

陶瓷粉对碱激发UHPC高温性能的影响研究

潘锡发

湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月9日; 发布日期: 2026年5月19日

摘要

本研究将陶瓷粉应用于碱激发UHPC体系, 用废弃陶瓷粉以10%、20%和30%的质量分数等量替代矿粉, 从宏观角度初步探讨了陶瓷粉对碱激发超高性能混凝土(UHPC)高温性能的影响。研究通过对试样在经历200°C、400°C、600°C和800°C高温处理后的外观形貌、质量损失和残余抗压强度进行系统性测试, 旨在揭示陶瓷粉的作用规律与机制。研究发现, 掺入陶瓷粉能有效提升碱激发UHPC的高温稳定性, 减轻表面损伤并降低质量损失。其中, 20%掺量的陶瓷粉试样在高温后表现出最优的综合力学性能, 在600°C和800°C下的残余抗压强度分别达到了86.25 MPa和77.50 MPa。研究认为, 陶瓷粉通过物理填充和潜在的火山灰反应, 生成了更耐热的物相, 从而改善了材料的高温性能。

关键词

陶瓷粉, 碱激发UHPC, 高温性能, 残余抗压强度, 质量损失

Research on the Influence of Ceramic Powder on the High-Temperature Performance of Alkali-Activated UHPC

Xifa Pan

School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: April 18, 2026; accepted: May 9, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

This study investigated the application of ceramic powder in an alkali-activated UHPC system, replacing mineral powder with waste ceramic powder at mass fractions of 10%, 20%, and 30% on a weight-for-weight basis. From a macroscopic perspective, the study preliminarily examined the influence of ceramic powder on the high-temperature performance of alkali-activated ultra-high-

performance concrete (UHPC). Through systematic testing of the specimens surface morphology, mass loss, and residual compressive strength after high-temperature treatment at 200°C, 400°C, 600°C, and 800°C, the study aimed to reveal the behavior patterns and mechanisms of ceramic powder. The results showed that the incorporation of ceramic powder effectively enhances the high-temperature stability of alkali-activated UHPC, reduces surface damage, and minimizes mass loss. Specifically, specimens containing 20% ceramic powder exhibited the best overall mechanical properties after high-temperature treatment, with residual compressive strengths of 86.25 MPa and 77.50 MPa at 600°C and 800°C, respectively. The study suggests that ceramic powder generates more heat-resistant phases through physical filling and potential pozzolanic reactions, thereby improving the material's high-temperature performance.

Keywords

Ceramic Powder, Alkali-Activated UHPC, High-Temperature Performance, Residual Compressive Strength, Mass Loss

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国作为世界陶瓷生产大国，在陶瓷制品冷加工、运输及拆除过程中产生大量废料。这些废料多以露天堆放或填埋方式处理，不仅占用土地资源，也对生态环境构成威胁[1]。陶瓷粉主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ，因经过高温煅烧而具备潜在火山灰活性。将其回收利用作辅助胶凝材料，符合资源节约与环境友好的发展要求。刘建等[2]指出，采用陶瓷骨料可提升碱激发 UHPC 的韧性。部分研究发现，随着陶瓷粉掺量增加，材料抗压强度总体呈下降趋势[3]，这归因于活性钙组分减少导致胶凝产物生成量下降。也有研究证实，废陶瓷粉在碱性激发下可呈现化学活性，并非惰性填料[4] [5]。

已有研究表明陶瓷粉的火山灰活性高度依赖温度条件，常温下反应缓慢，热养护下活性可被有效激发[6]。关于陶瓷粉对碱激发 UHPC 性能，尤其是高温性能的影响规律及内在机理，目前尚缺乏系统的实验数据和理论阐释。本文旨在系统研究不同陶瓷粉掺量对碱激发超高性能混凝土在高温作用后的力学性能、热稳定性的影响，揭示其作用机制，为陶瓷粉在低碳高性能建筑材料中的高值化应用提供理论依据。

2. 实验

2.1. 原材料

本试验采用的原料包括：S95 矿粉、一级粉煤灰、硅灰、陶瓷粉、石英砂、碱性激发剂和水。选用的硅灰粒径为 $0.1\sim 0.26\ \mu\text{m}$ ，石英砂粒径在 80~120 目之间，陶瓷粉为废弃陶瓷砖经破碎、碾磨、筛分得到，最大粒径 $\leq 0.05\ \text{mm}$ 。碱性激发剂由水玻璃溶液、固体 Na_2SiO_3 和水按照一定比例混合而成，此外采用液态聚羧酸高效减水剂调节浆料的流动性。

2.2. 配合比与制备工艺

2.2.1. 混凝土配合比设计

本试验强度测试设计 1 个基准组和 3 个试验组，试验组以陶瓷粉分别按 10%、20%、30% 的质量替代率，等量替代矿粉，钢纤维添加量为 2%。为控制变量，所有配比的总胶凝材料质量、碱激发剂用量、

水胶比、砂胶比保持一致。具体变量设计如表 1、表 2 所示：

Table 1. Variable design of experimental mix proportions (kg/m³)

表 1. 实验配合比变量设计(kg/m³)

Na ₂ SiO ₃	水玻璃	硼酸	水	减水剂
138.6	205.7	72.93	55.44	134.2

Table 2. Variable design of concrete mix proportions (kg/m³)

表 2. 混凝土实验配合比变量设计(kg/m³)

组别编号	矿粉	粉煤灰	硅灰	石英砂	陶瓷粉
GGBS-C0	1108.69	277.2	72.93	583.55	0
GGBS-C10	997.821	277.2	72.93	583.55	110.87
GGBS-C20	886.95	277.2	72.93	583.55	221.74
GGBS-C30	776.08	277.2	72.93	583.55	332.61

注：“GGBS”表示矿粉，“C”表示陶瓷粉，例如 GGBS-C10 表示陶瓷粉替代矿粉量为 10%。

2.2.2. 制备与养护

将矿粉、粉煤灰和硅灰倒入混合器中，低速搅拌 4 min，接着加入陶瓷粉并继续低速搅拌 4 min。然后分三次加入石英砂，每次搅拌 2 min，保持低速。最后，加入碱性激发剂并以高速搅拌 7 min，以确保混合物的流动性。搅拌完成后，将砂浆倒入模具中进行振捣，并用保鲜膜覆盖，静置 24 h 后脱模。本研究采用蒸汽养护条件，在 85℃ 下蒸汽养护 24 h [7]。

2.3. 测试方法

2.3.1. 流动性

本试验按 GB/T 2419-2005 《水泥胶砂流动度测定方法》[8]测试砂浆流动性。

2.3.2. 温度加速度

高温试验采用如高温电阻炉进行，升温过程严格按照预设制度执行升温速率 10℃/min 预设制度执行，目标温度分别设置 200℃、400℃、600℃、800℃。达到目标温度后保持恒温 2 h，确保试件内部温度与炉温一致，水化产物充分反应、热作用完全。

质量损失(w)由下式(1)计算：

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

式中， m_{20} 为试样在 20℃ 时的质量； m_T 为高温后的质量。

2.3.3. 抗压强度测试

将根据配合比制作的浆体倒入 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 模具的立方体模具中，静置 24 小时后脱模。脱模后将试件置于 85℃ 的蒸汽环境中养护 24 小时。试件的强度测试按 GB/T 17671-2020 《水泥胶砂检验方法》[9]，加载速率控制在 0.5 MPa/s，记录试件破坏时的压强。

3. 结果与讨论

3.1. 流动性

测定了不同陶瓷粉掺量下碱激发 UHPC 新拌浆体的初始流动度，结果如图 1 所示。GGBS-C0 砂浆的

直径为 162 mm, GGBS-C10 砂浆的直径为 170 mm, GGBS-C20 砂浆的直径为 162 mm, GGBS-C30 砂浆的直径为 175 mm。当陶瓷粉掺量为 10%时, 流动度较基准组有所提高, 较基准组提高了约 5%; 当掺量继续增加至 20%时, 流动度反而下降, 但仍接近于基准组水平; 当陶瓷粉掺量为 30%时, 较基准组提高了约 8%。这一变化规律表明, 陶瓷粉对碱激发 UHPC 流动性的影响具有复杂的“掺量依赖性”。

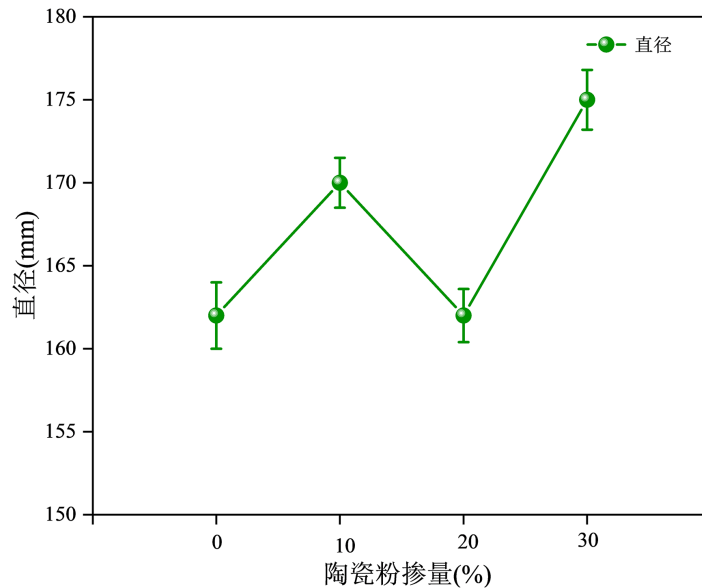


Figure 1. Mortar fluidity
图 1. 砂浆的流动性

陶瓷粉对碱激发 UHPC 流动性的影响是多种因素共同作用的结果, 主要包括物理填充效应、颗粒形貌效应、吸水特性和表面化学性质等。当陶瓷粉掺量为 10%时, 其与矿粉、硅灰、粉煤灰形成的多元复合体系可能达到了较好的颗粒级配状态, 因此流动性改善。当掺量为 20%时, 吸水效应的负面影响逐渐显现, 导致流动度下降; 当陶瓷粉掺量达到 30%时, 陶瓷粉的活性低于矿粉, 其掺入会稀释体系中的活性组分, 延缓早期水化反应速率。

3.2. 温度升高后外观和重量的变化

3.2.1. 高温后外观形貌及损伤特征影响

200℃外观特征如图 2(a)和图 2(b)所示。各组试件外观差异不明显, 整体完整性良好。表面色泽与常温状态几乎一致, 平整光滑, 表面无裂缝、无剥落, 边角保持锐利, 整体结构密实, 仅呈现轻微干燥感, 未出现任何实质性热损伤迹象。200℃低温作用下, 各组试件均未出现明显热损伤, 陶瓷粉的掺入对低温外观形貌无不利影响, 所有试件均保持完整结构。

400℃外观特征如图 2(c)和图 2(d)所示。GGBS-C0 与 GGBS-C10 试件整体颜色由常温下的深灰色变为均匀灰白色, 表面呈现明显的干燥脱水状态, 试件边角部位出现轻微酥松现象, 棱角依旧完整。GGBS-C20 与 GGBS-C30 试件外观近乎无明显损伤, 表面平整致密且色泽均匀, 仅颜色略浅于常温状态, 无任何酥松、剥落迹象, 棱角清晰挺拔, 结构完整性与常温试件相差无几, 充分体现陶瓷粉在中温环境下对基体的保护作用, 有效抑制了热应力引发的裂缝萌生与扩展, 维持了基体结构完好性。400℃中温作用下, 陶瓷粉替代矿粉可有效减轻碱激发 UHPC 热损伤, 提升基体体积稳定性, 且替代比例越高, 外观完整性越好。



Figure 2. Appearance before and after high-temperature treatment
图 2. 高温前后外观形貌

从图 2(e)和图 2(f)可以看出 600°C 各组试件损伤程度明显加重。GGBS-C0 试件整体颜色变深, 表面出现多条明显裂缝, 部分裂缝相互贯通, 将基体分割为若干较大块体。边角部位出现轻度酥松与局部掉角现象, 但尚未出现大面积剥落或结构溃散, 整体完整性虽受严重破坏, 但仍维持基本形状, 表明矿粉碱激发体系在 600°C 下已接近失效临界点。GGBS-C10 试件高温损伤程度较基准组明显减轻。表面颜色均匀, 存在少量细微裂缝, 裂缝宽度小且未形成贯通网络, 边角基本完整, 无块状剥落, 仅局部区域有轻微酥松感。整体结构保持良好, 外形规整, 未出现基体分割或崩解迹象, 陶瓷粉的耐高温保护作用开始凸显。GGBS-C20 与 GGBS-C30 试件表面平整, 几乎无可见裂缝, 仅个别微小细纹, 无连通趋势。边角完整锐利, 无酥松、掉渣、剥落等现象, 整体色泽均匀, 结构致密, 充分证明高掺量陶瓷粉在 600°C 高温下仍能有效抑制裂缝产生与扩展, 维持基体结构稳定。

800°C 外观形貌如图 2(g)和图 2(h)所示。GGBS-C0 与 GGBS-C10 试件表面颜色变为深蓝色, 整体色泽不均匀。GGBS-C20 与 GGBS-C30 试件依旧保持良好结构形态, 表面几乎无裂缝, 无连通、扩展趋势, 整体表面平整致密, 无剥落、起皮、掉角等损伤, 外形规整、棱角分明, 未出现任何酥松溃散现象, 极端高温下仍具备稳定的结构形态, 展现出极强的耐高温抗损伤能力。

3.2.2. 高温质量损失规律影响

由图 3 可知, 所有试件的质量损失均随温度升高而显著增加, 这与碱激发 UHPC 在高温下自由水蒸发、C-(A)-S-H 凝胶等水化产物分解以及部分碳酸盐脱碳的过程相符。但不同陶瓷粉掺量下的质量损失表

现出明显差异, 在 200℃时, GGBS-C10 损失最大较基准提高 21%, GGBS-C20 损失最小较基准组降低 22%。该温度下主要发生自由水及物理结合水的逸出, 陶瓷粉自身吸附水及微孔结构对水的保持能力可能是造成非单调变化的原因。

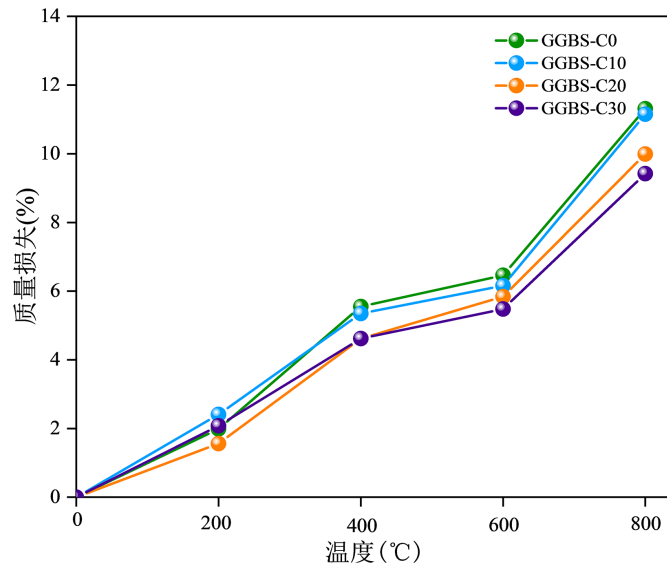


Figure 3. Mass loss after high-temperature treatment at different ceramic powder loading levels

图 3. 不同陶瓷粉掺量高温后质量损失

当温度升高至 400℃、600℃及 800℃时, 质量损失随陶瓷粉掺量增加呈单调下降趋势, 且掺量越高, 降低幅度越明显。400℃时, GGBS-C0、GGBS-C10、GGBS-C20、GGBS-C30 的质量损失分别为 5.55%、5.35%、4.62%、4.62%。GGBS-C20 和 GGBS-C30 较基准组降低约 16.8%, 而 GGBS-C10 仅降低 3.6%; 600℃时, 损失值依次为 6.46%、6.16%、5.84%、5.48%。GGBS-C30 较基准降低 15.2%, GGBS-C20 降低 9.6%, GGBS-C10 降低 4.6%; 800℃时, 损失值分别为 11.31%、11.15%、9.99%、9.42%。GGBS-C30 降低 16.7%, GGBS-C20 降低 11.7%, GGBS-C10 仅降低 1.4%。

在 400℃以上高温区间, 陶瓷粉的掺入可有效抑制碱激发 UHPC 的质量损失, 且掺量越高, 改善效果越显著。这主要归因于以下几个方面: 陶瓷粉本身经高温烧结(通常>1000℃)而成, 在 400℃~800℃范围内热稳定性高, 其替代部分碱激发胶凝材料后, 体系内可分解的水化产物总量减少; 陶瓷粉的微集料填充作用使基体更加致密, 高温下微裂缝扩展受阻, 分解产物逸出通道减少; 在碱激发环境中, 陶瓷粉表面可能参与反应生成更耐高温的沸石类或长石类矿物, 进一步抑制质量损失。

3.3. 立方体抗压强度

测定了不同掺量试件经 200℃、400℃、600℃、800℃高温处理后的残余抗压强度如图 4 所示。

所有试件的残余抗压强度均随处理温度升高而逐渐降低, 但不同陶瓷粉掺量的下降幅度和相对排序存在明显差异。200℃各掺量强度较初始略有下降, 但降幅较小(约 5%~15%)。GGBS-C20 仍保持最高残余抗压强度, GGBS-C0 最低, 该温度下主要发生自由水蒸发, 对结构损伤有限; 400℃残余强度进一步下降。GGBS-C0 和 GGBS-C10 分别降至 93.5 MPa 和 93.0 MPa, 降幅明显。而 GGBS-C20 和 GGBS-C30 分别保留 107.0 MPa 和 105.0 MPa, 显著高于基准组。GGBS-C20 较基准组提高 14.4%, GGBS-C30 提高 12.3%。这表明在 400℃时, 陶瓷粉的掺入能有效抑制水化产物分解导致的强度损失; 600℃基准组和

GGBS-C10 强度分别降至 71.8 MPa 和 72.6 MPa, 下降幅度较大。GGBS-C20 仍保持 86.25 MPa, 为所有掺量中最高, 较基准组提高 20.1%。GGBS-C30 为 75.8 MPa, 略高于基准组但低于 GGBS-C20, 可见 GGBS-C20 在 600℃ 时表现出最佳的耐高温性能; 800℃ 基准组强度仅剩 52.4 MPa, 损失约 60%。GGBS-C10 为 68.45 MPa, GGBS-C30 为 64.8 MPa, 而 GGBS-C20 仍保有 77.5 MPa, 较基准组提高 47.9%, 成为最优掺量。这说明 20% 陶瓷粉掺量能够显著改善碱激发 UHPC 在极端高温下的结构稳定性。

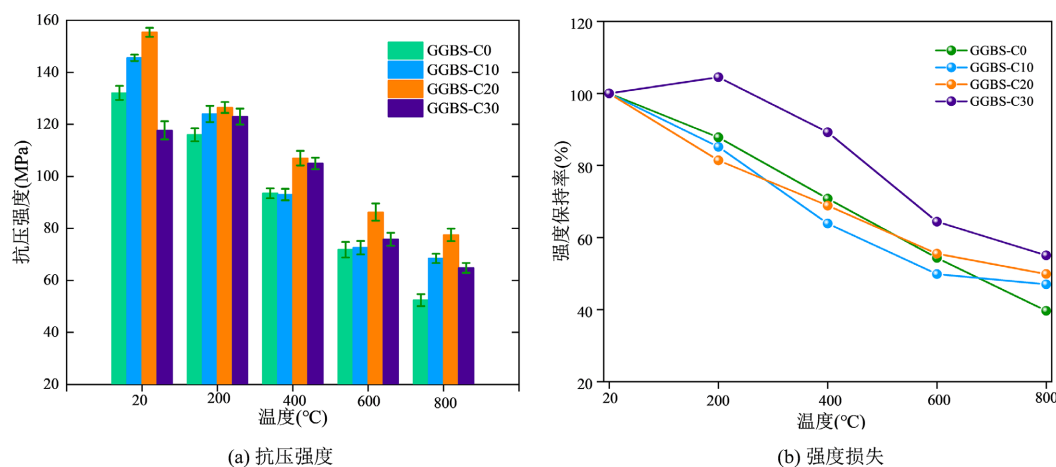


Figure 4. Compressive strength of the cube after high-temperature treatment
图 4. 高温后的立方体抗压强度

GGBS-C30 在 200℃ 时的强度保持率超过 100% (104.5%), 这可能是因为高温促进了陶瓷粉与碱激发体系的进一步反应(如火山灰效应)。在 400℃~800℃ 区间, GGBS-C30 的强度保持率始终高于其他掺量, 表明其残余强度相对初始值下降最慢。GGBS-C20 虽保持率略低于 GGBS-C30, 但其绝对强度在 600℃ 和 800℃ 均最高。

陶瓷粉掺量对碱激发 UHPC 高温残余强度的影响具有显著的非单调性, GGBS-C20 在绝大多数温度下均表现出最优的绝对强度。20% 陶瓷粉掺量可优化颗粒级配, 降低初始孔隙率, 减少高温下裂缝扩展通道, 从而保持较高残余强度。陶瓷粉本身经高温烧结, 在 800℃ 以下几乎不分解, 其替代部分易分解的碱激发胶凝材料后, 体系内可脱水相减少, 结构骨架更稳定。在碱激发环境中, 陶瓷粉表面可能参与反应生成耐高温的沸石类矿物, 尤其在 20% 掺量时形成最佳的界面结合。30% 掺量虽在高温保持率上表现突出, 但其初始强度较低, 导致绝对强度在高温下仍低于 20% 掺量。这可能是由于 30% 陶瓷粉掺量稀释了胶凝材料, 削弱了初始水化产物网络。

3.4. 陶瓷粉改善高温性能作用机制

陶瓷粉由废弃陶瓷砖经高温烧制后破碎研磨而得, 其主要晶相(如石英、莫来石等)在 800℃ 以下几乎不发生分解或相变。当陶瓷粉替代部分矿粉后, 体系中热稳定性较差的碱激发凝胶及碳酸盐等易分解相的比例相对减少, 从而降低了高温下的总质量损失, 并为基体提供了刚性的耐热骨架。陶瓷粉颗粒粒径 ≤ 0.05 mm, 介于矿粉与硅灰之间。适量掺入可优化胶凝材料的颗粒级配, 提高堆积密度, 降低初始孔隙率。高温作用下, 致密的基体能够有效抑制微裂缝的萌生与扩展, 阻碍水蒸气及分解产物的逸出通道, 从而减轻内部热应力损伤。

陶瓷粉表面富含活性 SiO_2 和 Al_2O_3 , 在碱激发体系中可发生溶解-聚合反应, 生成沸石类或类长石矿物。这些耐高温物相在高温下分解程度远低于 C-(A)-S-H 凝胶, 从而提高了强度保持率。陶瓷粉的火

山灰活性在热养护及高温作用下被有效激发。当掺量较低时，陶瓷粉的填充和成核作用有限，改善效果不明显。掺量增至 20%时，物理与化学效应达到最佳协同，表现出最优的高温残余强度。掺量进一步增至 30%时，由于陶瓷粉对矿粉的过度稀释，初始水化产物网络减弱，初始强度下降，尽管高温保持率较高，但绝对强度仍低于 20%掺量组。20%为改善碱激发 UHPC 高温性能的最佳掺量。

3.5. 研究局限性

本研究采用了一种特定来源的陶瓷粉，不同来源、不同种类的陶瓷粉在组成和活性上存在差异。建议后续研究对比分析不同来源陶瓷粉对碱激发 UHPC 高温性能的影响，建立陶瓷粉对碱激发 UHPC 影响评价的普适性方法。

4. 结论

本文系统研究了不同陶瓷粉替代矿粉掺量(10%、20%、30%)下，碱激发 UHPC 经 200℃、400℃、600℃、800℃高温处理后的外观损伤、质量损失、残余抗压强度及失效形态变化规律，得出以下结论：

(1) 陶瓷粉可显著改善碱激发 UHPC 高温后的外观完整性。400℃时，GGBS-C0 已出现酥松变色，而 GGBS-C20 及 GGBS-C30 表面平整致密、无裂缝剥落；600℃及 800℃下，GGBS-C0 出现贯通裂缝和严重损伤，GGBS-C20、GGBS-C30 仍保持棱角完整、结构致密，耐高温抗损伤能力突出。

(2) 质量损失随温度升高而增加，400℃以上高掺量陶瓷粉可有效抑制质量损失。800℃时，GGBS-C30 质量损失较基准组降低 16.7%。

(3) 陶瓷粉掺量对高温残余强度的影响呈非单调性，20%为最优掺量。该掺量在 600℃和 800℃下残余强度分别达 86.3 MPa 和 77.5 MPa，较基准组提高 20.1%和 47.9%；GGBS-C30 虽强度保持率最高，但因初始强度偏低，绝对强度不及 GGBS-C20。

参考文献

- [1] Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2010) Reusing Ceramic Wastes in Concrete. *Construction and Building Materials*, **24**, 832-838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- [2] Liu, J., Wu, C., Liu, Z., Li, J., Xu, S., Liu, K., et al. (2021) Investigations on the Response of Ceramic Ball Aggregated and Steel Fibre Reinforced Geopolymer-Based Ultra-High Performance Concrete (G-UHPC) to Projectile Penetration. *Composite Structures*, **255**, Article ID: 112983. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112983>
- [3] Huseien, G.F., Sam, A.R.M., Shah, K.W. and Mirza, J. (2020) Effects of Ceramic Tile Powder Waste on Properties of Self-Compacted Alkali-Activated Concrete. *Construction and Building Materials*, **236**, Article ID: 117574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117574>
- [4] Hwang, C., Dantie Yehualaw, M., Vo, D. and Huynh, T. (2019) Development of High-Strength Alkali-Activated Pastes Containing High Volumes of Waste Brick and Ceramic Powders. *Construction and Building Materials*, **218**, 519-529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143>
- [5] Pommer, V., Vejmelková, E., Černý, R. and Keppert, M. (2021) Alkali-Activated Waste Ceramics: Importance of Precursor Particle Size Distribution. *Ceramics International*, **47**, 31574-31582. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.037>
- [6] Morsy, M.S., Rashad, A.M., Shoukry, H., Mokhtar, M.M. and El-Khodary, S.A. (2020) Development of Lime-Pozzolan Green Binder: The Influence of Anhydrous Gypsum and High Ambient Temperature Curing. *Journal of Building Engineering*, **28**, Article ID: 101026. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101026>
- [7] 董静. 导电碱激发珊瑚混凝土的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2023.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T2419-2005 水泥胶砂流动度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [9] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T17671-2020 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.