第 32 卷第 5 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 32, No. 5
2011 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2011

文章编号:1008-1542(2011)05-0500-07

考虑约束组合梁与组合节点相互作用的结构火灾反应分析

李侥婷[1],李国强[1,2],楼国彪[1,2]

(1.同济大学土木工程学院,上海　200092;2.同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘　要:提出了考虑组合节点与约束组合梁相互作用的实用抗火计算方法。此方法考虑了由结构整体性产生的悬链线效应对组合梁临界温度的影响,考虑了非线性变化的端部约束对组合梁高温行为的约束和影响。最后利用试验结果对这种考虑约束组合梁与组合节点相互作用的结构火灾反应分析方法进行了验证。此方法为多层、高层建筑钢结构抗火反应分析及结构抗火设计提供了实用手段。

关键词:组合节点;抗火性能;非线性约束;约束组合梁;设计方法

中图分类号:TU398.9　　**文献标志码**:A

Analysis of interaction of flush endplate composite joint and restrained composite beam in fire

LI Jiao-ting[1], LI Guo-qiang[1,2], LOU Guo-biao[1,2]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents theoretically how the interaction of joints and beam is developed in fire conditions. A simple practical method is proposed to couple the non-linear changed characters of composite connection in the analysis of catenary action of beams at elevated temperatures. The proposed method is verified by experimental investigations. The study offers a feasibility of fire-resisting design and evaluation for the composite beam with semi-rigid connections in the complete temperature range.

Key words: flush endplate composite joint; fire-resistant capability; non-linear restraint; restrained composite beam; design method

传统的结构抗火设计方法是基于构件的抗火设计方法,即不考虑结构整体性的影响。已有试验和理论研究[1]表明处于结构整体中的构件承载力以及抗火能力与试验中单个构件的情况具有很大区别,这个区别主要由 2 方面因素导致。一方面,整体结构为一个多次超静定体系,当火灾在结构的局部发生时,结构局部构件发生承载方式改变或失去承载力时,整体结构的部分荷载会通过其他的传力路径传递到基础,从而防止结构的整体或局部倒塌。另一方面,未受火灾部分将为受火部分提供约束,使处于火灾中的建筑结构的水平构件(梁或楼板)能够通过悬链线效应或薄膜效应而继续承载,保证结构的整体性。悬链线效应是指处于结

收稿日期:2011-05-18;修回日期:2011-09-02;责任编辑:冯　民

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50738005,50728805);科技部国家重点实验室基础研究资助项目(SLDRCE08-A-06)

作者简介:李侥婷(1983-),女,江西吉安人,博士研究生,主要从事钢结构抗火方面的研究。

通讯作者:李国强教授。E-mail:gqli@mail.tongji.edu.cn

构整体中的水平构件在失去抗弯能力后，通过轴力和很大挠度形成的力矩来抵抗弯矩的现象。研究火灾下钢梁的悬链线效应，一方面可以在抗火设计中利用这一有利特性，减小或取消钢梁的防火保护，降低钢结构建筑成本；另一方面，钢梁的悬链线效应在实际发生过程中，会对周围结构产生较大的水平力，对于抗侧力较弱的结构，有可能由于钢梁的拉力使周围结构提前破坏[1]。

研究人员对火灾下梁的悬链线效应进行了试验和数值研究[2-6]。研究的主要内容包括进行约束梁的高温试验来考虑周围不同约束对梁火灾下承载能力、挠度、轴力以及悬链线效应的影响，通过数值分析给出梁弹性和塑性状态下的挠度曲线，并提出了进行约束钢梁抗火性能分析的理论计算方法。中国同济大学王银志[7]、郭士雄[8]对约束钢梁和组合梁升温段和降温段的受力行为进行了较为系统的理论和试验研究，给出了钢(组合)梁的温度场分布计算方法，解释了下翼缘屈曲现象，考虑了梁轴力和弯矩的相关性，同时也研究了决定约束梁抗火性能的重要因素以及约束梁高温下的承载特点及破坏模式。

以上高温下梁悬链线效应研究都以端部节点约束为线性这一特性为前提。然而，实际结构受火后，端部约束表现为随温度变化的非线性特点。结构升温膨胀梁产生轴力，轴力的变化影响梁端部节点高温下的极限弯矩、转动刚度，节点高温承载力非线性变化反过来又影响梁的耐火极限，这一相互过程较为复杂。因此，笔者给出了这一复杂过程的实用计算方法，用于火灾下考虑约束组合梁和组合节点相互影响的结构反应分析。

1　分析方法

图 1 所示为具有轴向约束和转动约束的试验组合梁[9-10]火灾试验模型。试件中组合梁与钢柱连接形式为平端板连接组合节点，梁另外两端与约束框架柱脚通过铰接连接。约束框架柱截面为 H500 mm×400 mm×12 mm×20 mm，约束框架梁采用双普通槽钢做成格构式梁，槽钢型号为[28a，约束框架柱脚处对组合梁的轴向约束刚度为 83.4 kN/mm。试件柱能够从格构式梁中两槽钢空隙中间穿过，从而保证千斤顶给钢柱提供的向上集中力，使试件组合节点产生负弯矩。试件中平端板连接组合节点两端组合梁可视为一端有轴向约束、另一端有转动约束的悬臂梁。而整个试验跨度内的组合梁可视为两端简支、受跨中集中荷载的约束组合梁。

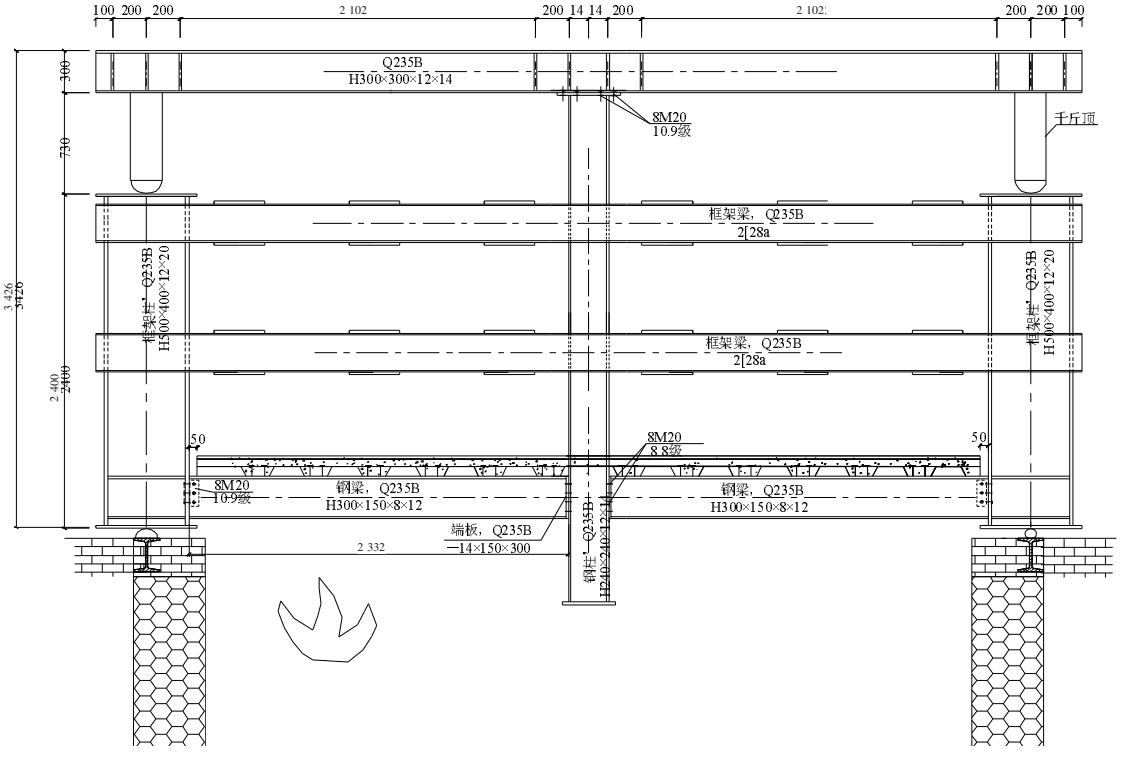


图 1　试验模型和加载方式

Fig. 1　Specimen and test set-up

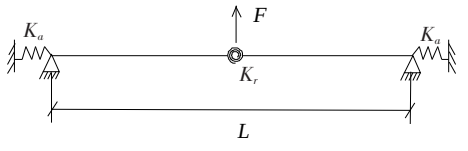
图2为试验组合梁的受力简化示意图。试验组合梁两端简支并受恒定的轴向约束 K_a，梁跨中的组合节点的弯矩 M_e 和转动刚度 K_r 将随温度、梁轴力 F_T 的影响而变化。在大变形条件下组合梁的轴力对组合梁承载能力产生影响，根据弯矩平衡可得出图中半跨组合梁的平衡方程：

$$F_T \cdot \delta_v + M_e = VL/2。 \tag{1}$$

式中：V 是节点剪力；δ_v 为跨中总挠度。δ_v 计算式如下：

$$\delta_v = \delta_m + \delta_T。 \tag{2}$$

式中：δ_m 是力学荷载作用下跨中挠度；δ_T 是温度梯度引起的组合梁变形下跨中挠度。



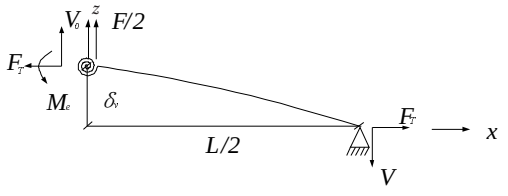


图2 试验约束组合梁受力简化示意图

Fig. 2 Beam loading and equilibrium diagrams for test

1.1 跨中挠度 δ_v

根据文献[2]与文献[3]，组合梁总挠曲线方程可表示为 $z(x)=z_m(x)+z_T(x)$，$z_m(x)$ 是力学荷载作用下的挠曲线方程，$z_T(x)$ 是温度梯度引起的组合梁挠曲线。对于跨中受集中荷载的简支梁，$z_m(x)$ 表达如下：

$$z_m(x)=\begin{cases}\dfrac{2\delta_m}{L}x, & 0\leqslant x\leqslant L/2\\ \dfrac{2\delta_m}{L}(L-x), & L/2<x\leqslant L\end{cases}。 \tag{3}$$

组合梁温度梯度沿梁截面高度方向非线性分布，材料膨胀系数也不一致，为简化计算，只考虑混凝土翼板中面与钢梁截面中面温差引起的挠度，从而温度梯度引起的梁变形 $z_T(x)$ 为

$$z_T(x)=\alpha_d\frac{\alpha_{sT}T_b-\alpha_{cT}T_t}{h_c+h_s}(x^2-Lx)。 \tag{4}$$

式中：系数项 α_d 是相对于简支梁挠度的降低系数，完全简支梁 $\alpha_d=1.0$，完全刚接梁 $\alpha_d=0$，说明完全刚接梁沿梁长均匀分布的温度梯度不会引起梁的变形；α_{sT} 和 α_{cT} 分别代表高温下钢材和混凝土的热膨胀系数；h_s 和 h_c 分别为钢梁的高度和混凝土板的厚度；T_b，T_t 分别表示组合梁中钢梁截面中面、混凝土翼板中面处的温度。则跨中总挠度 δ_v 表示为

$$\delta_v=\delta_m+\delta_T=\delta_m-\alpha_d\frac{\alpha_{sT}T_b-\alpha_{cT}T_t}{h_c+h_s}(L^2/4)。 \tag{5}$$

1.2 轴力 F_T

梁轴力由于梁发生挠曲变形和热膨胀引起梁端水平相对位移发生变化，同时外部轴向约束 K_a 对此位移产生轴向约束力而产生。挠曲变形产生的端部水平相对位移 δ_{hm} 可由总挠曲方程 $z(x)$ 对曲线积分获得，δ_{hT} 由经典热力学公式 $\Delta l=\square TL$ 计算。因此，梁端总相对位移 δ_h[7] 具体公式如下：

$$\delta_h=\delta_{hm}-\delta_{hT}=-\left(\int_0^L\left[1+\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}\right)^2\right]^{1/2}\mathrm{d}x-L\right)-\alpha\Delta TL=$$

$$\frac{2\delta_m^2}{L}+\left(1-\frac{\sin\dfrac{Lk_T}{2}}{\dfrac{Lk_T}{2}}\right)L-\frac{E_{sT}A_s\alpha_{sT}T_s+E_{cT}A_c\alpha_{cT}T_c}{E_{sT}A_s+E_{cT}A_c}L, \tag{6}$$

其中 k_T 定义为温度梯度引起的组合梁曲率，

$$k_T=\alpha_d\frac{\alpha_{sT}T_b-\alpha_{cT}T_t}{h_c+h_s}。 \tag{7}$$

定义梁受拉时 δ_h 值为正，梁受压时 δ_h 值为负。则组合梁轴力 F_T 为

$$F_T=K\delta_h。 \tag{8}$$

K 是约束组合梁的综合轴向刚度，同时考虑自身轴向刚度 K_{bT} 和轴向约束刚度 K_a，则

$$\frac{1}{K}=\frac{2}{K_a}+\frac{1}{K_{bT}}。 \tag{9}$$

梁自身轴向刚度 K_{bT} 为

梁受压时，

$$K_{bT}=\frac{E_{sT}A_s+E_{cT}A_c}{L}, \tag{10}$$

梁受拉时，
$$K_{bT}=\frac{E_{sT}A_s+E_{reT}A_{re}}{L}。\tag{11}$$

式中：E_{sT}，E_{cT}，E_{reT}分别为温度 T 时刻钢梁、混凝土、钢筋的弹性模量；A_s，A_c 分别为钢梁、混凝土板的横截面积；A_{re}为混凝土板内所有钢筋面积之和。

1.3　跨中弯矩 M_e

当组合梁的挠曲线确定后，集中荷载下跨中节点处的转角即可获得。节点转角确定后，根据文献[8]提出的高温下受轴力影响的弯矩-转角-温度关系公式计算出节点弯矩。计算公式如下。

无刚量转角：
$$\theta=\theta_r/(M_u/K_0)。\tag{12}$$

无刚量弯矩：
$$m=\frac{\theta}{(1+\theta^{n_T})^{1/n_T}}。\tag{13}$$

则组合节点抵抗矩
$$M_e=mM_u。\tag{14}$$

式中：M_u 为组合节点极限抗弯承载力；K_0 为组合节点初始转动刚度；n_T 为考虑梁轴力影响的 M-θ_r 关系曲线形状系数，可按下式计算[8]：

$$n_T=\begin{cases}\mu\alpha n_0, & T\in[20,150];\\ \mu\left[\alpha n_0-\dfrac{\alpha n_0(1-\beta)}{200}(T-150)\right], & T\in(150,350];\\ \mu\alpha\beta n_0, & T\in(350,500];\\ \mu\left[\alpha\beta n_0+\dfrac{\alpha n_0(\gamma-\beta)}{250}(T-500)\right], & T\in(500,750];\\ \mu\alpha\gamma n_0, & T\in(750,\sim)。\end{cases}\tag{15}$$

式中：μ 是节点形式计算参数，无加劲肋节点取 1，加劲肋节点取 1.37；T 是节点平均温度；n_0 取 1.5；α，β，γ 是计算参数，详见表 1。因此给出合理的力学荷载下引起的跨中挠度 δ_m 成为解决问题的关键。

表 1　参数 α，β，γ 取值

Tab. 1　Values of parameters α，β and γ

参数	轴力系数					说明
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	
α	1	1.12	1.24	1.33	1.47	受拉
β	0.87	0.83	0.75	0.70	0.70	
γ	1.11	1.31	1.58	2.29	2.46	
α	1	1.27	1.29	1.33	1.47	受压
β	0.87	0.72	0.82	0.85	0.95	
γ	1.11	1.04	1.14	1.50	2.02	

注：轴力系数为轴力与节点抗压(或拉)承载力的比值。

2　应　用

图 3 描述了上文中提出的实用计算方法全过程。笔者采用文献[9]与文献[10]的试验(见图 1)对此分析方法进行验证。全过程分析计算结果与试验数据的比较如图 4－图 6 所示。分析方法给出的曲线要提前于试验数据一小段时间，可能与高温材料取值有关，分析采用的试验组合梁高温材性为规范值[11-13]，与实际值会有差异。

所得数据表明，实用分析方法能够较为准确地表达约束组合梁升温全过程。计算过程中各计算参数变化特点可按 3 个阶段(即升温膨胀阶段、跳跃阶段和悬链线阶段)进行归纳，见图 7，要点如下。

1) 升温膨胀阶段，在小挠度增量下轴压力增加迅速，节点弯矩对轴压力变化不敏感。这是由于升温初期材料强度和刚度退化不明显，轴压力和弯矩共同作用下的受压钢梁下翼缘具有足够的抗压承载力，因此节点总是能够提供较为恒定的弯矩来抵抗外力。从计算过程看来，M-θ_r 关系中形状系数的确定对节点弯矩计算结果有较大影响。当梁为轴压力时，形状系数对计算节点弯矩内力影响较大。另外，在计算组合节点受压力影响下的节点弯矩极限承载力时，中性轴位置随温度升高和轴力的增大逐渐从钢梁中向混凝土板方向移动，这说明节点内部各组件在随温度变化开始进行内力重分布，混凝土板内较低温度的钢筋将在升温后期对节点抗弯承载力做出主要贡献。

2) 在跳跃阶段，由于钢梁下翼缘进入材料强度和刚度的快速退化区而开始屈曲，组合节点无法在高轴压力下保持原有弯矩承载力和节点刚度，因此组合梁在较弱的端部转动约束下挠度迅速增加，梁端位移开始向跨中移动，轴力由轴压力快速减小直至零后并转变为拉力。节点弯矩的阶段性增大有其结构保持平衡的必然性，并且从组合节点轴力-弯矩关系来看，快速降低的轴力让节点保持较高的抗弯承载力也是合理的。此阶段弯矩直接受轴力控制，形状系数对弯矩的影响逐渐减弱。组合节点中性轴位置继续向混凝土板中移

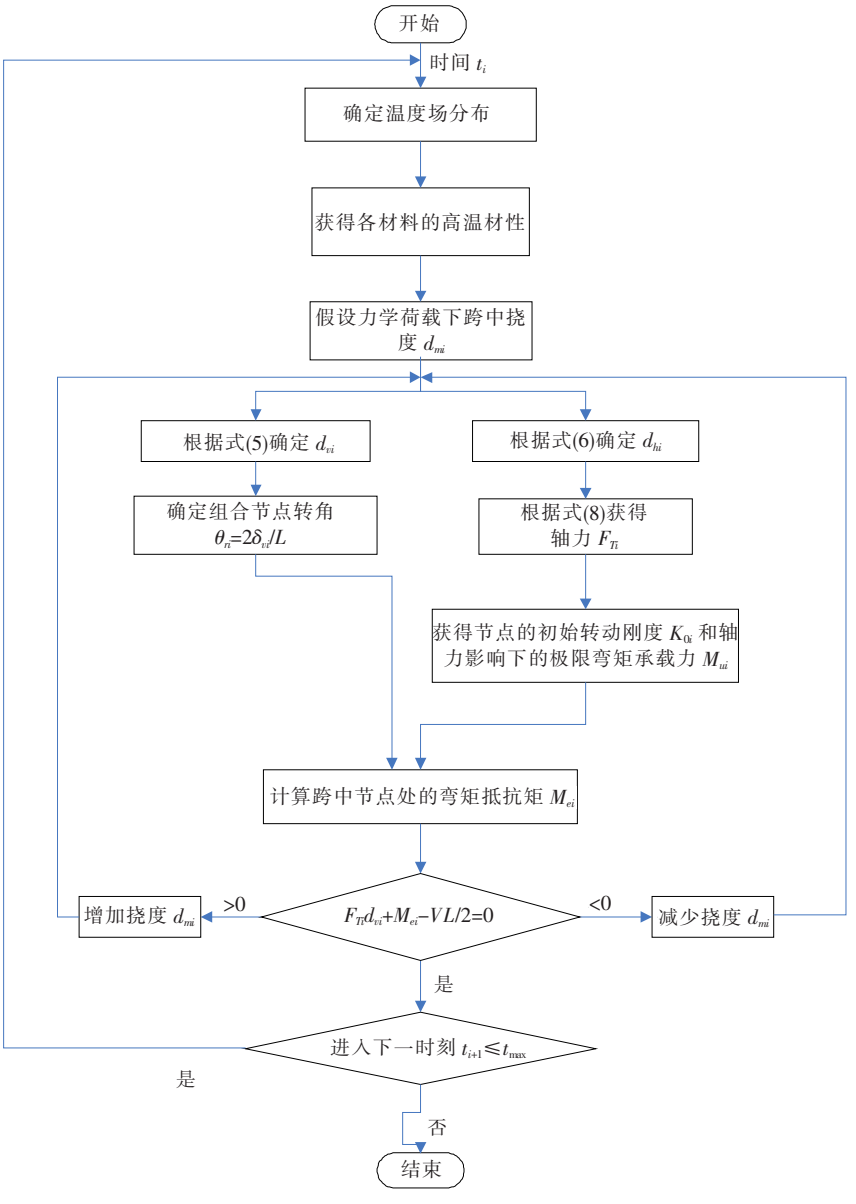


图 3 约束组合梁高温计算过程

Fig. 3 Flow chart of practical method of joint in the analysis of catenary action of beam

动，板中低温钢筋充裕的强度为节点承受拉力和弯矩提供保证。

3）悬链线阶段，轴力、挠度和梁端抵抗弯矩均相对平稳变化，轴拉力继续增加，在温度不断升高的环境下相应的组合节点抵抗弯矩会继续降低。此阶段形状系数对弯矩的影响很微弱，在计算节点处的抵抗弯矩时可不必考虑形状系数，直接采用温度 T 时组合节点在轴力 F_T 作用下的极限弯矩作为节点的抵抗弯矩。理由在于节点已经处于转动刚度不断退化的状态，全截面基本进入塑性状态，节点的弯矩承载力已经没有富余，组合梁自身根据端部约束情况而不断调整挠度从而改变轴力来满足平衡方程。梁端中性轴位置也相对平稳地向钢筋移动。

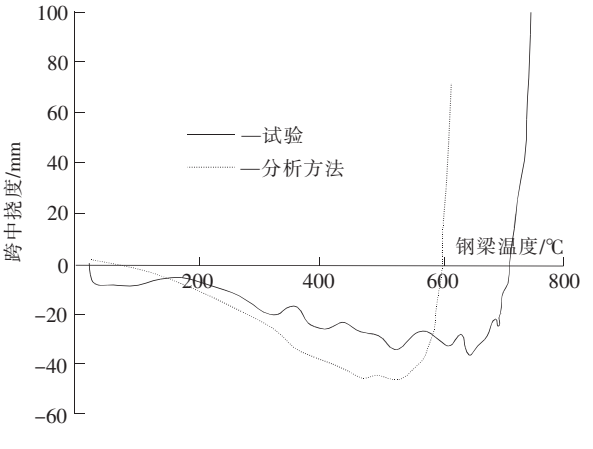
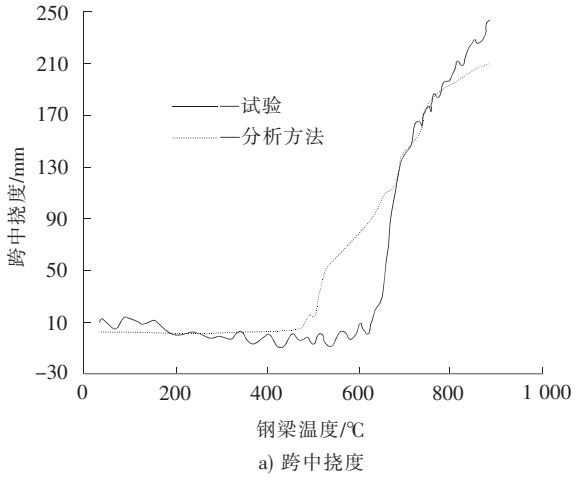
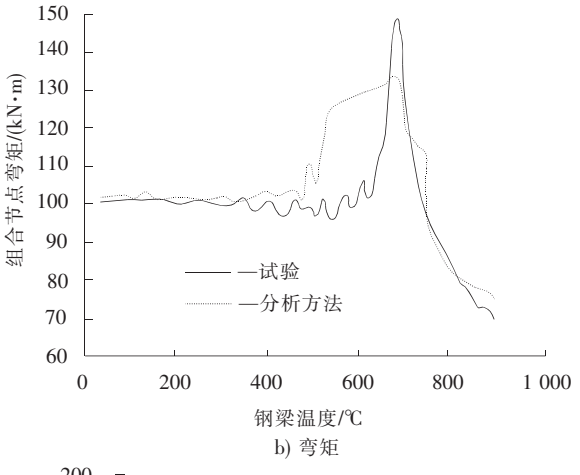


图 4 Test2 分析方法和试验数据的比较

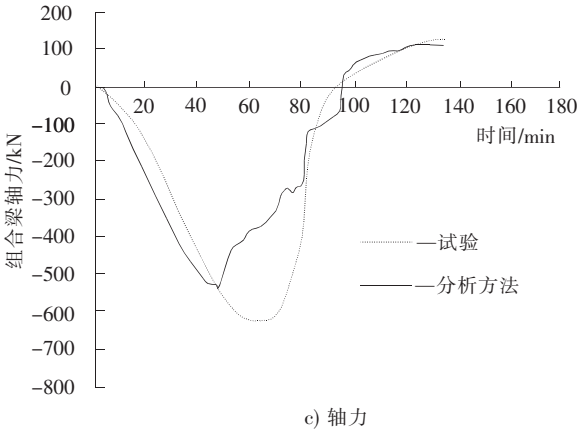
Fig. 4 Curve comparison of deflection between practical method and experimental data of Test2



a) 跨中挠度



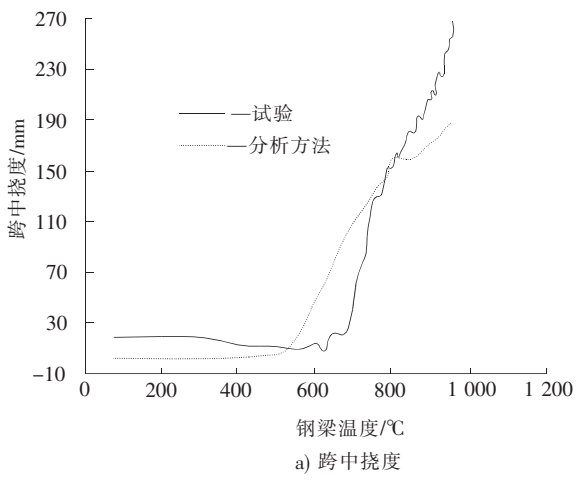
b) 弯矩



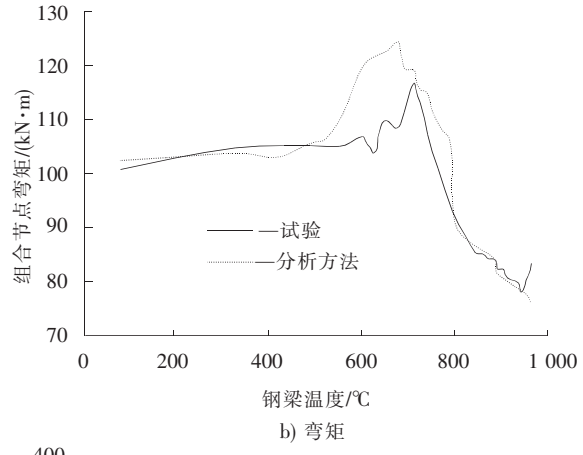
c) 轴力

图 5　Test3 分析方法和试验数据的比较

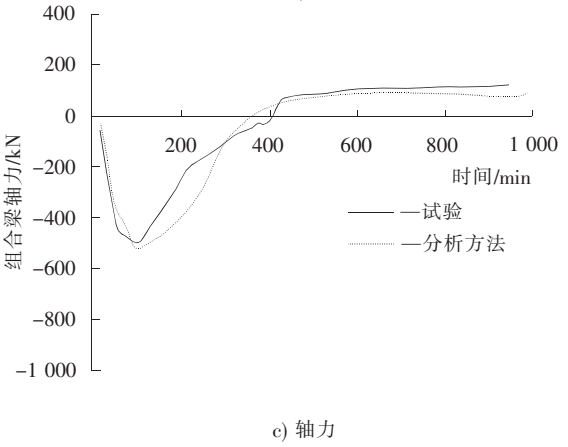
Fig. 5　Curve comparison between practical method and experimental data of Test3



a) 跨中挠度



b) 弯矩



c) 轴力

图 6　Test4 分析方法和试验数据的比较

Fig. 6　Curve comparison between practical method and experimental data of Test4

3　转动约束对组合梁挠度的影响

图 8—图 10 所示为节点不同转动约束刚度时挠度、轴力、节点处弯矩的对比，特点如下。

1）**转动约束刚度对约束组合梁的影响主要表现在下翼缘屈曲之前。约束刚度越大，跨中挠度越小；轴压值越大，对节点弯矩值影响越小。**

2）**当节点接近刚接时，是否考虑节点变化的转动约束对组合梁抗火性能的影响较小。**

3）**转动约束对于约束组合梁屈曲后的抗火性能（跨中挠度、弯矩、轴力）几乎无影响。**

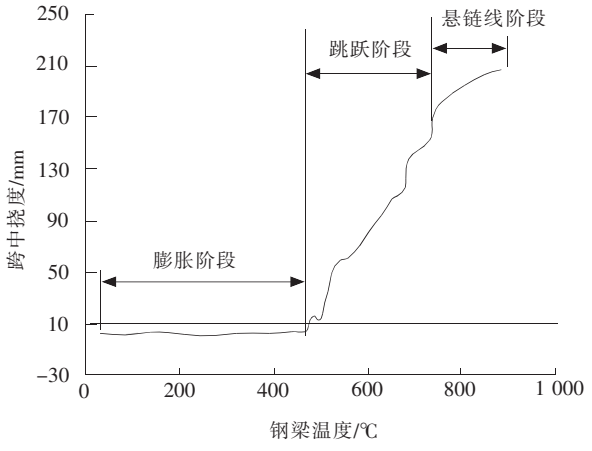


图 7 组合梁升温过程三阶段示意

Fig. 7 Three phases of composite beam behaviors in the entire elevated temperature

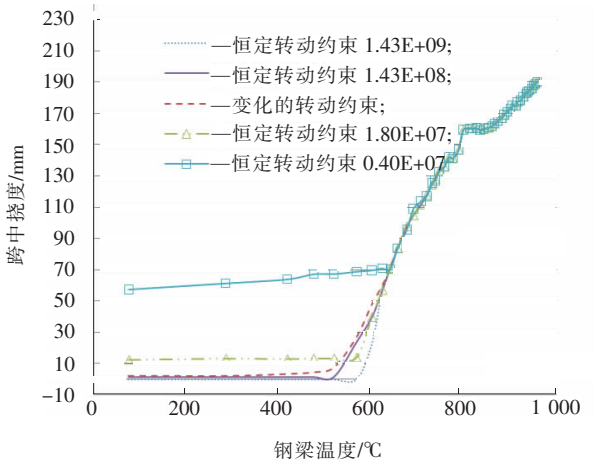


图 8 不同转动约束刚度时跨中挠度比较

Fig. 8 Comparison of beam deflection with different rotational stiffness level

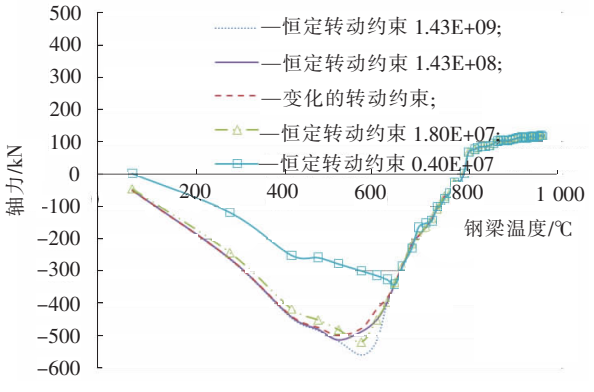


图 9 不同转动约束刚度时轴力比较

Fig. 9 Comparison of axial force with different rotational stiffness levels

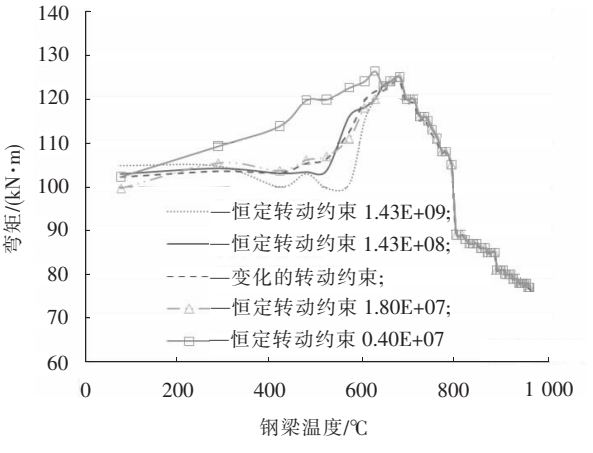


图 10 不同转动约束刚度时弯矩比较

Fig. 10 Comparison of moment of joint with different rotational stiffness levels

4 结 语

以往的结构抗火设计方法一般将结构中节点高温性能和梁的高温性能分开进行研究，没有合理地考虑这两者高温下的相互影响，将结构火灾下整体反应独立地分成几部分来研究。本文给出的约束组合梁高温下反应全过程分析方法考虑了组合节点抗弯承载力、转动刚度和组合梁的相互作用过程，其有效性和实用性得到了试验验证。本方法为多层、高层建筑钢结构火灾反应分析及结构抗火设计提供了实用手段。

参考文献：

[1] USMANI A S, CHUNG Y C, TORERO J L. How did the WTC towers collapse: A new theory[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38: 501-533.

[2] YIN Y Z, WANG Y C. A numerical study of large deflection behavior of restrained steel beams at elevated temperature[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1 029-1 047.

[3] YIN Y Z, WANG Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method(Part 1): Theory and validation for uniform temperature distribution[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 183-211.

[4] LIU T C H. Finite element modeling of behaviors of steel beams and connections in fire[J]. J Construct Steel Res, 1996, 36(3): 181-199.

(下转第 517 页)

参考文献:

[1] 周　琪,赵由才. 染料对人体健康和生态环境的危害[J]. 环境与健康杂志(Journal of Environment and Health),2005,22(3):229-231.

[2] 钟金汤. 偶氮染料及其代谢产物的化学结构与毒性关系的回顾与前瞻[J]. 环境与职业医学(Journal of Environmental & Occupational Medicine),2004,21(1):58-62.

[3] 丁忠浩. 有机废水处理技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002. 317-338.

[4] 李家珍. 染料、染色工业废水处理[M]. 北京:化学工业出版社,1997. 1-7,342-348.

[5] 钱　易,汤鸿霄,文湘华,等. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理(下卷):难降解有机物[M]. 北京:中国环境出版社,2000. 1-21.

[6] 徐文东,文湘华. 微生物在含染料废水处理中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备(Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control),2000,1(2):9-16.

[7] 王　惠,郑小伟,王宾香. 真菌对染料的脱色研究进展[J]. 应用与环境微生物学报(Chinese Journal of Applied & Environmental Biology),2009,15(1):147-151.

[8] JEFFREY K G,MICHAEL H G. Decolorization fo several polymericdyes by the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Applied and Environmental Microbiology,1983,45:1 741-1 747.

[9] LIBRA J A,BORCHERT M,BANIT S. Competition strategies for thedecolorization of a textile-reactive dye with the white-rot fungi trametes versicolor under non-sterile conditions[J]. Biotechnol Bioeng,2003,82(6):736-744.

[10] 李向飞,文湘华,林　刚. 白腐真菌 F1 对染料脱色特性的研究[J]. 环境污染治理技术与设备(Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control),2002,3(7):1-4.

[11] 荚　荣,谢　萍,秦　易. 固定化白腐真菌对多种染料脱色的研究[J]. 菌物系统(Mycosystema),2003,22(2):308-313.

[12] 苏　丹,李培军,许华夏. 均匀设计在固定化毛霉载体配方优化中的应用[J]. 农业环境科学学报(Journal of Agro-Environment Science),2006,25(6):1 667-1 670.

[13] 姜庆宏,崔岱宗,赵　敏,等. 一株产漆酶真菌新月弯孢霉 JQH-100 在染料脱色中的应用[J]. 菌物学报(Mycosystema),2010,29(5):678-682.

[14] 乔治杰,马　斌,陈琼华,等. 灵芝漆酶催化阳离子红 2GL 脱色的研究[J]. 菌物学报(Mycosystema),2010,29(2):261-266.

[15] 张慕明,余志晟,张洪勋,等. 东方伊萨酵母 YP-1 对染料活性艳红 K-2BP 的脱色[J]. 中国环境科学(China Environmental Science),2009,29(12):1 266-1 271.

[16] 罗　晓,王　婷. 固定化真菌处理土霉素废水的研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2011,32(1):98-102.

(上接第 454 页)

[3] 倪光正,杨仕友,钱秀英. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[4] AZIZI M,BOUSSOUIS M,AUBERT H,et al. A three-dimensional analysis of planar discontinuities by an iterative method[J]. Microwave and Optical Technology Letters,1996,13(6):372-376.

[5] JI W,LUO Q,YANG F. Analysis of H-shaped patch antenna by wave concept iterative procedure (WCIP)[A]. ICMMT 2010 Proceedings[C]. Chengdu:[s. n.],2010. 797-800.

[6] ZAIRI H,GHARSALLAH A,GHARBI A,et al. Modelisation of probe feed excitation using iterative method[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal,2004,19 (3):198-205.

[7] GHARSALLAH A,GHARBI A,DESCLOS L,et al. Analysis of interdigital capacitor and quasi-lumped miniaturized filters using iterative method[J]. International Journal of Numerical Modelling,2002,15(2):169-179.

(上接第 506 页)

[5] LIU T C H,FAHAD M K,DAVIES J M. Experimental investigation of behavior of axially restrained steel beams in fire[J]. J of Constructional Steel Research,2002,58:1 211-1 230.

[6] ALLAM A M,BURGESS I W,PLANK R J,et al. Performance-based simplified model for a steel beam at large deflection in fire[A]. Proc 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods[C]. Melbourne:[s. n.],2002.

[7] 王银志. 考虑结构整体性的组合梁抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2008.

[8] 郭士雄. 约束钢梁在升温段和降温段的反应及梁柱节点的破坏研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[9] 李侥婷. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的抗火性能研究[D]. 上海:同济大学,2010.

[10] 李国强,李侥婷,楼国彪. 考虑梁轴力影响的平端板连接组合节点抗火性能试验[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures),2011,32(4):125-133.

[11] 李　卫,过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures),1993,14(1):8-16.

[12] 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.

[13] ENV 1993-1-2(Eurocode 3),Design of Steel Structures(Part 1. 2):Structural Fire Design[S].