

# 水泥种类对砂浆收缩性能和孔结构参数的影响

吴福飞, 董双快, 赵振华, 吴发银, 黄宗辉  
(贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州贵阳 550025)

**摘要:** 研究常见水泥种类对砂浆收缩性能和孔结构参数的影响,为水泥的合理选用提供试验参考。采用贵州常见的4种水泥(豪龙水泥、西南水泥、尧柏水泥、中诚水泥),探索砂浆的力学性能、收缩性能和孔结构参数等性能。结果表明:随着养护龄期的延长,砂浆的抗折强度和抗压强度越高,但90 d时4种水泥砂浆抗压强度相差不大于3 MPa。砂浆的抗压强度与抗折强度之间呈现出显著的线性关系,折压比呈现出降低的趋势,干燥收缩与自收缩均随养护龄期的延长不断增长,但干燥收缩始终高于自收缩。通过吸水法发现,养护龄期的延长对砂浆孔结构均匀性有细化作用,但4种水泥砂浆的平均孔径相差不大,相差不到0.04。表明水泥产地不同,其性能的表现各异,文中4种水泥的建议选择顺序为:西南水泥 > 中诚水泥 > 尧柏水泥 > 豪龙水泥。

**关键词:** 水泥; 砂浆; 收缩性能; 力学性能; 孔结构参数

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0207-05

## Effect of cement type on shrinkage performance and pore structure parameters of mortar

WU Fufei, DONG Shuangkuai, ZHAO Zhenhua, WU Fayin, HUANG Zonghui

(School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The effects of common cement types in Guizhou on mortar shrinkage properties and pore structure parameters were explored, providing experimental reference for the rational selection of cement. Based on this, four kinds of common cement (Haolong cement, south west cement, Yaobai cement, Zhongcheng cement) in Guizhou were used to investigate the mechanical properties, shrinkage performance and pore structure parameters of mortar. Results show that with the extension of curing age, the flexural strength and compressive strength of mortar increase, but the difference in the compressive strength of four cement mortar at 90d is less than 3MPa. The compressive strength and flexural strength of mortar show a significant linear relationship, and the folding and pressing ratio shows a decreasing trend. Drying shrinkage and autogenous shrinkage of cement mortar both increase with the extension of curing age, but the drying shrinkage is always higher than that of autogenous shrinkage. Through the water-absorbing method it can be found that the prolongation of the curing age had a refinement effect on the homogeneity of the mortar pore structure, but the average pore diameters of the four cement mortars were not significantly different and the difference is less than 0.04. Based on the above findings, it can be concluded that the performance of cement varies as the cement producing area varies also, it is suggested that the choice of 4 kinds of cement follows the order: southwest cement > Zhongcheng cement > Yaobai cement > Haolong cement.

**Key words:** cement; mortar; shrinkage performance; mechanical properties; pore structure parameters

收稿日期:2017-12-17; 修回日期:2018-03-05

基金项目:贵州师范大学2016年博士科研启动项目(0517073);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)

作者简介: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。

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

## 1 研究背景

水泥通常由硅酸三钙(阿利特)、硅酸二钙(贝利特)、铝酸三钙、铁铝酸四钙、少量 MgO 和石膏等矿物成分组成<sup>[1]</sup>,这些矿物成分决定了水泥的水化热、力学性能和耐久性等性能,进而决定了混凝土的力学性能和耐久性<sup>[2-3]</sup>。杨锦<sup>[4]</sup>发现低热水泥砂浆的早期强度低,后期强度高且有超越中热水泥后期强度的趋势,梁瑞华等<sup>[5]</sup>发现水泥的比表面积越大,水化热和水化程度越高,即使在不同的养护条件(自然养护、标准养护和水中养护)仍呈现出相似的规律,随着水泥比表面积增大,强度有增加的趋势,且能显著增加凝胶孔的数量,减少大孔的数量<sup>[6]</sup>,同时,也会增加混凝土的水化热<sup>[7]</sup>。黏土是制备水泥的成分之一,为了节约有限的黏土资源,通常采用工业废渣来替代。韩静云等<sup>[8]</sup>采用石灰石煅烧煤矸石来制备水泥,其 28d 的净浆强度可达到 70.16 MPa,赵世珍等<sup>[9]</sup>采用电解锰渣、镁渣制备出抗折、抗压强度分别为 5.1 MPa 和 31.2 MPa 的低等级水泥。另外,其他低含量化学成分也会影响水泥的性能。宋强等<sup>[10]</sup>发现 MgO 含量增加,能降低水泥的干燥收缩性能,但水浴环境却能促使水泥膨胀。陈文海等<sup>[11]</sup>制备出碱式硫酸镁水泥,并测试了相应混凝土的基本力学性能,夏雨等<sup>[12]</sup>测试了氯氧镁水泥的弯曲性能。硫铝酸盐水泥与普通水泥由于在矿物成分上不同,其早期强度高<sup>[13-14]</sup>,除此之外,纳米二氧化硅<sup>[15-16]</sup>和纳米碳酸钙<sup>[17-18]</sup>的掺入也会对水泥的力学性能和耐久性产生影响。目前,针对水泥种类的研究成果较多,但很少关注同一地区常见水泥对比的研究,这给工程选用时带来许多不便,基于此,本文采用贵州常见的 42.5 级普通硅酸盐水泥制备水泥砂浆,探讨水泥种类对砂浆抗折强度、抗压强度、干燥收缩、自收缩和孔结构参数的影响。通过研究,以为贵州常见水泥的合理选用提供试验基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 原材料

水泥采用贵州常见的 42.5 级水泥,如豪龙水泥、西南水泥、尧柏水泥、中诚水泥,砂采用中国 ISO 标准砂,水采用实验室自来水。

### 2.2 试验方法

为了明确水泥种类对砂浆收缩性能和孔结构参数的影响。因此,水灰比固定为 0.50,水泥:水:砂

=450:250:135,按照《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)和《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)相关方法成型试件,试件尺寸(长×宽×高)为 40 mm×40 mm×160 mm,成型 1d 后拆模在标准养护室进行养护,养护至 1、3、7、14、28、60、90 d 后测试其力学性能和各时段的吸水量,并通过文献<sup>[19]</sup>的原理,计算其孔结构参数。

成型试件尺寸(长×宽×高)为 25 mm×25 mm×280 mm,各组 6 根,成型 1d 后拆模,3 根试件密封,剩下 3 根不密封,之后将其放入湿度为 50±2% 和温度为 20±1℃ 的环境中,养护到一定龄期后测试其干燥收缩和自收缩性能。

## 3 结果与分析

### 3.1 抗折强度

抗折强度是混凝土结构剪力计算的重要参数,水泥种类对砂浆抗折强度的影响规律如图 1 所示。从图 1 中看出,随着养护龄期的延长,砂浆的抗折强度越高。在 14 d 以前,抗折强度的增长速度较快,豪龙水泥、西南水泥、尧柏水泥和中诚水泥的 14 d 抗折强度分别是 3 d 时的 1.48、1.52、1.25 和 1.25 倍,以豪龙水泥和西南水泥的增长较快,14 d 时各种水泥抗折强度的排序为中诚水泥>尧柏水泥>豪龙水泥>西南水泥,但相差不大且抗折强度均在 7.5 MPa 以上。

28 d 时,西南水泥和豪龙水泥的抗折强度增长较快,分别约为 3d 时的 1.71 和 1.60 倍,60~90 d 时西南水泥和尧柏水泥的抗折强度增长较慢。在选择水泥时,通常以 28 d 时的抗折强度为依据,结合 60~90 d 时的试验结果,建议首选西南水泥,尧柏水泥次之。

### 3.2 抗压强度

抗压强度是混凝土强度等级评定、结构承载力计算的重要参数,水泥种类对砂浆抗压强度的影响规律如图 2 所示。由图 2 看出,随着养护龄期的延长,砂浆的抗压强度越来越高。尤其在 28 d 前,抗压强度增长较快,豪龙、西南、尧柏和中诚水泥约为 3 d 时的 1.81、1.87、1.62 和 1.69 倍,强度大小排序为尧柏水泥>西南水泥>中诚水泥>豪龙水泥,但大小相差不到 4 MPa 且均在 44 MPa 以上。60~90 d 时砂浆的抗压强度也不断增加,但是其增幅相对较小,差值不到 3 MPa。综合抗折强度和抗压强度的数据,建议首选西南水泥,尧柏水泥次之。

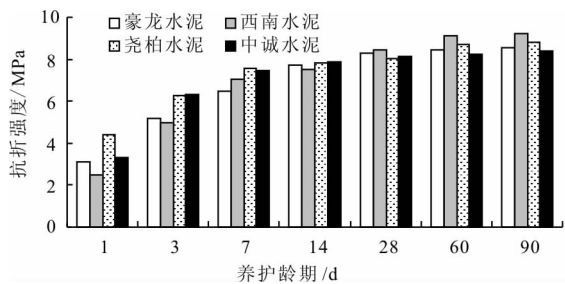


图 1 砂浆的抗折强度

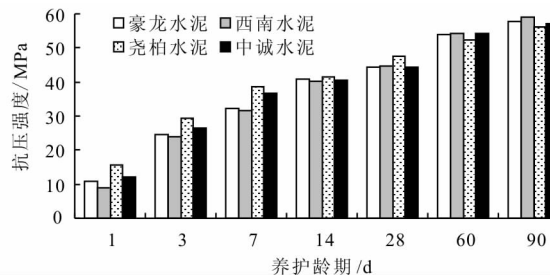


图 2 砂浆的抗压强度

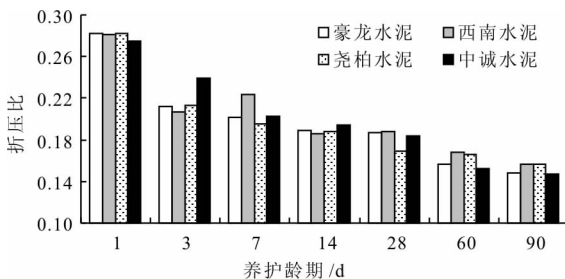


图 3 砂浆的折压比

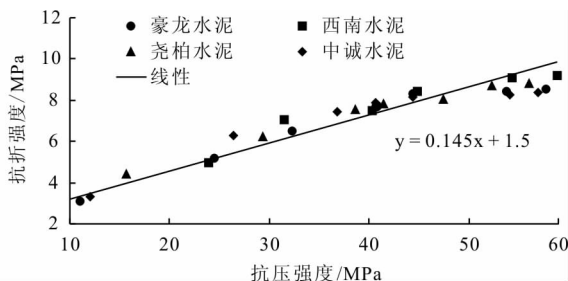


图 4 砂浆抗压强度与抗折强度的关系

折压比(抗折强度与抗压强度之比)是表现混凝土韧性的参数,其变化规律如图 3 所示。折压比与抗折强度和抗压强度变化规律不同,随龄期的延长趋势呈现出下降。3~28 d 时,以中诚水泥的折压比相对较大。在其余各龄期,4 种砂浆折压比的变化相对较小,这也进一步说明了 4 种水泥的抗折强度与抗压强度相差不大。在成本允许的情况下,4 种水泥可任意选择。混凝土的抗折强度一般为抗压强度的 1/7~1/10,本文试验结果发现,4 种水泥的抗折强度与抗压强度呈现出线性关系(如图 4 所示)。因此,在实际试验时,可根据水泥砂浆的抗压强度来预测抗折强度。

### 3.3 收缩性能

干燥收缩是由砂浆、混凝土内部水分不断蒸发流失,由内向外变干燥的现象,自收缩是胶凝材料的水化反应引起毛细孔负压和内部相对湿度降低而造成的宏观体积变化,这些变化过大会影响砂浆、混凝土的耐久性。4 种普通硅酸盐水泥对砂浆干燥收缩和自收缩的影响规律如图 5、6 所示。从图 5 可以看出,4 种水泥的收缩性能不同,均随龄期的延长逐渐增长。在整个测试过程,中诚水泥的干燥收缩始终高于其它 3 种水泥;在早期(14 d),尧柏水泥、西南水泥和豪龙水泥的干燥收缩值相差不大,在 28 d 以后,按干燥收缩大小排序为:中诚水泥 > 豪龙水泥 > 尧柏水泥 > 西南水泥。

从图 6 可见,砂浆自收缩与干燥收缩呈现类似的规律,中诚水泥的自收缩始终高于其它 3 种水泥。

在 14 d 前,中诚水泥与豪龙水泥的自收缩值相差较小,尧柏水泥与西南水泥也呈现类似的规律。在 28 d 后,按自收缩大小排序为:中诚水泥 > 西南水泥 > 豪龙水泥 > 尧柏水泥。相对而言,各种水泥的干燥收缩均高于自收缩,以干燥收缩对混凝土的影响较大,因此在选择水泥时,建议首先选择干燥收缩值较小的水泥,如西南水泥。

### 3.4 孔结构

通过吸水法测试并计算的孔结构参数( $\alpha$  和  $\lambda$ )如图 7 所示,其中  $\alpha$  越小,砂浆的孔径越不均匀; $\lambda$  反映了砂浆毛细孔径的平均孔径, $\lambda$  越小,孔径越小。由图 7 可看出,不同水泥和不同龄期砂浆的孔结构参数变化规律不尽相同。在 7 d 时,按砂浆的均匀性排序为尧柏水泥 > 豪龙水泥 > 中诚水泥 > 西南水泥,在 28 d 时,豪龙水泥 > 尧柏水泥 > 西南水泥 > 中诚水泥,可见水泥种类不同,养护龄期对砂浆孔结构均匀性的细化作用不同,综合来看,以豪龙水泥和尧柏水泥的孔结构较为均匀。在孔径大小方面的规律也不同,在 7 d 时,尧柏水泥 > 豪龙水泥 > 中诚水泥 > 西南水泥。在 28 d 时,4 种水泥砂浆的平均孔径相差不大,最大相差不到 0.04,这与抗压强度的结果较为接近。

### 3.5 微观结构与水化产物

水泥种类对砂浆 28 d 的微观形貌和水化产物的影响规律如图 8~9 所示,由图 8 可知,4 种水泥砂浆的界面相对密实,但也存在不少孔隙。其中豪龙水泥砂浆、尧柏水泥砂浆、西南水泥砂浆和中诚水

泥砂浆的最大孔径分别为 211.0  $\mu\text{m}$ 、245.0  $\mu\text{m}$ 、201.1  $\mu\text{m}$  和 243.7  $\mu\text{m}$ 。从电镜图上不难发现,中诚水泥砂浆的无害孔数量多、西南水泥砂浆水泥,以尧柏水泥砂浆的无害孔数量最少。

从孔隙的大小情况也不难发现,按最大孔隙排序为尧柏水泥 > 中诚水泥 > 豪龙水泥 > 西南水泥,因此,28 d 时西南水泥砂浆的抗压强度最大。将界面放大后,4 种水泥砂浆的水化产物如图 9 所示。界面放大后,西南水泥砂浆的界面相对密实,豪龙水泥砂浆次之,尧柏水泥砂浆和中诚水泥砂浆的界面相对疏松,尤其是尧柏水泥砂浆,虽然各种水化产物

相互交织在一起,但孔隙相对较大。豪龙水泥砂浆中形成较多纤维状的水化硅酸钙,尧柏水泥砂浆中的水化硅酸钙与水化铝酸钙相互交织在一起,西南水泥砂浆中的水化产物主要以纤维状的水化硅酸钙和层状的氢氧化钙为主,中诚水泥中除了纤维状的水化硅酸钙和层状的氢氧化钙,还有少量的钙矾石。对比发现,4 种水泥的水化产物主要以水化硅酸钙和层状的氢氧化钙为主,另外还有少量的水化铝酸钙和钙矾石,但是水泥种类不同,水泥水化形成的水化产物数量会有所不同,进而对砂浆力学性能和收缩性能的影响不同。

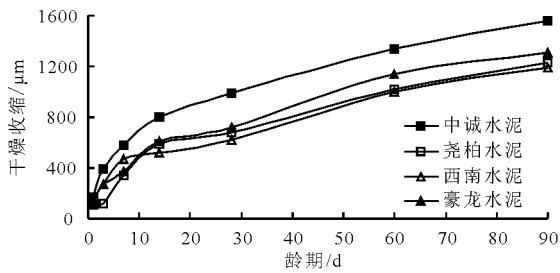


图5 砂浆干燥收缩

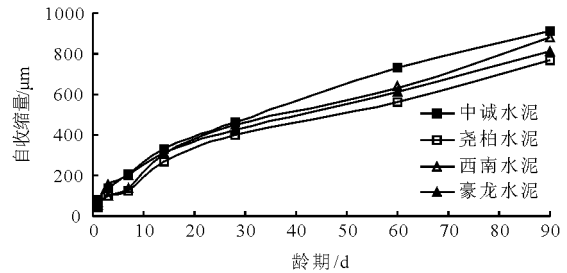
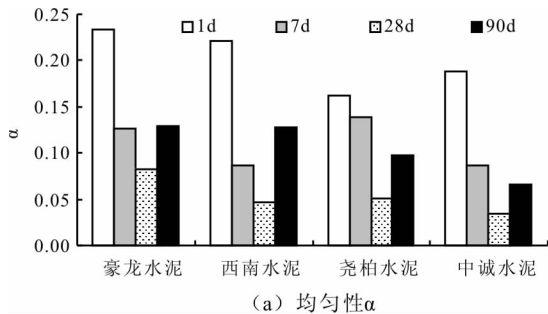
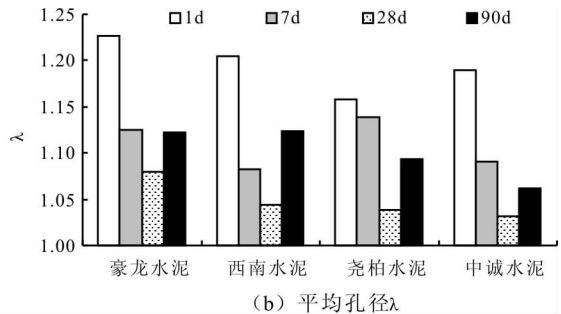


图6 砂浆自收缩



(a) 均匀性 $\alpha$



(b) 平均孔径 $\lambda$

图7 砂浆孔结构

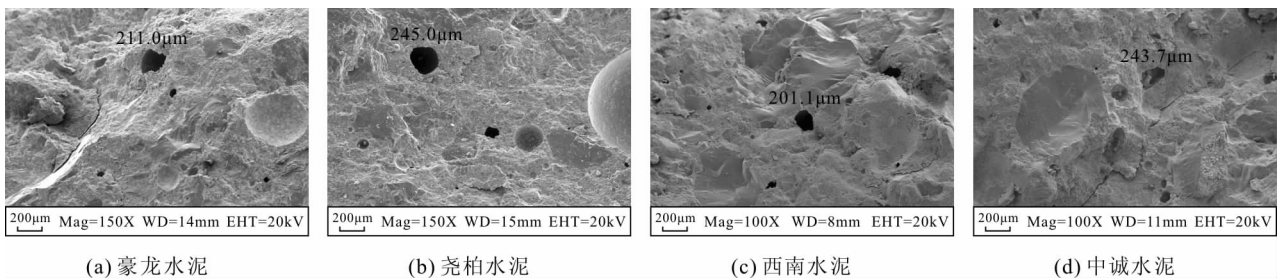


图8 砂浆的微观形貌

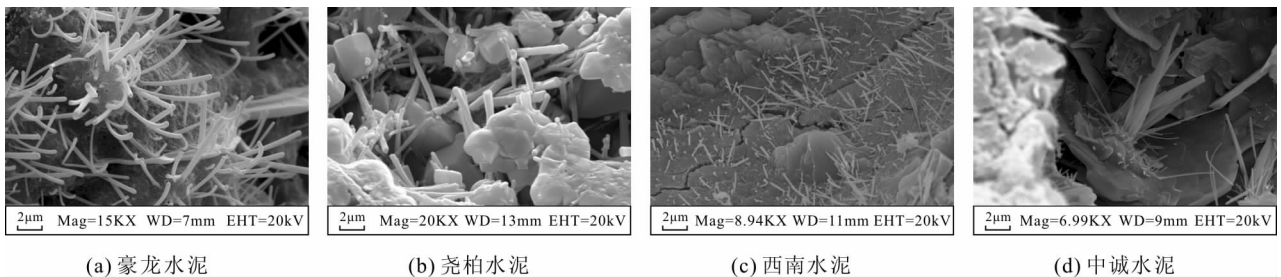


图9 砂浆的水化产物

## 4 结 论

通过对4种水泥砂浆收缩性能和孔结构参数的研究,可得到以下结论:

(1)随着养护龄期延长各种水泥的抗压强度与抗折强度均不断增大,且二者之间呈现出显著的线性关系,但抗压强度的增长比抗折强度的增长快,因此,折压比呈现出降低的趋势。

(2)水泥的产地不同,其成分不同,对砂浆收缩性能的影响也不同。砂浆的干燥收缩与自收缩均随养护龄期不断增长,干燥收缩始终高于自收缩。相对而言,中碱水泥的收缩值始终高于尧柏水泥、豪龙水泥和西南水泥。

(3)水泥的种类不同,砂浆的孔结构的均匀性和平均孔径也不同,养护龄期对砂浆孔结构均匀性的细化作用不同。在孔径大小方面,4种水泥砂浆的平均孔径相差不大,最大相差不到0.04。

上述这些规律对于贵州地区水泥的合理使用具有指导意义,同时也为砂浆抗压强度或抗折强度的预测提供借鉴。但本文只针对贵州常见的水泥进行试验,有待于对各种水泥进行试验,找出其一般规律,使其在选用时具有借鉴参考意义。

### 参考文献:

- [1] 吴福飞,特克斌,董双快,等. 掺合料和水胶比对水泥基材料水化产物和力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016,32(4):119-126.
- [2] STEFANIDOU M, TSARDAKA E C, PAVLIDOU E. Influence of nano-silica and nano-alumina in lime-pozzolan and lime-metakaolin binders[J]. Materials Today Proceedings, 2017,4(7):6908-6922.
- [3] HENDI A, RAHMANI H, MOSTOFINEJAD D, et al. Simultaneous effects of microsilica and nanosilica on self-consolidating concrete in a sulfuric acid medium[J]. Construction & Building Materials, 2017,152:192-205.
- [4] 杨锦. 不同胶凝材料体系水工混凝土的力学性能与变形性能研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
- [5] 梁瑞华,张磊,寇宵,等. 不同细度水泥的水化特性及其对水泥砂浆自愈合性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2017,36(6):2122-2127.
- [6] 魏莹. 基于不同粒径分布的低熟料矿渣水泥水化特征

- 和孔结构特性[J]. 硅酸盐通报,2017,36(5):1796-1800.
- [7] 王冲,殷吉强,肖波,等. 水泥细度与成分对混凝土温升的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(1):114-118.
- [8] 韩静云,张伟,宋旭艳,等. 掺加石灰石煅烧煤矸石及其在水泥水化过程中的作用机理[J]. 材料导报,2012,26(14):137-140.
- [9] 赵世珍,韩凤兰,王亚光. 电解锰渣-镁渣制备复合矿渣硫铝酸盐水泥熟料的研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(5):1766-1772+1776.
- [10] 宋强,张琼琼,徐德龙. 熟料氧化镁含量对水泥浆水化与收缩的影响[J]. 硅酸盐学报,2017,45(5):644-650.
- [11] 陈文海,吴成友,张慧芳,等. 碱式硫酸镁水泥混凝土基本力学性能研究[J]. 青海大学学报,2017,35(2):48-54.
- [12] 夏雨,关博文,刘开平,等. 氯氧镁水泥道路混凝土弯曲增韧性能研究[J]. 混凝土,2017(5):47-50+54.
- [13] 王培铭,李楠,徐玲琳,等. 低温养护下硫铝酸盐水泥的水化进程及强度发展[J]. 2017,45(2):242-248.
- [14] PELLETIER - CHAIGNAT L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B, et al. Beneficial use of limestone filler with calcium sulphoaluminate cement[J]. Construct Build Mater, 2012,26(1):619-627.
- [15] STEFANIDOU M, PAPAYIANNI I. Influence of nano-SiO<sub>2</sub>, on the Portland cement pastes[J]. Composites Part B, 2012,43(6):2706-2710.
- [16] GHASEMI - KAHRIZSANGI S, DESHEIKH H G, KARAMIAN E, et al. The Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nanoparticles addition on the microstructure and properties of bauxite self-flowing low-cement castables[J]. Ceramics International, 2017,43(12):8813-8818.
- [17] RAKI L, BEAUDOIN J, ALIZADEH R, et al. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology[J]. Materials, 2010,3(2):918-942.
- [18] CAMILETTI J, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete[J]. Materials & Structures/materiaux Et Constructions, 2013,46(6):881-898.
- [19] 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.