

基于组件法的栓焊节点高温力学模型

李永梅¹, 丁润民^{2*}, 刘美景³, 范圣刚²

(1. 东南大学成贤学院 机械与电气工程学院, 南京 210031; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 211189;
3. 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 南京 210031)

摘要: 钢框架梁柱连接节点的高温力学性能是影响火灾下钢框架结构抗连续倒塌性能的关键因素之一。基于组件法, 将栓焊节点分解为翼缘拉压组件、连接板螺栓孔承压组件、螺栓受剪组件、梁腹板螺栓孔承压组件和螺栓滑移组件等基本组件, 并分别对各组件的等效弹簧力学模型开展理论推导, 最终建立了栓焊节点高温组件模型。基于已开展的栓焊节点抗火试验, 构建了节点整体受力分析杆系模型, 并通过对比有限元结果和试验结果, 验证了组件模型的有效性和准确性。研究表明: 文中提出的栓焊节点高温组件模型可以较好地预测高温下钢框架梁柱连接节点的受力性能和行为反应。

关键词: 钢框架; 抗连续倒塌性能; 组件法; 栓焊节点; 高温力学性能; 抗火试验; 组件模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0110-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240531001

High-Temperature Mechanical Model of Welded Flange-Bolted Web Joints Based on Component Method

LI Yongmei¹, DING Runmin^{2*}, LIU Meijing³, FAN Shenggang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southeast University Chengxian College, Nanjing 210031, China;
2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Civil and Transportation
Engineering, Southeast University Chengxian College, Nanjing 210031, China)

*Corresponding author: 1409985056@qq.com

Abstract: The high-temperature mechanical property of steel frame beam-column connection joints is one of the key factors affecting the progressive collapse resistant performance of steel frame structures under fire. Based on the component method, the welded flange-bolted web joint was decomposed into basic components such as the tension and compression components of flanges, compression components of bolt holes in connection plate, shear components of bolts, compression components of bolt holes in beam web, and slip components of bolts. The mechanical model of equivalent spring for each component was theoretically derived, and the high-temperature component model for welded flange-bolted web joint was ultimately established. Based on the fire tests of welded flange-bolted web joints that have been conducted, a member system model for the overall force analysis of the joints was constructed, and the effectiveness and accuracy of the component model were verified by comparing the finite element results with the experimental results. The research results indicate that the high-temperature component model of welded flange-bolted web joints proposed in this paper can effectively predict the mechanical performance and behavioral response of steel frame beam-column connection joints under high temperatures.

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(52278153), 东南大学成贤学院国家级科研项目培育基金(2022NCF005)

作者简介:

李永梅(1979—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事机械工程、智能建造方面的研究。E-mail: 149687158@qq.com。

通信作者:

丁润民(1995—), 男, 博士, 工程师, 主要从事钢结构抗火方面的研究。E-mail: 1409985056@qq.com。

Keywords: steel frame; progressive collapse resistant performance; component method; welded flange-bolted web joint; high-temperature mechanical property; fire test; component model

钢框架梁柱节点的连接性能是评估结构整体稳定性与鲁棒性的关键因素之一。在正常使用状态下,钢框架梁柱节点主要起到传递弯矩与剪力的作用。然而,当结构关键承重构件发生破坏时,梁柱节点区域往往率先达到全截面塑性,形成塑性铰,进而基本丧失转动刚度;钢梁发生大变形后,悬链线效应开始发挥作用,节点的受力机制转为以传递拉力为主,这对剩余结构的内力重分布与抵抗连续倒塌能力影响显著。此外,在高温作用下,由于钢材力学性能退化,钢框架梁柱节点转动刚度也会随着温度的升高而逐渐下降。因此,掌握高温下钢框架节点连接性能的变化规律是研究火灾下钢框架结构抗连续倒塌性能的重中之重。

目前,组件法是研究钢框架梁柱连接节点受力性能的主要手段之一。组件法的基本原理是将连接节点的构造组成按受力特点分解为若干个仅受拉、压、转动变形的基本组件,并将各基本组件分别替换为具备等效承载力与刚度的弹簧,再对各弹簧进行组装分析^[1],该分析方法可以较好地反映连接节点的承载能力与转动刚度。近年来,越来越多的研究人员将组件法应用于不同类型节点的高温力学性能研究中,包括鳍板螺栓连接节点^[2]、角钢连接节点^[3]、平齐端板连接节点^[4-5]、栓焊混合连接节点^[6]等。栓焊混合连接节点(以下简称栓焊节点),是钢梁与钢柱刚性连接的常用形式。然而,在高温作用下,栓焊节点受火灾影响后的行为较为复杂,其与梁的刚度关系可能会发生变化,进而影响整体结构的抗连续倒塌性能,因此需要对高温下栓焊节点的非线性连接刚度和强度展开研究。

为进一步探究高温下栓焊节点的非线性力学特性,本文使用组件法建立了栓焊节点高温组件模型,并通过已开展的栓焊节点抗火试验,对高温组件模型的准确性进行了验证,可为后期开展火灾下钢框架结构连续倒塌模拟提供关键技术支持。

1 栓焊节点高温组件模型

图1给出了栓焊节点的高温组件模型,组成节点模型的基本组件包括翼缘拉压组件(TC)、连接板螺栓承压组件(CPC)、螺栓受剪组件(BS)、梁腹板螺栓承压组件(WPC)和螺栓滑移组件(BM)。

1.1 翼缘拉压组件

基于钢材在轴向力作用下的力学效应,提出翼缘拉压组件(TC)的等效弹簧力学模型,如图2所示(受拉力为正,受压力为负)。

在外荷载作用下,翼缘钢材达到屈服强度 $F_{y,T}$ (或

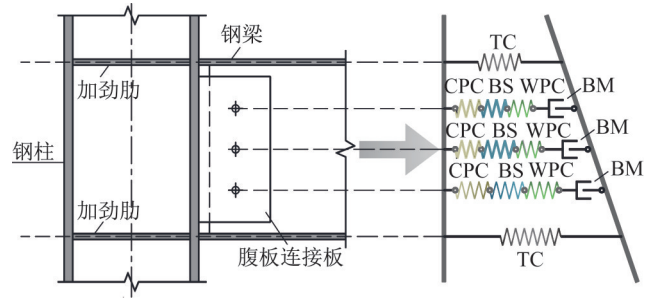


图1 栓焊节点组件模型

Fig. 1 Component model of welded flange-bolted web joints

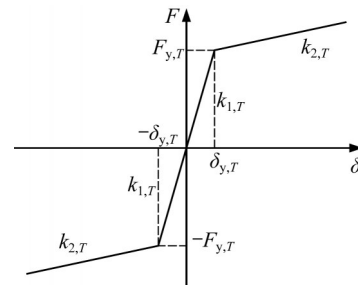


图2 翼缘拉压组件

Fig. 2 Tensile and compressive components of flanges

$-F_{y,T}$)前等效弹簧处于弹性阶段;当翼缘钢材达到屈服强度后,等效弹簧进入强化阶段。根据材料力学理论,杆件轴向刚度系数表达式为 EA/L 。其中, E 为材料弹性模量, A 为杆件截面积, L 为杆件长度。对于栓焊节点翼缘拉压组件(TC),其弹性阶段的刚度 $k_{1,T}$ 可按式(1)计算确定。

$$k_{1,T} = \frac{E_T A_{bf}}{\rho l_{co}} = \frac{E_T t_{bf} b_{bf}}{\rho l_{co}} \quad (1)$$

式中: E_T 为温度 T ℃时钢材弹性模量; A_{bf} 为翼缘的截面积; t_{bf} 、 b_{bf} 分别为翼缘的厚度与宽度; ρ 为与节点构造形式有关的系数,对于节点域不带加劲肋的栓焊节点,取 $\rho = 1.0$;对于节点域带加劲肋的栓焊节点,取 $\rho = 1.5$ ^[7]; l_{co} 为连接板的长度。

强化阶段的弹塑性刚度 $k_{2,T}$ 可按式(2)计算确定。

$$k_{2,T} = \frac{E'_T}{E_T} k_{1,T} \quad (2)$$

式中: E'_T 为温度 T ℃时钢材强化模量。

高温下翼缘拉压组件(TC)屈服承载力 $F_{y,T}$ 和对应的弹簧位移 $\delta_{y,T}$ 可分别按式(3)和(4)计算确定。

$$F_{y,T} = f_{y,T} A_{bf} = f_{y,T} t_{bf} b_{bf} \quad (3)$$

$$\delta_{y,T} = F_{y,T} / k_{1,T} = \rho f_{y,T} l_{co} / E_T \quad (4)$$

式中: $f_{y,T}$ 为温度 T ℃时钢材屈服强度。

1.2 螺栓滑移组件

已有研究结果^[3]表明:高强螺栓在受到火灾作用时,由于热膨胀效应的影响,会逐渐丧失预紧力。当预紧力不足以抵抗螺栓承受的剪力时,高强螺栓发生滑移,随后通过螺杆受剪机制承担剪力。在实际施工过程中,为了方便安装,螺栓孔尺寸一般会比螺杆直径大2 mm左右,即螺杆距离螺栓孔边缘的距离为1 mm。基于以上受力演变过程,本文提出了高温下螺栓滑移组件模型其 $F-\delta$ 如图3所示。

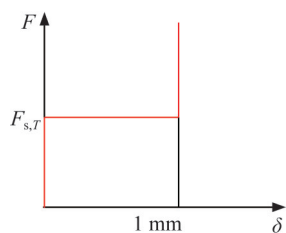


图3 螺栓滑移组件 $F-\delta$

Fig. 3 Load-displacement curve of slip components of bolts

当螺栓滑移组件受到的外荷载低于螺栓摩擦力时,螺栓不发生滑移,此时组件刚度为无穷大,不发生任何变形;当螺栓滑移组件受到的外荷载大于螺栓摩擦力时,螺栓发生滑移,组件刚度为0;当螺栓滑移后与螺栓孔壁接触,即缝隙为0时,螺栓滑移组件刚度恢复为无穷大。温度为 $T^\circ\text{C}$ 时高强螺栓抗滑移摩擦力 $F_{s,T}$ 可按式(5)计算确定。

$$F_{s,T} = n\beta_T P_T \quad (5)$$

式中: n 为螺栓个数; β_T 为温度 $T^\circ\text{C}$ 时接触面摩擦系数; P_T 为温度 $T^\circ\text{C}$ 时高强螺栓的预紧力,按式(6)计算。

$$P_T = \mu_T P_0 \quad (6)$$

式中: μ_T 为温度 $T^\circ\text{C}$ 时高强螺栓预紧力折减系数; P_0 为常温下高强螺栓的预紧力。

在高温作用下,摩擦型高强螺栓的抗滑移性能会大幅下降,造成该现象的原因是:一方面因接触面的滑移系数降低,另一方面因螺栓预紧力降低。根据已有研究成果^[8],高温下摩擦型高强螺栓的摩擦系数和预紧力折减系数可按表1取值。

表1 高温下摩擦型高强螺栓参数取值

Table 1 Parameter values for friction type high-strength bolts under high temperatures

温度/ $^\circ\text{C}$	20	200	300	400	500	600
摩擦系数 β_T	0.400	0.332	0.296	0.184	0.035	0
预紧力折减系数 μ_T	1.000	1.038	1.030	0.992	0.752	0.341

1.3 螺栓孔承压组件

SARRAJ^[2]针对高温下鳍板螺栓连接节点受力过程中,螺栓孔承压变形和螺栓抗剪变形均建立了较为精确的非线性组件模型。而鳍板螺栓连接节点与栓焊节点在钢梁腹板处的连接形式一致,因此本文采用SARRAJ^[2]提出的螺栓孔承压组件模型与螺栓抗剪组件模型来建立栓焊节点高温组件模型。高强螺栓发生滑移后,螺栓杆与连接板及梁腹板螺栓孔壁接触,此时螺栓依靠受剪机制抵抗外荷载。在外力作用下,螺栓发生剪切变形,而连接板和梁腹板的螺栓孔外边缘则发生挤压变形,分别对应螺栓受剪组件BS、连接板螺栓孔承压组件CPC和梁腹板螺栓孔承压组件WPC,如图4所示。

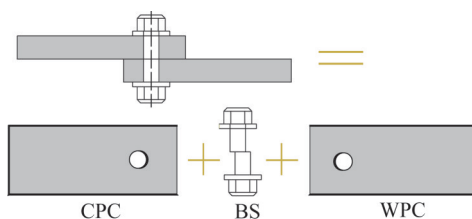


图4 组件变形分解示意

Fig. 4 Decomposition diagram of component deformation

高温下,连接板和梁腹板螺栓孔承压组件(CPC、WPC)等效弹簧的荷载-位移关系,可采用Richard方程来描述^[9],详见式(7)。

$$\frac{F}{F_{b,rd}} = \frac{\Psi \bar{\Delta}}{(1 + \bar{\Delta}^{0.5})^2} - \Phi \bar{\Delta} \quad (7)$$

式中: F 为连接板(梁腹板)螺栓孔承压组件所受外荷载; $F_{b,rd}$ 为连接板(梁腹板)螺栓孔承压组件极限承载力,按式(8)计算; $\bar{\Delta}$ 为连接板(梁腹板)名义承压变形,按式(9)计算; Ψ 、 Φ 为与温度有关的系数,可按表2取值^[2]。

$$F_{b,rd} = \min(e_2, 2.76d_b) f_{u,T} t \leq 2.4f_{u,T} dt \quad (8)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta_b K_i}{F_{b,rd}} \quad (9)$$

式中: $f_{u,T}$ 为温度 $T^\circ\text{C}$ 时钢材极限抗拉强度; t 为连接板(梁腹板)厚度; d 为板宽度; Δ_b 为螺栓孔承压组件位移变形; e_2 为螺栓孔中心沿主要受力方向至连接板(梁腹板)边缘的距离; d_b 为螺栓杆直径; K_i 为螺栓孔承压组件对应的刚度,通常认为由三部分组成:螺栓孔的挤压变形(对应刚度 k_{br})、螺栓孔外侧钢板的弯曲变形(对应刚度 k_b)、螺栓孔外侧钢板的剪切变形(对应刚度 k_v),上述刚度可分别按下列公式计算^[10]:

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{k_{br}} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_v}} \quad (10)$$

$$k_{br} = \Omega t f_{y,T} \left(\frac{d_b}{25.4} \right)^{0.8} \quad (11)$$

$$k_b = 32E_T f_{y,T} \left(\frac{e_2}{d_b} - 0.5 \right)^3 \quad (12)$$

$$k_v = 6.67G_T t \left(\frac{e_2}{d_b} - 0.5 \right) \quad (13)$$

式中： $f_{y,T}$ 为温度 T °C 时钢材屈服强度； E_T 为温度 T °C 时钢材弹性模量； G_T 为温度 T °C 时钢材剪切模量； Ω 为与温度有关的参数，按表 2 取值^[2]。

表 2 高温下螺栓孔承压组件参数取值

Table 2 Parameter values of compressive components of bolt openings under high temperatures

温度/°C	$e_2 \leq 2d_b$			$e_2 \geq 2d_b$ 且 $d_b \leq 20$ mm			$e_2 \geq 2d_b$ 且 $d_b = 24$ mm		
	Ψ	Φ	Ω	Ψ	Φ	Ω	Ψ	Φ	Ω
20	2.1	0.012	145	1.7	0.008	250	1.7	0.011 0	250
100	2.0	0.008	180	1.7	0.008	220	1.7	0.011 0	250
200	2.0	0.008	180	1.7	0.008	220	1.7	0.011 0	250
300	2.0	0.008	180	1.7	0.008	220	1.7	0.011 0	250
400	2.0	0.008	170	1.7	0.008	200	1.7	0.009 0	200
500	2.0	0.008	130	1.7	0.008	170	1.7	0.007 0	170
600	2.0	0.008	80	1.7	0.008	110	1.7	0.005 5	110
700	2.0	0.008	45	1.7	0.007	40	1.7	0.005 5	40
800	1.8	0.008	20	1.7	0.007	20	1.7	0.001 0	20

当螺栓孔的挤压变形达到一定程度时，其外边缘钢材完全屈服，无法再承担外荷载。通常认为，当螺栓孔挤压变形达到螺栓杆直径的一半时，螺栓孔承压组件的等效弹簧达到最大荷载；继续施加外荷载，该组件将失效^[11]。

$$F_{v,rd} = \Gamma \cdot f_{u,b} A_b \quad (15)$$

$$K_{v,b} = 0.15G_{T,b} A_b / d_b \quad (16)$$

$$G_{T,b} = \frac{E_{T,b}}{2(1 + \nu)} \quad (17)$$

式中： Δ_v 为螺栓受剪组件变形； F 为螺栓受剪组件所受外力； $K_{v,b}$ 为螺栓受剪组件刚度； $F_{v,rd}$ 为螺栓受剪组件极限承载力； $f_{u,b}$ 为常温下螺栓材料极限抗拉强度； A_b 为螺栓截面面积； d_b 为螺栓直径； $G_{T,b}$ 为温度 T °C 时螺栓材料剪切模量； $E_{T,b}$ 为温度 T °C 时螺栓材料弹性模量； ν 为泊松比； η 、 Γ 为与温度有关的参数，按表 3 取值^[2]。

1.4 螺栓受剪组件

高温下螺栓受剪组件(BS)等效弹簧的荷载-位移关系可由改进的 Ramberg-Osgood 公式确定^[12]。

$$\Delta_v = \frac{F}{K_{v,b}} + \eta \left(\frac{F}{F_{v,rd}} \right)^6 \quad (14)$$

表 3 高温下螺栓受剪组件参数取值

Table 3 Parameter values of shear components of bolts under high temperatures

温度/°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
η	2.50	2.80	2.00	2.20	2.00	2.00	1.30	0.60	0.70	0.02
Γ	0.580	0.575	0.538	0.500	0.426	0.323	0.139	0.061	0.041	0.019

2 组件模型的验证

2.1 栓焊节点抗火试验概况

文献[13]对 2 个栓焊节点试件(CJ-1 和 CJ-2)进行了抗火试验，其节点详细构造如图 5 所示。

节点梁柱构件均采用轧制 H 型钢，钢材等级为 Q235B；钢梁截面尺寸选用 HN250 mm × 125 mm × 6 mm × 9 mm，钢柱截面尺寸选用 HM294 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm。钢梁腹板通过螺栓与钢柱连接板连接，连接板厚度为 10 mm，螺栓采用 10.9S 级 M20 摩擦型高强度螺栓。楼板采用现浇

混凝土板，混凝土强度等级为 C30；楼板宽度为 1.0 m，长度为 2.0 m，试件 CJ-1 和 CJ-2 的楼板厚度分别为 100 mm 和 120 mm。钢梁上布置一列 $\Phi 16$ 栓钉，栓钉长度为 80 mm，纵向间距为 100 mm。楼板内配有双层双向钢筋，钢筋型号为 HRB400，直径为 10 mm，间距为 200 mm。节点试件的柱端、梁端分别通过法兰连接，与外部拼接钢柱、拼接钢梁对应相连；试件顶部设定向滑动支座，允许钢柱沿竖向自由膨胀，底部则为固定支座。

在栓焊节点抗火试验中，需分别对节点试件的柱顶

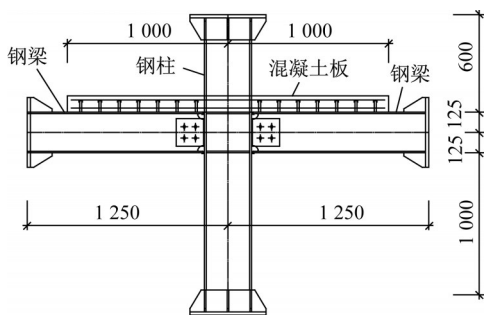


图5 节点试件详细构造(单位:mm)

Fig. 5 Detailed construction of joint specimens (unit: mm)

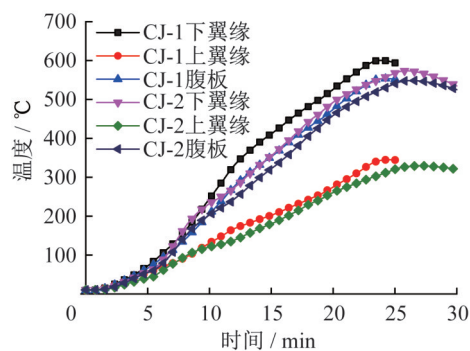


图6 节点试件温度-时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves of joint specimens

与梁端施加集中荷载;试验过程中,柱顶采用50 t分离式液压千斤顶施加柱轴力,钢梁端部则采用吊篮配重加载。试件CJ-1和CJ-2的柱顶荷载均为150 kN,梁端荷载则分别为24 kN和25 kN,以保证两个试件的荷载比(节点端部最大弯矩与其抗弯承载力的比值)均为0.5。本次栓焊节点抗火试验采用ISO-834标准升温曲线,试件CJ-1和CJ-2在节点处的温度-时间曲线如图6所示。

2.2 组件等效弹簧力学参数计算

栓焊节点试件CJ-1和CJ-2均设置两排螺栓,同一高度的两颗螺栓共同通过受剪机制分担外荷载。根据位移协调关系,栓焊节点试件CJ-1和CJ-2的组件模型如图7a)所示。根据上述各组件等效弹簧的力学模型,图8给出了不同温度下各组件等效弹簧的荷载-位移曲线。

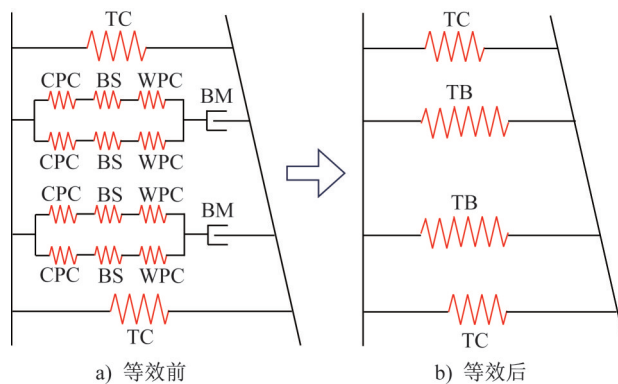


图7 节点试件组件模型

Fig. 7 Component model of joint specimens

2.3 节点整体受力分析模型的建立

节点的总体变形主要是由位于同一高度处各组件等

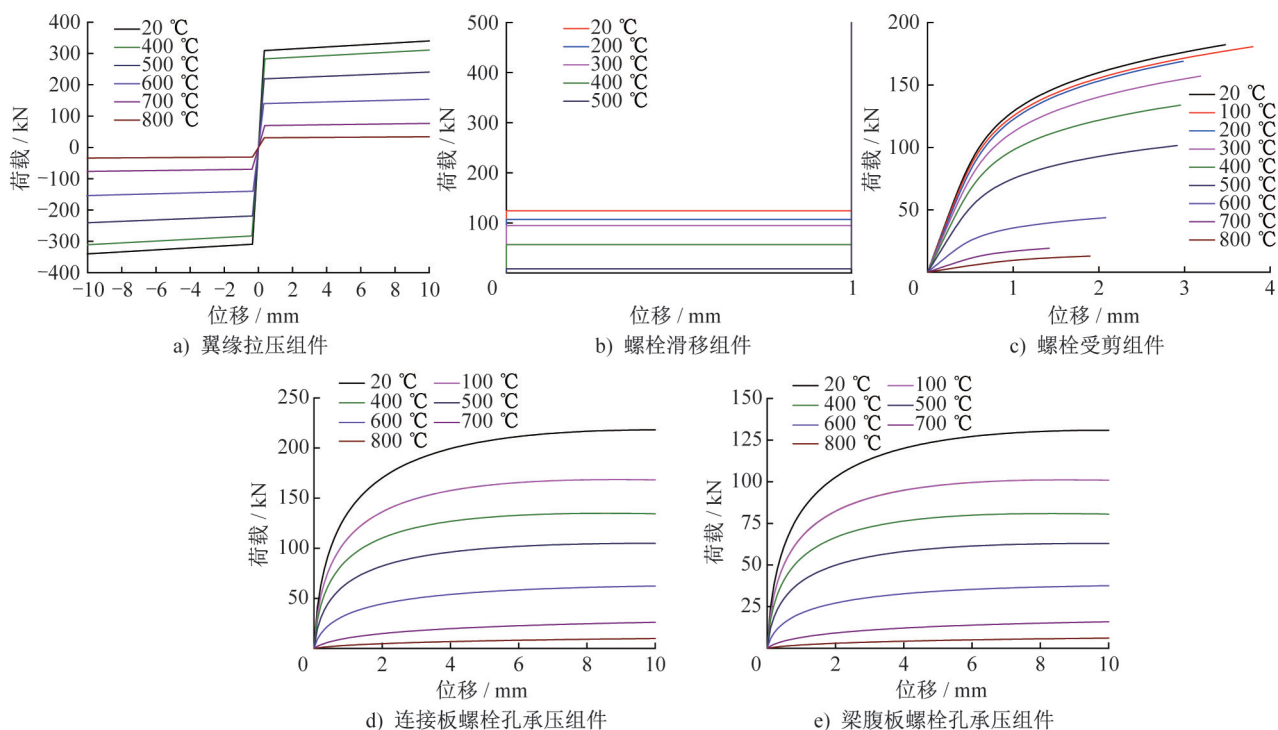


图8 各组件等效弹簧的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of equivalent springs for each component

效弹簧的变形之和决定的。为方便进行节点整体受力分析,根据弹簧串并联关系,将节点中位于同一高度处与螺栓受剪机制相关的所有组件等效成一个非线性弹簧(TB),如图 7b)所示。

根据连接板螺栓孔承压组件 CPC、螺栓受剪组件 BS 和梁腹板螺栓孔承压组件 WPC 的串联关系,可得组件串联后所受外力 F' 与位移 Δ' 为:

$$F' = F_{CPC} = F_{BS} = F_{WPC} \quad (18)$$

$$\Delta' = \Delta_{CPC} + \Delta_{BS} + \Delta_{WPC} \quad (19)$$

组件并联后所受外力 F'' 与位移 Δ'' 则为:

$$F'' = 2F' \quad (20)$$

$$\Delta'' = \Delta' \quad (21)$$

以 400 °C 为例,图 9 给出了组件串联和并联后的荷载-位移曲线,以及考虑螺栓滑移组件 BM 后非线性弹簧 TB 的荷载-位移曲线。

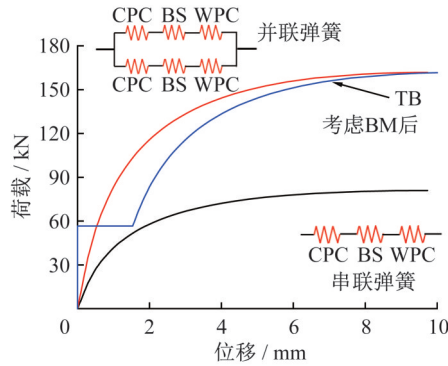


图 9 等效弹簧 TB 荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of equivalent spring TB

2.3.1 几何模型和单元选择

基于上述各组件力学特性,根据栓焊节点试件 CJ-1 和 CJ-2 实际尺寸建立的栓焊节点整体受力分析杆系模型如图 10 所示。栓焊节点抗火性能试验中,钢梁以悬臂梁形式承受端部竖向荷载,其截面内存在较大剪力与弯矩作用;为了更加精确地模拟火灾作用下钢梁的受弯变形,杆系模型中的梁柱构件均采用可以考虑横向剪切变形的铁木辛柯梁 B31 单元模拟。由于梁柱节点域焊有加劲肋,因此节点域处的剪切刚度较大,在模型中可以假定为刚域^[7]。对于带混凝土楼板的组合节点,楼板及其内部钢筋对节点转动性能影响显著,一方面影响节点截面方向的温度分布,另一方面能显著提高节点的转动刚度。为准确反映混凝土楼板对节点转动性能的影响,在栓焊节点整体受力分析杆系模型中采用 S4R 单元来模拟混凝土楼板,并通过壳单元内置的 Rebar* 命令设置板内钢筋的直径、间距和高度。

2.3.2 连接与非线性弹簧模拟

根据栓焊节点抗火性能试验结果,试件 CJ-1 和 CJ-2

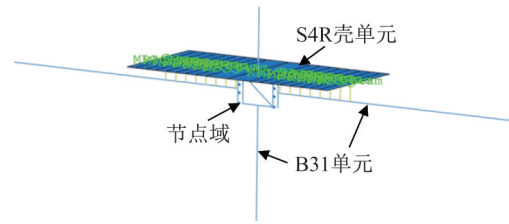


图 10 节点整体受力分析杆系模型

Fig. 10 Bar system model for overall force analysis of joints

的混凝土楼板与钢梁间的栓钉抗剪连接件,在节点破坏过程中均未出现明显剪切变形,因此可假定楼板与钢梁间为完全抗剪连接。在杆系模型中,采用 MPC-beam 单元(多点约束中的刚性连接)绑定楼板 S4R 壳单元与钢梁 B31 单元之间的所有自由度,以模拟栓钉连接件作用,保证楼板与钢梁能够共同工作,如图 11 所示。栓焊节点翼缘拉压组件 TC 和非线性弹簧 TB 的等效弹簧则通过 Spring 单元(弹簧单元)来模拟。在有限元软件 ABAQUS 中,虽然无法直接设置非线性 Spring 单元参数,但是可以通过修改 inp 文件,设置不同温度下非线性 Spring 单元的荷载-位移曲线,从而准确模拟各组件的力学性能。

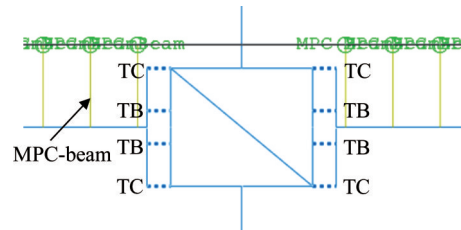


图 11 节点组件模拟

Fig. 11 Simulation of joint components

2.3.3 边界条件

杆系模型的边界条件应与试验试件的边界条件完全保持一致。钢柱底部设置为固定支座,需约束所有方向自由度;钢柱柱顶为竖向滑动支座,仅释放竖向平动自由度(U_2)。抗火试验中为防止钢梁整体失稳,限制了钢梁的移动轨道,以保证钢梁变形与钢柱始终处于同一平面,因此在模型中同样需要约束钢梁端部的面外自由度(U_3)。根据栓焊节点抗火试验加载要求,在钢柱柱顶施加轴向压力,并在钢梁端部施加竖向荷载。

2.3.4 温度场定义

抗火试验中,因混凝土板存在,节点截面方向温度分布不均匀。为准确模拟该不均匀温度分布对节点受力性能的影响,节点整体受力分析模型内,翼缘拉压组件 TC 的升温曲线按试验测得的钢梁上、下翼缘升温曲线设置;

非线性弹簧组件TB的升温曲线则按试验测得的钢梁腹板升温曲线设置。受火区域内钢梁和混凝土板在截面方向的温度分布,需要通过ABAQUS子程序Utemp对构件截面上的积分点进行定义。对于截面类型设置为H形截面的梁单元,一般默认包含5个积分点;而壳单元在厚度方向一般默认设置有5个积分点,积分点在竖向均匀分布,楼板中间积分点的温度将由顶层和底层积分点的温度插值计算得到。

2.4 分析结果的对比

基于上述分析方法,针对节点整体受力性能进行有限元模拟分析,图12给出了各试件梁端竖向位移-时间曲线的有限元结果与试验结果,以及采用简化的刚接连接模型(不考虑高温下梁柱节点力学性能退化)得到的有限元模拟结果对比。

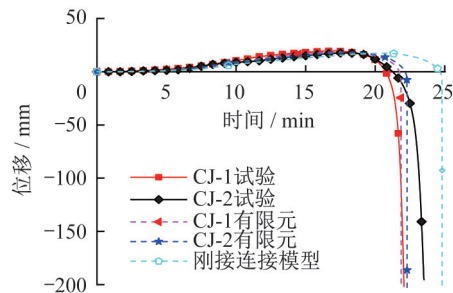


图12 有限元结果与试验结果对比

Fig. 12 Comparison between finite element results and test results

由图12可知:(1)升温初期,有限元结果中钢梁同样呈现反拱,其趋势与试验结果一致,表明在杆系模型中通过子程序Utemp定义构件截面各积分点温度,能较真实地反映构件温度分布。(2)试件CJ-1和CJ-2梁端竖向位移-时间曲线的有限元结果与试验结果整体吻合较好;两试件达到极限承载力后梁端竖向位移快速下降,杆系模型对其耐火时间的预测误差较小,与试验结果相比分别为1.1%、4.7%。(3)刚接连接模型因忽略高温下梁柱节点转动刚度的退化,模拟结果偏于不安全;而引入本文提出的栓焊节点高温组件模型,可有效提高模拟结果的精确性与安全性。综上所述,本文提出的栓焊节点高温组件模型可较为准确地模拟栓焊节点在火灾作用下的力学响应。

3 结论

基于组件法,本文建立了栓焊节点高温组件模型,给出了各组件等效弹簧的力学模型,并通过数值模拟和已有试验结果对组件模型的准确性进行了验证。主要结论如下:

(1) 高温下栓焊节点各组件等效弹簧的荷载-位移曲线会随着温度升高逐渐衰减,进而影响节点整体力学性能。

(2) 在采用有限元软件ABAQUS建立的节点受力分析杆系模型中,通过子程序Utemp定义构件截面温度分布可以更加准确地模拟火灾作用下钢框架梁柱连接节点的动力响应。

(3) 针对栓焊节点,本文建立的高温组件模型可以较为准确地预测高温下钢框架梁柱栓焊节点的受力性能和行为反应。

参考文献:

- [1] European Standard. Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-8: Design of Joints; EN 1993-1-8 [S]. Brussels: European Standard, 2004.
- [2] SARRAJ M. The behavior of steel fin plate connections in fire[D]. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- [3] YUAN Z, TAN K H, TING S K. Testing of composite steel top-and-seat-and-web angle joints at ambient and elevated temperatures: Part 2: Elevated-temperature tests[J]. Engineering Structures, 2011, 33(7): 2093-2109. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.021.
- [4] 高义奇,余红霞,施刚.火灾下平齐端板节点考虑剪力作用的组件模型研究[J].建筑结构,2018,48(19):55-60. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.19.012.
GAO Yiqi, YU Hongxia, SHI Gang. Research on component-based model for flush endplate connections in fire considering the effect of the shear force[J]. Building Structure, 2018, 48(19): 55-60. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.19.012. (in Chinese)
- [5] LI G Q, CHEN L Z, LI J T, et al. Modeling of end-plate bolted composite connection in fire considering axial force effects[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76: 133-143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.03.021.
- [6] 强旭红. 钢结构栓焊连接节点与高强度螺栓连接火灾后性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
QIANG Xuhong. Study on the behavior of flange-welded web-bolted combination connection and high-strength bolted connection after fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [7] YIM H C, KRAUTHAMMER T. Mathematical-mechanical model of WUF-B connection under monotonic load [J]. Engineering Journal, 2010, 47(2): 71-90. DOI: 10.62913/engj.v47i2.980.
- [8] 林文玉. 高强度螺栓连接高温力学性能有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
LIN Wenyu. Finite element analysis for mechanical property of high-strength bolt connection in high temperature [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [9] ELSALTI M K, RICHARD R M. Derived moment-rotation

- curves for partially restrained connections [J]. *Structural Engineering Review*, 1996, 8: 151-158. DOI: 10.1016/0952-5807(95)00055-0.
- [10] REX C O, EASTERLING W S. Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(6): 792-800. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:6(792).
- [11] MAIN J A, SADEK F. Robustness of steel gravity frame systems with single-plate shear connections [J]. *National Institute of Standards and Technology*, 2012. DOI: 10.6028/NIST.TN.1749.
- [12] RAMBERG W, OSGOOD W. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [13] 曾少儒. 火灾下钢框架栓焊混合连接节点性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- ZENG Shaoru. Research on performance of flange-welded / web-bolted connections of steel frames in fire [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)