

# PCCP保护层砂浆尺寸效应及掺合料影响研究\*

罗纬邦<sup>1</sup>, 马小宇<sup>2</sup>, 陆云才<sup>1</sup>, 周丽娜<sup>2†</sup>

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)保护层砂浆的厚度通常仅为25 mm,但实验室标准砂浆试件尺寸为70.7 mm或40 mm,为在试验结果与构件真实性能之间建立有效关联,系统探究尺寸效应的影响至关重要。针对上述问题,本文通过改变粉煤灰(Fly Ash, FA)和纳米二氧化硅(Nano Silica, NS)掺量,制作70.7 mm、40 mm及25 mm 3种尺寸的立方体试件,探究掺合料对PCCP保护层砂浆性能的影响,并揭示其强度随试件尺寸变化的规律。主要结论如下:首先,确定了FA(20%)与NS(3%)的最优复掺配比,其28 d力学性能与尺寸稳定性均最优。其次,砂浆强度表现出清晰的尺寸效应,即试件尺寸从70.7 mm减小至40 mm时强度升高,进一步减小至25 mm时则降低。最终,所建立的尺寸换算方程表明,换算系数随掺量呈先升后降趋势,且具有掺量依赖性,这为精确预测PCCP薄层砂浆的真实性能提供了理论依据。

**关键词:** PCCP砂浆;抗压强度;尺寸效应;矿物掺合料

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.08.09.0002

**中图分类号:** TV432 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)01-0082-011

**引文格式:** 罗纬邦,马小宇,陆云才,周丽娜. PCCP保护层砂浆尺寸效应及掺合料影响研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(1):82-92.

**英文引文格式:** Luo Weibang, Ma Xiaoyu, Lu Yuncai, Zhou Lina. Study on the size effect of PCCP protective layer mortar and the influence of admixtures[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(1):82-92.

## Study on the Size Effect of PCCP Protective Layer Mortar and the Influence of Admixtures

Luo Weibang<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>2</sup>, Lu Yuncai<sup>1</sup>, Zhou Lina<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830047, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** The thickness of the protective layer mortar for prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) is usually only 25 mm, whereas the laboratory standard mortar specimen sizes are 70.7 mm or 40 mm. To establish an effective correlation between experimental results and the actual performance of components, it is crucial to systematically investigate the influence of size effects. To address this issue, this study produces cubic specimens of three sizes, 70.7 mm, 40 mm, and 25 mm, by varying the contents of fly ash (FA) and nano silica (NS), in order to explore the impact of these supplementary materials on the performance of PCCP protective layer mortar and to reveal the regularity of strength variation with specimen size. The main conclusions are as follows: Firstly, the optimal combined dosage of FA (20%) and NS (3%) is determined, which shows the best 28-day mechanical performance and dimensional stability. Secondly, the mortar strength exhibits a clear size effect: as the specimen size decreases from 70.7 mm to 40 mm, the strength increases, but further reduction to 25 mm led to a decrease in strength. Finally, the established size conversion equation indicates that the conversion coefficient first increases and then de-

\* 收稿日期: 2025-08-09; 修回日期: 2025-12-23; 录用日期: 2025-12-28.

**基金项目:** 中华人民共和国水利部2022年重大科技项目“新疆高盐渍复杂侵蚀环境预应力钢筒混凝土管耐久性研究”(SKS-2022111); 红山科创英才-青年拔尖人才“复杂环境大口径长距离PCCP输水管道运行安全保障关键技术研究”(B241013003); 国家自然科学基金“硫酸盐侵蚀与溶蚀耦合作用下混凝土性能损伤规律研究”(52368040).

**作者简介:** 罗纬邦(1965—),男,教授级高工,主要从事水利水电工程设计的研究, E-mail: lwblwb@qq.com.

**† 通信作者:** 周丽娜(1985—),女,副教授,主要从事水工混凝土耐久性的研究, E-mail: linazhou@xju.edu.cn.

creases with the admixture content and is dependent on the dosage. This provides a theoretical basis for accurately predicting the actual performance of thin-layer PCCP mortar.

**Key words:** PCCP mortar; compressive strength; size effect; mineral admixture

## 0 引言

预应力钢筒混凝土管(Prestressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)是由混凝土管芯、钢筒、预应力钢丝、钢制承插口接头、砂浆保护层组合而成的大口径复合型管材<sup>[1]</sup>,被广泛应用于输水干线、城市排污、农业灌溉、工业输水等领域,逐渐成为跨区域水源地之间输水工程首选环保型非金属管材。PCCP失效主要原因是土壤中 $\text{SO}_4^{2-}$ 侵入保护层砂浆出现裂缝或空鼓现象,环境中 $\text{Cl}^-$ 进入保护层砂浆并腐蚀预应力钢丝使其断裂,从而引发爆管事故。保护层砂浆作为保护PCCP结构的第一道防线,其主要作用是保护管道中预应力钢丝免受外部环境侵蚀,确保管道结构安全稳定。为保证PCCP安全稳定运行,达到设计使用年限,降低失效性事件发生概率,美国ANSI/AWWA C301—14<sup>[2]</sup>与我国《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2017)<sup>[3]</sup>均对PCCP保护层砂浆最小厚度、含水率、吸水率以及抗压强度等进行了相关规定。

纳米二氧化硅(Nano Silica, NS)通过纳米填充显著提升试件的密实度与强度,粉煤灰(Fly Ash, FA)的火山灰活性可以增强水泥基材料的力学性能<sup>[4]</sup>;其小尺寸效应可降低孔隙率<sup>[5]</sup>,增强致密性,提升混凝土的力学性能与耐久性能;FA的球形形态效应可以起到润滑滚珠的作用<sup>[6]</sup>,进而改善混凝土的工作性能。马亮怡<sup>[7]</sup>通过制作标准立方体和标准圆柱体试件,探究NS和FA掺量对再生混凝土力学性能的影响,发现复掺3%NS和10%FA抗压强度最高,与对照组相比提升46.6%。Dai等<sup>[8]</sup>制作20 mm立方体试件探究NS对复掺FA的高抗硫酸盐水泥性能的影响,发现NS掺入含FA的水泥中,可以提高屈服应力,0.1%~0.3%的高活性NS与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,促进了水泥水化,提高致密化程度,使3 d抗压强度提高4.2%~4.7%,孔隙率降低7.3%~11.6%。吕周岭等<sup>[9]</sup>制作40 mm立方体试件将NS复掺到水泥-粉煤灰体系砂浆中,发现复掺0.5%掺量的NS可以提升 $\text{Cl}^-$ 固化率,增加水化硅酸钙(C-S-H)凝胶含量,降低孔隙率。张秀芝等<sup>[10]</sup>制作40 mm×40 mm×160 mm试件探究掺入NS和FA协同改善砂浆性能,发现复掺NS和FA的砂浆力学性能和耐久性能均优于单掺NS和单掺FA砂浆。

现有掺入NS和FA有效性的结论,几乎全部源于标准尺寸试件的测试结果。根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)<sup>[11]</sup>,实验室中常选取尺寸为70.7 mm立方体试件、40 mm×40 mm×160 mm试件进行试验。基于几何相似性与失效机理保真性的核心需求,PCCP规范规定试件尺寸为25 mm×25 mm×25 mm。Weibull、Bazant等学者早在上世纪就发现普通混凝土力学性能存在尺寸效应<sup>[12]</sup>,故对常规尺寸砂浆与PCCP规范规定尺寸砂浆之间的强度关系进行研究,可为未来在实验室研究PCCP砂浆以及检验其强度是否满足要求提供依据。目前,关于掺合料掺量与尺寸效应耦合作用的研究尚属空白,导致基于实验室的最佳配比可能并非PCCP保护层砂浆的最优解。

综上所述,本文通过改变FA和NS掺量,制作70.7 mm、40 mm及25 mm 3种尺寸的立方体试件,探究掺合料对PCCP保护层砂浆性能的影响,并揭示其强度随试件尺寸变化的规律,分析其尺寸效应。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

水泥采用P·O 42.5 R级天山牌普通硅酸盐水泥,表1为水泥主要化学成分。FA采用新疆某公司生产的II级粉煤灰,主要化学成分如表2所示。NS采用球形亲水疏油型,物理特性如表3所示。细骨料采用天然砂,实测细度模数为2.97,由于PCCP保护层砂浆需要采用细砂,故对天然砂进行筛分,配制成细砂,配制后的砂子细度模数为2.15,细骨料含泥量为0.89%。水为市政供应自来水。

### 1.2 砂浆实验室成型方法

由于PCCP保护层砂浆属于干硬性砂浆,砂浆状态干散、黏聚性较低,实际工程中常采用辊射法制作,而在实验室开展研究时,受场地与设备限制,辊射成型无法实现;运用标准的振动成型方法不仅试件难以成型,且密实度难以得到保证。故本文主要探究PCCP减水剂成型法,并将其与现场辊射成型砂浆进行对比。

表 1 水泥主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of cement

| 化学成分 | 质量分数/%           |                                |                                |       |      |                 |                  | 损失   |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|------|
|      | 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> | K <sub>2</sub> O |      |
| 测试结果 | 26.39            | 4.77                           | 3.80                           | 59.03 | 1.09 | 2.98            | 0.97             | 0.97 |

表 2 粉煤灰主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of FA

| 化学成分 | 质量分数/%           |                                |                                |       |                 | 损失   |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|------|
|      | 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> |      |
| 测试结果 | 56.10            | 19.12                          | 6.75                           | 11.50 | 2.39            | 4.14 |

表 3 纳米二氧化硅物理特性

Table 3 Physical properties of NS

| 物理特性 | 纯度/% | 平均粒径/nm | 比表面积/(m <sup>2</sup> /g) | pH  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% |
|------|------|---------|--------------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 测试结果 | 99.9 | 20      | 185                      | 6.5 | 0.005                             | 0.04                              |

在PCCP管道生产现场通过辊射法制作试件,成型24 h后切割取下,并测量其拆模密度.将切割后的试件标准养护至7 d和28 d,分别测试抗压强度和吸水率.辊射成型PCCP砂浆拆模密度为2 245.83 kg/m<sup>3</sup>,7 d、28 d抗压强度分别为46.68 MPa和53.37 MPa,7 d、28 d吸水率分别为7.54%和6.48%,并将这3种指标结果与实验室成型结果进行对比.

减水剂成型法是在配合比不变的情况下,适量加入减水剂,使砂浆具有黏聚性,密实度得到保证.为确定与辊射成型砂浆综合性能最匹配的减水剂掺量,在制备砂浆试样时,设置1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%和4.0%(质量分数)的减水剂掺量梯度.图1(a~c)分别为掺减水剂成型与辊射成型砂浆拆模密度、抗压强度与吸水率对比.

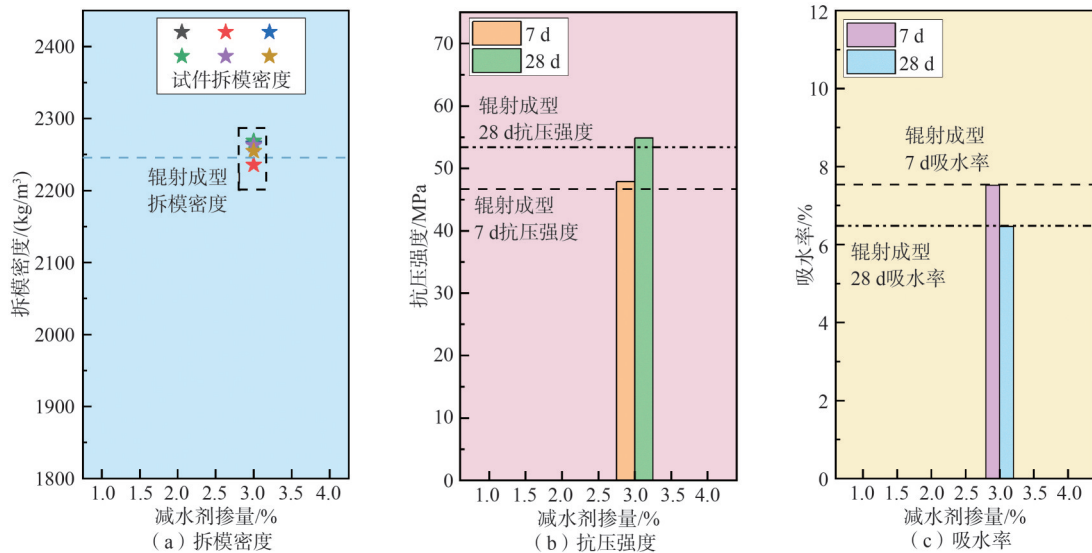


图 1 减水剂成型与辊射成型砂浆结果对比

Figure 1 Comparison of results of superplasticizer molding and roll injection molding mortar

根据以上3种指标综合分析,当减水剂掺量为3.0%时,实验室成型砂浆各方面性能与现场辊射成型砂浆最接近,且各指标相差均小于2%.已有研究表明拆模密度大于2 175 kg/m<sup>3</sup>,即可判定该PCCP砂浆合格<sup>[13]</sup>.本文减水剂掺量为3.0%的砂浆拆模密度平均值为2 249.05 kg/m<sup>3</sup>,符合上述判定要求.

### 1.3 试验设计

NS和FA具有火山灰效应以及更细的颗粒,可以提高水泥基材料的密实性,对水泥基材料力学性能和抗侵蚀性能有提高作用<sup>[7-10]</sup>.基于此,本文设计NS掺量(质量分数)为2%、3%、4%与FA掺量(质量分数)为10%、15%、20%、25%、30%的试验配合比.通过测试砂浆的抗压强度和吸水率,评估不同掺合料掺量对砂浆性能的影响,以确定最优掺量组合,为后续抗侵蚀试验的配合比设计提供数据支持.同时设计70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm(S-70.7)、40 mm×40 mm×40 mm(S-40)和25 mm×25 mm×25 mm(S-25)3种尺寸砂浆,进行尺寸效应试验研究.表4为尺寸效应试验砂浆配合比.

表4 尺寸效应试验砂浆配合比  
Table 4 Mortar mix proportion for size effect test

| 试件编号   | NS/% | FA/% | 水胶比  | 灰砂比   | 减水剂  |
|--------|------|------|------|-------|------|
| REF    | 0    |      |      |       |      |
| N2     | 2    |      |      |       |      |
| N3     | 3    |      |      |       |      |
| N4     | 4    |      |      |       |      |
| F10    |      | 10   |      |       |      |
| F15    |      | 15   |      |       |      |
| F20    | 0    | 20   | 0.30 | 1:2.4 | 3.0% |
| F25    |      | 25   |      |       |      |
| F30    |      | 30   |      |       |      |
| F20-N2 | 2    |      |      |       |      |
| F20-N3 | 3    | 20   |      |       |      |
| F20-N4 | 4    |      |      |       |      |

注: REF代表无掺合料的对照组;N2、N3和N4代表砂浆试件中NS掺量分别为2%、3%和4%;F10、F15、F20、F25和F30代表砂浆试件中FA掺量分别为10%、15%、20%、25%和30%;F20-N2、F20-N3和F20-N4代表砂浆试件中FA掺量为20%,NS掺量分别为2%、3%和4%

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 PCCP砂浆抗压强度变化规律

#### 2.1.1 NS对砂浆抗压强度的影响

图2为不同尺寸砂浆抗压强度随NS掺量的变化规律.随着养护龄期的增加,各组砂浆抗压强度呈增长趋势.在同一龄期,掺入NS的砂浆抗压强度明显高于REF组,且均满足规范要求.3种不同尺寸(S-70.7、S-40、S-25)砂浆抗压强度均随NS掺量的增加先上升后下降,当NS掺量为3%时,砂浆抗压强度最高.与REF组相比,当NS掺量为3%时,3种尺寸砂浆28 d抗压强度分别提高了13.90%、13.12%和16.11%.当NS掺量小于3%时,砂浆抗压强度呈现增长趋势.一方面,由于NS具有火山灰效应,NS中SiO<sub>2</sub>含量很高,与Ca(OH)<sub>2</sub>结合发生二次水化反应,使得C-S-H凝胶含量更高,从而提高砂浆的密实度和抗压强度;另一方面,由于NS为超细颗粒,掺入水泥基材料中可起到微填充作用,使水泥基材料更加密实,抗压强度进一步增强<sup>[14]</sup>.当NS掺量超过3%时,过量的NS产生团聚现象,不易分散,从而造成抗压强度有所下降.

试验还发现,砂浆养护初期,NS对其抗压强度的提高作用更明显.养护至3 d时,3种尺寸下N3组砂浆抗压强度较REF组分别提高了34.55%、36.03%和31.17%;而养护至90 d时,抗压强度增幅最小,分别为6.54%、5.59%和8.20%.这是由于NS早期活性较高,在养护初期能快速吸附水泥水化产生的Ca(OH)<sub>2</sub>,并与SiO<sub>2</sub>反应生成C-S-H凝胶,这一反应加快了水泥的水化,从而提高水泥的早期强度<sup>[15-16]</sup>.

#### 2.1.2 FA对砂浆抗压强度的影响

图3为不同尺寸砂浆抗压强度随FA掺量的变化规律.随着养护龄期的增加,各组砂浆抗压强度呈增长趋势.养护至3 d和7 d时,3种尺寸砂浆抗压强度均低于REF组,且随FA掺量的增加而降低.养护至3 d时,3种

尺寸砂浆F10组抗压强度较REF组分别降低了3.63%、4.45%和3.11%,F30组抗压强度较REF组分别降低了26.0%、26.9%和20.7%。这是由于FA早期活性低,等量取代部分水泥后,导致养护初期水泥水化速度减缓,C-S-H凝胶产物减少,从而降低砂浆的抗压强度<sup>[8]</sup>。当FA掺量小于20%时,砂浆抗压强度下降幅度较小;当FA掺量超过20%时,下降幅度明显增大。以S-70.7的砂浆试件为例,FA掺量由15%增加至20%,砂浆3 d、7 d抗压强度分别下降1.72%、4.25%;FA掺量由20%增加至25%,砂浆3 d、7 d抗压强度分别下降12.33%、13.98%。可知少量FA取代水泥时,C-S-H凝胶产量减幅较小,抗压强度小幅下降;而当FA掺量超过20%时,大掺量FA对水泥水化进程有明显的延缓效果,故在PCCP保护层砂浆中掺入FA可将20%掺量作为临界值。

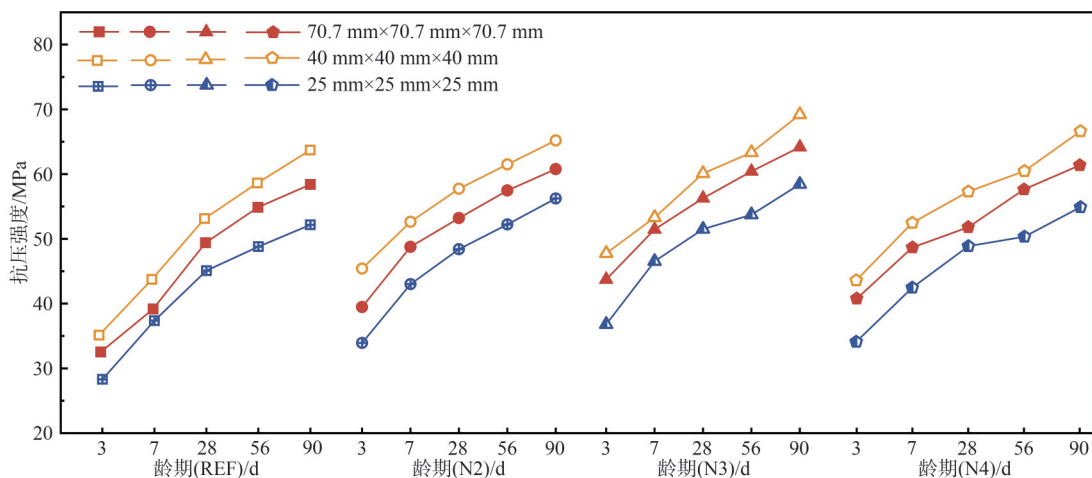


图 2 砂浆抗压强度随NS掺量的变化规律

Figure 2 Change rule of mortar compressive strength with NS mixing amount

养护至28 d和56 d时,掺FA组砂浆抗压强度与REF组基本持平,F10组和F20组可满足规范要求。养护至90 d时,掺FA砂浆抗压强度略高于REF组,且掺量为20%时最优,3种尺寸下F20组抗压强度较REF组分别提高了6.48%、2.45%和5.50%。这是由于FA后期活性较高,且具有火山灰效应,可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,再次生成C-S-H凝胶;同时,FA颗粒相比水泥颗粒更细,能够填充在未水化的水泥颗粒和C-S-H空隙之中,提高砂浆的致密程度,从而有效提升砂浆后期抗压强度。

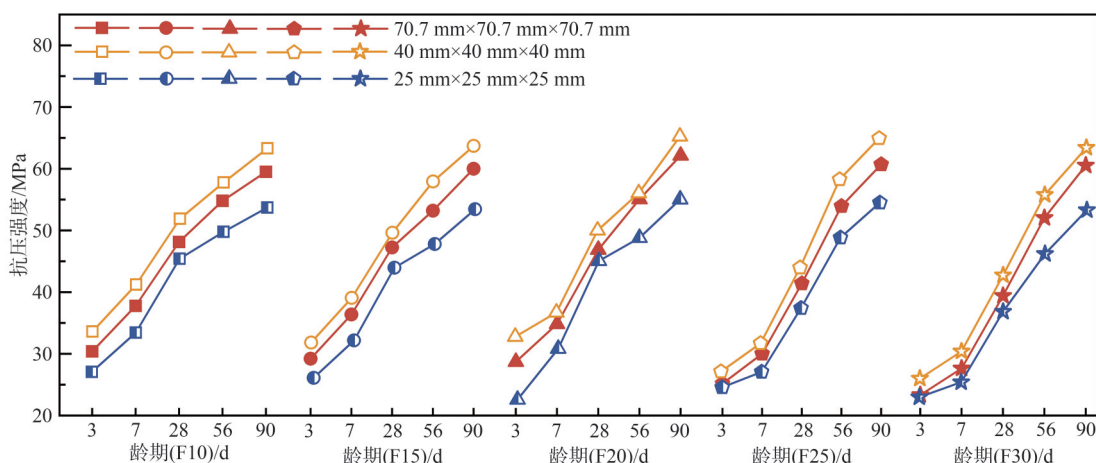


图 3 砂浆抗压强度随FA掺量的变化规律

Figure 3 Change rule of mortar compressive strength with FA mixing amount

### 2.1.3 NS和FA复掺对砂浆抗压强度的影响

图4为不同尺寸下复掺FA和NS砂浆抗压强度的变化规律。固定FA掺量为20%,NS掺量分别为2%、3%和4%。在FA掺量不变的情况下,砂浆抗压强度随NS掺量的增加先上升后下降,F20-N3组强度最高,且复掺

组砂浆抗压强度始终高于REF组和单掺FA组。养护至28 d时,3种尺寸砂浆F20-N3组较REF组分别提高26.73%、26.77%和27.52%,较F20组分别提高29.14%、26.88%和27.63%。

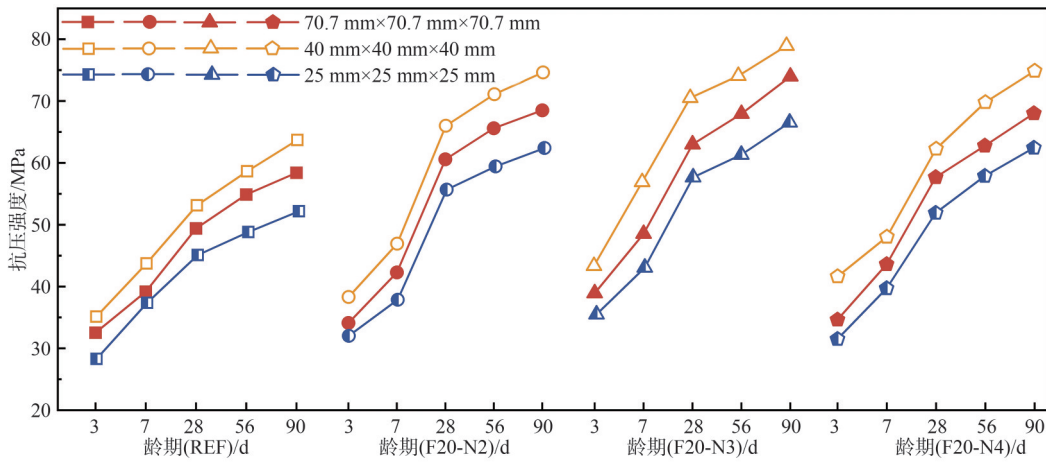


图4 复掺FA和NS对砂浆抗压强度的影响

Figure 4 Effect of compounding FA and NS on compressive strength of mortar

由图5可知,复掺砂浆3 d和7 d抗压强度均低于N3组。这是由于复掺组FA取代了部分水泥,使砂浆早期强度有所下降,此时即使复掺NS,抗压强度增长幅度依然较小。养护至28 d后,复掺组抗压强度增长幅度变大,超过单掺NS组。养护至90 d时,3种尺寸F20-N3组抗压强度比N3组分别提高19.02%、20.15%和17.90%。由于NS在早期发挥火山灰活性、FA在后期发挥火山灰活性,从而使砂浆整个水化过程均具有较高活性,但因FA早期活性较差,砂浆在早期表现出的力学性能较弱;在养护后期,FA与NS协同作用,使砂浆力学性能优异。且颗粒更小的NS填充于未水化的水泥颗粒、粉煤灰颗粒、C-S-H凝胶的空隙之中,进一步降低水泥砂浆的孔隙率,提高致密程度,进而提升砂浆的抗压强度<sup>[10]</sup>。

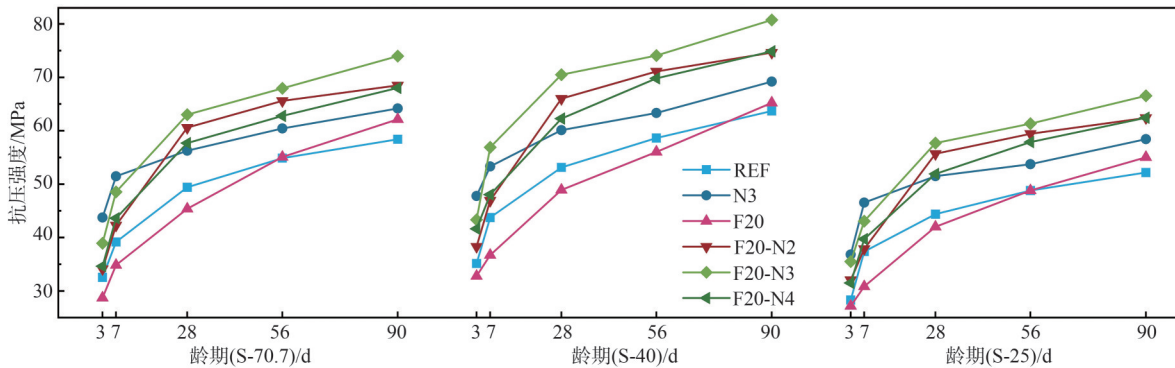


图5 单掺与复掺抗压强度对比

Figure 5 Comparison of compressive strength between single and compound mixing

## 2.2 PCCP砂浆吸水率变化规律

### 2.2.1 NS对砂浆吸水率的影响

由图6可知,砂浆吸水率随养护龄期增加不断下降。在同一龄期,掺入NS的砂浆吸水率明显低于REF组,且均满足规范要求。这是由于掺入NS,砂浆吸水率呈降低趋势。一方面,是由于NS自身可以填充砂浆的孔隙;另一方面,是由于NS中SiO<sub>2</sub>含量高,与Ca(OH)<sub>2</sub>结合发生二次水化反应,使C-S-H凝胶含量更高,从而提高砂浆密实度。3种尺寸砂浆吸水率均随NS掺量增加先下降后上升,当NS掺量为3%时,砂浆吸水率最低;养护至28 d时,3种尺寸砂浆吸水率较REF组分别下降16.72%、17.04%和15.48%。

### 2.2.2 FA对砂浆吸水率的影响

图7为不同尺寸下FA掺量对砂浆吸水率的影响规律,砂浆吸水率随养护龄期的增加不断下降。养护至

3 d和7 d时,砂浆吸水率均随FA掺量的增加而增大. 养护至3 d时,F10组3种尺寸砂浆吸水率较REF组分别降低9.21%、7.36%和8.97%,F30组较REF组分别降低2.42%、0.96%和2.72%. FA早期活性低,其掺入量越多,养护初期的水化速度越慢,故在养护初期,随FA掺量的增加,砂浆密实度逐渐减小,从而使砂浆的吸水率不断增加.

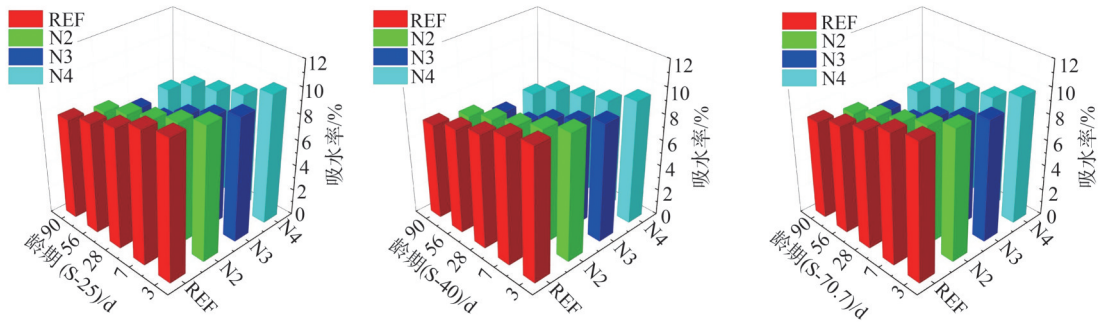


图6 砂浆吸水率随NS掺量的变化规律

Figure 6 Variation law of mortar water absorption with NS content

经28 d标准养护后,砂浆吸水率呈现随FA掺量增加而降低的变化规律. F20组3种尺寸试件的吸水率相比REF组,降幅分别达到3.93%、1.96%和3.11%;养护至90 d时,F20组吸水率较REF组分别降低了7.16%、5.48%和6.44%. 这是由于养护后期FA活性提高,砂浆内部密实度提高.

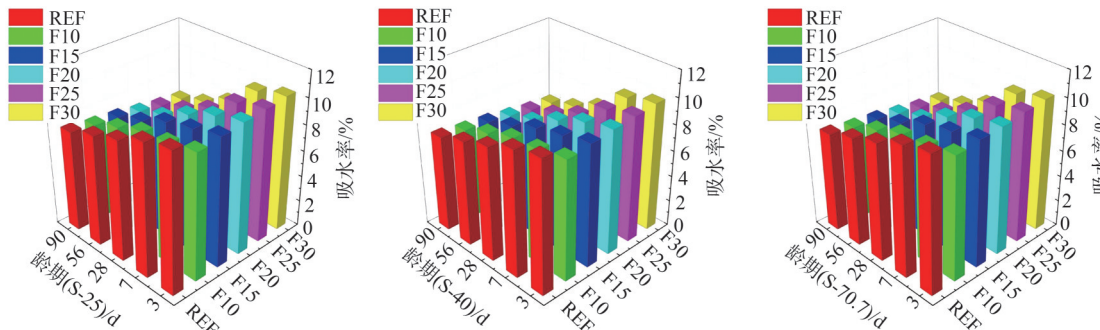


图7 砂浆吸水率随FA掺量的变化规律

Figure 7 Variation law of mortar water absorption with FA content

### 2.3 孔隙结构分析

选择REF组和F20-N3组3种尺寸砂浆试件进行MIP测试,对比分析不同尺寸砂浆的孔结构. 养护龄期为28 d,不同尺寸水泥砂浆的MIP测试结果如表5所示,微分进汞量测试结果如图8所示. 3种尺寸水泥砂浆相比,两组砂浆中S-70.7立方体试件的孔隙率和微分进汞量均为最高,最可几孔径最大;S-40的孔隙率和微分进汞量均为最低,最可几孔径最小;S-25立方体试件各测试指标处于S-70.7和S-40之间,这一结论与吸水率结果一致. S-40和S-25的孔隙率比S-70.7小,是由于砂浆试件尺寸越小,内部存在的缺陷越少,故孔隙率越低<sup>[17]</sup>. 而S-25的孔隙率比S-40大,可能是因为过小尺寸的砂浆试件在成型过程中,砂浆在填充模具时内部空气和水分排出完全,从而形成孔隙<sup>[18]</sup>;除此之外,较小的试件在养护过程中由于表面积相对较大,水分蒸发速度更快,从而导致孔隙生成.

### 2.4 尺寸效应分析

#### 2.4.1 不同尺寸试件抗压强度换算关系

2.1节中各组砂浆不同尺寸下抗压强度随养护龄期的变化规律图,直观反映出不同尺寸砂浆抗压强度的关系. 以S-70.7试件为标准组,S-40和S-25试件为非标准组,可知S-40砂浆试件各组各龄期的抗压强度均高于标准组,这与Weibull统计尺寸效应理论基本一致<sup>[19]</sup>. 试件内部存在缺陷与初始微裂纹,导致砂浆宏观力学性

能减弱,故尺寸越小,内部存在的缺陷越少,且内部低强度单元发展成微裂缝的概率也越低,从而抗压强度越高<sup>[20-21]</sup>. 由上述孔隙率结果可知,尽管S-25的整体孔隙率低于S-70.7,但其强度受局部致命缺陷(微裂缝)和边界损伤的放大效应控制,导致有效承载能力大幅下降. S-25的最可几孔径大于S-40,表明其关键孔径分布偏向更大尺寸,存在更多有害孔(大于50 nm的毛细孔或微裂缝). 大孔径孔隙/裂缝不仅减少有效承载面积,而且显著降低断裂能,使材料更脆、更易在低应力下破坏.

表 5 不同尺寸水泥砂浆MIP测试结果

Table 5 MIP test results of cement mortar with different sizes

| 试件编号   | 试件尺寸/mm        | 孔隙率/%    | 汞摄入量/(mL/g) | 最可几孔径/nm |
|--------|----------------|----------|-------------|----------|
| REF    | 70.7×70.7×70.7 | 18.487 7 | 0.092 9     | 50.43    |
|        | 40×40×40       | 17.659 3 | 0.087 7     | 41.46    |
|        | 25×25×25       | 17.940 3 | 0.090 9     | 49.73    |
| F20-N3 | 70.7×70.7×70.7 | 15.087 4 | 0.075 0     | 32.49    |
|        | 40×40×40       | 10.206 7 | 0.046 5     | 27.15    |
|        | 25×25×25       | 10.923 7 | 0.050 1     | 28.28    |

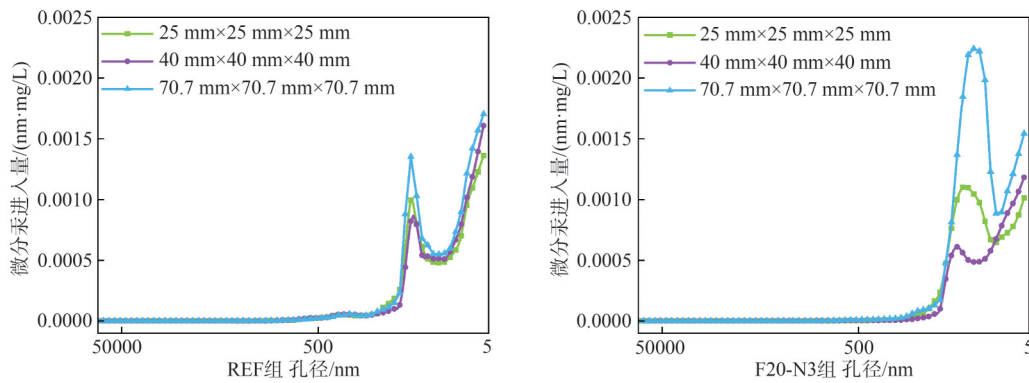


图 8 不同尺寸水泥砂浆微分进汞量测试结果

Figure 8 Test results of differential mercury intake of cement mortar with different sizes

选取REF组各龄期标准组与非标准组砂浆的抗压强度,绘制标准与非标准砂浆抗压强度关系曲线(图9). 非标准组与标准组砂浆抗压强度均具有一定的线性相关性,根据试验数据拟合得到两者的相关方程式. 图9(a)为S-40砂浆抗压强度与标准砂浆抗压强度之间的关系,二者的相关方程式为 $y_1=0.946x_1+6.522$ ,  $R_1^2=0.863$ . 图9(b)为S-25砂浆抗压强度与标准砂浆抗压强度之间的关系,二者的相关方程式为 $y_2=0.716x_2+8.392$ ,  $R_2^2=0.811$ .  $R^2$ 均大于0.8,说明两者之间有较好的关联性.

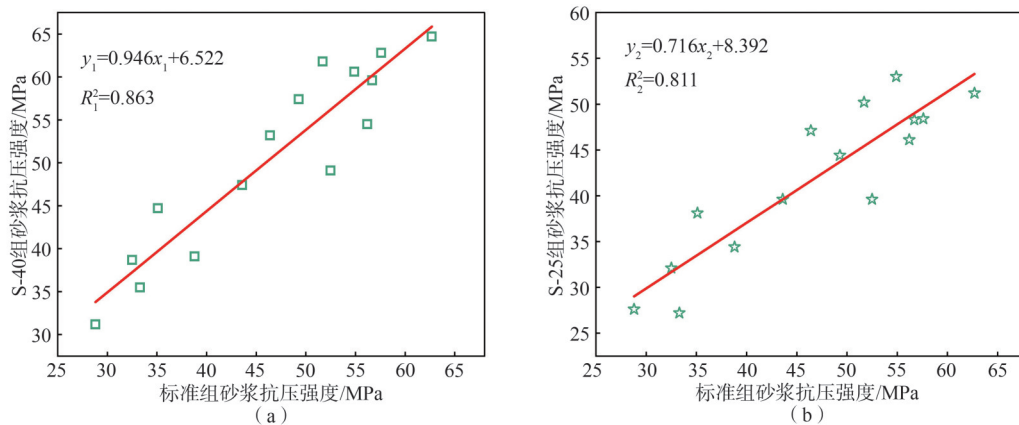


图 9 标准立方体砂浆与非标准立方体砂浆试件抗压强度关系

Figure 9 Relationship between compressive strength of standard and non-standard specimens

### 2.4.2 掺合料对抗压强度换算系数的影响

以标准养护时间28 d抗压强度为基准,分析非标准试件与标准试件抗压强度换算系数随掺合料改变的变化规律.图10(a)为S-40砂浆试件与标准试件的换算系数变化图,图10(b)为S-25砂浆试件与标准试件的换算系数变化图,纵坐标表示换算系数,其中 $\eta_1 = \frac{f_{c-40}}{f_{c-70.7}}$ 、 $\eta_2 = \frac{f_{c-25}}{f_{c-70.7}}$ .

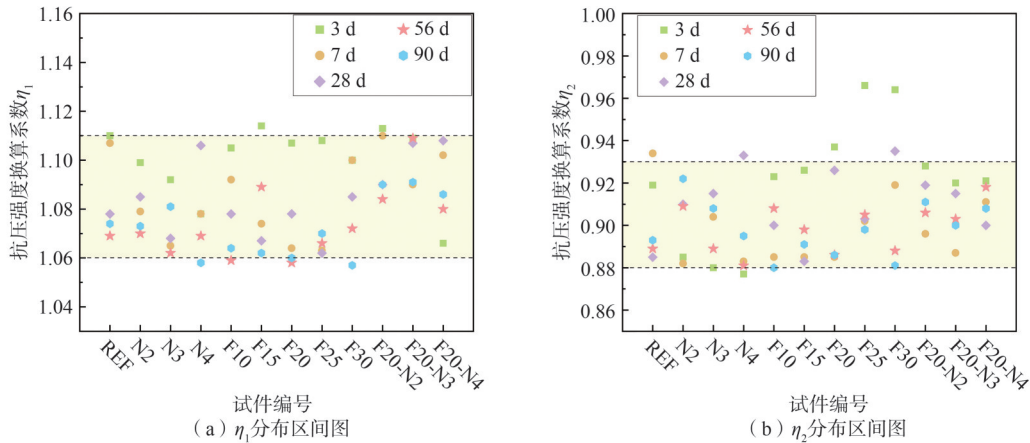


图10 非标准试件与标准试件抗压强度换算系数

Figure 10 Conversion factor for compressive strength of non-standard and standard test blocks

由图10(a)可知,S-40砂浆试件与标准试件的换算系数 $\eta_1$  REF组为1.076,除REF组外,其他组均介于1.092~1.116.同时可以得到, $\eta_1$ 随NS掺量的增加先增大后减小,当NS掺量为3%时,换算系数最大(1.116);随FA掺量的增加, $\eta_1$ 也呈先增长后下降的趋势,当FA掺量为20%时,换算系数最大(1.106);当NS和FA复掺时, $\eta_1$ 保持在 $1.100 \pm 0.010$ 范围内.抗压强度换算系数越偏离1,认为尺寸效应越显著<sup>[22]</sup>.故S-40试件与标准试件相比,单掺NS较单掺FA表现出更显著的尺寸效应,且单掺3%NS和单掺20%FA时尺寸效应最显著,这与最优抗压强度吻合,意味着抗压强度较大时尺寸效应更明显,与杨伟军等<sup>[23]</sup>得到的结论一致.同单掺相比,复掺时尺寸效应最小,且复掺时抗压强度换算系数更稳定.

由图10(b)可知,S-25砂浆试件与标准试件的换算系数 $\eta_2$  REF组为0.882,除REF组外,其他组均介于0.900~0.926,且其余各组尺寸效应都小于REF组.这是由于砂浆中掺入微细掺合料,使砂浆内部更加密实,与S-70.7标准试件相比,S-25小尺寸砂浆密实度提升更多,从而使尺寸效应减弱<sup>[24]</sup>. $\eta_2$ 随NS掺量的增加先增大后减小,当NS掺量为3%时,换算系数最大(0.918);随FA掺量的增加, $\eta_2$ 也呈先增长后下降的趋势,当FA掺量为20%时,换算系数最大(0.926);当NS和FA复掺时, $\eta_2$ 保持在 $0.915 \pm 0.005$ 范围内.单掺NS组和复掺组换算系数波动较小,故S-25试件与标准试件相比,NS掺量和复掺对其尺寸效应影响不明显,换算系数均稳定在 $0.913 \pm 0.007$ 范围内;单掺FA组换算系数波动幅度较大,其 $\eta_2$ 最大值与最小值相差0.026,当FA掺量为20%时,尺寸效应最不显著.

## 3 结论

(1) 掺入NS可有效提高PCCP保护层砂浆的抗压强度,尤其是早期强度,且抗压强度随NS掺量的增加先上升后下降.NS最佳掺量为3%,此时3种尺寸(S-70.7、S-40、S-25)砂浆3 d抗压强度较REF组分别提高了34.55%、36.03%和31.17%,90 d抗压强度分别增长了6.54%、5.59%和8.20%.掺入FA使PCCP砂浆早期抗压强度降低,且随FA掺量的增加而降低.28 d后抗压强度逐渐提高,FA掺量为20%时砂浆抗压强度表现最优,3种尺寸砂浆90 d抗压强度分别提高了6.48%、2.45%和5.50%.

(2) 复掺NS和FA组早期抗压强度优于单掺FA组和REF组,但低于N3组.后期抗压强度增长幅度变大,28 d后均高于单掺组.90 d时3种尺寸F20-N3组抗压强度较N3组分别提高了19.02%、20.15%和17.90%.FA和NS复掺协同作用,使砂浆的抗压强度提高.

(3) 3种尺寸的砂浆抗压强度存在尺寸效应,以S-70.7立方体试件为标准组,S-40立方体试件砂浆抗压强度较标准组高,二者相关方程式为 $y_1=0.946x_1+6.522$ , $R_1^2=0.863$ ;S-25立方体试件砂浆抗压强度较标准组低,二者相关方程式为 $y_2=0.716x_2+8.392$ , $R_2^2=0.811$ 。

(4) 尺寸效应换算系数 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 与掺合料种类及掺量有关。 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 随NS掺量的增加先增大后减小,当NS掺量为3%时,换算系数最大。 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 随FA掺量的增加先增大后减小,当FA掺量为20%时,换算系数最大。复掺NS和FA组较单掺组换算系数更稳定,尺寸效应更小。S-40组与标准组相比,掺加矿物掺合料组较REF组尺寸效应更显著;S-25组与标准组相比,添加掺合料组较REF组尺寸效应减弱。

## 参考文献:

- [1] 张宏宇. 预应力钢筒混凝土管结构性能及耐久性理论研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.  
Zhang H Y. Research on structural performance and durability theory of prestressed concrete cylinder pipe[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)
- [2] AWWA Standard. Prestressed concrete pressure pipe, steel-cylinder type: ANSI/AWWA C301—14[S]. Denver: American National Standards Institute, 2014.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 预应力钢筒混凝土管: GB/T 19685—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Prestressed concrete cylinder pipe: GB/T 19685—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [4] 宋少民, 刘娟红, 徐国强. 石灰石粉在混凝土中应用的综述与研究[J]. 混凝土世界, 2009(6): 38-43.  
Song S M, Liu J H, Xu G Q. Summarize and research on application of limestone powder in concrete[J]. China Concrete, 2009(6): 38-43. (in Chinese)
- [5] 刘战鳌, 周明凯, 李北星. 石粉对机制砂混凝土性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(10): 100-103.  
Liu Z A, Zhou M K, Li B X. Research progress on influence of microfines on manufactured sand concrete's performance[J]. Materials Reports, 2014, 28(10): 100-103. (in Chinese)
- [6] 周永祥, 王永海, 王思娅, 等. 石灰石粉的特性及对混凝土性能的影响[J]. 施工技术, 2014, 43(9): 23-27.  
Zhou Y X, Wang Y H, Wang S Y, et al. The characteristic of limestone powder and its effect on performance of concrete[J]. Construction Technology, 2014, 43(9): 23-27. (in Chinese)
- [7] 马亮怡. 纳米二氧化硅和粉煤灰改性再生混凝土力学性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.  
Ma L Y. Study on mechanical properties of recycled concrete modified by nano silica and fly ash[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] Dai J, Gong C C, Wang Y F, et al. Effect of nano-silica on structure and properties of high sulfate resistant Portland cement mixed with mineral powder or fly ash[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105843.
- [9] 吕周岭, 罗英, 马保国, 等. 纳米二氧化硅对水泥-粉煤灰体系氯离子固化能力的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 1997-2003.  
Lyu Z L, Luo Y, Ma B G, et al. Effect of nano-silica on the chloride immobilization capacity of cement-fly ash system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 1997-2003. (in Chinese)
- [10] 张秀芝, 刘明乐, 杜笑寒, 等. 纳米SiO<sub>2</sub>与粉煤灰协同改性水泥基材料性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 50-55+62.  
Zhang X Z, Liu M L, Du X H, et al. Synergistic effect of nano silica and fly ash on the cement-based materials[J]. Materials Reports, 2017, 31(12): 50-55+62. (in Chinese)
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 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.  
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of cement mortar strength(ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [12] 李孔龙. 再生混凝土抗压强度尺寸效应细观数值模拟与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
Li K L. Meso-numerical simulation and study on size effect of compressive strength of recycled concrete[D]. Harbin: Harbin

- Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 王冬,李文峰,祝烨然,等. 一种辊射工艺PCCP保护层砂浆设计配合比的快速评价方法:201910378449.4[P]. 2019-07-30.  
Wang D, Li W F, Zhu Y R, et al. A rapid evaluation method for the design mix ratio of roller-spray process PCCP protective layer mortar:201910378449.4[P]. 2019-07-30. (in Chinese)
- [14] 李振东,孟丹,王智鹏,等. 纳米二氧化硅改性混凝土宏观性能及微观调控机理分析[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2145-2153.  
Li Z D, Meng D, Wang Z P, et al. Analysis on macroscopic property and microcoscopic control mechanism of Nano-SiO<sub>2</sub> modified concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2145-2153. (in Chinese)
- [15] 李阳,陈杰,王飞,等. 纳米二氧化硅对水泥砂浆性能的影响[J]. 混凝土, 2017(8): 116-119.  
Li Y, Chen J, Wang F, et al. Effects of silica nano-powder on properties of high performance mortar[J]. Concrete, 2017(8): 116-119. (in Chinese)
- [16] Khater H M, El-Sabbagh B A, Fanny M, et al. Effect of nano-clay on alkali activated water-cooled slag geopolymer[J]. British Journal of Applied Science & Technology, 2013, 3(4): 764-776.
- [17] 陈凯. 地聚物再生混凝土受压性能尺寸效应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2023.  
Chen K. Study on size effect of compressive properties of geopolymer recycled concrete[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [18] Cappelari E, Giordani C, Dapper S T H, et al. Influência da resistência à compressão na molhabilidade superficial de concretos[J]. Revista Matéria, 2020, 25(1): e-12579.
- [19] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293-297.
- [20] 黄海燕,张子明. 混凝土的统计尺寸效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 291-294.  
Huang H Y, Zhang Z M. Statistical size effect of concrete[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(3): 291-294. (in Chinese)
- [21] 苏捷,方志. 水泥砂浆立方体抗压强度尺寸效应的试验研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 88-92.  
Su J, Fang Z. Experimental study on the dimensional effect of mortar cubic compressive strength[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(2): 88-92. (in Chinese)
- [22] 杜婷,帅小根,石雯,等. 粉煤灰-矿渣再生混凝土抗压强度及尺寸效应研究[J]. 功能材料, 2024, 55(2): 2142-2147.  
Du T, Shuai X G, Shi W, et al. Study on compressive strength and size effect of recycled concrete with fly ash-slag[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(2): 2142-2147. (in Chinese)
- [23] 杨伟军,袁帅,杨春侠. 砂浆单轴抗压强度尺寸效应律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 79-86.  
Yang W J, Yuan S, Yang C X. Study on size effect law of compressive strength of building mortar under uniaxial compression[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 79-86. (in Chinese)
- [24] 黄锦波. 混凝土的统计尺寸效应试验研究[J]. 建筑技术开发, 2007, 34(3): 50-51.  
Huang J B. Weibull statistical size effect theory of concrete[J]. Building Technique Development, 2007, 34(3): 50-51. (in Chinese)

责任编辑: 张自强