

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.049



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高温下方钢管地聚物混凝土短柱的轴压性能

吉森¹, 朱美春¹, 孟凡钦²

(1. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 201418; 2. 新西兰奥克兰大学 工程学院, 奥克兰 1023)

摘 要:为探究高温下方钢管地聚物混凝土短柱的轴压力学性能,以加载温度为主要试验参数,另外变化钢管外径尺寸、壁厚和钢材强度等参数,设计得到 10 个内填 C40 矿渣-粉煤灰地聚物混凝土的钢管短柱试件,通过升温试验和高温下轴压试验,测得试件在 28、200、400、600、800 °C 五种温度条件下的温度场以及力学性能,系统获取不同工况下试件的破坏形态、极限承载力与荷载-位移响应。结果表明:约束效应系数较大的试件在 200 °C 和 400 °C 时极限承载力较常温下分别提升 6% 和 9%,而约束效应系数较小的试件则略有下降,表明较强的钢管约束放大了地聚物混凝土在 200~400 °C 下的高温致密化效应;当温度升至 600 °C 及以上时,两类试件承载力均显著下降。在此基础上,利用 ABAQUS 建立顺序热-力耦合有限元模型,经试验验证,该模型能准确地模拟此类构件的热力响应。参数分析结果表明,增大约束效应系数有助于提高其高温下极限承载力。

关键词:方钢管混凝土短柱;地聚物;轴压性能;恒温加载;有限元分析;约束效应系数

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Axial compressive behavior of square geopolymer concrete-filled steel tubular stub columns under elevated temperatures

JI Sen¹, ZHU Meichun¹, MENG Fanqin²

(1. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, P. R. China; 2. Faculty of Engineering, University of Auckland, Auckland 1023, New Zealand)

Abstract: To investigate the axial compressive behavior of square geopolymer concrete-filled steel tubular (GCFST) stub columns at elevated temperatures, the target temperature was selected as the primary experimental parameter, while the outer dimensions, wall thickness, and steel strength of the steel tube were also varied. A total of 10 short-column specimens filled with C40 slag - fly ash geopolymer concrete were designed and fabricated. Elevated-temperature heating tests and axial compression tests were subsequently conducted to determine the temperature distribution and mechanical performance of the specimens at 28 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, and 800 °C. The failure modes, ultimate load-bearing capacities, and load - displacement responses under different testing conditions were systematically obtained. The experimental results indicate that for specimens with a larger confinement factor, the ultimate bearing capacity at 200 °C and 400 °C increased by 6% and 9%, respectively, compared to that at ambient temperature. In contrast, specimens

收稿日期: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(52278510)

作者简介: 吉森(1999-), 男, 主要从事组合结构抗火研究, E-mail: 22219086218@qq.com。

朱美春(通信作者), 女, 教授, E-mail: zhumeichun@shnu.edu.cn。

Received: 2026-04-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52278510)

Author brief: JI Sen (1999-), main research interest: fire resistance of composite structures, E-mail: 22219086218@qq.com.

ZHU Meichun (corresponding author), professor, E-mail: zhumeichun@shnu.edu.cn.

with a smaller confinement factor showed a slight decrease. This suggests that a stronger confining effect from the steel tube amplifies the thermal densification of the geopolymer concrete at 200-400 °C. When the temperature reaches 600 °C and above, the bearing capacity of both types of specimens drops significantly. Subsequently, a sequentially coupled thermal-stress finite element model was established using ABAQUS. Validated against the test data, the model accurately simulates the thermo-mechanical response of such components. Parametric analysis results show that increasing the confinement factor helps to enhance it.

Keywords: square concrete-filled steel tubular stub column; geopolymer; axial compressive behavior; constant-temperature loading; finite element analysis; confinement factor

钢管混凝土柱是指在钢管中填充混凝土而形成的钢-混凝土组合构件。钢管混凝土柱因适应当代工程结构向大跨、高耸、重载方向发展而得到广泛应用。目前钢管混凝土柱内填充的混凝土通常为硅酸盐水泥混凝土(Ordinary Portland Cement, 简称 OPC), 然而水泥的生产消耗大量能源并释放大 量温室气体。使用地聚物替代硅酸盐水泥用于建筑结构的制 作被认为是建筑可持续发展的一条新途径^[1]。地聚物(Geopolymer)的反应机理是具有活性的硅铝氧化物的物质通过碱性激发溶液, 使氧化物内部的硅(铝)氧键断裂, 并发生聚合反应形成硅铝四面体三维网状结构聚合物^[2]。与传统的硅酸盐水泥相比, 地聚物生产能耗和 CO₂ 排放量分别为水泥的 41% 和 20%^[3]。当地聚物原料采用粉煤灰、高炉矿渣等工业废料时, 可将工业废弃物循环利用, 进一步节能环保。使用地聚物代替硅酸盐水泥可形成地聚物混凝土(Geopolymer concrete, 简称 GPC)。

当前大力倡导节能减排、发展绿色建筑, 钢管地聚物混凝土结构的研究正受到越来越多的关注^[4-8]。耐高温是地聚物固有的特性, 因为其结构主要由强共价键(-Si-O-Al-)构成, 破坏这些化学键需要很高的能量, 因此具有很好的热稳定性。对于 GPC 而言, 由于高温下地聚物浆体和骨料之间的不相容性, 其高温性能与地聚物浆体有所不同。已有研究表明, GPC 同样具有较好的高温性能^[9-11]。鉴于此, 使用 GPC 替代钢管混凝土中的 OPC 被认为是提升钢管混凝土耐火性能的潜在途径之一。近年来, 学者开始关注钢管地聚物混凝土柱(GCFST)抗火性能, 并取得一系列研究进展。

Tao 等^[12]通过圆钢管地聚物混凝土和普通钢管混凝土短柱的抗压试验对比研究发现, 在常温下两者性能差异并不显著, 高温下钢管地聚物混凝土柱表现出更好的耐火性能; Katwal 等^[13]对不锈钢管地聚物混凝土柱进行耐火试验, 研究混凝土类型和内部钢筋的存在对其耐火性能的影响, 结果表明, 地聚物混凝土和不锈钢的组合使用能显著提高组合

柱的耐火性能; Song 等^[14]对钢管再生骨料地聚物混凝土(GRACFST)柱的火灾后性能及再生骨料地聚物混凝土(GRAC)立方体的温度场进行试验研究发现, GRACFST 柱具有良好的火灾后性能, 其残余强度指数通常在 0.83~1.11 的范围内, 并通过温度场试验的反分析建立了 GRAC 的热工性能模型; Xiang 等^[15]对经历了热-力耦合的 GRACFST 柱开展了火灾后性能数值研究, 提出了适用于该组合柱抗火设计及灾后评估的简化计算公式; Song 等^[16]通过试验和数值方法系统研究了 GRACFST 柱在压-弯-剪多荷载组合条件下的耐火性能, 结果表明, 该组合柱主要因整体弯曲而破坏, 轴压比对其耐火性能有显著影响, 并通过试验结果对有限元分析模型进行验证并开展了系统的参数分析, 在此基础上提出了多荷载组合条件下 GRACFST 耐火性能简化计算方法。

现有钢管地聚物混凝土柱的耐火性能研究以恒载升温路径为主, 而关于恒温加载路径下构件力学行为的探讨较为有限。恒载升温试验是评估构件耐火极限的标准方法, 而恒温加载试验则常用于研究材料及构件在特定温度下的本构关系; 恒温加载试验能够提供不受瞬态热效应干扰的高温力学性能基准数据, 从而有助于更准确地评估材料和构件在不同热-力路径下的性能表现, 包括高温下钢管和核心混凝土之间相互作用的分析。韩林海^[17]指出, 高温下钢管混凝土轴压构件的工作存在着钢管及其核心混凝土之间的相互作用问题, 在进行钢管混凝土结构的研究时应充分考虑这个因素。但之毅等^[18]对圆钢管地聚物混凝土短柱的恒温加载试验表明, 200 °C 和 400 °C 恒温加载后的试件极限强度较常温时有所提升, 这与传统钢管普通混凝土柱的表现存在差异^[17], 原因可能包括特定温度下地聚物混凝土强度的回升, 以及高温下钢管和地聚物混凝土之间的相互作用的影响。Dai 等^[19]研究了截面形式对高温下钢管混凝土柱轴向加载性能的影响, 提出圆形截面钢管混凝土柱的结构抗火性能最优, 其次依次为椭圆形、方形和矩形截面柱, 因此应考虑截

面形状对钢管与核心混凝土之间相互作用的影响。笔者聚焦方形截面,通过开展不同温度下方钢管地聚物混凝土(SGCFST)短柱的恒温加载轴压试验并开展数值模拟,探究其破坏形态、强度演化规律及“强度回升”现象的截面依赖性,旨在揭示方钢管地聚物混凝土柱高温下轴压性能变化规律,为完善该类组合柱的抗火设计理论提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试件设计以加载温度为主要参数,同时变化了钢管外径尺寸、壁厚和钢材强度,共设计 10 个方钢管地聚物混凝土短柱试件,具体参数如表 1 所示。

试件编号包含了试件的基本参数,其中,S 表示方形截面;中间的数字 100 和 110 分别表示钢管截面外径为 100 mm(壁厚为 3 mm)和 110 mm(壁厚为 4 mm);最后一组数字代表加载时构件中心的温度,包括 28 ℃(常温)、200 ℃、400 ℃、600 ℃和 800 ℃。试件长径比(长度与外径之比)统一取为 3。

采用热轧无缝方形钢管,首先将原始管材切割至设计长度,并对钢管端面进行铣平处理,减少加载时的应力集中;随后在钢管高度 1/2 与 3/4 处,各钻一个直径为 3 mm 的圆孔,用于后续布置热电偶监测内部温度,并兼作高温下混凝土内部蒸气的排气孔。在钢管底部焊接长宽高为 120 mm×120 mm×8 mm 的钢板,方便 GPC 浇筑,试件浇筑过程参见图 1。

表 1 SGCFST 短柱试件设计参数一览表
Table 1 Design parameters of SGCFST stub column specimens

试件编号	外径 D/mm	壁厚 t/mm	D/t	试件长度 L/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	约束效应系数 ξ	混凝土中心温度/℃
S-100-28	100	3	33	300	312	49.8	1.17	28
S-100-200	100	3	33	300	312	53.4	1.09	200
S-100-400	100	3	33	300	312	53.4	1.09	400
S-100-600	100	3	33	300	312	51.3	1.14	600
S-100-800	100	3	33	300	312	51.3	1.14	800
S-110-28	110	4	27.5	330	392	49.8	1.83	28
S-110-200	110	4	27.5	330	392	51.2	1.78	200
S-110-400	110	4	27.5	330	392	51.2	1.78	400
S-110-600	110	4	27.5	330	392	51.0	1.78	600
S-110-800	110	4	27.5	330	392	51.0	1.78	800



图 1 试件浇筑
Fig.1 Specimen casting

钢管内浇筑设计强度为 C40 的矿渣-粉煤灰基地聚物混凝土,其配合比如表 2 所示,与文献[18]中设计强度为 C40 的 GPC 的配合比保持一致。在设计 GPC 的配合比时,首先通过单纯型重心设计法和紧密堆积密度确定砂石最佳用量,然后通过正交试验设计法进行了 9 组 4 因素 3 水平的配合比试验,最后综合考虑各因素对 GPC 凝结时间和抗压强度的影响选定配合比,详细的设计过程见文献[20]。

GPC 配制过程如下:首先将粉煤灰、矿渣、粗细骨料按设计比例在混凝土搅拌机中干拌 2 min 至均匀,随后将预先溶解并冷却至室温的碱性激发剂拌合加入,湿拌不少于 3 min,直至拌合物色泽均匀、流动性满足要求。搅拌完成后立即进行浇筑,浇筑时将钢管放置在振动台上,采用分层灌入法将地聚物混凝土填入管内,每层厚度约 100 mm,辅以插入式振捣棒振捣,确保内部无空洞、无离析。浇筑至管

表2 C40矿渣-粉煤灰地聚物混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of C40 slag-fly ash GPC

单位: kg/m³

GPC强度等级	矿渣	粉煤灰	碎石		河砂	氢氧化钠	水玻璃	碳酸钠	水
			5~10	10~20 mm					
C40	168	252	240	842	777	12.15	45	13.8	153.6

顶后,对表面进行抹平处理。浇筑完成后用保鲜膜密封试件顶部,并在常温下养护28 d。

1.2 材料特性

截面外径为100 mm的钢管采用的钢材为Q235,110 mm的钢管采用的钢材为Q355,根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)制作拉伸试样,测得两类钢管的屈服强度 f_y 分别为312 MPa和392 MPa。

为准确测定各批次地聚物混凝土的实际强度,在浇筑柱体试件的同时,按相同配合比与工艺制作了100 mm立方体标准试块,与柱体试件在相同条件下养护28 d,并用于抗压强度测试。实测GPC试块28 d立方体抗压强度在表1中列出。由表中数据

可知,GPC抗压强度在49.8~53.4 MPa之间,满足设计强度要求。约束效应系数 $\xi = f_y A_s / (f_{ck} A_c)$,其中 $f_{ck} = 0.76 \times 0.88 \times f_{cu}$,公式来自文献[21]。

1.3 测点布置

在试件高度1/2和1/4处各布置一组热电偶,分别测得钢管地聚物混凝土短柱截面中心处、1/4处和钢管与地聚物混凝土界面处的温度变化,热电偶布置如图2所示。使用耐高温胶带与陶瓷纤维布在钢管外壁对热电偶引线进行分段固定,防止在混凝土浇筑过程中发生位移。所有热电偶在安装后均进行通路测试,确保信号传输正常。试验在电炉顶部布置了精度为0.001 mm的引伸计,用于采集试件的轴向变形数据。

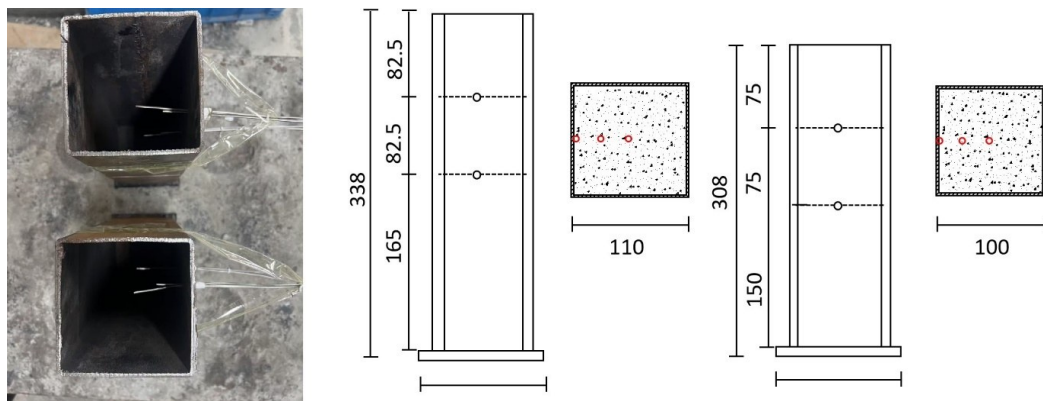


图2 热电偶测点布置图

Fig.2 Layout of thermocouple measuring points

1.4 试验装置及加载过程

采用电炉对试件进行加热,其力学性能测试由电液伺服万能压力试验机完成。高温电炉的净空尺寸为150 mm×150 mm×340 mm,试件最大尺寸为直径110 mm、高度330 mm,可以实现试件整体处于加热段。试验机的量程为2 000 kN,试验装置示意图如图3所示。试件通过高温电炉程序控制升温,升温速率为10 K/min,每个试件在炉温到达目标温度后恒温2~3 h,最终在钢管内部GPC中心温度达到目标温度后进行加载试验。为避免试件、垫片、加载设备间的空隙,正式加载前先进行预加载,加载至30 kN并持荷载3 min,卸载后正式加载,加载速率为1.8 mm/min,当试件轴向压缩变形达到20 mm时,视为试件破坏,停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及破坏形态

当GCFT试件内部温度达到100 ℃左右时,观察到大量水蒸气逸出;随着试件温度继续升高,蒸气量逐渐减少。试验结束并冷却后,将试件从高温炉中取出观察,发现随着受热温度的升高,试件表面氧化程度加剧,颜色逐渐加深(如图4所示)。

所有试件均出现钢管局部屈曲,部分试样表面沿高度方向出现2~3处凸起。对比S-100与S-110两组试件的破坏形态发现,S-110组试件通常仅在加载端部发生一处凸起,而S-100组试件则多出现2~3处屈曲,且管壁表面伴有较为明显的剪切滑移线。分析认为,造成上述差异的主要原因在于S-110组试件的宽厚比较小,钢管局部抗屈曲能力较

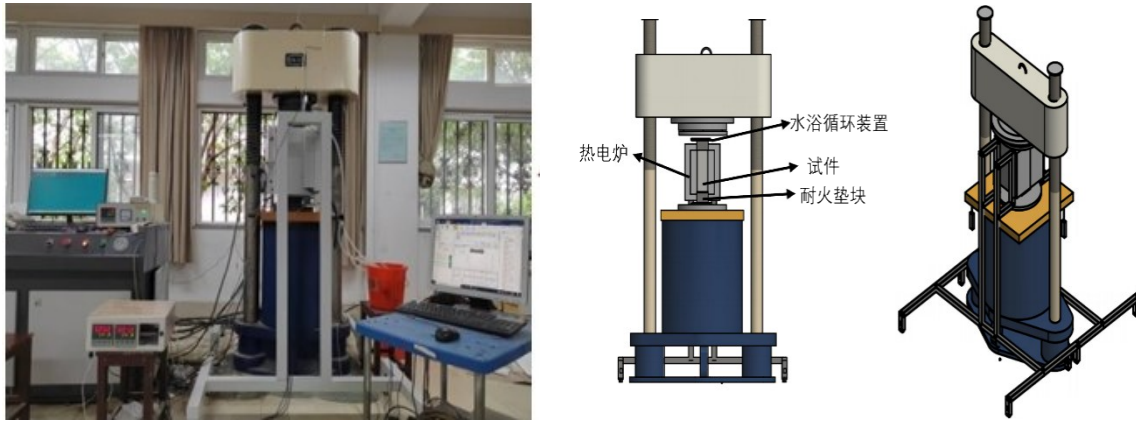


图3 加载装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test setup

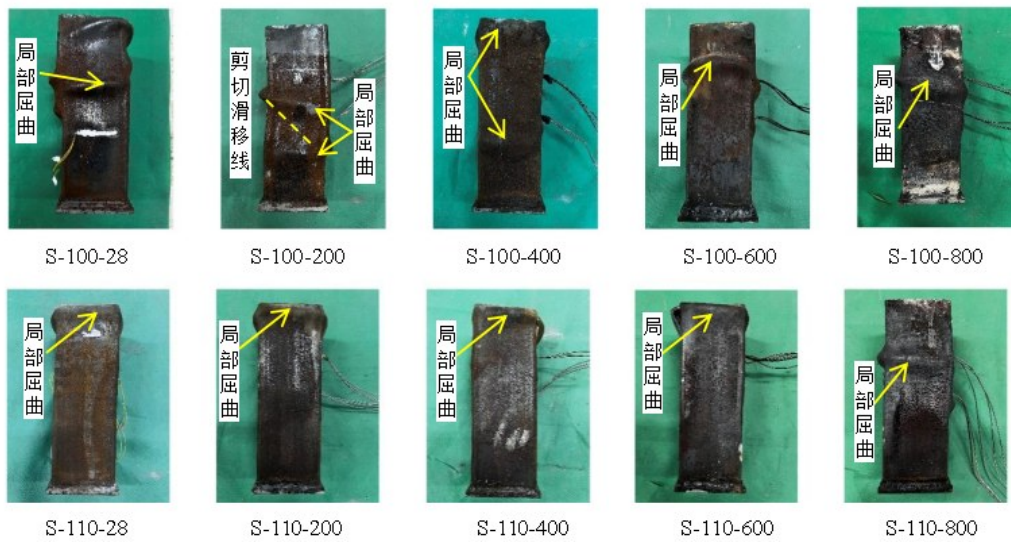


图4 SGCFST短柱试件高温下破坏形态

Fig. 4 Failure modes of SGCFST short columns under high temperature

强,钢管壁板局部屈曲的发生被有效推迟。

2.2 温度-升温时间曲线

试件的温度-升温时间曲线由布置在 GCFT 内部的热电偶测得,图 5 和图 6 所示为所有高温试件的升温曲线。由图 5 和图 6 可知,钢管和 GPC 交界处试件升温最快,率先达到设定的加载温度,这是因为钢材的导热系数大,而且钢管处于试件的外围,直接暴露在高温下;对填充于钢管内部的 GPC 而言,截面 1/4 处和中心处的升温速度明显滞后于钢管内边缘处,尤其是在 100~150 °C 这个温度段内。出现这种现象的原因一方面是 GPC 的导热系数小于钢材,另一方面是超过 100 °C 以后,GPC 内部的水分蒸发和迁移带走大量热量,从而导致 GPC 升温曲线出现了明显的缓慢上升段。水分蒸发完成后,GPC 温度以较快速率升高,其中,1/4 处的温度略高于中心处,最终,GPC 的各处温度都达到了设定的加载温度。

2.3 荷载-位移曲线

图 7 所示为不同温度下试件的荷载-相对变形曲线,相对变形是将柱顶位移归一化为峰值荷载对应的峰值位移,使不同温度下曲线可以在同一尺度下直接比较。为了便于对比分析,试件实测的峰值荷载以及高温下峰值荷载与常温下数值的比值同时在表 3 中给出。由图 7 和表 3 可知,随着温度升高,试件刚度降低,延性有所改善。高温下试件极限承载力的变化规律对 S-100 组和 S-110 组有所不同。对 S-100 组,各试件的极限应力随温度升高整体呈现降低趋势,其中 200 °C 和 400 °C 时降低幅度较小;温度达到 600 °C 及以上时,试件的极限承载力显著下降。对 S-110 组,温度在 200 °C 和 400 °C 时试件的极限承载力分别有 6% 和 9% 的上升;温度达到 600 °C 及以上时,试件的承载力变化规律与 S-100 组基本一致,但下降幅度超过了 S-100 组。

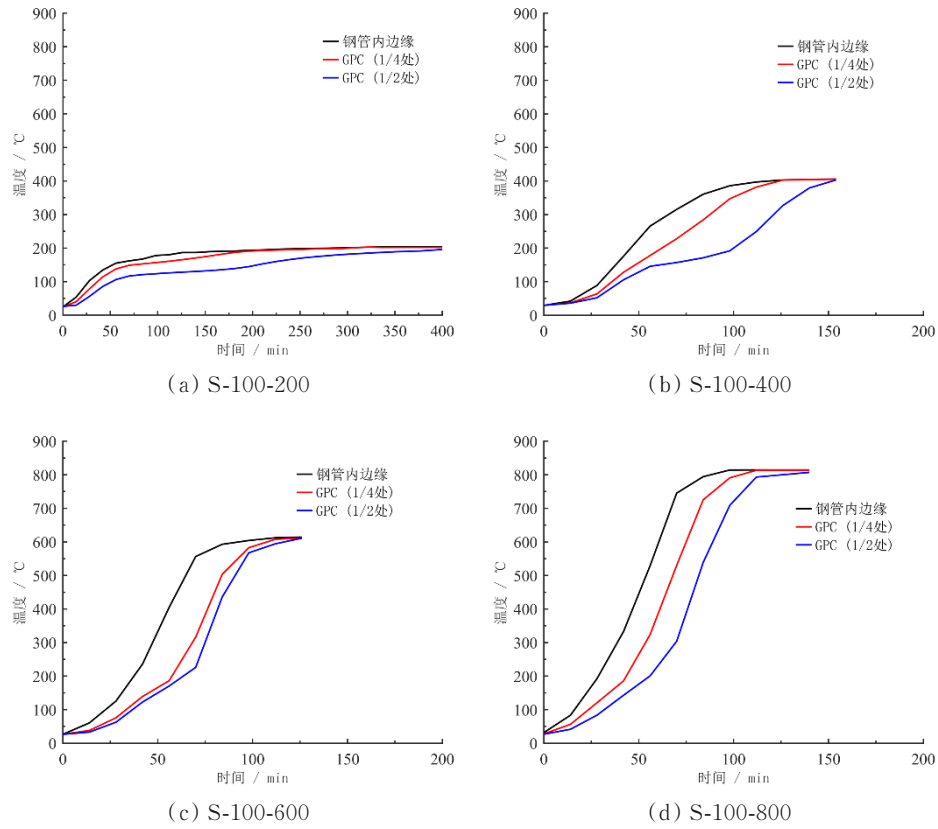


图5 S-100组试件高温不同测点温度-升温时间曲线

Fig. 5 Temperature-time curves at different measuring points for S-100 series specimens under elevated temperatures

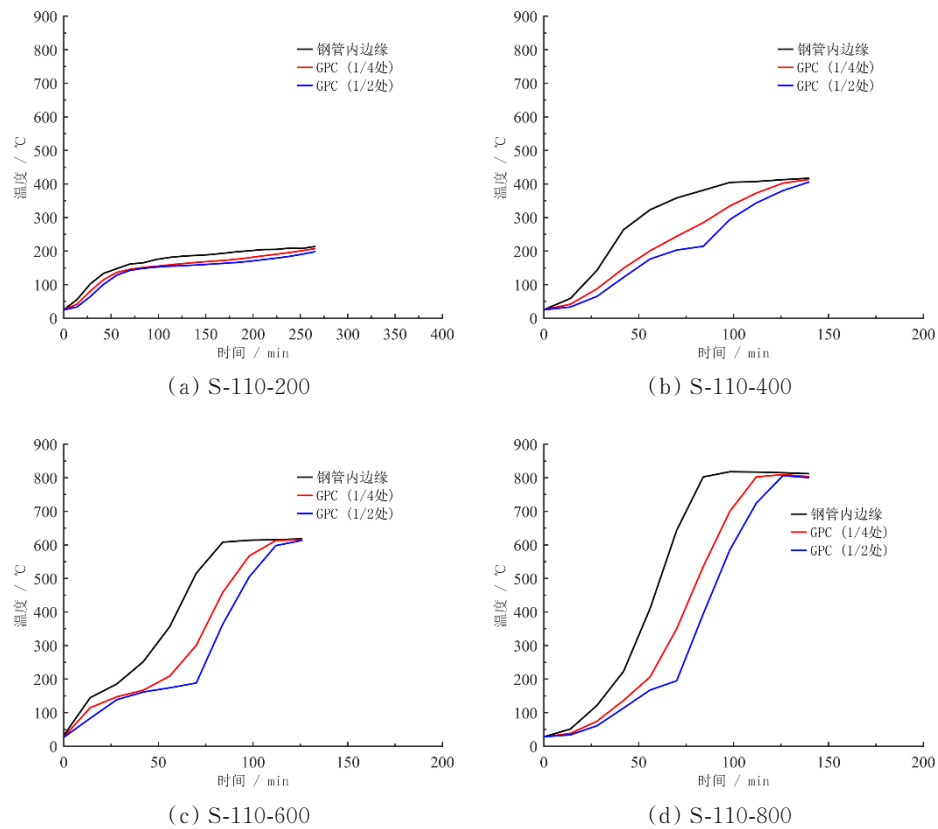


图6 S-110组试件高温不同测点温度-升温时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves at different measuring points for S-110 series specimens under elevated temperatures

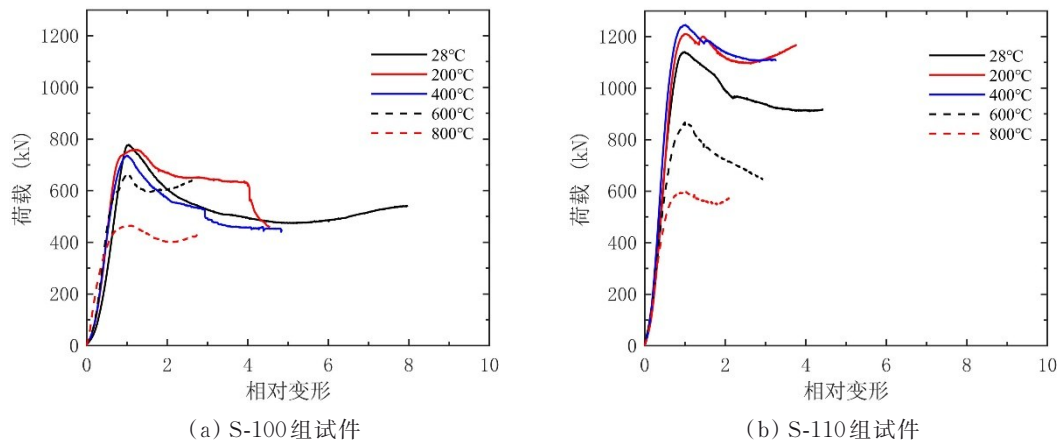


图7 不同温度下 SGCFST 短柱试件荷载-相对变形曲线

Fig. 7 Load-relative deformation curves of SGCFST stub column specimens at different temperatures

表3 不同温度下 SGCFST 短柱试件峰值荷载

Table 3 Peak load of SGCFST stub column specimens at different temperatures

试件编号	峰值荷载/kN	高温与常温峰值荷载比
S-100-28	778.2	1
S-100-200	756.9	0.97
S-100-400	735.9	0.95
S-100-600	662.8	0.85
S-100-800	468.4	0.61
S-110-28	1 149.8	1
S-110-200	1 219.8	1.06
S-110-400	1 258.9	1.09
S-110-600	864.5	0.75
S-110-800	590.7	0.51

温度在 200 °C 和 400 °C 时, S-100 组和 S-110 组试件极限承载力变化规律有所不同, 产生这种差异的原因主要源于两者钢管约束作用的强弱不同。由表 1 可知, S-110 组试件的约束效应系数明显大于 S-100 组。对于 S-110 组的试件, 在 200~400 °C 区间, 地聚物混凝土自身因脱水缩合和二次反应而略有致密化, 强度有微弱提升; 同时, 钢管在此温度下仍保留了较高的刚度和强度, 能够对核心地聚物混凝土提供有效的环向约束, 抑制微裂缝扩展, 从而将地聚物混凝土的微小增益放大为整体承载力的明显上升; 而 S-100 组试件的钢管约束较弱, 不足以抵消热损伤导致材料强度降低, 故整体承载力有所降低。当温度升至 600 °C 时, 两种钢管的强度均大幅下降, 约束作用显著减弱; 同时地聚物凝胶发生分解、晶化, 骨架坍塌, 因此 S-100 组和 S-110 组均出现承载力断崖式下降。

值得注意的是, 但之毅等^[18]对圆钢管地聚物混凝土柱试件同样观察到 200 °C 和 400 °C 时极限承载力上升的现象, 但其最大提升幅度达 20%, 明显高

于 S-110 组的 6%~9%。这表明, 与圆钢管相比方钢管的约束效果相对较弱。上述承载力回升现象是钢管地聚物混凝土柱区别于钢管普通混凝土柱的重要特征。已有研究表明, 钢管普通混凝土柱在高温下的承载力通常随温度单调递减^[17], 200~400 °C 区间未见承载力回升的报道。造成这一差异的根本原因在于, 普通硅酸盐水泥混凝土在该温度区间水化产物已开始分解, 强度持续下降; 而地聚物混凝土因硅铝凝胶进一步缩合致密化, 强度可微弱回升。这一材料层面的本征差异, 在钢管约束作用下被进一步放大, 使得地聚物混凝土在钢管约束条件下表现出不同于传统钢管混凝土的高温力学响应特征。

3 有限元数值模拟

基于试验数据, 运用 ABAQUS 有限元软件来建立分析模型, 模型尺寸与试件尺寸相同。数值模拟采用顺序热-力耦合分析方法, 先进行传热分析, 模拟试件在升温阶段的温度场分布; 再将温度结果映射到结构模型中, 进行高温下轴压力学性能分析

3.1 温度场模拟

3.1.1 材料热工参数

钢管的导热系数、比热以及热膨胀系数参考 Lie^[22]给出的公式。地聚物混凝土的传导系数和比热采用文献^[22]的试验成果, 热膨胀系数参考 Song 等^[16]通过校正因子 η 修正, 经模型试算验证取 $\eta=5$, 具体表达式如下。

C40 地聚物混凝土导热系数 λ_c (W/(m·°C)) 为

$$\lambda_c = \begin{cases} -0.005T + 2.075, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ -0.005T + 2.439, 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ -0.002T + 1.759, 200^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \\ 0.002T + 0.616, 300^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ -0.0004T + 1.628, 400^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ -0.00675T + 4.793, 500^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

C40地聚物混凝土比热 C_c (kJ/(kg·°C)) 为

$$\rho C_c = \begin{cases} 0.0121T + 1.881, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ -0.008T + 3.895, 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.014T - 0.517, 200^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \\ -0.003T + 4.547, 300^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.008T + 0.251, 400^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ 0.050T - 20.984, 500^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \\ -0.050T + 39.424, 600^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\ 4.186, 700^\circ\text{C} < T \end{cases} \quad (2)$$

地聚物混凝土热膨胀系数 α_c (m/(m·°C)) 为

$$\alpha_c = \begin{cases} 5 \times \frac{-1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6}T + 1.4 \times 10^{-11}T^3}{T - 20}, 20^\circ\text{C} < T \leq 805^\circ\text{C} \\ 5 \times \frac{12 \times 10^{-3}}{T - 20}, 805^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

3.1.2 温度场模型建立

温度场模型中,钢管和GPC均采用实体单元。试件表面与炉内空气之间的热交换以辐射和对流为主,试件内部的热量传递主要依靠热传导。初始温度设为 28°C ,环境升温曲线设定为试验实测升温曲线。辐射换热中,综合发射率取 0.7;钢管外表面的对流换热系数取 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。在 ABAQUS 中,绝对零度设为 -273.15°C ,Stefan-Boltzmann 常数设为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

钢管与核心 GPC 之间的接触设置为“表面与表面接触”,以钢管内表面为主表面、混凝土外表面为次表面。忽略二者之间的接触热阻,两者的网格类型均为热传递单元(DC3D8),网格划分如图 8 所示。材料视为各向同性,且模型中未考虑 GPC 内部水分蒸发对热传递的影响。

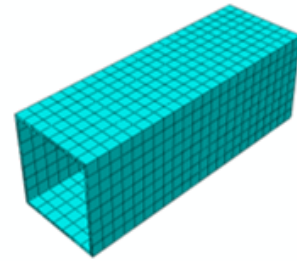
3.1.3 温度场模型验证

为验证模型准确性,在钢管内边缘、GPC 中心及 $1/4$ 处分别设置参考点,提取其温度-时间曲线,与试验实测曲线进行对比,图 9 给出了部分试件的对比曲线。由于 GPC 内部自由水蒸发吸热,试验曲线出现了明显的温度平台,且平台持续时间随目标温度的升高而缩短。模拟中未考虑水分效应,导致模拟的升温速率及同一时刻的温度值高于试验值。造成这一差异的原因还包括实际试验中存在部分热量散失,而理想化的模型未能完全模拟这一过程。升温后有限元计算结果与试验数据基本吻合。

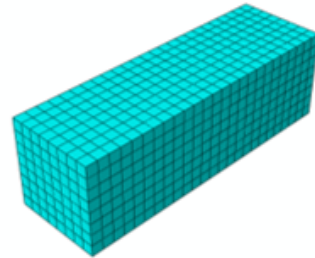
3.2 高温力学性能模拟

3.2.1 材料高温力学性能参数

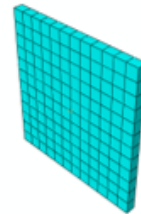
钢材的高温应力-应变关系参考 Lie^[22] 建议的公式。由于目前尚无高温下核心地聚物混凝土的本构模型可供直接采用,模拟时 GPC 的高温本构模型



(a) 地聚物混凝土网格划分



(b) 钢管网格划分



(c) 垫板网格划分

图 8 网格划分

Fig. 8 Mesh generation

采用韩林海^[21]提出的核心普通混凝土高温本构关系曲线,但是模型中涉及温度对材料性能影响的折减

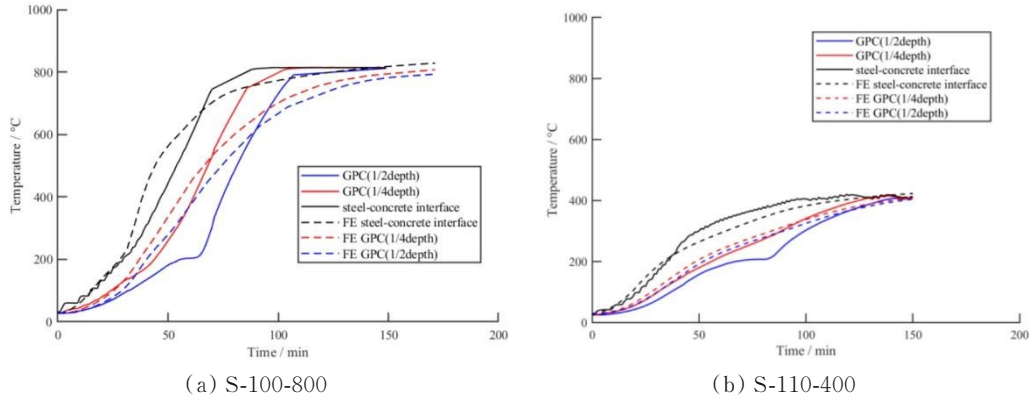


图9 SGCFST试件数值模拟与实测温度-升温时间曲线对比

Fig. 9 Comparison of numerically simulated and measured temperature-time curves for SGCFST specimens

系数取自文献[23]地聚物混凝土高温力学性能的试验研究结果。文献[21]提出的核心约束混凝土本构模型描述了约束效应如何改善核心混凝土受压行为的基本力学机制,这一机制在材料层面具有共通性,而地聚物混凝土与普通混凝土在高温下的主要差异,可以通过不同温度下材料强度与弹性模量退

化规律来表征,因此按此思路建立的 GPC 高温本构模型具有适用性。具体表达式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^n + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_0(T) = \begin{cases} f'_c \left[1 + 0.65 \left(\frac{T}{1000} \right) - 1.75 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \right], & 28^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ f'_c \left[1 + 0.414 \left(\frac{T}{1000} \right) - 1.30 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \right], & 400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\epsilon_0(T) = [(1300 + 12.5f'_c + 800\xi^{0.2}) \times 10^{-6}] \cdot (0.973 + 8.50 \times 10^{-4}T + 4.42 \times 10^{-6}T^2) \quad (6)$$

$$\text{式中: } x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0(T)}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0(T)}, \xi = \frac{f_y A_s}{f_{ck} A_c}, \text{ 方钢管: } \eta = 1.6 + \frac{1.5}{x}, \beta_0 = \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}.$$

地聚物混凝土在高温下弹性模量

$$E_{cT} = \begin{cases} E_c [1.065 - 2.4(T/1000) + 1.8(T/1000)^2], & 28^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ E_c [1.225 - 2.95(T/1000) + 2.15(T/1000)^2], & 400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

3.2.2 力学模型建立

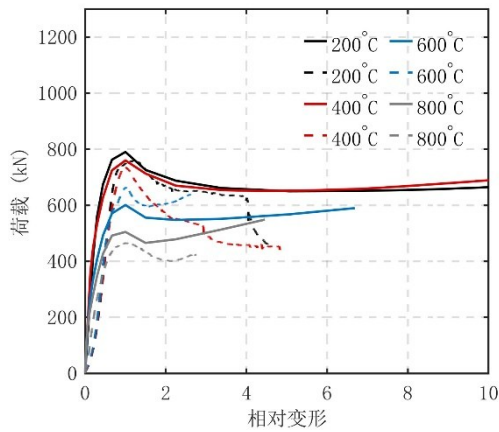
钢管与地聚物混凝土之间采用面-面接触,切向为罚摩擦,系数取 0.5;法向为硬接触,无初始过盈调整。混凝土与垫板之间采用面-面接触,钢管与垫板之间采用绑定接触。试件的边界条件设置为:底端垫板完全固定,上端垫板约束水平位移并施加竖向压缩位移 $U_3=20\text{ mm}$ 。预定义场中,从温度场模型的 ODB 文件导入升温历程的温度分布,并设置为初始状态。网格与温度场模型一致,单元类型为 C3D8R。

3.2.3 力学模型验证

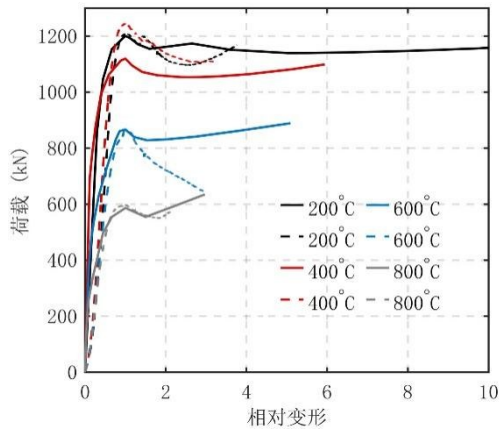
通过模拟得到的高温下 SGCFST 试件荷载-相对变形曲线与试验实测曲线的对比如图 10 所示。对比可知,有限元模型能够较好地预测 SGCFST 短柱在高温下的力学行为趋势与承载能力退化规律。模拟曲线在弹性阶段的刚度普遍略高于试验曲线,

这主要归因于数值模型对材料连续性、界面完美黏结及理想边界条件的假设,而实际测得的柱顶位移包含试验机与柱底微小变形、地聚物混凝土浇筑不密实、钢管与地聚物混凝土之间存在初始间隙、含水率影响以及试验装置轻微偏心等非理想因素。模拟曲线与试验曲线整体吻合较好,表明建立的有限元模型具有可靠的精度,能为 SGCFST 短柱的高温性能评估提供有效的理论分析工具。

有限元分析所得的极限状态下等效塑性应变 (PEEQ) 分布如图 11 所示。由图 11 可见,塑性变形主要集中于柱体中部高度区域,并伴随钢管显著向外鼓包,与试验观测到的破坏模式一致。高 PEEQ 值在截面内呈对称分布,反映出钢管在轴向压缩作用下局部屈服与屈曲的形成过程。该对比验证了模型在荷载-位移响应方面的有效性。相较于 S-100-600 试件, S-110-600 试件呈现更均匀的塑性应



(a) S-100组试件



(b) S-110组试件

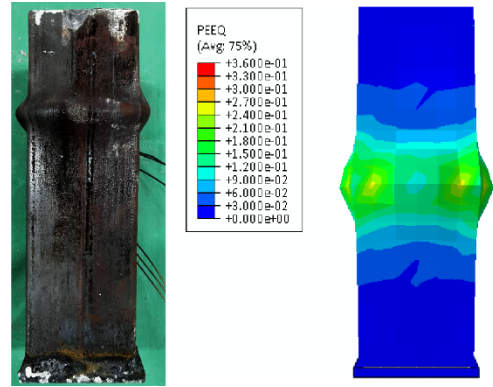
图 10 高温下 SGCFST 试件荷载-相对变形曲线的模拟与试验验证

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental load - relative deformation curves for SGCFST specimens at elevated temperatures

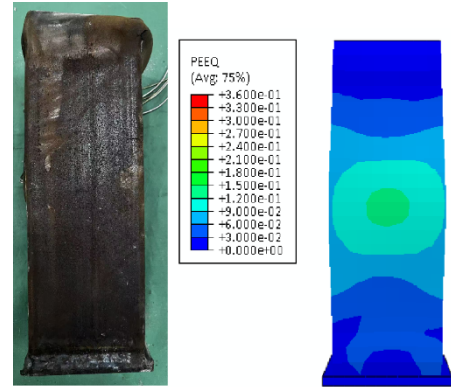
变分布及更宽广的塑性变形区,这归因于加厚钢管提供的更高约束力。增强的约束作用延缓了局部屈曲的发生,促进了更稳定的塑性变形过程,从而提升了 SGCFST 短柱的承载能力。

3.3 参数分析

选取约束效应系数 ξ 为关键参数,分析不同约束效应系数构件的约束作用随温度(28、200、400、600、800 °C)的变化规律,重点讨论不同温度等级下钢管和核心混凝土的作用。轴向位移加载至 $0.05H$ 视为破坏,其中 H 为试件的受火高度。在保持截面尺寸、材料强度及受火条件一致的情况下,通过改变钢管壁厚来调整约束效应系数,选取 $\xi=0.92$ 、 $\xi=2$ 和 $\xi=3$ 三组模型进行分析,其关系曲线如图 12 所示。温度对钢管和核心混凝土作用的影响,在常温下,钢管与核心混凝土之间的约束效应较为显著。钢管提供了强大的环向约束,限制了核心混凝土



(a) S-100-600



(b) S-110-600

图 11 基于等效塑性应变的 SGCFST 短柱失效模式

Fig. 11 Failure mode of SGCFST stub column based on equivalent plastic strain

土的膨胀和变形。此时,钢管的强度和刚度较高,可以有效地传递荷载,增强构件的整体承载力。

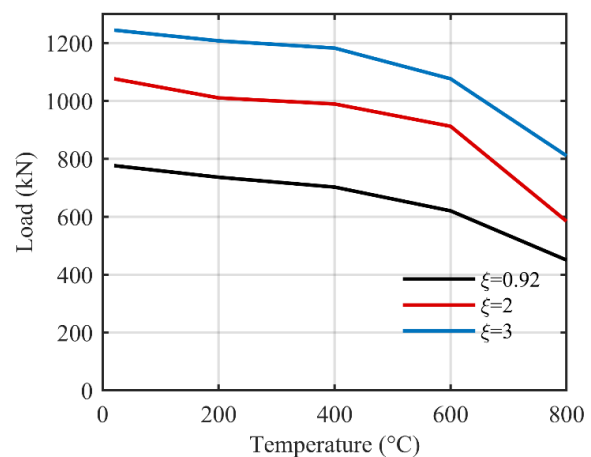


图 12 约束效应系数对 SGCFST 试件高温下极限承载力的影响

Fig. 12 Effect of confinement factor on ultimate bearing capacity of SGCFST specimens at elevated temperatures

随着温度升高至 200 °C 和 400 °C,钢管和核心混凝土之间的约束效应开始显现不同的表现。在这些温度下,钢管仍然保持一定的刚度,但其强度略

有下降。核心混凝土由于高温引起的脱水和凝胶化反应,出现了微小的致密化效应,这时钢管的约束作用变得更加显著。特别是对于约束效应系数较大的构件(如 $\xi=3$),钢管能够有效地抑制核心混凝土的微裂缝扩展和膨胀,增强构件的承载力。当温度升高到 600 °C 时,钢管的强度和刚度显著下降,同时核心混凝土开始出现明显的降解。此时,钢管对核心混凝土的约束作用明显减弱,虽然钢管仍能提供一定的环向约束,但对于防止混凝土热损伤的作用已不如低温阶段。对于约束效应较强的构件,虽然钢管约束有所减弱,但仍能在一定程度上保持核心混凝土的稳定性,减缓承载力的下降。在 800 °C 时,钢管的强度几乎完全丧失,且核心混凝土的强度也大幅降低。此时,钢管与核心混凝土之间的相互作用几乎消失,构件的整体承载力大幅下降。钢管对核心混凝土的约束作用在高温下几乎无效,因此,试件的承载力主要依赖于混凝土本身的高温表现,最终承载力显著下降。

对于 $\xi=0.92$ (约束效应较弱)的构件,随着温度的升高,钢管的约束作用显著减弱,导致核心混凝土在高温下发生较大的膨胀和裂缝扩展,承载力下降较快。对于 $\xi=2$ 和 $\xi=3$ (约束效应较强)的构件,钢管的约束作用更为显著。在 200 °C 和 400 °C 时,约束效应系数较大的构件能够有效抑制核心混凝土的热膨胀和裂缝扩展,因此承载力的下降幅度较小。然而,当温度达到 600 °C 及以上时,钢管的约束作用逐渐减弱,尤其在 800 °C 时,约束效应基本消失,所有试件的承载力均显著下降。

在工程设计中通过适当增大钢管壁厚来提高对核心混凝土的约束作用,对增强构件在高温下的承载能力与延性具有积极意义。

4 结论

通过不同温度下方钢管地聚物混凝土短柱的恒温加载轴压试验及有限元数值模拟,得出以下主要结论:

1) 高温下宽厚比较小的 S-110 组试件比宽厚比较大的 S-100 组试件更少出现钢管局部凸起,这归因于加厚钢管提供的更高约束力,增强的约束作用延缓了局部屈曲的发生,促进了更稳定的塑性变形过程,从而提升了 SGCFST 短柱的承载能力。

2) 钢管与地聚物混凝土交界处升温最快,核心地聚物混凝土升温滞后明显,尤其在 100~200 °C 区间因水分蒸发出现显著的温度平台。该现象在有限元模拟中因未考虑水分效应而未能完全复现,导致模拟温度略高于实测值。

3) 高温下 S-100 组试件的极限承载力随温度升高整体呈下降趋势,而 S-110 组试件在 200 °C 和 400 °C 时承载力较常温分别提升 6% 和 9%。当温度升至 600 °C 及以上时,两类试件承载力均显著下降。这表明较强的钢管约束能够放大地聚物混凝土在 200~400 °C 区间的微弱致密化效应,从而提升整体承载力。

4) 有限元参数分析结果表明:随着温度升高,钢管的约束效应减弱,尤其在 600 °C 以上;约束效应系数较大的构件在 200 °C 至 400 °C 时表现较好,但 600 °C 以上时所有构件承载力显著下降。

参考文献

- [1] Kathirvel P, Sreekumaran S. Sustainable development of ultra high performance concrete using geopolymer technology[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102267.
- [2] Davidovits J, Huaman L, Davidovits R. Ancient geopolymer in south-American monument. SEM and petrographic evidence[J]. Materials Letters, 2019, 235: 120-124.
- [3] van Deventer J S J, Provis J L, Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement[J]. Minerals Engineering, 2012, 29: 89-104.
- [4] 李彪,王成龙,李扬,等. 钢管地聚物再生混凝土界面黏结-滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(5): 172-185.
Li B, Wang C L, Li Y, et al. Experimental investigation on interfacial bond-slip behavior of geopolymer recycled aggregate concrete-filled steel tube[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(5): 172-185. (in Chinese)
- [5] 颜桂云,马文祥,许力,等. 方钢管地聚物砖骨料再生混凝土柱滞回性能及恢复力模型研究[J]. 振动与冲击, 2026, 45(1): 32-40.
Yan G Y, Ma W X, Xu L, et al. Hysteresis performance and restoring force model for square steel tube columns filled with geopolymer brick aggregate recycled concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2026, 45(1): 32-40. (in Chinese)
- [6] Al-Rousan R Z, Alnemrawi B R, Sawalha H M. The ultimate capacity of geopolymer recycled aggregate concrete filled steel tubular columns: Numerical and theoretical study[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 96: 110365.
- [7] Tiwary A K, Singh H, Singh K, et al. Experimental and analytical performance analysis of geopolymer concrete-filled double steel tube (CFDST) columns under axial loading[J]. Structures, 2025, 74: 108572.
- [8] Song T Y, Zhang H X, Peng X S, et al. Axial compres-

- sive behavior and design method on geopolymeric-recycled-aggregate-concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Structures, 2025, 82: 110709.
- [9] Manzoor T, Ahmad Bhat J, Shah A H. Performance of geopolymer concrete at elevated temperature: a critical review[J]. Construction and Building Materials, 2024, 420: 135578.
- [10] Shi F Y, Li L Y, Cheng S S. Mesoscale modelling for investigating the thermo-mechanical behaviour of geopolymer concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 104: 112435.
- [11] Kumar P, Pratap B, Sahu A. Recycled aggregate with GGBS geopolymer concrete behaviour on elevated temperatures[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2025, 16(1): 118-137.
- [12] Tao Z, Cao Y F, Pan Z, et al. Compressive behaviour of geopolymer concrete-filled steel columns at ambient and elevated temperatures[J]. International Journal of High-Rise Buildings, 2018, 7(4): 327-342.
- [13] Katwal U, Aziz T, Tao Z, et al. Tests of circular geopolymer concrete-filled steel columns under ambient and fire conditions[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107393.
- [14] Song T Y, Qu X Y, Pan Z, et al. Experimental analysis on post-fire performance of GRAC filled steel tubular columns and thermal properties of GRAC[J]. Engineering Structures, 2025, 325: 119403.
- [15] Xiang K, Qu X Y, Pan Z, et al. Full-coupled post-fire performance analysis of geopolymeric recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns[J]. Engineering Structures, 2025, 327: 119631.
- [16] Song T Y, Peng X S, Li C L, et al. Fire performance of geopolymeric recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns under multi-loading conditions[J]. Engineering Structures, 2025, 331: 119947.
- [17] 韩林海. 恒(高)温下钢管混凝土的轴压力学性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(5): 64-70.
Han L H. Behaviors of concrete filled steel tubular axial compression member under high constant temperature [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(5): 64-70. (in Chinese)
- [18] 但之毅, 魏新明, 朱美春. 高温下钢管地聚物混凝土短柱力学性能试验研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版中英文), 2025, 54(4): 488-496.
Dan Z Y, Wei X M, Zhu M C. Experimental study on mechanical properties of geopolymer concrete filled steel tube short columns at high temperature[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2025, 54(4): 488-496. (in Chinese)
- [19] Dai X H, Lam D. Shape effect on the behaviour of axially loaded concrete filled steel tubular stub columns at elevated temperature[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73: 117-127.
- [20] 魏新明. 钢管地聚物混凝土短柱耐火性能研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2024.
Wei X M. Research on fire resistance of geopolymer concrete-filled steel tubular stub columns[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2024. (in Chinese)
- [21] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
Han L H. Concrete filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [22] Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5): 1489-1509.
- [23] Joseph B. Behavior of geopolymer concrete exposed to elevated temperatures[D]. Cochin University of Science and Technology, 2015.

(编辑 XXX)