

粉煤灰地聚物的抗压强度及微观结构

何蓓¹, 张吾渝¹, 童国庆¹, 唐鑫¹, 刘成奎^{2,3}

(1. 青海大学 土木工程学院; 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 青海省建筑建材科学研究院有限责任公司, 青海 西宁 810008; 3. 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 通过无侧限抗压强度试验,探究水玻璃模数和水胶料配合比(水与粉煤灰质量比,简称水胶比)对粉煤灰地质聚合物宏观力学强度的影响,并结合扫描电镜、X射线衍射等从微观角度解释内在机理。结果表明:水玻璃模数和水胶比均对粉煤灰地质聚合物力学特性产生重要影响。水玻璃模数为0.8、1.1、1.3和1.5时,粉煤灰地聚物试样的无侧限抗压强度先增大后减小,水玻璃模数为1.1时,试样的力学强度呈现出最优水平;在水胶比为0.28、0.30、0.32时,试样力学强度呈现递减的趋势。粉煤灰玻璃体在碱性环境中溶解,物质之间发生解聚-缩聚反应,N-A-S-H凝胶物质作为反应产物,起到填充孔隙的作用,在水玻璃模数为1.1、水胶比为0.28时,体系中的水化反应充分进行,较多的凝胶物质产生,结构的整体性提高效果最显著,表现在宏观上为试样力学强度最高。

关键词: 粉煤灰地聚物; 水玻璃模数; 水胶比

中图分类号: TU526

文献标志码: A

Compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer

HE Bei¹, ZHANG Wuyu¹, TONG Guoqing¹, TANG Xin¹, LIU Chengkui^{2,3}

(1. School of Civil Engineering; Qinghai Provincial Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety,

Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Building and Materials Research Co., Ltd., Xining 810008, China;

3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Green Building and Eco-community, Xining 810008, China)

Abstract: The effects of water glass modulus and water-binder ratio (the ratio of water to the mass of fly ash) on the macroscopic mechanical strength of fly ash geopolymer were investigated by unconfined compressive strength test. Scanning electron microscope and X-ray diffraction were used to explain the internal mechanism from a microscopic perspective. The results show that both the modulus of water glass and water-binder ratio have an important influence on the mechanical properties of fly ash geopolymer. When the water glass modulus is 0.8, 1.1, 1.3 and 1.5, respectively, the unconfined compressive strength of the fly ash geopolymer sample is increased first and then decrease. When the water glass modulus is 1.1, the mechanical strength is showed an optimal level. When the water-binder ratio is 0.28, 0.30, and 0.32, the mechanical strength of the sample is showed a decreasing trend. The fly ash glass body is dissolved in an alkaline environment, and the depolymerization-polycondensation reaction is occurred between the substances. N-A-S-H gel substance is acted as the reaction product and played the role of filling the pores. When the number is 1.1 and the water-binder ratio is 0.28, the hydration reaction in the system is fully carried out, more gel substances are produced, and the structural integrity improvement effect is the most significant, and the macroscopic mechanical strength is the highest.

Keywords: fly ash geopolymer; water glass modulus; water-binder ratio

地聚物是具有活性的天然矿物、固体废弃物或人工合成的非晶态硅铝化合物,在碱性环境下发生溶解-聚合反应,由生成的硅氧四面体、铝氧四面体组成的三维网状结构的无机硅铝质聚合胶凝材料^[1]。

收稿日期: 2022-08-18, 修回日期: 2022-09-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 52168054; 青海省高原绿色建筑与生态社区重点实验室开放基金项目, 编号: KLKF-2021-007。

第一作者简介: 何蓓(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为地基处理和碱激发胶凝材料。E-mail: 1294480511@qq.com。

通信作者简介: 张吾渝(1969—), 女, 教授, 硕士, 博士生导师, 研究方向为岩土工程地基。E-mail: qdzwy@163.com。

在温室效应的大环境下,地聚物胶凝材料的生产与传统硅酸盐水泥材料相比,能源消耗和废水、废渣、废气等污染物排放量极低,具有强度高、韧性强、耐火、耐腐蚀和固封重金属等特点,作为一种新型绿色环保的环境友好型材料,具有极大的发展应用前景^[2]。

随着我国工业生产的高速发展,粉煤灰、矿渣和钢渣等工业废弃物数量日益增加,废渣中易溶于水的有害物质对土壤和水体会造成一定的污染。近几十年来,地聚物胶凝材料的制备原料逐渐从天然高岭土向工业废弃物转变,制备技术、宏微观力学性能和强度增长机制等受到了国内外研究者的广泛关注与研究。邓永锋等^[3]研究了地聚合物对水泥固化土强度的影响规律,结果表明,将地聚合物掺入水泥固化土中能产生更多的胶结物,使水泥土结构更加致密;相关学者分别对矿渣、粉煤灰等为原料的地聚物进行了微观形貌研究,发现地聚物中生成的 C-S-H 凝胶和 N-A-S-H 凝胶不断聚合和填隙,结构随养护龄期的增长变得致密,地质聚合物的良好力学性能凸显^[4-8]。刘泽等^[9]通过对发泡材料的孔隙结构进行分析,认为试样的孔隙结构分布与强度测试一致,试样强度的形成得益于孔隙结构较均匀,封闭孔多;刘乐平等^[10]研究了粉煤灰基聚合物与水泥复合材料的力学性能,认为随着粉煤灰掺量的增加,反应产物中产生的凝胶比例增加,养护 90 d 后试样的折压强度明显增大。综上所述,研究者在废渣掺量、地聚物的宏微观力学性能和强度增长机制等方面进行了一定研究,但对影响地聚物强度的关键因素研究有待进一步扩展。

粉煤灰是由具有活性的玻璃相和惰性的晶体相组成,玻璃相的含量、结构和成分是影响活性大小的主要因素,玻璃相在水中基本不发生反应,要使玻璃相具有胶凝性能,则需要在碱性环境中加以激发。水玻璃是目前常用的碱激发剂材料,它具有材料成本低、黏结力强、强度较高、耐酸性和耐热性好等优点。Gao 等^[11]和 Lyu 等^[12]认为激发剂模数是影响地聚物力学性能的关键因素。袁晓宁等^[13]和陈忠清等^[14]认为反应体系中固体反应物和前驱体胶凝物随着固液比的增大而增多,孔隙率降低使得强度增大。本试验中在已有的研究基础上,开展了无侧限抗压强度 (unconfined compressive strength, UCS) 试验,从宏观力学角度对不同龄期的粉煤灰地聚物试样强度进行探究,分析水玻璃模数和水胶料配合比 (水与粉煤灰的质量比,简称水胶比) 对其产生的影响;为研究试样微观结构及物相组成变化,本文中利用扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 和 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD),从微观角度揭示 2 种变量产生影响的内在机制,明确该变量对粉煤灰地聚物强度的影响机制,以期在更大程度上发挥工业废渣的再利用价值。

1 实验

1.1 材料

粉煤灰 (河南省巩义市某电厂),主要成分为氧化铝 (Al_2O_3) 和二氧化硅 (SiO_2),根据国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)^[15] 中的规定确定为一级低钙粉煤灰,详细成分见表 1。经 D-max2500PC 型 XRD 衍射仪 (日本理学公司) 分析物相组成,分析结果如图 1(b) 所示,粉煤灰中含有的主要成分为石英和莫来石等性质稳定的结晶相铝硅酸盐。在 $15^\circ \sim 40^\circ$ 区域内出现较明显的衍射峰,说明粉煤灰中存在具有较强的化学活性且有利于发生水化反应的无定型相玻璃体。

表 1 粉煤灰的化学成分质量分数
Tab. 1 Chemical composition of fly ash %

组份	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O
质量分数	54.94	34.86	2.52	2.63	1.76

水玻璃 (Na_2SiO_3 水溶液,南昌弘顺实业有限公司),固含物质量分数约为 33.73%,详细成分见表 2。调整水玻璃模数的固体碱性激发剂为 NaOH (分析纯,天津百世化工有限公司)。UCS 试验所用设备为 YAW-4306 型压力试验机 (美特斯工业系统 (中国) 有限公司)。

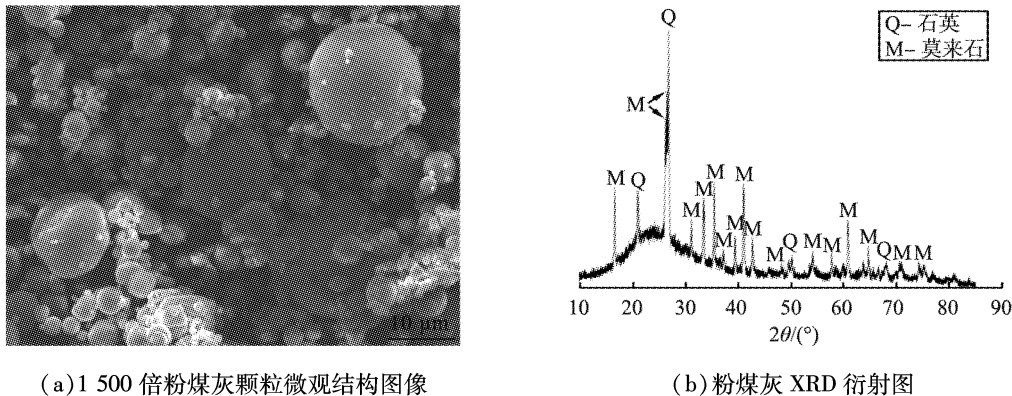


图1 粉煤灰原料的表征

Fig. 1 Characterization of fly ash feedstock

表2 水玻璃相关参数

Tab. 2 Water glass related parameters

波密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Na_2O 质量分数/%	SiO_2 质量分数/%	H_2O 质量分数/%	模数 M
38.00	9.03	24.7	66.28	2.82

1.2 方案

为研究水玻璃模数和水胶比对不同养护龄期下粉煤灰地聚物抗压强度及微观结构的影响,基于已有研究^[16-17],通过碱激发制备地聚物时,水玻璃模数范围取 1.0 ~ 1.5、水胶比取 0.29 附近可获得最佳力学强度,因此分别设置了 4 种不同水玻璃模数(0.8、1.1、1.3、1.5)和 3 种不同水胶比(0.28、0.30、0.32),以粉煤灰和水玻璃为原料制备粉煤灰地聚物试样,每组试验条件制备 3 个物理力学性质相同的平行试样,试验结果取平均值。测定养护龄期为 7、14、28 d 时的试样 UCS 值。

1) UCS 试验:由于地聚物在国内尚未出台相应规范,参考国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)^[18]和 Shi 等^[19]的试验方法,压力试验机加载速率取 10 mm/s。

2) 微观试验:取力学试验后体积约 1 cm^3 的烘干块体试样进行电镜观察,同时取部分经研磨并过 0.075 mm 筛的试样粉末进行 XRD 试验,用微观手段对不同条件下粉煤灰地聚物试样的宏观力学规律的内在机理进行解释。

1.3 水玻璃模数调整

通过 NaOH 固体对 Na_2SiO_3 溶液模数进行调整制成的改性水玻璃是广泛应用在地聚物合成中的碱性激发剂^[20]。钠水玻璃模数 M 是指水玻璃中 SiO_2 与 Na_2O 物质的量之比,对水玻璃溶液的黏度、黏结强度和固化速度有显著影响^[21]。 Na_2SiO_3 溶液中加入 NaOH 固体所进行的化学反应为方程式(1)所示^[22],根据拟定的方案,水玻璃模数调整所需添加的固体 NaOH 的质量分数如表 3 所示。

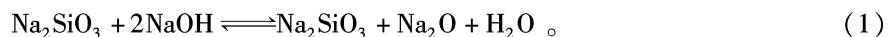


表3 水玻璃模数调节时加入 NaOH 的质量分数

Tab. 3 Amount of NaOH added when modulus of water glass is adjusted

模数 M	0.8	1.1	1.3	1.5
NaOH 质量分数/%	29.4	18.2	13.6	10.3

1.4 试样制备

试样以粉煤灰和水玻璃为原料,浇筑成长×宽×高为 100 mm×100 mm×100 mm 的净浆试块。具体步骤如下。

- 1) 称量所需的蒸馏水和粉煤灰。
- 2) 按照 1.3 所述方法配置相应模数的水玻璃溶液,搅拌至完全溶解并冷却至室温。
- 3) 将水玻璃溶液和蒸馏水倒入粉煤灰中,立即用水泥净浆搅拌机进行拌合,直至 3 种材料完全混合均匀。
- 4) 拌合好的浆液分 3 次倒入三联塑料模具中进行浇筑,并放在振动台上振动至密实。
- 5) 制备好的试样放入室温条件下进行养护,为防止试样水分散失,用保鲜膜对试样进行覆盖,养护 24 h 后脱模。
- 6) 待试样分别养护到 7、14、28 d 时进行下一步试验。

2 结果与讨论

2.1 水玻璃模数和水胶比对试样强度的影响

根据 UCS 试验结果,绘制如图 2 所示柱状图。从图中可以看出,在其他 2 种变量相同的情况下,当水玻璃模数从 0.8 增加到 1.1 时,试样的无侧限抗压强度均呈现增大的趋势;当模数从 1.1 继续增大到 1.5 时,试样的无侧限抗压强度开始减小。表明水玻璃作为碱性激发剂制备粉煤灰地聚物时,需要选择合适的模数才能达到最佳效果,否则不利于粉煤灰地聚物强度的形成,水玻璃模数的范围为 0.8~1.3 时,存在最佳的激发剂模数使粉煤灰地聚物的抗压强度达到最优水平。黄华等^[16]通过研究发现,当水玻璃模数范围为 1.0~2.0 时,粉煤灰地聚物的强度也呈现先增大后逐步减小的规律,在 1.0~1.5 范围内时,存在最优水玻璃模数使试样强度达到最大值,与本试验结果接近一致。水玻璃是一种由碱金属氧化物和二氧化硅组成的可溶性碱金属硅酸盐材料,它在水化反应过程中不仅起黏结作用,还可以提供反应初始阶段所需的可溶性硅酸盐。

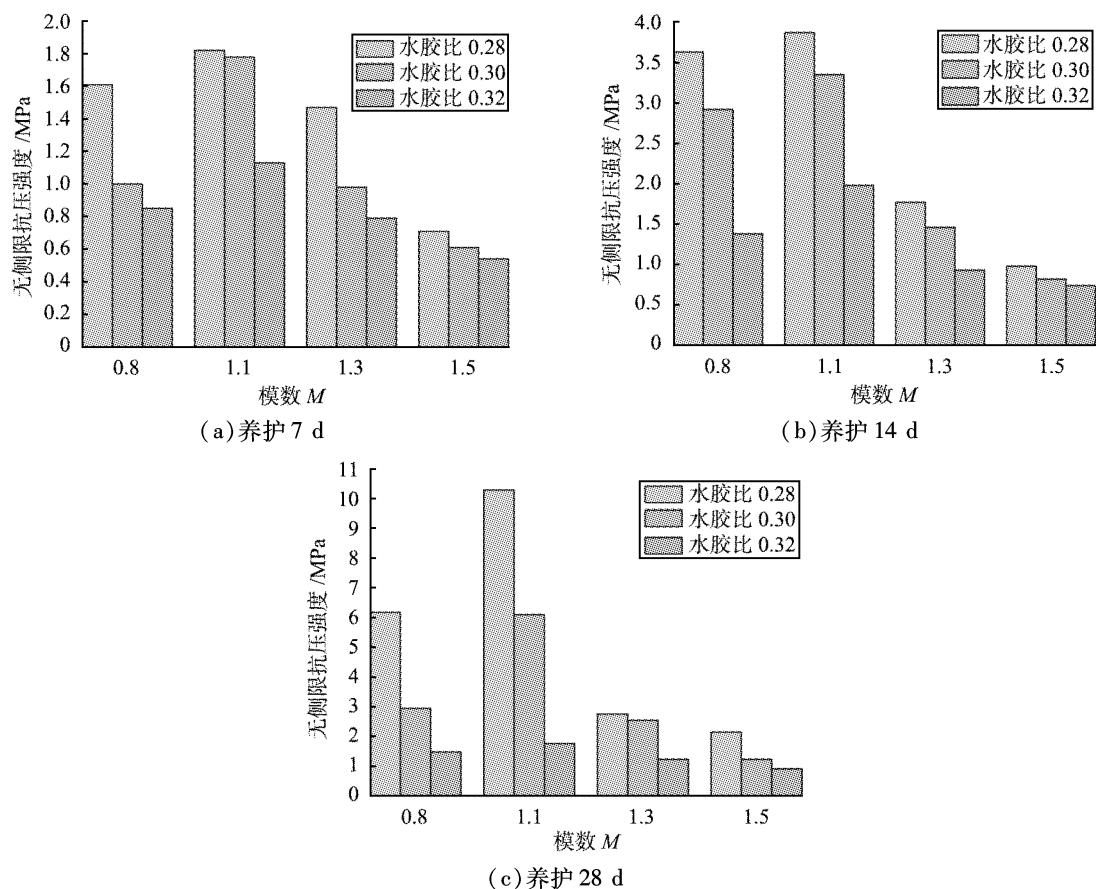


图 2 不同水玻璃模数、水胶比与试样强度的关系

Fig. 2 Relationship between different water glass modulus and water-binder ratio and sample strength

分析原因认为,在所设试验参数范围内,当激发剂模数为 0.8 时,反应体系中 OH^- 浓度较高,在高浓度 OH^- 作用下,粉煤灰玻璃体中的 $\text{Al}-\text{O}$ 和 $\text{Si}-\text{O}$ 共价键极易发生断裂,形成硅酸盐和偏铝酸盐,然后 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 等四面体离子团解聚并脱离前体物质,与反应体系中的碱金属阳离子结合生成凝胶相,随着反应的不断进行,形成的凝胶相在反应体系中凝固硬化,最终形成地聚物。粉煤灰玻璃体颗粒被水化过程中生成的 N-A-S-H 凝胶物质附着,影响了 OH^- 对粉煤灰颗粒内部的玻璃体进一步溶解,无法生成更多的胶凝材料以充填颗粒之间的孔隙,试样整体性提高效果不显著,从而导致地聚物试样的强度相对较低^[23]。当激发剂模数为 1.5 时,体系中 OH^- 浓度较低,粉煤灰玻璃体的活性不能被有效激发,使需要发生地质聚合反应的前驱体较少,大部分未溶解的粉煤灰颗粒以填料的形式存在于反应体系中,以致生成的 N-A-S-H 水化产物较少,从而导致地聚物试样的无侧限抗压强度较低^[24]。本试验最佳激发剂模数为 1.1,此时反应体系中的 OH^- 浓度适宜,为粉煤灰玻璃体内部 $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{Al}-\text{O}$ 键的断裂创造了有利的碱性环境,体系中各离子浓度处于相对平衡的状态,粉煤灰颗粒在溶液中的解聚-缩聚反应能朝着有利的方向持续进行,在此过程中伴随有大量的胶凝物质生成,对颗粒之间的间隙起到填充作用,从宏观上表现为地聚物强度的提高。

在相同水玻璃模数和养护龄期下,水胶比为 0.28 时试样 UCS 值最大,随着水胶比的增大试样的 UCS 逐渐减小,水胶比为 0.32 时,地聚物试样 UCS 值均较低,说明试样的 UCS 与水胶比之间呈负相关关系。粉煤灰原料在碱性溶液中经解聚-缩聚反应后,凝结硬化成三维网络状胶凝体,水在碱激发粉煤灰反应中主要起介质作用,同时也是反应的产物。由于缩聚反应是脱水过程,过量水存在会抑制硅氧四面体和铝氧四面体的聚合速率且养护过程中反应体系中水分蒸发所产生的孔隙越多,随着水胶比增大,试样的抗压强度逐渐降低。混凝土强度主要取决于水泥水化反应过程中生成的胶凝产物,碱激发粉煤灰地聚物的特性与之相似。根据相关文献的研究表明^[17,25],当水胶比过大时,大量的自由水在基体内部迁移,增大孔隙率,降低力学强度;当水胶比过小时,一方面,水分过少,体系中的 OH^- 无法与活性硅铝酸盐充分反应,另一方面,当体系中水量太少,在制样过程中会出现拌合料黏度很高的情况,难以通过振捣将空气排出,影响密实效果,因此,在地聚物的制备中,我们需要选择合适的水胶比。高云等^[17]通过试验研究得出,制备高强度混凝土时,水胶比范围在 0.29 附近时效果最佳,与本试验结果相近。

2.2 扫描电镜表征的微观结构分析

不同水玻璃模数下水胶比为 0.28 的粉煤灰地聚物试样养护 28 d 时的 SEM 图像如图 3 所示,放大倍数为 1 500 倍。

从图 3(b)中可知,水玻璃模数为 1.1 时,粉煤灰玻璃体中的 SiO_2 和 Al_2O_3 在较高浓度的 OH^- 作用下逐渐被溶解,使 $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{Al}-\text{O}$ 键断裂,硅酸盐和偏铝酸盐不断被溶出且不断向粉煤灰颗粒间隙扩散,重构形成硅铝酸盐低聚体,由于其结构不稳定,因此常温条件下易发生聚合反应,产生新的三维网状结构的 N-A-S-H 凝胶物质。随着反应的进行,该物质大量源源不断地生成,由于其相互交联且聚合度较高的特性,逐步覆盖在粉煤灰球体颗粒表面将其包裹,试样内部结构的整体性在孔隙填充的过程中变强,因此体现在宏观力学上为抗压强度达到最大。试样在激发剂模数为 0.8 时只有部分 $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{Al}-\text{O}$ 键断裂,可以从图中看出,相较于模数为 1.1 的试样,此种情况下试样的球形状态更为明显,玻璃体颗粒表面布满水化过程中产生的凝胶物质将其团团包裹,以致水化过程受阻,凝胶物质的生成无法顺利继续进行,从微观上表现为其结构的密实程度相对较低,因而宏观力学仅次于模数为 1.1 的地聚物试样;如图 3(d)所示,当水玻璃模数为 1.5 时,众多粉煤灰球体颗粒仍存在于反应体系中,且轮廓清晰,颗粒之间的孔隙较大,说明这些颗粒并未参与水化过程或水化过程不明显,粉煤灰颗粒未被有效溶解,使得粉煤灰颗粒表面生成的凝胶物质最少,大孔隙没有得到充分填充,在宏观上表现为试样的无侧限抗压强度最低。

图 4 所示为粉煤灰地聚物试样在不同水胶比条件下养护 28 d 且水玻璃模数为 1.1 时的 SEM 图像,放大倍数为 1 500 倍。由图可知,当激发剂模数和养护龄期相同,但水胶比不同时,试样的微观结构致密程度大致相同,表明不同水胶比下产生的凝胶物质数量基本一致;宏观力学上表现在随水胶比逐渐增大,粉煤灰地聚物试样的强度呈降低的趋势,分析认为在反应体系中随水含量的不断增多,水的润滑作

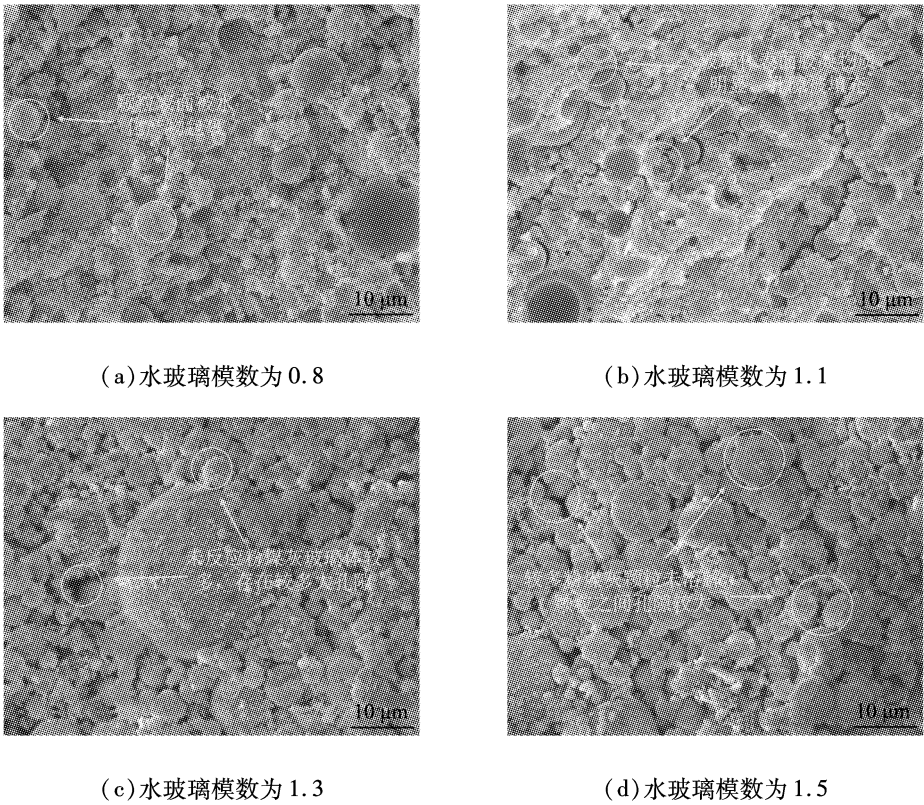


图3 养护 28 d 条件下不同模数试样微观结构图像
Fig.3 Microstructure of samples with different modulus curing for 28 d

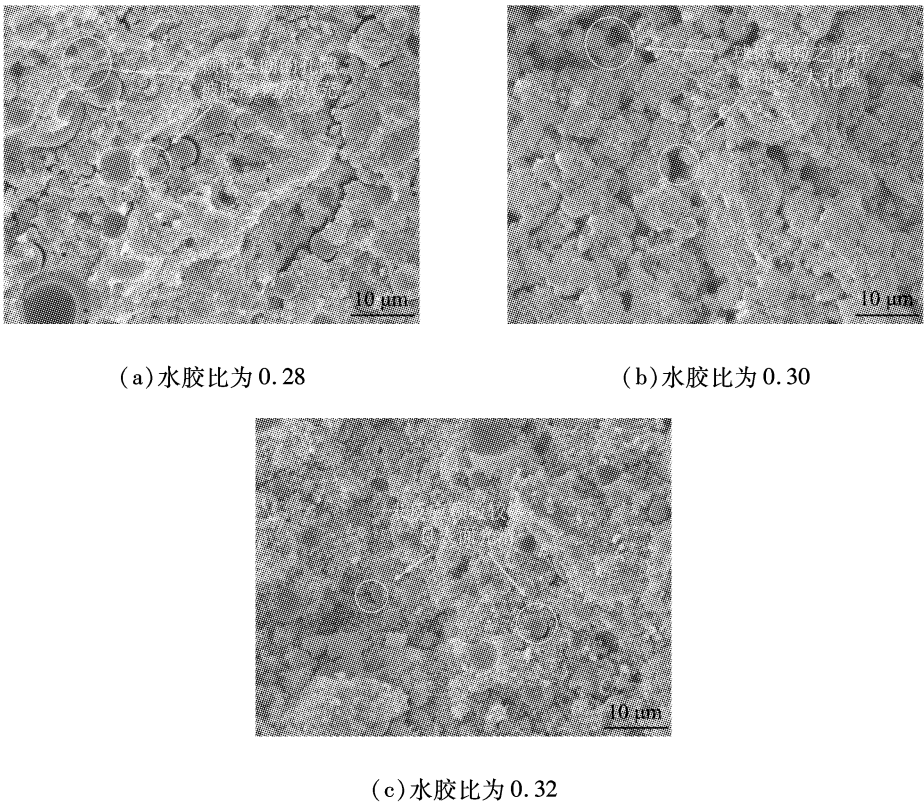


图4 养护 28 d 条件下不同水胶比试样微观结构图像
Fig.4 Microstructures of samples with different water-binder ratios curing for 28 d

用降低了粉煤灰颗粒与颗粒、颗粒与 N-A-S-H 水化产物之间的黏结力和摩擦阻力,使其颗粒间的联结强度降低。

随着粉煤灰地聚物试样的水胶比逐渐增大,试样孔隙呈增大的趋势。这是由于当试样水胶比为 0.28 时,相比之下反应体系中有更多的活性或潜在活性粉煤灰原料参与了水化反应,生成了更多的 N-A-S-H 水化产物,同时有较多的粉煤灰微细颗粒堆积和填充于体系中,以填充试样的孔隙。

2.3 X 射线衍射

图 5 所示为试样养护 28d 的 XRD 衍射图,其中图 5(a)试样水胶比为 0.28,水玻璃模数为 0.8、1.1、1.5;图 5(b)试样模数为 1.1,水胶比为 0.28、0.30、0.32。从图中可以看出,图谱中有石英和莫来石晶体 2 种特征峰,说明在反应过程中没有产生新的结晶相,在 $20^\circ < 2\theta < 40^\circ$ 区域出现了明显的衍射弥散峰。与图 1(b)相比,2 种衍射峰强度明显减弱,说明粉煤灰玻璃体在碱性环境中被不断溶解,重新聚合生成无定型的硅铝酸盐聚合物凝胶(N-A-S-H),使结构致密,强度随之提高。

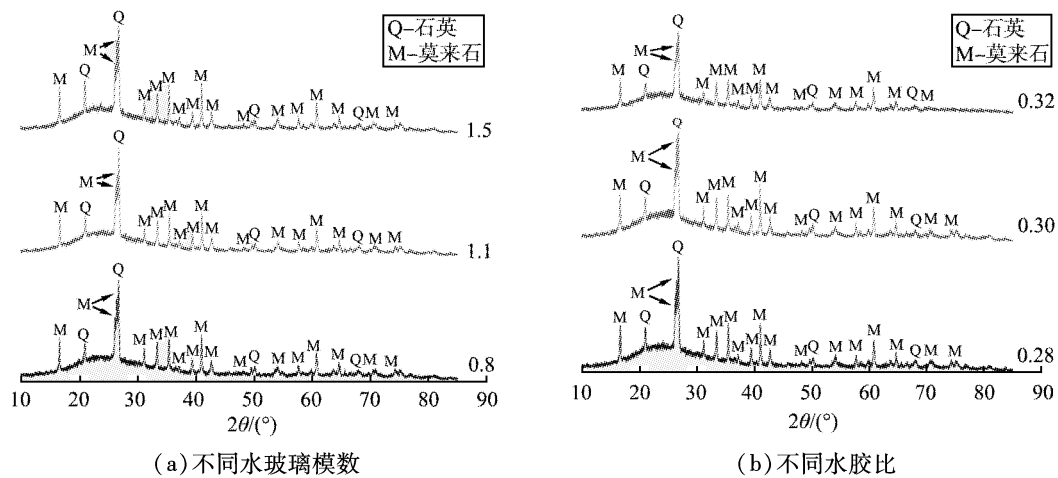


图 5 不同水玻璃模数和水胶比时试样的 XRD 衍射图

Fig. 5 XRD diffraction patterns of samples with different water glass modulus and water-binder ratio

2.4 机理分析

图 6 所示为粉煤灰基地聚物形成过程示意图。碱激发粉煤灰制备地聚物的过程可分为 3 个阶段。

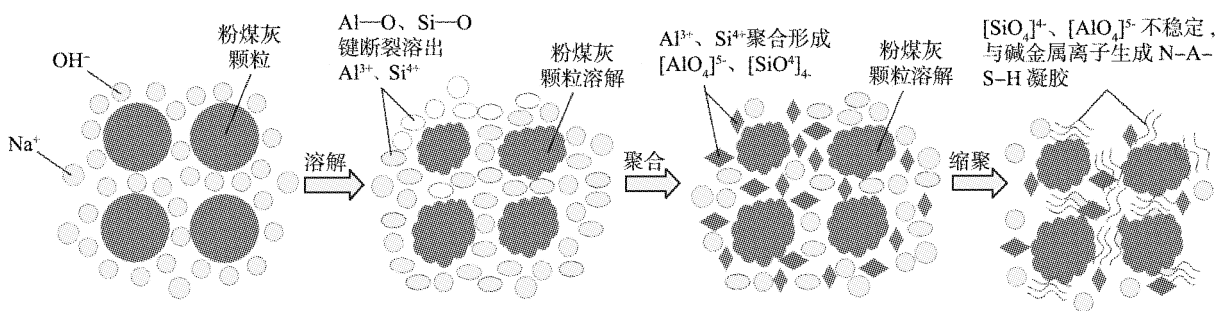


图 6 粉煤灰基地聚物形成过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of formation process of fly ash-based polymers

1) 在碱性激发剂水玻璃溶液的催化作用下粉煤灰玻璃体颗粒溶解,结构中的 Si—O 和 Al—O 键断裂, Al^{3+} 、 Si^{4+} 溶出并向颗粒间扩散。

2) Al^{3+} 、 Si^{4+} 在碱性环境下聚合重构形成 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 和 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 等四面体低聚体。

3) 由于 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 和 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 性质不稳定,在碱性溶液中进一步发生缩聚反应,低聚体与体系中的碱金属离子反应生成高聚合度的 N-A-S-H 凝胶附着在未溶解的粉煤灰颗粒表面,一方面, N-A-S-H 凝胶将体系中的颗粒紧密黏结形成致密的网状结构,显著提高结构的整体性;另一方面,粉煤灰未反应

部分被包裹覆盖,阻碍反应继续进行。

碱激发粉煤灰地聚物强度的提高取决于 N-A-S-H 凝胶的生成量,也就是由粉煤灰玻璃体颗粒溶解出的活性 Al^{3+} 、 Si^{4+} 所决定,因此,通过碱性激发剂激发粉煤灰活性制备地聚物时,选择合适的水玻璃模数和水胶比对地聚物力学强度的形成具有重要影响。

3 结论

基于粉煤灰玻璃体具有潜在的火山灰活性的特点,本文中通过开展无侧限抗压强度试验从宏观上研究了激发剂模数和水胶比对碱激发粉煤灰地聚物试样抗压强度的影响,并结合 SEM 和 XRD 从微观角度揭示其影响的内在机制,得出如下结论。

1) 粉煤灰玻璃体具有潜在的火山灰活性,可通过碱激发的方式来制备粉煤灰地聚物,在该过程中,水玻璃模数对制备效果有关键影响。激发剂模数的范围为 0.8 ~ 1.3 时存在最佳值使粉煤灰地聚物的抗压强度达到最优水平,当高于或低于该水玻璃模数时,试样强度均会降低。模数、水胶比和养护龄期分别为 1.1、0.28 和 28 d 时,试样强度达到最大。

2) 在相同激发剂模数、养护龄期和不同水胶比下,随水胶比逐渐增大,粉煤灰地聚物试样的宏观力学强度不断降低,而试样的微观结构致密程度大致相同;反应体系中随着水分的不断增多,在水的润滑作用下降低了粉煤灰颗粒与颗粒、颗粒与 N-A-S-H 水化产物之间的黏结力和摩擦阻力,使颗粒间的联结强度降低。

3) 粉煤灰地聚物试样的无侧限抗压强度随着养护龄期的增大而增大。粉煤灰颗粒可被 OH^- 溶解,发生解聚-缩聚反应,当养护龄期为 7 d 时,反应体系中具有高浓度的 OH^- 参与反应,但生成的胶凝物质较少,试样大孔隙无法被充分填充,使其结构松散,宏观上表现为早期强度较低。随着水化反应过程延长,粉煤灰玻璃体得到进一步溶解,越来越多的 N-A-S-H 水化产物生成,试样孔隙被有效充填,使其整体性得到提高,地聚物试样强度也随之增长。

参考文献 (References):

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis Calorimetry, 1989, 35(2): 429 - 441.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymer chemistry and application[M]. Saint-Quentin: National Defense Press, 2008: 41 - 42.
- [3] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 68 - 75.
- [4] 崔靖俞, 纪曦, 季港澳, 等. 湿陷性黄土地基粉煤灰-水泥复合注浆材料性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 3020 - 3031.
- [5] 罗少慧. 粉煤灰基矿物聚合材料的制备及其显微结构研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.
- [6] 刘润清, 孙斯慧, 杨元全. 粉煤灰粒径分布对硅酸盐水泥水化性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(5): 83 - 86.
- [7] 王春雪, 刘泽, 孔凡龙, 等. 钢渣-粉煤灰基地质聚合物的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3430 - 3435.
- [8] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 129 - 134.
- [9] 刘泽, 周瑜, 孔凡龙, 等. 矿渣-粉煤灰基发泡地质聚合物的微观结构与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(12): 12 - 15.
- [10] 刘乐平, 贺艳, 何立平, 等. 粉煤灰基地质聚合物/水泥复合材料的力学性能[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(7): 9 - 12.
- [11] GAO K, LIN K L, WANG D Y. Effects $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio on mechanical properties and themicrost ructure of nano- SiO_2 metakaolin-based geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2014(53): 503 - 510.
- [12] LYU S J, WANG T T. Main factors affecting mechanical characteristics of geopolymer revealed by experimental design and associated statistical analysis[J]. Construction and Building Materials, 2013(43): 589 - 597.

- [13] 袁晓宁, 杨萍, 蔡溪南, 等. 碱激发碳酸盐复合胶凝材料性能研究[J]. 化工新型材料, 2014, 42(3): 157–162.
- [14] 陈忠清, 陈文清, 吴早生, 等. 炉渣-粉煤灰地质聚合物的制备及性能研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(1): 98–106.
- [15] 中国建筑材料研究院研究所. 用于水泥和混凝土中的粉煤灰[M]. 上海: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74–84.
- [17] 高云, 杜春苗, 李栋, 等. 水胶比对高强混凝土力学性能影响的实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 653–659.
- [18] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [19] SHI C, ROY D, KRIVENKO P. Alkali-activated cements and concretes[M]. London: Spon Press, 2006.
- [20] GOKHAN G, GOKHAN K. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortared at different temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 371–377.
- [21] 汪华方, 樊自田. 水玻璃模数快速测定方法的改进[J]. 理化检验(化学分册), 2008(1): 47–49.
- [22] 孙淑文. 水玻璃模数的调节与计算[J]. 建井技术, 1984(2): 26–29.
- [23] CHEN Z, LI J S, ZHAN B J, et al. Compressive strength and microstructural properties of dry-mixed geopolymer pastes synthesized from GGBS and sewage sludge ash[J]. Construction & Building Materials, 2018, 182: 597–607.
- [24] SINGH S, ASWATH M U, RANGANATH R V. Effect of mechanical activation of red mud on the strength of geopolymer binder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 91–101.
- [25] 梁丹, 代楠, 魏俊奇, 等. 矿渣/粉煤灰地聚物灌浆料的强度和抗热震性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(1): 17–21.

(责任编辑:武秀娟)