

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.020

## 大掺量矿物掺合料复合胶凝材料性能研究

董帅志<sup>1</sup>, 余其俊<sup>1,2,3,4</sup>, 张强<sup>5</sup>, 罗扣<sup>5</sup>, 储玉婷<sup>1</sup>, 詹炳根<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009; 5. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**为降低大体积混凝土的水化热和收缩开裂风险,同时保证力学性能等服役性能,文章采用 3 种不同细度矿渣粉,通过与质量分数均为 30% 的硅酸盐水泥和粉煤灰进行复掺,制备大掺量矿物掺合料复合胶凝材料,并对其浆体的水化放热、化学收缩、孔径分布和砂浆试件的力学性能、抗开裂性能进行研究。结果表明:同时掺加 3 种不同细度矿渣的复合胶凝材料,由于矿物掺合料的填充作用,使其孔隙尺寸减小,密实度增加,保证了较好力学性能;同时通过优化级配,使得体系水化放热量和最大放热速率大幅度降低,化学收缩量减小,实现温和水化的作用;复合胶凝材料砂浆初始开裂时间推迟 20.8%,裂缝宽度减少 50%,大大降低大体积混凝土的收缩开裂风险,提升了抗开裂性能。

**关键词:**大掺量矿物掺合料;水化热;化学收缩;孔径分布;抗开裂性能

**中图分类号:**TU528.041 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)09-1289-08

### Study on properties of composite cementitious materials with high-volume supplementary cementitious materials

DONG Shuaizhi<sup>1</sup>, YU Qijun<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Qiang<sup>5</sup>,  
LUO Kou<sup>5</sup>, CHU Yuting<sup>1</sup>, ZHAN Binggen<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 3. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China; 4. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China; 5. China Railway Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:**To reduce the risk of hydration heat and shrinkage cracking of large-volume concrete while ensuring the service performance such as mechanical properties, three types of slag powders with varying fineness were used, compounded with Portland cement and fly ash both at a mass fraction of 30%, to prepare composite cementitious materials with high-volume supplementary cementitious materials. The hydration heat release, chemical shrinkage, pore size distribution of composite cementitious material slurry and the mechanical properties and cracking resistance of mortar specimens were studied. The results show that the composite cementitious materials incorporating three types of slag powders with varying fineness demonstrate reduced pore size and increased compactness due to the filling effect of the mineral admixture, which ensures better mechanical properties. At the same time, by

**收稿日期:**2023-06-08; **修回日期:**2023-06-28

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52002129);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划资助项目(2020-重大-01)

**作者简介:**董帅志(1998—),男,河北廊坊人,合肥工业大学硕士生;

余其俊(1962—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:concyuq@hfut.edu.cn;

张强(1966—),男,江苏连云港人,博士,中铁大桥勘测设计院集团有限公司教授级高级工程师;

罗扣(1981—),男,湖北咸宁人,中铁大桥勘测设计院集团有限公司正高级工程师;

詹炳根(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

optimizing the gradation, the hydration heat release and maximum heat release rate of the system are greatly reduced, the amount of chemical shrinkage is reduced, and the effect of mild hydration is realized. The initial cracking time of the mortar of composite cementitious material is delayed by 20.8%, and the crack width is reduced by 50%, which greatly reduces the risk of shrinkage cracking of large-volume concrete and improves its cracking resistance.

**Key words:** high-volume supplementary cementitious materials; hydration heat; chemical shrinkage; pore size distribution; cracking resistance

在水电站、大坝、机场、桥梁等大体积混凝土结构中,由于其早期水化放热速率较快,热量不易传导,导致混凝土结构内部温度升高<sup>[1-2]</sup>,使结构在早期存在收缩开裂风险,对工程耐久性和使用寿命极为不利<sup>[3]</sup>。在工程上,通过添加适量矿物掺合料的方式降低混凝土早期水化放热<sup>[4-5]</sup>。文献[6]试验发现,矿物掺合料的加入减小混凝土早期的水化热和绝热温升速率,在矿渣或粉煤灰替代 20%水泥的混凝土中,水化热分别下降 8.0%、18.5%,总绝热温升分别为 65.87、59.09 °C,在保持较低硬化温度的同时具有较低水化热,可以最大限度地减少由水泥水化热引起的热应力带来的早期开裂风险;文献[7-8]通过试验发现在矿物掺合料促使复合水泥水化热大幅降低的同时,混凝土的早期抗压和抗拉强度都明显降低,其中复掺 18.2%矿渣和 19.6%粉煤灰的复合水泥,7 d 抗压强度降低 46%,抗拉强度降低 53%,28 d 抗压和抗拉强度略低于纯水泥混凝土。

上述研究表明,矿物掺合料的引入极大地降低了复合水泥的早期收缩<sup>[9]</sup>和水化放热<sup>[10]</sup>。但目前工程中使用的矿渣较粗,其活性较低,矿物掺合料的加入导致复合水泥早期强度大幅度下降<sup>[11-12]</sup>,同时掺量也十分有限。超细矿渣由于其比表面积较大、活性较高,可以较好改善复合水泥

早期强度较低的问题,但同样存在着水化放热较高,导致结构存在开裂风险。因此,继续开展对掺加不同细度矿物掺合料的复合胶凝材料性能研究,研制一种操作简单、力学性能优良、水化放热平稳、适用于大体积混凝土工程的大掺量矿物掺合料的复合胶凝材料。

针对以上问题,本文通过将水泥、粉煤灰和 3 种不同细度的矿渣进行复掺,使矿物掺合料占胶凝材料总质量分数提高至 70%,大大降低水泥用量。通过复配优化级配,提高复合水泥紧密程度,在保证体系早期强度和长期力学性能的同时,调整水化进程,使其水化进程适中,减小早期水化放热和化学收缩,实现不同细度胶凝材料的梯度温和水化,降低了水泥基材料早期开裂风险。

## 1 原材料和试验方法

### 1.1 原材料

水泥采用安徽海螺水泥股份有限公司生产的 P·O 42.5 水泥,密度为 3.03 g/cm<sup>3</sup>;粉煤灰为 I 级(高钙)粉煤灰(FA);矿渣(SP)为粒化高炉矿渣粉,细度分别为 400、800、1 000 目;水为自来水。粒度分布如图 1 所示,各原材料的化学成分见表 1 所列。试验采用的细骨料为天然河砂,最大粒径为 4.75 mm,细度模数为 3.05,符合 II 区中砂要求。

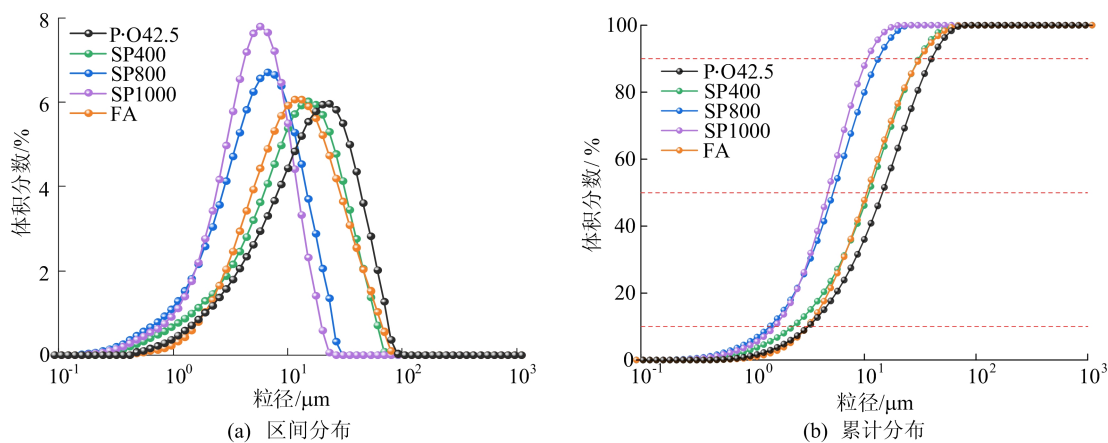


图 1 原材料的粒度分布

表1 原材料的化学成分及其质量分数

原材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	R <sub>2</sub> O	烧失量
水泥	69.74	13.83	3.23	3.94	4.35	0.75	0.80	2.64
矿渣 SP400	50.41	24.70	12.07	3.53	0.62	2.83	0.85	0.92
矿渣 SP800	47.21	25.98	13.28	2.90	1.09	2.85	0.90	0.87
矿渣 SP1000	47.26	25.95	13.25	2.95	1.18	2.84	0.91	0.87
粉煤灰	10.80	45.53	20.95	2.05	10.58	0.76	2.95	0.77

## 1.2 配合比

试样采用的对照组 RF 和 4 组不同试验组胶凝材料配比见表 2 所列。试验组中水泥和粉煤灰质量分数均为 30%，矿渣质量分数均为 40%。其中 S-400、S-800、S-1000 组中矿渣分别为使用 400、800、1 000 目单细度矿渣；PF 组中矿渣为 3 种不同细度矿渣按 1:1:1 质量比进行混合。

表2 胶凝材料配比设计

试样	水泥	粉煤灰	矿渣		
			400 目	800 目	1 000 目
RF	100	0			
S-400	30	30	40		
S-800	30	30		40	
S-1000	30	30			40
PF	30	30	40/3	40/3	40/3

## 1.3 试验方法

1) 抗压强度试验。胶砂试件的制备、养护、强度测试参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)<sup>[13]</sup>进行,试件尺寸(长×宽×高)为 40 mm×40 mm×160 mm,成型后在温度为(20±1)℃、相对湿度≥95%的标准养护条件下分别养护至 3、7、28 d,测定其抗压强度。

2) 水化热试验。采用 I CAL 8000HPC 型等温量热仪(美国 Calmetrix 公司)测量胶凝材料浆体的水化放热量和放热速率,将拌合均匀的浆体放入测量杯中,立即使用计算机自动连续记录结果,读数时间间隔为 1 min,测量时间为 72 h。

3) 化学收缩试验。试验装置如图 2 所示,参照 ASTM C1608—2017<sup>[14]</sup>中的方法,按照表 2 的胶凝材料配比,将配制好的水泥浆体放入带毛细管的玻璃瓶中,使玻璃瓶内的膏体高度在 5~10 mm 之间,装满水并在毛细管顶部滴上 1 滴石蜡油,置于(23±2)℃恒温水槽中,前 8 h 读数时间间隔为 30 min,随后读数间隔为 8 h,记录前 7 d 的毛细管读数,进行 2 组平行试验取平均值。

4) 压汞试验。根据胶凝材料配合比按水灰质量比 0.5 制作复合水泥净浆试块,在标准养护

室中养护 28 d 后取中间部分的净浆样品,尺寸 1~2 cm,质量 2 g 左右。将净浆样品在无水乙醇中全浸泡 24 h,取出后于真空干燥器中干燥 1 d。将干燥的砂浆样品置于压汞仪中进行试验。

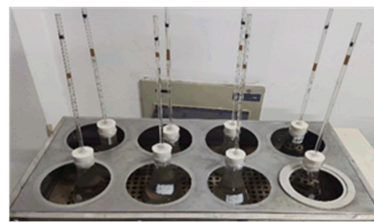


图2 水化水泥浆体的化学收缩试验装置

5) 约束椭圆环试验。试验装置如图 3 所示,成型约束椭圆环砂浆试件的存放环境温度应为(23±2)℃、相对湿度(50±4)%,成型 24 h 后取下外圈,用石墨在表面涂抹 1 层导电涂层带,使用 CFM-1 型五路水泥裂缝监测仪确定初始开裂时间,并在试件成型后 3、7、10、14、21、28 d 利用 HC-CK101 裂缝宽度观测仪测量裂缝宽度,以上试验均采用 2 组平行试验。

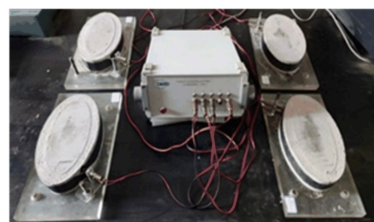


图3 水泥砂浆的约束椭圆环试验装置

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合胶凝材料水化热分析

不同配比水泥浆体 72 h 内放热规律如图 4 所示。从图 4a 可以看出,RF 组水化放热总量最高,且水化较快,大部分水化放热发生在 30 h 之前,矿物掺合料的加入有效降低了浆体水化放热量,矿渣细度的降低促进了水化反应速率及进程,水化放热量增大<sup>[15]</sup>,其中掺加 70% 矿物掺合料的 S-400、S-800、S-1000 和 PF 组的 3 d 水化放热量

分别降低 39.93%、29.24%、22.38%、30.96%。

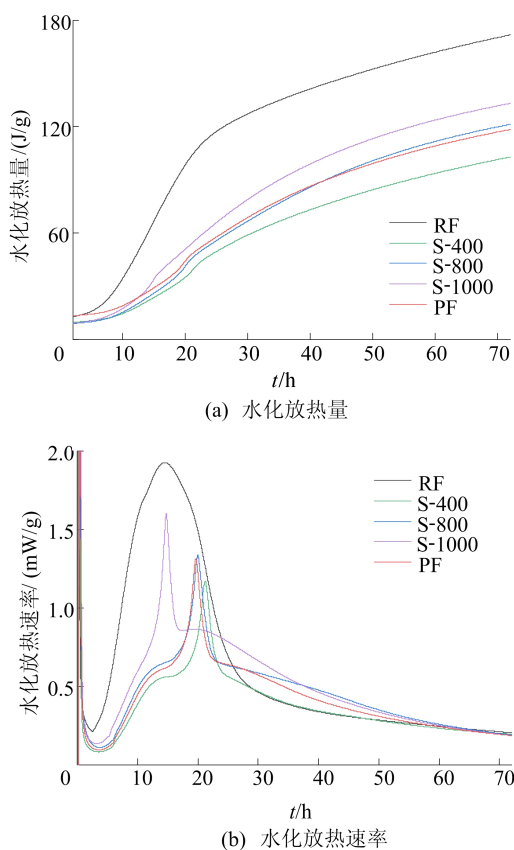


图 4 不同配比水泥浆体 72 h 内放热规律

矿物掺合料的掺加除了在浆体放热总量和放热速率上得到大幅度降低,还有效延缓水化热曲线峰值出现的时间<sup>[16]</sup>,实现了温和水化的作用。由图 4b 可知,矿物掺合料的掺加使各浆体放热峰值位置都发生右移,同时最大放热速率也均有所减小,与 RF 组相比,S-400、S-800、S-1000 和 PF 组的 3 d 水化放热速率分别降低 39.22%、30.91%、16.88%、31.95%。此外,RF 组的放热区间主要集中在 2~24 h,此时的水化放热速率高于其他组,但 24 h 后则低于其他组,可见矿物掺合料的掺加降低放热峰值的同时,拓宽了浆体的放热区间,增长了放热持续时间,使得放热分散,有效降低混凝土在水化阶段由于快速大量放热而导致的开裂问题。

对放热量数据进行归一化处理得到的矿物掺合料对水化热的贡献如图 5 所示。从图 5 可以看出,各种不同原材料成分在水化放热量上的贡献,在水泥水化的早期,即水化 3 d 龄期,水泥水化放热 171.74 J/g,粉煤灰水化放热 40.66 J/g,不同细度矿渣 SP400、SP800、SP1000 水化放热分别为 97.97、141.93、173.43 J/g,掺加不同细度矿

渣 PF 水化放热 136.58 J/g,比水泥放热减少了 20.48%。可见,除 SP1000 矿渣的水化放热量较大外,其他细度的矿物掺合料都可以降低单位质量粉体的水化放热量,SP1000 矿渣由于活性较高,对早期强度发展有利,但是对整体水化放热量的降低没有益处,不宜单独大量掺加<sup>[17]</sup>,而 PF 组通过复配,改善了复合水泥的颗粒分布,掺入部分 SP1000 矿渣的同时,同样起到延缓水化放热尖峰出现时间,优化水化进程,降低水化放热量的作用。

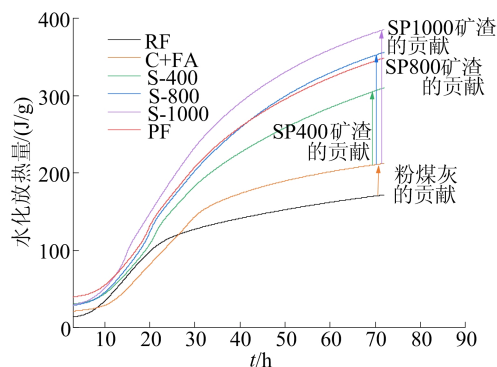


图 5 矿物掺合料对水化热的贡献

## 2.2 复合胶凝材料化学收缩分析

不同配比水泥浆体对化学收缩的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出,化学收缩随着时间的推移逐渐增大,尤其在水化早期,化学收缩迅速增长,之后逐渐放缓直到趋于稳定。水泥浆体化学收缩主要可以分成 3 个阶段<sup>[18]</sup>:① 加速期,主要发生在水化过程第 1 天,化学收缩速率迅速增长,达到最高值;② 减速期,主要发生在水化过程第 2~4 天,化学收缩仍在增长,但增长速率逐渐放缓;③ 平稳期,在水化 4 d 以后,随着水化程度不断加深,化学收缩速率逐渐趋于稳定,水泥浆体整体化学收缩变化量较小。

7 d 时,RF 组化学收缩为 0.079 8 mL/g,S-1000 化学收缩为 0.079 9 mL/g,与 RF 组化学收缩相近,其余 S-800、S-400、PF 组化学收缩分别为 0.064 4、0.061 5、0.067 5 mL/g,比 RF 组分别减少 19.30%、22.93%、15.41%。粉煤灰与矿渣复掺在早期表现出极强的抑制收缩作用,一方面是粉煤灰的滚珠效应使得复合粉早期与水反应较为缓慢,另一方面粉煤灰、矿渣和水泥颗粒间的复合微集料效应可以进一步改善水泥浆微观结构性能,进而降低收缩值<sup>[19]</sup>。

SP1000 矿渣由于其比表面积较大,拥有较强的活性,但导致的较大收缩量不利于大体积混凝土

的抗裂性能。PF 组中也含有较多活性较高的 SP1000 矿渣,通过复配将 3 种细度矿渣混合很好地解决了这个问题,使得复合水泥化学收缩大幅下降,克服了 SP1000 矿渣由于比表面积大导致的化学收缩较大的缺点,实现了温和水化的效果。

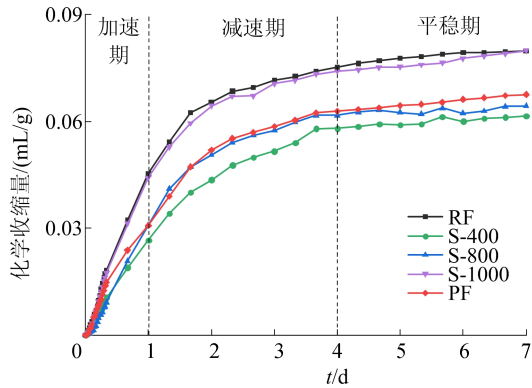


图 6 不同配比对水泥浆体化学收缩的影响

### 2.3 复合胶凝材料孔径分布

不同配比水泥浆体养护 28 d 后孔径分布和累计孔隙体积分别如图 7、图 8 所示。不同配比水泥浆体养护 28 d 后孔径主要包含 3 个特征范围:凝胶孔隙( $\leq 10$  nm)、过渡孔隙( $(10, 100]$  nm)、毛细管孔隙( $(100, 1\ 000]$  nm)<sup>[20]</sup>。其中 S-1000、S-800 和 PF 这 3 组孔隙主要为凝胶孔隙和过渡孔隙,S-400 和 RF 组 3 种孔隙均有包含。

通过观察各试样孔径分布的峰可以看出,掺加矿物掺合料的 4 个试验组的峰值均只有 1 个且孔隙尺寸均在  $(10, 100]$  nm 范围内,其中 S-1000 组峰值孔隙尺寸最小,约为 20 nm;S-800 组和 PF 组孔隙尺寸相近,约为 50 nm;S-400 组峰值尺寸最大,约为 75 nm。RF 组则有 2 个峰值,分别在  $(10, 100]$  nm 和  $(100, 1\ 000]$  nm 范围内,大小分别约为 50、200 nm。

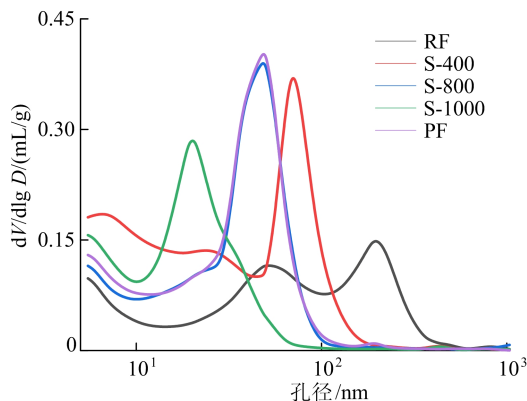


图 7 不同配比水泥浆体孔径分布

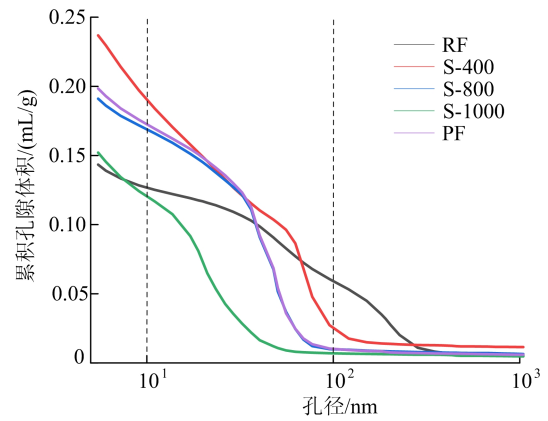


图 8 不同配比水泥浆体累计孔隙体积

不同配比水泥浆体孔隙体积分数如图 9 所示,孔隙率见表 3 所列。

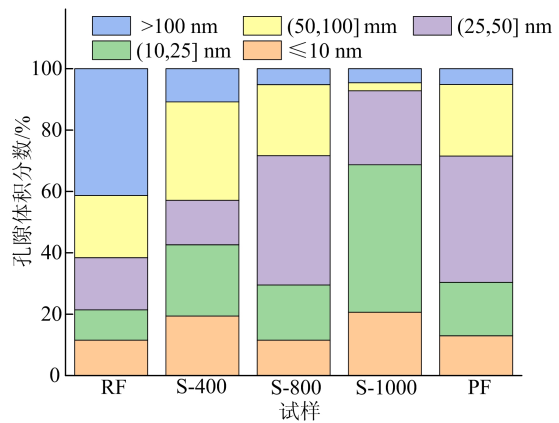


图 9 不同配比水泥浆体孔隙体积分数

表 3 不同配比水泥浆孔隙率 %

试样	RF	S-400	S-800	S-1000	PF
孔隙率	22.83	33.01	27.54	23.30	28.51

为表征不同配比水泥浆体孔径分布的不同,将测得的孔径分布分为小毛细孔( $\leq 10$  nm、 $(10, 25]$  nm、 $(25, 50]$  nm),中毛细孔( $[50, 100]$  nm)和大毛细孔( $> 100$  nm)<sup>[21]</sup>。随着矿渣细度增加,水泥浆体大毛细孔占比急剧减少,小毛细孔占比急剧增大,并且孔隙率也明显减少,有助于试样抗压强度的提高<sup>[22]</sup>。S-1000 组小毛细孔占到 92.8%,S-800 组和 PF 组小毛细孔占比均为 71.6%,S-400 组小毛细孔占比仅为 57.9%。S-1000、S-800 和 PF 这 3 组的大毛细孔占比均较少,约为 5%;而 S-400 组的大毛细孔占比为 10.8%,远超过其他试验组。

与纯水泥浆体相比,矿物掺合料的加入使得峰对应的孔隙尺寸减小,表明粉煤灰和矿渣在水

化过程中起到填充作用,尤其是矿渣水化形成的水化硅酸钙(C-S-H)相关闭了孔隙结构,使得大孔的数量减少,小孔的数量增加<sup>[23]</sup>。同时掺入矿渣细度越细,活性越高,填充效应越明显,28 d 龄期的水泥浆体结构越致密。S-1000 组结构最为紧密,S-400 组结构最为松散。PF 组通过复配,也起到了较好的填充效果,增大了胶凝孔隙和过渡孔隙所占比例,减少了毛细管孔隙所占比例,减小了水泥浆体的孔隙尺寸,提高了水泥浆体的密实度。

#### 2.4 复合胶凝材料砂浆力学性能

不同配比复合胶凝材料砂浆抗压强度如图 10 所示。矿物掺合料的加入降低了砂浆早期强度,试验组的 3、7、28 d 抗压强度均低于 RF 组,但抗压强度发展迅速,与 RF 组相比,S-400、S-800、S-1000、PF 组的 3 d 抗压强度分别降低 64.10%、48.30%、41.88%、51.28%,7 d 抗压强度分别降低 51.27%、29.01%、21.69%、31.55%,但 28 d 抗压强度仅降低 18.53%、7.32%、2.37%、6.03%。

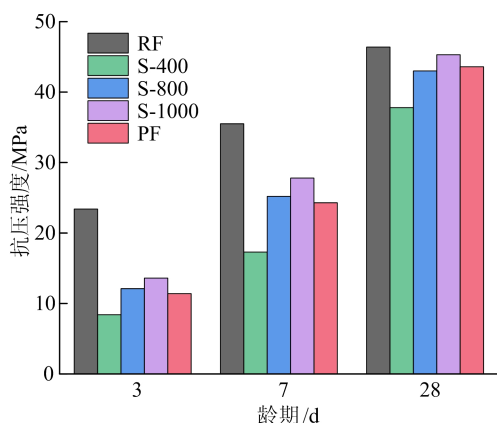


图 10 复合胶凝材料砂浆抗压强度

其中对于单细度矿渣和粉煤灰的复合砂浆,随着矿渣细度的减小,抗压强度呈上升趋势,这是由于较细的矿渣比表面积较大、活性较高,加快了矿渣的水化速率,使水化产物增多,有利于抗压强度的提升<sup>[24]</sup>,这与 2.1 节的水化放热规律是一致的。同时由孔径分布得出,较细矿渣早期的火山灰反应较大,生成了较多的水化硅酸钙(C-S-H),填充了体系的孔隙,降低了体系的孔隙率,减小了体系的孔隙半径,因此使得体系更为致密,也提升了体系的抗压强度。试验组 28 d 抗压强度从大到小依次为 SP1000、SP800、PF、SP400,该结果与孔径分布得出的结果相对应。

PF 组通过复配改善了复合胶凝材料的颗粒分布,在保证早期强度的前提上,后期强度有着较快提升,同时优化水化进程,使得体系水化程度适中,减少体系的放热量和放热速率,实现了温和水化。相较于 S-400 组,由于早期水化进程相对较快,早期强度有着较大提升,同时强度发展最为迅速,养护 28 d 后试样有着更为致密的孔隙结构,强度提高 15.3%。相较 S-1000 组,优化水化进程,使得体系水化程度适中,强度仅降低 3.9%,但放热量降低 21.3%,化学收缩量降低 15.5%,对于大体积混凝土,耐久性能大幅度提高。

#### 2.5 复合胶凝材料抗开裂性能

试样经椭圆环约束试验测得的开裂情况和初始开裂时间如图 11、图 12 所示。

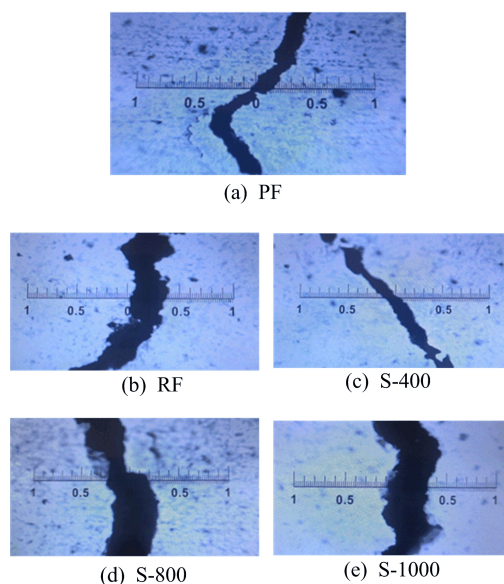


图 11 砂浆椭圆环约束试验开裂情况

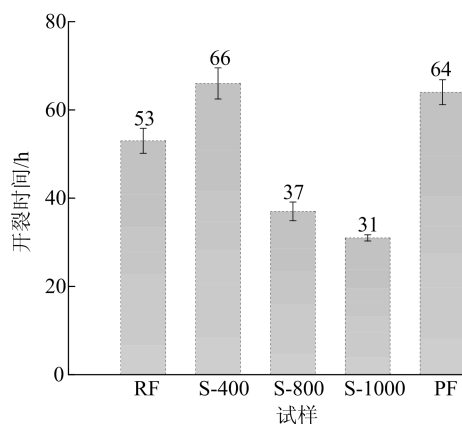


图 12 试样初始开裂时间

由图 12 可知:RF 组的开裂时间为 53 h, S-1000 和 S-800 组早于 RF 组开裂,开裂时间分

别为 31、37 h,分别提前了 41.5%、30.2%;而 S-400 和 PF 组晚于 RF 组开裂,开裂时间分别为 66、64 h,分别推迟了 24.5%、20.8%。由此可以看出,砂浆的初始开裂时间对于复合胶凝材料中矿渣的细度有着较大的敏感度,超细矿渣对开裂性能有较大的影响,但是 3 种细度矿渣混合后和粉煤灰复掺很好解决了这一问题,PF 组的开裂时间与 S-400 组相近。

椭圆环约束试验中不同配比复合胶凝材料砂浆裂纹平均宽度随龄期的发展情况如图 13 所示。所有样品的裂缝平均宽度在前 7 d 均迅速增长,7 d 后裂缝平均宽度增长速率显著减慢。S-800 和 S-1000 组裂缝平均宽度最大且发展较快,说明超细矿渣对水泥砂浆的裂缝平均宽度有着较大的影响,单掺矿渣越细,裂缝平均宽度越大,由 2.1 节复合胶凝材料水化热可以看出,较细的矿渣比表面积较大,在水化早期反应较快,放热速率较快,放热量较大,导致开裂时间较早、裂缝平均宽度较大。

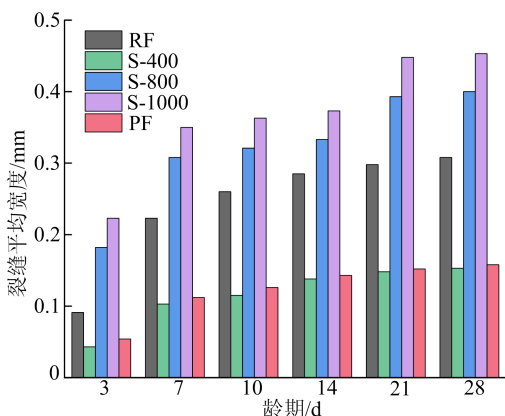


图 13 裂缝平均宽度随龄期的发展情况

PF 组开裂时间及裂缝平均宽度与 S-400 组相差不大,说明 PF 组通过复配很好地改善了超细矿渣对水泥砂浆开裂性能的影响,不仅试样首次开裂时间晚于 RF 组,裂缝平均宽度也较小且发展较缓慢,28 d 裂缝平均宽度约为 RF 组的 50%,大大降低了水泥砂浆的裂缝平均宽度,对于大体积混凝土的抗裂性能有着较大提高。

### 3 结 论

1) 矿物掺合料的加入降低了砂浆的抗压强度,但水化放热量、放热速率和化学收缩都有大幅度降低,抗开裂性能也有较大提升。

2) 掺加单细度矿渣与水泥和粉煤灰复合时,

矿渣越细,活性越高,早期水化反应更加剧烈,形成的水化产物使得体系更为紧密,早期强度越高,但水化放热量、放热速率和化学收缩量较大,抗开裂性能较差。

3) 同时掺加 3 种不同细度矿渣的复合胶凝材料,通过复配进行级配调控后,与纯水泥相比,3 d 放热总量降低 30.96%,水化放热速率峰值降低 31.95%,化学收缩减少 15.41%,椭圆环约束开裂时间推迟 20.8%,裂缝平均宽度减小了 50%,保证了早期强度的同时,后期强度发展迅速,实现不同细度胶凝材料的梯度温和水化,降低水泥基材料早期开裂风险,提高大体积混凝土的耐久性和使用寿命。

### [参 考 文 献]

- [1] XU G, TIAN Q, MIAO J, et al. Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149:367-377.
- [2] 钟翔,李北星. 温度匹配养护对大掺量矿物掺合料混凝土抗压强度及早期水化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10):3080-3086.
- [3] CHEN F. Control of early-age cracking in super-long mass concrete structures[J]. Sustainability, 2022, 14(7):3809.
- [4] WANG Q, CHEN H H, ZHANG Z Q. Properties of high-volume limestone powder concrete under standard curing and steam-curing conditions[J]. Powder Technology, 2016, 301:16-25.
- [5] 朱鹏飞,宫经伟,唐新军. 大体积混凝土胶凝材料体系水化放热规律研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6):111-116.
- [6] HAN F H, ZHANG Z Q. Hydration, mechanical properties and durability of high-strength concrete under different curing conditions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 132:823-834.
- [7] KLEMCZAK B, BATOG M, GIERGICZNY Z, et al. Complex effect of concrete composition on the thermo-mechanical behaviour of mass concrete[J]. Materials, 2018, 11(11):2207.
- [8] BATOG M, GIERGICZNY Z. Influence of mass concrete constituents on its properties[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:221-230.
- [9] HU X, SHI C J, SHI Z G, et al. Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153:857-865.
- [10] 李虹燕,丁铸,邢锋,等. 粉煤灰、矿渣对水泥水化热的影响[J]. 混凝土, 2008(10):54-57.
- [11] LI G, ZHAO X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(3):293-299.
- [12] 颜帮川,李中,刘先杰,等. 粉煤灰及矿渣对水泥浆体系早

- 期水化热效应的控制研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 52-59.
- [13] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-13.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste: ASTM C 1608[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007: 1-4.
- [15] 魏莹. 基于不同粒径分布的低熟料矿渣水泥水化特性和孔结构特性[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1796-1800.
- [16] YAO Y, YANG D W, ZENG J L, et al. Influences of fly ash and fluorgypsum on the hydration heat and compressive strength of cement[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 106(3): 869-874.
- [17] 苏英, 卢敏, 贺行洋, 等. 大掺量矿渣-水泥复合胶凝材料反应动力学研究[J]. 混凝土, 2019(8): 107-107, 111.
- [18] 吴福飞, 董双快, 赵振华, 等. 矿物掺合料对水泥基材料化学收缩与光谱性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 177-184.
- [19] 周文芳. 复合水泥净浆化学收缩影响因素研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [20] LI K, ZENG Q, LUO M, et al. Effect of self-desiccation on the pore structure of paste and mortar incorporating 70% GGBS[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 329-337.
- [21] CHOI Y C, KIM J, CHOI S. Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 96-103.
- [22] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 162-169.
- [23] ORTEGA J M, ALBALADEJO A, PASTOR J L, et al. Influence of using slag cement on the microstructure and durability related properties of cement grouts for micropiles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 84-93.
- [24] 贺行洋, 张晨, 苏英, 等. 大掺量矿渣-水泥复合胶凝材料体系的性能研究[J]. 混凝土, 2019(9): 83-87.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1296 页)

#### 4 结 论

本文以实际工程为研究对象, 建立 4 个计算模型, 对黏滞阻尼器和隔震支座的减震性能展开研究。在两者多遇地震时结构最大位移相近的基础上, 通过对比分析多遇地震和罕遇地震时各种方案的最大加速度、层间位移角等地震响应, 得出以下结论:

1) 在多遇地震作用下, 增设黏滞阻尼器能减少结构的部分地震响应, 而隔震结构对结构的最大加速度和层间位移角的减震能力优于黏滞阻尼器。

2) 在罕遇地震作用下, 黏滞阻尼器和隔震支座均能有效减小结构的楼层剪力和层间位移角等地震响应。其中黏滞阻尼器结构对层间位移角和楼层剪力的减震效果不如隔震结构明显; 而混合布置方案对地震作用的控制效果优于单独布置黏滞阻尼器和隔震支座方案。

3) 黏滞阻尼器与隔震支座在大震下能够正常工作并发挥耗散能量的作用, 使结构抗震性能得到较大提升, 从而减轻了结构主要构件的损伤。

#### [参 考 文 献]

- [1] 佟道林. 高烈度地区某框架结构的隔震分析与设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(1): 138-143.
- [2] 胥玉祥, 朱玉华, 卢文胜. 云南省博物馆新馆隔震结构模拟地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(10): 39-47.
- [3] 田洁, 张俊发, 刘云贺, 等. 铅芯橡胶支座基础隔震体系参数优化配置研究[J]. 世界地震工程, 2003(1): 158-163.
- [4] 翁大根, 张超, 吕西林, 等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
- [5] 闫锋, 吕西林. 附加与不附加黏滞阻尼墙的 RC 框架对比振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 8-16.
- [6] 国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 31-47.
- [7] 魏新强, 安贵仓, 唐晓琳. 兰州某中学教学楼隔震加固设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(11): 54-59.
- [8] 陈道政, 黄冬冬. 基础隔震与黏滞阻尼器减震性能对比研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(24): 58-62, 73.
- [9] 屈涛, 卫文, 古静欣. 某学院楼减隔震方案比选与设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(21): 139-143.

(责任编辑 吴亮)