

引用本文:霍静思,郝柏青,李 智.考虑轴向约束的钢筋混凝土梁高温下竖向推覆试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):41-48.
HUO Jing-si,HAO Bai-qing,LI Zhi. Vertical Push-down Tests of RC Beams at High Temperature Considering Axial Restrain[J]. Journal of
Architecture and Civil Engineering,2020,37(1):41-48.

DOI:10.19815/j.jace.2018.11069

考虑轴向约束的钢筋混凝土梁高温下 竖向推覆试验

霍静思^{1,2},郝柏青¹,李 智^{1,3}

(1. 湖南大学 教育部建筑安全与节能重点实验室,湖南 长沙 410082; 2. 华侨大学 福建省智慧基础设施与
监测重点实验室,福建 厦门 361021; 3. 理雅结构工程咨询有限公司,纽约 NY10005)

摘要:为研究轴向约束对钢筋混凝土梁高温下大变形力学性能的影响,进行了 1 根常温和 2 根高温
下约束梁的竖向推覆试验。比较分析了不同升温时间对轴向约束钢筋混凝土梁测点温度、升温反
应及延性和耗能等的影响;重点研究了轴向约束钢筋混凝土梁的高温反应、破坏形态、承载能力和
受力机制。结果表明:升温过程中,随着温度的升高,轴向约束钢筋混凝土梁不断向下挠曲,但炉温
超过 800 ℃ 之后,挠度有所恢复;由于受热膨胀引起的轴压力影响,高温下约束梁塑性铰区域明显
缩小,其延性和耗能能力随着温度的升高而降低;高温作用产生的初始轴压力提高了梁的峰值承载
力,但随着升温时间的延长,其提高幅度低于材料劣化对梁峰值承载力的降低幅度;初始轴压力使
得高温梁在破坏前始终处于压弯机制;研究结果可为验证和校正火灾下约束混凝土梁力学行为的
数值模拟以及理论分析提供可靠的试验数据,并为进一步探讨高温下钢筋混凝土约束梁大变形时
的破坏准则提供依据。

关键词:钢筋混凝土梁;轴向约束;高温;大变形;破坏形态

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0041-08

Vertical Push-down Tests of RC Beams at High Temperature Considering Axial Restraint

HUO Jing-si^{1,2}, HAO Bai-qing¹, LI Zhi¹

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University,
Changsha 410082, Hunan, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Intelligent Infrastructure and
Monitoring, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. LERA Consulting Structural
Engineers, New York NY10005, USA)

Abstract: In order to investigate the influence of axial restraint on the mechanical behaviours of
fire-exposed reinforced concrete (RC) beams at large deformation, the push-down tests of one
restrained beam at ambient temperature and two restrained beams at high temperature were
carried out. The effects of different heating time on the measuring point temperature, heating
response, ductility and energy dissipation of axially restrained RC beams were compared and
analyzed. The thermal response, failure mode, bearing capacity and force mechanism of axially

收稿日期:2019-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51378200,51678256);上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2016-KF09)

作者简介:霍静思(1970-),男,吉林梨树人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jingsihuo@gmail.com。

restrained RC beams were mainly studied. The results show that during the heating process, with the increase of temperature, the axially restrained RC beams deflect downward continuously, but the deflection recovers after the furnace temperature exceeds 800 °C. Due to the influence of axial compression caused by thermal expansion, the plastic hinge area of restrained beams at high temperature is obviously reduced, and its ductility and energy dissipation capacity decrease with the increase of temperature. The initial axial compression caused by high temperature increases the peak bearing capacity of beams, but with the increase of heating time, the increase amplitude is less than the decrease amplitude of peak bearing capacity of beams caused by material deterioration. The initial axial compression makes high temperature beams always in bending mechanism before failure. The paper can provide reliable experimental data for verifying and modifying the numerical simulation as well as theoretical analysis of the mechanical behavior of confined concrete beams under fire, and provide a basis for further exploring the failure criteria of axially restrained RC beams under large deformation at high temperature.

Key words: reinforced concrete beam; axial restraint; high temperature; large deformation; failure mode

0 引言

钢筋混凝土梁作为建筑结构中重要的水平承重构件,虽具有良好的耐火性能,但其一旦失效会改变竖向构件的支撑条件,从而对整体结构传力和受力机制造成影响,可能引发局部结构坍塌,甚至整体结构倒塌。

以往对于钢筋混凝土梁抗火性能的研究主要集中在简支梁和连续梁^[1-4],而钢筋混凝土梁在遭受火灾时,其周边结构的约束作用会使梁的力学行为更为复杂。目前国内外学者对具有梁端约束的钢筋混凝土梁开展了一系列研究,大多针对耐火极限问题,即采用恒载升温的荷载-温度路径。Dwaikat 等^[5-6]提出了一种数值方法对钢筋混凝土约束梁的耐火性能进行研究,并进一步对轴向约束和简支混凝土梁进行了恒载升温对比试验,数值分析和试验结果表明,轴向约束和转动约束均能提高梁的耐火极限,但轴向约束的影响更大。吴波等^[7-10]主要研究了轴向约束、转动约束等因素对钢筋混凝土梁火灾下力学性能的影响,发现梁端轴向约束刚度对由约束产生的附加荷载和变形影响较大,梁端转动约束刚度对附加荷载的影响较小,但对梁变形有影响;在此基础上建立了考虑升降温全过程的钢筋混凝土约束梁轴力和梁端弯矩的实用计算方法。Albrifkani 等^[11]对计算混凝土梁高温下的耐火极限提出了一种基于大变形,可以考虑梁端约束的数值模拟方法。韩蕊等^[12]对 T 形轴向约束梁的耐火性能进行了有限元分析,发现轴向约束增加了梁的耐火极限,同时验证

了轴向约束能够提高梁截面的抗弯承载力。可见,约束作用对混凝土梁的耐火极限影响显著。

此外,部分学者研究了高温下梁竖向加载至大变形时的性能,即先升温后加载至梁底纵筋拉断。Elghazouli 等^[13]研究了在火灾作用下少筋混凝土梁的悬链线效应,结果表明:当梁有轴向约束且跨中位移逐渐增大时,梁的受力机制由压拱机制逐渐过渡到悬链线机制。Li 等^[14]与谭炎等^[15-16]对具有轴向约束的钢筋混凝土梁-柱结构进行了高温下竖向推覆试验,研究结果表明:高温使得材料性能劣化,节点具有更强的耗能能力和转动能力,更有利于梁-柱结构进入悬链线阶段。

综上所述,周边约束不仅能提高梁的耐火极限,而且在大变形时能够形成悬链线机制抵抗外荷载,但针对后者力学性能的研究有限。因此,本文进行了轴向约束钢筋混凝土梁在高温下的竖向推覆试验,重点研究了推覆过程中其破坏形态和受力机制以及高温对二者的影响,为验证和校正火灾下约束混凝土梁力学行为的数值模拟以及理论分析提供可靠的试验数据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计了 3 根 1:2 缩尺的钢筋混凝土梁,分别进行常温和高温下静力竖向推覆试验,主要考察升温时间(1 h 和 2 h)对受轴向约束的钢筋混凝土梁破坏形态、受力机制和承载能力的影响。

试件详细信息如图 1 和表 1 所示,3 根梁的几

何尺寸和配筋相同,总长为 2 800 mm,计算跨度为 3 200 mm,保护层厚度为 20 mm。梁纵向钢筋采用对称布置,上下均配置 2 ￠14 的 HRB400 钢筋,配筋率为 0.77%,箍筋采用 ￠8@100 的 HRB400 钢筋。混凝土设计强度为 C30;混凝土立方体实测抗压强度为 31 MPa,纵筋实测屈服强度为 567 MPa,实测极限强度为 649 MPa。

1.2 试验装置与方法

本文试验装置由提供轴向约束的自平衡 U 形刚性底座、加载系统和高温炉三部分组成,如图 2 所示。刚性底座两侧立柱顶部是连接梁端的平板铰支

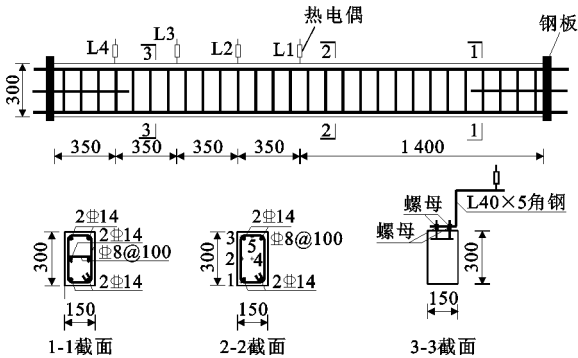


图 1 梁设计详图(单位:mm)

Fig. 1 Detail Design of Beam (Unit:mm)

表 1 试件编号和试验结果

Tab. 1 Number of Specimens and Test Results

试件 编号	受火 时间/h	峰值荷载 P_k/kN	峰值挠度 δ_k/mm	倒塌荷载 P_u/kN	极限挠度 δ_u/mm	轴力极值 N/kN	最大弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	屈服位移 Δ_y/mm	延性位移 Δ_f/mm	延性系数 μ_Δ	耗能 k_f
C	0	59.9	61.0	59.6	227.7	-89.5(52.6)	54.8	17.2	227.7	13.24	12 428.9
G1	1	58.6	30.4	18.2	161.0	-235.0(-)	55.1	21.5	73.4	3.41	6 356.3
G2	2	36.0	17.0	—	115.2	-263.2(-)	34.6	8.0	42.1	5.26	2 254.0

注:试件编号中,“C”表示常温,“G”表示高温,数字“1”和“2”分别表示升温 1 h 和升温 2 h;峰值荷载为加载过程第 1 个峰值荷载;峰值挠度为第 1 个峰值荷载对应的挠度;轴力极值中括号前外数值为最大轴压力,括号内数值为最大轴拉力。

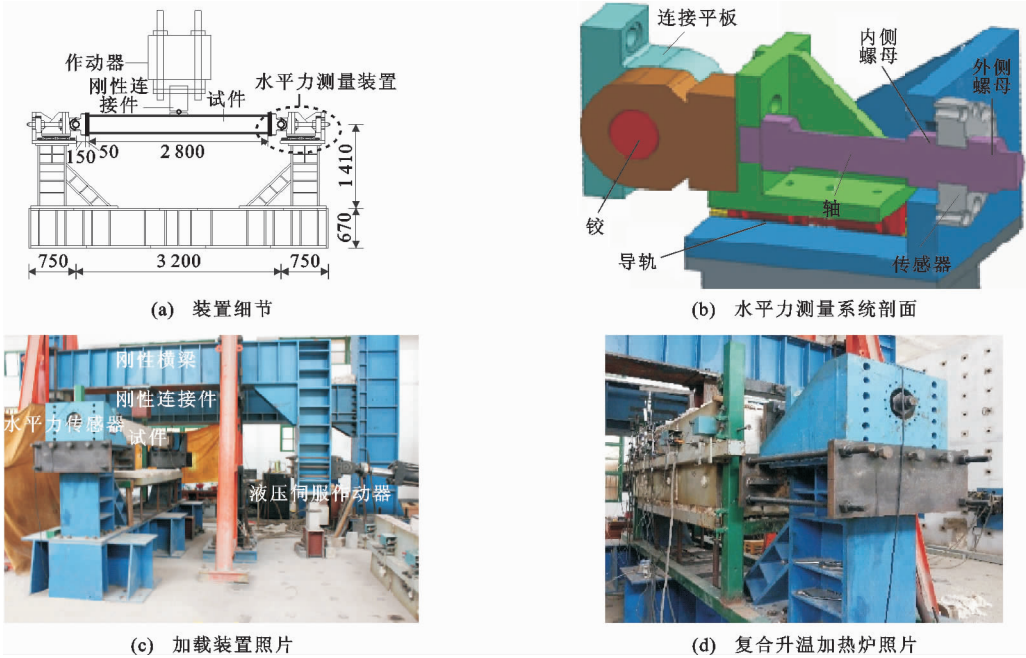


图 2 试验装置(单位:mm)

Fig. 2 Test Setup (Unit:mm)

座,支座外侧是可以测量梁端轴力的机构^[14];加载系统主要由倒 L 形刚性横梁、带滚动支座的竖向刚性连接件、3 个伺服作动器 MAS-1000 与控制软件组成^[14];升温装置采用多功能组合式结构试验高温炉,炉子构造和使用方法见文献^[14]。

在常温试验中,采用位移加载的方式,通过升降

刚性横梁对水平放置的试件施加竖向荷载,试验停止的判定条件是钢筋断裂^[17],即梁完全丧失承载能力。

高温试验分为标准升温 and 竖向推覆 2 个阶段。标准升温阶段:按照 ISO834 标准升温曲线,通过多功能组合式结构试验高温炉对梁进行三面受火试

验。竖向推覆阶段:高温炉达到预定升温时间后自动停止加热,立即拆除加热装置(保持炉体关闭)、热电偶测量仪器和位移计,按照与常温试验相同的方法进行加载。

1.3 试验测量

在常温试验中,通过控制软件测量加载阶段梁跨中竖向挠度、荷载及梁端轴力。

高温试验中除了在竖向推覆阶段采用与常温试验同样的方法测量相应数据外,还在升温阶段测量梁的竖向挠曲及测点温度。由于梁顶部在升温阶段完全处于高温炉内,其竖向挠曲不能通过直接布置位移计测量。因此,在升温过程中对梁施加 2 kN 恒定荷载,利用控制控件测量跨中(测点 L1)挠度,利用引出装置测量测点 L2~L4 的竖向挠度;此外,还采用热电偶测量炉膛温度和梁内部测点温度。引出装置和热电偶布置如图 1 所示,其中,引出装置为 L40×5 角钢与混凝土内预埋件通过螺母连接。

2 试验结果分析

2.1 升温反应

图 3 为梁内各测点的温度曲线、平均炉温曲线和 ISO834 标准升温曲线。随着炉膛温度升高,各测点温度升高,且梁底角部测点 1 的升温速率依次高于侧面测点 2,3 及梁截面中心测点 4,梁顶部测点 5 的升温速率最低。梁 G1 内除测点 1 温度明显较高外,其余测点的温度相差不大,而梁 G2 由于升温时间的增加,截面的温度梯度较梁 G1 变得更加明显;升温结束时,各测点温度均高于梁 G1 相应测点。混凝土内部水分在 100 ℃ 时出现蒸发、迁徙的现象,导致 2 根梁的测点 3,4,5 在 100 ℃ 左右形成明显的温度水平台阶,而测点 1,2 由于距加热源较近,受水分迁徙的影响较小。

钢筋混凝土梁三面受火时,由于轴向约束的作用,其受热膨胀会产生梁端轴力和弯曲效应。图 4,5 分别给出了梁端轴力-炉温曲线和梁竖向挠度-炉温曲线。由图 4 可见,在升温过程中,2 根梁受热膨胀产生的轴压力随炉温的变化趋势基本一致:600 ℃ 之前,轴压力增长速率缓慢,600 ℃ 之后,轴力迅速增加;升温结束时梁 G2 与梁 G1 的轴压力分别为 185.5 kN 和 236.0 kN。由图 5(a)可见,梁 G1 各测点竖向挠度随炉温变化规律与轴力随炉温变化规律基本类似:600 ℃ 以下,竖向挠度变化不大;600 ℃ 以后,竖向挠度增速加快。由图 5(b)可见,梁 G2 在炉温达到 800 ℃ 之前,竖向挠度整体变化趋势和大

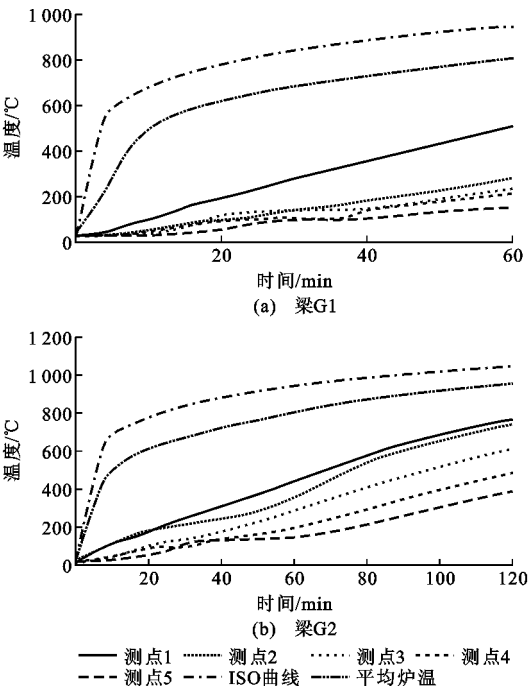


图 3 升温曲线与测点温度
Fig. 3 Temperature-time Curves and Temperature of Measuring Points

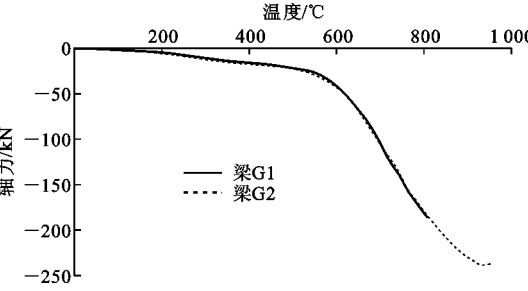


图 4 轴力-炉温曲线
Fig. 4 Axial Force-furnace Temperature Curves

小与 G1 基本相同,但炉温超过 800 ℃ 后,其竖向挠度有所恢复。越靠近跨中位置,梁的竖向位移越大, G1 跨中位移在升温结束时达到 12 mm,而 G2 跨中位移在达到最大值后逐渐减小,在升温结束时仅为 8 mm。

2.2 破坏形态

图 6 给出了梁的破坏形态。常温梁 C 破坏时,2 根底部纵筋被拉断,整体变形曲线呈 V 字形,跨中受压区混凝土压溃并剥离,受拉区弯曲裂缝开裂严重,部分混凝土剥离脱落。高温梁 G1 的裂缝开展模式与常温梁类似,但由于高温引起的轴向压力较大,裂缝数量少、宽度小,塑性铰区域明显缩小。高温梁 G2 与前 2 个试件不同,其底部纵筋仅 1 根被拉断,且由于钢筋断裂后继续加载,梁竖向位移增大,裂缝开展更为严重,塑性铰区域有所增大,但仍

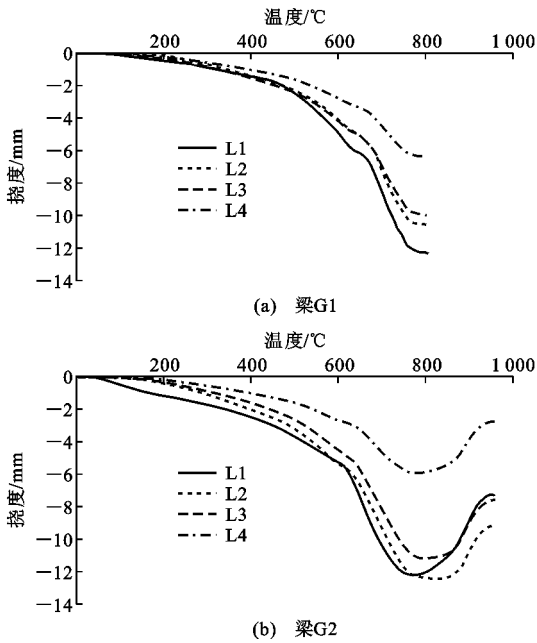


图 5 梁整体竖向挠度-炉温曲线

Fig. 5 Vertical Deflection-furnace Temperature Curves of Beam

小于常温梁 C 的塑性铰区域。此外,还观察到梁 G2 跨内出现较多拉裂缝,这是因为继续加载后,梁受到较大轴向拉力作用。

2.3 轴力-挠度曲线

图 7 为加载全过程的轴力-挠度曲线,正、负值分别表示轴拉力、轴压力。常温梁 C 的梁端轴力从 0 逐渐增大至峰值轴压力,随后开始逐渐减小并向轴拉力转变,最后在挠度为 227.7 mm 时达到峰值轴拉力。高温梁 G1,G2 由于轴向约束的存在,高温引起受热膨胀使得梁在加载前形成较大的初始轴压力,分别为 167.3,221.7 kN,导致其峰值轴压力明显高于常温梁;在高温作用下,峰值轴压力点从 A 向左移动至点 A' 和 A'',曲线捏缩现象更明显,即轴力随挠度的变化速率更快。与常温梁 C 的梁端轴力最后转换为轴拉力不同,高温梁的梁端轴力在加载过程中始终为轴压力。从图 7 可以看出,高温梁的 2 条曲线分别在 161.0 mm 和 115.2 mm 时急速下降,这是由于梁内钢筋突然发生断裂所致。

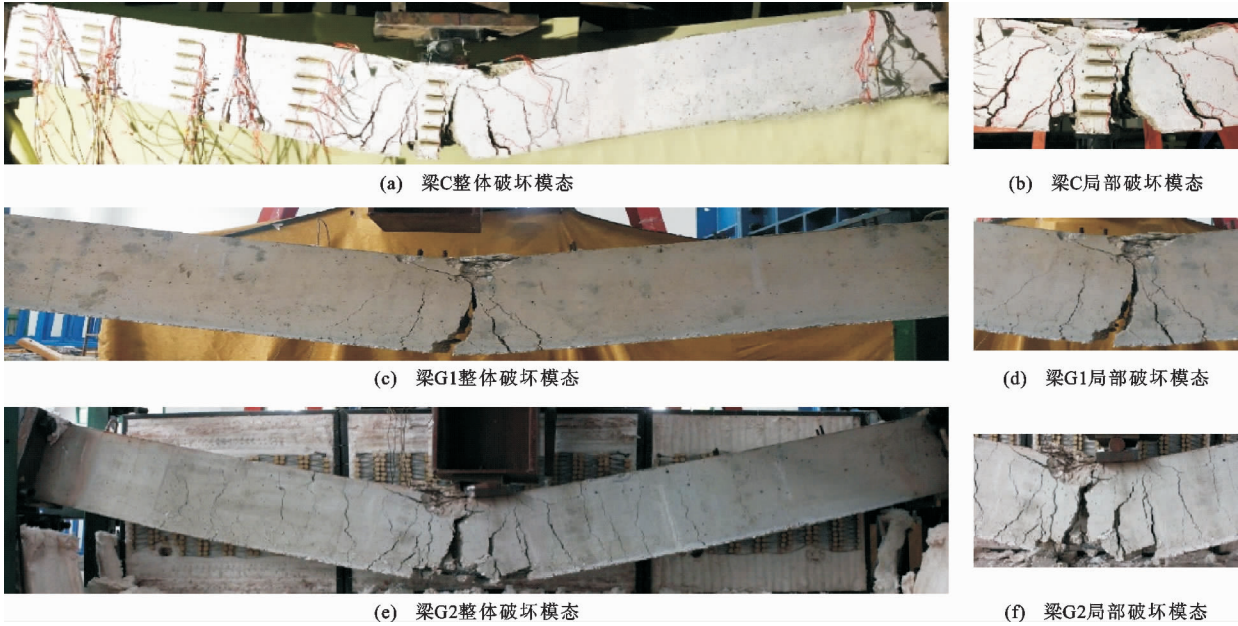


图 6 破坏模式

Fig. 6 Failure Modes

2.4 荷载-挠度曲线

各试件加载全过程的荷载-挠度曲线如图 8 所示。常温梁 C 的曲线可以分为弹性阶段(OA)、压拱阶段(AB)、压-拉转换阶段(BC)和悬链线阶段(C 点以后)。在加载初期,梁 C 承担的荷载随挠度呈线性增大;由于梁的压拱效应,随着挠度的增大,荷载增大至峰值荷载点 B;随后经历小幅降低即再次

上升,最终在挠度达到 227.7 mm 时,由于钢筋突然断裂而急速下降,破坏荷载为 59.6 kN。高温梁的荷载随挠度变化趋势与常温梁有显著差异:由于高温作用引起轴压力的影响,高温梁在加载初期处于压弯状态,其承担的荷载迅速达到峰值荷载,随后随着挠度增加而逐渐降低,直至破坏;破坏之前,2 条曲线的下降速率基本相同。结合表 1 可知,高温梁 G1 的峰值荷载与常温梁的峰值荷载相差不大,而高

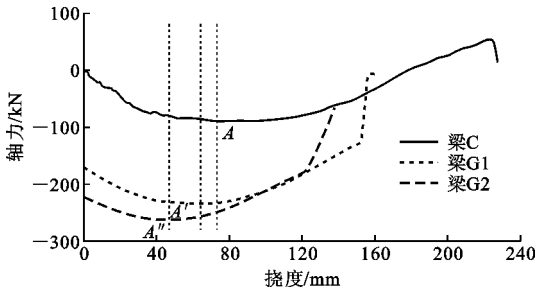


图 7 轴力-挠度曲线

Fig. 7 Axial Force-deflection Curves

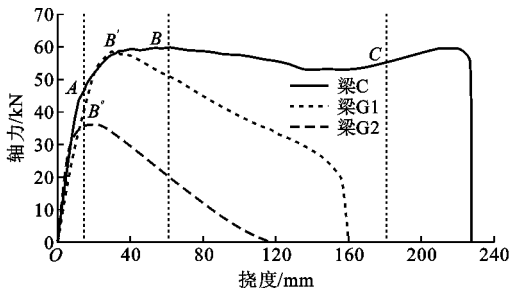


图 8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection Curves

温梁 G2 的峰值荷载大幅降低。可见,高温作用 1 h 对于轴向约束钢筋混凝土梁的峰值荷载影响不大,但会减小梁破坏时的位移;高温作用 2 h 使得轴向约束钢筋混凝土梁的峰值荷载和破坏时的位移显著降低。

2.5 弯矩-挠度曲线

图 9 为梁的弯矩-挠度 ($M-\delta$) 曲线,其中弯矩 $M=RL_n-N\delta$, R 为支座反力, L_n 为铰接点到梁跨中的距离, N 为水平力, δ 为中点挠度。与图 8 类似,将常温梁 C 的弯矩-挠度曲线划分为 4 个阶段,其弯矩在弹性段迅速增大,随后增速减缓,在压-拉转换阶段达到极限抗弯承载力后,开始逐渐减小直至破坏。高温梁弯矩随挠度的变化趋势与常温梁有所不同:在初始轴压力和荷载同时作用下,梁的弯矩迅速达到最大值,随后逐渐下降,且 2 根梁的弯矩下降速率相差不大。与常温梁 C 相比,高温梁的弹塑性阶段较短,后期抗弯承载力退化较快;高温梁 G1 的极限抗弯承载力略高于常温梁 C,而梁 G2 的极限抗弯承载力显著降低。各梁最大弯矩的具体数值见表 1。

2.6 延性和耗能

钢筋混凝土梁的延性和耗能能力是其火灾高温下力学性能的重要评判指标。梁的延性用延性系数 μ_Δ 来表示,耗能能力用荷载-位移曲线围成的面积来表示, $\mu_\Delta = \Delta_f / \Delta_y$, Δ_y 为屈服位移, Δ_f 为延性位

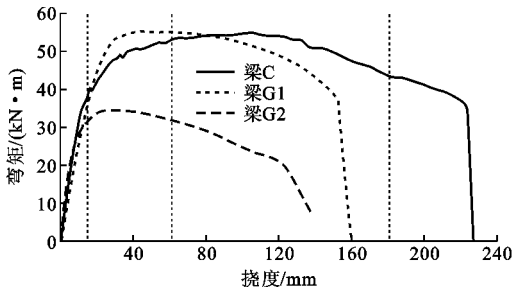


图 9 弯矩-挠度曲线

Fig. 9 Bending Moment-deflection Curves

移^[18],具体数据见表 1。由表 1 可以看出,常温梁 C 的延性系数最高,高温梁 G1 和 G2 的延性系数仅为常温梁的 25.8% 和 39.7%。梁 G2 的延性系数高于梁 G1,这与梁内钢筋的延性随温度变化规律相一致^[19]。钢筋屈服应变受高温影响不大,而极限应变在超过 500 °C 后随温度升高而增大。这表明,高温下轴向约束钢筋混凝土梁的延性主要取决于钢筋的延性。对于耗能性能来说,常温梁 C 的耗能性能最好,高温梁 G1 和 G2 相对于常温梁 C 分别降低了 48.9% 和 81.9%。可见,高温作用会显著降低钢筋混凝土梁的延性和耗能能力,且升温时间越长,耗能能力降低幅度越大,而延性则不同。

3 受力机理分析

为分析高温下轴向约束钢筋混凝土梁的受力机制,图 10 给出了各试件的轴力-弯矩曲线及 $N-M$ 能力曲线。常温梁的 $N-M$ 能力曲线按照偏心构件进行计算;高温梁的 $N-M$ 能力曲线采用文献[20]提出的简化计算方法,即考虑高温对钢筋和混凝土材料性能的影响,在常温计算方法的基础上进行修正。

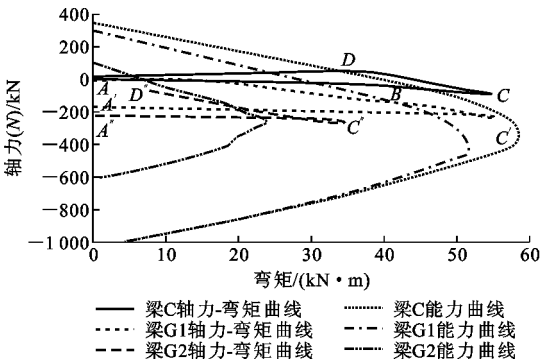


图 10 轴力-弯矩曲线

Fig. 10 Axial Force-bending Moment Curves

常温梁 C 的轴力-弯矩曲线可以分为 4 个阶段:抗弯阶段(AB)、压弯强化阶段(BC)、压弯退化阶段(CD)和悬链线形成阶段(D 点以后)。曲线 AB 段

梁端轴压力增速缓慢,轴压力较小,跨中弯矩较大,可认为梁主要处于抗弯状态,即以梁机制为主。 BC 段由于轴压力的影响,随着挠度增加,梁竖向承载力增加。 C 点以后,由于跨中荷载的减小(图 8)以及梁端轴力减小引起的二阶效应减弱(图 7),导致梁抗弯承载力下降,梁进入压弯退化阶段。梁端轴力在曲线超过 D 点后转换为轴拉力,形成悬链线机制。从图 10 可以看出,梁达到极限抗弯承载力后,其轴力-弯矩曲线沿着理论 $N-M$ 能力曲线发展。结合图 8,9 可知,梁承担的荷载和跨中弯矩在悬链线阶段并没有增加或者超过极限承载力,可认为是梁的悬链线发展并不充分,梁即随着钢筋的断裂而破坏,与文献[15]发现的规律一致。

高温梁在整个加载过程中始终处于压弯状态,且其轴力-弯矩曲线仅可分为压弯强化和压弯退化 2 个阶段。压弯强化阶段中,由于加载前存在初始温度内力(轴向压力),高温梁处于压弯复合受力状态,并随着挠度增大,轴压力和弯矩均逐渐增大,达到极限承载力点 C' 和 C'' 。从图 10 可以看出,高温梁 $G1$ 的极限抗弯承载力与常温梁 C 相差不大,可能的原因是:经过 1 h 升温,梁底部纵筋温度约为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,其极限强度降低不明显^[21],且高温产生的初始轴压力能够提高梁的抗弯承载力^[12]。梁 $G2$ 的极限抗弯承载力大幅降低,仅为 $34.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。这表明,受高温作用 2 h 时,梁端初始轴压力对于梁极限抗弯承载力的提高有限,而高温导致混凝土和钢筋的强度劣化,会显著降低梁的极限抗弯承载力。在弯矩达到极限抗弯承载力后,试件进入压弯退化阶段,虽然梁仍处于压弯受力状态,但随着挠度增大,弯矩和轴力均呈现退化趋势,并且退化路径低于高温 $N-M$ 能力曲线。

4 结 语

(1)温度内力影响试件的破坏模式,高温产生的轴向压力使得梁跨中塑性铰区域缩小,破坏呈脆性。

(2)高温作用影响试件的承载力,钢筋和混凝土因高温作用导致材料力学性能劣化而降低了梁的峰值承载力,受热膨胀产生的轴压力则提高了梁的峰值承载力;随着受火时间延长,材料劣化对梁峰值承载力的影响程度高于温度内力的影响程度。

(3)高温作用显著影响试件的倒塌受力机制,常温梁的受力机制由抗弯机制转化为压弯机制,最后形成悬链线机制;高温作用下梁始终处于压弯机制。

(4)对轴向约束的钢筋混凝土梁,可以采用 $N-$

M 能力曲线来预测其在大变形下的受力状态。高温下梁的 $N-M$ 能力曲线计算方法有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Behavior of Reinforced Concrete at Elevated Temperature and Its Calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 陆洲导,朱伯龙,周跃华. 钢筋混凝土简支梁对火灾反应的试验研究[J]. 土木工程学报,1993,26(3):47-54.
LU Zhou-dao, ZHU Bo-long, ZHOU Yue-hua. Experimental Study on Fire Response of Simple Supported Reinforced Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(3): 47-54.
- [3] 时旭东,过镇海. 高温下钢筋砼连续梁的破坏机构和内力重分布研究[J]. 建筑结构,1996,26(7):34-37.
SHI Xu-dong, GUO Zhen-hai. Investigation of Failure Mechanism and Internal Force Redistribution of Reinforced Concrete Continuous Beams at Elevated Temperature[J]. Building Structure, 1996, 26(7): 34-37.
- [4] 时旭东,过镇海. 高温下钢筋混凝土连续梁的受力性能试验研究[J]. 土木工程学报,1997,30(4):26-34.
SHI Xu-dong, GUO Zhen-hai. Experimental Investigation of Behavior of Reinforced Concrete Continuous Beam at Elevated Temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 26-34.
- [5] DWAIKAT M B, KODUR V K R. Response of Restrained Concrete Beams Under Design Fire Exposure [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(11): 1408-1417.
- [6] DWAIKAT M B, KODUR V K R. A Numerical Approach for Modeling the Fire Induced Restraint Effects in Reinforced Concrete Beams[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(4): 291-307.
- [7] WU B, LU J Z. A Numerical Study of the Behaviour of Restrained RC Beams at Elevated Temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(4): 522-531.
- [8] 吴 波,乔长江. 混凝土约束梁升降温全过程的耐火性能试验[J]. 工程力学,2011,28(6):88-95.
WU Bo, QIAO Chang-jiang. Experimental Study on Fire Behaviors of RC Restrained Beams During Heating and Cooling Phases[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 88-95.
- [9] 吴 波,乔长江. 约束混凝土梁的升降温全过程轴力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(1):12-20.

- WU Bo, QIAO Chang-jiang. Axial Force Analysis of Restrained Concrete Beams During Heating and Cooling Phases[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 12-20.
- [10] 吴波, 乔长江. 约束混凝土梁的升降温全过程弯矩分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 353-360.
- WU Bo, QIAO Chang-jiang. Bending Moments of Restrained RC Beams During Heating and Cooling Phases[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 353-360.
- [11] ALBRIFKANI S, WANG Y C. Explicit Modelling of Large Deflection Behaviour of Restrained Reinforced Concrete Beams in Fire[J]. Engineering Structures, 2016, 121: 97-119.
- [12] 韩蕊, 王广勇, 薛素铎, 等. 受轴向约束的钢筋混凝土 T 形简支梁耐火性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 34-40.
- HAN Rui, WANG Guang-yong, XUE Su-duo, et al. Fire Performance of T-shaped Simply Supported Concrete Beams with Axial Constraints[J]. Building Science, 2016, 32(9): 34-40.
- [13] ELGHAZOUALI A Y, IZZUDDIN B A. Failure of Lightly Reinforced Concrete Members Under Fire. I: Analytical Modeling[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(1): 3-17.
- [14] LI Z, LIU Y Z, HUO J S, et al. Experimental Assessment of Fire-exposed RC Beam-column Connections with Varying Reinforcement Development Lengths Subjected to Column Removal[J]. Fire Safety Journal, 2018, 99: 38-48.
- [15] 谭炎. 高温下钢筋混凝土梁-柱边节点竖向推覆试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- TAN Yan. Experimental Research on Push-down Test of RC Exterior Beam-column Connection at High Temperature[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [16] 谭炎, 李智, 霍静思, 等. 锚固形式对火灾下边柱失效后 RC 梁柱节点受力机制影响试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(4): 41-47.
- TAN Yan, LI Zhi, HUO Jing-si, et al. Experimental Study on Mechanical Behaviour of RC Beam-column Connections with Different Anchorage Form Under Exterior Column Removal Induced by Fire[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2017, 39(4): 41-47.
- [17] YI W J, HE Q F, XIAO Y, et al. Experimental Study on Progressive Collapse-resistant Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(4): 433-439.
- [18] ELSAYED W M, ABDEL MOATY M A N A, ISSA M E. Effect of Reinforcing Steel Debonding on RC Frame Performance in Resisting Progressive Collapse[J]. HBRC Journal, 2016, 12(3): 242-254.
- [19] 钮宏, 陆洲导, 陈磊. 高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1990, 18(3): 287-297.
- NIU Hong, LU Zhou-dao, CHEN Lei. An Experimental Study of Constitutive Relationship Between Reinforce Bar and Concrete Under Elevated Temperature[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1990, 18(3): 287-297.
- [20] 杨建平, 时旭东, 过镇海. 高温下钢筋混凝土压弯构件极限承载力简化计算[J]. 建筑结构, 2002, 32(8): 23-25.
- YANG Jian-ping, SHI Xu-dong, GUO Zhen-hai. Simplified Calculation of Ultimate Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Compression-bending Members at Elevated Temperature[J]. Building Structure, 2002, 32(8): 23-25.