

# 钢蜂窝梁-混凝土楼板组合梁抗火性能研究

贾连光<sup>1</sup>,王宇涵<sup>1</sup>,王留生<sup>2</sup>,张旭<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 中国石油集团东北炼化工程有限公司辽阳分公司,辽宁 辽阳 111000)

**摘要** 目的 研究钢蜂窝梁-混凝土板组合梁的抗火性能,分析不同参数对蜂窝组合梁临界温度的影响,为蜂窝式钢结构的抗火设计提供参考. 方法 分别对3根腹板为实腹、圆形开孔、正六边形开孔的蜂窝组合梁进行抗火试验;对比分析组合梁在火灾条件下的时间-位移曲线及临界温度;建立有限元计算模型,对火灾下的蜂窝组合梁进行数值模拟研究,对比不同开孔率、孔间距、腹板高厚比以及是否设置加劲肋等因素对蜂窝组合梁抗火性能的影响. 结果 加劲肋是影响蜂窝梁临界温度的重要参数;开孔率和孔间距对蜂窝梁的临界温度有一定影响;当腹板高厚比过大时,蜂窝梁很容易发生火灾下的腹板屈曲破坏,腹板高厚比越小,蜂窝梁临界温度越高. 结论 与开孔率和孔间距相比,加劲肋和腹板高厚比对蜂窝组合梁的临界温度影响更大,通过设置加劲肋及调整腹板高厚比,蜂窝组合梁的抗火性能可以得到有效改善.

**关键词** 蜂窝组合梁;抗火性能;有限元分析;影响因素;临界温度

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Study on Fire Resistance of Steel Castellated Beam-Concrete Slab Composite Beams

JIA Lianguang<sup>1</sup>, WANG Yuhan<sup>1</sup>, WANG Liusheng<sup>2</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China National Petroleum Northeast Petrochemical Engineering Co., Ltd. Liaoyang Branch, Liaoyang, China, 111000)

**Abstract:** In order to study the fire performance of steel castellated beam concrete slab composite beams (castellated composite beams), 3 fire resistant tests were carried out for the castellated composite beams with solid web, round openings and hexagon openings. The time-displacement curve and critical temperature of the combined beam under fire condition are compared and analyzed. Combined with the finite element calculation model, the numerical simulation study on the castellated composite beams under fire, contrast different opening rate, hole spacing, the high thickness ratio of web and whether setting stiffening rib on the castellated composite fire resistance. The results show that the stiffening rib is important factor that influence the fire resistance of castellated

收稿日期:2017-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51578346);辽宁省自然科学基金项目(2015020597)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,主要从事钢结构设计与计算理论方面研究.

composite beams. The critical temperature of the castellated beam is not obviously affected by the opening rate and the hole spacing. When the high thickness ratio of web is too big, it is very easy for the castellated girder to be damaged by the abdominal buckling of the fire. The smaller the high thickness ratio of web is, the higher the critical temperature of the castellated beam is.

**Key words:** castellated composite beam; fire resistance; finite element analysis; influence factor; critical temperature

蜂窝组合梁充分发挥混凝土楼板和蜂窝钢梁的优势,具有良好的整体性能<sup>[1]</sup>,蜂窝梁的孔洞便于穿越管线,有效降低了层高,同时节省钢材,具有较好的经济效益和社会效益<sup>[2]</sup>,而混凝土楼板能够起到改善钢梁的抗火性能的作用<sup>[3]</sup>.蜂窝组合梁因其优异的受力性能和外形特征,被广泛应用于办公楼、工业厂房和停车场<sup>[4]</sup>.

国内外对于普通钢结构在火灾下的力学性能已进行了大量研究<sup>[5-9]</sup>,并且规范中有相应的抗火设计方法<sup>[10]</sup>,但对于蜂窝式钢结构的抗火性能研究还不多见.陈玲珠<sup>[11]</sup>通过将各国规范临界温度的计算结果与现有试验结果进行对比发现,组合梁抗火设计时,应考虑常温下抗剪连接程度的影响;李鹤<sup>[12]</sup>对火灾下圆角多边形孔蜂窝梁腹板屈曲性能进行研究,指出火灾下的蜂窝梁由于中心腹板升温速率快更容易发生孔间腹板屈曲破坏;马宁<sup>[13]</sup>对高温下受约束蜂窝钢梁的悬链线效应进行分析,并给出适用于火灾下蜂窝梁的大变形简化计算方法;G. BIHINA等<sup>[14]</sup>对圆孔蜂窝组合梁进行火灾试验,分析了混凝土楼板、梁翼缘和腹板的温度分布规律.基于

此,笔者以实腹式组合梁、圆孔蜂窝组合梁和正六边形蜂窝组合梁为研究对象进行抗火性能试验,并建立升温条件下蜂窝组合梁有限元分析模型,将试验结果与有限元结果进行对比,发现两者的位移曲线和温度曲线均吻合良好,并在该模型的基础上,分析不同开孔率、孔间距、腹板高厚比以及是否设置加劲肋等因素对蜂窝组合梁抗火性能的影响,为蜂窝式钢结构的抗火设计提供参考.

## 1 蜂窝梁火灾试验

### 1.1 试件设计

试验设计了3根H形截面组合梁,按腹板孔型的不同将试件分别编号为L1, L2, L3,蜂窝钢梁截面参数见表1,混凝土楼板参数见表2.以圆孔蜂窝梁为例试件示意图见图1.钢梁和混凝土楼板以圆柱头栓钉作为剪力连接件,栓钉的设计参照《组合结构设计规范》(JGJ138—2016).蜂窝组合梁的两端板长宽高为280 mm × 300 mm × 40 mm,采用焊接的方式连接,为保证蜂窝梁两端简支的边界条件,端板底边设计为直径80 mm的曲边,如图2所示.

表1 蜂窝钢梁截面参数

Table 1 Parameters of castellated steel girder section

试件编号	孔洞形状	孔洞数/个	开孔率/%	腹板扩高后尺寸/mm	翼缘宽×厚/mm	梁长/mm
L1	实腹	0	0	188×4	100×6	1 660
L2	圆孔	6	70	188×4	100×6	1 660
L3	正六边形	6	70	188×4	100×6	1 660

表2 混凝土楼板参数

Table 2 Concrete floor parameters

混凝土强度	楼板截面长×宽×厚/mm	横向钢筋	纵向钢筋
C30	1 660×700×60	Φ10@200	Φ10@200

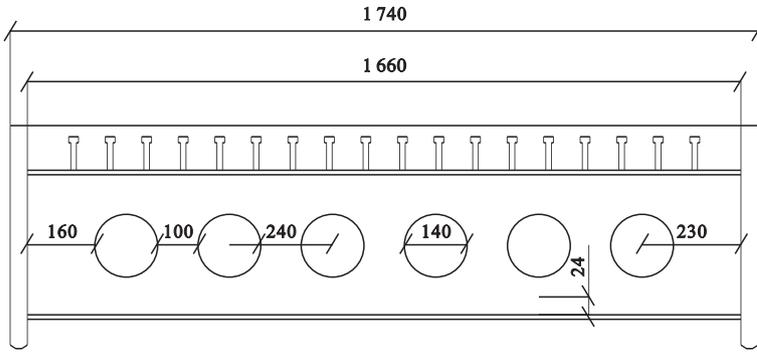


图1 圆孔蜂窝梁试件示意图

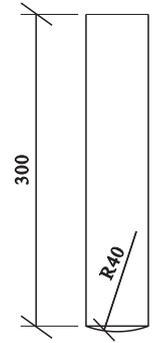


图2 端板侧面示意图

Fig.1 Schematic diagram of a circular hole castellated beam specimen

Fig.2 Side diagram of end plate

### 1.2 试验装置及试验方案

以圆孔蜂窝组合梁火灾试验为例,其他试件与此类似. 试验在长为2.7 m, 宽为1.4 m, 深为2.25 m 的火灾试验炉内进行, 蜂窝梁试件放置在高度为1.7 m 的钢管混凝土柱支撑上, 支撑与混凝土底板用螺栓连接. 为保证各装置在试验过程中正常有效工作, 在试验炉内部及四周包裹硅酸铝耐火毡垫.

试验采用先施加均布荷载后升温的方法, 在混凝土楼板上部铺设8层单块质量为20 kg 的质量块, 荷载大小总计为22.4 kN, 沿组合梁楼板中心线两侧均匀布置, 加载装置见图3.



图3 试验加载装置

Fig.3 Test loading device

加载过程中观测试件位移变化, 保证试件变形一直处于弹性阶段, 加载及升温过程中的位移通过电子位移计多点测量, 试验按照ISO-834 标准升温曲线升温, 炉内温度与标准升温曲线对比见图4.

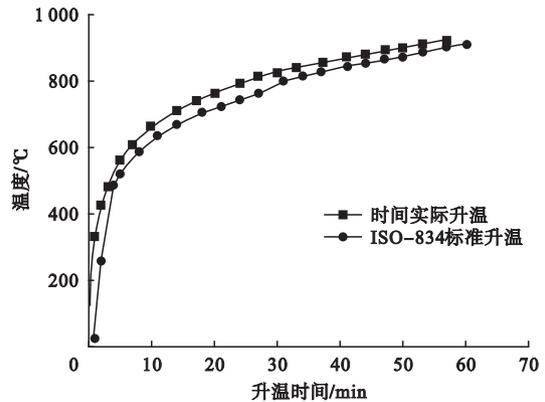


图4 炉内温度与标准升温曲线对比

Fig.4 Comparison of temperature and standard temperature curve in furnace

由图4可知, 炉内温度和标准升温曲线吻合良好. VI 位移计试件三面受火. 采用K型铠装热电偶测量试件以及炉内温度, 位移测点及温度测点布置见图5和图6.

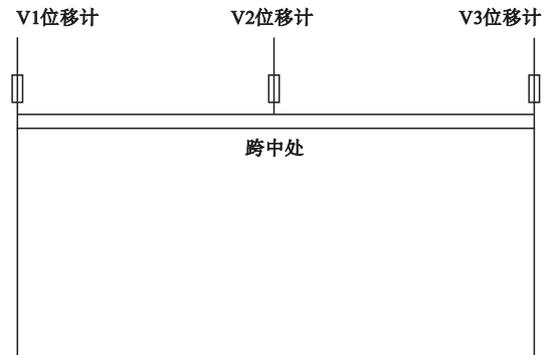


图5 位移测点布置

Fig.5 Displacement measuring point layout

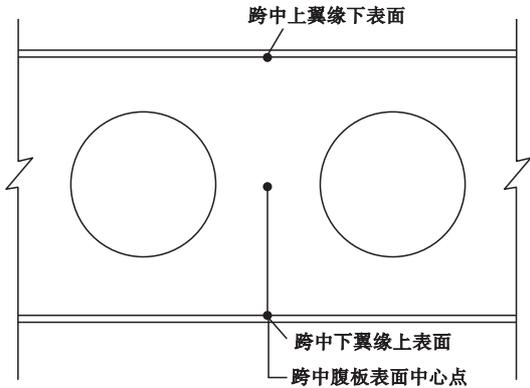


图6 温度测点布置图

Fig. 6 Temperature measurement point

### 1.3 试验现象及结果分析

3个试件在升温到500℃前,试件变形并不明显,跨中位移的增幅较小;升温在500~750℃时,跨中位移逐渐增加,试件变形明显增大;750℃以后,随着温度的升高,跨中位移曲线开始变陡,位移迅速发展;与试件L1相比,试件L2和试件L3的升温速率较慢。

比较3个试件的破坏形态可知,在火灾作用下的混凝土楼板倾覆程度十分严重,组合梁的下翼缘均产生侧向扭转,试件L1的下翼缘侧移现象更加明显。试件L2和L3发生孔间腹板屈曲现象,试件L3的腹板屈曲更严重,且在六边形孔角处发生撕裂,撕裂方向沿着孔角的45°方向。

由试验现象及数据分析可知,蜂窝梁在升温条件下更容易发生孔间腹板屈曲现象,与实腹式组合梁相比,耐火时间较短。六边形蜂窝组合梁由于孔角处应力集中,抗火性能不如圆孔蜂窝组合梁。

## 2 有限元建模

### 2.1 本构关系

采用ABAQUS建立蜂窝组合梁有限元模型,模型尺寸、边界条件和荷载大小均与前述试验一致。钢材型号为Q345B,混凝土强度等级为C30,钢材和混凝土的力学性能参照欧洲规范EC3<sup>[15]</sup>。升温条件下钢材泊松比不变,取 $\theta_s = 0.3$ ,钢材的屈服强度和弹性模

量折减系数见表3,其中, $f_{yT}$ 、 $f_y$ 分别表示高温和常温时屈服强度; $E_T$ 、 $E$ 分别表示高温和常温时弹性模量。

表3 高温下钢材屈服模量和弹性模量折减系数

Table 3 The elastic modulus reduction factor of steel at high temperature

钢的温度/℃	屈服强度	弹性模量
	折减系数	折减系数
	$f_{yT}/f_y$	$E_T/E$
20	1.000	1.000
100	1.000	1.000
200	1.000	0.900
300	1.000	0.800
400	1.000	0.700
500	0.780	0.600
600	0.470	0.310
700	0.230	0.130
800	0.110	0.090
900	0.060	0.067 5

钢材和混凝土的热物理特性随温度发生变化,根据欧洲规范EC3<sup>[15]</sup>计算不同温度下钢材及混凝土的比热容 $C_s$ ,导热系数 $\lambda_s$ ,见表4。

表4 不同温度下钢材及混凝土的比热容和导热系数

Table 4 Specific heat capacity and thermal conductivity of steel and concrete

温度/℃	比热容/(J·(kg·℃) <sup>-1</sup> )		导热系数/(W·(m·℃) <sup>-1</sup> )	
	钢材	混凝土	钢材	混凝土
20	431	913	53.3	1.36
100	471	963	50.7	1.35
200	522	1 022	47.3	1.34
300	573	1 075	41.4	1.32
400	624	1 122	39.2	1.22
500	675	1 164	37.0	1.10
600	760	1 200	34.8	0.97
700	1 008	1 231	32.6	0.85
800	799	1 256	30.4	0.72
900	650	1 275	28.2	0.60

## 2.2 有限元模型的建立及验证

应用有限元分析软件对受恒载作用的蜂窝梁模型进行标准升温条件下的抗火性能分析,即先对模型进行热分析,然后利用热分析结果进行力学分析。

### 2.2.1 热分析模型的建立

混凝土楼板和钢梁的单元类型为C3D8R,圆柱头栓钉直径为13 mm,纵向间距为85 mm,横向间距为55 mm。栓钉与楼板采用嵌入的命令,可保证混凝土楼板与蜂窝钢梁共同工作,梁翼缘上表面与混凝土楼板接触面属性中定义摩擦系数为0.3,模型从表面选择钢,钢梁和混凝土楼板间假设有小滑移。热分析中,绝对零度为 $-273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,Stefan-Boltzman 常数为 $5.67 \times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,初始温度设定为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热对流系数设定为25,混凝土表面的热辐射系数为0.5,钢材表面的热辐射系数为0.95。由于混凝土楼板和蜂窝钢梁存在温度梯度,定义交界面热阻系数为 $0.01(\text{m}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})/\text{W}$ 。

### 2.2.2 热-力耦合模型的建立

在热分析模型的基础上,对蜂窝组合梁端施加简支约束。在分析过程中未考虑温度应力,平面外侧移与实际相比差别较大,因此对组合梁设置平面外位移限制。

### 2.2.3 模型有效性验证

将模拟得到的结果与试验进行对比,由温度场分析得到的时间-温度曲线与试验测得的结果对比如图7所示。

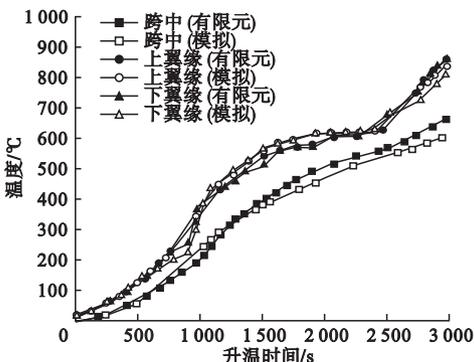


图7 有限元与试验的时间-温度曲线对比

Fig. 7 Comparison of time temperature curves between finite element and test

由热-力耦合分析得到的跨中竖向位移与试验结果对比如图8所示。由图可知,有限元结果与试验曲线对比良好,证明了本抗火分析模型的有效性。

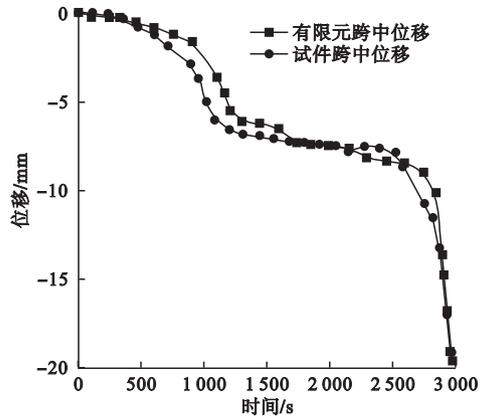


图8 有限元与试验的时间-位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of time displacement curves

## 3 参数分析

标准升温条件下,分析开孔率、孔间距、加劲肋、腹板厚度对蜂窝组合梁抗火性能的影响。取构件竖向位移达到梁跨度的 $1/20$ 作为火灾下的极限临界状态,即竖向位移 $\delta = 300\text{ mm}$ 时,蜂窝组合梁达到耐火极限状态<sup>[16]</sup>。

### 3.1 开孔率

蜂窝梁开孔率指蜂窝梁的开孔直径与梁横截面高度的比值。孔间距为0.465 m时不同开孔率下圆孔蜂窝组合梁的位移-时间曲线见图9。

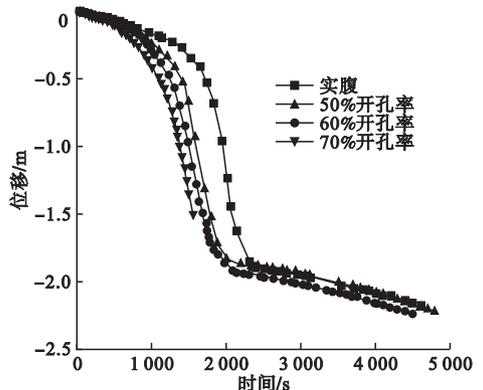


图9 不同开孔率构件时间-位移曲线

Fig. 9 Time-displacement curve with different opening rate

由图可知,在达到耐火极限( $\delta = 300 \text{ mm}$ )前,除实腹梁以外,不同开孔率下蜂窝梁的位移发展趋势差别不大,开孔率对蜂窝组合梁的耐火时间影响不明显.通过有限元分析得到组合梁的临界温度,实腹式以及开孔率为50%,60%,70%的组合梁临界温度分别为 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ , $685 \text{ }^\circ\text{C}$ , $676 \text{ }^\circ\text{C}$ , $663 \text{ }^\circ\text{C}$ ,实腹式组合梁与蜂窝组合梁的临界温度差别较大,这是因为蜂窝梁在腹板开设孔洞,降低了孔洞截面的抗弯刚度,同时增加了火灾环境下的热量交换,使得腹板的升温速率加快,因此与实腹式相比,蜂窝梁组合梁在火灾下的承载能力较差,临界温度较低.可见,腹板开孔对组合梁的临界温度影响较大,但改变开孔率对蜂窝梁的临界温度影响并不大.

### 3.2 孔间距

蜂窝梁的剪力主要由腹板承担,孔间距越小,相邻孔洞间腹板宽度越窄,蜂窝梁越容易发生孔间腹板屈曲<sup>[17-18]</sup>,因此会影响蜂窝组合梁在火灾下的耐火极限.开孔率为60%时不同孔间距下圆孔蜂窝组合梁的时间-位移曲线如图10所示.

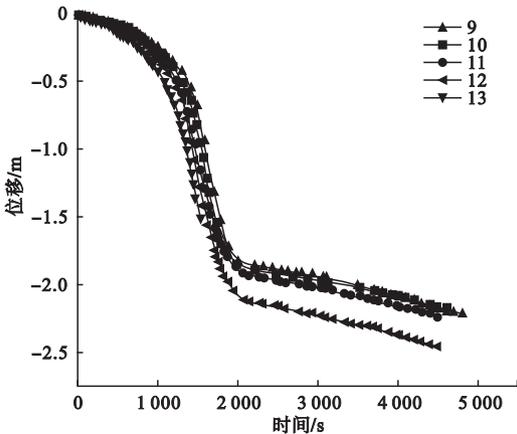


图10 不同孔间距构件时间-位移曲线

Fig. 10 Time-displacement curve of different opening numbers

孔间距分别为 $0.635 \text{ m}$ , $0.565 \text{ m}$ , $0.509 \text{ m}$ , $0.463 \text{ m}$ , $0.423 \text{ m}$ (开孔个数为9,10,11,12,13)的组合梁耐火时间相差不大,对照有限元分析结果可知临界温度分别为 $689 \text{ }^\circ\text{C}$ , $685 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$680 \text{ }^\circ\text{C}$ , $676 \text{ }^\circ\text{C}$ , $653 \text{ }^\circ\text{C}$ ,孔间距越大,蜂窝梁临界温度越低,但不同孔间距的组合梁临界温度差别不大,这是因为孔间距及开孔率都是造成腹板受剪削弱的重要参数,仅考虑孔间距一个因素并不能对蜂窝梁的临界温度造成明显的影响,且在火灾条件下,钢材和混凝土力学性能下降对蜂窝梁抗火承载力影响显著,削弱了孔间距对抗火性能的影响.

### 3.3 腹板厚高比

对腹板高厚比分别为31,38,47,63的圆孔蜂窝组合梁进行抗火性能分析,得到时间-位移曲线如图11所示.

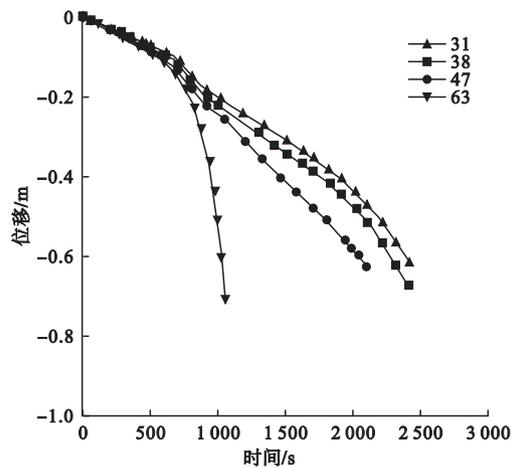


图11 不同腹板高厚比的时间-位移曲线

Fig. 11 Comparison of different web thickness

升温时间在 $740 \text{ s}$ 时,腹板高厚比为63的蜂窝梁跨中位移迅速增加且持续发展,此时其余构件的位移变化相对平缓.由有限元分析可知,腹板高厚比分别为63,47,38,31的蜂窝梁临界温度分别为 $597 \text{ }^\circ\text{C}$ , $676 \text{ }^\circ\text{C}$ , $691 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $706 \text{ }^\circ\text{C}$ .孔间腹板越厚,蜂窝梁临界温度越高,除高厚比为63的蜂窝梁以外,其余各梁的临界温度相差不大,而高厚比为31和63的构件,两者临界温度相差 $109 \text{ }^\circ\text{C}$ .这是由于在蜂窝梁升温过程中,竖向截面温度分布不均匀,腹板开孔造成削弱且升温速率较快,导致腹板处钢材力学性能下降较快,当腹板过薄时,蜂窝梁非常容易发生孔间腹板屈曲破坏,导致腹板下部及下翼缘发生共同

扭转,构件失去承载能力,而当蜂窝梁腹板高厚比很小时,此时孔间腹板承载能力较高,且腹板对组合梁抗弯刚度贡献较小,因此对临界温度影响并不明显。

### 3.4 加劲肋

对开孔率为60%,孔间距为0.465 m的圆孔蜂窝组合梁设置加劲肋,加劲肋厚度为8 mm,宽度为60 mm,间距1.4 m设置在孔间腹板处,如图12所示。加劲构件与未加劲构件的跨中位移曲线见图13。

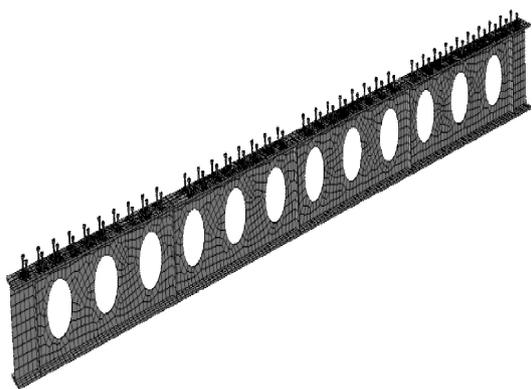


图12 带加劲肋构件

Fig. 12 Web with stiffening rib

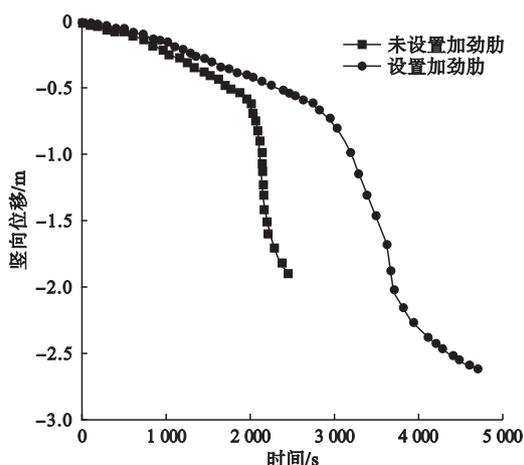


图13 有无加劲肋构件时间-位移曲线对比

Fig. 13 Comparison of stiffener

由图13可知,升温时间在770 s前,二者的跨中位移发展趋势几乎一致,是否设置加劲肋对构件的变形没有影响;升温时间在770 s到2 000 s之间时,未加劲构件的跨中位移逐渐增大,与加劲构件相比位移发展速

度越来越快;2 000 s后,温度稍有增加时,未加劲构件的位移就迅速发展,蜂窝组合梁失去承载能力,此时加劲构件还可以继续承载。由有限元分析结果可知,设置加劲肋前后蜂窝组合梁的临界温度分别为677 ℃与710 ℃,加劲构件在加劲肋旁第一孔桥及翼缘处发生受拉破坏,孔洞上方混凝土楼板被压坏,加劲肋的设置有效改善了孔间腹板的屈曲性能,对构件的位移发展具有一定的限制作用,显著提高了蜂窝组合梁的耐火极限。

## 4 结论

(1)升温过程中,组合梁的抗弯刚度大幅度下降,竖向位移迅速发展,引起腹板及下翼缘侧移,蜂窝组合梁的最终破坏情况是梁产生较大挠度,腹板屈曲及下翼缘扭转。

(2)开孔率及孔间距对临界温度有一定影响。孔间距越大,临界温度越高;开孔率越小,临界温度越高。

(3)孔间腹板高厚比大,容易发生屈曲破坏。腹板加劲肋对临界温度有一定影响,能够延缓腹板屈曲及下翼缘扭转,提高蜂窝组合梁抗火性能。

## 参考文献

- [1] 贾连光,杜明坎,回锋,等.六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能研究[J].工程力学,2016,33(1):81-87  
(JIA Lianguang, DU Mingkan, HUI Feng, et al. Analysis of shear behavior of hexagon hole cellular beam and cellular composition beam [J]. Journal of engineering mechanics, 2016, 33(1): 81-87.)
- [2] 贾连光,杨建华,刘永方.矩形孔口蜂窝组合梁抗剪性能研究[J].建筑钢结构进展,2015,17(5):24-31.  
(JIA Lianguang, YANG Jianhua, LIU Yongfang. A study on shear property of cellular composite beams with rectangular openings [J]. Progress in building steel structures, 2015, 17(5): 24-31.)
- [3] 李国强,王卫永,周宏宇.简支组合梁抗火设计简化方法[J].建筑结构,2010,24(6):35-37.  
(LI Guoqiang, WANG Weiyong, ZHOU Hongyu. Simplified approach for fire-re-

- sisitence design of simple-supported composite beams[J]. *Building structure*, 2010, 24(6): 35-37.)
- [4] 张艳霞,赵微,李云鹏,等.圆孔型蜂窝梁及其组合梁受力性能研究[J].*工业建筑*,2015,45(2):136-142.  
(ZHANG Yanxia, ZHAO Wei, LI Yunpeng, et al. Research on mechanical behavior of the circular hole cellular beams and steel-concrete composite cellular beam [J]. *Industrial construction*, 2015, 45(2): 136-142.)
- [5] 郭士雄,李国强.火灾下约束钢梁的受力性能及抗火设计方法[J].*建筑结构*,2005(12): 59-61.  
(GUO Shixiong, LI Guoqiang. Behavior of restrained steel beams subjected to fire and practical fire-resistant design method [J]. *Building structures*, 2005(12): 59-61.)
- [6] 蒋翔,童根树,张磊.耐火钢-混凝土筒支组合梁抗火性能[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 68-74.  
(JIANG Xiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Fire-resistant performance of simply supported fire-resistant steel-concrete composite beams [J]. *Journal of Harbin institute of technology*, 2017, 49(12): 68-74.)
- [7] 李国强,丁军,张韧.耐火钢梁抗火计算与设计的实用方法[J].*工业建筑*,2005,35(7): 80-82.  
(LI Guoqiang, DING Jun, ZHANG Ren. A practical approach for fire-resistant calculation and design of fire-resistant steel beams[J]. *Industry and architecture*, 2005, 35(7): 80-82.)
- [8] DWAIKAT M, KODUR V. Effect of location of restraint on fire response of steel beams[J]. *Fire technology*, 2010, 46(1): 109-128.
- [9] GARCIA H, BIEZMA M V, CUADRADO J, et al. Study of historical developments in the use of fire resistant steels[J]. *Materials at high temperatures*, 2013, 30(4): 313-319.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑钢结构防火技术规范:GB51249—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for fire safety of steel structure in buildings: GB51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)
- [11] 陈玲珠,李国强,蒋守超,等.组合梁抗火设计方法的改进[J].*建筑结构*,2015(11):70-74.  
(CHEN Lingzhu, LI Guoqiang, JIANG Shouchao, et al. Improvements of fire design specifications for composite beams[J]. *Building structure*, 2015(11): 70-74.)
- [12] 李鹤,王旭东,张露露,等.火灾下蜂窝钢梁腹板屈曲性能研究[J].*建筑钢结构进展*,2016, 18(6):42-51.  
(LI He, WANG Xudong, ZHANG Lulu, et al. Investigation on web-post buckling behavior of cellular steel beams in a fire [J]. *Progress in building steel structure*, 2016, 18(6): 42-51.)
- [13] 马宁.高温下受约束蜂窝钢梁的悬链线效应分析[D].济南:山东大学,2015.  
(MA Ning. Catenary action of the restrained castellated steel beams in a fire [D]. Jinan: Shandong University, 2015.)
- [14] BIHINA G, ZHAO B, BOUCHA R A. Behaviour of composite steel-concrete cellular beams in fire [J]. *Engineering structures*, 2013, 56(6): 2217-2228.
- [15] European Committee for Standardization. Eurocode3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules-structural fire design: EN1993-1-2. [S]. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- [16] 王旭东.火灾下圆角多边形孔蜂窝梁孔间腹板屈曲性能研究[D].济南:山东大学,2015.  
(WANG Xudong. Investigation on web-post buckling behavior of castellated steel beam with the fillet corner hexagonal web openings in fire [D]. Jinan: Shandong University, 2015.)
- [17] 陈星.约束圆孔蜂窝梁的抗火性能分析及简化计算方法[D].西安:西安建筑科技大学, 2016.  
(CHEN Xing. Fire resistance analysis and simplified computing method of restrained cellular beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [18] 王培军,王旭东,张露露.常温及火灾下蜂窝梁腹板屈曲承载力计算方法[J].*工程力学*, 2017, 34(2): 171-178.  
(WANG Peijun, WANG Xudong, ZHANG Lulu. Design method for web-post shear buckling strength of castellated beams at room temperature & in fire [J]. *Engineering mechanics*, 2017, 34(2): 171-178.)