

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202104013

## 钢结构梁柱节点抗火性能研究进展与展望\*

王卫永<sup>1,2</sup>, 冉甜<sup>1</sup>, 逯鹏<sup>3</sup>, 杨竞杰<sup>1</sup>

(1.重庆大学土木工程学院,重庆 400045; 2.重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;  
3.中冶建筑研究总院有限公司,北京 100089)

**摘要:** 钢结构不耐火,在一定程度上制约了钢结构的应用和发展。为了探明钢结构在火灾下的工作性能,对钢结构基本构件的抗火性能进行了大量研究,提出了相应的设计理论与方法。梁柱节点是钢结构中十分关键的部位,在火灾下的可靠连接是保证钢结构火灾安全的重要前提。为了全面了解钢结构梁柱节点在火灾下的受力性能和破坏机理,从试验研究、有限元模拟和组件分析法三个方面系统地梳理了国内外关于节点抗火性能的研究进展。比较了高温下不同类型节点的力学性能,探讨了多种关键参数对节点在火灾下工作性能的影响规律,介绍了不同类型节点的高温组件分析模型以及弯矩-转角曲线数学模型。分析表明:节点构造形式对钢框架火灾安全有较大影响;通过设置柱腹板加劲肋、提高螺栓强度等级以及增加连接件的厚度等可以有效地提高节点的抗火性能。最后剖析了钢结构梁柱节点抗火研究中存在的不足,对未来值得关注和重视的关键问题提出展望。

**关键词:** 钢结构; 节点; 抗火性能; 进展; 组件分析法; 展望

**中图分类号:** TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0837-13

## Research Progress and Prospect on Fire Resistance of Steel Beam-to-Column Connections

WANG Weiyong<sup>1,2</sup>, RAN Tian<sup>1</sup>, LU Peng<sup>3</sup>, YANG Jingjie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. MCC Architectural Research Institute, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The poor fire resistance of steel structure restricts its application and development to a certain extent. In order to find out the working performance of steel structure in fire, people have done a lot of research on the fire resistance performance of basic components in steel structures, and proposed corresponding design theory and method. Beam-column joint is a key part of steel structure. Reliable connection under fire is an important premise to ensure the fire safety of steel structure. In order to fully understand the mechanical behavior and failure mechanism of steel beam-column joints under fire, the research progress of fire resistance performance of joints at home and abroad is systematically reviewed from three aspects: experimental research, finite element simulation and component analysis. The mechanical properties of different types of joints at high temperature are compared in this paper, and the influence of various key parameters on the working performance of joints under fire is dis-

\* 收稿日期:2021-04-13;修回日期:2021-07-02

基金项目:国家钢结构工程技术研究中心开放基金课题(YZB2019Ky01)资助

作者简介:王卫永(1982—),男,教授,博导,博士。主要从事钢结构防灾减灾方面的研究。E-mail: wywang@cqu.edu.cn

cussed. The high-temperature component analysis models of different types of joints and the mathematical models of moment-rotation curves are introduced. The analysis shows that the joint form has great influence on the fire safety of steel frames. The fire resistance of the joints can be effectively improved by setting stiffeners in the column web, improving the strength grade of bolts and increasing the thickness of end-plate. Finally, the knowledge gaps in the research of fire resistance of steel structure beam-column joints are analyzed, and the key issues worthy of attention in the future are put forward for reference.

**Keywords:** steel structure; connection; fire-resistance; research progress; component based method; prospect

## 引言

近年来,随着我国多高层、大型公共建筑的快速发展,建筑火灾造成的生命与财产损失也越来越严重。钢材虽是非燃烧材料,耐火性能却极差。火灾高温下,普通钢材的强度和刚度会随着温度的升高急剧降低,使钢结构的承载能力以及结构刚度显著退化,从而造成钢结构损伤、严重破坏甚至倒塌。为保护生命及财产安全,抗火性能研究成为钢结构研究领域中的重要方向之一<sup>[1]</sup>。

在钢结构体系中,梁柱节点是关键部位,对于体系的稳定性以及可靠性起着重要作用<sup>[2]</sup>。“9.11”事件以后,对WTC1、WTC2以及WTC7的倒塌分析结果显示<sup>[3]</sup>:由于火灾作用下梁柱连接节点的失效,导致柱子失去侧向支撑而发生屈曲破坏,最后引起结构连续倒塌。因此,钢结构梁柱连接节点在火灾下的性能研究是进行钢结构抗火设计、火灾安全评估的前提和基础。

目前,用于评估节点抗火性能的方法主要有3种<sup>[4]</sup>:

(1)试验研究。通过足尺或缩尺的节点火灾试验,可以直观地反映节点在高温下的实际力学行为,并且得到节点的转角—温度关系或弯矩—转角关系,但由于成本较高,常作为节点理论研究的验证手段。

(2)有限元模拟。采用有限元软件对节点建立精细化有限元模型,并考虑材料非线性、几何非线性、接触非线性等问题,对节点的抗火性能进行参数分析。

(3)组件法。将节点拆分为多个基本组件,每个组件由线性或非线性的弹簧模拟,通过弹簧的串、并联组合计算,将各基本组件进行组装,获得节

点整体的力学行为并进行理论分析。

现阶段,国内对于钢结构基本构件的高温性能研究相对较为成熟,并已经编制了相应设计规范<sup>[5]</sup>,而对于节点在高温下性能的理解相对落后。本文对钢结构梁柱节点高温性能的相关研究成果进行归纳和分析,指出目前研究中存在的问题和不足,并对未来研究工作提出展望和建议。

## 1 钢结构梁柱节点火灾下性能

节点在火灾下的性能包括节点的耐火极限、承载力、转动刚度以及转动能力等,因此,针对节点的抗火试验和有限元模拟是为揭示火灾下节点的破坏机理以及探究影响节点各项力学性能的因素。现从不同类型节点抗火性能的比较、节点的耐火极限、高温承载力和变形能力、高温对节点破坏模式的影响以及节点的优化设计等方面予以归纳。

### 1.1 常见节点类型及其抗火性能的比较

梁柱节点主要是通过焊缝、高强螺栓和连接角钢或者其它形式的连接件将梁柱连接起来。节点连接形式不同,抗火性能也有所差别,选择合适的连接形式对于钢结构整体在火灾下的稳定性有着重要意义。目前,在实际工程中常用的节点形式有:外伸端板连接、平齐端板连接、柔性端板连接、鳍板式连接、顶底角钢连接、腹板角钢连接、带双腹板顶底角钢连接、短T型钢连接、栓焊连接、全焊连接、盖板式连接(图1)等,一般将全焊连接、栓焊连接和盖板式连接等视为刚性节点<sup>[6]</sup>。

余红霞<sup>[7]</sup>开展了4组常用节点的高温性能试验,并对试验现象和结论做了归纳,不同类型节点在高温下的力学行为的比较情况如图2所示。研究表明,火灾高温下,平齐端板连接呈现出典型的半

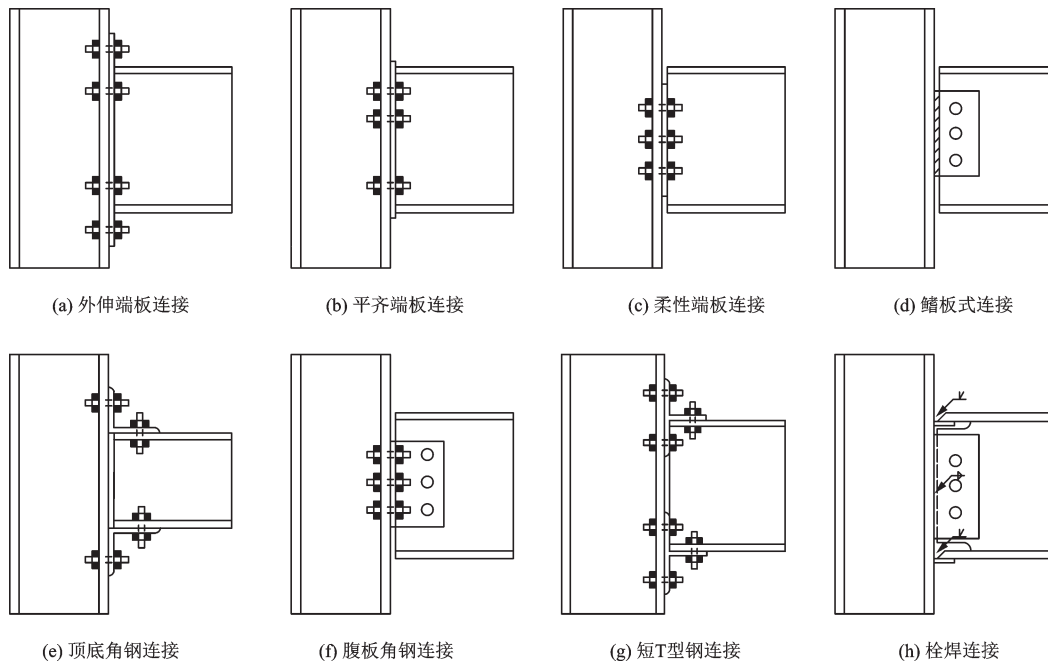


图1 常用节点类型示意

Fig.1 Sketches of the common joint

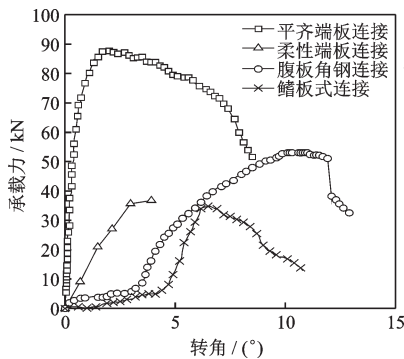


图2 不同类型节点在550 °C下力学行为的比较<sup>[7]</sup>

Fig.2 Comparison on mechanical behavior of different connections at 550 °C<sup>[7]</sup>

刚性连接的特性,承载和转动能力较好;腹板角钢连接和鳍板式连接都呈现出典型的柔性连接特性,具有较好的转动能力和较差的承载能力;而柔性端板连接在变形很小时就发生撕裂破坏,变形能力较差。

隋炳强等<sup>[8]</sup>对2个全焊十字节点和2个栓焊十字节点进行了恒载下的升温试验和有限元模拟,研究发现:刚性节点的耐火时间较短;全焊节点的耐火性能略高于栓焊节点,但两者极限转动能力相差不大。

Y. C. Wang等<sup>[9]</sup>对10个节点子结构进行了抗火试验,试验包含了5类常用的节点连接形式,研究了不同类型节点在火灾中的牢固性。不同节点类型对钢梁的极限温度和轴力的影响如图3所示。由

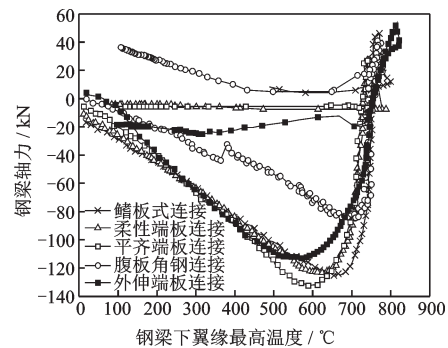


图3 不同节点类型对梁极限温度和轴力的影响<sup>[9]</sup>

Fig.3 Influence of different connection types on the limit temperature and axial force of steel beams<sup>[9]</sup>

图可知,腹板角钢连接在高温下的牢固性较其他4种节点更好,外伸端板连接、平齐端板连接和鳍板式连接次之,柔性端板连接最差。

通过比较发现,外伸端板连接节点和平齐端板连接节点在火灾下不仅能够为钢梁提供较好的连接强度,还能承受较大变形,具有构造简单、施工速度快、施工质量可控等优点。综上,火灾高温下,刚性节点(如全焊连接、栓焊连接等)延性较差,不利于钢梁形成悬链线效应,且易使结构发生脆性破坏;柔性节点(如鳍板式连接、柔性端板连接等)转动能力虽好,但不传递弯矩;而半刚性节点(如外伸端板连接节点、平齐端板连接节点、腹板角钢连接等)在火灾下不仅能够为结构提供较好的连接强度

和延性,而且构造简单、施工快捷、质量易保障,有较好的应用前景。

## 1.2 节点耐火极限研究

早期主要通过恒载升温试验以及有限元瞬态热分析获得节点的耐火极限和转角-温度关系。为考察影响节点耐火极限的因素,国内外学者展开了大量的研究,研究概况见表1。

R. M. Lawson<sup>[10]</sup>对外伸端板连接节点、平齐端板连接节点、腹板连接节点做了8组火灾试验,获得了3类节点的转角-温度关系以及在不同梁端荷载比下的临界温度。K. S. Al-Jabri等<sup>[12-13]</sup>通过试验,考察了不同构件尺寸、端板厚度等因素对平齐端板连接节点和柔性端板连接节点耐火极限的影响。

楼国彪<sup>[15]</sup>、郝淑英等<sup>[16]</sup>以及王卫永等<sup>[17-19]</sup>采用恒载升温的试验方式,分别研究了梁端荷载、柱腹板加劲肋的设置和端板厚度对外伸端板连接节点

耐火极限的影响。

隋炳强等<sup>[8]</sup>通过火灾试验考察了柱腹板加劲肋的设置对全焊节点极限温度的影响。舒赣平等<sup>[20]</sup>研究了T型钢厚度、螺栓直径和楼板等因素对T型钢连接节点抗火性能的影响。

高义奇等<sup>[21-22]</sup>通过对平齐端板连接节点和腹板双角钢节点进行恒载升温试验和数值模拟,分析了这两类节点在高温以及拉剪组合作用下的变形发展和破坏规律,探讨了不同轴力-剪力组合对平齐式端板连接节点耐火极限的影响。L. Chen等<sup>[23]</sup>采用数值模拟,考察了螺栓直径、螺栓等级、端板厚度、耐火钢和耐火螺栓的利用等因素对3类端板连接节点临界温度的影响。

王兴武等<sup>[24]</sup>通过有限元模拟研究了螺栓预紧力对短T型钢连接节点临界温度的影响。杨占兴<sup>[25]</sup>通过参数分析,考察了T型钢厚度、螺栓直径、梁端荷载以及有无柱腹板加劲肋等参数对短T型钢连接节点耐火时间的影响。

表1 节点耐火极限研究

Table 1 Research on fire resistance limit of joint

参考文献	节点形式	控制参数
R. M. Lawson <sup>[10]</sup>	外伸端板连接 平齐端板连接 腹板连接	梁端荷载比
L. C. Leston-Jones等 <sup>[11]</sup>	平齐端板连接	梁端荷载比
K. S. Al-Jabri等 <sup>[12-13]</sup>	平齐端板连接 柔性端板连接	构件尺寸、梁端荷载比、端板厚度
K. C. Yang等 <sup>[14]</sup>	栓焊连接	梁端荷载比
楼国彪 <sup>[15]</sup>	外伸端板连接	梁端荷载比
郝淑英等 <sup>[16]</sup>	外伸端板连接	柱腹板加劲肋
王卫永等 <sup>[17-19]</sup>	外伸端板连接 栓焊连接	端板厚度、柱腹板加劲肋 柱腹板加劲肋
隋炳强等 <sup>[8]</sup>	栓焊连接 全焊连接	柱腹板加劲肋
舒赣平等 <sup>[20]</sup>	T型钢连接	T型钢壁厚、螺栓直径
高义奇等 <sup>[21-22]</sup>	平齐端板连接 腹板双角钢连接	不同轴力-剪力组合
L. Chen等 <sup>[23]</sup>	柔性端板连接 平齐端板连接 外伸端板连接	螺栓等级及变形能力、端板厚度、荷载比、梁跨
王兴武等 <sup>[24]</sup>	短T型钢连接	螺栓预紧力
杨占兴 <sup>[25]</sup>	外伸端板连接 短T型钢连接	端板(T型钢)厚度、螺栓直径、梁端荷载比、柱腹板加劲肋
代东亮 <sup>[26]</sup>	带双腹板顶底角钢连接	火灾工况、顶底角钢厚度
王伟 <sup>[27]</sup>	顶底角钢连接	钢柱、钢梁、顶底角钢截面参数,钢柱轴力

代东亮<sup>[26]</sup>采用数值模拟分析了不同火灾工况下改变顶底角钢厚度对带双腹板顶底角钢连接节点临界温度的影响。王伟<sup>[27]</sup>通过参数分析,考察了钢梁、钢柱、顶底角钢的截面尺寸和钢柱轴力等因素对顶底角钢连接节点耐火时间的影响。

总结节点恒载升温试验与有限元模拟的结果可以发现,影响节点耐火极限的主要因素包括梁和柱的截面尺寸、荷载比、柱腹板加劲肋、螺栓强度以及端板或者角钢厚度等。通过减小节点所受荷载、

设置柱腹板加劲肋、提高螺栓强度等级以及增加连接件(端板、T型钢或角钢等)的厚度等,可以较为有效地提升节点的耐火极限。

### 1.3 节点高温承载力和变形能力研究

承载力与转动变形能力作为衡量节点高温下工作性能的重要指标,通常对于某一类节点,这两者不可兼得。表2对节点高温承载和变形能力的研究概况进行了总结。

表2 节点高温承载力与变形能力的研究

Table 2 Research on fire resistance and deformation capacity of joints

文献	节点类型	温度或升温时间	控制参数
Z. H. Qian 等 <sup>[28]</sup>	外伸端板连接	400 °C、550 °C、700 °C	梁轴向压力
H. X. Yu 等 <sup>[30-32]</sup>	腹板角钢连接 平齐端板连接 柔性端板连接 鳍板式连接	450 °C、550 °C、650 °C	梁端轴拉力-剪力不同组合
X. H. Qiang 等 <sup>[33-35]</sup>	高强度平齐端板连接	550 °C	端板厚度及强度等级
武念铎等 <sup>[37]</sup>	高强度外伸端板连接	550 °C	端板厚度及强度等级
Y. D. Li 等 <sup>[38]</sup>	一端外伸端板连接	400 °C、500 °C、600 °C	梁轴向力
史伟伟等 <sup>[29]</sup>	外伸端板连接	500 °C、900 °C	端板宽度、柱轴压比、螺栓直径、钢材强度
王伟 <sup>[27]</sup>	顶底角钢连接	400 s、600 s、800 s	钢柱、钢梁、顶底角钢截面参数、钢柱轴力

Z. H. Qian 等<sup>[28]</sup>对6个外伸端板连接中柱节点进行了恒温加载的试验研究,选取的温度分别为400、550、700 °C。对700 °C高温下的3个节点施加了不同的梁端轴压力,用于研究高温下钢梁的轴压力对节点弯矩—转角的影响。研究发现:随着温度升高和钢梁的轴压力的增大,节点的承载力减小。史伟伟等<sup>[29]</sup>通过参数分析,研究了不同温度下端板宽度、柱轴压比、螺栓直径和钢材强度等参数对方钢管框架外伸端板连接节点的弯矩—转角关系的影响规律。

H. X. Yu 等<sup>[30-32]</sup>通过对58个节点进行恒定高温下的加载试验和有限元分析,研究了平齐端板连接、柔性端板连接、鳍板连接以及腹板角钢连接在不同温度和荷载组合作用下的力学性能。在此基础上,余红霞<sup>[7]</sup>还对节点的抗弯能力、抗轴拉/压能力和塑性转动能力之间的关系进行了梳理。图4对比了不同轴力—剪力组合对平齐端板节点承载力—转角曲线的影响。由图可知,节点的转动变形能力与荷载组合无关,而钢梁轴拉力的增加会降低节点的抗弯承载力。

X. H. Qiang 等<sup>[33-35]</sup>对仅端板采用高强钢的节点

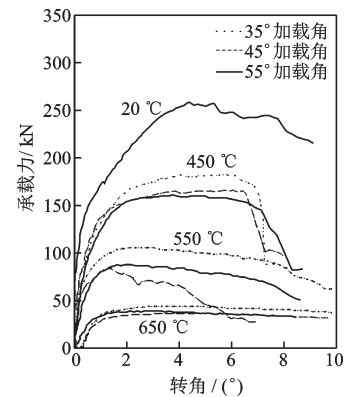
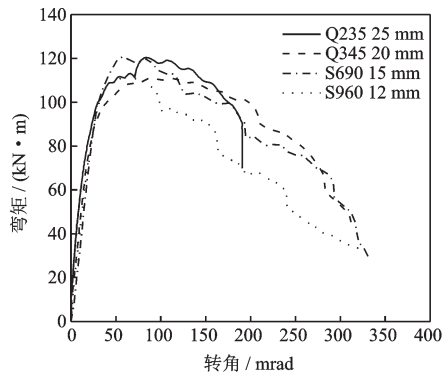


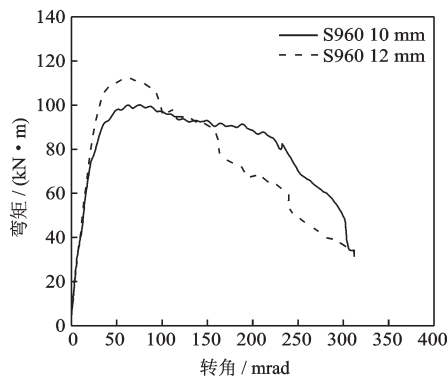
图4 不同荷载组合下节点的承载力—转角曲线<sup>[32]</sup>

Fig.4 Force-rotation curves of joints under different load combinations<sup>[32]</sup>

的高温性能进行研究,发现端板连接节点的承载能力和转动性能由端板材料和厚度控制,端板越厚节点承载能力越大,但转动能力明显下降,如图5所示。EC3<sup>[36]</sup>基于常温下的普通钢端板连接节点提出的计算方法可准确预测端板连接节点火灾下的抗弯承载力,但对于转动能力的相关条文则过于保守。武念铎等<sup>[37]</sup>对高强度外伸端板连接节点550 °C下受力性能进行研究,得到了与X. H. Qiang 等<sup>[33-35]</sup>



(a) 端板强度对节点弯矩—转角曲线的影响



(b) 端板厚度对节点弯矩—转角曲线的影响

图5 火灾下节点的弯矩—转角曲线<sup>[33]</sup>

Fig.5 Moment-rotation comparison of joints at elevated temperature<sup>[33]</sup>

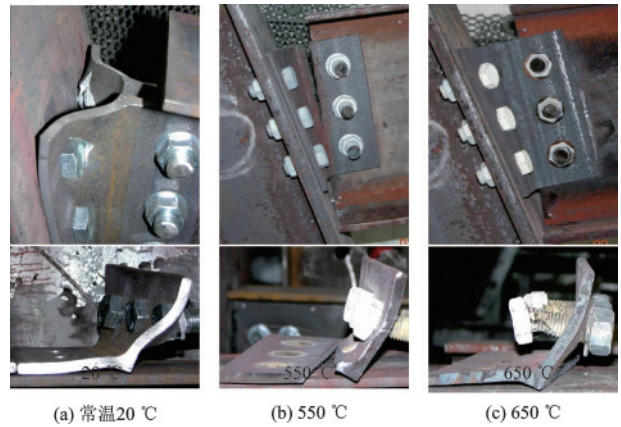
相同的结论。

王伟<sup>[27]</sup>采用有限元对顶底角钢连接节点高温性能进行模拟,通过参数分析,考察了不同升温时间下钢梁、钢柱、顶底角钢的截面尺寸和钢柱轴力等因素对顶底角钢连接节点抗火性能的影响规律。研究发现,增加柱翼缘厚度、柱腹板厚度以及角钢肢厚可以有效地提升顶底角钢连接节点的初始转动刚度和承载力。

#### 1.4 高温对节点破坏模式的影响

余红霞<sup>[7]</sup>对于普通钢节点破坏模式的研究表明,随着温度的升高,节点破坏模式呈现出从钢材构件向螺栓转换的趋势,图6为腹板角钢连接节点在不同温度下的破坏模式。X. H. Qiang等<sup>[33]</sup>对于高强钢端板连接节点火灾下的失效模式的研究表明,高温下节点的失效模式由常温下的端板破坏转变为端板和螺栓联合破坏,如图7所示。任楚超等<sup>[39]</sup>对高强钢栓焊连接节点的抗火研究表明,高温作用使节点失效组件由钢梁变成钢柱。

王伟<sup>[27]</sup>对顶底角钢连接节点高温下的有限元



(a) 常温20 °C (b) 550 °C (c) 650 °C

图6 腹板角钢连接节点的破坏模式<sup>[7]</sup>

Fig.6 Failure mode of web cleat connections<sup>[7]</sup>



(a) 常温20 °C (b) 550 °C

图7 平齐端板连接节点的破坏模式<sup>[33]</sup>

Fig.7 Failure mode of flush end-plate connections<sup>[33]</sup>

模拟结果表明,在火灾下节点连接角钢的倒角处容易出现应力集中而最先破坏。舒赣平等<sup>[20]</sup>对于T型钢连接节点火灾试验现象的分析可知,T型钢连接节点火灾中的破坏模式取决于受拉区连接件T型钢和高强螺栓间的相对承载力。

高温下,节点破坏模式发生转变的主要原因在于温度对材料性能的影响,包括弹性模量、屈服应力、延性和韧性等<sup>[40]</sup>。综合上述研究结果可以发现,高强螺栓的高温性能是决定节点高温破坏模式的重要因素。火灾下,高强螺栓具有较好的延性,但强度的折减相较于构件钢材的更大。因此,在普通钢节点中常建议选用较高强度的螺栓以避免其过早破坏。在高强钢节点中不建议使用强度很高的螺栓,相反推荐使用具有较高延性的螺栓,以满足节点延性要求。

#### 1.5 节点的优化设计

为保证节点在火灾下能够承受钢梁所产生的较大的拉压变形,充分发挥钢梁的悬链线效应,从

而提高结构在火灾中的鲁棒性,近年来,有学者对传统连接节点进行优化研究,给出了一些提高节点转动能力和延性的设计方法。Y. C. Wang<sup>[41]</sup>给出了提高节点转动能力的构造措施,包括:将连接螺栓尽可能集中在梁的受压翼缘附近,使用槽形螺栓孔和适当增加螺栓间距等。W. Meng等<sup>[42]</sup>研究了一种新型通道端板连接节点的抗火性能,节点构造如图8所示。研究表明,采用该类通道端板可以改善节点的变形能力,从而提高节点在高温下的牢固性。Y. Liu等<sup>[43-44]</sup>提出了如图9所示的一种新型的节点形式,节点包含3个部分:固定在梁腹板上的肋板、固定在柱腹板或翼缘上的端板以及肋板和端板之间的半圆柱形截面。这种新型连接节点具有理想铰接节点的特点,在高温下能够为钢梁提供轴向变形所需的延性,减少由梁的热膨胀产生的压力和梁的大变形产生的悬链线拉力,进而有效地提高节点的抗火性能。

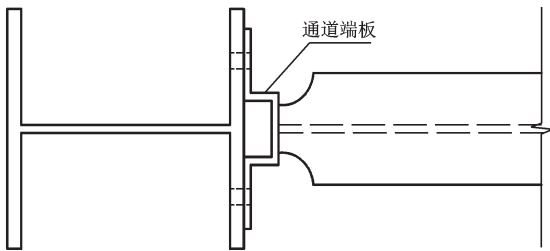


图8 通道端板连接节点<sup>[42]</sup>

Fig.8 Schematic of bolted channel and extended endplate connections<sup>[42]</sup>



图9 新型延性连接节点<sup>[43]</sup>

Fig.9 Schematic of a new ductile connection<sup>[43]</sup>

## 2 钢结构梁柱节点组件分析法

基于组件法的分析思路对节点抗火性能进行理论分析,分析过程大致包括2个基本步骤<sup>[45]</sup>:

(1)确定节点的组件分析模型。首先,按受力方式的不同将节点划分为只受拉、压、剪作用的不

同组件(图10),然后确定各组件在高温下的材料特性及其本构关系,最后将所有组件装配成由弹簧和刚性杆构成的力学模型。

(2)建立节点弯矩—转角曲线的数学模型。利用组件分析模型,确定节点高温下的基本力学参数(承载力、转动刚度和转动能力等),将这些高温力学参数代入节点已有的曲线模型,得到高温下的弯矩—转角曲线数学模型,再通过试验结果进行验证和修正。

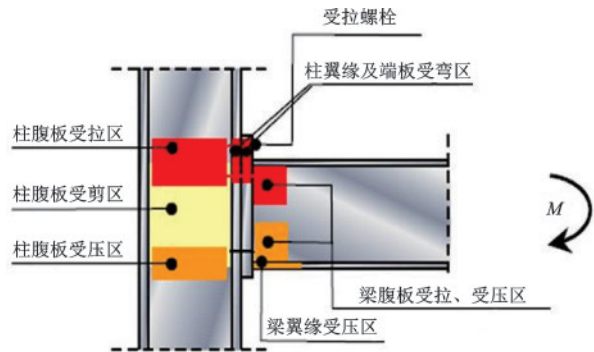


图10 端板连接节点三个分区和关键组件<sup>[46]</sup>

Fig.10 End-plate connection separated into three zones and key component<sup>[46]</sup>

### 2.1 节点高温组件分析模型

端板连接节点由于构造相对简单、组件划分相对明确,非常契合组件法的应用,近年来,诸多学者已经成功地建立端板连接节点的高温组件分析模型,见表3。

Z. H. Qian等<sup>[47]</sup>在试验的基础上,推导了相对复杂的组件法模型,考虑了轴力、剪力和弯矩共同作用下外伸式端板节点的力学性能,并考虑了钢梁腹板变形对于分析结果的影响。H. X. Yu等<sup>[49]</sup>提出了一种端板节点屈曲线模型,该模型可以较好的模拟节点在大变形状态受拉时的拉力、变形特性以及破坏模式,但是该模型假定节点的受剪特性为完全刚性,未考虑节点域剪切变形。高义奇等<sup>[50]</sup>基于H. X. Yu等<sup>[49]</sup>的模型,建立了考虑剪切变形的平齐式端板连接节点组件模型。强旭红等<sup>[51-53]</sup>提出了一种用于计算外伸式端板节点初始刚度的组件模型。

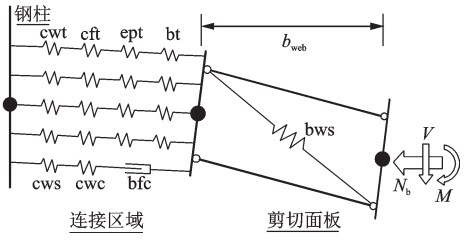
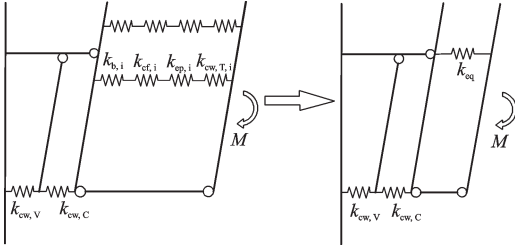
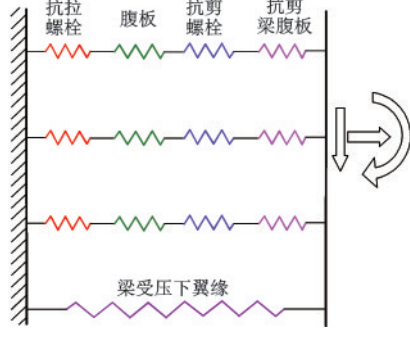
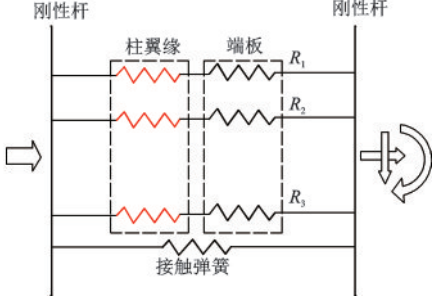
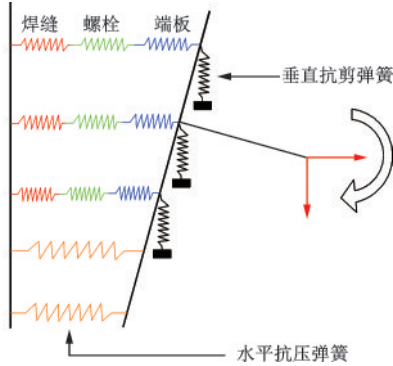
与试验研究和有限元模拟相比,利用组件法建立的节点高温下的理论分析模型,可以定量计算节点高温下的转动刚度和极限承载力,为建立节点抗火设计的简化计算方法提供了理论基础。然而,目

前,高温下组件法的运用主要针对端板连接节点,对于一些较为复杂的节点形式(如顶底角钢连接节

点、T型钢连接节点)还鲜少涉及,因此,需要对这些节点进行深入研究,建立相应的理论分析模型。

表3 端板连接节点组件分析模型

Table 3 Component analysis model for end-plate connections

分析模型	节点类型	荷载	文献来源
	一端外伸端板连接	拉、剪、弯	Z. H. Qian 等 <sup>[47]</sup>
	外伸端板连接	剪、弯	强旭红等 <sup>[53]</sup>
	腹板角钢连接	拉、剪、弯	H. X. Yu等 <sup>[48]</sup>
	平齐端板连接	拉、剪、弯	H. X. Yu等 <sup>[49]</sup> 和高义奇等 <sup>[50]</sup>
	柔性端板连接	拉、剪、弯	Y. Hu等 <sup>[54]</sup>

## 2.2 弯矩—转角曲线数学模型

梁柱节点的主要功能是向柱传递梁端的轴力、剪力、弯矩及扭矩,其中比较重要的是弯矩的传递,欧洲和我国现行钢结构设计规范<sup>[36,55]</sup>都建议采用节点的弯矩—转角( $M-\theta$ )曲线作为钢结构节点设计的依据。现阶段,针对普通钢节点在常温下的 $M-\theta$ 曲线提出的数学模型主要有:线性模型、多项式模型、B样条模型、幂函数模型和指数模型。Y. Yee等<sup>[56]</sup>对端板无加劲肋的外伸式端板连接提出了四参数指数模型,如下式:

$$M = M_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-(k_{\text{ini}} - k_p + c\theta)\theta}{M_{\max}} \right] \right\} + k_p \theta \quad (1)$$

式中, $M$ 为节点的弯矩; $M_{\max}$ 为抗弯极限承载力; $k_{\text{ini}}$ 为初始刚度; $k_p$ 为屈服后刚度; $c$ 为形状参数。

强旭红等<sup>[53]</sup>基于节点组件分析模型,引入钢材高温下力学性能折减系数,提出了高强钢端板连接节点在常温和高温下的初始刚度 $k_{\text{ini}}$ 、屈服后刚度 $k_p$ 和抗弯极限承载力 $M_{\max}$ 的计算方法,将计算得到的参数代入上式,进而得到了高强钢节点在高温下的弯矩—转角曲线的关系式,并用试验结果验证了该数学曲线模型的适用性。

## 3 问题及展望

### 3.1 问题

现阶段钢节点的抗火性能研究虽然已经取得较大的进展,但仍存在以下问题:

(1)对高强度钢节点的高温性能研究相对匮乏。高强钢在土木工程领域具有广阔的应用前景,然而,目前有关高强钢节点的研究成果较为有限,在一定程度上制约了高强度钢材钢结构的应用与发展。

(2)现有研究忽略了框架整体对节点力学性能的影响。目前,对于节点的抗火性能研究大多是将节点孤立起来,虽然部分研究考虑了轴力与剪力对节点的影响,但仍然与实际结构中节点的力学性能存在一定差距,应考虑对由梁、柱、节点构成的子结构进行深入研究。

(3)受火方式和防火保护对梁柱节点火灾响应的影响研究较少。目前所做的研究主要是针对无防火保护的节点,火灾工况为全截面受火,未考虑受火方式和防火措施对节点抗火性能的影响。在

实际工程中,常通过喷刷防火涂层的手段来提高结构防火性能,故应开展有防火保护层的节点在不同火灾工况下的抗火性能研究。

(4)节点高温下的变形机理和破坏模式的研究有待深入。现阶段,节点的抗火研究侧重于考察影响节点受力和刚度的因素,对于不同连接形式的节点在高温下的变形机理和破坏模式的分析还较少。

(5)尚未对节点高温延性的影响因素进行深入研究。火灾下,节点的延性对梁发展悬链线效应、保证荷载内力重分布以及结构保持整体性至关重要<sup>[57]</sup>。因此,在节点抗火设计中,除了要满足承载力需求,还要保证足够的延性,以避免节点脆性破坏或是先于梁柱破坏。

(6)节点抗火性能理论分析方法还有待完善。目前的研究基本还遵循传统的常温下节点设计的思路,将 $M-\theta$ 曲线关系作为节点抗火性能理论分析和抗火设计的依据,将节点的抗弯承载力作为极限承载力。然而,火灾高温下,节点将承受来自钢梁的轴力,所以节点的极限承载力由抗弯能力和抗轴拉/压能力共同确定。

### 3.2 展望

考虑到节点在实际工程结构中的火灾响应,并结合建筑结构体系的整体抗火性能分析和设计的需求,提出以下几点展望:

(1)制定火灾下节点转动能力的评估标准。现有规范EC3<sup>[36]</sup>关于节点在常温下转动能力的建议应用于高温下时过于保守,为此有必要提出适用于节点高温下的转动能力评估指标,以便更经济可靠地进行节点抗火设计。

(2)对多种构造形式的节点进行组件法研究,建立较完整的节点高温组件分析模型库。不同的节点形式对应了不同的建模方式和计算方法,目前工程领域应用到的节点形式较为繁多,组件法尚未给出一种通用的理论分析方法,故应开展多种节点形式的组件法研究。

(3)结合实际工程应用的节点优化设计研究。节点在火灾中的变形、承载力、延性、转动刚度、耗能能力、极限转动能力、破坏模式等对于钢结构的整体稳定有着重要影响,基于大量的参数分析结果,通过改变传统连接的构造形式开发出新的节点并加以检验和应用,以满足实际工程的需要,可能是节点抗火性能研究的重要方向。

(4)考虑蠕变效应的节点抗火性能研究。钢材的高温蠕变会对钢结构的抗火性能产生很大的影响。蠕变效应使节点的转角增大,对结构抗火性能产生不利的影 响。研究表明<sup>[58]</sup>,忽略结构钢的热蠕变,可能导致火灾下节点整体响应的不安全预测。

(5)火灾后节点剩余性能的检测与鉴定。现阶段,钢结构梁柱节点火灾后的性能研究十分不足,而节点的剩余承载力和变形能力对火灾后修复及抗火设计至关重要,为确保节点火灾后安全,需要进一步研究。

## 4 结 论

系统地介绍和总结了节点抗火性能研究的基本方法、研究进展和存在的问题,并对未来需要进一步研究的工作提出展望,得出以下结论:

(1)节点构造形式将很大程度影响梁柱连接节点在火灾中的受力机制和延性,进而影响钢框架以及结构整体的抗火性能,因此,选择合适的连接形式是节点抗火设计的关键。

(2)目前,对于独立的常见连接节点(尤其是端板连接节点)的抗火研究已经较为成熟,但对于钢结构整体的抗火试验和有限元分析还很匮乏,以致无法提出可靠地节点抗火设计方法。

(3)节点在高温下的受力特性和变形特性均异于常温下的情况,综合考虑节点的弯矩、轴力、剪力和转角等变量之间的相互关系对于节点的抗火设计意义重大。

(4)火灾高温下,节点的转动能力和承载能力同等重要。在保证节点承载能力满足要求的前提下,提升节点的转动能力可以有效地改善结构在火灾中的受力状况同时增强结构的鲁棒性。

### 参考文献:

[1] 李炎地,赵金城.火灾下梁柱端板式节点研究进展[J].建筑钢结构进展,2020,22(1):1-7.  
Li Y D, Zhao J Ch. Research review on the behavior of steel beam to column endplate connection in fire [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(1): 1-7. (in Chinese)

[2] 王培军,乌兰托亚,朱绪林.单边螺栓 T 型节点火灾高温下抗拉性能[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):425-431.

Wang P J, Wu L T Y, Zhu X L. Tension behavior of one-side bolted T-stub in a fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 425-431. (in Chinese)

[3] National Institute of Standards and Technology. Final report on the collapse of the world trade center building 7-draft for public comment [R]. USA: National Institute of Standards and Technology, 2008.

[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.  
Gao Y Q, Yu H X, Shi G. 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. (in Chinese)

[5] 建筑钢结构防火技术规范:GB 51249—2017 [S]. 北京:中国计划出版社,2017.  
Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)

[6] 潘珠峰,杨健,王斐亮,等.典型连接节点对钢框架抗连续倒塌性能影响研究进展[J].建筑结构,2020,50(24):11-18.  
Pan Zh F, Yang J, Wang F L, et al. Research progress on the effect of typical beam-column joints on progressive collapse resistance of steel frames [J]. Building Structure, 2020, 50(24): 11-18. (in Chinese)

[7] 余红霞.火灾下钢节点牢固性的研究与展望[J].工程力学,2011,28(4):116-121.  
Yu H X. Discussions on the robustness of steel connections in fire [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 116-121. (in Chinese)

[8] 隋炳强,董毓利,王卫永,等.钢框架中柱刚节点抗火性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(4):651-655.  
Sui B Q, Dong Y L, Wang W Y, et al. Experimental study of the fire resistance of inner rigid beam-column joints in steel frames [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(4): 651-655. (in Chinese)

[9] Wang Y C, Dai X H, Bailey C G. An experimental study of relative structural fire behaviour and robustness of different types of steel joint in restrained steel frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(7): 1149-1163.

[10] Lawson R M. Behaviour of steel beam-to-column connections in fire [J]. Structural Engineer, 1990, 68(14): 263-271.

- [11] Leston-Jones L C, Lennon T, Plank R J, et al. Elevated-temperature moment-rotation tests on steelwork connections [J]. Structures & Buildings, 2015, 122 (4) : 410-419.
- [12] Al-Jabri K S, Lennon T, Burgess I W, et al. Behaviour of steel and composite beam-column connections in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46(1-3):308-309.
- [13] Al-Jabri K S, Burgess I W, Lennon T, et al. Moment-rotation-temperature curves for semi-rigid joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(3) : 281-303.
- [14] Yang K C, Chen S J, Ho M C. Behavior of beam-to-column moment connections under fire load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(7) : 1520-1527.
- [15] 楼国彪. 钢结构高强度螺栓外伸式端板连接抗火性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.  
Lou G B. Behavior and design of extended endplate moment connections with high-strength bolts in fire [D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- [16] 郝淑英, 董金浩, 叶金铎. 火灾下加劲肋对梁柱外伸端板连接性能的影响[J]. 工程力学, 2010, 27(8) : 152-155, 163.  
Hao Sh Y, Dong J H, Ye J D. Effect of stiffener on behavior of beam to column extended end-plate connection in fire [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8) : 152-155, 163. (in Chinese)
- [17] 王卫永, 李国强, 于克强. 外伸端板节点在火灾下的转角-温度关系[J]. 钢结构, 2006, 21(3) : 92-94.  
Wang W Y, Li G Q, Yu K Q. Rotation-temperature relationship of extended end-plate connection in fire [J]. Steel Construction, 2006, 21(3) : 92-94. (in Chinese)
- [18] 王卫永, 董毓利, 李国强. 外伸端板节点火灾行为的试验研究和理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12) : 2125-2128.  
Wang W Y, Dong Y L, Li G Q. Experimental and analytical studies on extended end-plate connection in fire [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12) : 2125-2128. (in Chinese)
- [19] 王卫永, 董毓利. 钢结构栓焊节点火灾行为的试验研究[J]. 河北建筑科技大学学院学报, 2006, 23(2) : 24-26.  
Wang W Y, Dong Y L. Study of welded flange-bolted web connections of steel structures in fire [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(2) : 24-26. (in Chinese)
- [20] 舒赣平, 杜二峰, 张欣欣, 等. T型钢连接梁柱节点抗火性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7) : 136-143.  
Shu G P, Du E F, Zhang X X, et al. Experimental study on the fire performance of steel beam-column t-stub joints [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(7) : 136-143. (in Chinese)
- [21] 高义奇, 余红霞, 施刚. 火灾下拉剪组合作用对高强螺栓节点性能影响的试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9) : 97-103.  
Gao Y Q, Yu H X, Shi G. Experimental research on the behavior of high-strength bolted connections under combined tension and shear in fire [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9) : 97-103. (in Chinese)
- [22] 高义奇, 施刚, 余红霞. 拉剪组合作用下平齐式端板节点火灾行为的有限元研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11) : 100-106.  
Gao Y Q, Shi G, Yu H X. FEM analysis of flush end-plate connections under the combined effect of tension and shear in fire [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11) : 100-106. (in Chinese)
- [23] Chen L, Wang Y C. Methods of improving survivability of steel beam/column connections in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79 (1) : 127-139.
- [24] 王兴武, 杨秀萍, 温殿英, 等. 短T型钢连接行为的有限元数值模拟[J]. 天津理工大学学报, 2005, 21(4) : 1-4.  
Wang X W, Yang X P, Wen D Y, et al. Numerical simulation on behavior of simple T-stub steel connection by finite element method [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2005, 21(4) : 1-4. (in Chinese)
- [25] 杨占兴. 火灾下钢框架半刚性节点性能的试验研究及有限元分析[D]. 南京: 东南大学, 2008.  
Yang Zh X. Experimental research and finite element analysis of performance on semi-rigid connections of steel frame in fire [D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [26] 代东亮. 钢结构半刚性连接节点抗火性能有限元分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.  
Dai D L. Steel structure semi-rigid connection nodes fire resistance performance finite element analysis [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [27] 王伟. 火灾下钢结构半刚性节点受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Wang W. Study on the mechanical behavior of steel structure semi-rigid joint under fire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [28] Qian Z H, Tan K H, Burgess I W. Behavior of steel

- beam-to-column joints at elevated temperature: experimental investigation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(5):713-726.
- [29] 史伟伟,王静峰,盛宏玉,等.高温下方钢管框架外伸端板连接节点力学性能及破坏机理[J].*工程力学*,2013,30(增1):248-252.  
Shi W W, Wang J F, Sheng H Y, et al. Mechanical behavior and failure mechanism of extended endplate connections to square steel tubular columns at high temperature[J]. *Engineering Mechanics*, 2013,30(Sup 1):248-252. (in Chinese)
- [30] Yu H X, Burgess I W, Davison J B, et al. Experimental investigation of the behaviour of fin plate connections in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009,65(3):723-736.
- [31] Yu H X, Burgess I W, Davison J B, et al. Tying capacity of web cleat connections in fire-Part1: test and finite element simulation [J]. *Engineering Structures*, 2009,31(3):651-663.
- [32] Yu H X, Burgess I W, Davison J B, et al. Experimental and numerical investigations of the behavior of flush end plate connections at elevated temperatures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011,137(1):80-87.
- [33] Qiang X H, Bijlaard F S K, Kolstein M H, et al. Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions-Part 1: experimental study[J]. *Engineering Structures*, 2014,64:23-38.
- [34] Qiang X H, Jiang X, Bijlaard F S K, et al. Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions-Part 2: numerical study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 64: 39-51.
- [35] 强旭红,任楚超,姜旭,等.高强平齐式端板连接火灾下性能试验[J].*同济大学学报(自然科学学报)*,2017,45(5):673-683.  
Qiang X H, Ren Ch Ch, Jiang X, et al. Experimental and theoretical study on behavior of high Strength steel flush endplate connections under fire conditions [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(5):673-683. (in Chinese)
- [36] European Committee for Standardization. EN 1993-1-8, Eurocode3-design of steel structures part 1-8: design of joints[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [37] 武念铎,罗永峰,强旭红,等.高强钢外伸式端板节点火灾性能试验与数值分析[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2018,48(1):138-145.  
Wu N D, Luo Y F, Qiang X H, et al. Experimental and numerical analysis on high strength steel extended endplate connections in fire [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(1): 138-145. (in Chinese)
- [38] Li Y D, Zhao J C. Analytical investigation of beam-to-column endplate connections at elevated temperatures [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2018: 1-15.
- [39] 任楚超,强旭红,罗永峰,等.高强钢栓焊连接节点火灾下性能研究[C]//第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集.天津:[s.n.],2016.  
Ren Ch Ch, Qiang X H, Luo Y F, et al. Study on behavior of welded flange-bolted web connections in high strength steel structures under fire[C]//*Proceedings of the Sixteenth National Symposium on Modern Structural Engineering*. Tianjin:[s.n.], 2016. (in Chinese)
- [40] 罗永峰,王熹宇,强旭红,等.高强钢在工程结构中的应用进展[J].*天津大学学报(自然科学与工程技术版)*,2015,48(增1):134-141.  
Luo Y F, Wang X Y, Qiang X H, et al. Progress in application of high strength steel to engineering structures [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(Sup 1):134-141. (in Chinese)
- [41] Wang Y C. Ensuring robustness of steel framed structures in fire through improved joint performance [J]. *Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering*, 2012,32(1):89-98.
- [42] Meng W, Wang P. Strategies to increase the robustness of endplate beam-column connections in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.09.017.
- [43] Liu Y, Huang S S, Burgess I W. Component-based modelling of a novel ductile steel connection[J]. *Engineering Structures*,2020,doi:10.1016/j.engstruct.2020.110320.
- [44] Liu Y, Huang S S, Burgess I W. Investigation of a steel connection to accommodate ductility demand of beams in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019,157: 182-197.
- [45] 陈颖智,童乐为,陈以一.组件法用于钢结构节点性能分析的研究进展[J].*建筑科学与工程学报*,2012,29(3):81-89.  
Chen Y Zh, Tong L W, Chen Y Y. Research developments of component method for behavior of joints in steel structures [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2012,29(3):81-89. (in Chinese)
- [46] AL-Jabri K S. Modelling and simulation of beam-to-column joints at elevated temperature: A review[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2011,348(7): 1695-1716.

- [47] Qian Z H, Tan K H, Burgess I W. Numerical and analytical investigations of steel beam-to-column joints at elevated temperatures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(5):1043-1054.
- [48] Yu H X, Burgess I W, Davison J B, et al. Tying capacity of web cleat connections in fire, Part 2: Development of component-based model[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(3):697-708.
- [49] Yu H X, Burgess I W, Davison J B, et al. Development of a yield-line model for endplate connections in fire[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(6): 1279-1289.
- [50] 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.  
Gao Y Q, Yu H X, Shi G. 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. (in Chinese)
- [51] 强旭红,武念铎,罗永峰,等.有螺栓预紧力的T型连接初始刚度计算方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49 (1):9-15.  
Qiang X H, Wu N D, Luo Y F, et al. Calculation method of initial stiffness of T-stubs involved bolt pre-tension [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49 (1):9-15. (in Chinese)
- [52] 强旭红,武念铎,罗永峰,等.考虑撬力作用位置的T型连接初始刚度计算方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(12):1230-1237.  
Qiang X H, Wu N D, Luo Y F, et al. Theoretical analysis of initial stiffness of t-stubs considering the location of prying force [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(12): 1230-1237. (in Chinese)
- [53] 强旭红,陈欢,姜旭,等.高强钢端板连接节点弯矩-转角曲线模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48 (4):471-480.  
Qiang X H, Chen H, Jiang X, et al. Mathematical model for moment-rotation curve of high strength steel endplate connections [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(4):471-480. (in Chinese)
- [54] Hu Y, Davison J B, Burgess I W, et al. Component modelling of flexible end-plate connections in fire[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2009, 9 (1) : 1-15.
- [55] 钢结构设计规范:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.  
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [56] Yee Y, Melchers R. Moment-rotation curves for bolted connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112 (3):615.
- [57] 罗永峰,任楚超,强旭红,等.高强钢结构抗火研究进展[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49 (增1):104-121.  
Luo Y F, Ren Ch Ch, Qiang X H, et al. State-of-the-art on fire-resistance behavior of high strength steel structures [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(Sup 1): 104-121. (in Chinese)
- [58] Ghor A E, Hantouche E G, Morovat M A. Flush endplate connections in fire: time-dependent behavior of tension bolts[J]. *Fire Technology*, 2018, 54(5): 1149-1169.

(本文责编:赵霞)