

引用格式:梁冬瑶,李福昆,杨青梅,等.高温作用下高强地聚物混凝土力学性能研究[J].工业建筑,2026,56(6):256-264. LIANG Dongyao, LI Fukun, YANG Qingmei, et al. Research on the Mechanical Properties of High-Strength Geopolymer Concrete Exposed to Elevated Temperatures[J]. Industrial Construction, 2026, 56(6): 256-264 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG24082707

高温作用下高强地聚物混凝土力学性能研究^{*}

梁冬瑶¹ 李福昆² 杨青梅³ 李春华⁴ 李明晖² 杨海峰²

(1. 广西路建集团建筑工程有限公司, 南宁 530004; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 中国建筑股份有限公司阿尔及利亚公司, 北京 100125)

摘 要 地聚物作为低碳环保胶凝材料, 具备优异的力学性能, 是高强混凝土的理想水泥替代品。然而, 高温作用会导致混凝土性能退化, 影响结构安全。以温度(20, 200, 400, 600 °C)和混凝土强度(C70、C80)为变量, 研究高强地聚物混凝土(HGPC)在单轴受压下的力学性能。结果表明, 温度升高, HGPC的破坏模式由贯穿骨料转变为地聚物基体与骨料的界面过渡区破坏, 质量和抗压强度显著下降, 600 °C时, 质量损失率达6.8%, f_{cu}^T/f_{cu}^{20} 降至常温值的0.39。此外, HGPC的 f_c^T/f_{cu}^T 低于普通混凝土和普通高强混凝土, 并随温度升高进一步降低。结合高温后HGPC受压力学演化特征, 构建考虑损伤参数的应力-应变本构模型, 经验证模型计算结果与试验实测数据一致性较好, 可为高温环境下地聚物混凝土结构设计提供理论依据。

关键词 高强地聚物混凝土; 高温试验; 单轴抗压强度; 轴心抗压强度; 应力-应变本构关系; 质量损失

Research on the Mechanical Properties of High-Strength Geopolymer Concrete Exposed to Elevated Temperatures

LIANG Dongyao¹ LI Fukun² YANG Qingmei³ Li Chunhua⁴ LI Minghui² YANG Haifeng²

(1. Guangxi Road Construction Group Construction Engineering Co., Ltd., Nanning 530004, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. China State Construction Company Limited Algeria Company, Beijing 100125, China)

Abstract: As a low-carbon and eco-friendly cementitious material, geopolymer exhibits excellent mechanical properties and is an ideal substitute for cement in high-strength concrete. However, elevated temperatures degrade the performance of concrete, compromising structural safety. This study investigated the mechanical properties of high-strength geopolymer concrete (HGPC) under uniaxial compression, considering temperature (20 °C, 200 °C, 400 °C, and 600 °C) and concrete strength grade (C70, C80) as variables. The results indicated that the failure mode of HGPC shifted from aggregate penetration to failure at the interfacial transition zone, accompanied by significant mass and strength loss. At 600 °C, the mass loss rate reached 6.8%, while f_{cu}^T/f_{cu}^{20} dropped to 0.39 of its room-temperature value. Additionally, f_c^T/f_{cu}^T was lower than that of conventional and high-strength concrete, and it further decreased with increasing temperature. A stress-strain constitutive model incorporating damage parameters was developed, demonstrating strong agreement with experimental data and providing theoretical support for HGPC applications in high-temperature environments.

^{*} 广西科技重大专项项目(AA23023034); 国家自然科学基金项目(52178123); 广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026178)。

第一作者: 梁冬瑶, 高级工程师, 主要从事技术管理, 科技研发与应用, 重点研发应用有机硅复合材料、新型混凝土材料, 289530378@qq.com。

通讯作者: 杨青梅, 博士研究生, 主要从事固废资源化利用、新型混凝土材料方面研究, 2410569@tongji.edu.cn。

收稿日期: 2024-08-27

Keywords: high-strength geopolymer concrete; high-temperature test; uniaxial compressive strength; axial compressive strength; stress-strain constitutive relation; mass loss

0 引言

近年来,随着我国建筑行业迅猛发展,水泥作为建筑行业的重要材料,需求量极为庞大。根据国家统计局数据,中国 2024 年累计水泥产量 18.25 亿 t^[1],而生产 1 吨水泥将产生 10 kg 粉尘、2 kg 氮氧化物和 1 kg 二氧化硫等副产物^[2]。此外,生产 1 kg 普通硅酸盐水泥会释放 0.66~0.82 kg 的二氧化碳^[3]。水泥生产过程中排放的二氧化碳约占其全球总排放量的 5%~7%^[4]。在全球范围内,水泥行业的规模和需求如此之大,对气候变化影响巨大,与碳达峰碳排放政策背道而驰。因此,人们极力寻求一种水泥的替代品——地质聚合物(简称地聚物)。地聚物为一种硅铝质的无机胶凝材料,是由具有火山灰活性或胶凝活性的硅铝酸盐类矿物与碱性激发剂反应而形成的碱激发胶凝材料^[5]。研究表明,地聚物具有绿色环保^[6]、碳排放量低^[7]、制备工艺简单^[8]等优点。由于制备地聚物的原料较多,采用不同的原材料制备混凝土也具有不同的工作性能。已有大量试验研究了 NaOH 和水玻璃使用量对矿渣基地聚物混凝土性能的影响,结果表明,矿渣基地聚物混凝土在强碱的作用下表现出优异的快凝水硬性能,造成施工不便等问题,因此考虑在原试验基础上,加入粉煤灰和偏高岭土,结果发现混凝土的性能得到很大提升^[9-10]。Nath 等^[11]发现,在制备粉煤灰基地聚合物混凝土时,当矿渣掺入量超过 30%,混凝土的强度可以显著提高。然而,矿渣含量增加时,粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土的凝结时间逐渐减少。Mustakim 等^[12]研究了二氧化硅和硅灰对粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土工作性能、凝结时间、抗压强度和微观结构性能的影响,发现二氧化硅和硅灰均提高了地聚物聚合程度,使地聚物基体更加紧密,从而使粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土的工作性能得以改善。Behfarnia 和 Rostami^[13]在地聚物混凝土中掺入不同比例的硅灰代替矿渣,结果发现掺入硅灰能够改善混凝土的抗压强度和渗透性能。Sani 等^[14]研究了掺入不同比例矿渣与粉煤灰的地聚物混凝土的基本力学性能,发现增加矿渣和粉煤灰掺量可以提高混凝土的坍落度、抗压强度以及劈裂强度,并可适用于实际工程。

随着城市化建设不断发展,城市房屋绝大部分

为高层或者超高层建筑,其结构形式以钢筋混凝土居多。在各种灾害中,火灾是目前威胁公众安全较大的灾害之一。相关数据显示,2023 年上半年,中国发生的火灾共计 55 万起,死亡或者受伤人数达 2400 余人,造成直接经济损失和间接财产损失分别约为 40 亿元和 160 亿元^[15]。相较于上一年同期,火灾发生件数、伤亡人数分别上升 19.9% 和 9.3%^[16]。混凝土作为现代建筑结构承重和支撑体系的重要组成部分材料,具有较低的导热系数和良好的耐火性能,使混凝土建筑结构在火灾时能够基本保持整体稳定性^[17]。火灾会使混凝土结构遭受约 1000 °C 的高温损伤,引发一系列物理和化学变化,导致其内部结构及成分发生显著变化,从而导致结构损伤、承载力下降,甚至局部破坏、整体坍塌等隐患^[18-20]。因此,为了科学、合理、经济地进行混凝土建筑设计,并确保其在火灾高温环境中的安全性,国内外越来越多的学者开始研究火灾高温下混凝土的力学性能和劣化机理。

地聚物具有较水泥胶凝材料更好的耐高温性能,目前对低强地聚物混凝土常温力学性能和高温后力学性能的研究较为集中,但未见对高温后高强地聚物混凝土力学性能的研究。高温后高强地聚物混凝土力学性能的研究有利于地聚物混凝土推广使用,有助于建筑行业绿色环保可持续发展,是十分有意义的。因此本文以混凝土强度和温度为变量进行立方体单轴抗压和轴心抗压试验研究,获取高温下高强地聚物混凝土的受力性能,以为高强地聚物混凝土的工程设计和理论分析提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

试验使用的粗骨料为石灰石天然粗骨料,如图 1 所示,购买于南宁某砂石厂,粒径为 5~20 mm 连续级配碎石,按照 GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》^[21]对其物理性能进行测定,表 1 为粗骨料各项物理性能。细骨料为河砂,购买于某砂场,细度模数为 2.68。两种骨料的连续级配曲线如图 2 所示。可以发现粗细骨料级配曲线处于上、下限级配曲线之间,表明两者级配曲线良好。

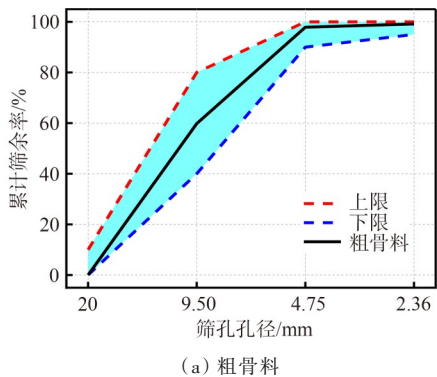


图1 粗骨料
Fig. 1 Coarse aggregate

表1 粗骨料材料性能

Table 1 Material properties of coarse aggregate			
含水率/%	24 h吸水率/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%
0.31	0.91	2503.2	10.3

采用的地聚物胶凝材料购自河北省石家庄某矿产品有限公司,由粉煤灰和矿粉以3:2的重量比配置,粉煤灰和矿粉的化学成分见表2。碱激发剂



为液体水玻璃和固体 NaOH 混合而得,固体 NaOH 的纯度≥99%,水玻璃的性能指标如表3所示。试验拌和用水为普通自来水。此外,采用 QS-8020H 聚羧酸高效减水剂以减少胶凝材料絮化成团状况。采用等体积法配置两种不同强度等级(C70、C80)高强地聚物混凝土,配合比见表4。

表2 粉煤灰和矿粉成分

Table 2 Chemical composition of fly ash and slag powder								
种类	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
粉煤灰	3.7	28.1	50.8	6.2	1.2	—	0.6	1.2
矿粉	33.6	14.3	36.5	3.2	7.5	0.8	—	—

表3 水玻璃的主要性能指标

Table 3 Main performance indexes of sodium silicate						
SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	波美度	密度/(cm ³ ·g ⁻¹)	模数	含水率/%	
29.54	12.40	48	1.46	2.46	49.52	

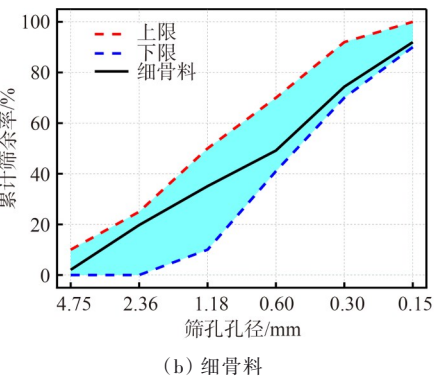


图2 骨料级配曲线
Fig. 2 Particle size distribution curves for aggregates

表4 高强地聚物混凝土配合比

Table 4 Mix proportions of high-strength geopolymer concrete								
编号	地聚物胶凝材料/(kg·m ⁻³)	碱激发剂/(kg·m ⁻³)		减水剂/(g·m ⁻³)	粗骨料/(kg·m ⁻³)	细骨料/(kg·m ⁻³)	用水量/(kg·m ⁻³)	缓凝剂/(kg·m ⁻³)
		水玻璃	NaOH					
HGPC-70	356.3	135.8	24.8	1.069	1134.9	666.6	81.6	1.069
HGPC-80	407.2	155.2	28.3	1.221	1113.9	626.6	68.9	1.221

1.2 试件设计及加载

试验以混凝土强度等级和温度为设计因素,混凝土强度等级为C70、C80,每种强度等级下设计并制作了4种温度水平(20,200,400,600℃)的试件,共8组,每组3个试件。设计了24个100 mm×100 mm×100 mm立方体试件,用于单轴抗压强度试验;同时设计了24个100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试件进行轴心轴压试验。根据表4设计出的配合比浇筑混凝土,试件成型后室内放置24 h,然后脱模并移至标准养护室养护28 d。完成养护

之后,将试件取出后放置7 d,之后进行高温处理。立方体抗压试验和棱柱体抗压试验均采用广西大学实验室的RMT岩石压力试验机进行加载。根据GB/T 50087—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[22]要求进行试验,考虑本试验混凝土为高强混凝土,采用位移控制的加载方式,加载速率为0.01 mm/s。

1.3 高温处理

高温炉采用广西大学实验室的RX3-45-9型工业电阻炉,该电阻炉额定温度950℃,炉内的热电偶

可实时监测炉内温度,炉内尺寸 1200 mm×600 mm×400 mm,高温炉如图 3 所示。每批次试件高温处理前取 3 个试块用电子秤称重并记录重量,用于与高温后的重量对比。高温试验时目标温度分别为 200, 400, 600 °C,记录每分钟显示的炉内温度,将每分钟记录的温度绘制成升温曲线,见图 4。当炉内温度达到设定温度后保持 3 h 以保证混凝土中心达到目标温度。恒温结束后快速取出试件,待试件冷却后立即称量并记录重量。



图 3 高温试验电阻炉

Fig. 3 Resistance furnace for high-temperature testing

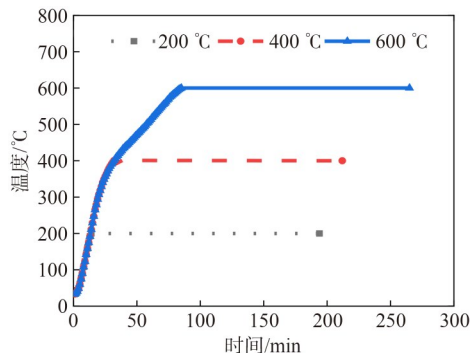


图 4 试件升温曲线

Fig. 4 Heating curves of the specimens

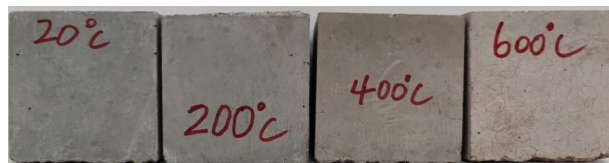
2 试验结果与分析

2.1 高温试验结果及分析

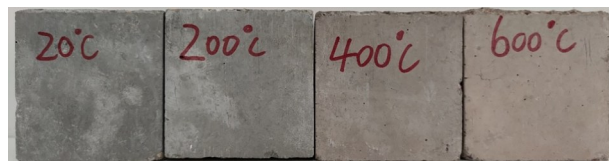
2.1.1 表观变化

两种混凝土强度等级的试件在 3 种高温作用下的表观变化,如图 5 所示。观察可发现,升温时炉口冒白烟(水蒸气),温度达 288 °C 后大量白烟冒出,在炉门外壁凝结成水滴。本文浇筑的高强地聚物混凝土常温状态下试块呈青色;试件在 200 °C 时,颜色略微变浅,为青灰色,表面无裂纹。当试块经历 400 °C 高温后,表面颜色继续变浅,呈现青黄色,表面出现微裂纹。当试块达到 600 °C 高温后,表面呈淡黄色,试块表面裂纹明显。随着温度升高,试件表观颜色逐渐

由青灰色变浅为淡黄色。由于本试验浇筑的混凝土为高强混凝土,没有出现其他学者^[23]观察到高强混凝土高温试验时的爆裂现象。原因可能是文献^[24-25]研究表明粉煤灰地聚物微孔的连通性较好^[24-25],这可以防止高温后孔隙蒸汽压过大发生爆裂。温度的提高可以加剧裂纹的扩展,原因可能是高温条件下地聚物胶凝基体收缩,而骨料受热逐渐分解导致体积膨胀,两者逐渐剥离而产生裂纹。



(a) HGPC-70



(b) HGPC-80

图 5 高强地聚物混凝土高温前后表观

Fig. 5 Appearance of high-strength geopolymer concrete before and after exposure to elevated temperatures

2.1.2 质量变化

高强地聚物混凝土在高温作用前后试件的质量情况不一致。使用指标质量损失率(δ)进行评价,其计算方法如式(1)。

$$\delta = \frac{m_{20} - m_T}{m_{20}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{20} 为常温下试件的质量; m_T 为高温下试件的质量, T 分别为 200, 400, 600 °C。为了更直观分析高温后质量损失率与温度的关系,绘制不同高温后质量损失率与温度关系见图 6。可知,随着温度升高,两种强度等级高强地聚物混凝土质量损失率都增大,且逐渐接近,后期增大速率逐渐减小,当温度为 600 °C 时,质量损失率几乎相等,约为 6.8%。

2.2 立方体单轴抗压试验结果及分析

不同高温后立方体试块单轴抗压破坏形态如图 7 所示。由于立方体试块上下表面与接触的加载板有摩擦力,试块中部无侧向约束,所有试块破坏形态都呈正倒相接的四角锥形,与普通混凝土破坏时相似。对于 20 °C 及 200 °C 高温的混凝土试块,接近峰值荷载时可以听见产生裂纹的声音,达到最大荷载时有“嘭”的一声,并有小碎块弹出,裂缝几乎完全贯穿粗骨料;

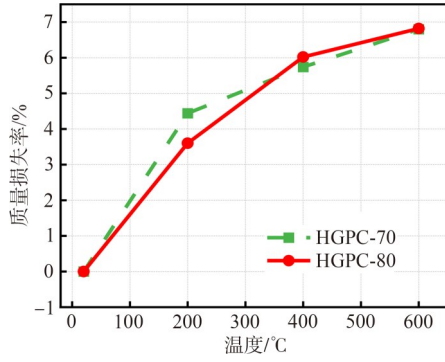


图6 质量损失率随温度变化

Fig. 6 Mass loss rate varies with temperature

400 °C高温后的混凝土试块,破坏时部分粗骨料破坏;对于600 °C高温后的试件,因为高温对砂浆和骨料间的界面过渡区损伤较为严重,导致仅少部分粗骨料破坏,多为粗骨料与地聚物基体黏结界面破坏。

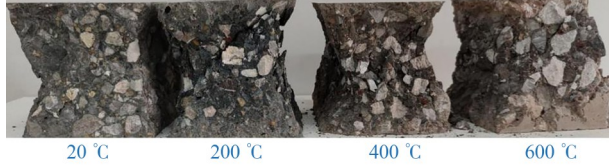


图7 不同高温后单轴压破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimens under uniaxial compression after exposure to different elevated temperatures

图8展示了立方体抗压强度随温度的变化规律。可知,随着温度的升高,两种高强地聚物混凝土强度均逐渐降低。这可能是因为地聚物胶凝材料与骨料高温时的变形不协同,造成高温后的损伤。地聚物具有较水泥更好的耐高温性能,在高温时地聚物材料收缩,石灰石在高温时会膨胀,导致地聚物基体与骨料黏结的界面过渡区在高温后出现损伤,混凝土抗压强度降低。为了直观分析高温对立方体抗压强度的影响,绘制了高温后剩余抗压强度(即抗压强度与常温时抗压强度的比值 f_{cu}^T/f_{cu}^{20})随温度的变化曲线,如图9所示。可发现:两种强度等级混凝土的抗压强度随温度升高时的下降规律相似,20~200 °C时下降相对缓慢,200 °C高温后 HGPC-70 和 HGPC-80 剩余强度分别为 20 °C 时的 0.86 和 0.84;400 °C 高温后抗压强度均为常温时的 0.59;600 °C 高温后剩余抗压强度约为常温时的 0.39。

为了定量分析高温对高强地聚物混凝土的抗压强度的影响,通过回归分析建立 f_{cu}^T/f_{cu}^{20} 与温度的关系式, f_{cu}^T/f_{cu}^{20} 与温度近似呈线性关系,采用线性方程进行回归,得式(2)。

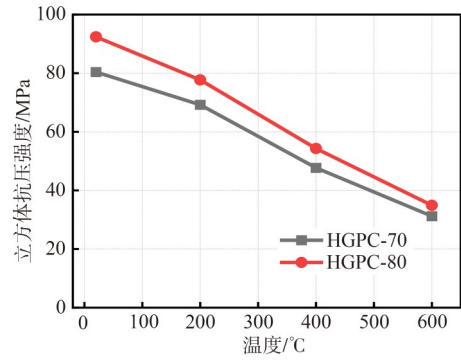
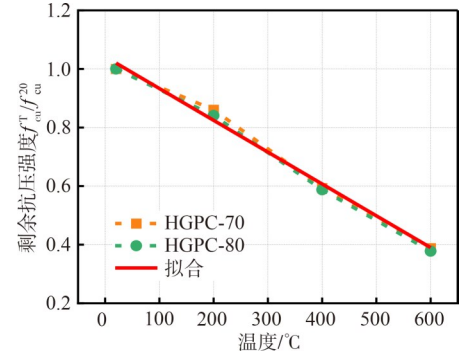


图8 抗压强度随温度变化

Fig. 8 Compressive strength varies with temperature

图9 f_{cu}^T/f_{cu}^{20} 随温度变化规律Fig. 9 f_{cu}^T/f_{cu}^{20} varies with temperature

$$f_{cu}^T/f_{cu}^{20} = 1.04215 - 1.09 \times \frac{T}{1000} \quad (2)$$

式中: T 为混凝土试件经历的最高温度。 $R^2=0.987$,表明拟合效果良好。

2.3 棱柱体轴心抗压试验结果及分析

2.3.1 应力-应变曲线及破坏模式

图10展示了棱柱体的应力-应变曲线及破坏形态,图中曲线为同组3个试件曲线的平均值。由于常温试件发生脆性破坏,没能测到有效的应力-应变全曲线下降段。可知,HGPC-70和HGPC-80混凝土棱柱体受压应力-应变全曲线随温度升高变化趋势相似,均随着温度的升高峰值应力明显降低,HGPC的峰值应变增大,应力-应变曲线上扬段斜率降低,即弹性模量逐渐降低,下降段下降速率变慢,曲线整体变得平缓。

此外,所有棱柱体受压后的破坏模式均为斜剪破坏,与普通混凝土相似,且温度越高,试件的破坏程度越明显。对于常温试件,其破坏裂缝贯穿粗骨料,这与普通混凝土裂缝沿水泥基体与粗骨料黏结界面过渡区发生破坏的情况不同。200 °C高温后的试件,破坏界面大部分粗骨料破坏,可能是由于温度引起的膨胀或水分蒸发,导致粗骨料的破坏较为

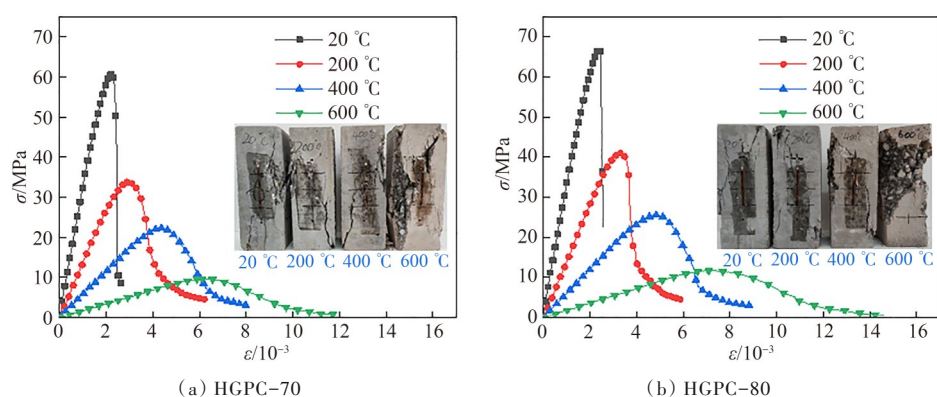


图 10 高温后高强地聚物混凝土的应力-应变及曲线破坏形态

Fig. 10 Stress-strain curves and curve failure patterns of high-strength geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures

明显;随着温度升高,破坏界面贯穿粗骨料的比例越来越少,到600 °C高温后,大部分破坏界面发生在水泥基体与粗骨料黏结界面的过渡区。上述情况表明,随着温度升高,混凝土的破坏模式逐渐从粗骨料本身的破坏转向水泥基体与粗骨料黏结界面过渡区的破坏,相比于粗骨料,地聚物基体的热稳定性在高温下受到了更大的影响。

2.3.2 峰值应力分析

混凝土的棱柱体抗压强度的最大值称为轴心抗压强度 f_c ,对应图 10 中应力-应变曲线的峰值应

力。从图 10 提取数据绘制了棱柱体轴心抗压强度随温度变化曲线,如图 11 所示。可知,轴心抗压强度随着温度升高呈现不同程度降低。经历 200 °C 高温时 HGPC-70 和 HGPC-80 混凝土峰值应力降到只有常温时的 54.7% 和 60.5%;200 °C 之后相对剩余抗压强度随温度的升高近乎线性下降,降至 $0.16f_c^{20}$ 。从图 11(b) 可以看出,剩余轴心抗压强度随温度升高的下降速率先快后慢,呈非线性关系。与前文立方体抗压试验获得两者呈线性关系的结果存在明显差异。

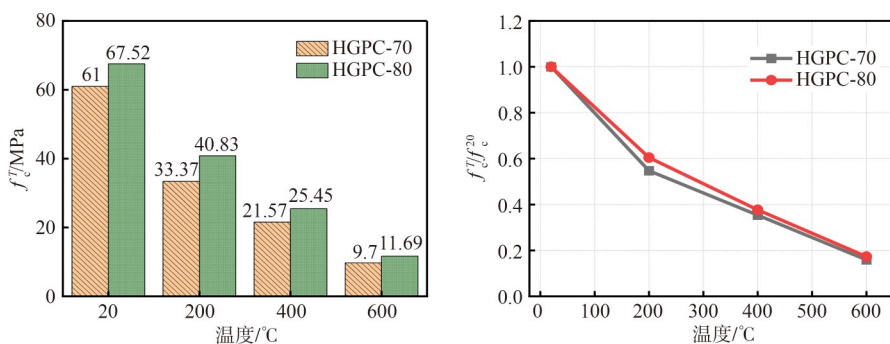
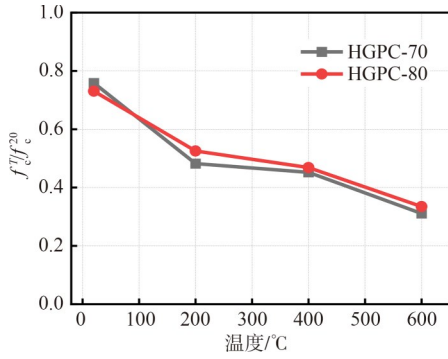


图 11 不同温度下的轴心抗压强度

Fig. 11 Axial compressive strengths at different temperatures

高温后棱柱体抗压强度 f_c^T 与立方体抗压强度 f_{cu}^T 的比值 f_c^T/f_{cu}^T 随温度变化规律,见图 12。可知,随着温度升高, f_c^T/f_{cu}^T 在不断减小,常温下本文 HGPC-70 和 HGPC-80 高强地聚物混凝土 f_c/f_{cu} 分别为 0.76 和 0.73,低于普通混凝土的 0.78~0.88。国内相关科研机构对立方体抗压强度 62~88 MPa 的高强混凝土进行立方体单轴抗压试验和轴心抗压试验^[26],得到 f_c/f_{cu} 分别为 0.821, 0.839, 0.873,均高于本文试验结果。混凝土标准立方体单轴抗压强度试验中,混凝土立方体试件在受压的同时还会受到传力钢板

的横向约束作用,使得混凝土立方体单轴抗压强度高于棱柱体轴心抗压强度,所以 f_c/f_{cu} 在一定程度上反映了试件端部横向约束对抗压强度的影响。本文试验 f_c/f_{cu} 小于普通混凝土和硅酸盐水泥高强混凝土,且随温度升高 f_c/f_{cu} 不断降低。由此可以得到横向约束对高强地聚物混凝土抗压强度的提升作用较普通混凝土和高强混凝土更显著,对于高温后的高强地聚物混凝土,横向约束对抗压强度的增强效果更加明显。

图12 $f_c^T/f_c^{T_{20}}$ 随温度变化规律Fig. 12 $f_c^T/f_c^{T_{20}}$ varies with temperature

2.3.3 应力-应变本构关系

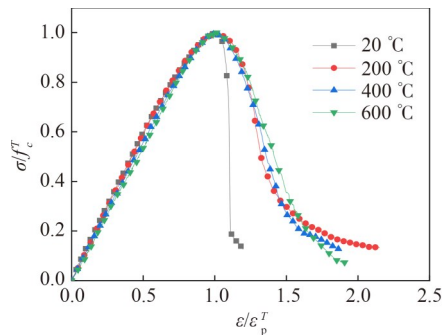
高温后高强地聚物混凝土受压应力-应变关系可以评估高温损伤后混凝土结构的力学性能。将高温前、后高强地聚物混凝土应力-应变曲线归一化,如图13所示。

可知,高温后应力-应变曲线上升段形状与常温时几乎重合,下降段常温时为脆性破坏,高温后脆性降低,曲线变平缓,与普通混凝土相似。因此,对于高温后高强地聚物混凝土,采用与常温时混凝土相同的应力-应变本构模型。参考Yang等^[27]建立的高温损伤后再生混凝土应力-应变表达式,本文棱柱体轴心受压应力-应变关系采用式(3)表示,该模型考虑损伤力学的概念引入损伤参数。

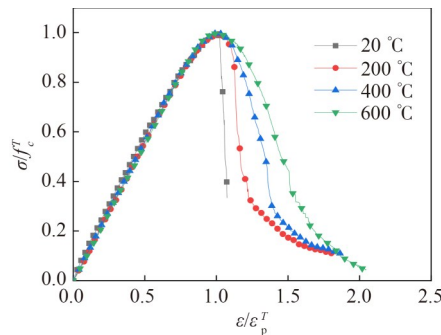
$$\sigma = (1 - D^T) E_c \varepsilon \quad (3a)$$

$$D^T = \begin{cases} 1 - \frac{n\rho_c}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{a_c(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3b)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_p}{E_c \varepsilon_p - f_c} \quad (3c)$$



(a) HGPC-70



(b) HGPC-80

图13 归一化的应力-应变曲线

Fig. 13 Normalized stress-strain curves

$$\rho_c = \frac{f_c}{E_c \varepsilon_p} \quad (3d)$$

其中 $x = \varepsilon/\varepsilon_p$

式中: ε 为压应变; ε_p 为峰值应变; E_c 为弹性模量; D^T 为不同温度下的损伤参数; σ 为应力; f_c 为峰值应力; a_c 和 n 分别为应变-应力曲线的形状参数,通过 Origin 软件对本次试验的应力-应变曲线拟合得到。其中,参数 n 控制应力-应变模型上升段的形态,参数 a_c 决定下降段的变化特征。高温前后 n 和 a_c 的值见表5。

表5 高温前后 n 和 a_c 的值Table 5 Values of n and a_c before and after exposure to elevated temperatures

参数	HGPC-70				HGPC-80			
	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C
n	5.793	6.687	9.743	14.516	5.860	11.258	9.022	11.731
a_c	—	11.481	11.744	9.937	—	31.515	14.643	8.703
R^2	—	0.970	0.958	0.933	—	0.963	0.945	0.911

将表5中 n 和 a_c 的值代入式(3c)和式(3d)得到高温前、后高强地聚物混凝土单轴受压本构方程,将各高温后的本构方程与试验数据对比,绘制图14。可知,本文所建立的高温后高强地聚物混凝土单轴受压本构方程与试验数据吻合较好。可以作为高温后高强地聚物混凝土受压应力-应变本构关系。

图15为不同高温后 HGPC-70 混凝土和 HGPC-80 混凝土损伤参数 D^T 与应变 ε 的关系,由于常温时试件未能测到有效的下降段,所以没有绘制常温时试件的损伤参数与应变关系曲线。对比图中不同高温后的参数曲线可知,当损伤参数 D^T 相同时,经历温度更高的高强地聚物混凝土应变更大,这与峰值应变随温度升高而增大的规律一致。

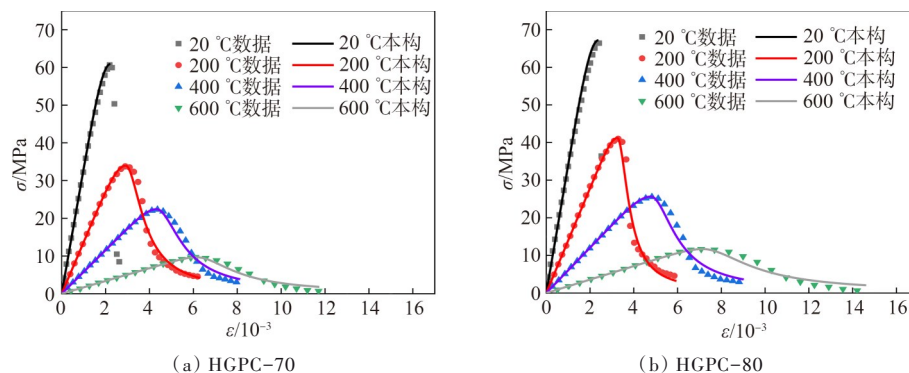


图 14 本构方程与试验数据对比

Fig. 14 Comparison of the constitutive equation with the experimental data

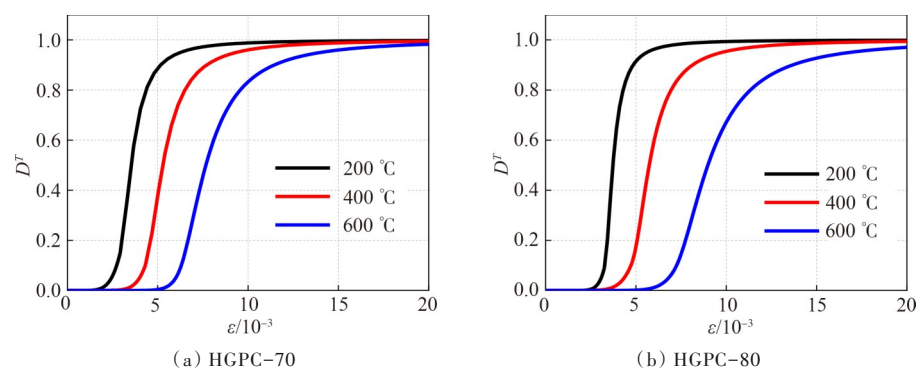


图 15 不同高温后损伤参数与应变关系

Fig. 15 Relations between damage parameters and strains after exposure to different elevated temperatures

3 结 论

1) 高强地聚物混凝土的表观颜色随温度升高逐渐变浅,由常温时的青灰色向 600 °C 高温后的浅黄色变化,且表观裂纹越发明显。温度升高加剧了试件质量的损失,温度为 600 °C 时 HGPC-70 和 HGPC-80 的质量损失率均为 6.8%。

2) HGPC 轴压试验的破坏形态表现出显著的温度依赖性:在常温下,破坏裂缝几乎完全贯穿粗骨料,而随温度升高,粗骨料的破坏程度逐渐减弱,破坏模式逐步向粗骨料与地聚物基体之间的界面过渡区转移,这表明高温环境显著影响界面过渡区的损伤程度,成为控制 HGPC 力学性能劣化的关键因素。

3) HGPC 立方体单轴抗压强度随温度升高逐渐降低,通过回归拟合得到剩余相对单轴抗压强度 (f_{cu}^T/f_{cu}^{20}) 与温度基本呈线性下降,600 °C 时仅为常温时的 0.39,同时建立了以温度为变量的高温后剩余相对单轴抗压强度拟合式,拟合效果良好。

4) HGPC 棱柱体的轴心抗压强度和弹性模量随温度升高呈下降趋势,200 °C 时其轴心抗压强度已降至常温值的约 60%。此外, HGPC 的 f_c^T/f_{cu}^T 均低于

普通混凝土和普通高强混凝土,且温度升高, f_c^T/f_{cu}^T 进一步降低。通过高温后高强地聚物混凝土力学特征分析,建立了考虑损伤参数的受压应力-应变本构关系,模型预测曲线与实测应力-应变曲线吻合良好。

参 考 文 献

- [1] CCA 数字水泥网-水泥行业的信息资讯平台. 2024 年中国水泥经济运行及 2025 年展望[EB/OL]. [2025-08-17]. <https://www.crcement.com.hk/IndustryInformation/2025-08-07/1920441.html?flag=1>.
- [2] MURALI G. Recent research in mechanical properties of geopolymer-based ultra-high-performance concrete: a review [J]. Defence Technology, 2024, 32(2): 67-88.
- [3] 万聪聪, 姜天华. 高性能地聚物混凝土早期收缩特性[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 952-964.
- [4] YANG H F, LI H R, LI C H, et al. Failure criterion and damage evolution of high-strength geopolymer concrete under compression-shear composite loading after high temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2024, 450: 138686.
- [5] DAVIDOVITS J. Geopolymer cement: a review[J]. Geopolymer Institute, Technical Papers, 2013, 21: 1-11.
- [6] YANG H F, YANG Q M, LUO J H. Shear strength and failure

- criterion of geopolymer coral aggregate concrete under compression-shear loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76:107241.
- [7] 彭晖,杜运兴. 地聚物混凝土的抗剪性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(3):102-109.
- [8] LI Y, SHEN J L, LIN H. Optimization design for alkali-activated slag-fly ash geopolymer concrete based on artificial intelligence considering compressive strength, cost, and carbon emission [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75: 106929.
- [9] GEBREGZIABIHER B S, THOMAS R, PEETHAMPARAN S. Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55:91-102.
- [10] EI-SAYED H A, ABO E-E S A, KHATER H M, et al. Resistance of alkali activated water-cooled slag geopolymer to sulphate attack[J]. *Ceramics-Silikáty*, 2011, 55(2):153-160.
- [11] NATH P, SARKER P K. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 66:163-171.
- [12] MUSTAKIM S M, DAS S K, MISHRA J, et al. Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica[J]. *Silicon*, 2021, 13:2415-2428.
- [13] BEHFARNIA K, ROSTAMI M. Effects of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131:205-213.
- [14] SANI M F A A, MUHAMAD R, MO K H. Effect of ground granulated blast furnace slag as partial replacement in fly ash-based geopolymer concrete[C]//*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Materials Science and Engineering. Bristol, UK:IOP Publishing, 2020:12002-12008.
- [15] 国家消防救援局. 2023年上半年全国日均火灾超3000起[EB/OL]. [2023-07-17]. <https://www.119.gov.cn/qmxfkg/sjtj/2023/38420.shtml>.
- [16] 王升旭,苗吉军,刘家良,等. 高温水冷却后混凝土力学性能研究进展[J]. *混凝土*, 2024(6):63-70.
- [17] DONG J F, LIU Y C, XU Y, et al. Investigating the structural behaviour of double-skin steel tubes filled with basalt fibre reinforced recycled aggregate concrete under high temperature [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 100:111782.
- [18] 李忠友,刘元雪,姚志华,普通硅酸盐混凝土高温性能劣化分析模型[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(2):229-235.
- [19] 赵东拂,高海静,贾朋贺,等. 高强混凝土经不同高温历程后性能劣化研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(4):240-248.
- [20] 赵子诚,赵晖,李世强,等. 火灾下钢-混凝土组合墙抗爆机理分析与变形预测[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(10):87-102.
- [21] 中国建筑材料联合会. 建设用碎石、卵石: GB/T 14685—2011 [S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [22] 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: GB/T 50087—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [23] 柳献,袁勇,叶光,等. 高性能混凝土高温爆裂的机理探讨[J]. *土木工程学报*, 2008(6): 61-68.
- [24] KONG D L Y, SANJAYAN J G, SAGOE-CRENTSIL K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1583-1589.
- [25] LAHOTI M, WONG K K, TAN K H, et al. Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure [J]. *Materials & Design*, 2018, 154: 8-19.
- [26] 李家康,王巍. 高强混凝土的均匀受压强度试验分析[J]. *土木工程学报*, 1995(5): 76-79.
- [27] YANG H F, LYU L S, DENG Z H, et al. Residual compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures [J]. *Structural Concrete*, 2017, 18(3): 479-486.