

# 钢框架在高温作用下的温度场研究

杨 宁<sup>1,2,3</sup>, 王崇革<sup>3</sup>, 张玉华<sup>3</sup>, 玄 超<sup>3</sup>

(1. 江苏建筑职业技术学院 江苏 徐州 221116; 2. 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心 江苏 徐州 221116;  
3. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室 山东 青岛 266590)

**摘 要:**以一平面钢框架为算例,选取钢框架某一房间为研究对象,利用通用有限元分析软件 ANSYS 研究其在标准升温曲线作用下的温度分布及温度随时间的发展变化过程。结果发现:梁与柱受到火作用的一面升温较快,而背火面即非受火面升温较慢;梁腹板温度最高,下翼缘次之,上翼缘温度最低;梁上翼缘、腹板与下翼缘的温度随时间逐渐升高,呈现升温速率初期较快而后逐渐放慢的特点,上翼缘、腹板、下翼缘的温度在 735 °C 左右时升温速率又突然增大,然后又减少,可以为钢结构抗火设计提供参考。

**关键词:**钢框架;高温作用;温度场;有限元分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)01-0074-05

## Temperature Field of Steel Frame Under High Temperature

YANG Ning<sup>1,2,3</sup>, WANG Chongge<sup>3</sup>, ZHANG Yuhua<sup>3</sup>, XUAN Chao<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Jianzhu Institute, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building Energy Saving and Construction Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster

Prevention and Mitigation, Shandong University Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** By using the general finite element analysis software ANSYS, this paper studied the temperature distribution and temperature changes over time of the planar steel frame of a room being acted on by standard warming up curve. The results show that the exposed surface temperature of beams and columns rises more rapidly while the unexposed surface temperature rises more slowly, with the highest temperature at the beam's ventral shield, moderate temperature at bottom flange and the lowest temperature at top flange, and with the extension of time the temperature keeps on rising at a rapid heating rate first but a slowing one later. However, there appears a sudden rise and then a quick fall of heating rate when the temperature of the top flange, ventral shield and bottom flange reaches about 735 °C. The research results can provide certain reference for the fire resistance design of steel structures.

**Key words:** steel frame; high temperature function; temperature field; finite element analysis

钢结构因其具有施工速度快,工业化程度高等优点在当代社会中得到了广泛的应用,然而钢结构具有不耐火的特点,一旦发生火灾其力学性能会出现快速下降造成严重后果<sup>[1]</sup>。人们一般将钢结构构件表面进行防火处理来提高钢结构的抗火性能,这种方法的确能满足耐火极限的要求,但不加区分的防护,费用会相当

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目(SJXTQ1508); 江苏建筑职业技术学院科技计划项目(JYA312-19); 江苏建筑职业技术学院基于 BIM 信息技术的《建筑识图与绘图》项目化课程改革研究项目(Py2015-9)

作者简介: 杨 宁(1985—)男,山西大同人,讲师,博士研究生,主要从事工程结构抗火理论及温度场方面的研究工作。

E-mail: yangning20000@126.com

昂贵。分析以往火灾后钢结构破坏的案例可以发现,针对某些部位的防火设计还未充分施展其最大防火能力,而有些却早早失效,因此无差别的防护既不科学也相当浪费。因此钢结构的抗火研究不仅必要,而且具有重要意义。

对于钢构件温度场及抗火方面的研究,国内学者进行了一些探索和实践。刘东亚等<sup>[2]</sup>利用 ANSYS 研究了钢梁在不同升降温条件下的火灾行为,针对各参数对钢梁抗火性能的影响进行了深入分析。王卫永等<sup>[3]</sup>借助 ANSYS 对防火涂料局部破损情况下钢柱的温度分布情况进行分析,为防火涂料局部破损后钢结构及其构件的抗火性能研究创造了基础条件。王新堂<sup>[4]</sup>和吕俊利等<sup>[5]</sup>对 H 型钢柱抗火性能进行试验研究,得到钢柱的升温过程及在火灾作用下的力学响应。葛勇等<sup>[6]</sup>对 H 型截面试件进行受火试验,研究试件的升温曲线,采用切条法对其在火灾前后的残余应力分布进行了深入研究。王培军等<sup>[7]</sup>采用防火板保护钢柱四面受火时的截面温度计算方法,研究了防火板与钢柱无间隙及防火板与钢柱有间隙两种类型。王传奇等<sup>[8]</sup>借助 ANSYS 建立薄壁型钢-混凝土梁柱组合节点在标准升温曲线下的有限元模型,分析梁柱节点的温度场,针对梁柱节点弯矩-时间曲线和节点耐火时间进行了参数化研究。杨秀萍等<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 建立约束钢梁的有限元模型,得到温度随时间的变化曲线,基于约束钢梁模型分析了钢梁在自然火灾条件下的可靠性。

综上所述,针对钢结构温度场及抗火的研究方法主要包括试验和理论研究,研究内容多集中在构件层次,钢结构整体的抗火研究还相对较少。因此,研究钢框架整体在火灾作用下的温度分布及温度随时间的变化情况,研究影响钢框架构件温度高低的因素及高温区的作用范围,可以为钢框架防火提供防火思路和途径,降低防火成本,使防火设计有的放矢,同时也为钢框架在火灾作用下的行为研究提供了基础条件,对于钢结构抗火具有十分重要的理论意义和现实意义。

本研究以一平面钢框架为例,借助 ANSYS 研究了平面钢框架在火灾作用下的温度分布及温度随时间的发展变化过程。

## 1 研究模型

### 1.1 模型描述

所研究模型为一榀二层三跨平面钢框架,具体尺寸见图 1,柱间距 6 m,层高 3.3 m,模型全部柱脚固定,其右侧设有侧向支撑,柱顶作用有集中荷载,其中外侧柱作用的荷载值为 90 kN,内侧柱作用的荷载值为 180 N,模型全部横梁作用有 18 kN/m 的均布荷载,梁与柱的材料为 Q235H 型钢,梁与柱的尺寸(单位 mm)为:

梁  $H400 \times 150 \times 8 \times 10$ ,

柱  $H300 \times 300 \times 10 \times 16$ 。

平面框架的尺寸如图 1 所示。

设定火灾发生在房间 1,房间按标准升温曲线进行升温且温度均匀分布。通过在房间之间设立防火墙仅使受火间的结构构件随着标准升温曲线的温度上升,假定其他房间几乎不受影响。

### 1.2 参数选择

柱腹部设有砖墙,柱子仅朝受火一侧翼缘受到火灾的影响和作用。型钢梁的上翼缘与混凝土楼板紧密接触,因此,型钢梁除上翼缘上表面外,其余三面都将受到火的作用。

热分析单元选用 SOLID70,热膨胀系数按照欧洲钢结构协会 ECCS(European Convention for Constructional Steelwork),英国规范 BSI(British Standards Institution)BS5950:Part8 和上海的《建筑钢结构防火技术规程》DG/TJ08-008-2000 的规定取值,因此热膨胀系数取值为  $\alpha_s = 1.4 \times 10^{-5}$ ,比热容和导热系数是根据 EC3 与 EC4 规定的结构钢的比热计算公式和热传导系数的计算公式计算得到的,结构钢的密度随温度的变化较小,取为  $\rho_s = 7\ 850\ \text{kg/m}^3$ 。

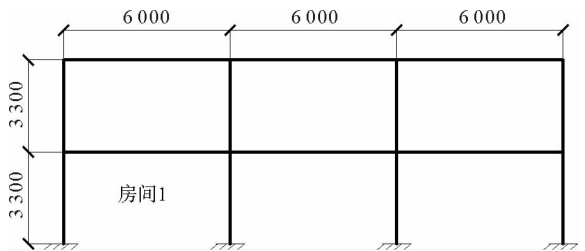


图 1 平面框架尺寸图

Fig. 1 Plane framework size

## 2 仿真结果分析

钢框架着火间按照标准升温曲线进行升温,升温起始温度取为 20 °C,取 60 s 作为一个荷载步,模拟分析 2 400 s 内温度随时间的分布规律。图 2 为受火间有限元模型。

平面钢框架受火间在不同时刻的温度分布具有普遍类似的规律,因此选择时间为 2 400 s 时受火间整体的温度分布作为典型代表,如图 3 所示。

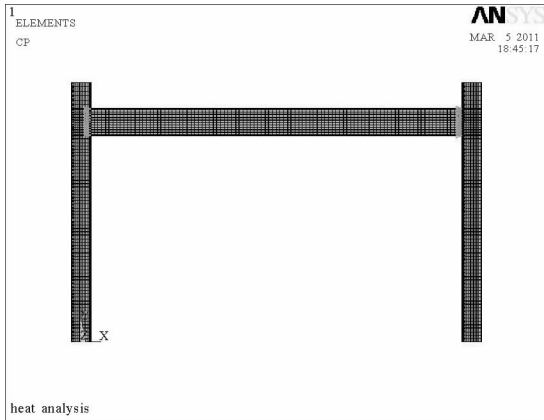


图 2 受火间有限元模型

Fig. 2 Finite element model in fire room

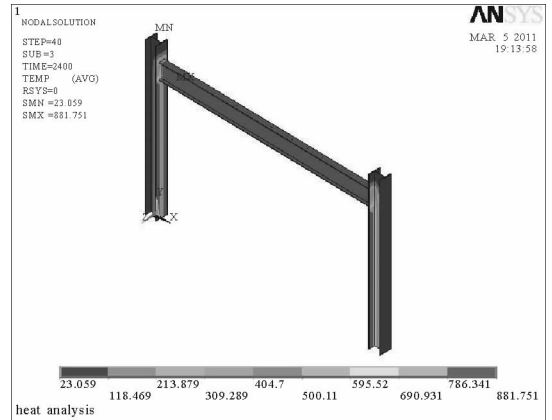


图 3 时间为 2 400 s 时受火间整体温度分布图

Fig. 3 Whole temperature spread in fire room at 2400 s

从图 3 可以看出,相对于初始温度 20 °C,随着时间发展受火间整体温度不断升高,其中受到火作用的一侧温度较未受到火作用的一侧温度上升较快,到 2 400 s 时非受火面温度也只有 23 °C,究其原因柱腹部的砖墙具有阻碍热量传递与阻止火灾扩散的功能,同时表明防火墙的设置能够将火灾控制在有限的空间内。

钢框架梁跨中截面在不同时刻的温度分布同样具有普遍类似规律,选取时间为 1 320 s 时梁截面的温度分布作为典型代表,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,型钢梁的腹板温度最高,下翼缘温度次之,上翼缘温度最低,其形成过程取决于梁不同部位距离火源的远近、受火面的数量及受热方式。腹板与下翼缘同时受到对流、辐射以及热传导的作用,然而腹板左右都受到火的影响,而下翼缘只有下表面一面为迎火面,所以腹板温度要高于下翼缘的温度。型钢梁上翼缘的温升历程主要是依靠热传导进行,所以温度最低。

受火间梁跨中截面上翼缘、下翼缘和腹板温度随时间的变化过程如图 5 所示,腹板-上翼缘,腹板-下翼缘温度差随时间的变化图如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,框架梁上翼缘、腹板、下翼缘的温度随着时间的发展不断升高,但升温速率起初较快,然后逐渐变慢,当上翼缘、腹板和下翼缘温度达到约 735 °C 时升温速率又突然增大,然后升温速率又逐渐减少。升温速率起初较快,然后逐渐变慢的原因在于钢框架是在标准升温曲线作用下进行升温的,标准升温曲线的升温特点呈现升温速率起初较快,然后逐渐减小的规律。上翼缘,腹板和下翼缘温度达到 735 °C 左右时升温速率又突然增大,这是因为钢框架升温过程比热的取值是依据 EC3 与 EC4 给出的结

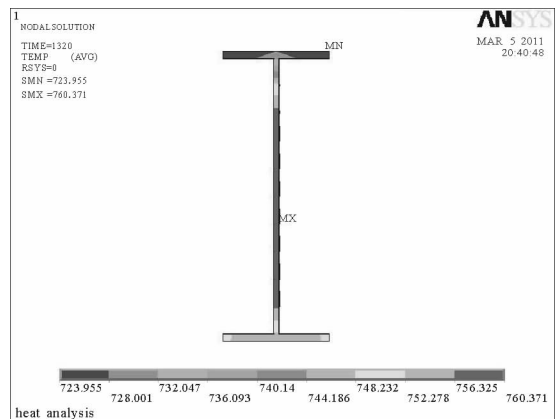


图 4 梁截面在时间为 1 320 s 时温度分布图

Fig. 4 Temperature spread of girder cross-section at 1320 s

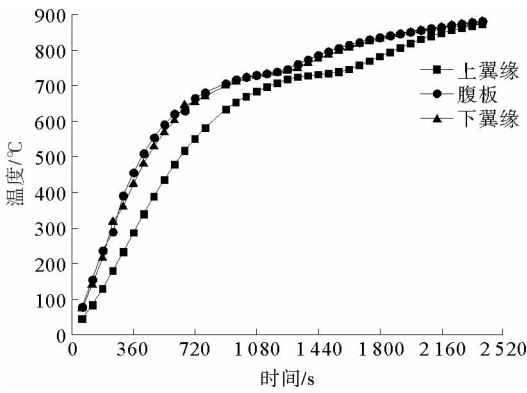


图 5 上翼缘、下翼缘和腹板温度随时间的变化图

Fig. 5 Temperature history of top flange, bottom flange, ventral shield

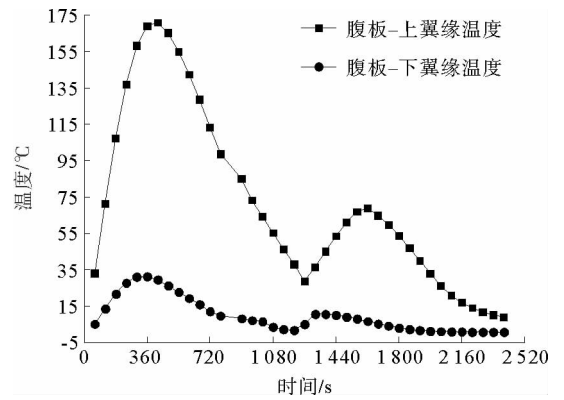


图 6 腹板-上翼缘、腹板-下翼缘温度随时间的变化图

Fig. 6 Temperature history of ventral shield-top flange, ventral shield-bottom flange

构钢的比热公式进行的,温度为 735 °C 时比热发生了很大的变化,导致升温速率的突然增大。

梁的腹板与上翼缘的温差随着时间的发展逐渐增大,到 420 s 时温差达到极大值 170.8 °C,然后由于热传导的进行其温差渐渐变小,1 260 s 时其温差减小到极小值 28.8 °C,接着比热的变化导致温差又进一步扩大到 1 620 s 的 68.9 °C,最终温差减小到 2 400 s 的 9.0 °C。

型钢梁腹板与下翼缘的温差在 360 s 以前逐渐增大,达到极大值 31.4 °C,然后逐渐减小到 1 140 s 时的极小值 2.0 °C,而后逐渐增大到 1 320 s 的极大值 10.8 °C,在 2 400 s 时温差仅仅只有 0.8 °C。

可以得出,型钢梁的腹板与上翼缘温差极值发生的时间皆滞后于型钢梁腹板和下翼缘温差极值出现的时间,究其原因热传导的滞后作用引起的。

### 3 结论

通过 ANSYS 对钢框架温度场的分析可以得到如下结论:

1) 钢框架构件不同部位温度的高低与其距离火源的远近、受火面数量以及受热方式有密切关系。这一结论能够为钢框架防火设计提供防火思路与防火途径。

梁和柱受到火作用的一侧温度较高,且温度上升较快,而未受到火作用的一侧温度较低上升也较为缓慢。因此,受火面在防火设计时候要做到重点防护。柱非受火面温度到 2 400 s 时也只有 23 °C,说明柱腹部防火墙的设置可以把火灾控制在有限的空间内。

梁腹板温度最高,其次是下翼缘,上翼缘温度最低。因此,对于梁来说腹板的防火设计要重点加强。型钢梁腹板和下翼缘受到对流、辐射及热传导的共同影响,然腹板左右同时受火,而下翼缘仅仅下表面为迎火面,所以腹板温度要高于下翼缘。型钢梁上翼缘上部接触有混凝土楼板,升温途径主要依靠热传导进行,因此温度最低。

2) 梁的上翼缘、腹板、下翼缘的温度随着时间的发展而不断升高,随时间的推移温度有趋于一致的趋势,这是由传热学中温度最终趋于一致的性质决定的,但升温速率呈现先快后慢然后又变快又变慢的特征,反映在梁的腹板与上翼缘的温差,梁的腹板与下翼缘的温差时间曲线上出现了两个极大值和一个极小值,即两个波峰和一个波谷。钢框架升温速率的先快后慢,然后又变快又变慢的变化规律可以为钢框架防火设计提供参考。

3) 型钢梁腹板与上翼缘温差极值出现的时间均滞后于梁的腹板与下翼缘的温度差极值出现的时间,究其原因由是热传导的滞后作用引起的。

### 参考文献:

[1] 吕俊利,孙建东,董毓利. 钢框架厂房火灾后的破坏形态[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(增1):95-98.

- LÜ Junli, SUN Jiandong, DONG Yuli. Damage mode of steel frame structure mill building after fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(S1): 95-98.
- [2] 刘东亚, 杨秀萍. 升降温条件对约束钢梁抗火性能的影响[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(5): 11-15.  
LIU Dongya, YANG Xiuping. Effect of temperature rise and drop on constraining the fire resistance of steel beam[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2010, 26(5): 11-15.
- [3] 王卫永, 李国强. 防火涂料破损后钢柱的温度分布[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 56-59.  
WANG Weiyong, LI Guoqiang. Temperature distribution of steel columns after partial damage to fire protection[J]. Journal of Guangxi University: Nat Sci Ed, 2010, 35(1): 56-59.
- [4] 王新堂, 周明, 王万祯. 约束 H 型钢柱火灾响应及火灾后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 18-24.  
WANG Xintang, ZHOU Ming, WANG Wanzhen. Experimental study of fire response and post-fire mechanical behavior of restrained H-steel columns after exposure to fire[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 18-24.
- [5] 吕俊利, 董毓利, 刘涛. 柱端不同约束 H 型截面钢柱抗火性能研究[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(3): 244-246.  
LÜ Junli, DONG Yuli, LIU Tao. Study on performance of different restriction of H-section steel columns in fire[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(3): 244-246.
- [6] 葛勇, 王卫永. H 型截面钢构件受火前后残余应力分布试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(1): 126-131.  
GE Yong, WANG Weiyong. Experimental study on residual stress distribution of H-shaped steel member before and after exposure to fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(1): 126-131.
- [7] 王培军, 夏金环, 郑玉超. 防火板保护钢柱四面受火时截面温度计算方法[J]. 建筑钢结构进展, 2015, 17(2): 44-51.  
WANG Peijun, XIA Jinhuan, ZHENG Yuchao. An approach for predicting cross-sectional temperatures of four-side fire exposed steel columns protected by insulation board [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(2): 44-51.
- [8] 王传奇, 沈建华, 高轩能. 薄壁型钢-混凝土梁柱节点抗火性能数值分析[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(4): 35-40.  
WANG Chuanqi, SHEN Jianhua, GAO Xuanneng. Numerical analysis on fire response of thin-walled steel-concrete beam-to-column connections [J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(4): 35-40.
- [9] 杨秀萍, 刘东亚, 姚斌. 自然火灾条件下约束钢梁可靠性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(1): 70-74.  
YANG Xiuping, LIU Dongya, YAO Bin. Reliability analysis of restrained steel beam in natural fire [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(1): 70-74.

(责任编辑: 吕海亮)