

# 贵州地区粉煤灰种类对长龄期砂浆力学性能与孔隙率的影响

董双快<sup>1</sup>, 吴福飞<sup>1</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 陈聪<sup>1</sup>, 郭爽<sup>1</sup>, 陈亮亮<sup>2</sup>, 叶鸿宏<sup>3</sup>

(1. 贵州师范大学, 贵州 贵阳 550025; 2. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160;

3. 中建西部建设贵州有限公司, 贵州 贵阳 550004)

**摘要:** 为了区别不同电厂Ⅱ级粉煤灰对长龄期砂浆性能的影响作用,采用贵州地区常见的4种粉煤灰(鸭溪、大方、六盘水和都匀Ⅱ级粉煤灰),探索各粉煤灰对长龄期砂浆力学性能、孔隙率、吸水率和微观形貌的影响。结果表明:粉煤灰等质量替代水泥后,有利于提高长龄期砂浆的抗折强度和抗压强度,最大分别增大了94.6%和52.1%(鸭溪)、71.6%和49.5%(大方),100.0%和92.0%(六盘水)以及51.8%和47.6%(都匀);粉煤灰的掺量越大,砂浆的抗折强度和抗压强度的增加速率越大,孔隙率的降低幅度越大,分别为29.7%(六盘水)、40.0%(鸭溪)、28.7%(都匀)和34.9%(大方),同时,4种粉煤灰砂浆的最大吸水率分别降低了21.6%(六盘水)、44.0%(都匀)、39.8%(鸭溪)和38.9%(大方);综合分析发现,养护1000 d后,粉煤灰仍主要发挥填充作用和火山灰效应,其中活性较低的粉煤灰仍以填充作用为主。

**关键词:** 粉煤灰;长龄期砂浆;力学性能;吸水率;孔隙率

中图分类号:TV42<sup>+</sup>3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)06-0180-07

## Effects of different fly ash on the mechanical properties and porosity of long-age mortar in Guizhou region

DONG Shuangkuai<sup>1</sup>, WU Fufei<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, CHEN Cong<sup>1</sup>, GUO Shuang<sup>1</sup>,  
CHEN Liangliang<sup>2</sup>, YE Honghong<sup>3</sup>

(1. Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China; 3. China West Construction Guizhou Co., Ltd., Guiyang 550004, China)

**Abstract:** To distinguish the effect of grade II fly ash from different power plants on the performance of long-age mortar, we used four kinds of commonly used fly ash in Guizhou region (from Yaxi, Dafang, Liupanshui and Douyun) to explore the influence of different fly ash on the mechanical properties, porosity, water absorption and microstructure of long-age mortar. The results show that the flexural strength and compressive strength of long-age mortar improved by 94.6% and 52.1% (Yaxi), 71.6% and 49.5% (Dafang), 100.0% and 92.0% (Liupanshui) and 51.8% and 47.6% (Douyun) respectively, after the replacement of cement with fly ash of equal amount from those regions. The greater the content of fly ash, the greater the increase of the flexural strength and compressive strength of mortar, and the greater the decrease of porosity, which was 29.7% (Liupanshui), 40.0% (Yaxi), 28.7% (Duyun) and 34.9% (Dafang), respectively. Maximum water absorption of these four kinds of fly ash mortar reduced by 21.6% (Liupanshui), 44.0% (Douyun), 39.8% (Yaxi) and 38.9% (Dafang), respectively. Comprehensive analysis found that, after curing for 1000 days, fly ash was still active in the mortar perform-

收稿日期:2019-12-22; 修回日期:2020-06-14

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]125号);贵州科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合LH字[2017]7351号);贵州师范大学2016年博士科研启动项目(0517073);贵州省科学技术基金项目(黔科合LH字[2014]7046号);贵州省科学技术基金项目(黔科合J字LKS[2013]41号)

作者简介:董双快(1988-),女,贵州盘县人,硕士,实验师,从事新型环境材料研发及应用研究。

通讯作者:吴福飞(1985-),男,贵州兴义人,博士,副教授,从事现代水泥混凝土材料与固体废弃物处理技术及生态环境材料的教学与科研工作研究。

ing filling and pozzolanic effect, among which that with lower activity mostly had a filling effect on the porosity of mortar.

**Key words:** fly ash; long-age mortar; mechanical properties; water absorption; porosity

## 1 研究背景

粉煤灰是电厂煤炭燃烧的主要产物(约占60%),在我国每年产量多达 $(5 \sim 6) \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$ 。目前,粉煤灰主要用于墙体材料及水泥和混凝土中<sup>[3-4]</sup>,尤其在水泥和混凝土行业的研究和应用居多。吴耀鹏等<sup>[5]</sup>研究发现,粉煤灰掺量越大,低水胶比混凝土高温后的抗压强度越小,但掺量为30%时,高温后的抗压强度损失较小。董玉萍等<sup>[6]</sup>研究发现,在水泥土中复掺高钙粉煤灰与激发剂可显著提高水泥土材料的早期力学性能。傅柏权等<sup>[7]</sup>以高韧性纤维增强水泥基复合材料为研究对象,掺入大掺量粉煤灰后,复合材料的抗压强度和极限抗弯荷载降低,韧性提高,其破坏形式属于延性破坏。赵志方等<sup>[8]</sup>在混凝土中掺入80%的粉煤灰,发现混凝土的自生收缩发展比对照组混凝土小。王雪莲<sup>[9]</sup>将粉煤灰制备成粉煤灰微珠,当其掺量为30%时,混凝土的自收缩与干燥收缩在不同程度上得到了抑制。毛明杰等<sup>[10]</sup>采用粉煤灰替代细骨料,试验发现粉煤灰作为细骨料掺入后,混凝土的强度性能优于普通混凝土。张俊芝等<sup>[11]</sup>研究发现,经过自然潮差环境作用后,粉煤灰能有效地减少混凝土的孔隙率,细化孔径分布,混凝土中孔径10~100 nm的数量增加,孔径100~1 000 nm的数量降低,且环境作用时间越长,混凝土中孔径为100~1 000 nm和大于1 000 nm的数量降低幅度越大。王瑜玲等<sup>[12]</sup>研究了粉煤灰-矿粉-水泥三元体系的水化放热情况,结果发现粉煤灰和矿粉掺入后,对三元体系的水化有稀释作用,降低了水泥颗粒之间接触的机会,降低了水化产物的形成速率。De Matos等<sup>[13]</sup>和Elmrabet等<sup>[14]</sup>的研究也证实,粉煤灰的掺入会降低水泥基材料的水化热且早期强度较低。刘永森等<sup>[15]</sup>研究了粉煤灰-矿粉-水泥三元体系的抗压强度,结果发现水泥、粉煤灰和矿粉的组合对混凝土力学性能有增强作用,粉煤灰和矿粉的协同效应较为明显。姜春萌等<sup>[16]</sup>研究了矿物掺合料对凝灰岩碱骨料反应的影响,发现粉煤灰的抑制作用优于矿渣,粉煤灰高掺含量对长龄期混凝土碱骨料反应的抑制作用效果较好。

贵州电厂较多,如西部六盘水水城县发耳电厂、南部都匀火电厂、中部遵义县鸭溪电厂、西北部大方

县贵州大方发电有限公司、东部黔东电厂和北部桐梓电厂等。这些电厂产生的粉煤灰以Ⅱ级粉煤灰为主,产量大,应用却相对较少。目前,虽然对于粉煤灰的研究已经有较多的成果,但大多数的研究主要以单种粉煤灰为主,未对比不同电厂粉煤灰的差异性,尤其是长龄期作用下的性能。为此,本文以贵州地区不同电厂的4种Ⅱ级粉煤灰为研究对象,探索长龄期作用后粉煤灰对砂浆力学性能、孔隙率、吸水率和微观形貌的影响,为贵州地区粉煤灰混凝土的应用提供试验参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 原材料

水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥,安定性检测合格,比表面积为 $376 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,标准稠度为26.9%;砂采用中级砂;水为实验室自来水。粉煤灰采用贵州地区常用的4种Ⅱ级粉煤灰,分别为六盘水水城县发耳电厂产生的Ⅱ级粉煤灰(HJFa,如图1(a))、都匀火电厂产生的Ⅱ级粉煤灰(DHFa,如图1(b))、遵义县鸭溪电厂产生的Ⅱ级粉煤灰(YXFa,如图1(c))和大方县贵州大方发电有限公司产生的Ⅱ级粉煤灰(DFFa,如图1(d)),其比表面积分别为428、423、430和 $418 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,需水比分别为101.4%、103.9%、98.5%和102.9%。试验用水泥和4种粉煤灰的化学成分及其质量分数见表1。

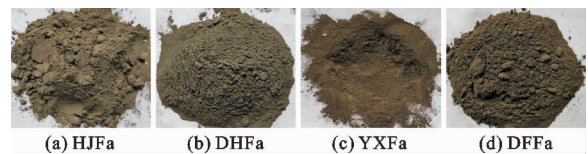


图1 试验采用的贵州地区4种粉煤灰

### 2.2 试验方法

试验混凝土配合比为水泥:水:中级砂=450:225:1350,以六盘水Ⅱ级粉煤灰(HJFa)、都匀Ⅱ级粉煤灰(DHFa)、鸭溪Ⅱ级粉煤灰(YXFa)和大方Ⅱ级粉煤灰(DFFa)等质量替代水泥制成试件,其替代率分别为0、20%、30%、40%、50%,分别记为CK, HJFa1, HJFa2, HJFa3, HJFa4, ..., DFFa1, DFFa2, DFFa3, DFFa4,如图2所示。试件采用三联模(尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ),在标准养护室(温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,湿度 $\geq 95\%$ )养护后参考《水工混凝土

试验规程》(SL 352-2018)进行抗折强度和抗压强度试验。吸水率和孔隙率采用干燥-饱和称重法,将养护到规定龄期的试件,切割成尺寸为40 mm×40 mm×10 mm的试件,通过烘干和饱和过程计算其吸水率和孔隙率,分别采用公式(1)和公式(2)。

$$\xi = (m_s - m_d) / m_d \quad (1)$$

$$\psi = (m_s - m_d) / (m_s - m_x) \quad (2)$$

式中: $\xi$ 和 $\psi$ 分别为吸水率和孔隙率,%; $m_s$ 为试件饱和状态的质量,g; $m_d$ 为试件完全干燥状态的质量,g; $m_x$ 为试件水饱和后的浮重,g。

表1 试验用水泥和4种粉煤灰的化学成分及其质量分数

| 材料       | MgO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Loss |
|----------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|-------------------|------------------|------|
| 水泥       | 1.81 | 22.45            | 5.68                           | 3.23                           | 60.71 | 1.92            | 0.59              | 0.88             | 3.04 |
| 六盘水Ⅱ级粉煤灰 | 1.08 | 50.35            | 20.89                          | 18.73                          | 6.28  | 0.67            | 0.68              | 0.82             | 2.35 |
| 都匀Ⅱ级粉煤灰  | 1.93 | 49.45            | 21.93                          | 16.98                          | 5.41  | 0.63            | 0.76              | 1.32             | 1.35 |
| 鸭溪Ⅱ级粉煤灰  | 1.24 | 51.69            | 22.61                          | 15.88                          | 6.24  | 0.88            | 0.98              | 0.21             | 1.78 |
| 大方Ⅱ级粉煤灰  | 0.78 | 48.99            | 21.73                          | 19.15                          | 6.33  | 1.10            | 0.67              | 0.58             | 2.46 |

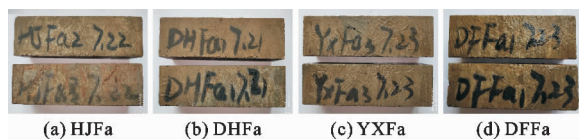


图2 4种粉煤灰砂浆试件

### 3 结果与分析

#### 3.1 抗折强度

粉煤灰通常具有潜在活性,由于贵州各地区煤矿产煤成分的差异,导致不同粉煤灰种类对砂浆性能的影响规律有所不同,4种粉煤灰不同掺量砂浆试件的抗折强度随养护龄期变化规律如图3所示。

由图3可见,4种粉煤灰砂浆和纯水泥砂浆在养护龄期1~28 d的增长幅度较大,纯水泥砂浆在28~1 000 d的增长幅度变缓,仅增加了15.7%。粉煤灰的掺量为20%~50%且养护龄期为28~1 000 d时,六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的抗折强度分别增长了45.5%~100.0%、39.6%~51.8%、34.5%~94.6%和49.0%~71.6%。其增长规律基本表现为,粉煤灰掺量越大则试件抗折强度增长速率越大。养护龄期从1 d增加至1 000 d,4种粉煤灰砂浆试件的抗折强度呈持续增长的趋势。在1 000 d时,4种粉煤灰砂浆试件的抗折强度在掺量为20%~50%时均高于纯水泥砂浆,六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的抗折强度分别比纯水泥砂浆增加了16.7%~26.0%、8.3%~21.8%、12.5%~20.8%和5.2%~28.1%。其中六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤

灰砂浆试件相应掺量为20%、20%、30%和30%时,4种粉煤灰试件的抗折强度达到最大值。因此,按龄期为1 000 d时的抗折强度大小排序为:大方Ⅱ级粉煤灰>六盘水Ⅱ级粉煤灰>都匀Ⅱ级粉煤灰>鸭溪Ⅱ级粉煤灰。综合上述研究发现,由于水泥颗粒细度相对较细,与水接触后水化反应较快,使纯水泥砂浆抗折强度的早期发展较快,后期抗折强度的增长速率相对缓慢。粉煤灰颗粒中含有一定活性的SiO<sub>2</sub>、CaO和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在水化的碱性环境中促进粉煤灰颗粒参与二次水化反应。另外,参考文献[17]和[18]中的研究表明:粉煤灰中含有的Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对提高砂浆的抗折强度有贡献。因此,从4种粉煤灰砂浆的抗折强度研究发现,长龄期作用下粉煤灰的掺量可提高到40%。

#### 3.2 抗压强度

粉煤灰虽有潜在活性,但是其活性通常在碱性环境激发下才能表现出来,因此,粉煤灰替代水泥制备砂浆后,砂浆早期的抗压强度通常较低,且粉煤灰掺量越大,对抗压强度的降低作用也越大。4种粉煤灰不同掺量砂浆试件的抗压强度随养护龄期变化规律如图4所示。

由图4的试验结果发现,龄期仍然是影响砂浆抗压强度的重要因素,即养护龄期越长,砂浆的抗压强度越大。在养护龄期为1~28 d时,4种粉煤灰砂浆和纯水泥砂浆抗压强度增长幅度较大,在养护龄期为28~1 000 d时,纯水泥砂浆抗压强度增长缓慢。粉煤灰的掺量为20%~50%且龄期为28~1 000 d时,鸭溪Ⅱ级粉煤灰、大方Ⅱ级粉煤灰、六盘水Ⅱ级粉煤灰和都匀Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的抗压强度分别增长了14.1%~52.1%、2.7%~49.5%、

17.0% ~ 92.0% 和 3.6% ~ 47.6%。由此可见,粉煤灰的掺量越大,长龄期砂浆抗压强度的增长速率就越大。养护龄期达到 1 000 d 时,六盘水 II 级粉煤灰、都匀 II 级粉煤灰、鸭溪 II 级粉煤灰和大方 II 级粉煤灰砂浆的抗压强度分别在掺量为 20% ~ 40%、20% ~ 40%、20% 和 20% ~ 30% 时高于纯水泥砂浆,在掺量为 20%、30%、20% 和 30% 时,4 种粉煤灰砂浆试件的抗压强度达到最大值,分别比纯水泥基砂浆提高了 17.0%、9.8%、14.1% 和 4.0%。因此,其抗压强度大小排序为:六盘水 II 级粉煤灰 > 鸭

溪 II 级粉煤灰 > 都匀 II 级粉煤灰 > 大方 II 级粉煤灰。从抗压强度的试验结果不难发现,4 种粉煤灰对砂浆后期抗压强度的贡献较小,六盘水 II 级粉煤灰、都匀 II 级粉煤灰、鸭溪 II 级粉煤灰和大方 II 级粉煤灰的掺量分别不宜超过 40%、40%、20% 和 30%。对比 4 种粉煤灰砂浆试件抗折强度和抗压强度的试验结果发现,4 种粉煤灰都能在一定程度上提高长龄期砂浆试件的抗折强度和抗压强度,相对而言,4 种粉煤灰对砂浆试件抗折强度的增强作用大于对抗压强度的增强作用。

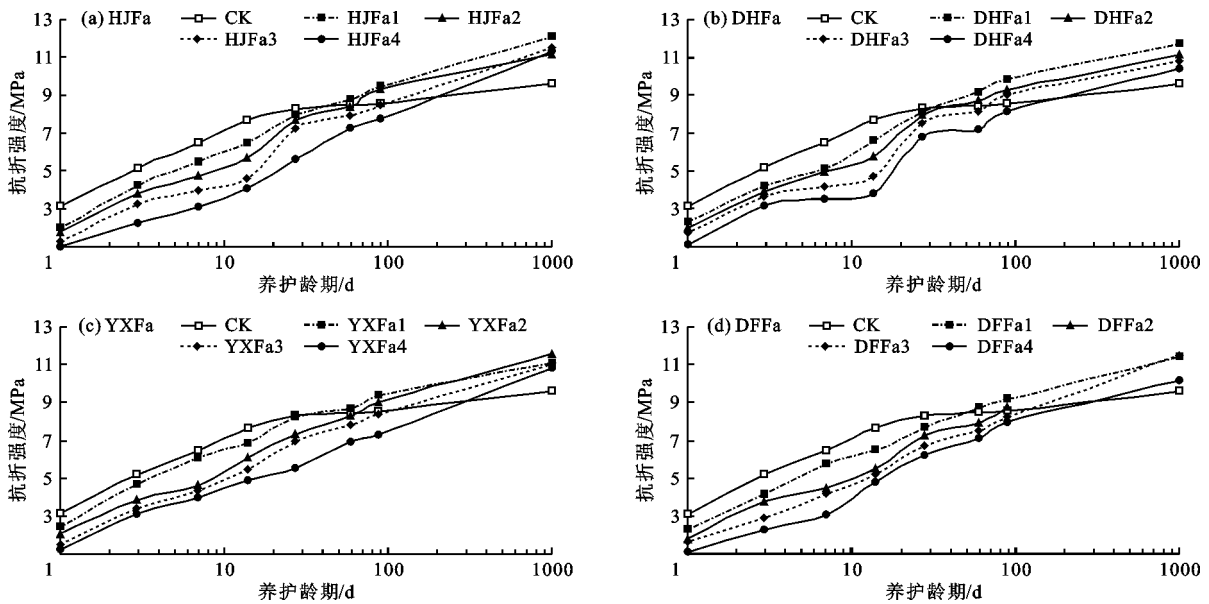


图 3 4 种粉煤灰不同掺量砂浆试件的抗折强度随养护龄期变化规律

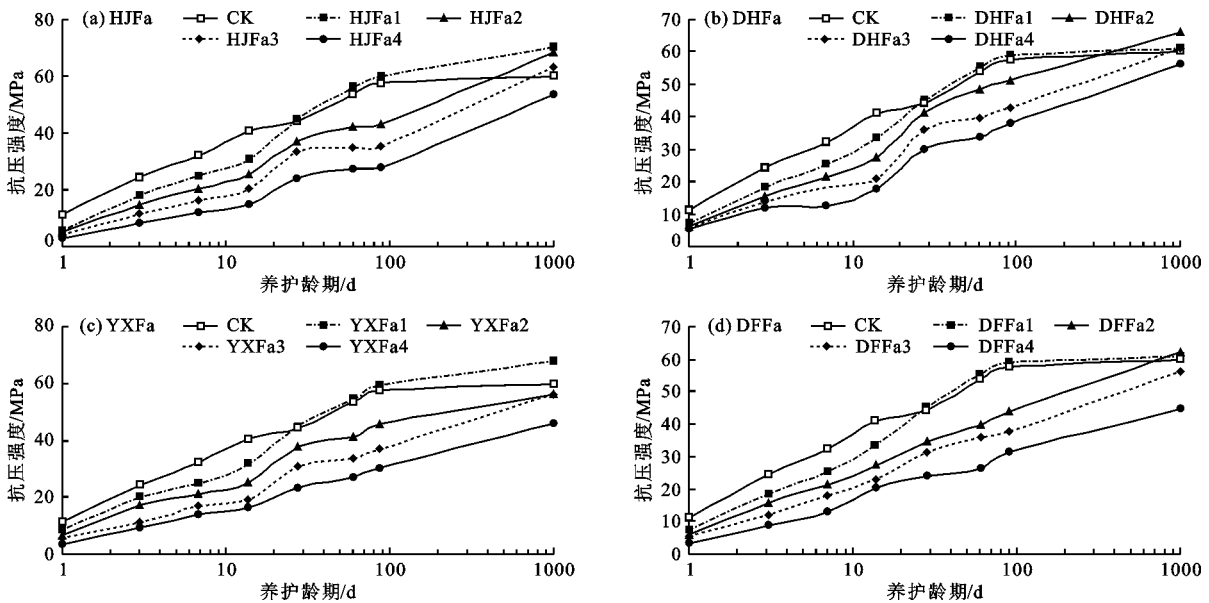


图 4 4 种粉煤灰不同掺量砂浆试件的抗压强度随养护龄期变化规律

### 3.3 孔隙率

养护龄期为 1 000 d 时,4 种粉煤灰砂浆试件孔

隙率随粉煤灰掺量的变化规律如图 5 所示。由图 5 可见,以粉煤灰等质量替代水泥,随着粉煤灰掺量的

增加,砂浆试件的孔隙率不断降低。粉煤灰掺量从20%增加至50%时,六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的孔隙率比对照组分别降低了19.0%~29.7%、9.2%~28.7%、25.6%~40.0%和14.9%~34.9%,按粉煤灰对砂浆孔隙率的贡献大小排序为:鸭溪Ⅱ级粉煤灰>大方Ⅱ级粉煤灰>六盘水Ⅱ级粉煤灰>都匀Ⅱ级粉煤灰。发生上述现象的主要原因是,粉煤灰颗粒比水泥细,能填充于水泥水化形成的多害孔、有害孔等孔隙中,进而减小了砂浆试件的孔隙率,粉煤灰颗粒越细其填充效果就越好。砂浆试件孔隙率的减小相当于提高了砂浆的受力面,从而增大了砂浆试件的抗压强度。参考文献[11]通过电镜扫描发现,掺合料的掺量越大,对砂浆孔隙率的降低作用越显著,上述4种粉煤灰对砂浆抗压强度的影响规律也证明了这一点。虽然掺合料的掺量增加后,在一定程度上降低了砂浆的孔隙率,但是同时也降低了水泥的含量,进而影响水泥水化形成Ca(OH)<sub>2</sub>的数量,抑制了粉煤灰火山灰活性的发挥。因此,粉煤灰的掺量超过40%后,延长养护龄期,也无法弥补砂浆抗压强度的降低。

### 3.4 吸水率

4种粉煤灰不同掺量砂浆试件的吸水率随养护龄期变化规律如图6所示。由图6可见,粉煤灰掺量为20%~50%、养护龄期为1~90d时,4种粉煤灰砂浆的吸水率基本呈现出先降低后增大的趋势,

且均大于纯水泥砂浆试件。另外,粉煤灰的掺量越大,一般其吸水率也越大。在90d龄期时,六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的吸水率分别比纯水泥砂浆试件大3.3%~10.4%、2.3%~12.7%、-2.4%~7.5%和-0.6%~8.7%。在90~1000d龄期时,六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰不同掺量砂浆试件的吸水率分别比纯水泥砂浆试件降低了18.2%~21.6%、8.7%~44.0%、28.4%~39.8%和8.2%~38.9%。对比发现,4种粉煤灰砂浆的吸水率基本表现出粉煤灰的掺量越大,吸水率的降低速率也越大。这主要是养护延长后,粉煤灰发生了二次水化反应,细化了砂浆的孔结构,降低了有害孔、多害孔等孔隙的比例<sup>[11]</sup>,进而降低了砂浆试件对水的吸附能力。因此,粉煤灰掺量越大,孔隙率和吸水率相对较小,其力学性能增幅相对较高。

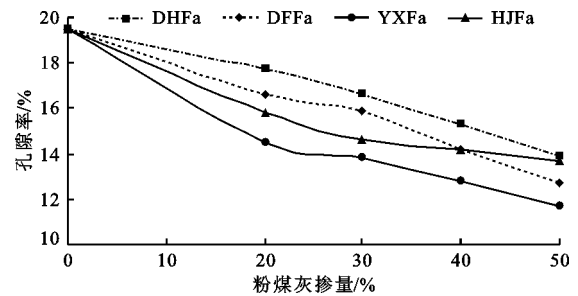


图5 4种粉煤灰砂浆试件孔隙率随粉煤灰掺量的变化规律(养护龄期为1000d)

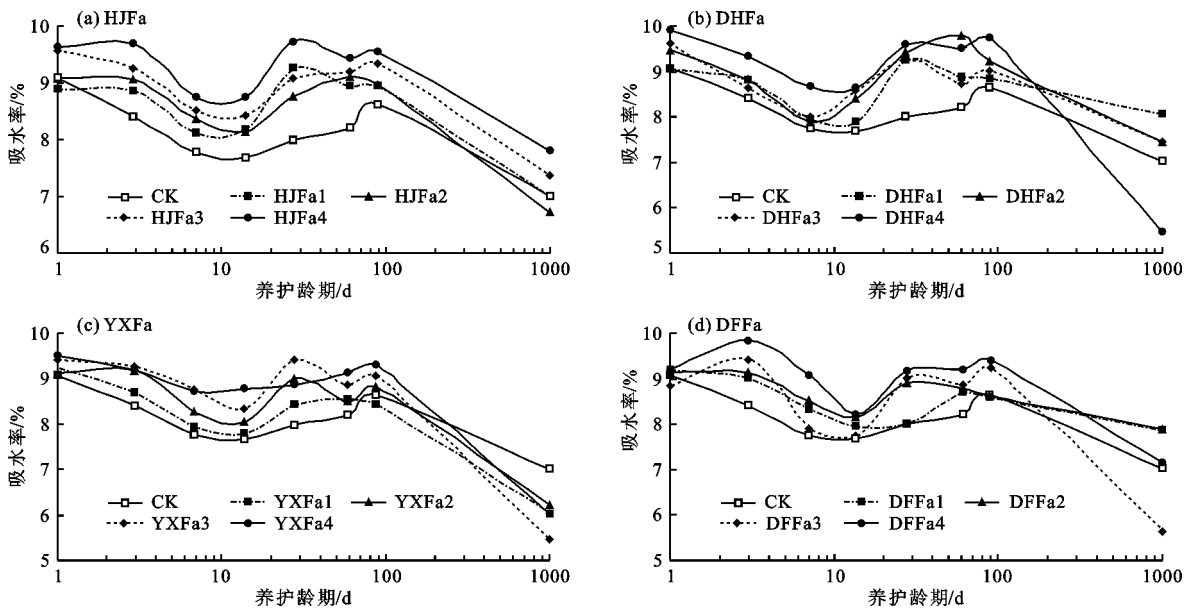


图6 4种粉煤灰不同掺量砂浆试件的吸水率随养护龄期变化规律

### 3.5 粉煤灰砂浆试件的微观形貌

养护28和1000d后,对六盘水Ⅱ级粉煤灰和

鸭溪Ⅱ级粉煤灰砂浆试件进行电镜扫描,结果如图7所示。

从28 d的微观形貌(图7(a)、7(c))可以发现,由于粉煤灰的活性较低,大部分粉煤灰颗粒仅发挥填充作用,粉煤灰的掺量越大,其填充作用也越明显。粉煤灰的粒径最小,水泥次之,砂的粒径最大,3种材料混合后可以形成逐层填充的作用,从孔隙率和抗压强度的试验结果也证实这一点。文献[11]也证实,掺量越大,对砂浆孔结构的细化作用也越好,但是会减少水泥的水化产物<sup>[17-18]</sup>,不利于抗压强度的发展。

从养护龄期为1 000 d的微观形貌(图7(b)、7(d))可以发现,粉煤灰颗粒表面已经附着一层水化产物,但只附着在粉煤灰颗粒表面的一部分,主要是由于粉煤灰颗粒的差异性和活性高低的差异,使粉煤灰参与水化的程度不同。参考文献[19]、[20]中的研究结果也表明,粉煤灰的掺入,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量降低而 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 的含量增加,龄期越长,其

参与二次水化反应的颗粒越多,粉煤灰颗粒与水化产物的粘结较为牢固;采用90%粉煤灰与10%CaO混合处理后,粉煤灰表面Ca含量明显增加,水化产物 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 的 $\text{C}/\text{S}$ 降低,说明粉煤灰活化处理后,粉煤灰的活性增加。从抗压强度的结果发现,抗压强度的增长幅度较小,说明粉煤灰的掺入阻碍了水泥水化后胶结物质的形成。另外,粉煤灰的潜在活性低,参与二次水化反应的含量少,二次水化反应后形成的胶结物质有限<sup>[21]</sup>,因此,粉煤灰对砂浆抗压强度的增大作用有限<sup>[22]</sup>。虽然粉煤灰的掺入,对砂浆抗折强度和孔隙率的影响较大,但粉煤灰砂浆抗折强度的增长主要源于粉煤灰中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的贡献,砂浆孔隙率的降低主要源于粉煤灰细颗粒的填充作用。综合上述,粉煤灰在砂浆中的作用主要是填充作用和火山灰效应,但针对活性低的粉煤灰材料,主要以填充作用为主。

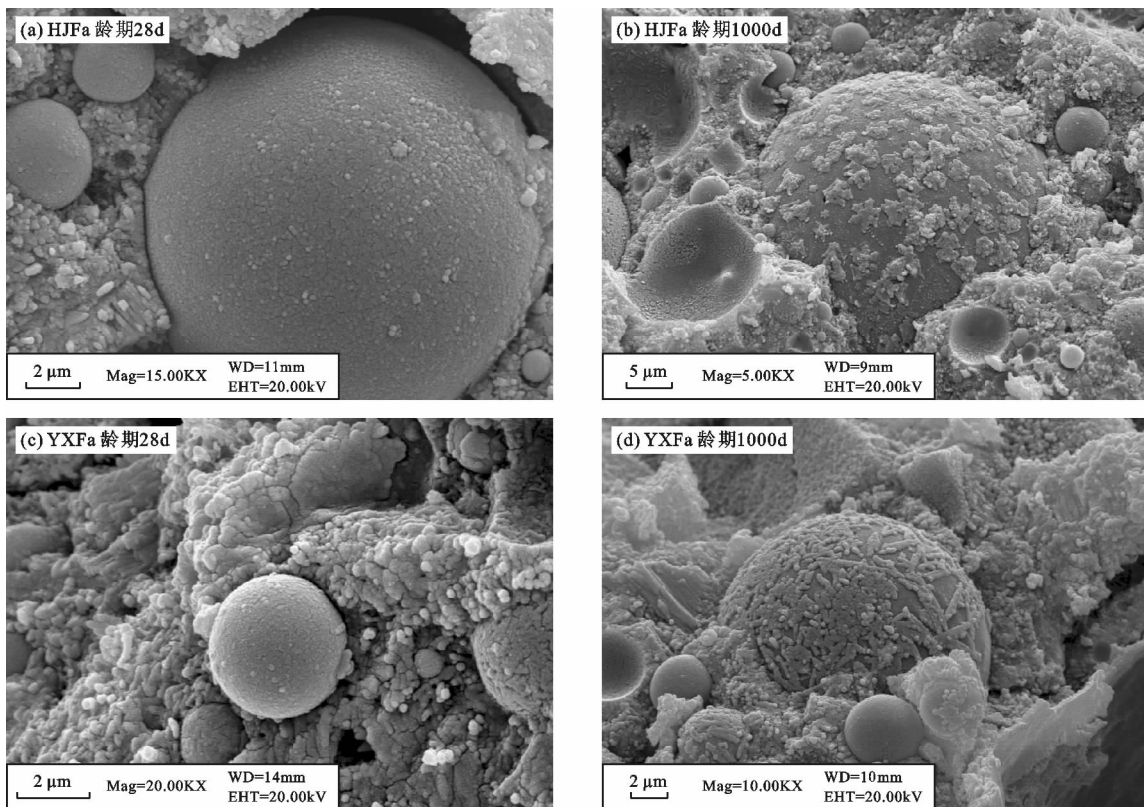


图7 六盘水Ⅱ级粉煤灰和鸭溪Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的微观形貌

## 4 结 论

(1)粉煤灰能提高长龄期砂浆的抗折强度和抗压强度。养护龄期从28 d延长至1 000 d时,纯水泥砂浆试件的抗折强度和抗压强度仅增长了15.7%和3.9%,而鸭溪Ⅱ级粉煤灰、大方Ⅱ级粉煤灰、六

盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的抗折强度和抗压强度最大分别增长了94.6%和52.1%、71.6%和49.5%,100.0%和92.0%和51.8%和47.6%,掺量越大,抗折强度和抗压强度的增加速率越大。

(2)粉煤灰能降低长龄期砂浆的孔隙率。六盘

水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰砂浆试件的孔隙率最大分别降低了29.7%、28.7%、40.0%和34.9%，基本表现出掺量越大，孔隙率越低的趋势。长龄期砂浆的孔隙率降低后，同时也降低了砂浆的吸水率，4种粉煤灰砂浆（六盘水Ⅱ级粉煤灰、都匀Ⅱ级粉煤灰、鸭溪Ⅱ级粉煤灰和大方Ⅱ级粉煤灰）最大分别降低了21.6%、44.0%、39.8%和38.9%。

(3)长龄期作用后，粉煤灰仍主要发挥填充作用和火山灰效应，达到降低砂浆的孔隙率，提高其密实度，增强其力学性能的目的。

### 参考文献：

- [1] 罗林,钱志宽,甘甜,等. 贵州典型电厂粉煤灰的放射性安全评估[J]. 地球与环境,2019,47(5):722-727.
- [2] 吴福飞,邓洪刚,朱丽菊,等. 混凝土再生胶凝材料的活性试验研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(5):42-47+53.
- [3] KUMARI K, PREETHA R, RAMACHANDRAN D, et al. Nanoparticles for enhancing mechanical properties of fly ash concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2016, 3(6): 2387-2393.
- [4] 吴福飞,邓洪刚,董双快,等. 轻烧MgO活性的影响因素研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(1):96-100.
- [5] 吴耀鹏,李彦豪,张旭,等. 水胶比和粉煤灰掺量对混凝土高温后抗压强度的影响[J]. 建筑结构,2019,49(22):93-96.
- [6] 董玉萍,张玉佩. 高钙粉煤灰水泥土早期强度试验[J]. 硅酸盐通报,2019,38(10):3248-3252.
- [7] 傅柏权,蔡向荣. 大掺量粉煤灰对高韧性纤维增强水泥基复合材料性能的影响[J]. 混凝土,2019(8):88-91.
- [8] 赵志方,章斌,李超. 超高掺粉煤灰混凝土早龄期自生收缩研究[J]. 浙江工业大学学报,2019,47(5):548-552.
- [9] 王雪莲. 粉煤灰微珠活性粉末混凝土力学与收缩特性研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(10):3373-3377.
- [10] 毛明杰,韩鹏飞,杨秋宁,等. 基于正交试验粉煤灰细骨料混凝土抗压强度研究[J]. 混凝土,2019(9):88-91.
- [11] 张俊芝,方润华,吕萌,等. 自然潮差环境下粉煤灰混凝土微观结构的时变过程[J]. 自然灾害学报,2019,28(5):9-16.
- [12] 王瑜玲,王春福. 粉煤灰-矿粉-水泥三元体系水化放热模型研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(8):2695-2700.
- [13] DE MATOS P R, JUNCKES R, GRAEFF E, et al. Effectiveness of fly ash in reducing the hydration heat release of mass concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 28:101063.
- [14] ELMRABET R, HARFI A E, YOUBI M S E. Study of properties of fly ash cements [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 13:850-856.
- [15] 刘永森,段岳强,王瑞攀,等. 粉煤灰-矿粉-水泥三元胶凝材料对混凝土抗压强度的影响[J]. 厦门理工学院学报,2019,27(5):71-77.
- [16] 姜春萌,唐新军,王航,等. 龄期与矿物掺合料对凝灰岩碱骨料反应的影响[J]. 人民长江,2019,50(6):177-180.
- [17] 吴福飞,董双快,赵振华,等. 粉煤灰对砂浆力学性能与孔结构参数的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(3):101-107.
- [18] 董双快,吴福飞,王红,等. 工业废渣替代砂浆细集料的可行性研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(2):101-107.
- [19] ZHANG Tongsheng, YU Qijun, WEI Jiangxiong, et al. Effect of size fraction on composition and pozzolanic activity of high calcium fly ash [J]. Advances in Cement Research, 2011, 23(6):299-307.
- [20] 张同生. 水泥熟料与辅助性胶凝材料的优化匹配[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [21] 周淑春. 复合石灰石粉-粉煤灰-矿渣混凝土宏观性能演化规律与微观机理研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.
- [22] 邸云菲,袁枫斌,刘江. 多种因素对大掺量粉煤灰混凝土早期力学性能及凝结时间的影响[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2019,32(2):79-84.