

大空间建筑不同区域受火对平面张弦梁结构响应影响分析

陈长坤^{1,2}, 刘广林¹, 张冬¹

1. 中南大学土木建筑学院防灾科学与技术研究所, 长沙 410075

2. 中国科学技术大学; 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027

摘要 为了获取大空间建筑火灾下张弦梁结构响应规律, 分析不同区域受火对该结构响应影响, 优化结构抗火设计方法, 本文结合大空间建筑特点及火灾特征, 考虑张弦梁结构边跨受火、跨中受火及结构全跨整体受火情况, 采用有限元法对3种受火条件下的结构响应展开研究, 探讨了该结构在火灾高温下的行为响应及不同区域受火对结构响应影响, 获取了火灾高温下活动铰支座的侧向位移、拱梁的竖向位移、下弦索的轴向拉力、撑杆的轴向压力, 进而提出了适合大空间张弦梁结构抗火设计的优化建议。结果表明, 受火灾高温影响, 结构变形, 右端可动铰支座随拱梁温度升高逐渐向右移动, 且幅度较大, 为提高结构的安全性能, 建议采取一定的措施限制活动铰支座水平位移最大变化量; 对比不同工况下结构位移、弯矩及轴力变化, 可知不同区域受火致使空间温度场分布不均, 该因素对张弦梁结构响应影响较大, 张弦梁结构抗火性能研究应予以考虑; 基于整体受火条件的结构抗火设计过于保守, 缺乏针对性, 结构抗火设计应结合实际火灾场景, 考虑局部区域受火情况探讨结构行为响应, 针对张弦梁结构防火的薄弱部位采取针对性的隔热或防火措施。

关键词 张弦梁结构; 大空间建筑; 火灾; 结构抗火性能

中图分类号 TU998.12

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.12.003

The Structural Response of Beam String Structure in Case of Fire in Different Areas of a Large Space Building

CHEN Changkun^{1,2}, LIU Guanglin¹, ZHANG Dong¹

1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China

2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract In this paper, the structural response of the Beam String Structure (BSS) in case of fire in a large space building is investigated by using the finite element method. The fires at the side segment, the middle segment and the full span of the BSS are considered separately in order to reveal the impact of fire areas on the structural response. The horizontal displacement of the right support block and the vertical displacement of the beam are obtained, together with the axial forces of the string and strut. The results indicate that the right support block of the BSS exposed to fire would move toward right with the increase of the fire temperature gradually in a notable extent. It is recommended that some measures should be taken to limit the maximum horizontal displacement of the right support block for improving the safety of the structure. The non-uniform temperature caused by different fire exposures may greatly influence the displacement, bending moment and axial force of the structure. This should be considered in the fire resistant design for this structure. A fire protection design for the BSS based on the assumption of its full span being exposed to fire is relatively conservative. The real fire condition should be considered during the fire resistant design and extra protecting measures should be taken for the weaker members and segments based on the analysis on the structure response of the BSS under some local fire condition.

Keywords Beam String Structure; large space building; fire; structural fire-resistant behaviors

收稿日期: 2010-12-18; 修回日期: 2010-03-20

基金项目: 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2009-KF05)

作者简介: 陈长坤, 教授, 研究方向为钢结构火灾安全, 电子邮箱: cckchen@mail.csu.edu.cn

0 引言

大跨度张弦结构是近 20 年来发展起来的一种新型大跨度预应力钢结构体系。该结构体系是由撑杆连接抗弯受压构件与抗拉构件形成的自平衡体系^[1-3],结构构造简单、受力合理、经济实用,使压弯构件和抗拉构件协同工作,充分发挥材料的力学性能,较好地满足了大跨度空间建筑设计理念,广泛适用于机场航站楼、车站候车厅、体育馆、会展中心等公共聚集场所,且国内外已有不少工程实例^[4]。近年来,张弦结构在机场航站楼、候车室等人员高度密集的大空间建筑中广泛应用,但如果该类场所发生火灾,耐火性能较差的钢结构^[5]容易失稳坍塌,后果不堪设想,张弦结构的耐火性能逐渐引起了钢结构专家的关注。

20 世纪 80 年代日本大学 Saitoh 等^[6-7]首次提出张弦结构的概念,21 世纪初国内外学者对张弦结构的静力和动力性能展开了一系列基于常温的研究工作^[8-14]。2005 年,丁彧^[15]采用 ISO834 标准升温曲线,讨论了张弦桁架的结构参数变化对抗火性能的影响,仿真了张弦桁架的破坏全过程。2007 年,武丽英^[16]对张弦桁架高温预应力损失进行模拟研究,明确了不同火灾、不同约束时张弦桁架结构预应力损失过程及防火设计中应注意的问题。2009 年,王杰^[17]对双层张弦桁架结构的耐火性能进行了研究,讨论了初始预应力值、矢跨比、垂跨比等参数对其耐火性能的影响,总结了各参数变化时结构构件内力及节点位移的变化规律。

目前,张弦结构耐火研究主要采用 ISO834 标准曲线模拟整体火灾温升,认为轰然发生后室内趋于均匀高温,但张弦结构是一种大跨度预应力结构,结构内部空间区域较大,该类建筑火灾与普通建筑火灾存在较大区别^[18]。结构全跨整体受火的特大区域火灾发生概率相对较小,实际火灾场景多为局部区域受火。且现有的耐火研究主要针对张弦桁架开展,而对同属张弦结构的张弦梁结构耐火研究尚少有开展。为了研究大空间建筑火灾下张弦梁结构耐火性能,本文结合大空间建筑结构特点及火灾特征,考虑张弦梁结构体系边跨受火、跨中受火两种典型的局部区域受火以及结构全跨整体受火情况,采用有限元法对 3 种不同受火边界下张弦梁结构响应展开研究,探讨张弦梁结构在火灾高温下的力学响应特点、不同区域受火对结构耐火性能影响及结构耐火设计方法的优化,为张弦梁结构耐火设计提供参考。

1 张弦梁结构有限元分析

张弦梁结构是一种大跨度预应力张弦梁结构体系,其基本组成构件为拱梁、撑杆和柔性索,如图 1 所示。采用有限单元法,将结构构件离散为一组有限个且按一定方式相互联合的单元组合体。该结构在使用过程中处于弹性受力阶段,结构分析时将撑杆离散为杆单元组合体,将索离散为索单元组合体,将拱梁离散为梁单元组合体,考虑到索内预应力作用以及拱梁曲线形状为抛物线形,索与拱梁均采用非线性分

析,而撑杆采用线性分析。

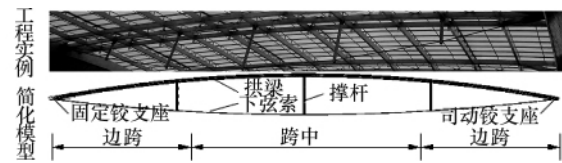


图 1 平面张弦梁结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam string structure

采用有限元软件 ANSYS, 选用二次有限应变梁单元 Beam189 模拟拱梁,选用轴向拉压的杆单元 Link8 模拟撑杆,选用只能承受轴向拉力的杆单元 Link10 模拟下弦索,张弦梁结构有限元分析步骤如图 2 所示。因为张弦梁结构拱梁与撑杆连接方式为平面内铰接,索与撑杆之间连接亦为铰接,所以梁单元 Beam189 与杆单元 Link8 连接处、索单元 Link10 与杆单元 Link8 连接处均按为铰接方式处理。

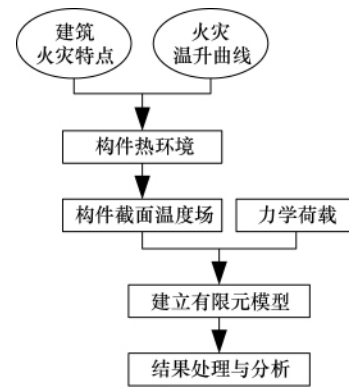


图 2 张弦梁结构有限元分析步骤

Fig. 2 BSS finite element analysis steps

2 数值模型和工况设置

选取一榀实腹式张弦梁结构作为分析模型,跨度为 20.0m,垂度为 1.0m(垂跨比 0.05),矢高 1.5m(矢跨比 0.075),撑杆数为 3。拱梁选用 $\phi 203-6$ 的钢管,撑杆截面面积 $A_1=940\text{mm}^2$,下弦拉索截面面积 $A_2=346\text{mm}^2$,下弦索的初始预应变为 0.002。平面张弦梁结构模型左端采用固定铰支座,右端采用可动铰支座,拱梁承受 15kN/m 的线荷载。同时考虑构件所处位置及构件截面形状两种因素,拱梁支撑屋面,与屋面接触,但拱梁采用圆形钢管,截面形状为圆形,因此拱梁的受火条件为周边四面受火;下弦索和撑杆处于建筑空间内,受火条件亦为四面受火。

建立单榀平面张弦梁结构的有限元数值模型,假定张弦梁各构件的截面温度均匀分布,撑杆与索连接处不能滑动。常温下,拱梁和撑杆的弹性模量为 $E_1=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$,下弦钢索的弹性模量为 $E_2=1.8 \times 10^5 \text{MPa}$,钢密度取 $\rho=7850 \text{kg/m}^3$ 。根据欧洲规范 Eurocode3^[19]的相关模型选取钢材的热工参数及力学

性能参数。由于实际大空间建筑火灾场景多为结构构件局部区域受到高温作用的特征,为分析不同区域受火对结构响应影响,设置张弦梁结构边跨受火、跨中受火两种典型的局部区域受火工况,边跨、跨中区域位置如图 1 所示,同时设置张弦梁结构全跨整体受火工况。

3 结果与分析

3.1 支座水平位移

受火灾高温影响,钢材受热温度升高,产生热膨胀效应,使构件变形并有附加加热应力的产生,进而平面张弦梁的整体结构响应随温度升高而发生较大的变化。当张弦梁结构部分构件受火时,即局部区域受火,受火灾高温的影响,张弦梁结构产生较大的竖向变形,钢材刚度、屈服临界荷载降低,结构整体承载能力下降,结构向下移动;由于结构右端采用可动铰支座,结构产生竖向变形的同时,在水平方向存在一定的侧向变形。

张弦梁结构右端可动铰支座的侧向位移随受火区域拱梁温度变化如图 3 所示。可以看出,全跨受火时右端可动铰支座侧向位移随拱梁温度变化程度最为明显,结构失效最快;单侧边跨受火条件下,右端铰支座侧向位移变化最为平缓,由于结构体系单侧受火,受不均匀温度场影响,高温度场区域结构的承载能力小于低温度场区域,结构左右承载能力不均,结构容易失效破坏;跨中受火条件下,随受火拱梁温度升高,右端铰支座侧向位移变化相对平缓,结构的极限温度比边跨受火时高 83℃,极限温度达到 584℃。

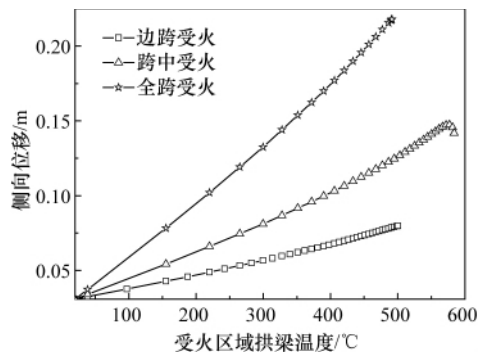


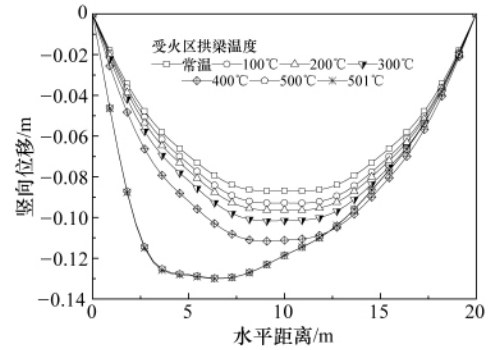
图 3 张弦梁右端点侧向位移变化

Fig. 3 Variation of horizontal displacement of right support block

3.2 拱梁竖向位移和弯矩

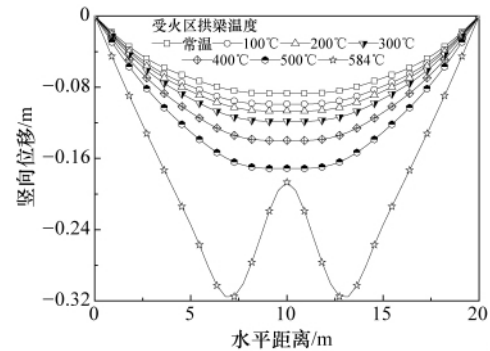
图 4 给出了不同受火边界条件下拱梁竖向位移变化量 UY 随受火区域拱梁温度变化的情况。由图 4(a)可知,当结构体系单侧受火时,非受火区域拱梁温度低于左侧边跨受火区域拱梁,受火区域拱梁温度升高,刚度明显下降,导致左侧受火区域拱梁的竖向位移变化量明显大于右边跨非受火区域,该条件下,极限温度为 501℃。

由图 4(b)可知,跨中受火时拱梁竖向位移变化量 UY 变



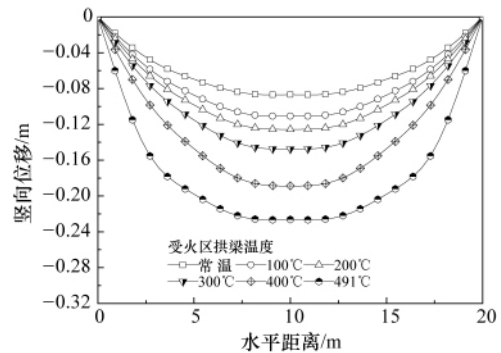
(a) 边跨受火

(a) Side segment exposed to fire



(b) 跨中受火

(b) Middle segment exposed to fire



(c) 全跨受火

(c) Full span exposed to fire

图 4 拱梁 UY 竖向变形

Fig. 4 UY vertical deformation of beam

化幅度比边跨受火更明显,受火灾高温影响,拱梁竖向位移变化量更大;该受火边界条件下,结构的极限温度为 584℃,拱梁受不均匀温度分布和撑杆作用的影响,极限温度下拱梁不同位置的竖向位移变化量呈 W 形,即由跨中至边跨位移变化量先增大后减少。该受火条件下跨中区域拱梁升温较快,跨中高温区拱梁的竖向位移变化量大于边跨低温区;在 $X=10\text{m}$ 处,拱梁受撑杆支撑,该处位移变化量小于附近受火区域,受火区域拱梁的温度为 500℃时,拱梁不同位置位移变化量呈 W 形。

全跨受火边界条件下拱梁不同位置竖向位移变化量如图4(c)所示,结合表1拱梁竖向最大位移 UY_{max} 随受火拱梁温升变化情况分析可知,相同温度梯度下全跨受火时竖向最大位移 UY_{max} 变化最显著,极限温度(结构失效时受火拱梁所

对应的温度)最低,对结构体系的稳定性影响最大,而边跨受火时结构受不均匀温度场影响,受火区与非受火区拱梁位移变化量差别较大,结构承载能力不均,结构内力重分布,致使结构体系发生破坏。

表1 拱梁 UY_{max} 随温度变化情况

Table 1 UY_{max} vertical deformation of beam versus temperature

UY_{max}/cm	受火拱梁温度/°C						
	20	100	200	300	400	500	极限温度
UY_{max1} (边跨受火)	-8.7	-9.29	-9.64	-10.17	-11.16	-12.97	-13 (501°C)
UY_{max2} (跨中受火)	-8.7	-9.90	-10.66	-11.81	-13.97	-17.12	-31 (584°C)
UY_{max3} (全跨受火)	-8.7	-11.09	-12.59	-14.77	-18.87	—	-23 (491°C)

当受火拱梁温度升至400°C时,不同受火边界条件下拱梁不同位置弯矩变化如图5所示。由图5可知,受火灾高温的影响,弯矩峰值呈现增大趋势,受火区域弯矩增大较为明显。拱梁各位置弯矩分布趋势基本相同,拱梁弯矩为负值,即杆件截面上部受拉,下部受压,拱梁弯矩峰值集中在撑杆之间的空腹节间。

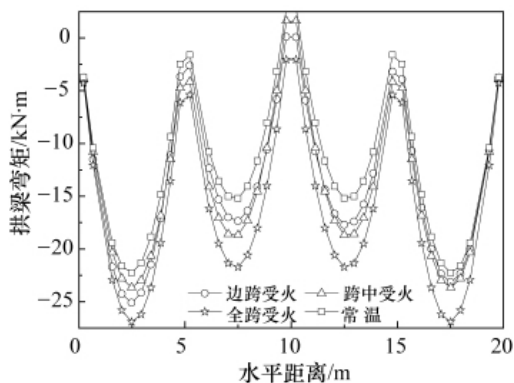


图5 受火拱梁温度 $T=400^{\circ}C$ 时拱梁弯矩
Fig. 5 Beam moments at $T=400^{\circ}C$

3.3 下弦索轴向拉力

张弦梁结构下弦索轴向拉力随受火弦索温度变化情况如图6所示,随受火弦索温度升高,由于结构构件位移变化量逐渐增大,右端可动铰支座向右移动,使索内轴向拉力呈明显增大趋势。在受火弦索温度达到350°C以前,轴向拉力变化相对缓慢;当受火弦索温度升至400°C左右时,索内轴向拉力急剧增加,直至部分构件破坏而导致整体结构失效破坏。

3.4 撑杆轴向拉力

张弦梁撑杆(跨中位置)轴向压力随受火撑杆温度的变化情况如图7所示,轴力均为负值,即撑杆受到拱梁与下弦索的轴向压力作用。边跨局部区域受火时,由于跨中撑杆处于非受火区域,受火灾高温的影响不大,在受火区域撑杆温度达到450°C以前撑杆轴向压力基本不变,温度继续升高,拱

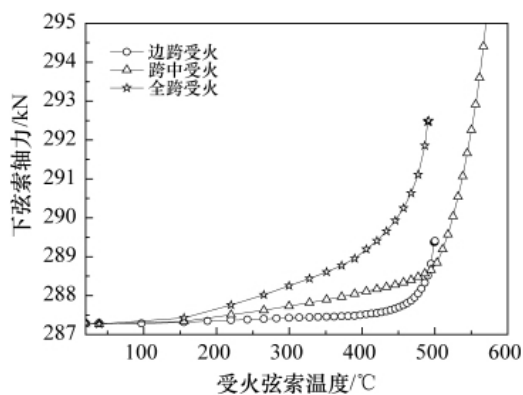


图6 下弦索轴向拉力变化
Fig. 6 Variation of axial forces in the string

梁、弦索挠度变形增大,结构承载能力降低,撑杆轴力急剧减小,直至结构失效破坏。与之不同的是,跨中受火与全跨受火条件下,跨中撑杆内轴向压力呈现先增大后减少的趋势。这两种受火条件下,跨中撑杆均处于受火区域,撑杆受火发生热膨胀,然而撑杆受到拱梁与下弦索的约束作用,致使撑杆的热膨胀受到限制,撑杆的轴线压力先增大;随着撑杆温度

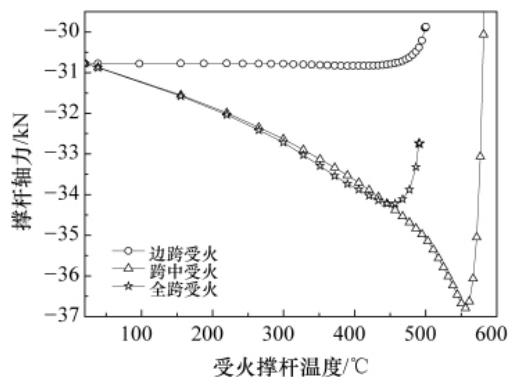


图7 撑杆轴向压力变化
Fig. 7 Variation of axial forces in strut

升高,钢材的刚度与屈服强度降低,撑杆的承载能力下降,同时由于拱梁与下弦索受高温作用而变形加大,其对撑杆的约束能力也降低,进而,撑杆轴向压力由增大转变为减小。

以上分析表明,张弦梁结构局部区域受火与全跨受火的力学响应、耐火极限等明显不同,不同区域受火对结构响应影响较大,进行防火设计时,应结合实际火灾场景,开展性能化结构抗火设计,对薄弱区域采取针对性隔热或防火措施。

4 结论

(1) 受火区高温影响,结构呈现整体下移的趋势,右端可动铰支座随受火区域拱梁温度的升高而逐渐向右侧向移动,本文张弦梁模型在边跨、跨中、全跨3种受火条件下的最大侧向位移分别为8、14、21cm,建议采取一定的措施限制活动铰支座水平位移的最大变化量,预防高温下支座位移变化过大致使结构破坏。

(2) 边跨受火时结构的极限温度低于跨中受火的极限温度,而全跨受火时结构的极限温度最低,对于本文所分析的张弦梁模型,边跨受火的极限温度比跨中受火时低83℃,即受火区域不同时结构响应差别较大,张弦梁结构抗火分析应考虑不同区域受火对结构响应的影响。

(3) 对于本文所分析的张弦梁模型,边跨受火与跨中受火时拱梁的最大竖向位移分别为13、23cm,拱梁最大竖向位移相差10cm,结构局部区域受火灾高温作用,高温区域结构材料性能下降,受不均匀温度场影响,受火区域与非受火区域结构响应差别较大。

(4) 本文跨中受火时拱梁最大竖向位移为18cm,变化幅度比边跨受火时更大,受不均匀温度场及撑杆支撑作用,极限温度下拱梁不同位置的竖向位移UY呈现W形,即跨中至边跨位移呈现先增大后减少的趋势。

(5) 全跨受火条件下,结构响应最为剧烈,拱梁位移、弯矩等参数变化量最大,但基于全跨整体受火条件下的结构抗火设计过于保守,缺乏针对性,在进行张弦梁结构抗火设计时,建议考虑局部区域受火情况,结合实际火灾场景探讨结构行为响应,开展性能化的结构抗火设计,对薄弱区域采取针对性的隔热或防火措施。

参考文献 (References)

- [1] 白正仙,刘锡良,李义生. 新型空间结构形式-张弦梁结构 [J]. 空间结构, 2001, 7(2): 33-38.
Bai Zhengxian, Liu Xiliang, Li Yisheng. *Spatial Structures*, 2001, 7(2): 33-38.
- [2] Wu M E. Analytical method for the lateral buckling of the strut in BSS [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(9): 2301-2310.
- [3] Xue W C, Liu S. Design optimization and experimental study on BSS[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(1): 70-80.
- [4] 孙建琴,李方慧. 大跨度空间结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Sun Jianqin, Li Fanghui. Design for the large-span space structure[M].

Beijing: Science Press, 2009.

- [5] Wang Y C. Steel and composite structures: Behaviour and design for fire safety[M]. London: Spon Press, 2002.
- [6] Saitoh M. A Study on structural characteristic of beam string structure. Part I: Prestressing for dead load [C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, 1987.
- [7] Saitoh M. Study on mechanical characteristics of light-weight complex structure composed of a membrane and a beam string structure [C]// Spatial, Lattice and Tension Structure, Proceeding of IASS-ASCE Int Symp, 1994: 632-641.
- [8] 吴祖威. 张弦梁结构的找形与受力性能分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
WU Zuxian. Analysis of form-finding and mechanical behavior for beam string structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [9] 张志宏, 张明山, 董石麟. 张弦梁结构若干问题的探讨 [J]. 工程力学, 2004, 12(6): 26-30.
Zhang Zhihong, Zhang Mingshan, Dong Shilin. *Engineering Mechanics*, 2004, 12(6): 26-30.
- [10] 蔡建国, 涂展麒, 冯建. 新广州站三向张弦梁结构优化设计 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(5): 13-18.
Cai Jianguo, Tu Zhanqi, Feng Jian. *Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition*, 2010, 37(5): 13-18.
- [11] Aihara T, Katov M. A hybrid structure consisting of a steel beam string structure and a wooden hyperbolic paraboloidal shell reinforced by aramid fiber sheets[J]. *J Int Assoc Shell Spatial Struct*, 2004, 45(2): 81-91.
- [12] 刘超. 张弦梁结构的有限元分析[J]. 安徽建筑, 2005, 12(5): 104-105.
Liu Chao. *Anhui Architecture*, 2005, 12(5): 104-105.
- [13] 尚仁杰, 吴转琴. 双向张弦梁找形的有限元法 [J]. 计算力学学报, 2009, 26(1): 131-135.
Shang Renjie, Wu Zhuanqin. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(1): 131-135.
- [14] 毛德培. 钢结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
Mao Depei. Steel structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [15] 丁颢. 张弦梁结构抗火性能的数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
Ding Yu. Numerical simulation on beam string structure behavior against fire[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2005.
- [16] 武丽英. 火灾下张弦桁架结构预应力损失模拟研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
Wu Liying. A Study on the pre-stress loss behavior of TSS in fire[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [17] 王杰. 双层张弦梁结构的抗火性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
Wang Jie. On fire-resistance analysis of beam string structure with double-layer string[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [18] 范维澄, 孙金华, 陆守香. 火灾风险评估方法学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Fan Weicheng, Sun Jinhua, Lu Shouxiang. Fire risk evaluation methodology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] British Standards Institution. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules, Structural Fire Design [S]. London: British Standards Institution, DD ENV 1993-1-2: 2001.

(责任编辑 刘志远)