

# 高温下钢筋混凝土梁-柱节点的力学性能演化机制

卢丽敏<sup>1,2</sup>, 王守兴<sup>3</sup>, 吴少华<sup>4</sup>, 李康<sup>3</sup>, 舒前进<sup>1</sup>, 袁广林<sup>1</sup>, 禹海涛<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 徐州市建设工程检测中心有限公司, 江苏 徐州 221003; 5. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究钢筋混凝土框架梁-柱节点的火灾行为及其相互约束作用随温度的变化规律, 开展了荷载-高温耦合作用下的钢筋混凝土框架梁升降温全过程的结构试验。在试验的基础上采用 VULCAN 程序进行了恒定荷载作用下框架梁单独受高温、梁-柱同时受高温、梁-柱节点弯矩-转角关系的火灾响应数值分析。结果表明, 钢筋混凝土框架梁-柱节点的转动约束强度随温度的升高而降低, 梁-柱节点转角峰值相较于弯矩峰值具有滞后效应。

**关键词:** 梁-柱节点; 火灾高温; 转动约束; 力学性能; 火灾试验

中图分类号: TU312; TU317

文献标志码: A

high temperature at the same time, and the beam-column joint moment-rotation relationship at a constant load. The results show that the end restraint strength of reinforced concrete frame beams decreases with the increase of temperature. The peak value of the rotational angle at the beam-column joint has a certain delay compared to the peak value of the restraint moment.

**Key words:** beam-column joint; elevated temperature; rotational restraint; mechanical performance; fire experiments

## Mechanical Property Evolution of Beams-Column Joints at Elevated Temperatures

LU Limin<sup>1,2</sup>, WANG Shouxing<sup>3</sup>, WU Shaohua<sup>4</sup>, LI Kang<sup>3</sup>, SHU Qianjin<sup>1</sup>, YUAN Guanglin<sup>1</sup>, YU Haitao<sup>5</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construction Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Xuzhou Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Xuzhou 221003, China; 5. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the structural behavior of reinforced concrete beam-column joints and the changing rules of the constraints between them at elevated temperatures, thermal-load coupling tests on reinforced concrete frame beams were conducted. Based on the test, the VULCAN program is adopted to conduct the numerical analysis of the fire response of the frame beam subjected to high temperature alone, the beam-column subjected to

火灾中的钢筋混凝土框架梁由于受到高温影响, 构件荷载和温度荷载通过内力重分布重新作用于钢筋混凝土结构上<sup>[1-2]</sup>, 梁-柱节点在传递弯矩的同时能够发生相对转动, 从而产生纵向伸长、弯曲、旋转等一系列热变形<sup>[3]</sup>。梁-柱节点的变形能力能够真实地反映框架结构的变形能力, 通过理论计算可以得到弯矩调幅系数与转角的关系, 进而得到转角和弯矩的关系<sup>[4-5]</sup>。由于受热构件刚度的变化, 框架柱对梁的约束作用呈现随受火温度而变化的特性。

通过对结构构件的抗火性能研究发现: 在受火前期, 梁端位移变形缓慢, 接近耐火极限时变形明显加快<sup>[6]</sup>。受恒荷载和高温共同作用时, 节点核心区的温度场分布较梁-柱端截面偏低, 在梁端容易出现塑性铰外移现象, 塑性区被压缩向柱端移动, 并在柱端出现塑性铰<sup>[7-9]</sup>。梁轴线上的内力分布发生变化, 使梁在支撑柱两侧发生不同的变形, 产生转角位移, 必须考虑支撑柱布置对火灾行为的影响<sup>[10-11]</sup>。可以看出火灾高温下钢筋混凝土框架梁的约束强度的变化会影响其在升温过程中的内力重分配和位移响

收稿日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51808544)

第一作者: 卢丽敏(1982—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢筋混凝土材料高温性能及钢筋混凝土结构火灾行为。E-mail: Limin.lu@cumt.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

应,因此对火灾高温下的梁端转角变形和约束弯矩的关系仍需要进一步研究。通过数值分析方法进行结构火灾响应的模拟仍然是目前大型复杂结构火灾行为研究的主要方法<sup>[12-14]</sup>,当前火灾高温下钢筋混凝土梁-柱节点的火灾响应分析大都基于定常约束<sup>[15-16]</sup>,考虑端部约束强度随温度变化的研究鲜有报道。因此,关于框架梁-柱的约束弯矩与转角在高温下的变化情况仍然需要深入的分析。

本文从钢筋混凝土框架结构中分离出梁-柱节点,仿照结构的实际受力情况,开展了两组恒载作用下钢筋混凝土框架梁单独高温的梁-柱节点动力响应的火灾试验,在试验的基础上采用VULCAN程序进行了恒载作用下钢筋混凝土框架梁单独高温和梁-柱同时受高温时梁-柱节点火灾响应的数值计算,探讨了钢筋混凝土框架梁升降温全过程中梁端转角和弯矩的演化机理。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

为了考虑钢筋混凝土框架梁-柱节点的约束强度的不同,本试验共计设计了两组足尺单跨框架梁结构,通过梁端柱子的截面不同,来实现不同的约束强度,框架结构基本信息见表1。

钢筋混凝土框架由一根梁和两根柱构成,由于柱子是为了提供框架梁的约束,试验中没有受火,因此对柱子进行了缩尺,缩尺比例1:2,梁与柱的连接假定为半刚性连接,柱基础假定为刚性固定(图1)。图中, $d$ 为钢筋直径, $l_{abE}$ 为规范要求的钢筋锚固长度。钢筋混凝土梁的净跨度为3 300 mm,有效受火跨度为2 800 mm。钢筋混凝土梁两侧采用整浇钢筋混凝土柱作为梁的约束构件,两侧柱子与高温试验炉之间各预留50 mm空间。梁和柱均配置直径为

18 mm的HRB400纵向受力钢筋,其屈服强度和极限抗拉强度实测值分别为422.5和591.0 MPa。混凝土28 d立方体抗压强度实测值为42.5 MPa。

### 1.2 升温加载制度

钢筋混凝土梁通过液压千斤顶和一个分配梁实现三分点集中力加载。液压千斤顶作用在分配梁上,千斤顶与分配梁之间布置压力传感器,用来实时监控荷载加载情况。千斤顶通过分配梁及分配梁下的钢垫块向钢筋混凝土框架梁传递荷载。

试验时,试件吊装到位后,紧密连接各个部分,底梁通过4个地锚螺杆与实验室底板相连。支座和试件间孔隙采用石棉材料封堵,防止梁端柱和加载系统受到高温影响。

液压千斤顶加载值按双筋矩形梁跨中极限承载力的30%取值,计算值为56.0 kN,分3级加载。施加预定荷载的50%以压实缝隙,检查各测量系统是否工作正常,随后卸载,预加载要求构件控制在弹性范围内。之后按照逐级加载方法至预定荷载并且持荷10 min,待荷载、位移和应变稳定,开始供电,即进入恒载升温阶段。

试验采用三面电加热方式进行(梁两侧,梁底部),升温到预定的2 h加热时间之后再恒载降温,采用自然通风的降温方式,数据采集截至降温后3 h,结束试验。

钢筋混凝土框架试件的热-力耦合试验加载装置设计如图2所示。

### 1.3 测点布置

为了跟踪测量火灾发展过程中受火梁内部温度场的变化,从而为梁-柱构件强度的变化提供依据,本实验设置了5组热电偶(H1~H5,图3a)。每组热电偶(梁截面)包括6个热电偶测点(T1~T6,图3b),监测梁内不同深度温度场的变化。

表1 试件基本信息

Tab. 1 Basic information of specimens

工况	梁截面/(mm×mm)	柱截面/(mm×mm)	柱计算高度/mm	转动约束刚度比	轴向约束刚度比
A-120	200×350	200×200	1 550	0.597	0.008
B-120	200×350	250×250	1 550	1.152	0.015

Z1和Z2用于测量钢筋混凝土梁的轴向变形,Z3和Z4用于测量节点转角(图3a)。Z1、Z2、Z3和Z4采用YHD-100型位移传感器,由DH3816N静态数据采集仪采集。

在梁-柱节点处、柱跨中的钢筋位置布置高温应变片,编号为HBS1~HBS4的应变片布置在在梁上,编号为HCS1~HCS8的应变片布置在柱上(图4),以校核梁-柱构件的受力情况。

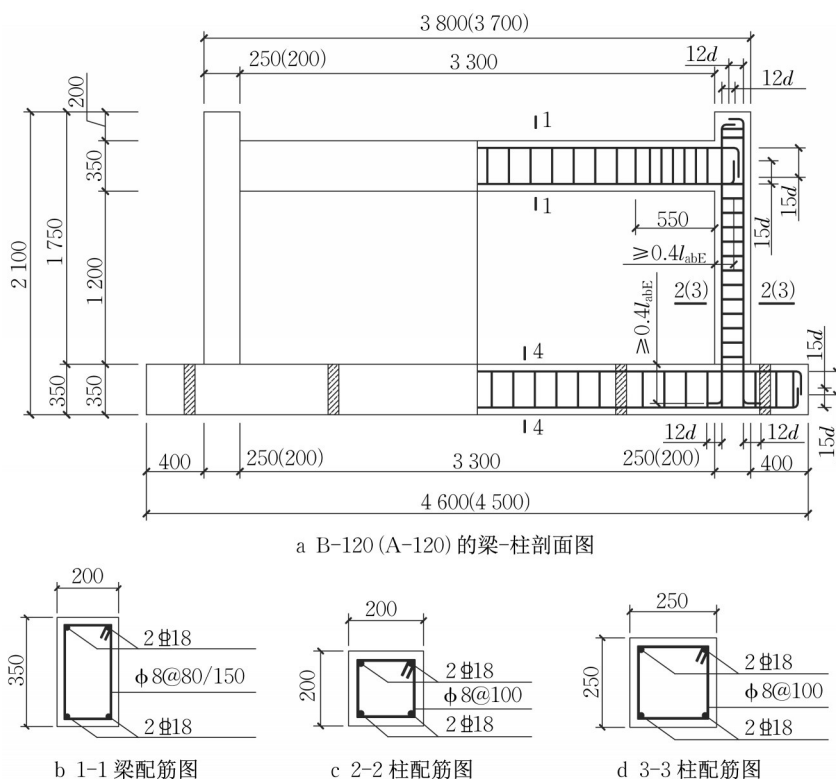


图1 试件尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Size and reinforcement of specimen (unit: mm)

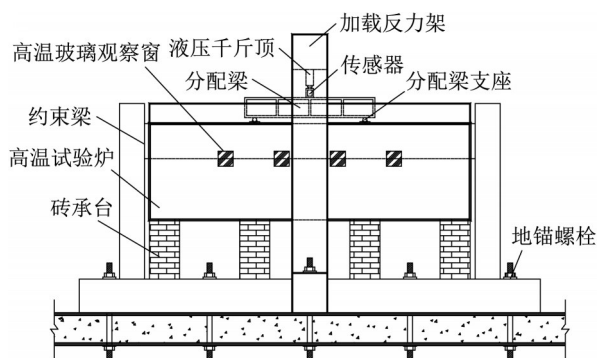


图2 热-力耦合加载系统立面示意图

Fig. 2 Vertical diagram of thermal-load loading system

## 2 试验结果

### 2.1 梁截面温度场

为了研究火灾高温作用下温度对梁-柱转角和约束作用产生的影响,选取了B-120构件的跨中截面H2截面进行了梁截面温度场的分析(图5)。

对于升温阶段的H2截面,即加热到120 min:由于测点T1位于侧面及底面两处受火面的边角点位置,该测点升温速率最快;而T2、T3及T4分别位于单一受火面的中间及边角位置,但是梁侧面距离电炉电阻丝相较于底面更近些,故T2、T3的升温速率

相近,且高于测点T4;测点T5、T6布置在梁截面中心位置及背火面,升温速率远低于边缘测点。

在自然通风降温阶段,从120 min到300 min:混凝土外表面开始有不同程度的降温,T1-T4测点的温度均下降。而由于混凝土的热惰性,降温一段时间内,其内部测点T5、T6的温度仍保持上升状态,降温90 min后,混凝土内部的温度超过了边缘的T4。

### 2.2 钢筋应变分析

试验条件下,钢筋混凝土框架梁-柱节点处的约束弯矩,无法直接测得。但是其约束弯矩的变化可以通过钢筋拉区应变反映出来,如钢筋应变HCS1和HCS5的变化曲线。而柱子中部钢筋的应变差,即HCS3与HCS4的差以及HCS7与HCS8的差,反映了柱子反弯点位置的变化,常温下,应变差趋近于0,柱子反弯点接近柱中截面,钢筋应变结果如图6所示。

钢筋应变HCS5和HCS1的变化曲线直接反映了左右两侧柱端约束弯矩的变化趋势,呈现出先随着截面温度的升高逐渐增大而后逐渐减小的变化特性,其约束弯矩的峰值出现在加热60 min左右。这说明当截面受火后达到一定的温度后,其端部约束弯矩随截面温度的升高而下降,而降温阶段,由于热

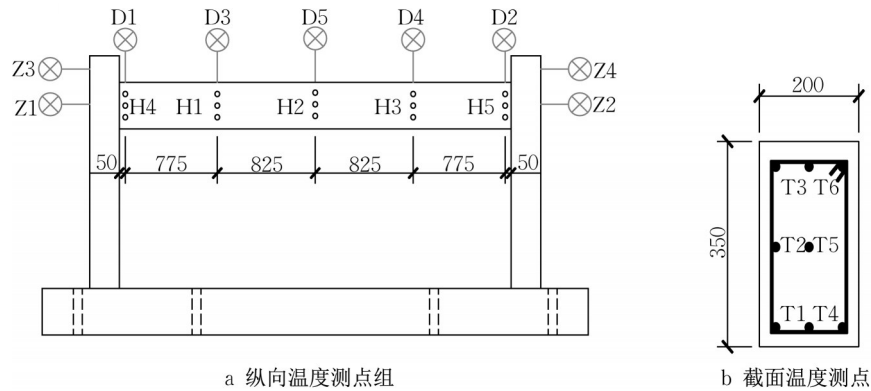


图3 温度、位移测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 3 Layout of thermal couples and displacement gauge (unit: mm)

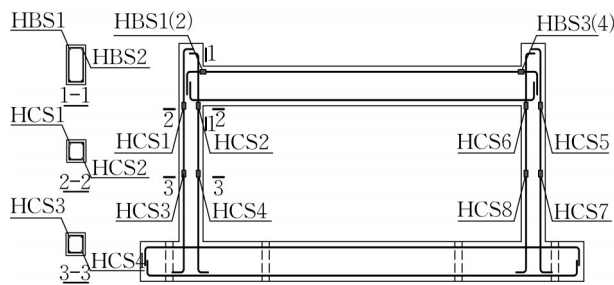


图4 高温应变片布置图

Fig. 4 Layout of high-temperature strain gauge

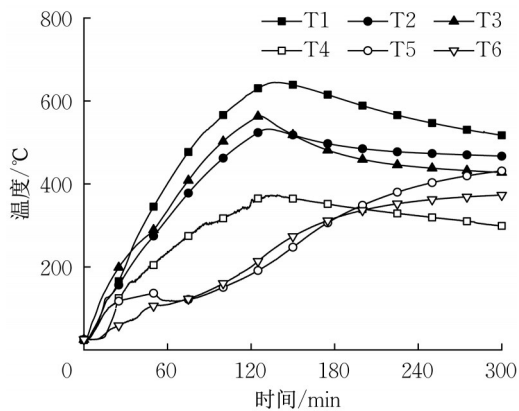


图5 H2截面温度场分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution of H2

惰性,截面内部温度仍会持续升高一段时间,其梁端约束弯矩仍缓慢减小直到趋于平缓。

从HCS3与HCS4的差以及HCS7与HCS8的差,可以看出柱子反弯点位置随着梁温度的升高,先向下移动,然后降温段略有恢复,反映出端部弯矩先增大后逐渐下降的变化趋势。

### 2.3 梁端转角位移

在火灾高温外加恒载作用下,钢筋混凝土框架梁由于材料劣化及裂缝的发展会引起梁端转角位移的变化,试验采用位移替代法(梁端位移差值)考虑

梁-柱相对变形,得到转角位移随时间的关系。分别以Z3-Z1、Z4-Z2表示火灾升降温全过程中A-120、B-120钢筋混凝土框架梁-柱Z3与Z1、Z4与Z2测点的转角位移差值,其随时间的变化曲线如图7所示。

钢筋混凝土框架梁在整个升降温全过程中的转角位移随着截面温度的升高先较快增长而后快速减小并渐趋稳定的变化特性。在升温初期,由于温度梯度的增大,梁端发生的转角位移也不断增大。随着温度不断升高,梁端转角在达到峰值后开始减小,梁端转角峰值的出现晚于约束弯矩,说明梁-柱节点转动约束在标准火灾温度条件下,加热60 min后强度开始下降。

Z3-Z1、Z4-Z2测点的转角位移曲线总体较为一致,表明试验结果的对称性相对较好。尽管高温情况下,节点转动约束强度在下降,但是相同温度下B-120试件的转动约束强度更大,B-120试件在升降温全过程中的转角位移峰值略小于A-120。

## 3 梁-柱节点转角、约束弯矩数值分析

在试验的基础上,本文采用VULCAN程序开展了恒定荷载下框架梁单独受高温和梁-柱同时受高温时的火灾响应数值分析。受火矩形截面梁仅考虑三面受火(底面及两个侧面)。VULCAN在进行截面温度场分析时,首先将梁截面进行了单元的划分,并将钢筋截面面积等效为长方形单元的面积,继而对梁截面沿宽度及高度方向进行网格单元划分。

数值计算时,升降温阶段钢筋和混凝土的热工参数采用Eurocode2<sup>[17]</sup>中的相关公式。钢筋混凝土梁受火面的对流换热系数为 $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ,不受火面的对流换热系数取为 $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ,辐射换热系数为0.56。程序在计算分析时,指定前10个分析步

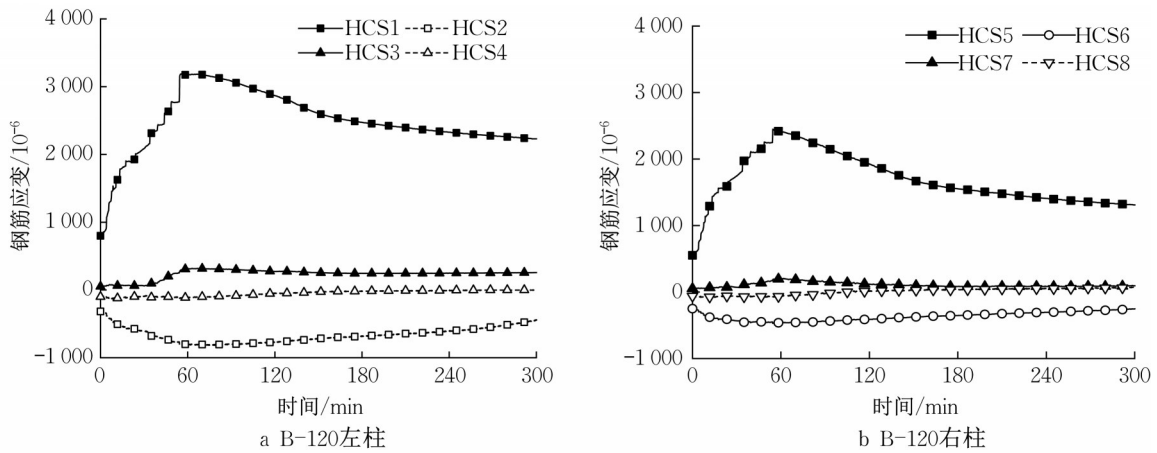


图6 高温下B-120柱子钢筋应变曲线

Fig. 6 Strain curve of B-120 column reinforcement at elevated temperature

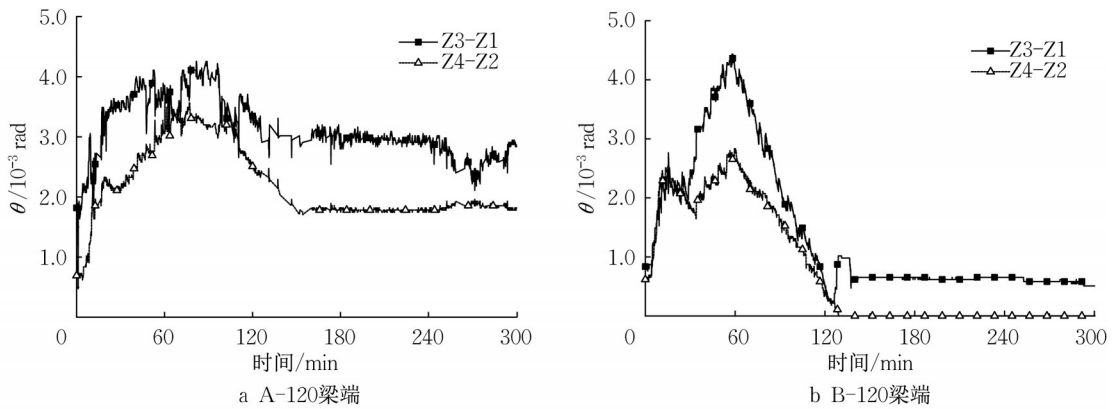


图7 火灾高温下A-120、B-120梁端转角位移曲线

Fig. 7 Rotational angle of A-120 and B-120 at elevated temperatures

为自重及竖向荷载步,后600个分析步为热力耦合下结构计算分析步(温度场导出的温度数据时间间隔为0.5 s,故300 min的升降温阶段共计分析步600步)。

### 3.1 基于实验工况的转角结果分析

基于VULCAN模型,首先模拟了试验工况A-120框架,通过梁-柱节点转角的计算结果和试验结果的对比,对计算程序的合理性进行了验证,框架试验与模拟转角位移对比如图8所示。

CO-1程序模拟值与试验值A-120对比结果从变化趋势上对应良好,即同样在升温80 min后,转角位移达到峰值,之后开始减小,并在降温阶段渐趋稳定。由于转角本身量级很小,试验中位移测量毫米误差,都会对转角数值产生较大的影响,且试验中试件左右未达到理想中的完全对称,因此与试验结果数值相比,模拟曲线的转角位移峰值略大。

### 3.2 不同约束工况下节点转角对比分析

梁-柱同时高温,柱本身强度的下降,必然导致

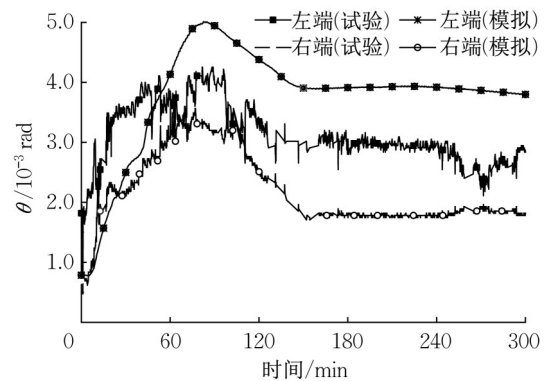


图8 A-120框架试验与模拟转角位移对比

Fig. 8 Comparison of beam end rotational angle between experiment and simulation for A-120 frame

其对钢筋混凝土框架梁的约束作用与钢筋混凝土框架梁单独高温的工况不同。图9给出了VULCAN程序开展的恒定荷载作用下框架梁单独受高温和梁-柱同时受高温时梁-柱转角位移的变化曲线,钢筋

混凝土框架梁-柱参数如表2所示(图9中,L表示梁单独高温,F表示梁-柱同时高温)。

表2 钢筋混凝土框架梁-柱参数

Tab. 2 Parameters of beams and columns

工况	柱截面/ mm×mm	柱计算高 度/mm	转动约束刚 度比	轴向约束刚 度比
CO-1	200×200	1 200	0.597	0.008
CO-2	250×250	1 200	1.152	0.015
CO-3	350×350	2 400	1.427	0.005
CO-4	400×400	4 000	1.218	0.001

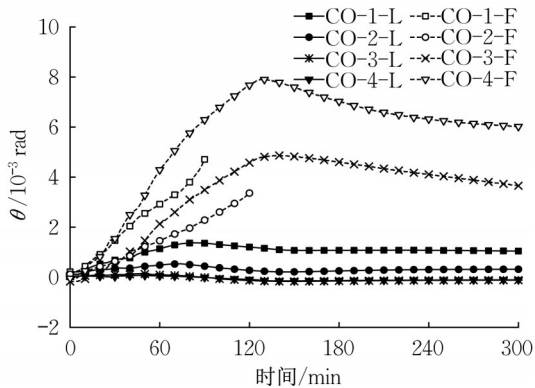


图9 梁单独高温和梁-柱同时高温下转角位移对比曲线  
Fig. 9 Rotational angle displacements of beam-column joint when frame subjected to elevated temperature partly and wholly

梁单独高温时转角在受火80 min内呈现增大趋势,在升温阶段后期就开始逐渐恢复,之后趋于稳定。梁-柱同时高温时,转角在受火120 min内始终呈现增大趋势,在降温阶段,转角变形部分恢复后趋于稳定。并且结构承载力下降相比梁单独高温更为严重,工况CO-1-F和CO-2-F在升温阶段丧失承载力发生破坏。

梁-柱同时高温的钢筋混凝土的梁-柱节点转角位移峰值远大于梁单独高温下的工况,这是因为相比于梁单独高温,梁-柱同时高温对柱端转动约束刚度的削弱更多,致使节点转动刚度更低,变形更大。

### 3.3 不同约束工况下梁端弯矩对比分析

图10给出了VULCAN程序开展的恒定荷载作用下框架梁单独受高温和梁-柱同时受高温时梁端弯矩。图中,L表示梁单独高温,F表示梁-柱同时高温。

(1) 梁-柱同时高温与混凝土梁单独高温下梁的弯矩变化规律基本相同,即梁端弯矩在升温60 min内呈现增大趋势,升温后期弯矩逐渐减小,并在停止升温后弯矩趋于稳定。

(2) 梁-柱同时高温下的梁端弯矩小于梁单独

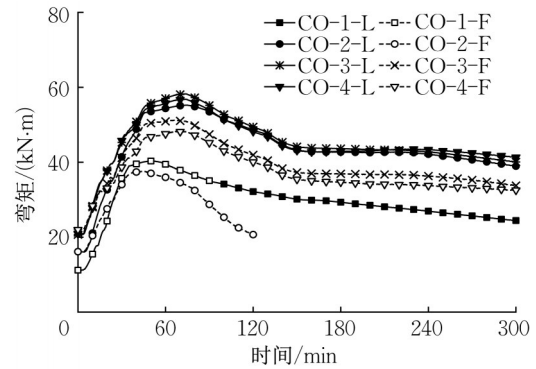


图10 梁单独高温和梁-柱同时高温下梁端弯矩对比曲线  
Fig. 10 Restraint moment of beam-column joint when frame subjected to elevated temperature partly and wholly

高温下的工况。因为梁-柱同时受火工况下,柱的刚度削弱的更为剧烈,梁端转动约束强度不断减小,导致升降温全过程中混凝土梁跨中承担更多的弯矩,因此对结构更为不利。钢筋混凝土框架梁、柱刚度退化的差异会使框架的破坏模式由强柱弱梁破坏转变为强梁-弱柱破坏。

(3) 综合分析弯矩-转角的关系发现:无论是梁单独受高温还是梁柱同时受高温的工况,弯矩和转角在受火前60 min时间内随受火温度的发展具有同步变化的特性,可是随着受火时间的延长,转角变形一直增大而弯矩却开始减小直到趋于稳定,证明转动约束强度在温度达到一定程度后开始降低。梁、柱同时高温情况,转动约束强度降低比梁单独受高温工况出现的早。

## 4 结论

本文通过2组钢筋混凝土框架梁的火灾响应试验和基于VULCAN软件建立的数值模型的计算,对钢筋混凝土框架梁-柱节点的弯矩-转角进行了试验研究和参数分析,得到以下结论:

(1) 通过热-力耦合结构试验揭示了在升降温全过程中,钢筋混凝土框架梁-柱节点的转动变形和约束弯矩随受火温度的升高均呈现先增加后减小的变化特性,且转角峰值相比于弯矩峰值具有滞后性。

(2) 基于VULCAN程序建立了钢筋混凝土梁-柱节点火灾响应计算模型,对比分析了钢筋混凝土框架梁单独受高温和由于梁、柱同时受高温的工况下,节点转动变形和约束弯矩的关系。梁、柱同时受高温时的结构响应相较于梁单独受高温时更强烈,

且其弯矩峰值出现的更早。

(3) 梁-柱节点火灾高温过程中变形和约束力的非同步性,证明了节点转动约束强度在受火温度达到一个峰值后会随构件温度的升高而降低的演化机制。

#### 作者贡献声明:

卢丽敏:设计并参与试验,进行了稿件修改和完善。

王守兴:试验数据整理和论文撰写。

吴少华:参与试验过程和论文的修改。

李康:参与试验过程和论文数据的整理。

舒前进:试验过程指导。

袁广林:试验过程指导。

禹海涛:研究思路指导和论文修改。

#### 参考文献:

- [1] 吴波,何喜洋.高温下钢筋混凝土框架的内力重分布研究[J].土木工程学报,2006,39(9):54.  
WU Bo, HE Xiyang. Research on redistribution of internal force of reinforced concrete frame under high temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(9):54.
- [2] 刘汾涛,吴波,吴耀鹏,等.具有端部约束的碳纤维布加固混凝土梁的高温弯矩分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(3):329.  
LIU Fentao, WU Bo, WU Yaopeng, *et al.* A study on the redistribution of internal forces in reinforced concrete frames under high temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33 (3): 329.
- [3] 骆开静,高全臣,王凯,等.钢筋混凝土梁高温试验现象及损伤[J].科学技术与工程,2017,17(27):270.  
LUO Kaijing, GAO Quanchen, WANG Kai, *et al.* Phenomena and damage degree of reinforced concrete beams after high temperature [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (27): 270.
- [4] 唐贵和,吴波,文波.时变约束混凝土梁的升降温全过程内力分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):39.  
TANG Guihe, WU Bo, WEN Bo. Analysis of internal forces in inconstantly restrained reinforced concrete beams during heating and cooling phases [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015,43(1):39.
- [5] 杨春峰,于群.钢砼结构弯矩调幅系数与截面转角关系的探讨[J].沈阳大学学报,2003,15(4):18.  
YANG Chunfeng, YU Qun. Probing into the relation between moment modification factor and section corner of the reinforced concrete structure [J]. Journal of Shenyang University, 2003, 15 (4): 18
- [6] 王玉镯,傅传国,邱洪兴.火灾中钢筋混凝土框架节点试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(S2):115.  
WANG Yuzhuo, FU Chuanguo, QIU Hongxing. Experimental study on behavior of reinforced concrete frame joints in fire [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 115.
- [7] 傅传国,王广勇,王玉镯.钢筋混凝土框架节点抗火性能试验研究及理论分析[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(4):822.  
FU Chuanguo, WANG Guangyong, WANG Yuzhuo. Experimental and theoretical research on fire resistance behaviour of reinforced concrete joints [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(4): 822.
- [8] 陆洲导,魏锴,苏磊,等.高温后钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(1):29.  
LU Zhoudao, WEI Kai, SU Lei, *et al.* Quasi-static test of reinforced concrete frames after high temperature [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1): 29.
- [9] LI Z, TAN Y, HUO J S, *et al.* Behaviour of fire-exposed reinforced concrete joints with varying anchorage details subjected to exterior column removal [J]. Fire Technology, 2019, 56(4): 1443.
- [10] 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.
- [11] KONG W Y, FU C G, LIU W Q. Fire resistance test of a reinforced concrete beam-supporting column transfer structure joint unit [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019. 44 (5): 5117.
- [12] 王广勇,韩林海,余红霞.钢筋混凝土梁-钢筋混凝土柱平面节点的耐火性能研究[J].工程力学,2010,27(12):164.  
WANG Guangyong, HAN Hailin, YU Hongxia. Fire performance of reinforced concrete beam-column plane joints [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 164.
- [13] WU B, LIU J S, CHEN X M. Numerical analysis of lateral displacement of beam-column joints in concrete frame structures subjected to fire [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(10): 1495.
- [14] 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.
- [15] RING T, ZEIML M, LACKNER R. Underground concrete frame structures subjected to fire loading: Part I — Large-scale fire tests [J]. Engineering Structures, 2014, 58: 175.
- [16] RING T, ZEIML M, LACKNER R. Underground concrete frame structures subjected to fire loading: Part II — Re-analysis of large-scale fire tests [J]. Engineering Structures, 2014, 58: 188.
- [17] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules-structural fire design [S]. Brussels: CEN, 2004.