

ICS 91.100.30
J 59
备案号: 50091-2015



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1448—2015

发电工程混凝土试验规程

Test code for power project concrete

2015-04-02 发布

2015-09-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 混凝土拌和物	2
4.1 混凝土拌和物取样及室内拌和方法	2
4.2 混凝土拌和物坍落度试验	3
4.3 混凝土拌和物扩展度试验	4
4.4 混凝土拌和物黏稠性和抗离析性试验 (V 形漏斗)	6
4.5 自密实混凝土拌和物填充性能试验 (U 形箱)	7
4.6 混凝土拌和物间隙通过性试验 (J 形环)	9
4.7 混凝土拌和物泌水率试验	11
4.8 混凝土拌和物表观密度试验	12
4.9 混凝土拌和物凝结时间试验 (贯入阻力法)	13
4.10 混凝土拌和物含气量试验	15
4.11 海砂、混凝土拌和物中氯离子含量的快速测定	16
5 混凝土	19
5.1 混凝土试件的成型与养护方法	19
5.2 混凝土立方体抗压强度试验	20
5.3 混凝土劈裂抗拉强度试验 (采用标准试件)	21
5.4 混凝土轴向抗拉强度与极限拉伸试验	22
5.5 混凝土弯曲试验	25
5.6 混凝土轴向抗压强度与静力抗压弹性模量试验	27
5.7 混凝土压缩徐变试验	29
5.8 混凝土干缩试验	32
5.9 混凝土自生体积变形试验	34
5.10 混凝土导温系数测定	36
5.11 混凝土导热系数测定	38
5.12 混凝土比热测定 (绝热法)	39
5.13 混凝土线膨胀系数测定	41
5.14 混凝土绝热温升试验	42
5.15 混凝土抗水渗透试验	43
5.16 混凝土抗冻性试验	46
5.17 混凝土动弹性模量试验	54
5.18 硬化混凝土气泡参数试验 (直线导线法)	55
5.19 混凝土碳化试验	57
5.20 混凝土电通量试验	58
5.21 混凝土快速氯离子迁移系数试验 (RCM 法)	61

5.22 混凝土中钢筋锈蚀试验 65

5.23 混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量测定 66

5.24 混凝土中砂浆的氯离子总含量测定 68

5.25 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验 69

5.26 混凝土抗压疲劳变形试验 71

5.27 混凝土碱-骨料反应试验 72

5.28 混凝土早期抗裂试验 77

前 言

本标准根据《国家能源局关于下达 2011 年第二批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2011〕252 号）的要求制定。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：中国电力建设股份有限公司、中国水利水电第三工程局有限公司。

本标准参编单位：河南省电力勘测设计院、山东电力建设第三工程公司、中国华电工程（集团）有限公司。

本标准主要起草人：陈文耀、郑平、郭晓安、谢凯军、李灼然、焦凯、罗斌、尹业先、胡泽清、杨富亮、李勤、王庆红、周刚、高玉生、路郑郑、岳鹏、韩萌。

本标准在执行过程中的意见和建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

发电工程混凝土试验规程

1 范围

本标准适用于发电工程混凝土试验。水工混凝土试验按 DL/T 5150《水工混凝土试验规程》的规定执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 750 水泥压蒸安定性试验方法

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法标准

GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

DL/T 5150 水工混凝土试验规程

DL/T 5151 水工混凝土砂石骨料试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

自密实混凝土 self-consolidating concrete; SCC

具有高流动性、均匀性和稳定性，浇筑时无需外力振捣，能够在自重作用下流动并充满模板空间的混凝土。

3.2

坍落扩展度 slump-flow

用坍落度筒测量混凝土坍落度后，随即测量混凝土拌和物坍落扩展终止后扩展面最大直径和最大直径呈垂直方向的直径，取其两直径的平均值。

3.3

扩展时间 slump-flow time

T_{500}

用坍落度筒测量混凝土坍落度时，自坍落度筒提起开始计时至坍落扩展度达到 500mm 的时间（s）。

3.4

V 形漏斗试验 V-funnel test

采用 V 形漏斗，检验自密实混凝土抗离析性能的一种试验方法。将混凝土拌和物装满 V 形漏斗，从开启出料口底盖开始计时，记录拌和物全部流出出料口所经历的时间（s）。

3.5

U 形箱试验 U-channel test

采用规定的 U 形箱，检测自密实混凝土拌和物通过钢筋间隙，并自行填充至箱内各个部位能力的一种试验方法。

3.6

胶凝材料用量 binder content

每立方米混凝土中水泥用量和活性矿物掺合料用量之和。

3.7

混凝土抗冻等级 **resistance class to freezing-thawing of concrete**

用快冻法测得的最大冻融循环次数来划分的混凝土的抗冻性能等级。

3.8

电通量法 **test method for coulomb electric flux**

用通过混凝土试件的电通量来反映混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法。

3.9

快速氯离子迁移系数法 **test method for rapid chloride ions migration coefficient; RCM**

通过测定混凝土中氯离子渗透深度，计算得到氯离子迁移系数来反映混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法，简称 RCM 法。

3.10

抗硫酸盐等级 **resistance class to sulphate attack of concrete**

用抗硫酸盐侵蚀试验方法测得的最大干湿循环次数来划分的混凝土抗硫酸盐侵蚀性能等级。

4 混凝土拌和物

4.1 混凝土拌和物取样及室内拌和方法

4.1.1 适用范围

4.1.1.1 用于混凝土现场取样。

4.1.1.2 为室内试验提供混凝土拌和物。

4.1.2 仪器设备

4.1.2.1 混凝土搅拌机：单卧轴式强制搅拌机，容量（60~100）L，转速（46~48）r/min。

4.1.2.2 拌和钢板：平面尺寸不小于 1.5m×2.0m，厚 5mm 左右。

4.1.2.3 磅秤：称量（50~100）kg、感量 50g。

4.1.2.4 台秤：称量 10kg、感量 5g。

4.1.2.5 天平：称量 1kg、感量 0.5g。

4.1.2.6 其他：铁铲、手推车或取样桶等。

4.1.3 取样方法

4.1.3.1 取样前应将拌和用钢板、铁铲、手推车或取样桶清洗干净并保持表面湿润无明水。

4.1.3.2 然后在同一盘或同一车混凝土中约 1/4 处、1/2 处和 3/4 处分别抽取大致相同的混凝土拌和物代表性样品，取样量应不少于试验用量的 1.2 倍，且最小取样量不应少于 20L，同一组混凝土拌和物应从同一盘或同一车混凝土中抽取，从开始取样至取样完毕时间应控制在 15min 以内。

4.1.3.3 将取好后的混凝土拌和物卸在钢板上，人工翻拌 3 次，使其混合均匀，再进行相关试验。

4.1.4 室内拌和方法

4.1.4.1 材料用量以质量计。称量精度：水泥、掺合料、水和外加剂为±0.5%，骨料为±1%。

4.1.4.2 用以拌制混凝土的各种材料，应提前放置在室内，其温度应与拌和间温度相同。

4.1.4.3 在拌和混凝土时，拌和间温度保持在（20±5）℃，对所拌制的混凝土拌和物应避免阳光照射及吹风。

4.1.4.4 砂、石料用量均以干燥状态下的质量为准。

4.1.4.5 一次拌和量不宜少于搅拌机容量的 20%，亦不宜大于搅拌机容量的 80%；拌和物总量应不少于试验用量的 1.2 倍。

4.1.4.6 拌和前应将搅拌机冲洗干净，并预拌少量同种混凝土拌和物或水胶比相同的砂浆，使搅拌机内壁挂浆后将剩余料卸出，倒在拌和钢板上，使砂浆均匀地涂覆在拌和钢板上。

4.1.4.7 将称好的石料、胶凝材料、砂料、水（外加剂一般先溶于水）依次加入搅拌机，加料时间不应超过 2min，开动搅拌机搅拌 2min。

4.1.4.8 将拌好的混凝土拌和物卸在钢板上，刮出黏结在搅拌机上的拌和物，人工翻拌 3 次，使之混合均匀，再进行相关试验。

4.2 混凝土拌和物坍落度试验

4.2.1 适用范围

4.2.1.1 本试验测定混凝土拌和物的坍落度来评定混凝土拌和物的和易性。必要时，也可用于评定混凝土拌和物和易性随拌和物停置时间的变化。

4.2.1.2 适用于骨料最大粒径不超过 37.5mm，坍落度不小于 10mm 的混凝土拌和物。

4.2.2 仪器设备

4.2.2.1 坍落度筒：用厚度大于 1.5mm 的钢板制成的截头圆锥筒，筒内壁必须光滑，其上下端面应与轴线垂直。在距筒的上口约 100mm 处的两侧装有两个把手，并在靠近其下口的两侧装有两个踏板，以便于试验过程中坍落度筒的固定，坍落度筒的具体形状尺寸见图 1。

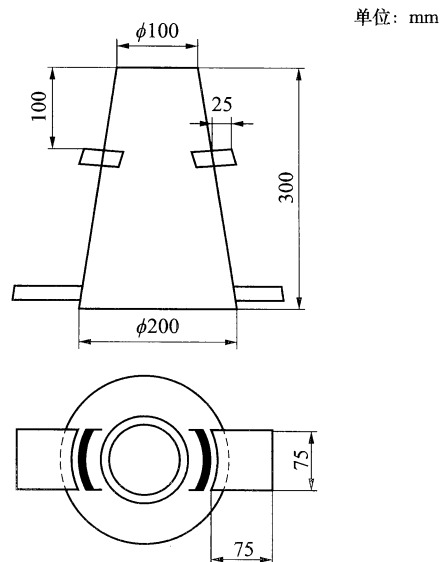


图 1 坍落度筒的具体形状尺寸

4.2.2.2 试验用钢板：平面尺寸不小于 800mm×800mm，厚度不宜小于 6mm 的刚性平板或能保证足够刚度。

4.2.2.3 捣棒：直径 16mm、长 600mm，一端为弹头形的金属棒。

4.2.2.4 钢直尺：500、300mm 各一把，最小刻度 1mm。

4.2.2.5 其他：37.5mm 孔径筛、装料漏斗、钹刀、小铁铲、温度计等。

4.2.3 试验方法

4.2.3.1 新拌混凝土的试样，按 4.1 给出的要求制备。若骨料粒径超过 37.5mm，应采用湿筛法剔除。

4.2.3.2 将坍落度筒、捣棒及试验用钢板冲洗干净并保持湿润，然后将坍落度筒放在试验用钢板上，双脚踏紧踏板，坍落度筒在装料时保持位置固定。

4.2.3.3 将混凝土拌和物用小铁铲通过装料漏斗分三层装入筒内，每层高度大致相等。每装一层，用捣棒在筒内从边缘到中心按螺旋形均匀插捣 25 次，在筒边插捣时，捣棒应稍有倾斜。顶层装料时，应使拌和物高出筒口，插捣过程中，如试样沉落到低于筒口，则应随时添加，使混凝土始终高于筒口。插捣深度：底层应穿透该层，中、上层应分别插进其下层约（10~20）mm。

4.2.3.4 上层插捣完毕，取下装料漏斗，用镩刀将混凝土拌和物沿筒口抹平，并清除筒外周围的混凝土。

4.2.3.5 将坍落度筒徐徐竖直提起，轻放于试样旁边，整个提高过程应在（5~10）s 内完成。当试样不再继续坍落时，用钢尺量出试样顶部最高点与坍落度筒高度之差，即为坍落度值，精确至 1mm。

4.2.3.6 整个坍落度试验宜在（2~3）min 内完成。

4.2.3.7 本试验用于评定混凝土拌和物和易性经（历）时变化时，如坍落度损失，可将拌和物保湿停置规定时间（如 30、60、90、120min 等）再进行上述试验（试验前将拌和物重新人工翻拌 3 次），将试验结果与原试验结果进行比较，从而评定拌和物和易性经（历）时变化。

4.2.3.8 若混凝土试样发生一边坍陷或剪坏，则该次试验作废，应取另一部分试样重做试验；如第二次试验仍出现上述现象则表示该混凝土和易性不好，应予记录备查。

4.2.3.9 测量并记录试验时混凝土拌和物的温度。

4.2.4 试验结果处理

4.2.4.1 混凝土拌和物的坍落度以 mm 计，精确至 1mm，修约至 5mm。

4.2.4.2 在测定坍落度的同时，可目测评定混凝土拌和物的下列性质：

- a) 稠度：根据做坍落度时插捣混凝土的难易程度分为上、中、下三级。上，表示容易插捣；中，表示插捣时稍有阻滞感觉；下，表示很难插捣。
- b) 黏聚性：用捣棒在做完坍落度的试样一侧轻打，如试样保持原状而渐渐下沉，表示黏聚性较好；若试样突然坍倒、部分崩裂或发生石子离析现象，表示黏聚性不好。
- c) 含砂情况：根据镩刀抹平程度分多、中、少三级。多，即用镩刀抹混凝土拌和物表面时，抹 1 次~2 次就可使混凝土表面平整无蜂窝；中，抹 4 次~5 次就可使混凝土表面平整无蜂窝；少，抹面困难，抹 8 次~9 次后混凝土表面仍不能消除蜂窝。
- d) 析水情况：根据水分从混凝土拌和物中析出的情况分多量、少量、无三级。多量，表示在插捣时及提起坍落度筒后就有很多水分从底部析出；少量，表示有少量水分析出；无，表示没有明显的析水现象。

4.3 混凝土拌和物扩展度试验

4.3.1 适用范围

本试验用于测定混凝土拌和物的扩展度。

4.3.2 仪器设备

4.3.2.1 坍落度筒：与 4.2.2.1 的规定相同。

4.3.2.2 刚性平板：平面尺寸不小于 800mm×800mm，厚度不宜小于 6mm 的刚性平板或能保证足够刚度，在平板表面中心位置标出直径为 500mm 圆圈。

4.3.2.3 钢尺：长度不小于 800mm，最小刻度 1mm。

4.3.2.4 秒表：最小读数 0.1s。

4.3.2.5 扩展度测量辅助工具：见图 2 所示，由 L 形角钢加工制成，当使用卷尺能够正确测量扩展度时，

可不使用辅助工具。

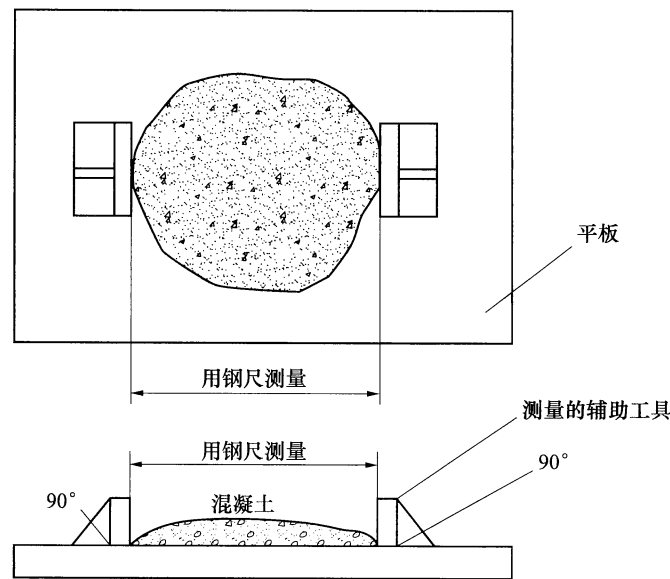


图 2 混凝土扩展度测量工具使用示意图

4.3.2.6 其他：铲子、镩刀、盛料容器等。

4.3.3 试验方法

4.3.3.1 新拌混凝土的试样，按 4.1 给出的要求制备。

4.3.3.2 润湿坍落度筒内表面及刚性平板，在坍落度筒内壁和刚性平板上应无明水，使刚性平板保持水平，然后将坍落度筒置于水平放置的刚性平板中心位置上，用脚踩住坍落度筒两边的脚踏板，使其在装料时保持固定位置。

4.3.3.3 装料

- a) 普通混凝土：将混凝土拌和物用小铁铲通过装料漏斗分三层装入筒内，每层高度大致相等。每装一层，用捣棒在筒内从边缘到中心按螺旋形均匀插捣 25 次，在筒边插捣时，捣棒应稍有倾斜。顶层装料时，应使拌和物高出筒口，插捣过程中，如试样沉落到低于筒口，则应随时添加，使混凝土始终高于筒口。插捣深度：底层应穿透该层，中、上层应分别插进其下层约（10～20）mm。
- b) 自密实混凝土：用盛料容器将自密实混凝土均匀地一次性填入坍落度筒内，自开始入料至填充结束应在 1.5min 内完成，整个过程应严格控制不得施以任何捣实或振动。

4.3.3.4 用镩刀刮除坍落度筒顶部余料，使其与坍落度筒上缘齐平，然后将坍落度筒沿垂直方向连续地向上提起，提起时间应控制在 3s～5s，从开始装料至坍落度筒提起应在 150s 内完成。待混凝土不再扩散后，测量扩散后的最大直径，以及与最大直径呈垂直方向的直径，精确至 1mm。

4.3.3.5 T_{500} 测定：测定扩展度达 500mm 时间，自坍落度筒提起时至扩展后的混凝土外缘接触平板上所绘直径 500mm 的圆圈为止，以秒表计时，精确至 0.1s。

4.3.3.6 观察最终扩展后混凝土的状态，如骨料在中央堆积或最终扩展后的混凝土边缘有较多的水泥浆析出，表示此混凝土拌和物抗离析性不好，应予记录。

4.3.4 试验结果处理

混凝土拌和物的扩展度取拌和物扩散后的最大直径，以及与最大直径呈垂直方向直径的平均值，精确至 1mm，修约至 5mm。当测得两直径之差大于 50mm 时，需从同一盘混凝土中另取试样重新试验。

4.4 混凝土拌合物黏稠性和抗离析性试验（V形漏斗）

4.4.1 适用范围

本试验用于测量自密实混凝土黏稠性和抗离析性。

4.4.2 仪器设备

4.4.2.1 V形漏斗（见图3）：由金属或塑料制成，容积约为10L，其内表面应光滑、平整。漏斗出料口部位，应附设快速开启且具有水密性的底盖。漏斗上边缘的部位应加工平整，构造平滑。

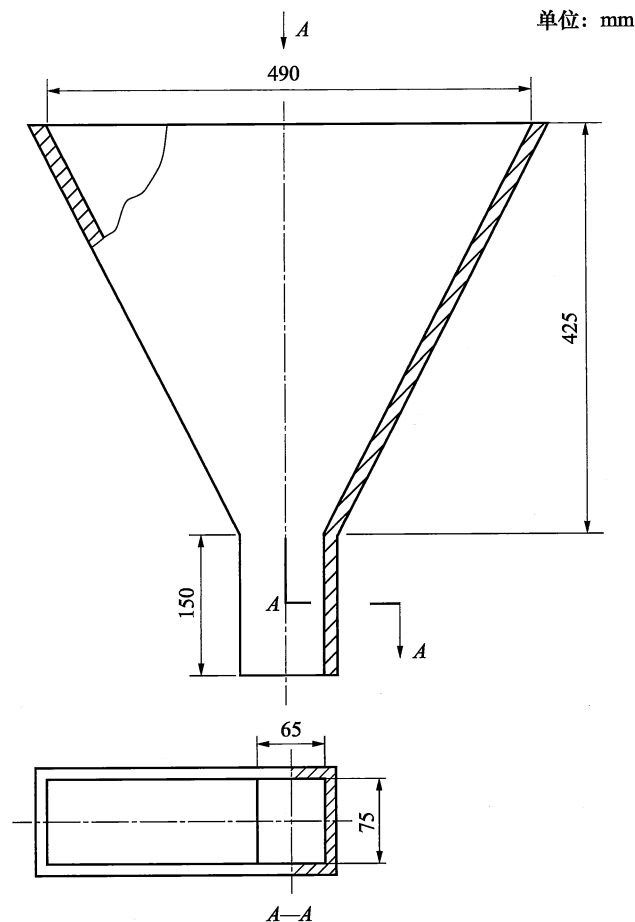


图3 V形漏斗形状及内部尺寸

4.4.2.2 支撑漏斗的台架：台架应有调整装置确保其能够水平放置，便于搬运。

4.4.2.3 秒表：最小读数 0.1s。

4.4.2.4 工具：铲子、钹刀、盛料容器（容积约 5L 附有把手的塑料桶、容积约 12L 的水桶）等。

4.4.3 试验方法

4.4.3.1 新拌混凝土的试样，按 4.1 给出的要求制备。

4.4.3.2 用清水将 V 形漏斗冲洗干净，并用湿布擦拭使其保持润湿，然后将其置于台架上确保漏斗稳固，使其顶面水平，漏斗整体为垂直状态。

4.4.3.3 将 12L 的水桶放置在漏斗下方，并确认漏斗流出口的底盖是否关闭。

4.4.3.4 用 5L 的塑料桶盛装混凝土试样，由漏斗的上方匀速的填入漏斗内至满。

4.4.3.5 用鐮刀沿漏斗上端將混凝土的頂面刮平。

4.4.3.6 将混凝土顶面刮平后静置 1min, 然后将漏斗出料口的底盖打开, 用秒表测量自开盖至漏斗内混凝土全部流出的时间 (t_0), 精确至 0.1s, 同时观察并记录混凝土是否有堵塞等状况。

4.4.3.7 若新拌混凝土的黏滯性较高, t_0 时间判定困难时, 可由漏斗上方向下观察, 透光的瞬间即为混凝土由卸料口流完的时间。

4.4.3.8 t_0 时间的测定, 宜在 5min 内对试样进行 2 次试验。

4.4.4 试验结果处理

t_0 时间取 2 次试验结果的平均值, 精确至 0.1s。

4.5 自密实混凝土拌和物填充性能试验 (U 形箱)

4.5.1 适用范围

本试验用于测量自密实混凝土拌和物通过钢筋间隙与自行填充至模板角落的能力。

4.5.2 仪器设备

4.5.2.1 U形箱：分A型和B型两种，由钢质或有机玻璃等硬质不吸水材料制成，内表面应光滑、平整，能尽量减少混凝土与容器之间的摩擦阻力，U形箱主要结构、尺寸如下。

a) U 形箱整体形状与尺寸: 组装后的 U 形箱应坚固, 且能观察混凝土的流动状态, 其整体形状及尺寸见图 4。

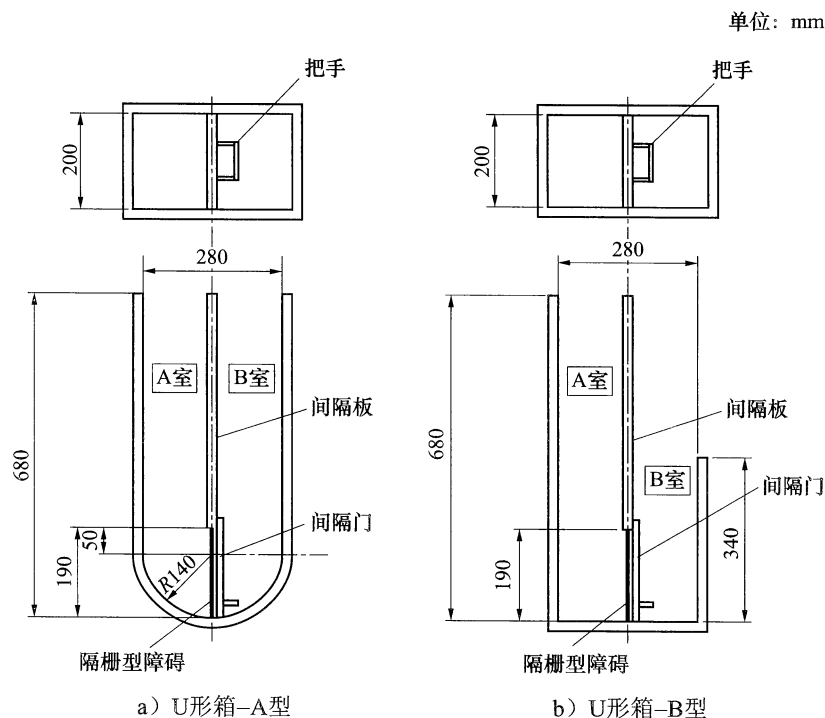


图 4 U 形箱整体形状与尺寸

b) U形箱内的隔栅型障碍: 在U形箱的内部中央部位放置有隔栅型障碍, 其形状与尺寸见图5。I型隔栅由5根直径10mm的光圆钢筋制成, II型隔栅由3根直径13mm的光圆钢筋制

成，可根据结构物的形状、尺寸及配筋状况等，结合自密实混凝土等级选择相应的障碍和检测标准。

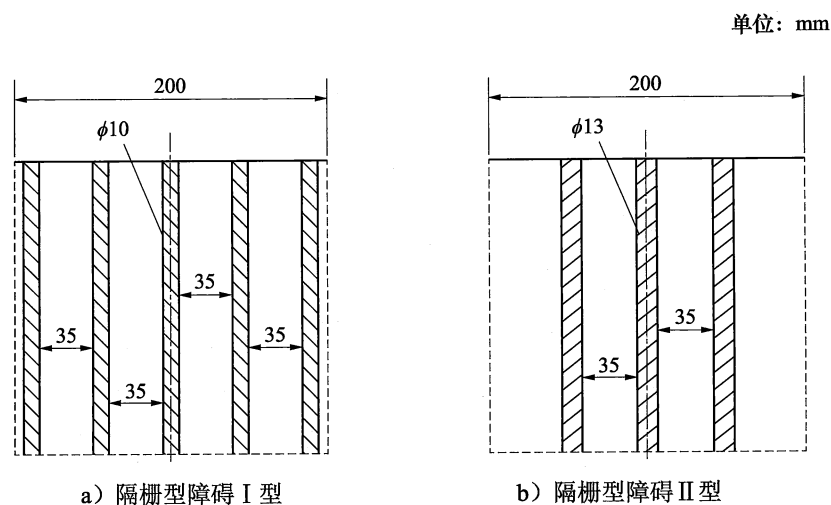


图 5 U 形箱隔栅型障碍形状与尺寸

- c) U 形箱内部沟槽：在 U 形箱的中央部位设有沟槽，间隔板和可开启的间隔门能插入其中，凭借插入装置，使 A 室与 B 室成为能被隔开的两个空间。

4.5.2.2 秒表：最小读数 0.1s。

4.5.2.3 工具：刮刀、钢尺（精确至 1mm）、盛料容器（容积约 5L 附有把手的塑料桶）等。

4.5.3 试验方法

4.5.3.1 将 U 形箱水平放置，并保持顶面的水平状态。在 U 形箱中，插入间隔门并装好隔栅型障碍的间隔板。

4.5.3.2 将 U 形箱内表面、间隔门、间隔板和隔栅型障碍等，用湿布擦拭润湿。关闭间隔门，用盛料容器，将新拌混凝土试样均匀地注入 A 室至满，整个过程不得施以任何捣实或振动。

4.5.3.3 用刮刀沿 U 形箱的上缘刮平混凝土顶面后，静置 1min。

4.5.3.4 连续、迅速地将隔门向上拉起（见图 6），混凝土边通过隔栅型障碍边向 B 室流动，直至流动停止为止，在此期间 U 形箱应保持静止、不得移动。

4.5.3.5 以钢尺量测 B 室顶面至混凝土表面的高度 H_0 ，测量时应沿容器宽的方向量取两端及中央等 3 个位置的填充高度，精确至 1mm，整个试验应在 5min 内完成。

4.5.4 试验结果处理

填充高度按公式（1）计算

$$BH = H - H_0 \quad (1)$$

式中：

BH ——填充高度（精确至 1mm），mm；

H ——U 形箱 B 室高度，mm；

H_0 ——B 室顶面至混凝土表面的高度平均值，mm。

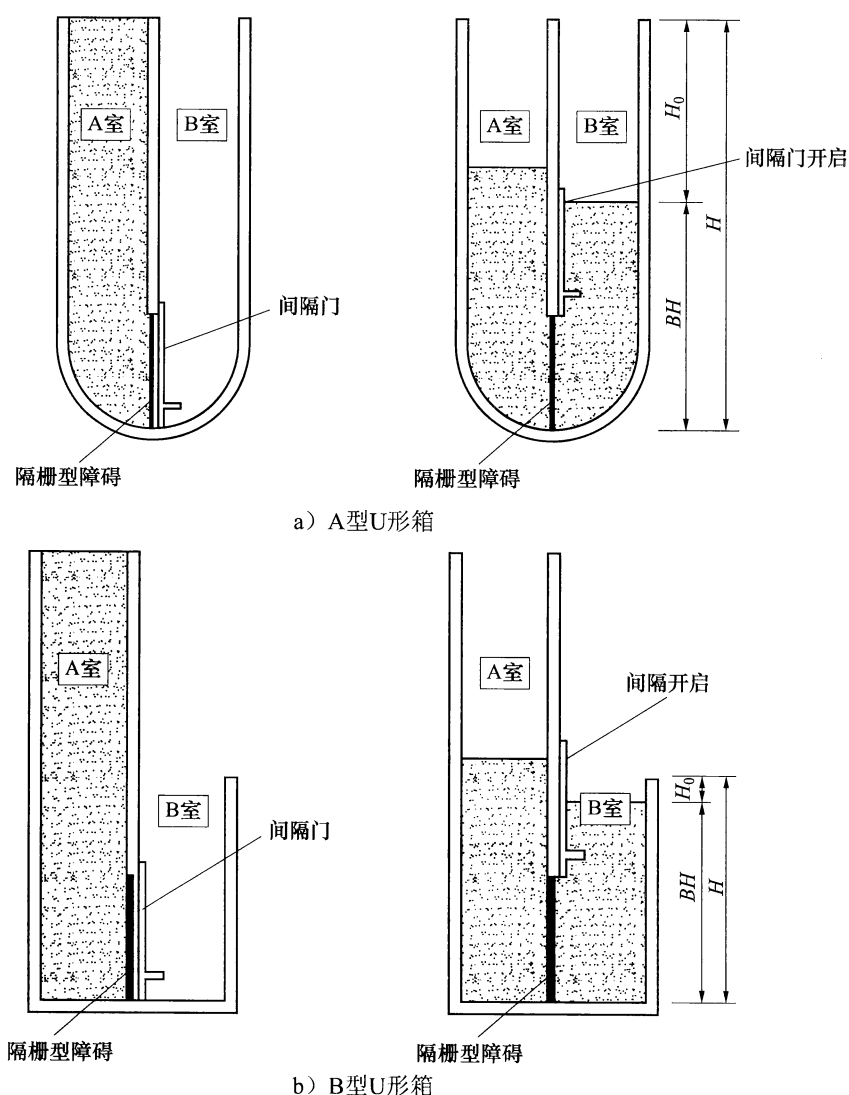


图6 U形箱试验过程和测量方法

4.6 混凝土拌和物间隙通过性试验 (J形环)

4.6.1 适用范围

本试验用于测定自密实混凝土的间隙通过性。

4.6.2 仪器设备

4.6.2.1 J形环：由钢制或硬质不吸水材料制成，表面应光滑、平整，环直径为300mm，环本身厚度为25mm，宽度为38mm，在环上中心位置等间距垂直于圆环排列16根直径为16mm、长100mm的圆柱体，形状尺寸见图7。

4.6.2.2 刚性平板：平面尺寸不小于800mm×800mm，厚度不宜小于6mm的刚性平板或能保证足够刚度。

4.6.2.3 坍落度筒：与4.2.2.1的规定相同。

4.6.2.4 500mm钢直尺及钢卷尺各一把，最小刻度1mm。

4.6.2.5 盛料容器：容积约为12L的水桶等容器。

4.6.2.6 其他：钹刀、铁铲等。

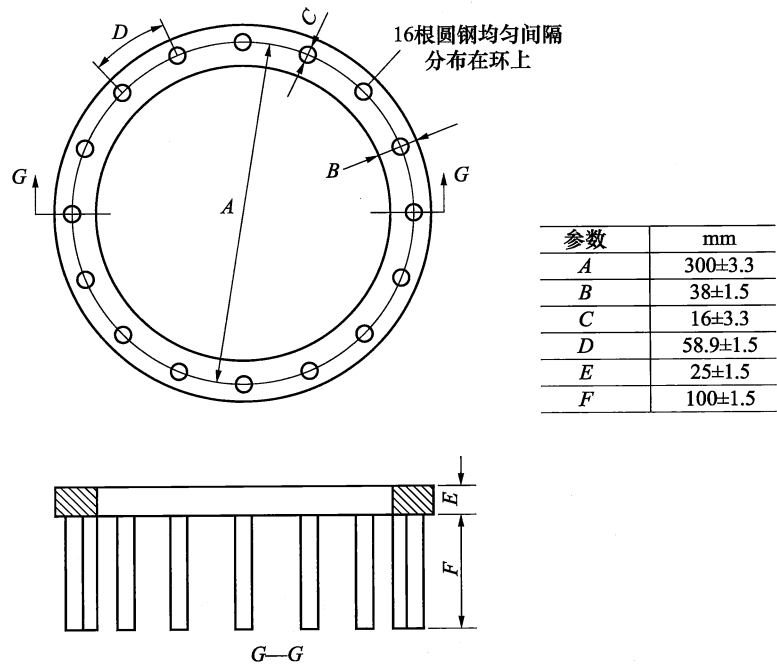


图 7 J 形环形状尺寸示意图

4.6.3 试验方法

4.6.3.1 新拌混凝土的试样，按 4.1 给出的要求制备。

4.6.3.2 将坍落度筒、J 形环及刚性平板用水润湿，把 J 形环平稳的放在刚性平板上使其保持水平，将坍落度筒倒置在 J 形环内的中心位置，并与 J 形环同心。

4.6.3.3 使坍落度筒及 J 形环保持固定，然后用盛料容器将自密实混凝土均匀一次性填入坍落度筒内，整个过程应严加控制不得施以任何捣实或振动。

4.6.3.4 用刮刀刮除筒口余料，使其与筒口齐平，将坍落度筒周围的混凝土清理干净，然后将坍落度筒沿垂直方向连续地向上提起，坍落度筒提起时间应控制在 2s 内，从开始装料至坍落度筒提起应在 90s 内完成。

4.6.3.5 待混凝土不再扩散后，测量扩散后混凝土的最大直径 d_1 及与其垂直方向的直径 d_2 ，并精确至 1mm。

4.6.4 试验结果处理

4.6.4.1 自密实混凝土通过 J 形环扩展度 d 按公式 (2) 计算（精确至 1mm，结果修约至 5mm）

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad (2)$$

式中：

d ——自密实混凝土 J 形环扩展度，mm；

d_1 ——自密实混凝土通过 J 形环扩散的最大直径，mm；

d_2 ——与 d_1 呈垂直方向的直径，mm。

4.6.4.2 自密实混凝土通过性能指标 PA 按公式 (3) 计算（精确至 1mm，结果修约至 5mm）

$$PA = \text{混凝土扩展度} - d \quad (3)$$

式中：

PA ——自密实混凝土间隙通过性性能指标；

d ——自密实混凝土 J 形环扩展度, mm。

4.7 混凝土拌和物泌水率试验

4.7.1 适用范围

本试验适用于骨料最大粒径不大于 37.5mm 的混凝土拌和物泌水率测定。

4.7.2 试验设备

4.7.2.1 容量筒: 内径及内高均为 (186 ± 2) mm, 筒壁厚为 3mm, 容积为 5L 的金属圆筒, 带盖 (如无盖可用玻璃板代替)。

4.7.2.2 振动台: 振动频率 (50 ± 2) Hz, 在空载条件下, 振动台面中心点的垂直振幅应为 (0.5 ± 0.02) mm。空载条件下, 启动时间不应大于 2s。

4.7.2.3 磅秤: 称量 50kg、感量 50g。

4.7.2.4 量筒: 容量为 10、50、100mL 的量筒。

4.7.2.5 捣棒: 直径 16mm、长 600mm, 一端为弹头形的金属棒。

4.7.2.6 工具: 吸液管、钟表、铁铲、镩刀等。

4.7.3 试验方法

4.7.3.1 按 4.1 的方法制备混凝土拌和物。

4.7.3.2 应用湿布湿润试样筒内壁后立即称量, 记录试样筒的质量。再将混凝土试样装入试样筒, 混凝土的装料及捣实方法有两种:

- a) 方法 A: 用振动台振实。将试样一次装入试样筒内, 开启振动台, 振动应持续到表面出浆为止, 且应避免过振; 并使混凝土拌和物表面低于试样筒筒口 (30 ± 3) mm, 用镩刀抹平。抹平后立即计时并称量, 记录试样筒与试样的总质量。
- b) 方法 B: 用捣棒捣实。采用捣棒捣实时, 混凝土拌和物应分两层装入, 每层的插捣次数应为 25 次; 捣棒由边缘向中心均匀地插捣, 插捣底层时捣棒应贯穿整个深度, 插捣第二层时, 捣棒应插透本层至下一层的表面; 每一层捣完后用橡皮锤轻轻沿容量外壁敲打 5 次~10 次, 进行振实, 直至拌和物表面插捣孔消失并不见大气泡为止; 并使混凝土拌和物表面低于试样筒筒口 (30 ± 3) mm, 用镩刀抹平。抹平后立即计时并称量, 记录试样筒与试样的总质量。

4.7.3.3 在以下吸取混凝土拌和物表面泌水的整个过程中, 应使试样筒保持水平、不受振动; 除了吸水操作外, 应始终盖好盖子; 室温应保持在 (20 ± 2) °C。

4.7.3.4 从计时开始后 60min 内, 每隔 10min 吸取 1 次试样表面渗出的水。60min 后, 每隔 30min 吸 1 次水, 直至认为不再泌水为止。为了便于吸水, 每次吸水前 2min, 将一片 35mm 厚的垫块垫入筒底一侧使其倾斜, 吸水后平稳地复原。吸出的水放入量筒中, 记录每次吸水的水量并计算累计水量, 精确至 1mL。

4.7.4 试验结果处理

泌水率按公式 (4) 计算

$$B = \frac{W_b}{(W + G)G_w} \times 100 \quad (4)$$

其中,

$$G_w = G_1 - G_0 \quad (5)$$

式中:

- B ——泌水率, %;
 W_b ——泌水总量, g;
 W ——混凝土拌和物总用水量, g;
 G ——混凝土拌和物总质量, g;
 G_w ——试样质量, g;
 G_1 ——试样筒及试样总质量, g;
 G_0 ——试样筒质量, g。

计算应精确至 1%。泌水率取三个试样测值的平均值。三个测值中的最大值或最小值, 如果有一个与中间值之差超过中间值的 15%, 则以中间值为试验结果; 如果最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时, 则此次试验无效。

4.8 混凝土拌和物表观密度试验

4.8.1 适用范围

本试验适用于测定混凝土拌和物捣实后的单位体积质量 (即表观密度)。

4.8.2 仪器设备

4.8.2.1 容量筒: 金属制成的圆筒, 两旁装有提手。对骨料最大粒径不大于 37.5mm 的拌和物采用容积为 5L 的容量筒, 其内径与内高均为 (186 ± 2) mm, 筒壁厚为 3mm; 骨料粒径大于 37.5mm 时, 容量筒的内径和内高均应大于骨料最大粒径的 4 倍。容量筒上缘及内壁应光滑平整, 顶面与底面应平行并与圆柱体的轴垂直。

容量筒容积应予以标定, 标定方法可采用一块能覆盖住容量筒顶面的玻璃板, 先称出玻璃板和空桶的质量, 然后向容量筒中灌入清水, 当水接近入口时, 一边加水, 一边把玻璃板沿筒口徐徐推入盖严, 应注意使玻璃板下不带入任何气泡; 然后擦净玻璃板面及筒壁外的水分, 将容量筒连同玻璃板放在台秤上称其质量; 两次质量之差 (kg) 即为容量筒的容积 L 。

4.8.2.2 磅秤: 称量 50kg、感量 50g。

4.8.2.3 振动台: 振动频率 (50 ± 2) Hz, 在空载条件下, 振动台面中心点的垂直振幅应为 (0.5 ± 0.02) mm。空载条件下, 启动时间不应大于 2s。

4.8.2.4 捣棒: 直径 16mm、长 600mm, 一端为弹头形的金属棒。

4.8.2.5 工具: 玻璃板 (尺寸稍大于容量筒口)、橡皮锤、刮刀等。

4.8.3 试验方法

4.8.3.1 按 4.1 的方法拌制混凝土。

4.8.3.2 用湿布把容量筒内外擦干净, 称出容量筒质量, 精确至 50g。

4.8.3.3 混凝土的装料及捣实方法应根据拌和物的稠度而定。坍落度不大于 70mm 的混凝土, 宜用振动台振实; 大于 70mm 的宜用捣棒人工捣实。采用捣棒捣实时, 应根据容量筒的大小决定分层与插捣次数: 用 5L 容量筒时, 混凝土拌和物应分两层装入, 每层的插捣次数应为 25 次; 用大于 5L 的容量筒时, 每层混凝土的高度不应大于 100mm, 每层插捣次数应按每 $10\,000\text{mm}^2$ 截面不小于 12 次计算。各次插捣应由边缘向中心均匀地插捣, 插捣底层时捣棒应贯穿整个深度, 插捣第二层时, 捣棒应插透本层至下一层的表面; 每一层捣完后用橡皮锤轻轻沿容器外壁敲打 5 次~10 次, 进行振实, 直至拌和物表面插捣孔消失并不见大气泡为止。

采用振动台振实时, 应一次将混凝土拌和物灌到高出容量筒口。装料时可用捣棒稍加插捣, 振动过程中如混凝土低于筒口, 应随时添加混凝土, 振动直至表面出浆为止。

4.8.3.4 用刮尺将筒口多余的混凝土拌和物刮去，表面如有凹陷应填平；将容量筒外壁擦净，称出混凝土试样与容量筒总质量，精确至 50g。

4.8.4 试验结果处理

表观密度按公式（6）计算

$$\gamma_h = \frac{W_2 - W_1}{V} \times 1000 \quad (6)$$

式中：

γ_h ——表观密度，kg/m³；

W_1 ——容量筒质量，kg；

W_2 ——容量筒和试样总质量，kg；

V ——容量筒的容积，L。

计算结果精确至 10kg/m³。

4.9 混凝土拌和物凝结时间试验（贯入阻力法）

4.9.1 适用范围

本试验适用于从混凝土拌和物中筛出的砂浆用贯入阻力法来确定坍落度值不为零的混凝土拌和物凝结时间的测定。

4.9.2 仪器设备

4.9.2.1 加荷装置：最大测量值应不小于 1000N，精度为±10N。

4.9.2.2 测针：长为 100mm，承压面积为 100mm²、50mm²和 20mm²三种测针，在距贯入端 25mm 处刻有一圈标记。

4.9.2.3 砂浆试样筒：上口径为 160mm，下口径为 150mm，净高为 150mm 刚性不透水的金属圆筒，并配有盖子。

4.9.2.4 标准筛：筛孔为 4.75mm 的金属方孔筛。

4.9.2.5 捣棒：直径 16mm、长 600mm，一端为弹头形的金属棒。

4.9.2.6 工具：吸液管、温度计、钟表等。

4.9.3 试验方法

4.9.3.1 按 4.1 的方法拌制混凝土拌和物，用 4.75mm 标准筛筛出砂浆，每次应筛净，然后将其拌和均匀。将砂浆一次分别装入三个试样筒中，做三次试验。取样混凝土坍落度不大于 70mm 的混凝土宜用振动台振实砂浆；取样混凝土坍落度大于 70mm 的宜用捣棒人工捣实。用振动台振实砂浆时，振动应持续到表面出浆为止，不得过振；用捣棒人工捣实时，应沿螺旋方向由外向中心均匀插捣 25 次，然后用橡皮锤轻轻敲打筒壁，直至插捣孔消失为止。振实或插捣后，砂浆表面应低于砂浆试样筒口约 10mm，砂浆试样筒应立即加盖。

4.9.3.2 砂浆试样制备完毕，编号后应置于温度为（20±2）℃的环境中或现场同条件下待试，并在以后的整个测试过程中，环境温度应始终保持（20±2）℃。现场同条件测试时，应与现场条件保持一致。在整个测试过程中，除在吸取泌水或进行贯入试验外，试样筒应始终加盖。

4.9.3.3 凝结时间测定从水泥与水接触瞬间开始计时。根据混凝土拌和物的性能，确定测针试验时间，以后每隔 0.5h 测试一次，在临近初、终凝时可增加测定次数。

4.9.3.4 在每次测试前 2min，将一片 20mm 厚的垫块垫入筒底一侧使其倾斜，用吸管吸去表面的泌水，

吸水后平稳地复原。

4.9.3.5 测试时将砂浆试样筒置于贯入阻力仪上，测针端部与砂浆表面接触，然后在 (10 ± 2) s 内均匀地使测针贯入砂浆 (25 ± 2) mm 深度，记录贯入压力，精确至 10N；记录测试时间，精确至 1min；记录环境温度，精确至 0.5°C 。

4.9.3.6 各测点的间距应大于测针直径的两倍且不小于 15mm，测点与试样筒壁的距离应不小于 25mm。

4.9.3.7 贯入阻力测试在 $(0.2 \sim 28)$ MPa 时应至少进行 6 次，直至贯入阻力大于 28MPa 为止。

4.9.3.8 在测试过程中应根据砂浆凝结状况，适时更换测针，更换测针宜按表 1 选用。

表 1 测针选用规定表

贯入阻力 MPa	0.2~3.5	3.5~20	20~28
测针面积 mm^2	100	50	20

4.9.4 试验结果处理

4.9.4.1 贯入阻力按公式 (7) 计算

$$f_{\text{pr}} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

式中：

f_{pr} ——贯入阻力，MPa；

P ——贯入压力，N；

A ——测针面积， mm^2 。

计算应精确至 0.1MPa。

4.9.4.2 凝结时间宜通过线性回归方法确定。将贯入阻力 f_{pr} 和时间 t 分别取自然对数 $\ln(f_{\text{pr}})$ 和 $\ln(t)$ ，然后把 $\ln(f_{\text{pr}})$ 当作自变量， $\ln(t)$ 当作因变量进行线性回归，得到回归方程式 (8)

$$\ln(t) = A + B \ln(f_{\text{pr}}) \quad (8)$$

式中：

t ——时间，min；

f_{pr} ——贯入阻力，MPa；

A 、 B ——线性回归系数。

根据公式 (8) 求得当贯入阻力为 3.5MPa 时初凝时间为 t_s ，贯入阻力为 28MPa 时终凝时间为 t_e 。

$$t_s = e^{[A+B \ln(3.5)]} \quad (9)$$

$$t_e = e^{[A+B \ln(28)]} \quad (10)$$

式中：

t_s ——初凝时间，min；

t_e ——终凝时间，min；

A 、 B ——线性回归系数。

凝结时间也可用绘图拟合方法确定。以贯入阻力为纵坐标，经过的时间为横坐标（精确至 1min），绘制出贯入阻力与时间之间的关系曲线，以 3.5MPa 和 28MPa 划两条平行于横坐标的直线，分别与曲线相交的两个交点的横坐标即为混凝土拌和物的初凝时间和终凝时间。

4.9.4.3 用三个试验结果的初凝时间和终凝时间的算术平均值作为此次试验的初凝时间和终凝时间。如果三个测值的最大值或最小值中有一个与中间值之差超过中间值的 10%，则以中间值为试验结果；如果

最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 10% 时, 则此次试验无效。

凝结时间用 (h:min) 表示, 精确至 1min, 并修约至 5min。

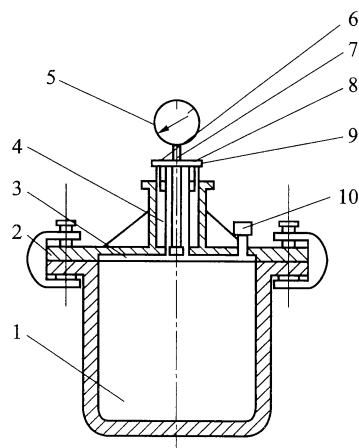
4.10 混凝土拌和物含气量试验

4.10.1 适用范围

本试验适用于骨料最大粒径不大于 37.5mm 的混凝土拌和物含气量测定。

4.10.2 仪器设备

4.10.2.1 含气量测定仪: 由容器及盖体两部分组成。容器应由硬质、不易被水泥浆腐蚀的金属制成, 其内表面粗糙度不应大于 $3.2\mu\text{m}$, 容积为 7L。盖体应用与容器相同的材料制成。容器及盖体之间应设置密封垫圈, 并保证封闭, 见图 8。



1—容器; 2—盖体; 3—水找平室; 4—气室; 5—压力表; 6—排气阀;
7—操作阀; 8—排水阀; 9—进气阀; 10—加水阀

图 8 含气量测定仪

4.10.2.2 捣棒: 直径 16mm、长 600mm, 一端为弹头形的金属棒。

4.10.2.3 振动台: 振动频率 (50 ± 2) Hz, 在空载条件下, 振动台面中心点的垂直振幅应为 (0.5 ± 0.02) mm。空载条件下, 启动时间不应大于 2s。

4.10.2.4 台秤: 称量 50kg、感量 50g。

4.10.2.5 橡皮锤: 应带有质量约 250g 的橡皮锤头。

4.10.3 试验方法

4.10.3.1 按 4.1 的方法拌制混凝土拌和物。

4.10.3.2 用湿布擦净容器和盖的内表面, 装入混凝土拌和物试样。

4.10.3.3 捣实可采用人工或机械方法。当拌和物坍落度大于 70mm 时, 宜采用捣棒人工插捣; 当拌和物坍落度不大于 70mm 时, 宜采用机械振捣, 如振动台或插入式振捣器等。

- a) 用捣棒捣实时, 应将混凝土拌和物分 3 层装入, 每层捣实后高度约为 1/3 容器高度; 每层装料后由边缘向中心均匀地插捣 25 次, 捣棒应插透本层高度, 再用橡皮锤沿容器外壁重击 10 次~15 次, 使插捣留下的插孔填满。最后一层装料应避免过满。
- b) 采用机械捣实时, 一次装入捣实后体积为容器容量的混凝土拌和物, 装料时可用捣棒稍加插捣, 振实过程中如拌和物低于容器口, 应随时添加; 振动至混凝土表面平整、表面出浆即止, 不得

过度振捣；若使用插入式振动器捣实，应避免振动器触及容器内壁和底面；在施工现场测定混凝土拌和物含气量时，应采用与施工振动频率相同的机械方法捣实。

4.10.3.4 捣实完毕后立即用刮尺刮平，表面如有凹陷应予填平抹光；如需同时测定拌和物表观密度时，可在此时称量和计算；擦净容器上口边缘，装好密封垫圈，加盖并拧紧螺栓。

4.10.3.5 关闭操作阀和排气阀，打开排水阀和加水阀，通过加水阀，向容器内注入水；当排水阀流出的水流不含气泡时，在注水的状态下，同时关闭加水阀和排水阀。

4.10.3.6 然后开启进气阀，用气泵注入空气至气室内压力略大于 0.1MPa，待压力示值仪表示值稳定后，微微开启排气阀，调整压力至 0.1MPa，关闭排气阀。

4.10.3.7 开启操作阀，待压力示值仪稳定后，测得压力值 P_{01} (MPa)。

4.10.3.8 开启排气阀，压力仪示值回零；重复 4.10.3.6 和 4.10.3.7 的步骤，对容器内试样再测一次压力值 P_{02} (MPa)。

4.10.3.9 若 P_{01} 和 P_{02} 的相对误差小于 0.5% 时，则取 P_{01} 和 P_{02} 的算术平均值，按压力和含气量关系曲线查得含气量 A_0 (精确至 0.1%)；若不满足，则应进行第三次试验，测得的压力值为 P_{03} (MPa)。当 P_{03} 与 P_{01} 、 P_{02} 中较接近一个值的相对误差不大于 0.5% 时，则取此二值的算术平均值查得的 A_0 ；当仍大于 0.5%，此次试验无效。

4.10.3.10 测定骨料校正因素：骨料校正因素随骨料种类而变化。

a) 按公式 (11) 和公式 (12) 计算出装入量钵中的砂、石质量

$$m_g = \frac{V}{1000} \times m'_g \quad (11)$$

$$m_s = \frac{V}{1000} \times m'_s \quad (12)$$

式中：

m_g 、 m_s ——每个试样中的粗骨料、细骨料质量，kg；

m'_g 、 m'_s ——每立方米混凝土中用粗骨料、细骨料质量，kg；

V ——含气量测定仪容积，L。

b) 量钵中先盛 1/3 高度的水，将称取的砂石料混合并逐渐加入量钵中，边加料边搅拌以排气，每当水面升高 25mm 时，用捣棒轻捣 10 次，骨料全部加入后，再加水至满，然后除去水面泡沫，擦净量钵边缘，加橡皮圈，盖紧钵盖。按测定混凝土拌和物含气量的步骤测定此时的含气量，即骨料校正因素 A_g 。

4.10.4 试验结果处理

含气量按公式 (13) 计算 (准至 0.1%)

$$A = A_0 - A_g \quad (13)$$

式中：

A ——拌和物的含气量，%；

A_0 ——两次含气量测定的平均值，%；

A_g ——骨料校正因素，%。

计算精确至 0.1%。

4.11 海砂、混凝土拌和物中氯离子含量的快速测定

4.11.1 适用范围

本试验适用于现场快速检验海砂或混凝土拌和物中的氯离子含量。

4.11.2 试验基本原理

用氯离子选择电极和甘汞电极置于液相中，测得的电极电位 E ，与液相中氯离子浓度 C 的对数，呈线性关系，即 $E=K-0.059\lg C$ 。因此，可根据测得的电极电位值，来推算出氯离子浓度。

4.11.3 仪器设备

4.11.3.1 氯离子选择电极：测量范围为 $(5\times 10^{-5}\sim 10^{-2})$ mol/L；pH 值为：2~12；响应时间 ≤ 2 min；温度为 $(5\sim 35)$ °C。

4.11.3.2 参比电极：饱和甘汞电极，盐桥充 KNO_3 溶液 0.1mol/L 或 NaNO_3 溶液 0.1mol/L。

4.11.3.3 电位测量仪器：分辨值为 mv 的酸度计、恒电位仪、伏特计或电位差计，输入阻抗不小于 $7\text{M}\Omega$ 。

4.11.3.4 烘箱：能使温度控制在 105 ± 5 °C。

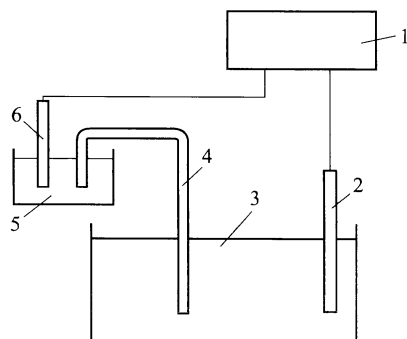
4.11.3.5 天平：称量 2000g，感量 2g。

4.11.3.6 容器：如浅盘等。

4.11.4 试验方法

4.11.4.1 建立电位-氯离子浓度关系曲线：

- 把氯离子选择电极放入由蒸馏水（或去离子水）配制的 NaCl 溶液 0.001mol/L 中活化 2h；
- 用蒸馏水（或去离子水）配制 $5.5\times 10^{-3}\text{mol/L}$ 和 $5.5\times 10^{-4}\text{mol/L}$ 两种 NaCl 标准溶液，各 250mL；
- 将氯离子选择电极和甘汞电极（通过盐桥），插入 (20 ± 2) °C 的两种 NaCl 标准溶液中，经 2min 后用电位测量仪测两电极之间电位值（见图 9）。将两值标点在 $E-\lg C$ 半对数坐标上，其连接线即为电位-氯离子浓度关系曲线。



1—点位测试仪；2—氯离子选择电极；3—被测液；4—盐桥；5—NaCl；6—甘汞电极

图 9 测试示意图

4.11.4.2 检测海砂或混凝土的氯离子或混凝土的氯离子含量是否超过规范的允许值时，应制备氯离子浓度允许限值的标准溶液 250mL。标准溶液的 NaCl 浓度按公式（14）计算

$$C_{\text{NaCl}} = \frac{K}{3.55\beta} \quad (14)$$

式中：

C_{NaCl} —— NaCl 标准溶液的浓度，mol/L；

K ——规范规定的氯离子浓度允许限值，%；

β ——混凝土的水胶比。

按前述同样步骤测得 20°C 标准溶液的电极电位值。

注：氯离子浓度允许限值 K ，按水泥用量计。

4.11.4.3 海砂中氯离子含量测定:

- a) 把氯离子选择电极放入 0.001mol/L 的 NaCl 溶液中活化 1h。
- b) 测定海砂含水率 ω_{wc} 。从样品中取各约重 500g 的试样两份, 分别放入已知质量 (m_1) 的干燥容器中称重, 记下每盘试样与容器的总重 (m_2)。将容器连同试样放入温度为 $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重, 称量烘干后的试样与容器的总重 (m_3)。

砂的含水率 ω_{wc} 应按照公式 (15) 计算 (精确至 0.1%)

$$\omega_{wc} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100\% \quad (15)$$

式中:

m_1 —— 容器质量, g;

m_2 —— 未烘干的试样与容器总重, g;

m_3 —— 烘干后的试样与容器的总重, g。

以两次试验结果的算术平均值作为测定值。

- c) 称取 200g 海砂样品置于 1000mL 磨口瓶中, 加入 250mL 蒸馏水 (或去离子水), 加盖后摇晃 1min, 静置 0.5h, 并按此顺序再重复一次。将上部清液移至锥形瓶中。并用温度计测量清液的温度。
- d) 将氯离子选择电极和甘汞电极 (通过盐桥) 插入水中, 用电位测量仪测得电位值。按温度每增加 1°C , 电位向负方向移动 1mv 的比率对电位值进行温度校正, 并从 $E - \lg C_{\text{NaCl}}$ 曲线上推求得水中氯离子浓度。

4.11.4.4 混凝土拌和物中氯离子含量测定:

- a) 把氯离子选择电极放入以蒸馏水 (或去离子水) 配制的 0.001mol/L 的 NaCl 溶液中活化 1h。
- b) 从混凝土拌和物中取出 600g 左右砂浆, 放入烧杯中, 量测温度, 插入氯离子选择电极和甘汞电极 (通过盐桥), 测定其电位, 并进行温度校正。
- c) 从 $E - \lg C_{\text{NaCl}}$ 曲线推算得相应拌和水的氯离子浓度。

4.11.5 试验结果处理

4.11.5.1 海砂氯离子含量按公式 (16) 计算

$$P_s = C_{\text{Cl}^-} \times \frac{(1.25 + \omega_{wc})(1 + \omega_{wc})}{1000N} \times 35.5 \times 100\% \quad (16)$$

式中:

P_s —— 海砂中氯离子含量, 以水泥质量计, %;

C_{Cl^-} —— 水中氯离子浓度, mol/L;

ω_{wc} —— 海砂含水率, %;

N —— 混凝土的灰砂比。

4.11.5.2 混凝土拌和物氯离子含量按公式 (17) 计算

$$P_c = C_{\text{Cl}^-} \times \frac{\beta}{1000} \times 35.5 \times 100\% \quad (17)$$

式中:

P_c —— 混凝土拌和物中氯离子含量, 以水泥质量计, %;

C_{Cl^-} —— 相应拌和水中氯离子浓度, mol/L;

β —— 混凝土的水胶比。

4.11.5.3 检验海砂或混凝土的氯离子含量是否超过规范规定允许限量时, 将测得电位值经温度校正后与

相应氯离子允许限量标准溶液中电位值相比较，若前者较后者小，表明其氯离子含量已超过规范允许值。

5 混凝土

5.1 混凝土试件的成型与养护方法

5.1.1 适用范围

为室内混凝土性能试验制作试件与试件养护。

5.1.2 仪器设备与环境控制

5.1.2.1 试模：试模最小边长应不小于最大骨料粒径的 3 倍。铸铁试模拼装应牢固，不漏浆，振捣时不得变形；塑料试模应表面光滑、具有足够的刚度，振捣时不变形。尺寸精度要求：边长误差不得超过 1/150，角度误差不得超过 0.5°，平整度误差不得超过边长的 0.05%。试模应符合下列规定：

- a) 抗压强度和劈拉强度试模：边长为 150mm×150mm×150mm 的立方体试件是标准试件。
- b) 轴向抗压强度和静力受压弹性模量试模：边长为 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件是标准试件。
- c) 抗折强度试模：边长为 150mm×150mm×550mm 的棱柱体试件是标准试件。
- d) 抗冻试模：边长为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件是快冻试验的标准试件。
- e) 抗渗试模：试模为上口内部直径 175mm，下口内部直径 185mm，高 150mm 的圆台体。

5.1.2.2 振动台：振动频率 (50 ± 2) Hz，在空载条件下，振动台面中心点的垂直振幅应为 (0.5 ± 0.02) mm。空载条件下，启动时间不应大于 2s。

5.1.2.3 捣棒：直径 16mm、长 600mm，一端为弹头形的金属棒。

5.1.2.4 成型室：成型室应控制温度在 (20 ± 5) °C。

5.1.2.5 预养室：预养室温度应控制在 (20 ± 5) °C，相对湿度 50%以上。

5.1.2.6 养护室：标准养护室温度应控制在 (20 ± 2) °C，相对湿度 95%以上。

5.1.3 试验方法

5.1.3.1 制作试件前应将试模擦拭干净，并在其内壁上均匀地刷一薄层矿物油或其他脱模剂。

5.1.3.2 按 4.1 给出的要求拌制混凝土拌和物。如混凝土拌和物骨料最大粒径超过试模最小边长的 1/3 时，大骨料用湿筛法筛除。

5.1.3.3 取样或试验室拌制的混凝土应在拌制后尽量短的时间内成型，一般不宜超过 15min。

5.1.3.4 根据混凝土拌和物的稠度确定混凝土成型方法，坍落度不大于 70mm 的混凝土宜用振动台振实；坍落度大于 70mm 的混凝土宜用捣棒人工捣实；检验现浇混凝土或预制构件的混凝土，试件成型方法宜与实际采用的方法相同。

- a) 采用振动台成型时，应将混凝土拌和物一次装入试模，装料时应用镩刀沿试模内壁略加插捣，并使混凝土拌和物高出试模上口，振动应持续到混凝土表面出浆为止，不得过振。
- b) 采用捣棒人工插捣时，混凝土拌和物应分两层装入模内，每层的装料厚度大致相等；插捣应按螺旋方向从边缘向中心均匀进行。在插捣底层混凝土时，捣棒应达到试模底部；插捣上层时，捣棒应贯穿上层后插入下层 $(20 \sim 30)$ mm；插捣时捣棒应保持垂直，不得倾斜。然后应用镩刀沿试模内壁插拔数次；每层插捣次数按在 $10\,000\text{mm}^2$ 截面积内不得少于 12 次；插捣后应用橡皮锤轻轻敲击试模四周，直至插捣棒留下的空洞消失为止。采用插入式振捣棒振实时，将混凝土拌和物一次装入试模，装料时应用镩刀沿各试模壁插捣，并使混凝土拌和物高出试模口；宜用直径为 $\phi 25\text{mm}$ 的插入式振捣棒，插入试模振捣时，振捣棒距试模底板 $(10 \sim 20)$ mm 且不得触及试模底板，振动应持续到表面出浆为止，且应避免过振，以防止混凝土离析；一般振捣时

间为 20s。振捣棒拔出时要缓慢，拔出后不得留有孔洞。

5.1.3.5 刮除试模上口多余的混凝土，待混凝土临近初凝时，用钹刀抹平。

5.1.4 试件的养护

5.1.4.1 试件成型后应立即用不透水的薄膜覆盖表面。

5.1.4.2 采用标准养护的试件，应在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境中静置一昼夜或二昼夜，然后编号、拆模。拆模后应立即放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护，或在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的不流动的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液中养护。标准养护室内的试件应放在支架上，彼此间隔 $(10 \sim 20) \text{mm}$ ，试件表面应保持潮湿，并不得被水直接冲淋。

5.1.4.3 同条件养护试件的拆模时间可与实际构件的拆模时间相同，拆模后，试件仍需保持同条件养护。

5.1.4.4 标准养护龄期为 28d（从搅拌加水开始计时），其他龄期试件根据设计要求确定。

5.1.5 试验时间偏差

不同龄期试件强度和变形性能试验时间偏差如下：

- a) 3d 龄期试验时间偏差要求 $\pm 45 \text{min}$ 。
- b) 7d 龄期试验时间偏差要求 $\pm 2 \text{h}$ 。
- c) 28d 及 28d 以上龄期试验时间偏差要求 $\pm 8 \text{h}$ 。

5.2 混凝土立方体抗压强度试验

5.2.1 适用范围

本试验适用于测定混凝土立方体试件的抗压强度。

5.2.2 仪器设备

5.2.2.1 压力机或万能试验机：试件破坏荷载应大于压力机全量程的 20% 且小于压力机全量程的 80%，测量精度为 $\pm 1\%$ 。

5.2.2.2 钢制垫板：

- a) 钢垫板的平面尺寸应不小于试件的承压面积，厚度应不小于 25mm。
- b) 钢垫板应机械加工，承压面的平面度公差为 0.04mm；表面硬度不小于 55HRC。

5.2.3 试验方法

5.2.3.1 试件从养护地点取出后应将试件表面与上下承压板面擦干净，用湿布将试件表面覆盖直至试验为止。

5.2.3.2 将试件安放在试验机的下压板或垫板上，试件的承压面应与成型时的顶面垂直。试件的中心应与试验机下压板中心对准，开动试验机，当上压板与试件或钢垫板接近时，调整球座，使接触均衡。

5.2.3.3 在试验过程中应连续均匀地加荷，混凝土强度等级 $< \text{C}30$ 时，加荷速度取 $(0.3 \sim 0.5) \text{MPa/s}$ ；混凝土强度等级 $\geq \text{C}30$ 且 $< \text{C}60$ 时，取 $(0.5 \sim 0.8) \text{MPa/s}$ ；混凝土强度等级 $\geq \text{C}60$ 时，取 $(0.8 \sim 1.0) \text{MPa/s}$ 。

5.2.3.4 当试件接近破坏开始急剧变形时，应停止调整试验机油门，保持加荷速度直至试件破坏，然后记录破坏荷载。

5.2.4 试验结果处理

5.2.4.1 混凝土立方体抗压强度按公式 (18) 计算（精确至 0.1MPa）

$$f_{cc} = \frac{P}{A} \quad (18)$$

式中:

f_{cc} ——抗压强度, MPa;

P ——破坏荷载, N;

A ——试件承压面积, mm^2 。

5.2.4.2 抗压强度值应符合以下规定:

- 三个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值 (精确至 0.1MPa)。
- 三个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时, 则把最大及最小值一并舍除, 取中间值作为该组试件的抗压强度值。
- 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的 15%, 则该组试件的试验结果无效。

5.2.4.3 混凝土强度等级 $< C60$ 时, 用非标准试件测得的强度值均应乘以尺寸换算系数, 200mm×200mm×200mm 试件, 其值为 1.05; 100mm×100mm×100mm 试件, 其值为 0.95。当混凝土强度等级 $\geq C60$ 时, 宜采用标准试件; 使用非标准试件时, 尺寸换算系数应由试验确定。

5.3 混凝土劈裂抗拉强度试验 (采用标准试件)

5.3.1 适用范围

本试验用于测定混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度。

5.3.2 试验设备

5.3.2.1 试验机: 与 5.2.2.1 条的规定相同。

5.3.2.2 垫块、垫条及支架:

- 劈裂抗拉强度试验应采用半径为 75mm 的钢制弧形垫块, 其横截面尺寸见图 10, 垫块的长度与试件相同。
- 垫条为三层胶合板制成, 宽度为 20mm, 厚度为 (3~4) mm, 长度不小于试件长度, 垫条不得重复使用。
- 支架为钢支架, 见图 11。

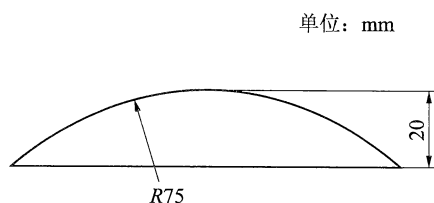
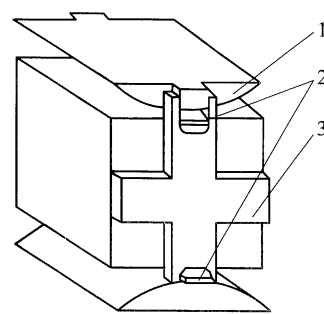


图 10 垫块横截面尺寸



1—垫块; 2—垫条; 3—支架

图 11 钢支架

5.3.3 试验方法

5.3.3.1 将试件放在试验机下压板的中心位置, 劈裂承压面和劈裂面应与试件成型时的顶面垂直; 在上、下压板与试件之间垫以圆弧形垫块及垫条各一条, 垫块与垫条应与试件上、下面的中心线对准并与成型时的顶面垂直。

5.3.3.2 开动试验机, 当上压板与圆弧形垫块接近时, 调整球座, 使接触均衡。加荷应连续均匀, 当混

混凝土强度等级 < C30 时, 加荷速度取 (0.02~0.05) MPa/s; 当混凝土强度等级 ≥ C30 且 < C60 时, 取 (0.05~0.08) MPa/s; 当混凝土强度等级 ≥ C60 时, 取 (0.08~0.10) MPa/s, 至试件接近破坏时, 应停止调整试验机油门, 保持加荷速度直至试件破坏, 然后记录破坏荷载。

5.3.4 试验结果处理

5.3.4.1 混凝土劈裂抗拉强度按公式 (19) 计算 (精确至 0.01MPa)

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (19)$$

式中:

f_{ts} —— 劈裂抗拉强度, MPa;

P —— 破坏荷载, N;

A —— 试件劈裂面面积, mm²。

5.3.4.2 强度值的确定应符合下列规定:

- 三个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值 (精确至 0.01MPa)。
- 三个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时, 则把最大及最小值一并舍除, 取中间值作为该组试件的强度值。
- 如最大值与最小值与中间值的差均超过中间值的 15%, 则该组试件的试验结果无效。

5.3.4.3 当混凝土强度等级 ≥ C60 时, 宜采用标准试件; 使用非标准试件时, 尺寸换算系数应由试验确定。

5.4 混凝土轴向抗拉强度与极限拉伸试验

5.4.1 适用范围

本试验用于测定混凝土的轴向抗拉强度、极限拉伸值以及抗拉弹性模量。

5.4.2 仪器设备

5.4.2.1 试验机: 100kN 拉力试验机或伺服程控万能试验机, 其拉伸间距宜在 (800~1000) mm。

5.4.2.2 试模: 成型试件尺寸埋件见图 12 (a)~图 12 (d)。

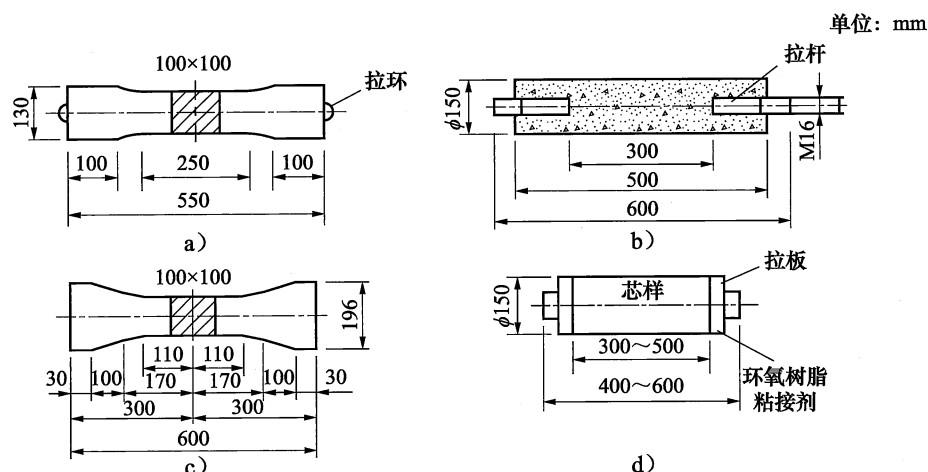
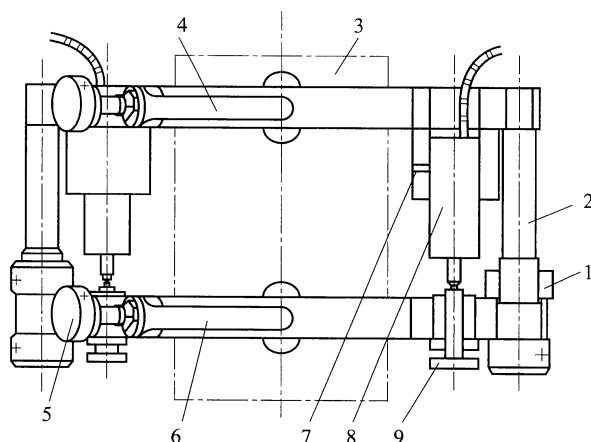


图 12 混凝土轴向拉伸试件及埋件

5.4.2.3 应变测量装置: 千分表、电阻应变片或位移传感器等均可用于测定试件的变形。采用千分表或位移传感器时应备有变形测量架 (见图 13)。试件的变形通过变形测量架传递到千分表或位移传感器。采用电阻应变片测量试件变形时应配置一台电阻应变仪; 采用位移传感器测量试件变形时应备有与其相

匹配的放大器和记录仪。测量精度应不低于 0.001mm，应变测量装置的测量精度应不低于 1×10^{-6} 。

5.4.2.4 拉杆、拉板、应变片、502 胶、环氧树脂黏结剂等。



1—圆螺母；2—标距定位杆；3—试件；4—上支架；5、7—紧定螺钉；
6—下支架；8—千分表或位移传感器；9—零点调节螺栓

图 13 变形测量架

5.4.3 试验方法

5.4.3.1 按 4.1 及 5.1 的有关规定制作试件，以四个试件为一组。拌和物最大骨料粒径超过 31.5mm 时，用 31.5mm 方孔筛湿筛后成型。

5.4.3.2 成型前埋件的安装：当采用图 12 (a) 所示的试件时，将拉环紧紧夹持在试模两端上、下拉环夹板的凹槽中，注意检查拉环位置是否水平，必要时用若干层纸垫在前夹板或后夹板上，以调整拉环的水平位置。当采用图 12 (b) 所示的试件时，上、下拉杆的埋设靠端板定位，端板与试模内尺寸采用动配合精度，以保证埋杆与试件同轴心。

5.4.3.3 到达试验龄期时，将试件从养护室取出，量测试件断面尺寸，试件尺寸测量精确至 1mm。试件安装在试验机上。试验机应具有球面拉力接头，试件的拉杆与拉力接头连接。球面拉力接头用以调整试件轴线与试验机施力轴线可能产生的偏心。

5.4.3.4 将千分表或位移传感器固定在变形测量架上（见图 13），测量标距（100~150mm）由标距定位杆定位。然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部。

当采用电阻应变仪测量变形时，在试件从养护室取出后，应尽快在试件的两侧中间部位用电吹风吹干表面，然后用 502 胶粘贴电阻片。电阻片的长度应不小于骨料最大粒径的 3 倍。从试件取出至试验完毕，不宜超过 4h，并注意试件保湿。应提前操作好变形测量的准备工作。

5.4.3.5 开动试验机，进行两次预拉，预拉荷载约相当于破坏荷载的（15~20）%。预拉时，应测读应变值，需要时调整荷载传递装置使偏心率不大于 15%。偏心率按公式（20）计算

$$e = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right| \times 100\% \quad (20)$$

式中：

e ——偏心率，%；

ε_1 、 ε_2 ——分别为试件两侧的应变值。

5.4.3.6 预拉完毕后，重新调整测量仪器，进行正式测试，拉伸时的荷载速度控制在 0.4MPa/min，每加荷 500N 或 1000N 测读并记录变形值，直至试件破坏（当采用千分表测量变形时，荷载加到接近破坏荷载时，为防止千分表受损可将其从试件上卸下）。记录破坏荷载和断裂位置。

当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形由位移传感器经放大器送入 $X\sim Y$ 记录仪，自动绘制荷载—应变曲线。试件断裂后停止试验。

5.4.4 试验结果处理

5.4.4.1 轴向抗拉强度按公式 (21) 计算 (精确至 0.01MPa)

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (21)$$

式中：

f_t ——轴向抗拉强度，MPa；

P ——破坏荷载，N；

A ——试件断面面积， mm^2 。

5.4.4.2 极限拉伸值的确定：采用位移传感器测定应变时，荷载—应变曲线由 $X\sim Y$ 记录仪自动给出。破坏荷载所对应的应变即为该试件的极限拉伸值。采用其他测量变形的装置时，以应变为横坐标，应力为纵坐标，给出每个试件的应力—应变曲线。过破坏应力坐标点，作与横坐标平行的线，并将应力—应变曲线外延，两线交点对应的应变值即为该试件的极限拉伸值，精确至 1×10^{-6} ，见图 14。

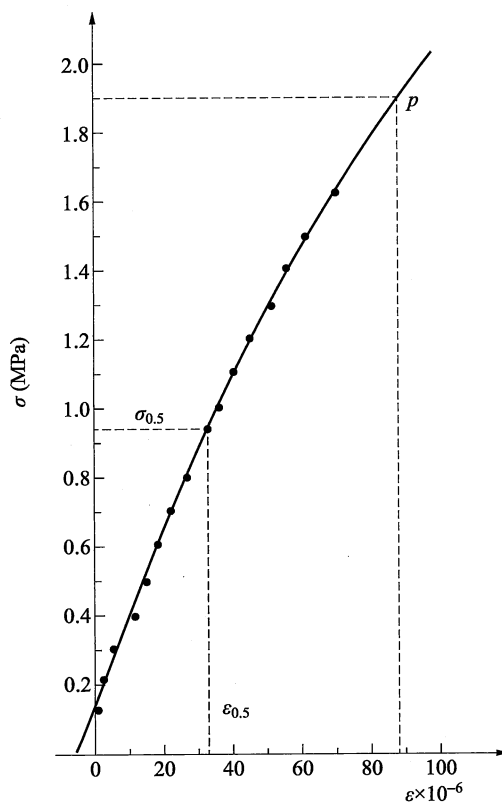


图 14 应力—应变曲线图

如曲线不通过坐标原点时，延长曲线起始段使与横坐标相交，并以此交点作为极限拉伸值的起始点。

5.4.4.3 抗拉弹性模量按公式 (22) 计算 (精确至 100MPa)

$$E_t = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \quad (22)$$

式中：

E_t ——轴向抗拉弹性模量，MPa；

$\sigma_{0.5}$ ——50%的破坏应力, MPa;

$\varepsilon_{0.5}$ —— $\sigma_{0.5}$ 所对应的应变值。

抗拉弹性模量取应力从 0~0.5 f_t 破坏应力的割线弹性模量。

5.4.4.4 轴向抗拉强度、极限拉伸值、抗拉弹性模量均以四个试件测值的平均值作为试验结果。当试件的断裂位置与变截面转折点或埋件端点的距离在 20mm 以内时, 该测值应剔除, 取余下测值的平均值作为试验结果。如可用的测值少于两个时, 应重做试验。

5.5 混凝土弯曲试验

5.5.1 适用范围

本试验用简支梁三分点加荷法测定混凝土的抗弯强度, 亦可同时测定混凝土的抗弯极限、拉伸值以及抗弯弹性模量。

5.5.2 仪器设备

5.5.2.1 试验机: 万能试验机或带有弯曲试验架的压力试验机, 其要求与 5.2.2.1 条的有关规定相同。

5.5.2.2 试验加荷装置: 试验机应能施加均匀、连续、速度可控的荷载, 并带有能使两个相等荷载同时作用在试件跨度三分点处的抗折试验装置, 见图 15。

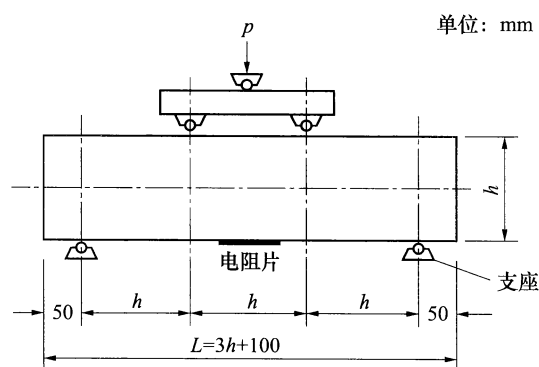


图 15 弯曲试验示意图

试件的支座和加荷头应采用直径 (20~40) mm、长度不小于 (b+10) mm 的硬钢圆柱, 支座立脚点固定铰支, 其他应为滚动支点。

5.5.2.3 试模: 150mm×150mm×550mm (或 600mm) 试模; 必要时可采用 100mm×100mm×400mm (或 515mm) 试模。

5.5.2.4 应变测量仪器: 电阻应变仪一台, 测量精度 1×10^{-6} 。

5.5.2.5 应变片 (长度一般应不小于骨料最大粒径的 3 倍) 及 502 胶水等。

5.5.3 试验方法

5.5.3.1 按 4.1 及 5.1 的有关规定制作试件。采用 100mm×100mm×400mm 试模时, 骨料最大粒径大于 31.5mm 时应筛去。

5.5.3.2 到达试验龄期时, 试件从养护室取出后将试件表面擦拭干净。

5.5.3.3 按图 15 装置试件, 安装尺寸偏差不得大于 1mm。试件的承压面应为试件成型时的侧面。支座及承压面与圆柱的接触面应平稳、均匀, 否则应垫平。

5.5.3.4 测试弯曲拉伸应变时, 将小梁底面中间段受拉侧粘贴电阻片的部位用电风吹干表面, 然后用 502 胶水粘贴电阻片, 见图 15。

5.5.3.5 开动试验机, 进行两次预弯, 预弯荷载均相当于破坏荷载的 (15~20)%, 预弯完毕后重新调整应变仪, 使应变值指示为零, 然后进行正式测试。施加荷载应保持均匀、连续。当混凝土强度等级 < C30 时, 加荷速度取 (0.02~0.05) MPa/s; 当混凝土强度等级 ≥ C30 且 < C60 时, 取 (0.05~0.08) MPa/s; 当混凝土强度等级 ≥ C60 时, 取 (0.08~0.10) MPa/s。每加荷 500N 或 1000N 测读并记录应变值, 至试件接近破坏时, 应停止调整试验机油门, 直至试件破坏, 然后记录破坏荷载。并记录试件破坏荷载的试验机示值及试件下边缘断裂位置。

5.5.4 试验结果处理

5.5.4.1 混凝土抗弯强度按公式 (23) 计算 (精确至 0.01MPa), 如弯断面位于两个集中荷载之外 (以受拉区为准) 该试件作废。如有两个试件的弯断面均位于两集中荷载之外, 则试验重做。

$$f_f = \frac{Pl}{bh^2} \quad (23)$$

式中:

f_f ——混凝土抗弯强度, MPa;

P ——试件破坏荷载, N;

l ——支座间距 (即跨度) $l=3h$, mm;

b ——试件截面宽度, mm;

h ——试件截面高度, mm。

- 每组以 3 个试件测值的平均值作为该组试件的抗弯强度值。若 3 个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时, 则把最大及最小值一并舍除, 取中间值作为该组试件的抗弯强度值; 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的 15%, 则该组试件的试验结果无效。
- 3 个试件中若有一个折断面位于两个集中荷载之外, 则混凝土抗弯强度值按另两个试件的试验结果计算。若这两个测值的差值不大于这两个测值较小值的 15% 时, 则该组试件的抗弯强度值按着两个测值的平均值计算, 否则该组试件的试验无效。若有两个试件的下边缘断裂位置位于两个集中荷载作用线之外, 则该组试件试验无效。
- 当试件尺寸为 100mm×100mm×400mm 非标准试件时, 应乘以尺寸换算系数 0.85; 当混凝土强度等级 ≥ C60 时, 宜采用标准试件; 使用非标准试件时, 尺寸换算系数应由试验确定。

5.5.4.2 抗弯极限拉伸值

- 以应变为横坐标, 应力为纵坐标, 绘出每个试件的应力—应变关系曲线。
- 过破坏应力坐标点, 作与横坐标平行的线, 并将应力—应变曲线外延, 两线交点对应的应变即为该试件的抗弯极限拉伸值 (精确至 1×10^{-6})。
- 如曲线不通过坐标原点时, 需延长曲线起始段使与横坐标相交, 并以此交点作为试件应变的起始点。
- 应力按公式 (24) 计算 (精确至 0.01MPa)

$$\sigma_f = \frac{Pl}{bh^2} \quad (24)$$

式中:

σ_f ——弯曲应力, MPa;

P ——弯曲荷载, N;

l 、 b 、 h ——与公式 (23) 相同。

5.5.4.3 抗弯弹性模量取应力从 0~0.5 f_f 破坏应力的割线弹性模量。抗弯弹性模量按公式 (25) 计算 (精确至 100MPa):

$$E_f = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \quad (25)$$

式中：

E_f ——抗弯弹性模量，MPa；

$\sigma_{0.5}$ ——50%的破坏应力，MPa；

$\varepsilon_{0.5}$ —— $\sigma_{0.5}$ 所对应的应变值。

5.5.4.4 抗弯极限拉伸值、抗弯弹性模量均以 3 个试件测值的平均值作为试验结果。

5.6 混凝土轴向抗压强度与静力抗压弹性模量试验

5.6.1 适用范围

本试验用于测定混凝土棱柱体（或圆柱体）的轴向抗压强度和静力抗压弹性模量。

5.6.2 仪器设备

5.6.2.1 压力试验机：与 5.2.2.1 条的有关规定相同。混凝土强度等级 \geq C60 时，试件周围应设防崩裂网罩。

5.6.2.2 试模：边长为 150mm×150mm×300mm 的棱柱体标准试模或 ϕ 150mm×300mm 的圆柱体标准试模。圆柱体试模应由刚性、金属制成的圆筒形和底板构成，用适当的方法组装而成。试模组装后不能有变形和漏水现象。圆柱体试模的尺寸误差，直径误差应小于 1/20d，高度误差应小于 1/100h；试模底板的平整度公差应不超过 0.02mm；组装试模时，圆筒形模纵轴与底板应成直角，其允许公差为 0.5°。

5.6.2.3 应变量测装置，与 5.4.2.3 条的有关规定相同。

5.6.2.4 钢垫板：钢垫板应机械加工，平面尺寸应不小于试件的承压面积，厚度应不小于 25mm；平整度公差为 0.04mm；表面硬度不小于 55HRC；硬化层厚度约为 5mm。

5.6.2.5 卡尺：量程 300mm，分度值 0.02mm。

5.6.2.6 压板：用于圆柱体试件端面平整处理的压板，应采用厚度为 6mm 及其以上的平板玻璃，压板直径应比试模的直径大 25mm 以上。

5.6.3 试验方法

5.6.3.1 按 5.1 的有关规定制作试件。以 6 个试件为一组。其中 3 个测定轴向抗压强度，3 个测定抗压弹性模量。当只测定静力弹性模量时，成型 4 个试件，先取 1 个测定轴向抗压强度，其余 3 个测定静力弹性模量。

5.6.3.2 到达试验龄期时，试件从养护地点取出后应及时进行试验，用干毛巾将试件表面与上下承压面擦干净，量测断面尺寸。用湿布覆盖，以保持潮湿状态。

5.6.3.3 将试件安放在试验机的下压板上或钢垫板上，试件的中心应与试验机下压板中心对准。开动试验机，当上压板与试件或钢垫板接近时，调整球座，使接触均衡。试验机的加压板与试件的端面之间要紧密接触，中间不得夹入有缓冲作用的其他物质。

5.6.3.4 测定轴向抗压强度。在试验过程中应连续均匀地加荷，当混凝土强度等级 $<$ C30 时，加荷速度取（0.3~0.5）MPa/s；当混凝土强度等级 \geq C30 且 $<$ C60 时，取（0.5~0.8）MPa/s；当混凝土强度等级 \geq C60 时，取（0.8~1.0）MPa/s。当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门，直至试件破坏，记录破坏荷载。

5.6.3.5 测定抗压弹性模量。将千分表或位移传感器固定在变形测量架上（同图 13），标准试件的测量标距采用 150mm，由标距定位杆定位，然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部。非标准试件的测量标距不应大于试件高度的 1/2，也不应小于 100mm 及骨料最大粒径的 3 倍。

5.6.3.6 加荷至基准应力为 0.5MPa 的初始荷载值 P_1 ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每测点的变形读数 ε_0 ，应立即连续均匀地加荷至应力为轴向抗压强度 f_c 的 1/3 的荷载值 P_2 ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_a 。加荷速度应符合 5.6.3.4 的规定。

5.6.3.7 当以上这些变形值之差与它们平均值之比大于 20% 时，应重新对中试件后重复 5.6.3.6 的试验。如果无法使其减少到低于 20% 时，则此次试验无效。

5.6.3.8 在确认试件对中符合 5.6.3.7 的规定后，以与加荷速度相同的速度卸荷至基准应力 0.5MPa (P_1)，恒载 60s；然后用同样的加荷和卸荷速度以及 60s 的保持恒载 (P_1 及 P_2) 至少进行两次反复预压。在最后一次预压完成后，在基准应力 0.5MPa (P_1) 持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_0 ；再用同样的加荷速度加荷至 P_2 ，持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_a (见图 16)。

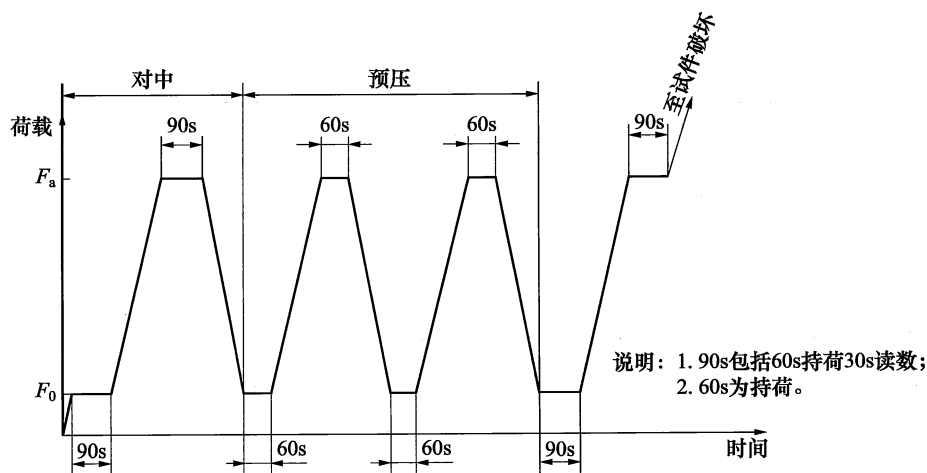


图 16 弹性模量加荷方法示意图

5.6.3.9 卸除变形测量仪，以同样的速度加荷至破坏，记录破坏荷载；如果试件的抗压强度与 f_c 之差超过 f_c 的 20% 时，则应在报告中注明。

5.6.4 试验结果处理

5.6.4.1 轴向抗压强度

采用棱柱体试件时，按公式 (26) 计算 (精确至 0.1MPa)

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (26)$$

采用圆柱体试件时，按公式 (27) 计算 (精确至 0.1MPa)

$$f_c = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (27)$$

式中：

f_c ——混凝土轴向抗压强度，MPa；

P ——试件破坏荷载，N；

A ——试件承压面积， mm^2 ；

d ——圆柱体试件计算直径 (28)，mm，精确至 0.1mm；

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (28)$$

式中：

d_1 、 d_2 ——试件两个垂直方向的直径，mm。

取三个试件测值的平均值作为该组试件的轴向抗压强度值。试验结果取舍方法同 5.2 的有关规定。

5.6.4.2 静力抗压弹性模量

采用棱柱体时，按公式 (29) 计算 (精确至 100MPa)

$$E_c = \frac{P_2 - P_1}{A} \times \frac{L}{\Delta L} \quad (29)$$

采用圆柱体时，按公式 (30) 计算 (精确至 100MPa)

$$E_c = \frac{4(P_2 - P_1)}{\pi d^2} \times \frac{L}{\Delta L} = 1.273 \times \frac{(P_2 - P_1)L}{d^2 \Delta L} \quad (30)$$

式中：

E_c ——混凝土静力抗压弹性模量，MPa；

P_2 ——应力为 1/3 轴向抗压强度时的荷载，N；

P_1 ——应力为 0.5MPa 时的初始荷载，N；

L ——测量标距，mm；

A ——试件承压面积，mm²；

ΔL ——最后一次从 P_1 加荷至 P_2 时的试件两侧变形的平均值 (式 31)，mm；

d ——圆柱体试件计算直径，按圆柱体轴向抗压强度的规定计算，mm。

$$\Delta L = \varepsilon_a - \varepsilon_0 \quad (31)$$

式中：

ε_a —— P_2 时试件两侧变形的平均值，mm；

ε_0 —— P_1 时试件两侧变形的平均值，mm。

弹性模量以三个试件测值的平均值作为试验结果。如果其中一个试件的轴向抗压强度值与用以确定检验控制荷载的轴向抗压强度值相差超过后者的 20% 时，则弹性模量值按另两个试件测值的算术平均值计算；如有两个试件超过上述规定时，则此次试验无效。

5.7 混凝土压缩徐变试验

5.7.1 适用范围

本试验用于测定混凝土试件在长期恒定轴向压力作用下的变形性能。

5.7.2 仪器设备

5.7.2.1 徐变仪：常用徐变仪可选用弹簧式或液压式，其工作荷载范围应为 (180~500) kN，在要求时间范围内 (至少 1 年) 把所要求的压缩荷载加到试件上并应能保持荷载不变。弹簧式压缩徐变仪 (见图 17) 应包括上下压板、球座或球铰及其配套垫板、弹簧持荷装置以及 2 根~3 根承力丝杆。压板与垫板应具有足够的刚度，压板的受压面的平整度偏差不应大于 0.1mm/100mm，并应能保证对试件均匀加荷。弹簧及丝杆的尺寸应按徐变仪所要求的试验吨位而定。在试验荷载下，丝杆的拉应力不应大于材料屈服点的 30%，弹簧的工作压力不应超过允许极限荷载的 80%，且工作时弹簧的压缩变形不得小于 20mm。当使用液压式持荷部件时，可通过一套中央液压调节单元同时加荷几个徐变架，该单元应由储液器、调节器、显示仪表和一个高压源 (如高压氮气瓶或高压泵) 等组成。有条件时可采用几个试件串叠受荷，上下压板的总距离不得超过 1600mm。

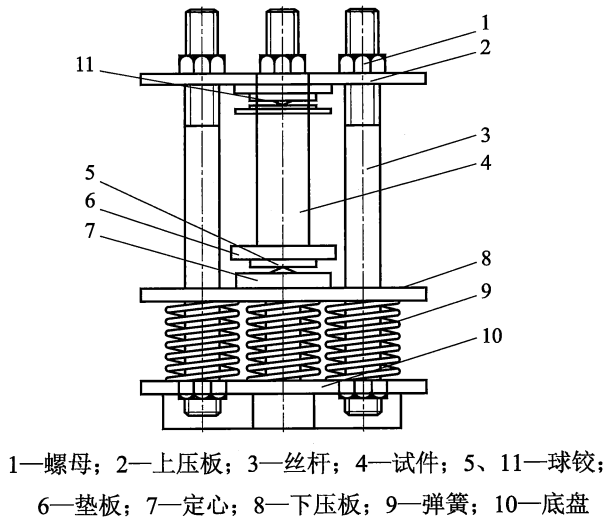


图 17 弹簧式压缩徐变仪

- 5.7.2.2 加荷装置：包括加荷架、油压千斤顶、测力装置等。
- a) 加荷架应由接长杆及顶板组成，加荷时加荷架应与徐变仪丝杆顶部相连。
 - b) 油压千斤顶可采用一般的起重千斤顶，其吨位应大于所要求的试验荷载。
 - c) 测力装置可采用钢环测力计、荷载传感器或其他形式的压力测定装置。其测量精度应达到所加荷载的 $\pm 2\%$ ，试件破坏荷载不应小于测力装置全量程的 20%且不应大于测力装置全量程的 80%。
- 5.7.2.3 变形量测仪器：可采用外装式、内埋式或便携式，其测量的应变值精度不应低于 0.001mm/m。
- a) 采用外装式变形量测装置时，应至少测量不少于两个均匀地布置在试件周边的基线的应变。测点应精确布置在试件的纵向表面的纵轴上，且应与试件端头等距，与相邻试件端头的距离不应小于一个截面边长。
 - b) 采用差动式应变计或钢弦式应变计等内埋式变形量测装置时，应在试件成型时可靠地固定该装置，应使其量测基线位于试件中部并应与试件纵轴重合。
 - c) 采用接触法引伸仪等便携式变形量测装置时，侧头应牢固附置在试件上。
 - d) 量测标距应大于混凝土骨料最大粒径的 3 倍，且不少于 100mm。

5.7.3 试验方法

5.7.3.1 试件的形状与尺寸：徐变试验应采用棱柱体试件。试件尺寸应根据混凝土中骨料最大粒径按表 2 选用，长度应为截面边长的 3 倍~4 倍。

表 2 徐变试验试件尺寸选用表 单位：mm

骨料最大公称粒径	试件最小边长	试件长度
31.5	100	400
40	150	≥ 450

当试件叠放时，应在每叠试件端头的试件和压板之间加装一个未安装应变量测仪表的辅助性混凝土垫块，其截面边长尺寸应与被测试件相同，且长度应至少等于其截面尺寸的一半。

- 5.7.3.2 试件数量应符合下列规定：
- a) 制作徐变试件时，应同时制作相应的棱柱体抗压试件及收缩试件。

- b) 收缩试件应与徐变试件相同，并应装有与徐变试件相同的变形量测装置。
- c) 每组抗压、收缩、徐变试件的数量宜各为 3 个，其中每个加荷龄期的每组徐变试件应至少为 2 个。

5.7.3.3 试件制备应符合下列规定：

- a) 当要叠放试件时，宜磨平其端头。
- b) 徐变试件受压面与相邻的纵向表面之间的角度与直角的偏差不应超过 $1\text{mm}/100\text{mm}$ 。
- c) 采用外装式应变测量装置时，徐变试件两侧面应有安装量测装置的测头，测头宜采用埋入式，试模的侧壁应具有能在成型时使测头定位的装置。在对粘结的工艺及材料确有把握时，可采用胶粘。

5.7.3.4 试件的养护与存放方式应符合下列规定：

- a) 抗压试件及收缩试件应随徐变试件一并同条件养护。
- b) 对于标准环境中的徐变，试件应在成型后不少于 24h 且不多于 48h 时拆模，且在拆模前，应覆盖试件表面。随后应立即将试件送入标准养护室到 7d 龄期（自混凝土搅拌加水开始计时），其中 3d 加载的徐变试验应养护 3d。养护期间试件不应浸泡于水中。试件养护完成后应移入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(60 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿室进行徐变试验，直至试验完成。
- c) 对于适用于大体积混凝土内部情况的绝湿徐变，试件在制作或脱模后应密封在保湿外套中（包括橡皮套、金属套筒等），且在整个试件存放和测试期间也应保持密封。
- d) 对于需要考虑温度对混凝土弹性和非弹性性质的影响等特定温度下的徐变，应控制好试件存放的试验环境温度，应使其符合希望的温度历史。
- e) 对于需确定在具体使用条件下的混凝土徐变值等其他存放条件，应根据具体情况确定试件的养护及试验制度。

5.7.3.5 徐变试验应符合下列规定：

- a) 对比或检验混凝土的徐变性能时，试件应在 28d 龄期时加荷。当研究某一混凝土的徐变特性时，应至少制备 5 组徐变试件并应分别在龄期为 3、7、14、28d 和 90d 加荷。
- b) 测头或测点应在试验前 1d 粘好，仪表安装好后应仔细检查，不得有任何松动或异常现象。加荷装置、测力计等也应予以检查。
- c) 在即将加荷徐变试件前，应测试同条件养护试件的棱柱体抗压强度。
- d) 测头和仪表准备好以后，应将徐变试件放在徐变仪的下压板后，使试件、加荷装置、测力计及徐变仪的轴线重合，并再次检查变形量测仪表的调零情况，且应记下初始读数。当采用未密封的徐变试件时，应在将其放在徐变仪上的同时，覆盖参比用收缩试件的端部，以保持与徐变试件同样的干燥条件。
- e) 试件放好后，应及时开始加荷。当无特殊要求时，应取徐变应力为所测得的棱柱体抗压强度的 40%。当采用外装仪表或者接触法引伸仪时，应用千斤顶先加压至徐变应力的 20% 进行对中。两侧的变形相差应小于其平均值的 10%，当超出此值，应松开千斤顶卸荷，进行重新调整后，再加荷到徐变应力的 20%，并再次检查对中情况。对中完毕后，应立即继续加荷直到徐变应力，并及时读出两边的变形值，将此时两边变形的平均值作为在徐变荷载下的初始变形值。从对完到测初始变形值之间的加荷及测量时间不得超过 1min。随后应拧紧承力丝杆上端的螺母，并松开千斤顶卸荷，且应观察两边变形值的变化情况。此时，试件两侧的读数相差不应超过平均值的 10%，否则应予以调整，调整应在试件持荷的情况下进行，调整过程中所产生的变形增值应计入徐变变形之中。然后应再加荷到徐变应力，并应检查两侧变形读数，其总和与加荷前读数相比，误差不应超过 2%。否则应予以补足。
- f) 应在加荷后的 1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180、270d 和 360d 测读试件的变形值。
- g) 在测读徐变试件的变形读数的同时，应测量同条件放置参比用收缩试件的收缩值。

- h) 试件加荷后应定期检查荷载的保持情况,应在加荷后 7、28、60、90d 各校核一次,如荷载变化大于 2%,应予以补足。在使用弹簧式加载架时,可通过施加正确的荷载并拧紧丝杆上的螺母,来进行调整。

5.7.4 试验结果处理

5.7.4.1 徐变应变按公式 (32) 计算

$$\varepsilon_{ct} = \frac{\Delta L_t - \Delta L_0}{L_b} - \varepsilon_t \quad (32)$$

式中:

ε_{ct} ——加荷 t d 后的徐变应变, mm/m, 精确至 0.001mm/m;

ΔL_t ——加荷 t d 后的总变形值, mm, 精确至 0.001mm;

ΔL_0 ——加荷时测得的初始变形值, mm, 精确至 0.001mm;

L_b ——测量标距, mm, 精确至 1mm;

ε_t ——同龄期的收缩值, mm/m, 精确至 0.001mm/m。

5.7.4.2 徐变度按公式 (33) 计算

$$C_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\delta} \quad (33)$$

式中:

C_t ——加荷 t d 的混凝土徐变度, 1/MPa, 精确至 1×10^{-6} /MPa;

δ ——徐变应力, MPa。

5.7.4.3 徐变系数按公式 (34) 和公式 (35) 计算

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_0} \quad (34)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L_0}{L_b} \quad (35)$$

式中:

ϕ_t ——加荷 t d 的徐变系数;

ε_0 ——在加荷时测得的初始应变值, mm/m, 精确至 0.001mm/m。

5.7.4.4 每组分别以 3 个试件徐变应变(徐变度或徐变系数)试验结果的平均值作为该组混凝土试件徐变应变(徐变度或徐变系数)的测定值。

5.7.4.5 作为供比对用的混凝土徐变值,应采用经过标准养护的混凝土试件,在 28d 龄期时经受 0.4 倍棱柱体抗压强度恒定荷载持续作用 360d 的徐变值。可用测得的 3 年徐变值作为终极徐变值。

5.8 混凝土干缩试验

5.8.1 适用范围

本试验用于测定在无约束和规定的温湿度条件下硬化混凝土试件的收缩变形性能。

5.8.2 仪器设备

5.8.2.1 试模:规格为 100mm×100mm×515mm 的棱柱体试模。

5.8.2.2 标准杆:测量混凝土收缩变形的装置应具有硬钢或石英玻璃制作的标准杆,并应在测量前及测量过程中及时校核仪表的读数。

5.8.2.3 收缩测量装置可采用下列形式之一：

- 卧式混凝土收缩仪的测量标距应为 540mm，并应装有精度为 $\pm 0.001\text{mm}$ 的千分表或测微器。
- 立式混凝土收缩仪的测量标距和测微器同卧式混凝土收缩仪。
- 其他形式的变形测量仪表的测量标距不应小于 100mm 及骨料最大粒径的 3 倍。并至少能达到 $\pm 0.001\text{mm}$ 的测量精度。

5.8.3 试验方法

5.8.3.1 按 4.1 和 5.1 的相关规定拌和并成型试件，以三个试件为一组，金属测头应埋设牢靠，位置准确。收缩试件成型时不得使用机油等憎水性脱模剂。试件成型后应带模养护（1~2）d，并保证拆模时不损伤试件。对于事先没有埋设测头的试件，拆模后应立即粘贴或埋设测头。试件拆模后，应立即送至温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 以上的标准养护室养护。

5.8.3.2 试件和测头应符合下列规定：

- 采用卧式混凝土收缩仪时，试件两端应预埋测头或留有埋设测头的凹槽。卧式收缩试验用测头（图 18）应由不锈钢或其他不锈的材料制成。
- 采用立式混凝土收缩仪时，试件一端中心预埋测头（图 19）。立式收缩试验用测头的另外一端宜采用 M20mm×35mm 的螺栓（螺纹通长），并应与立式混凝土收缩仪底座固定。螺栓和测头都应预埋进去。

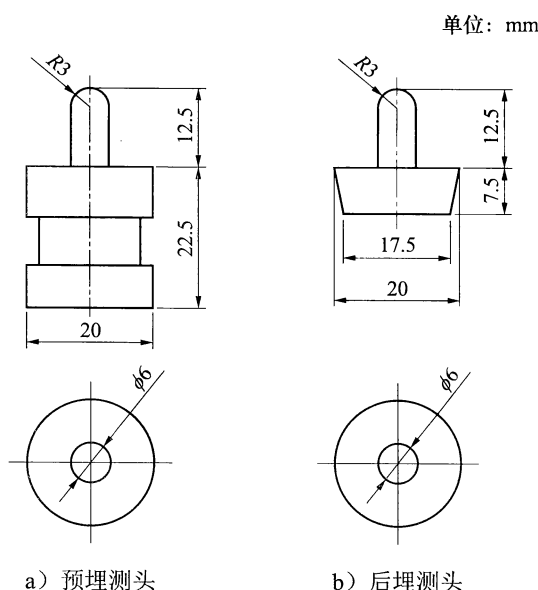


图 18 卧式收缩试验用测头

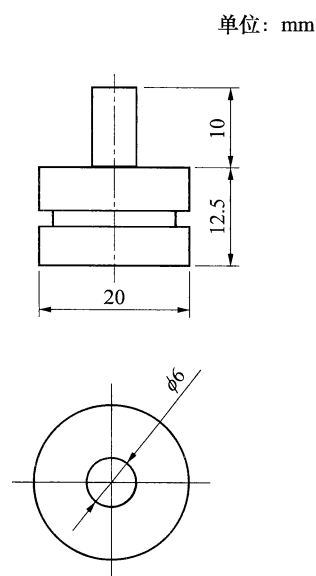


图 19 立式收缩试验用测头

- 采用接触法引伸仪时，所用试件的长度应至少比仪器的测量标距长出一个截面边长。测头应粘贴在试件两侧面的轴线上。
- 使用混凝土收缩仪时，制作试件的试模应具有能固定测头或预留凹槽的端板。使用接触法引伸仪时，可用一般棱柱体试模制作试件。

5.8.3.3 收缩试验应在恒温恒湿环境中进行，室温应保持在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度应保持在 $(60 \pm 5)\%$ 。试件应放置在不吸水的搁架上，底面应架空，每个试件之间的间隙应大于 30mm。

5.8.3.4 测定代表某一混凝土收缩性能的特征值时，试件应在 3d 龄期时（从混凝土搅拌加水时算起）从标准养护室取出，并应立即移入恒温恒湿室测定其初始长度，此后应至少按下列规定的时间间隔测量其变形读数：1、3、7、14、28、45、60、90、120、150、180、360d（从移入恒温恒湿室内计时）。

5.8.3.5 测定混凝土在某一具体条件下的相对收缩值时（包括在徐变试验时的混凝土收缩变形测定）应按要求的条件进行试验。对非标准养护试件，当需要移入恒温恒湿室进行试验时，应先在室内预置 4h，再测其初始值。测量时应记下试件的初始干湿状态。

5.8.3.6 收缩测量前应先用标准杆校正仪表的零点，并应在测定过程中至少再复核 1 次～2 次，其中一次应在全部试件测读完后进行。当复核时发现零点与原值的偏差超过 $\pm 0.001\text{mm}$ 时，应调零后重新测量。

5.8.3.7 试件每次在卧式收缩仪上放置的位置和方向均应保持一致。试件上应标明相应的方向记号。试件在放置及取出时应轻稳仔细，不得碰撞表架及表杆。当发生碰撞时，应取下试件，并应重新以标准杆复核零点。

5.8.3.8 采用立式混凝土收缩仪时，整套测试装置应放在不易受外部振动影响的地方。读数时宜轻敲仪表或者上下滑动测头。安装立式混凝土收缩仪的测试台应有减震装置。

5.8.3.9 用接触法引伸仪测量时，应使每次测量时试件与仪表保持相对固定的位置和方向。每次读数应重复 3 次。

5.8.4 试验结果处理

5.8.4.1 混凝土收缩率按公式 (36) 计算（精确至 1×10^{-6} ）

$$\varepsilon_{st} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (36)$$

式中：

ε_{st} ——试验期为 t d 的混凝土收缩率， t 从测定初始长度时算起；

L_0 ——试件长度的初始读数，mm；

L_t ——试件在试验期为 t d 时测得的长度读数，mm；

L_b ——试件的测量标距，用混凝土收缩仪测量时应等于两测头内侧的距离，即等于混凝土试件长度（不计测头凸出部分）减去两个测头埋入深度之和，mm。采用接触法引伸仪时，即为仪器的测量标距。

5.8.4.2 取一组三个试件收缩率的平均值作为该组混凝土试件的收缩率测定值。

5.8.4.3 作为相互比较的混凝土收缩率值应为不密封试件于 180d 所测得的收缩率值。可将不密封试件于 360d 所测得的收缩率值作为该混凝土的终极收缩率值。

5.9 混凝土自生体积变形试验

5.9.1 适用范围

本试验用于测定混凝土在恒温绝湿和无外荷载的条件下，仅仅由于胶凝材料的水化作用引起的体积变形，即自生体积变形。

5.9.2 仪器设备

5.9.2.1 测量仪表：

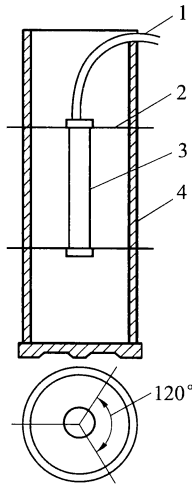
a) 差动式电阻应变计（长度应不小于骨料最大粒径的 3 倍），水工比例电桥等。精度不大于 4×10^{-6} 。

b) 应变计率定设备：包括应变计率定器、恒温水槽、标准温度计（ $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，精度 0.1°C ）、绝缘电阻表。

5.9.2.2 密封试件桶：用镀锌板或其他密封材料制作。尺寸为直径 200mm、高度（500～600）mm。

5.9.3 试验方法

5.9.3.1 检查和率定应变计，合格后方能使用。把率定好的应变计垂直固定在试模中心，见图 20。



1—电缆；2—24 号铅丝；3—应变计；4—铁模

图 20 应变计安装示意图

5.9.3.2 密封试件桶在试验前应进行严格检查，要求密封桶不渗水不透气。在密封桶内壁衬一层厚约（1~2）mm 橡皮板或涂抹一层厚约（0.3~0.5）mm 沥青隔离层。

5.9.3.3 将应变计垂直固定在试件桶中心，并注意在成型时不应使应变计损坏。

5.9.3.4 成型试件前、后，量测应变计的电阻及电阻比，做好记录。

5.9.3.5 按 4.1 给出的要求拌制混凝土，拌和物中粒径超过 37.5mm 的骨料需用湿筛法剔除，并记录试件灰浆率。

5.9.3.6 将混凝土拌和物分三层装入密封桶内，人工插捣或振动台振捣密实。每组试件两个。

5.9.3.7 试件成型后，应尽快将密封桶的盖板紧贴试件端部盖好，周边及应变计电缆出口处应密封，以防止试件水分散失。

5.9.3.8 试件密封后应及时量测应变计的电阻及电阻比，并将试件放置在温度为（20±2）℃的环境中养护，避免振动。

5.9.3.9 基准值的选定：除有特殊要求外，一般以成型后 24h 应变计的测值为基准值。

5.9.3.10 测量时间：成型后 2、6、12、24h 各量测应变计电阻及电阻比一次，以后每天量测一次至两周，然后每周量测一次至二次，半年之后每月量测一次至二次，龄期为 1 年。

5.9.4 试验结果处理

5.9.4.1 混凝土自生体积变形按公式（37）和公式（38）计算（精确至 1×10^{-6} ）

$$G_t = f(Z - Z_0) + (b - a)(T - T_0) \tag{37}$$

$$T = a'(R - R_0) \tag{38}$$

式中：

G_t ——混凝土自生体积变形， 10^{-6} ；

f ——应变计应变灵敏度， $10^{-6}/(0.01\%)$ ；

Z ——测量的电阻比，0.01%；

Z_0 ——电阻比基准值，0.01%；

b ——应变计温度补偿系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

a ——混凝土线膨胀系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

T ——实测温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_0 ——温度基准值, $^{\circ}\text{C}$;

a' ——应变计温度灵敏度系数, $^{\circ}\text{C}/\Omega$;

R ——观测电阻, Ω ;

R_0 —— 0°C 电阻, Ω 。

5.9.4.2 取两个或两个以上试件测值的平均值作为试验结果。试验记录格式见表 3。

表 3 混凝土自生体积变形试验记录表

试件编号_____			成型日期_____			R_0 _____			f _____			T_0 _____		
仪器编号_____			混凝土线膨胀系数_____			a _____			$a'b$ _____			Z_0 _____		
时间			R	ΔR	T	ΔT	Z	ΔZ	$f\Delta Z$	$b\Delta T$	G_0	$a\Delta T$	G_t	备注
1			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
月	日	时	Ω	$R-R_0$	$a'\Delta R$	$T-T_0$	仪器 读数	$Z-Z_0$	$f\times$ $(Z-Z_0)$	$b\times$ $(T-T_0)$	$f\times$ $(Z-Z_0)$ $+b\times$ $(T-T_0)$	$a\times$ $(T-T_0)$	$f\times$ $(Z-Z_0)$ $+b\times$ $(T-T_0)$ $-a(T-T_0)$	

试验者:

计算者:

校核者:

5.10 混凝土导温系数测定

5.10.1 适用范围

本试验用于测定混凝土的导温系数。

5.10.2 仪器设备

5.10.2.1 导温仪: 示意图见图 21。

5.10.2.2 试模: 圆柱形铁模, 直径 200mm, 高 400mm。试模附有一支架, 以便在试件中心固定直径为 10mm 的插入试模内深度为 200mm 的铁杆, 作为量测试件中心温度的预留孔。

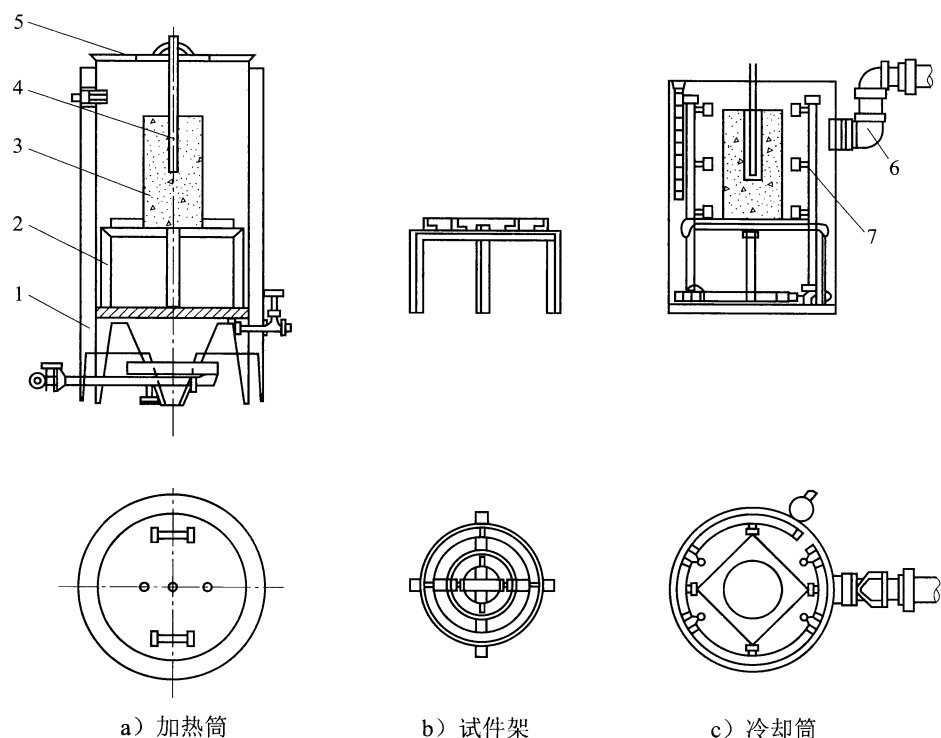
5.10.2.3 测温计, 量程 ($0\sim 100$) $^{\circ}\text{C}$ 、精度 0.1°C 。如用水银温度计, 水银球到刻度起点的距离须大于 250mm。时钟、石棉线、胶布、变压器油等。

5.10.3 试验方法

5.10.3.1 按 4.1 给出的要求制备混凝土拌和物。如骨料粒径大于 37.5mm, 应用湿筛法剔除。

5.10.3.2 将拌好的混凝土分三层装入试模内, 每层用捣棒插捣 40 次 (或用振动台振实)。第一层混凝土装入后, 安上支架, 将铁杆插入试模中, 并固定在中心部位, 再浇捣第二层和第三层。试验以两个试件为一组。

5.10.3.3 成型后 (1~2) h 抹面, 约 4h 后将埋入的铁杆轻轻转动 (不得上下移动), 以免与混凝土黏结。 (1~2) d 后拔出铁杆拆模, 编号, 将试件放到标准养护室至少养护 7d, 即可用于试验。



1—保温外桶；2—试件架；3—试件；4—测温计；5—桶盖；6—排水管；7—冷却水管及喷嘴

图 21 混凝土导温仪示意图

5.10.3.4 试验前一天，取出试件，在顶面靠近中心孔周围凿毛，用湿布抹净，向孔内注放变压器油，放入测温元件，使测头浸没在油中，用石棉线将孔口塞紧，用胶布固定好，并用水泥净浆（橡皮泥）严密封口。

5.10.3.5 试验时，将试件安放在试架上，连架一起放入加热桶中，加水没过试件顶面 50mm 以上，盖上桶盖，启动加热器和搅拌器，将桶中的水加热至（60~70）℃，待试件中心温度与水温完全相等时停止加热和搅拌。如要测得不同温度的导温系数，可分别加热至所需的温度。

5.10.3.6 在冷却水桶内注满水，并使其不断流动，以达水温均匀一致。

5.10.3.7 将经加热且温度均匀一致的试件，迅速连同试件架一起放入冷却水桶内（水面应高出试件顶面 50mm 以上），立即迅速、准确地测读试件中心温度和冷却水温，并开始计时，以后每隔 5min 测读一次，直到试件中心温度与冷却水水温相差（3~6）℃为止（一般需 1h 左右）。

5.10.4 试验结果处理

5.10.4.1 根据记录计算试件中心温度与冷却水温度的初始温差 θ_0 及两者在任意时刻的温差 θ 。

5.10.4.2 导温系数可根据记录计算的初始温差 θ_0 及任意时刻的温差 θ 按下述步骤计算而得。

- a) 以冷却时间 t 为横坐标， $\ln\theta$ 为纵坐标，选择两个点，设温度为 θ_a 、 θ_b ，相应的时间为 t_a 、 t_b ，按公式（39）计算冷却率 m （℃/h）

$$m = \frac{\ln\theta_a - \ln\theta_b}{t_b - t_a} \quad (39)$$

- b) 按公式（40）计算试件形状系数 K （m²）

$$K = \frac{1}{(2.404\ 8/R)^2 + (\pi/L)^2} \quad (40)$$

式中：

R ——试件的半径，m；

L ——试件的高度，m。

c) 按公式 (41) 计算导温系数 a (m^2/h):

$$a = Km \quad (41)$$

取两个试件测值的平均值作为试验结果。

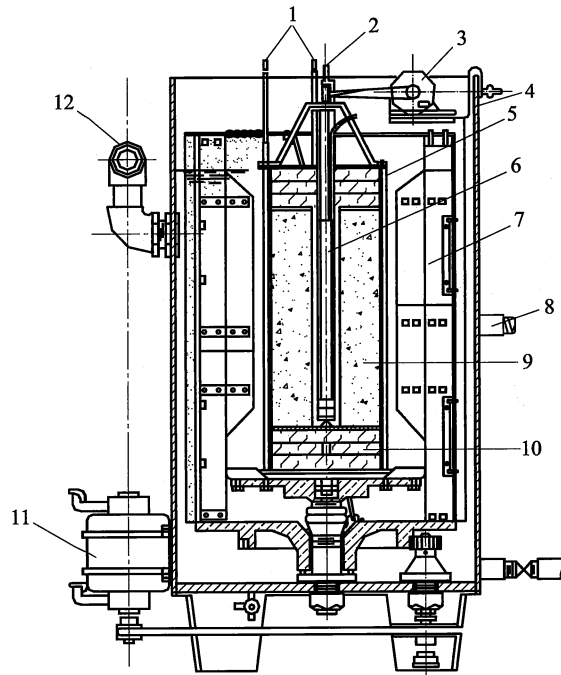
5.11 混凝土导热系数测定

5.11.1 适用范围

本试验用于测定混凝土的导热系数。

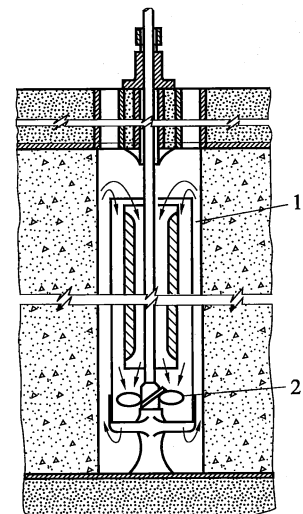
5.11.2 仪器设备

5.11.2.1 导热仪示意图见图 22，加热器安装示意图见图 23。



1—温度计；2—搅拌器轴；3—搅拌器马达；4—冷却桶；
5—试件架；6—加热器；7—搅拌叶片；8—进水管；9—试件；
10—软木；11—马达；12—出水管

图 22 导热仪示意图



1—加热器；2—搅拌器叶片

图 23 加热器安装示意图

5.11.2.2 测温计：(0~100) °C，精度 0.1°C。如用玻璃水银温度计，水银球至读数起点的距离应大于 250mm。

5.11.2.3 试模：圆柱形铁模，直径 200mm、高 400mm。试模附有支架，用以固定埋设贯穿整个试件中心的直径为 40mm 的铁杆。

5.11.3 试验方法

5.11.3.1 试件的成型，养护与 5.10 给出的要求相同，每组试件为两个。

- 5.11.3.2 试验时按图 22、图 23 将试件安放在试件架上（软木应先用石蜡液浸渍）。向试件内腔灌水，水面比试件顶面低（10~20）mm。
- 5.11.3.3 接通冷却水源，向桶中放水，使水面与试件顶面齐平，然后开动大叶片搅拌器，此时，靠试件处水位降低，应继续放水，使中部水位与试件顶面齐平。调节控制好进出水量，使整个试验过程的水位不变。
- 5.11.3.4 接通加热器开关，开动试件内腔小搅拌器使内腔温度均匀一致。控制加热器的电压和电流，一般电压为（50~100）V，电流为（1.5~2.0）A，并使其稳定下来。观测试件中心温度上升情况，以及仪器运转是否正常。
- 5.11.3.5 接通加热器后 1h 左右，每隔 10min 测读一次冷却水温、混凝土中心温度以及电压、电流，直至电压、电流及混凝土中心温度稳定为止。一般需测读 10 次。

5.11.4 试验结果处理

5.11.4.1 导热系数按公式（42）计算

$$\lambda = \frac{Q \ln(a/b)}{2\pi L(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{3.617W \ln(a/b)}{2\pi L(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{2.316W}{\theta_2 - \theta_1} \tag{42}$$

- 式中：
- λ ——混凝土导热系数，kJ/（m·h·℃）；
 - Q ——试件由中心向四周单位时间内的传热量，为 3.617W，kJ/h；
 - a ——试件外径，m；
 - b ——试件内孔径，m；
 - L ——试件高度，m；
 - θ_1 ——冷却水温，℃；
 - θ_2 ——试件中心水温，℃；
 - W ——电热功率，为电流与电压乘积，W。

注：由于开始一段时间读数规律性较差，一般计算选用自记录温度起 30min 以后的各次读数来计算。

5.11.4.2 取各次导热系数测值的平均值为该试件的导热系数。以两个试件导热系数的平均值作为试验结果。试验记录格式见表 4。

表 4 混凝土导热系数记录计算表

试件编号_____ 成型日期_____ 试验日期_____

混凝土配合比_____ 骨料最大粒径_____ 掺和料外加剂_____

时间 h: min	冷却水 温度 θ_1 ℃	试件中心温 度 θ_2 ℃	温差 $\theta_2 - \theta_1$ ℃	电压 V	电流 A	加热功率 W	导热系数 $\lambda = \frac{2.316W}{\theta_2 - \theta_1}$ kJ/(m·h·℃)	备注

观测者：_____ 计算者：_____ 校核者：_____

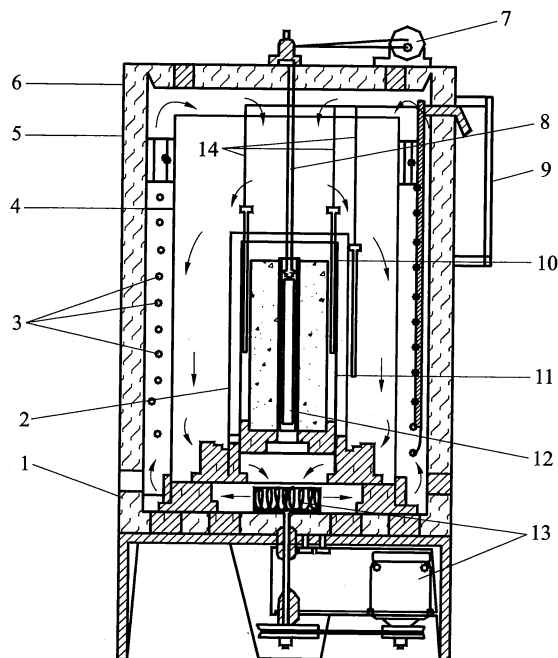
5.12 混凝土比热测定（绝热法）

5.12.1 适用范围

本试验用于测定混凝土的比热。

5.12.2 仪器设备

5.12.2.1 比热仪示意图见图 24。



1—软木垫块；2—隔离桶；3—加热丝；4—圆筒型空气挡板；5—保温桶；6—隔热材料；7—搅拌器马达；
8—搅拌器；9—控制箱；10—2.5mm 空气层；11—试件桶；12—加热器；13—鼓风机及马达；14—温度计

图 24 比热仪示意图

5.12.2.2 试模：圆柱形金属试模，直径 200mm，高 400mm，附有支架以固定试件中心埋杆，埋杆直径 40mm，贯穿整个试件。

5.12.2.3 时钟，磅秤（称量 50kg、感量 50g）。

5.12.3 试验方法

5.12.3.1 试件成型、养护与 5.10 给出的要求相同。试验以两个试件为一组。

5.12.3.2 试验前，从养护室取出试件，擦干表面水分，称量。

5.12.3.3 将试件及其他设备按图安装好，并往试件桶内装水，使水面高出试件顶面（20~30）mm。记录装入的水量（精确到 10g）。

5.12.3.4 约 4h 后，当试件桶内的温度与保温桶内温度稳定一致时，表示比热仪内试件温度、水温 and 气温已达平衡。此时测出的温度即为试件的初始温度（ θ_1 ），与此同时也测读瓦时表的初始读数。

5.12.3.5 接通加热器及搅拌器的电源并开始计时。同时接通鼓风马达及空气加热丝电源，使保温桶内空气与试件桶内的水温相等。待水温上升（10~15）℃时，关闭加热器，只让搅拌器运转，经（1.5~2.0）h，使试件温度均匀，读取试件桶内温度计的读数（ θ_2 ），并记录时间及瓦时表读数。至此，一次加热操作完毕。

5.12.3.6 按上述加热操作步骤对试件再加热两次。

5.12.4 试验结果处理

5.12.4.1 比热 c 的计算步骤如下。

a) 加热器供热：每次加热所消耗的电量（W·h）乘以 3.617 [kJ/（W·h）] 即为每次加热器的供

热量 q_1 (kJ)。

b) 搅拌器供热: 搅拌器搅拌常数乘以搅拌时间 (h), 即为每次搅拌器供热量 q_2 (kJ)。

注: 搅拌器常数与搅拌器形状尺寸及转速有关。按美国垦务局混凝土比热仪图纸制造的搅拌器常数为 6.752kJ/h, 自制的应另行测定。

c) 试件桶吸热: 试件桶的吸热常数 4.254kJ/°C, 乘以每次加热的温升值 ($\theta_2 - \theta_1$) 即为试件桶所吸收的热量 q_3 (kJ)。

d) 水吸热: 水的比热乘以用水量再乘以每次加热的温升值 ($\theta_2 - \theta_1$), 即为水所吸收的热量 q_4 (kJ)。

e) 试件吸热: 令为 Q (kJ), 按公式 (43) 和公式 (44) 计算:

$$Q = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 \quad (43)$$

$$Q = M \left[C_0(\theta_2 - \theta_1) + \frac{C_1}{2}(\theta_2^2 - \theta_1^2) + \frac{C_2}{3}(\theta_2^3 - \theta_1^3) \right] \quad (44)$$

式中:

M —— 试件的质量, kg;

C_0 、 C_1 、 C_2 —— 待求的系数;

θ_1 、 θ_2 —— 每次加热的初温和终温, °C。

连续加热三次就可得到三个三元一次方程, 联立求解即可求出 C_0 、 C_1 、 C_2 之值。

f) $c = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2$, 即得比热 c 随温度 θ 变化表达式。此式在试验温度范围内有效。

取两个试件测值的平均值作为试验结果。

5.13 混凝土线膨胀系数测定

5.13.1 适用范围

本试验用于测定混凝土的线膨胀系数。

5.13.2 仪器设备

5.13.2.1 带有搅拌器的自动控制恒温水箱, 大小视一次试验试件的多少而定。要求箱内水面没过试件筒顶 50mm 左右, 温度控制精度 0.5°C 以内。

5.13.2.2 量测仪器: 差动式电阻应变计, 测距 250mm; 水工比例电桥; 长杆温度计, 测温范围 (0~100) °C、精度 0.1°C。

5.13.2.3 试模: 直径 200mm、高 500mm 的带盖白铁皮筒。

5.13.2.4 (2~3) mm 厚的橡胶皮、胶布等。

5.13.3 试验方法

5.13.3.1 按 5.9 给出的方法进行试件的制作和养护, 每组试件为两个。测完混凝土自身体积变形的试件, 也可用于本试验。

5.13.3.2 将至少养护 7d 后的试件放入恒温水箱内, 箱中水面应没过试件顶面 50mm 以上。水的起始温度可为 (10~20) °C。

5.13.3.3 控制水温使其恒定。量测应变计的电阻和电阻比, 并用温度计测读水温。当试件中心温度与水温一致时记下读数, 即为试验初始温度的测值。恒温的标准是相隔 1h 温度不得超过 0.1°C。为使箱中的水温均匀, 必须经常开动搅拌器。

5.13.3.4 调整恒温箱温度控制器, 使水温上升到 60°C 左右, 恒温后记下试件中心温度与水温一致时的电阻、电阻比和水温, 即为试验终止时的测值。

5.13.4 试验结果处理

5.13.4.1 试件的中心温度及应变值分别按公式 (45) 和公式 (46) 计算

$$\theta = a'(R_t - R_0) \quad (45)$$

$$\varepsilon_m = f'\Delta Z + ba'(R_t - R_0) \quad (46)$$

式中:

θ —— 试件的中心温度, $^{\circ}\text{C}$;

a' —— 仪器温度灵敏度系数, $^{\circ}\text{C}/\Omega$;

R_t —— 试验终止时仪器的电阻, Ω ;

R_0 —— 试验开始时仪器的电阻, Ω ;

ε_m —— 混凝土试件的应变值, 10^{-6} ;

f' —— 应变计灵敏度, $10^{-6}/0.01\%$;

ΔZ —— 电阻比变化量, 即试验终止温度的电阻比与初始温度电阻比之差值;

b —— 仪器温度补偿系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

5.13.4.2 混凝土的线膨胀系数按公式 (47) 计算 (精确至 $0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

$$\alpha = \frac{\varepsilon_m}{\Delta\theta} \quad (47)$$

式中:

α —— 混凝土线膨胀系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

$\Delta\theta$ —— 试验终止温度与初始温度之差, $^{\circ}\text{C}$ 。

取两个试件测值的平均值作为试验结果。

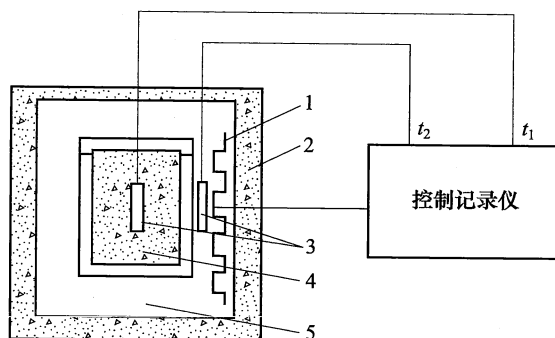
5.14 混凝土绝热温升试验

5.14.1 适用范围

本试验用于在绝热条件下, 测定混凝土在水化过程中的温度变化及最高温升值。

5.14.2 仪器设备

5.14.2.1 绝热温升测定仪: 仪器的绝热室要求达到绝热试验条件, 即胶凝材料水化所产生的热量与外界不发生热交换。仪器由绝热养护箱和控制记录仪两部分组成, 工作原理见图 25。绝热室温度跟踪试样中心温度, 相差不大于 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。试验温度 ($5 \sim 80$) $^{\circ}\text{C}$, 温度读数精度 0.1°C 。凡满足上述技术条件的绝热温升测定仪皆可用于混凝土的绝热温升试验。



1—加热器; 2—保温隔热层; 3—测温元件; 4—混凝土试件; 5—控温层

图 25 绝热温升测定仪工作原理

5.14.2.2 容器：容器用钢板制成，顶盖具有橡胶封圈。容器尺寸应大于最大骨料粒径的三倍。

5.14.2.3 恒温室：(20±2)℃。

5.14.2.4 磅秤、捣棒及放测温探头的紫铜测温管或玻璃管等。管的尺寸要求内径稍大于测温探头直径，长度为试件高的二分之一。

5.14.3 试验方法

5.14.3.1 试验前应根据仪器使用说明书检查仪器工作是否正常，温度跟踪精度是否满足±0.1℃要求。在容器内盛入比室温高(25~30)℃的水，至离上口20mm处。按正常试验规定将容器放入绝热室内，然后开始试验。如仪器工作正常，72h或更长时间水温应保持恒定(在跟踪精度±0.1℃以内)，如果水温不能保持恒定(超出跟踪精度±0.1℃)，则应按仪器使用说明书规定，对仪器进行调整。重复上述试验，直至满足要求。

5.14.3.2 试验前24h应将混凝土拌和用料，放在(20±5)℃的室内，使其温度与室温一致。如对拌和物浇筑温度有专门要求时，则按要求控制拌和物的初始温度。

5.14.3.3 按4.1给出的要求拌制混凝土拌和物，量测拌和物温度，然后分两层装入容器中。人工捣实按5.1的有关规定进行。在容器中心埋入一根紫铜测温管或玻璃管，然后盖上容器上盖，全部密封。测温管中盛入少许变压器油。

5.14.3.4 试样容器送入绝热室内，按仪器使用说明书规定，将测温元件(温度传感器，或温度计)装入测温管中。

5.14.3.5 开始试验，控制绝热室温度与试样中心温度相差不大于±0.1℃。每0.5h记录一次试样中心温度，历时24h后每1h记录一次，7d后可(3~6)h记录一次。试验历时28d(或根据需要确定天数)结束。

5.14.3.6 试件从拌和、成型到开始测读温度，一般应在30min内完成。

5.14.4 试验结果处理

5.14.4.1 绝热温升值按公式(48)计算

$$\theta_n = \frac{C_k + C_m}{C_k} (\theta'_n - \theta_0) \quad (48)$$

式中：

θ_n —— n 天龄期混凝土绝热温升值，℃；

θ'_n —— n 天龄期仪器记录的温升值，℃；

θ_0 ——混凝土拌和物的初始温度，℃；

C_k ——混凝土试件的质量与混凝土平均比热的乘积，kJ/℃；

C_m ——绝热量热器的总热容量，由厂家提供。如自制仪器可按 $C_m = \sum G_i C_i$ 进行计算， G_i 为各附件(容器、测温管、测温元件和变压器油)质量(kg)， C_i 为各附件材料的比热，kJ/℃。

5.14.4.2 以时间为横坐标，温升为纵坐标绘制混凝土温升过程线，根据曲线即可查得各不同龄期的混凝土绝热温升值。

5.15 混凝土抗水渗透试验

5.15.1 渗水高度法

5.15.1.1 适用范围

本试验适用于以测定硬化混凝土在恒定水压力下的平均渗水高度来表示的混凝土抗水渗透性能。

5.15.1.2 仪器设备

5.15.1.2.1 混凝土抗渗仪：应符合 JG/T 249 的规定。

5.15.1.2.2 试模：规格为上口内部直径 175mm，下口内部直径 185mm，高 150mm 的圆台体。

5.15.1.2.3 密封材料：宜用石蜡加松香或水泥加黄油等材料，也可采用橡胶套等其他密封材料。

5.15.1.2.4 梯形板：应采用尺寸为 200mm×200mm 透明材料制成，并应画有十条等间距、垂直于梯形底线的直线，见图 26。

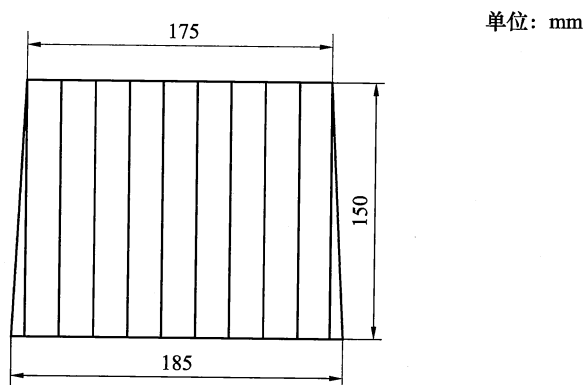


图 26 梯形板示意图

5.15.1.2.5 钢尺的分度值应为 1mm；钟表的分度值应为 1min。

5.15.1.2.6 其他辅助设备：螺旋加压器、烘箱、电炉、浅盘、铁锅、钢丝刷等。

5.15.1.2.7 安装试件的加压设备可为螺旋加压或其他加压形式，其压力应能保证将试件压入试件套内。

5.15.1.3 试验方法

5.15.1.3.1 按 4.1 和 5.1 给出的要求进行试件的制作和养护，六个试件为一组。

5.15.1.3.2 试件拆模后，用钢丝刷刷去两端面的水泥浆膜，并应立即将试件送入标准养护室进行养护。试件刷毛时间宜在 (24~48) h 内进行，刷毛后应在试件顶面编号。

5.15.1.3.3 抗水渗透试验的龄期宜为 28d。应在到达试验龄期的前一天，从养护室取出试件，并擦拭干净。待试件表面晾干后，应按下列方法进行试件密封：

- a) 当用石蜡密封时，应在试件侧面裹涂一层熔化的内加少量松香的石蜡。然后用螺旋加压器将试件压入经过烘箱或电炉预热过的试模中，使试件与试模底平齐，并应在试模变冷后解除压力。试模的预热温度，应以石蜡接触试模，即缓慢熔化，但不流淌为准。
- b) 用水泥加黄油密封时，其质量比应为 (2.5~3):1。应用三角刀将密封材料均匀地刮涂在试件侧面上，厚约 (1~2) mm。应套上试模并将试件压入，使试件与试模底平齐。
- c) 试件密封也可以采用其他可靠的方式密封。

5.15.1.3.4 试件准备好后，启动抗渗仪，并开通六个试位下的阀门，使水从六个孔中渗出，水应充满试位坑。在关闭六个试位下阀门后应将密封好的试件安装在抗渗仪上。

5.15.1.3.5 试件安装好后，应立即开通六个试位下的阀门，使水压在 24h 内恒定控制在 (1.2 ± 0.05) MPa，且加压过程不应大于 5min，应以达到稳定压力的时间作为试验记录起始时间（精确至 1min），在稳压过程中随时观察试件端面的渗水情况，当有某一个试件端面出现渗水时，应停止该试件的试验并应记录时间，并以试件的高度作为该试件的渗水高度。对于试件端面未出现渗水的情况，应在试验 24h 后停止试验，并及时取出试件。在试验过程中，当发现水从试件周边渗出时，应重新按本规程第 5.15.1.3.3 条的规定进行密封。

5.15.1.3.6 将从抗渗仪上取出来的试件放在压力机上，并应在试件上下两端面中心处沿直径方向各放一根直径为 6mm 的钢垫条，并确保它们在同一竖直平面内。然后开动压力机，将试件沿纵断面劈裂为两半。试件劈开后，应用防水笔描出水痕。

5.15.1.3.7 应将梯形板放在试件劈裂面上，并用钢尺沿水痕等间距量测 10 个测点的渗水高度值，读数应精确至 1mm。当读数时若遇到某测点被骨料阻挡，可以靠近骨料两端的渗水高度平均值来作为该测点的渗水高度。

5.15.1.4 试验结果处理

5.15.1.4.1 试件渗水高度按公式 (49) 计算

$$\bar{h}_i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} h_j \quad (49)$$

式中：

\bar{h}_i ——第 i 个试件的平均渗水高度，mm；

h_j ——第 i 个试件第 j 个测点处渗水高度，mm。

应以 10 个测点渗水高度的平均值作为该试件渗水高度的测定值。

5.15.1.4.2 一组试件的平均渗水高度按公式 (50) 计算

$$\bar{h} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \bar{h}_i \quad (50)$$

式中：

\bar{h} ——一组 6 个试件的平均渗水高度，mm。

应以一组 6 个试件渗水高度的平均值作为该组试件渗水高度的测定值。

5.15.2 逐级加压法

5.15.2.1 适用范围

本试验适用于通过逐级施加水压力来测定以抗渗等级表示的混凝土的抗水渗透性能。

5.15.2.2 仪器设备

符合本规程 5.15.1 的规定。

5.15.2.3 试验方法

5.15.2.3.1 试件的成型、养护、密封、安装等按 5.15.1 的有关规定进行。

5.15.2.3.2 试验时，水压应从 0.1MPa 开始，以后每隔 8h 增加 0.1MPa 水压，并随时观察试件端面渗水情况。当 6 个试件中有 3 个试件表面出现渗水时，或加至规定压力（设计抗渗等级）在 8h 内 6 个试件中表面渗水试件少于 3 个时，即可停止试验，并记下此时的水压力。在试验过程中，当发现水从试件周边渗出时，应重新按本规程第 5.15.1.3.3 条的规定进行密封。

5.15.2.4 试验结果处理

混凝土的抗渗等级，以每组 6 个试件中有 4 个试件未出现渗水时的最大水压力乘以 10 来确定。混凝土的抗渗等级按公式 (51) 计算

$$P = 10H - 1 \quad (51)$$

式中：

P ——混凝土抗渗等级；

H ——6个试件中有3个试件渗水时的水压力，MPa。

5.16 混凝土抗冻性试验

5.16.1 快冻法

5.16.1.1 适用范围

本试验用于测定混凝土试件在水冻水融条件下，以经受的快速冻融循环次数来表示的混凝土抗冻性能。

5.16.1.2 仪器设备

5.16.1.2.1 快速冻融装置应符合 JG/T 243 的规定。除应在测温试件中埋设温度传感器外，尚应在冻融箱内防冻液中心、中心与任何一个对角线的两端分别设温度传感器。运转时冻融箱内防冻液各点温度的极差不得超过 2°C 。

a) 试件中心最低和最高温度应分别控制在 $(-18 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(5 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 内。

b) 冻融液温度为 $(-25 \sim 20)^{\circ}\text{C}$ 。

c) 冻融循环一次历时不超过 4h（融化时间不少于整个冻融历时的 1/4）。

5.16.1.2.2 试件盒：采用具有弹性的橡胶材料制作，其内表面底部应有半径为 3mm 橡胶凸起部分。盒内加水后水面至少高出试件顶面 5mm。试件盒横截面尺寸宜为 $115\text{mm} \times 115\text{mm}$ ，试件盒长度宜为 500mm。橡胶试件盒横截面示意图见图 27。

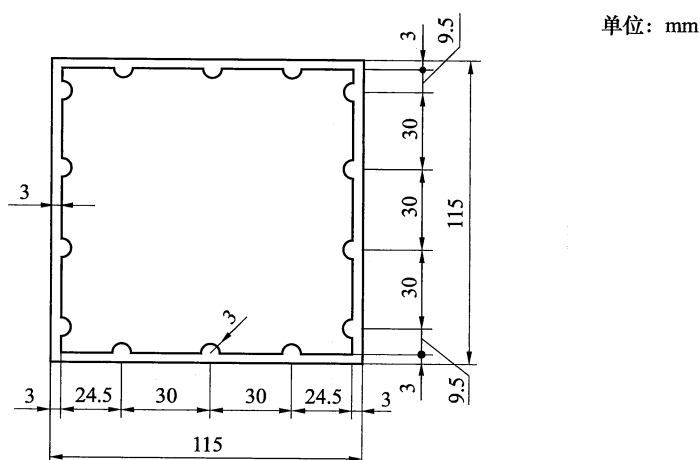


图 27 橡胶试件盒横截面示意图

5.16.1.2.3 动弹性模量测定仪：输出频率可调范围应为 $(100 \sim 20000)$ Hz，输出功率应能使试件产生受迫振动。

5.16.1.2.4 台秤：称量 20kg、感量 5g。

5.16.1.2.5 试模：规格为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体。

5.16.1.2.6 温度传感器（包括热电偶、电位差计等）应在 $(-20 \sim 20)^{\circ}\text{C}$ 范围内测定试件中心温度，且测量精度应为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

5.16.1.3 试验方法

5.16.1.3.1 按 5.1 给出的要求成型试件，试验以 3 个试件为一组。成型试件时，不得采用憎水性脱模剂。

除制作冻融试验的试件外，尚应制作同样形状、尺寸，且中心埋有温度传感器的测温试件，测温试件应采用防冻液作为冻融介质。测温试件所用混凝土的抗冻性能应高于冻融试件。测温试件的温度传感器应埋设在试件中心。温度传感器不应采用钻孔后插入的方式埋设。

5.16.1.3.2 在标准养护室内或同条件养护的试件应在养护龄期为 24d 时提前将冻融试验的试件从养护地点取出，随后应将冻融试件放在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中浸泡，浸泡时水面应高出试件顶面 $(20 \sim 30)$ mm。在水中浸泡时间应为 4d，试件应在 28d 龄期时开始进行冻融试验。始终在水中养护的试件，当试件养护龄期达到 28d 时，可直接进行后续试验。对此种情况，应在试验报告中予以说明。

5.16.1.3.3 当试件养护龄期达到 28d 时应及时取出试件，用湿布擦除表面水分后应对外观尺寸进行测量，试件外观尺寸应满足试件的相邻面的夹角为 90° ，其公差不得超过 0.5° ，各边长和高的尺寸公差不得超过 1mm 等要求，并应编号、称量试件初始质量 W_{0i} 。然后应按本规程 5.17 的有关规定测定其横向基频的初始值 f_{0i} 。

5.16.1.3.4 将试件放入试件盒内，试件应位于试件盒中心，然后将试件盒放入冻融箱内的试件架中，并向试件盒内注入清水。在整个试验过程中，盒内水位高度应始终保持至少高出试件顶面 5mm。测温试件盒应放在冻融箱的中心位置。

5.16.1.3.5 冻融循环过程应符合下列规定：

- 每次冻融循环应在 $(2 \sim 4)$ h 内完成，且用于融化的时间不得少于整个冻融循环时间的 1/4。
- 在冷冻和融化过程中，试件中心最低和最高温度应分别控制在 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 内。在任意时刻，试件中心温度不得高于 7°C ，且不得低于 -20°C 。
- 每块试件从 3°C 降至 -16°C 所用的时间不得少于冷冻时间的 1/2；每块试件从 -16°C 升至 3°C 所用时间不得少于整个融化时间的 1/2，试件内外的温差不宜超过 28°C 。
- 冷冻和融化之间的转换时间不宜超过 10min。

5.16.1.3.6 每隔 25 次冻融循环宜测量试件的横向基频 f_{ni} 。测量前应先将试件表面浮渣清洗干净并擦干表面水分，然后应检查其外部损伤并称量试件的质量 W_{ni} 。随后应按本规程 5.17 的有关规定测定其横向基频。测完后，应迅速将试件调头重新装入试件盒内并加入清水，继续试验。试件的测量、称重及外观检查应迅速，待测试件应用湿布覆盖。

5.16.1.3.7 当有试件停止试验被取出时，应另用其他试件填充空位。当试件在冷冻状态下因故中断时，试件应保持在冷冻状态，直至恢复冻融试验为止，并应将故障原因及暂停时间在试验结果中注明。试件在非冷冻状态下发生故障的时间不宜超过两个冻融循环的时间。在整个试验过程中，超过两个冻融循环时间的中断故障次数不得超过两次。

5.16.1.3.8 当冻融循环出现以下三种情况之一时，可停止试验：

- 达到规定的冻融循环次数；
- 试件的相对动弹性模量下降到 60%；
- 试件的质量损失率达 5%。

5.16.1.4 试验结果处理

5.16.1.4.1 相对动弹性模量按公式 (52) 计算（精确至 0.1）

$$P_i = \frac{f_{ni}^2}{f_{0i}^2} \times 100\% \quad (52)$$

式中：

P_i ——经 N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的相对动弹性模量，%，精确至 0.1；

f_{ni} ——经 N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的横向基频，Hz；

f_{0i} ——冻融循环试验前第 i 个混凝土试件的横向基频初始值，Hz。

以 3 个试件试验结果的平均值为测定值。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时, 应剔除此值, 并取其余两值的平均值作为测定值; 当最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时, 应取中间值作为测定值。

5.16.1.4.2 单个试件的质量损失率按公式 (53) 计算 (精确至 0.01)

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{0i} - W_{ni}}{W_{0i}} \times 100\% \quad (53)$$

式中:

ΔW_{ni} —— N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量损失率, %, 精确至 0.01;

W_{0i} —— 冻融循环试验前第 i 个混凝土试件的质量, g;

W_{ni} —— N 次冻融循环后第 i 个混凝土试件的质量, g。

5.16.1.4.3 一组试件的平均质量损失率按公式 (54) 计算 (精确至 0.1)

$$\Delta W_n = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta W_{ni}}{3} \times 100\% \quad (54)$$

式中:

ΔW_n —— N 次冻融循环后一组混凝土试件的平均质量损失率, %, 精确至 0.1。

以 3 个试件试验结果的平均值为测定值。当某个值试验结果出现负值, 应取 0, 再取 3 个试件试验结果的平均值。当 3 个值中的最大值或最小值与中间值之差超过 1% 时, 应剔除此值, 并应取其余两值的平均值作为测定值; 当最大值和最小值与中间值之差均超过 1% 时, 应取中间值作为测定值。

5.16.1.4.4 试验结果评定

混凝土抗冻等级 (以 F 表示) 应以相对动弹性模量下降至不低于 60% 或者质量损失率不超过 5% 时的最大冻融循环次数来确定。

5.16.2 单面冻融法 (或称盐冻法)

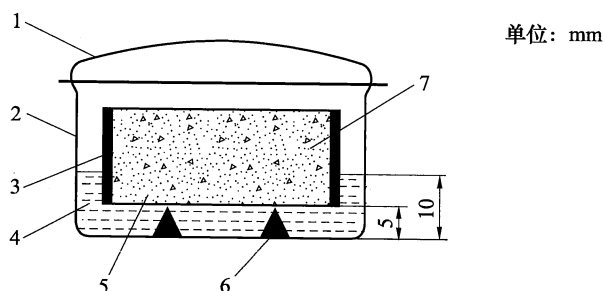
5.16.2.1 适用范围

本试验用于测定混凝土试件在大气环境中且与盐接触的条件下, 以能够经受的冻融循环次数或者表面剥落质量或超声波相对动弹性模量来表示的混凝土抗冻性能。

试验环境条件: 温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $(65 \pm 5)\%$ 。

5.16.2.2 仪器设备

5.16.2.2.1 试件盒: 顶部有盖的试件盒应采用不锈钢制成, 见图 28。容器内的长度应为 $(250 \pm 1)\text{mm}$, 宽度应为 $(200 \pm 1)\text{mm}$, 高度应为 $(120 \pm 1)\text{mm}$ 。容器底部应安置高 $(5 \pm 0.1)\text{mm}$ 不吸水、浸水不变形且在试验过程中不得影响溶液组分的非金属三角垫条或支撑。



1—盖子; 2—箱体; 3—侧向封闭; 4—试验液体; 5—试验表面; 6—垫条; 7—试件

图 28 试件盒示意图

5.16.2.2.2 液面调整装置：由一支吸水管和使液面与试件盒底部间的距离保持在一定范围内的液面自动定位控制装置组成，在使用时，液面调整装置应使液面高度保持在 (10 ± 1) mm。液面调整装置示意图见图 29。

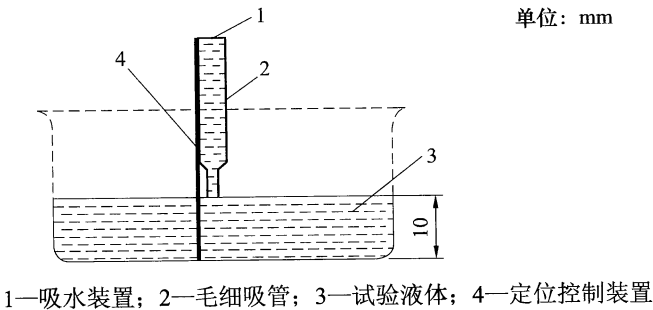


图 29 液面调整装置示意图

5.16.2.2.3 单面冻融试验箱（见图 30）：试件盒应固定在单面冻融试验箱内，并应自动地按规定的冻融循环制度（见图 31）进行冻融循环。冻融循环制度的温度应从 20°C 开始，并应以 $(10\pm 1)^{\circ}\text{C/h}$ 的速度均匀地降至 $(-20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ ，且应维持 3h；然后应从 -20°C 开始，并应以 $(10\pm 1)^{\circ}\text{C/h}$ 的速度均匀地升至 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ ，且应维持 1h。

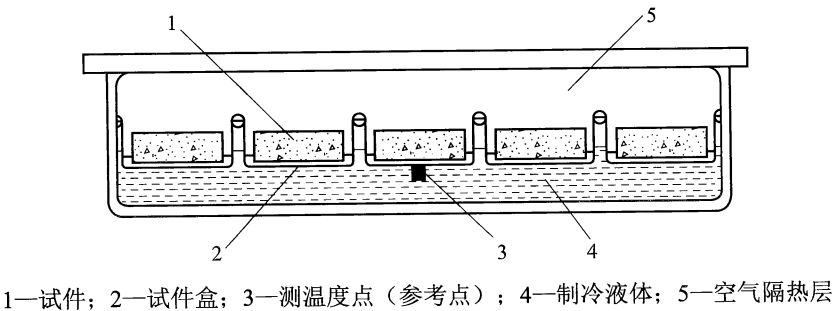


图 30 单面冻融试验箱

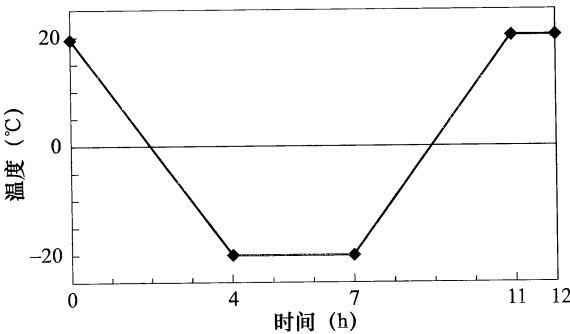
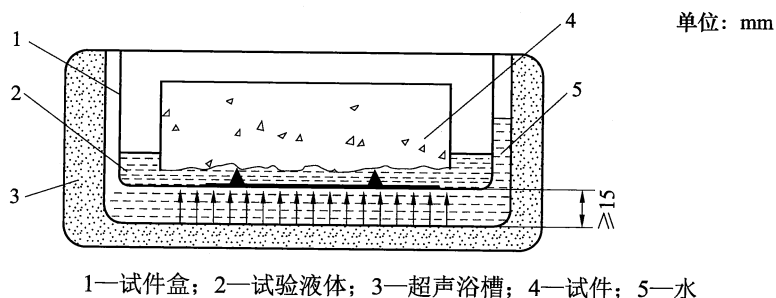


图 31 冻融循环制度

5.16.2.2.4 试件盒的底部浸入冷冻液中的深度应为 (15 ± 2) mm。单面冻融试验箱内应装有可将冷冻液和试件盒上部空间隔开的装置和固定的温度传感器，温度传感器应装在 $50\text{mm}\times 6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的矩形容器内。温度传感器在 0°C 时的测量精度不应低于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ，在冷冻液中测温的时间间隔应为 (6.3 ± 0.8) s。单面冻融试验箱内温度控制精度应为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，当满载运转时，单面冻融试验箱内各点之间的最大温差不得超过 1°C 。单面冻融试验箱连续工作时间不应少于 28d。

5.16.2.2.5 超声浴槽中超声发生器的功率应为 250W，双半波运行下高频峰值功率应为 450W，频率应为 35kHz。超声浴槽的尺寸应使试件盒与超声浴槽之间无机械接触地置于其中，试件盒在超声浴槽中的

位置应符合图 32 的规定, 且试件盒和超声浴槽底部的距离不应小于 15mm。



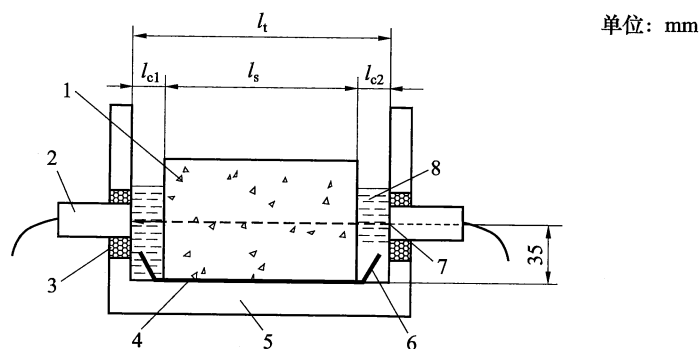
1—试件盒；2—试验液体；3—超声浴槽；4—试件；5—水

图 32 试件盒在超声浴槽中的位置

5.16.2.2.6 超声波测试仪：频率（50~150）kHz。

5.16.2.2.7 不锈钢盘（或称剥落物收集器）：由厚 1mm、面积不小于 110mm×150mm、边缘翘起为（10±2）mm 的不锈钢制成的带把手钢盘。

5.16.2.2.8 超声传播时间测量装置：由长和宽均为（160±1）mm、高为（80±1mm）的有机玻璃制成，见图 33。超声传感器应安置在该装置两侧相对的位置上，且超声传感器轴线距试件的测试面距离应为 35mm。



中养护至 7d 龄期。当试件的强度较低时，带模养护的时间可延长，在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中的养护时间应相应缩短。

5.16.2.3.3 当试件在水中养护至 7d 龄期后，应对试件进行切割。试件切割位置应符合图 34 的规定，首先应将试件的成型面切去，试件的高度应为 110mm。然后将试件从中间的聚四氟乙烯片分开成两个试件，每个试件的尺寸应为 $150\text{mm} \times 110\text{mm} \times 70\text{mm}$ ，偏差应为 $\pm 2\text{mm}$ 。切割完成后，应将试件放置在空气中养护。对于切割后的试件与标准试件的尺寸有偏差的，应在报告中注明。非标准试件的测试表面边长不应小于 90mm；对于形状不规则的试件，其测试表面大小应能保证内切一个直径 90mm 的圆，试件的长高比不应大于 3。

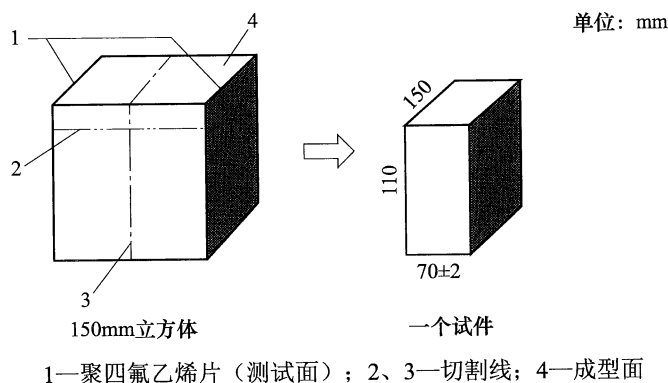


图 34 试件切割位置示意图

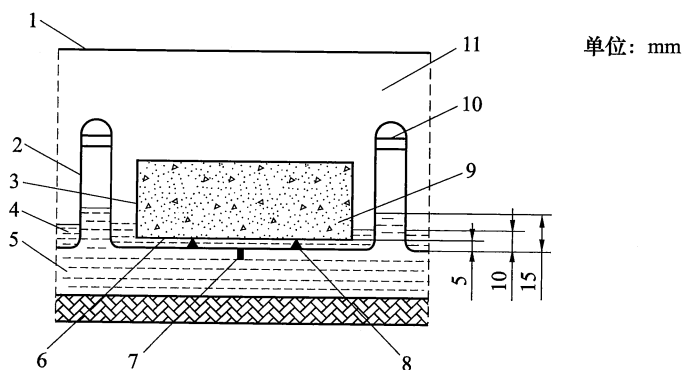
5.16.2.3.4 每组试件的数量不应少于 5 个，且总的测试面积不得少于 0.08m^2 。

5.16.2.3.5 单面冻融试验应符合下列规定：

- 到达规定养护龄期的试件应放在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(65 \pm 5)\%$ 实验室中干燥至 28d 龄期。干燥时试件应侧立并应相互间隔 50mm。
- 在试件干燥至 28d 龄期前的 $(2 \sim 4)\text{d}$ ，除测试面和与测试面相平行的顶面外，其他侧面应采用环氧树脂或其他满足本规程第 5.16.2.2.14 条要求的密封材料进行密封。密封前应对试件侧面进行清洁处理。在密封过程中，试件应保持清洁和干燥，并应测量和记录试件密封前后的质量 W_0 和 W_1 ，精确至 0.1g。
- 密封好的试件应放置在试件盒中，并使测试面向下接触垫条，试件与试件盒侧壁之间的空隙应为 $(30 \pm 2)\text{mm}$ 。向试件盒中加入试验液体并不得溅湿试件顶面。试验液体的液面高度应由液面调整装置调整为 $(10 \pm 1)\text{mm}$ 。加入试验液体后，应盖上试件盒的盖子，并记录加入试验液体的时间。试件预吸水时间应持续 7d，试验温度应保持为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。预吸水期间应定期检查试验液体高度，并应始终保持试验液体高度满足 $(10 \pm 1)\text{mm}$ 的要求。试件预吸水过程中应每隔 $(2 \sim 3)\text{d}$ 测量试件的质量，精确至 0.1g。
- 当试件预吸水结束之后，应采用超声波测试仪测定试件的超声波传播时间初始值 t_0 ，精确至 $0.1\mu\text{s}$ 。在每个试件测试开始前，应对超声波测试仪器进行校正。超声波传播时间初始值的测量应符合以下规定：
 - 首先应迅速将试件从试件盒中取出，并以测试面向下的方向将试件放置在不锈钢盘上，然后将试件连同不锈钢盘一起放入超声传播时间测量装置中（图 33）。超声传感器的探头中心与试件测试面的距离应为 35mm。应向超声传播时间测量装置中加入试验溶液作为耦合剂，且液面应高于超声传感器探头 10mm，但不应超过试件上表面。
 - 每个试件的超声传播时间应通过测量离测试面 35mm 的两条相互垂直的传播轴得到。可通过细微调整试件位置，使测量的传播时间最小，以此确定试件的最终测量位置，并应标记这些位置作为后续试验中定位时采用。

3) 试验过程中,应始终保持试件和耦合剂的温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,防止试件的上表面被湿润。排除超声传感器表面和试件两侧的气泡,并应保护试件的密封材料不受损伤。

5.16.2.3.6 将完成超声传播时间初始值测量的试件按本规程第 5.16.2.2 条的要求重新装入试件盒中，试验溶液的高度应为 (10 ± 1) mm。在整个试验过程中应随时检查试件盒中的液面高度，并对液面进行及时调整。将装有试件的试件盒放置在单面冻融试验箱的托架上，当全部试件盒放入单面冻融试验箱中后，应确保试件盒浸泡在冷冻液中的深度为 (15 ± 2) mm，且试件盒在单面冻融试验箱的位置符合图 35 的规定。在冻融循环试验前，应采用超声浴方法将试件表面的疏松颗粒和物质清除，清除之物应作为废弃物处理。



1—试验机盖；2—相邻试件盒；3—侧向密封层；4—试验液体；5—制冷液体；6—测试面；
7—测温点（参考点）；8—垫条；9—试件；10—托架；11—隔热空气层

图 35 试件盒在单面冻融试验箱中的位置

5.16.2.3.7 在进行单面冻融试验时，应去掉试件盒的盖子。冻融循环过程宜连续不断地进行。当冻融循环过程被打断时，应将试件保存在试件盒中，并应保持试验液体的高度。

5.16.2.3.8 每 4 个冻融循环应对试件的剥落物、吸水率、超声波相对传播时间和超声波相对动弹性模量进行一次测量。上述参数测量应在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温室中进行。当测量过程被打断时, 应将试件保存在盛有试验液体的试验容器中。

5.16.2.3.9 试件的剥落物、吸水率、超声波相对传播时间和超声波相对动弹性模量的测量应按下列步骤进行:

- 先将试件盒从单面冻融试验箱中取出，并放置到超声浴槽中，应使试件的测试面朝下，并应对浸泡在试验液体中的试件进行超声浴 3min。
- 用超声浴方法处理完试件剥落物后，应立即将试件从试件盒中拿起，并垂直放置在一吸水物表面上。待测试面液体流尽后，应将试件放置在不锈钢盘中，且应使测试面向下。用干毛巾将试件侧面和上表面的水擦干净后，应将试件从钢盘中拿开，并将钢盘放置在天平上归零，再将试件放回到不锈钢盘中进行称量。应记录此时试件的质量 w_n ，精确至 0.1g。
- 称量后应将试件与不锈钢盘一起放置在超声传播时间测量装置中，并按测量超声传播时间初始值相同的方法测定此时试件的超声传播时间 t_n ，精确至 0.1 μ s。
- 测量完试件的超声传播时间后，应重新将试件放入另一个试件盒中，并按上述要求进行下一个冻融循环。
- 将试件重新放入试件盒以后，应及时将超声波测试过程中掉落到不锈钢盘中的剥落物收集到试件盒中，并用滤纸过滤留在试件盒中的剥落物。过滤前应先称量滤纸的质量 μ_f ，然后将过滤后含有全部剥落物的滤纸置在 $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干 24h，并在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(60 \pm 5)\%$ 的实验室中冷却 $(60 \pm 5)\text{min}$ 。冷却后应称量烘干后滤纸和剥落物的总质量 μ_b ，精确至 0.01g。

5.16.2.3.10 当冻融循环出现以下三种情况之一时,可停止试验,并应以经受的冻融循环次数或者单位表面积剥落物总质量或超声波相对动弹性模量来表示混凝土的抗冻性能:

- 达到 28 次冻融循环时。
- 试件单位表面积剥落物总质量大于 1500g/m^2 时。
- 试件的超声波相对动弹性模量降低到 80% 时。

5.16.2.4 试验结果处理

5.16.2.4.1 试件表面剥落物的质量按公式 (55) 计算 (精确至 0.01)

$$\mu_s = \mu_b - \mu_f \quad (55)$$

式中:

- μ_s ——试件表面剥落物的质量, g;
 μ_b ——干燥后滤纸与试件剥落物的总质量, g;
 μ_f ——滤纸的质量, g。

5.16.2.4.2 N 次冻融循环之后,单个试件单位测试表面积剥落物总质量按公式 (56) 计算

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \times 10^6 \quad (56)$$

式中:

- m_n —— N 次冻融循环后,单个试件单位测试表面积剥落物总质量, g/m^2 ;
 μ_s ——每次测试间隙得到的试件剥落物质量, g, 精确至 0.01g;
 A ——单个试件测试表面的表面积, mm^2 。

每组应取 5 个试件单位测试表面积上剥落物总质量计算值的平均值作为该组试件单位测试表面积上剥落物总质量测定值。

5.16.2.4.3 经 N 次冻融循环后试件相对质量增加 Δw_n (或吸水率) 按公式 (57) 计算 (精确至 0.1)

$$\Delta w_n = (w_n - w_1 + \sum \mu_s) / w_0 \times 100\% \quad (57)$$

式中:

- Δw_n ——经 N 次冻融循环后,每个试件的吸水率, %;
 w_n ——经 N 次冻融循环后,试件的质量 (包括侧面密封物), g, 精确至 0.1g;
 w_1 ——密封后饱水之前试件的质量 (包括侧面密封物), g, 精确至 0.1g;
 μ_s ——每次测试间隙得到的试件剥落物质量, g, 精确至 0.01g;
 w_0 ——试件密封前干燥状态的净质量 (不包括侧面密封物的质量), g, 精确至 0.1g。

每组应取 5 个试件吸水率计算值的平均值作为该组试件的吸水率测定值。

5.16.2.4.4 超声波相对传播时间和相对动弹性模量按下列方法计算:

a) 超声波在耦合剂中的传播时间 t_c 按公式 (58) 计算 (精确至 0.1)

$$t_c = l_c / v_c \quad (58)$$

式中:

- t_c ——超声波在耦合剂中的传播时间, μs , 精确至 0.1 μs ;
 l_c ——超声波在耦合剂中传播的长度 ($l_{c1} + l_{c2}$), l_c 应由超声探头之间的距离和测试试件的长度的差值决定, mm;
 v_c ——超声波在耦合剂中传播的速度, km/s。

v_c 可利用超声波在水中的传播速度来假定, 在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时, 超声波在耦合剂中传播的速度为 1440m/s (或 1.440km/s)。

b) 经 N 次冻融循环之后,每个试件传播轴线上传播时间的相对变化 τ_n 按公式 (59) 计算 (精确

至 0.1)

$$\tau_n = \frac{t_0 - t_c}{t_n - t_c} \times 100\% \quad (59)$$

式中:

 τ_n —— 试件的超声波相对传播时间, %; t_0 —— 在预吸水后第一次冻融之前, 超声波在试件和耦合剂中的总传播时间, 即超声波传播时间初始值, μs ; t_n —— 经 N 次冻融循环之后超声波在试件和耦合剂中的总传播时间, μs 。

- c) 在计算每个试件的超声波相对传播时间时, 应以两个轴的超声波相对传播时间的平均值作为该试件的超声波相对传播时间测定值。每组应取 5 个试件超声波相对传播时间计算值的平均值作为该组试件超声波相对传播时间的测定值。
- d) 经 N 次冻融循环之后, 试件的超声波相对动弹性模量 $R_{u, n}$ 应按公式 (60) 计算 (精确至 0.1)

$$R_{u, n} = \tau_n^2 \times 100\% \quad (60)$$

式中:

 $R_{u, n}$ —— 试件的超声波相对动弹性模量, %。

- e) 在计算每个试件的超声波相对动弹性模量时, 应先分别计算两个相互垂直的传播轴上的超声波相对动弹性模量, 并应取两个轴的超声波相对动弹性模量的平均值作为该试件的超声波相对动弹性模量测定值。每组应取 5 个试件超声波相对动弹性模量计算值的平均值作为该组试件的超声波相对动弹性模量测定值。

5.17 混凝土动弹性模量试验

5.17.1 适用范围

本试验适用于采用共振法测定混凝土的动弹性模量。

5.17.2 仪器设备

5.17.2.1 动弹性模量测定仪 (又称共振仪): 输出频率可调范围为 (100~20 000) Hz, 输出功率应能使试件产生受迫振动。

5.17.2.2 试件支撑体: 采用厚度约为 20mm 的泡沫塑料垫, 宜采用表观密度为 (16~18) kg/m^3 的聚苯板。

5.17.2.3 台秤: 最大量程 20kg、感量 5g。

5.17.3 试验方法

5.17.3.1 动弹性模量试验应采用尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件。

5.17.3.2 首先测定试件的质量和尺寸。试件质量精确至 0.01kg, 尺寸的测量精确至 1mm。

5.17.3.3 测定完试件的质量和尺寸后, 应将试件放置在支撑体的中心位置, 成型面应向上, 并应将激振换能器的测杆轻轻地压在试件长边侧面中线的 1/2 处, 接收换能器的测杆轻轻地压在试件长边侧面中线距端面 5mm 处。在测杆接触试件前, 宜在测杆与试件接触面涂一薄层黄油或凡士林作为耦合介质, 测杆压力的大小应以不出现噪声为准。采用的动弹性模量测定仪各部件连接和相对位置应符合图 36 的规定。

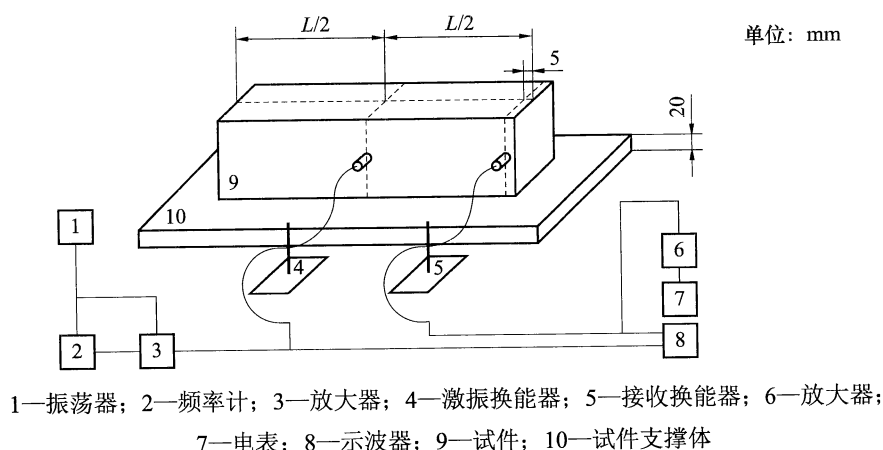


图 36 各部件连接和相对位置示意图

5.17.3.4 放置好测杆后,应先调整共振仪的激振功率和接收增益旋钮至适当位置,然后变换激振频率,并应注意观察指示电表的指针偏转。当指针偏转为最大时,表示试件达到共振状态,应以这时所显示的共振频率作为试件的基频振动频率。每一测量应重复测度两次以上,当两次连续测值之差不超过两个测值的平均值的 0.5% 时,应取这两个测值的平均值作为该试件的基频振动频率。

5.17.3.5 当用示波器作显示的仪器时,示波器的图形调成一个正圆时的频率应为共振频率。在测试过程中,当发现两个以上峰值时,应将接收换能器移至距试件端部 0.224 倍试件长处,当指示电表为零时,应将其作为真实的共振峰值。

5.17.4 试验结果处理

5.17.4.1 动弹性模量按公式 (61) 计算

$$E_d = 13.244 \times 10^{-4} \times \frac{WL^3 f^2}{\alpha^4} \quad (61)$$

式中:

E_d ——混凝土动弹性模量, MPa;

W ——试件的质量, kg, 精确至 0.01kg;

L ——试件的长度, mm;

f ——试件横向振动时的基频振动频率, Hz;

α ——正方形截面试件的边长, mm。

5.17.4.2 取三个试件测值的平均值,作为该组试件动弹性模量的测定值,计算应精确至 100MPa。

5.18 硬化混凝土气泡参数试验 (直线导线法)

5.18.1 适用范围

本试验测定硬化混凝土中气泡的数量、大小和间距,用来计算混凝土的含气量、气泡比表面积和间距系数等气泡参数,以研究混凝土的抗冻性能和鉴定外加剂的引气性能等。同时也适用于实际建筑物抗冻性调查。

5.18.2 仪器设备

5.18.2.1 测量显微镜:放大 80 倍~128 倍,具有目镜测微尺和物镜测微尺 (非固定附件,用以率定目镜测微尺)。目镜测微尺最小读数为 10μm。载物台能纵、横向移动,移动范围分别不小于 50mm 和 100mm。

当采用硬化混凝土气孔分析仪时，试验仪器应具备自动测量和计算功能，试验前应对设备进行标定，符合要求后方可试验。

5.18.2.2 显微镜照明灯：聚光型灯。

5.18.2.3 切片机、磨片机、抛光机。

5.18.3 试验方法

5.18.3.1 试件的观测面应与浇筑面相垂直。观测总面积和导线总长度应符合表 5 的规定。

表 5 最小观测总面积及最小导线总长度

骨料最大粒径 mm	最小观测总面积 mm ²	最小导线总长度 mm
37.5	17 000	2600
31.5	11 000	2500
19	7000	2300
9.5	6000	1900
注：如混凝土内骨料或大孔隙分布很不均匀，应适当增大观测面积。当在一个混凝土试样中取几个加工表面时，两加工表面的间距应大于骨料最大粒径的 1/2。		

5.18.3.2 从试样上锯下试件后，洗刷干净，将观测面分别采用 400 号、800 号金刚砂仔细研磨。每次磨完后应洗刷干净，再进行下次研磨。最后在抛光机转盘的呢料上涂刷氧化铬，进行抛光，再洗刷干净，在（105±5）℃的烘箱中烘干，然后置于显微镜下试测。当强光以低入射角照射在观测面上时，观测到表面除了气泡截面和骨料孔隙外，基本是平的，气泡边缘清晰，并能测出尺寸为 10μm 的气泡截面，即可认为该观测截面已加工合格。

5.18.3.3 当采用人工测试时，观测前用物镜测微尺校准目镜测微尺刻度。在观测面两端，附贴导线间距标志，使选定的导线长度均匀地分布在观测面范围内。调整观测面的位置，使十字丝的横丝与导线重合，然后用目镜测微尺进行定量测量。从第一条导线起点开始观察，分别测量并记录视域中气泡个数及测微尺所截取的每个气泡的弦长刻度值。根据工作需要，也可增测气泡截面直径。第一条导线测试完后，再按顺序进入第二、三、四……条导线，直至测完规定的导线长度。当采用硬化混凝土气孔分析仪测试时，按照说明进行操作。

5.18.4 试验结果处理

5.18.4.1 气泡平均弦长按公式（62）计算

$$\bar{l} = \frac{\sum l}{n} \tag{62}$$

5.18.4.2 气泡比表面积按公式（63）计算

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} \tag{63}$$

5.18.4.3 气泡平均半径按公式（64）计算

$$r = \frac{3}{4} \bar{l} \tag{64}$$

5.18.4.4 硬化混凝土中的空气含量按公式（65）计算

$$A = \frac{\sum l}{T} \tag{65}$$

5.18.4.5 1000mm³ 混凝土的气泡个数按公式 (66) 计算

$$n_v = \frac{3A}{4\pi r^3} \quad (66)$$

5.18.4.6 气泡间距系数按公式 (67) 和公式 (68) 计算。

当混凝土中浆气比 P/A 大于 4.33 时

$$\bar{L} = \frac{3A}{4n_1} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (67)$$

当混凝土中浆气比 P/A 小于 4.33 时:

$$\bar{L} = \frac{P}{4n_1} \quad (68)$$

式中:

\bar{l} —— 气泡平均弦长, mm;

$\sum l$ —— 全导线所切割的气泡弦长总和, mm;

n —— 全导线所切割的气泡总个数;

α —— 气泡比表面积, mm²/mm³;

A —— 硬化混凝土的空气含量 (体积比);

T —— 导线总长, mm;

n_v —— 1000mm³ 混凝土中的气泡个数;

r —— 气泡平均半径, mm;

\bar{L} —— 气泡间距系数, mm;

P —— 试件混凝土中胶结材料浆体含量 (体积比, 不包括空气含量);

n_1 —— 平均每 10mm 导线切割的气泡个数。

计算结果取三位有效数字。

5.19 混凝土碳化试验

5.19.1 适用范围

本试验用于测定在一定浓度的二氧化碳气体介质中混凝土试件的碳化深度。

5.19.2 仪器设备

5.19.2.1 碳化箱: 带有密封盖或门的密闭容器, 容器的容积至少应为预定进行试验的试件体积的两倍。碳化箱内应有架空试件的支架、二氧化碳入口、分析取样用的气体导出口、箱内气体对流循环装置、为保持箱内恒温恒湿所需的设施以及温湿度监测装置。宜在碳化箱上设玻璃观察口对箱内的温度进行读数。

5.19.2.2 气体分析仪: 应能分析箱内二氧化碳浓度, 精确至 $\pm 1\%$ 。

5.19.2.3 二氧化碳供气装置: 包括气瓶、压力表及流量计。

5.19.3 试验方法

5.19.3.1 碳化试验宜采用棱柱体混凝土试件, 以三块为一组。棱柱体的长宽比不宜小于 3。无棱柱体试件时, 也可用立方体试件, 其数量应相应增加。

5.19.3.2 试件宜在 28d 龄期进行碳化试验, 掺有掺合料的混凝土可以根据其特性决定碳化前的养护龄

期。碳化试验的试件宜采用标准养护，试件应在试验前 2d 从标准养护室取出，然后应在 60℃ 下烘 48h。

5.19.3.3 经烘干处理后的试件，除应留下一个或相对的两个侧面外，其余表面应采用加热的石蜡予以密封。然后应在暴露侧面上沿长度方向用铅笔以 10mm 间距画出平行线，作为预定碳化深度的测量点。

5.19.3.4 将经过处理的试件放入碳化箱内的支架上，各试件之间的间距不应小于 50mm。

5.19.3.5 试件放入碳化箱后，应将碳化箱密封。密封可采用机械办法或油封，但不得采用水封。应开动箱内气体对流装置，徐徐充入二氧化碳，并测定箱内的二氧化碳浓度。应逐步调节二氧化碳的流量，使箱内的二氧化碳浓度保持在 $(20 \pm 3)\%$ 。在整个试验期间应采取去湿措施，使箱内的相对湿度控制在 $(70 \pm 5)\%$ ，温度应控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的范围内。

5.19.3.6 碳化试验开始后应每隔一定时期对箱内的二氧化碳浓度、温度及湿度做一次测定。宜在前 2d 每隔 2h 测定一次，以后每隔 4h 测定一次。试验中应根据所测得的二氧化碳浓度、温度及湿度随时调节这些参数，去湿用的硅胶应经常更换。也可采用其他更有效的去湿方法。

5.19.3.7 在碳化到了 3、7、14d 及 28d 时，分别取出试件，破型测定碳化深度。棱柱体试件应通过在压力试验机上的劈裂法或者用干锯法从一端开始破型。每次切除的厚度应为试件宽度的一半，切后应用石蜡将破型后试件的切断面封好，再放入箱内继续碳化，直到下一个试验期。如采用立方体试件时，应在试件中部劈开，立方体试件应只做一次检验，劈开测试碳化深度后不得再重复使用。

5.19.3.8 随后应将切除所得的试件部分刷去断面上残存的粉末，然后喷上（或滴上）浓度为 1% 的酚酞酒精溶液（酒精溶液含 20% 的蒸馏水）。经约 30s 后，应按原先标划的每 10mm 一个测量点用钢板尺测出各点的碳化深度。当测点处的碳化分界线上刚好嵌有粗骨料颗粒，可取该颗粒两侧处碳化深度的平均值作为该点的深度值。所测量的碳化深度精确至 0.5mm。

5.19.4 试验结果处理

5.19.4.1 混凝土在各试验龄期时的平均碳化深度按公式 (69) 计算（精确至 0.1mm）

$$\bar{d}_t = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (69)$$

式中：

\bar{d}_t —— 试件碳化 t d 后的平均碳化深度，mm；

d_i —— 各测点的碳化深度，mm；

n —— 测点总数。

每组应以在二氧化碳浓度为 $(20 \pm 3)\%$ 、温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 的条件下，3 个试件碳化 28d 的碳化深度平均值作为该组混凝土试件碳化测定值。

5.19.4.2 碳化结果处理时宜绘制碳化时间与碳化深度的关系曲线。

5.20 混凝土电通量试验

5.20.1 适用范围

本试验适用于测定以通过混凝土试件的电通量为指标来确定混凝土抗氯离子渗透性能。本方法不适用于掺有亚硝酸盐和钢纤维等良导电材料的混凝土抗氯离子渗透试验。

5.20.2 仪器设备

5.20.2.1 电通量试验装置见图 37。

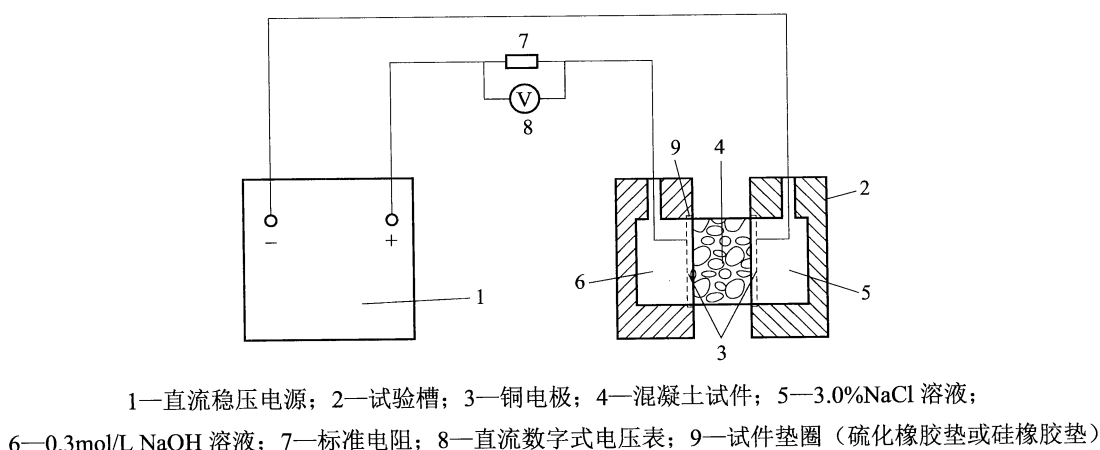


图 37 电通量试验装置示意图

5.20.2.2 仪器设备和化学试剂应符合下列要求：

- 直流稳定电源的电压范围应为（0~80）V，电流范围应为（0~10）A。并应能稳定输出 60V 直流电压，精度应为 $\pm 0.1V$ 。
- 耐热塑料或耐热有机玻璃试验槽（图 38）的边长应为 150mm，总厚度不应小于 51mm。试验槽中心的两个槽的直径分别为 89mm 和 112mm。两个槽的深度应分别为 41mm 和 6.4mm。在试验槽的一边应开有直径为 10mm 的注液孔。

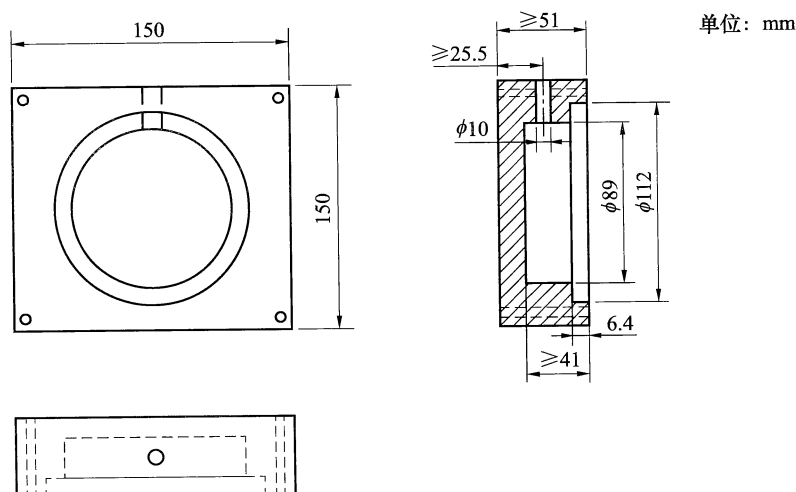


图 38 耐热塑料或耐热有机玻璃试验槽

- 紫铜垫板宽度应为 (12 ± 2) mm，厚度应为 (0.50 ± 0.05) mm。铜网孔径应为 0.95mm（64 孔/cm²）或者 20 目。
- 标准电阻精度应为 $\pm 0.1\%$ ；直流数字电流表量程应为（0~20）A，精度应为 $\pm 0.1\%$ 。
- 真空泵和真空表应符合标准要求。
- 真空容器的内径不应小于 250mm，并应能至少容纳 3 个试件。
- 阴极溶液应用化学纯试剂配制的质量浓度为 3.0% 的 NaCl 溶液。
- 阳极溶液应用化学纯试剂配制的摩尔浓度为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液。
- 密封材料应采用硅胶或树脂等密封材料。
- 硫化橡胶垫或硅橡胶的外径应为 100mm、内径应为 75mm、厚度应为 6mm。
- 切割试件的设备应采用水冷式金刚锯或碳化硅锯。
- 抽真空设备可由烧杯（体积在 1000mL 以上）、真空干燥器、真空泵、分液装置、真空表等组

合而成。

m) 温度计的量程应为 (0~120) °C, 精度应为 ±0.1 °C。

n) 电吹风的功率应为 (1000~2000) W。

5.20.3 试验方法

5.20.3.1 电通量试验应采用直径 (100±1) mm, 高度 (50±2) mm 的圆柱体试件。试件的制作、养护应符合本规程第 5.21.3.2 条的规定。当试件表面有涂料等附加材料时, 应预先去除, 且试样内不得含有钢筋等良导电材料。在试件移送试验室前, 应避免冻伤或其他物理伤害。

5.20.3.2 电通量试验宜在试件养护到 28d 龄期进行。对于掺有大掺量矿物掺和料的混凝土, 可在 56d 龄期进行试验。应先将养护到规定龄期的试件暴露于空气中至表面干燥, 并应以硅胶或树脂密封材料涂刷试件圆柱侧面, 还应填补涂层中的孔洞。

5.20.3.3 电通量试验前应将试件进行真空饱水。应先将试件放入真空容器中, 然后启动真空泵, 并应在 5min 内将真空容器中的绝对压强减少至 (1~5) kPa, 应保持该真空度 3h, 然后在真空泵仍然运转的情况下, 注入足够的蒸馏水或者去离子水, 直至淹没试件, 应在试件浸没 1h 后恢复常压, 并继续浸泡 (18±2) h。

5.20.3.4 在真空饱水结束后, 应从水中取出试件, 并抹掉多余水分, 且应保持试件所处环境的相对湿度在 95%以上。应将试件安装于试验槽内, 并应采用螺杆将两试验槽和端面装有硫化橡胶垫的试件夹紧。试件安装好以后, 应采用蒸馏水或者其他有效方式检查试件和试验槽之间的密封性能。

5.20.3.5 检查试件和试验槽之间的密封性后, 应将质量浓度为 3.0% 的 NaCl 溶液和摩尔浓度为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液分别注入试件两侧的试验槽中, 注入 NaCl 溶液的试验槽内的铜网应连接电源负极, 注入 NaOH 溶液的试验槽中的铜网应连接电源正极。

5.20.3.6 在正确连接电源线后, 应在保持试验槽中充满溶液的情况下接通电源, 并应对上述两铜网施加 (60±0.1) V 直流恒电压, 且应记录电流初始读数 I_0 。开始时应每隔 5min 记录一次电流值, 当电流值变化不大时, 可每隔 10min 记录一次电流值; 当电流变化很小时, 应每隔 30min 记录一次电流值, 直至通电 6h。

5.20.3.7 当采用自动采集数据的测试装置时, 记录电流的时间间隔可设定为 (5~10) min。电流测量值应精确至 ±0.5mA。试验过程中宜同时监测试验槽中溶液的温度。

5.20.3.8 试验结束后, 应及时排出试验溶液, 并应用凉开水和洗涤剂冲洗试验槽 60s 以上, 然后用蒸馏水洗净并用电吹风冷风挡吹干。

5.20.3.9 试验应在 (20~25) °C 的室内进行。

5.20.4 试验结果处理

5.20.4.1 试验过程中或试验结束后, 应绘制电流与时间的关系图。应通过将各点数据以光滑曲线连接起来, 对曲线作面积积分或按梯形法进行面积积分, 得到试验 6h 通过的电通量 (C)。

5.20.4.2 每个试件的总电通量可采用简化公式 (70) 计算

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \cdots + 2I_t + \cdots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (70)$$

式中:

Q ——通过试件的总电通量, C;

I_0 ——初始电流, A, 精确到 0.001A;

I_t ——在时间 t (min) 的电流, A, 精确到 0.001A。

5.20.4.3 计算得到的通过试件的总电通量应换算成直径为 95mm 试件的电通量值。应通过将计算的总电通量乘以一个直径为 95mm 的试件和实际试件横截面积的比值来换算, 换算可按公式 (71) 进行

$$Q_s = Q_x \times (95/x)^2 \quad (71)$$

- e) 电源应能稳定提供 (0~60) V 的可调直流电, 精度应为 $\pm 0.1\text{V}$, 电流应为 (0~10) A。
- f) 电表的精度应为 $\pm 0.1\text{mA}$ 。
- g) 温度计或热电偶的精度应为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。
- h) 喷雾器应适合喷洒硝酸银溶液。
- i) 游标卡尺的精度应为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- j) 尺子的最小刻度应为 1mm。
- k) 水砂纸的规格应为 200 号~600 号。
- l) 细锉刀可为备用工具。
- m) 扭矩扳手的扭矩范围应为 (20~100) N·m, 测量允许误差为 $\pm 5\%$ 。
- n) 电吹风的功率应为 (1000~2000) W。
- o) 黄铜刷可为备用工具。
- p) 真空表或压力计的精度应为 $\pm 665\text{Pa}$ (5mmHg 柱), 量程应 (0~13 300) Pa (0~100mmHg 柱)。
- q) 抽真空设备可由体积在 1000mL 以上的烧杯、真空干燥器、真空泵、分液装置、真空表等组合而成。

5.21.2.3 溶液和指示剂应符合下列规定:

- a) 阴极溶液应为 10% 质量浓度的 NaCl 溶液, 阳极溶液应为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液。溶液应至少提前 24h 配制, 并应密封保存在温度为 (20~25) $^\circ\text{C}$ 的环境中。
- b) 显色指示剂应为 0.1mol/L 的 AgNO_3 溶液。

5.21.3 试验方法

5.21.3.1 RCM 试验所处的试验室温度应控制在 (20~25) $^\circ\text{C}$ 。

5.21.3.2 试件制作应符合下列规定:

- a) RCM 试验用试件应采用直径为 (100 \pm 1) mm, 高度为 (50 \pm 2) mm 的圆柱体试件。
- b) 在试验室制作试件时, 宜使用 $\phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 或 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试模。骨料最大公称粒径不宜大于 25mm。试件成型后应立即用塑料薄膜覆盖并移至标准养护室。试件应在 (24 \pm 2) h 内拆模, 然后应浸没于标准养护室的水池中。
- c) 试件的养护龄期宜为 28d。也可根据设计要求选用 56d 或 84d 养护龄期。
- d) 应在抗氯离子渗透试验前 7d 加工成标准尺寸的试件。当使用 $\phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试件时, 应从试件中部切取高度为 (50 \pm 2) mm 的圆柱体作为试验用试件, 并应将靠近浇筑面的试件端面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。当使 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试件时, 应先将试件从正中间切成相同尺寸的两部分 $\phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$, 然后应从两部分中各切取一个高度为 (50 \pm 2) mm 的试件, 并应将第一次的切口面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。
- e) 试件加工后应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑。
- f) 加工好的试件应继续浸没于水中养护至试验龄期。

5.21.3.3 RCM 法试验应按下列步骤进行:

- a) 首先应将试件从养护池中取出, 并将试件表面的碎屑刷洗干净, 擦干试件表面多余的水分。然后应采用游标卡尺测量试件的直径和高度, 测量应精确到 0.1mm。应将试件在饱和面干状态下置于真空容器中进行真空处理。应在 5min 内将真空容器中的气压减少至 (1~5) kPa, 并应保持该真空度 3h, 然后在真空泵仍然运转的情况下, 将用蒸馏水配制的饱和氢氧化钙溶液注入容器, 溶液高度应保证将试件浸没。在试件浸没 1h 后恢复常压, 并应继续浸泡 (18 \pm 2) h。
- b) 试件安装在 RCM 试验装置前应采用电吹风冷风挡吹干, 表面应干净, 无油污、灰砂和水珠。
- c) RCM 试验装置的试验槽在试验前应用室温凉开水冲洗干净。
- d) 试件和 RCM 试验装置 (图 39) 准备好以后, 应将试件装入橡胶套内的底部, 在与试件齐高的

橡胶套外侧安装两个不锈钢环箍（图 40），每个箍高度应为 20mm，并应拧紧环箍上的螺栓至扭矩 $(30 \pm 2) \text{ N} \cdot \text{m}$ ，使试件的圆柱侧面处于密封状态。当试件的圆柱曲面可能有造成液体渗漏的缺陷时，应以密封剂保持其密封性。

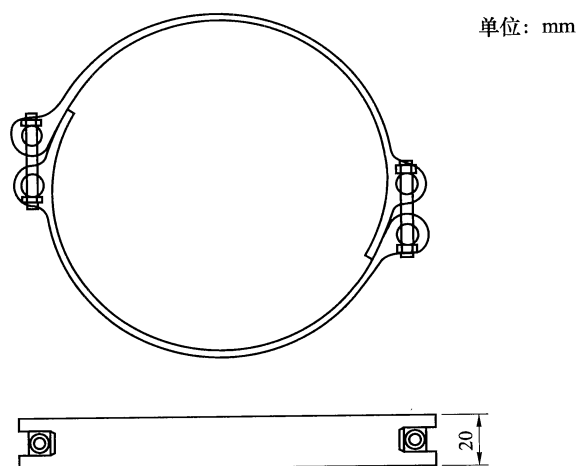


图 40 不锈钢环箍

- e) 应将装有试件的橡胶套安装到试验槽中，并安装好阳极板。然后在橡胶套中注入约 300mL 浓度为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液，并使阳极板和试件表面均浸没于溶液中。在阴极试验槽中注入 12L 质量浓度为 10% 的 NaCl 溶液，并应使其液面与橡胶套中的 NaOH 溶液的液面齐平。
- f) 试件安装完成后，应将电源的阳极（又称正极）用导线连至橡胶筒中阳极板，并将阴极（又称负极）用导线连至试验槽中的阴极板。

5.21.3.4 电迁移试验应按下列步骤进行：

- a) 首先应打开电源，将电压调整到 $(30 \pm 0.2) \text{ V}$ ，并应记录通过每个试件的初始电流。
- b) 后续试验应施加的电压（见表 6 第 2 列）应根据施加 30V 电压时测量得到的初始电流值所处的范围（见表 6 第 1 列）决定。应根据实际施加的电压，记录新的初始电流。按照新的初始电流值所处的范围（见表 6 第 3 列），确定试验应持续的时间（见表 6 第 4 列）。

表 6 初始电流、电压与试验时间的关系

初始电流 I_{30V} (用 30V 电压) mA	施加的电压 U (调整后) V	可能的新初始电流 I_0 mA	试验持续时间 t h
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24

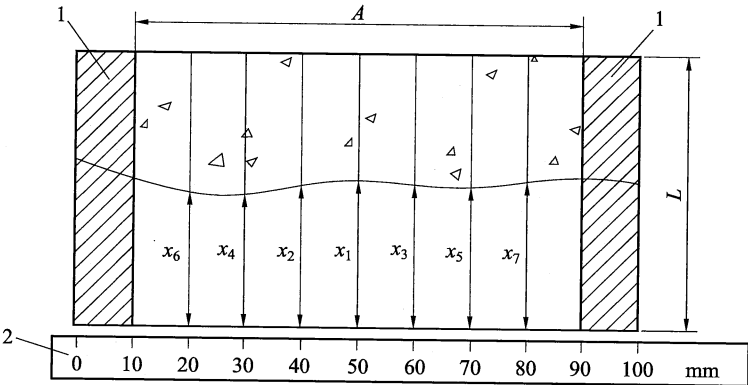
表 6（续）

初始电流 I_{30V} (用 30V 电压) mA	施加的电压 U (调整后) V	可能的新的初始电流 I_0 mA	试验持续时间 t h
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

- c) 应按照温度计或者电热偶的显示读数记录每一个试件阳极溶液的初始温度。
- d) 试验结束时，应测定阳极溶液的最终温度和最终电流。
- e) 试验结束后应及时排除试验溶液。应用黄铜刷清除试验槽的结垢或沉淀物，并用饮用水和洗涤剂将试验槽和橡胶套冲洗干净，然后用电吹风的冷风挡吹干。

5.21.3.5 氯离子渗透深度测定应按下列步骤进行：

- a) 试验结束后，应及时断开电源。
- b) 断开电源后，应将试件从橡胶套中取出，并应立即用自来水将试件表面冲洗干净，然后应擦去试件表面多余水分。
- c) 试件表面冲洗干净后，应在压力试验机上沿轴向劈成两个半圆柱体，并应在劈开的试件断面立即喷涂浓度为 0.1mol/L 的 $AgNO_3$ 溶液显色指示剂。
- d) 指示剂喷洒约 15min 后，应沿试件直径断面将其分成 10 等份，并应用防水笔描出渗透轮廓线。
- e) 然后应根据观察到的明显的颜色变化，测量显色分界线（其位置编号见图 41）离试件底面的距离，精确至 0.1mm。
- f) 当某一测点被骨料阻挡，可将此测点位置移动到最近未被骨料阻挡的位置进行测量，当某测点数据不能得到，只要总测点数多于 5 个，可忽略此测点。
- g) 当某测点位置有一个明显的缺陷，使该点测量值远大于各测点的平均值，可忽略此测点数据，但应将这种情况在试验记录和报告中注明。



1—试件边缘部分；2—尺子；A—测量范围；L—试件高度

图 41 显色分界线位置编号

5.21.4 试验结果处理

5.21.4.1 混凝土的非稳态氯离子迁移系数应按公式（72）进行计算

$$D_{RCM} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \left[X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right] \quad (72)$$

式中：

D_{RCM} ——混凝土的非稳态氯离子迁移系数，精确到 $0.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ；

T ——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

L ——试件厚度，mm，精确到 0.1mm；

X_d ——氯离子渗透深度的平均值，mm，精确到 0.1mm；

U ——所用电压的绝对值，V；

t ——试验持续时间，h。

5.21.4.2 每组应以 3 个试件的氯离子迁移系数的算术平均值作为该组试件的氯离子迁移系数测定值。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的 15% 时，应取中间值作为测定值。

5.22 混凝土中钢筋锈蚀试验

5.22.1 适用范围

适用于测定在给定条件下混凝土中钢筋的锈蚀程度。本方法不适用于在侵蚀性介质中混凝土内的钢筋锈蚀试验。

5.22.2 仪器设备

5.22.2.1 混凝土碳化仪器设备应包括碳化箱、供气装置及气体分析仪。碳化设备应符合第 5.19.2 的规定。

5.22.2.2 钢筋定位板（图 42）宜采用木质五合板或薄木板等材料制作，尺寸应为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，板上应钻有穿插钢筋的圆孔。

5.22.2.3 称量设备的最大量程应为 1kg，感量应为 0.001g。

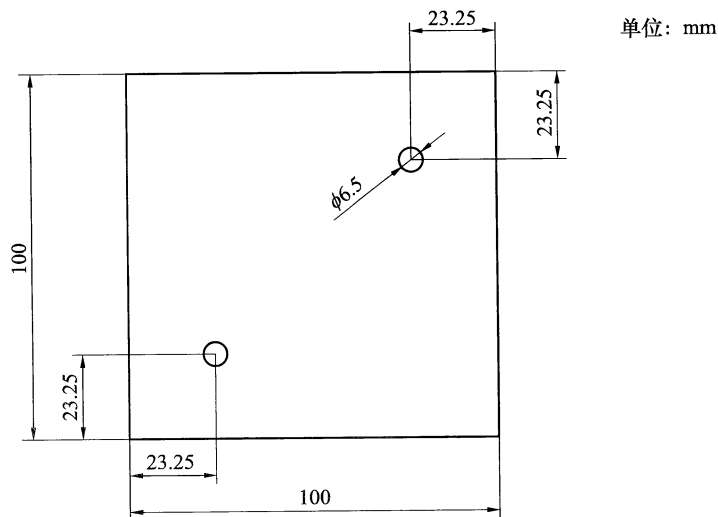


图 42 钢筋定位板

5.22.3 试验方法

5.22.3.1 试件的制作与处理应符合下列规定：

- 本方法应采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体试件，每组应为 3 块。
- 试件中埋置的钢筋应采用直径为 6.5mm 的 HPB300 普通低碳钢热轧盘条调直截断制成，其表面不得有锈坑及其他严重缺陷。每根钢筋长应为 $(299 \pm 1)\text{mm}$ ，应用砂轮将其一端磨出长约 30mm

的平面，并用钢字打上标记。钢筋应采用 12%盐酸溶液进行酸洗，并经清水漂净后，用石灰水中和，再用清水冲洗干净，擦干后应在干燥器中至少存放 4h，然后应用天平称取每根钢筋的初重（精确至 0.001g）。钢筋应存放在干燥器中备用。

- c) 试件成型前应将套有定位板的钢筋放入试模，定位板应紧贴试模的两个端板，安放完毕后应使用丙酮擦净钢筋表面。
- d) 试件成型后，应在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下盖湿布养护 24h 后编号拆模，并应拆除定位板。然后应用钢丝刷将试件两端部混凝土刷毛，并应用石灰比小于试件用混凝土水灰比、水泥和砂子比例为 1:2 的水泥砂浆抹上不小于 20mm 厚的保护层，并确保钢筋端部密封质量。试件应在就地潮湿养护（或用塑料薄膜盖好）24h 后，移入标准养护室养护至 28d。

5.22.3.2 混凝土中钢筋锈蚀试验应按下列步骤进行：

- a) 钢筋锈蚀试验的试件应先进行碳化，碳化应在 28d 龄期时开始。碳化应在二氧化碳浓度为 $(20 \pm 3)\%$ 、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 和温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下进行，碳化时间应为 28d。对于有特殊要求的混凝土中钢筋锈蚀试验，碳化时间可再延长 14d 或者 28d。
- b) 试件碳化处理后应立即移入标准养护室放置。在养护室中，相邻试件间的距离不应小于 50mm，并应避免试件直接淋水。应在潮湿条件下存放 56d 后将试件取出，然后破型，破型时不得损伤钢筋。应先测出碳化深度，然后进行钢筋锈蚀程度的测定。
- c) 试件破型后，应取出试件中的钢筋，并应刮去钢筋上黏附的混凝土。应用 12%盐酸溶液对钢筋进行酸洗，经清水漂净后，再用石灰水中和，最后应以清水冲洗干净。应将钢筋擦干后在干燥器中至少存放 4h，然后对每根钢筋称重（精确至 0.001g），并应计算钢筋锈蚀失重率。酸洗钢筋时，应在洗液中放入两根尺寸相同的同类无锈钢筋作为基准校正。

5.22.4 试验结果处理

5.22.4.1 钢筋锈蚀失重率应按公式 (73) 计算

$$L_w = \frac{\omega_0 - \omega - \frac{(\omega_{01} - \omega_1) + (\omega_{02} - \omega_2)}{2}}{\omega_0} \times 100\% \quad (73)$$

式中：

L_w ——钢筋锈蚀失重率，%，精确至 0.01；

ω_0 ——钢筋未锈蚀前质量，g；

ω ——锈蚀钢筋经过酸洗处理后的质量，g；

ω_{01}, ω_{02} ——分别为基准校正用的两根钢筋的初始质量，g；

ω_1, ω_2 ——分别为基准校正用的两根钢筋酸洗后的质量，g。

5.22.4.2 每组应取 3 个混凝土试件中钢筋锈蚀失重率的平均值作为该组混凝土试件中钢筋锈蚀失重率测定值。

5.23 混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量测定

5.23.1 适用范围

适用于测定硬化混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量，为查明钢筋锈蚀原因及判定混凝土密实性提供依据。

5.23.2 仪器设备

5.23.2.1 天平：称量 100g，感量 0.01g；称量 200g，感量 0.001g；称量 200g，感量 0.000 1g 各 1 台。

5.23.2.2 棕色滴定管：25mL 或 50mL。

5.23.2.3 三角烧瓶：250mL。

5.23.2.4 容量瓶：100mL、1000mL。

5.23.2.5 移液管：20mL。

5.23.2.6 标准筛：孔径 0.63mm。

5.23.2.7 化学药品：硫酸（密度 1.84kg/L）；乙醇（95%）；硝酸银、铬酸钾、酚酞（以上均为化学纯）；氯化钠（分析纯）。

5.23.2.8 试剂配制如下：

- a) 配制浓度约 5% 铬酸钾指示剂：称取 5g 铬酸钾溶于少量蒸馏水中，加入少量硝酸银溶液使出现微红，手动摇匀后放置过夜，过滤并移入 100mL 容量瓶中，稀释至刻度。
- b) 配制浓度约 0.5% 酚酞溶液：称取 0.5g 酚酞，溶于 75mL 乙醇（95%）后再加 25mL 蒸馏水。
- c) 配制稀硫酸溶液：以 1 份体积硫酸倒入 20 份蒸馏水。
- d) 配制 0.02mol/L 氯化钠标准溶液：把分析纯氯化钠置于瓷坩埚中加热（以玻璃棒搅拌），一直到不再有盐的爆裂声为止。冷却后称取 1.2g 左右（精确至 0.1mg），用蒸馏水溶解后移入 1000mL 容量瓶，并稀释至刻度。

氯化钠溶液标准浓度按公式（74）计算

$$C_{\text{NaCl}} = \frac{n_{\text{NaCl}}}{V} \quad (74)$$

$$n_{\text{NaCl}} = \frac{m}{M_r} \quad (75)$$

式中：

C_{NaCl} ——氯化钠溶液的标准浓度，mol/L；

n_{NaCl} ——氯化钠的量，mol；

V ——溶液的体积，L；

m ——氯化钠质量，g；

M_r ——氯化钠的摩尔质量，g/mol，取 58.45。

- e) 配制 0.02mol/L 硝酸银溶液（也可根据所测的氯离子含量配成浓度略高的硝酸银溶液）：称取硝酸银 3.4g 左右溶于蒸馏水中并至 1000mL，置于棕色瓶中保存。用移液管吸取氯化钠标准溶液 20mL V_1 于三角烧瓶中，加入 10 滴铬酸钾指示剂，用已配制的硝酸银溶液滴定至溶液刚呈砖红色。记录所消耗的硝酸银溶液毫升数 V_2 。

硝酸银溶液标准浓度应按公式（76）计算

$$C_{\text{AgNO}_3} = C_{\text{NaCl}} \times \frac{V_1}{V_2} \quad (76)$$

式中：

C_{AgNO_3} ——硝酸银溶液的标准浓度，mol/L；

C_{NaCl} ——氯化钠标准溶液的标准浓度，mol/L；

V_1 ——氯化钠标准溶液的毫升数，mL；

V_2 ——消耗硝酸银溶液的毫升数，mL。

5.23.3 试验方法

5.23.3.1 取混凝土中的砂浆约 30g，研磨至全部通过 0.63mm 筛，然后置于 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 2h，取出后放入干燥器冷却至室温。称取 20g（精确到 0.01g），重量为 G ，置于三角烧瓶中，并加入 200mL V_3 蒸馏水，剧烈振荡（1~2）min，浸泡 24h。

5.23.3.2 将上述试样过滤。用移液管分别吸取滤液 20mL V_4 ，置于两个三角烧瓶中，各加 2 滴酚酞，使溶液呈微红色，再用稀硫酸中和至无色后，加铬酸钾指示剂 10 滴，立即用硝酸银溶液滴至砖红色。记录所消耗的硝酸银毫升数 V_5 。

5.23.4 试验结果处理

水溶性氯离子含量应按公式 (77) 计算，以两次测值的平均值作为测定结果。

$$P = \frac{C_{\text{AgNO}_3} V_5 \times 0.03545}{G \times \frac{V_4}{V_3}} \times 100\% \quad (77)$$

式中：

- P ——砂浆样品中水溶性氯离子含量，%；
- C_{AgNO_3} ——硝酸银标准溶液浓度，mol/L；
- G ——砂浆样品重，g；
- V_3 ——浸样品的水量，mL；
- V_4 ——每次滴定时提取的滤液量，mL；
- V_5 ——每次滴定时消耗的硝酸银溶液量，mL。

5.24 混凝土中砂浆的氯离子总含量测定

5.24.1 适用范围

本试验适用于测定混凝土中砂浆的氯离子总含量，其中包括已和水泥结合的氯离子含量。为查明钢筋锈蚀原因提供依据。

5.24.2 仪器设备

- 5.24.2.1 分析天平：称量 100g，感量 0.1mg。天平：称量 200g，感量 0.01g。
- 5.24.2.2 酸式滴定管：10mL，2 只。
- 5.24.2.3 容量瓶：100mL 和 1000mL 各一个。
- 5.24.2.4 三角烧瓶：250mL。
- 5.24.2.5 试剂瓶：1000mL。
- 5.24.2.6 移液管：20mL。
- 5.24.2.7 其他：玻璃干燥器、研钵、表面皿、瓷坩埚、恒温烘箱。
- 5.24.2.8 化学药品：氯化钠、硝酸银、硫氰酸钾、硝酸、铁矾、铬酸钾（以上均为化学纯）；氯化钠（分析纯）。
- 5.24.2.9 试剂配制如下：
 - a) 0.02mol/L 氯化钠标准溶液的配制：把分析纯氯化钠溶液置于瓷坩埚中加热，直到不再有盐的爆裂声为止。冷却后称取 1.2g 左右（精确至 0.1mg），用蒸馏水溶解后移入 1000mL 容量瓶，并稀释至刻度。
 - b) 0.02mol/L 硝酸银溶液的配制：称取硝酸银 3.4g 左右溶于蒸馏水中并至 1000mL，置于棕色瓶中保存。用移液管吸取氯化钠标准溶液 20mL 于三角烧瓶中，加入 10 滴铬酸钾指示剂，用已配制的硝酸银溶液滴定至溶液刚呈砖红色。
 - c) 6mol/L 硝酸溶液的配制：取化学纯浓硝酸（ HNO_3 含量 65%~68%）25.8mL 放入 100mL 容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度。
 - d) 10%铁矾溶液：用 10g 化学纯铁矾溶于 90g 蒸馏水配成。

- e) 0.02mol/L 硫氰酸钾标准溶液：用天平称取化学纯硫氰酸钾晶体约 1.95g 左右，溶于 1000mL 蒸馏水，充分摇匀，装在瓶内配成硫氰酸钾溶液并用硝酸银标准溶液进行标定。将硝酸银标准溶液装入滴定管，从滴定管放出硝酸银标准溶液约 25mL，加入 6mol/L 硝酸 5mL 和 10%铁矾溶液 4mL，然后用硫氰酸钾标准溶液滴定，滴定时，激烈摇动溶液，当滴至红色维持（5~10）s 不褪时即为终点。

硫氰酸钾标准溶液的当量浓度按公式（78）计算

$$C_{\text{KSCN}} = \frac{C_{\text{AgNO}_3} V_2}{V_1} \quad (78)$$

式中：

C_{KSCN} ——硫氰酸钾标准溶液的标准浓度，mol/L；

C_{AgNO_3} ——硝酸银标准溶液的标准浓度，mol/L；

V_1 ——滴定时消耗的硫氰酸钾标准溶液，mL；

V_2 ——硝酸银标准溶液，mL。

5.24.3 试验方法

5.24.3.1 取适量的混凝土试样（约 40g 左右），用小锤仔细除去混凝土试样中石子部分，保存砂浆，把砂浆研碎成粉状。置于（105±5）℃烘箱中烘 2h。取出放入干燥器内冷却至室温，用感量为 0.01g 的天平称取（10~20）g 砂浆试样倒入三角烧瓶。

5.24.3.2 用容量瓶盛 100mL 稀硝酸（按体积比为浓硝酸：蒸馏水=15:85）倒入盛有砂浆试样的三角烧瓶内，盖上瓶塞，防止蒸发。

5.24.3.3 砂浆试样浸泡一昼夜左右（以水泥全部溶解为度），其间应摇动三角烧瓶，然后用滤纸过滤，除去沉淀。

5.24.3.4 用移液管准确量取滤液 20mL 两份，置于三角锥瓶，每份由滴定管加入硝酸银溶液约 20mL（可估算氯离子含量的多少而酌量增减），分别用硫氰酸钾溶液滴定。滴定时激烈摇动溶液，当滴至红色能维持（5~10）s 不褪时即为终点。

5.24.4 试验结果处理

氯离子总含量按公式（79）计算，以两次测值的平均值作为测定结果。

$$P = \frac{0.03545(C_{\text{AgNO}_3} V - C_{\text{KSCN}} V_1)}{G \frac{V_2}{V_3}} \times 100\% \quad (79)$$

式中：

P ——砂浆样品中氯离子总含量，%；

C_{AgNO_3} ——硝酸银标准溶液的浓度，mol/L；

V ——加入滤液试样中的硝酸银标准溶液量，mL；

C_{KSCN} ——硫氰酸钾标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 ——滴定时消耗的硫氰酸钾标准溶液量，mL；

V_2 ——每次滴定时提取的滤液量，mL；

V_3 ——浸样品的水量，mL；

G ——砂浆样品质量，g。

5.25 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验

5.25.1 适用范围

本试验适用于测定混凝土试件在干湿交替环境中，以能够经受的最大干湿循环次数来表示的混凝土

抗硫酸盐侵蚀性能。

5.25.2 仪器设备

5.25.2.1 干湿循环试验装置宜采用能使试件静止不动，浸泡、烘干及冷却等过程应能自动进行的装置。设备应具有数据实时显示、断电记忆及试验数据自动存储的功能。

5.25.2.2 也可采用符合下列规定的设备进行干湿循环试验。

- a) 烘箱应能使温度稳定在 $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- b) 容器应至少能够装 27L 溶液，并应带盖，且应由耐盐腐蚀材料制成。

5.25.2.3 试剂应采用化学纯无水硫酸钠。

5.25.3 试验方法

5.25.3.1 混凝土试件应符合下列规定：

- a) 本方法应采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试件，每组应为 3 块。
- b) 混凝土的取样、试件的制作和养护应符合本规程 3.1 的要求。
- c) 除制作抗硫酸盐侵蚀试验用试件外，还应按照同样方法，同时制作抗压强度对比用试件。试件组数应符合表 7 的要求。

表 7 抗硫酸盐侵蚀试验所需的试件组数

设计抗硫酸盐等级	KS15	KS30	KS60	KS90	KS120	KS150	KS150 以上
检查强度所需干湿循环次数	15	15 及 30	30 及 60	60 及 90	90 及 120	120 及 150	150 及设计次数
鉴定 28d 强度所需试件组数	1	1	1	1	1	1	1
干湿循环试件组数	1	2	2	2	2	2	2
对比试件组数	1	2	2	2	2	2	2
总计试件组数	3	5	5	5	5	5	5

5.25.3.2 试件干湿循环试验步骤

- a) 试件应在养护至 28d 龄期的前 2d，将需进行干湿循环的试件从标准养护室取出。擦干试件表面水分，然后将试件放入烘箱中，并应在 $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下烘 48h。烘干结束后应将试件在干燥环境中冷却到室温。对于掺入掺合料比较多的混凝土，也可采用 56d 龄期或者设计规定的龄期进行试验，这种情况应在试验报告中说明。
- b) 试件烘干并冷却后，应立即将试件放入试件盒（架）中，相邻试件之间应保持 20mm 间距，试件与试件盒侧壁的间距不应小于 20mm。
- c) 试件放入试件盒以后，应将配制好的 5% Na_2SO_4 溶液放入试件盒，溶液应至少超过最上层试件表面 20mm，然后开始浸泡。从试件开始放入溶液，到浸泡过程结束的时间应为 $(15 \pm 0.5)\text{h}$ 。注入溶液的时间不应超过 30min。浸泡龄期应从将混凝土试件移入 5% Na_2SO_4 溶液中起计时。试验过程中宜定期检查和调整溶液的 pH 值，可每隔 15 个循环测试一次溶液 pH 值，应始终维持溶液的 pH 值为 6~8。溶液的温度应控制在 $(25 \sim 30)^\circ\text{C}$ 。也可不检测其 pH 值，但应每月更换一次试验用溶液。
- d) 浸泡过程结束后，应立即排液，并应在 30min 内将溶液排空。溶液排空后应将试件风干 30min，

从溶液开始排出到试件风干的时间应为 1h。

- e) 风干过程结束后应立即升温, 应将试件盒内的温度升到 80℃, 开始烘干过程。升温过程应在 30min 内完成。温度升到 80℃后, 应将温度维持在 (80±5)℃。从升温开始到开始冷却的时间应为 6h。
- f) 烘干过程结束后, 应立即对试件进行冷却, 从开始冷却到将试件盒内的试件表面温度冷却到 (25~30)℃的时间应为 2h。
- g) 每个干湿循环的总时间应为 (24±2) h。然后应再次放入溶液, 按照上述 c)~f) 的步骤进行下一个干湿循环。
- h) 在达到本规程表 7 规定的干湿循环次数后, 应及时进行抗压强度试验。同时应观察经过干湿循环后混凝土表面的破损情况并进行外观描述。当试件有严重剥落、掉角等缺陷时, 应先用高强石膏补平后再进行抗压强度试验。
- i) 当干湿循环试验出现下列三种情况之一时, 可停止试验:
 - 1) 当抗压强度耐蚀系数达到 75%;
 - 2) 干湿循环次数达到 150 次;
 - 3) 达到设计抗硫酸盐等级相应的干湿循环次数。
- j) 对比试件应继续保持原有的养护条件, 直到完成干湿循环后, 与进行干湿循环试验的试件同时进行抗压强度试验。

5.25.4 试验结果处理

5.25.4.1 混凝土抗压强度耐蚀系数按公式 (80) 计算

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \times 100\% \quad (80)$$

式中:

K_f ——抗压强度耐蚀系数, %;

f_{cn} —— N 次干湿循环后受硫酸盐腐蚀的一组混凝土试件的抗压强度测定值, MPa, 精确至 0.1MPa;

f_{c0} ——与受硫酸盐腐蚀试件同龄期的标准养护的一组对比混凝土试件的抗压强度测定值, MPa, 精确至 0.1MPa。

5.25.4.2 f_{c0} 和 f_{cn} 应以 3 个试件抗压强度试验结果的算术平均值作为测定值。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时, 应剔除此值, 并应取其两值的算术平均值作为测定值; 当最大值和最小值, 均超过中间值的 15% 时, 应取中间值作为测定值。

5.25.4.3 抗硫酸盐等级应以混凝土抗压强度耐蚀系数下降到不低于 75% 时的最大干湿循环次数来确定, 并应以符号 KS 表示。

5.26 混凝土抗压疲劳变形试验

5.26.1 适用范围

适用于在自然条件下, 通过测定混凝土在等幅重复荷载作用下疲劳累计变形与加载循环次数的关系, 来反映混凝土抗压疲劳变形性能。

5.26.2 仪器设备

5.26.2.1 疲劳试验机的吨位应能使试件预期的疲劳破坏荷载不小于试验机全量程的 20%, 也不应大于试验机全量程的 80%。准确度应为 I 级, 加载频率应为 (4~8) Hz。

5.26.2.2 上、下钢垫板应具有足够的刚度, 其尺寸应大于 100mm×100mm, 平面度要求为每 100mm 不应超过 0.02mm。

5.26.2.3 微变形测量装置的标距应为 150mm，可在试件两侧相对的位置上同时测量。承受等幅重复荷载时，在连续测量情况下，微变形测量装置的精度不得低于 0.001mm。

5.26.3 试验方法

5.26.3.1 抗压疲劳变形试验应采用尺寸为 100mm×100mm×300mm 的棱柱体试件。试件应在振动台上成型，每组试件应至少为 6 个，其中 3 个用于测量试件的轴向抗压强度 f_c ，其余 3 个用于抗压疲劳变形性能试验。

5.26.3.2 全部试件应在标准养护室养护至 28d 龄期后取出，并应在室温 (20±5)℃ 存放至 3 个月龄期。

5.26.3.3 试件应在龄期达 3 个月时从存放地点取出，先将其中 3 块试件按照本规程 5.6 的有关规定测定其轴向抗压强度 f_c 。

5.26.3.4 然后应对剩下的 3 块试件进行抗压疲劳变形试验。每一试件进行抗压疲劳变形试验前，应先在疲劳试验机上进行静压变形对中，对中时应采用两次对中的方式。首次对中的应力宜取轴向抗压强度 f_c 的 20%（荷载可近似取整数，kN），第二次对中应力宜取轴向抗压强度 f_c 的 40%。对中时，试件两侧变形值之差应小于平均值的 5%，否则应调整试件位置，直至符合对中要求。

5.26.3.5 抗压疲劳变形试验采用的脉冲频率宜为 4Hz。试验荷载（图 43）的上限应力 σ_{\max} 宜取 $0.66f_c$ ，下限应力 σ_{\min} 宜取 $0.1f_c$ 。有特殊要求时，上限应力和下限应力可根据要求选定。

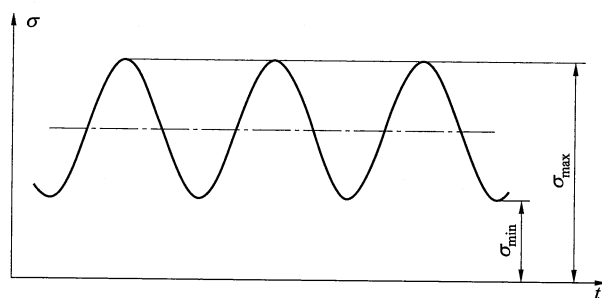


图 43 荷载示意图

5.26.3.6 抗压疲劳变形试验中，应于每 1×10^5 次重复加载后，停机测量混凝土棱柱体试件的累积变形。测量宜在疲劳试验机停机后 15s 内完成。应在对测试结果进行记录之后，继续加载进行抗压疲劳变形试验，直到试件破坏为止。若加载至 2×10^6 次，试件仍未破坏，可停止试验。

5.26.4 试验结果处理

每组应取 3 个试件在相同加载次数时累积变形的算术平均值，作为该组混凝土试件在等幅重复荷载下的抗压疲劳变形测定值，精确至 0.001mm/m。

5.27 混凝土碱-骨料反应试验

5.27.1 混凝土碱-骨料反应试验（混凝土棱柱体试验法）

5.27.1.1 适用范围

本试验用于检验混凝土试件在温度 38℃ 及潮湿条件养护下，混凝土中的碱与骨料反应所引起的膨胀是否具有潜在危害。适用于碱-硅酸反应和碱-碳酸盐反应。

5.27.1.2 仪器设备

5.27.1.2.1 本方法应采用边长分别为 4.75mm、9.5mm、16mm、19mm 的方孔筛。

5.27.1.2.2 称量设备的最大量程应分别为 50kg 和 10kg，感量应分别不超过 10g 和 5g，各一台。

5.27.1.2.3 试模的内尺寸应为 75mm×75mm×275mm，试模两个端板应预留安装测头的圆孔，孔的直径应与测头直径相匹配。

5.27.1.2.4 测头（埋钉）的直径应为（5~7）mm，长度应为 25mm。应采用不锈钢制成，测头均应位于试模两端的中心部位。

5.27.1.2.5 测长仪的测量范围应为（275~300）mm，精度应为±0.001mm。

5.27.1.2.6 养护盒应由耐腐蚀材料制成，不应漏水，且应能密封。盒底部应装有（20±5）mm 深的水，盒内应有试件架，且能使试件垂直立在盒中。试件底部不应与水接触。一个养护盒宜同时容纳 3 个试件。

5.27.1.3 试验方法

5.27.1.3.1 原材料和设计配合比应按照下列规定准备：

- a) 应使用硅酸盐水泥，水泥含碱量宜为（0.9±0.1）%（以 Na₂O 当量计，即 Na₂O+0.658K₂O）。可通过外加浓度为 10% 的 NaOH 溶液，使试验用水泥含碱量达到 1.25%。
- b) 当试验用来评价细骨料的活性，应采用非活性的粗骨料，粗骨料的非活性也应通过试验确定，试验用细骨料细度模数宜为（2.7±0.2）。当试验用来评价粗骨料的活性，应用非活性的细骨料，细骨料的非活性也应通过试验确定。当工程用的骨料为同一品种的材料，应用该粗、细骨料来评价活性。试验用粗骨料应由三种级配：（19~16）mm、（16~9.5）mm 和（9.5~4.75）mm，各取 1/3 等量混合。
- c) 每立方米混凝土水泥用量应为（420±10）kg。水灰比应为 0.42~0.45。粗骨料与细骨料的质量比应为 6:4。试验中除可外加 NaOH 外，不得再使用其他的外加剂。

5.27.1.3.2 试件应按下列规定制作：

- a) 成型前 24h，应将试验所用所有原材料放入（20±5）℃的成型室。
- b) 混凝土搅拌宜采用机械拌和。
- c) 混凝土应一次装入试模，用振捣棒和钹刀捣实，注意测头周围应填实，然后在振动台上振动 30s 或直至表面泛浆为止。
- d) 试件成型后带模放入温度为（20±2）℃、相对湿度在 95% 以上的标准养护室中，并进行覆盖，在混凝土初凝前（1~2）h，用钹刀抹平试件表面，编号，并注明测定方向。

5.27.1.3.3 试件养护及测量应符合下列要求：

- a) 试件应在标准养护室中养护（24±4）h 后脱模（当试件强度较低时，可延至 48h 脱模），脱模时应特别小心不要损伤测头，并应尽快测量试件的基准长度。待测试件应用湿布盖好。
- b) 试件的基准长度测量应在（20±2）℃的恒温室中进行。每个试件应至少重复测试两次，应取两次测值的算术平均值作为该试件的基准长度值。
- c) 测量基准长度后将试件放入养护盒中，盖严盒盖。然后将养护盒放入（38±2）℃的养护室或养护箱里养护。
- d) 试件的测量龄期应从测定基准长度后算起，测量龄期应为 1 周、2 周、4 周、8 周、13 周、18 周、26 周、39 周和 52 周，以后可每半年测一次。每次测量的前一天，应将养护盒从（38±2）℃的养护室中取出，并放入（20±2）℃的恒温室中，恒温时间应为（24±4）h。试件各龄期的测量应与测量基准长度的方法相同，测量完毕后，应将试件调头放入养护盒中，并盖严盒盖。然后将养护盒重新放回（38±2）℃的养护室或者养护箱中继续养护至下一测试龄期。
- e) 每次测量时，应观察试件有无裂缝、变形、渗出物及反应产物等，并应做详细记录。必要时可在长度测试周期全部结束后，辅以岩相分析等手段，综合判断试件内部结构和可能的反应产物。

5.27.1.3.4 当混凝土碱-骨料反应试验出现以下两种情况之一时，可结束试验：

- a) 膨胀率超过 0.04%；

b) 膨胀率虽小于 0.04%，但试验周期已经达 52 周（或一年）。

5.27.1.4 试验结果处理

5.27.1.4.1 试件的膨胀率应按公式（81）计算

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (81)$$

式中：

ε_t ——试件在 t_d 龄期的膨胀率，%，精确至 0.001；

L_t ——试件在 t_d 龄期的长度，mm；

L_0 ——试件的基准长度，mm；

Δ ——测头的长度，mm。

5.27.1.4.2 每组应以 3 个试件测值的算术平均值作为某一龄期膨胀率的测定值。

5.27.1.4.3 当每组平均膨胀率小于 0.020% 时，同一组试件中单个试件之间的膨胀率的差值（最高值与最低值之差）不应超过 0.008%；当每组平均膨胀率大于 0.020% 时，同一组试件中单个试件的膨胀率的差值（最高值与最低值之差）不应超过平均值的 40%。

5.27.2 骨料碱活性检验（砂浆棒长度法）

5.27.2.1 适用范围

5.27.2.1.1 测定水泥砂浆试件的长度变化，以鉴定水泥中的碱与活性骨料间的反应所引起的膨胀是否具有潜在危害。

5.27.2.1.2 本方法适用于判别碱骨料反应较快的碱-硅酸盐反应和碱-硅酸反应，不适用于碱-碳酸盐反应。

5.27.2.2 仪器设备

5.27.2.2.1 筛：砂料标准筛一套，孔形为方孔，孔径（公称直径）为 9.5mm、4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm，以及底盘和盖。

5.27.2.2.2 胶砂搅拌机、铁勺、量筒、秒表、跳桌等。

5.27.2.2.3 钹刀及截面为 14mm×13mm、长（120~150）mm 的硬木制捣棒。

5.27.2.2.4 试模和测头（埋钉）：金属试模，规格为 25.4mm×25.4mm×285mm。试模两端正中有小孔，以便测头在此固定埋入砂浆；测头用不锈钢制成。

5.27.2.2.5 养护筒：用耐腐材料（如塑料等）制成，应不漏水，不透气，加盖后放在养护室中能确保筒内空气相对湿度为 95% 以上，筒内设有试件架，架下盛有水，试件垂直立于架上并不与水接触。

5.27.2.2.6 测长仪或比长仪：测量范围（275~300）mm，精度 0.01mm。

5.27.2.2.7 室温为（38±2）℃ 的养护室。

5.27.2.3 试验步骤

5.27.2.3.1 试验准备

a) 水泥：水泥含碱量为 1.20%，低于此值可掺浓度 10% 的 NaOH 溶液，将系统的含碱量调至水泥量的（1.20±0.05）%。对于具体工程，如该工程拟用水泥含碱量高于此值，则用该种水泥试验。

注：水泥含碱量以氧化钠（Na₂O）计，氧化钾（K₂O）换算为氧化钠时乘以换算系数 0.658。

- b) 骨料：砂料使用工程实际用砂，或拟用砂。将砂样缩分成约 5kg，按表 8 中所示级配及比例组合成试验用料，并将试样洗净晾干。石料，将试样缩分至约 5kg，破碎筛分后，各粒级都要在筛上用水冲净黏附在骨料上的淤泥和细粉，然后烘干备用。

表 8 砂料级配表

筛孔尺寸 mm	4.75~2.36	2.36~1.18	1.18~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15
分级质量 %	10	25	25	25	15

- c) 砂浆配合比：水泥与砂的质量比为 1:2.25。一组三个试件共需水泥 400g，砂 900g。

砂浆用水量按砂浆流动度选定，跳桌跳动次数为：6s 跳动 10 次，以流动度在（105~120）mm 为准。

5.27.2.3.2 试件制作

- a) 型前 24h，将试验所用材料（水泥、砂、拌和水等）放入（20±2）℃的恒温室中。
- b) 砂浆制备：先将称好的水泥、骨料倒入搅拌锅内，开动搅拌机，拌和 5s 后，徐徐加水，（20~30）s 加完，自开动机器起搅拌（180±5）s 停机，将黏在叶片上的砂浆刮下，取下搅拌锅。
- c) 砂浆分两层装入试模内，每层捣 20 次。注意测头周围应填实，浇捣完毕后用钹刀刮除多余砂浆，抹平表面，编号，并标明测定方向。

5.27.2.3.3 试件的养护及测量

- a) 试件成型完毕后，带模放入标准养护室，养护（24±4）h 后，脱模（当试件强度较低时，可延至 48h 脱模）。脱模后立即测量试件的长度。此长度为试件的基准长度。测长应在（20±2）℃的恒温室中进行。每个试件至少重复测试两次，取差值在仪器精度范围内的两个读数的平均值作为长度测定值。待测的试件须用湿布覆盖，以防止水分蒸发。
- b) 测量后将试件放入养护筒中，盖严筒盖，放入（38±2）℃的养护室里养护（一个筒内的试件品种应相同）。
- c) 测长龄期可自测基长后算起 2 周、1 个月、2 个月、3 个月、6 个月、9 个月、12 个月，如有必要还可适当延长。在测长前一天，应把养护筒从（38±2）℃的养护室取出，放入（20±2）℃的恒温室。试件的测长方法与测基长时相同，测量完毕后，应将试件调头放入养护筒中，盖好筒盖，放回（38±2）℃的养护室继续养护到下一测试龄期。
- d) 在测量时应对试件进行观察，内容包括试件变形，裂缝，渗出物（应注意有无胶体物质），并做记录。

5.27.2.4 试验结果处理

5.27.2.4.1 试件的膨胀率应按公式（82）计算

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (82)$$

式中：

ε_t ——试件在 t d 龄期的膨胀率，%，精确至 0.001；

L_t ——试件在 t d 龄期的长度，mm；

L_0 ——试件的基准长度，mm；

Δ ——测头（即埋钉）的长度，mm。

5.27.2.4.2 以三个试件测值的平均值作为某一龄期膨胀率的测定值。

5.27.2.4.3 试验精度应符合下述要求：膨胀率小于 0.020%时，单个测值与平均值的差值不得大于 0.003%；膨胀率大于 0.020%时，单个测值与平均值的差值不得大于平均值的 15%。超过上述规定时需查明原因，取其余两个测值的平均值作为该龄期膨胀率的测定值。当一组试件的测值少于两个时，该龄期的膨胀率须通过补充试验确定。

5.27.2.4.4 评定标准

当试件半年膨胀率超过 0.10%，或三个月膨胀率超过 0.05%时（只有在缺少半年膨胀率资料时才有效），即评定为具有潜在危害性的活性骨料。反之，如低于上述数值，则评定为非活性骨料。

5.27.3 碱骨料反应抑制措施有效性试验（砂浆棒快速法）

5.27.3.1 目的及适用范围

本方法能在 16d 内检测出骨料在砂浆中的潜在有害的碱-硅反应，尤其适合于检验反应缓慢或只在后期才产生膨胀的骨料。

5.27.3.2 仪器设备、试剂及防护用品

5.27.3.2.1 仪器设备

- a) 筛：砂料标准筛一套，孔形为方孔，孔径（公称直径）为 9.5mm、4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm，以及底盘和盖。
- b) 胶砂搅拌机，搅拌叶片末端与搅拌锅之间的空隙距离应为 (5.1 ± 0.3) mm。
- c) 镬刀、铁勺、量筒、硬木捣棒截面为 14mm×13mm，长为 150mm。
- d) 试模及测头（埋钉）：金属试模，规格为 25.4mm×25.4mm×285mm。试模两端正中有小孔，以便测头在此埋入砂浆。测头用不锈钢金属制成。
- e) 养护筒：用耐腐蚀和耐高温（80℃）的聚丙烯或聚乙烯制成。容器能密封，使外面的水不能进入，使容器中溶液的浓度不发生变化。
- f) 恒温水浴箱，温度能控制在 (80 ± 2) ℃。
- g) 比长仪：测量范围（275~300）mm，精度 0.01mm。

5.27.3.2.2 试剂：NaOH（分析纯）。1mol/L NaOH 溶液，浓度应为（0.99~1.01）mol/L。每升 NaOH 溶液中含 NaOH 40g。

5.27.3.2.3 防护用品：防酸碱的围裙、袖套、手套、胶鞋及面罩等。

5.27.3.3 试验步骤

5.27.3.3.1 试样制备

- a) 水泥：使用硅酸盐水泥。用 GB/T 750 中相关方法检验，该水泥压蒸膨胀率应小于 0.20%。水泥的含碱量为 (0.9 ± 0.1) %（当水泥含碱量较低时，通过外加 NaOH 达到要求标准）。
- b) 骨料：砂料可根据工程实际用砂，按表 9 的级配组合。粗骨料如为一种岩石，可破碎成表 9 的级配组合成试验用砂。如为多种岩石，可根据岩相检验结果，分成活性和非活性两部分，分别破碎成表 9 中所示级配，按比例组合成试验用砂。也可按工程现场粗骨料的级配来进行破碎加工。所有样品应洗净，烘干，分别储存于密封的容器中。

表 9 砂料级配表

筛孔尺寸 mm	4.75~2.36	2.36~1.18	1.18~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15
分级质量 %	10	25	25	25	15

- c) 砂浆配合比：水泥与砂的质量比为 1:2.25。一组三个试件，共需水泥 400g，砂 900g，砂浆水灰比为 0.47。

5.27.3.3.2 试件制作

- a) 成型前 24h，将试验所用材料（水泥、砂、拌和水）放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度大于 50% 的恒温室中。
- b) 砂浆制备：先将水泥与砂倒入搅拌锅内，开动搅拌机。拌和 5s 后徐徐加水，30s 加完，自开动机器起搅拌 3min 停机。将黏在叶片上的砂浆刮下，取下搅拌锅。
- c) 砂浆分两层装入试模内，每层用捣棒捣 20 次（并注意测头周围应填实），捣完用钹刀刮除多余砂浆，抹平表面。试件成型 4h 后可对试件进行编号，并标明测定方向。

5.27.3.3.3 试件的养护及测量

- a) 试件成型完毕后，连模一起放入温度为 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，湿度 95% 以上的养护室中或养护箱中，养护 (24 ± 2) h 后，脱模，立即在恒温室测量试件的初始读数（作为测读基准长度的参照值）。
- b) 测量完毕，将试件完全浸泡在装有自来水的密封的养护筒中，将养护筒放入温度保持在 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温水浴箱中恒温 24h（一个筒为同一组试件）。
- c) 将养护筒从恒温水浴箱中取出，打开筒盖，将试件从筒中取出，用毛巾将表面和两端测头擦干，尽快测量试件的基准长度，试件从溶液中取出到测量完毕应在 (15 ± 5) s 的时间内完成。
- 注：每个试件测量前，均应先测标准棒，以便校正试件测值。
- d) 一组试件测量完后，立即装入盛有 1mol/L NaOH 溶液的养护筒中，试件应完全浸泡在溶液中，盖好养护筒盖子，使之密封，再将养护筒放入温度为 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温水浴中。
- e) 测量基准长度后进行三次观测，即 3d、7d、14d（从测基长后算起），观测龄期准至 1h。试件的测量方法与测基准长度相同。
- f) 每次测量时，应观察试件的外观特征，有无裂缝、弯曲等。

5.27.3.4 试验结果处理

5.27.3.4.1 试件的膨胀率按公式 (83) 计算

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (83)$$

式中：

ε_t ——试件在 t d 龄期的膨胀率，%，精确至 0.001；

L_t ——试件在 t d 龄期的长度，mm；

L_0 ——试件的基准长度，mm；

Δ ——测头（即埋钉）的长度，mm。

以 3 个试件测值的平均值作为某一龄期膨胀率的测定值。

5.27.3.4.2 评定标准：

- a) 砂浆试件 14d 的膨胀率小于 0.1%，则骨料为非活性骨料。
- b) 砂浆试件 14d 的膨胀率大于 0.2%，则骨料为具有潜在危害性反应的活性骨料。
- c) 砂浆试件 14d 的膨胀率为 0.1%~0.2% 的，对这种骨料应结合现场记录、岩相分析、开展其他的辅助试验或将试件观测的时间延至 28d 后的测试结果等来进行综合评定。

5.28 混凝土早期抗裂试验

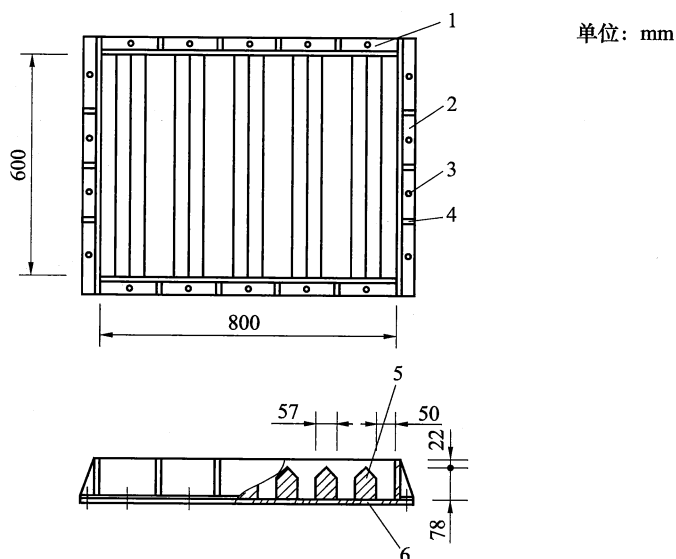
5.28.1 适用范围

本试验用于测试混凝土试件在约束条件下的早期抗裂性能。

5.28.2 仪器设备

5.28.2.1 本方法应采用尺寸为 $800\text{mm}\times 600\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的平面薄板型试件，每组应至少 2 个试件。混凝土骨料最大公称粒径不应超过 31.5mm 。

5.28.2.2 混凝土早期抗裂试验装置（见图 44）应采用钢制模具，模具的四边（包括长侧板和短侧板）宜采用槽钢或者角钢焊接而成，侧板厚度不应小于 5mm ，模具四边与底板宜通过螺栓固定在一起。模具内应设有 7 根裂缝诱导器，裂缝诱导器可分别用 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 、 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ 角钢与 $5\text{mm}\times 50\text{mm}$ 钢板焊接组成，并应平行于模具短边。底板应采用不小于 5mm 厚的钢板，并应在底板表面铺设聚乙烯薄膜或者聚四氟乙烯片做隔离层。模具应作为测试装置的一个部分，测试时应与试件连在一起。



1—长侧板；2—短侧板；3—螺栓；4—加强肋；5—裂缝诱导器；6—底板

图 44 混凝土早期抗裂试验装置

5.28.2.3 风扇的风速应可调，并且应能够保证试件表面中心处的风速不小于 5m/s 。

5.28.2.4 温度计精度不应低于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。相对湿度计精度不应低于 $\pm 1\%$ 。风速计精度不应低于 $\pm 0.5\text{m/s}$ 。

5.28.2.5 刻度放大镜的放大倍数不应小于 40 倍，分度值不应大于 0.01mm 。

5.28.2.6 照明装置可采用手电筒或者其他简易照明装置。

5.28.2.7 钢直尺的最小刻度应为 1mm 。

5.28.3 试验方法

5.28.3.1 试验宜在温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $(60\pm 5)\%$ 的恒温恒湿室中进行。

5.28.3.2 将混凝土浇筑至模具内后，应立即将混凝土摊平，且表面应比模具边框略高。可使用平板表面式振捣器或者采用振捣棒插捣，应控制好振捣时间，并应防止过振和欠振。

5.28.3.3 在振捣后，应用镟刀整平表面，并使骨料不外露，且应使表面平实。

5.28.3.4 应在试件成型 30min 后，立即调节风扇位置和风速，使试件表面中心正上方 100mm 处风速为 $(5\pm 0.5)\text{m/s}$ ，并应使风向平行于试件表面和裂缝诱导器。

5.28.3.5 试验时间应从混凝土搅拌加水开始计算，应在 $(24\pm 0.5)\text{h}$ 测读裂缝。裂缝长度应用钢直尺测量，并应取裂缝两端直线距离为裂缝长度。当一个刀口上有两条裂缝时，可将两条裂缝的长度相加，折算成一条裂缝。

5.28.3.6 裂缝宽度应采用放大倍数至少 40 倍的读数显微镜进行测量，并应测量每条裂缝的最大宽度。

5.28.3.7 平均开裂面积、单位面积的裂缝数目和单位面积上的总开裂面积应根据混凝土浇筑 24h 测量得到的裂缝数据来计算。

5.28.4 试验结果处理

5.28.4.1 裂缝的平均开裂面积应按公式 (84) 计算

$$a = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (W_i \times L_i) \quad (84)$$

5.28.4.2 单位面积的裂缝数目应按公式 (85) 计算

$$b = \frac{N}{A} \quad (85)$$

5.28.4.3 单位面积上的总开裂面积应按公式 (86) 计算

$$c = ab \quad (86)$$

式中:

a ——裂缝的平均开裂面积, $\text{mm}^2/\text{条}$, 精确到 $1\text{mm}^2/\text{条}$;

W_i ——第 i 条裂缝的最大宽度, mm , 精确到 0.01mm ;

L_i ——第 i 条裂缝的长度, mm , 精确到 1mm ;

N ——总裂缝数目, 条;

b ——单位面积的裂缝数目, 条/ m^2 , 精确到 0.1 条/ m^2 ;

A ——平板的面积, m^2 , 精确到小数点后两位;

c ——单位面积上的总开裂面积, mm^2/m^2 , 精确到 $1\text{mm}^2/\text{m}^2$ 。

5.28.4.4 每组应分别以 2 个或多个试件的平均开裂面积 (单位面积上的裂缝数目或单位面积上的总开裂面积) 的算术平均值作为该组试件平均开裂面积 (单位面积上的裂缝数目或单位面积上的总开裂面积) 的测定值。

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
发电工程混凝土试验规程
DL/T 1448—2015

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京传奇佳彩数码印刷有限公司印刷

*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 5.25印张 155千字
印数 001—200册

*

统一书号 155123·3163 定价 43.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

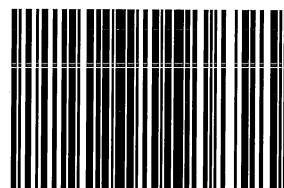
版 权 专 有 翻 印 必 究



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



155123.3163

上架建议：水利水电工程/
水利水电施工