

ICS 93.020

P 10

备案号: J2388—2017

**DL**

**中华人民共和国电力行业标准**

**P DL/T 5532 — 2017**

---

## **粉煤灰试验规程**

**Code for fly ash test method**

2017-08-02 发布

2017-12-01 实施

---

**国家能源局 发布**

中华人民共和国电力行业标准

粉煤灰试验规程

Code for fly ash test method

**DL/T 5532—2017**

主编部门：电力规划设计总院

批准部门：国家能源局

施行日期：2017年12月1日

中国计划出版社

2017 北 京



# 国家能源局

## 公告

2017 年 第 8 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法(试行)〉及实施细则的通知》(国能局科技〔2009〕52 号)有关规定,经审查,国家能源局批准《风电场调度运行信息交换规范》等 120 项行业标准,其中能源标准(NB)54 项、电力标准(DL)66 项,现予以发布。

上述标准中电力管理及电工装备标准由中国电力出版社出版发行,两项交流电弧炉标准由中国标准出版社出版发行,电力规划设计标准由中国计划出版社出版发行,煤炭建设标准由煤炭工业出版社出版发行,农村能源及生物质标准由中国农业出版社出版发行。

附件:行业标准目录

国家能源局  
2017 年 8 月 2 日

附件:

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
.....						
108	DL/T 5532—2017	粉煤灰试验规程			2017-08-02	2017-12-01
.....						

## 前 言

根据《国家能源局关于下达 2014 年第一批能源领域行业标准制(修)订计划的通知》(国能科技〔2014〕298 号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结已有试验成果及工作经验,并在广泛征求意见的基础上,制定本规程。

本规程主要技术内容是:总则、术语和符号、试样制备、含水率试验、密度试验、比重试验、颗粒分析试验、相对密度试验、击实试验、渗透试验、固结试验、三轴压缩试验、直接剪切试验、易溶盐试验等。

本规程由国家能源局负责管理,由电力规划设计总院提出,由能源行业发电设计标准化技术委员会负责日常管理,由中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司负责具体内容解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送电力规划设计总院(地址:北京市西城区安德路 65 号;邮政编码:100120)。

本规程主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

**主 编 单 位:**中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

**参 编 单 位:**中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司

国核电力规划设计研究院

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司

**主要起草人:**赵锦明 赵书明 贾建勋 白新春 曾 平

俞 萍 杨雪玲 章 虹 黄兴怀 禹 峰

朱小丹 房秀娜 刘振坤 顾亚娟 赵春宏

王继华

主要审查人:王中平 邓南文 袁立江 邹信华 别传炎  
刘厚健 李 扬 贾 宁 刘珍岩 王庆环  
任亚群 邵长云 廖爱平 马海毅 王基文



# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 2 )
3	试样制备 .....	( 4 )
3.1	一般规定 .....	( 4 )
3.2	仪器设备 .....	( 4 )
3.3	扰动灰样的制备 .....	( 5 )
3.4	原状灰样的制备 .....	( 7 )
3.5	试样饱和 .....	( 7 )
4	含水率试验 .....	( 11 )
5	密度试验 .....	( 13 )
6	比重试验 .....	( 15 )
6.1	一般规定 .....	( 15 )
6.2	比重瓶法 .....	( 15 )
7	颗粒分析试验 .....	( 17 )
7.1	一般规定 .....	( 17 )
7.2	筛析法 .....	( 17 )
7.3	移液管法 .....	( 19 )
8	相对密度试验 .....	( 26 )
8.1	一般规定 .....	( 26 )
8.2	最小干密度试验 .....	( 26 )
8.3	最大干密度试验 .....	( 28 )
8.4	相对密度计算 .....	( 29 )

9	击实试验 .....	( 31 )
9.1	一般规定 .....	( 31 )
9.2	轻型击实试验 .....	( 31 )
10	渗透试验 .....	( 35 )
10.1	一般规定 .....	( 35 )
10.2	常水头渗透试验 .....	( 35 )
10.3	变水头渗透试验 .....	( 40 )
11	固结试验 .....	( 43 )
12	三轴压缩试验 .....	( 49 )
12.1	一般规定 .....	( 49 )
12.2	不固结不排水剪切试验 .....	( 57 )
12.3	固结不排水剪切试验 .....	( 59 )
12.4	固结排水剪切试验 .....	( 64 )
13	直接剪切试验 .....	( 67 )
13.1	一般规定 .....	( 67 )
13.2	直接剪切试验 .....	( 68 )
14	易溶盐试验 .....	( 72 )
14.1	一般规定 .....	( 72 )
14.2	浸出液制取 .....	( 72 )
14.3	易溶盐总量测定 .....	( 73 )
14.4	碳酸根及重碳酸根的测定 .....	( 74 )
14.5	氯离子测定 .....	( 77 )
14.6	硫酸根的测定 .....	( 79 )
14.7	钙离子的测定 .....	( 85 )
14.8	镁离子的测定 .....	( 86 )
14.9	钠离子和钾离子的测定 .....	( 87 )
14.10	pH 值的测定 .....	( 89 )
附录 A	各项试验记录 .....	( 92 )
附录 B	比重瓶校正 .....	(110)

附录 C 煤油比重的测定 ..... (112)

本规程用词说明 ..... (114)

引用标准名录 ..... (115)

附:条文说明 ..... (117)



## Contents

1	General provisions .....	( 1 )
2	Terms and symbols .....	( 2 )
2.1	Terms .....	( 2 )
2.2	Symbols .....	( 2 )
3	Samples preparation .....	( 4 )
3.1	General requirements .....	( 4 )
3.2	Instruction and equipment .....	( 4 )
3.3	Disturbed samples preparation .....	( 5 )
3.4	Undisturbed samples preparation .....	( 7 )
3.5	Samples saturated .....	( 7 )
4	Water content test .....	( 11 )
5	Density test .....	( 13 )
6	Specific gravity test .....	( 15 )
6.1	General requirements .....	( 15 )
6.2	Pyknometer method .....	( 15 )
7	Grain distribution analysis test .....	( 17 )
7.1	General requirements .....	( 17 )
7.2	Sieving method .....	( 17 )
7.3	Pipette method .....	( 19 )
8	Relative density test .....	( 26 )
8.1	General requirements .....	( 26 )
8.2	Minimun dry density test .....	( 26 )
8.3	Maximun dry density test .....	( 28 )
8.4	Calculation of relative density .....	( 29 )



9	Compaction test .....	( 31 )
9.1	General requirements .....	( 31 )
9.2	Lightweight compaction test .....	( 31 )
10	Permeability test .....	( 35 )
10.1	General requirements .....	( 35 )
10.2	Constant head permeability test .....	( 35 )
10.3	Variable head permeability test .....	( 40 )
11	Consolidation test .....	( 43 )
12	Triaxial compression test .....	( 49 )
12.1	General requirements .....	( 49 )
12.2	Unconsolidated undrained test .....	( 57 )
12.3	Consolidated undrained test .....	( 59 )
12.4	Consolidated drained test .....	( 64 )
13	Direct shear test .....	( 67 )
13.1	General requirements .....	( 67 )
13.2	Direct shear test .....	( 68 )
14	Strongly soluble salt test .....	( 72 )
14.1	General requirements .....	( 72 )
14.2	Leach liquor prepared .....	( 72 )
14.3	Determination of total strongly soluble salt .....	( 73 )
14.4	Determination of carbonate and bicarbonate .....	( 74 )
14.5	Determination of chloride ion .....	( 77 )
14.6	Determination of sulfate ion .....	( 79 )
14.7	Determination of calcium ion .....	( 85 )
14.8	Determination of magnesium ion .....	( 86 )
14.9	Determination of sodium and potassium ion .....	( 87 )
14.10	Determination of pH value .....	( 89 )
Appendix A	Testing records .....	( 92 )
Appendix B	Calibration of pyknometer .....	( 110 )

Appendix C Gravity test of kerosene .....	(112)
Explanation of wording in this code .....	(114)
List of quoted standards .....	(115)
Addition;Explanation of provisions .....	(117)

# 1 总 则

**1.0.1** 为了测定粉煤灰的基本工程性质,统一试验方法,为电力工程设计和施工提供可靠的指标和参数,制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于电力工程中粉煤灰填筑料和粉煤灰地基的基本工程性质试验。

**1.0.3** 本规程试验所用的仪器、设备应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的规定,并应定期按现行有关标准进行检定校准。

**1.0.4** 粉煤灰试验除应符合本规程规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。



## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 粉煤灰 fly ash

从电厂煤粉锅炉烟气中收集的粉末,其粒径一般在 0.001mm~2mm 之间。

#### 2.1.2 四分对角取样法 quartering method

将混合均匀的灰样堆成圆锥形,通过圆心将其四等分,去掉任意相对的两等分后,剩下的两等分再混合均匀堆成圆锥形,照例四等分,如此反复进行,直至得到所需灰样数量为止。

### 2.2 符 号

#### 2.2.1 物理性指标。

$C_c$  —— 曲率系数;

$C_u$  —— 不均匀系数;

$D_r$  —— 相对密度;

$e$  —— 孔隙比;

$G_s$  —— 灰粒比重;

$G_{mt}$  ——  $t^{\circ}\text{C}$  时煤油的比重;

$m$  —— 质量;

$S_r$  —— 饱和度;

$V$  —— 容积;

$\omega$  —— 含水率;

$\rho$  —— 密度。

#### 2.2.2 力学性指标。

$A_i$  —— 破坏时孔隙水压力系数;

$a_v$  —— 压缩系数；  
 $B$  —— 初始孔隙水压力系数；  
 $c$  —— 黏聚力；  
 $C_c$  —— 压缩指数；  
 $C_s$  —— 回弹指数；  
 $C_v$  —— 固结系数；  
 $E_s$  —— 压缩模量；  
 $k_{20}$  —— 标准温度(20℃)时试样的渗透系数；  
 $p_c$  —— 先期固结压力；  
 $s$  —— 抗剪强度；  
 $u$  —— 孔隙水压力；  
 $\sigma$  —— 正应力；  
 $\tau$  —— 剪应力；  
 $\varphi$  —— 内摩擦角。

### 2.2.3 化学性指标。

$b(x)$  —— 物质  $x$  质量摩尔浓度。

### 3 试样制备

#### 3.1 一般规定

3.1.1 试样制备的数量应根据试验需要而设定,宜多制备 1 个~2 个备用。

3.1.2 扰动样制备时,试样密度、含水率与制备标准之差值应分别在 $\pm 0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 与 $\pm 1\%$ 范围以内,平行试验或同一组试样间密度、含水率差值应分别在 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1\%$ 以内。

3.1.3 原状样制备时,平行试验或同一组内试样的密度差值不应大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,含水率差值不应大于 $2\%$ 。

3.1.4 对密封的原状样应小心搬运和妥善存放,试验前不应开启。

3.1.5 试样饱和方法视灰的性质可选用浸水饱和法、毛细管饱和法及真空抽气饱和法三种。

#### 3.2 仪器设备

3.2.1 试样制备所用主要仪器设备应包括分析筛、台秤、天平、环刀、击实仪和烘箱,辅助工具宜包括饱和器、抽气机、干燥器、保湿器、木锤、木碾、橡皮板、修土刀、钢丝锯、凡士林、喷雾器、搪瓷盘、标签、塑料袋以及其他盛灰器。

3.2.2 试样制备所用主要仪器设备规格应符合表 3.2.2 的规定。

表 3.2.2 试样制备所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
分析筛	孔径 2mm
台秤	称量 10kg,分度值 5g;称量 5000g,分度值 1g



续表 3.2.2

仪器设备名称	规格和要求
天平	称量 1000g,分度值 0.5g;称量 500g,分度值 0.1g;称量 200g,分度值 0.01g
环刀	内径 61.8mm 和 79.8mm,高 20mm;内径 61.8mm,高 40mm
击实仪	轻型
烘箱	电热烘箱或温度能保持 105℃~110℃的其他能源烘箱

3.2.3 分析筛应按现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第 1 部分:金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1 的规定进行校验。

3.3 扰动灰样的制备

3.3.1 根据工程实际情况,扰动灰样的制备可分别采用击样法、击实法和压样法。

3.3.2 击样法应按下列步骤和要求进行:

1 将灰样从试样筒或包装袋中取出,对灰样的颜色、气味、夹杂物及均匀程度等进行描述,并将灰样拌和均匀,取代表性灰样测定含水率,进行风干或烘干。

2 将风干或烘干灰样放在橡皮板上用木碾碾散,不得使用粉碎机。将碾散的灰样过 2mm 筛。过筛后用四分对角取样法,取出足够数量的代表性灰样,充分拌匀,装入密封容器内,标以标签,以备各项试验之用。对风干灰样,需测定风干含水率。

3 为配制一定含水率的灰样,取过筛的足够试验用灰,平铺在橡皮板或搪瓷盘内,用喷水设备均匀喷洒预计的加水量,充分拌匀后,装入塑料袋,放入保湿器或其他密封容器内,浸润一昼夜。计算所需的加水量应按下式计算:

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01 \omega_0} \times 0.01(\omega' - \omega_0) \quad (3.3.2-1)$$

式中:  $m_w$  ——制备试样所需加水量(g);

$m$  ——风干或烘干灰质量(g);



$\omega_0$  ——风干或烘干灰含水率(%)；

$\omega'$  ——制样所要求的含水率(%)。

4 测定湿灰样不同位置处的含水率不应少于两点,偏差不应大于1%。

5 根据模具的容积及所要求的干密度、含水率,按本规程式(3.3.2-1)和式(3.3.2-2)计算的用量,制备所需湿灰量。将湿灰样倒入模具内,并固定在底板上的击实器内,用击实方法将灰样击入模具内,称取试样质量,并符合本规程第3.1.2条的规定。

$$m_s = (1 + 0.01\omega_s)\rho_d V \quad (3.3.2-2)$$

式中:  $m_s$  ——湿灰质量(g);

$\omega_s$  ——湿灰含水率(%);

$\rho_d$  ——试样要求的干密度(g/cm<sup>3</sup>);

$V$  ——击样筒或环刀模具的容积(cm<sup>3</sup>)。

3.3.3 击实法应按下列步骤和要求进行:

1 按照本规程第3.3.2条中第1款~第4款的规定配制一定含水率的灰样;

2 根据击实筒容积和要求的干密度、含水率,按本规程式(3.3.2-1)和式(3.3.2-2)计算的用量,制备所需湿灰量。依据击实试验程序,将灰样击实到所需的密度,用推土器推出。将试验用的环刀内壁涂一薄层凡士林,刃口向下放在灰样上,边压边削,直至灰样高出环刀为止。削去环刀两端余灰,并用平口刀修平,修平时不应在试样表面反复涂抹。擦净环刀外壁后,称环刀和试样的总质量,准确至0.1g,并测定环刀两端削下灰样的含水率。

3.3.4 压样法应按下列步骤和要求进行:

1 按照本规程第3.3.2条中第1款~第4款的规定配制一定含水率的灰样;

2 根据模具容积和要求的干密度、含水率,按本规程式(3.3.2-1)和式(3.3.2-2)计算的用量,制备所需湿灰量。以静压力将灰压入模具内,称取试样质量,并符合本规程第3.1.2条的规定。



**3.3.5** 当考虑粉煤灰的凝硬作用时,制备好的试样可根据工程实际需要放置一段时间再进行试验。

**3.3.6** 扰动试样制备记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.1。

### **3.4 原状灰样的制备**

**3.4.1** 现场采样和制备应符合下列规定:

- 1 根据工程要求,应选定具有代表性的取样点;
- 2 应在预定的取样深度以上 2cm 处开始切削为一个平面,用环刀直接压入法取样;
- 3 取样过程中,应仔细观察灰样的状态,并描述它的深度、颜色、气味、粒径、夹杂物、裂缝和均匀性等。

**3.4.2** 室内灰样的制备应符合下列规定:

- 1 小心开启原状灰样的试样筒,取出灰样;观察灰样,并对它的层次、气味、粒径、颜色、夹杂物、裂缝和均匀性等进行描述;当确定灰样已受扰动或取样质量不符合规定时,不应制备力学性质试验的试样;
- 2 按本规程第 3.3.1 条第 5 款击实法的操作步骤,切取试样;切削过程中注意灰样的上下和层次,无特殊要求时,切取方向应与天然层次垂直;
- 3 从余灰中取代表性试样,根据试验要求测定含水率、比重、颗粒分析等指标。

**3.4.3** 原状试样制备记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.2。

### **3.5 试样饱和**

**3.5.1** 毛细管饱和法适用于渗透系数大于  $10^{-4}$  cm/s 的试样,应按下列步骤和要求进行:

- 1 选用框式饱和器(图 3.5.1),在装有试样的环刀两面贴放滤纸,再放两块大于环刀的透水板于滤纸上,通过两端的螺母将透水板、环刀夹紧;



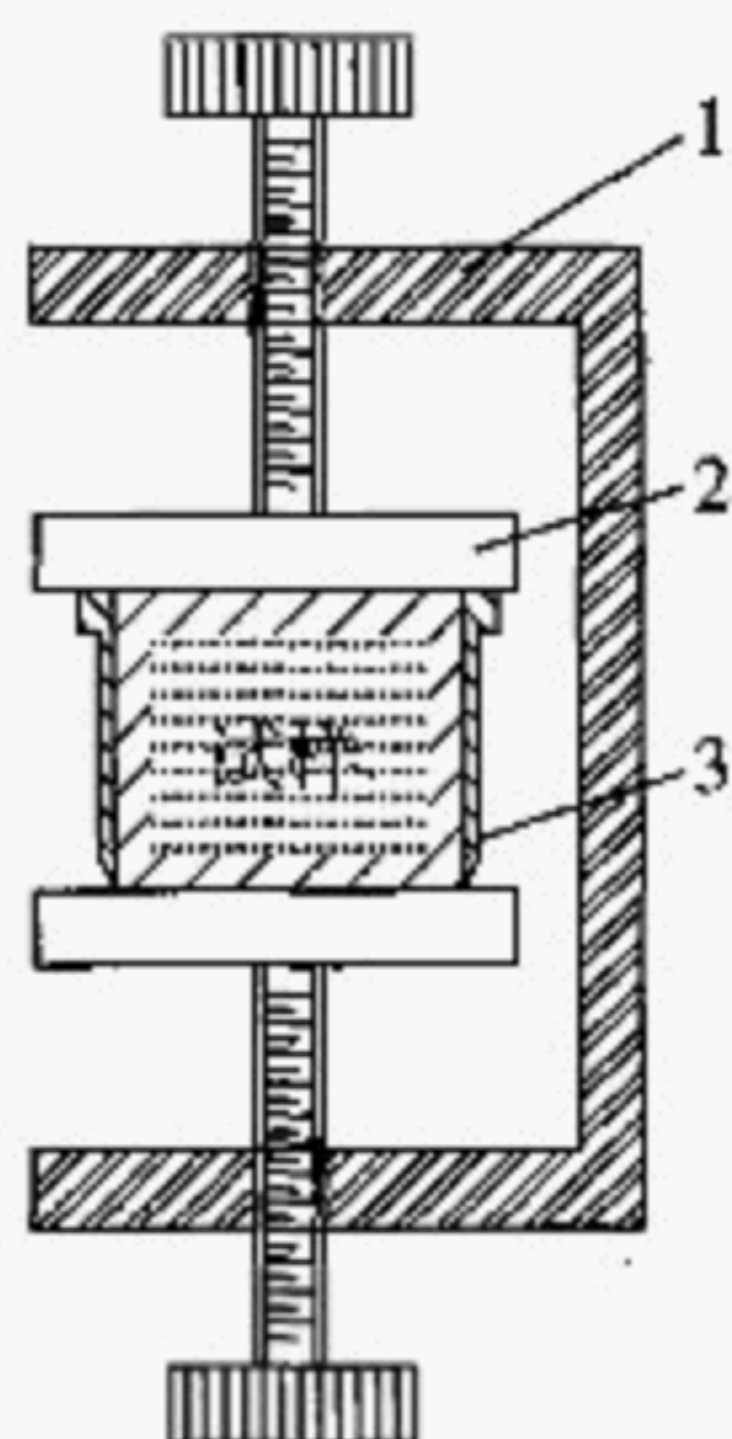


图 3.5.1 框式饱和器

1—框架；2—透水板；3—环刀

2 将装好试样的饱和器置于水箱中，注入清水，水面不得将试样淹没，关上箱盖，浸水时间不宜少于 24h，使试样充分饱和；

3 取出饱和器，松开螺母，取出环刀，擦干外壁，吸取表面水，称环刀和试样的总质量，准确至 0.1g；按本规程式 3.5.2 计算饱和度；当饱和度低于 95% 时，应继续饱和。

3.5.2 抽气饱和法适用于不大于  $10^{-4}$  cm/s 的试样，应按下列步骤进行：

1 选用叠式饱和器(图 3.5.2-1)或框式饱和器(图 3.5.1)，在叠式下板正中放置稍大于环刀直径的透水板和滤纸，将装有试样的环刀放在滤纸上，试样上再放一张滤纸和一块透水板，依次重复，由下而上重叠，至适当的高度，将饱和器上板放在最上部的透水板上，旋紧拉杆上端的螺丝，将各个环刀在上下板之间夹紧；

2 将装有试样的饱和器放入真空缸(图 3.5.2-2)内，盖上缸盖；盖缝内应涂一薄层凡士林以防止漏气；关管夹、开二通阀，将真空缸与抽气机接通，启动抽气机，当真空表接近  $-100$  kPa，继续抽气，抽气时间不少于 0.5h，微开管夹，使纯水徐徐注入真空缸，在注水过程中，应调节管夹，使真空压力表读数基本保持不变；

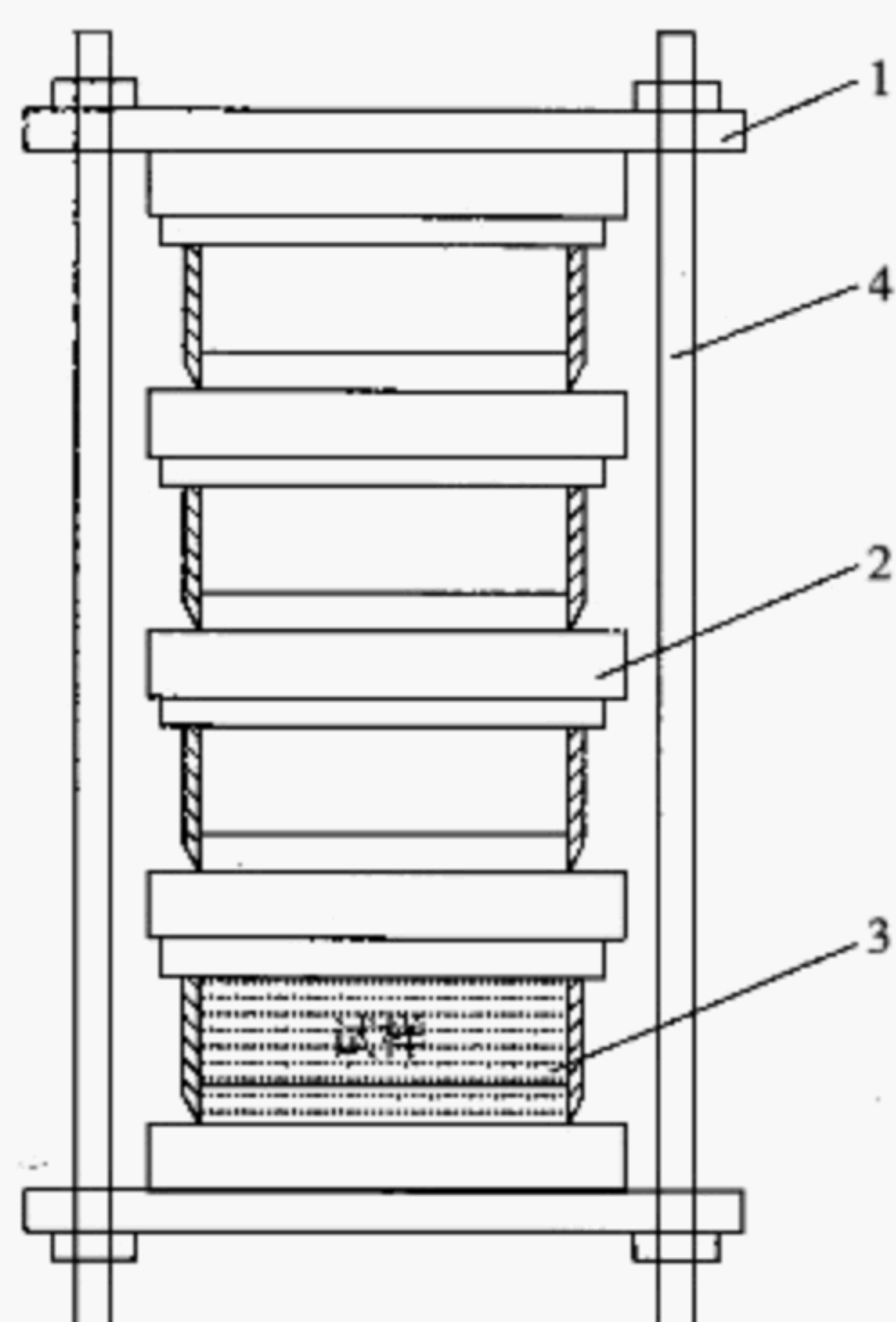


图 3.5.2-1 叠式饱和器

1—夹板;2—透水板;3—环刀;4—拉杆

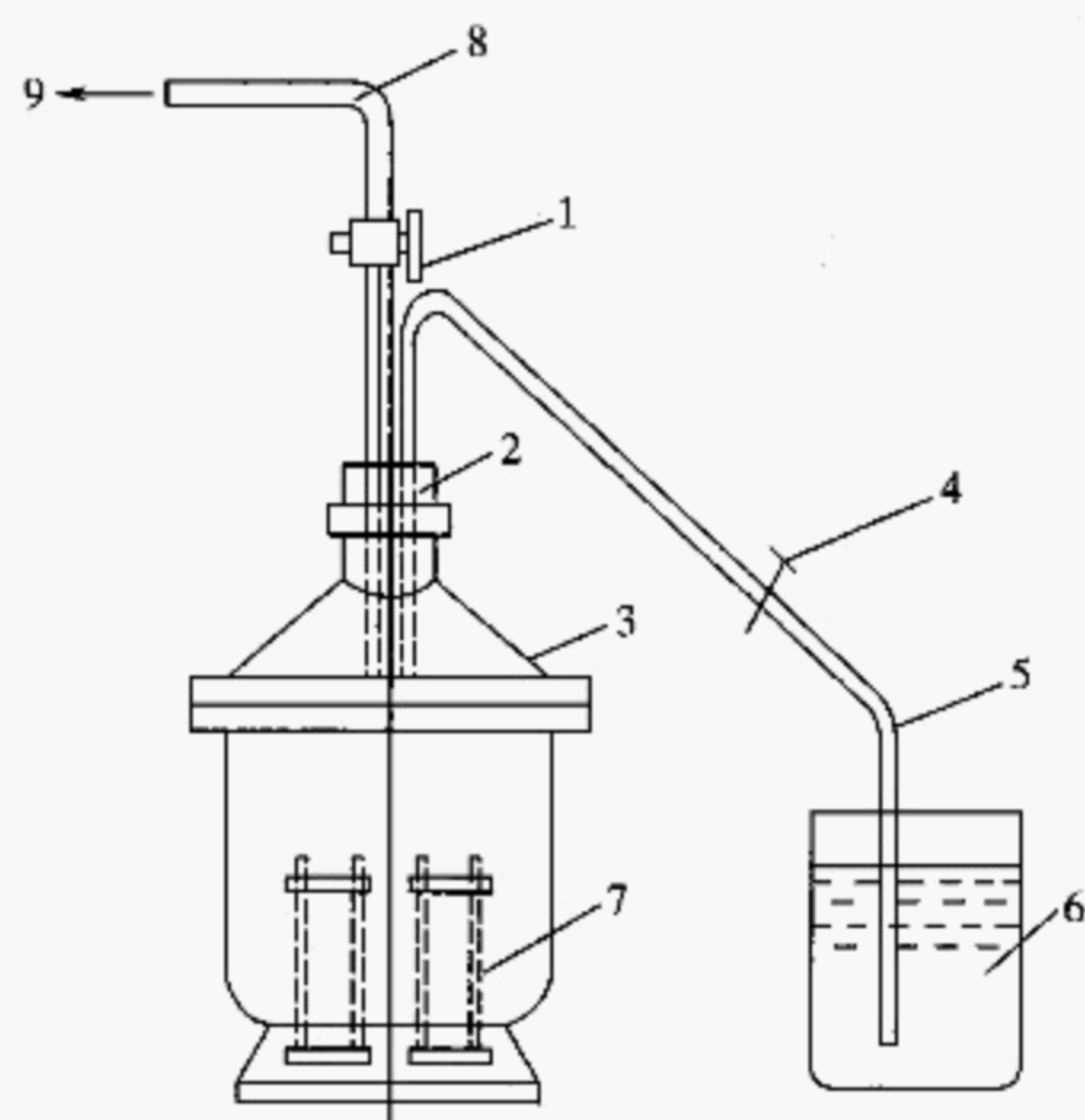


图 3.5.2-2 真空缸

1—二通阀;2—橡皮塞;3—真空缸;4—管夹;5—引水管;  
6—水缸;7—饱和器;8—排气管;9—接抽气机



3 待水淹没饱和器后停止抽气,开管夹使空气进入真空缸,静置一段时间,借大气压力,使试样充分饱和;

4 打开真空缸,从饱和器内取出带环刀的试样,称环刀和试样总质量,准确至 0.1g;当饱和度低于 95%时,应继续抽气饱和;饱和度应按下式计算:

$$S_r = \frac{(\rho_{sr} - \rho_d) G_s}{\rho_d \cdot e} \text{ 或 } S_r = \frac{\omega_{sr} G_s}{e} \quad (3.5.2)$$

式中:  $S_r$  ——试样饱和度(%);

$\rho_{sr}$  ——试样饱和后的密度(g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_d$  ——灰的干密度(g/cm<sup>3</sup>);

$\omega_{sr}$  ——饱和后的含水率(%);

$G_s$  ——灰粒比重;

$e$  ——试样孔隙比。

3.5.3 浸水饱和法适用于疏松的试样,应将带有环刀的试样置于固结或剪切容器内,同时向容器内自下而上注水,使试样浸水饱和。

3.5.4 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)饱和法应符合本规程第 12.1.11 条的规定。

3.5.5 反压力饱和法应符合本规程第 12.1.12 条的规定。

## 4 含水率试验

4.0.1 测定粉煤灰的含水率应采用烘干法。

4.0.2 本试验适用于有机质含量不超过干质量 5% 的粉煤灰。

4.0.3 本试验所用主要仪器设备应包括烘箱和天平,辅助工具包括干燥器和称量盒。

4.0.4 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 4.0.4 的规定。

表 4.0.4 含水率试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
烘箱	电热烘箱或温度能保持 105℃~110℃ 的其他能源烘箱
天平	称量 1000g,分度值 0.5g;称量 500g,分度值 0.1g; 称量 200g,分度值 0.01g

4.0.5 本试验应按下列步骤进行:

1 取有代表性试样 30g~40g,将选取的试样放入称量盒内,立即盖好盒盖,擦净盒外余灰,称量结果为称量盒加湿灰质量,准确至 0.01g;若使用恒质量盒,可先将其放置天平上清零,然后再称量装有试样的恒质量盒,称量结果即为湿灰质量。

2 揭开盒盖,将试样与盒放入烘箱,在温度 105℃~110℃ 下烘到恒重,烘干时间不少于 8h。

3 将烘干后的试样与盒取出,盖好盒盖放入干燥器内冷却至室温,称干灰质量,准确至 0.01g。

4 含水率应准确至 0.1%,并应按下式计算:

$$\omega = \left( \frac{m}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.0.5)$$

式中:  $\omega$  ——含水率(%);

$m$  ——湿灰质量(g);

$m_d$  ——干灰质量(g)。

**5** 本试验应进行两次平行测定,平行差值不得大于 2%,取其算术平均值。

**4.0.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.3。



## 5 密度试验

5.0.1 测定粉煤灰的密度应采用环刀法。

5.0.2 本试验所用主要仪器设备应包括环刀和天平。

5.0.3 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 5.0.3 的规定：

表 5.0.3 密度试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
环刀	内径 61.8mm 和 79.8mm, 高度 20mm
天平	称量 500g, 分度值 0.1g; 称量 200g, 分度值 0.01g

5.0.4 环刀应按现行行业标准《切土环刀校验方法》SL 110 的规定进行校验。

5.0.5 环刀法测定密度、试样制备应按本规程第 3.4 节的步骤进行。

5.0.6 试样的湿密度和干密度应准确至 0.01g/cm<sup>3</sup>, 并按下列公式计算：

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (5.0.6-1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01\omega} \quad (5.0.6-2)$$

式中： $\rho$ ——湿密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$\rho_d$ ——干密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$m_1$ ——湿灰样与环刀总质量(g)；

$m_2$ ——环刀质量(g)；

$V$ ——环刀容积(cm<sup>3</sup>)；

$\omega$ ——含水率(%)。

**5.0.7** 本试验应进行两次平行测定,平行差值不得大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ , 取其算术平均值。

**5.0.8** 环刀法试验的记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.4。

## 6 比重试验

### 6.1 一般规定

6.1.1 测定粉煤灰的比重应采用比重瓶法。

6.1.2 比重测定的介质应采用煤油。

### 6.2 比重瓶法

6.2.1 本试验所用主要仪器设备应包括比重瓶、天平、恒温水槽、温度计、烘箱和分析筛,辅助工具包括抽气机、漏斗和滴管。

6.2.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 6.2.2 的规定。

表 6.2.2 比重试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
比重瓶	长颈,容积 50mL;短颈,容积 100mL;校正按照附录 B 方法进行操作
天平	称量 200g,分度值 0.001g
恒温水槽	允许误差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
温度计	测量范围 $0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ,分度值 $0.5^{\circ}\text{C}$
烘箱	温度能保持在 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$
分析筛	2mm

6.2.3 比重瓶应按现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定,分析筛应按现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第 1 部分:金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1 的规定进行校验。

6.2.4 本试验应按下列步骤进行:

1 将比重瓶烘干,称取烘干试样 10g 装入事先校正并洗净烘干的比重瓶。

2 将已装有干灰的比重瓶注入煤油至瓶的一半处,摇动比重



瓶或在振荡器内振荡 5min,放入真空缸中抽气至真空度接近 -100kPa,并继续抽气,抽气时间不少于 1h。

3 将煤油注入比重瓶,注至略低于瓶的刻度处,待瓶内悬液温度稳定及瓶上部悬液澄清。

4 用滴管调整液面恰至刻度处,以弯液面下缘为准,擦干瓶外及瓶内壁刻度以上部分的煤油,称瓶、煤油、试样总质量,称量后立即测出瓶内煤油的温度。

5 根据测得的温度,从已绘制的温度与瓶、煤油总质量关系中查得瓶、煤油总质量。

6 称量应准确至 0.001g,温度应准确至 0.5℃。

7 灰粒比重应按下式计算:

$$G_s = \frac{m_d}{m_1 + m_d - m_2} G_{mt} \quad (6.2.4)$$

式中:  $G_s$  ——灰粒比重;

$m_d$  ——干灰质量(g);

$m_1$  ——瓶、煤油总质量(g);

$m_2$  ——瓶、煤油、试样总质量(g);

$G_{mt}$  —— $t$ ℃时煤油的比重,准确至 0.001,应按本规程附录 C 确定。

8 应进行两次平行测定,平行差值不得大于 0.02,取其算术平均值。

6.2.5 比重试验的记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.5。

## 7 颗粒分析试验

### 7.1 一般规定

7.1.1 本试验适用于测定粉煤灰中各粒组干灰质量占试样总质量的百分数。

7.1.2 颗粒分析试验方法应根据粉煤灰的颗粒大小确定,粒径大于或等于 0.075mm 的粉煤灰应采用筛析法,粒径小于 0.075mm 的粉煤灰应采用移液管法。

### 7.2 筛析法

7.2.1 本试验所用主要仪器设备应包括分析筛、天平、振筛机和烘箱,辅助工具包括研钵、橡皮头研杵、搪瓷盘、毛刷、匙和木碾。

7.2.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 7.2.2 的规定。

表 7.2.2 筛析法所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
分析筛	孔径分别为 2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm
天平	称量 1000g,分度值 0.1g 和称量 200g,分度值 0.01g
烘箱	温度能保持在 105℃~110℃

7.2.3 分析筛应按现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第 1 部分:金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1 的规定进行校验,振筛机应按现行行业标准《实验室用标准筛振荡机技术条件》DZ/T 0118 的规定进行校验。

7.2.4 本试验应按下列步骤进行:

1 将试样拌匀后摊在搪瓷盘中,置于 105℃~110℃烘箱中烘干,用四分对角取样法称取代表性烘干试样 100g~200g,准确至 0.1g;



2 将试样倒入依次叠好的最上层筛中,加盖并置于振筛机上震摇,震摇时间宜为 15min~20min;

3 由最大孔径筛开始,按顺序将各筛取下,在搪瓷盘上用手轻叩摇晃,如仍有灰粒漏下,应继续轻叩摇晃,至无灰粒漏下为止;漏下的灰粒应全部放入下级筛内,并将留在各筛上的试样用软毛刷刷净,分别称量,准确至 0.1g;

4 筛后各级筛上和底盘上试样质量的总和与筛前试样总质量的差值,不得大于试样总质量的 1%;

5 当粒径小于 0.075mm 的试样质量大于总质量的 10%时,应按移液管法测定粒径小于 0.075mm 的颗粒组成。

7.2.5 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 小于某粒径的试样质量占试样总质量百分数应按下式计算:

$$X = \frac{m_A}{m_B} \times d_x \quad (7.2.5-1)$$

式中:  $X$  ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数(%);

$m_A$  ——小于某粒径的试样质量(g);

$m_B$  ——筛析时为所取的试样质量(g);

$d_x$  ——粒径小于 2mm 或粒径小于 0.075mm 的试样质量占总质量的百分数。若试样中无大于 2mm 粒径或无小于 0.075mm 的粒径,在计算分析时则  $d_x$  为 100%。

2 绘制颗粒大小分布曲线时应以小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数为纵坐标,以粒径(mm)的对数为横坐标进行绘制,求出各粒组的颗粒质量百分数。

3 不均匀系数应按下式计算:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7.2.5-2)$$

式中:  $C_u$  ——不均匀系数;

$d_{60}$  ——限制粒径,在粒径分布曲线上小于该粒径的试样含



量占试样总质量的 60% 的粒径；

$d_{10}$  ——有效粒径，在粒径分布曲线上小于该粒径的试样含量占试样总质量的 10% 的粒径。

4 曲率系数应按下式计算：

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (7.2.5-3)$$

式中： $C_c$  ——曲率系数；

$d_{30}$  ——在粒径分布曲线上小于该粒径的试样含量占试样总质量的 30% 的粒径。

7.2.6 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.6。

### 7.3 移液管法

7.3.1 本试验所用主要仪器设备应包括移液管、小烧杯、天平、量筒、温度计、洗筛、洗筛漏斗、搅拌器、煮沸设备和烘箱，辅助工具包括秒表、锥形瓶、研钵、木杵和电导率仪。

7.3.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 7.3.2 的规定。

表 7.3.2 移液管法所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
移液管	容积 25mL(图 7.3.2)
小烧杯	容积 50mL
天平	称量 200g,分度值 0.001g
量筒	高约 450mm,直径约 60mm,容积 1000mL, 刻度为 0mL~1000mL,分度值为 10mL
温度计	刻度 0℃~50℃,分度值 0.5℃
洗筛	孔径为 0.075mm
洗筛漏斗	直径略大于洗筛直径,使洗筛恰可套入漏斗中
搅拌器	轮径 50mm,孔径约 3mm;杆长约 400mm,带旋转叶
煮沸设备	附冷凝管
烘箱	温度能保持在 105℃~110℃



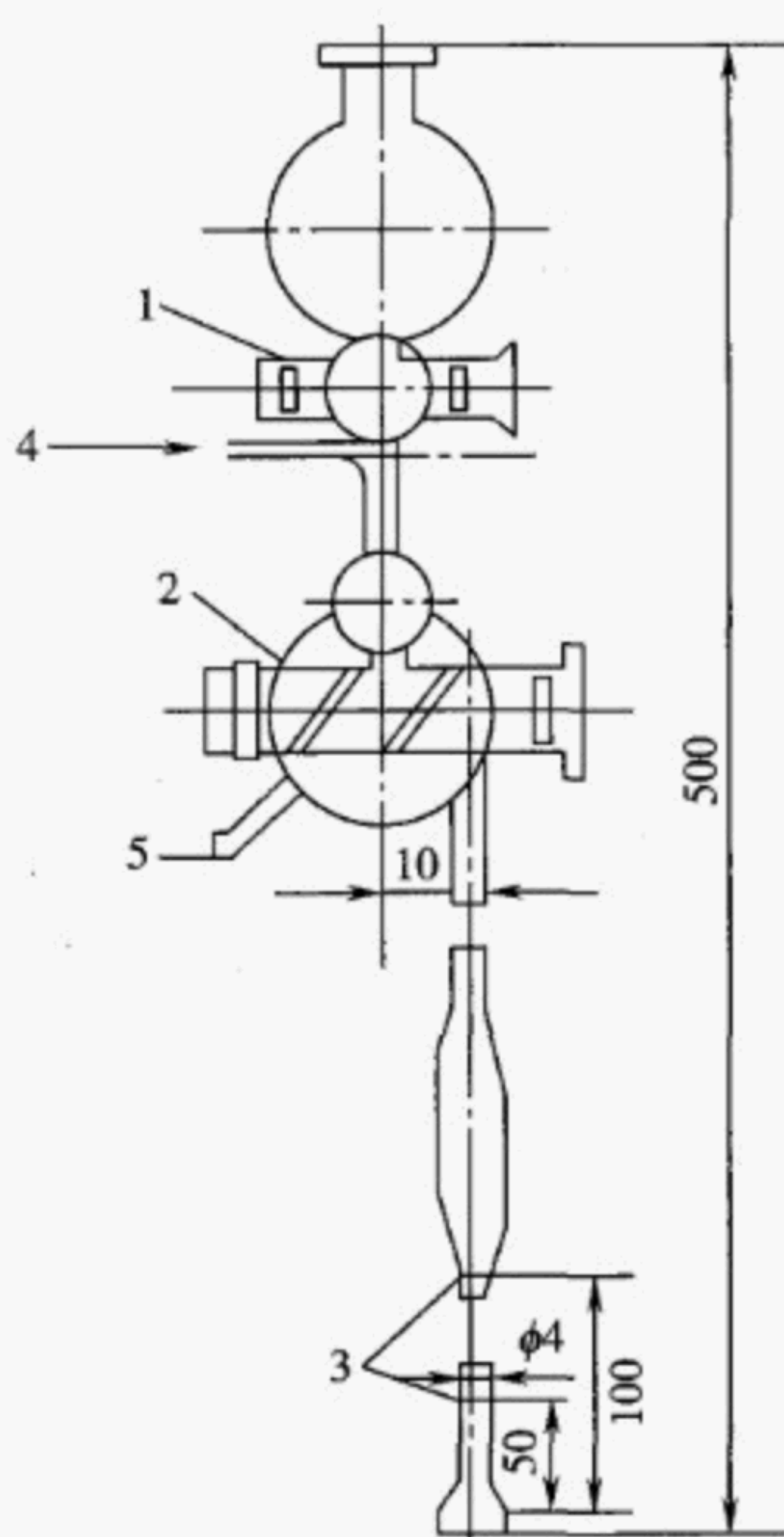


图 7.3.2 移液管示意图

1—二通阀；2—三通阀；3—移液管；4—接吸球；5—放流口

**7.3.3** 量筒应按现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定，洗筛应按现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第1部分：金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1 的规定进行校验。

**7.3.4** 试剂配制应符合下列规定：

**1** 4%六偏磷酸钠溶液：称取 4g 六偏磷酸钠溶于少量纯水中，并用纯水稀释至 100mL；

**2** 5%酸性硝酸银溶液：称取 5g 硝酸银溶于少量 10%硝酸溶液中，并用 10%硝酸溶液稀释至 100mL；

**3** 5%酸性氯化钡溶液：称取 5g 氯化钡溶于少量 10%盐酸溶液中，并用 10%盐酸溶液稀释至 100mL。

**7.3.5** 试验前应对试样的易溶盐含量进行检验,可采用电导法或目测法。

1 当采用电导法进行检验时,应按电导率仪使用说明书操作,测定温度  $T^{\circ}\text{C}$  时灰水比 1:20 试样溶液的电导率,  $20^{\circ}\text{C}$  时的电导率应按下式计算:

$$K_{20} = \frac{K_T}{1 + 0.02(T - 20)} \quad (7.3.5)$$

式中:  $K_{20}$  ——  $20^{\circ}\text{C}$  时悬液的电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 当  $K_{20}$  大于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  时应洗盐;

$K_T$  ——  $T^{\circ}\text{C}$  时悬液的电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ );

$T$  ——测定时悬液的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

2 当采用目测法检验时,应取风干试样 3g 于烧杯中,加适当纯水调成糊状研散,再加纯水 25mL 煮沸 10min 冷却后移入试管中,放置时间不少于 12h,观察试管,当出现凝聚现象时应洗盐。

**7.3.6** 试样中易溶盐含量大于总质量的 0.5% 时,应洗盐,洗盐步骤应符合下列规定:

1 将分析用的试样放入调土杯内,注入少量蒸馏水,拌和均匀,迅速倒入贴有滤纸的漏斗中,并注入蒸馏水冲洗过滤,附在调土杯上的试样全部洗入漏斗;若发现滤液混浊,应重新过滤;

2 加水应使漏斗内的液面保持高出试样上表面约 5cm;每次加水后,应用表面皿盖住漏斗;

3 检查易溶盐清洗程度,可用 2 个试管各取刚滤下的滤液 3mL~5mL,一管加入数滴 5% 酸性氯化钡溶液,另一管加入数滴 5% 酸性硝酸银溶液;若任一管中有白色沉淀,应继续清洗,直至试管中不再发现白色沉淀为止,或直至滤液的电导率小于  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  为止。

**7.3.7** 本试验应按下列步骤进行:

1 本试验宜采用天然湿度试样,含水率大于 70% 时应予以风干,将含水率控制在 50%~70% 之间。若无法保持其湿度时也可用烘干试样。



2 试样中易溶盐含量大于总质量的 0.5% 时,应按本规程第 7.3.6 条规定执行。

3 称取代表性试样 200g~300g,拌和均匀后测定其含水率。

4 称取 20g 烘干试样或按式(7.3.7-1)、式(7.3.7-2)计算试样干质量为 20g 时所需的风干灰或湿灰质量,准确至 0.001g;

当易溶盐含量小于 1% 时,应按下式计算:

$$m = m_d(1 + 0.01\omega) \quad (7.3.7-1)$$

当易溶盐含量大于或等于 1% 时,应按下式计算:

$$m = \frac{m_d(1 + 0.01\omega)}{1 - 0.01DT} \quad (7.3.7-2)$$

式中:  $m$  ——风干灰或湿灰质量(g);

$m_d$  ——试样干质量(g);

$\omega$  ——风干灰或湿灰含水率(%);

$DT$  ——易溶盐含量(%)。

5 将称取的试样或洗盐后滤纸上的试样倒入锥形瓶中,注入纯水 200mL,浸泡时间不少于 12h。

6 将锥形瓶放在煮沸设备上,连接冷凝管进行煮沸,煮沸时间约 40min;试样含水率为 50%~70% 时可不煮沸。

7 将冷却后的悬液倒入瓷杯中,静置约 1min,将上部悬液倒入量筒。杯底沉淀物用带橡皮头研杵细心研散,加水,经搅拌后,静置约 1min,再将上部悬液倒入量筒。如此反复操作,直至杯内悬液澄清为止。当试样中大于 0.075mm 的颗粒估计超过试样总质量的 15% 时,应将其全部倒至 0.075mm 筛上冲洗,直至筛上仅留大于 0.075mm 的颗粒为止。

8 将留在洗筛上的颗粒洗入蒸发皿内,倾去上部清水,烘干称量,然后按本规程第 7.2.3 条第 3 款、第 4 款规定进行筛析。

9 将过筛悬液倒入量筒,加 4% 浓度的六偏磷酸钠约 10mL 于量筒溶液中,再注入纯水,使筒内悬液达 1000mL。

10 将盛试样悬液的量筒放入恒温水槽中,测记悬液温度,估



读至 0.5℃。试验中悬液温度允许变化范围应为±0.5℃。

11 粒径小于 0.05、0.01、0.005、0.002mm 和其他所需粒径下沉一定深度所需的静置时间应按下式计算：

$$t = \frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wt}) \rho_w g} \times \frac{L}{d^2} \quad (7.3.7-3)$$

式中：t —— 沉降时间(s)；

$\rho_w$  —— 4℃时水的密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$\eta$  —— 水的动力黏滞系数[(10<sup>-6</sup>)kPa·s]；

$G_s$  —— 灰粒比重；

$G_{wt}$  —— 温度为 T℃时的水的比重；

L —— 某一时间 t 内的灰粒沉降距离(cm)；

g —— 重力加速度(981cm/s<sup>2</sup>)；

d —— 颗粒直径(mm)。

为了简化计算，也可按照下列公式计算：

$$t = \frac{K^2}{d^2} \times L \quad (7.3.7-4)$$

$$K = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{wt}) \rho_w g}} \quad (7.3.7-5)$$

式中：K —— 粒径计算系数，与悬液温度和灰粒比重有关，其值可按本规程表 7.3.7 的规定选择。

表 7.3.7 粒径计算系数 K 值

温度 (℃)	灰 粒 比 重								
	2.10	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50
5	0.1590	0.1555	0.1523	0.1492	0.1463	0.1435	0.1410	0.1385	0.1362
6	0.1566	0.1531	0.1499	0.1469	0.1440	0.1413	0.1388	0.1364	0.1341
7	0.1543	0.1509	0.1478	0.1448	0.1420	0.1393	0.1368	0.1344	0.1322
8	0.1521	0.1488	0.1456	0.1427	0.1399	0.1373	0.1348	0.1325	0.1302
9	0.1499	0.1466	0.1435	0.1406	0.1379	0.1353	0.1329	0.1305	0.1284
10	0.1478	0.1446	0.1415	0.1387	0.1360	0.1334	0.1310	0.1287	0.1266
11	0.1458	0.1426	0.1395	0.1367	0.1341	0.1316	0.1292	0.1270	0.1248
12	0.1437	0.1406	0.1376	0.1348	0.1322	0.1297	0.1274	0.1252	0.1231



续表 7.3.7

温度 (℃)	灰 粒 比 重								
	2.10	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50
13	0.1418	0.1387	0.1358	0.1330	0.1304	0.1280	0.1257	0.1235	0.1214
14	0.1400	0.1369	0.1340	0.1313	0.1287	0.1263	0.1241	0.1219	0.1199
15	0.1381	0.1351	0.1322	0.1295	0.1270	0.1247	0.1224	0.1203	0.1183
16	0.1363	0.1333	0.1305	0.1279	0.1254	0.1231	0.1208	0.1187	0.1167
17	0.1346	0.1317	0.1289	0.1263	0.1239	0.1216	0.1194	0.1173	0.1153
18	0.1330	0.1300	0.1273	0.1247	0.1223	0.1200	0.1179	0.1158	0.1139
19	0.1313	0.1284	0.1257	0.1232	0.1208	0.1185	0.1164	0.1144	0.1125
20	0.1297	0.1268	0.1242	0.1217	0.1193	0.1171	0.1150	0.1130	0.1111
21	0.1281	0.1253	0.1227	0.1202	0.1179	0.1157	0.1136	0.1116	0.1098
22	0.1266	0.1238	0.1212	0.1188	0.1165	0.1143	0.1123	0.1103	0.1085
23	0.1251	0.1224	0.1198	0.1174	0.1151	0.1130	0.1110	0.1090	0.1072
24	0.1237	0.1210	0.1184	0.1160	0.1138	0.1117	0.1096	0.1077	0.1059
25	0.1223	0.1196	0.1171	0.1147	0.1125	0.1104	0.1084	0.1066	0.1048
26	0.1209	0.1183	0.1158	0.1134	0.1112	0.1092	0.1072	0.1054	0.1036
27	0.1195	0.1169	0.1144	0.1121	0.1100	0.1079	0.1060	0.1041	0.1024
28	0.1182	0.1157	0.1132	0.1109	0.1088	0.1068	0.1048	0.1030	0.1013
29	0.1170	0.1144	0.1120	0.1097	0.1076	0.1056	0.1037	0.1019	0.1002
30	0.1157	0.1132	0.1108	0.1086	0.1065	0.1045	0.1026	0.1008	0.09915

12 准备好移液管。将二通阀置于关闭位置,三通阀置于移液管和吸球相通的位置。

13 用搅拌器沿悬液上、下搅拌各约 30 次,用时 1min,取出搅拌器。

14 开动秒表,根据各粒径的静置时间,提前约 10s,将移液管放入悬液中,浸入深度为 10cm。用吸球吸取悬液,吸取悬液量不应少于 25mL。

15 旋转三通阀,使与放流口相通,将多余的悬液从放流口放出,收集后倒入原量筒内的悬液中。

16 将移液管下口放入已称量过的小烧杯中,由上口倒入少量纯水,开三通阀使水流入移液管,连同移液管内的试样悬液流入小烧杯内。



17 每吸取一组粒径的悬液后应重新搅拌,再吸取另一组粒径的悬液。

18 将烧杯内的悬液蒸发浓缩半干,在  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  温度下烘至恒量,称小烧杯连同干灰的质量,准确至  $0.001\text{g}$ 。

7.3.8 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数应按下式计算:

$$X = \frac{m'_s V}{V_1 m_d} \times 100 \quad (7.3.8)$$

式中:  $X$  ——小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分数(%);

$m'_s$  ——吸取的  $25\text{mL}$  悬液中的灰粒质量(g);

$m_d$  ——试样干质量(g);

$V$  ——悬液总体积,  $V$  为  $1000\text{mL}$ ;

$V_1$  ——移液管每次吸取的悬液体积,  $V_1$  为  $25\text{mL}$ 。

2 用小于某粒径的灰样质量百分数为纵坐标,颗粒粒径(mm)的对数为横坐标,绘制颗粒大小分布曲线(图 7.3.8)。

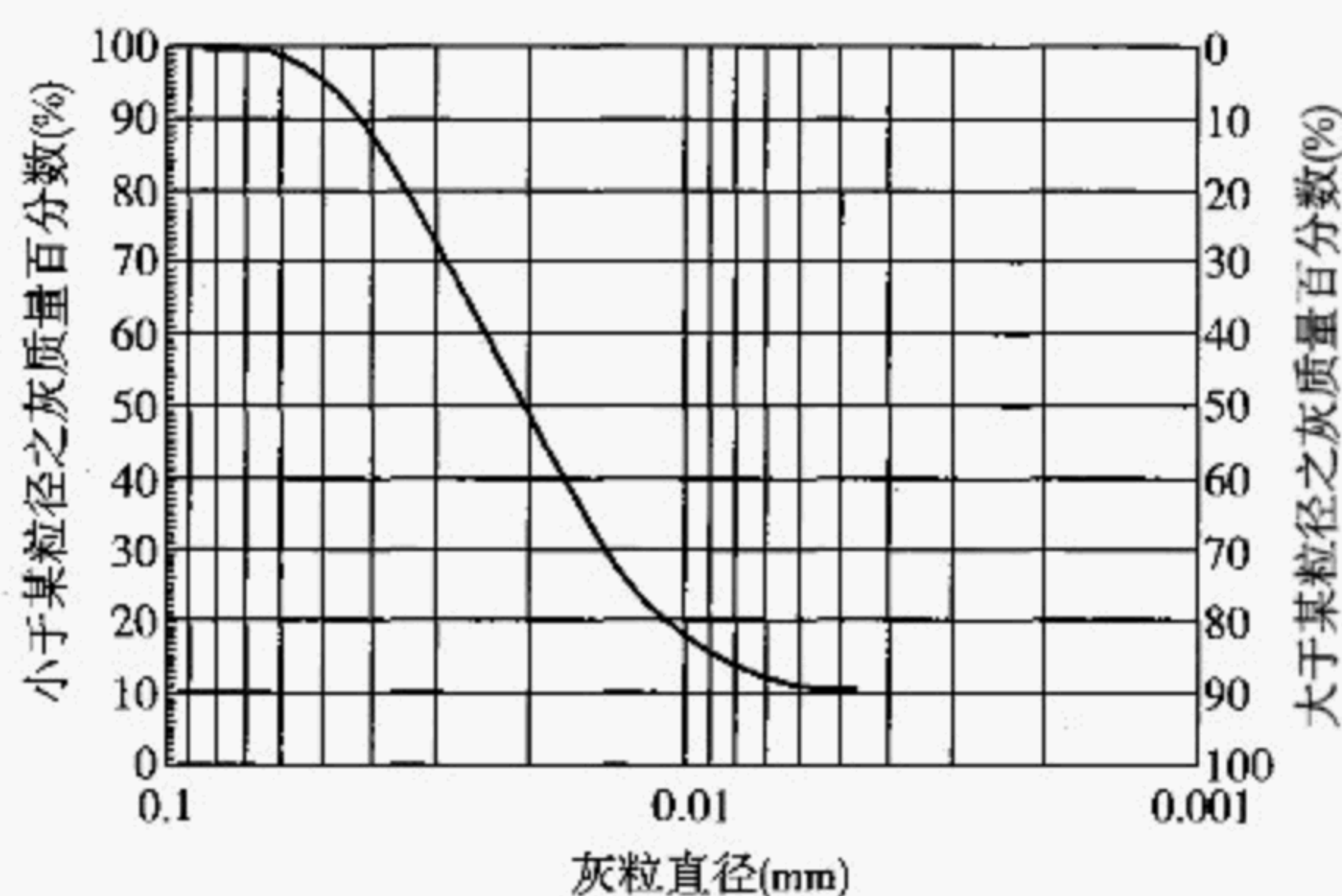


图 7.3.8 颗粒大小分布曲线

7.3.9 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.7。

## 8 相对密度试验

### 8.1 一般规定

8.1.1 本试验适用于测定粉煤灰最大干密度与最小干密度,计算粉煤灰相对密度。

8.1.2 最小干密度试验宜采用漏斗法与量筒倒转法;最大干密度试验宜采用振动锤击法。

8.1.3 最小干密度与最大干密度试验均应进行两次平行测定,平行差值不得大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,取其算术平均值。

### 8.2 最小干密度试验

8.2.1 本试验所用主要仪器设备(图 8.2.1)应包括量筒、长颈漏斗、锥形塞、拂平器和天平。

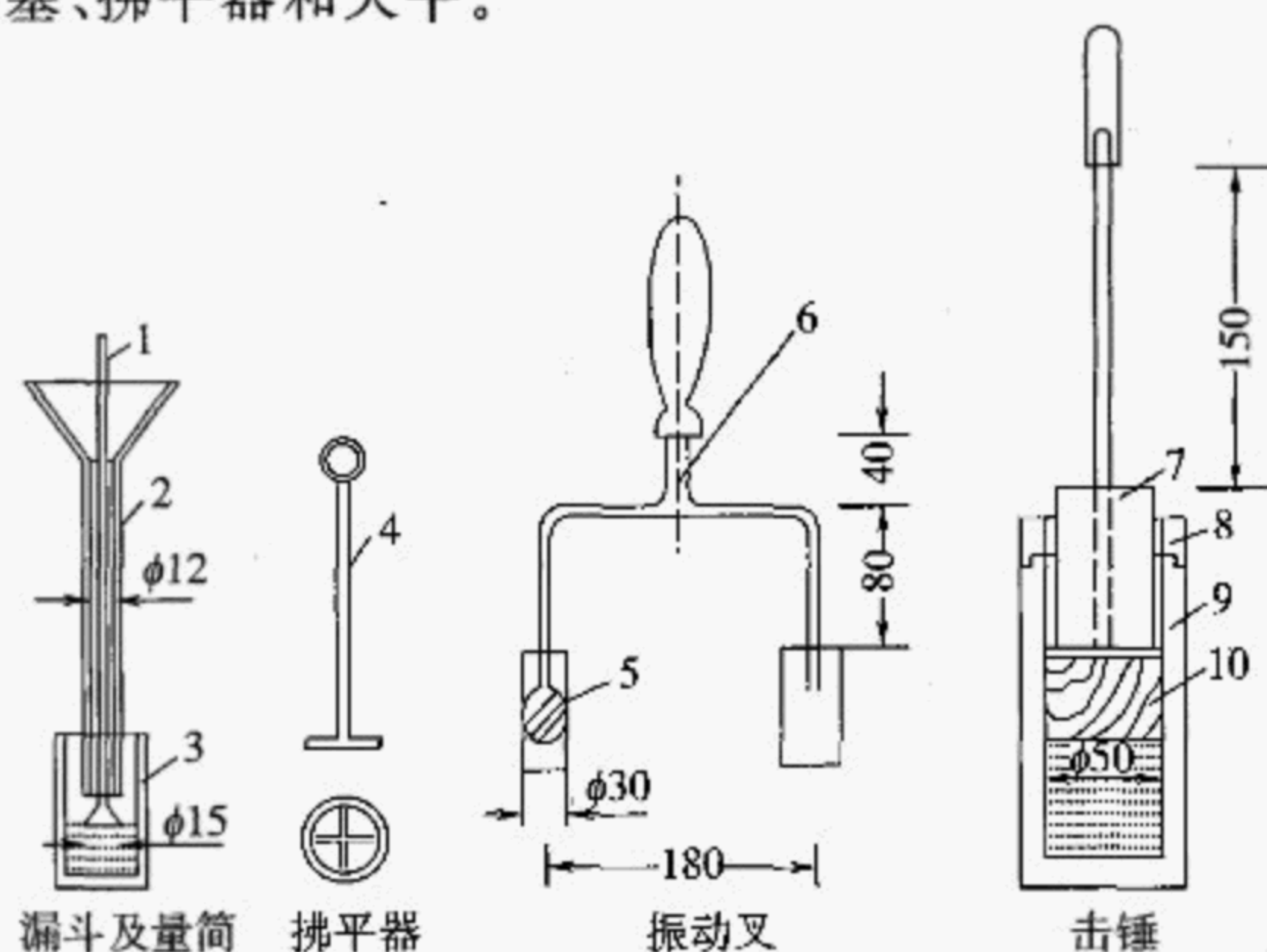


图 8.2.1 相对密度试验测定装置(单位:mm)

1—锥形塞;2—长颈漏斗;3—量筒;4—拂平器;5—击球;

6—音叉;7—落锤;8—护环;9—金属容器;10—锤座



8.2.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 8.2.2 的规定。

表 8.2.2 最小干密度试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
量筒	容积为 1000mL,内径应大于 60mm
长颈漏斗	颈管内径约为 12mm,颈口磨平
锥形塞	直径约为 15mm 的圆锥体,焊接于金属杆上
拂平器	十字形金属平面焊接在金属杆下端
天平	称量 1000g,分度值 0.1g

8.2.3 量筒应按现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

8.2.4 本试验灰样制备应按本规程第 3 章第 3.3.2 条第 1 款和第 2 款的规定进行。

8.2.5 本试验应按下列步骤进行：

1 将锥形塞杆自长颈漏斗下口穿入,并向上提起,使锥体堵住漏斗管口,一并放入 1000mL 量筒中,使其下端与量筒底接触；

2 称取制备好的干试样 500g,误差控制至 0.5g 以内,均匀倒入漏斗中,至漏斗锥体高度的 2/3 左右为宜；

3 将漏斗与塞杆同时提高,然后下放塞杆使锥体略离开管口,均匀缓慢地通过长颈漏斗注入量筒,边注边调节漏斗管口高度,使试样自由落距宜保持为 10mm 左右,长颈漏斗在试样上部作螺旋形移动,使试样形成均匀灰层；

4 试样全部落入量筒后,取出漏斗与锥形塞,用拂平器将灰面拂平,勿使量筒振动,然后测读试样体积,准确估读至 5mL；

5 用手掌或橡皮板堵住量筒口,将量筒缓慢地反复倒转,然后缓慢地转回原来位置,并至试样表面水平,如此重复几次,记下试样体积的最大值,准确至 5mL；



6 取上述两种方法测得的较大体积值,计算最小干密度。

8.2.6 试样的最小干密度应准确至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ,并应按下式计算:

$$\rho_{\text{dmin}} = \frac{m_{\text{d}}}{V_{\text{dmax}}} \quad (8.2.6)$$

式中:  $m_{\text{d}}$  ——试样干质量(g);

$\rho_{\text{dmin}}$  ——试样的最小干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V_{\text{dmax}}$  ——试样的最松状态的体积( $\text{cm}^3$ )。

8.2.7 试样的最大孔隙比应准确至 0.01,并应按下式计算:

$$e_{\text{max}} = \frac{\rho_{\text{w}} \cdot G_{\text{s}}}{\rho_{\text{dmin}}} - 1 \quad (8.2.7)$$

式中:  $e_{\text{max}}$  ——试样的最大孔隙比;

$\rho_{\text{w}}$  ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_{\text{s}}$  ——灰粒比重。

### 8.3 最大干密度试验

8.3.1 本试验所用主要仪器设备(图 8.2.2)应包括金属容器、振动叉、击锤、台秤。

8.3.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 8.3.2 的规定。

表 8.3.2 最大干密度试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
金属容器	容积 250mL,内径 50mm,高度为 127mm;容积 1000mL,内径 100mm,高度为 127mm,带护环
振动叉	两端击球质量相等
击锤	质量 1250g,落高 150mm,直径 50mm
台秤	称量 5000g,分度值 1g

8.3.3 金属容器应按现行行业标准《体积管检定规程》JJG 209 的规定进行检定。

8.3.4 本试验灰样制备应按本规程第 3 章第 3.3.2 条第 1 款和第 2 款的规定进行。



8.3.5 本试验应按下列步骤进行:

- 1 拧紧金属容器底板上的螺丝;
- 2 将制备好的干试样 1000g,误差控制至 1.0g 以内,分三次倒入金属容器进行振击,每层约为容积的 1/3;
- 3 振动叉以每分钟往返 150 次~200 次速度敲打容器两侧,同时规定落高 15cm,以每分钟 30 次~60 次速度,用自由落锤锤击试样表面,每层击 70 次~120 次,击至试样体积不变为止;
- 4 按本规程第 8.3.5 条第 3 款的规定,进行剩余两次的装样、振动和锤击,第三次装样时应先在容器口上安装;
- 5 最后一次振动完毕,取下护环,用平口刀轻轻刮平试样,称容器和试样总质量,精确至 1.0g,并记录试样体积。

8.3.6 试样的最大干密度应准确至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ,并应按下式计算:

$$\rho_{\text{dmax}} = \frac{m_d}{V_{\text{dmin}}} \quad (8.3.6)$$

式中:  $\rho_{\text{dmax}}$  ——试样的最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V_{\text{dmin}}$  ——试样的最密实状态的体积( $\text{cm}^3$ )。

8.3.7 试样的最小孔隙比应准确至 0.01,并应按下式计算:

$$e_{\text{min}} = \frac{\rho_w \cdot G_s}{\rho_{\text{dmax}}} - 1 \quad (8.3.7)$$

式中:  $e_{\text{min}}$  ——试样最小孔隙比。

## 8.4 相对密度计算

8.4.1 相对密度应准确至 0.01,并应按下列公式计算:

$$D_r = \frac{e_{\text{max}} - e_0}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \quad (8.4.1-1)$$

$$D_r = \frac{\rho_{\text{dmax}}(\rho_d - \rho_{\text{dmin}})}{\rho_d(\rho_{\text{dmax}} - \rho_{\text{dmin}})} \quad (8.4.1-2)$$

式中:  $D_r$  ——试样的相对密度;

$e_0$  ——试样的天然孔隙比或要求的孔隙比；

$\rho_d$  ——试样的天然干密度或要求的干密度(g/cm<sup>3</sup>)。

**8.4.2** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.8。



# 9 击实试验

## 9.1 一般规定

- 9.1.1 本试验用于测定粉煤灰的密度与含水率的关系,确定粉煤灰的最大干密度与相对应的最优含水率。
- 9.1.2 本试验宜采用轻型击实,单位体积击实功应为  $592.2\text{kJ/m}^3$ 。

## 9.2 轻型击实试验

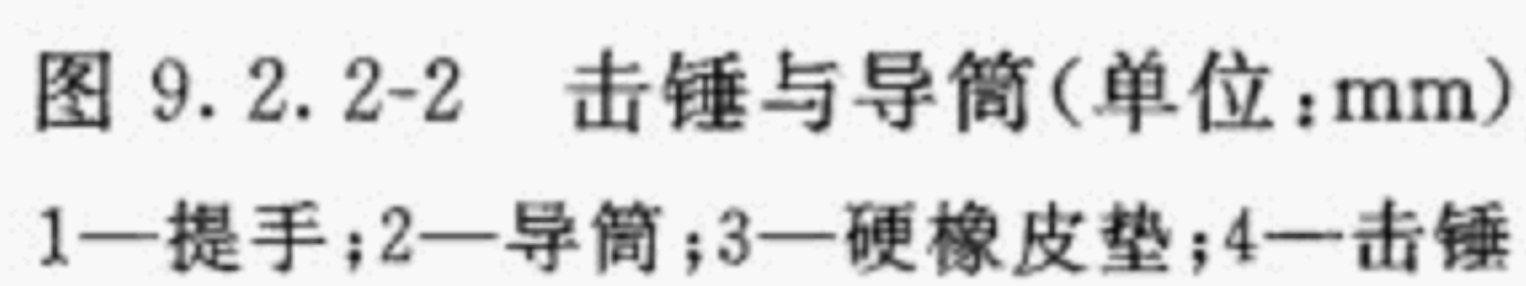
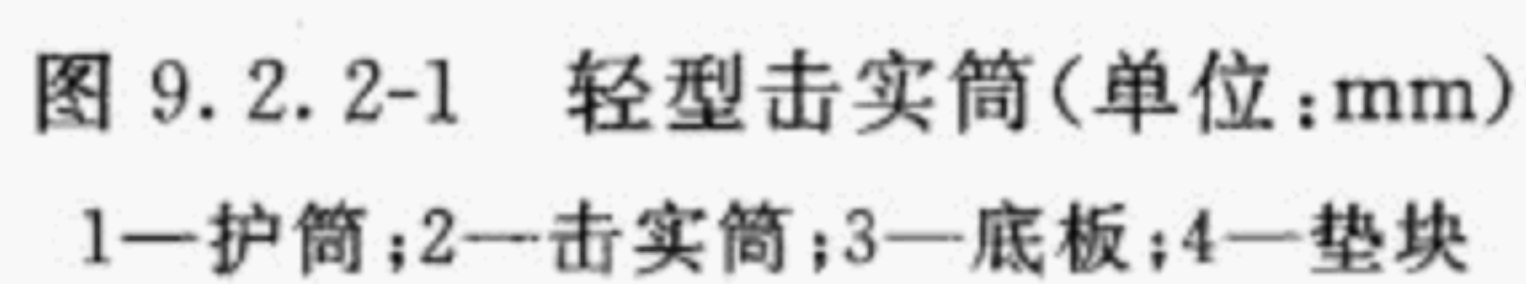
- 9.2.1 本试验所用主要仪器设备应包括击实仪、天平、台秤、量筒、分析筛和烘箱,辅助工具包括喷水设备、碾土设备、试样推出器、盛土器和保湿设备。
- 9.2.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 9.2.2-1、表 9.2.2-2 的规定。

表 9.2.2-1 轻型击实试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
击实仪	包括击实筒(图 9.2.2-1)和击锤与护筒(图 9.2.2-2), 尺寸应符合表 9.2.2-2 规定
天平	称量 200g,分度值 0.01g
台秤	称量 10kg,分度值 5g
量筒	容积为 500mL,100mL
分析筛	孔径为 2mm
烘箱	温度能保持在 $105^{\circ}\text{C}\sim110^{\circ}\text{C}$

表 9.2.2-2 击实仪主要部件规格表

试验方法	锤底直径 (mm)	锤质量 (kg)	落高 (mm)	击 实 筒			护筒高度 (mm)
				内径(mm)	筒高(mm)	容积( $\text{cm}^3$ )	
轻型	51	2.5	305	102	116	947.4	50





**9.2.3** 击实仪应按现行行业标准《击实仪校验方法》SL 112 的规定进行校验,量筒应按现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定,分析筛应按现行国家标准《试验筛 技术要求和检验 第 1 部分:金属丝编织网试验筛》GB/T 6003.1 的规定进行校验。

**9.2.4** 试样制备分为干法和湿法两种,试样制备应按照下列步骤进行:

1 干法制备采用四分对角取样法取代表性试样 15kg,风干碾散,过孔径 2mm 的筛,将过筛后的试样拌匀,并测定风干含水率。预估试样的最优含水率,并按本规程第 3.3.2 条第 3 款和第 4 款的步骤制备至少 7 个不同含水率的试样,相邻两个含水率的差值为 4%;

2 湿法制备采取天然含水率的代表性试样 15kg,碾碎,过孔径 2mm 的筛,将过筛后的试样拌匀,并测定天然含水率。预估试样的最优含水率,按本规程第 9.2.4 条第 1 款的要求,分别将天然含水率的试样风干或加水到所要求的不同含水率。制备试样时应使试样中含水率分布均匀。

**9.2.5** 本试验应按下列步骤进行:

1 将击实仪放在坚实的地面上,击实筒内壁和底板涂一薄层润滑油,连接好击实筒与底板,安装好护筒;

2 取制备好的试样,分为三层击实,每层取湿灰质量 0.5kg~0.7kg,控制击实后的试样高度约为 1/3 筒高,击数为 25 击;

3 将试样倒入筒内,整平灰面,进行击实;每击实一层后,刨毛灰面,重复进行各层的击实试验,最后一层击实完毕,超过击实筒的余灰高度应小于 6mm;

4 卸下击实筒,拆去护筒,用平口刀削平击实筒两端余灰。擦净筒外壁,称筒与试样的总质量,准确至 1g,并计算试样的湿密度;

5 用推土器将试样从筒中推出,取 2 个代表性试样测定含水率;

6 按本规程第 9.2.5 条第 1 款~第 5 款执行,对不同含水率试样依次击实,击实后的试样不应重复使用。



9.2.6 本试验的资料整理应符合下列规定：

1 试样的干密度应准确至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ，并按下式计算：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01\omega} \quad (9.2.6-1)$$

式中： $\rho$ ——湿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$\rho_d$ ——干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$\omega$ ——含水率(%)。

2 试样饱和含水率应准确至  $0.1\%$ ，并按下式计算：

$$\omega_{\text{sat}} = \left( \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \quad (9.2.6-2)$$

式中： $\omega_{\text{sat}}$ ——饱和状态含水率(%)；

$\rho_w$ ——温度  $4^\circ\text{C}$  时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

3 绘制干密度与含水率关系曲线应符合下列要求：

1) 以干密度为纵坐标，含水率为横坐标，绘制干密度与含水率的关系曲线(图 9.2.6)。取峰值点的纵坐标为最大干密度  $\rho_{d\text{max}}$ ，相应的横坐标为最优含水率  $\omega_{\text{op}}$ 。当不能绘出峰值点或连不成完整的曲线时，应补点。

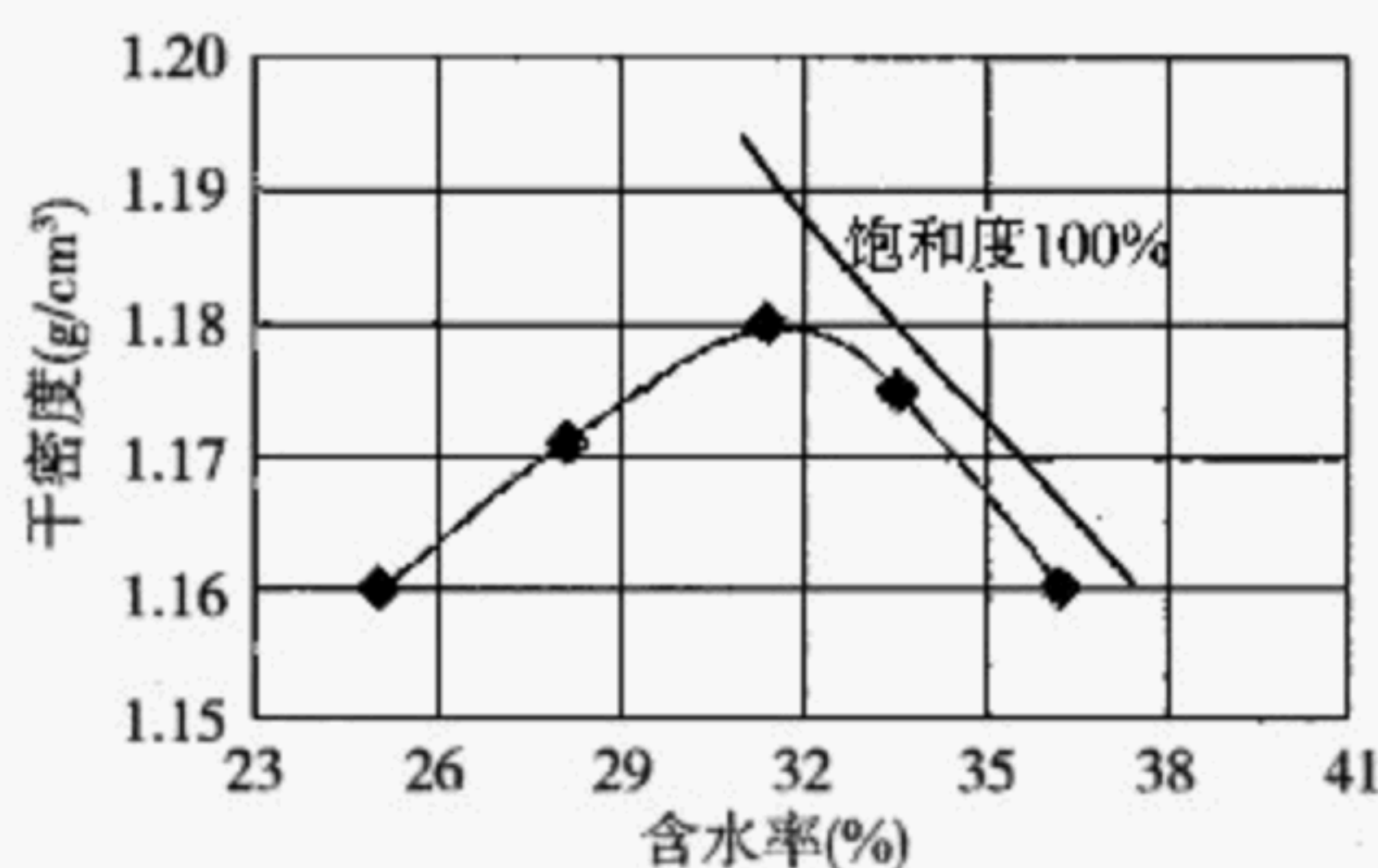


图 9.2.6  $\rho_d \sim \omega$  关系曲线

2) 按本规程式(9.2.6-2)计算数个干密度下试样的饱和含水率。

以干密度为纵坐标，饱和含水率为横坐标，绘制饱和曲线。

9.2.7 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.9。



## 10 渗透试验

### 10.1 一般规定

10.1.1 本试验适用于测定粉煤灰的渗透系数。

10.1.2 粉煤灰渗透系数的测定方法有常水头法和变水头法,可根据颗粒大小确定试验方法。

10.1.3 试验用水宜采用实际作用于粉煤灰中的天然水;也可采用纯水或经过滤的清水。在试验前应用抽气法或煮沸法进行脱气。试验时的水温宜高于室温  $3^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

### 10.2 常水头渗透试验

10.2.1 本试验所用主要仪器设备应包括常水头渗透装置(图 10.2.1)、天平、温度计,辅助工具包括供水瓶、量杯、积水容器、木锤、秒表、直尺、吸水球和无纺布等。

10.2.2 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 10.2.2 的规定。

10.2.3 常水头渗透装置应按现行行业标准《渗透仪校验方法》SL 115 的规定进行校验。

10.2.4 本试验应按下列步骤进行:

1 装好仪器,并确认各管路接头处不漏水;将调节管与供水管连通,从渗水孔向圆筒内充水至水位略高于金属孔板,关止水夹;

2 取具有代表性的风干灰或含水率为  $15\%\sim 30\%$  的湿灰  $3\text{kg}\sim 4\text{kg}$ ,称量准确至  $1.0\text{g}$ ,拌和均匀后测定其含水率;

3 在金属孔板上放置薄型针刺无纺布,按试样控制高度等分若干层,每层厚  $2\text{cm}\sim 3\text{cm}$ ,试样的质量相应分为若干等分,分层装入圆筒,边填装边用木锤击捣试样,控制每层试样高度相等;试样干密度稍大时,应在每层试样装好捣实后,升降调节管位置,使



水经调节管由筒底向上缓慢渗入,浸润试样;试样最后一层应高出顶部测压管 3cm~4cm,量出试样顶面至筒顶的高度,计算试样高度,称剩余试样质量,准确至 0.1g,计算装入试样总质量;在试样上面覆盖薄型针刺无纺布和 2cm 厚的细砾作缓冲层,细砾层与溢水孔间应保持 1cm~2cm 距离;

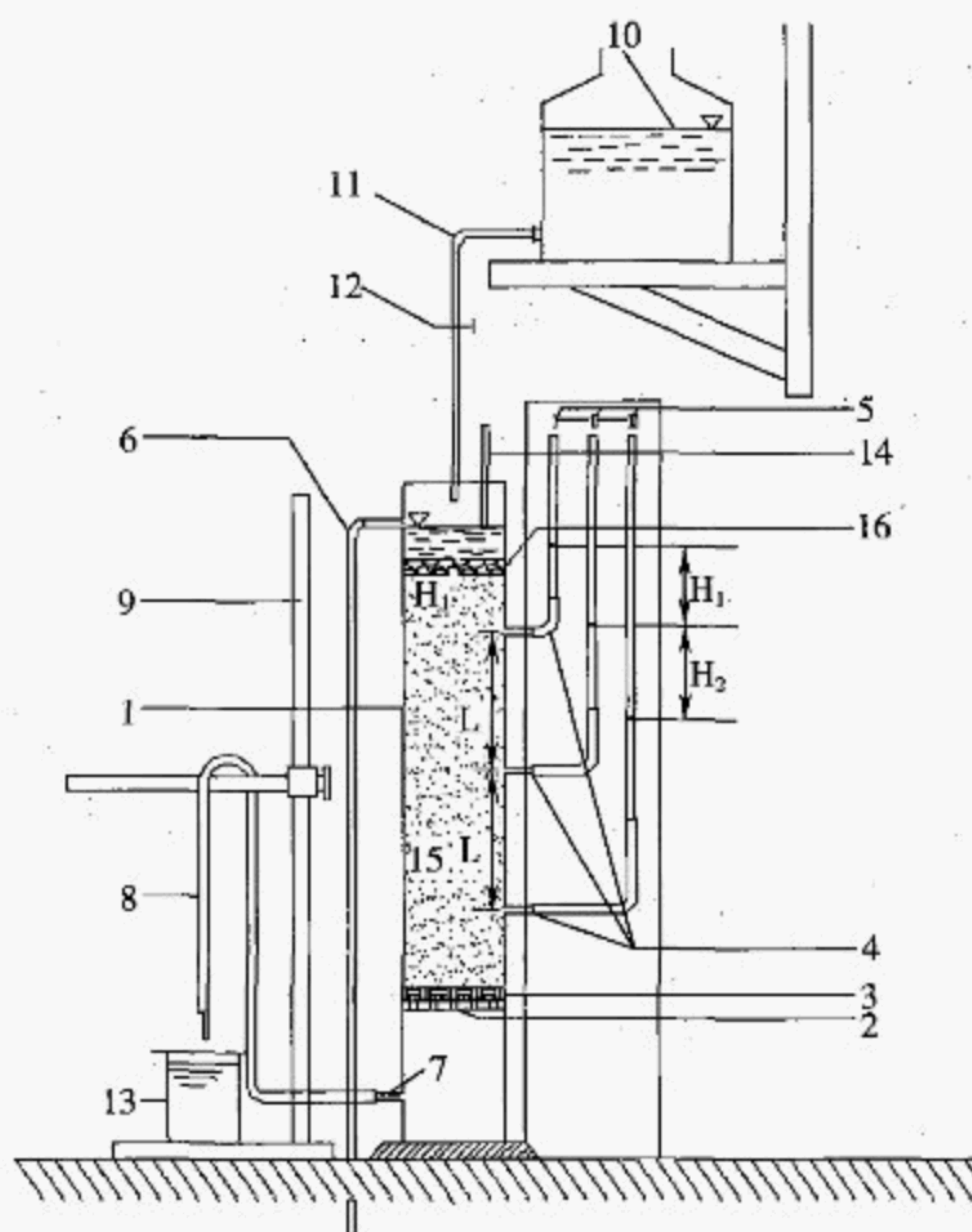


图 10.2.1 常水头渗透装置

1—封底金属圆筒;2—金属孔板;3—无纺布;4—测压孔;5—玻璃测压管;  
6—溢水孔;7—渗水孔;8—调节管;9—滑动支架;10—供水瓶;11—供水管;  
12—止水夹;13—积水容器;14—温度计;15—试样;16—砾石层

4 试样装好后,连接供水管和调节管,并由调节管中进水,微开止水夹,水由供水瓶缓慢流入仪器底部,使试样逐渐饱和;当水面与试样顶面齐平,继续放水至水从溢水孔流出,关止水夹,静置 4h 以上;饱和时水流不应过急,以免冲动试样;



表 10.2.2 常水头渗透试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
常水头渗透装置	金属圆筒高为 40cm, 直径为 10cm, 金属孔板距筒底 6cm, 三个测压孔的中心距为 10cm, 玻璃测压管内径为 0.6cm~0.8cm, 分度值为 0.1cm
天平	称量 5000g, 分度值 1g; 称量 500g, 分度值 0.1g
温度计	分度值 0.5℃

5 检查各测压管水位是否与溢水孔齐平; 如不齐平, 说明试样中或测压管接头处有集气阻隔, 用吸水球对准水位低的测压管吸水排气, 至水位齐平;

6 提高调节管使其高于溢水孔, 然后将调节管与供水管分开, 并将供水管置于金属圆筒内, 开止水夹, 使水由上部注入金属圆筒内;

7 降低调节管, 使管口位于试样上部 1/3 处, 造成水位差, 使水渗过试样, 经调节管流出; 在渗透过程中应调节供水管夹, 使供水管流量略多于溢出水量; 溢水孔应始终有余水溢出, 以保持常水位;

8 测压管水位稳定后, 记录测压管水位, 计算各测压管间的水位差;

9 开动秒表, 同时用量杯接取经一定时间的渗透水量, 并重复 1 次; 接取渗透水量时, 调节管口不可没入水中;

10 测记进水与出水处的水温, 取平均值;

11 降低调节管管口至试样中部及下部 1/3 处, 以改变水力坡降, 按本规程第 10.2.4 条第 7 款~第 10 款的规定重复进行测定;

12 根据需要, 可装数个不同孔隙比的试样, 进行渗透系数的测定。

10.2.5 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 试样的干密度  $\rho_d$  及孔隙比  $e$  应按下列公式计算:

$$\rho_d = \frac{m}{Ah(1+0.01\omega)} \quad (10.2.5-1)$$

$$e = \frac{\rho_w G_s}{\rho_d} - 1 \quad (10.2.5-2)$$

式中： $m$ ——风干灰或湿灰总质量(g)；

$\rho_d$ ——试样干密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$\omega$ ——风干灰或湿灰含水率(%)；

$A$ ——试样断面积(cm<sup>2</sup>)；

$h$ ——试样高度(cm)；

$e$ ——试样孔隙比；

$G_s$ ——试样比重。

2 渗透系数  $k_T$  及  $k_{20}$  应按下列公式计算：

$$k_T = \frac{QL}{AHt} \quad (10.2.5-3)$$

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (10.2.5-4)$$

式中： $k_T$ ——水温  $T^\circ\text{C}$  时试样的渗透系数(cm/s)；

$Q$ ——时间  $t$  秒内的渗透水量(cm<sup>3</sup>)；

$L$ ——两测压孔中心间的试样高度,10cm；

$H$ ——平均水位差,为  $H_1$  与  $H_2$  的平均值(cm)；

$H_1$ ——上中测压管水位差(cm)；

$H_2$ ——中下测压管水位差(cm)；

$t$ ——时间(s)；

$k_{20}$ ——标准温度(20 $^\circ\text{C}$ )时试样的渗透系数(cm/s)；

$\eta_T$ —— $T^\circ\text{C}$  时水的动力粘滞系数( $10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$ )；

$\eta_{20}$ ——20 $^\circ\text{C}$  时水的动力粘滞系数( $10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$ )。

比值  $\eta_T/\eta_{20}$  与温度的关系应符合表 10.2.5 的规定。



表 10.2.5 水的动力粘滞系数、粘滞系数比、温度校正值

温度 (°C)	动力粘滞系数 $\eta$ ( $10^{-6}$ kPa·s)	$\eta_T/\eta_{20}$	温度校正 系数 TP	温度 (°C)	动力粘滞系数 $\eta$ ( $10^{-6}$ kPa·s)	$\eta_T/\eta_{20}$	温度校正 系数 TP
5.0	1.516	1.501	1.17	17.5	1.074	1.066	1.66
5.5	1.493	1.478	1.19	18.0	1.061	1.050	1.68
6.0	1.470	1.455	1.21	18.5	1.048	1.038	1.70
6.5	1.449	1.435	1.23	19.0	1.035	1.025	1.72
7.0	1.428	1.414	1.25	19.5	1.022	1.012	1.74
7.5	1.407	1.393	1.27	20.0	1.010	1.000	1.76
8.0	1.387	1.373	1.28	20.5	0.998	0.988	1.78
8.5	1.367	1.353	1.30	21.0	0.986	0.976	1.80
9.0	1.347	1.334	1.32	21.5	0.974	0.964	1.83
9.5	1.328	1.315	1.34	22.0	0.963	0.953	1.85
10.0	1.310	1.297	1.36	22.5	0.952	0.943	1.87
10.5	1.292	1.279	1.38	23.0	0.941	0.932	1.89
11.0	1.274	1.261	1.40	24.0	0.919	0.910	1.94
11.5	1.256	1.243	1.42	25.0	0.899	0.890	1.98
12.0	1.239	1.227	1.44	26.0	0.879	0.870	2.03
12.5	1.223	1.211	1.46	27.0	0.859	0.850	2.07
13.0	1.206	1.194	1.48	28.0	0.841	0.833	2.12
13.5	1.188	1.176	1.50	29.0	0.823	0.815	2.16
14.0	1.175	1.163	1.52	30.0	0.806	0.798	2.21
14.5	1.160	1.148	1.54	31.0	0.789	0.781	2.25
15.0	1.144	1.133	1.56	32.0	0.773	0.765	2.30
15.5	1.130	1.119	1.58	33.0	0.757	0.750	2.34
16.0	1.115	1.104	1.60	34.0	0.742	0.735	2.39
16.5	1.101	1.090	1.62	35.0	0.727	0.720	2.43
17.0	1.088	1.077	1.64	—	—	—	—

3 在测得的结果中取 3 个~4 个在允许差值范围内的数值,求其算术平均值,作为试样的渗透系数,允许差值不得大于  $2 \times 10^{-n}$  cm/s;

4 当进行不同孔隙比下的渗透试验时,可在半对数坐标上绘



制以孔隙比为纵坐标,渗透系数为横坐标的  $e \sim \lg k$  关系曲线图(图 10.2.5)。

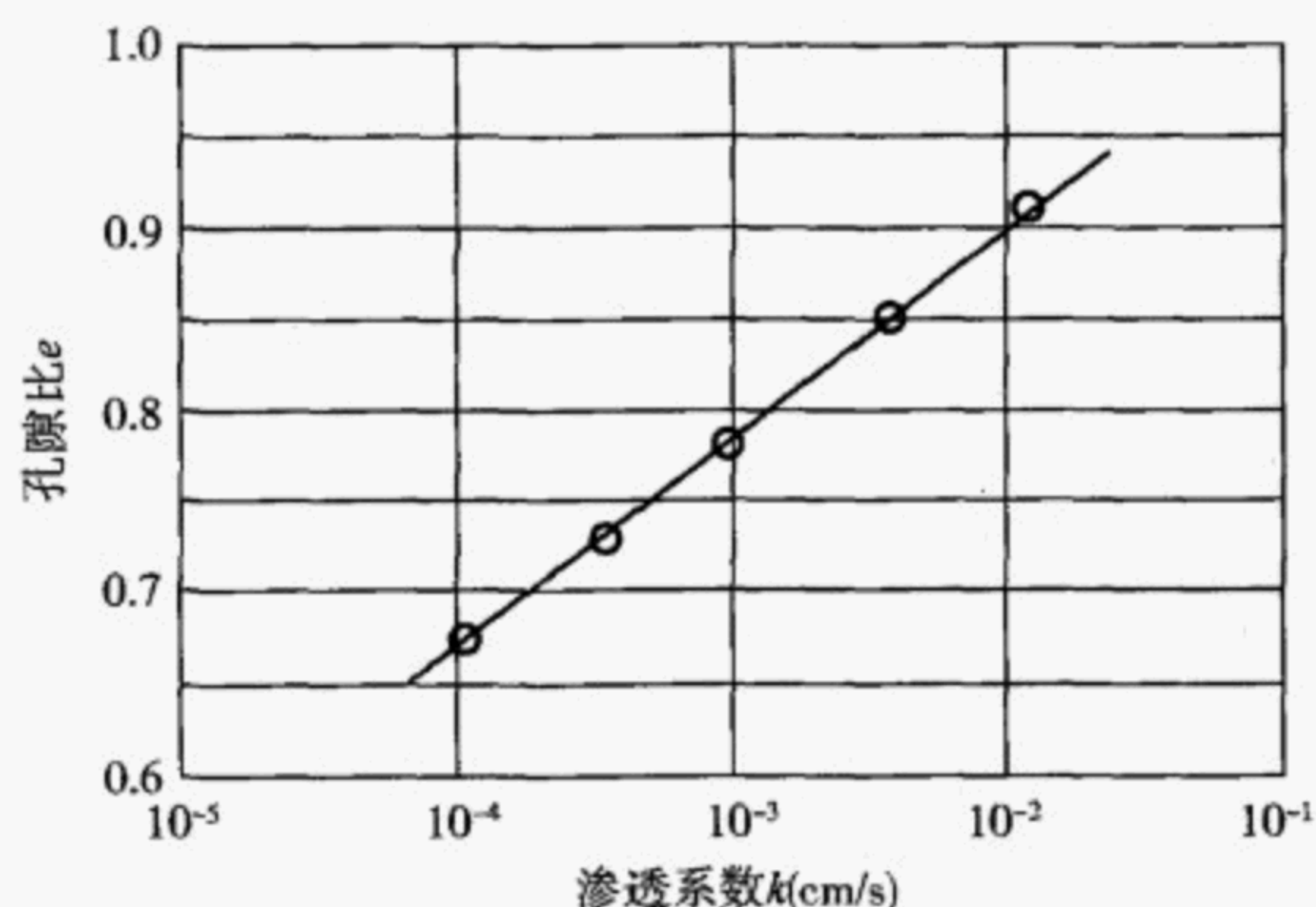


图 10.2.5 孔隙比  $e$  与渗透系数  $\lg k$  关系曲线

**10.2.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.10。

### 10.3 变水头渗透试验

**10.3.1** 本试验所用主要仪器设备应包括变水头渗透容器和变水头装置(图 10.3.1),辅助工具包括钢丝锯、秒表、温度计、削土刀、吸水球、抽气设备和凡士林等。

**10.3.2** 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 10.3.2 的规定。

**10.3.3** 变水头渗透装置应按现行行业标准《渗透仪校验方法》SL 115 的规定进行校验,透水板应按现行行业标准《透水板校验方法》SL 111 的规定进行校验,环刀应按现行行业标准《切土环刀校验方法》SL 110 的规定进行校验。

**10.3.4** 本试验应按下列步骤进行:

- 1 对于扰动试样的制备应符合本规程第 3.3 节的规定;
- 2 可用质量比为 1:1 的灰水配比调浆在切土环刀内人工浇灌堆积制样,将调制好的灰浆一次倒入带套筒的环刀内,待灰粒沉



淀排出多余水分后取下套筒,用钢丝锯将多余的灰浆切除、刮平和称量;

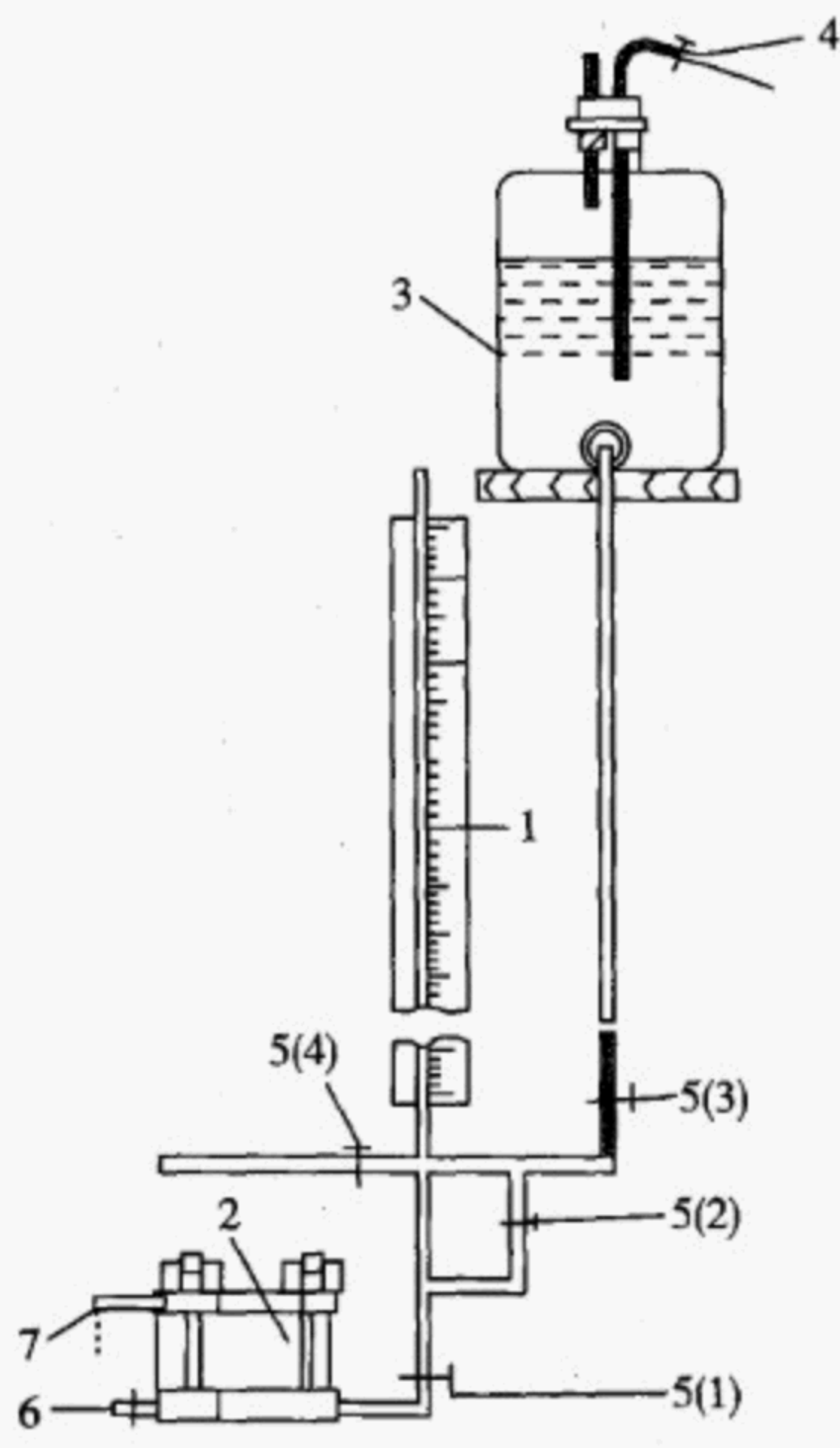


图 10. 3. 1 变水头渗透装置  
 1—变水头管;2—渗透容器;3—供水瓶;4—接水源管;  
 5—进水管夹;6—排气管;7—出水管

表 10. 3. 2 变水头渗透试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
变水头渗透容器	由环刀、透水板、套筒及上、下盖组成
变水头装置	变水头管的内径,根据试样渗透系数选择不同尺寸, 长度为 1. 0m 以上,分度值为 1. 0mm

3 将原状试样或制备成给定密度的试样,根据需要用环刀在垂直或平行试样层面切取,将制备好的试样放在真空缸内按本规

程第 3.5.2 条的规定进行真空抽气饱和或直接用变水头装置的水头进行饱和;

4 将容器套筒内壁涂一薄层凡士林,然后将盛有试样的环刀推入套筒,并压入止水垫圈;把挤出的多余凡士林小心刮净,装好带有透水板的上、下盖,均匀施力将螺丝拧紧,不得漏气漏水;

5 把装好试样的渗透容器与水头装置连通;利用供水瓶中的水充满进水管,水头高度根据试样结构的疏松程度确定,将测压管开始水头调整在 50cm~70cm 的位置处,待水头稳定后注入渗透容器;开排气阀,可将容器侧立,排除渗透容器底部的空气,直至溢出的水中无气泡;关排气阀,放平渗透容器;

6 将水头管充水至需要高度后,关进水管夹[图 10.3.1 中 5 (2)],开动秒表,同时测记起始水头( $h_1$ )。经过时间  $t$  后,再测记终止水头( $h_2$ ),测水温,估读至 0.5℃。如此重复 3 次~4 次。

**10.3.5** 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 水温  $T^{\circ}\text{C}$  渗透系数应按下式计算:

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (10.3.5)$$

式中:  $a$  ——变水头管截面积( $\text{cm}^2$ );

$L$  ——渗径,等于试样高度( $\text{cm}$ );

$h_1$  ——起始水头( $\text{cm}$ );

$h_2$  ——终止水头( $\text{cm}$ );

$A$  ——试样的断面积( $\text{cm}^2$ );

$t$  ——时间( $\text{s}$ );

2.3 —— $\ln$  和  $\lg$  的换算系数。

2 标准温度下的渗透系数按本规程式(10.2.5-4)计算。

3 计算结果允许差值不得大于  $2 \times 10^{-n} \text{cm/s}$ ,求其算术平均值作为试样的渗透系数。

**10.3.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.11。



## 11 固结试验

**11.0.1** 本试验方法适用于饱和粉煤灰。当只进行压缩时,可用于非饱和粉煤灰。

**11.0.2** 本试验所用主要仪器设备应包括固结容器(图 11.0.2)、加压设备和变形量测设备。

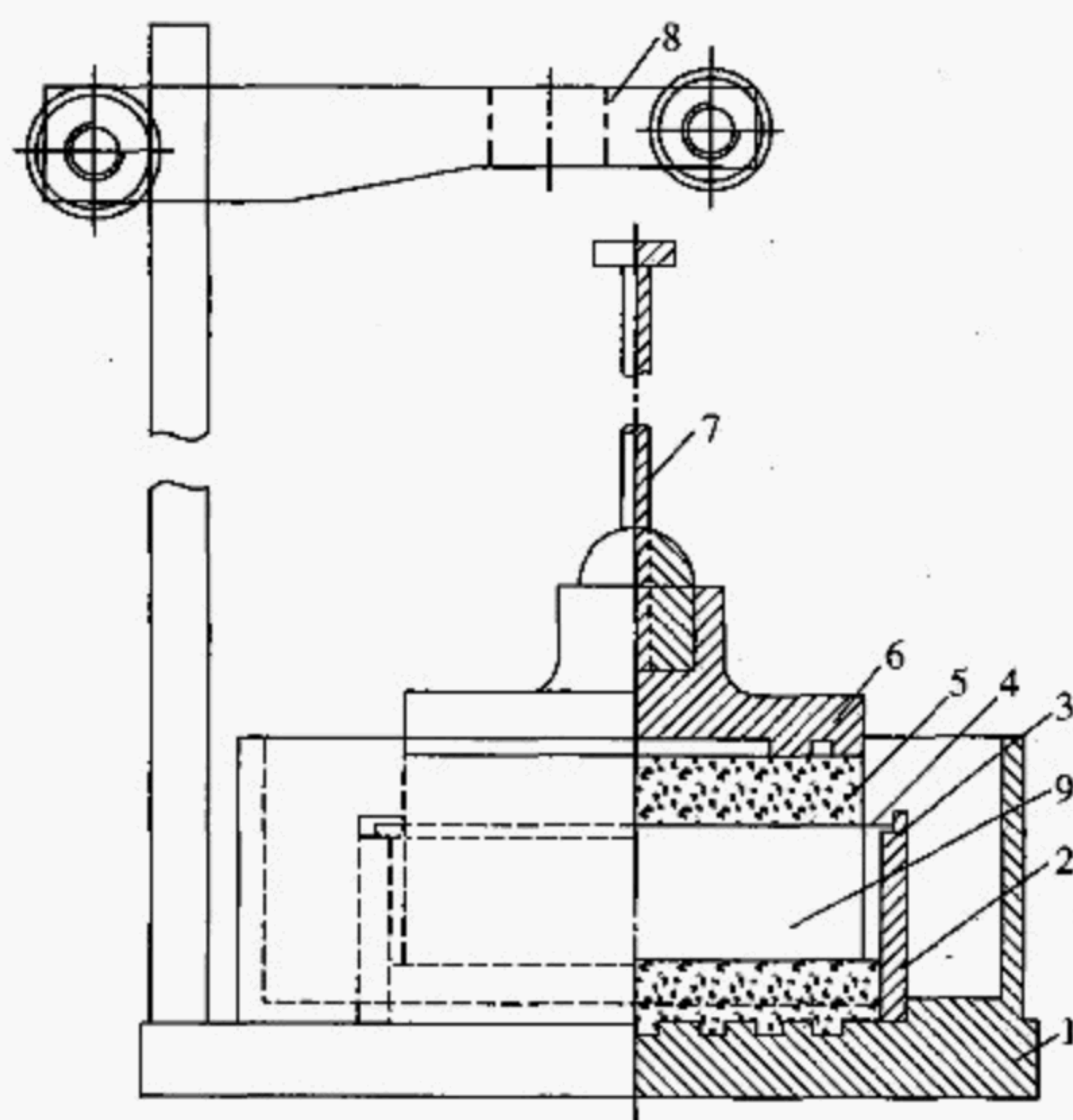


图 11.0.2 固结仪示意图

1—水槽;2—护环;3—环刀;4—导环;5—透水板;6—加压上盖;  
7—位移计导杆;8—位移计架;9—试样

**11.0.3** 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 11.0.3 的规定:

表 11.0.3 固结试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
固结容器	由环刀、护环、透水板、水槽、加压上盖组成；环刀由耐腐蚀不锈钢材料制成，内径为 61.8mm 和 79.8mm，高度为 20mm；透水板的渗透系数应大于试样的渗透系数，顶部透水板直径应小于环刀内径 0.2mm~0.5mm
加压设备	应能垂直地在瞬间施加各级规定的压力，且没有冲击力
变形量测设备	量程 10mm，分度值为 0.01mm 的百分表或准确度为全量程 0.2% 的位移传感器

**11.0.4** 固结仪应按现行行业标准《固结仪校验方法》SL 114 的规定进行校验，透水板应按现行行业标准《透水板校验方法》SL 111 的规定进行校验，环刀应按现行行业标准《切土环刀校验方法》SL 110 的规定进行校验。

**11.0.5** 本试验扰动试样的制备应符合本规程第 3.3 节规定，原状试样的制备应符合本规程第 3.4 节规定，并测定试样的含水率和密度，取切下的余样测定粉煤灰比重。试样需要饱和时，应符合本规程第 3.5.1 条~第 3.5.3 条规定。

**11.0.6** 本试验应按下列步骤进行：

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄型滤纸，将带有试样的环刀装入护环内，放上导环、试样上依次放上薄型滤纸、透水板和加压上盖，并将固结容器置于加压框架正中，使加压上盖与加压框架中心对准，安装百分表或位移传感器；

2 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触，将百分表或传感器调整到零位或测读初读数；

3 确定需要施加的各级压力，压力等级宜为 12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa；第一级压力不宜大于 12.5kPa；最后一级压力应大于试样的自重压力与附加压力之和；只需测定压缩系数时，最大压力不小于 400kPa；



4 需要确定原状样的先期固结压力时,初始段的荷重率应小于或等于 1;施加的最大压力应使测得的  $e - \lg p$  曲线下段出现直线段;

5 对于饱和试样,施加第一级压力后应立即向水槽中注水浸没试样;非饱和试样进行压缩试验时,应用湿棉纱围住加压板周围;

6 需要测定沉降速率、固结系数时,施加每一级压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度变化;时间为 3s、6s、9s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min,至稳定为止,稳定标准为每小时变形不大于 0.005mm;不需要测定沉降速率时,则施加每级压力后 24h 测定试样高度变化作为稳定标准;只需测定压缩系数的试样,施加每级压力后,每小时变形达 0.01mm 时,测定试样高度变化作为稳定标准;按此步骤逐级加压至试验结束;

7 需要进行回弹试验时,可在某级压力下固结稳定后退压,直至退到要求的压力,每次退压至稳定后测定试样的回弹量;

8 试验结束后吸去容器中的水,迅速拆除仪器各部件,取出整块试样,测定含水率。

11.0.7 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 试样的初始孔隙比应准确至  $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ,并按下式计算:

$$e_0 = \frac{(1 + 0.01\omega_0)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1 \quad (11.0.7-1)$$

式中:  $e_0$  ——试样的初始孔隙比;

$\omega_0$  ——含水率(%);

$\rho_0$  ——试样湿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_w$  ——温度  $4^\circ\text{C}$  时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$G_s$  ——灰粒比重。

2 各级压力下试样固结稳定后的单位沉降量应按下式计算:

$$S_i = \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \times 10^3 \quad (11.0.7-2)$$

式中:  $S_i$  ——某级压力下的单位沉降量(mm/m);

$h_0$  ——试样初始高度(mm);

$\sum \Delta h_i$  ——某级压力下试样固结稳定后的总变形量(mm)(等于该级压力下的固结稳定读数减去仪器变形量);

$10^3$  ——单位换算系数。

3 各级压力下试样固结稳定后的孔隙比应按下式计算:

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)}{h_0} \Delta h_i \quad (11.0.7-3)$$

式中:  $e_i$  ——各级压力下试样固结稳定后的孔隙比。

4 某一压力范围内的压缩系数应按下式计算:

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (11.0.7-4)$$

式中:  $a_v$  ——压缩系数(MPa<sup>-1</sup>);

$p_i$  ——某级压力值(MPa)。

5 某一压力范围内的压缩模量应按下式计算:

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (11.0.7-5)$$

式中:  $E_s$  ——某压力范围内的压缩模量(MPa)。

6 某一压力范围内的体积压缩系数应按下式计算:

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (11.0.7-6)$$

式中:  $m_v$  ——某压力范围内的体积压缩系数(MPa<sup>-1</sup>)。

7 压缩指数和回弹指数应按下式计算:

$$C_c \text{ 或 } C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log p_{i+1} - \log p_i} \quad (11.0.7-7)$$

式中:  $C_c$  ——压缩指数;



$C_s$  ——回弹指数。

8 以孔隙比为纵坐标,压力为横坐标绘制孔隙比与压力的关系曲线(图 11.0.7-1)。

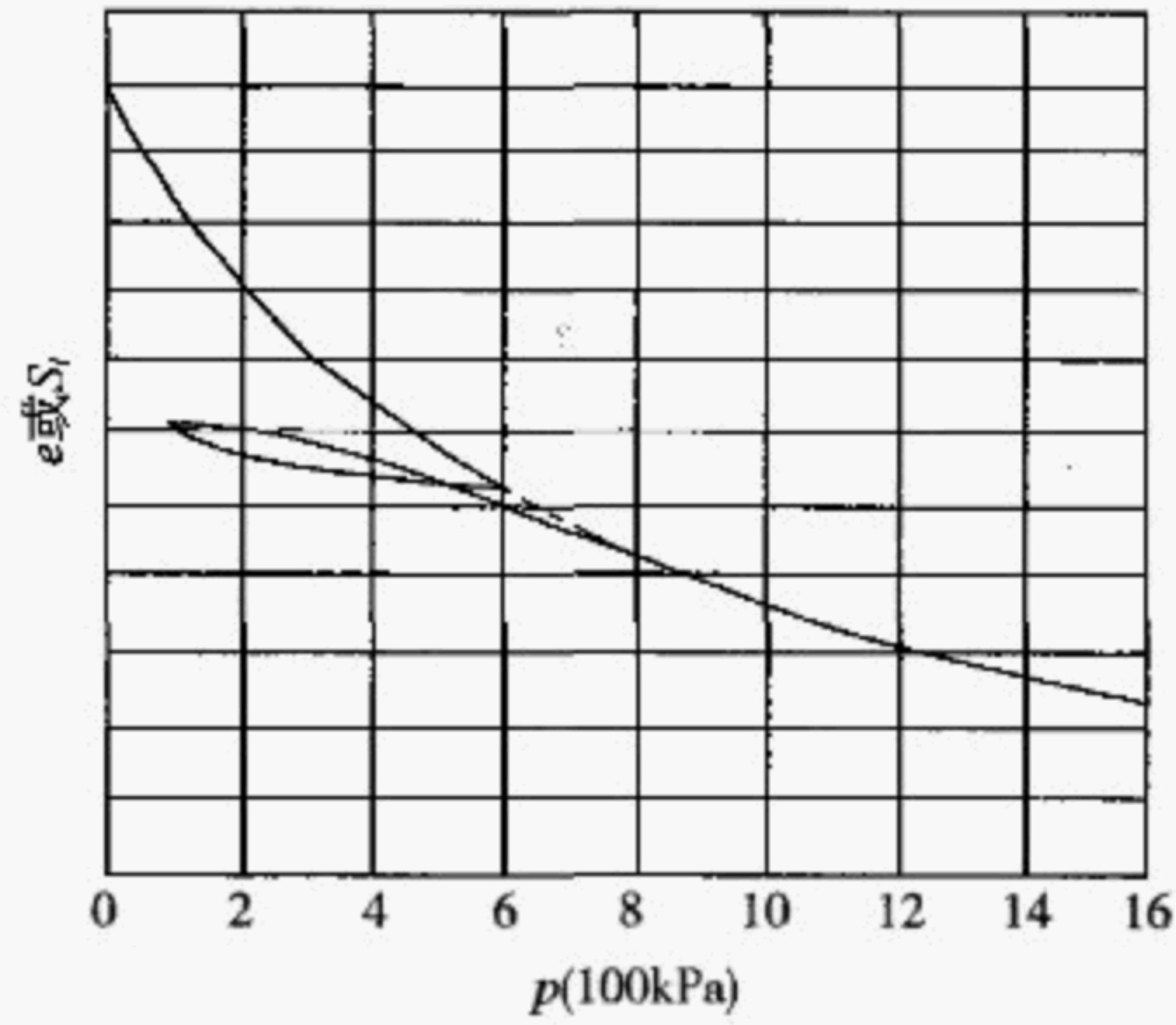


图 11.0.7-1  $e(S_r)-p$  关系曲线

9 以孔隙比为纵坐标,以压力的对数为横坐标,绘制孔隙比与压力的对数关系曲线(图 11.0.7-2)。

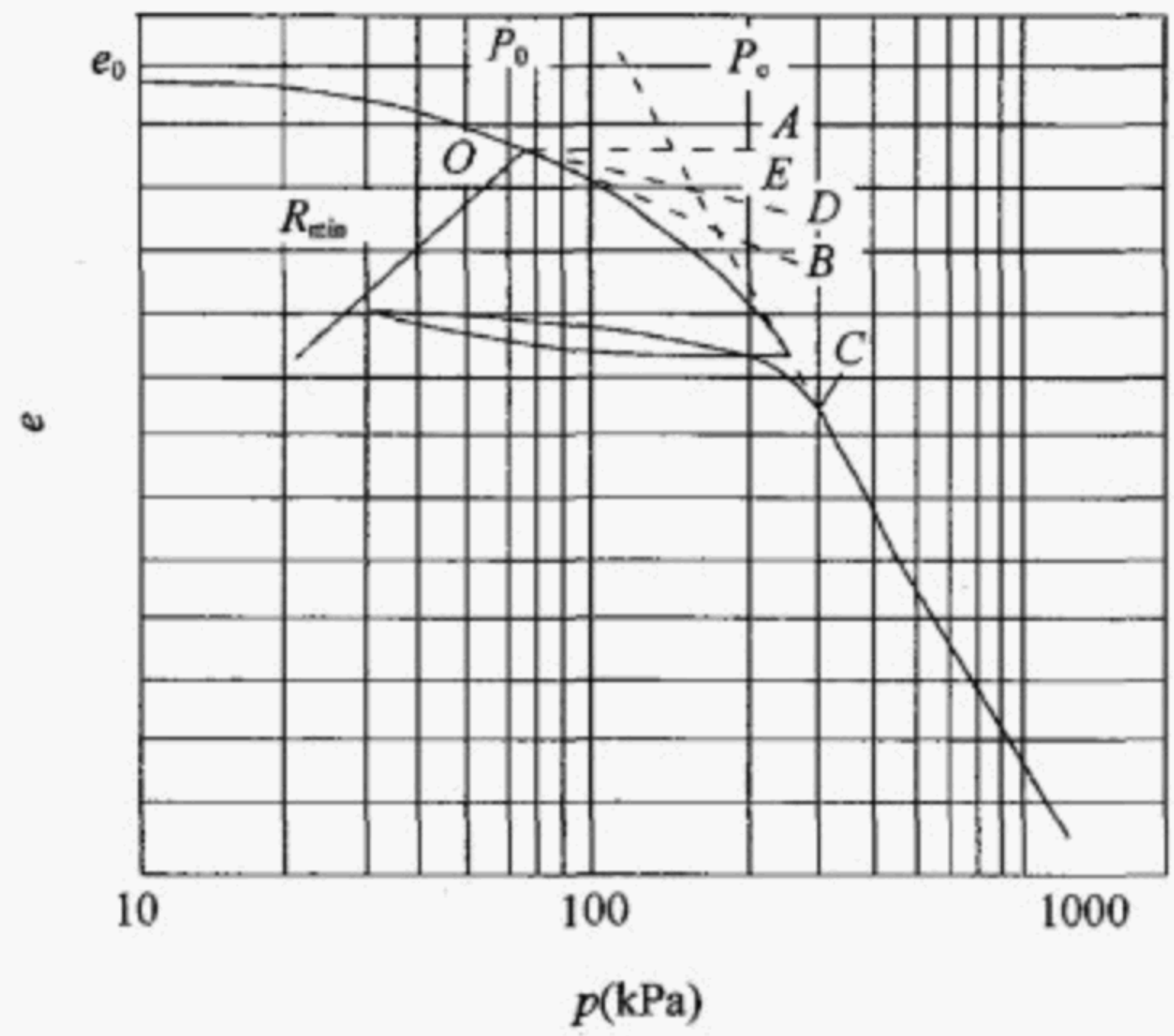


图 11.0.7-2  $e-\log p$  曲线求  $p_c$  示意图

**10** 原状试样的先期固结压力可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

**11** 固结系数可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

**11.0.8** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.12～表 A.0.14。



## 12 三轴压缩试验

### 12.1 一般规定

12.1.1 本试验适用于测定粉煤灰的总抗剪强度参数和有效抗剪强度参数。

12.1.2 本试验可分为不固结不排水剪(UU)、固结不排水剪(CU 或  $\overline{\text{CU}}$ )和固结排水剪(CD)三种试验类型。

12.1.3 本试验所用主要仪器设备应包括应变控制式三轴仪(图 12.1.3)、附属设备、负荷传感器、位移传感器或量表、天平和橡皮膜。

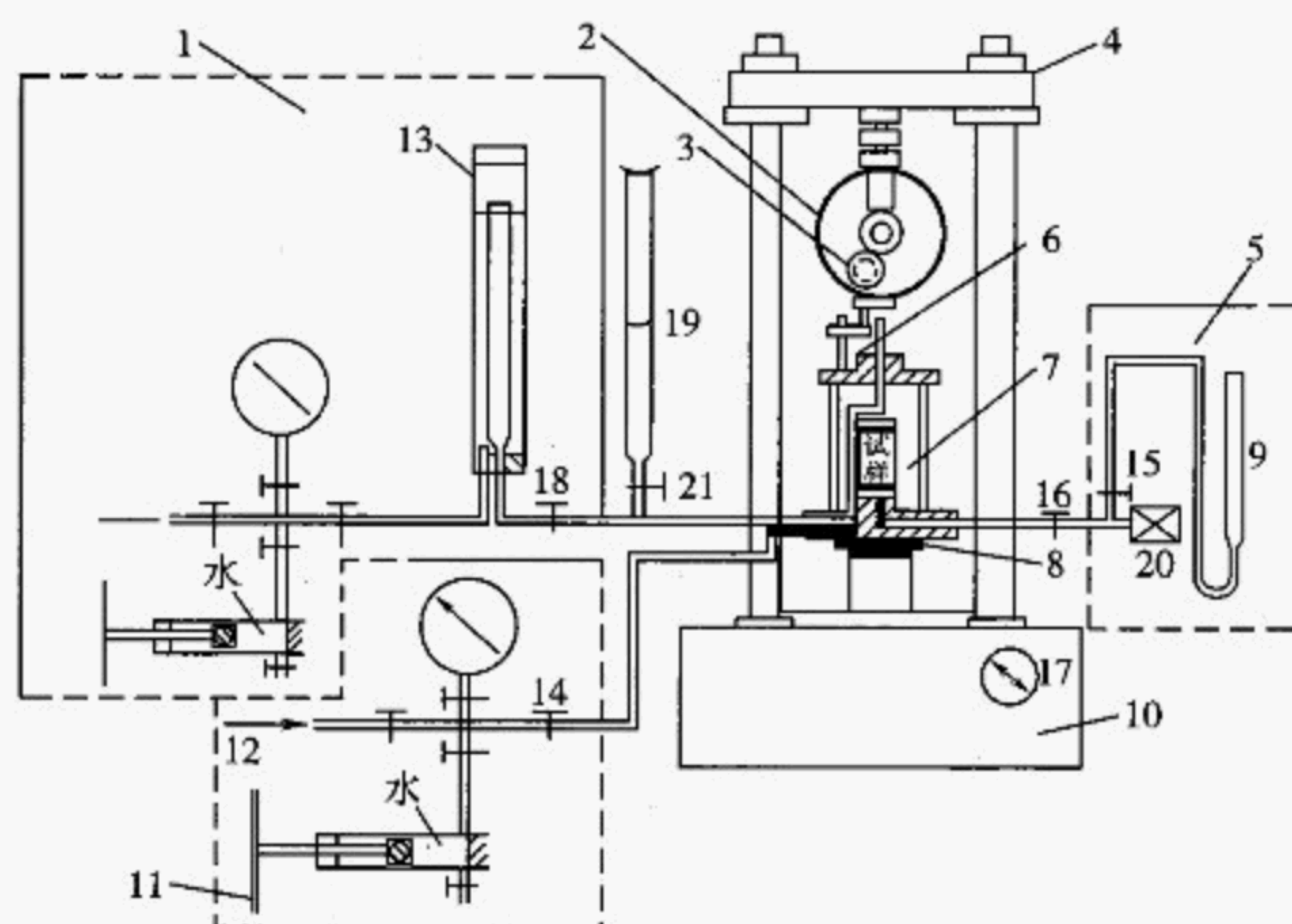


图 12.1.3 应变控制式三轴仪

- 1—反压力控制系统;2—轴向测力计;3—轴向位移计;4—试验机横梁;  
5—孔隙水压力量测系统;6—活塞;7—压力室;8—升降台;9—量水管;  
10—试验机;11—周围压力控制系统;12—压力源;13—体变管;  
14—周围压力阀;15—量管阀;16—孔隙压力阀;17—手轮;  
18—体变管阀;19—排水管;20—孔隙压力传感器;21—排水管阀

12.1.4 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 12.1.4 的规定。

表 12.1.4 三轴压缩试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
应变控制式三轴仪	由反压力控制系统、周围压力控制系统、压力室、孔隙水压力量测系统及试验机等组成
附属设备	包括击实筒(图 12.1.4-1)、饱和器(图 12.1.4-2)、切土器(图 12.1.4-3)、分样器(图 12.1.4-4)、承膜筒(图 12.1.4-5)和对开圆模(图 12.1.4-6)
负荷传感器	不同量程,最大轴向压力的准确度不小于 1%; 或量表:量程 30mm,分度值 0.01mm
量表或位移传感器	量程 30mm,分度值为 0.01mm 的量表或准确度为 全量程 0.2% 的位移传感器
天平	称量 5000g,分度值 1g;称量 200g,分度值 0.01g; 称量 100g,分度值 0.01g
橡皮膜	直径 39.1mm,厚度宜为 0.1mm~0.2mm

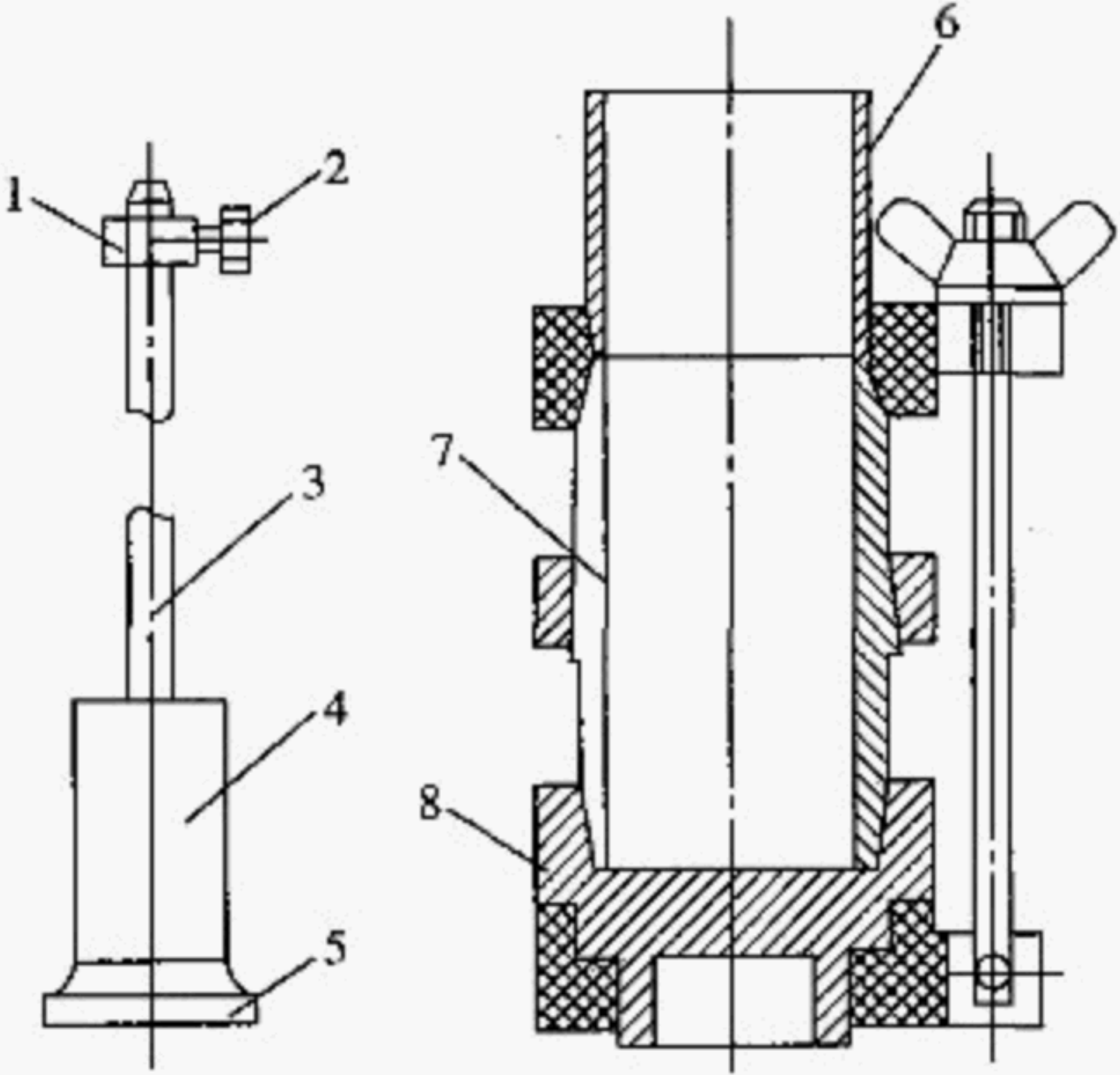


图 12.1.4-1 击实筒

1—套环;2—定位螺丝;3—导杆;4—击锤;  
5—底板;6—套筒;7——饱和器;8—底板



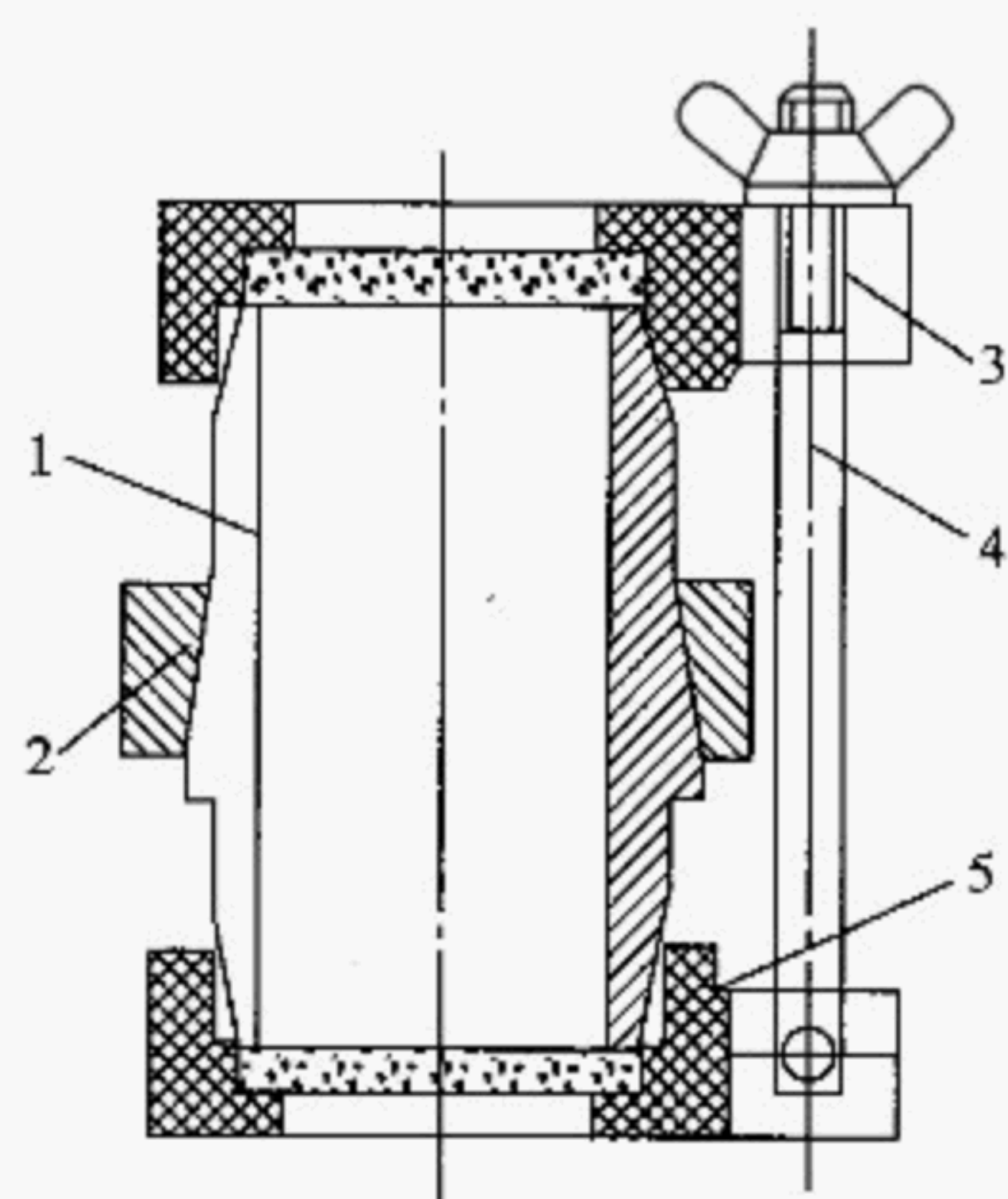


图 12.1.4-2 饱和器

1—试样筒；2—紧箍；3—夹板；4—拉杆；5—透水板

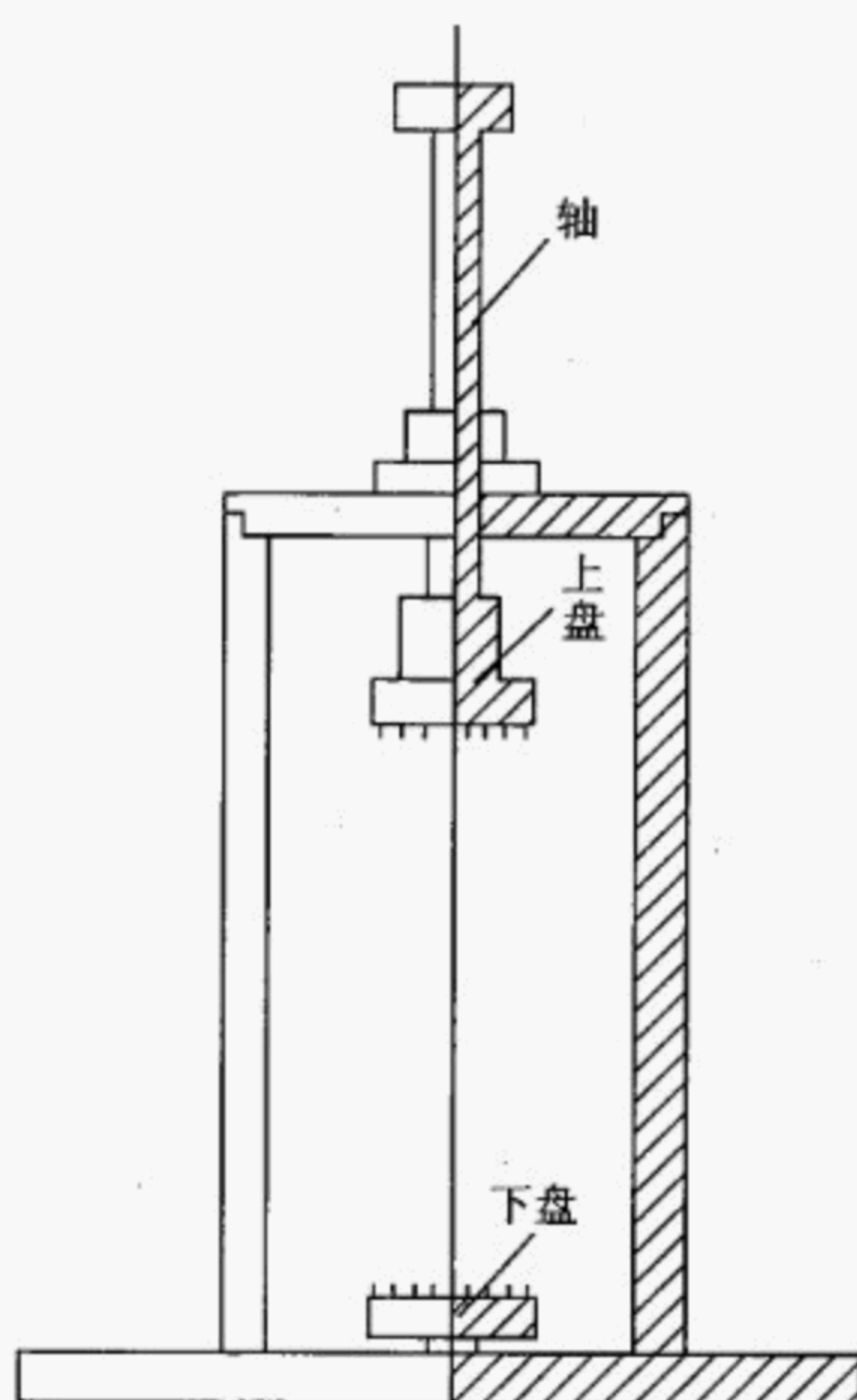


图 12.1.4-3 切土器

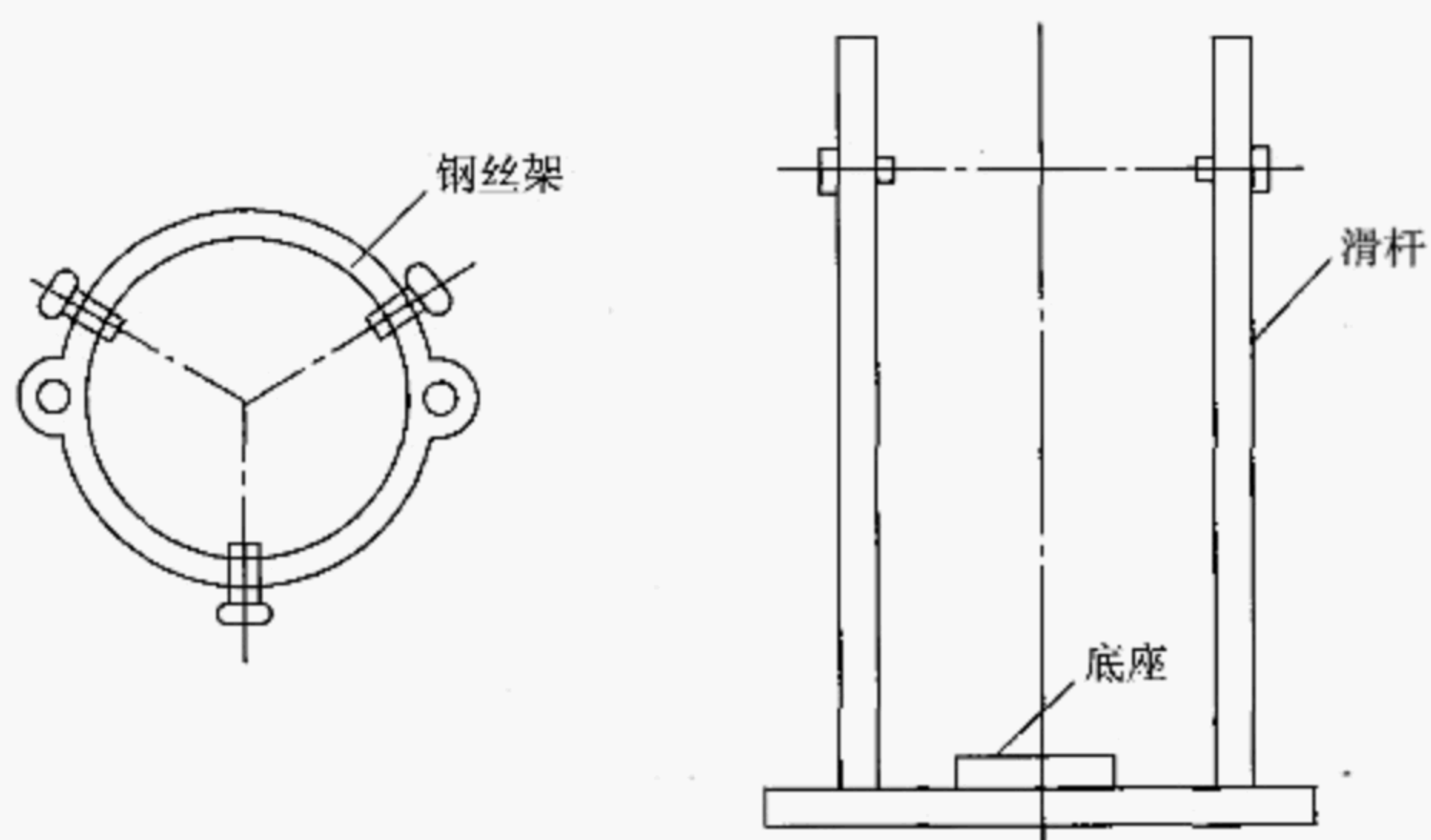


图 12.1.4-4 原状土分样器

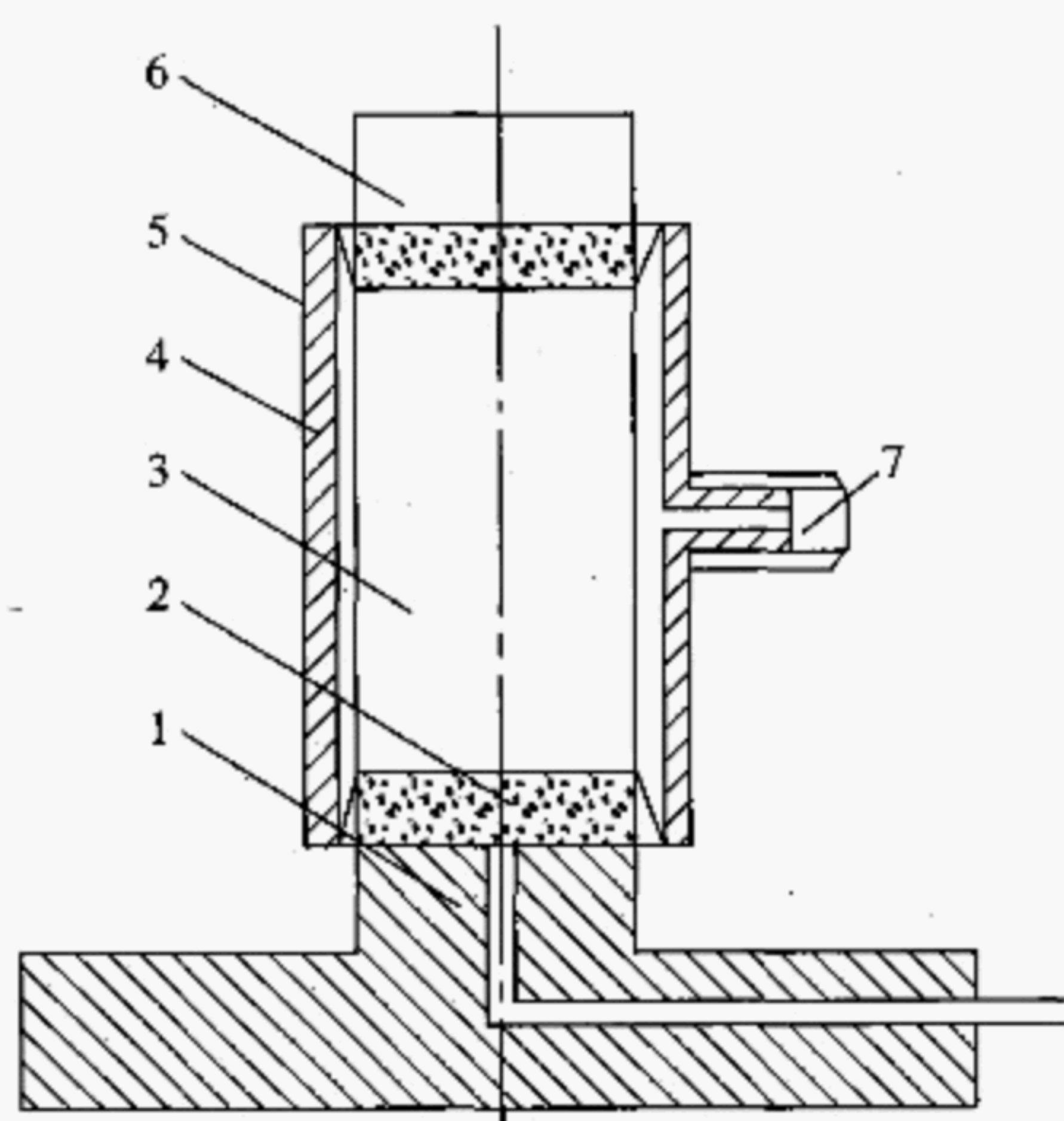


图 12.1.4-5 承膜筒安装示意图

1—压力室底座;2—透水板;3—试样;4—承膜筒;  
5—橡皮膜;6—上帽;7——吸气孔



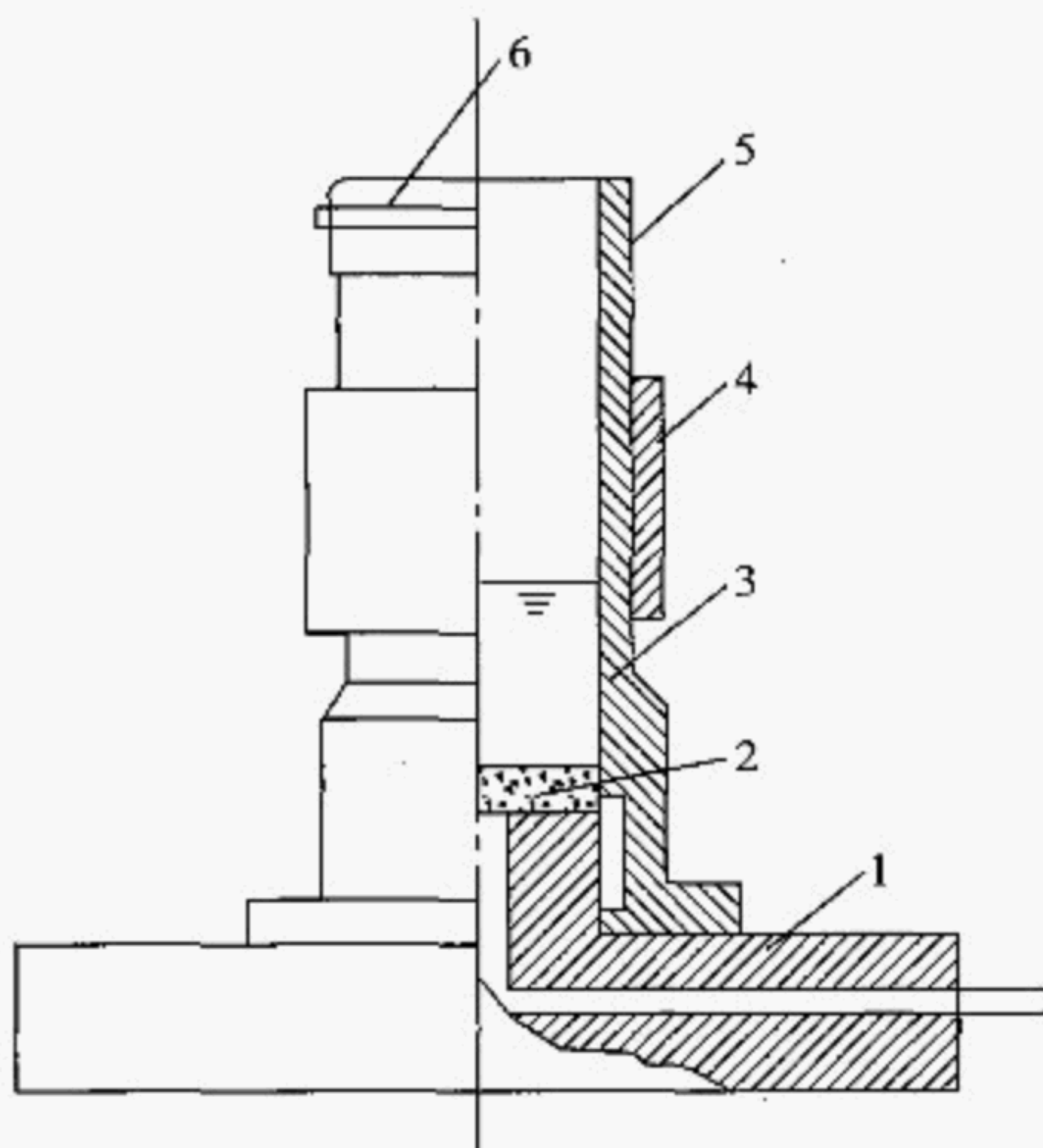


图 12.1.4-6 对开圆模

1—压力室底座；2—透水板；3—制样圆模(两片合成)；  
4—紧箍；5—橡皮膜；6—橡皮圈

**12.1.5** 应变控制式三轴仪应按现行行业标准《应变控制式三轴仪校验方法》SL 118 的规定进行校验，透水板应按现行行业标准《透水板校验方法》SL 111 的规定进行校验。

**12.1.6** 仪器检查应符合下列规定：

1 周围压力控制系统和反压力控制系统的仪表的误差应小于全量程的  $\pm 1\%$ ，采用传感器时，其误差应小于全量程的  $\pm 0.5\%$ ，根据试样的强度大小，选择不同量程的测力计，最大轴向压力的准确度不应小于  $1\%$ ；

2 孔隙压力量测系统的气泡应排除，其方法是：孔隙压力量测系统中充以无气水，并施加压力，小心打开孔隙压力阀，让管路中的气泡从压力室底座排出，应反复几次直到气泡完全冲出为止；孔隙压力量测系统的体积因数应小于  $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{kPa}$ ；

3 排水管路应通畅；活塞在轴套内应能自由滑动，各连接处



应无漏水漏气现象；仪器检查完毕，关周围压力阀、孔隙压力阀和排水阀以备使用；

4 橡皮膜在使用前应仔细检查。其方法是扎紧两端，在膜内充气，然后沉入水下检查应无气泡溢出。

12.1.7 本试验试样制备应符合下列规定：

1 本试验应采用直径 39.1mm，高度 80mm 试样；

2 原状试样制备应先用钢丝锯或削土刀切取一稍大于规定尺寸的灰柱，放在切土器的上、下圆盘之间；再用钢丝锯或削土刀紧靠侧板，由上往下细心切削，边切削边转动圆盘，直至灰样的直径被削成规定的直径为止；然后按试样高度的要求，削平上下两端，切削成直径为 39.1mm，高度 80mm 的试样，将切削好的试样称量，准确至 0.1g。试样高度和直径用卡尺量测，试样的平均直径应按下式计算：

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \quad (12.1.7)$$

式中： $D_0$ ——试样平均直径(mm)；

$D_1$ ——试样上部位直径(mm)；

$D_2$ ——试样中部位直径(mm)；

$D_3$ ——试样下部位直径(mm)。

取切下的余样，平行测定含水率，取其算术平均值作为试样的含水率。对于同一组原状试样，密度的差值不宜大于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率差值不宜大于 2%。

3 扰动试样制备采用击实法，并应符合下列规定：

1) 选取 2kg 的代表性试样，经风干、碾碎、过筛，测定风干含水率，按要求的含水率算出所需加水量。

2) 将需加水量喷洒到试样上拌匀，稍静置后装入塑料袋，然后置于密闭容器内不宜少于 20h，使含水率均匀。取出试样复测其含水率，测定的含水率与要求的含水率的差值应小于  $\pm 1\%$ 。否则需调整含水率至符合要求为止。



3) 击实筒的内径应与试样直径相同。击锤的直径宜小于试样直径,也允许采用与试样直径相等的击锤。击实筒壁在使用前应擦洗干净,涂一薄层凡士林。

4) 根据要求的干密度,称取所需质量,按试样高度分层击实,可分为 5 层,各层质量相等,每层击实至要求高度后,将表面刨毛,然后再加第二层灰料,如此反复直到最后一层,将击样筒中的试样两端整平,取出称其质量,一组试样的密度差值应小于  $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**12.1.8** 本试验饱和方法可分别采用抽气饱和法、水头饱和法、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )饱和法和反压力饱和法,仅使用水头饱和法无法使试样达到饱和。

**12.1.9** 抽气饱和法应按本规程第 3.5.2 条第 2 款~第 4 款的步骤进行。

**12.1.10** 水头饱和法应按下列步骤和要求进行:

- 1 按本规程第 12.3.1 条第 1 款~第 4 款步骤进行安装;
- 2 试样顶用透水帽,施加  $20\text{kPa}$  的周围压力,并同时提高试样底部量管的水面和降低连接试样顶部固结排水管的水面,使两管水面差在  $60\text{cm}\sim 80\text{cm}$ ;
- 3 打开量管阀、孔隙压力阀和排水阀,让水自下而上通过试样,直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内的水量相等为止。

**12.1.11** 二氧化碳( $\text{CO}_2$ )饱和法应按下列步骤和要求进行:

- 1 二氧化碳的饱和装置(图 12.1.11),试样安装完成后,装上压力室罩,将各阀门关闭,开周围压力阀对试样施加  $20\text{kPa}$  的周围压力;
- 2 将减压阀调至  $5\text{kPa}\sim 10\text{kPa}$ ,开供气阀使  $\text{CO}_2$  气体由试样底部输入试样内;
- 3 开体变管阀,当体变管内的水面无气泡时关闭供气阀;
- 4 开孔隙压力阀及量管阀、升高量管内水面,使保持高于体



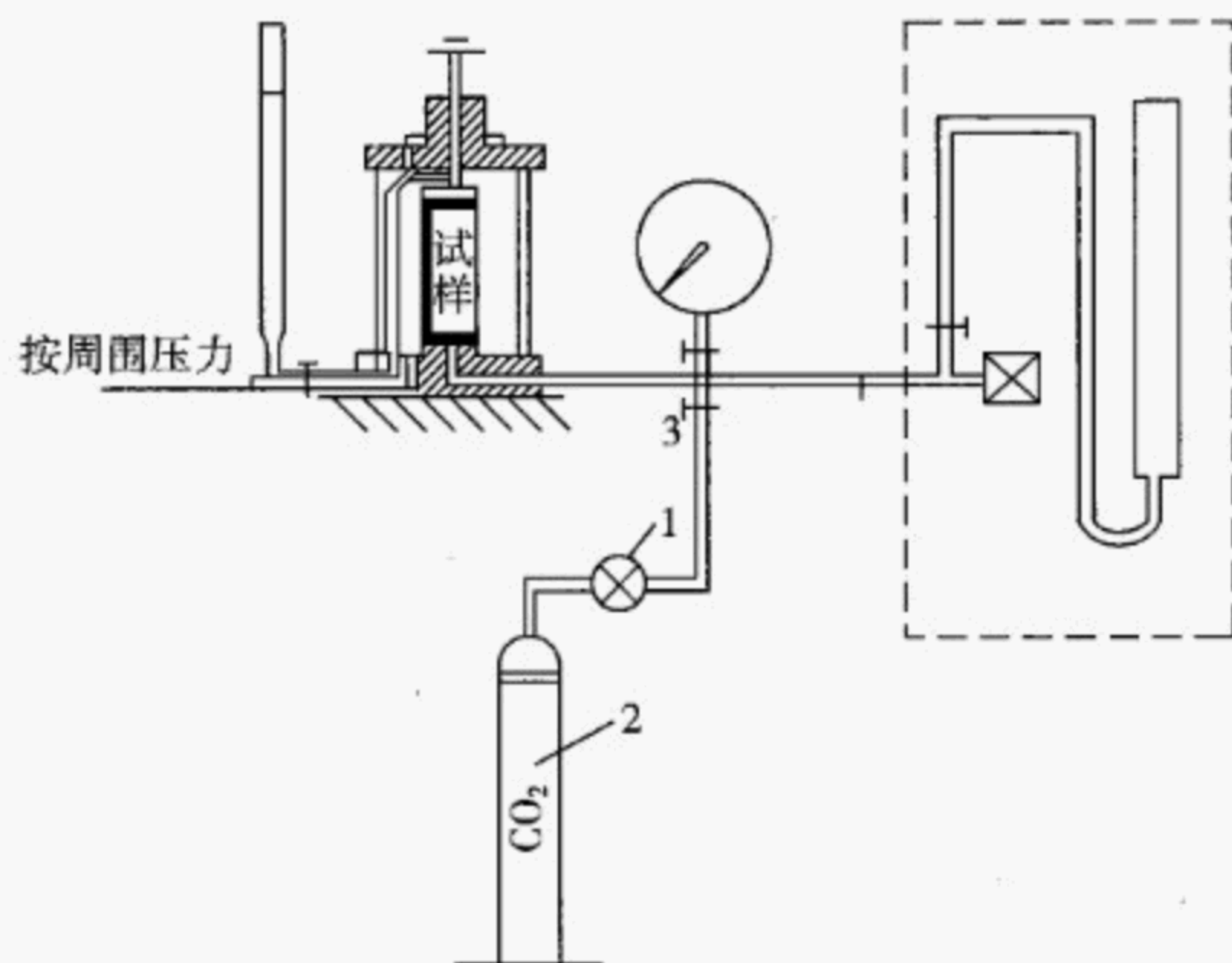


图 12.1.11 二氧化碳饱和装置图

1—减压阀;2—CO<sub>2</sub>储气瓶;3—供气阀

变管内水面约 0.2m;

5 当量管内流出的水量约等于体变管内上升的水量为止,再继续按照本规程第 12.1.10 条进行水头饱和后,关闭体变管阀及孔隙压力阀。

**12.1.12 反压力饱和法应按下列步骤和要求进行:**

1 按本规程第 12.1.9 条、第 12.1.10 条和 12.1.11 条的规定进行试样饱和;

2 用孔隙压力系数(B 值)检查饱和度,如试样的饱和度达不到 99%,可用反压力控制系统(图 12.1.3)对试样施加反压力以达到完全饱和,其步骤如下:

1)试样装好以后装上压力室罩,关孔隙压力阀和反压力阀,测记体变管读数;先对试样施加 20kPa 的周围压力预压,并开孔隙压力阀待孔隙压力稳定后记下读数,然后关孔隙压力阀;

2)反压力应分级施加,并同时分级施加周围压力,以减少对



试样的扰动；在施加反压力过程中，始终保持周围压力比反压力大 20kPa；反压力和周围压力的每级增量取 30kPa；

- 3) 操作时，先调周围压力至 50kPa，并将反压力系统调至 30kPa，同时打开周围压力阀和反压力阀，再缓缓打开孔隙压力阀，待孔隙压力稳定后，测记孔隙压力计和体变管读数，再施加下一级的周围压力和反压力。每施加一级压力应测定孔隙水压力增量，当孔隙水压力增量与周围压力增量之比  $\Delta u / \Delta \sigma_3$  大于 0.98 时认为试样已达到饱和。

## 12.2 不固结不排水剪切试验

### 12.2.1 本试验试样安装应符合下列规定：

- 1 对压力室底座充水，在底座上放置不透水板，并依次放置试样、不透水板及试样帽；

- 2 将橡皮膜套在承膜筒内，两端翻出筒外，从吸气孔吸气，使膜贴紧承膜筒内壁，然后套在试样外，放气，翻起橡皮膜的两端，取出承膜筒；用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上；

- 3 装上压力室罩，安装时应先将活塞提升，以防碰撞试样，压力室罩安放后，将活塞对准试样帽中心，并均匀地旋紧螺丝，再将轴向测力计对准活塞；

- 4 开排气孔，向压力室充水，当压力室内快注满水时，降低进水速度，水从排气孔溢出时，关闭排气孔；

- 5 关体变传感器或体变管阀及孔隙压力阀，开周围压力阀，施加所需的周围压力；周围压力大小应与工程的实际荷载相适应，并使最大周围压力与试样的最大实际荷载大致相等，也可按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 施加；

- 6 上升升降台，当轴向测力计有微读数时表示活塞已与试样帽接触，然后将轴向负荷传感器或量表和轴向位移传感器或量表



的读数调整到零位。

12.2.2 本试验试样剪切应按下列步骤进行：

1 试验机启动之前，应按表 12.2.2 的规定将各阀门关闭或开启；

表 12.2.2 各阀门开关状态

试验方法	体变管阀 (18)	排水管阀 (19)	周围压力阀 (14)	孔隙压力阀 (16)	量管阀 (15)
UU 试验	关	关	开	关	关

2 试验的剪切应变速率应为 0.5%/min~1.0%/min；

3 开动试验机进行剪切。开始阶段，试样每产生轴向应变 0.3%~0.4%测记轴向力和轴向位移读数各 1 次，当轴向应变达 3%以后，读数间隔可延长为 0.7%~0.8%各测记 1 次，接近峰值时应加密读数；

4 当出现峰值后，再继续剪 3%~5%轴向应变；若轴向力读数无明显减少，则剪切至轴向应变达 15%~20%；

5 试验结束后关闭试验机，关周围压力阀，下降升降台，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，擦干试样周围的水，脱去试样外的橡皮膜，描述试样破坏后形状，称试样质量并测定含水率；

6 对其余几个试样，在不同周围压力下以同样的剪切应变速率进行试验。

12.2.3 本试验的资料整理应符合下列规定：

1 轴向应变的校正应按下式计算：

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} \times 100 \tag{12.2.3-1}$$

式中： $\epsilon_1$  ——轴向应变(%)；

$\Delta h_1$  ——剪切过程中试样的高度变化(cm)；

$h_0$  ——试样的初始高度(cm)。

2 剪切面积的校正应按下式计算：



$$A_a = \frac{A_0}{1 - \epsilon_1} \quad (12.2.3-2)$$

式中： $A_a$ ——试样剪切时的校正面积( $\text{cm}^2$ )；

$A_0$ ——试样的初始断面积( $\text{cm}^2$ )。

3 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )应按下式计算：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (12.2.3-3)$$

式中： $\sigma_1$ ——大主应力(kPa)；

$\sigma_3$ ——小主应力(kPa)；

$C$ ——测力计率定系数(N/0.01mm)；

$R$ ——测力计读数(0.01mm)；

10——单位换算系数。

4 以主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )为纵坐标,轴向应变( $\epsilon_1$ )为横坐标,绘制主应力差与轴向应变关系曲线,取曲线上主应力差的峰值作为破坏点,无峰值时,取 15% 轴向应变时的主应力差值作为破坏点。

5 不固结不排水剪强度包线可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

12.2.4 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.15。

### 12.3 固结不排水剪切试验

12.3.1 本试验试样安装应按下列规定：

1 开孔隙压力阀及量管阀,使压力室底座充水排气,并关阀；压力室底座上依次放上透水板、湿滤纸、试样、湿滤纸、透水板,在其周围贴上 7 条~9 条浸湿的滤纸条,宽度为试样直径的 1/5~1/6,滤纸条上端与透水板连接,若施加反压力饱和试样,所贴的滤纸条应中间断开约 1/4 试样高度,或自底部向上贴至 3/4 试样高度处；

2 将橡皮膜套在承膜筒内,两端翻出筒外,从吸气孔吸气,使



膜贴紧承膜筒内壁,然后套在试样外,放气,翻起橡皮膜的两端,取出承膜筒,用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上;

3 用软刷子或双手自下向上排除试样与橡皮膜之间的气泡;

4 开排水管阀,使水从试样帽流出,排除管路中气泡,并将试样帽置于试样顶端,排除顶端气泡,将橡皮膜扎紧在试样帽上;

5 降低排水管,使水面至试样中心高程以下 20cm~40cm,吸出试样与橡皮膜之间水分,然后关排水管阀;

6 装上压力室罩,压力室罩安放后,将活塞对准试样帽中心,并均匀地旋紧螺丝,再将轴向测力计对准活塞;

7 开排气孔,向压力室充水,当压力室内快注满水时,降低进水速度,水从排气孔溢出时,关闭排气孔。然后放低排水管使其水面与试样中心高度齐平,并测记其水面读数,关排水管阀。

**12.3.2** 本试验试样排水固结应按下列步骤进行:

1 使量管水面位于试样中心高度处,开量管阀,测读传感器,记下孔隙压力起始读数,然后关量管阀;

2 关体变传感器或体变管阀及孔隙压力阀,开周围压力阀,施加所需的周围压力,传感器归零或量表调整;周围压力大小应与工程的实际荷载相适应,并尽可能使最大周围压力与试样的最大实际荷载大致相等,也可按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 施加;

3 打开孔隙压力阀,测记稳定后的孔隙压力读数,减去孔隙压力计起始读数,即为周围压力下试样的初始孔隙压力( $u$ );

4 开排水管阀的同时开动秒表,按 0、0.25min、1min、4min、9min...时间测记排水管水面及孔隙压力计读数;在整个试验过程中零位指示器的水银面始终保持在原来位置,排水管水面应与试样中心高度保持一致,固结度至少应达到 95%;

5 如需对试样施加反压力时,则按本规程第 12.1.12 条规定进行,然后关体变管阀,增大周围压力,使周围压力与反压力之差等于原来选定的周围压力,记录稳定的孔隙压力读数和体变管水



面读数作为固结前的起始读数；

6 开体变管阀，让试样通过体变管排水，并按本规程第 12.3.2 条中的第 3 款和第 4 款规定进行排水固结；

7 固结完成后，关排水管阀或体变管阀，记下体变管或排水管和孔隙压力的读数；开动试验机，到轴向力读数开始微动时，表示活塞已与试样接触，记下轴向位移读数，即为固结下沉量 ( $\Delta h_c$ )；依此算出固结后试样高度 ( $h_c$ )，然后将轴向力和轴向位移读数都调至零；

8 其余几个试样按同样方法安装，并在不同周围压力下排水固结。

12.3.3 本试验试样剪切应按下列步骤进行：

1 试验机启动之前，应按表 12.3.3 的规定将各阀门关闭或开启；

表 12.3.3 各阀门开关状态

试验方法	体变管阀 (18)	排水管阀 (19)	周围压力阀 (14)	孔隙压力阀 (16)	量管阀 (15)
$\overline{\text{CU}}$ 试验 (测孔隙压力)	关	关	开	开	关
CU 试验	关	关	开	关	关

2 试验的剪切应变速率应为  $0.1\%/min \sim 0.5\%/min$ ；

3 开动试验机，进行剪切。开始阶段，试样每产生轴向应变  $0.3\% \sim 0.4\%$  测记轴向力和轴向位移读数各 1 次，当轴向应变达  $3\%$  以后，读数间隔可延长为  $0.7\% \sim 0.8\%$  各测记 1 次，当接近峰值时应加密读数；

4 当出现峰值后，再继续剪  $3\% \sim 5\%$  轴向应变；若轴向力读数无明显减少，则剪切至轴向应变达  $15\% \sim 20\%$ ；

5 测读轴向位移时应同时测读孔隙压力的读数；

6 试验结束后关闭试验机，关周围压力阀，应关闭孔隙压力阀；下降升降台，开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，擦



干试样周围的水,脱去试样外的橡皮膜,描述破坏后形状,称试样质量并测定含水率;

7 对其余几个试样,在不同周围压力下以同样的剪切应变速率进行试验。

12.3.4 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算应按照表 12.3.4 的规定进行;

表 12.3.4 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算

项目	起始	固 结 后		剪切时校正值
		按实测固结下沉	等应变简化试样	
试样高度(cm)	$h_0$	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0 \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3}$	—
试样面积(cm <sup>2</sup> )	$A_0$	$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$	$A_c = A_0 \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3}$	$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.1\epsilon_1}$
试样体积(cm <sup>3</sup> )	$V_0$	$V_c = h_c A_c$		—

表中:  $\Delta h_c$  ——固结下沉量(cm);

$\Delta V$  ——固结排水量(cm<sup>3</sup>);

$A_a$  ——试样剪切时的面积(cm<sup>2</sup>);

$\epsilon_1$  ——轴向应变(%),  $\epsilon_1$  等于  $\frac{\Delta h_i}{h_c}$ ;

$\Delta h_i$  ——试样剪切时高度变化(cm),可预先绘制  $\Delta V \sim h_c$  及  $\Delta V \sim A_c$  的关系线备用。

2 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )应按下式计算:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (12.3.4-1)$$

式中:  $\sigma_1$  ——大主应力(kPa);

$\sigma_3$  ——小主应力(kPa);

$C$  ——测力计率定系数(N/0.01mm);

$R$  ——测力计读数(0.01mm);



10——单位换算系数。

3 有效主应力比  $\sigma'_1/\sigma'_3$  应按下列公式计算：

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (12.3.4-2)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (12.3.4-3)$$

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} + 1 \quad (12.3.4-4)$$

式中： $\sigma'_1$ 、 $\sigma'_3$ ——有效大主应力和有效小主应力(kPa)；

$\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ——大主应力与小主应力(kPa)；

$u$ ——孔隙水压力(kPa)。

4 孔隙压力系数  $B$  和  $A_f$  应按下列公式计算：

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (12.3.4-5)$$

$$A_f = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (12.3.4-6)$$

式中： $B$ ——初始孔隙水压力系数；

$A_f$ ——破坏时的孔隙水压力系数；

$u$ ——试样在周围压力下产生的初始孔隙压力(kPa)；

$u_d$ ——试样在主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )下产生的孔隙压力(kPa)。

5 根据需要分别绘制主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线、有效主应力比( $\sigma'_1/\sigma'_3$ )与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线、孔隙压力  $u$  与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线，可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定；

6 以( $\sigma_1 - \sigma_3$ )或  $\sigma'_1/\sigma'_3$  的峰点值作为破坏点，如( $\sigma_1 - \sigma_3$ )和  $\sigma'_1/\sigma'_3$  均无峰值，应以应力路径的密集点或按一定轴向应变相应的( $\sigma_1 - \sigma_3$ )或  $\sigma'_1/\sigma'_3$  作为破坏强度值，轴向应变可取  $\epsilon_1 = 15\%$ ；

7 强度包线的绘制可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

12.3.5 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.16。



## 12.4 固结排水剪切试验

12.4.1 本试验试样安装应按本规程第 12.3.1 条规定进行。

12.4.2 本试验试样固结应按本规程第 12.3.2 条规定进行。

12.4.3 本试验试样剪切应按下列步骤进行：

1 试验机启动之前,应按表 12.4.3 的规定将各阀门关闭或开启；

表 12.4.3 各阀门开关状态

试验方法	体变管阀 (18)	排水管阀 (19)	周围压力阀 (14)	孔隙压力阀 (16)	量管阀 (15)
CD 试验	开	开	开	开	关

2 试验的剪切应变速率应为  $0.075\%/min \sim 0.1\%/min$ ；

3 开动试验机,进行剪切。开始阶段,试样每产生轴向应变  $0.3\% \sim 0.4\%$  测记轴向力和轴向位移读数各 1 次,当轴向应变达  $3\%$  以后,读数间隔可延长为  $0.7\% \sim 0.8\%$  各测记 1 次,当接近峰值时应加密读数；

4 当出现峰值后,再继续剪  $3\% \sim 5\%$  轴向应变；若轴向力读数无明显减少,则剪切至轴向应变达  $15\% \sim 20\%$ ；

5 测读轴向位移时,应同时测读体变传感器或体变管读数及排水管读数；

6 试验结束后关闭试验机,关周围压力阀,关闭孔隙压力阀和体变传感器或体变管阀,下降升降台,开排气孔,排去压力室内的水,拆除压力室罩,擦干试样周围的水,脱去试样外的橡皮膜,描述破坏后形状,称试样质量并测定含水率；

7 对其余几个试样,在不同周围压力下以同样的剪切应变速率进行试验。

12.4.4 本试验的资料整理应符合下列规定：

1 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算应按照表 12.4.4 的规定进行；



表 12.4.4 试样的高度、面积、体积及剪切时的面积计算

项目	起始	固 结 后		剪切时校正值
		按实测固结下沉	等应变简化式样	
试样高度(cm)	$h_0$	$h_c = h_0 - \Delta h_c$	$h_c = h_0 \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3}$	—
试样面积(cm <sup>2</sup> )	$A_0$	$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$	$A_c = A_0 \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3}$	$A_a = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i}$
试样体积(cm <sup>3</sup> )	$V_0$	$V_c = h_c A_c$		—

表中： $\Delta h_c$ ——固结下沉量(cm)；

$\Delta V$ ——固结排水量(cm<sup>3</sup>)；

$\Delta V_i$ ——排水剪中剪切时的试样体积变化，按体变管或排水管读数求得(cm<sup>3</sup>)；

$\epsilon_1$ ——轴向应变(%)， $\epsilon_1$  等于  $\frac{\Delta h_i}{h_c}$ ；

$\Delta h_i$ ——试样剪切时高度变化(cm)，可预先绘制  $\Delta V \sim h_c$  及  $\Delta V \sim A_c$  的关系线备用。

2 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )应按下式计算：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (12.4.4-1)$$

式中： $\sigma_1$ ——大主应力(kPa)；

$\sigma_3$ ——小主应力(kPa)；

$C$ ——测力计率定系数(N/0.01mm)；

$R$ ——测力计读数(0.01mm)；

$A_a$ ——试样剪切时的面积(cm<sup>2</sup>)；

10——单位换算系数。

3 有效主应力比  $\sigma'_1/\sigma'_3$  应按下列公式计算：

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (12.4.4-2)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (12.4.4-3)$$

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} + 1 \quad (12.4.4-4)$$

式中： $\sigma_1'$ 、 $\sigma_3'$ ——有效大主应力和有效小主应力(kPa)；

$\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ——大主应力与小主应力(kPa)；

$u$ ——孔隙水压力(kPa)。

4 孔隙压力系数  $B$  和  $A_f$  应按下列公式计算：

$$B = \frac{u}{\sigma_3} \quad (12.4.4-5)$$

$$A_f = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (12.4.4-6)$$

式中： $u$ ——试样在周围压力下产生的初始孔隙压力(kPa)；

$u_d$ ——试样在主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )下产生的孔隙压力(kPa)。

5 分别绘制主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线、有效主应力比( $\sigma_1'/\sigma_3'$ )与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线、孔隙压力  $u$  与轴向应变  $\epsilon_1$  的关系曲线,可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

6 以( $\sigma_1 - \sigma_3$ )或  $\sigma_1'/\sigma_3'$  的峰点值作为破坏点,如( $\sigma_1 - \sigma_3$ )和  $\sigma_1'/\sigma_3'$  均无峰值,应以应力路径的密集点或按一定轴向应变相应的( $\sigma_1 - \sigma_3$ )或  $\sigma_1'/\sigma_3'$  作为破坏强度值,可取轴向应变  $\epsilon_1$  为 15%。

7 强度包线绘制可按照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中的方法确定。

12.4.5 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.17。



## 13 直接剪切试验

### 13.1 一般规定

13.1.1 本试验用于测定粉煤灰的抗剪强度参数,即黏聚力和内摩擦角。

13.1.2 粉煤灰的直接剪切试验可分为慢剪(S)、固结快剪(CQ)和快剪(Q)三种试验方法。

13.1.3 本试验所用主要仪器设备应包括应变控制式直剪仪(图 13.1.3)、量表或位移传感器、环刀,辅助工具包括饱和器、削土刀或钢丝锯、秒表、滤纸和直尺等。

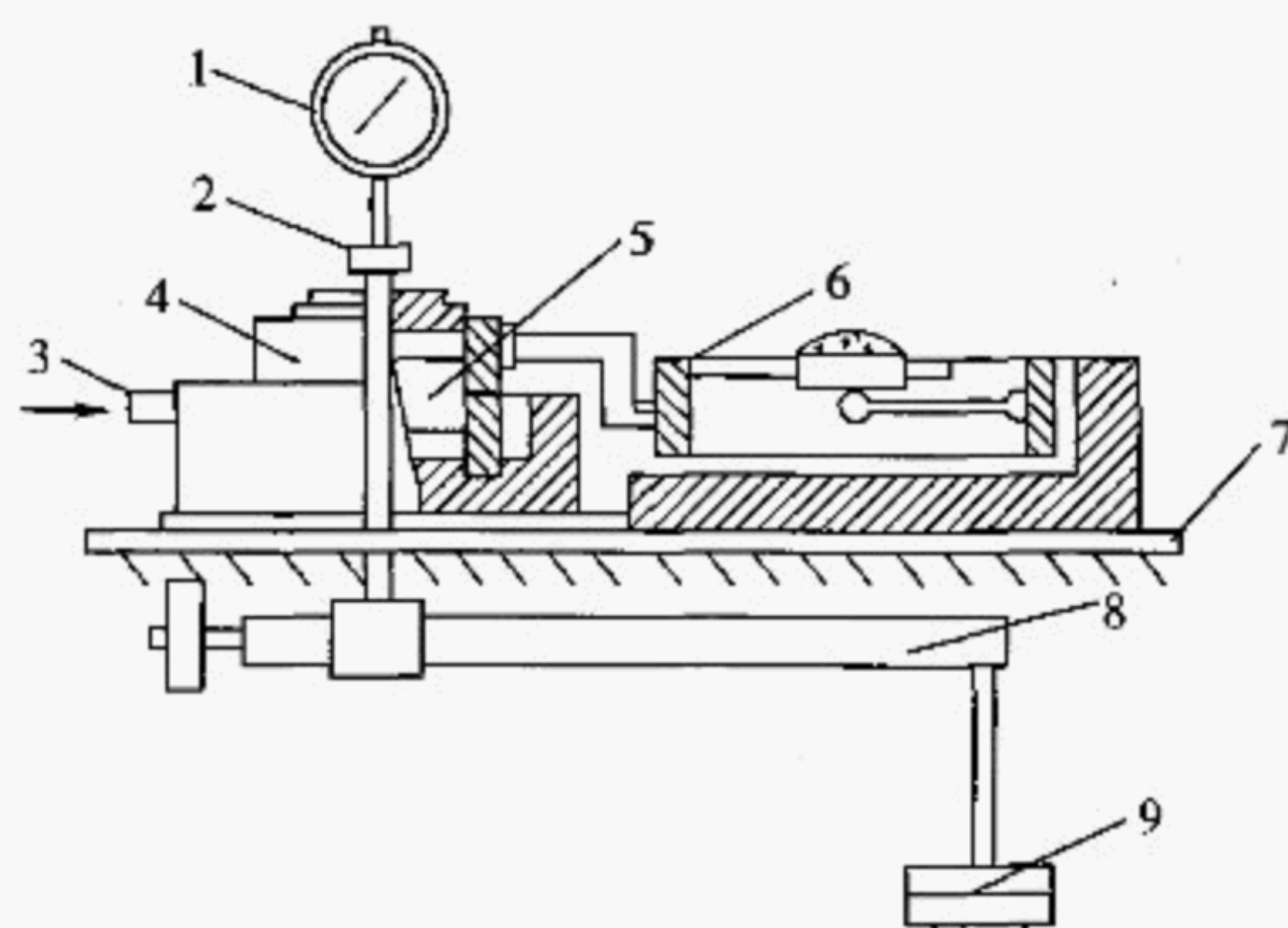


图 13.1.3 应变控制式直剪仪结构图

1—垂直变形百分表;2—垂直加压框架;3—推动座;4—剪切盒;  
5—试样;6—测力计;7—台板;8—杠杆;9—砝码

13.1.4 本试验所用主要仪器设备规格应符合表 13.1.4 的规定。

表 13.1.4 直接剪切试验所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
应变控制式直剪仪	由剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量测系统组成
量表或位移传感器	量程 10mm,分度值为 0.01mm 的量表或准确度为全量程 0.2%的位移传感器
环刀	内径 61.8mm,高 20mm

**13.1.5** 应变控制式直剪仪应按照现行行业标准《应变控制式直剪仪校验方法》SL 116 的规定进行校验,环刀应按照现行行业标准《切土环刀校验方法》SL 110 的规定进行校验,透水板应按照现行行业标准《透水板校验方法》SL 111 的规定进行校验。

## 13.2 直接剪切试验

**13.2.1** 本试验扰动试样的制备应符合本规程第 3.3 节规定,原状试样的制备应符合本规程第 3.4 节规定,试样饱和应符合本规程第 3.5.1 条~第 3.5.3 条规定。

**13.2.2** 本试验试样安装应按下列步骤进行:

- 1 对准剪切容器上、下盒,插入固定销,固结快剪试验与慢剪试验在下盒内放透水板和滤纸,快剪试验时应以塑料薄膜代替滤纸,将带有试样的环刀刃口向上,对准剪切盒口,在试样上放滤纸和透水板,小心地将试样推入剪切盒内,避免试样倾斜,移去环刀;

- 2 移动传动装置,使上盒前端钢珠刚好与测力计接触,依次加上传压板、加压框架,安装垂直位移和水平位移量测装置,并调至零位或测记初始读数;

- 3 根据工程实际施加垂直压力,各级压力可根据试样紧密程度一次施加或分级施加。

**13.2.3** 慢剪试验应按下列步骤进行:

- 1 施加垂直压力后,每 1h 测读垂直变形一次。直至试样固结变形稳定,稳定标准为每小时变形量不大于 0.005mm;



2 待试样固结稳定后拔去固定销进行剪切,剪切速率为 0.02mm/min;

3 当需要进行估算试样的剪切破坏时间时,可按下式进行计算:

$$t_f = 50t_{50} \quad (13.2.3)$$

式中:  $t_f$  ——达到破坏所经历的时间(min);

$t_{50}$  ——固结度达到 50%的时间(min)。

#### 13.2.4 固结快剪试验应按下列步骤进行:

1 施加垂直压力后,每 1h 测读垂直变形一次,直至试样固结变形稳定,稳定标准为每小时变形量不大于 0.005mm;

2 拔去固定销,以 0.8mm/min 的剪切速率进行剪切,使试样在 3min~5min 内剪损,试样每产生剪切位移 0.2mm~0.4mm 测记测力计和位移读数;当测力计读数出现峰值时,继续剪切至剪切位移 4mm 停止;若无明显峰值时,则应剪切至剪切位移 6mm 时停止;

3 剪切结束,退去剪切力和垂直压力,移去加压框架,吸掉盒内积水,取出试样,需要时,测定试样含水率。

#### 13.2.5 快剪试验应按下列步骤进行:

1 拔去固定销,以 0.8mm/min 的剪切速率进行剪切,使试样在 3min~5min 内剪损,试样每产生剪切位移 0.2mm~0.4mm 测记测力计和位移读数;

2 当测力计读数出现峰值时,继续剪切至剪切位移 4mm 停止。若无明显峰值时,则应剪切至剪切位移 6mm 时停止。

#### 13.2.6 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 剪切位移应按下列式计算:

$$L = L'n' - R \quad (13.2.6-1)$$

式中:  $L$  ——剪切位移(0.01mm);

$n'$  ——手轮转数;

$L'$  ——手轮转动一周的位移量(0.01mm);

$R$  ——测力计读数(0.01mm)。

2 剪应力应按下式计算:

$$\tau = CR/A_0 \times 10 \quad (13.2.6-2)$$

式中:  $\tau$ ——剪应力(kPa);

$C$ ——测力计率定系数(N/0.01mm);

$R$ ——测力计读数(0.01mm);

$A_0$ ——试样面积( $\text{cm}^2$ );

10——单位换算系数。

3 绘制直剪试验关系曲线应符合下列规定:

- 1) 以剪应力为纵坐标, 剪切位移为横坐标, 绘制剪应力与剪切位移的关系曲线(图 13.2.6-1); 取剪应力与剪切位移关系曲线上的峰值或稳定值, 作为抗剪强度, 若曲线上无峰值或稳定值, 应取剪切位移 4mm 时所对应的剪应力值作为抗剪强度;

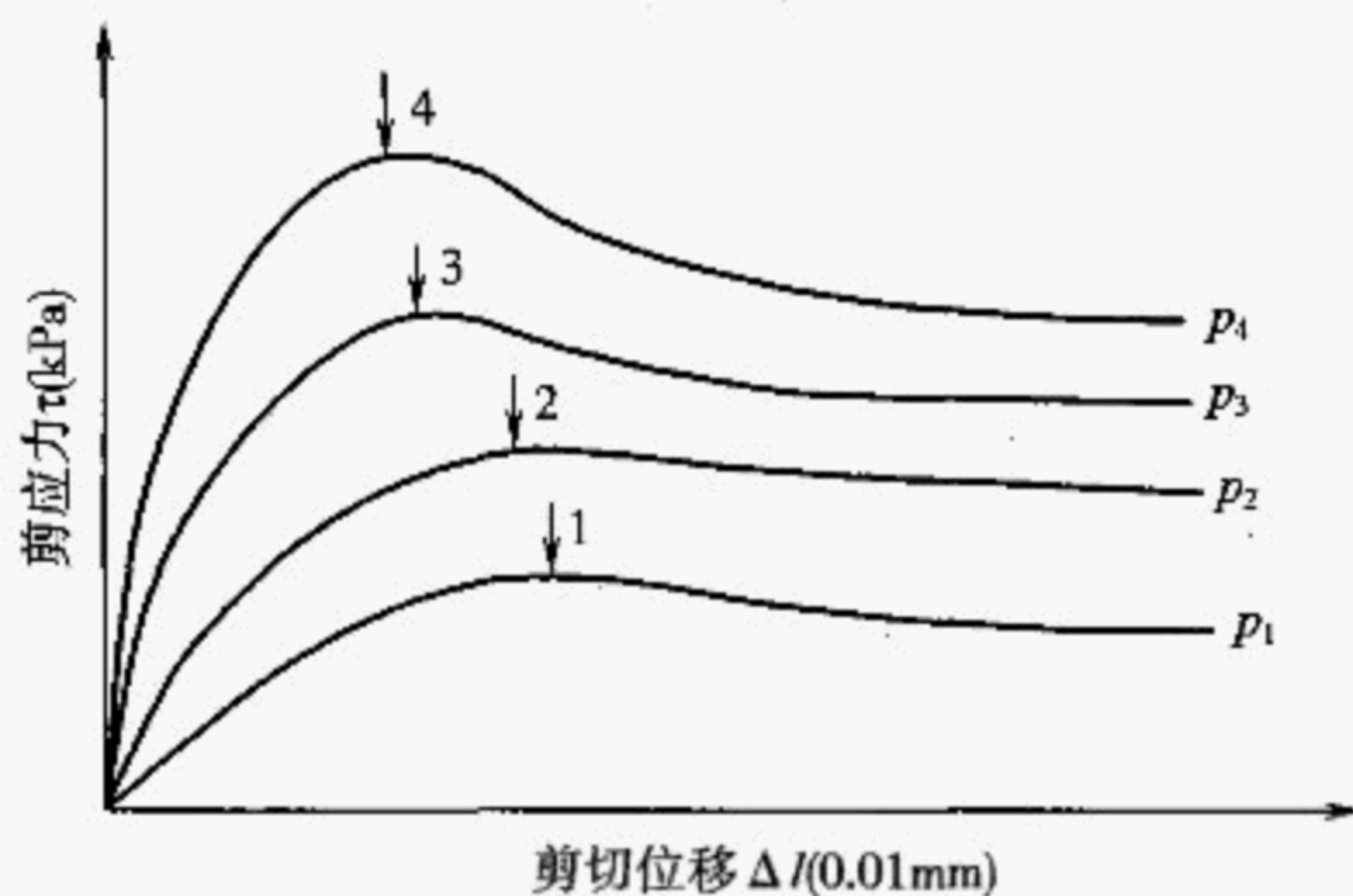


图 13.2.6-1 剪应力与剪切位移关系曲线

- 2) 以抗剪强度为纵坐标, 垂直压力为横坐标, 绘制抗剪强度与垂直压力的关系曲线(图 13.2.6-2); 直线的倾角为内摩擦角  $\varphi$ , 直线在纵坐标轴上的截距为黏聚力  $c$ , 快剪试验用  $c_q$  及  $\varphi_q$  表示; 固结快剪试验用  $c_{cq}$  及  $\varphi_{cq}$  表示; 慢剪试验用  $c_s$  及  $\varphi_s$  表示。



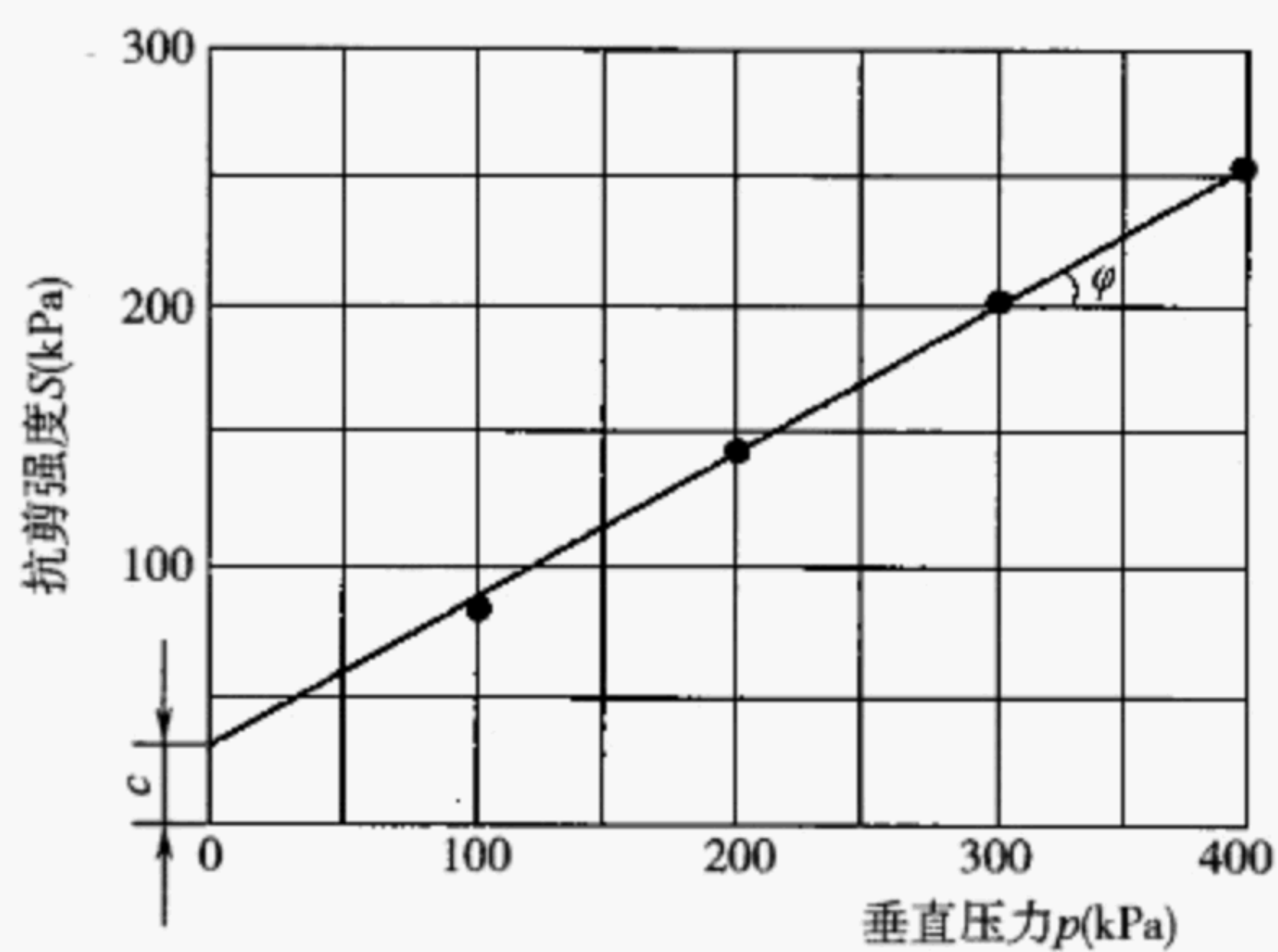


图 13.2.6-2 抗剪强度与垂直压力的关系曲线

13.2.7 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.18 和表 A.0.19。

## 14 易溶盐试验

### 14.1 一般规定

14.1.1 本试验适用于测定粉煤灰中易溶盐的总量及其组成的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  阴离子和  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  及  $\text{Na}^+$  阳离子的含量。

14.1.2 本试验所用试剂的纯度应在分析纯级及以上。

14.1.3 本试验试验用水及所用试剂的配制方法应按照现行国家标准《分析实验室用水规格和试验方法》GB/T 6682、《化学试剂 标准滴定溶液的制备》GB/T 601、《化学试剂 杂质测定用标准溶液的制备》GB/T 602 的规定执行。

### 14.2 浸出液制取

14.2.1 浸出液制取所用主要仪器设备应包括过滤设备、离心机和天平,辅助工具包括广口瓶、细颈瓶等、微孔滤膜和滤纸。

14.2.2 浸出液制取所用主要仪器设备规格应符合表 14.2.2 的规定。

表 14.2.2 浸出液制取所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
过滤设备	包括真空泵、平底瓷漏斗、抽滤瓶
离心机	转速为 10000r/min
天平	称量 200g,分度值 0.01g

14.2.3 本试验应按下列步骤进行:

1 采用四分对角取样法称取 2mm 筛下风干试样 100g,准确至 0.01g;置于广口瓶,按灰水比 1:20 加入纯水,振荡 10min,用离心机分离,抽气过滤;另取试样 3g~5g,测定含水率;



2 将滤纸用纯水浸湿后贴在漏斗底部,漏斗装在抽滤瓶上,连通真空泵抽气,使滤纸与漏斗贴紧,将振荡后的悬液摇匀,倾入漏斗中抽气过滤,所得的透明滤液即为浸出液,贮于细口瓶中供分析用。

14.3 易溶盐总量测定

14.3.1 易溶盐总量测定所用主要仪器设备及试剂应包括天平、烘箱、双氧水(化学纯)和碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )溶液,辅助工具包括水浴锅、蒸发皿、表面皿、移液管和干燥器等。

14.3.2 易溶盐总量测定所用主要仪器设备及试剂规格应符合表 14.3.2 的规定。

表 14.3.2 易溶盐总量测定所用主要仪器设备及试剂规格

仪器设备名称	规格和要求
天平	包括真空泵、平底瓷漏斗、抽滤瓶
烘箱	附温度控制装置
双氧水	浓度为 15%
碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )溶液	浓度为 20g/L

14.3.3 移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.3.4 本试验应按下列步骤进行:

1 用移液管吸取浸出液 100mL 注入已知恒量的蒸发皿中,盖上表面皿,放在水浴锅上蒸干;当蒸干残渣中呈现黄褐色时,应加入 15%双氧水 1mL~2mL,继续在水浴锅上蒸干,反复处理至黄褐色消失。

2 将蒸发皿放入烘箱,在温度 105℃~110℃下烘 4h~8h,取出后放入干燥器中冷却,称蒸发皿加烘干残渣的质量,再烘干 2h~4h,在干燥器中冷却后再称蒸发皿加烘干残渣的质量,反复进行至最后相邻两次质量差值不大于 0.0001g;

3 当浸出液蒸干残渣中含有大量结晶水时,将使测得的易溶盐含量偏高,遇此情况,可用两个蒸发皿,一个加浸出液 50mL,另



一个加纯水 50mL,然后各加等量 2%碳酸钠溶液,搅拌均匀后按本规程 14.3.4 条第 1 款和第 2 款的规定操作,烘干温度改为 180℃。

**14.3.5** 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 未经 20g/L 碳酸钠溶液处理的易溶盐总量应计算至 0.1g/kg,平行误差不应大于 0.2g/kg,取算术平均值。并按下式计算:

$$W = \frac{(m_2 - m_1) \times \frac{V_w}{V_1}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.3.5-1)$$

式中:  $W$  ——易溶盐总量(%);

$m_2$  ——蒸发皿加烘干残渣质量(g);

$m_1$  ——蒸发皿质量(g);

$V_w$  ——制取浸出液所加纯水量(mL);

$V_1$  ——吸取浸出液量(mL);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

$10^{-3}$  ——将 g 换算成 kg 的因数。

2 经 2%碳酸钠处理后的易溶盐总量应计算至 0.1g/kg,平行误差不大于 0.2g/kg,取算术平均值。并按下式计算:

$$W = \frac{V_w(m_3 - m_0)}{V_1 \times m_d \times 10^{-3}} \quad (14.3.5-2)$$

式中:  $m_3$  ——蒸干后试样加碳酸钠质量(g);

$m_0$  ——蒸干后碳酸钠质量(g)。

**14.3.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.20。

## 14.4 碳酸根及重碳酸根的测定

**14.4.1** 碳酸根及重碳酸根测定所用主要仪器设备应包括酸式滴定管、天平、容量瓶和移液管,辅助工具包括锥形瓶、蒸发皿和烘箱等。



14.4.2 碳酸根及重碳酸根测定所用主要仪器设备规格应符合表 14.4.2 的规定。

表 14.4.2 碳酸根及重碳酸根测定所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
酸式滴定管	容量为 25mL,分度值为 0.1mL
天平	称量为 200g,分度值为 0.0001g
容量瓶	容量为 100mL、1000mL
移液管	容量为 10mL、25mL、50mL

14.4.3 酸式滴定管、容量瓶和移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.4.4 本试验所用的试剂应符合下列规定：

1 1g/L 甲基橙指示剂的配制应称 0.1g 甲基橙加纯水稀释至 100mL；

2 5g/L 酚酞指示剂的配制应称 0.5g 酚酞溶于 50mL95% 的乙醇中，用纯水稀释至 100mL；

3 0.05mol/L 盐酸标准溶液的配制应将 4.2mL 浓盐酸加入 100mL 纯水中，搅拌后移入 1000mL 容量瓶中，用水稀释至刻度；

4 盐酸标准溶液的标定应取在温度 160℃~180℃下烘 2h~4h 的无水碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )4 份，每份 0.1g，准确至 0.0001g。放入四个锥形瓶中，注入 20mL~30mL 纯水，加 1g/L 甲基橙指示剂两滴，用配制好的盐酸标准溶液滴定至溶液由黄色变为橙色为止，记下盐酸标准溶液用量。盐酸标准溶液的浓度应计算至 0.0001mol/L，平行误差不得大于 0.05mL，取其算术平均值。并按下式计算：

$$c(\text{HCl}) = 2m / (V \times 0.106) \tag{14.4.4}$$

式中： $c(\text{HCl})$ ——盐酸标准溶液的浓度(mol/L)；

$V$ ——盐酸标准溶液的用量(mL)；

$m$ ——碳酸钠的用量(g)；



0.106——碳酸钠的摩尔质量(kg/mol)。

**14.4.5** 本试验试样操作应按下列步骤进行:

1 用移液管吸取灰浸出液 25mL,注入锥形瓶中,加 5g/L 酚酞指示剂 2 滴~3 滴,如试液不显红色,表示无碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )存在;当试液显红色时,用盐酸标准溶液滴定至呈淡红色刚刚褪去,记下盐酸标准溶液的用量,准确至 0.01mL;

2 在试液中加入 1g/L 甲基橙指示剂 1 滴~2 滴,继续用盐酸标准溶液滴定至试液由黄色变为橙色为止,记下盐酸标准溶液用量,准确至 0.05mL。

**14.4.6** 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 碳酸根的含量应计算准确至 0.001g/kg 或 0.01mmol/kg,平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$b(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{2V_1 \times c(\text{HCl}) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.4.6-1)$$

$$\text{CO}_3^{2-} = 0.060 \times b(\text{CO}_3^{2-}) \quad (14.4.6-2)$$

式中:  $b(\text{CO}_3^{2-})$  ——碳酸根的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{CO}_3^{2-}$  ——碳酸根含量(g/kg);

$V_1$  ——酚酞指示剂达到终点时消耗盐标准溶液体积,此时碳酸盐只是半中和,故为  $2V_1$  (mL);

$V_w$  ——制浸出液加纯水量(mL);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

$c(\text{HCl})$  ——盐酸标准溶液的浓度(mol/L);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

0.060——碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )的摩尔质量(kg/mol);

$10^{-3}$ ——将 g 换算成 kg 的因数。

2 重碳酸根的含量应计算准确至 0.001g/kg 或 0.01mmol/kg,平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式



计算：

$$b(\text{HCO}_3^-) = \frac{c(\text{HCl}) \times (V_2 - V_1) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.4.6-3)$$

$$\text{HCO}_3^- = 0.061 \times b(\text{HCO}_3^-) \quad (14.4.6-4)$$

式中： $b(\text{HCO}_3^-)$ ——重碳酸根的质量摩尔浓度(mmol/kg)；

$\text{HCO}_3^-$ ——重碳酸根含量(g/kg)；

$V_2$ ——甲基橙为指示剂滴定时的盐酸标准溶液用量(mL)；

0.061——重碳酸根的摩尔质量(g/mmol)。

14.4.7 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.21。

14.5 氯离子测定

14.5.1 氯离子测定所用主要仪器设备应包括酸式滴定管、移液管、容量瓶和天平，辅助工具包括锥形瓶、棕色试剂瓶、棕色细口瓶、蒸发皿和烘箱等。

14.5.2 氯离子测定所用主要仪器设备规格应符合表 14.5.2 的规定。

表 14.5.2 氯离子测定所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
酸式滴定管	颜色应为棕色，容量为 25mL，分度值为 0.1mL
容量瓶	容量为 100mL、1000mL
移液管	容量为 10mL、25mL、50mL
天平	称量 200g，分度值 0.0001g

14.5.3 酸式滴定管、容量瓶和移液管应按现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.5.4 本试验所用的试剂应符合下列规定：

1 50g/L 铬酸钾( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ )指示剂的配制应取 5g 铬酸钾溶于适量纯水中，逐滴加入硝酸银( $\text{AgNO}_3$ )标准溶液至略有砖红色沉淀为止；放置 24h 后用滤纸过滤，将滤液稀释至 100mL，贮于棕



色细口瓶中;

2 0.02mol/L 重碳酸钠( $\text{NaHCO}_3$ )溶液的配制应称取 1.7g 重碳酸钠,溶于纯水中,稀释至 1000mL;

3 0.02mol/L 硝酸银( $\text{AgNO}_3$ )标准溶液的配制应称取经 105℃~110℃烘干的分析纯硝酸银 3.3974g,溶解于纯水中,倒入 1000mL 容量瓶,用纯水稀释定容,贮于棕色细口瓶中。

**14.5.5** 本试验应按下列步骤进行:

1 用移液管取 25mL 浸出液,加入甲基橙指示剂,逐滴加入 0.02mol/L 重碳酸钠溶液至试液变为纯黄色,酸碱度控制为 7;再加入 50g/L 铬酸钾指示剂 5 滴~6 滴,用硝酸银标准溶液滴定,直至生成砖红色沉淀,记下硝酸银标准溶液用量;

2 用移液管吸取 25mL 纯水,按本规程第 14.5.5 条第 1 款中规定进行空白试验,记下硝酸银标准溶液用量。

**14.5.6** 氯离子的含量应计算准确至 0.001g/kg 或 0.01mmol/kg。平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$b(\text{Cl}^-) = \frac{c(\text{AgNO}_3)(V_1 - V_2) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.5.6-1)$$

$$\text{Cl}^- = 0.0355 \times b(\text{Cl}^-) \quad (14.5.6-2)$$

式中:  $b(\text{Cl}^-)$  ——氯离子的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{Cl}^-$  ——氯离子含量(g/kg);

$V_1$  ——滴定试样时硝酸银标准溶液用量(mL);

$V_2$  ——空白试验中硝酸银标准溶液用量(mL);

$c(\text{AgNO}_3)$  ——硝酸银标准溶液浓度(mol/L);

$V_w$  ——浸出液加纯水量(mL);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

0.0355 ——氯离子的摩尔质量(g/mmol);



$10^{-3}$ ——将 g 换算成 kg 的因数。

14.5.7 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.22。

## 14.6 硫酸根的测定

14.6.1 本试验的测定应根据硫酸根含量的估测结果选用下列方法：

- 1 EDTA 络合滴定法适用于常量分析；
- 2 比浊法适用于硫酸根含量不大于 100mg/L。

14.6.2 硫酸根含量的估测所用试剂应符合下列规定：

- 1 50g/L 氯化钡( $\text{BaCl}_2$ )溶液的配制应将 5g 氯化钡加纯水稀释至 100mL；
- 2 浓度为 1+1 的盐酸的配制应将浓盐酸与同体积纯水混匀。

14.6.3 硫酸根含量的估测应按下列步骤进行：

- 1 取浸出液 5mL 注入试管，加入浓度为 1+1 的盐酸 2 滴，50g/L 氯化钡溶液 5 滴摇匀，按表 14.6.3 的规定估测硫酸根的含量；当含量大于 100mg/L 时，可用 EDTA 络合滴定法；当含量不大于 100mg/L 时，可用比浊法；

- 2 硫酸根含量测定时，吸取浸出液体积和钡镁混合溶液用量应符合表 14.6.3 的规定。

表 14.6.3 浸出液用量及钡镁混合溶液用量

加氯化钡后溶液 浑浊情况	硫酸根含量 (mg/L)	吸取灰浸出液体积 (mL)	钡镁混合溶液 (mL)
数分钟后微浑浊	<10	—	—
立即呈微浑浊	25~50	—	—
立即浑浊	50~100	25	4~5
立即沉淀	100~200	25	8
立即大量沉淀	>200	10	10~12



14.6.4 EDTA 络合滴定法测定硫酸根离子所用主要仪器设备应包括酸式滴定管、移液管、容量瓶和天平,辅助工具包括锥形瓶、试剂瓶、细口瓶、蒸发皿和烘箱等。

14.6.5 EDTA 络合滴定法所用主要仪器设备规格应符合表 14.6.5 的规定。

表 14.6.5 EDTA 络合滴定法测定硫酸根离子主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
酸式滴定管	容量为 25mL,分度值为 0.1mL
容量瓶	容量为 100mL、1000mL
移液管	容量为 10mL、25mL、50mL
天平	称量 200g,分度值 0.0001g

14.6.6 酸式滴定管、容量瓶和移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.6.7 EDTA 络合滴定法所用的试剂应符合下列规定:

1 浓度为 1+4 的盐酸溶液的配制应将浓盐酸 10mL 与 40mL 纯水混匀;

2 钡镁混合溶液的配制应将 1.22g 氯化钡( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )和 1.02g 氯化镁( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )溶于水中,稀释至 500mL,溶液中钡、镁( $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )离子浓度为 0.01mol/L,每毫升约沉淀硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )1mg;

3 pH 为 10 的氨缓冲溶液的配制应将 67.50g 氯化铵( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )加纯水溶解后,加入氨水 570mL,用纯水稀释至 1000mL;

4 铬黑 T 指示剂的配制应将 0.5g 铬黑 T 和 100g 烘干氯化钠( $\text{NaCl}$ )混合,磨细拌匀,贮于棕色瓶中,并放入干燥器中;

5 本试验所用乙醇浓度应为 95%;

6 锌标准溶液的配制应将基准氧化锌( $\text{ZnO}$ )在 800℃条件下灼烧至恒重,冷却后准确称取基准氧化锌( $\text{ZnO}$ )0.2035g 于 100ml 烧杯中,加入适量纯水,加盖表面皿,滴入浓度为 1+1 的盐



酸溶液至全部溶解后,然后移入 250mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度,此溶液浓度为 0.01mol/L;

7 0.01mol/L EDTA 标准溶液的配制应称取乙二胺四乙酸二钠 3.72g 溶于无 CO<sub>2</sub> 的纯水中,微热溶解,冷却后定容至 1000mL,用锌标准溶液标定;

8 浓度为 1+1 的氨水的配制应将氨水与等体积纯水混匀。

**14.6.8 EDTA 标准溶液的标定应符合下列规定:**

1 0.01mol/L EDTA 标准溶液的标定为用移液管吸取 4 份浓度 0.01mol/L 锌标准溶液,每份 20mL,分别注入 4 个锥形瓶中,加纯水至 50mL,加氨缓冲溶液 10mL,铬黑 T 指示剂少许,95%乙醇 5mL,用 EDTA 标准溶液滴定,使溶液由红色变为亮蓝色为止,记下用量;

2 EDTA 标准溶液的浓度应计算至 0.0001mol/L,取 4 个标定值的算术平均值。并按下式计算:

$$c(\text{EDTA}) = V_c \times \frac{c(\text{Zn}^{2+})}{V_E} \quad (14.6.8)$$

式中:  $c(\text{EDTA})$  ——EDTA 标准溶液的浓度(mol/L);

$V_E$  ——EDTA 标准溶液的用量(mL);

$c(\text{Zn}^{2+})$  ——锌标准溶液的浓度(mol/L);

$V_c$  ——锌标准溶液的用量(mL)。

**14.6.9 EDTA 滴定法应按下列步骤进行:**

1 按本规程表 14.6.3 的规定,用移液管吸取 25mL 浸出液放入 150mL 锥形瓶中,投入一小块刚果红试纸,加入浓度 1+1 的盐酸溶液,使刚果红试纸变蓝色,并煮沸除去二氧化碳;

2 水样偏酸性或偏碱性时,应预先用浓度 1+1 的氨水溶液或浓度 1+5 的盐酸溶液调至近中性,使用刚果红试纸检验;

3 按本规程表 14.6.3 的规定用移液管加入钡镁混合溶液,边加边摇动,再煮沸 5min,冷却后静置 2h;加入氨缓冲溶液 10mL 摇匀,再加入铬黑 T 指示剂少许和 95%乙醇 5mL,摇匀;用 EDTA



标准溶液滴定,当溶液呈紫色时,摇动 0.5min~1min,继续滴定至试液变为亮蓝色为止,记下 EDTA 标准溶液用量,准确至 0.01mL;

4 另取锥形瓶进行空白试验。用移液管吸取 25mL 纯水放入 150mL 锥形瓶中,加入浓度 1+4 的盐酸溶液 8 滴,加入 10mL 钡镁混合溶液、10mL 氨缓冲溶液、少许铬黑 T 指示剂和 95%乙醇 5mL 摇匀。再用 EDTA 标准溶液滴定至空白试液由红色变为亮蓝色为止,记下 EDTA 标准溶液用量。

14.6.10 EDTA 滴定法的资料整理应符合下列规定:

1 钡镁混合溶液浓度应计算至 0.0001mol/L,并应按下式计算:

$$c(\text{Ba} + \text{Mg}) = V_E \times \frac{c(\text{EDTA})}{10} \quad (14.6.10-1)$$

式中:  $c(\text{Ba} + \text{Mg})$  ——钡镁混合溶液浓度(mol/L);

$V_E$  ——滴定时 EDTA 标准溶液用量(mL);

$c(\text{EDTA})$  ——EDTA 标准溶液浓度(mol/L)。

2 硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$b(\text{SO}_4^{2-}) = \frac{c(\text{Ba} + \text{Mg}) \times V_B - (V_E - V_0) \times c(\text{EDTA}) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.6.10-2)$$

$$\text{SO}_4^{2-} = 0.096 \times b(\text{SO}_4^{2-}) \quad (14.6.10-3)$$

式中:  $b(\text{SO}_4^{2-})$  ——硫酸根的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{SO}_4^{2-}$  ——硫酸根含量(g/kg);

$c(\text{Ba} + \text{Mg})$  ——钡镁混合液浓度(mol/L);

$V_B$  ——加入钡镁混合剂量(mL);

$V_E$  ——EDTA 标准溶液滴定灰浸出液的用量(mL);



$V_0$  ——消耗于与测硫酸根时体积相同的灰浸出液中钙离子和镁离子的 EDTA 标准溶液的滴定量(mL);

$c(\text{EDTA})$  ——EDTA 标准溶液的浓度(mol/L);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

0.096——硫酸根的摩尔质量(g/mmol)。

**14.6.11** 比浊法测定硫酸根离子所用主要仪器设备应包括磁力搅拌器、移液管、容量瓶、光电比色计或分光光度计、量匙,辅助工具包括秒表、烧杯、蒸发皿和烘箱等。

**14.6.12** 比浊法所用主要仪器设备规格应符合表 14.6.12 的规定。

表 14.6.12 比浊法测定硫酸根离子主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
容量瓶	容量为 100mL、1000mL
移液管	容量为 5mL、10mL、25mL、50mL
天平	称量 200g,分度值 0.0001g
量匙	容量 0.2mL~0.3mL

**14.6.13** 容量瓶和移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

**14.6.14** 比浊法所用的试剂应符合下列规定:

1 稳定溶液的配制应称取 750g/L 氯化钠溶于 300mL 水中,加入 50mL 盐酸、50mL 甘油和 100mL95%的乙醇,混合均匀;

2 结晶氯化钡( $\text{BaCl}_2$ )的制备应将氯化钡晶粒置于玻璃研钵中研细,过 0.71mm 筛孔,取 0.5mm 筛以上颗粒备用;

3 硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )标准溶液的配制应称取在 130℃ 温度下烘干的无水硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )0.1479g,溶于纯水中,移入 1000mL 容量瓶中定容。此溶液中硫酸根含量为 0.1mg/mL。

**14.6.15** 比浊法测定硫酸根离子应按下列步骤进行:

1 用移液管分别准确吸取硫酸根标准溶液 5mL、10mL、20mL、30mL、40mL 倒入 100mL 容量瓶中定容,制成硫酸根含量



为 0.5mg/100mL、1.0mg/100mL、3.0mg/100mL、4.0mg/100mL 的标准系列,分别注入烧杯中,加稳定溶液 2.5mL 和一量匙氯化钡结晶,用磁力搅拌器搅拌 1min;将悬浊液在光电比色计中用紫色光片进行比浊,在 3min 内每隔 30s 测度一次悬浊液的吸收值,读取稳定的读数。以硫酸根含量为纵坐标,吸收值为横坐标,绘制标准曲线,并注明试验温度;

2 用移液管吸取浸出液 25mL,放入烧杯中,当硫酸根含量大于 4mg/mL 时应减少浸出液用量并稀释至 25mL。加入 1mL 悬浊液稳定剂和一量匙氯化钡结晶,用磁力搅拌器搅拌 1min,将上述悬浊液在 15min 内于 420nm 或 480nm 下进行比浊,以同一浸出液即 25mL 中加 1mL 稳定溶液,不加氯化钡结晶,调节比色计吸收值“0”点,或测读吸收值后在灰样浊液吸收值中减去,从标准曲线上查得比浊液中硫酸根含量(mg/25mL),记录测定时的室温。

**14.6.16** 比浊法测定硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,并应按下列公式计算:

$$\text{SO}_4^{2-} = \frac{0.001K \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.6.16-1)$$

$$b(\text{SO}_4^{2-}) = \text{SO}_4^{2-} / 0.096 \quad (14.6.16-2)$$

式中:  $b(\text{SO}_4^{2-})$  ——硫酸根的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{SO}_4^{2-}$  ——硫酸根含量(g/kg);

$V_w$  ——浸出液加纯水量(mL);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

$K$  ——由标准曲线查得的 25mL 浸出液中的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量(mg);

0.001——将 mg 换算成 g 的因数;

0.096—— $\text{SO}_4^{2-}$  的摩尔质量(kg/mol);

$10^{-3}$ ——将 g 换算成 kg 的因数。



14.6.17 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.23 和 A.0.24。

14.7 钙离子的测定

14.7.1 钙离子测定所用主要仪器设备应包括酸式滴定管、移液管、容量瓶和天平,辅助工具包括锥形瓶、试剂瓶、细口瓶、蒸发皿和烘箱等。

14.7.2 钙离子测定所用主要仪器设备规格应符合表 14.7.2 的规定。

表 14.7.2 钙离子测定所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
酸式滴定管	容量为 25mL,分度值为 0.1mL
容量瓶	容量为 100mL、1000mL
移液管	容量为 10mL、25mL、50mL
天平	称量 200g,分度值 0.0001g

14.7.3 酸式滴定管、容量瓶和移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.7.4 钙离子测定所用的试剂应符合下列规定:

- 1 主要试剂应符合本规程第 14.6.7 条的规定;
- 2 钙指示剂的配制应称取 0.5g 钙指示剂与 50g 干燥氯化钠研细混合均匀,贮于棕色瓶中,置于干燥器中保存;
- 3 2mol/L 氢氧化钠(NaOH)溶液的配制应称取 8g 氢氧化钠溶于无二氧化碳的纯水中,并稀释至 100mL,贮存于聚乙烯瓶中。

14.7.5 标准溶液的标定按本规程第 14.6.8 条的规定进行。

14.7.6 钙离子测定应按下列步骤进行:

- 1 用移液管吸取浸出液 25mL,加入 150mL 锥形瓶中,放入刚果红试纸一小片,滴入浓度 1+4 的盐酸溶液,使试纸变蓝色,煮沸 2min~3min,水样偏酸性或偏碱性时,应预先用浓度 1+1 的氨水溶液或浓度 1+5 的盐酸溶液盐酸调至近中性,使用刚果红试纸检验。当浸出液中碳酸根和重碳酸根含量很少时,可省去此步骤;



2 冷却后,加入 2mol/L 氢氧化钠 2mL,摇匀放置 1min~2min,使镁离子沉淀完全,加入钙指示剂少许,95%乙醇 5mL,用 EDTA 标准溶液滴定至试液由红色变为亮蓝色为止,记下 EDTA 标准溶液的用量,准确至 0.01mL。

14.7.7 钙离子的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$b(\text{Ca}^{2+}) = \frac{c(\text{EDTA}) \times V_1 \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.7.7-1)$$

$$\text{Ca}^{2+} = 0.040 \times b(\text{Ca}^{2+}) \quad (14.7.7-2)$$

式中:  $b(\text{Ca}^{2+})$  ——钙离子的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{Ca}^{2+}$  ——钙离子含量(g/kg);

$c(\text{EDTA})$  ——EDTA 标准溶液的浓度(mol/L);

$V_1$  ——滴定  $\text{Ca}^{2+}$  时所用的 EDTA 体积(mL);

$V_w$  ——浸出液加纯水量(mL);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

0.040——钙离子的摩尔质量(kg/mol)。

14.7.8 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.25。

## 14.8 镁离子的测定

14.8.1 本试验所用的仪器设备及规格要求应符合本规程第 14.7.1 条~第 14.7.3 条的规定。

14.8.2 本试验所用试剂应符合本规程第 14.6.7 条的规定。

14.8.3 标准溶液的标定应按本规程第 14.6.8 条的规定进行。

14.8.4 本试验应按下列步骤进行:

1 用移液管吸取浸出液 25mL,注入 150mL 锥形瓶中,水样偏酸性或偏碱性时,应预先用浓度 1+1 的氨水溶液或浓度 1+5



的盐酸溶液盐酸调至近中性,使用刚果红试纸检验。加入氨缓冲溶液 5mL 摇匀,再加入铬黑 T 指示剂少许和 95%乙醇 5mL 摇匀。用 EDTA 标准溶液滴定试液至亮蓝色为止,记下 EDTA 标准溶液用量,准确至 0.01mL;

2 用移液管吸取与本规程第 14.8.4 条第 1 款规定的等体积浸出液,按本规程第 14.7.6 条的规定,滴定钙离子对 EDTA 标准溶液的用量。

**14.8.5** 镁离子的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,平行误差不得大于 0.1mL,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$b(\text{Mg}^{2+}) = \frac{c(\text{EDTA})(V_2 - V_1) \times \frac{V_w}{V}}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.8.5-1)$$

$$\text{Mg}^{2+} = 0.024 \times b(\text{Mg}^{2+}) \quad (14.8.5-2)$$

式中:  $b(\text{Mg}^{2+})$  ——镁离子的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{Mg}^{2+}$  ——镁离子含量(g/kg);

$c(\text{EDTA})$  ——EDTA 标准溶液的浓度(mol/L);

$V_1$  ——滴定  $\text{Ca}^{2+}$  时所用的 EDTA 体积(mL);

$V_2$  ——滴定  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量时所用的 EDTA 体积(mL);

$V_w$  ——浸出液加纯水量(mL);

$V$  ——试验时吸取灰浸出液量(mL);

$m_d$  ——烘干灰质量(g);

0.024——镁离子的摩尔质量(kg/mol)。

**14.8.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.25。

## 14.9 钠离子和钾离子的测定

**14.9.1** 钠离子和钾离子测定所用主要仪器设备应包括火焰光度计、容量瓶、移液管和天平,辅助工具包括烧杯和烘箱等。

**14.9.2** 钠离子和钾离子测定所用主要仪器设备规格应符合表



14.9.2 的规定。

表 14.9.2 钙离子和钾离子测定所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
容量瓶	容量为 50mL、1000mL
移液管	容量为 10mL、25mL、50mL
天平	称量 200g,分度值 0.0001g

14.9.3 容量瓶和移液管应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

14.9.4 本试验所用的主要试剂应符合下列规定：

1 钠( $\text{Na}^+$ )标准溶液的配制应称取经 550℃灼烧过的基准氯化钠( $\text{NaCl}$ )0.2542g,在少量纯水中溶解,移至 1000mL 容量瓶定容;贮于聚乙烯瓶中。此溶液含钠离子 0.1mg/mL,以此为母液可稀释配制成所需浓度的标准系列溶液;

2 钾( $\text{K}^+$ )标准溶液的配制应称取经 500℃~600℃灼烧 40min 的基准氯化钾( $\text{KCl}$ )0.1907g,在纯水中溶解,加入浓度为 1+1 的盐酸溶液 2ml 后,移入 1000mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度。此溶液含钾离子 0.1mg/mL,贮存于聚乙烯瓶中。

14.9.5 本试验操作应按下列步骤进行：

1 取 50mL 容量瓶 9 个,各加入钠和钾标准溶液 0、0.5mL、1mL、2.5mL、5mL、10mL、15mL、20mL、25mL,然后用纯水稀释定容,配制成钠、钾含量分别为 0、1mg/L、2mg/L、5mg/L、10mg/L、20mg/L、30mg/L、40mg/L、50mg/L 的标准系列溶液;分别用钠滤光片和钾滤光片逐个测定其吸收值,然后以吸收值为纵坐标,相应的钠、钾浓度为横坐标,分别绘制标准曲线。并将曲线进行回归,求出回归方程;

2 用移液管吸取一定量试样浸出液于 50mL 容量瓶中,用纯水稀释至刻度,采用本规程第 14.9.5 条第 1 款绘制标准曲线的工作条件。分别用钠滤光片和钾滤光片逐个测定其吸收值,并用测得的钠钾吸收值,从标准曲线查得或由回归方程求得相应的钠、钾离子含量。



**14.9.6** 本试验的资料整理应符合下列规定:

1 钠离子的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,平行误差不得大于 0.2mmol/kg 和 0.005g/kg,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$\text{Na}^+ = \frac{0.001 \times N \times K_n \times V_w}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.9.6-1)$$

$$b(\text{Na}^+) = \frac{\text{Na}^+}{0.023} \quad (14.9.6-2)$$

式中:  $b(\text{Na}^+)$  ——钠离子的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{Na}^+$  ——钠离子含量(g/kg);

$K_n$  ——由标准曲线查得的钠离子含量(mg/mL);

0.001——mg 换算成 g 的因数;

$N$ ——灰浸出液和稀释倍数,当直接取灰浸出液测试时, $N=1$ ;

0.023——钠离子的摩尔质量(kg/mol)。

2 钾离子的浓度和含量应分别计算至 0.01mmol/kg 和 0.001g/kg,平行误差不得大于 0.5mmol/kg 和 0.02g/kg,取其算术平均值。并按下列公式计算:

$$\text{K}^+ = \frac{0.001 \times N \times K_k \times V_w}{m_d \times 10^{-3}} \quad (14.9.6-3)$$

$$b(\text{K}^+) = \frac{\text{K}^+}{0.039} \quad (14.9.6-4)$$

式中:  $b(\text{K}^+)$  ——钾离子的质量摩尔浓度(mmol/kg);

$\text{K}^+$  ——钾离子含量(g/kg);

$K_k$  ——由标准曲线查得的钾离子含量(mg/mL);

0.039——钾离子的摩尔质量(kg/mol)。

**14.9.7** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.26。

## **14.10 pH 值的测定**

**14.10.1** pH 值的测定所用主要仪器设备应包括酸度计、天平和



容量瓶,辅助工具包括广口瓶、烧杯、振荡器、定性滤纸和温度计等。

**14.10.2** pH值的测定所用主要仪器设备规格应符合表 14.10.2 的规定。

表 14.10.2 pH值的测定所用主要仪器设备规格

仪器设备名称	规格和要求
酸度计	附玻璃电极、甘汞电极或复合电极
天平	称量 200g,分度值 0.0001g
容量瓶	容量为 100mL、1000mL

**14.10.3** 容量瓶应按照现行行业标准《常用玻璃量器检定规程》JJG 196 的规定进行检定。

**14.10.4** 本试验所用的主要试剂应符合下列规定：

1 pH4.01 标准缓冲溶液的配制应称取经 105℃~110℃烘干至恒重的邻苯二甲酸氢钾( $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ )10.21g,用无二氧化碳纯水溶解后,移入 1000mL 容量瓶中,稀释至刻度,摇匀;

2 pH6.87 标准缓冲溶液的配制应称取经 105℃~110℃烘干至恒重的磷酸氢二钠( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )3.53g 和磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )3.39g,用无二氧化碳纯水溶解后,移入 1000mL 容量瓶中,稀释至刻度,摇匀;

3 pH9.18 标准缓冲溶液的配制应称取硼砂( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )3.80g,用无二氧化碳纯水溶解后,移入 1000mL 容量瓶中,稀释至刻度,摇匀,宜用聚乙烯瓶密闭保存,此溶液保存使用期不宜超过两个月;

4 饱和氯化钾(KCl)溶液的配制应取氯化钾加入到适量纯水中,边加边搅拌,直至不溶解为止。

**14.10.5** 本试验应按下列步骤进行：

1 灰悬的液制备应称取过 2mm 筛的风干试样 10g,置于 250mL 广口瓶中,加入 200mL 无二氧化碳纯水,在振荡器上振荡 10min,静止 30min,待测;



**2** 本试验采用电位法测定,应分别采用本规程第 14.10.4 条中第 1 款~第 3 款的标准缓冲溶液,对仪器进行 pH 值定位,准确至 0.01;

**3** 将少许悬液盛于烧杯中,将酸度计上的玻璃电极和甘汞电极或复合电极插入杯中,摇动烧杯,使悬液均匀接触电极 2min~3min,弃去,用悬液洗涤 1 次~2 次;再取悬液进行 pH 值测定,准确至 0.01,同时测定悬液温度,进行温度补偿,两次平行误差不得大于 0.1pH 值;

**4** 测量完毕,关闭电源,用纯净水洗净电极,并用滤纸吸干电极表面的水分,将玻璃电极浸泡在饱和氯化钾溶液中。

**14.10.6** 本试验记录格式可使用本规程附录 A 表 A.0.27。

## 附录 A 各项试验记录

表 A.0.1 扰动试样制备记录

[illegible]



表 A.0.2 原状灰样开土记录

工程名称						进室日期:		
开样者						开样日期:		
试样编号		取土深度 (m)	颜色	气味	层次	夹杂物	包装与 扰动情况	其他
室内	野外							

表 A.0.3 含水率试验记录

工程名称						试验环境			
试验日期						试验者			
试验规程						校核者			
烘箱编号						天平编号			
试样 编号	试样 说明	盒 号	盒质量 (g)	盒加湿 灰质量 (g)	盒加干 灰质量 (g)	水分 质量 (g)	干灰 质量 (g)	含水率 (%)	平均 含水率 (%)

表 A.0.4 密度试验记录表(环刀法)

工程名称					试验环境				
试验日期					试验者				
试验规程					校核者				
烘箱编号					电子天平编号				
试样编号	环刀号	环刀容积 (cm <sup>3</sup> )	湿样与 环刀质量 (g)	湿样质量 (g)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水率 (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均 干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	

表 A.0.5 比重试验记录表(比重瓶法)

工程名称	试验环境										
试验日期	试验者										
试验规程	校核者										
烘箱编号	天平编号										
试样编号	比重瓶号	温度 (℃)	液体比重	比重瓶 质量 (g)	瓶、干灰 质量 (g)	干灰质量 (g)	瓶、液 总质量 (g)	瓶、液、灰 总质量 (g)	与干灰同 体积的 液体质量 (g)	比重	平均 比重

表 A.0.6 颗粒大小分析试验记录表(筛析法)

工程名称				试验环境			
试验日期				试验者			
试验规程				校核者			
烘箱编号				天平编号			
试样编号							
烘干试样质量 = _____ g				小于 0.075 mm 的试样占试样总质量百分数 = _____ %			
试验筛编号	孔径(mm)	累积留筛试样质量(g)	小于该孔径的试样质量(g)		小于该孔径的试样总质量百分数(%)		
底盘总计							



表 A.0.7 颗粒分析试验记录表(移液管法)

工程名称	试验日期		干灰总质量_____g 灰粒比重_____ mL					
试样编号	试验环境							
试验规程	电子天平编号							
烘箱编号	三角烧瓶编号							
量筒编号	试验者							
移液管编号	校核者							
小于 0.075mm 颗粒灰样质量百分数_____								
粒径 (mm)	杯号	杯加灰样质量 (g)	杯质量 (g)	吸管内 悬液质量 (g)	1000mL 量筒 内灰样质量 (g)	小于某粒径的 灰样质量百分数 (%)	小于某粒径的灰样 占总灰量百分数 (%)	

表 A. 0. 8 相对密度试验记录表

工程名称		试验环境				
试样编号		试验日期				
相对密度仪编号		试验规程				
烘箱编号		试验者				
天平编号		校核者				
试验项目		最小干密度		最大干密度		备注
试验方法		漏斗法		量筒 倒转法		振动 锤击法
试样加容器质量 (g)	(1)					
容器质量(g)	(2)					
试样质量(g)	(3)=(1)-(2)					
试样体积(cm³)	(4)					
干密度(g/cm³)	(5)=(3)+(4)					
平均干密度 (g/cm³)	(6)					
孔隙比	(7)					
天然干密度 (g/cm³)	(8)					
天然孔隙比	(9)					
灰粒比重	(10)					
相对密度	(11)					



表 A.0.9 击实试验记录表

工程名称							试验日期					
试验者							校核者					
击实仪编号							天平编号					
台称编号							烘箱编号					
击实筒体积 (cm <sup>3</sup> )							击锤质量 (g)					
每层击数							落距(mm)					
试样编号	试验序号	干 密 度					含 水 率					
		筒加灰质量 (g)	筒质量 (g)	湿灰质量 (g)	湿密度 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	盒号	湿灰质量 (g)	干灰质量 (g)	含水率 (%)	平均含水率 (%)	超高 (mm)
最大干密度(g/cm <sup>3</sup> )						最优含水率(%)						

表 A.0.10 常水头渗透试验记录

工程名称		试样高度		干灰质量		试验者							
试样编号		试样面积		灰料比重		计算者							
仪器编号		试样说明		孔隙比		校核者							
				测压孔间距		试验日期							
试验次数	经过时间 $t$ (s)	测压管水位 (cm)			水力 坡降	渗透 水量 ( $\text{cm}^3$ )	渗透 系数 ( $\text{cm/s}$ )	平均 水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	校正系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	水温 $20^{\circ}\text{C}$ 渗透系数 ( $\text{cm/s}$ )	平均渗透 系数 ( $\text{cm/s}$ )	备注	
		I 管	II 管	III 管									水位差 (cm)

表 A.0.11 变水头渗透试验记录

工程名称		试样说明		试样面积		试验者					
试样编号		测压管断面积		孔隙比		计算者					
仪器编号		试样高度		试验日期		校核者					
开始时间	终止时间	经过时间 (s)	初始水头 (cm)	终止水头 (cm)	$2.3 \frac{a}{A} \frac{L}{t}$	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	T℃ 时的 渗透系数 (cm/s)	水温 (℃)	校正系数 $\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	水温 20℃ 渗透系数 (cm/s)	平均渗 透系数 (cm/s)



表 A. 0. 12 固结试验记录表

工程名称				试验者					
试样编号				计算者					
取样深度				校核者					
试样说明				试验日期					
1. 含水率试验									
试样情况		盒号	盒加湿灰质量	盒加干灰质量	盒质量	水质量	干灰质量	含水率	
			(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
			(1)	(2)	(3)	(1)－(2)	(2)－(3)	(4)÷(5)×100	
试验前	饱和前								
	饱和后 (或饱和灰)								
试验后									
2. 密度试验									
试样情况		环刀加灰质量	环刀质量	灰质量	试样体积	密度			
		(g)	(g)	(g)	(cm³)	(g/cm³)			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			
		(1)	(2)	(1)－(2)	(4)	(3)÷(4)			
试验前	饱和前								
	饱和后 (或饱和灰)								
试验后									
3. 孔隙比及饱和度计算									
试样情况		试验前			试验后				
含水率(%)									
密度(g/cm³)									
孔隙比									
饱和度(%)									





表 A. 0. 14 固结试验记录表

工程名称					试验者			
试样编号					计算者			
试验日期					校核者			
试样原始高度					$C_v = \frac{0.848 \overline{(h)}^2}{t_{90}}$ 或 $C_v = \frac{0.197 \overline{(h)}^2}{t_{50}}$			
试验前孔隙比								
加压历时 (min)	压力 (kPa)	试样总 变形量 (mm)	压缩后 试样高度 (mm)	孔隙比	压缩 模量 (MPa)	压缩 系数 (MPa <sup>-1</sup> )	排水 距离 (cm)	固结 系数 (cm <sup>2</sup> /s)

表 A. 0. 15 三轴压缩试验记录表

工程名称				试验者				
试样编号				计算者				
试样说明				校核者				
试验方法				试验日期				
试样状态				周围压力(kPa)				
	起始值	固结后	剪切后	反压力(kPa)				
直径(cm)				周围压力下的孔隙压力(kPa)				
高度(cm)				初始孔隙水压力系数				
面积(cm <sup>2</sup> )								

续表 A. 0. 15

体积( $\text{cm}^3$ )				破坏应变(%)	
质量(g)					
密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )				破坏主应力差(kPa)	
干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )					
试验含水率				破坏大主应力(kPa)	
	起始值		剪切后		
盒号				破坏孔隙水压力系数	
盒加湿灰质量(g)				相应的有效大主应力(kPa)	
湿灰质量(g)				相应的有效小主应力(kPa)	
盒加干灰质量(g)					
干灰质量(g)				最大有效主应力比	
水质量(g)					
含水率(%)				孔隙压力系数	
饱和度					
试样破坏情况的描述					
备注					





表 A.0.18 直接剪切试样记录表

工程名称											仪器编号	
试样编号											试验者	
试样说明											计算者	
试验日期											校核者	
试样编号	1		2		3		4		5			
	起始	饱和 后	剪后	起始	饱和 后	剪后	起始	饱和 后	剪后	起始	饱和 后	
湿密度 (g/cm³)	(1)	(1)										
含水率 (%)	(2)	(1)										
干密度 (g/cm³)	(3)	$\frac{1}{1+0.01(2)}$										
孔隙比	(4)	$\frac{G_s}{(3)}-1$										
饱和度 (%)	(5)	$\frac{G_s(2)}{(4)}$										



表 A. 0. 19 直接剪切试样记录表

工程名称			试验者	
试样编号			校核者	
试验方法			试验日期	
试验编号			剪切前固结时间 (min)	
仪器编号			剪切前压缩量 (mm)	
垂直压力(kPa)			剪切历时(min)	
测力计率定系数			抗剪强度(kPa)	
手轮转数 (转) (1)	测力计读数 (0.01mm) (2)	剪切位移 (0.01mm) (3)=(1)×20—(2)	剪应力 (kPa) (4)= $\frac{(2) \times C}{A_0} \times 10$	垂直位移 (0.01mm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
...				
32				

表 A. 0. 20 易溶盐总量测定记录表

工程名称						试验者					
试验方法						计算者					
试验日期						校核者					
报告编号		仪器编号			温度			湿度			
试样 编号	风干灰 质量 (g)	风干 含水率 (%)	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取 浸出液 (mL)	蒸发皿 编号	蒸发皿 质量 (g)	蒸发皿 加残渣 质量 (g)	残渣 质量 (g)	易溶盐总量 (g/kg)	
										计算值	平均值

表 A. 0. 21 碳酸根(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)重碳酸根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)测定记录表

工程名称						试验者					
试验方法						计算者					
试验日期						校核者					
报告编号		仪器编号			温度			湿度			
试样 编号	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取滤 液体积 (mL)	盐酸标准溶液			碳酸根含量 (g/kg)		重碳酸钙含量 (g/kg)		
				浓度 (mol/L)	第 1 次 用量 (mL)	第 2 次 用量 (mL)	计算值	平均值	计算值	平均值	



表 A. 0. 22 氯根(Cl<sup>-</sup>)测定记录表

工程名称				试验者				
试验方法				计算者				
试验日期				校核者				
报告编号		仪器编号		温度		湿度		
试样 编号	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取 滤液 体积 (mL)	硝酸银标准溶液			氯离子含量(g/kg)	
				浓度 (mol/L)	滴定 用量 (mL)	空白 用量 (mL)	计算值	平均值

表 A. 0. 23 硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)测定记录表

工程名称						试验者				
试验方法						EDTA 法				
试验日期						校核者				
报告编号		仪器编号		温度		湿度				
试样 编号	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取滤 液体积 (mL)	钡镁混合液		EDTA 标准溶液			硫酸根含量 (g/kg)	
				浓度 (mol/L)	用量 (mL)	浓度 (mol/L)	用量 (mL)	滴定 钙+镁 用量 (mL)	计算值	平均值

表 A. 0. 24 硫酸根(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)测定记录表

工程名称					试验者			
试验方法 比浊法					计算者			
试验日期					校核者			
报告编号		仪器编号		温度		湿度		
试样 编号	烘干灰 质量(g)	加水 体积 (mL)	吸取滤 液体积 (mL)	试验时 温度 (℃)	吸收值	由标准曲 线查出的 硫酸根 质量 (mg)	硫酸根含量 (g/kg)	
							计算值	平均值

表 A. 0. 25 钙离子(Ca<sup>2+</sup>)镁离子(Mg<sup>2+</sup>)测定记录表

工程名称					试验者							
试验方法					EDTA 法			计算者				
试验日期					校核者							
报告编号			仪器编号			温度			湿度			
试样 编号	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取 滤液 体积 (mL)	EDTA 标准溶液				Ca <sup>2+</sup> 含量 (g/kg)		Mg <sup>2+</sup> 含量 (g/kg)		
				浓度 (mol/L)	滴定 Ca <sup>2+</sup> 用量 (mL)	滴定 Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> 用量 (mL)	滴定 Mg <sup>2+</sup> 用量 (mL)	计算 值	平均 值	计算 值	平均 值	



表 A. 0. 26 钠离子(Na<sup>2+</sup> )、钾离子(K<sup>+</sup> )测定记录表

工程名称							试验者					
试验方法							火焰光度法					
试验日期							校核者					
报告编号		仪器编号			温度			湿度				
试样 编号	烘干灰 质量 (g)	加水 体积 (mL)	吸取 滤液 稀释 倍数	试验 条件	测钠 离子 读数	由标准 曲线查 钠离子 含量 (mg/mL)	钠离子含量 (g/kg)		测钾 离子 读数	由标准 曲线查 钾离子 含量 (mg/mL)	钾离子含量 (g/kg)	
							计算 值	平均 值			计算 值	平均 值

表 A. 0. 27 酸碱度(pH)测定记录表

工程名称				试验者			
试验方法				计算者			
试验日期				校核者			
报告编号		仪器编号		温度		湿度	
试样编号	灰水比例	温度(℃)	pH 值			备注	
			第 1 次	第 2 次			

## 附录 B 比重瓶校正

**B. 0. 1** 比重瓶每年应校正 1 次,并经常抽查。如发现有误差时,应重新校正。

**B. 0. 2** 本试验所用的仪器设备及规格要求应符合本规程第 6. 2. 1 条~第 6. 2. 3 条的规定。

**B. 0. 3** 比重瓶的校正应按下列步骤进行:

1 将比重瓶洗净,烘干,称量两次,准确至 0. 001g;取其算术平均值,两次差值不应大于 0. 002g;

2 将事先经过真空抽气法排除空气的煤油注入比重瓶,对长颈比重瓶达到刻度为止;移比重瓶入恒温水槽,待瓶内煤油温稳定后,将瓶取出,擦干外壁,称瓶、煤油总质量,准确至 0. 001g;重复上述步骤,测定两次,取其算术平均值,其平行差值不应大于 0. 002g;

3 将恒温水槽水温以 5℃级差调节,逐级测定不同温度下的瓶、煤油总质量;

4 以瓶、煤油总质量为横坐标,温度为纵坐标,绘制瓶、煤油总质量与温度的关系曲线(图 B. 0. 3)备用。

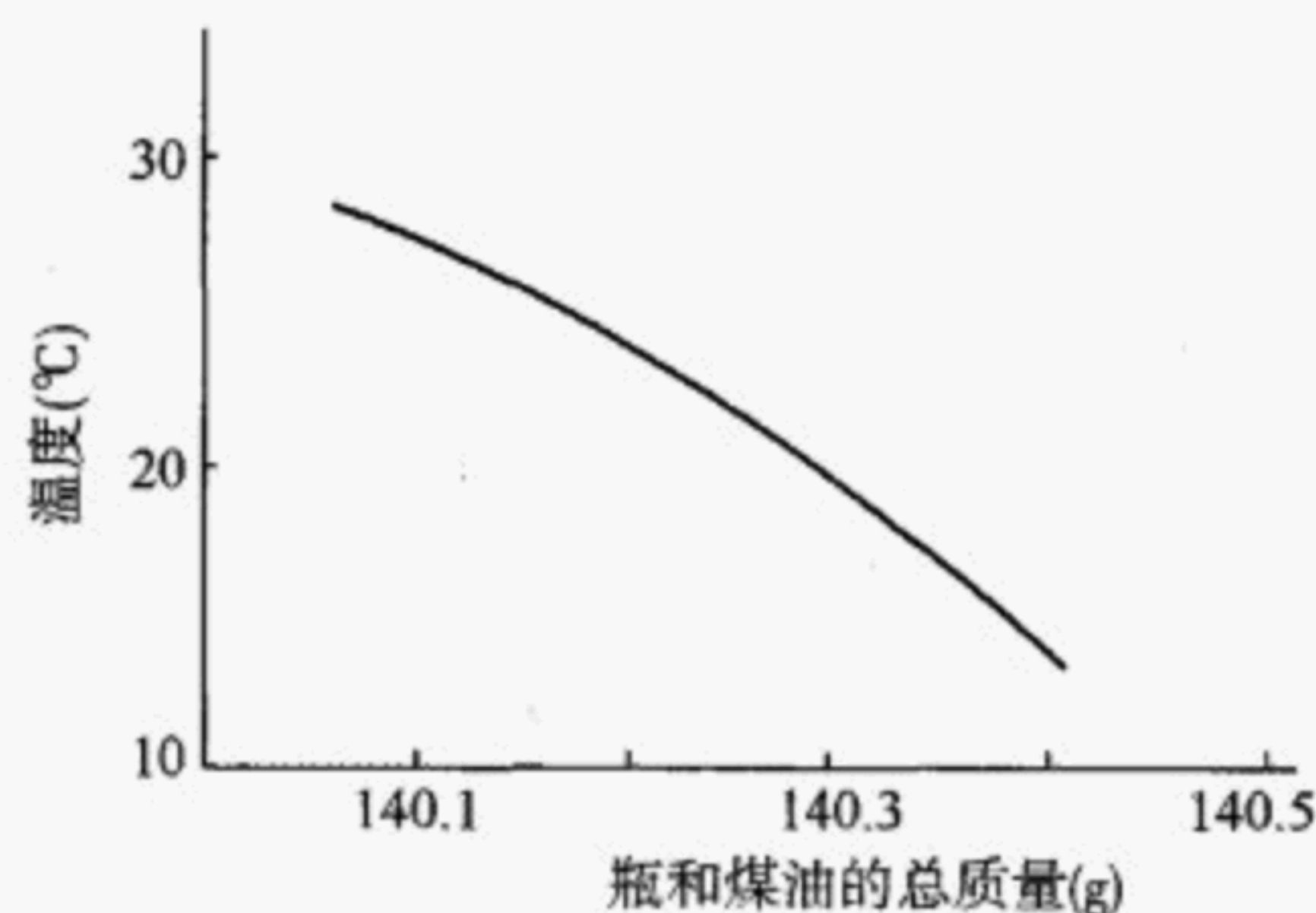


图 B. 0. 3 温度和瓶、煤油质量关系曲线



B. 0. 4 本校正记录可使用表 B. 0. 4。

表 B. 0. 4 比重瓶校正记录

工程名称		试验环境	
试验日期		试验者	
试验规程		校核者	
温度计编号		天平编号	
温度(℃)	瓶号	瓶、煤油总质量(g)	平均瓶、煤油总质量(g)

## 附录 C 煤油比重的测定

**C.0.1** 煤油比重的测定应符合下列步骤：

1 将已称重的比重瓶装满经真空抽气的煤油，恒温后称瓶、煤油总质量；

2 用同一比重瓶装满煮沸过或真空抽气的纯水，恒温后称瓶、水总质量。

**C.0.2** 温度  $t^{\circ}\text{C}$  时煤油的比重应准确至 0.001，并按下式计算：

$$G_{\text{mt}} = \frac{m_1 - m_b}{m_1' - m_b} G_{\text{wt}} \quad (\text{C.0.2})$$

式中： $G_{\text{mt}}$ ——煤油比重；

$m_b$ ——瓶质量(g)；

$m_1$ ——瓶、煤油总质量(g)；

$m_1'$ ——瓶、纯水总质量(g)；

$G_{\text{wt}}$ —— $t^{\circ}\text{C}$  时纯水的比重应符合表 C.0.2 的规定，准确至 0.001。

表 C.0.2 水的比重

$t^{\circ}\text{C}$	$G_{\text{wt}}$	$t^{\circ}\text{C}$	$G_{\text{wt}}$	$t^{\circ}\text{C}$	$G_{\text{wt}}$
4.0	1.000000	8.0	0.999876	12.0	0.999525
4.5	0.999996	8.5	0.999844	12.5	0.999466
5.0	0.999992	9.0	0.999809	13.0	0.999404
5.5	0.999982	9.5	0.999770	13.5	0.999339
6.0	0.999968	10.0	0.999728	14.0	0.999271
6.5	0.999951	10.5	0.999682	14.5	0.999200
7.0	0.999930	11.0	0.999633	15.0	0.999127
7.5	0.999905	11.5	0.999580	15.5	0.999050



续表 C. 0. 2

t/℃	$G_{wt}$	t/℃	$G_{wt}$	t/℃	$G_{wt}$
16.0	0.998970	23.0	0.997567	30.0	0.995676
16.5	0.998888	23.5	0.997448	30.5	0.995524
17.0	0.998802	24.0	0.997326	31.0	0.995369
17.5	0.998714	24.5	0.997201	31.5	0.995213
18.0	0.998623	25.0	0.997074	32.0	0.995054
18.5	0.998530	25.5	0.996945	32.5	0.994894
19.0	0.998433	26.0	0.996813	33.0	0.994731
19.5	0.998334	26.5	0.996679	33.5	0.994566
20.0	0.998232	27.0	0.996542	34.0	0.994399
20.5	0.998128	27.5	0.996403	34.5	0.994230
21.0	0.998021	28.0	0.996262	35.0	0.994059
21.5	0.997911	28.5	0.996119	35.5	0.993887
22.0	0.997799	29.0	0.995974	36.0	0.993712
22.5	0.997685	29.5	0.995826	36.5	0.993535

## 本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。



## 引用标准名录

- 《化学试剂 标准滴定溶液的制备》GB/T 601  
《化学试剂 杂质测定用标准溶液的制备》GB/T 602  
《试验筛 技术要求和检验 第1部分:金属丝编织网试验筛》  
GB/T 6003.1  
《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406  
《土工试验方法标准》GB/T 50123  
《常用玻璃量器检定规程》JJG 196  
《体积管检定规程》JJG 209  
《切土环刀校验方法》SL 110  
《透水板校验方法》SL 111  
《击实仪校验方法》SL 112  
《固结仪校验方法》SL 114  
《渗透仪校验方法》SL 115  
《应变控制式直剪仪校验方法》SL 116  
《应变控制式三轴仪校验方法》SL 118  
《实验室用标准筛振荡机技术条件》DZ/T 0118

中华人民共和国电力行业标准

粉煤灰试验规程

DL/T 5532—2017

条文说明



## 制 订 说 明

《粉煤灰试验规程》DL/T 5532—2017,经国家能源局 2017 年 8 月 2 日以第 8 号公告批准发布。

本规程制订过程中,编制组进行了广泛的调查研究,认真总结已有试验成果及工作经验,通过调研、搜集比对、征求意见、验证试验及专题研究,完成了《粉煤灰试验现状调研报告》《粉煤灰主要析出成分的测定分析专题》两份专题研究报告,对制订的内容反复讨论、分析、论证,取得了重要的试验技术参数。

尚需深入研究的有关问题:1)未进行粉煤灰的细化定名,在今后的工作中需要积累大量试验数据,并与现场勘察评价相结合,对粉煤灰进行细化定名,以使规程具有针对性和指导性;2)有条件时开展动力试验,完善标准全面性,以满足工程对试验要求;3)开展粉煤灰浸出液毒性试验,对粉煤灰长期堆放造成水土环境污染进行试验研究。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定,编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

## 目 次

1	总 则 .....	(123)
2	术语和符号 .....	(124)
2.1	术语 .....	(124)
3	试样制备 .....	(125)
3.1	一般规定 .....	(125)
3.3	扰动灰样的制备 .....	(125)
3.4	原状灰样的制备 .....	(125)
3.5	试样饱和 .....	(125)
4	含水率试验 .....	(127)
5	密度试验 .....	(128)
6	比重试验 .....	(129)
6.1	一般规定 .....	(129)
6.2	比重瓶法 .....	(129)
7	颗粒分析试验 .....	(130)
7.1	一般规定 .....	(130)
7.2	筛析法 .....	(130)
7.3	移液管法 .....	(130)
8	相对密度试验 .....	(132)
8.1	一般规定 .....	(132)
8.2	最小干密度试验 .....	(132)
8.3	最大干密度试验 .....	(132)
9	击实试验 .....	(134)
9.2	轻型击实试验 .....	(134)
10	渗透试验 .....	(135)



10.1	一般规定 .....	(135)
10.2	常水头渗透试验 .....	(135)
10.3	变水头渗透试验 .....	(136)
11	固结试验 .....	(137)
12	三轴压缩试验 .....	(138)
12.1	一般规定 .....	(138)
12.3	固结不排水剪切试验 .....	(139)
12.4	固结排水剪切试验 .....	(139)
13	直接剪切试验 .....	(140)
13.1	一般规定 .....	(140)
13.2	直接剪切试验 .....	(140)
14	易溶盐试验 .....	(141)
14.1	一般规定 .....	(141)
14.2	浸出液制取 .....	(141)
14.3	易溶盐总量测定 .....	(141)
14.4	碳酸根及重碳酸根的测定 .....	(142)
14.5	氯离子测定 .....	(142)
14.6	硫酸根的测定 .....	(142)
14.7	钙离子的测定 .....	(143)
14.8	镁离子的测定 .....	(144)
14.9	钠离子和钾离子的测定 .....	(144)
14.10	pH 值的测定 .....	(144)
附录 B	比重瓶校正 .....	(145)

# 1 总 则

**1.0.1** 随着我国电力建设的飞速发展,燃煤电厂的粉煤灰排放量与日俱增,每年有 3000 万~5000 万吨的粉煤灰产生,而粉煤灰也越来越多地被作为工程建设的地基土或地基处理的材料,它的利用和处理已经刻不容缓。为此,首先需要解决粉煤灰基本工程特性的测试问题。由于粉煤灰是一种与土不完全相同的,并具有特殊性质的散状物质,因此,为了保证试验质量,取得确切反映粉煤灰基本工程性质的可靠数据,需要对其试验方法和试验参数进行统一编制,从而能够起到统一的指导和规范作用,并为电力工程设计和施工提供可靠的计算指标和参数。

**1.0.2** 目前粉煤灰有针对环境影响评价的化学成分测试,有针对作为工程建筑掺合料的性质测试,而本规程主要是针对火力发电厂灰场中粉煤灰作为坝体填筑料和地基,或在电力工程中所涉及的粉煤灰地基开展的基本工程性质试验,其他涉及粉煤灰的领域也可参考。

**1.0.3** 试验所用的仪器、设备需要根据国家计量法的要求定期进行检定和校准。



## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

**2.1.1** 粉煤灰主要产生于燃煤电厂。煤粉在炉膛中呈悬浮状态燃烧,燃煤中的绝大部分可燃物都能在炉内烧尽,而不燃物大量混杂在高温烟气中,这些不燃物因受到高温作用而部分熔融,同时由于其表面张力的作用,形成大量细小的球形颗粒,在锅炉尾部引风机的抽气作用下,含有大量灰分的烟气流向炉尾,随着从高温到温度急剧下降的过程中形成了大量表面光滑的球状玻璃体。在引风机将烟气排入大气之前,上述这些细小的球形颗粒,经过除尘器被分离、收集,即形成粉煤灰。在国内外的规范中对于粉煤灰的表述基本一致,均是指燃煤电厂中煤粉炉烟道气体中收集的粉末,明确不是指炉底的灰渣。

通过从各电力设计院收集到的 12 个灰场(4 个湿灰场和 8 个干灰场)588 个灰样的粒组统计,并同时收集了中国水利水电科学研究院的 19 个灰场的颗粒分析曲线,结果显示粉煤灰绝大部分的粒径在  $0.001\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$  之间,部分分布在  $0.5\text{mm}\sim 2\text{mm}$  之间。灰场中存储的粉煤灰既有粗灰又有细灰,而细灰的分布占绝大多数,灰场中存储的粉煤灰颗粒大小与锅炉的形式、燃烧的煤种、收集排放的方式有很大的关系,而随着经济技术的发展,炉型的改进、收集方式的技术提升及高消耗的水力除灰方式逐渐退出,灰场中存储的粉煤灰大多会以细灰的方式出现。



## 3 试样制备

### 3.1 一般规定

3.1.1 采集具有代表性的灰样极为重要。由于粉煤灰的排放方式、时间以及离排灰口距离不同等因素的影响,灰场中粉煤灰颗粒级配在水平与垂直方向有着较大的差异,因此,根据工程需要,在一定范围内选取采样地点,采集具有代表性和足够数量的灰样进行试验,以正确评价它的工程性质。

### 3.3 扰动灰样的制备

3.3.2 为了制备的试样易成型,粉煤灰需要具有一定的含水率,经试验比较得出,以 30%~35% 为宜。制备平行试样时,为了减少人为误差,一般一次性称够试样用灰量并喷水。

3.3.5 粉煤灰具有凝硬作用,它的凝聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随龄期增加而呈非线性增加, $c$ 、 $\varphi$  值更为显著,压缩系数  $a_v$ 、渗透系数  $k$  随龄期增加而减小,龄期在一个月內最为显著。若实际工程需要考虑粉煤灰的这种凝硬作用时,制备的试样可放置所需的时间后再进行试验。

### 3.4 原状灰样的制备

3.4.1 在进行粉煤灰原状样采集时,由于粉煤灰具有无胶结状的性质、对震动较为敏感、易扰动、渗透性强、天然含水率极易变化,采用现场环刀法可以保证天然密度和含水率准确性。

### 3.5 试样饱和

3.5.3 疏松的试样浸水饱和时,由于颗粒表面黏性受到破坏,易



导致结构松散,试样体积发生变化,并出现水流动现象,将细小颗粒带走,使测试结果产生较大的误差。因此,浸水饱和时要求施加一定的初始压力 3kPa。在加水时自下而上,以便使气泡容易溢出。

## 4 含水率试验

**4.0.1** 粉煤灰质轻多孔,当含水率较大时,其水分极易损失。因此,测定粉煤灰的含水率,除了采样要保证质量,测试时要在现场进行。含水率的测定方法很多,鉴于粉煤灰本身的特点,及便于操作,经比较试验选用烘干法作为标准方法。

**4.0.4** 对于远红外式热源烘箱,只要温度控制符合要求也可以采用。因为灰粒质轻,易被吹飞,故采用鼓风式烘箱时不宜鼓风。

粉煤灰的水溶液一般呈碱性,pH 值在 9~13 之间,粉煤灰对铝制称量盒有腐蚀作用,温度越高、灰样的含水率越大,腐蚀性越强。试样的含水率超过 50% 时,不宜用铝盒,可改用耐腐蚀的称量盒。

**4.0.5** 鉴于粉煤灰分布的不均匀性和颗粒多孔性等特点,含水率变化较大,所以取样质量在本规程规定为 30g~40g。

试样烘至恒重所需时间与粉煤灰的天然含水率及取样量有关,比较试验研究证明:粉煤灰的天然含水率越大、取样数量越多,烘干时间越长。

规程采用平行试验目的是为了操作中间发生的错误。对原状灰样通过平行试验还可进一步了解含水率的均匀程度。为了保证试验准确度,规定平行试验的允许误差是合理的。



## 5 密度试验

**5.0.1** 密度定义为单位体积的质量。测定密度的方法有多种,环刀法作为通用方法,既简单又方便,满足试验精度要求,本规程建议采用。

**5.0.5** 灰质轻多孔,当含水率较大时,其水分极易损失,因此,要及时取样并称重。由于灰不均匀性,如果同一个试样有直剪试验、固结试验等力学试验项目时,这些试验项目所用的环刀都需要称重,取得密度试验数据,密度试验数据在取值时要综合考虑与其他试验数据的一致性。考虑到灰松散,含水率大容易液化的特点,环刀称重拿取时要侧立,避免试样脱环。

## 6 比重试验

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 粉煤灰颗粒表面和内部存在许多空洞和孔隙,在最紧密状态下,其体积也包括一部分闭合和半闭合孔隙的体积。因此,粉煤灰的比重实际上是视比重。

煤种、煤的粉碎工艺、燃烧程度、煤炉形式的不同、收排方式的不同、取样地段的不同,都会导致粉煤灰比重值的差异,故粉煤灰的比重宜实测。

根据近些年一些燃煤电厂粉煤灰粒度分析资料,粉煤灰粒组为  $0.001\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ,因此比重瓶法对粉煤灰是适用的。

**6.1.2** 本规程推荐选用中性介质煤油,其比重比纯水小、浸润性强、挥发性小。

### 6.2 比重瓶法

**6.2.1** 从仪器比较看,使用长颈比重瓶比短颈比重瓶操作相对方便。其主要优点是:用玻璃漏斗将称好的灰样倒入长颈比重瓶时,由于瓶口大而深,不会产生灰粒飞扬或损耗;长颈比重瓶在抽气时灰粒不易溅出;不会发生灰粒堵塞比重瓶毛细管的现象或是毛细管孔隙充气而影响试验质量的问题。

**6.2.4** 由于粉煤灰的特点,其比重试验与一般土粒及岩石的比重试验不同,主要是解决充分排气、减少液面漂浮物以便于测读的问题;用短颈比重瓶试验时,灰粒易飞扬散失;漂浮物在液面或阻塞瓶塞的毛细管使测试困难。本规程用烘干试样的真空抽气法作为粉煤灰比重试验的标准方法。



## 7 颗粒分析试验

### 7.1 一般规定

7.1.2 目前国内外工程上对粉煤灰粒度测定,仍以筛析法、密度计法、移液管法以及筛析法与后两者结合的方法应用最为广泛。显微镜法、光散射法、库尔特法等粒度分析法,虽然有各自优点,但其分析量小,对工程来说其取样代表性较差,故不常用。

密度计的制作以比重  $G_s = 2.65$  为基准,对不同的试样比重,试验结果须校正。粉煤灰比重值介于  $2.0 \sim 2.5$  之间,较密度计制作基准小很多,试验结果校正烦琐,结果也不够准确。此外,密度计制造中刻度精确度和检验的准确度、试验中插取密度计的速度(特别是取出密度计过快造成的悬液扰动)和操作人员间读数差异,以及由于密度计杆体不清洁时对弯液面形成的影响,均对试验结果产生影响。相对而言,移液管的吸管插入悬液部分较细,对悬液扰动轻微,操作者之间误差小,因此,本规程规定粉煤灰粒度分析大于或等于  $0.075\text{mm}$  的采用筛析法,小于  $0.075\text{mm}$  的采用移液管法。

### 7.2 筛析法

7.2.4 粉煤灰颗粒细,取样过多时过筛困难。本规程取样数少于一般砂样,为  $100\text{g} \sim 200\text{g}$ ,且延长振筛时间为  $15\text{min} \sim 20\text{min}$ 。

### 7.3 移液管法

7.3.4 目前国内外大多数规程用钠盐作为分散剂,以六偏磷酸钠使用最广,使用偏磷酸钠和焦磷酸钠亦不少,还有些单位使用  $25\%$  氨水作分散剂。



通过采用六偏磷酸钠对硅铝型粉煤灰进行分散的结果看,浓度为4%的溶液10mL~30mL使用量,效果几乎相同,且分散效果好,并无絮凝现象。故本试验采用浓度为4%的六偏磷酸钠溶液10mL为分散剂。若对加入六偏磷酸钠后产生凝聚的试样,可选用其他分散剂,如浓度为6%的双氧水,浓度为1%的硅酸钠等。

**7.3.5** 洗盐的检验方法,规程上列出了加化学试剂的目测法。也可采用电导法,该法效率高,操作方便,具体操作参考有关手册。

**7.3.6** 本规程规定了试样中易溶盐含量大于总质量的0.5%时须经过洗盐手续,才能进行颗粒分析试验。当用含有易溶盐的试样进行颗粒分析时,对试验成果有较大影响。关于洗盐的方法,一般采用过滤法;也可用抽气过滤法,以加快过滤的速度。

**7.3.7** 经比较试验,当灰样的含水率为50%~70%时,只加化学分散剂的方法与烘干、风干样浸泡18h后煮沸0.5h(或1h)再加化学分散剂的分散效果相同,因而对具有50%~70%含水率的灰样采用只加化学分散剂的方法是适用的,它可减少浸泡煮沸工作,而且灰样更接近天然状态。但含水率过大的灰样难以分散和拌匀,应加以风干。

由于粉煤灰是散粒状物质、较易分散,因而本试验对试样的分散仍采用国家标准中的浸泡煮沸加化学分散剂的方法。

由于粉煤灰中不同颗粒结构的玻璃球体、结晶体和碳颗粒聚集成粒径独特的结构,其比重变化较大,因而在进行移液管法试验计算时,采用实际比重。

移液管法是根据各种粒径在一定时间后下沉距离的关系来计算吸取悬液的时间和距离。因此,本规程是固定粒径和吸取深度10cm来计算时间。

**7.3.8** 由于粉煤灰颗粒内有较多孔洞,故相同颗粒外表粒径和等效粒径差值较大。移液管法试验所测粒径为颗粒的等效粒径,而筛析法试验所测粒径为颗粒的外表粒径,因而在颗粒分配曲线上,两种测试方法的结果不完全衔接,绘制曲线时应用一过渡曲线,将两种测试方法所绘曲线平滑连接。



## 8 相对密度试验

### 8.1 一般规定

8.1.1 灰样的最小干密度、最大干密度和天然干密度是计算其相对干密度的三个重要参数。由于粉煤灰的颗粒组成与砂土相似,且具有良好的透水性,因此,相对密度可作为评价粉煤灰紧密程度的指标。

8.1.2 通过粉煤灰试验方法研究,漏斗法比量筒倒转法测定的最小干密度值偏小。

8.1.3 通过粉煤灰试验方法研究,最小干密度受倒转的速度与最大干密度受振动能量不同,进行平行测定是必需的,两次及两次以上的平行测定效果更好。

### 8.2 最小干密度试验

8.2.5 根据粉煤灰颗粒表面粗糙、松散、细粒较多、比重小的特点,为减少灰粒飞扬,增加颗粒之间的孔隙,通过粉煤灰试验方法研究,试验时漏斗底部管口至灰面的距离定为 10mm,效果更好。

由于漏斗法采用较细的管径来控制试样均匀缓慢地落入平口杯,形成疏松的堆积,遇较多粗颗粒时,操作过程中管径容易阻塞,因此含有较多粗颗粒的粉煤灰应采用量筒慢速倒转法。

### 8.3 最大干密度试验

8.3.4 根据粉煤灰试验方法研究,为防止粉煤灰颗粒飞扬,烘干或风干试样可以加入少量纯水。通过粉煤灰试验方法研究,试样保持 4%~5% 的含水率是可行的。

**8.3.5** 烘干或风干的粉煤灰颗粒容易飞扬,为了改善试验条件,可配备电动最大干密度试验仪,粗灰可用较少击数,细灰应采用较多击数。



## 9 击实试验

### 9.2 轻型击实试验

**9.2.1** 击实仪有多种型号,可分为电动击实仪和手动击实仪。部分电动击实仪配有落高跟踪装置,能保证试样在等功能条件下进行击实。

**9.2.4** 粉煤灰试验方法研究时,采用了干法和湿法制样,干法制样是将粉煤灰风干至含水率 10% 左右,然后根据制样含水率加水;湿法制样是将粉煤灰风干至含水率 30% 左右,当制备含水率低于 30% 的试样时,采用风干的办法达到要求的含水率;当制备含水率高于 30% 的试样时,加水至所需含水率。两种方法所得到的击实后的最大干密度差值小于  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,对击实试验成果影响不大,因此,制样时可将粉煤灰的含水率控制在 20% 左右,并且灰样须充分拌匀。粉煤灰具有质轻多孔、化学成分特殊、击实曲线较平缓以及对含水率不敏感的特性,要求制样数至少为 7 个;制样时相邻两个含水率的差值过大则含水率最高点难以击实,差值过小则干密度变化不明显,经试验比较得出,建议轻型击实试验试样制备时含水率间隔为 4%。

**9.2.5** 为了保证击实试验在等功能的条件下进行,要求余灰高度不得超过 6mm。而为了更好地控制余高,应测量每层的加灰质量和击实后的灰柱高度,随时调整加灰质量。当击实试样的含水率大于最优含水率,饱和度达 80% 以上时,击实筒底有水析出,且随着含水率的增加,筒底析出的水增多,造成上层与下层含水率相差很大,因此,宜沿垂直部位切取有代表性的试样,拌匀后测含水量。粉煤灰具有多孔的特性,经击实后一些颗粒破碎,小于  $0.075\text{mm}$  的颗粒明显增加,因此灰样不应重复使用。



## 10 渗透试验

### 10.1 一般规定

**10.1.2** 测定粉煤灰渗透系数的方法有很多,经过粉煤灰试验方法研究,本试验列出的两种方法较为成熟,常水头渗透试验采用70型渗透仪法,变水头渗透试验采用南55型渗透仪法。两种方法的适用范围,常水头渗透试验适用于渗透系数较大的灰样;变水头渗透试验适用于渗透系数较小的灰样。国外有的规程(如JIS)规定:常水头渗透试验适用于渗透系数较大的试样:即  $k = 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ ;变水头渗透试验适用于渗透系数较小的试样,通常指  $k = 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。也就是说,上述两种方法仅适用于  $k = 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。至于极高和极低透水性的灰样,需要采用特殊的试验方法或通过间接的推算求取渗透系数。

**10.1.3** 试验用水应预先经过脱气处理,因为水中溶有空气,试验期间,空气从水中游离出来,在试样中形成气泡,堵塞试样的孔隙,致使渗透系数逐渐降低。这已为国内外一些研究者所证实。在规程修订中强调了必须采用脱气水进行渗透试验的规定。

另外,若水温低于试样温度,水进入试样时会因温度升高而分解出气体,堵塞孔隙,这样,也会影响渗透系数的测定结果,因此,规程中除规定用脱气水进行试验外,对于试验水温做了相应的规定。

### 10.2 常水头渗透试验

**10.2.5** 粉煤灰的渗透性是水流通过灰样孔隙的能力,显然,粉煤灰的孔隙大小,决定着渗透系数的大小。因此,测定渗透系数时,需要说明与渗透系数相适应的粉煤灰的密度状态。试验时应将试



样控制在设计要求的孔隙比下,测定其渗透系数,否则试验结果实用意义不大。要使试样孔隙比控制在需要值有困难时,可进行不同孔隙比下渗透系数的测定,做出孔隙比与渗透系数的关系曲线,即可查出任意需要孔隙比下的渗透系数。

### 10.3 变水头渗透试验

**10.3.4** 采用南 55 型渗透仪进行渗透试验时,应严格控制环刀高度,若环刀高度不够,则试样同试样下盖板不紧贴,饱和时出现试样下沉现象,所以,要确保环刀套上容器套环后两者平齐,达到试样同上下透水板紧贴的目的。

通过粉煤灰试验方法研究,曾探索模拟电厂高浓度水力输浆,用调制的稠浆在渗透环刀内浇灌堆积制样。试验证明采用此法制备出来的试样干密度在  $0.655\text{g}/\text{cm}^3 \sim 0.686\text{g}/\text{cm}^3$  之间,同灰场取样干密度  $0.672\text{g}/\text{cm}^3$  非常接近。浇灌出来的试样因粉煤灰颗粒调浆后具有自凝性,沉淀时颗粒能同环刀壁紧贴,试样饱和时不会出现体缩和下沉现象,故将此制备试样方法编入本规程。

试样的饱和度愈小,孔隙内残留气体愈多,使试样的有效渗透面积减小。同时由于气体因孔隙水压力的变化而胀缩,因而饱和度的影响即成为一个不定的因素。为了保持试验准确,要求试样充分饱和,排尽试样孔隙中的气体。

由于粉煤灰试样的密实程度相对较差,测压管开始水头太高容易将试样中的细颗粒冲出,造成试样的破坏,因此,测压管开始水头不可调得太高;测压管开始水头太低,则试验的开始水头与终止水头差值较小,不易测读,试验误差较大,因此,本规程规定测压管开始水头调整范围为  $50\text{cm} \sim 70\text{cm}$ ,对于密实度较高的试样,测压管开始水头也可适当调高至  $80\text{cm}$ 。

## 11 固结试验

**11.0.3** 由于粉煤灰具有腐蚀性,固结仪加压盒要采用耐腐材料制成。试验结束后,及时取出试样,擦洗仪器。

**11.0.6** 滤纸和透水板的湿度应接近试样的湿度。测定沉降速率仅适用饱和灰。粉煤灰松散,饱和粉煤灰容易液化,所以固结试验试样环刀拿取时,小心放置避免脱环。

**11.0.8** 本规程的试验记录表格为推荐格式,由于目前国内大部分试验室固结试验采用计算机自动采集数据,即使手工记录也不用手工计算,各试验室根据实际情况增减内容。



## 12 三轴压缩试验

### 12.1 一般规定

**12.1.1** 三轴压缩试验是将包有橡皮膜的圆柱体试样浸没在充满纯水的压力室中,在恒定的周围压力作用下,逐渐增大轴向压力,直至试样达到破坏或轴向应变达到 20%。根据莫尔——库仑破坏准则,确定粉煤灰的强度参数。试验须制备三个以上密度,体积相同圆柱体的试样。

**12.1.2** 根据排水情况不同三轴压缩试验分为三种类型:

不固结水不排水剪(UU)试验是在施加周围压力和增加轴向压力直至破坏过程中均不允许试样排水。本试验可以测得总抗剪强度参数  $c_u$ 、 $\varphi_u$ 。

固结不排水剪(CU 或  $\overline{CU}$ )试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在保持不排水的情况下,增加轴向压力直至破坏。本试验可以测得总抗剪强度参数  $c_{cu}$ 、 $\varphi_{cu}$  或有效抗剪强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$  和孔隙压力系数。

固结排水剪(CD)试验是试样先在某一周围压力作用下排水固结,然后在允许试样充分排水的情况下增加轴向压力直到破坏,本试验可以测得有效抗剪强度参数  $c_d$ 、 $\varphi_d$  和变形参数。

**12.1.7** 根据常见粉煤灰的粒径范围,推荐采用试样规格为直径 39.1mm 高度 80mm。

**12.1.8** 鉴于粉煤灰具有质量轻、比重小、颗粒多孔洞和易扰动的特性,其饱和是试验的关键。抽气饱和法适用于密实的试样;二氧化碳法对各种试样均适宜,在饱和时,应注意二氧化碳压力不得大于周围压力,以免扰动试样;当其他方法都不能使试样完全饱和时,可以利用反压力饱和,反压力是人为对试样同时增加孔隙水压



力和周围压力,使试样孔隙内的空气在压力下溶解于水,对试样施加反压力的大小与试样起始饱和度有关,当起始饱和度过低时,即使施加很大的反压力,也不一定能使试样饱和,加上受三轴仪压力的限制,为此,当试样起始饱和度低时,应首先进行抽气饱和,然后再加反压力饱和。

### **12.3 固结不排水剪切试验**

**12.3.1** 为了加速试样的固结过程,同时在剪切时使试样内孔隙压力均匀传递,宜在试样外贴滤纸条。

**12.3.2** 固结标准采用两种方法。一种是以固结排水量达到稳定作为固结的标准;另一种是以孔隙水压力完全消散为标准。根据所进行的试验与调研的经验,本试验规定以固结度达到 95% 作为固结标准。

### **12.4 固结排水剪切试验**

**12.4.3** 在试验和调研中,对固结排水剪的剪切速率进行对比试验,当剪切速率采用每分钟轴向应变为  $0.075\% \sim 0.1\%$  时,均无孔隙水压力产生。因此,本规程采用此速率。



## 13 直接剪切试验

### 13.1 一般规定

13.1.1 直接剪切试验虽然不能有效地控制排水,但由于其结构简单、操作方便,故仍可利用该试验测定粉煤灰的抗剪强度指标。

### 13.2 直接剪切试验

13.2.4 试验安装时,稍不慎便会对粉煤灰试样造成扰动,因此要格外小心。饱和的粉煤灰试样,极易被扰动,故只能在剪力仪内进行固结而后剪切,不能在预压装置预先固结后再搬至剪力仪中剪切。

粉煤灰在垂直荷重作用下,完成主固结时间很短, $t_{90}$ 一般在2min左右,经比较试验,以每小时变形量不大于0.005mm作为固结稳定标准。一般1h~2h试样即可达到稳定。

## 14 易溶盐试验

### 14.1 一般规定

14.1.1 粉煤灰的易溶盐是指灰中易溶于水的盐类,包括氯化物、硫酸盐、碳酸盐及重碳酸盐等。

### 14.2 浸出液制取

14.2.3 关于浸出震荡时间,在同一灰水比例下,浸出震荡的时间不同,所得结果亦有差异。研究表明:对灰中易溶盐的浸出震荡时间 10min~15min 即可。为了统一试验条件,本试验采用的浸提时间为 10min。

关于灰水比,在同一浸出震荡时间,由于各种盐类在水中的溶解度差异悬殊,因而利用控制灰水比例的方法将易溶盐分离。就灰中易溶盐的含量和组成比例而言,钙离子和硫酸根离子组分很大。通过试验表明,采用 1:20 的灰水比例是适宜的。

### 14.3 易溶盐总量测定

14.3.1 测定灰中易溶盐的总量采用烘干法,由于不需特殊的仪器设备,且比较准确,因此本规程采用烘干法。

14.3.4 当烘干残渣中有较多的吸湿性强的钙、镁氯化物存在时,将难以恒量。可在浸出液内预先加入 20g/L 碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )溶液 10mL~20mL,使其转变为钙、镁碳酸盐,在 180℃下烘至恒量,并做一个加 20g/L 碳酸钠溶液的空白试验,所加入的碳酸钠量应从烘干残渣总量中减去。

14.3.5 易溶盐试验中所用试样均为烘干灰样。若使用风干灰样,在结果计算时需将风干质量( $m$ ),换算成烘干质量( $m_d$ ),因



此在试验时均需同期测试试样的风干含水率  $\omega$  ,其换算关系为  $m_d = m / (1 + 0.01\omega)$  。

#### 14.4 碳酸根及重碳酸根的测定

**14.4.1** 碳酸根和重碳酸根用双指示剂中和滴定法测定。该法是利用碱金属碳酸盐和重碳酸盐水解时碱性强弱不同,用酸分步滴定,并以不同指示剂指示终点,由标准溶液用量算出碳酸根和重碳酸根的含量。

**14.4.4** 盐酸标准溶液也可用标定过的氢氧化钠标准溶液标定,也可以用硫酸标准溶液代替盐酸标准溶液。

**14.4.5** 碳酸根和重碳酸根的测定应在灰浸出液过滤后立即进行,否则将由于二氧化碳的吸收或释出而产生误差。

#### 14.5 氯离子测定

**14.5.1** 氯离子采用硝酸银滴定法测定,以铬酸钾为指示剂。该法是根据铬酸银与氯化银的溶解度不同,以铬酸钾为指示剂,用硝酸银对氯离子进行滴定时,氯化银首先沉淀,待其沉淀完全后,多余的银离子才能生成砖红色铬酸银沉淀,此时即表明氯离子滴定已达终点。

**14.5.5** 由于有微量的硝酸银与铬酸钾反应指示终点,因此需进行空白试验以减去消耗于铬酸钾的硝酸银用量。

#### 14.6 硫酸根的测定

**14.6.1** 硫酸根采用 EDTA 络合滴定法是用过量的氯化钡使溶液中的硫酸根沉淀完全,再用 EDTA 标准溶液在  $\text{pH} \approx 10$  时以铬黑 T 为指示剂滴定过量的钡离子,最后由净消耗的钡离子计算硫酸根含量。

比浊法为使氯化钡与溶液中硫酸根形成硫酸钡沉淀,然后在一定条件下使硫酸钡分散成较稳定的悬浊液,在比色计中测定其



浊度,按照浊度查标准曲线便可计算硫酸根的含量。

**14.6.7** 两种液体相混合的试剂,以溶质体积与溶剂体积之比来表示。如浓度 1+3 盐酸溶液,是指 1 体积的浓盐酸与 3 体积的纯水混匀。

用 EDTA 标准溶液滴定过量的钡离子,以铬黑 T 为指示剂时,由于钡离子指示剂阴离子络合不稳定,终点不明显,需加入镁使终点清晰,故沉淀硫酸根时采用钡镁混合剂。

**14.6.11** 比浊法适用于硫酸根含量小于 40mg/L 的试样,因大于 40mg/L 时,标准曲线即向下弯曲,且悬浊液不稳定。当试样中硫酸根含量较高时,可稀释后测定。

**14.6.15** 在比浊法操作中,沉淀搅拌时间、搅拌速度、试剂的用量等需严格控制,否则将会引起较大的误差。

## 14.7 钙离子的测定

**14.7.6** 在钙离子的测定中也可以使用 K-B 指示剂来替代钙指示剂。K-B 指示剂的配制和使用方法如下:称取 0.5g 酸性铬蓝 K 和 1g 萘酚绿 B 与干燥分析纯氯化钠 100g 研细混匀,贮于棕色瓶中,放在干燥器中保存,可长期使用,具体使用方法与钙指示剂相同。或分别配制 0.2% 酸性铬蓝 K 与 0.5% 萘酚绿 B 溶液,在滴定时分别加入 2 滴~3 滴,用 EDTA 溶液滴定到试液由酒红色转为不变的蓝色即为终点。

铁、铝、铜、锰等元素干扰滴定终点,如粉煤灰浸出液中含有较多量的上述元素时,则应按下述方法消除它们的干扰:1)浸出液在未加氨缓冲溶液前,先加浓度为 1+1 三乙醇氨溶液 3mL,使铁、铝等离子被络合掩蔽而消除干扰;2)浸出液在未加氨缓冲溶液前,加入少量固体盐酸羟胺,然后加氨缓冲溶液,此时二价锰不影响滴定终点,但亦被 EDTA 溶液定量络合而计入总硬度;3)在浸出液加入氨缓冲溶液后,加入新配制的含量为 20g/L 的硫化钠溶液 0.5mL,使铜及其他重金属离子生成硫化物沉淀。



在 pH 大于 12 的溶液中,镁离子被沉淀为氢氧化镁,在此条件下以钙指示剂为指示剂,用 EDTA 标准溶液滴定溶液中的钙离子。在钙离子测定中,溶液的 pH 值需要控制在 12 以上,使镁离子沉淀为氢氧化镁,以免影响钙离子的滴定。加氢氧化钠使镁沉淀完全后,应及时滴定,以免溶液吸收二氧化碳而生成碳酸钙沉淀,延长滴定终点。

## 14.8 镁离子的测定

14.8.4 在 pH=10 的条件下,以铬黑 T 等为指示剂,用 EDTA 标准溶液滴定钙离子、镁离子含量,从含量中减去钙离子含量而求出镁离子含量。

## 14.9 钠离子和钾离子的测定

14.9.1 火焰光度法是发散光谱分析中比较简单的一种方法。它是利用火焰激发使原子的电子跃迁而释放能量产生特征谱线。由于激发的能量较低,仅有碱金属和碱土金属等能用此方法激发,所产生的发射光谱经滤光片后用光电池和检流计来测其发射强度。这种方法简便、迅速,灵敏度较高,常用来测定钠、钾的含量,尤其是当它们含量较低时,用火焰光度计优于其他方法。

## 14.10 pH 值的测定

14.10.1 酸碱度(pH 值)是溶液中氢离子浓度(氢离子活度)的负对数,即  $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$ 。pH 是标志溶液酸碱度的通用指标。pH 值的范围为 0~14,当溶液 pH 等于 7 时为中性,小于 7 时为酸性,大于 7 时为碱性。

## 附录 B 比重瓶校正

**B. 0. 1** 比重瓶的玻璃在不同温度下会产生胀缩。煤油在不同温度下的密度(比重)也各不相同。因此,比重瓶盛装煤油至一定标记处的总质量随温度而异,故比重瓶必须进行校正。



S/N:155182·0173



DL/T 5532—2017

中华人民共和国电力行业标准

粉煤灰试验规程

DL/T 5532—2017



中国计划出版社出版发行

网址: [www.jhpress.com](http://www.jhpress.com)

地址:北京市西城区木樨地北里甲11号国宏大厦C座3层

邮政编码:100038 电话:(010)63906433(发行部)

北京市科星印刷有限责任公司印刷

---

850mm×1168mm 1/32 5印张 123千字

2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

印数1—3000册



统一书号:155182·0173

定价:45.00元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话:(010)63906404

如有印装质量问题,请寄本社出版部调换