

ICS 27.140

P 59

备案号: J2667—2019

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL / T 5777 — 2018

水工混凝土掺用硅粉
技术规范

Technical specification of silica fume for use in
hydraulic concrete

2018-12-25 发布

2019-05-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

水工混凝土掺用硅粉
技术规范

Technical specification of silica fume for use in
hydraulic concrete

DL/T 5777 — 2018

主编机构：中国电力企业联合会

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2019 年 5 月 1 日

中国电力出版社

2019 北 京

国家能源局

公 告

2018 年 第 16 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《光伏发电工程地质勘察规范》等 204 项行业标准，其中能源标准（NB）32 项、电力标准（DL）172 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2018 年 12 月 25 日

DL / T 5777 — 2018

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	出版机构	批准日期	实施日期
...							
199	DL/T 5777— 2018	水工混凝土 掺用硅粉 技术规范			中国电力 出版社	2018-12-25	2019-05-01
...							

前 言

本规范根据《国家能源局关于下达 2014 年第一批行业标准制(修)订计划的通知》(国能科技〔2014〕298 号)的要求制定。

本规范针对水电水利工程混凝土掺用硅粉的特点,参考了国内外相关标准,在总结分析相关研究成果及工程经验基础上,吸收了水工混凝土掺用硅粉的最新研究成果,反映了水工混凝土掺用硅粉的技术水平与发展趋势。

本规范主要技术内容包括硅粉技术要求、水工混凝土掺用硅粉的技术要求、掺硅粉混凝土的质量控制和检查。

本规范由中国电力企业联合会提出。

本规范由电力行业水电施工标准化技术委员会(DL/TC 29)归口。

本规范主编单位:长江水利委员会长江科学院。

本规范参编单位:中国长江三峡集团公司、
武汉大学水利水电学院、
中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司。

本规范主要起草人员:杨华全 董 芸 陈 霞 李文伟
周世华 何 真 严建军 石 妍
杨梦卉 钟贻辉 李 响 王 磊
苏 杰 张建峰 闫小虎 林育强
李明霞 张 亮 高志扬 肖延亮

本规范主要审查人员:汪 毅 梅锦煜 高 翔 张 宏
程志华 孙来成 李志刚 王鹏禹
吴高见 吴 旭 王 军 钟彦祥
杨 涛 何小雄 姚福海 林 鹏

DL/T 5777 — 2018

朱明星 吕芝林 陈改新 陆采荣
李光伟

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

目 次

1 总则1

2 术语2

3 硅粉技术要求3

 3.1 品质指标3

 3.2 试验方法4

 3.3 取样与检验4

 3.4 包装与储运4

4 水工混凝土掺用硅粉的技术要求6

5 掺硅粉混凝土的质量控制和检查7

附录 A 硅粉需水量比试验方法8

附录 B 硅粉活性指数试验方法11

本规范用词说明13

引用标准名录14

附：条文说明15

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Quality requirements for silica fume	3
3.1	Criterion of control quality	3
3.2	Testing methods	4
3.3	Sample and inspection	4
3.4	Packaging, safekeeping and transportation	4
4	Technical requirements on silica fume for use in hydraulic concrete	6
5	Quality control and inspection of silica fume concrete	7
Appendix A	Water demand ratio of silica fume	8
Appendix B	Test method of activation index of silica fume	11
	Explanation of wording in this code	13
	List of normative standards	14
	Addition: Explanation of provisions	15

1 总 则

1.0.1 为规范硅粉在水工混凝土中的应用，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于水电水利工程。

1.0.3 掺硅粉的水工混凝土应满足拌和物性能、力学、变形、热学、耐久性等设计要求。

1.0.4 水工混凝土掺用硅粉，除应遵守本规范的规定外，还应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 硅粉 silica fume

采用电弧炉冶炼工业硅或硅铁合金时，从烟道气体中收集的以无定形二氧化硅为主要成分的超细火山灰质材料。

2.0.2 碱含量 alkali content

碱含量以钠当量 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) 计。

2.0.3 硅粉掺量 silica fume content

硅粉质量占胶凝材料质量的百分比。

2.0.4 活性指数 reactivity index

28d 龄期时掺 10% 硅粉的试验胶砂与不掺硅粉的基准胶砂的抗压强度百分比。

3 硅粉技术要求

3.1 品质指标

3.1.1 硅粉的二氧化硅含量、烧失量、细度、比表面积、需水量比、活性指数应符合表 3.1.1 规定的技术要求。

**表 3.1.1 硅粉的二氧化硅含量、烧失量、细度、比表面积、
需水量比、活性指数技术要求**

项 目	品质指标
二氧化硅含量	$\geq 85.0\%$
烧失量	$\leq 5.0\%$
细度 (45 μm 筛余)	$\leq 10.0\%$
比表面积 (m^2/kg)	≥ 15000
需水量比	$\leq 125\%$
活性指数	$\geq 105\%$

3.1.2 硅粉的含水率、三氧化硫含量和氯离子含量宜符合表 3.1.2 规定的技术要求。

表 3.1.2 硅粉的含水率、三氧化硫含量和氯离子含量技术要求

项 目	品质指标
含水率	$\leq 3.0\%$
三氧化硫含量	$\leq 3.0\%$
氯离子含量	$\leq 0.3\%$

3.1.3 当硅粉作为抑制材料用于活性骨料混凝土时，其碱含量允许值应经试验论证确定。

3.2 试验方法

3.2.1 二氧化硅含量、烧失量、三氧化硫含量、氯离子含量、碱含量按《水泥化学分析方法》GB/T 176 测定。

3.2.2 含水率按《矿物掺和料应用技术规范》GB/T 51003 测定。

3.2.3 细度(45 μ m 筛余)按《水泥细度检验方法筛析法》GB/T 1345 中的水筛法测定。

3.2.4 比表面积按《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》GB/T 19587 测定。

3.2.5 需水量比按附录 A 测定。

3.2.6 活性指数按附录 B 测定。

3.3 取样与检验

3.3.1 进场硅粉应按批取样检验，同一厂家相同生产批次取样以连续供应的 20t 为一批，不足 20t 按一批计。

3.3.2 取样应有代表性，袋装硅粉应分别从 10 个以上包装袋内等量抽取。散装硅粉总取样部位不少于 10 个，应从至少 3 个散装罐内抽取，每个散装罐应从 3 个以上不同部位等量抽取；少于 3 个散装罐时，每个散装罐的取样部位不少于 3 个。

3.3.3 取样总量应不少于 2kg，抽取的样品混合均匀后，按四分法分别抽取试验样和封存样，封存样应密封保存 3 个月。当有争议时，对封存样进行复检或仲裁检验。

3.3.4 每批硅粉均应进行品质检验。符合本规范品质指标的为合格品；二氧化硅含量、烧失量、细度、比表面积、需水量比、活性指数等品质指标的检验结果不符合要求时，应重新取样复检，复检结果如仍达不到要求，则该批硅粉为不合格品。

3.4 包装与储运

3.4.1 硅粉产品应标明产品名称、批号、执行标准号、生产厂名

称和地址、出厂日期，并提供出厂硅粉的检验结果及合格证。

3.4.2 硅粉的包装应标明净质量，满足防潮要求。

3.4.3 硅粉的储运应避免包装破损及对环境的污染。

3.4.4 硅粉储存超过 6 个月时，应重新进行含水率检验，含水率超过 3%时调整硅粉掺量。

4 水工混凝土掺用硅粉的技术要求

4.0.1 掺硅粉混凝土的设计强度等级、强度保证率和标准差等指标，应与不掺硅粉的混凝土相同。

4.0.2 掺硅粉混凝土的和易性、强度和耐久性等指标应符合设计要求。

4.0.3 水工混凝土中硅粉的掺量应通过试验确定，宜为 3%~8%，不宜超过 10%。

4.0.4 掺硅粉混凝土的配合比设计按《水工混凝土配合比设计规程》DL/T 5330 中的绝对体积法执行。

4.0.5 应进行硅粉与水泥、外加剂的适应性试验，以混凝土拌和物性能与强度是否出现异常进行综合性评判。

4.0.6 掺硅粉混凝土的拌和物应搅拌均匀，硅粉的掺入方式与搅拌时间应根据现场施工条件，通过试验确定，如采用硅粉浆掺入方式，混凝土拌和用水应扣除硅粉浆中的水量，硅粉浆的水灰比宜为 1.0。

4.0.7 掺硅粉混凝土应在施工全过程做好保湿措施，适当延长养护时间。

4.0.8 掺硅粉混凝土浇筑时应振捣密实。

4.0.9 宜采用适当技术措施，减小掺硅粉混凝土的自收缩、干缩与温度收缩。

5 掺硅粉混凝土的质量控制和检查

5.0.1 加强硅粉混凝土的收缩与温度裂缝控制与检查。

5.0.2 掺硅粉混凝土的质量控制和检查按《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的规定执行。

附录 A 硅粉需水量比试验方法

A.1 目的及适用范围

A.1.1 规定了硅粉的需水量比试验方法。

A.1.2 用于评定硅粉的质量。

A.2 材 料

A.2.1 水泥：宜采用符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 的 42.5 硅酸盐水泥或符合《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》GB 200 的中热硅酸盐水泥，也可采用工程用水泥。

A.2.2 标准砂：宜采用《中国 ISO 标准砂》GSB 08-1337，也可采用工程实际用砂。

A.2.3 水：饮用水。

A.3 仪 器 设 备

A.3.1 烘箱：温度控制范围为 $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 。

A.3.2 天平：称量不小于 1000g 时，最小分度值不大于 1g；称量不小于 100g 时，最小分度值不大于 0.01g。

A.3.3 行星式水泥胶砂搅拌机。

A.3.4 流动度跳桌。

A.3.5 试模：用金属材料制成，由截锥圆模和模套组成。截锥圆模内壁应光滑，尺寸为：高度 $60\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ；上口内径 $70\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ；下口内径 $100\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ；下口外径 120mm。模套与截锥圆模配合使用。

A.3.6 捣棒：用金属材料制成，直径为 $20\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ，长度约 200mm ，捣棒底面与侧面成直角，其下部光滑，上部手滚银花。

A.3.7 卡尺：量程为 200 mm ，分度值不大于 0.5 mm 。

A.3.8 小刀：刀口平直，长度大于 80 mm 。

A.4 试 验 步 骤

A.4.1 称取适量水泥、硅粉试样，其中水泥试样先通过 0.9 mm 方孔筛，水泥与硅粉试样放入 $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘干，取出放在干燥器中冷却至室温后使用。

A.4.2 胶砂配比见表 A.4.2。

表 A.4.2 胶 砂 配 比

胶砂种类	水泥 (g)	硅 (g)	标准砂 (g)	用水量 (mL)
基准胶砂	450	—	1350	按流动度 $130\text{ mm} \sim 140\text{ mm}$ 控制
试验胶砂	405	45	1350	按流动度 $130\text{ mm} \sim 140\text{ mm}$ 控制，同时与基准胶砂流动度差值 $\pm 3\text{ mm}$

A.4.3 将基准胶砂和试验胶砂分别按《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》GB/T 17671 规定进行搅拌。

A.4.4 按《水泥胶砂流动度测定方法》GB/T 2419 规定分别测定基准胶砂试件和试验胶砂试件的流动度。

A.5 试 验 结 果 处 理

A.5.1 需水量比按式 (A.5.1) 计算 (精确至 0.1%)：

$$X = \frac{V_1}{V_0} \times 100 \quad (\text{A.5.1})$$

式中：X —— 需水量比 (%)；

V_1 —— 试验胶砂用水量 (mL)；

V_0 —— 基准胶砂用水量 (mL)。

A.5.2 试验次数与数据处理

以两次测值的平均值作为试验结果，试验结果准确至 1%；
如两次测值相差大于 0.5%，应重新试验。

附录 B 硅粉活性指数试验方法

B.1 目的及适用范围

B.1.1 规定了硅粉的活性指数试验方法。

B.1.2 适用于作为掺和料使用的硅粉的活性指数的测定。

B.2 材 料

B.2.1 水泥：宜采用符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 的 42.5 硅酸盐水泥或符合《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》GB 200 的中热硅酸盐水泥，也可采用工程用水泥。

B.2.2 标准砂：宜采用《中国 ISO 标准砂》GSB 08-1337，也可采用工程实际用砂。

B.2.3 水：饮用水。

B.3 仪 器 设 备

B.3.1 天平：量程不小于 1000g，最小分度值不大于 1g。

B.3.2 搅拌机、振实台或振动台、抗压强度试验机：符合《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 规定。

B.4 试 验 步 骤

B.4.1 胶砂配比见表 B.4.1，固定基准胶砂与试验胶砂水胶比均为 0.5。

表 B.4.1 胶 砂 配 比

胶砂种类	水泥 (g)	硅粉 (g)	标准砂 (g)	用水量 (mL)
基准胶砂	450	—	1350	225
试验胶砂	405	45	1350	225

B.4.2 将基准胶砂和试验胶砂分别按《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》GB/T 17671 规定进行搅拌、试件成型和养护。

B.4.3 试件养护至 28d, 按《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》GB/T 17671 规定分别测定基准胶砂试件和试验胶砂试件的抗压强度。

B.5 试验结果处理

B.5.1 活性指数按式 (B.5.1) 计算 (精确至 0.1%):

$$K = \frac{R}{R_0} \times 100 \quad (\text{B.5.1})$$

式中: K ——活性指数 (%);

R ——试验胶砂 28d 抗压强度 (MPa);

R_0 ——基准胶砂 28d 抗压强度 (MPa)。

B.5.2 试验次数与数据处理

以两次测值的平均值作为试验结果, 试验结果精确至 1%; 如两次测值相差大于 0.5%, 应重新试验。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对于要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的用词:
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用词:
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用词:
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用词,采用“可”。

2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时,写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

通用硅酸盐水泥 GB 175
中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥 GB 200
水泥化学分析方法 GB/T 176
水泥细度检验方法筛析法 GB/T 1345
水泥胶砂流动度测定方法 GB/T 2419
水泥胶砂强度检验方法（ISO 法） GB/T 17671
气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积 GB/T 19587
矿物掺合料应用技术规范 GB/T 51003
中国 ISO 标准砂 GSB 08-1337
水工混凝土施工规范 DL/T 5144
水工混凝土配合比设计规程 DL/T 5330

DL / T 5777 — 2018

中华人民共和国电力行业标准

水工混凝土掺用硅粉技术规范

DL / T 5777 — 2018

条 文 说 明

目 次

编制说明 17

1 总则 19

2 术语 22

3 硅粉技术要求..... 24

4 水工混凝土掺用硅粉的技术要求 42

5 掺硅粉混凝土的质量控制和检查 62

编制说明

硅粉是铁合金工业的副产品，具有颗粒细小、比表面积大、 SiO_2 纯度高、火山灰活性强等物理化学特点，混凝土中掺入适量硅粉可显著改善混凝土粘附性能和凝聚性，起到明显的密实增强效果，同时还可以有效提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀、抗冲磨、抗冻以及碱骨料反应抑制效果。近几年，硅粉混凝土较广泛应用在水电水利工程抗冲耐磨混凝土和喷射混凝土中，为适应我国水电水利工程建设需要，亟待制定电力行业水工混凝土用硅粉技术规范，规范硅粉的技术要求和试验方法，以指导工程应用，促进水工混凝土技术进步。本标准是根据《国家能源局关于下达 2014 年第一批行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2014〕169 号）和电力行业标准项目合同《水工混凝土用硅粉技术规范》的要求制定，属水电水利行业推荐性标准。

根据《工程建设标准编写规定》要求，本标准以水工混凝土用硅粉的研究成果为基础，结合硅粉在工程中应用的成功经验，并参照加拿大标准《辅助胶凝材料（Supplementary cementing materials）》AN/CSA- A23.5，美国混凝土学会《混凝土应用硅粉导则（Guide for the use of silica fume in concrete）》ACI 234R，美国材料试验协会标准《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范（Standard specification for silica fume for use in hydraulic - cement concrete and mortar）》ASTM C1240，以及欧洲标准《用于混凝土的硅粉（Silica fume for concrete）》EN 13263-1、澳大利亚标准《辅助胶凝材料 第 3 部分：无定形二氧化硅（Supplementary cementitious materials Part 3: amorphous silica）》AS 3582.3—1994、巴西标准《混凝土、砂浆与净浆 中波特兰水泥用硅粉 第 2 部

分：化学测试方法（Silica fume for use with portland cement in concrete, mortar and paste-Part 2: chemical test methods）》NBR 13956—1997、日本标准《混凝土用硅粉（Silica fume for use in concrete）》JIS A 6207: 2000 和我国水利部《水工混凝土硅粉品质标准暂行规定》（1991）、国家标准《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736—2017、《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236、《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 等相关技术标准制定。

制定工作由电力行业水电施工标准化技术委员会归口，长江水利委员会长江科学院负责起草，中国长江三峡集团公司中国、武汉大学水利水电学院、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司参与编制。标准编制组于 2014 年 1 月成立，经过文献调研、大纲编制、专题调研、补充试验，以及征求意见稿的编写、意见征集与修订、送审稿的审查，于 2017 年 9 月完成报批稿。

1 总 则

硅粉具有颗粒细小、比表面积大、二氧化硅纯度高、火山灰活性强等物理化学特点，把硅粉作为掺和料加入混凝土中，可显著改善混凝土黏附性能和凝聚性、提高混凝土强度以及抗硫酸盐侵蚀和抗冻融性能。硅粉在混凝土和砂浆中的应用有超过 60 年的历史。1946 年，美国人 James W. Sharp 在其专利（US2410954）中提到使用硅粉改善水泥砂浆的性能。1952 年基于挪威科技大学 Bernhardt 教授的研究成果，首次试验性地使用了硅粉混凝土。其后，铁合金工业发达的北欧国家对硅粉混凝土开展了广泛的研究，并于 1970 年代正式将硅粉用于港口码头、北海油田、地下矿井等实际工程。1974 年挪威埃肯公司研制成功炉体粉尘过滤技术用于收集硅粉。1979 年以后，冰岛所有水泥均掺有 6%~7% 的硅粉，以抵抗潜在的碱骨料反应破坏。1981 年硅粉资源丰富的加拿大魁北克水泥厂开始生产掺加硅粉的复合水泥用于预拌混凝土。1983 年美国陆军工程师兵团首次使用将硅粉用于混凝土中。1985 年英国开始在工程中使用硅灰以获得能够抗化学侵蚀的高强混凝土。我国 1985 年在四川渔子溪二级电站中试用了硅粉混凝土，1986 年将硅粉砂浆应用于葛洲坝船闸的修补和蓄水池的防渗，其后很多大坝溢流面采用硅粉配制的抗冲磨混凝土抵抗高速水流的冲刷。

为推动硅粉的应用，各国纷纷制定了硅粉复合水泥或混凝土应用硅粉技术规范。1977 年发布的挪威水泥标准《波特兰水泥：质量要求、包装和试验方法（Portlandsement - Kvalitetskrav, paknings- og prøvetakingsregler）》NS 3050 允许在复合水泥的生产中掺加硅粉；1978 年出版的挪威混凝土标准《混凝土—材料、施工和控制（Betongkonstruksjoner - materialer, utførelse og

kontroll)) NS 3474 允许在混凝土中直接掺加硅粉, 掺量最多可达到 8%~10%。1986 年加拿大标准《辅助胶凝材料 (Supplementary cementing materials)》CAN/CSA-A23.5 首次提出了硅粉作为混凝土掺和料使用的品质要求、试验方法和使用指南, 规定硅粉中的二氧化硅含量不少于 85%, 7d 龄期加速养护强度活性指数不低于 85%, 在硅粉的应用历史上是一个重要的里程碑。美国混凝土学会 ACI 于 1987 年提交了混凝土应用硅粉的技术报告《混凝土中硅粉的应用 (Use of silica fume in concrete)》ACI 226.2R, 现在的最新版本是《混凝土中硅粉使用指南 (Guide for the use of silica fume in concrete)》ACI 234R-06, 美国首个关于混凝土中使用硅粉的标准是 1991 年 AASHTO 采纳的《用于混凝土和砂浆的微硅粉技术规范 (Standard specification for microsilica for use in concrete and mortar)》AASHTO M 307-91, 此后, ASTM 于 1993 年发布了其关于硅粉标准的第一版《水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范 (Standard specification for silica fume for use in hydraulic-cement concrete and mortar)》ASTM C1240-93, 2014 年出版了最新的修订版。欧洲最早的硅粉标准是挪威 1992 年发布的《用于混凝土的硅粉—定义与要求 (Silica fume for concrete - definitions and requirements)》NS 3045: 1992 和法国的《混凝土用矿物外加剂—硅粉 (Additions for concrete - silica fumes)》NF P18-502: 1992, 欧洲标准委员会 2005 年发布了统一的标准《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1, 被所有欧盟国家采纳。此外, 澳大利亚 1994 年发布了《辅助胶凝材料 第 3 部分: 无定形二氧化硅 (Supplementary cementitious materials Part 3: amorphous silica)》AS 3582.3—1994, 巴西 1997 年发布了《混凝土、砂浆与净浆 中波特兰水泥用硅粉 第 2 部分: 化学测试方法 (Silica fume for use with portland cement in concrete, mortar and paste - Part 2: chemical test methods)》NBR 13956—1997, 日本 2000 年发布了《混凝土用硅粉 (Silica fume for use in concrete)》

JIS A 6207: 2000。

我国水利部水规总院于 1991 年以水规科（1991）10 号文的形式发布了《水工混凝土硅粉品质标准暂行规定》，标准基本参照《辅助胶凝材料（Supplementary cementing materials）》CAN/CSA-A23.5 对硅粉品质进行了规定，要求硅粉二氧化硅含量不少于 85%，7d 龄期加速养护活性指数不低于 90%；随后，交通行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275—2000 附录 A 基本参照了《水工混凝土硅粉品质标准暂行规定》。国家标准《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736—2017 将硅灰作为矿物外加剂之一列出了其主要技术指标及要求，包括烧失量、氯离子含量、二氧化硅含量、比表面积、需水量比及 28d 活性指数等。国家标准《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236—2007，根据二氧化硅含量将硅粉细分为 SF85、SF88、SF90、SF93 和 SF96 共五个等级。《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003—2014 在《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 基础上对硅粉（灰）的品质指标进行了规定。

尽管硅粉在我国应用与推广都取得了较大进步，也制定了相关的产品与应用技术标准，但针对硅粉用作水工混凝土掺和料，特别是在配制混凝土强度要求较高、有抗冲磨抗空蚀要求的混凝土，以及用于水工建筑物喷射、修补与抑制骨料碱活性方面，尚未制定针对性的技术标准，影响了硅粉在水利水电工程中的推广应用。为了导并规范硅粉在水工混凝土中的推广和应用，在总结已有成功经验的基础上制定本规范。

2 术 语

2.0.1 本条规定综合考虑了硅粉的生产工艺、活性成分及品质特性，参照了国内外多个标准，明确了硅粉的定义。

《水工混凝土硅粉品质标准暂行规定》(以下简称《暂行规定》)中，硅粉的定义是在冶炼硅铁合金或工业硅时，通过烟道排出的硅蒸气经收尘装置收集而得的粉尘。

《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 中，将硅粉定义为在冶炼硅铁合金或工业硅时，通过烟道排出的硅蒸气氧化后，经收尘器收集得到的以无定形二氧化硅为主要成分的产品。

《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236，综合了《暂行规定》中对硅粉的定义，将其定义为硅铁和工业硅等生产中，通过电炉的眼罩收集的含硅气体氧化凝聚后，经干法收尘装置收集的二氧化硅微粉，简称二氧化硅微粉（俗称“硅灰”）。

《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 中，将硅粉定义为在冶炼硅铁合金或工业硅时，通过烟道排出的粉尘，经收集得到的以无定形二氧化硅为主要成分的粉体材料。

《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 中对硅粉的定义与《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 类似，即从冶炼硅铁合金或工业硅时通过烟道排出的粉尘，经收集得到的以无定形二氧化硅为主要成分的粉体材料。

2015 年更新的美国标准《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范 (Standard specification for silica fume for use in hydraulic-cement concrete and mortar)》ASTM C1240 将硅粉定义为：very fine pozzolanic material, composed mostly of amorphous silica produced by electric arc furnace as a by-product of the

production of elemental silicon or ferro-silicon alloys (also known as condensed silica fume and microsilica), 即硅粉是电弧炉冶炼金属硅或硅铁合金时产生的一种副产品, 是一种以无定形二氧化硅为主要成分的超细火山灰质材料 (也俗称硅灰或微硅粉)。

基于上述几个标准, 本规范综合考虑了硅粉的产生、组成及活性特点, 将其定义为: 采用电弧炉冶炼工业硅或硅铁合金时, 从烟道气体中收集的以无定形二氧化硅为主要成分的超细火山灰质材料。

3 硅粉技术要求

3.1.1 本条规定是基于我国硅粉生产与应用现状，并参照《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 和《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范（Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar）》ASTM C1240 的相关规定制定。

（1）二氧化硅含量。硅粉的主要成分是二氧化硅，一般占90%左右，绝大部分是无定形或玻璃态的，其他成分含量都较少。二氧化硅（ SiO_2 ）的量是衡量硅粉品质高低的关键指标，直接关系硅粉的火山灰活性及其掺入混凝土后的性能。国内外部分地区硅粉的化学成分见表1。

表1 国内外部分地区硅粉的化学成分统计表 (%)

地区	各地区硅粉的化学成分含量							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	C	R_2O	Loss
贵州遵义	92.40	0.80	1.10	0.50	1.10	1.00	0.30	2.2
青海西宁	90.09	0.99	2.01	0.81	1.17	1.00	0.45	2.95
河北唐山	92.16	0.44	0.27	0.94	1.37	1.00	0.99	1.63
甘肃	94.72	1.05	0.73	0.75	0.29	0.27	0.62	2.60
宁夏	93.57	0.43	0.53	0.28	0.73	1.19	1.05	3.02
内蒙古	92.75	0.28	0.59	0.23	0.89	1.30	1.52	3.26
贵州	94.70	0.60	0.10	0.20	0.87	1.80	0.78	2.96
挪威埃肯	88~98	<2.2	<2.2	—	<2.0	<3.45	—	—
日本某厂	89.59	1.38	2.04	0.49	0.70	1.94	2.00	—
加拿大某厂	90.3~ 92.4	0.54~ 0.61	3.86~ 4.54	0.7~ 0.83	0.41~ 0.52	0.88~ 0.98	—	—

本规范适用于冶炼工业硅或硅铁合金过程中收集到的超细硅粉材料，不同的硅铁合金冶炼厂，收集到的硅粉品质之间也存在一定差异。当生产合金的种类或原材料发生变化时，生产收集到的硅粉的化学成分也发生变化。合金中 Si 的含量较高时，所生产出的硅粉也具有比较高的二氧化硅含量。由硅金属和 75 硅铁（FeSi75，指硅含量为 75%左右）生产厂回收的硅粉，二氧化硅含量在 85%以上，火山灰活性高，在混凝土中使用效果显著，而由 SiMn、CaSi 及 50 硅铁（FeSi50，指硅含量为 50%左右）生产厂回收的硅粉，二氧化硅含量较低，掺在混凝土中效果不明显。一般生产 1t 硅金属，约排放 0.6t 硅粉，生产 1tFeSi75 约排放 0.2t~0.45t 硅粉。

不同种类硅粉的化学成分如表 2 所示。结合表 1 和表 2 可知，不同合金冶炼厂收集到的硅粉中二氧化硅含量基本都在 85%以上。值得注意的是，并不是所有的工厂都按不同类型分别收尘，如果某工厂生产几种硅合金，回收的硅粉为混合硅粉，二氧化硅含量不定，使用时应特别慎重。

表 2 不同硅铁合金冶炼厂收集到的硅粉的化学成分 （%）

成分名称	不同种类硅粉的化学成分含量				
	Si	FeSi90	FeSi75	Si+FeSi75	FeSi50
SiO ₂	94~98	90~96	86~90	90	84.1
Fe ₂ O ₃	0.02~0.15	0.2~0.8	0.3~5.0	2.9	8.0
Al ₂ O ₃	0.1~0.4	0.5~3.0	0.2~1.7	1.0	0.8
CaO	0.1~0.3	0.1~0.5	0.2~0.5	0.1	1.0
MgO	0.2~0.9	0.5~1.5	1.0~3.5	0.2	0.8
Na ₂ O	0.1~0.4	0.2~0.7	0.3~1.8	0.9	—
K ₂ O	0.2~0.7	0.4~1.0	0.5~3.5	1.3	—
C	0.2~1.3	0.5~1.4	0.8~2.3	0.6	1.8
S	0.1~0.3	0.1~0.4	0.2~0.4	0.1	—

续表 2

成分名称	不同种类硅粉的化学成分含量				
	Si	FeSi90	FeSi75	Si+FeSi75	FeSi50
MnO	0.1	0.1~0.2	0~0.2	—	—
Loss	0.8~1.5	0.7~2.5	2.0~4.0	—	3.9

对比国内外技术标准对硅粉品质指标的技术要求（如表 3 所示），美国《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范（Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar）》ASTM C1240、欧洲标准《用于混凝土的硅粉（Silica fume for concrete）》EN 13263-1、加拿大标准《辅助胶凝材料（Supplementary cementing materials）》AN/CSA- A23.5、日本标准《混凝土用硅粉（Silica fume for use in concrete）》JIS A 6207、巴西标准《混凝土、砂浆与净浆 中波特兰水泥用硅粉 第 2 部分：化学测试方法（Silica fume for use with portland cement in concrete, mortar and paste-Part 2: chemical test methods）》NBR 13956 以及韩国标准 KSF2567、印度标准，均要求硅粉中二氧化硅含量不得低于 85%。

表 3 国内外标准中硅粉品质指标对比

品质指标	美国	欧洲	加拿大	日本	中国	巴西	韩国	印度
	ASTM C1240	EN 13263-1	CAN/CSA A23.5	JIS A6207	GB/T 18736	NBR 13956	KSF 2567	India
SiO ₂ 含量 (%)	≥85	≥85	≥85	≥85	≥85	≥85	≥85	≥85
SO ₃ 含量 (%)	—	≤2.0	≤1.0	≤3.0	—	—	≤3.0	—
Cl ⁻ 含量 (%)	—	≤0.3	—	≤0.1	≤0.2	—	≤0.3	—
f—CaO 含量 (%)	—	≤1.0	—	≤1.0	—	—	—	—

续表 3

品质指标		美国	欧洲	加拿大	日本	中国	巴西	韩国	印度
		ASTM C1240	EN 13263-1	CAN/CSA A23.5	JIS A6207	GB/T 18736	NBR 13956	KSF 2567	India
MgO 含量 (%)		—	—	—	≤5.0	—	—	≤5.0	—
可溶性碱 (Na ₂ O 量) (%)		—	—	—	—	—	≤1.5	—	≤1.5
含水率 (%)		≤3.0	≤4.0	≤5.0	≤5.0	≤3.0	≤3.0	—	≤3.0
烧失量 (%)		≤6.0	≤4.0	≤6.0	≤5.0	≤6.0	≤6.0	≤5.0	≤5.0
比表面积 (m ² /g)		≥15	15~35	—	≥15	≥15	—	≥15	—
活性指数 (%)	7d	≥105 (加速养护)	—	—	≥95 (标养)	—	—	—	—
	28d	—	—	—	≥105 (标养)	≥85 (标养)	—	—	—
细度 (45μm 筛余) (%)		≤10	—	—	—	—	≤10	≤5.0	≤10
压蒸膨胀率 (%)		—	—	—	—	—	—	—	—
需水量比 (%)		—	—	—	—	≤125	—	—	—

国标《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 根据二氧化硅含量将硅粉划分为 5 个牌号, 即 SF96、SF93、SF90、SF88、SF85, 其中二氧化硅含量分别不得低于 96.0%、93.0%、90.0%、88.0% 和 85.0%。国标《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 对主要用于配置高强、高性能混凝土的硅粉做了技术要求, 要求硅粉中二氧化硅含量不得低于 85%。

硅粉中的二氧化硅大部分都是无定形的二氧化硅, 掺入水泥混凝土中与水泥水化产物 Ca(OH)₂ 结合, 生成水化硅酸钙凝胶,

并析出新的非常稳定的 C-S-H 晶体，减少了大晶格的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石的数量，这就是通常所指的硅粉的火山灰效应。二氧化硅含量的高低决定了硅粉的火山灰活性高低，也直接影响掺硅粉混凝土的强度增长。我国水电工程中混凝土应用的硅粉品质普遍较高，如表 4 所示，硅粉的品质基本都是参照《暂行规定》和《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 执行，即硅粉中二氧化硅含量普遍高于 85%，其中活性的二氧化硅（在饱和石灰水中可溶）达 40%以上，具有很高的活性。

鉴于硅粉回收过程中其品质受硅铁合金种类与原材料的影响存在波动，综合考虑硅粉的资源利用率、与国内外标准的一致性以及硅粉品质对混凝土性能的影响，本规范规定硅粉中二氧化硅含量不得低于 85%。

表 4 我国水电工程中混凝土应用硅粉的品质指标

工程名称	使用部位	硅粉品质指标					
		SiO_2 含量 (%)	含水率 (%)	烧失量 (%)	细度 (45 μm 筛余) / 比表面积	SO_3 含量 (%)	活性指数 (%)
金安桥	抗冲磨	91.3	0.50	4.40	—	—	—
宝珠寺	右底孔	94.1	—	1.78	—	0.77	—
小浪底	中闸室	92.5	0.47	3.62	1.25%/23800~24900 m^2/kg	—	115
瀑布沟	泄洪部位	93.8	1.1	3.1	15100 m^2/kg	0.83	114
东风	泄洪洞	92.4~94.0	—	2.15	21100 m^2/kg	0.1~0.50	—
凤尾河	大坝	87.6	1.9	3.80	9.3%/23100 m^2/kg	—	97
漫湾	泄洪洞	88.5	—	—	<10%	—	—
岩滩	抗冲磨	92.7	2.0	3.40	25000~30000 m^2/kg	0.56	—
鲁基厂	冲沙闸、泄洪闸	97.2	0.8	1.75	—	—	87

续表 4

工程名称	使用部位	硅粉品质指标					
		SiO ₂ 含量 (%)	含水率 (%)	烧失量 (%)	细度 (45μm 筛余) /比表面积	SO ₃ 含量 (%)	活性指数 (%)
水口	船闸	92.8	—	—	—	—	—
长河坝	抗冲磨	94.4	—	0.75	19400m ² /kg	—	98
米兰河山口水库	抗冲磨	—	0.2	—	16700m ² /kg	—	131
雅上流域	抑制碱骨料	88.4	—	3.2	—	0.7	—

(2) 烧失量。目前国内外的工业硅生产，大都是以硅石为原料，碳质原料为还原剂，用电炉进行熔炼。硅粉的二氧化硅含量越高、品质越好，碳等其他有害杂质含量越低，烧失量越小。

硅粉是纳米级颗粒，掺入胶凝体系时由于超细颗粒的吸附效应会对混凝土的含气量产生一定影响。此外，硅粉中含有的碳也会吸附部分引气剂，为降低硅粉对混凝土含气量的影响程度，本规范对硅粉的烧失量进行了规定。

根据表 1、表 2 和表 4 国内外的硅粉生产与应用现状，硅粉的烧失量通常在 1.0%~4.5%之间；结合表 3 中国内外标准给出的限值，本规范明确要求硅粉的烧失量不得超过 5%。

(3) 细度。细度是影响硅粉的形态效应、微集料效应与火山灰效应的重要因素之一。硅粉的颗粒粒径越小，火山灰活性越高，但同时需水量比也越大。

硅粉在冷凝时的气、液、固相变的过程中受表面张力的作用，形成大小不一的圆球状，且表面较为光滑，有些可能是两个或多个圆球粒黏凝在一起。粉煤灰与硅粉的颗粒形貌对比见图 1，清晰可见硅粉颗粒比粉煤灰颗粒要细得多，且硅粉出现团聚现象。

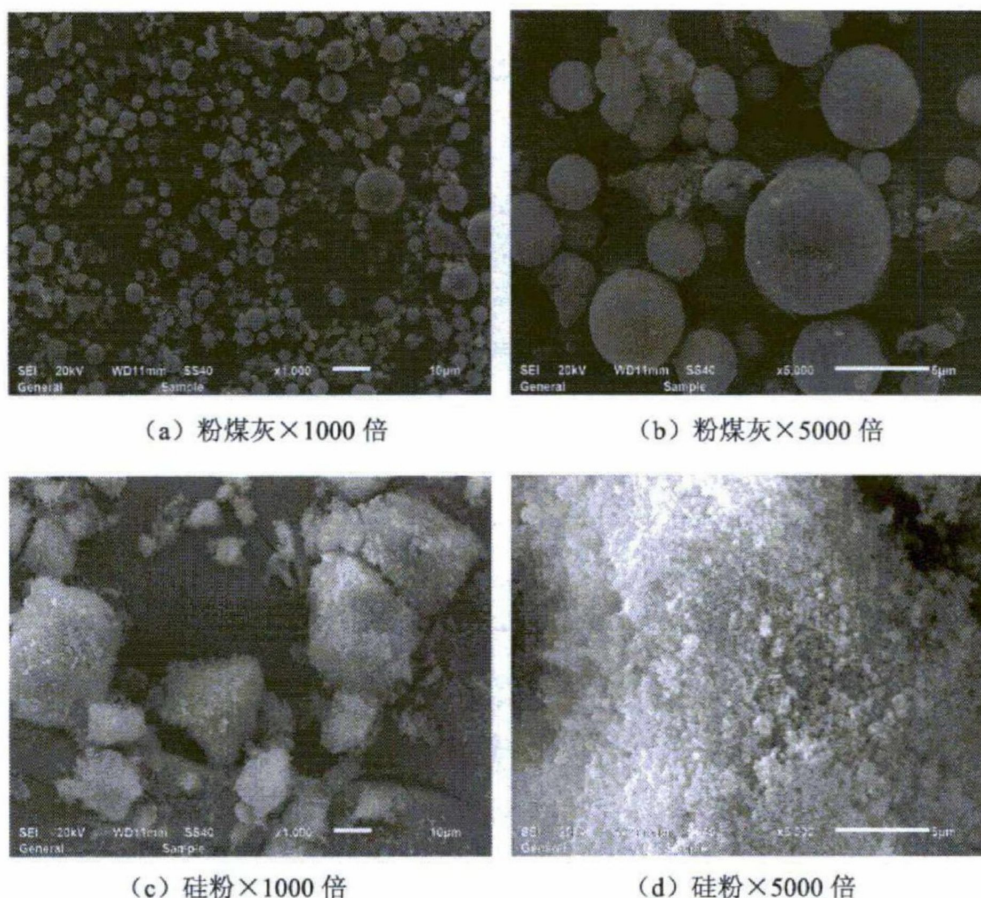


图1 粉煤灰与硅粉的 SEM 图片

硅粉是超细粉末，颗粒极其细微，粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒占比 80% 以上，平均粒径 $0.1\mu\text{m}\sim 0.15\mu\text{m}$ ，仅是水泥颗粒直径的 1/100，其比表面积可达 $25000\text{m}^2/\text{kg}\sim 30000\text{m}^2/\text{kg}$ ，是水泥比表面积的 50 倍~100 倍。硅粉的粒度分布与制造方法、电弧炉的操作条件等有关。

结合激光粒度分析仪，对 LT 生产的硅粉（其二氧化硅含量为 88.4%）进行颗粒粒径分析，试验结果见表 5 和图 2，其中 D10 表示在累计粒度分布曲线中，10% 体积的颗粒直径小于该值，单位为 μm ；D50、D90 与此类似。D(4, 3) 表示体积平均粒径，单位为 μm 。试验结果表明，硅粉中粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒占比达到 37.8%。而 SC 硅粉的粒度分析结果（见表 6）表明，该硅粉粒径小于 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒占比高达 89.4%。

表 5 LT 硅粉的激光粒度分析试验结果（干法分散）

D (4, 3) (μm)	累积分布（以体积百分比计算，μm）（%）											特征参数 （以体积计算） (μm)		
	<1	<3	<5	<8	<16	<24	<32	<45	<63	<80	<100	D10	D50	D90
3.1	37.8	63.3	79.3	91.8	99.0	99.3	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	0.294	1.66	7.29

表 6 SC 硅粉的激光粒度分析试验结果

比表面积 (m^2/g)	45 μm 筛余 (%)	累积分布（以体积百分比计算， μm ）（%）				
		<0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1.0	1.0~5.0
22.54	0.93	65.8	23.6	4.4	3.7	2.5

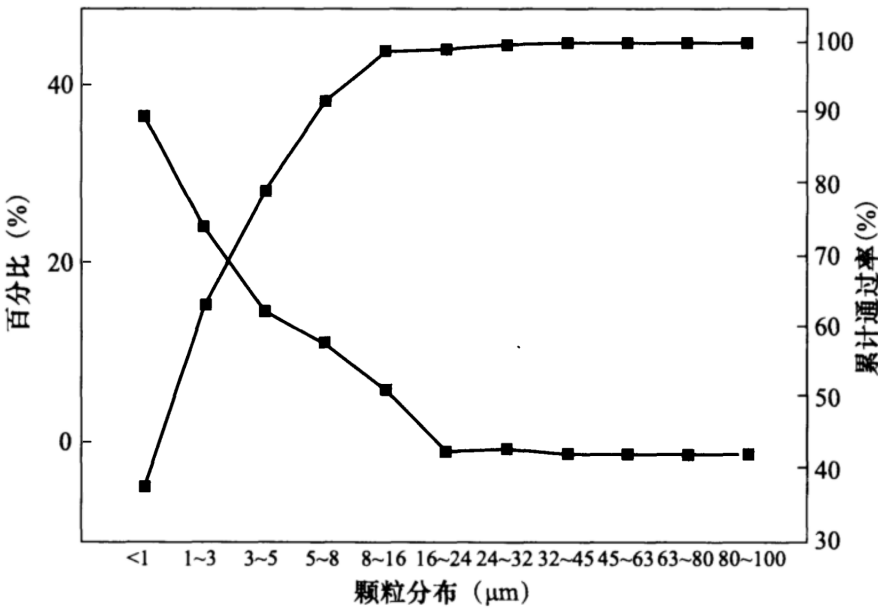


图 2 硅粉颗粒激光粒度分析试验结果

硅粉颗粒容易团聚，在确定其细度时一般采用水筛法，筛孔径 45 μm ，取 10g 硅粉，在 0.1MPa 水压喷头下水筛，得出筛余量。唐山、北京、上海硅粉，水筛 15min，筛余不超过 3%。随着硅粉品质的提高，筛余不断减小，《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 对不同品质的硅粉的细度进行了规定，其中 SF85 硅粉的 45 μm 筛余不得超过 10%，如表 7 所示。

表 7 不同品质硅粉的 45 μ m 筛余技术要求

标准	筛余 (45 μ m) (%)				
	SF96	SF93	SF90	SF88	SF85
GB/T 21236	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 3.5	≤ 5.0	≤ 10.0

美国标准《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范 (Standard specification for silica fume for use in hydraulic-cement concrete and mortar)》ASTM C1240 规定硅粉的细度 (45 μ m 筛余) 参照 ASTM C430 列出的试验方法测定。由于硅粉颗粒比水泥、粉煤灰均要细, 采用该方法进行测试时硅粉颗粒均可以穿过筛孔, 筛余主要是硅粉中的外来杂质; 由于硅粉颗粒极细容易团聚, 因此, 采用该方法测试时需要将筛余中容易分散的硅粉团聚颗粒和外来杂质区分开来。

资料显示, 美国肯塔基州铁合金厂的硅粉, 用 45 μ m 水筛法进行细度试验 (30 个样品), 平均筛余 3.7% (最大值为 16%)。根据试验, 普通硅粉的筛余为 1%~15%; 加拿大、美国、欧洲和我国标准规定筛余小于 10%。

比表面积也是表征硅粉细度的参数之一, 是衡量硅粉火山灰活性高低的重要指标。硅粉的颗粒越细、比表面积越大, 参与化学反应时接触面积越大, 反应活性越高。

测量粉体比表面积常用透气法 (Blaine) 和氮吸附法 (BET), 不同的方法有不同的适用范围, 二者相差很大。例如水泥常用透气法, 其比表面积为 300 m²/kg ~400 m²/kg, 硅粉颗粒小、比表面积大, 用氮吸附法测比表面积更为准确, 大多数资料报道的硅粉比表面积, 都是用氮吸附方法得到的。《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736、《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 和《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范 (Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar)》ASTM C1240 也均推荐采用氮吸附法测定硅粉的比表面积。

采用氮吸附法测定不同冶炼厂收集到的硅粉，其比表面积约为 $15000\text{ m}^2/\text{kg}\sim 25000\text{ m}^2/\text{kg}$ ，平均值为 $20000\text{ m}^2/\text{kg}$ 左右，几种硅粉的比表面积与平均粒径如表 8 所示。根据经验，硅粉的比表面积和平均粒径有如下关系：

$$A=B/DR$$

式中： A ——比表面积（ m^2/kg ）；
 B ——常数（一般为 6 左右）；
 R ——硅粉密度（ kg/m^3 ）；
 D ——硅粉平均粒径（ μm ）。

表 8 不同冶炼厂生产的硅粉的比表面积与平均粒径

硅粉	比表面积计算值 (m^2/kg)	比表面积测试值 (BET) (m^2/kg)	平均粒径 (μm)
Si 系	20000	18500	0.18
FeCrSi 系	16000	—	0.18
FeSi50	15000	—	0.21
FeSi75	13000	15000	0.26

根据 Aitcin 等人推算的粒径分布结果如图 3 所示。

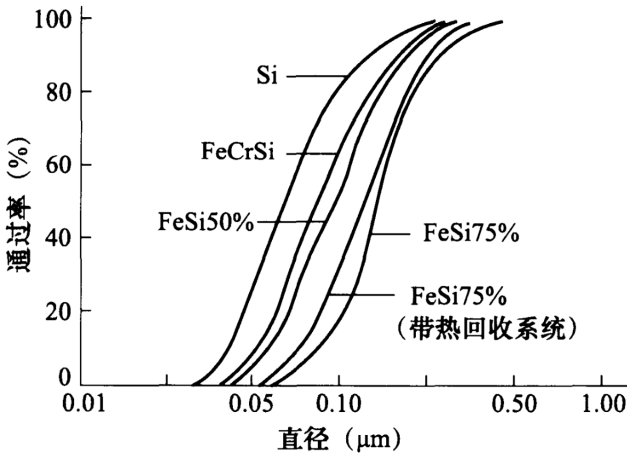


图 3 几种硅粉的粒径分布

硅粉在水电工程中主要用于配制高强高性能抗冲耐磨混凝土，用于泄洪洞、消力池、水垫塘等易受冲磨、空蚀部位，混凝

土的强度等级相对较高(C40 以上),纵观我国水电工程应用实践,用于配制水工混凝土的硅粉比表面积均超过 $15000\text{m}^2/\text{kg}$,大多数在 $20000\text{m}^2/\text{kg}$ 以上(如表 4 所示)。

综合考虑硅粉的生产工艺以及硅粉在水电工程中的应用现状,参考国内外标准对硅粉的品质指标技术要求,本规范规定硅粉的 $45\mu\text{m}$ 筛余按不超过 10%、比表面积不低于 $15000\text{m}^2/\text{kg}$ 控制。

(4) 需水量比。需水量比与细度、烧失量等参数密切相关,能较为全面地反映硅粉的品质特性,是选用硅粉的关键控制指标。硅粉颗粒越细、烧失量越高,则需水量比越大。

硅粉超细颗粒掺入胶凝体系时,需水量比与混凝土拌和物的流动性、单位用水量直接相关;需水量比越大,达到相同流动性时混凝土的单位用水量越高。

需水量比还与硅粉的掺量有关,硅粉掺量越高,需水量比也越大(见表 9)。为了规范硅粉的需水量比试验方法,国内各相关标准基本都是参考《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736 规定执行,即以硅粉掺量为 10%作为基准制备胶砂,用水量以试验胶砂流动度达到(基准胶砂流动度 $\pm 5\text{mm}$)控制。《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736、《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 和《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 均要求硅粉的需水量比不得超过 125%。

表 9 硅粉的需水量比试验结果 (%)

编号	水泥掺量	硅粉掺量	需水量比
1	97	3	102.1
2	95	5	105.7
3	92	8	113.7
4	90	10	116.2
5	88	12	118.5

(5) 活性指数。活性指数是指特定龄期时掺硅粉试验胶砂与

基准胶砂的抗压强度比。活性指数是反映硅粉活性高低的特征参数，也是决定硅粉掺入混凝土后对其性能发展的重要影响参数。

不同标准中活性指数的测试龄期、试件的养护条件存在一定差异。日本标准《混凝土用硅粉 (Silica fume for use in concrete)》JIS A 6207 对 7d、28d 的活性指数均进行了规定，要求其分别不得低于 95% 和 105%，且明确测试试件处于标准养护条件下。该标准的基准胶砂与试验胶砂用水量相同，均为 225mL，试验胶砂中硅粉掺量为 10%，该标准未说明试验胶砂是否需要掺入高效减水剂使其流动度与基准胶砂相同。

欧洲标准《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1 规定，掺 10% 硅粉胶砂与基准胶砂的 28d 抗压强度比不得低于 100%。为了使试验胶砂达到与基准胶砂相同的流动度，掺硅粉胶砂需要掺入一定量的符合 EN 934-2 要求的高效减水剂。

《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范 (Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar)》ASTM C1240 规定，硅粉的 7d 活性指数不得低于 105%，掺硅粉胶砂试件的流动度与基准胶砂流动度相同，即达到根据 ASTM C1437 方法测得的 100%~115% 的流动度，为此，掺硅粉胶砂中通常需要掺入一定量的符合 ASTM C494/494M 中 F 类的高效减水剂；成型试件先置于温度为 (23℃±2℃)、相对湿度不低于 95% 的养护室中初始养护 24h，然后再放入温度为 (65℃±2℃) 的密封玻璃容器内养护 6d。根据 ASTM C109/C109M 试验方法，进行基准胶砂与掺硅粉胶砂的 7d 抗压强度试验，每 3 个试件为一组。

国内标准中除《暂行规定》中要求硅粉的活性指数不低于 90% 以外，《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736、《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236、《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 等其他标准均要求硅粉的活性指数不低于 85%，上述这些标准中列出的活性指数的测试龄期均为 28d 且试件的养护条件为

标准养护。值得注意的是，我国标准中列出的活性指数的测试方法与国外标准存在的最大差异是试验胶砂的用水量与养护条件。各国标准均规定掺硅粉胶砂的用水量与基准胶砂相同，通常需要掺入一定量的高效减水剂使试验胶砂流动度与基准胶砂相同，在相同水胶比下比较两者的抗压强度。我国标准中列出的活性指数测试方法规定，基准胶砂的用水量为 225mL，掺硅粉的试验胶砂的用水量按其胶砂流动度达到（基准胶砂流动度值 ± 5 mm）控制，即试验胶砂的用水量高于基准胶砂、水胶比大于基准胶砂（见表 10）。此外，《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范（Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar）》ASTM C1240 规定活性指数测试的试件养护条件为加速养护，以加速养护 7d 抗压强度比值为评判依据。上述两方面的差异导致国标中硅粉 28d 活性指数值与其他国家标准不同。

表 10 流动度相当条件下水泥胶砂的抗压强度

名称	流动度 (mm)	用水量 (g)	水胶比	28d 抗压强度 (MPa)	28d 抗压强度比 (%)
中热水泥 1	217.0	225	0.50	54.2	—
中热 1+10%硅粉 1	218.5	270	0.60	48.4	89
中热 1+10%硅粉 2	217.1	280	0.62	46.8	86
中热 1+10%硅粉 3	216.5	290	0.64	42.6	79
中热水泥 2	217.5	225	0.50	56.1	—
中热 2+10%硅粉 1	215.5	270	0.60	52.5	94
中热 2+10%硅粉 2	214.5	280	0.62	47.5	85
中热 2+10%硅粉 3	215.5	290	0.64	44.7	80

本规范在参照各国标准基础上，改进了国标硅粉活性指数测试方法，规定试验胶砂中硅粉掺量为 10%、保持试验胶砂与基准胶砂的水胶比相同，测得两者的 28d 抗压强度比，具体试验方法见附录 B。尽管硅粉需水量比较高，掺入 10%硅粉后试验胶砂的

流动度变小，但从实际拌和效果看，胶砂仍然可以成型，且可以消除外掺高效减水剂带来的适应性不良等问题，见表 11。

表 11 同水胶比条件下水泥胶砂的抗压强度

名称	水胶比	用水量 (g)	流动度 (mm)	28d 抗压强度 (MPa)	28d 抗压强度比 (%)
中热水泥 1	0.50	225	217.0	54.2	—
中热 1+10%硅粉 1	0.50	225	174.0	60.9	112
中热 1+10%硅粉 2	0.50	225	171.0	62.0	114
中热 1+10%硅粉 3	0.50	225	163.0	59.8	110
中热水泥 2	0.50	225	217.5	56.1	—
中热 2+10%硅粉 1	0.50	225	179.5	59.7	106
中热 2+10%硅粉 2	0.50	225	171.0	62.6	112
中热 2+10%硅粉 3	0.50	225	155.5	62.4	111
低热水泥	0.50	225	—	42.2	—
低热+10%硅粉 1	0.50	225	—	52.7	125
低热+10%硅粉 2	0.50	225	—	51.9	123
低热+10%硅粉 3	0.50	225	—	50.6	120
普通水泥	0.50	225	—	48.7	—
普通+10%硅粉 1	0.50	225	—	58.3	120
普通+10%硅粉 2	0.50	225	—	60.6	124
普通+10%硅粉 3	0.50	225	—	58.5	120

对比附录 B 测试方法与国标采用的保持相同流动度、调整用水量的方法可知，由于硅粉的需水量比远高于水泥，当采用相同流动度、调整用水量时，试验胶砂的水胶比通常大于基准胶砂水胶比（0.50），按照硅粉的需水量比为 120% 计算，试验胶砂实际水胶比可能在 0.60 左右（见表 10）。从操作简便性考虑，相同流动度、调整用水量的方法不易于操作和成型。此外，通常水工混

凝土掺用硅粉是用于配制高强抗冲耐磨混凝土，混凝土的配制强度较高、水胶比相对较低，根据我国水电工程抗冲耐磨部位混凝土采用掺硅粉技术方案的推荐施工配合比统计结果，混凝土的水胶比普遍小于 0.40。从工程应用考虑，附录 B 列出的方法更贴近于工程实际。因此，本规范给出了相同水胶比的硅粉的活性指数检测方法。

3.1.2 本条参照《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736、《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 和《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1 等标准的相关规定制定。

(1) 含水率。微硅粉是二氧化硅气体与空气接触氧化后的产物，在生产和保存的过程中应密封隔绝空气。这样才能保证生成的微硅粉的质量，同时也让生产后的微硅粉能够保持得更久。

此外，由于硅粉颗粒粒径通常是纳米级尺寸，掺入混凝土拌和物中可以填充水泥颗粒间隙起到良好的微集料效应，硅粉的高火山灰活性效应还有助于混凝土强度快速增长并改善其耐久性能。因此，为保证硅粉在混凝土拌和物中均匀分散并充分发挥其增强、改善耐久性的作用，硅粉在存储、运输过程中应注意防水、防潮。

参照表 3 中国内外标准中对硅粉含水率的技术要求，本规范规定硅粉中含水率不得超过 3.0%。

(2) 三氧化硫含量。硅粉中三氧化硫 (SO_3) 含量过高可能会产生有害的钙矾石膨胀，为保证工程质量，参照相关标准对硅粉中三氧化硫含量进行了规定。

欧洲标准《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1 要求硅粉中三氧化硫含量不得超过 2.0%；加拿大标准《辅助胶凝材料 (Supplementary cementing materials)》AN/CSA-A23.5 要求不得超过 1.0%，日本《混凝土用硅粉 (Silica fume for use in concrete)》JIS A 6207 和韩国标准 KSF 2567 标准均要求三氧化硫含量不得超过 3.0%；而我国《暂行规定》《高强高性能混凝土用

矿物外加剂》GB/T 18736 和《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 则皆没有对硅粉中三氧化硫含量进行规定。

我国水泥相关标准均对三氧化硫含量进行了限定。《通用硅酸盐水泥》GB 175 规定硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥以及复合硅酸盐水泥中三氧化硫含量均不得超过 3.5%。《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》GB 200 也要求水泥中三氧化硫含量不得超过 3.5%。

《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 对同为火山灰质材料的粉煤灰中的三氧化硫进行了限定，要求其含量不得超过 3.0%。

结合我国硅粉品质特性，并参照国内外相关技术标准，本规范规定硅粉中三氧化硫含量不得超过 3.0%。

(3) 氯离子含量。本条规定参照《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 和《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1 制定。

当硅粉应用于钢筋混凝土时，为防止钢筋发生锈蚀，通常需要限定混凝土中氯离子含量。

欧洲标准《用于混凝土的硅粉 (Silica fume for concrete)》EN 13263-1 规定，根据 EN 196-2 方法测得的硅粉的氯离子含量不得超过 0.3%，当氯离子含量超过 0.1%时，硅粉生产厂商应该明确其特征值上限。

国标《电炉回收二氧化硅微粉》GB/T 21236 对不同牌号的硅粉的氯离子含量也进行了具体规定，详见表 12，即随着硅粉品质的提高，硅粉中氯离子含量不断降低；当硅粉中二氧化硅含量不得低于 85%时，氯离子含量不得超过 0.3%。

表 12 不同品质硅粉的氯离子含量技术要求 (%)

种类	SF96	SF93	SF90	SF88	SF85
筛余 (45μm)	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.2	≤0.3

3.1.3 碱含量

目前我国水利水电工程开发与建设正向江河源头推进，特别是在我国新疆、西藏等地区，受地质条件影响部分工程用骨料具有潜在碱活性，为了充分利用工程开挖料、节约工程成本，不得不采用该种骨料并同时采取有效的碱骨料反应预防措施，其中掺硅粉是较为常用的一种技术方案。

为了降低混凝土发生碱骨料反应风险，不论采取何种抑制方案，均需要严格控制混凝土的总碱量。当采用掺硅粉抑制技术方案时，需要对水泥、粉煤灰、硅粉、骨料、外加剂等混凝土原材料中的可溶性碱含量进行限定。

结合雅砻江中上游某水电工程开展了硅粉可溶性碱试验，具体试验结果见表 13、表 14。

表 13 不同浸泡时间粉煤灰溶出的 Na_2O 和 K_2O 含量
试验结果（80℃水溶液浸泡）

品种	项目	相对含量 (%)	龄 期 (d)					
			7	14	28	60	90	180
TF 硅粉	Na_2O	100	4.8	5.2	6.5	7.2	7.4	7.8
	K_2O	100	1.5	1.7	2.1	2.4	2.4	2.4

表 14 硅粉溶出的 Na_2O 和 K_2O 含量试验结果 (%)（80℃碱溶液浸泡）

品种	项目	含量 (%)	龄期 (d)		相对含量 (%)	龄期 (d)	
			7	14		7	14
LT 硅粉	Na_2O	0.185	0.006	0.026	100	3.2	14.1
	K_2O	0.375	0.044	0.118	100	11.7	31.5

从试验结果可以看出，硅粉在碱溶液浸泡下碱的可溶出率远高于粉煤灰。

因此，当混凝土用骨料具有潜在碱活性且采用掺硅粉作为抑制材料的技术方案时，硅粉的碱含量应由供需双方协商确定。

本条参照 ASTM C618 制定。

硅粉的均匀性对混凝土拌和物及硬化混凝土性能影响很大。《暂行规定》对硅粉的均匀性进行了规定，以密度、细度分别与其均值的偏差作为均匀性控制指标。对于引气混凝土，《水硬性水泥、混凝土和砂浆应用硅粉技术规范（Standard specification for silica fume for use in hydraulic -cement concrete and mortar）》ASTM C1240 基于掺硅粉砂浆的引气剂掺量来控制硅粉的均匀性，具体要求是：掺硅粉砂浆的体积含气量达到 18% 时，引气剂掺量的波动值不得超过前 10 组（若少于 10 组，则以前面试验总量计）平均值的 20%。

鉴于本规范针对的是硅粉本身的均匀性而不是掺入硅粉之后的混凝土，本条规定选择二氧化硅含量与需水量比作为硅粉均匀性控制指标。二氧化硅含量可以直接衡量硅粉的品质并控制杂质的量，需水量比与细度、烧失量等参数密切相关，且需水量比还直接影响胶砂流动性和混凝土单位用水量，在测试硅粉的活性指数时也需要测定需水量比参数。因此，需水量比能较为全面地反映硅粉的品质特性，是硅粉的关键控制指标，将其作为均匀性控制指标之一。由于硅粉用量相对较少，硅粉的均匀性以要求单一样品的二氧化硅含量和需水量比与 10 个样品测值平均值（或当样品数量小于 10 时，所有样品测值平均值）的偏差值不超过 2% 来控制。如某种硅粉二氧化硅含量的平均测值为 90%、需水量比为 120% 时，其二氧化硅含量和需水量比测值分别在（90%±1.8%）和（120%±2.4%）范围内即为均匀。

4 水工混凝土掺用硅粉的技术要求

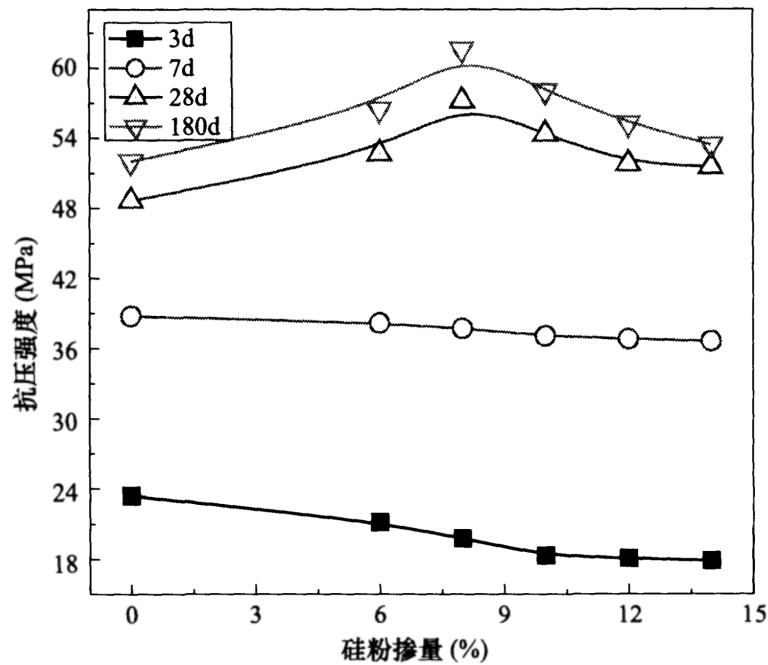
4.0.3 水工混凝土掺用硅粉时，应结合工程使用经验和室内试验结果，确定合理的硅粉掺量。

研究表明，混凝土中掺入适量的硅粉会起到明显的增密增强效果，同时还可以有效提高混凝土的抗硫酸盐、抗冲刷及抗冻和抑制碱骨料反应能力。但硅粉掺量超过一定值后，反而会引起混凝土后期强度降低且收缩大、绝热温升高，拌和时混凝土过于黏稠不利于施工。因此，硅粉掺量应根据结构具体要求控制在一定范围内，结合试验选择合理的硅粉掺量。

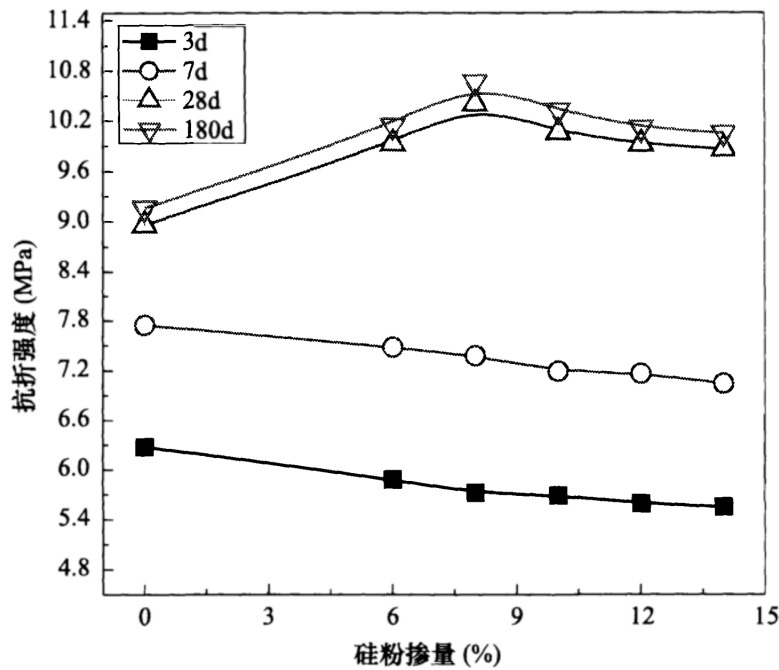
硅粉掺量对水泥胶砂强度与流动度的影响分别见图4和图5所示。从图4中可以看出，硅粉掺入后水泥3d强度降低，且随掺量的增加而逐渐下降，但早期强度增长较快，到7d龄期时掺硅粉水泥抗压强度接近纯水泥抗压强度，养护至28d以后，掺硅粉水泥的强度均超过不掺硅粉的水泥砂浆。值得注意的是，当硅粉掺量超过8%时，水泥的后期强度随硅粉掺量增加而呈现下降的趋势，出现强度倒缩的现象。硅粉掺量增加，胶砂流动度明显降低，且掺量越高、降幅越大，即硅粉的掺量过高会增加浆体的黏稠度，不利于施工。

混凝土中硅粉的掺量通常控制在3%~10%范围内，部分工程采用了硅粉与粉煤灰复掺的技术方案，充分利用硅粉早期活性高、强度增长快和粉煤灰后期火山灰活性发挥、后期强度增幅大的特点，还可以有效降低胶凝体系的水化热，实现复合凝体系的功能协调与时空互补。与此同时，随着混凝土石灰石粉、凝灰岩粉、砂板岩石粉等新型矿物掺和料的开发与应用，也逐步开展了硅粉与石粉复掺的技术方案研究与论证工作，利用硅粉的早期高活性特性弥补石粉混凝土早期强度低、增长缓慢的不足，在粉煤灰、

矿渣粉等优质矿物掺和料紧缺的西部地区，该复掺技术方案具有广阔的应用空间。



(a) 抗压强度与硅粉掺量的关系



(b) 抗折强度与硅粉掺量的关系

图 4 水泥胶砂强度与硅粉掺量的关系

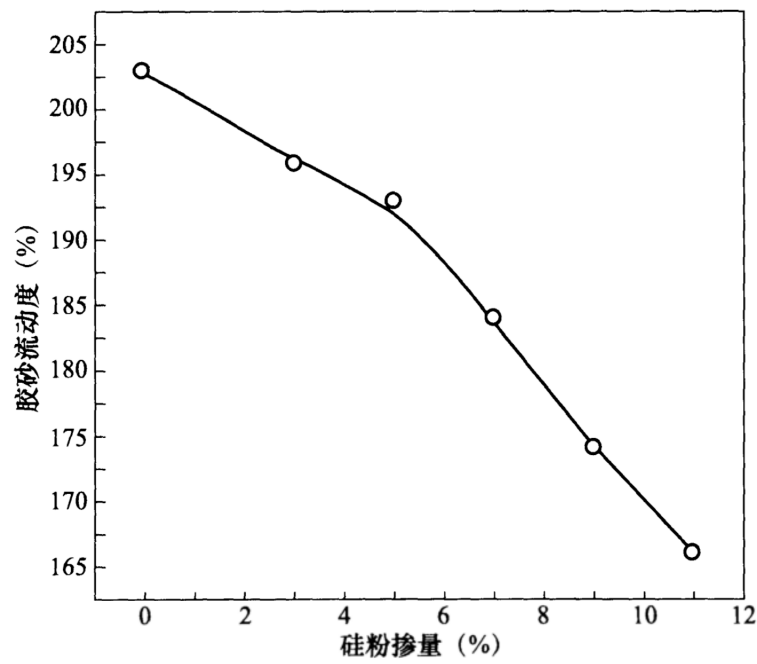


图 5 胶砂流动度与硅粉掺量的关系

图 6 是掺硅粉与掺粉煤灰胶凝体系的水化热对比试验结果。从试验结果可以看出，硅粉等量替代水泥后，由于硅粉强烈的火山灰反应，胶凝系统 3d 和 7d 水化放热增加，高于掺粉煤灰水泥水化热。

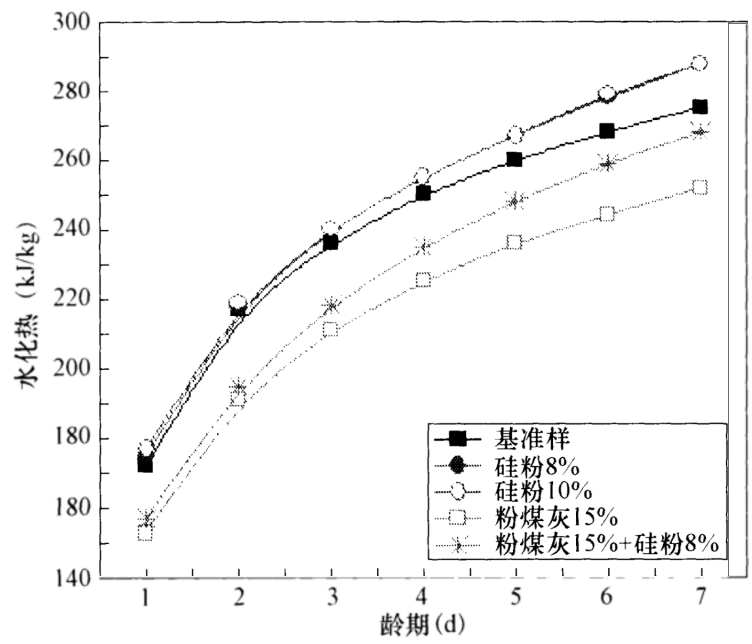


图 6 硅粉对水泥水化热的影响

目前国内已有水利水电工程成功应用硅粉配制高强高性能混凝土，大部分用于泄洪洞、水垫塘、船闸等易遭受冲磨部位的抗冲耐磨混凝土，取得了良好的应用效果。已实践过的工程试验结果均表明，掺硅粉有助于提高混凝土的早期强度，最关键的是可以显著提升混凝土的抗冲耐磨性，特别是可以大面积提升混凝土的抗空蚀作用。

美国陆军工程兵团水道试验站在 1983 年对 Kinzua 坝消力池进行修补时，进行了硅粉混凝土的抗磨蚀试验，试验采用 30cm×12cm 的圆板试件，放入罐内，加钢珠 75 个，加水开动电机，使叶片带动钢珠转动，转速为 1200r/min，模仿含沙水流流旋涡磨蚀混凝土表面，试验连续进行 72h，结果表明石灰岩骨料的硅粉混凝土抗磨蚀性能最好，重量损失只有 2.2%，而普通钢纤维混凝土重量损失达 9.4%。硅粉混凝土的抗气蚀性能比普通混凝土好得多。中国水利水电科学研究院的试验结果表明，硅粉混凝土的抗气蚀能力极强，即使在加空蚀诱导器加速气蚀作用后，硅粉混凝土的失重率也只有 0.58%，仅为普通混凝土气蚀失重的 13%。硅粉混凝土能提高建筑物的抗冲击能力。用 10cm×8cm×40cm 的梁式荷载进行跨中集中荷载冲击试验的结果表明，掺硅粉 10% 的混凝土其抗冲击能力为普通混凝土的 1.43 倍；用冲击仪对 10cm×10cm×10cm 的立方体试件进行冲击试验的结果表明，掺硅粉 15% 的混凝土其抗冲击能力为普通混凝土的 2.2 倍~5.3 倍。

我国部分水电工程应用硅粉技术方案的抗冲磨混凝土主要设计指标与原材料如表 15 所示。

A 水电站水垫塘等抗冲耐磨部位使用了复掺粉煤灰和硅粉的技术方案配置 C₉₀50 混凝土；在厂家推荐掺量范围内（5%~10%）进行硅粉掺量优选试验（见表 16），在满足设计要求的前提下，考虑到施工易裂等因素，确定硅粉掺量 5% 作为施工配合比推荐掺量，混凝土拌和物与性能试验结果见表 17，在实际使用中取得了较好的效果。

表 15 部分水电工程应用硅粉技术方案的抗冲磨混凝土主要设计指标与原材料

工程名称	工程部位	设计指标	水泥	掺和料及 掺量	骨料	外加剂
水布垭	溢洪道和放空洞最大流速 > 39m/s	C40、C50	葛州坝水泥厂 42.5 中热	石门电厂 I 级灰硅粉	灰岩 人工骨料	羧酸高效减水剂 SR3
小浪底	泄洪建筑物孔板洞、排沙洞、明流洞	C70F50W6	525R 普通硅酸盐水泥	II 级灰、硅粉	天然骨料	减水剂 (VZ)、增塑剂 (NN)、缓凝剂 (Retarder)、引气剂 (AER)
瀑布沟	泄洪洞、放空洞及溢洪道部位 (洪水流速达 35m/s ~ 42m/s, 泄洪洞最大流速 36.7m/s)	C ₉₀ 50W6 F100	JH 水泥厂 42.5 中热、JD42.5 普通	广安电厂 I 级灰、硅粉	花岗岩 人工骨料	JM-PCA 聚羧酸减水剂、JM-PCA (IV) 减缩抗裂增强剂、引气剂 AIR202 (部分配比采用)
溪洛渡	水垫塘表层和泄洪洞衬砌	C ₉₀ 60	XH42.5 中热	I 级灰 硅粉	玄武岩 人工骨料	聚羧酸高效减水剂 JM-PCA、ZB-1G 引气剂
大岗山	水垫塘、泄洪洞	C ₉₀ 50F150W10	ES42.5 中热 JH42.5 中热	宣威 I 级灰 硅粉	花岗岩 人工骨料	JM-PCA 聚羧酸减水剂、NOF-AE 引气剂
金安桥	泄洪系统	C ₉₀ 50F150W8	YB42.5 中热	曲靖 I 级灰 硅粉	玄武岩 人工骨料	JM-II 高效减水剂、ZB-1G 引气剂
宝珠寺	右底孔	C60	JY525 中热	硅粉	灰岩 人工骨料	GH ₉ -A 引气剂

续表 15

工程名称	工程部位	设计指标	水泥	掺和料及 掺量	骨料	外加剂
东风	泄洪中孔衬砌（泄洪洞最大流速 36.8m/s~41.0m/s）	C50	SC525 中热	II 级灰、 硅粉	灰岩 人工骨料	FDN 减水剂、木钙引气剂
漫湾	左岸泄洪洞	C30	525 普通硅酸 盐水泥	硅粉	流纹岩 人工骨料	—
李家峡	导流洞和主坝左岸重力 墩	C55	525 中热硅 酸盐水泥	III 级灰、 硅粉	人工骨料	FDN 减水剂、DH ₉ 引气剂
沙溪口	船闸	C ₉₀ 60	早强型 525R 普通硅 酸盐水泥	硅粉	—	FDN 减水剂、松脂皂引气剂
水口	船闸	C ₉₀ 60W8	525 硅酸 盐水泥	福州华能电厂 灰、硅粉	天然骨料	UEA 膨胀剂
五强溪	船闸泄水段修复	C70	52.5 普通 硅酸 盐水泥	硅粉剂 NSF、 钢纤维	人工骨料	—

表 16 A 水电站水垫塘优选硅粉掺量的混凝土配合比及强度试验结果

设计指标	级配	水胶比	用水量 (kg/m ³)	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	抗压强度 (MPa)		
						7d	28d	90d
C ₉₀ 50F150W10	三	0.33	120	15	5	39.2	51.5	60.1
			120	15	7	42.3	56.4	65.5
			120	15	9	44.9	58.3	69.0
	二	0.33	141	15	5	41.6	54.0	61.4
			141	15	7	43.7	57.6	66.2
			141	15	9	46.1	62.3	70.3

B 水电站泄洪洞的最大流速可达 36.7m/s，泄洪建筑部位使用了硅粉进行了混凝土性能比选试验（C₉₀50W6 F100）。基于硅粉与粉煤灰复掺的技术方案，综合比较不同硅粉掺量（3%、5%、8%）时混凝土的性能（见表 18 和表 19），结果表明与掺粉煤灰相比，掺硅粉的混凝土早期强度较高，但后期发展慢，最终获得的强度略高；掺硅粉明显增加混凝土各龄期的干缩值。

C 水电站比较了 AK、FX、YY、LT 四种硅粉对混凝土的性能影响，硅粉掺量控制为 5%。试验结果表明（见表 20），硅粉品种对混凝土抗冲磨强度的影响较显著。

D 水电站开展了复掺粉煤灰与硅粉技术方案配制高强混凝土的研究（见表 21），其中粉煤灰掺量 20%、硅粉掺量 5%。从试验结果看，水胶比为 0.45、0.40、0.35 和 0.30 时，可以分别配制出 C₉₀40、C40、C₉₀50、C50 抗冲耐磨混凝土。

E 水库采用天然骨料比较了单掺矿渣粉、矿渣粉和 HF 复掺、单掺硅粉三种掺和料方案配制的抗冲耐磨混凝土的性能（见表 22），其中单掺硅粉时掺量为 4%。试验结果显示，硅粉微细颗粒在低水胶比条件下有填充效应和微集料效应，其火山灰反应更充分剧烈，能改善界面结构，提高界面黏结强度，提高水泥石的密实度和强度。因此，当工程采用天然骨料时，建议混凝土中掺入

硅粉。编号 ML25 配合比使用的是人工灰岩骨料，其他配合比均为天然骨料。

此外，小浪底中闸室下游段衬砌、东风泄洪中孔衬砌、葛洲坝船闸修补、二滩泄洪洞修复等也采用了硅粉混凝土技术方案，取得了良好的应用效果。我国部分水电工程采用硅粉混凝土技术方案的推荐施工配合比汇总见表 23。

水工混凝土中掺入硅粉除配制高强抗冲耐磨混凝土外，还有一个主要作用就是抑制骨料的碱活性。硅粉主要成分是无定形二氧化硅，其在胶凝体系中均匀分散，将有限的局部化解成无限多的活性中心，每一个中心都参与化学反应而消耗碱，能量只能分散而不能局部集中，从而起到抑制碱-骨料反应作用。

结合雅砻江中上游某水电工程的活性砂板岩骨料开展单掺硅粉、复掺硅粉与石粉以及单掺粉煤灰的碱活性抑制效果试验，试验结果表明，不同品质的硅粉对骨料碱活性的抑制效果不同，即硅粉品质越好，抑制效果越好；硅粉掺量越高，抑制效果越好；硅粉掺量为 3%、石粉掺量为 20% 时，可达到与单掺 20% 粉煤灰相同的抑制效果。

4.0.4 掺硅粉混凝土的配合比设计按《水工混凝土配合比设计规程》DL/T 5330 中的绝对体积法执行。

硅粉超细颗粒掺入混凝土，将对混凝土配合比参数产生不同的影响，混凝土配合比设计时需要综合考虑硅粉对水胶比、单位用水量、砂率以及计算方法的影响。

水胶比：与不掺硅粉的基准混凝土相比，掺入硅粉后必须考虑其对配制强度的影响；掺入一定量的硅粉取代水泥，混凝土的早期强度发展较快，同水胶比时掺硅粉混凝土的 28d 龄期强度基本高于不掺硅粉的基准混凝土。因此，在保证同强度等级前提下，需要根据混凝土强度的增幅或富裕度在基准混凝土的基础上适当调整水胶比，具体调整幅度应根据硅粉的掺量与加入方式而定。

表 17 A 水电站水垫塘硅粉混凝土拌和物性能和强度试验结果 (C₉₀50F150W10)

水泥品种	级配	水胶比	用水量 (kg/m ³)	砂率 (%)	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	坍落度 (mm)	含气量 (%)
ES 中热 42.5	三	0.36	115	30	15	5	80	4.2
		0.33	115	30	15	5	85	4.5
		0.30	115	30	15	5	78	4.0
JH 中热 42.5	三	0.36	120	30	15	5	80	4.4
		0.33	120	30	15	5	87	4.6
		0.30	120	30	15	5	82	4.3
ES 中热 42.5	二	0.36	136	37	15	5	89	4.8
		0.33	136	37	15	5	85	4.7
		0.30	136	37	15	5	78	4.3
JH 中热 42.5	二	0.36	141	37	15	5	88	4.5
		0.33	141	37	15	5	80	4.2
		0.30	141	37	15	5	79	4.0

续表 17

水泥品种	级配	水胶比	凝结时间 (min)		抗压强度 (MPa)			抗冲磨强度 [h/ (kg/m ²)]	磨损率 (%)	抗渗 等级	抗冻 等级
			初凝	终凝	7d	28d	90d				
ES 中热 42.5	三	0.36	—	—	39.1	50.8	59.0	—	—	—	—
		0.33	703	947	41.5	54.6	62.0	12.3	2.4	≥10	≥150
		0.30	—	—	43.3	56.8	66.5	—	—	—	—
JH 中热 42.5	三	0.36	—	—	36.8	49.1	56.4	—	—	—	—
		0.33	580	822	39.2	51.5	60.1	7.1	4.3	≥10	≥150
		0.30	—	—	41.6	54.7	62.2	—	—	—	—
ES 中热 42.5	二	0.36	—	—	40.5	54.5	60.1	—	—	—	—
		0.33	825	1021	42.7	55.5	65.3	9.0	3.3	≥10	≥150
		0.30	—	—	45.1	58.8	68.0	—	—	—	—
JH 中热 42.5	二	0.36	—	—	38.9	51.2	58.6	—	—	—	—
		0.33	712	894	41.6	54.0	61.4	9.9	2.9	≥10	≥150
		0.30	—	—	43.8	59.1	68.7	—	—	—	—

表 18 B 水电站抗冲耐磨混凝土试验配合比及性能试验结果 (C₅₀50W6F100)

编号	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	砂率 (%)	级配	混凝土材料用量 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)			
						水	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	石	7d	28d	90d	180d
PP1	0.350	15	0	42	二	152	369	65	—	771	1069	40.7	57.1	67.5	70.6
PP9	0.332	15	3	42	二	144	356	65	13	778	1079	40.0	60.3	70.1	71.0
PP10	0.334	15	5	41	二	145	347	65	22	757	1094	41.9	61.9	69.6	72.0
PP11	0.336	15	8	41	二	146	334	65	35	754	1090	43.3	63.2	68.5	69.8
PP13	0.343	15	3	42	二	149	356	65	13	773	1071	37.3	53.2	63.9	71.5
PP14	0.346	15	5	41	二	150	347	65	22	752	1086	46.2	55.3	66.0	71.0
PP15	0.348	15	8	41	二	151	334	65	35	749	1082	48.3	57.2	66.7	72.5
编号	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	砂率 (%)	级配	抗冲磨强度 [h/ (kg/m ²)]						磨损率 (%)		抗渗等级 (90d)	抗冻等级 (90d)
						28d	90d	180d	28d	90d	180d	90d	180d		
PP1	0.350	15	0	42	二	10.9	14.3	17.4	2.63	1.69	1.72	>W8	>F50	>F50	>F50
PP9	0.332	15	3	42	二	15.0	16.6	17.0	1.99	1.80	1.76	>W8	>F50	>F50	>F50
PP10	0.334	15	5	41	二	15.3	16.7	17.5	1.96	1.79	1.71	>W8	>F50	>F50	>F50
PP11	0.336	15	8	41	二	16.0	17.0	17.7	1.87	1.76	1.69	>W8	>F50	>F50	>F50
PP13	0.343	15	3	42	二	11.1	12.3	16.6	2.70	2.43	1.80	>W8	>F50	>F50	>F50
PP14	0.346	15	5	41	二	12.6	13.4	17.0	2.29	2.20	1.76	>W8	>F50	>F50	>F50
PP15	0.348	15	8	41	二	15.4	16.4	17.5	2.01	1.82	1.71	>W8	>F50	>F50	>F50

表 19 B 水电站抗冲耐磨混凝土干缩率试验结果 (C₉₀50W6F100)

编号	方案	水胶比	粉煤灰掺量 (%)	硅粉掺量 (%)	干缩率 (×10 ⁻⁶)							
					3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	
PP1	中热/Ⅰ级灰/JM-PCA	0.350	15	0	120	208	258	320	358	402	444	
PP9	低热/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.332	15	3	132	198	243	299	387	410	456	
PP10	低热/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.334	15	5	144	207	254	311	395	418	470	
PP11	低热/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.336	15	8	150	220	276	342	405	442	493	
PP13	普通/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.343	15	3	199	291	380	450	495	552	588	
PP14	普通/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.346	15	5	205	300	391	469	510	563	599	
PP15	普通/Ⅰ级灰/硅粉/JM-PCA	0.348	15	8	211	306	400	474	521	576	614	

表 20 C 水电站抗冲耐磨混凝土试验配合比及性能试验结果 (C₉₀40F300、C₉₀50F300、C₉₀60F300)

编号	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉厂家	硅粉 (%)	砂率 (%)	级配	混凝土材料用量 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)				抗冲磨强度 [h/ (kg/m ²)]			抗冲击韧性比	抗渗等级	
							水	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	石	7d	28d	90d	180d	90d	180d	28d			90d
LK17	0.33	30	FX	5	30	二	122	241	111	19	618	1472	33.8	52.4	58.3	67.2	13.6	15.8	0.93	0.93	>W8	

续表 20

编号	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	硅粉厂家	硅粉 (%)	砂率 (%)	级配	混凝土材料用量 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)				抗冲磨强度 [h/ (kg/m ²)]			抗冲击韧性比	抗渗等级
								水	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	石	7d	28d	90d	180d	90d	180d	28d	90d	
LK18	0.33	30	YY	5	30	二		122	241	111	19	618	1472	31.6	49.8	65.1	68.1	14.3	17.2	0.96	0.98	>W8
LK19	0.33	30	LT	5	30	二		122	241	111	19	618	1472	30.8	50.3	62.9	60.4	14.4	17.0	0.77	0.86	>W8
LK2	0.33	30	AK	5	30	二		122	241	111	19	618	1472	39.1	58.3	69.6	72.5	15.0	17.5	1.00	1.00	>W8

表 21 D 水电站抗冲耐磨混凝土试验配合比及性能试验结果

编号	混凝土形态	强度等级	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	砂率 (%)	混凝土材料用量 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)			抗冲磨强度 [h/ (kg/m ²)]		磨损率 (%)		抗渗等级	抗冻等级
							水	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	石	7d	28d	90d	28d	90d	28d	90d		
XN13	常态	C ₉₀ 40	0.45	20	5	37	123	203	54	14	750	1291	25.6	40.3	50.2	—	14.7	—	1.9	>W8	>F100
XN14		C40	0.40	20	5	36	122	229	61	15	718	1291	28.6	48.7	57.1	11.2	—	2.6	—	>W8	>F100
XN15		C ₉₀ 50	0.35	20	5	35	121	259	69	17	686	1287	38.5	53.4	64.2	—	16.7	—	1.8	>W8	>F100
XN16		C50	0.30	20	5	34	120	300	80	20	650	1275	49.5	70.8	81.7	15.5	—	1.8	—	>W8	>F100

续表 21

编号	混凝土形态	强度等级	水胶比	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	砂率 (%)	混凝土材料用量 (kg/m ³)						抗压强度 (MPa)			抗冲磨强度 [h/(kg/m ²)]		磨损率 (%)	抗渗等级	抗冻等级	
							水	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	石	7d	28d	90d	28d	90d				28d
XN17	泵送	C ₉₀ 40	0.45	20	5	43	134	223	60	15	847	1135	23.7	38.6	49.8	—	12.1	—	2.4	>W8	>F100
XN18		C40	0.40	20	5	42	133	249	67	17	814	1137	28.0	50.2	60.3	12.4	—	2.4	—	>W8	>F100
XN19		C ₉₀ 50	0.35	20	5	41	132	283	75	19	779	1133	29.6	54.1	61.6	—	15.5	—	1.9	>W8	>F100
XN20		C50	0.30	20	5	40	131	328	87	22	738	1120	43.4	65.0	72.1	14.2	—	2.0	—	>W8	>F100

表 22 E 水库抗冲耐磨混凝土力学及变形性能试验结果 (C40、C50)

编号	强度等级	水泥品种	骨料	水胶比	矿渣粉 (%)	硅粉 (%)	HF (%)	抗压强度 (MPa)		抗冲耐磨强度 [h/ (kg/m ²)]	磨损率 (%)	抗渗等级	抗冻等级
								7d	28d				
ML19	C40	TS	天然	0.38	40	—	—	28.3	48.4	6.75	4.21	>W60	>F200
ML20		QS	天然	0.38	40	—	—	27.0	46.5	5.96	4.65	>W60	>F200
ML21		TS	天然	0.38	40	—	2.5	29.6	49.9	5.32	5.26	>W60	>F200
ML22		QS	天然	0.38	40	—	2.5	28.2	45.0	5.28	5.19	>W60	>F200
ML30		TS	天然	0.40	—	4	—	36.3	55.6	9.76	4.05	>W60	>F200
ML31		QS	天然	0.40	—	4	—	37.9	52.2	8.54	4.98	>W60	>F200

续表 22

编号	强度等级	水泥品种	骨料	水胶比	矿渣粉 (%)	硅粉 (%)	HF (%)	抗压强度 (MPa)		抗冲耐磨强度 [h/(kg/m ²)]	磨损率 (%)	抗渗等级	抗冻等级
								7d	28d				
ML23	C50	TS	天然	0.30	40	—	—	41.4	60.2	8.42	3.39	>W60	>F200
ML25		TS	人工	0.30	40	—	—	53.4	74.8	14.25	1.91	>W60	>F200
ML24		QS	天然	0.30	40	—	—	41.8	58.2	8.19	3.32	>W60	>F200
ML26		TS	天然	0.30	40	—	2.5	43.1	64.6	9.73	2.56	>W60	>F200
ML27		QS	天然	0.30	40	—	2.5	39.6	57.4	6.37	4.34	>W60	>F200
ML28		TS	天然	0.30	—	4	—	59.5	70.3	12.08	2.31	>W60	>F200
ML29		QS	天然	0.30	—	4	—	57.3	66.5	10.45	2.67	>W60	>F200

表 23 我国部分水电工程应用硅粉混凝土的推荐施工配合比

工程名称	使用部位	设计指标	级配	水胶比	砂率 (%)	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	材料用量 (kg/m ³)					
								用水量	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	小石
小浪底	中闸室下游段	C70F50W6	二	0.25	36	20	3	120	380	—	15	632	551
金安桥	泄洪系统	C ₉₀ 50F150W8	二	0.38	34	15	8	152	308	60	32	679	725

续表 23

工程名称	使用部位	设计指标	级配	水胶比	砂率 (%)	粉煤灰 (%)	硅粉 (%)	材料用量 (kg/m ³)						
								用水量	水泥	粉煤灰	硅粉	砂	小石	中石
宝珠寺	右底孔	C60	三	0.35	29	—	10	152	391	—	43.4	538	266	399
			二	0.35	35	—	10	175	450	—	50	605	453	683
东风	泄洪中孔	C50	二	0.35	37	15	3	125	275	53	29	723	558	632
大岗山	水垫塘	C ₉₀ 50F150W10	三	0.33	29	15(ES中热42.5)	5	115	279	52	17.4	562	278	418
				0.33	29	15(JH中热42.5)	5	120	291	55	18.2	554	274	412
			二	0.33	37	15(ES中热42.5)	5	136	330	62	20.6	666	459	688
				0.33	37	15(JH中热42.5)	5	141	342	64	21.4	656	452	678
	泄洪洞	C ₉₀ 50F100W6	二(常态)	0.33	38	20	5	125	284	76	19	718	586	586
			二(泵送)	0.33	40.5	20	5	137	311	83	21	738	598	489
鲁基厂	强冲沙闸和泄洪闸底板	C40F50W6	二	0.39	—	0.9 (聚丙烯纤维)	10	150	346	—	38	604	460	854

单位用水量：硅粉属于超细颗粒材料，比表面积是水泥的百倍以上，其需水量比也远大于水泥。掺硅粉后为保持混凝土的和易性，需要增加混凝土的拌和用水，即增加混凝土的单位用水量。具体增加幅度与硅粉的品质、掺量及加入方式有关。

砂率：相同胶凝材料用量下，硅粉等量取代水泥时，由于硅粉密度比水泥要小得多，因此掺硅粉混凝土拌和物中浆体体积相比基准混凝土明显增加，这也导致硅粉混凝土在拌和过程中黏聚性与保水性更好。所以，在混凝土配合比设计选择合适砂率时，应根据硅粉的品质、掺量与加入方式在基准混凝土基础上不做调整或小幅调整。

配合比计算方法：水工混凝土配合比设计时，通常选择绝对体积法计算混凝土中各种材料用量。硅粉由于颗粒细、密度小，会对混凝土拌和物的容重与含气量产生一定影响，因此，推荐掺硅粉混凝土应参照《水工混凝土配合比设计规程》DL/T 5330 中的绝对体积法计算具体的材料用量。

4.0.5 硅粉与水泥有较好的适应性，但硅粉由于含有少量杂质、颗粒较细，可能对减水剂的减水率、引气剂的引气效果、混凝土的凝结时间等产生影响，应在混凝土原材料选择阶段及时进行外加剂与硅粉的适应性试验。

4.0.6 目前水工混凝土掺用硅粉有三种方式：粉状硅粉、加密硅粉和硅粉浆。粉状硅粉是标准硅粉，其中无定形二氧化硅含量大于 90%，密度为 2200 kg/m^3 左右。加密硅粉是用机械和物理方法使硅粉颗粒产生附聚和压实作用，堆积密度是粉状硅粉的 3.5 倍左右，在光学显微镜下硅粉聚合物呈球状体，且大部分粒径小于 $100\mu\text{m}$ 。硅粉浆的制备工程：使用搅拌机将水和硅粉按重量比 (1:1) 拌和若干时间直至颗粒全部悬浮于水中为止，掺入一定的稳定剂，使浆液在正常气温条件下能够稳定在 72h 以上。

关于硅粉的形态对混凝土，特别是高强混凝土的 28d 及更长龄期的抗压强度、抗冻性能以及抗渗性能、抗氯化盐侵蚀性影响，

存在不同的认识。小浪底工程为了解决硅粉的供应问题和提高混凝土品质，开展了加密硅粉、硅粉浆与粉状硅粉的对比论证试验（见表 24）。结果发现，这三种不同形态硅粉配制的混凝土的性能无重大差异。

从新拌混凝土性能看，为达到与基准混凝土相同的坍落度与含气量，掺入这三种形态硅粉的混凝土所需的高效减水剂和引气剂的用量均要小幅增加，其中硅粉浆混凝土用量最高，其次为加密硅粉混凝土，粉状硅粉混凝土的外加剂增量最小。而且，加密硅粉在搅拌时最易控制，掺入加密硅粉的硅粉浆、水泥浆和混凝土试件在试拌抹面处理比其他两种形态硅粉要容易些。

表 24 小浪底开展的不同形态硅粉混凝土的配合比
以及部分性能试验结果

混凝土	水胶比	硅粉 (%)	砂率 (%)	混凝土材料用量 (kg/m ³)						
				水	水泥+粉煤灰	硅粉	砂	石	减水剂	引气剂
基准混凝土	0.27	0	36	112	368+83	0	660	1155	1.8	6.0
硅粉浆混凝土	0.26	6	36	83	368+83	58	660	1155	2.4	6.2
粉状硅粉混凝土	0.25	6	36	112	368+83	29	660	1155	2.0	6.0
加密硅粉混凝土	0.26	6	36	112	368+83	29	660	1155	2.2	6.9

混凝土	水胶比	硅粉 (%)	砂率 (%)	抗压强度 (MPa)		耐久性指数 (%)	抗氯离子渗透总电荷 C
				28d	56d		
基准混凝土	0.27	0	36	42.7/100	56.8/100	95.9	1788
硅粉浆混凝土	0.26	6	36	71.8/168	76.7/135	84.5	310
粉状硅粉混凝土	0.25	6	36	69.3/162	74.6./131	82.4	301
加密硅粉混凝土	0.26	6	36	67.5/158	81.2/143	94.6	384

从硬化混凝土性能看，无论使用何种形态的硅粉，硅粉对混凝土的抗压强度都有明显的增强作用。相比较而言，28d 增强效果最为显著的是硅粉浆混凝土，其次是粉状硅粉混凝土，加密硅粉混凝土的增强效果略低；但 56d 龄期时增强效果最好的是加密硅粉混凝土，其次是粉状硅粉混凝土，硅粉浆混凝土的后期增强效果不如前面两种。三种形态硅粉配制的混凝土的抗冻与抗渗性能均不存在明显差异，可以满足设计要求，且可以显著提高混凝土抗氯离子、抗硫酸盐等抗侵蚀能力。

因此，结合小浪底工程开展的硅粉形态对混凝土性能影响的专门论证试验，发现不同形态的硅粉配制的混凝土的各项性能无重大差异。使用加密硅粉和硅粉浆是硅粉在水工混凝土中应用技术的发展趋势和方向，从小浪底的应用实例来看，使用加密硅粉和硅粉浆技术有利于提高运输生产效率、保护拌和场地环境、提高拌制混凝土的分散均匀性与拌制质量，但使用过程中还需要增加专门的设施设备、增加工程成本。

综上所述，工程因综合考虑技术和经济因素，并结合室内或现场试验，选择合适的硅粉形态与拌和工艺。当采用硅粉浆时，应综合考虑浆液的均匀性、泵送难易程度以及混凝土的温控等因素，选择合适的水灰比；基于国内外施工经验，宜选择硅粉浆的水灰比为 1.0 左右。

4.0.9 为解决掺硅粉混凝土的早期收缩裂缝问题，工程中通常会采取诸多综合技术措施，包括掺入高性能减水剂、复掺粉煤灰或其他矿物掺和料、加强早期养护与配套温控技术措施等。工程中通常采用的是硅粉与粉煤灰或其他掺和料复掺的技术方案以降低水工混凝土开裂风险，一方面利用硅粉的微集料和高活性的特点改善混凝土拌和物性能并起到增强增密的作用，另一方面利用粉煤灰的减水效果、降低水化热与后期强度增长幅度高的特点改善混凝土的长期耐久性；复掺硅粉与粉煤灰技术方案可以充分发挥这两种材料各自的技术优势，起到时空互补作用，也是减小硅粉

混凝土收缩裂缝的主要技术措施之一。由于硅粉颗粒细、需水量比高、早期水化快，掺硅粉混凝土的早期收缩大、水化热高，为防止硅粉混凝土表面出现收缩与温度裂缝，混凝土浇注后宜尽早开始表面养护，且适当延长养护时间。

5 掺硅粉混凝土的质量控制和检查

5.0.1～5.0.2 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 对混凝土的质量控制和检查作了详细明确的规定，掺硅粉的混凝土的质量控制和检查照此执行。

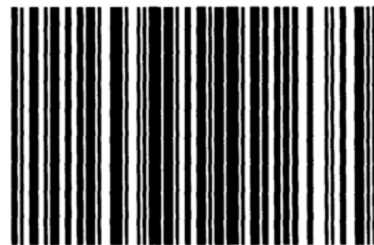


中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.1630

定价：34.00 元