

# S95 矿渣粉掺合料对胶凝体系微观结构及强度演化规律

武英杰

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830049

**【摘要】**：本文以 S95 矿渣粉为研究对象，通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 等微观测试手段及水泥胶砂强度试验，探究不同掺量 S95 矿渣粉对复合胶凝体系水化特征、微观结构及力学性能的影响规律。结果表明，S95 矿渣粉对胶凝体系的作用呈现显著阶段性特征：早期以稀释效应为主，掺量越高结构越松散；中期火山灰效应逐步激活，基体趋于致密；长期火山灰反应充分，高掺量组微观结构较优。力学性能显示，早期强度随掺量增加而降低，60% 掺量组 1 d、3 d 抗折抗压强度较空白组降幅分别为 65.8%、73.7% 和 33.9%、43.8%；28 d 强度差距明显缩小，60 d 时高掺量组强度实现反超。其中，抗压强度以 20% 掺量最优，最大掺量时虽较之降低约 6%，但仍高于空白组。微观演化规律与宏观力学性能高度吻合，研究结果可为 S95 矿渣粉在本地工程中的推广应用提供试验依据与数据参考。

**【关键词】**：S95 矿渣粉；胶凝体系；微观结构；水化特性；胶砂强度；火山灰效应

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.017

## 引言

矿物掺合料是配制高性能水泥基材料的关键组分，合理掺用可降低水泥用量与碳排放、优化微观结构，提升混凝土长期力学性能及耐久性<sup>[1]</sup>。S95 矿渣粉作为一种高活性矿物掺合料，火山灰性能优良，应用日趋广泛<sup>[2]</sup>。但受原料工艺制约，部分矿渣粉品质欠佳，固废资源化与工程用材需求矛盾突出。但部分钢铁厂经技术改造后，可稳定量产 S95 级矿渣粉，为解决该问题提供了方案。矿渣粉作为工业固废基胶凝材料，节能减排效益突出，后期强度与耐久性优势显著，具备极高应用价值<sup>[3]</sup>。为此，本文针对 S95 矿渣粉开展系统性试验，揭示其对胶凝体系微观结构与强度发展的影响规律，为工程应用提供科学依据和数据支撑。

## 1 原材料选择

### 1.1 水泥

试验用水泥均为青松水泥厂生产的 P·O42.5 水泥，其物理力学性能符合 GB175-2007《通用硅酸盐水泥》要求。

### 1.2 S95 矿渣粉

试验用 S95 矿渣粉为八一钢铁厂生产，密度 2.82g/cm<sup>3</sup>，比表面积 505 m<sup>2</sup>/kg，28 d 活性指数 102%，流动度比 122%，各项指标均满足 GB/T18046-2017 中 S95 级别的技术要求。化学成分及 X 射线衍射图谱见表 1，图 1。

表 1 S95 矿渣粉化学分析检测结果 (%)

检验项目	Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
S95 矿渣粉	0.58	35.81	5.68	6.68	43.35	3.37	1.76	0.77

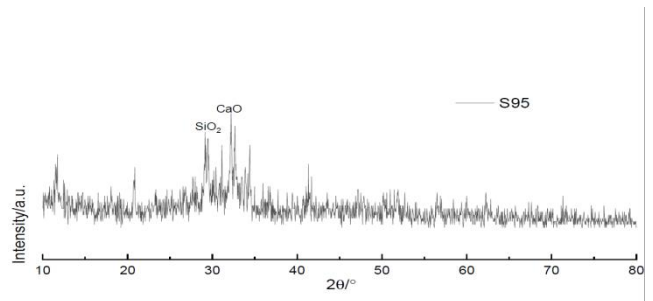


图 1.S95 矿渣粉 X 射线衍射图

本试验所用 S95 矿渣粉主氧化物总含量达 91.52%，活性系数优异，火山灰活性突出。XRD 图谱以 10°~80° 弥散宽化“馒头峰”为主体，玻璃体占比高，晶相杂质含量低，无有害晶相，物相稳定。

### 1.3 水

拌和水采用乌鲁木齐地下水，水质优良，满足《混凝土用水标准》JGJ63-2006。

## 2 试验方案设计

### 2.1 水化特性微观性能分析

试验采用 40 mm×40 mm×100 mm 长方体试件，制备水胶比 0.40，S95 矿渣粉掺量 0%、30%、60% 的净浆试件，分别在 3 d、28 d、60d、120 d 龄期取样，采用 XRD (X 射线衍射) 分析水化产物物相组成，SEM (扫描电镜) 观测微观形貌、水化产物及孔结构特征<sup>[4]</sup>。

**【作者简介】**武英杰 (1979.6-)，女，汉族，籍贯：山东泰安，学历：研究生，单位：新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院，职称：高级工程师，研究方向：结构材料。**【基金资助项目】**水利部水库大坝安全重点实验室开放基金 (YK324014)；新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目 (2025D01A8)。

## 2.2 胶砂强度试验

试验选取 0.50 水胶比, S95 矿渣粉掺量分别为 0、20%、30%、40%、50%、60%, 分别测定 1d、3d、7d、28d、60d 抗压抗折强度, 以研究不同掺量矿渣粉对强度影响规律。

试验用水泥为基准水泥, 砂为中国 ISO 标准砂, 试验方法参照《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》(GB/T 17671-1999) 进行。制作 40mm×40mm×160mm 棱柱试件, 在温度(20±1)°C, 相对湿度 90% 以上的水泥养护箱内养护 24h, 脱模后在 20°C 水中养护至规定龄期进行强度试验。

## 3 试验结果及分析

3.1 图 2~图 5 为 3d S95 矿渣粉掺量 0 (纯水泥)、30%、60% 的净浆试件 SEM 扫描电镜和 XRD 图谱。

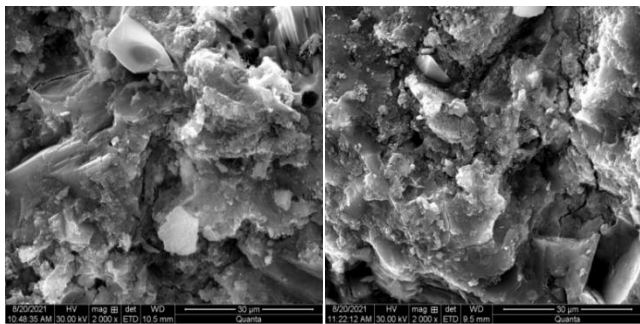


图 2.3d 纯水泥 SEM 图片 图 3.3d 掺 30% 矿渣粉 SEM 图片

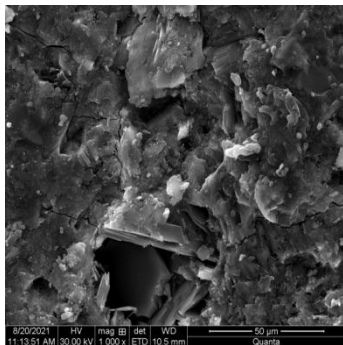


图 4.3d 掺 60% 矿渣粉 SEM 图片

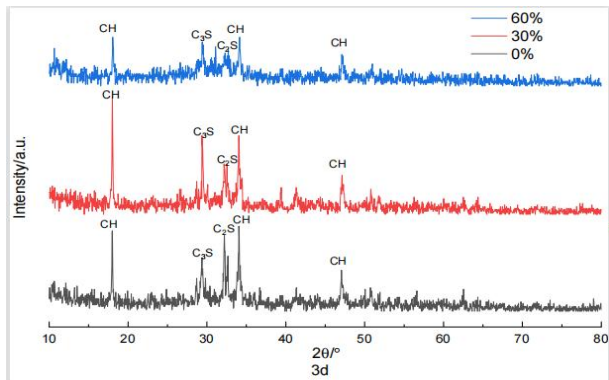


图 5. 不同掺量矿渣粉 3d XRD 图谱

3d 龄期为水化启动期, 各组试样微观结构松散, 毛细孔隙发育, 水化产物未形成连续凝胶网络。SEM 可见六方片状

氢氧化钙 (CH) 晶体、致密块状未水化熟料 (C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>S) 及少量纤维状水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶, 熟料与水化产物界面清晰。随着 S95 矿渣粉掺量提高, CH 生成量递减、孔隙率升高, 结构趋于松散。XRD 分析显示, CH 特征峰位于 18°、34° 及 47° 附近, 未水化熟料峰集中于 29°~33° 区间, 无明显 C-S-H 凝胶峰, 表明早期水化以结晶态 CH 为主, 凝胶相生成有限。此阶段矿渣粉以稀释效应为主, 掺量越高, 早期水化进程延缓越显著<sup>[5]</sup>。

3.2 图 6~图 9 为 28d S95 矿渣粉掺量 0 (纯水泥)、30%、60% 的净浆试件 SEM 扫描电镜和 XRD 图谱。

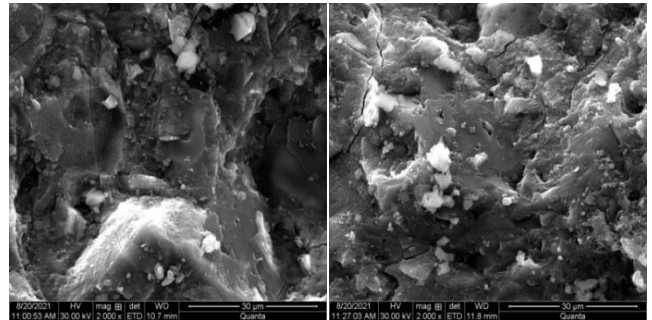


图 6.28d 纯水泥 SEM 图片 图 7.28d 掺 30% 矿渣粉 SEM 图片

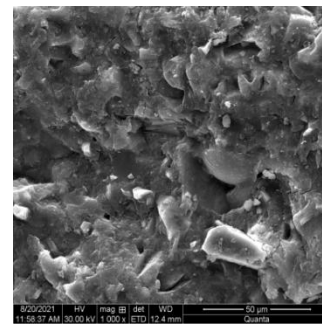


图 8.28d 掺 60% 矿渣粉 SEM 图片

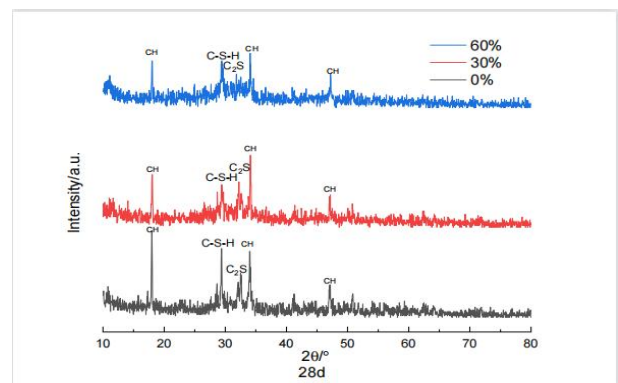


图 9. 不同掺量矿渣粉 28d XRD 图谱

28d 龄期时, 各组水化程度显著提升, 微观结构更为致密, C-S-H 凝胶已形成连续网络。SEM 观察表明, 随矿渣粉掺量增加, CH 晶体数量与尺寸逐步递减, 未水化熟料残留减少, 矿渣粉颗粒被凝胶包裹程度加深, 孔径由毛细孔向凝胶孔细化, 60% 掺量组结构较致密。XRD 分析验证, 纯水泥组 (0%)

CH 峰强较 3d 增强、熟料峰减弱，体现水泥持续水化、CH 累积；30% 与 60% 掺量组 CH 峰强显著降低，C-S-H 弥散峰增强，且 60% 组变化更突出，表明矿渣粉火山灰效应被充分激发，持续消耗 CH 并生成大量二次水化产物。此阶段火山灰效应主导体系演化，高掺量组通过二次水化优化微观结构<sup>[9]</sup>。

3.3 图 10~图 13 为 120d S95 矿渣粉掺量 0（纯水泥）、30%、60% 的净浆试件 SEM 扫描电镜和 XRD 图谱。

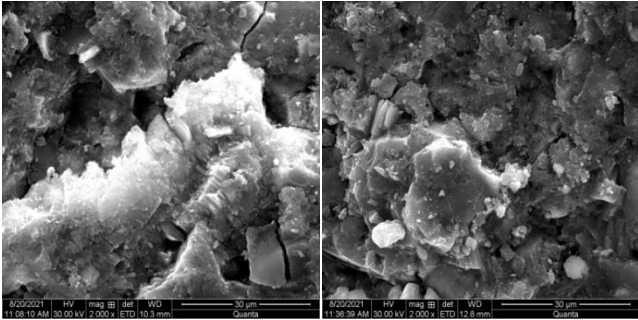


图 10.120d 纯水泥 SEM 图片

图 11.120d 掺 30% 矿渣粉 SEM 图片

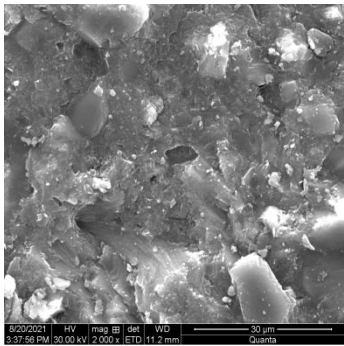


图 12.120d 掺 60% 矿渣粉 SEM 图片

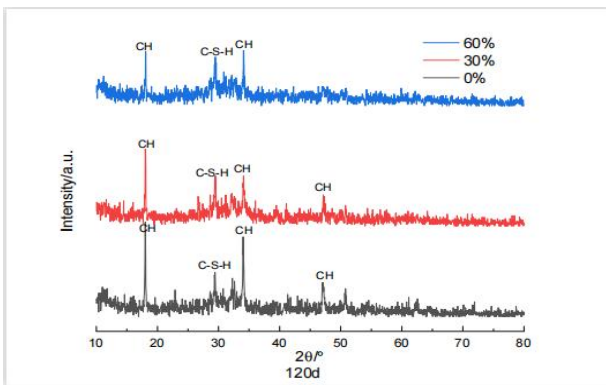


图 13.不同掺量矿渣粉 60d XRD 图谱

120d 龄期为水化稳定期，水化产物形成连续致密的凝胶网络。SEM 显示，各试样均可见少量六方片状 CH 晶体、极少量未水化颗粒及大量致密堆积的 C-S-H 凝胶，界面模糊、过渡层连续，结合力增强；随矿渣粉掺量提高，CH 晶体数量与尺寸降低，孔隙率下降，60% 掺量组结构最致密。XRD 结果表明，熟料水化基本完成；随掺量增加，CH 特征峰强逐级减弱，C-S-H 弥散峰强增强，60% 掺量组 CH 峰强最低、

C-S-H 弥散峰最宽，火山灰反应最充分。此阶段长期火山灰效应主导微观结构演化，高掺量矿渣粉持续消耗 CH 并生成更多 C-S-H 凝胶，显著提升结构致密性<sup>[7]</sup>，为长期力学性能与耐久性提升提供了物相与形貌依据。

### 3.4 胶砂强度发展规律

根据试验结果绘制相同水灰比下不同矿渣粉掺量下水泥胶砂试件抗折、抗压强度发展曲线，见图 14、15。

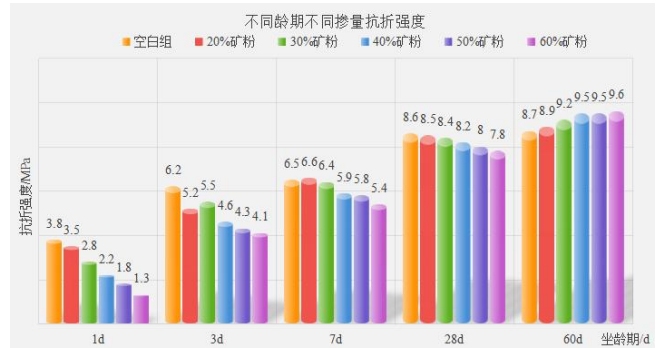


图 14. 0.50 水胶比抗折强度发展曲线

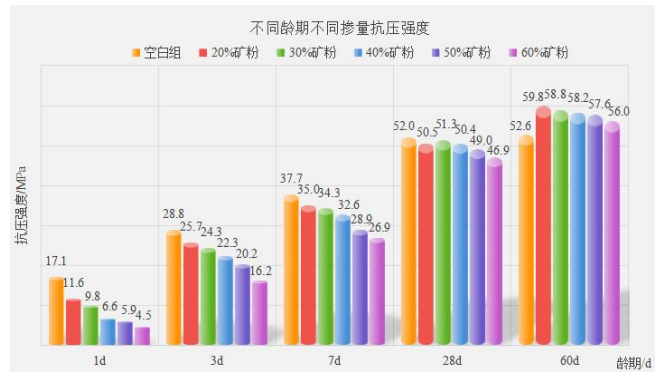


图 15. 0.50 水胶比抗压强度发展曲线

由图 14、15 可知，相同水胶比下，胶砂抗折与抗压强度随龄期增长呈一致规律。早期（1d~3d），强度随矿渣粉掺量增加显著下降。1d 时 60% 矿渣粉组抗折、抗压强度较空白组分别下降 65.8% 和 73.7%；3d 时降幅收窄至 33.9% 和 43.8%。中期（7d~28d）火山灰效应逐步显现，强度差距持续缩小；28d 时 60% 矿渣粉组对应降幅仅 9.3%、9.8%。长期（60d）高掺量（60%）矿渣粉优势凸显，抗折、抗压强度达 9.6 MPa 和 56.0 MPa，较空白组分别增长 10.3% 和 6.5%，且较自身 28d 强度分别增长 23.1% 和 19.4%，而空白组同期增长不足 2%。综上，矿渣粉早期延缓水化，中后期通过火山灰效应持续消耗 CH 并生成 C-S-H 凝胶，显著提升长期强度<sup>[8]</sup>。

## 4 结论

（1）微观演化规律表明，S95 矿渣粉掺量对水泥基材料的作用呈显著阶段性特征：早期稀释效应主导，掺量越高结构越疏松、强度越低；中期火山灰效应显现，结构趋密，强度差距缩小；长期火山灰效应充分发挥，高掺量组微观结构致密性与

宏观性能反超，长期优势明显。

(2) 矿渣粉掺量显著影响胶砂强度发展规律，早期强度随掺量增加而降低，后期各掺量组强度均高于空白组。抗折强度随掺量增加略有提高；抗压强度以20%掺量最优，最大掺量时虽较之降低约6%，但仍高于空白组。

(3) 高掺量矿渣粉对早期强度的削弱作用明显，60%掺量组较空白组，1 d、3 d、7 d、28 d 抗压强度分别降低约70%、40%、30%和10%，至60 d时抗压强度反升约6%，长期增强效应突出。

### 参考文献：

- [1] 谢蕙竹,肖智仁,侯文隽.矿物掺合料对混凝土力学性能影响的研究进展[J].广州建筑,2026,54(01):114-120.
- [2] 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉: GB/T 18046-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 李标,马芹永,张发.超细矿渣粉与硅灰对水泥基注浆材料性能影响机理分析[J].硅酸盐通报,2022,41(12):4342-4352.
- [4] 毛思雨,姜东宇,袁龄卿,等.基于微观视角分析高炉矿渣-粉煤灰替代水泥和矿粉体系的可行性[J].上海公路,2025,(03):143-150+155+251.
- [5] 符昱.提高矿粉/粉煤灰激发时效及其机理研究[D].武汉理工大学,2020.
- [6] 庚利民,杜红秀,郭丛乔,等.多元固废微粉对混凝土性能的影响及机理分析[J].混凝土与水泥制品,2024,(10):84-89.
- [7] 李滢,马丽媛,陈曦.再生微粉和矿物掺合料对水泥基材料性能的影响研究[J].混凝土,2025,(08):78-82.
- [8] 谢蕙竹,肖智仁,侯文隽.矿物掺合料对混凝土力学性能影响的研究进展[J].广州建筑,2026,54(01):114-120.