

何锐,柴华,安炬峰,等.粉煤灰微珠粒径及掺量对灌浆料性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(4):15-26.

HE Rui, CHAI Hua, AN Ju-feng, et al. Influence of particle size and dosing of fly ash microbeads on performance of grout[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 15-26.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.04.002

## 粉煤灰微珠粒径及掺量对灌浆料性能的影响

何锐<sup>1</sup>,柴华<sup>1</sup>,安炬峰<sup>2</sup>,李亮亮<sup>1</sup>,王振军<sup>1</sup>,杨水平<sup>3</sup>

(1. 长安大学材料科学与工程学院,陕西西安 710010; 2. 中交二公局第四工程有限公司,河南洛阳 471000;  
3. 甘肃省临夏公路事业发展中心双城公路段,甘肃临夏 731800)

**摘要:**为了探究粉煤灰微珠粒径及掺量对灌浆料性能的影响,选取了 4 种不同粒径的粉煤灰微珠制备灌浆料试样,测试其流动度与抗压强度,并采用气孔结构分析仪、等温微量热仪与扫描电镜(SEM),分析灌浆料孔隙结构参数、水化放热特性与微观形貌的变化,探讨了粉煤灰微珠对灌浆料性能的影响机理。试验结果表明:小粒径( $\leq 45\text{ }\mu\text{m}$ )的粉煤灰微珠有助于增加灌浆料的流动性和提升灌浆料的 28 d 强度,且当  $10\text{ }\mu\text{m}$  的微珠掺量(质量分数,下同)为 10% 时,28 d 抗压强度最大;粉煤灰微珠的掺加增大了灌浆料的总含气量,当  $10\text{ }\mu\text{m}$  的微珠掺量为 5% 时,可以细化并改善材料的孔结构;随着粉煤灰微珠掺量的增加,水化放热量降低显著,且水化放热量随着粉煤灰微珠粒径的增大而降低;SEM 微观分析显示小粒径的粉煤灰微珠表面生成了更多的水化产物。总体来看,掺入 5%~10% 小粒径的粉煤灰微珠,可以显著提升灌浆料工作性能和 28 d 抗压强度,且降低灌浆料的水化放热。

**关键词:**道路工程;粉煤灰微珠;粒径;流动度;抗压强度;孔隙结构;水化热

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)04-0015-12

## Influence of particle size and dosing of fly ash microbeads on performance of grout

HE Rui<sup>1</sup>, CHAI Hua<sup>1</sup>, AN Ju-feng<sup>2</sup>, LI Liang-liang<sup>1</sup>, WANG Zhen-jun<sup>1</sup>, YANG Shui-ping<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710010, Shannxi, China;

2. CCCC-SHB Fourth Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China; 3. Gansu Province Linxia Highway Development Center Shuangcheng Highway Section, Linxia 731800, Gansu, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of the particle size and dosage of fly ash microbeads on the performance of grout, four types of fly ash microbeads with different particle sizes were selected to prepare grout and test its fluidity and compressive strength. The pore structure analyzer, isothermal microcalorimeter and scanning electron microscope (SEM) were used to analyze the changes of pore structure parameters, hydration exothermic properties and microscopic morphology of the grout, and to explore the influence mechanism of fly ash microbeads on the performance of the grout. The results show that small particle size ( $\leq 45\text{ }\mu\text{m}$ ) of the fly ash microbeads help to increase the fluidity of the grout and enhance the 28 d strength

收稿日期:2023-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52278429);陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLGY-25, 2023-YBGY-495);

陕西省交通科技项目(21-50K, 23-91K);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102312402)

作者简介:何锐(1984-),男,湖北襄阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:heruia@163.com.

of the grout, and when 10  $\mu\text{m}$  beads dosage (mass fraction, the same below) is 10%, the 28 d compressive strength is the largest. Fly ash microbeads doping increase the total air content of the grout, when 10  $\mu\text{m}$  beads dosage is 5%, it can be refined and improve the pore structure of the material. With the increase of the dosage of fly ash microbeads, the decrease of the exothermic heat of hydration is more significant, and the exothermic heat of hydration decreases with the increase of the particle size of fly ash microbeads. SEM microanalysis shows that the surface of fly ash microbeads with small particle size generates more hydration products. Overall, the incorporation of 5% to 10% small particle size fly ash microbeads can significantly improve the working performance and 28 d compressive strength of the grout, and reduce the exothermic heat of hydration of the grout. 4 tabs, 19 figs, 26 refs.

**Key words:** road engineering; fly ash microbead; particle size; flowability; compressive strength; pore structure; hydration heat

## 0 引言

在“双碳”战略目标的指导下,装配式建筑因其低能耗、高效率、可持续性等优点,受到越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>。对于装配式建筑而言,构件之间的可靠连接至关重要,是确保整体结构安全的基本保障,而钢筋套筒灌浆连接是装配式构件之间主要的连接方式,因此灌浆材料的性能直接决定了装配式构件之间连接质量的好坏<sup>[5-6]</sup>。

传统套筒灌浆料的组成中含有大量的水泥,而水泥的生产伴随着高消耗、高能耗、高污染,已经不符合当代社会的绿色发展理念,因此低碳灌浆料的研发势在必行。粉煤灰微珠(fly ash microbeads, FAM)是一种具有改善胶凝材料密度、和易性、耐久性和耐热性能的优秀辅助胶凝材料<sup>[7-9]</sup>。因增加了比表面积和填充效果,含有粉煤灰微珠的砂浆或混凝土可以获得更高的力学性能<sup>[10-12]</sup>。杜涛等研究了在水泥磨制阶段掺入部分粉煤灰微珠作为水泥熟料的替代品,指出随着掺量增高,3 d 抗压强度降低幅度越明显,28 d 抗压强度先增大后降低,在掺量(质量分数,下同)为 5% 时达到峰值,同时掺入粉煤灰微珠后,各组的 28 d 抗压强度均高于对照组<sup>[13]</sup>。李丹萍研究了混凝土在掺入粉煤灰微珠后的抗压强度及其对混凝土钢筋黏结强度的影响,结果表明 28 d 前粉煤灰微珠的掺入导致混凝土水化程度的降低,抗压强度发展缓慢,28 d 后粉煤灰微珠才与水泥水化产物进行二次水化,此过程循环反复进而促进水泥进一步水化,抗压强度发展较快<sup>[14]</sup>。Aydin 等研究了粉煤灰细度对掺加粉煤灰水泥砂浆力学性能的影响,指出当不同细度的粉煤灰掺入后,由于碱

硅反应,可以使水泥砂浆的膨胀率降低。粉煤灰微珠具有的独特颗粒形态,可以对砂浆或者混凝土的流动度与孔隙率产生重要影响<sup>[15]</sup>。Patricia 等研究了水泥基材料流动性能随粉煤灰微珠细度的改变趋势,研究结果表明粉煤灰微珠能改善净浆、砂浆和混凝土的和易性,并与高效减水剂协同发挥改善和易性的作用<sup>[16]</sup>。Kwan 等研究发现,添加粉煤灰微珠可以增加胶凝材料的堆积密度,改善和易性。粉煤灰微珠的球形形态,起到了球轴承的作用,有助于提高灌浆料的流动性和降低其黏附性<sup>[17]</sup>。Hanif 等研究发现含粉煤灰微珠的复合材料由于微珠球形中空结构而降低了密度,但由于粉煤灰微珠的强烈火山灰反应而没有显著损失力学性能<sup>[18]</sup>。Wang 等研究了粉煤灰微珠对高性能混凝土微观结构和宏观性能的影响,研究发现粉煤灰微珠在早期对高性能混凝土孔隙结构改善的贡献小于晚期<sup>[19]</sup>。

综上所述,目前关于粉煤灰微珠在水泥基灌浆材料中的应用研究仅限于粉煤灰微珠掺量对灌浆料性能的影响阶段,而对于粉煤灰微珠粒径大小对水泥基灌浆料性能影响方面的研究则相对缺乏。已有研究表明,粉煤灰微珠粒径大小对混凝土孔隙结构和力学性能具有重要影响<sup>[20]</sup>。因此,本文采用不同粒径的粉煤灰微珠作为填料制备灌浆料,系统研究粉煤灰微珠的粒径和掺量对灌浆料流动度和抗压强度的影响规律,并采用气孔结构分析仪、等温量热仪和扫描电镜分析不同组试样的孔隙结构参数、水化特性和微观形貌的变化,以探讨粉煤灰微珠对灌浆料性能的影响机理。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

水泥选择 P·I 52.5 硅酸盐水泥,其技术指标见 表 1。集料选用 ISO 标准砂;减水剂选用减水率为 25% 的西卡 P530 聚羧酸高性能减水剂;膨胀剂选用 UEA 型混凝土膨胀剂;消泡剂选用 pH 值为 6~8 的工业级消泡剂。

表 1 P·I 52.5 硅酸盐水泥技术指标  
Tab. 1 P·I 52.5 silicate cement technical indexes

参数	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
参数值	3.15	349	158	239	5.71	9.65	31.73	59.97

粉煤灰微珠用筛网分选出粒径为 4 个级别的颗粒:10 μm(A)、45 μm(B)、125 μm(C)、250 μm(D)。粉煤灰微珠粒径  $d$  分布如图 1 所示,不同粒径粉煤灰微珠化学组成见表 2,X 射线衍射仪(XRD)分析如图 2 所示,通过扫描电镜(SEM)可以观察到粉煤灰微珠微观形貌如图 3 所示。

1.2 试验方案

为了研究粉煤灰微珠的粒径和掺量对灌浆料性能的影响,以粉煤灰微珠的粒径和掺量作为变量,水胶比为 0.24,砂胶比为 1:1;外加剂中减水剂掺量为 1%,膨胀剂掺量为 0.5%,消泡剂掺量为 0.1%。试验中粉煤灰微珠替代水泥,替代水泥的质量分别为 0.5%、10%、15%、20%(粉煤灰微珠与水泥掺量总和为 100%),试验中粉煤灰微珠粒径分别为 10、45、125、250 μm。具体配合比设计见表 3。

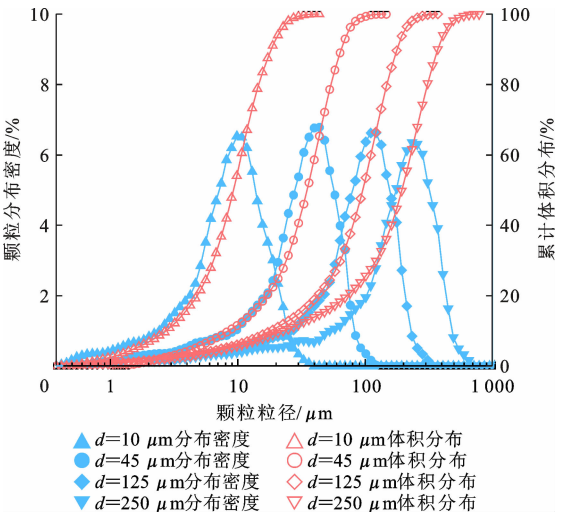


图 1 粉煤灰微珠粒径分布  
Fig. 1 Fly ash microbeads particle size distributions

表 2 不同粒径粉煤灰微珠化学组成

Tab. 2 Chemical compositions of fly ash microbeads with different particle sizes											%
编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO
FAM-A	57.46	30.18	3.16	3.32	1.03	0.92	0.88	0.61	0.05	0.83	0.03
FAM-B	57.24	30.29	3.27	3.34	1.04	0.92	0.90	0.63	0.05	0.89	0.04
FAM-C	60.83	30.50	3.82	3.43	1.15	0.93	0.75	0.50	0.06	0.77	0.03
FAM-D	60.15	29.45	3.29	3.63	1.02	0.88	0.67	0.58	0.07	0.76	0.05

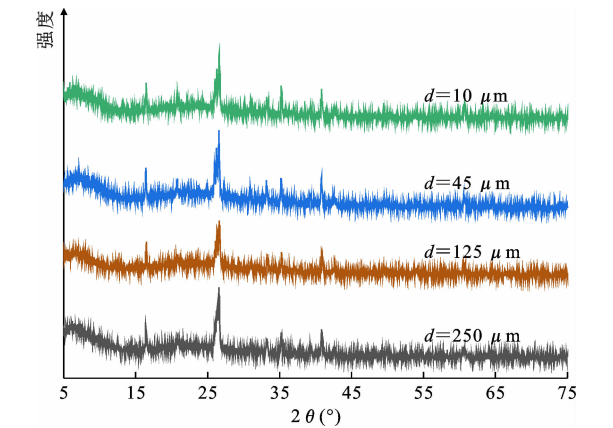


图 2 不同粒径粉煤灰微珠 XRD 分析  
Fig. 2 XRD analysis of fly ash microbeads with different particle sizes

1.3 测试方法

试验流程如图 4 所示,流动度测试根据《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019)中的截锥流动度测试方法。所用的截锥圆模上口直径为 100±0.5 mm,下口直径为 70±0.5 mm,高 60±0.5 mm。玻璃板尺寸为 500 mm×500 mm。测试时润湿截锥圆模和玻璃板,将灌浆料倒入截锥圆模至与上口齐平,提起截锥圆模至浆体不再流动,测试浆体在玻璃板上的最大扩散直径及其垂直方向上的直径,计算两者平均值作为测试结果。

根据《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019)进行抗压强度测试。试件的尺寸为 40 mm(长)×40 mm(宽)×160 mm(高)。

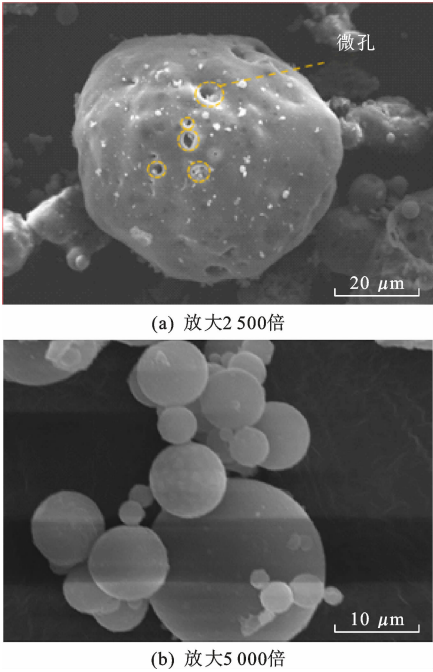


图 3 粉煤灰微珠 SEM 图像  
Fig. 3 SEM images of fly ash microbeads

使用 Rapid Air 457 型硬化孔结构测试仪(图 5)对硬化浆体的气孔测试分析。制备测试试样流程如下,首先将养护至规定龄期的试件切割成 10~20 mm 厚的片状试样,打磨抛光并进行表面清理,用黑色墨水对试件光滑表面进行染色,待干燥后将白色纳米碳酸钙均匀涂抹在试件表面以填充孔隙,最后用刀片刮除试件表面多余粉末进行测试。

使用 I-Cal 8000 HPC Calorimeter 型八通道等温微量热仪分析水泥浆体水化的放热速率和放热总量。试验前先将测试环境温度调至 23 ℃,并将原材料置于测试箱内至少恒温 2 h,待等温微量热仪系统上各通道曲线稳定后开始测试。测试过程如图 6 所示。

从测试后的 28 d 抗压试件中取小颗粒,使用酒精进行水分置换后放入 70 ℃ 的烘箱中 4 h,然后使用 Hitachi S-4800 冷场发射扫描电子显微镜进行微观形貌观察。

表 3 灌浆料配合比设计  
Tab. 3 Grout ratios design

编号	粉煤灰微珠		水泥掺量/%	砂胶比	水胶比	减水剂/%	膨胀剂/%	消泡剂/%
	粒径/μm	掺量/%						
F0		0	100	1 : 1	0.24	1	0.5	0.1
A1~A4	10	5、10、15、20	95、90、85、80	1 : 1	0.24	1	0.5	0.1
B1~B4	45	5、10、15、20	95、90、85、80	1 : 1	0.24	1	0.5	0.1
C1~C4	125	5、10、15、20	95、90、85、80	1 : 1	0.24	1	0.5	0.1
D1~D4	250	5、10、15、20	95、90、85、80	1 : 1	0.24	1	0.5	0.1

注:编号中的字母 A~D 代表对应粒径,数字 1~4 代表所对应的掺量分别为 5%、10%、15%、20%;F0 表示未掺粉煤灰微珠的基准组。

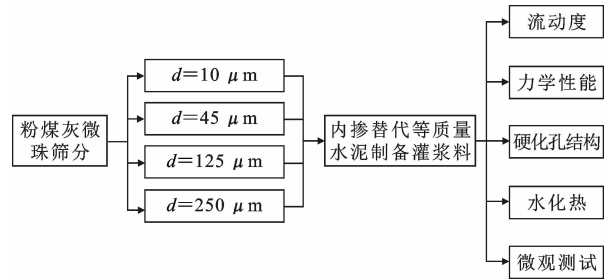


图 4 试验流程  
Fig. 4 Test flow

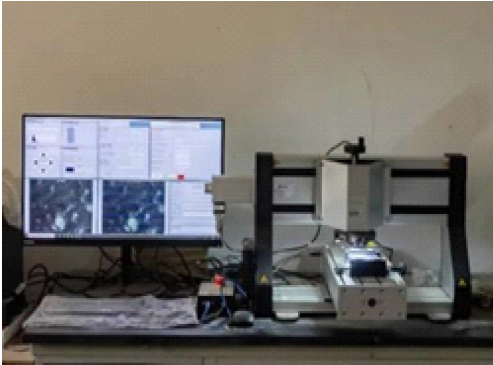


图 5 Rapid air 457 硬化孔结构测试仪器  
Fig. 5 Rapid air 457 hardened pore structure test apparatus

2 结果与讨论

2.1 微珠对工作性能的影响

流动性可直接反映灌浆料的均匀性及其现场施工的难易程度。不同粒径和掺量的粉煤灰微珠对灌浆料工作性能的影响,测试结果如图 7 所示。

由图 7 可知,掺加 10、45 μm 的粉煤灰微珠有利于灌浆料流动度的提升,且掺量越大灌浆料的流动度提升越大。而掺加 125、250 μm 的粉煤灰微珠会降低灌浆料的流动度,且掺量越大灌浆料的流动度下降越多。在相同粉煤灰微珠掺量的情

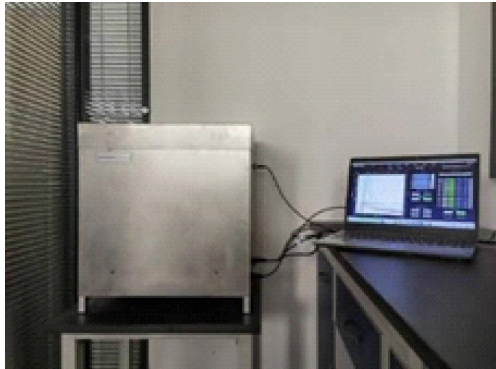


图 6 水化热测试过程  
Fig. 6 Heat of hydration test process

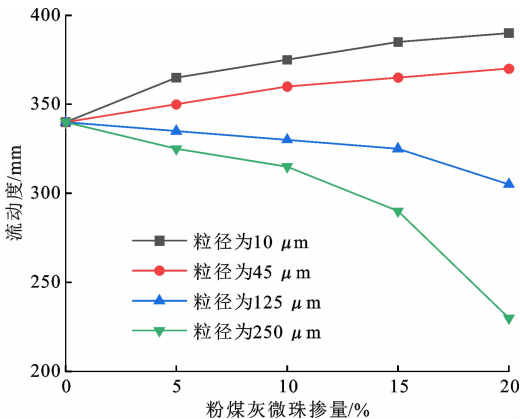


图 7 粉煤灰微珠粒径与掺量对灌浆料流动度的影响  
Fig. 7 Effects of particle size and dosing of fly ash microbeads on grout fluidity

况下,粒径越大,流动度越小。出现这种现象的原因与粉煤灰微珠颗粒的形貌有关。由图 3 可知,颗粒越大的粉煤灰微珠,其表面越凹凸不平且具有大量的孔隙,而粉煤灰微珠的颗粒越小,其整体形态呈现为更标准的球形,并具有光滑封闭的表面。所以,在胶凝体系中,小粒径粉煤灰微珠的加入,能更好地发挥滚珠润滑效应,降低浆体内部的界面摩擦,改善水泥颗粒间的相对滑移,使灌浆料具有更大的和易性。随着微珠含量的增加,灌浆料流动性能变优。而当掺入大粒径的粉煤灰微珠时,粉煤灰微珠颗粒中不规则形状的大颗粒含量较多,其表面凹凸不平,颗粒间相对运动时,摩擦力增加;另外,由于微珠为中空结构且表面孔隙丰富,这会使得其在灌浆料拌和过程中吸收大量的拌和水,从而严重影响灌浆料的流动性。

2.2 微珠对力学性能的影响

强度是决定灌浆料是否能满足设计要求的关键指标。不同粒径和掺量的粉煤灰微珠对灌浆料在 3、7、28 d 抗压强度的影响,试验结果如图 8~图 10

所示。

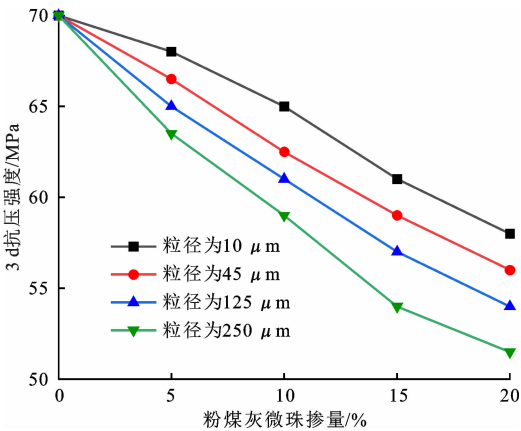


图 8 粉煤灰微珠对灌浆料 3 d 抗压强度的影响  
Fig. 8 Effects of fly ash microbeads on 3 d compressive strength of grout

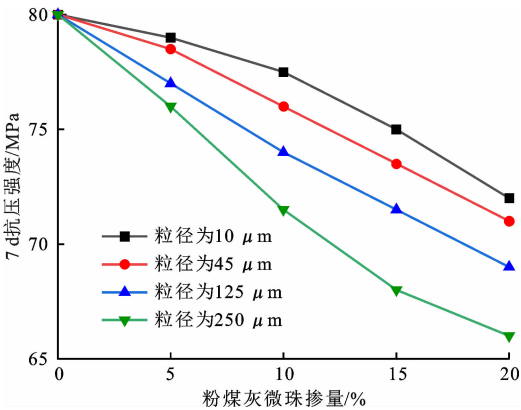


图 9 粉煤灰微珠对灌浆料 7 d 抗压强度的影响  
Fig. 9 Effects of fly ash microbeads on 7 d compressive strength of grout

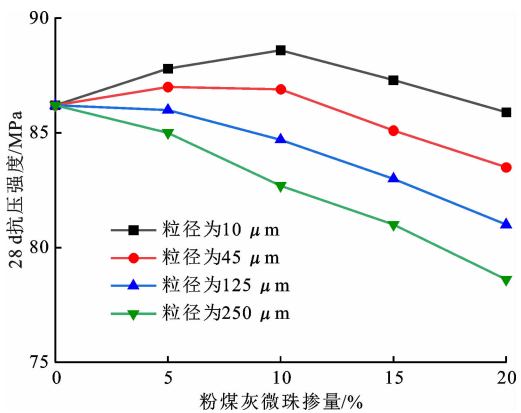


图 10 粉煤灰微珠对灌浆料 28 d 抗压强度的影响  
Fig. 10 Effects of fly ash microbeads on 28 d compressive strength of grout

由图 8 和图 9 可知,灌浆料 3、7 d 抗压强度随着粉煤灰微珠掺量的增加而减小,且 4 种粒径的强度变化规律相似。当粉煤灰微珠掺量为 0% 时,灌



浆料的 3 d 抗压强度为 70 MPa,当粉煤灰微珠掺量为 20%时,掺入 10、45、125、250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料抗压强度分别下降到了 58.1、56.7、54.3、51.5 MPa。当粉煤灰微珠掺量为 0%时,灌浆料的 7 d 抗压强度为 80.2 MPa,当粉煤灰微珠掺量为 20%时,掺入 10、45、125、250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料抗压强度分别下降到了 72.6、71.2、69.4、66.7 MPa。由图 10 可知,当养护龄期到 28 d 时,掺入粒径为 10、45  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠,灌浆料抗压强度随着掺量的增加先增大后减小,未掺粉煤灰微珠的灌浆料抗压强度为 86.2 MPa,当粉煤灰微珠掺量增加到 10%时,抗压强度分别增加到了 88.6、86.9 MPa,当微珠掺量增加到 20%时,抗压强度分别减小到 85.9、83.5 MPa。而掺入 125、250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠时,抗压强度随着掺量的增加而降低,由 86.2 MPa 下降到了 81.0、78.6 MPa。结果表明,灌浆料抗压强度随着粉煤灰微珠粒径的减小而增大,这是因为小粒径微珠可更有效地填充灌浆料的孔隙结构,增加了浆体密实性,粉煤灰微珠的粒径越小,其化学活性就越强,可以与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  更好地进行二次水化反应,生成更多具有良好黏结力的水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,从而增强了灌浆料中各组成部分之间的黏结性与整体性,提高了灌浆料的抗压强度<sup>[21]</sup>。

粉煤灰微珠对灌浆料强度的影响主要来自于火山灰效应和微填充效应。粉煤灰微珠的火山灰活性较低,只有经过一定龄期在碱性环境养护下,才能发生二次水化反应,为灌浆料的后期抗压强度做出贡献。因此,当粉煤灰微珠替代水泥时,会导致可进行水化反应的水泥质量减少,从而降低灌浆料的早期抗压强度,大量掺入粉煤灰微珠会引起力学性能的

下降<sup>[22-23]</sup>。随着养护龄期的不断延长,灌浆料的抗压强度也在逐渐增大。在养护到 28 d 时,灌浆料中粉煤灰微珠与水泥发生进一步的火山灰反应,灌浆料中各组分的黏结性和整体性增强,孔隙率降低,抗压强度得到提升,即当掺入粒径为 10、45  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠时,掺量在 5%和 10%且灌浆料的 28 d 强度优于基准组。

2.3 微珠对气孔结构的影响

灌浆料是一种非均质多孔材料,其结构内部有许多大小形状各异的孔隙,孔隙结构对灌浆料物理性能有很大的影响。采用 Rapid Air 457 对硬化灌浆料中的气孔进行分析,以评价掺入不同粒径与掺量的粉煤灰微珠对灌浆料气孔特征的影响。当掺入粉煤灰微珠粒径为 10  $\mu\text{m}$  时,不同掺量下的硬化浆体气孔扫描如图 11 所示,当粉煤灰微珠掺量为 10%时,不同粒径微珠的硬化浆体气孔结构扫描如图 12 所示。

从图 11 和图 12 观察到的灌浆料横截面与鲍尔斯模型中提出的具有球形孔隙横截面一致。可考虑试件孔隙分布均匀,无气孔偏析和气孔聚集等微结构缺陷<sup>[24]</sup>。掺入不同粒径与掺量的微珠硬化 28 d 后,灌浆料气孔结构性质如表 4 所示。

灌浆料中粉煤灰微珠的加入导致总含气量的增长。表 4 为不同粒径与掺量的粉煤灰微珠灌浆料硬化砂浆中气孔的参数,从表 4 可以看出,未掺粉煤灰微珠的灌浆料中总含气量与平均孔径分别为 0.737%和 21  $\mu\text{m}$ 。当粒径为 10  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠替代水泥质量的 5%、10%、15%和 20%时,含气量分别为 0.594%、0.802%、1.432%和 1.724%,对应的平均孔径分别为 19、18、26、32  $\mu\text{m}$ 。当用粒径为 10、45、125、250  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠替代水泥质量的

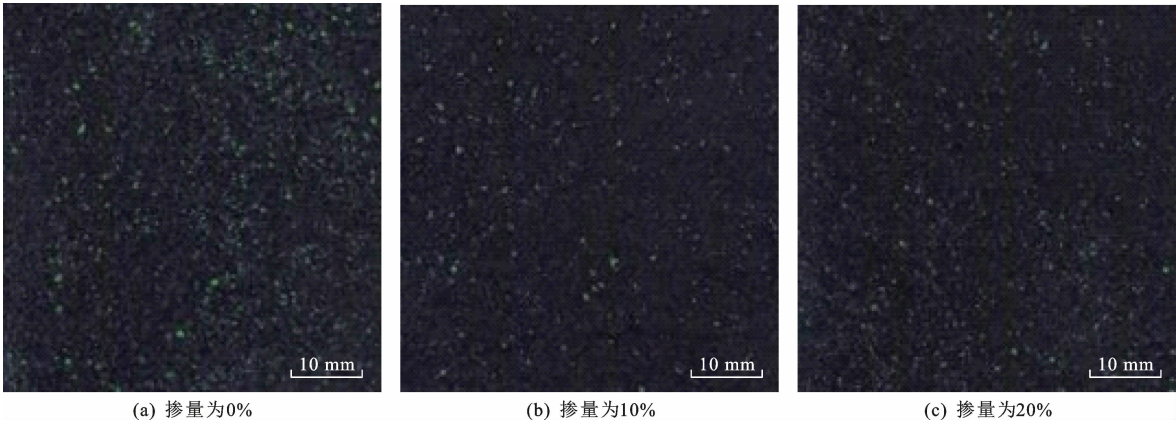


图 11 10  $\mu\text{m}$  粒径的粉煤灰微珠在不同掺量下的硬化浆体扫描电镜  
Fig. 11 SEM of hardened slurry with 10  $\mu\text{m}$  particle size of fly ash microbeads at different dosages

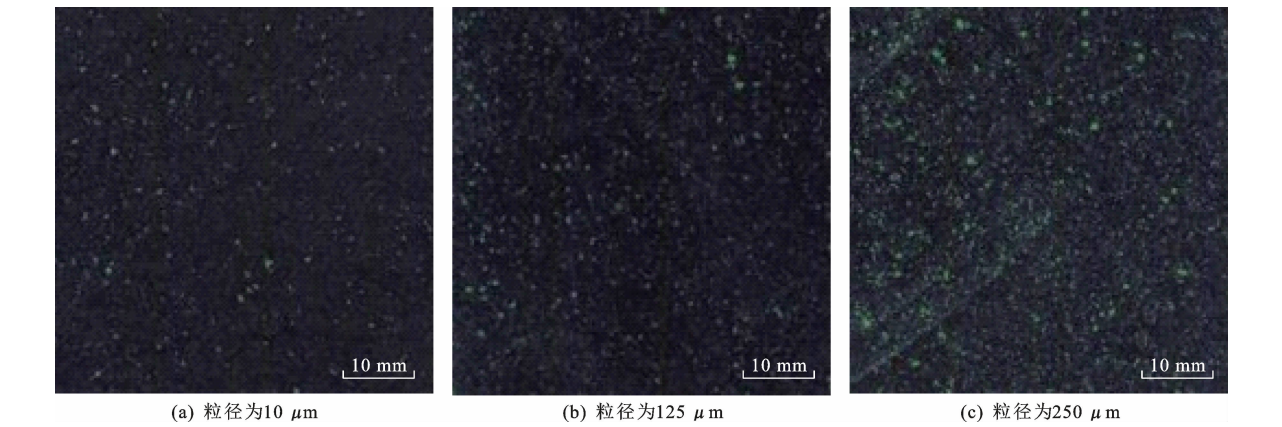


图 12 10%掺量的粉煤灰微珠在不同粒径下的硬化浆体扫描电镜

Fig. 12 SEM of hardened slurry with 10% dosage of fly ash microbeads at different particle sizes

表 4 不同粒径与掺量的粉煤灰微珠灌浆料硬化砂浆中气孔的参数

灌浆料中气孔结构特征	不同 FAM 粒径与不同掺量下的参数							
	掺量 0%	掺量 5%	掺量 10%	掺量 15%	掺量 20%	掺量 10%		
		粒径 10 μm				粒径 45 μm	粒径 125 μm	粒径 250 μm
总含气量/%	0.737	0.594	0.802	1.432	1.724	0.895	1.286	2.456
平均孔径/μm	21	19	18	26	32	30	32	45
气孔间距系数/μm	195	191	182	160	144	175	168	147

10%时,对应的含气量分别为0.802%、0.895%、1.286%和2.456%,同时平均孔径分别为18、30、32、45 μm。随着粉煤灰微珠掺量的增加与微珠粒径的增大,总含气量与平均孔径也随之增大。

随着微孔含量和总含气量的增加,气孔间距系数减小,气孔间距系数在0.144~0.195 mm。当粒径为10 μm的粉煤灰微珠替代水泥质量的5%、10%、15%和20%时,气孔间距系数相较于未掺微珠的灌浆料分别减少了2%、6%、18%、26%;当用粒径为10、45、125、250 μm的粉煤灰微珠替代水泥质量的10%时,气孔间距系数相较于未掺微珠的灌浆料分别减少了6%、10%、14%和25%。与未掺粉煤灰微珠的灌浆料相比,粉煤灰微珠的存在显著降低了气孔间距系数。

灌浆料养护28 d后,掺入不同粒径和掺量粉煤灰微珠的灌浆料孔径分布如图13、图14所示。从图13可以看出,当4种粒径粉煤灰微珠的掺量都为10%时,100 μm以下的最大孔隙含量分别为灌浆料总孔隙率的34%、27%、25%和29%,500 μm以上的最大孔隙含量分别为灌浆料总孔隙率的15%、20%、16%和20%。随着粉煤灰微珠粒径的增加,灌浆料总含气量增加;当掺入粒径为10 μm的粉煤灰微珠时,所产生0~100 μm的气孔比例最高且500 μm以上的气孔比例最小。当掺入粒径为250

μm的粉煤灰微珠时,200 μm以上的气孔比例最大。从图14可以看出,当粒径为10 μm粉煤灰微珠替代水泥质量的0%、5%、10%、15%和20%时,100 μm以下的最大孔隙含量分别为灌浆料总孔隙率的25%、31%、34%、24%和22%,500 μm以上的最大孔隙含量分别为灌浆料总孔隙率的26%、27%、15%、18%和18%。随着微珠掺量的增加,灌浆料总含气量增加,这是因为胶凝体系中粉煤灰微珠掺量的增大,没有足够多的水泥生成水化产物填充内部结构,使灌浆料变得疏松多孔,大孔隙较多,对整体强度不利。但是当粉煤灰微珠掺量为10%时,所产生的微孔比例最大且大于500 μm的气孔比例最小,表明粉煤灰微珠的火山灰和填料效应起了重要作用,此时内部水化产物生长充分,气孔得以有效填充,因此含气量减小,处于中间水平,而且其气孔间距系数也处于中间水平,所以28 d抗压强度最高。同时250 μm微珠的掺入导致灌浆料中(300,500] μm和500 μm以上的气孔比例增加,对强度损害较大。这一趋势与灌浆料28 d抗压强度变化规律一致。

综上所述,通过灌浆料28 d的气孔分布分析可知,随着小粒径粉煤灰微珠的掺入以及微珠掺量的增加,灌浆料孔隙结构得到细化。这是由于小粒径粉煤灰微珠在灌浆料中的滚珠效应更加明显,灌浆

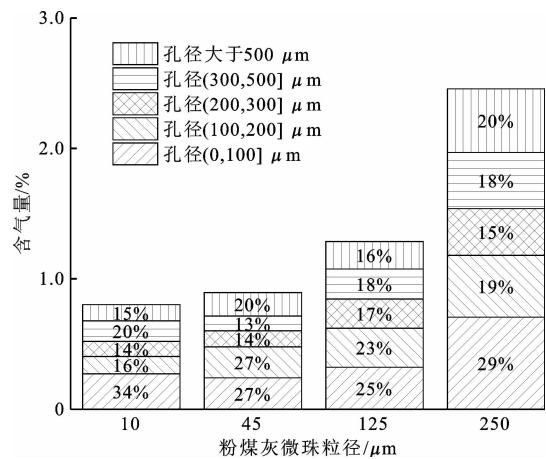


图 13 粉煤灰微珠粒径对孔径分布的影响

Fig. 13 Effects of particle size of fly ash microbeads on pore size distribution

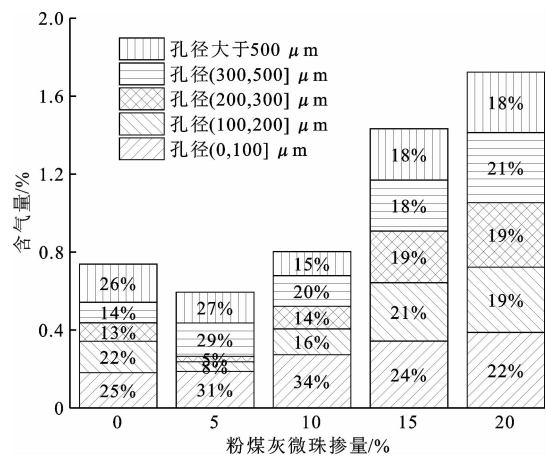


图 14 粉煤灰微珠掺量对孔径分布的影响

Fig. 14 Effects of dosage of fly ash microbeads on pore size distribution

料的流动性增大,在浆料搅拌的过程中,引入的空气被打散成更小粒径的气泡,从而使得灌浆料中的气泡粒径趋于细化,优化了孔隙结构,有利于关键料的强度提升。

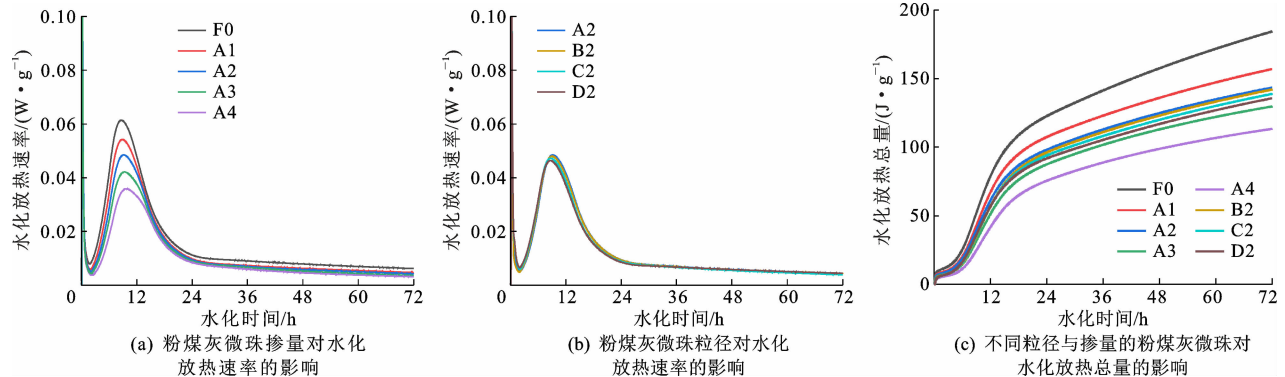


图 15 不同粒径与掺量粉煤灰微珠的胶凝材料水化放热特性

Fig. 15 Hydrochemical exothermic properties of cementitious materials with different particle sizes and dosages of fly ash microbeads

2.4 微珠对水化热的影响

为探究不同粒径与掺量粉煤灰微珠的掺入对水泥水化的影响,通过分别掺入掺量为 10% 的 10  $\mu\text{m}$  (A2)、45  $\mu\text{m}$  (B2)、125  $\mu\text{m}$  (C2) 和 250  $\mu\text{m}$  (D2) 的粉煤灰微珠与掺入掺量为 5% (A1)、10% (A2)、15% (A3)、20% (A4) 的 10  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠,考察水泥水化放热速率曲线及 72 h 水化累计总放热量曲线,测试结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出,F0 的水泥水化诱导期结束。水化加速开始时刻  $t_0$  为 1.83 h,A1~A4 的  $t_0$  时间分别为 1.96、2.08、2.14、2.29 h。粉煤灰微珠的掺入,在水泥水化诱导阶段具有显著的延迟性,而且随着粉煤灰微珠掺量的逐渐增多,这种延迟效应更为突出。这是因为粉煤灰微珠表面会吸附  $\text{Ca}^{2+}$ ,从而降低溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度,使得  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的成核延迟,进而延长了水泥水化诱导期结束的时间<sup>[25]</sup>。根据  $t_0$  对应的放热速率  $q_0$  来看,随着水泥用量的逐步减少,水化放热的最小速率也会逐步下降。A2、B2、C2、D2 的  $t_0$  时间分别为 2.08、2.03、1.99、1.94 h。由此可知,粉煤灰微珠粒径的减小会小幅度延长诱导期。粉煤灰微珠的掺入改善浆体的流动性能,当粒径逐渐减小时,浆体中的实际水胶比会上升,这也导致溶液中的离子浓度达到过饱和状态所需的时间变得更长<sup>[26]</sup>。从  $t_0$  对应的放热速率  $q_0$  来看,D2>C2>B2>A2,表明在水化最早期,随着粉煤灰微珠粒径的增大,胶凝材料热效应有较明显增长。由图 15 可以看出,水泥水化加速期结束、水化减速期开始时刻  $t_1$  时间上 F0 为 8.66 h,A1、A2 与 A0 相差不大,A3、A4 分别为 9.36、9.73 h,明显大于 F0,表明粉煤灰微珠对水泥水化进程的抑制作用依然存在,且掺量越大抑制作用越明显。从  $t_1$  对应的放热速率  $q_1$  来比较,从 F0 到 A4 随着水泥用量的减小,



水泥的水化速率最大值分别为0.061 39、0.054 21、0.048 52、0.042 13、0.035 87 W/g,随粉煤灰微珠掺量的增加,水泥的水化速率最大值降低。A1~A4与 F0 的  $q_1$  比值分别为 88.30%、79.36%、68.63%和 58.43%,呈线性减小的趋势,这与水泥的用量密切相关。A2、B2、C2、D2 的  $t_1$  时间分别为 9.18、9.01、8.77、8.61 h,根据  $q_1$  比较,从 A2 到 D2 随着粉煤灰微珠粒径的增大,水泥的水化速率最大值分别为 0.048 52、0.048 04、0.047 20、0.046 40 W/g。随着粉煤灰微珠的粒径逐渐减小,其在早期的水化活性得到了增强,这也进一步加速了水泥的水化过程,并产生了更多的水化热。同时由于粉煤灰微珠表面含氧官能团含量增加,使得其在水泥石中形成了一个稳定的化学吸附层。因此,水泥的水化放热是第 2 个放热峰的主要驱动力,而粉煤灰微珠的反应放热则起到了补充的角色。从时间上看,随着粉煤灰微珠粒径的减小,水化放热峰值出现时间延后,这表明粉煤灰微珠对水泥水化进程仍然具有一定的延缓作用。在水化 9 h 后,水化放热速率开始下降,并且随着粉煤灰微珠掺量的增加,速率下降的幅度减缓。当水化达到 24 h 时,不同掺量和粒径粉煤灰微珠的水化放热速率趋于相同。

从图 15 还可以观察到,在水化过程的最初 5 h 内,放热量相对较低,而初始期和诱导期的放热量对整个系统的影响并不显著。只有在进入加速阶段之后,水化释放的热量才开始急剧上升,这一增长速度是由水泥与粉煤灰微珠的双重水化作用所决定的。在 70 h 基本达到稳定时,放热总量从大到小依次为 F0、A1、A2、B2、C2、D2、A3、A4,粉煤灰微珠粒径相同,掺量不同时,胶凝材料的放热量随水泥用量的减少而降低;而粉煤灰微珠掺量相

同,粒径不同时,胶凝材料的放热量随粉煤灰微珠粒径的增大而降低。早期是水泥水化占据主导,水化放热量和放热速率都随着水泥掺量减小而降低,但粉煤灰微珠粒径越大,活性越低,因此 72 h 的放热总量仍然随着粒径的增加而减小。同时粉煤灰微珠的掺量越大,水化放热总量越低。

2.5 微观结构分析

采用扫描电镜对粉煤灰微珠灌浆料内部微观形貌进行了研究。选用硬化 28 d 后,粉煤灰微珠含量为 10% 的 4 种灌浆料试样进行观察,结果如图 16~图 19 所示。

可以看出,对于掺入粒径为 45、250  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠,灌浆料中水泥水化反应产物覆盖粉煤灰微珠颗粒的面积小于 10  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠。可以明显观察到,火山灰反应导致了粉煤灰微珠中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的消耗,并形成了 C-S-H 凝胶,这些凝胶主要覆盖在 10  $\mu\text{m}$  微珠的外部晶粒结构上。在图 16 中观察到反应后,粒径 10  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠颗粒与周围凝胶紧密结合,而在图 17~图 19 中,粒径 45、125、250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠颗粒周围比较疏松,可以看到浆体中的大孔隙,内部结构松散。疏松结构的存在导致抗压强度降低,抗压强度变化趋势证实了这一点。从图 18、图 19 可以看出,灌浆料中粒径 125、250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠发生破裂。这表明,由于颗粒尺寸较大,粉煤灰微珠与水泥中的碱性物质反应较慢,并且由于粉煤灰微珠颗粒中空结构,当粒径偏大时,在搅拌成型过程中,粉煤灰微珠容易因为机械原因而破裂。综上所述,小粒径粉煤灰微珠的活性高于大粒径粉煤灰微珠,小粒径微珠的掺入,导致水化产物增多,浆体内部结构更加致密,改善了孔隙结构,从而提升了灌浆料的力学性能。

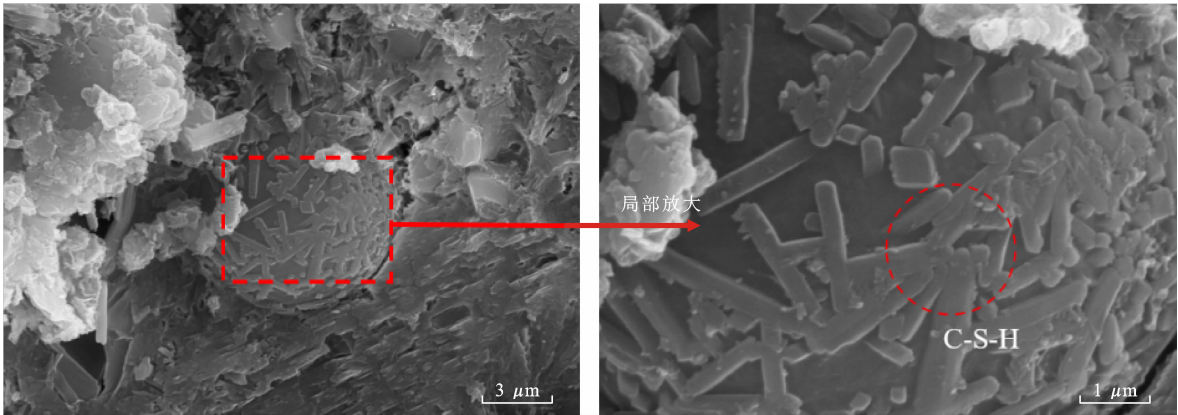


图 16 掺入粒径 10  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料试样  
Fig. 16 Grout specimens mixed with 10  $\mu\text{m}$  fly ash microbeads

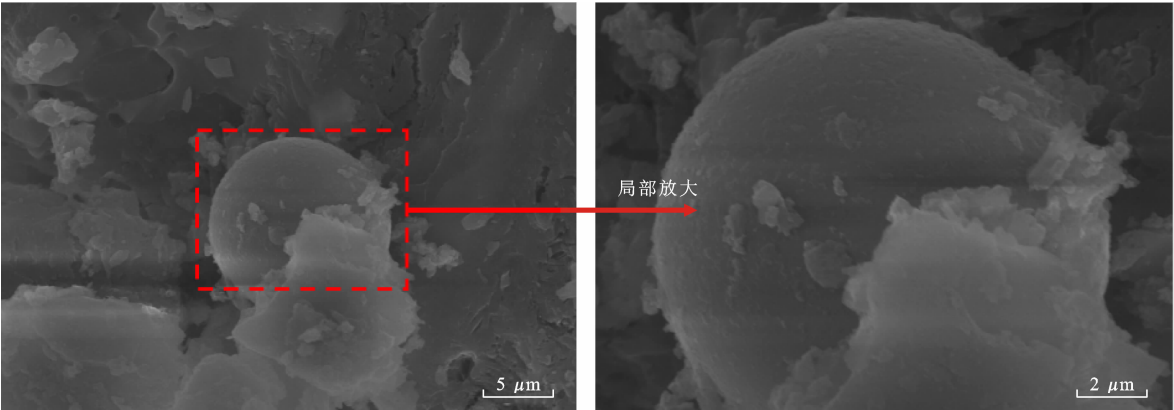


图 17 掺入粒径 45  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料试样  
Fig. 17 Grout specimens mixed with 45  $\mu\text{m}$  fly ash microbeads

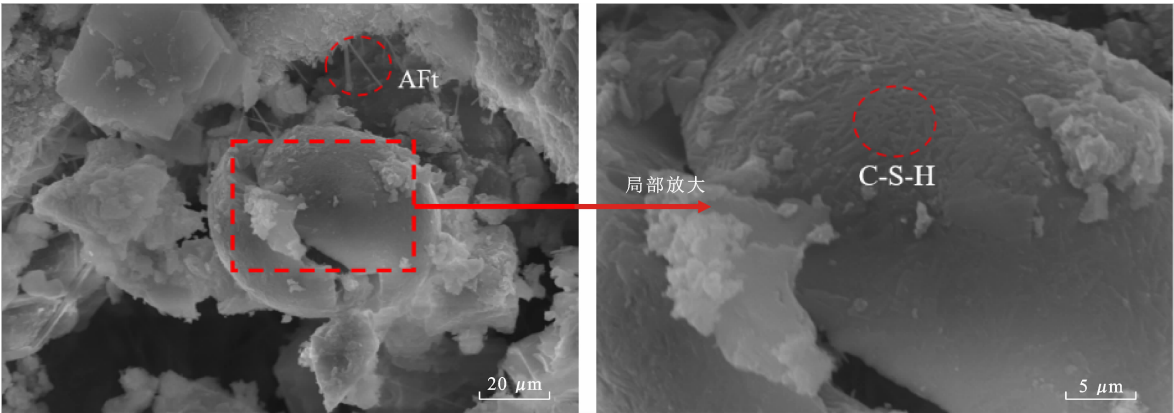


图 18 掺入粒径 125  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料试样  
Fig. 18 Grout specimens mixed with 125  $\mu\text{m}$  fly ash microbeads

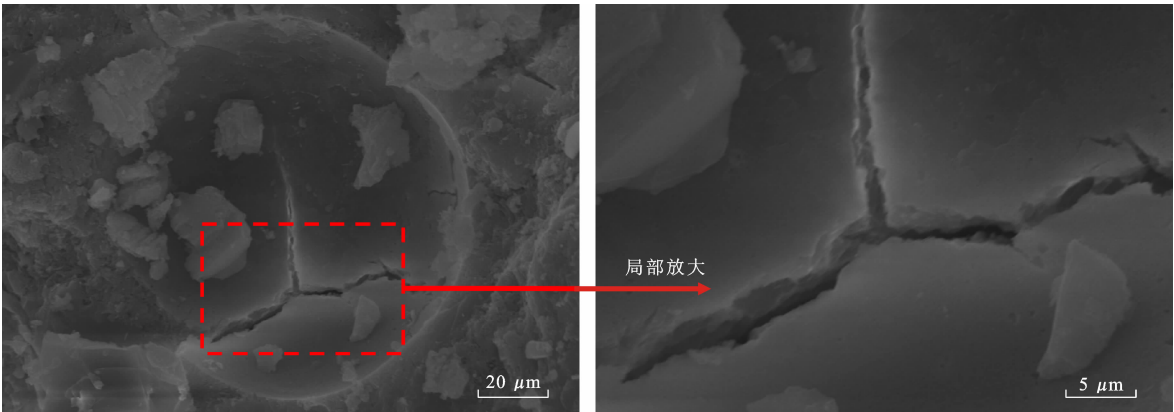


图 19 掺入粒径 250  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠的灌浆料试样  
Fig. 19 Grout specimens mixed with 250  $\mu\text{m}$  fly ash microbeads

3 结 语

- (1)小粒径( $\leq 45\ \mu\text{m}$ )粉煤灰微珠呈球形颗粒,对灌浆料的流动度有改善作用;而大粒径( $\geq 125\ \mu\text{m}$ )微珠表面凹凸不平且有大量孔隙,对流动度有不利影响。
- (2)当掺入 5%~10%的小粒径粉煤灰微珠时,

可以使灌浆料 28 d 抗压强度提高 0.8%~2.8%。

(3)当掺入粒径为 10  $\mu\text{m}$  的粉煤灰微珠时,0~100  $\mu\text{m}$  的气孔所占比最高且 500  $\mu\text{m}$  以上的气孔比例最小,且当掺量为 5%时,优化了灌浆料的孔隙结构同时减小了其总含气量。

(4)随着粉煤灰微珠掺量的增加,水化放热量降低显著,且水泥水化放热量随着粉煤灰微珠粒径的

增大而降低。

(5)综上,当掺入5%~10%粒径为10  $\mu\text{m}$  粉煤灰微珠时,可提升灌浆料28 d抗压强度,同时显著提升灌浆料的流动度,降低水化放热,并改善孔隙结构。

(6)本文仅单独讨论不同粉煤灰微珠粒径下,不同掺量对灌浆料性能的影响,对于粉煤灰微珠不同粒径组合对灌浆料性能的影响有待进一步研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 何锐,王铜,陈华鑫,等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7):29-41.  
HE Rui, WANG Tong, CHEN Hua-xin, et al. Impact of Qinghai-Tibet Plateau's climate on strength and permeability of concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7):29-41.
- [2] HE R, LI M, GAN V J L, et al. BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278(1):123505.
- [3] 何锐,郭健,胡元元,等. 水泥基材料水分传输及数值模拟方法研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(6):1-12.  
HE Rui, GUO Jian, HU Yuan-yuan, et al. Research progress on moisture transport and numerical simulation methods of cement-based materials[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(6):1-12.
- [4] 陈宇亮,曾辉,李婷玉,等. 偏高岭土、粉煤灰和矿渣地聚合物注浆材料研制与应用[J]. 公路工程, 2021, 46(6):142-147.  
CHEN Yu-liang, ZENG Hui, LI Ting-yu, et al. Development and application of metakaolin, fly ash and slag geopolymer grouting material[J]. Highway Engineering, 2021, 46(6):142-147.
- [5] LIU S, LI Z F, YUE T, et al. A dynamic simulation study on the sustainability of prefabricated buildings[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 77(2):103551.
- [6] 李伟民. 我国装配式建筑发展关键影响因素研究[D]. 南京:东南大学, 2020.  
LI Wei-min. Exploring key influence factors on the development of prefabricated buildings in China[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [7] NAVID R, KUENZEL C. Cenospheres: A review[J]. Fuel, 2017, 207(11):1-12.
- [8] DANISH A, ALI MOSABER PANAH M. Formation mechanism and applications of cenospheres: A review[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(11):4539-4557.
- [9] ASAD H, PARTHASARATHY P, MA H Y, et al. Properties improvement of fly ash cenosphere modified cement pastes using nano silica[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 81(8):35-48.
- [10] CHINDAPRASIRT P, JATURAPITAKKUL C, SINSIRI T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(4):425-428.
- [11] MARTIN L H J, FRANK W, ELSA T, et al. Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95(5):152-163.
- [12] CHOI S J, LEE S S, MONTEIRO P J M. Effect of fly ash fineness on temperature rise, setting, and strength development of mortar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(5):499-505.
- [13] 杜涛,李永良,李国祥,等. 粉煤灰微珠替代水泥熟料的试验研究[J]. 水泥, 2017(8):10-13.  
DU Tao, LI Yong-liang, LI Guo-xiang, et al. Study on micro ball of fly ash to replace cement clinker[J]. Cement, 2017(8):10-13.
- [14] 李丹萍. 高温对粉煤灰混凝土与钢筋粘结性能的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.  
LI Dan-ping. Study on bond property of fly ash concrete and steel bar after high temperature[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [15] AYDIN S, KARATAY C, BARADAN B. The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars[J]. Powder Technology, 2010, 197(1/2):68-72.
- [16] PATRICIA M D K, BART C, RUBEN S, et al. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263(12):120493.
- [17] KWAN A, CHEN J J. Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste[J]. Powder Technology, 2013, 234(1):

19-25.

[18] HANIF A, LU Z Y, LI Z J. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites—A Review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144(7): 373-384.

[19] WANG Q, WANG D Q, CHEN H H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2017: 125-137.

[20] ELZBIETA H, ALEKSANDRA K. Effect of particle size of fly ash microspheres (FAMs) on the selected properties of concrete[J]. Minerals, 2022, 12(7): 847.

[21] MALHOTRA V M, ZHANG M H, READ P H, et al. Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(5): 518-525.

[22] DUAN P, SHUI Z H, CHEN W, et al. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 1-6.

[23] 方智全. 纳米二氧化硅和粉煤灰微珠对水泥基材料性能的影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.

FANG Zhi-quan. Study on the effect of nano silica and fly ash microsphere on the performance of cement-based materials[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.

[24] KUMAR R, BHATTACHARJEE B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 155-164.

[25] 王 冲, 杨长辉, 钱觉时, 等. 粉煤灰与矿渣的早期火山灰反应放热行为及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(7): 1050-1058.

WANG Chong, YANG Chang-hui, QIAN Jue-shi, et al. Behavior and mechanism of pozzolanic reaction heat of fly ash and ground granulated blastfurnace slag at early age[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(7): 1050-1058.

[26] 米贵东. 多组分复合胶凝材料体系水化性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

MI Gui-dong. Studies on the hydration performance of complex cementitious materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.