

# 水泥-双掺料胶凝体系碾压混凝土孔结构试验研究

蒋小建 孔祥芝

(阿勒泰水务局阿勒泰地区萨尔托海水库管理处 阿勒泰 836500,

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室 北京 100038)

**摘要:** 将磨细水淬矿渣与石灰石粉按一定比例混合制成双掺料, 利用扫描电镜、压汞测孔技术研究了水泥-双掺料胶凝体系水化硬化浆体的密实度和孔结构发展规律, 同时进行大掺量双掺料碾压混凝土强度及抗渗性随龄期变化试验。结果表明, 随着水化龄期的增长, 双掺料与粉煤灰相似, 具有优化浆体孔结构的作用, 硬化浆体无害孔比例明显增加, 浆体密实度改善, 混凝土强度及抗渗性能均有显著提高。

**关键词:** 双掺料; 硬化浆体; 孔结构; 混凝土; 抗渗性

## Experiment research on pore system development of the cement pastes with bi-component admixture

KONG Xiangzhi

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038 China)

**Abstract:** Ground blast furnace slags(GBFS) and limestone powder mixed in appropriate proportions can be made into bi-component admixture. In this paper, the development of the pore system in the hardened cement paste, which contains a high-volume of the bi-component admixture, was studied using scanning electron microscopy(SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP). Meanwhile, mechanical tests and the impermeability tests were performed on Roller-Compacted Concrete (RCC) contains the bi-component admixture. Experimental results showed that the bi-component admixture, similar with fly ash, can optimize the pore system in the paste with the increasing of hydration age. Also, the porosity of the hardened paste decreased and the percentage of the sound pores increased significantly, leading to an improvement of its density. In addition, the strength and the impermeability of the bi-component RCC was significantly improved.

**Keywords:** bi-component admixture; hardened paste; pore system; concrete; impermeability

## 引言

熔融状态的矿渣经水淬急冷作用, 形成大量的处于热力学不稳定状态的玻璃相, 通常称为“玻璃体”, 这种介温状态的玻璃相在碱性激发剂作用下具有一定的水硬性<sup>[1-2]</sup>。将水淬矿渣粉磨后与石灰石粉按一定比例混合可制成双掺料, 经过试验研究证实双掺料具有良好的掺合料性能, 并成功的取代粉煤灰应用于景洪、戈兰滩水电站大坝碾压混凝土<sup>[3-4]</sup>。然而, 大量非活性成分的加入是否对硬化浆体的密实度、孔结构、以及混凝土渗透性产生不利影响, 从而影响混凝土的耐久性。如肖佳等研究表明, 石灰石粉在10%~30%掺量范围内砂浆试件平均孔径增大18.8%~34.6%, 混凝土电通量增大值5%~75.2%, 并且石粉降低混凝土抗渗性能与其导致胶砂孔结构粗化有着较好的对应关系<sup>[5]</sup>。本文选用磨细锰铁矿渣和磨细铁矿渣分别与石灰石粉以5:5比例混合制成双掺料, 研究水泥-大掺量(60%总胶材质量百分比)双掺料净浆体系硬化浆体的孔结构、密实度发展规律, 并与水泥-粉煤灰胶凝体系进行平行对比, 同时进行混凝土强度、抗渗性试验。

## 1 试验原材料

水泥: P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 品质满足 GB175-1999 相关技术要求。磨细锰铁矿渣、磨细铁矿渣: 由基金项目: 国家重点研发计划(十三五)(2016YFB0303601, 2017YFC0405004), 中国水科院团队建设及人才培养类项目(SM0145B632017, SM0145B842017)

**作者简介:** 蒋小建 (1971—), 男, 高级工程师, 研究方向: 水工结构

**通讯作者简介:** 孔祥芝 (1980—), 男, 高级工程师, 研究方向: 主要从事水工混凝土材料及耐久性研究。

原状水淬（锰）铁矿渣经磨细制成，比表面积分别为  $4380 \text{ kg/m}^2$  和  $3430 \text{ kg/m}^2$ ，满足 GB/T18046-2000 技术要求。粉煤灰：云南某电厂 II 级粉煤灰，满足 GB/T1596-2005 中 II 级灰技术要求。石灰石粉：由石灰岩粉磨制得。外加剂：萘系缓凝高效减水剂，松香类引气剂。双掺料：磨细锰铁矿渣+石灰石粉双掺料（质量比 5:5，以下简称 MS 双掺料），磨细铁矿渣+石灰石粉双掺料（质量比 5:5，以下简称 PS 双掺料）。

## 2 结果与讨论

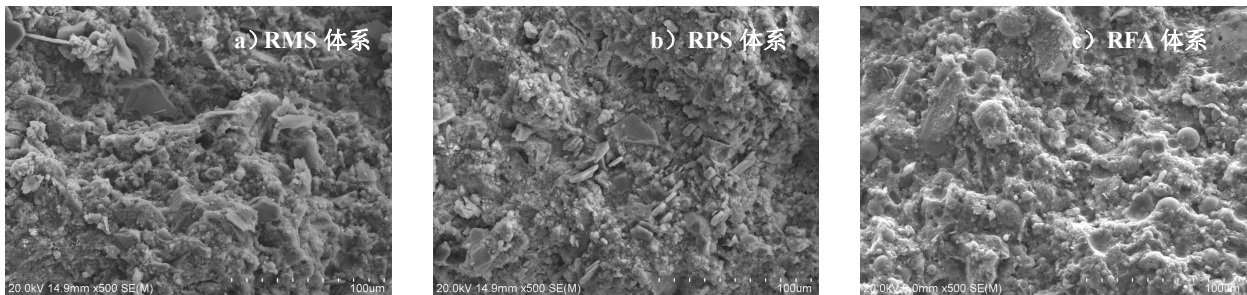
### 2.1 浆体密实度

采用扫面电镜观察掺双掺料净浆浆体的密实度随龄期的变化，胶凝体系包括 40%水泥+60%MS 双掺料体系（RMS 体系）；40%水泥+60%PS 双掺料体系（RPS 体系）；40%水泥+60%粉煤灰体系（RFA 体系），净浆配比见表 1。净浆试样在成型 24h 后脱模放入标准养护室内养护，到测试龄期后放入无水乙醇中保存待测，测试前进行低温烘干。

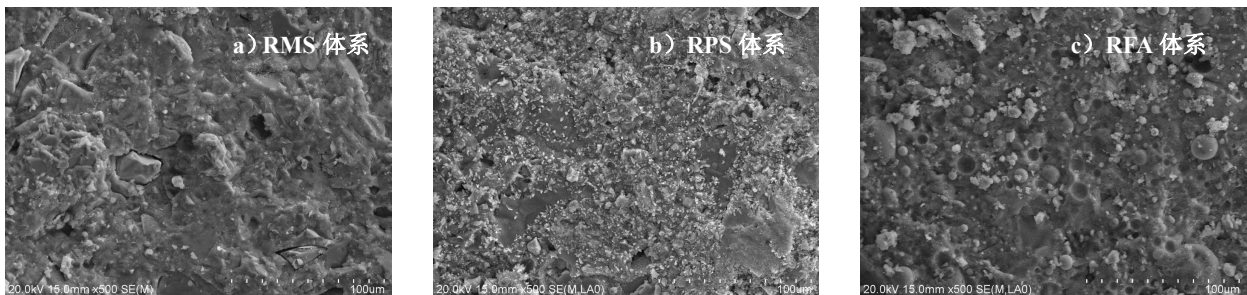
表 1 净浆配合比

试验编号	水胶比	用水量/g	水泥/g	减水剂/g	掺合料/g	
					粉煤灰	双掺料
RMS	0.29	107.4	148	0.37	-	222
RPS	0.29	107.4	148	0.37	-	222
RFA	0.29	107.4	148	0.37	222	-

利用扫描电镜对上述三个胶凝体系水化 7d 和 180d 龄期时的硬化浆体断面进行观察。结果表明，水化 7d 龄期时，断面处水化 C-S-H 凝胶数量有限，可发现大量的未水化水泥颗粒、矿渣颗粒、石灰石粉或粉煤灰颗粒，如照片 1 所示。随着水化龄期的进行，180d 龄期浆体密实度得到极大改善，浆体断面水化 C-S-H 凝胶已连接成片，凝胶体中可见一些被包裹的矿渣颗粒、石灰石粉颗粒和粉煤灰颗粒，如照片 2 所示。



照片 1 水化 7d 龄期硬化浆体断面 SEM 照片（×500）



照片 2 水化 180d 龄期硬化浆体断面 SEM 照片（×500）

### 2.2 浆体孔结构

利用压汞法测试表 1 所列胶凝体系在水化 7d~365d 龄期时硬化浆体的孔结构参数，测试最大汞压力 400MPa，测孔范围 $\geq 3\text{nm}$ 。由图 1、图 2 可知，随着水化龄期的增长，RMS 和 RPS 体系的最可几孔径在减小，孔分布曲线出现两个峰值，由于测量范围的限制，孔径在 3nm 附近的峰没有完全显现。对比图 3 可知，RFA 体系仅有一个明显的峰值，同样随着龄期的增长浆体的最可几孔径在减小。表 2 列出三种胶凝体系在不同龄期时的总孔体积、孔隙率、平均孔径、最可几孔径。总体看，随着水化龄期的增长，浆体总孔体积和孔隙率均有减小，并且 RMS 和 RPS 体系水化 365d 时的孔隙率要小于 RFA 体系。掺双掺料或掺粉煤灰，浆体的平均孔径相差不大，均随着水化龄期的增长而明显减小。

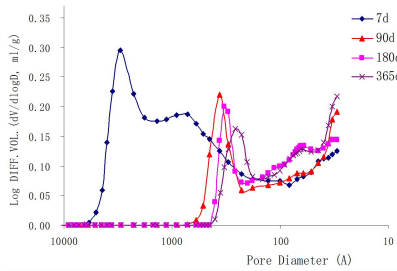


图 1 RMS 体系孔体积微分分布

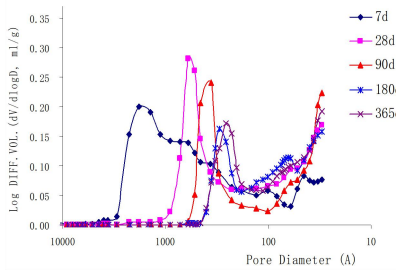


图 2 RPS 体系孔体积微分分布

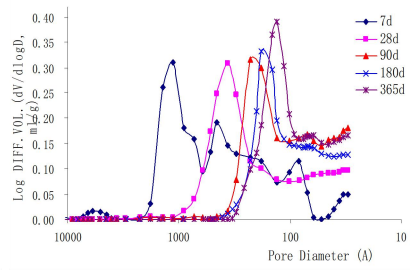


图 3 RFA 体系孔体积微分分布

表 2 硬化浆体孔结构参数试验结果

试验编号	RMS				RPS					RFA				
	7	90	180	365	7	28	90	180	365	7	28	90	180	365
测试龄期/d	7	90	180	365	7	28	90	180	365	7	28	90	180	365
总孔体积/(mL/g)	0.318	0.134	0.159	0.142	0.202	0.166	0.121	0.131	0.128	0.229	0.188	0.208	0.175	0.199
孔隙率/%	37.2	26.2	29.5	26.8	35.8	27.7	22.9	25.3	25.0	37.2	30.9	35.1	30.2	34.9
体积平均孔径/nm	22.4	9.2	8.8	8.1	21.6	11.5	9.5	8.9	8.6	27.1	13.8	9.3	9.1	8.7
最可几孔径/nm	305.0	36.2	32.9	26.0	181.8	60.6	36.2	30.2	26.0	113.1	36.3	22.7	18.1	13.0

吴中伟院士<sup>[5]</sup>根据较多资料，按孔径对强度的不同影响，将混凝土中的孔分为无害孔、少害孔、有害孔、多害孔 4 类，对应的孔径大小分别为：小于 20nm、20~100nm、100~200nm 和大于 200nm，设法降低孔隙率、除去多害孔，减少有害孔，就能得到较高的强度和密实度。根据上述对孔的分级，将三种硬化浆体中的孔分为以下四级：3~18nm、18~113nm、113~226nm 和 226~1033nm，计算各级孔的体积百分率随龄期的变化，如图 4~图 6 所示。可以看出，无论掺双掺料还是掺粉煤灰，随着龄期的增长，无害孔体积百分率明显增大，少害孔体积百分率明显减小，有害孔和多害孔 90d 龄期后消失。

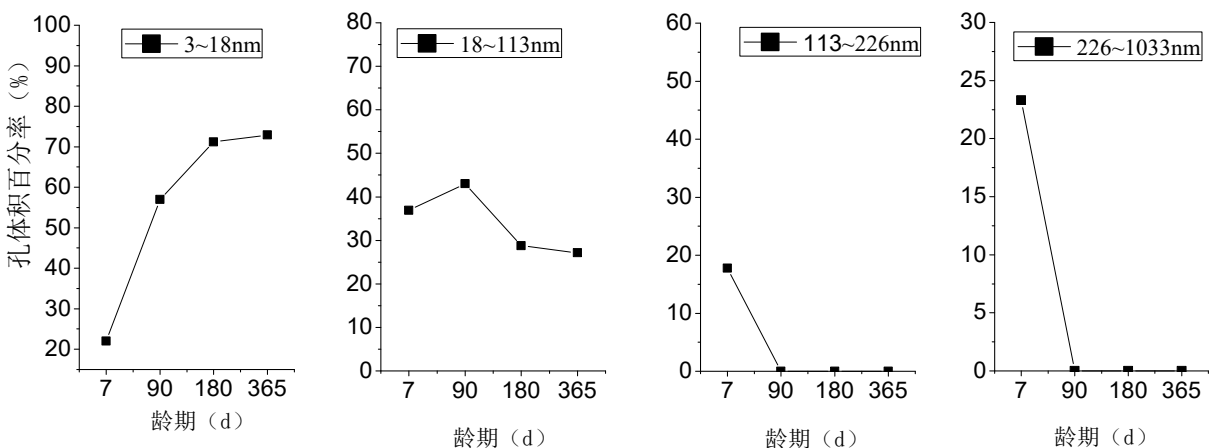


图 4 RMS 硬化浆体中各级孔体积百分率随龄期变化曲线

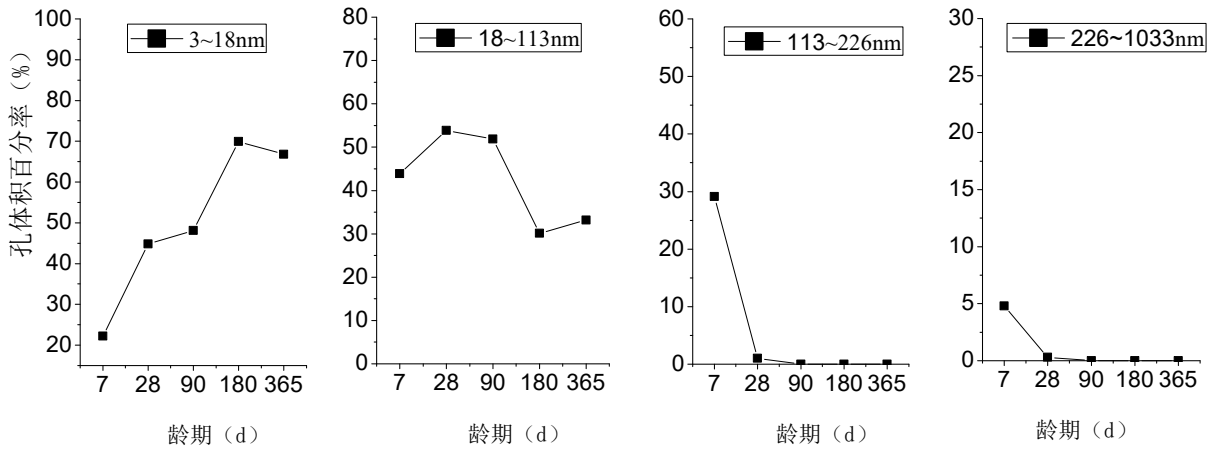


图5 RPS 硬化浆体中各级孔体积百分率随龄期变化曲线

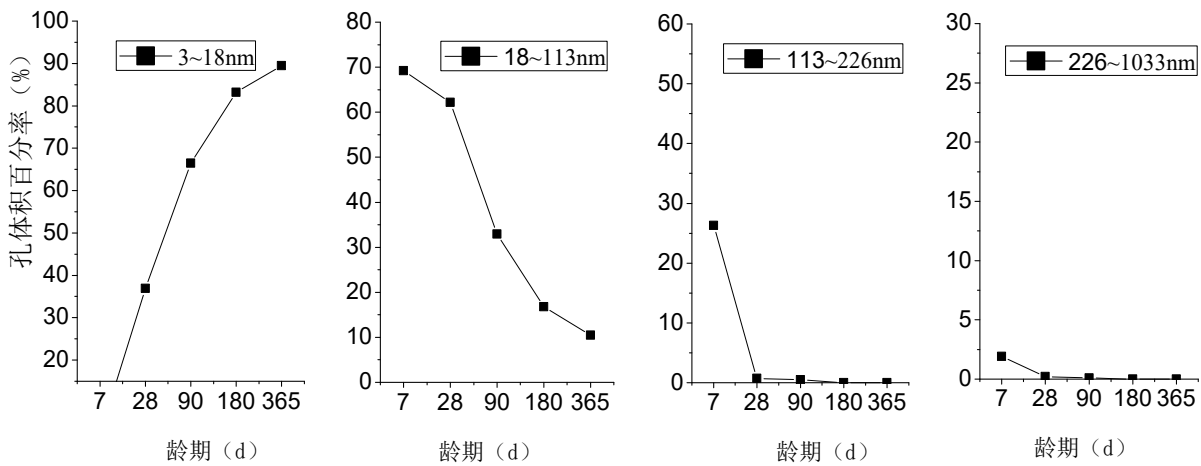


图6 RFA 硬化浆体中各级孔体积百分率随龄期变化曲线

### 2.3 混凝土渗透性

国内外学者普遍认为<sup>[7-8]</sup>, 混凝土渗透性主要取决于内部孔隙的连通状况、孔径分布、路径的曲折性, 临界孔径等孔特性参数, 良好的孔特性对提高混凝土强度、抗渗性, 以及耐久性具有重要作用。同样选用 MS、PS 双掺料和粉煤灰, 研究大掺量双掺料碾压混凝土的强度、抗渗性发展规律, 试验配合比见表 3。

表 3 混凝土试验配合比

混凝土类别	试验编号	级配	水胶比	掺合料 /%	砂率 /%	引气剂 /(/万)	减水剂 /%	每方混凝土材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )				
								水	水泥	双掺料	砂	石
	RMS	三	0.47	60	31	7.0	0.6	75	64	96	646	1528
碾压	RPS	三	0.47	60	31	7.0	0.6	75	64	96	646	1534
	RFA	三	0.47	60	31	7.0	0.6	73	62	93(粉煤灰)	643	1521

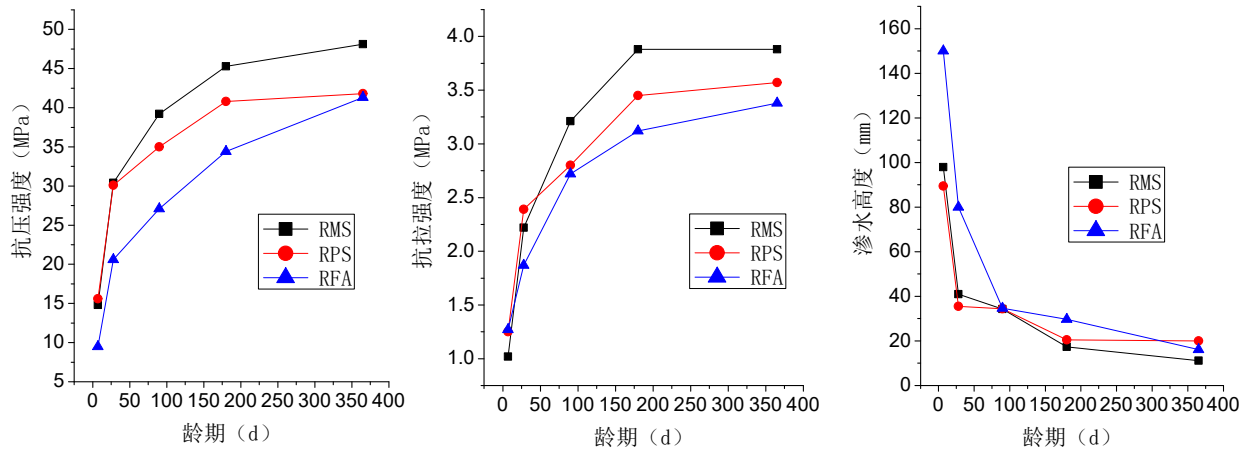


图7 混凝土性能发展规律

抗渗试验根据 SL352-2006《水工混凝土试验规程》进行，最大水压力 0.6MPa，测试渗水高度。结果表明，随着龄期的增长，混凝土强度、抗渗性明显提高，如图 7 所示。以 28d 龄期为基准，180d 龄期，RMS 系列和 RPS 系列混凝土抗压强度分别增长 49%和 36%，渗水高度下降 58%和 42%；掺粉煤灰混凝土抗压强度增长 67%，渗水高度下降 63%。从上述混凝土性能增长规律看，随着龄期的增长，混凝土密实度明显提高，孔径分布和孔的连通状况也有所改善。

### 3 结论

(1)大掺量双掺料胶凝体系水化硬化浆体具有良好的密实度，水化 180d 龄期，浆体断面水化 C-S-H 凝胶连接成片，矿渣颗粒和石灰石粉颗粒被充分包裹。(2)随着水化龄期的增长，大掺量双掺料胶凝体系硬化浆体最可几孔径减小，无害孔增多，少害孔、有害孔和多害孔明显减少，孔的连通状况也有所改善，这对混凝土耐久性非常有利。

### 参考文献

- [1] 袁润章. 胶凝材料学 (第 2 版) [M], 武汉理工大学出版社, 1996, 10, 武汉.
- [2] 李 贞, 冯庆革, 朱慧英, 等. 矿渣混凝土力学性能及耐久性的研究[J]. 混凝土, 2014 (7): 37-39.
- [3] 陈改新, 孔祥芝. 石灰石粉\_一种新的碾压混凝土掺合料[J]. 中国水利, 2007 (21): 16-18..
- [4] 邓山翔. 戈兰滩水电站碾压混凝土坝十大筑坝特点[J]. 云南水力发电,2008, 24 (S1): 45-49.
- [5] 肖 佳, 何彦琪, 郭明磊, 等. 石粉对混凝土抗渗性能的影响[J]. 混凝土, 2015 (12): 89-92..
- [6] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M], 中国铁道出版社, 1999.09, 北京.
- [7] P.梅泰著 祝永年 沈 威译 混凝土的结构、性能与材料[M] 同济大学出版社 1991 11, 上海.
- [8] 赵铁军. 混凝土渗透性[M], 科学出版社, 2006.01, 北京.

~~[通讯作者]: 孔祥芝 (1980-), 男, 高级工程师, 研究方向: 主要从事水工混凝土材料及耐久性研究。~~

~~[联系地址]: 中国水利水电科学研究院结构材料所302室~~

~~[联系电话]: 电话010-68781738; Email: 24792119@qq.com~~

~~[通讯作者]: 孔祥芝电话: 18600754954~~

~~[邮寄地址]: 北京市海淀区玉渊潭南路 3 号, 水科院结构材料所 302 室 (100038)~~

来稿日期	第一作者姓名	稿件名称	电子邮箱	备注
2014-1-27 0:00:00	孔祥芝	大掺量双掺料胶凝体系硬化浆体孔结构发展试验研究	24792119@qq.com	20140214定-1412

请输出第一作者姓名及您的投稿邮箱查找您的稿件，准确信息以 [lnthjz@vip.163.com](mailto:lnthjz@vip.163.com) 邮箱回复为准，请您关注自己的投稿邮箱。