

# 高强钢平齐式端板连接节点火灾后性能数值研究

强旭红<sup>1</sup>, 石志伟<sup>1</sup>, 何旭<sup>2</sup>, 姜旭<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 华润置地(北京)股份有限公司, 北京 100035)

**摘要:** 采用 Abaqus 软件对高强钢平齐式端板连接节点火灾后性能进行模拟, 结果表明有限元模型能准确模拟节点的弯矩-转角关系、节点失效模式和应力分布等。在此基础上, 对端板采用 Q460 高强钢和 Q345 普通钢的节点进行参数分析。结果表明: 在历经 550 °C 火灾高温并冷却后, 节点力学性能未发生明显退化; 端板材料对节点初始刚度无影响, 但对节点承载力影响显著; 与采用较厚普通钢端板的节点相比, 采用较薄高强钢端板的节点可实现相近的承载力甚至更高的转动能力。

**关键词:** 高强钢; 平齐式端板连接节点; 火灾后; 结构火灾安全; 数值研究

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

## Numerical Study on Post-fire Behavior of High Strength Steel Flush Endplate Connections

QIANG Xuhong<sup>1</sup>, SHI Zhiwei<sup>1</sup>, HE Xu<sup>2</sup>, JIANG Xu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Resources Land(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100035, China)

**Abstract:** The behavior of high strength steel flush endplate connections on post-fire was simulated according to the test results using finite element software Abaqus. Comparison between the analysis results of finite element method (FEM) and all representative experimental results on moment-rotation relationship, failure mode and stress distribution of flush endplate connections shows that good agreements exist. Based on above, parametric analysis on Q460 high strength steel endplate connections and Q345 mild steel endplate connections was conducted. Results show that: the degradation of mechanical behavior of the connections is not significant after cooling down from fire temperature 550 °C; the material property of the endplate has no impact on the initial stiffness of the connections but has important impact on

the bending capacity of the connections; a connection with thinner high strength steel endplate can achieve similar bending capacity and equivalent or even higher rotation capacity after fire in comparison with a connection with thicker mild steel endplate.

**Key words:** high strength steel; flush endplate connection; post-fire; structural fire safety; numerical study

在常温下钢材具有良好的力学性能, 而在火灾高温下钢材的强度和刚度下降较快。无论普通结构钢还是高强结构钢, 在历经低于 600 °C 的火灾高温并冷却后, 力学性能基本可恢复<sup>[1-2]</sup>, 这为火灾后钢结构的再利用提供了可能。

节点是钢结构的重要组成部分, 相较于完全采用普通钢的钢结构节点, 将高强钢合理应用于节点, 能在显著提高节点承载力的同时保证节点具有足够的变形能力。Coelho 等<sup>[3-4]</sup>对采用高强钢 S460、S690 和 S960 端板的节点的试验研究表明, 采用上述高强钢作为端板材料的节点满足欧洲钢结构设计规范 Eurocode 3 对节点强度和刚度的要求, 并且节点具有足够的变形能力。孙飞飞等<sup>[5]</sup>对三个平齐式端板连接节点(两个为 Q690 高强钢端板, 一个为 Q345 普通钢端板)进行低周反复荷载的试验结果表明, Q690 高强钢平齐式端板连接节点的承载力比 Q345 普通钢平齐式端板连接节点高 30%。此外, 余红霞<sup>[6]</sup>采用恒温加载方式对四种钢结构节点(平齐式端板连接节点、柔性端板连接节点、鳍板式连接节点和腹板角钢连接节点)在 20~700 °C 温度范围内力学性能的研究发现, 随温度升高, 节点破坏模式由钢构件破坏向螺栓破坏转变, 并指出常温下钢结构节点设计方法直接应用于高温下钢结构节点设计时的不合理之处。目前, 在世界范围内针对火灾后钢结构的再

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0304701); 国家自然科学基金(51408150); 国家财政部项目((2013)235); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014KJ044)

第一作者: 强旭红(1984—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗火及高强钢在土木工程领域中的应用。E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn

通信作者: 姜旭(1982—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和钢与组合桥。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn



扫码  
查看  
作者  
扩展  
介绍

利用提出相关建议的规范或标准很少,只有英国规范 BS5950 中的 Part 8<sup>[7]</sup>指出:历经火灾并冷却后,对于热轧钢和铸钢,若平直度在限值内则可再次使用;对于普通钢 S235 和 S275,火灾后的力学性能可恢复至火灾前力学性能的 90% 以上;对于普通钢 S355,火灾后力学性能可恢复至火灾前力学性能的 75% 以上(过火时温度高于 600℃)。然而,对于高强钢火灾后的力学性能,目前尚无规范提及。

为研究高强钢端板连接节点火灾后的力学性能,对七个平齐式梁柱端板连接节点试件在历经 550℃ 火灾高温后的力学性能进行足尺试验研究,同时对上述七个节点试件在常温下(未过火)的相应力学性能进行试验研究,用以对比分析,详见文献[8]。

在试验研究中,火灾后节点主要组件的应力、应变分布等不易通过试验获得,有限元分析可准确预测节点在加载过程中任意时刻参数的变化。目前,采用有限元软件对结构或构件<sup>[9-10]</sup>进行经济、高效的数值研究成为一种趋势。采用通用有限元软件 Abaqus 对七个平齐式端板连接节点进行分析,从模型的几何尺寸、单元类型、网格生成、接触定义等方面介绍了建模过程,通过有限元模拟分析得到火灾后节点的失效模式、节点弯矩-转角关系曲线以及端板和螺

栓的应力分布等,并根据试验结果对数值模拟正确性进行验证。在此基础上,对 Q460 高强钢端板连接节点和 Q345 普通钢端板连接节点进行了参数研究。

## 1 试验研究

### 1.1 试验节点试件

试验中平齐式端板连接节点依据欧洲钢结构设计规范 Eurocode 3: Part 1-8<sup>[11]</sup>进行设计。高强钢端板连接节点的端板材料采用高强钢 S690 和 S960<sup>[12]</sup>,作为对比的普通钢端板连接节点的端板材料采用 Q235 和 Q345。所有节点试件中梁和柱均采用普通钢 Q345,其中梁截面为 HW300 mm×300 mm×10 mm×15 mm,柱截面为 HW407 mm×428 mm×20 mm×35 mm<sup>[13]</sup>。试件几何尺寸如图 1 所示,试件概况和试验条件如表 1 所示。高强钢端板试验中采用的焊条型号为 ER76-G,焊条屈服强度为 735 MPa,稍高于 S690 的屈服强度,但低于 S960 的屈服强度,因此对高强钢采用增大焊脚尺寸的方式进行补偿。对于普通钢(Q235 和 Q345)端板,焊脚尺寸取 8 mm;对于高强钢(S690 和 S960)端板,焊脚尺寸取 10 mm<sup>[13]</sup>。

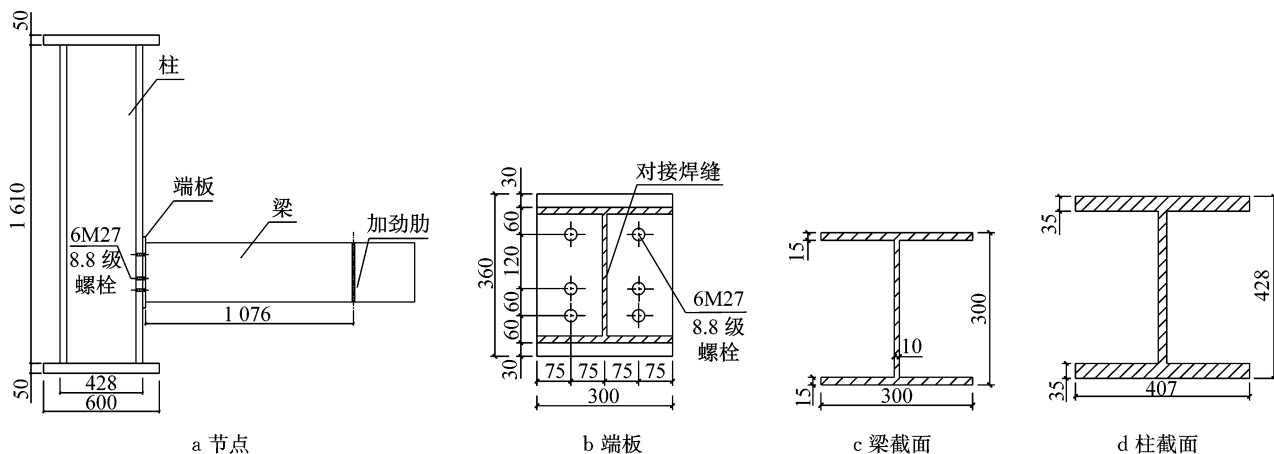


图1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig.1 Geometrical dimensions of the specimen(unit:mm)

笔者前期对高强钢火灾后的材料力学性能试验研究<sup>[1-2]</sup>结果表明:当火灾温度超过 600℃ 时,火灾后高强钢的材性退化非常明显,这与普通钢相似;此外,众多针对钢结构火灾下和火灾后的试验研究均据此选取 550℃ 为足尺火灾试验的试验温度,故本文试验亦选择火灾温度为 550℃,便于与其他火灾试验结果进行对比。

### 1.2 试验装置与试验过程

研究分常温试验(未过火)和火灾后试验两部

分,均在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行。图 2 为试验用的火灾试验炉(4.5 m×3.0 m×1.7 m)。结合已有试验设备,考虑到火灾后对梁施加拉力远比施加压力稳定,故将梁柱节点试件整体倒转,以方便从炉外施加荷载。加载方式如图 3 所示。

在对试件进行加热的过程中,以 10℃·min<sup>-1</sup> 的速率(该值与进行防火保护的建筑物在真实火灾下的升温速率相当)对炉内节点试件加热至 550℃。当试件各组件受热均匀后持温 30 min,而后

表 1 试件概况与试验条件

Tab.1 Details of test specimens and test conditions

节点试件 编号	端板材料 型号	端板厚度/ mm	焊条型号	焊缝强度与 母材匹配情况	最高火灾温度/ ℃	未过火温度/℃
1-1P	Q235	20	ER50-6	高于母材	550	
1-2P	S690	12	ER76-G	匹配	550	
1-3P	S960	10	ER76-G	低于母材	550	
2-1P	Q235	25	ER50-6	高于母材	550	
2-2P	Q345	20	ER50-6	高于母材	550	
2-3P	S690	15	ER76-G	匹配	550	
2-4P	S960	12	ER76-G	低于母材	550	
1-1A	Q235	20	ER50-6	高于母材		20
1-2A	S690	12	ER76-G	匹配		20
1-3A	S960	10	ER76-G	低于母材		20
2-1A	Q235	25	ER50-6	高于母材		20
2-2A	Q345	20	ER50-6	高于母材		20
2-3A	S690	15	ER76-G	匹配		20
2-4A	S960	12	ER76-G	低于母材		20

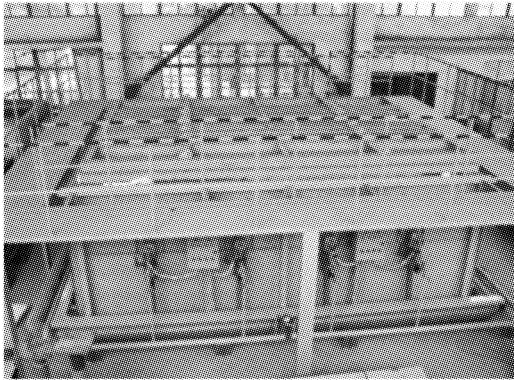


图 2 火灾试验炉<sup>[8]</sup>

Fig.2 Fire test furnace<sup>[8]</sup>

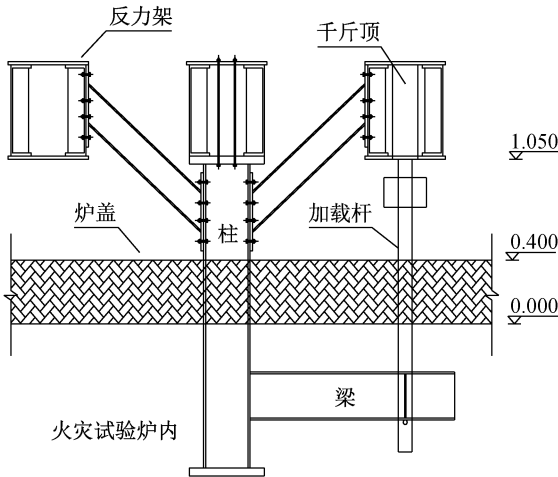


图 3 加载试验装置<sup>[8]</sup>

Fig.3 Test setup<sup>[8]</sup>

停止加热并通风降温,待试件自然冷却至常温,再对试件进行加载,直至试件破坏.经试验得到端板连接节点的火灾后剩余承载力、节点转角和节点破坏模式.所有试验设备在加载前都经过调试并进行预加

载.正式加载阶段,采用位移控制,千斤顶液压传动器的活塞运动速率为  $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,同时记录端板连接节点的变形值和相应荷载值,具体详见文献[8].

2 有限元模型

2.1 单元类型和网格划分

有限元模型的几何尺寸与试验用的节点试件完全相同.考虑节点试件的几何尺寸、荷载、温度分布以及边界条件的对称性,建模时仅建节点试件的一半,以期缩短计算时间、提高计算效率.

单元类型选用 C3D8I 单元,C3D8I 单元能有效模拟组件间的接触关系,并准确进行非线性分析.网格划分中,在螺栓孔周围采用密集网格以便准确分析螺栓孔周边应力分布.梁、柱、端板、螺栓以及节点整体有限元模型的网格划分情况如图 4 所示.

2.2 接触定义和分析步设置

有限元模型的接触关系包括螺栓-柱翼缘、柱翼缘-端板、端板-螺母以及螺栓杆-螺栓孔,如图 5 所示.所有接触关系的接触属性均为小滑移以保证接触面间荷载传递,摩擦因数取 0.44.由于螺母与螺栓杆的接触状态对整个模型分析影响不大,故螺母-螺栓杆采用绑定约束,如图 6a 所示,将梁与端板间焊缝采用绑定约束而未对焊缝进行实体建模以简化模型,如图 6b 所示.

有限元分析过程分为五个荷载步:第 1 步,临时约束螺栓与端板各方向自由度,并在螺栓轴线上施加 10 N 的预紧力;第 2 步,解除对螺栓和端板的约束;第 3 步,固定所有螺栓的长度;第 4 步,设定模型

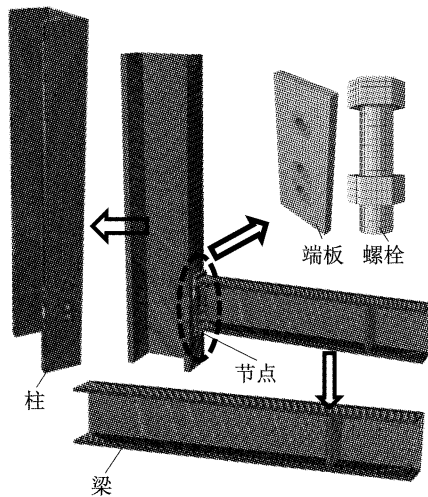


图4 有限元模型网格划分

Fig.4 Mesh generation of finite element model

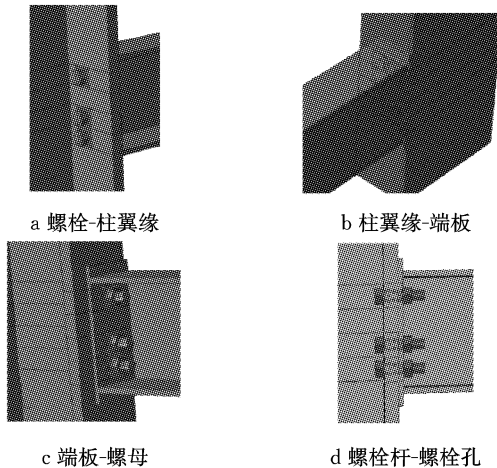


图5 有限元模型中的接触关系

Fig.5 Contact pairs in finite element model

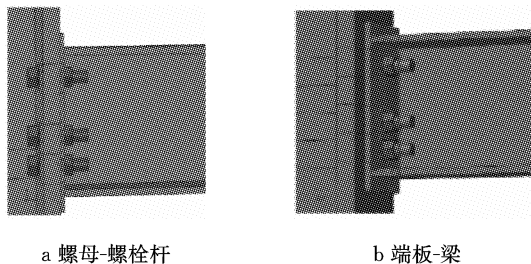


图6 有限元模型中螺母-螺栓杆和端板-梁的绑定约束

Fig.6 Tie constraints in bolt nuts-shanks and endplate-beam in finite element model

的温度场为 20 ℃;第 5 步,在梁端布有加劲肋的加载点处施加等效竖向荷载。前三步可保证在减少计算量和分析误差的基础上顺利建立组件间的接触关系。

螺栓的失效准则依据 Coelho 等<sup>[14-15]</sup>的建议,当螺栓受拉应变达到材料的极限应变  $\epsilon_u$  时认为螺栓断

裂,而对端板和柱翼缘,则认为当截面等效塑性应变达到材料极限应变时该组件失效。

### 2.3 材料力学性能

根据英国规范 BS5950 中的 Part 8<sup>[7]</sup>对结构钢 S235 和 S275 火灾后力学性能剩余系数的建议,将普通钢(包括 Q235 和 Q345)历经 550 ℃的火灾高温并冷却后的剩余力学性能取为常温下(未过火)力学性能的 90%。8.8 级高强螺栓常温下的力学性能依据 Sheffield 大学的研究<sup>[16-19]</sup>确定,8.8 级高强螺栓火灾后的力学性能剩余系数依据 Lou 等<sup>[20]</sup>的研究确定。此外,高强度 S690 和 S960 火灾后力学性能剩余系数依据 Qiang 等<sup>[1-2]</sup>所做的材性试验确定。

图 7 为常温下试验用钢材和螺栓的工程应力-应变曲线,火灾高温后材料强度为常温下强度乘以相应火灾高温后的强度剩余系数。有限元模型中输入的应力和应变为真实应力和真实塑性应变,按下式求得:

$$\sigma_{tr} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0(L_0/L)} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng})$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{tr} - \epsilon_{el} = \epsilon_{tr} - \frac{\sigma_{tr}}{E}$$

式中:  $F$  为试件两端荷载;  $A_0$  和  $L_0$  分别为样试的初始截面面积和初始长度;  $A$  和  $L$  分别为试件受荷载  $F$  作用时的即时截面面积和即时长度;  $\sigma_{tr}$ 、 $\epsilon_{tr}$ 、 $\epsilon_{pl}$ 、 $\epsilon_{el}$  分别为真实应力、真实应变、塑性应变和弹性应变;  $E$  为弹性模量;  $\epsilon_{eng}$  和  $\sigma_{eng}$  分别为工程应变和工程应力。

$\epsilon_{eng}$  和  $\sigma_{eng}$  的计算式如下所示:

$$\epsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$$

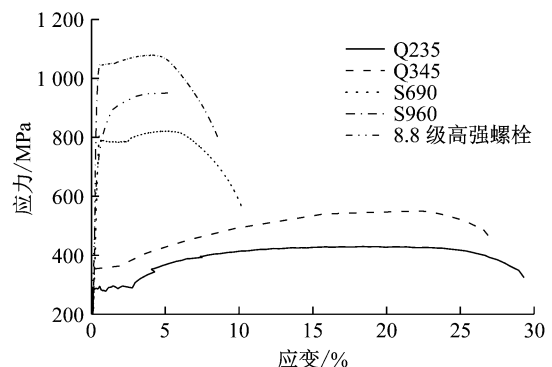


图7 常温下材料的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of the materials at ambient temperature

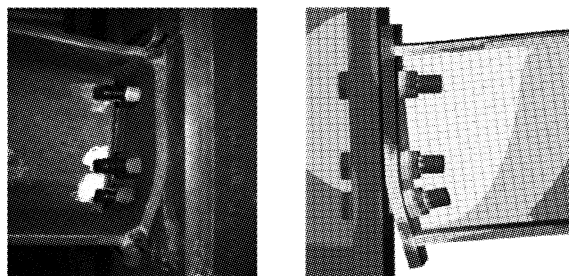
工程应变与真实应变之间的转换关系如下所示:

$$\varepsilon_{tr} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$$

### 3 有限元模型验证

#### 3.1 节点变形

图 8 和图 9 分别为历经 550 °C 的火灾高温并冷却至常温后,节点试件 2-3P(S690 15 mm) 及其各组件最终变形状态的有限元模拟结果与试验结果的对比。可以看出,有限元模拟的最终变形状态与试验结果较为吻合。端板发生屈曲变形,并且受拉区端板与柱翼缘产生分离,而螺栓孔周边未发生明显破坏。需要指出的是,试件 2-3P 的失效模式为模式 2(端板屈服的同时螺栓破坏),在本文有限元模拟中,当螺栓

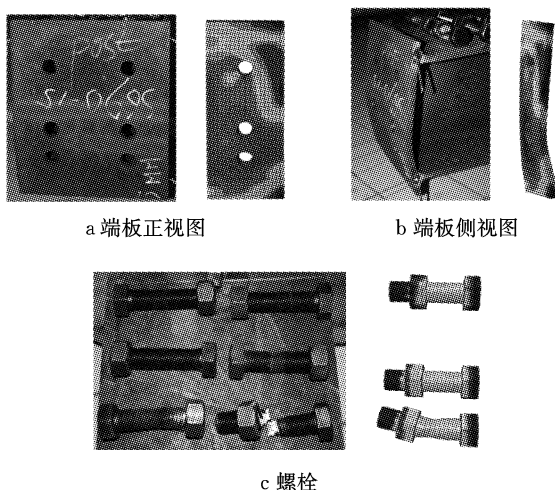


a 试验结果

b 有限元模拟结果

图 8 火灾后节点试件 2-3P 最终变形状态试验和有限元模拟结果对比

Fig.8 Comparison of final deformation state of specimen 2-3P after fire between test and finite element simulation results



a 端板正视图

b 端板侧视图

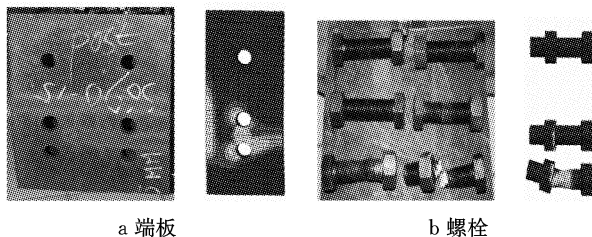
c 螺栓

图 9 火灾后节点试件 2-3P 组件失效试验和有限元模拟结果对比

Fig.9 Comparison of component failure of specimen 2-3P after fire between test and finite element simulation results

受拉应变达到材料的极限应变  $\varepsilon_u$  时,即停止计算,并认为螺栓已发生断裂。虽然有限元模型未能模拟出螺栓断裂的过程,但是可揭示断裂发生和扩展的位置,如图 9c 所示。首排受拉螺栓发生屈曲,并且螺栓杆中部发生颈缩,受压螺栓依然保持平直。类似地,也可从其余六组试件中得到相同的结论。虽然该有限元模型尚无法模拟试验曲线的下降段,但是可判断出首先发生失效的组件和试件失效模式。

等效塑性应变的大小能够预测节点屈服状态,故将有限元模型等效塑性应变云图与试验得到的节点变形状态进行对比。以如图 10 所示的试件 2-3P(S690 15 mm) 为例,试件端板发生较大的塑性变形,最外侧一排受拉螺栓及其螺栓孔周边发生了屈服。



a 端板

b 螺栓

图 10 火灾后节点试件 2-3P 组件最终变形状态和有限元模拟等效塑性应变云图

Fig.10 Cloud diagram of final deformation state and equivalent plastic strain in finite element simulation of specimen 2-3P after fire

#### 3.2 节点弯矩-转角关系

图 11~14 为历经 550 °C 的火灾高温并冷却后,节点试件 2-1P、2-2P、2-3P 和 2-4P 的弯矩-转角关系的试验与有限元模拟结果的对比。

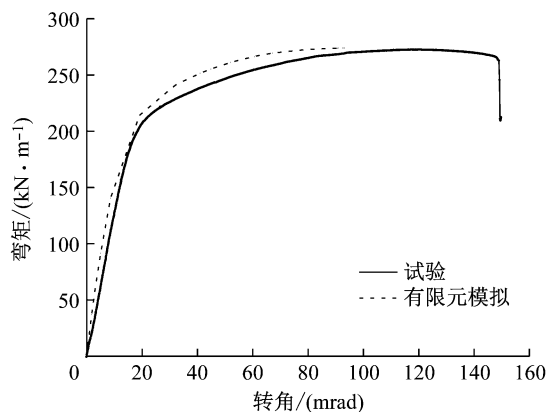


图 11 火灾后节点试件 2-1P 弯矩-转角关系曲线的试验和有限元结果对比

Fig.11 Comparison of moment-rotation curve of specimen 2-1P after fire between test and finite element simulation results

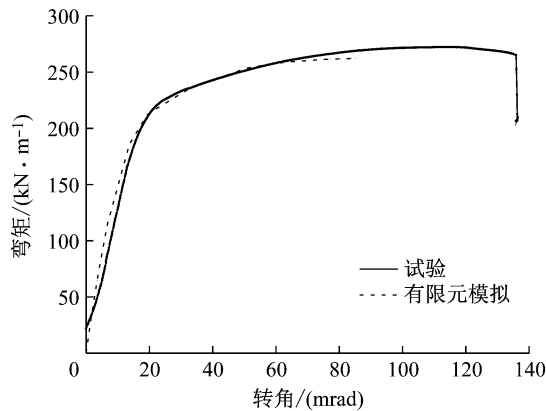


图12 火灾后节点试件 2-2P 弯矩-转角关系曲线的试验和有限元结果对比

Fig.12 Comparison of moment-rotation curve of specimen 2-2P after fire between test and finite element simulation results

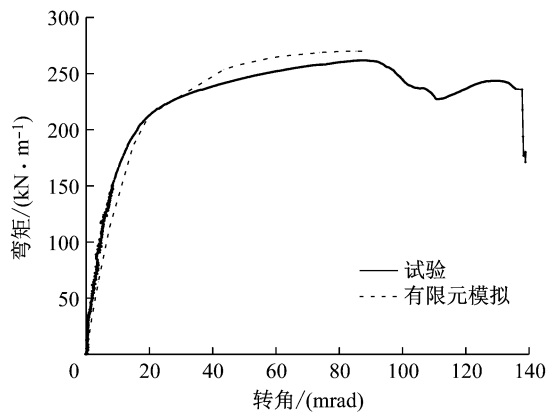


图13 火灾后节点试件 2-3P 弯矩-转角关系曲线的试验和有限元结果对比

Fig.13 Comparison of moment-rotation curve of specimen 2-3P after fire between test and finite element simulation results

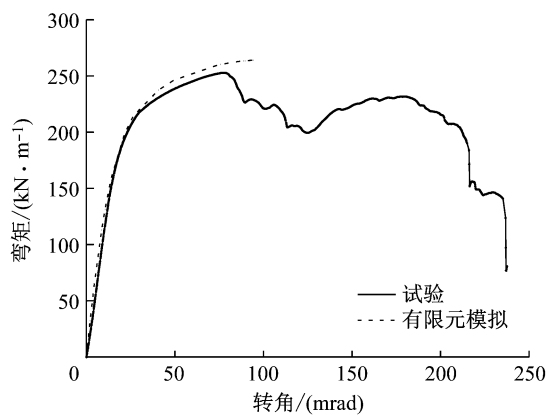


图14 火灾后节点试件 2-4P 弯矩-转角关系曲线的试验和有限元结果对比

Fig.14 Comparison of moment-rotation curve of specimen 2-4P after fire between test and finite element simulation results

以图14为例,节点试件 2-4P 有限元模拟结果在节点初始刚度、节点承载力和承载力对应的转动变形等方面与试验结果较为吻合。

所有节点的火灾后剩余承载力如表2所示。由于节点试件 1-3P(S960 10 mm)的端板较薄、焊缝热影响区对节点力学性能影响很大<sup>[13]</sup>,导致试件的端板提前破坏,故不在对比之列。由表2可看出,有限元模拟得到的节点剩余承载力与试验结果比较接近,最大偏差为 8.14%。

表2 火灾后数值分析的校验

Tab.2 Validation of numerical study against experimental study after fire

节点试件编号	端板		火灾后承载力(弯矩)		偏差/%
	材料型号	厚度/mm	试验值/(kN·m)	有限元模拟结果/(kN·m)	
1-1P	Q235	20	255.56	247.11	3.31
1-2P	S690	12	226.67	245.11	8.14
1-3P	S960	10			
2-1P	Q235	25	272.59	273.96	0.50
2-2P	Q345	20	272.35	262.14	3.75
2-3P	S690	15	261.79	270.06	3.16
2-4P	S960	12	252.85	264.01	4.41

### 3.3 应力分布

以节点试件 1-2P (S690 12 mm)为例,其端板与螺栓的最终应力状态分别如图15和图16所示。从图15中端板的应力云图可清晰地看到试验结束时的变形状态,端板中部和端板的螺栓孔周边(尤其是

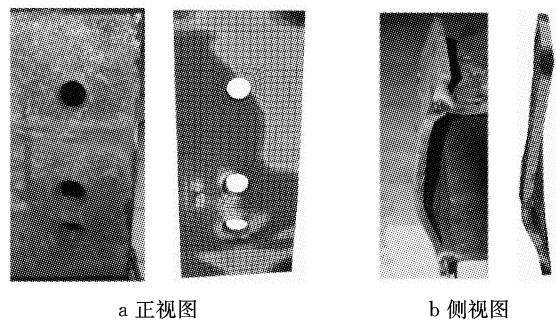


图15 火灾后节点试件 1-2P 端板最终应力状态和屈服线模式

Fig.15 Final stress state and yield line pattern of endplate of specimen 1-2P after fire

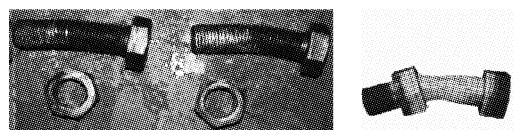


图16 火灾后节点试件 1-2P 受拉区首排螺栓失效时最终应力状态

Fig.16 Final stress state of bolts in top tensile row of specimen 1-2P after fire

受拉区螺栓孔周边)屈服效应明显,而端板受压区变形相对较小.图 16 表明,首排受拉螺栓发生颈缩,并且螺栓颈缩发生的位置附近同时也是端板的螺栓孔应力集中较为明显之处.类似地,也可从其余试件得到相近的结论.从应力云图的分析结果可发现:在试验研究中,火灾后节点组件的应力分布不易通过试验获得,而有限元分析可准确预测节点在加载过程中任意时刻的应力分布.

4 参数分析

在前文已验证有限元模型正确性的基础上,以国内最常用的高强钢 Q460 端板连接节点为对象进行有限元参数分析,建模过程如第 2 节所述,节点参数如表 3 所示.为对比分析,对端板采用最常用国产普通钢 Q345 的节点进行相应数值分析.节点中除端板外其余组件的材料性能与第 2.3 节相同,常温 and 火灾高温后,高强钢 Q460 端板的材料性能参照文献 [21-22],普通钢 Q345 的材料性能参照文献 [1,23-24].

表 3 Q460 节点的端板参数

有限元模型编号	端板	
	材料型号	厚度/mm
Q460-8	Q460	8
Q460-10	Q460	10
Q460-12	Q460	12
Q460-14	Q460	14
Q460-16	Q460	16

4.1 Q460 高强钢端板连接节点力学性能

4.1.1 节点弯矩-转角关系曲线

常温下(未过火)和火灾后 Q460 端板连接节点的弯矩-转角关系曲线如图 17 所示(图例中 A 表示 20 ℃,P 表示火灾高温 550 ℃,下同).从图 17 可看出,节点在破坏前历经了较长的塑性变形,节点变形

能力良好.由图 17 还可得出如下结论:无论在常温下还是火灾后,随端板厚度增加,节点的初始转动刚度和抗弯承载力增大,节点转动能力减小;当端板厚度较小时,在火灾后相较于常温下,节点主要力学性能的退化程度优于厚度较大的端板.

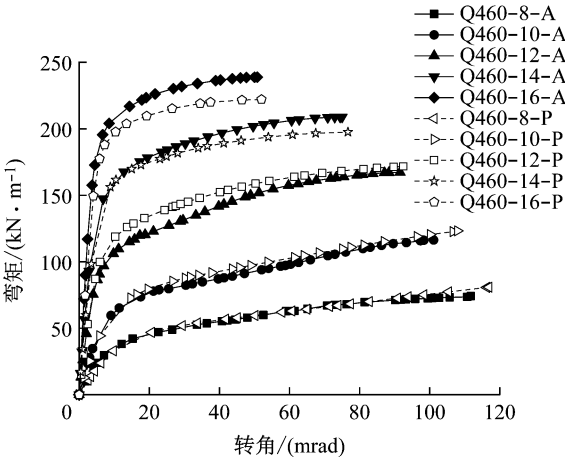


图 17 常温下(未过火)和火灾后 Q460 端板连接节点弯矩-转角关系

Fig. 17 Moment-rotation relationship of Q460 endplate connections at ambient temperature ( without fire exposure) and after fire

4.1.2 节点的主要力学性能

对节点的力学性能包括初始刚度、抗弯承载力和转动能力等参数进行评价.表 4 为常温下(未过火)和火灾高温后 Q460 高强钢端板连接节点的主要力学性能的有限元分析结果.分析结果进一步表明,历经 550 ℃火灾高温后高强钢平齐式端板连接节点的主要力学性能未发生明显退化,火灾后剩余承载力达到受火前的 90% 以上,可为在火灾中未发生倒塌的高强钢结构火灾后的再利用提供参考.

此外,从表 4 还可看到,随端板厚度增加,节点的转动能力有所下降.这是因为尽管端板较厚可以提高节点抗弯承载力,但是端板厚度的增加会降低

表 4 常温下(未过火)和火灾后 Q460 端板连接节点主要力学性能对比

Tab.4 Comparison of mechanical behavior of Q460 endplate connections at ambient temperature (without fire exposure) and after fire

节点试件编号	$S_{iniQ460-P}$	$S_{iniQ460-A}$	$\frac{S_{iniQ460-P}}{S_{iniQ460-A}}$	$M_{rQ460-P}$	$M_{rQ460-A}$	$\frac{M_{rQ460-P}}{M_{rQ460-A}}$	$\phi_{rQ460-P}$	$\phi_{rQ460-A}$	$\frac{\phi_{rQ460-P}}{\phi_{rQ460-A}}$
Q460-8	12 932	13 540	0.96	81.0	74.7	1.08	117.3	111.8	1.05
Q460-10	15 961	16 433	0.97	123.3	116.3	1.06	108.1	101.2	1.07
Q460-12	18 583	19 331	0.96	171.9	167.3	1.03	93.8	91.9	1.02
Q460-14	20 812	21 552	0.97	197.6	208.9	0.95	76.7	75.0	1.02
Q460-16	22 308	23 469	0.95	222.1	238.9	0.93	52.0	50.8	1.02

注:  $S_{iniQ460-P}$  和  $S_{iniQ460-A}$  分别为火灾后和常温下(未过火)Q460 端板连接节点的初始转动刚度,  $kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ ;  $M_{rQ460-P}$  和  $M_{rQ460-A}$  分别为火灾后和常温下(未过火)Q460 端板连接节点的抗弯承载力,  $kN \cdot m$ ;  $\phi_{rQ460-P}$  和  $\phi_{rQ460-A}$  分别为火灾后和常温下(未过火)Q460 端板连接节点的转动能力,  $mrad$ .

节点的变形能力,使节点破坏模式由模式 1 向模式 2 (甚至是模式 3)转变,出现端板还未发生充分的塑性变形前螺栓断裂破坏的情况。

## 4.2 Q460 高强度与 Q345 普通钢端板连接节点力学性能对比

### 4.2.1 节点弯矩-转角关系曲线

Q460 高强度端板连接节点和 Q345 普通钢端板连接节点历经 550 °C 火灾高温后的弯矩-转角关系如图 18 所示。图 18 表明,由于节点采用的端板材料的强度、刚度以及延性的不同,因此节点力学性能也不同。节点端板厚度相同时, Q460 系列节点的抗弯强度、初始刚度均大于 Q345 系列节点的相应力学参数。Q460 系列节点的变形能力则弱于 Q345 系列节点的变形能力。

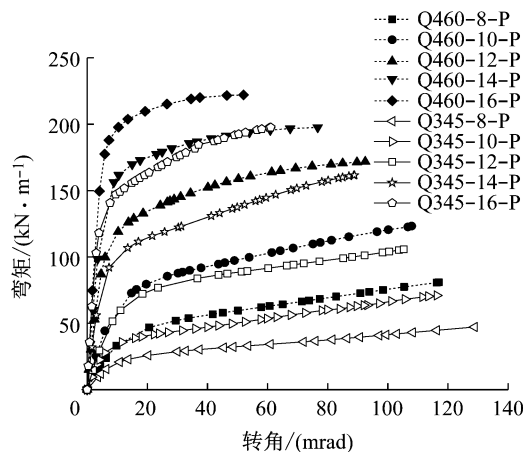


图 18 火灾后 Q460 端板连接节点与 Q345 端板连接节点弯矩-转角关系

Fig. 18 Moment-rotation relationship of Q460 endplate connections and Q345 endplate connections after fire

根据如图 18 所示的节点弯矩-转角关系曲线,按照端板材料和端板厚度的不同将节点分为 4 组,

表 6 火灾后 Q460 端板连接节点与 Q345 端板连接节点主要力学性能对比

Tab.6 Comparison of post-fire mechanical behavior between endplate connections Q460 and Q345

端板厚度/ mm	$S_{iniQ345-P}$	$S_{iniQ460-P}$	$\frac{S_{iniQ345-P}}{S_{iniQ460-P}}$	$M_{rQ345-P}$	$M_{rQ460-P}$	$\frac{M_{rQ345-P}}{M_{rQ460-P}}$	$\phi_{rQ345-P}$	$\phi_{rQ460-P}$	$\frac{\phi_{rQ345-P}}{\phi_{rQ460-P}}$
8	12 633	12 932	0.98	47.2	81.0	0.58	129.0	117.3	1.10
10	15 703	15 961	0.98	70.9	123.3	0.58	116.3	108.1	1.08
12	18 328	18 583	0.99	105.9	171.9	0.62	106.0	93.8	1.13
14	20 554	20 812	0.99	161.6	197.6	0.82	89.0	76.7	1.16
16	22 081	22 308	0.99	197.6	222.1	0.89	61.1	52.0	1.18

注:  $S_{iniQ345-P}$  和  $S_{iniQ460-P}$  分别为火灾后 Q345 端板和 Q460 端板连接节点的初始转动刚度,  $kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ ;  $M_{rQ345-P}$  和  $M_{rQ460-P}$  分别为火灾后 Q345 端板和 Q460 端板连接节点的抗弯承载力,  $kN \cdot m$ ;  $\phi_{rQ345-P}$  和  $\phi_{rQ460-P}$  分别为火灾后 Q345 端板和 Q460 端板连接节点的转动能力, mrad。

分组结果如表 5 所示。每组中包含一个 Q460 端板连接节点和一个 Q345 端板连接节点,结合图 18 中的曲线可以看出,表 5 中每组内的两条曲线在节点初始刚度、节点抗弯承载力、节点转动能力方面均较为相近。由此得出如下结论:在平齐式端板连接节点中,与采用较厚普通钢端板的节点相比,通过合理的节点设计,采用较薄高强度端板的节点可实现相近的承载力以及更高的(至少是相当的)节点转动能力。

表 5 节点分组

Tab.5 Grouping of the connections

组别	节点编号
Group-1	Q460-8-P, Q345-10-P
Group-2	Q460-10-P, Q345-12-P
Group-3	Q460-12-P, Q345-14-P
Group-4	Q460-14-P, Q345-16-P

### 4.2.2 节点主要力学性能的比较

表 6 为火灾后 Q460 端板连接节点与 Q345 端板连接节点主要力学性能的有限元对比结果。由表 6 可知:火灾后,端板材料是否采用高强度对节点初始刚度基本无影响;端板材料对节点转动能力有所影响,在端板厚度相同的情况下,采用普通钢 Q345 端板的节点转动能力优于采用高强度 Q460 端板的节点转动能力,这是由高强度 Q460 的延性较普通钢 Q345 差所引起的;端板材料对节点的抗弯承载力影响明显。值得注意的是,当端板较厚时,端板材料对节点抗弯承载力的影响逐渐减弱。表 6 中,当节点端板厚度为 8 mm 或 10 mm 时,  $M_{rQ345-P}$  仅为  $M_{rQ460-P}$  的 0.58 倍,当节点端板厚度达到 16 mm 时,  $M_{rQ345-P}$  为  $M_{rQ460-P}$  的 0.89 倍。这是因为当端板较厚时,节点的极限承载力由螺栓控制,即随端板厚度增加,失效模式由模式 1 逐渐向模式 2、甚至模式 3 转变。

## 5 结论

(1) 本文有限元模型均能正确模拟历经火灾高

温后高强度节点的变形、弯矩-转角关系和应力分布等。

(2) 无论在常温下还是火灾后,随端板厚度增加,节点的初始转动刚度以及抗弯承载力增大,节点



转动能力减小。

(3) 高强钢平齐式端板连接节点在历经 550 °C 火灾高温并冷却至室温后,主要力学性能未发生明显退化。

(4) 端板材料对平齐式端板连接节点初始刚度基本无影响。

(5) 端板材料对平齐式端板连接节点抗弯承载力影响显著,并且随端板厚度增加而减弱。

(6) 通过合理的节点设计,与采用较厚普通钢端板的节点相比,采用较薄高强钢端板的平齐式节点可实现相近的承载力以及更高的节点转动能力。

## 参考文献:

- [1] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690[J]. *Engineering Structure*, 2012, 35:1.
- [2] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire performance of very high strength steel S960[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80(1):235.
- [3] COELHO A M G, BIJLAARD F S K. Experimental behaviour of high strength endplate connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(9):1228.
- [4] COELHO A M G, BIJLAARD F S K. High strength steel in building and civil engineering structures: design of connections [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(3):413.
- [5] 孙飞飞,孙密,李国强,等. Q690 高强钢端板连接梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4):116.  
SUN Feifei, SUN Mi, LI Guoqiang, *et al.* Experimental study on seismic behavior of high-strength steel beam-to-column endplate connections[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4):116.
- [6] 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.  
YU Hongxia. Discussions on the robustness of steel connections in fire[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(4):116.
- [7] BSI. BS5950 Structural use of steelwork in building, Part 8: code of practice for fire resistant design [S]. London: BSI, 1998.
- [8] 强旭红,石志伟,姜旭,等. 高强钢平齐式端板连接节点火灾后性能试验研究[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2019(1):9.  
QIANG Xuhong, SHI Zhiwei, JIANG Xu, *et al.* Experimental study on high strength steel flush endplate connections after fire[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2019 (1):9.
- [9] SHI Gang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, *et al.* Numerical simulation of steel pretensioned bolted endplate connections of different types and details[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(10):2677.
- [10] 高义奇,施刚,余红霞. 拉剪组合作用下平齐端板节点火灾行为的有限元分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 100.  
GAO Yiqi, SHI Gang, YU Hongxia. FEM analysis of flush endplate connections under the combined effect of tension and shear in fire[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 100.
- [11] European Committee for Standardization(CEN). Eurocode 3, design of steel structures, Part 1-8: design of joints [S]. Brussels: CEN, 2005.
- [12] European Committee for Standardization(CEN). Eurocode 3, design of steel structures, Part 1-12: additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700 [S]. Brussels: CEN, 2005.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 11263—2010 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢 [S]. 北京:中国标准出版社, 2011.  
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 11263—2010 The hot-rolled H and cut T section [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [14] COELHO A M G, BIJLAARD F S K, SILVA L S D. On the deformation capacity of beam-to-column bolted connections [C]//European Convention for Constructional Steelwork-Technical Committee 10: Structural Connections. Coimbra: [s.n.], 2002:1-8.
- [15] COELHO A M G. Characterization of the ductility of bolted endplate beam-to-column steel connections [D]. Coimbra: University of Coimbra, 2004.
- [16] HU Ying, DAVISON J B, BURGESS I W, *et al.* Experimental study on flexible end plate connections in fire [C] //5th European Conference on Steel and Composite Structures. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork, 2008: 1007-1012.
- [17] HU Ying, DAVISON J B, BURGESS I W, *et al.* Comparative study of the behaviour of BS4190 and BS EN ISO 4014 bolts in fire [C] //3rd International Conference on Steel and Composite Structures 2007. Manchester: [s.n.], 2007: 587-592.
- [18] HU Ying. Robustness of flexible endplate connections under fire conditions [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2009.
- [19] THEODOROU Y. Mechanical properties of grade 8.8 bolts at elevated temperatures [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2003.
- [20] LOU Guobiao, YU Shan, WANG Rui, *et al.* Experimental study of mechanical properties of high-strength bolts after fire [C]// Structures in Fire, Proceedings of the 6th International Conference. East Lansing: [s.n.], 2010: 679-686.
- [21] 孙飞飞,谢黎明,崔嵬,等. Q460 高强钢单调与反复加载性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(1): 30.  
SUN Feifei, XIE Liming, CUI Wei, *et al.* Experimental study on material properties of Q460 high strength steel under monotonic and cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(1):30.
- [22] WANG W, LIU T, LIU J. Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114: 100.
- [23] 靳猛,赵金城,刘明路,等. 建筑钢材高温后的力学性能分析 [J]. *工业建筑*, 2010(增刊):1121.  
JIN Meng, ZHAO Jincheng, LIU Minglu, *et al.* Analysis on the mechanical property of structural steel after fire [J]. *Industrial Construction*, 2010(S):1121.
- [24] 戴国欣,王飞,施刚,等. Q345 与 Q460 结构钢材单调和循环加载性能比较[J]. *工业建筑*, 2012, 42(1): 13.  
DAI Guoxin, WANG Fei, SHI Gang, *et al.* Comparison of monotonic and cyclic performances of structural steel Q345 and Q460[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(1):13.