

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900754



本刊网刊

粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究

杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 李福海*, 胡丁涵

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:为探讨粉煤灰基地聚物砂浆力学性能和微观孔结构的影响因素, 利用正交设计和单一变量法研究了养护温度、高温养护时长、水相含量 z 、水玻璃模数 n 、胶砂比 J 和溶胶比 R 对砂浆强度的影响, 获得了其数学关系模型。同时, 借助压汞法分析了微观孔结构和砂浆宏观力学性能的关系。结果表明: 提高养护温度可以显著地增加砂浆的抗压强度, 并且最佳温度为 $70\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 高温持续养护 4 d 可以获得砂浆抗压强度和抗弯强度的最大值, 养护 24 h 可分别获得最大抗压强度和抗弯强度的 91.9% 和 71.3% 。砂浆强度的敏感性因素从大到小依次为水相含量 z 、水玻璃模数 n 、胶砂比 J 、溶胶比 R ; 砂浆强度随着水相含量 z 的增大而急剧降低, 两者几乎呈线性关系; 砂浆的抗压强度和抗弯强度随着水玻璃模数 n 的增加先增大后减小, 满足二次函数关系; 胶砂比和溶胶比对砂浆的强度影响较小。孔隙率越小, 砂浆强度越高; 孔隙率对强度的影响要明显大于孔径分布; 在孔隙率相近时, 胶凝孔隙($\leq 10\text{ nm}$)和过渡孔隙($10\sim 100\text{ nm}$)的体积百分数越大, 砂浆强度越高。

关键词:粉煤灰; 地质聚合物; 抗压强度; 压汞法; 正交试验

中图分类号: TU52

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2020)06-0162-08

Research on Influence Parameters of Early Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar

YANG Shiyu, ZHAO Renda, JIN Hesong, LI Fuhai*, HU Dinghan

(School of Civil Eng., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate the influence factors of the mechanical properties and the microscopic pore structure of fly ash based geopolymer mortar, the curing temperature, high temperature curing time, water phase content z , water glass modulus n , solution/cement ratio R and the cement/sand ratio J were studied by orthogonal design and single variable method, respectively. And its mathematical model was proposed. The relationship between microscopic pore characteristics and mechanical properties of mortar was analyzed by mercury intrusion porosimetry (MIP). The results showed that increasing the curing temperature can significantly increase the compressive strength of the mortar, and the optimum temperature is $70\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. The maximum compressive strength and flexural strength of mortar can be obtained by continuous curing at high temperature for 4 d , while 91.9% of the maximum compressive strength and 71.3% of the maximum flexural strength can be obtained respectively by curing for 24 h . The sensitivity factors from large to small on mechanical properties of mortar as follows as water phase content, water glass modulus, the cement/sand ratio and the solution/cement ratio. The strength of mortar decreases sharply with the increase of water content z , and the two have almost linear relationship. The compressive strength and flexural strength of the mortar first increase and then decrease with the increase of the modulus n of the water glass, satisfying the quadratic curve relationship. The effect of cement/sand ratio and solution/cement ratio on the strength of mortar can be ignored. When the porosity is similar, the larger the volume ratio of the gel aperture ($\leq 10\text{ nm}$) and the transition aperture ($10\sim 100\text{ nm}$), the higher the strength of the mortar. However, the effect of porosity on the strength is significantly greater than the influence of pore size distribution.

Key words: fly ash; geopolymer; compressive strength; mercury intrusion porosimetry; orthogonal test

收稿日期: 2019-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778531); 四川省科技计划项目(2019YJ0219); 四川省科技厅项目(2020ZYD011)

作者简介: 杨世玉(1989—), 男, 博士生. 研究方向: 混凝土材料和混凝土桥梁结构长期性能. E-mail: shyyang@my.swjtu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: lifuhai2007@home.swjtu.edu.cn

网络出版时间: 2020-10-20 15:01:11

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20201019.1107.002.html>

地聚物最早是由Davidovits提出来的^[1-2], 是一种由 $[\text{AlO}_4]$ 和 $[\text{SiO}_4]$ 四面体基本单元形成的3维立体网状无机聚合物。地聚物一般指由碱性溶液, 如氢氧化钠(NaOH)、水玻璃(Na_2SiO_3)等, 激活富硅铝质原料(如矿渣、粉煤灰等)而聚合成类似水泥的胶凝材料。相比普通硅酸盐水泥, 地聚物的生产耗能可减少60%, CO_2 的排放量可降低5/6, 即使温度高达1 000~1 200 ℃ 仍然不会丧失其力学性能。同时实现了工业固废的二次利用, 对环保产生积极的影响^[3-6]。因此, 被认为是普通硅酸盐水泥的一种理想替代品。近年来, 有关碱激发胶凝材料的研究呈现一种近似指数式的增长^[7-9]。

文献[2,10]研究表明, 地聚物混凝土的早期强度高, 仅3 d龄期的抗压强度就可以达到60 MPa以上。但是, 激发剂种类、浓度及养护环境等对地聚物的合成影响显著。Görhan等^[11]分析了水玻璃/ NaOH 质量比在0.4~2.3范围时, NaOH 浓度对地聚物混凝土强度的影响, 研究发现 NaOH 浓度为6 mol/L时的激发效果最佳。Somna等^[12]将水玻璃/ NaOH 质量比的研究范围扩大到0.33~3.00发现, 最大抗压强度值出现在 NaOH 浓度为14 mol/L时。此外, 李星烨^[13]基于单一变量法探讨了水玻璃与 NaOH 的质量比等因素对地聚物砂浆力学性能的影响, 结果表明, 水玻璃/ NaOH 为1.0时, 地聚物砂浆可获得最大抗压强度, 且 NaOH 的浓度越高激发效果越明显。不难看出, 激发剂各组分 的比例与砂浆力学性能的关系尚不统一。前人的研究也未将水相含量单独考虑, 少有文献提及地聚物力学强度与影响因素的数学模型。故此, 对地聚物砂浆的力学性能的研究任重而道远。

众所周知, 材料的微观结构决定了其宏观性能。砂浆是多相复合材料, 其细集料、粉煤灰、激发剂等可构成不同的级配并达到填充效果, 从而导致砂浆中孔隙大小、形状和分布复杂多变。研究砂浆的微观孔隙结构可以解释其宏观力学机理, 对进一步改进其性能具有重要指导意义。Park等^[14]分析了高温下粉煤灰基地聚物净浆的孔结构, 研究表明, 高温下(400 ℃)强度与孔隙率成反比关系。Musaad等^[15]研究了矿渣等掺量对粉煤灰基地聚物孔结构的影响, 结果表明, 矿渣的掺入使地聚物胶凝材料内部结构更加致密, 孔隙率降低。但是, 有关孔隙结构与水玻璃模数 n 、孔隙结构与水相含量 z 关系的研究较少。

基于上述研究, 作者分别利用正交试验和单因素试验, 探讨水玻璃模数 n 、水相含量 z 、胶砂比 J (粉煤灰与细集料的质量之比)、溶胶比 R (激发剂溶液与粉煤灰的质量之比)对地聚物砂浆强度发展的影响, 并提出数学模型。运用压汞法分析微观孔隙与力学

强度的关系, 揭示地聚物砂浆强度破坏的内在原因, 以期 为地聚物混凝土的工程推广应用提供参考依据和技术支撑。

1 原材料和测试方法

1.1 原材料

1) 粉煤灰。粉煤灰由成都博磊资源循环开发有限公司提供。且化学氧化物含量见表1, 粒径分布见图1。

表 1 粉煤灰的化学氧化物含量
Tab. 1 Chemical oxide content of fly ash

									%
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	烧失量	
58.84	12.45	1.81	5.78	1.44	0.72	0.18	0.36	3.20	

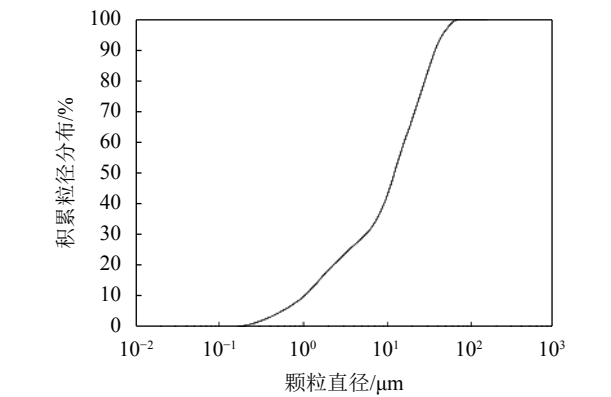


图 1 粉煤灰的粒度累积分布曲线

Fig. 1 Particle size cumulative distribution curve of fly ash

由表1可知, 该粉煤灰中 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的含量大于70%, 并且 CaO 含量低于10%, 烧失量为3.20%。根据ASTM C618规范, 该粉煤灰为F级低钙粉煤灰范畴。由图1可见, 灰样的粒径范围为0.10~100.00 μm , 其中45.00 μm 以下颗粒的累积粒径占比为94.25%, 中位粒径为12.10 μm 。

2) 试验砂。试验用砂由厦门艾思欧标准砂有限公司提供, 其比重为2.65, 其粒径范围为0.08~2.00 mm。

3) 激发剂溶液。选用纯度大于95%的 NaOH 颗粒和波美度为40、含固量为46.08%的水玻璃制备。成都市政自来水用作 NaOH 溶液的分散剂。

1.2 试验方法

- 1) 试验流程。试验的流程如图2所示。
- 2) 强度试验。如图3所示, 根据《水泥胶砂强度检验方法》(ISO法)》(GB/T 17671—1999)的规定, 在水泥胶砂抗折抗压试验机上进行地聚物砂浆的抗弯强度和抗压强度的测试。
- 3) 压汞试验。如图4所示, 试验微观孔隙的测试采用压汞仪Micromeritics Autopore IV9500。由于表面

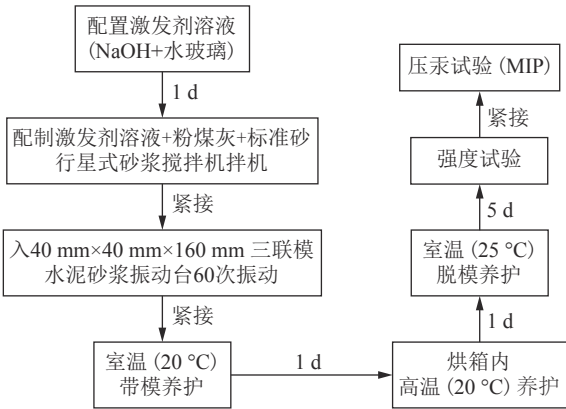


图 2 试件制作过程

Fig. 2 Production process of specimens

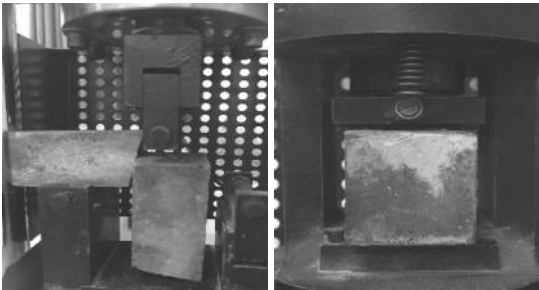


图 3 强度测试试验过程

Fig. 3 Process of strength test

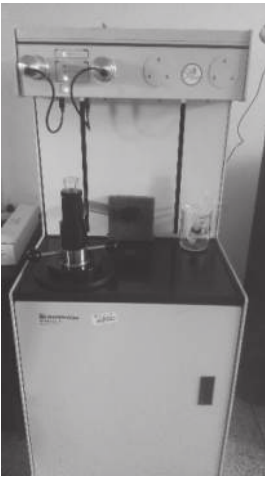


图 4 压汞试验过程

Fig. 4 Process of MIP test

张力的原因,汞对固体多是非湿润的,汞在外力作用下才能侵入固体孔隙结构中,其过程满足瓦什伯恩 (Washburn)方程^[16]:

$$r = -2\sigma \cos \theta / P \tag{1}$$

式中: P 为外加压力, Pa; r 为孔的半径, m; σ 为汞的表面张力, 通常取0.48 N/m; θ 为湿润角, 一般取140°。式 (1)表明, 在 θ 和 σ 不变的前提下, 汞的压力与入侵孔径成反比。

4) 正交试验设计。试验为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 的激

发剂类型, 其中, n 为激发剂溶液中 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 质量比, z 为 $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的质量比。为了充分考虑激发剂溶液中各组分对砂浆强度的贡献, 同时便于工程应用, 文中称 n 为“模数”, z 为“水相含量”。

试验选择了水玻璃模数、水相含量、胶砂比和溶胶比4个因素作为变量因子, 根据正交设计表 $L_{16}(4^5)$, 设置了4个水平 (表2), 同时采取了单因素变量法研究了温度和高温养护时间对地聚物砂浆强度的影响。

表 2 正交试验的因素和水平设计

Tab. 2 Factors and level design of orthogonal experiments

因素	模数 n	水相含量 z	胶砂比 J	溶胶比 R
水平1	1.0	3.0	0.4	0.50
水平2	1.2	4.0	0.6	0.65
水平3	1.4	5.0	0.8	0.70
水平4	1.6	6.0	1.0	0.75

2 结果与讨论

2.1 养护温度和时长对地聚物砂浆的影响

在水玻璃中掺入适量NaOH溶液制备模数为1.0, 水相含量 z 为4.0的激发剂溶液。制作了6组胶砂比 J 和溶胶比 R 均为0.5的砂浆试件。成型的试件分别在40、50、60、70、80、90℃烘箱中密封养护24 h, 并分别测量7 d的弯曲强度和抗压强度, 结果如图5所示。同样配比的成型试件分别在80℃环境下养护1、2、3、4、5 d, 强度测试结果见图6。

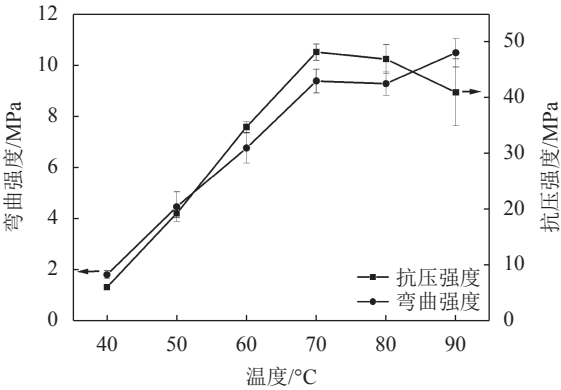


图 5 养护温度和砂浆强度的关系

Fig. 5 Relationship between curing temperature and mortar strength

从图5可以看出, 试件的抗压强度和弯曲强度随养护温度的增长先升高后平稳, 在70℃时有拐点。具体表现为, 养护温度为40℃时, 试件抗压强度不足10 MPa; 养护温度在40~70℃之间时, 试件抗压强度随温度增加几乎呈直线状上升; 养护温度为70℃时, 达到48.08 MPa; 进一步升温至90℃时, 抗压强度趋于平稳, 甚至略有减小。这是由于养护温度的提高加剧了分子的热运动, 增强了羟基离子的解聚极化能,

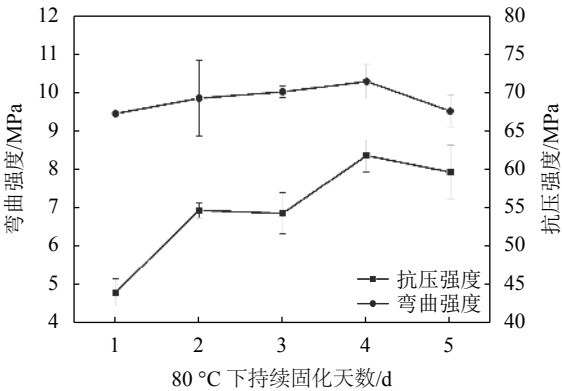


图 6 养护时长和砂浆强度的关系

Fig. 6 Relationship between curing time and mortar strength
使得粉煤灰的活性被激发出来,从而提升了地聚物的生成速率。但是,过高的固化温度使地聚物硬化加快和气孔增多而无法逐步形成更密实的结构。此外,过高的温度使得早期生成的凝胶没有充足的时间扩散,导致地聚物砂浆的强度无法进一步提升。

如图6所示,地聚物砂浆的强度随着高温(80 °C)养护的时长先增后减。高温持续养护4 d可以获得砂浆抗压强度和抗弯强度的最大值,但是,养护24 h可分别获得最大抗压强度和弯曲强度的91.9%和71.3%。可见,通过延长高温固化时间来提高地聚物强度的效果并不明显。

2.2 正交试验优化配比和极差分析

表3为正交试验结果。根据表3中强度指标可知,最佳抗压强度配合比为3134,而根据强度发展规律可以推定3111为最佳配合,但该配比不包含在已做的试验内,可以作为下一步配比优化方向。最大弯曲强度为12.73 MPa,出现在配合比1111中,说明地聚物砂浆的抗压强度和弯曲强度最优值并不同时获得。

表 3 地聚物砂浆的强度值

Tab. 3 Strength values of geopolymer mortar					
配合方案	弯曲强度/ MPa	抗压强度/ MPa	配合方案	弯曲强度/ MPa	抗压强度/ MPa
1111	12.73	57.07	3134	7.37	62.07
1222	8.63	40.55	3243	6.70	50.63
1333	5.33	25.82	3312	6.53	44.27
1444	2.87	17.47	3421	4.97	22.72
2123	6.77	52.22	4142	9.93	52.00
2214	7.37	50.23	4231	6.17	59.08
2341	6.43	39.90	4324	6.10	36.57
2432	4.43	17.85	4413	5.40	28.32

注: 配合比中数字1、2、3、4分别代表水平1、水平2、水平3、水平4; 千位代表模数 n , 百位代表水相含量 z , 十位代表胶砂比 J , 个位代表溶胶比 R 。

为衡量各因素对强度指标的敏感性,在正交试验中可以计算各因素下试验指标极差值的大小(表4)。

极差大的因素代表其4个水平对强度所造成的差异性大。据此可知,水相含量 z 极差最大,是主要因素;模数 n 极差相对较小,是次要因素。这个关系也可以从趋势图上各曲线的波动大小反映出来。

表 4 各因素的极差值

Tab. 4 Extreme difference of each factor		
因素	抗压极差	抗弯极差
模数 n	23.4	3.0
水相含量 z	34.7	4.8
胶砂比 J	7.3	2.2
溶胶比 R	6.4	1.6

2.3 水玻璃模数 n 对地聚物砂浆的影响

根据正交试验均匀分散和综合可比的特点,通过计算可获得同一因素下各水平 i 相应的平均强度 $\bar{k}_i$ 。强度随各因素各水平变化的趋势见图7散点图,其中 $\bar{k}_i$ 表示正交试验获得的各水平 i 抗压强度平均值, $\bar{k}_j$ 表示正交试验获得的各水平 j 抗弯强度平均值。

采用单一变量法,保持砂浆的胶砂比、溶胶比分别为0.70和0.65,水相含量为4.5,调整水玻璃的模数 n 分别为0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6,获得砂浆的7 d强度如图7中折线所示。

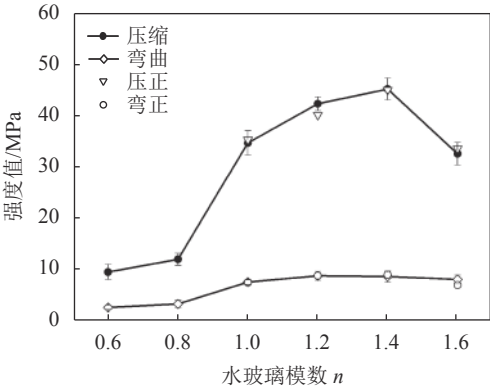


图 7 砂浆强度与水玻璃模数 n 的关系

Fig. 7 Relationship between mortar strength and sodium silicate modulus n

从图7可以发现,砂浆试件的抗压强度和弯曲强度随着水玻璃模数 n 的增加先增高后下降,这与正交试验所得结论基本吻合。当水玻璃模数 n 为1.4时,由单因素法和正交试验获得的抗压强度最大值分别为46.0和45.6 MPa。相关的研究认为地聚物材料中生成的N-A-S-H凝胶的数量越多,试件的抗压强度也越大^[11]。图7的数据曲线说明,随着水玻璃模数 n 的逐渐提高,聚合程度加深,反应产物N-A-S-H凝胶的数量逐渐增多,试样密实程度逐渐提高,抗压强度增大。当模数超过1.4后,随着模数的继续增加,水玻璃溶液的黏度增大,试样制备过程中引入的气泡难以排出,

从而导致试样密实程度降低。因此，试件的抗压强度降低。

选择模数分别为0.8和1.4的砂浆试件，用尖锐的锤子将试件敲碎，制成半径约6 mm的圆柱体微样品进行压汞测试，结果见图8和表5。一般在材料学领域可将孔结构划分为4个层次：凝胶孔隙（超微小孔，≤10 nm）、过渡孔隙（微毛细孔，10~100 nm）、毛细管孔隙（大毛细孔，100~1 000 nm）、宏观孔隙（≥1 000 nm）。

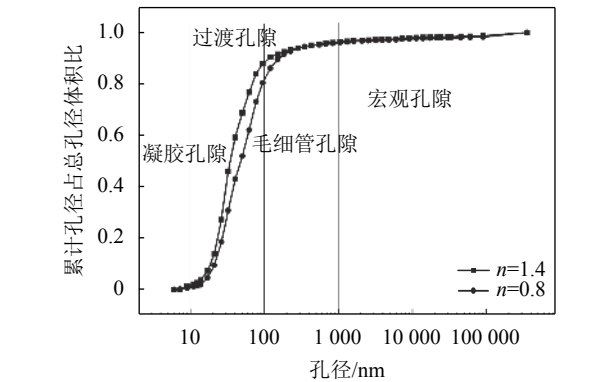


图 8 不同水玻璃模数 n 下砂浆孔径分布

Fig. 8 Pore size distribution of mortar under different sodium silicate modulus n

表 5 水玻璃模数 n 对孔结构参数影响

Tab. 5 Effect of sodium silicate modulus n on pore structure parameters

模数 n	孔径/nm			
	≤10	10~100	100~1 000	≥1 000
0.8	1.28	79.20	15.70	3.84
1.4	2.20	85.70	8.46	3.61

由图8及表5可知，相较于用模数 n 为0.8的水玻璃制成的砂浆材料，模数 n 为1.4时试件的凝胶孔隙、过渡孔隙、毛细管孔隙和宏观孔隙分别增加了71.2%、8.2%、-46.1%和-6.0%（负数表示减小）。这意味着随着水玻璃模数 n 的增加，孔结构的半径在逐渐缩小，胶凝孔径明显增大，混凝土胶凝材料变得密实，因而强度显著提高。考虑到水玻璃模数分别为0.8、1.4时，地聚物砂浆的孔隙率分别为21.009 0%和19.766 7%，而胶凝孔隙的体积和过渡孔隙的百分比增加，可以看出，当孔隙率相等或接近时，孔径半径越小，胶凝孔隙占比越大，地聚物抗压强度越高。

由于压汞试验（MIP）中，汞液压力与微观孔隙半径大小成反比，在逐级加压过程中，水银最先进入宏观孔隙，最后进入胶凝孔隙。相反，在卸压时，水银最先从较小的孔隙退出。因此，进汞曲线与孔喉相关，退汞曲线与空腔形状关联^[17]。通过分析进、退汞曲线可以了解孔隙结构的表面粗糙度和不均匀性。

图9为不同水玻璃模数 n 下生成砂浆材料的汞侵入过程曲线。从图9中可以看出，两种曲线走势完全一致，说明水玻璃模数基本不影响地聚物砂浆孔隙均匀性。对于进汞曲线，毛细孔隙段的曲线斜率较小，表明喉道分布集中；过渡孔隙段曲率越来越大，意味着细喉道所占频率越高；胶凝孔隙段与汞压（孔径）轴向平行，说明孔体积逐渐减小直至最大汞压量。对于退汞曲线，过渡孔隙段曲线曲率小、弧线长，反映了细孔占比大；毛细孔隙段曲线斜率变大体现了孔隙的分选性变强；在宏观孔隙段停止退汞的终点位置反映了孔隙的均匀程度，曲线位置越低，代表孔隙结构越均匀。

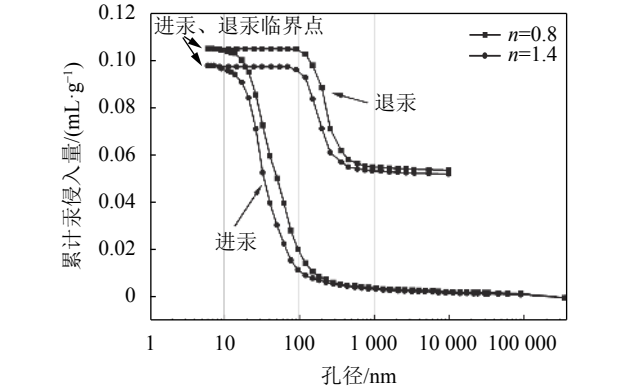


图 9 孔径与进汞量的关系

Fig. 9 Relationship between pore size and mercury intake

2.4 水相含量 z 对地聚物砂浆的影响

保持砂浆的胶砂比、溶胶比分别为0.70和0.65，水玻璃的模数 n 为1.3，调整水相含量分别为2.0、3.0、4.0、5.0、6.0，获得砂浆的7 d强度如图10中折线所示。

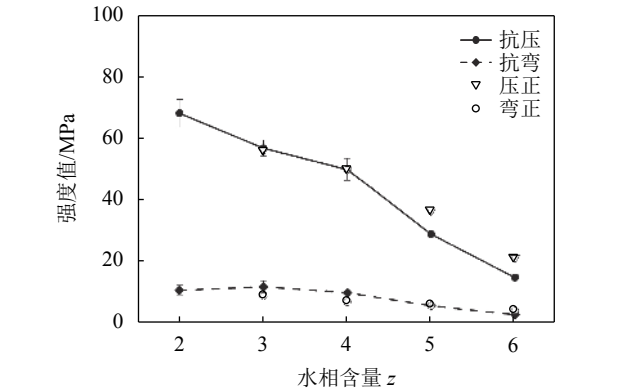


图 10 不同水相含量 z 下砂浆的孔径分布

Fig. 10 Pore size distribution of mortar with different water content z

由图10可见，地聚物砂浆的抗压强度和抗弯强度均随着水相含量 z 的增大几乎呈线性减小。当水相含量 z 从2.0增加到6.0时，砂浆的抗压强度从68.2 MPa持续降低到仅为15.1 MPa。这是由于水相含量的增加使地聚物变得稀薄，胶凝材料由于黏性降低而无法

与砂石胶结在一起, 并且地聚物砂浆固化过程中, 水仅充当介质作用, 散失的水分会在砂浆中留下气孔, 从而降低了砂浆的密实度。同时, 水相的增加导致激发剂溶液的浓度降低, 胶凝材料的生成也会受到影响。以上因素共同导致了混凝土强度的削弱。

如图11和表6可以看出, 不同水相含量 z 对孔隙分布影响显著。相对于用水相含量 z 为4.0的水玻璃制成的砂浆材料, 水相含量 z 为2.5时试件的胶凝孔隙、过渡孔隙、毛细管孔隙和宏观孔隙分别变化了150%、-70.0%、452.0%、506.6%(负数表示减小)。另一方面, 通过计算可知, 当水相含量分别为2.5、4.0时, 地聚物砂浆的孔隙率分别为14.3864%、19.7667%。平均孔径分别是60.3和32.6 nm。

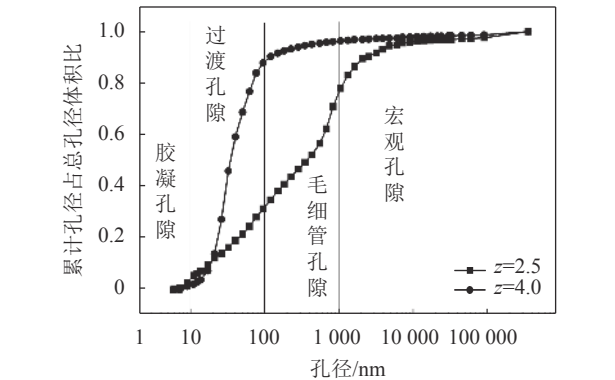


图 11 不同水相含量 z 下砂浆的孔径分布

Fig. 11 Pore size distribution of mortar with different water content z

表 6 水相含量 z 对孔结构参数影响

Tab. 6 Effect of water content z on pore structure parameters

水相含量 z	孔径/nm			
	≤ 10	10~100	100~1000	≥ 1000
2.50	5.5	25.8	46.70	21.90
4.00	2.2	85.7	8.46	3.61

结合图10的强度试验结果可以看出, 水相含量 z 的减少使得胶凝材料孔隙的占比急剧增多, 并且孔隙率显著减小, 抗压强度也大幅度提高。因此, 对地聚物砂浆而言, 降低水的用量可以显著降低试件的孔隙率, 生成了更多密实胶凝材料, 进而大大提高地聚物混凝土的强度。

2.5 胶砂比 J 对地聚物砂浆的影响

将砂浆溶胶比定为0.65, 水相含量为4.5, 制作胶砂比分别为0.4、0.5、0.6、0.7、0.8和1.0的6组试件, 7 d强度的测量值如图12中折线图所示。

显然, 胶砂比对砂浆抗压强度的影响相对较小。当胶砂比 J 在0.4~0.8范围变化时, 砂浆的抗压强度在45.0 MPa左右波动, 而砂浆的弯曲强度从9.8 MPa

减小到7.2 MPa, 降幅为26.5%。这种抗压能力变化小, 而抗弯能力降幅大的原因可能是由于胶凝材料比例的增加, 导致胶凝材料对标准砂包裹厚度的增大, 从而使得砂浆的性质慢慢接近净浆的脆裂性质。因此, 在配合比设计时, 可以考虑采用小胶砂比。

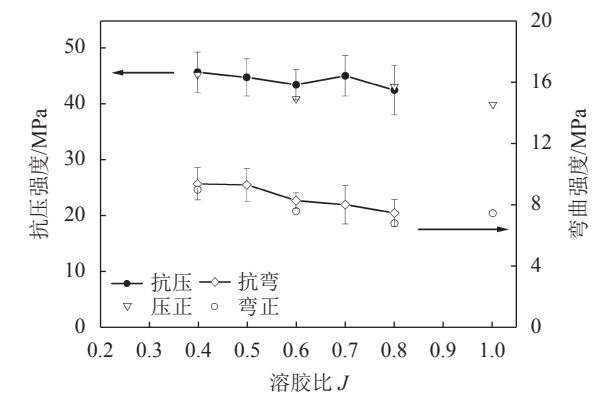


图 12 砂浆强度与胶砂比 J 的关系

Fig. 12 Relationship between mortar strength and the cement/sand ratio J

2.6 溶胶比 R 对地聚物砂浆的影响

试验保持胶砂比为0.7, 水相含量 z 为常量4.5, 通过控制激发剂溶液制作溶胶比分别为0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75的6组试件, 7 d强度的测量值如图13中折线所示。

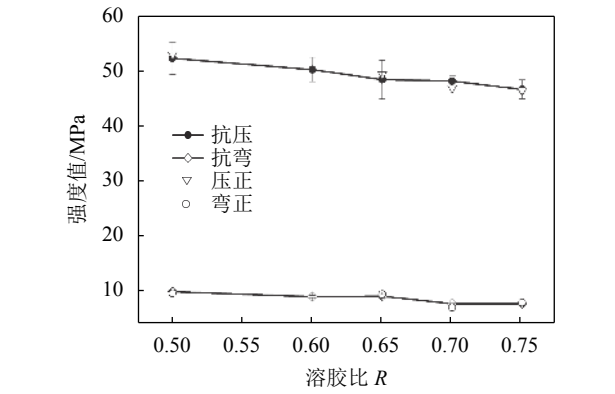


图 13 砂浆强度与溶胶比 R 的关系

Fig. 13 Relationship between mortar strength and the solution/cement ratio R

由图13可知, 随着溶胶比 R 的增加, 地聚物的抗压强度和抗弯强度略有下降, 但是提升溶胶比 R 可以改善地聚物的工作性。

2.7 砂浆强度主要影响因素的回归分析

根据最小二乘拟合获得砂浆强度-水玻璃模数、砂浆强度-水相含量的关系如图14、15所示。作者尝试用 β ($\beta \leq 3$) 阶多项式来拟合试验所得数据点, 通过残差分析可知, 对于水玻璃模数和砂浆抗压强度的关系接近于二次曲线 $y = -134.39x^2 + 348.37x - 180.51$, 其相关系数的平方 $R^2 = 0.981$; 水相含量与砂浆抗压强

度近似呈线性关系 $y=-11.77x+94.09$,其相关系数的平方 $R^2=0.954$ 。

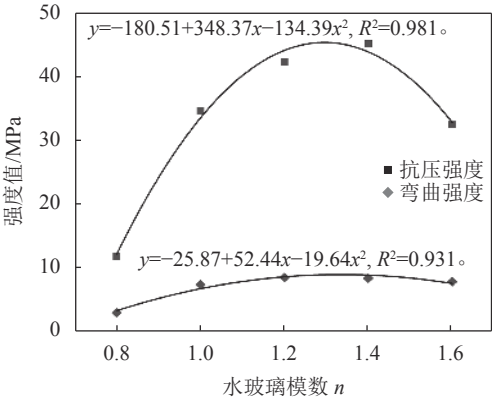


图 14 水玻璃模数 n 和砂浆强度的函数关系

Fig. 14 Functional relationship between modulus n of sodium silicate and mortar strength

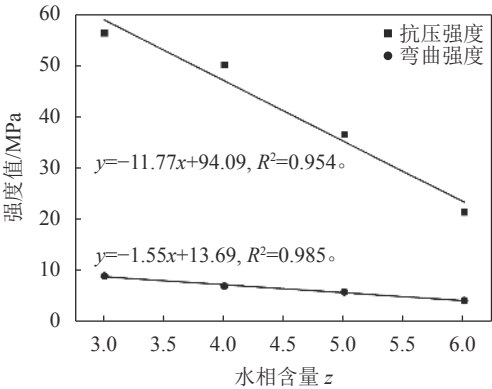


图 15 水相含量 z 和砂浆强度的函数关系

Fig. 15 Functional relationship between water content z and mortar strength

3 结 论

通过正交设计和单一因素变量法,对粉煤灰基地聚物砂浆进行了室内力学试验,并采用压汞试验(MIP)测定了材料的孔隙结构,可以获得如下结论:

- 1) 砂浆的抗压强度随着养护温度增加几乎呈线性增长,最佳养护温度在70~80℃;高温持续养护4 d可以获得砂浆抗压强度和抗弯强度的最大值。但是,养护24 h可分别获得最大抗压强度和抗弯强度的91.9%和71.3%。因此,通过延长高温养护时长来进一步增加地聚物砂浆强度的效果不明显。
- 2) 对影响地聚物砂浆强度因素的极差分析可知,各因素对砂浆的抗压强度和抗弯强度的敏感性从大到小分别为:水相含量 z 、水玻璃模数 n 、胶砂比 J 、溶胶比 R 。因此,在配制地聚物混凝土时应尽量采用最佳的水相含量和水玻璃模数,通过调节溶胶比和胶砂比来改善混凝土的工作性。
- 3) 正交试验设计获得的地聚物砂浆强度随各因

素变化规律的结论与单一因素法基本匹配。砂浆的抗压强度和弯曲强度随着水玻璃模数 n 的增加先增高后下降。通过最小二乘拟合可得抗压强度 y 与水玻璃模数 x 的关系: $y=-134.39x^2+348.37x-180.51$, $R^2=0.981$;抗压强度 y 随着水相含量 x 的增大而急剧降低,两者几乎满足线性关系 $y=-11.77x+94.09$, $R^2=0.954$ 。

4) 胶砂比和溶胶比对地聚物砂浆的强度影响相对较小。其中,胶砂比的增加使得砂浆的抗压强度45.0 MPa左右波动,然而抗弯强度略有下降。随着溶胶比的增加,试件的抗压强度和抗弯强度略有下降。但是,提升溶胶比可以显著改善地聚物砂浆的工作性。

5) 根据压汞试验结果可知,水玻璃模数 n 对砂浆的微观孔隙结构影响较小,同时水玻璃模数基本不影响孔隙的均匀性。在孔隙率相近时,胶凝孔隙(≤ 10 nm)和过渡孔隙(10~100 nm)的体积比对砂浆的强度其主要作用,其占比越大,砂浆强度越高。水相含量 z 对砂浆的孔结构影响显著,水含量 z 的降低使得胶凝孔隙的占比急剧增多,并且孔隙率显著减小,抗压强度也大幅度提高。孔隙率对强度的影响要明显大于孔径分布。

参考文献:

[1] Zhang Dawang,Wang Dongmin.Research status of geopolymer concrete[J].Materials Reports,2018,32(9):1519–1527.[张大旺,王栋民.地质聚合物混凝土研究现状[J].材料导报,2018,32(9):1519–1527.]

[2] Reddy M S,Dinakar P,Rao B.A review of the influence of source material’s oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete[J].Microporous and Mesoporous Materials,2016,234(1):12–23.

[3] Li Zhenming,Zhang Shizhe,Zuo Yibing,et al.Chemical deformation of metakaolin based geopolymer[J].Cement and Concrete Research,2019,120(9):108–118.

[4] Sun Zenging,Lin Xiaochen,Vollpracht A.Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers[J].Construction and Building Materials,2018,189(11):797–803.

[5] Panda Biranchi,Paul S C,Hui L J,et al.Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment[J].Journal of Cleaner Production,2017,167(20):281–288.

[6] Yu Jiaren,Chen Yonghui,Chen Geng,et al.Experimental study on geopolymer stabilized clay mechanical behaviour and its stabilization mechanism[J].Journal of Building Materials,2014,42(12):1–8.[俞家人,陈永辉,陈庚,等.地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J].建筑材料学报,2014,42(12):1–8.]

[7] Wang Qing,Ding Jinan,Ding Zhaoyang,et al.Research and

- preparation on polymer base foam concrete of inorganic mineral[J].[Concrete](#),2018(11):118–121.[王晴,丁纪楠,丁兆洋,等.地聚物基泡沫混凝土制备与性能研究[J].[混凝土](#),2018(11):118–121.]
- [8] Shi Keyou,Shu Xiaoyan,Zhao Yanhong,et al.Fabrication and properties of geopolymer containing simulated 90Sr and 137Cs for nuclear waste form[J].[Journal of Wuhan University of Technology](#),2017,39(10):37–43.[史克油,舒小艳,赵彦红,等.模拟含90Sr,137Cs放射性废物的地聚物固化体制备及性能[J].[武汉理工大学学报](#),2017,39(10):37–43.]
- [9] Gao Yuan,Xu Jinyu,Zhang Guoxi,et al.Response surface on early performance of alkali-activated slag binder[J].[Journal of Building Materials](#),2016,19(2):209–213.[高原,许金余,张国喜,等.矿渣碱激发胶凝材料早期性能响应曲面研究[J].[建筑材料学报](#),2016,19(2):209–213.]
- [10] Atiş C D,Görür E B,Karahan O,et al.Very high strength (120MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount,heat curing temperature and heat curing duration[J].[Construction and Building Materials](#),2015,96(15):673–678.
- [11] Görhan G,Kürklü G.The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures[J].[Composites \(Part B:Engineering\)](#),2014,58:371–377.
- [12] Somna K,Jaturapitakkul C,Kajitvichyanukul P,et al.NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature[J].[Fuel](#),2011,90(6):2118–2124.
- [13] Li Xingye.Study on the performance of alkali-activated fly ash mortar[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.[李星烨.碱激发粉煤灰砂浆性能研究[D].成都:西南交通大学,2018.]
- [14] Park S M,Jang J G,Lee N K,et al.Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures[J].[Cement and Concrete Research](#),2016,89:72–79.
- [15] Musaad Z N K,Uddin A S F,Hao Yifei,et al.Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low Calcium fly ash[J].[Construction and Building Materials](#),2016,125(30):809–820.
- [16] Li Haiyan,Yue Dali,Zhang Xiujuan.Characteristics of pore structure and reservoir evaluation of low permeability reservoir in Sulige gas filed[J].[Earth Science Frontiers](#),2012,19(2):133–140.[李海燕,岳大力,张秀娟.苏里格气田低渗透储层微观孔隙结构特征及其分类评价方法[J].[地学前缘](#),2012,19(2):133–140.]
- [17] Lu Hongjiang,Xing Zhengyan,Wang Yongshi.Comprehensive application of mercury and mercury-returning data in reservoir evaluation[J].[Petroleum Geology and Recovery Efficiency](#),1997(2):53–58.[鲁洪江,邢正岩,王永诗.压汞和退汞资料在储层评价中的综合应用探讨[J].[油气采收率技术](#),1997(2):53–58.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Yang Shiyu,Zhao Renda,Jin Hesong,et al.Research on influence parameters of early strength of fly ash-based geopolymer mortar[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2020,52(6):162–169.[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.]