

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.016

自然火灾中钢结构构件温度场模拟

胡 鹰, 赵鹏飞, 杨 波, 熊 刚, 戴国欣

(重庆大学 土木工程学院, 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:在既有一榀框架受火实验的基础上,建立了该实验框架的精确有限元模型。通过与试验结果对比,获得了较好的温度场模拟结果。从结构抗火设计实际需要的角度出发,探究不同火灾发展因素对构件升温的影响,使用 ABAQUS 模拟多种参数化火灾模型下构件温度场分布。研究表明:有限元软件 ABAQUS 能够获得较精确的温度场分布;考虑多种随机性参数更有利于钢结构抗火工程。

关键词:温度场;参数化;ABAQUS;钢结构抗火工程;

中图分类号:TU318 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0078-06

Temperature field simulation of steel components under natural fire

Hu Ying, Zhao Pengfei, Yang Bo, Xiong Gang, Dai Guoxin

(Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area,
School of Civil Engineering Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract:Based on the fire test of an existing frame, a finite element model of the testing frame was established. By comparison with the test results, better result of temperature-field simulation was obtained. In addition, considering the systemic design of the actual needs and exploring the effects of distinctive factors on the development of fire, the use of ABAQUS was to simulate the distribution of temperature-field under distinct fire models with varieties of parametric. The results show that: the finite-element software ABAQUS can obtain more precise temperature distribution; considering various random parameters is more conducive to the constructional steel fire engineering.

Key words:temperature-field;parametric;ABAQUS;structural steel fire engineering

火灾过程中,空气的温度变化趋势复杂多样,作为结构抗火研究的初始条件,其结果将影响结构抗火设计的最终方案。中国现行《建筑设计防火规范 GB50016-2006》^[1]及《高层民用建筑设计防火规范 GB50045-95》(2005 版)^[2]均采用下述方法进行结构抗火设计:首先根据建筑物的重要性、用途、面积、层数、扑救难度、危险性等选定相应的耐火等级,从而确定承重构件的耐火极限,最后采用标准升温曲线

(ISO834)进行标准耐火试验来校核构件的耐火极限,不满足要求则重新设计。但是,标准升温曲线(ISO834)与实际火灾升温曲线往往相差较大。标准升温曲线仅是一种人为规定的升温规律,在实际中,发生火灾的房间情况各不相同,仅以开口因子为例,不同用途房间的开口因子差别很大,发生火灾后空气的温度-时间曲线各不相同。因此,需要考虑实际火灾升温的多种因素,得到符合不同实际情况

收稿日期:2015-03-15

基金项目:重庆大学科研启动基金(0218001104410)

作者简介:胡鹰(1978-),男,研究员,博士,博导,主要从事钢结构节点性能及结构连续倒塌研究,(E-mail) gangjiiegoukanghuo@163.com。

的升温曲线。影响火灾发展的因素包括:受火房间的开间尺寸、火灾荷载密度、开口情况等。欧洲规范、美国土木工程师协会(ASCE)和中国的马忠诚均提出了确定火灾升温的参数化方法^[3],该方法非常实用,工程设计人员在确定房间几何尺寸、火灾荷载密度、开口因子和房间壁面特性等参数后,可以方便地得到升温及降温曲线。通过 ABAQUS 建立了一榀既有框架的有限元模型,采用不同的升温曲线加载模拟不同火灾情况,将有利于实际结构抗火设计。

1 实验框架概况

本文引用文献^[4]的实验数据,鳍板焊接于方钢管混凝土柱,H 型钢梁腹板与鳍板采用 8.8 级高强度螺栓连接。梁上翼缘被 15 mm 厚矿棉包裹。方钢管使用 S355,其他均使用 S275,混凝土强度等级为 C30。方钢管型号为 UK SHS250×250×8,梁型号为 UB178×102×19,核心混凝土尺寸为 242×242×3 390,端板尺寸 200×150×20,底板尺寸 300×300×25,框架平面图如图 1 所示。

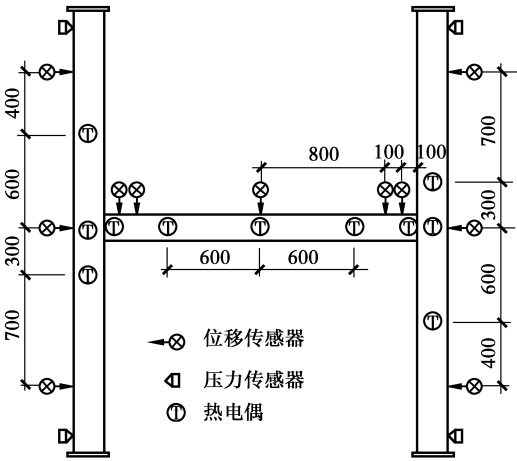


图 1 框架平面示意图(单位:mm)

实验使用的火炉为方形,内部尺寸为 300 mm×1 600 mm×900 mm。火炉的内表面由 200 mm 厚陶瓷纤维组成,如图 2 所示。

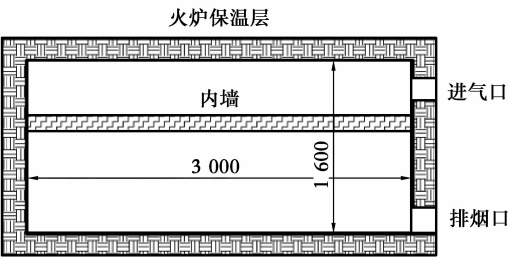


图 1.2 火炉平面示意图

2 有限元模型的建立及其结果对比

2.1 高温下材料的热物理特性

火灾发生时影响材料升温的主要因素包括比热容和热传导系数。采用 EN 1993-1-2^[5]及 EN 1994-1-2^[6]推荐的结构钢和普通混凝土的比热及热传导系数随温度变化如图 3~4 所示。

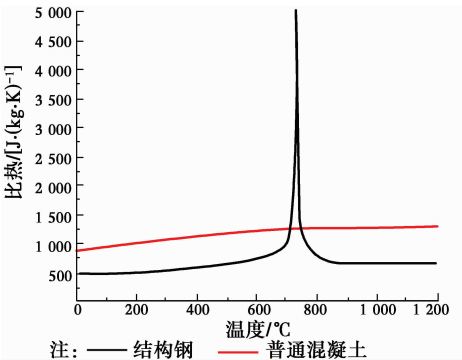


图 3 结构钢及普通混凝土比热

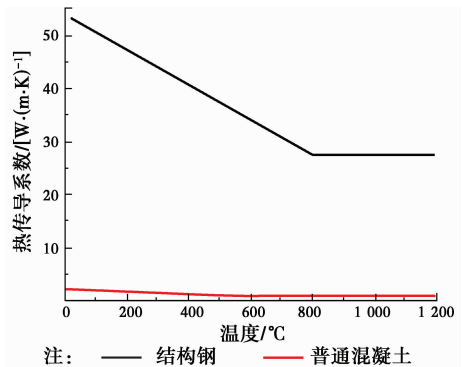


图 4 结构钢及普通混凝土热传导系数

2.2 有限元模型及其结果对比

该模型全部使用三维实体单元,单元类型为 DC3D8。假设钢管和混凝土之间完全传热,忽略接触热阻的影响,钢管与混凝土、保护层与梁、梁与端板和螺栓之间均使用绑定(tie)约束,有限元模型如图 5 所示。

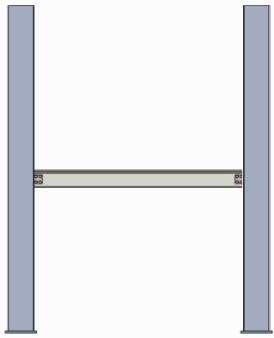


图 5 框架有限元模型

试验中梁上翼缘被 15 mm 厚矿棉包裹(图 6)。梁上翼缘的热量主要来源于 2 部分:相邻构件及矿棉的热传导。矿棉因密度不同其物理特性也各有差异,试验中使用的矿棉类型为 LR80,其物理特性参照文献[7]的取值:密度为 80 kg/m²,比热为1 000 J/kg℃,热传导系数见图 7。

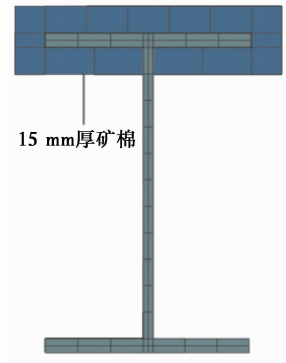


图 6 梁上翼缘防火保护层示意图

在 ABAQUS/Standard 中可以分析热传导、强制对流、边界辐射等问题,其分析类型可以是瞬态或稳态、线性或非线性^[8]。本文采用瞬态非线性传热分析,有限元方法将问题在空间中离散化,对于瞬态传热问题,控制方程必须通过时间积分进行求解。在 ABAQUS 中对瞬态固体传热进行时间积分的操作是利用后向差分算法,该方法是无条件稳定的^[9]。

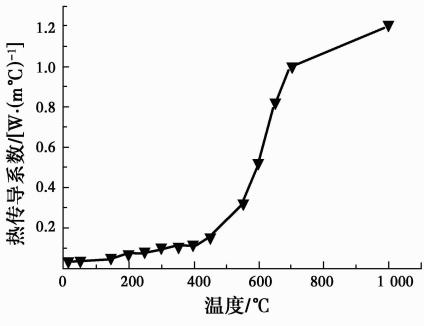


图 7 LR80 矿棉热传导系数

火炉内热量通过热对流和热辐射传递给钢框架,热辐射系数是衡量物体表面接近理想黑体的指标,其取值因火炉不同而略有差异,本文参考文献[10]取 0.2。对流换热系数参照 EN 1991-1-2,取 25 W/m²K。考虑试验中的受火情况,取受火高度为 1.5 m。假定该区域内空气温度分布均匀,升温阶段按照 ISO834^[11]进行加载,30 min 后达到 827 ℃,随后进入自然冷却阶段,8 h 后炉温降至 36 ℃。

取实验中热电偶测得的梁跨中上下翼缘的温度与有限元模拟结果相比较,温度随时间变化如图 8 所示。

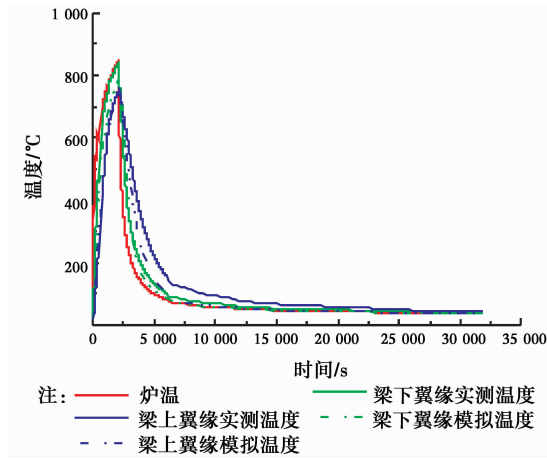


图 8 梁跨中上下翼缘温度对比

由于梁下翼缘无任何防火保护而直接暴露于空气中,故下翼缘实测温度与炉温非常接近,由此看出钢材具有极好的热传导能力。有限元模拟得到的梁下翼缘温度趋势与实测几乎无差别。由于矿棉的保护,梁下翼缘实测温度低于炉温,同时,有限元模拟结果与实测结果几乎完全相同。这说明 ABAQUS 不但能够计算普通钢构件的温度分布,同时还能够用于有复杂防火保护的构件升温及降温计算。梁高方向温度分布如表 1 所示。

表 1 梁高方向温度分布

时间/min	10	30	60	300
温度分布				

依照 ISO834 升温曲线加热到第 10 min 时,炉温达到 678 ℃,梁下翼缘直至腹板中部温度相差不

大,接近 500 ℃。但在腹板靠近上翼缘处温度变化梯度较大,上翼缘温度在 320 ℃附近,这是由于上翼

缘包裹的石棉有效降低了上翼缘及部分腹板的温度。第 30 min 时,炉内停止加热,炉温达到了 841 ℃。此时整个梁截面高度方向温度相差 50 ℃以内,腹板最高,下翼缘次之,上翼缘居末。第 1 h 时,结构经历了 30 min 的自然冷却,温度下降非常明显,此时上翼缘最高温度为 348 ℃,下翼缘最高温度为 208 ℃,造成 140 ℃温差的原因是上翼缘被石棉包裹,不易散热,表现出热惰性。第 5 h 时,经历了 4.5 h 自然冷却后,构件的温度与炉温相差越来越小,热量传递趋于静止。

3 参数化火灾模型下的温度场分布

3.1 参数化火灾模型曲线

在指令性设计法中,只考虑了 ISO834 标准火灾模型。然而,对于不同火灾持续时间和冷却时间的

火灾模型,构件的火灾敏感性往往相差较大,因此应予以充分的考虑。标准火灾模型无法考虑建筑中燃料数量不同、燃烧率不同等多种因素,而这些因素往往对火灾下实际结构的性能有显著影响。同时,在进行结构的抗火性能评估时,应该考虑火灾的冷却阶段,而标准火灾模型却不包括冷却阶段。参数化火灾模型既考虑了标准火灾模型的燃烧程度,又考虑了冷却阶段的影响,现已广泛应用于结构抗火设计中^[12]。

商业建筑中,随着建筑布局及功能的多样化,多种参数火灾模型将会出现。EN1991 参数火灾模型^[13]与房间的几何形状、通风率及火灾荷载密度密切相关。通过调整通风面积和火灾荷载密度得到了 6 种火灾模型,如表 2 所示。

表 2 不同参数下的火灾模型

模 型	总面积 A_t/m^2	楼板面积 A_f/m^2	通风面积 A_v/m^2	平均开口 高度/m	火荷载密度/ (MJ/m ²) [J/(m ² · s ^{1/2} · K)]	参数 B/ [J/(m ² · s ^{1/2} · K)]	开口因子 $O/m^{1/2}$	燃料控制的 燃烧时间/min
模型一	81	18	3.89	1.56	750	1 742	0.06	15
模型二	81	18	2.59	1.56	750	1 742	0.04	15
模型三	81	18	1.30	1.56	750	1 742	0.02	15
模型四	81	18	3.89	1.56	450	1 742	0.06	15
模型五	81	18	3.89	1.56	1 350	1 742	0.06	15
模型六	81	18	3.89	1.56	2 250	1 742	0.06	15

上述 6 种火灾模型可以分为 2 种情况:不同开口因子和不同火灾荷载密度。模型一、二、三因通风面积不同开口因子分别为 0.06,0.04,0.02;模型四、五、六在其他参数均相同的情况下仅火灾荷载密度不同,分别为 450、1 350、2 250 MJ/m²。上述 2 种情况如图 9 和 10 所示。参数 B 是火灾房间壁面的热惰性,其取值与壁面材料的比热容、密度及导热系数有关。室内火灾一般可分为通风控制型和燃料控制型,这两种类型的火灾存在界限升温时间 t_{lim} ,火灾发展速率不同, t_{lim} 的取值也不同。对于低速发展火灾来说, $t_{lim}=25$ min;对于中速发展火灾来说, $t_{lim}=20$ min;对于快速发展火灾来说, $t_{lim}=15$ min^[14]。本文火灾模型均为快速发展火灾,故燃料控制的燃烧时间为 15 min。上述 6 种火灾模型的最大升温时间 t_{max} 均大于 15 min,故均为通风控制型火灾。参数化火灾模型的具体计算公式参照 EN1991 1-2。

当开口因子 O 取值不同时, O 越小意味着通风条件越差,燃烧所能达到的最高温度也就越低;火灾

的持续时间也越长,这是冷却阶段较长的缘故。同时,随着通风条件的增强,可以支持燃烧的氧气增多,火灾达到的最高温度也会增大,直到达到某一点,最高温度开始下降。在该点处,火灾从通风控制性转变为燃料控制型。

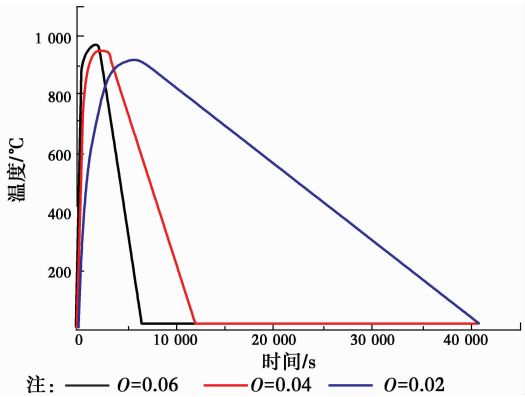


图 9 不同火灾荷载密度的火灾模型

当火灾荷载密度取值不同时,火灾荷载密度越小,火灾规模也应越小。随着火灾荷载密度的增大,火灾逐渐由燃料控制型转变成通风控制型^[15]。

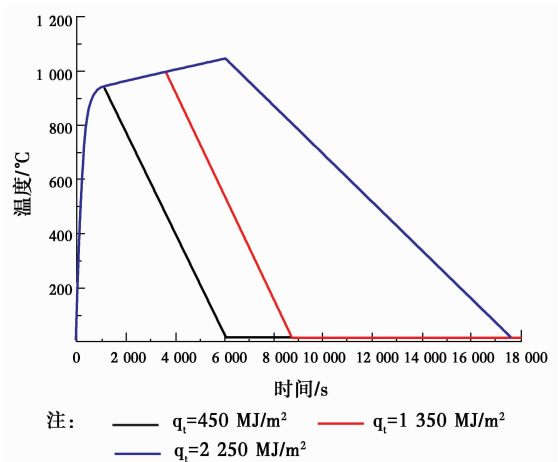


图 10 不同开口因子的火灾模型

子及不同火灾荷载密度下,梁上下翼缘时间—温度曲线,如表 3 所示。

火灾模型一、二、三分别对应开口因子 0.06, 0.04,0.02,火灾模型四、五、六分别对应火灾荷载密度为 450,1 350,2 250 MJ/m²。从表 3 可以看出:相同的火灾模型下,梁上翼缘温度低于下翼缘温度,这与标准火灾曲线中的温度分布一致;不同的火灾模型下,在火势发展阶段,钢构件的温度均低于环境温度,在火势消退过程中钢构件的温度均高于环境温度;对于开口因子不同的火灾模型来说,开口因子越小,钢构件温度与火灾中的环境温度就越接近,这将为通风条件较差的防火分区提供简化防火设计(即防火设计时近似认为钢构件温度等于环境温度);对于不同火灾荷载密度的火灾模型来说,火灾荷载密度同最大燃烧时间和火灾的所能达到的最高温度成正相关,这一关系对于受火钢构件来说同样成立。

3.2 参数化火灾模型下构件温度分布的有限元模拟

基于标准火灾下构件有限元模拟结果准确性,在受火面及材料热物理特性不变情况下,修改炉温曲线为上述 6 种火灾模型,分别得到了不同开口因

表 3 不同参数下梁上下翼缘温度

影响 因素	梁上翼缘		梁下翼缘	
开口 因子				
	注: — 火灾模型一 - - - 模型一下构件温度 — 火灾模型二 - - - 模型二下构件温度 — 火灾模型三 - - - 模型三下构件温度		注: — 火灾模型一 - - - 模型一下构件温度 — 火灾模型二 - - - 模型二下构件温度 — 火灾模型三 - - - 模型三下构件温度	
火灾 荷载 密度				
	注: — 火灾模型四 - - - 模型四下构件温度 — 火灾模型五 - - - 模型五下构件温度 — 火灾模型六 - - - 模型六下构件温度		注: — 火灾模型四 - - - 模型四下构件温度 — 火灾模型五 - - - 模型五下构件温度 — 火灾模型六 - - - 模型六下构件温度	

4 结 论

1) 通过与已有实验数据的对比发现, ABAQUS/Standard 不仅能够准确地预测普通钢构件的温度分布, 同时还能够用于计算有复杂防火保护的构件升温及降温计算。

2) 火灾模型与房间的几何形状、通风率及火灾荷载密度密切相关, 建立符合实际情况的参数化火灾模型更有利于结构抗火设计。

3) 通过对比框架在标准火灾模型(ISO834)及其他 6 种火灾模型下的温度分布, 进一步证实了不同火灾发展因素对构件升温及降温有显著影响。

参考文献:

- [1] GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [2] GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范[S]. 2005.
- [3] 李国强, 韩林海. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [4] Ding J, Wang Y C. Experimental study of structural fire behavior of steel beam to concrete filled tubular column assemblies with different types of joints [J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3485-3502.
- [5] Eurocode EC3: Design of steel structures part 1. 2: general rules-structural fire design [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [6] Eurocode EC4: Design of composite and concrete structures part 1. 2: general rules-structural fire design [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [7] Wang H B. Heat transfer analysis of components of construction exposed to fire [D]. Manchester: University of Salford, 1995.
- [8] 庄茁, 张帆. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] ABAQUS analysis user's Manual version 6. 13 [CP]. ABAQUS Inc. 2013.
- [10] Ding J, Wang Y C. Temperatures in unprotected joints between steel beams and concrete-filled tubular columns in fire [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(1): 16-32.
- [11] International Standards Organization (ISO). ISO 834: Fire resistance tests, elements of building construction [S]. Switzerland, 1980.
- [12] 余红霞, 余新盟, 于潮鸣. 结构火灾安全设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [13] Eurocode EC1: Actions on structures Part 1. 2: general actions: actions on structures exposed to fire [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [14] Franssen J M, Kodur V, Zaharia R. Designing steel structures for fire safety [M]. London: CRC Press/Balkema, 2009.
- [15] Hamilton S R. Performance-based fire engineering for steel framed structures: a probabilistic methodology [D]. California: Stanford University, 2011.

(编辑 薛婧媛)