

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.107



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



掺入普通硅酸盐水泥的粉煤灰地聚物混凝土 力学性能与微观特征

杨成^{1a}, 熊凌鑫^{1b}, 游俊杰^{1b,2}, 吉鑫民^{1b}, 胡瑞青³

(1. 西南交通大学 a. 陆地交通地质灾害防治技术国家工程研究中心; b. 土木工程学院, 成都 610031; 2. 佛山市岩疏智慧城市科技发展有限公司, 广东 佛山 528051; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 既有研究表明, 在粉煤灰地聚物混凝土(FGC)中掺入少量普通硅酸盐水泥颗粒, 能够增强其在常温养护后的力学性能, 但这个结果尚未与早期接受高温养护且不含普通硅酸盐水泥的FGC进行力学特征对比, 以验证其可实用程度。为更加贴近实际工程需求, 将不含水泥颗粒且接受热固化的FGC与含有少量水泥颗粒仅接受室温固化的FGC进行了包括泊松比在内的基本力学性能测试和比较。为了从微观机制上解释力学性能的测试结果, 进行了包括SEM、EDS、XRD、FTIR、Micro-CT等的分析。结果表明: 常温养护下含有少量水泥颗粒的FGC各项力学性能与不含水泥颗粒并接受热固化的FGC相近, 临破坏前的试件横向应变与纵向应变之比均接近1.0, 均有突出的横向变形能力; 掺量8%的水泥颗粒在室温条件下对FGC聚合反应的促进效果接近FGC接受高温养护, 在形成更为合理的微观孔隙结构方面, 改进后的FGC在常温养护条件下优于高温养护FGC。
关键词: 抗压强度; 微观结构; 聚合反应; 水化产物; 不对称伸缩振动

中图分类号: TU528.41 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)03-0207-09

Mechanical properties and microscopic characteristics of fly ash geopolymer concrete containing ordinary portland cement

YANG Cheng^{1a}, XIONG Lingxin^{1b}, YOU Junjie^{1b,2}, JI Xinmin^{1b}, HU Ruiqing³

(1a. National Engineering Research Center of Geological Disaster Prevention Technology in Land Transportation; 1b. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Foshan Youngnos Smart City Technology Development Co., Ltd., Foshan 528051, Guangdong, P. R. China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, P. R. China)

Abstract: Previous studies show that the fly ash geopolymer concrete cured at room temperature can be

收稿日期: 2023-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600501); 四川省自然科学基金(2022NSFSC0458); 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研开发项目(院科20-53, 院科20-21)

作者简介: 杨成(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事低碳建材研究, E-mail: yangcheng@swjtu.edu.cn.
胡瑞青(通信作者), E-mail: 1145074849@qq.com。

Received: 2023-07-28

Foundation items: National Key Research & Development Program (No. 52278178); Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022RC1176); Research and Development Project of China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. (Nos. 20-53, 20-21)

Author brief: YANG Cheng (1977-), PhD, associate professor, main research interest: low carbon building materials, E-mail: yangcheng@swjtu.edu.cn.

HU Ruiqing (corresponding author), E-mail: 1145074849@qq.com.

significantly improved if mixed into a small dosage of ordinary Portland cement. However, this modified material has rarely been compared with the traditional fly ash geopolymer concrete, cured at high temperature and not mixed with any ordinary Portland cement. In order to meet the needs of practical engineering applications, the basic mechanical properties, including Poisson's ratios, were tested and compared between two different materials, i. e., the thermally cured fly ash polymer concrete without cement and the room temperature cured fly ash geopolymer concrete with a small dosage of cement particles. Also, to clarify the mechanism in results of the mechanical tests, the microscope and chemical elements tests, including SEM, EDS, XRD, FTIR and CT, are performed. The results show that the mechanical properties of room-temperature cured fly ash polymer concrete containing a little cement are close to those of thermal cured FGC without cement particles. Before compressive failure of prism specimens, the lateral to the vertical strain ratio is close to 1.0, exhibiting a significant lateral deformation capability. After adding 8% cement particles, the degree of polymerization reaction at room temperature is close to that of high temperature curing measures without cement. In forming a more reasonable microscopic pore structure, the samples cured at room temperature are better than those cured at high temperatures.

Keywords: compressive strength; microstructure; polymerization reaction; hydration products; asymmetric stretching vibration

粉煤灰地质聚合物是由粉煤灰硅铝酸盐和液态的碱性激发剂反应生成的新型无机胶凝材料^[1],主要原料粉煤灰通常来自燃煤发电残余物。作为燃煤发电大国,中国近年粉煤灰(FA)年生成量已经超过6亿t,粉煤灰填埋和灰坝的规模正在快速扩大,对地下水和空气质量环境的不利影响日益严重^[2]。能否有效降低建筑行业与火力发电对碳排放和环境的不利影响,是目前影响中国能否实现双碳达标的关键环节。因此,拓宽粉煤灰在建材领域的应用途径,以更快的速度消耗燃煤发电残余物,已经成为低碳建材领域的重要课题^[2]。

地质聚合物是由 AlO_4 和 SiO_4 四面体结构单元组成的三维立体网状结构稳定存在,具有良好的力学性能、早强快硬性、良好的耐腐蚀性和耐高温性,有望在许多的场合取代传统水泥^[3]。Soutsos等^[4]、Assi等^[5]、Nikolić等^[6]对影响粉煤灰地聚物混凝土(FGC)性能的因素进行了研究,包括粉煤灰的来源、混凝土固化的环境、活化剂和添加剂的类型都可能对粉煤灰地聚物混凝土的强度产生影响。为了使粉煤灰地聚物混凝土能够在力学性能上替代普通硅酸盐混凝土,需要对粉煤灰地聚物混凝土进行早期高温养护,以提升聚合反应的程度并促进地聚物凝胶的形成,从而提高其早期强度^[7-8]。而完整的高温养护条件往往只能在工业化预制构件生产中提供,在需要现浇施工的大型户外建造场景中,早期阶段的高温养护的实施困难,不易推广。因此,Nath等^[9]提出在FGC中掺入少量的普通硅酸盐水泥(OPC)以改善其室温养护下的早龄期强度,并与室温养护且不含硅酸盐水泥的FGC进行了对

比^[9],但后者强度很低,工程适用性欠佳。

笔者将掺入少量硅酸盐水泥仅接受常温养护的FGC与未掺入水泥但接受早期高温养护的FGC进行了对比分析,二者均有工程适用性^[9]。以往在FGC中掺入硅酸盐水泥的研究大多集中在抗压强度测试分析,对于其泊松比研究少见报道。而事实上,以一些常见的组合结构构件为代表,受约束的核心区混凝土其轴心抗压强度要有所提高,核心区材料的泊松比是重要的影响因素^[10],而掺入少量硅酸盐水泥后,FGC泊松比是否有显著变化尚需验证。笔者针对4种不同配比和养护条件的FGC试件,对包括抗压强度、弹性模量、应力应变曲线、泊松比在内的基本力学性能进行了比较。既有研究大多从静态化学分析的角度揭示FGC性能形成,但考虑龄期的变化,对掺入硅酸盐水泥的FGC与普通FGC的化学和微观结构演化过程进行比较的研究很少,尤其二者间粉煤灰颗粒碱性侵蚀发展程度和材料孔洞分布差异尚未明确。为了对掺入硅酸盐水泥且受常温养护的FGC性能给出实质性解释,对不同龄期和配比的FGC内粉煤灰的碱性侵蚀、石英相的特征峰值、地聚物反应形成的官能基团、微观结构孔洞分布等进行了比较和量化分析。

1 试验内容

1.1 试验材料

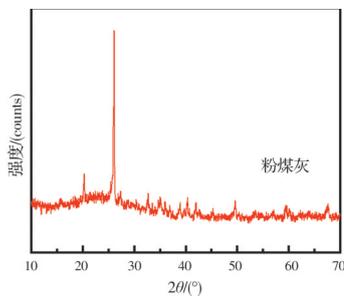
试验采用符合中国国家标准^[11]的I级粉煤灰和P·O 42.5的普通硅酸盐水泥,两者的化学成分见表1,主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,占比为81.91%,同时含有少量的CaO、 Fe_2O_3 等成分。通过扫描电镜仪

表1 试验材料主要的化学成分

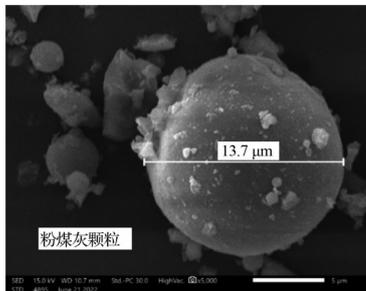
Table 1 Chemical composition of raw material

原材料	化学成分/%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
粉煤灰	55.63	26.34	5.97	5.69	1.29	0.69	2.22	0.54	0.19
硅酸盐水泥	19.35	5.82	61.91	3.44	2.64	0.27	0.73	4.63	0.22

观察发现,粉煤灰以颗粒微珠形式存在于样品中(图1)。通过对粉煤灰在 $2\theta=5^\circ\sim 80^\circ$ 范围进行X射线衍射仪扫描,可以观察到晶体相组成主要为石英、莫来石和赤铁矿的结晶峰,同时, $2\theta=20^\circ\sim 40^\circ$ 之间出现不定型的非晶相的宽峰,可能是具有活化潜力的玻璃相。碱性激发剂由氢氧化钠和硅酸钠混合而成。细骨料选用河沙,粗骨料则选用粒径为5~20 mm的粉碎花岗岩。



(a) XRD 图谱



(b) SEM 图像

图1 FA 原材料 XRD 图谱和颗粒 SEM 图像

Fig. 1 The SEM images and XRD patterns of FA

1.2 配合比设计及试件制备

1.2.1 配合比

共设置4个试验组,分别为早期热养护(FGC-T)、常温养护(FGC-NT)、掺入4%OPC仅常温养护(FGC-4O)和掺入8%OPC仅常温养护(FGC-

8O),用以说明普通硅酸盐水泥掺入量和初始养护条件对粉煤灰地聚物混凝土性能的影响。由于FGC-NT已被证明力学性能欠佳,故仅做化学和微观结构分析。各组用料配合比见表2。

1.2.2 地聚物的制备工艺

按照表2中的配合比对原材料和碱性激发剂进行配置,其中NaOH溶液的摩尔浓度为12 mol/L,NaSiO₃和NaOH溶液的质量比为2.5。将NaOH加入水中配置成所需浓度后,与NaSiO₃溶液混合搅拌均匀,然后将混合液置于通风良好的环境中自然冷却至室温。冷却时间因溶液体积等条件不同而有所差异,一般需要2~4 h。待溶液冷却后按各试验组的要求加入粉煤灰、水泥、细骨料、粗骨料进行混合,混合均匀后按要求制备试件。对不同的试验组进行不同条件的养护。先将所有试件放入温度为25~28℃和湿度为60%±10%的条件下养护6 h固化后进行脱模;随后将FGC-T置于60℃的温度下进行高温养护24 h,最后放入室温环境下养护至设定龄期;作为比较组的FGC-NT、FGC-4O、FGC-8O则在试件脱模后,直接放入室温环境下养护至设定龄期。

1.3 测试方法

1.3.1 FGC的宏观性能

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[12],对龄期为3、7、14、28 d的固体样品进行立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、弹性模量和泊松比的测试。所有样品都是在室温环境(25℃,60%RH)下进行测试。立方体抗压强度试验和棱柱体应力-应变关系试验均在YAW-2000型压力试验机上进行,在正式加载前预压3次,加载过程缓慢均匀。预压后,试样在应力比分别设置为0.1~1的10个不同荷载水平下加载,直至试样被压

表2 粉煤灰地聚物混凝土的配合比与养护条件

Table 2 Mixture proportions and curing condition of the geopolymer concrete

编号	养护条件	配合比/(kg/m ³)					
		粉煤灰	硅酸盐水泥	氢氧化钠	硅酸钠	细骨料	碎石
FGC-T	热养护	400	0	45.7	114.3	651	1 209
FGC-NT	常温养护	400	0	45.7	114.3	651	1 209
FGC-4O	常温养护	384	16	45.7	114.3	651	1 209
FGC-8O	常温养护	368	32	45.4	114.3	651	1 209

碎和破坏。每个加载水平保持3 min,以精确测量和记录线性和非线性行为的应变。使用标距为100 mm、阻值为120 Ω 的电阻式应变片测量应变,采用TST3827EN系统采集应变测量数据并初步处理。

1.3.2 微观结构及成分表征

通过XRD、SEM、FTIR和Micro-CT测试物相组成、微观结构和官能基团表征,分析研究养护参数对地聚物的影响;利用X射线衍射仪(XRD)研究其晶体的物质和非晶体的特征峰;以扫描电子显微镜(SEM)表征样品微观结构及其表面特征,并结合能谱仪(EDS)分析微区元素成分;以傅里叶变换处理红外吸收光谱仪(FTIR)获取分子内部的相对振动和分子转动的信息,以确定物质分子结构。测试分析分别用于表征3、28 d龄期的FGC样品特性。最后,通过GE Vtomex CT扫描仪观察28 d龄期时样品孔隙率及孔隙分布。

2 试验结果与讨论

2.1 单轴受压力学性能比较

2.1.1 抗压强度和弹性模量分析

在龄期相同的条件下,未掺硅酸盐水泥试件FGC-T立方体抗压强度略高(图2(a))。虽然立方体试件的抗压强度随着龄期时间的增长递增,但早龄期提升明显更快。各试验小组在龄期3 d时的立

方体抗压强度均保持在25 MPa的左右,在龄期28 d时,3组都达到最高值且均大于40 MPa,而在高温养护的条件下的立方体抗压强度最大为50.2 MPa。

由图2(a)、(b)可以看出,在不同条件下,立方体抗压强度与轴心抗压强度有相似的增长趋势。在早龄期,各试验组的强度均在15 MPa左右,而在标准龄期时,轴心抗压强度均大于24 MPa。通过FGC-4O和FGC-8O的比较可以发现,随着硅酸盐水泥含量的增加,轴心抗压强度会降低。这主要是因为FGC凝结缓慢,硅酸盐水泥聚合不足。不过,二者的差异未超过5 MPa。

所有的试验组在早龄期时的弹性模量均大于9 GPa(图2(c))。虽然标准龄期弹性模量均达到了25 GPa,但FGC-4O和FGC-8O在28 d的弹性模量均低于FGC-T。

2.1.2 应力-应变曲线分析

图3为轴向受压时的轴向和横向应力-应变曲线,其中压应变为轴向应变,拉应变为横向应变。可以看出,随着龄期的增长,受压应力-应变曲线的斜率逐渐增大,极限压应变和横向拉应变总体上呈逐渐降低的趋势,表明地聚物混凝土的延性随着龄期的增长而不断降低。龄期28 d时,3组试验组的极限压应变分别为 $-2\ 200 \times 10^{-6}$ 、 $-2\ 133 \times 10^{-6}$ 和 $-1\ 887 \times 10^{-6}$ 。

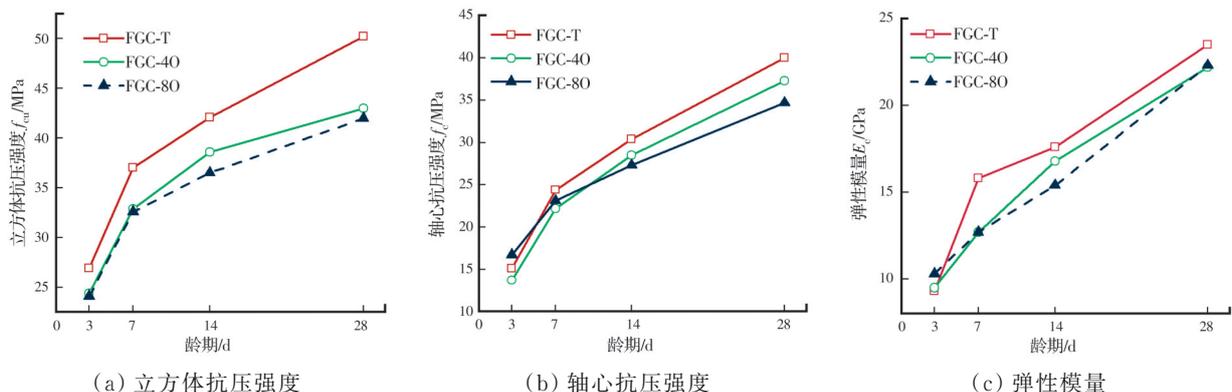


图2 地聚合物混凝土的基本力学性能

Fig. 2 Basic mechanical properties of FGC

普通混凝土极限压应变大约为 $2\ 000 \times 10^{-6}$,尽管普通硅酸盐水泥的加入会对水化作用有一定促进,但缺乏热养护可能会削弱了微观层面交联作用发展,最终导致压应变的轻微损失。相比之下,各试验组在28 d的横向正应变最大值分别为 $2\ 100 \times 10^{-6}$ 、 $2\ 034 \times 10^{-6}$ 和 $1\ 800 \times 10^{-6}$,粉煤灰地聚物混凝土展示出了较好的横向变形能力^[13]。这主要是由于地聚胶凝材料中特殊的无机高分子聚合物结构有利于力学性能提升。

2.1.3 泊松比

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[12]的规定进行泊松比测试。由于混凝土在轴压作用下会产生横向膨胀,可以用材料达到极限强度前的非线性泊松比,即非线性的横向和纵向应变之比,反映其横向变形能力。有显著横向变形能力的水泥基材料如果受到有效的环向约束,轴向抗压强度往往显著提高。从不同龄期的泊松比随轴向压应力发展曲线可以看出,弹性泊松比范

围在0.1~0.2(图4),与普通混凝土较为接近。

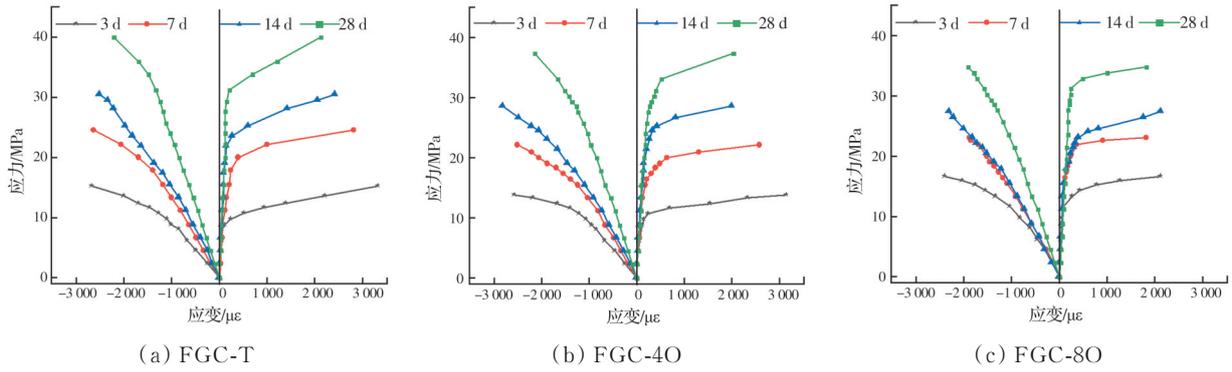


图3 应力-应变关系曲线图

Fig. 3 Stress-strain curve

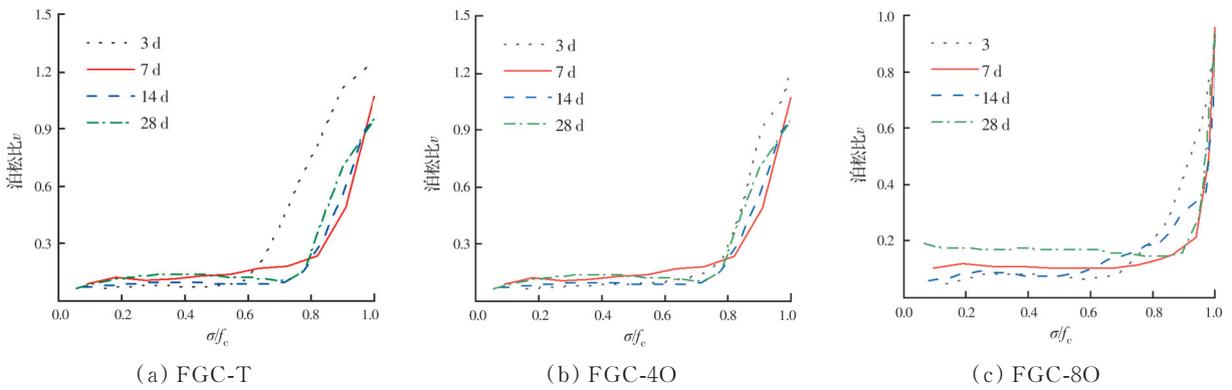


图4 应力比与泊松比的关系

Fig. 4 stress ratios and Poisson's ratios

龄期3 d,应力比为0.6时,FGC-T试件的泊松比急剧增加,达到破坏时的非线性泊松比超过了1.2,曲线中的拐点通常定义为临界应力比。对于7、14、28 d的临界应力比约为0.8且泊松比为0.3,到试件破坏时,泊松比约为1.0。同时在FGC-40和FGC-80的测试结果中也发现了类似的情况。FGC-40在破坏状态下的泊松比与FGC-T非常接近,FGC-80则比其他试验组略低,泊松比在0.8~1.0之间。

值得一提的是,观察到的接近1.0的泊松比值并非出现在FGC应力-应变曲线的线弹性阶段,而是出现在明显的非线性阶段,已接近试件的极限变形状态。Chen等^[14]在其混凝土损伤理论中对这种现象背后的机理已有明确阐述,Darwin等^[15]和Kupfer等^[16]在更早的研究中已经发现当压应力超过0.8倍单轴抗压强度时,体应变方向将发生逆转,表观泊松比会快速增大,在试件不稳定的压碎阶段,泊松比甚至会超过1.0。而相比普通混凝土,FGC的材料延性更优,因为FGC中的C(N)a-s-h凝胶可以形成致密、低孔隙度的三维网状交联凝胶基质,这种微观结构有助于约束材料的横向膨胀,这使得

FGC试件在受到垂直压缩时具有更稳定的侧向变形能力,压溃阶段的受力变形曲线相比普通混凝土更稳定,更容易产生接近1.0的非线性泊松比。

图5为应力比为1时的泊松比随龄期的变化。尽管各组在早龄期时泊松比之间存在差异,但在龄期28 d时所有试验组的泊松比几乎相同。值得注意的是,FGC-T组早龄期的泊松比与FGC-40相近且略高于FGC-80,说明早龄期普通硅酸盐水泥对地聚物三维网格微观结构的促进作用不如高温养护,但随着龄期增长,这个差距逐渐减小并消失。

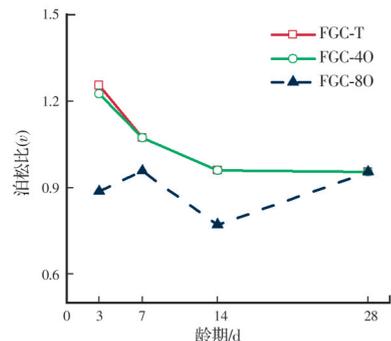


图5 不同龄期条件下应力比σ/σ_c=1时泊松比
Fig. 5 Poisson's ratios with ages at the stress σ/σ_c=1

2.2 微观结构

2.2.1 微观形态

由图6的SEM图像可以看出,在早龄期阶段,粉煤灰颗粒表面生成了活化反应产物铝硅酸钠凝

胶^[17]。值得注意的是,不同条件下的产物生成量有所不同,掺入8%硅酸盐水泥的样品产生更多沉淀。而经过早期高温热养护的样品则会受到碱性侵蚀的影响,导致粉煤灰颗粒的部分外壳发生溶解。

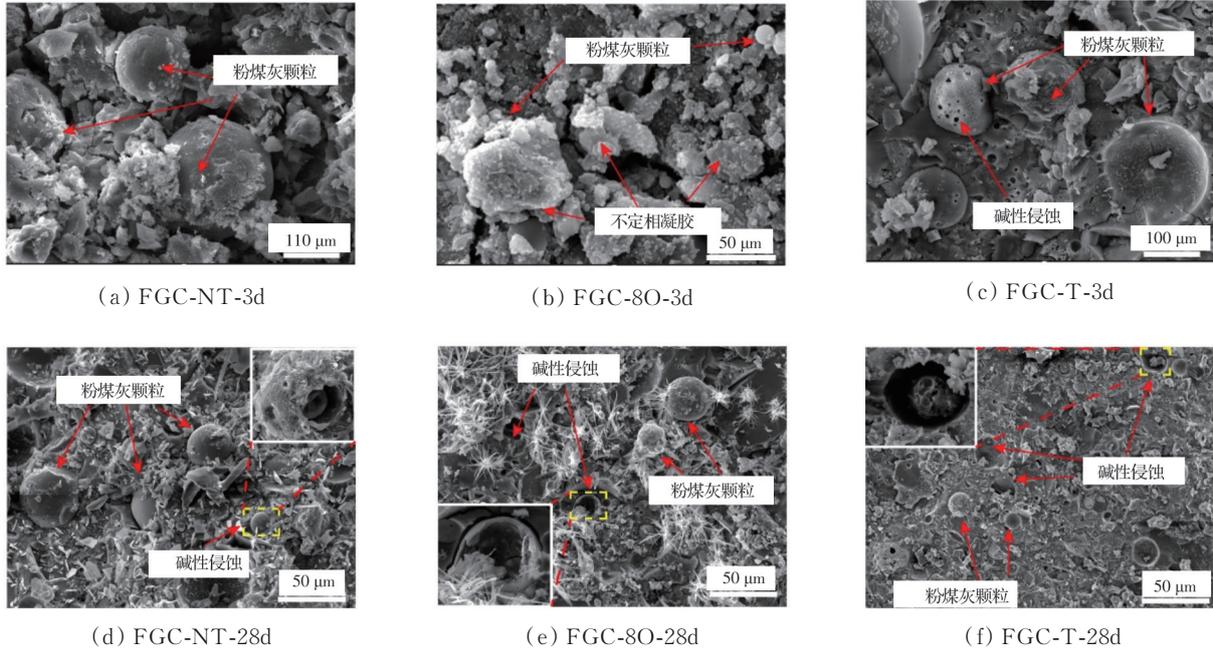


图 6 不同条件下 FGC 样品中 FA 颗粒的反应阶段

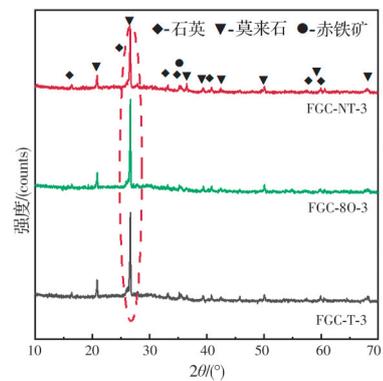
Fig. 6 SEM images of the geopolymer concrete

在标准龄期时,每个试验组的粉煤灰颗粒都受到碱性溶液的侵蚀,但依旧能看出其原有形态,其中早期高温热养护的样品侵蚀最为严重。

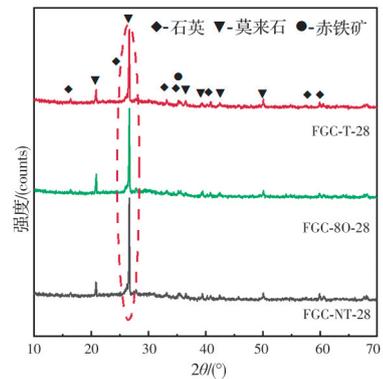
从不同龄期阶段观察结果看,早期高温热养护下 FGC-T 粉煤灰的碱活化反应最强,常温养护且掺入 8% 硅酸盐水泥的 FGC-80 次之,常温养护未添加硅酸盐水泥的 FGC-NT 最弱。这主要是因为 FGC-T 的高温热养护极大地激发了地聚物之间的反应活性,从而加快了反应速率。相比之下掺入 8% 硅酸盐水泥的 FGC-80 借助硅酸盐水泥水化反应有利于激发地聚物之间的反应活性^[18]。可以从热化学的角度解释含硅酸盐水泥的 FGC 即便未经早期高温养护也具备充分力学性能的原因。

2.2.2 XRD 特征峰

从图7的XRD结果看,所有样品中均存在石英、莫来石和赤铁矿相,因为在粉煤灰地聚物发生聚合反应时,上述物质呈现惰性,且在碱性条件下它们的反应程度有限。由于地聚物发生的聚合反应使得物质之间相互转化,同时伴随着稀释效应^[19],所以不同时期的石英相特征峰值有所差距。由于硅酸盐水泥的掺入量较少,对抗压强度和泊松比的增益作用显然小于水化过程产生的影响。



(a) 养护 3 d 时 XRD 图谱



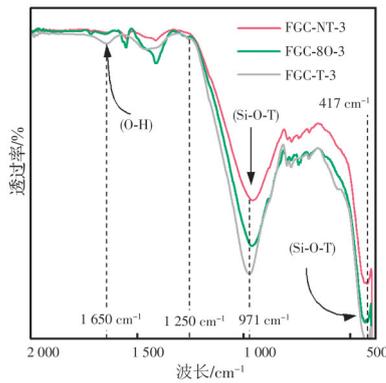
(b) 养护 28 d 的 XRD 图谱

图 7 不同龄期时的 XRD 图谱

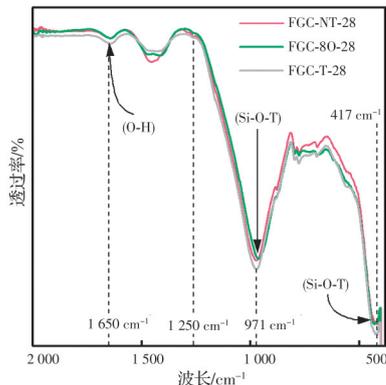
Fig. 7 The XRD patterns with ages

2.2.3 红外谱图

从图 8 反映特殊官能基团的红外光谱分析看, 1 650 cm⁻¹处对应的是 O-H 不对称伸缩振动和弯曲振动峰,说明地聚物中的自由水通过水化反应逐渐转变为结合水。光谱中 1 250~417 cm⁻¹区段为 Si—O—T(T=Si 或 Al)的不对称振动峰,表明粉煤灰中原有的硅酸盐和铝硅酸盐在持续发生解聚反应,这与 XRD 中观察的现象一致。其中 971 cm⁻¹和 417 cm⁻¹处分别对应如下现象,即 Si—O—Si 结构



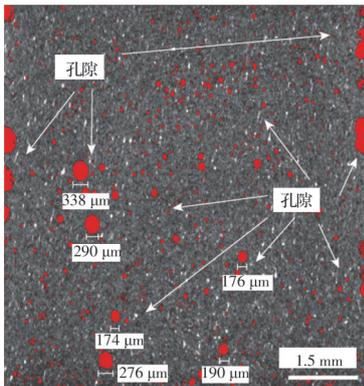
(a) 养护 3 d 时 FTIR 图谱



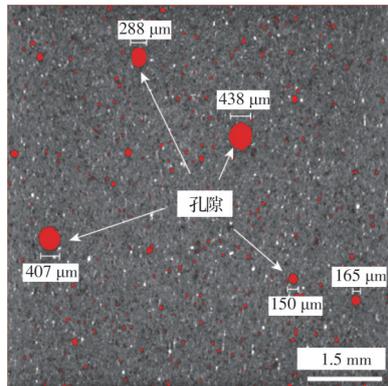
(b) 养护 28 d 时 FTIR 图谱

图 8 不同条件下的红外光图谱

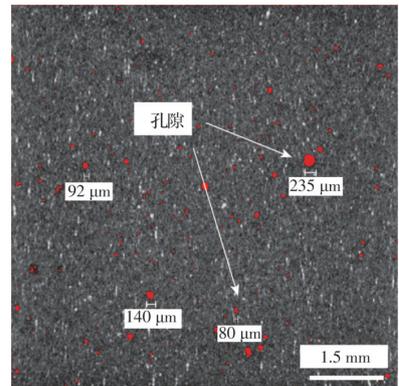
Fig. 8 The FTIR spectra of the geopolymer concrete



(a) FGC-T



(b) FGC-NT



(c) FGC-80

图 9 不同条件下样品 CT 图像

Fig. 9 The CT Image of the geopolymer concrete

中纳入了 Al,硅四面体中非桥接氧(NBOs)的数量增加和 Si-O-Si 导致的弯曲振动峰^[20-21]。故无论是在早龄期还是标准龄期时,经早期高温养护不含硅酸盐水泥的样品 FGC-T 的反应活性最为剧烈,掺入 8% 硅酸盐水泥且常温养护的样品 FGC-80 次之,最后则是常温养护未添加硅酸盐水泥的样品 FGC-NT。

2.2.4 CT 图像

由图 9 所示的标准龄期切片 CT 图像可见, FGC-T 分布孔隙的尺寸和数量都大于 FGC-80 和 FGC-NT。经 CT 量化分析,FGC-T 的孔隙率为 5.77%,而 FGC-NT 和 FGC-80 的孔隙率分别为 2.01% 和 1.46%,因此,FGC-80 与 FGC-T 之间的差异显著。

图 9 显示的现象说明早龄期热养护不仅能促进地聚物的聚合反应,同时也改变了混凝土的孔结构。虽然早期孔结构对泊松比有所提升,但对混凝土的力学性能和抗渗性能有一定负面影响,进而影响混凝土的耐久性。当掺入 8% 硅酸盐水泥,可以为地聚物混合物之间的聚合反应过程提供了稳定的热源,从而促进聚合反应的发生。因此,与 FGC-T 和 FGC-NT 相比,FGC-80 的孔隙数量和孔径大小更加均匀且密实。

2.3 硅酸盐水泥对试件横向变形能力的影响机制讨论

经过早期高温热养护的样品,虽然存在相当数量的孔隙,但在早期强度没有完全发展的情况下,横向变形能力受孔隙影响较大。由于高温养护促进聚合反应从而抵消了孔隙所带来的负面影响,所以无论在任何时期,FGC-T 都展现出更好的抗压强度。

在未经早期高温热养护的样品中加入 8% 硅酸盐水泥后,发生地聚物聚合反应的同时也进行着硅

酸盐水泥的水化反应,水化反应为聚合反应持续提供一定的热源和水化产物,这促进了聚合反应发展,也优化了孔隙结构,使得试件更加密实。因此,随着龄期增加,FGC-T与FGC-80的抗压强度和泊松比的差异在不断缩小。在28 d时,与进行了热养护的FGC-T相比,未经热养护的FGC-80虽然强度略有不足,但它们的泊松比几乎一致,这对于常温养护条件下的FGC作为约束混凝土构件核心材料时有显著的工程意义。

3 结论

为了拓展FGC的工程应用,对两类有实际工程意义的FGC材料进行比较,一种是室温养护时掺入少量普通硅酸盐水泥的FGC,另一种是不含普通硅酸盐水泥但接受早期热养护的FGC。完成了力学性能测试(包括泊松比)、化学成分、晶体相变、化学键振动和微观结构等方面的观察,结论如下:

1)在FGC中掺入少量普通硅酸盐水泥且在常温条件下养护,其力学性能与早期高温热养护的FGC相近,有利于节省早龄期热养护的成本,并减少碳排放,可用于施加热养护难度较大的现浇大型或复杂混凝土工程中。

2)由于具有独特的三维微观网状结构,使FGC具备良好的横向变形能力和反膨胀特征特性。在临近轴向受压承载能力极限时,FGC试件泊松比远高于普通混凝土试件。其中,不含普通硅酸盐水泥且接受热养护的FGC孔隙率更高,它的三维网状结构形成更充分,故其早龄期非线性泊松比也更高。但随着龄期的增加,这种差距逐渐缩小并接近消失。

3)在达到标准龄期时,掺入少量普通硅酸盐水泥且在常温养护的FGC,其聚合反应程度与经过早期热养护但不含普通硅酸盐水泥的FGC相差不大。二者的Si—O—Si或Si—O—Al不对称拉伸振动几乎处于同一水平。掺入OPC并进行温室养护的FGC,还可减少高温养护所带来的孔隙负面影响。

参考文献

[1] 赵人达,成正清,文甜,等.早龄期低钙粉煤灰基地聚合物混凝土拉伸徐变特性[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):111-117.
ZHAO R D, CHENG Z Q, WEN T, et al. Tensile creep characteristics of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 111-117. (in Chinese)

[2] YAO Z T, XIA M S, SARKER P K, et al. A review of

the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China [J]. Fuel, 2014, 120: 74-85.

- [3] ZHUANG X Y, CHEN L A, KOMARNENI S, et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 125: 253-267.
- [4] SOUTSOS M, BOYLE A P, VINAI R, et al. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 355-368.
- [5] ASSI L N, DEEVER E E, ELBATANOUNY M K, et al. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 807-815.
- [6] NIKOLIĆ V, KOMLJENOVIC M, BAŠĆAREVIĆ Z, et al. The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 361-370.
- [7] ZHANG M, ZHAO M X, ZHANG G P, et al. Reaction kinetics of red mud-fly ash based geopolymers: Effects of curing temperature on chemical bonding, porosity, and mechanical strength [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93: 175-185.
- [8] PALOMO A, GRUTZECK M W, BLANCO M T. Alkali-activated fly ashes [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1323-1329.
- [9] NATH P, SARKER P K. Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 55: 205-214.
- [10] MATHEW G, JOSEPH B. Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 311-317.
- [11] 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Fly ash used for cement and concrete: GB/T 1596—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [12] 混凝土力学性能试验方法标准: 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test method of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [13] CHEN W F. Plasticity in reinforced concrete [M]. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [14] CHEN W F, SALEEB A F. Constitutive equations for engineering materials: Elasticity and modeling [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [15] DARWIN D, PECKNOLD D. Inelastic model for

- cyclic biaxial loading of reinforced concrete [M]. Civil Engineering Studies SRS 409, University of Illinois, Champaign-Urbana, 1974, 169.
- [16] KUPFER H, HILSDORF H K, RUSCH H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1969, 66(8): 656-666.
- [17] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A, CRIADO M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1204-1209.
- [18] PALOMO A, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, KOVALCHUK G, et al. OPC-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9): 2958-2966.
- [19] BÖKE N, BIRCH G D, NYALE S M, et al. New synthesis method for the production of coal fly ash-based foamed geopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 189-199.
- [20] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2005, 86(1/2/3): 207-214.
- [21] WANG Y G, LIU X M, ZHANG W, et al. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118852.

(编辑 胡玲)