

火灾模型对钢交错桁架结构性能化防火设计的适用性分析^{*}

陈长坤, 张 冬, 刘广林

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 对目前性能化防火设计中常用的4种火灾作用模型进行了分析和总结, 并运用这4种模型对钢结构交错桁架在火灾时的热环境进行了模拟, 分析不同火灾作用模型下该体系的结构响应, 研究不同火灾作用模型对交错桁架结构性能化防火设计的适用性。研究表明: 火源功率、火灾载及火灾持续时间等因素对钢结构交错桁架的防火分析具有重要影响。国际标准升温曲线和参数化室内升温曲线不考虑火源功率、建筑通风口等因素, 缺乏针对性, 分析结果偏于保守; 区域模型所得温度偏低, 不宜用于交错桁架结构的性能化防火设计; 场模型考虑了火源功率及环境温度分布的不均匀性, 和实际火灾较接近, 计算结果相对较为准确, 可用于结构的性能化防火设计。

关键词: 火灾模型; 交错桁架; 结构抗火; 钢结构

中图分类号: X928.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)01-0093-05

0 引言

钢交错桁架结构是一种新型的抗侧力体系^[1]。目前在国外已经得到推广与应用, 但在我国并无工程实例。防火设计理论的不完善是制约钢交错桁架结构推广的一个重要因素。

目前针对钢交错桁架结构的抗火性能研究, 国内外相关报道还很少。美国钢结构学会在2002年推出的交错桁架体系设计指南——Steel Design Guide Series 14: Staggered Truss Framing System^[2]是目前国际上较权威的交错桁架体系设计指导性文献, 但其中防火设计部分也主要是对普通钢结构防火设计理论的拓广应用。现有的研究成果还未形成完善的防火设计理论。因此对于钢交错桁架结构, 采用性能化的抗火设计是必要的。

在钢结构建筑的性能化抗火设计中, 保证建筑具有足够的耐火时间是进行性能化设计的重要依据。钢结构建筑的耐火时间与火灾时空气的温升过程密切相关。为了得到真实的钢结构建筑耐火时间, 必须较为准确地预测火灾情况下空气的温升过程, 而火灾情况下空气的温升过程又取决于所采用的火灾作用模型。因此研究不同火灾作用模型对钢结构抗火分析的影响, 对结构的性能化抗火设计有着十分重要的意义。

目前在建筑性能化防火设计中常用的4种室内火灾作用模型为: 国际标准升温曲线 ISO834、参数化的室内升温曲线、区域模型和场模型^[3]。本文以钢结构交错桁架作为分析对象, 运用上述4种火灾作用模型分析钢结构火灾的热环境, 研究其对钢结构交错桁架体系抗火性能的影响, 讨论各种火灾作用模型的优缺点及其在钢结构交错桁架抗火分析中的适用性。

1 钢结构性能化抗火设计步骤

钢结构的性能化抗火设计主要包括以下3个步骤: 首先根据选取的火灾作用模型确定着火空间环境温度, 进而得到钢构件内部温度场, 然后根据构件内部温度场分析结构在火灾作用下的响应。具体分析步骤如图1所示。

2 火灾作用模型分析

2.1 国际标准升温曲线

国际标准火灾升温曲线 ISO834 是国际标准化组织制定的一条理想化的火灾温度-时间理论试验曲线, 其表达式如下:

$$T_i = 345 \lg(8t + 1) + T_0, \quad (1)$$

式中: t 为加热时间(min); T_i 为受火 t 时间后的

^{*} 收稿日期: 2009-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50706059)

作者简介: 陈长坤(1977-), 男, 福建福安人, 副教授, 博士, 从事钢结构火灾安全研究. E-mail: cckchen@mail.csu.edu.cn

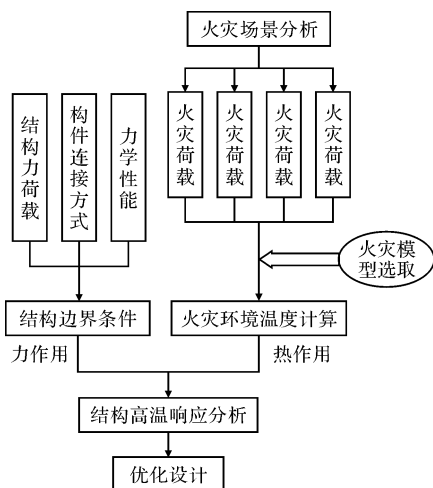


图1 钢结构性能化抗火设计流程图

炉内温度(℃); T_0 为炉内初始温度(℃)。

2.2 参数化的室内升温曲线

室内升温曲线可以根据参数方程的方法获得。目前,国内外学者提出了多种求解室内温度的参数方程^[4]。其中具有代表性的 ENV 1991-2-2 推荐的方法中,火灾过程温度可由下列公式获得^[4]。

火灾增长阶段室内温度:

$$T_i = 1\,325 \left[1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.427e^{-19t^*} \right], \quad (2)$$

火灾衰减阶段室内温度:

$$\begin{cases} t_d^* \leq 0.5 \text{ h 时}, T_g = T_{\max} - 625(t^* - t_d^*), & (3) \\ 0.5 \text{ h} \leq t_d^* \leq 2 \text{ h 时}, T_g = T_{\max} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*), & (4) \\ t_d^* > 2 \text{ h 时}, T_g = T_{\max} - 250(t^* - t_d^*), & (5) \end{cases}$$

式中: T_i 为受火 t 时间后炉内温度(℃); $t^* = t\Gamma$,

t 为受火时间(h), $\Gamma = \left(\frac{F}{\sqrt{\rho c \lambda}} \right)^2 / \left(\frac{0.04}{1\,160} \right)^2$, 其中,

$\sqrt{\rho c \lambda}$ 为室内边界的热惯量, F 为通风因子, 可通过公式 $F = A_w \sqrt{H} / A_T$ 求得, A_w 为开口面积, A_T 为室内内表面总面积; $t_d^* = 0.13 \times 10^{-3} q_{i,d} / F\Gamma$, $q_{i,d}$ 为火灾荷载(MJ/m^2)。

2.3 区域模型

区域模型是以受限空间中的火灾为研究对象的半物理模拟,将受火空间分为不同区域,假定每个区域中压力、密度、温度、烟气浓度等物理参数均匀一致^[3]。区域模型在描述火灾燃烧时进行了较大简化,无法得到火灾的某些细节,但其保留了火灾燃烧系统的复杂性机制,因此在性能化设计中仍得到较广泛的运用,例如,田玉敏等人即采用区域模拟对某歌剧院火灾进行数值模

拟^[5]。双区域模型是最简化也是最常用的区域模型。常用的区域模拟软件有 CFAST 等。

2.4 场模型

场模型将受火空间划分为许多相互关联的单元,通过求解控制火灾过程中的一系列质量、能量、动量守恒的偏微分方程,得到该空间的温度场、流速场及组分浓度场等时间空间分布^[6]。目前,常用的场模拟软件有 FDS、Phoenixs 等。场模拟在性能化防火设计中得到了较为广泛的应用,Rehm 等人曾用 FDS 分析 911 事件中世贸中心火灾过程^[3,7]。

可以看出,以上 4 种模型各有优缺点,其中场模型由于考虑火灾作用下室内温度的不均匀分布,和真实火灾较接近。

3 分析模型及假设

分析对象为 6 层钢交错桁架体系建筑模型。建筑共有三榀桁架,跨度 12.5 m,其中中间桁架底层受火灾作用。受火交错桁架结构如图 2 所示。其中柱和弦杆分别采用 350 mm × 350 mm × 16 mm 和 200 mm × 200 mm × 10 mm 的方钢管,腹杆采用 160 mm × 160 mm × 10 mm 方钢管,钢材料为 Q235。高温下钢材材料参数均按照欧洲规范 EUROCODE3^[8]选取,钢材热膨胀系数为: $\alpha_s = 1.4 \times 10^{-5}$ 。弦杆与外柱铰接,腹杆与弦杆铰接,弦杆间刚接。弦杆受均布荷载作用,荷载比为 0.4。

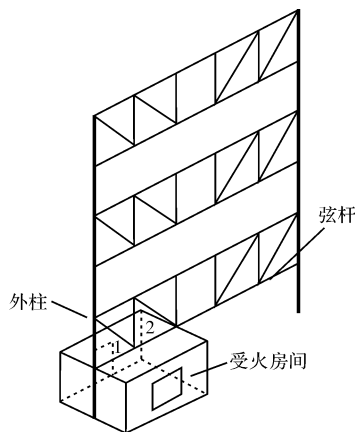


图2 受火交错桁架示意图

在分析过程中,假定墙体隔热性能良好,外柱被墙体保护较好,受火灾影响较小,仅火源正上方一层桁架下弦杆受火灾影响较大,受火构件截面温度均匀分布。同时,在分析中不考虑钢构件的不完整性、初弯曲、残余应力和弯扭屈曲。

发生火灾的房间如图3所示,房间尺寸为5 m×4 m×3 m(长×宽×高),窗尺寸为1.8 m×1.5 m(宽×高),底边距室内地面1 m,门尺寸为1.2 m×2 m(宽×高)。交错桁架弦杆1和弦杆2位于受火房间屋顶中部。受火房间模拟过程中只考虑火灾对着火房间的温度影响,火源位于房间中部,火灾发展为 αt^2 增长型, $\alpha=0.0469$,火灾荷载为360 MJ/m²,火源功率为1 MW、2 MW。

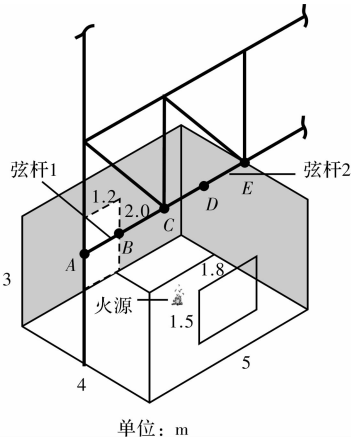


图3 受火房间示意图(受火房间位置见图2)

4 结果分析

具体分析时,区域模型和场模型的火灾热环境温度分别采用相应软件 CFAST 和 FDS 模拟获得,并运用有限元软件 ANSYS 对钢构件内部温度场和高温下钢结构交错桁架结构的力学响应进行模拟分析。

4.1 热环境温度

图4给出了火源功率为1MW和2MW时不同火灾模型作用下室内环境温升曲线,其中场模拟给出的是火源正上方C点位置(C点位置见图3)的温度随时间变化的曲线。从图4中可以看出,在火灾初始阶段,根据各种不同火灾作用模型得到的温升较接近。但是火灾发展到一定阶段后,采用各模型得到的室内温度差别较大。其中采用区域模拟得到的室内温度较低,这可能是由于钢交错桁架结构建筑的层高较小,不易形成稳定的烟气层引起的。同时,火源功率对室内温度有很大影响,当室内火源功率为2MW时,在火灾发生2 min后,火源正上方C点处的温度较高,随后保持稳定。

采用场模拟能够获得火灾过程中温度的空间分布,因此,可以得到火灾作用下沿构件轴向的空气温度分布。由于火源左右两侧沿弦杆方向温度变化大致相同,图5给出了火源功率为1MW时

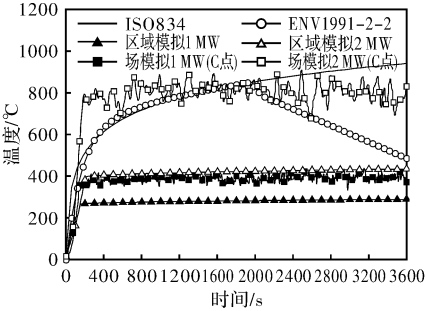


图4 不同火灾作用模型下热环境温度变化曲线

弦杆1靠墙端A点、弦杆中部B点和火源正上方C点三个特征位置的空气温度变化曲线(A、B、C位置见图3)。由图中可以看出,场模拟得到的结果中,着火房间温度沿构件轴向方向的温度相差较大,且离火源位置越远温度越低,这与实际情况较为一致。火源功率为1MW时,离火源最远处的A点和火源正上方C点的温差接近200℃。火源位置正上方由于受羽流的影响,温度波动较大。火源功率为2MW时情况类似。

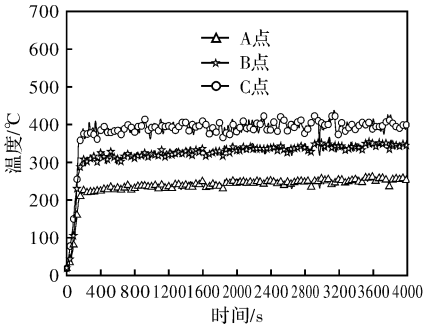


图5 火源功率1MW场模拟沿弦杆纵向环境温度曲线

4.2 构件内部温度

图6给出了不同火灾作用模型下,受高温作用的钢构件内部温度场随时间变化曲线。其中场模拟选取的截面位置为火源正上方C点处钢构件截面。由图可知,火灾热环境直接影响钢构件的内部温度场,环境温度越高,构件内部温度越高。不同火灾作用模型下钢构件内部温度场变化存在较大的差别。图7给出了火源功率为1MW时受火钢构件沿轴向方向温度场分布情况。由图中可以看出,钢构件内部温度沿轴向分布不均匀,离火源位置越近温度越高,离火源位置较远的钢构件截面温度较低,这和热环境温度场的分布规律是一致的。

4.3 结构响应分析

图8给出了不同火灾作用模型下,钢交错桁架结构受火弦杆B点截面竖向位移随时间的变化曲线。由图8中可以看出,由于在火灾初始阶段高温

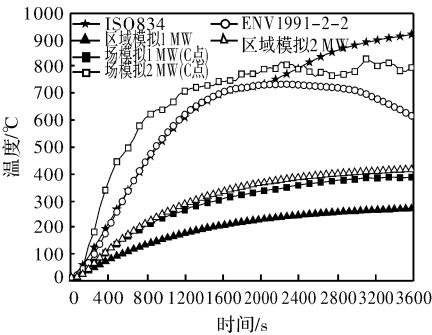


图6 不同火灾作用模型下构件内部温度比较

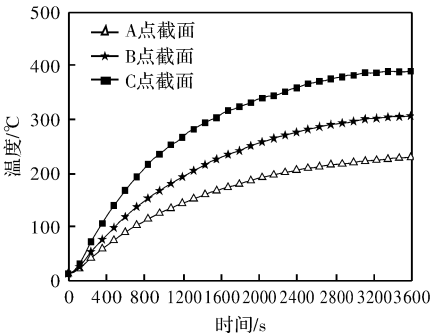


图7 火源功率1MW 场模拟构件轴向各内部温度曲线

的作用，国际标准升温曲线、参数化室内升温曲线模型和场模拟 2MW 火源下，结构在较短时间内失效。不同火灾作用模型下结构失效时间如表 1 所示。由表 1 可知，参数化室内升温曲线虽然考虑了火灾衰减阶段，但由于其对升温阶段的计算不考虑火源功率的影响，其所描述的室内温度依然较高，使得结构在 1 056 s 内失效。结合图 9 中给出的不同火灾作用模型下 B 截面弯矩随时间变化曲线可看出，在火灾作用下，虽然场模拟 2MW 火源下得到的交错桁架体系火源正上方钢构件截面温度较高，但由于钢构件内部纵向温度场的不均匀分布，导致弦杆 B 截面位移和弯矩却较小，结构失效时间也长，为 1 107 s。由此可见，构件纵向温度场分布对交错桁架抗火性能有较大影响。因此，在对交错桁架进行抗火分析时考虑构件内部温度场的不均匀分布是必要的。

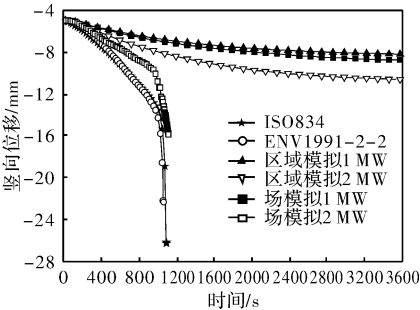


图8 不同火灾作用模型下 B 截面竖向位移曲线比较

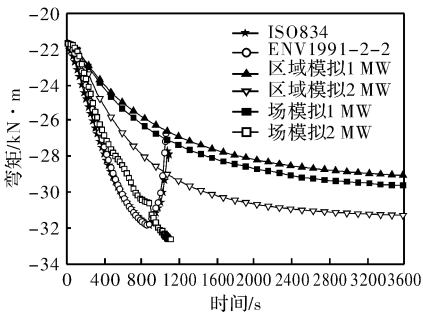


图9 不同火灾作用模型下 B 点弯矩 - 时间曲线比较

表 1 不同火灾模型下结构失效时间

火灾模型	火源功率/MW	失效时间/s
ISO834	—	1 087
ENV1991-2-2	—	1 056
区域模拟	1.0	未破坏
	2.0	未破坏
场模拟	1.0	未破坏
	2.0	1 107

注：火灾荷载为 360 MJ/m²

5 结论

通过研究不同火灾作用模型下钢结构交错桁架体系的力学响应，可以发现不同火灾作用模型对交错桁架体系的抗火分析结果具有较大的影响。

(1) 场模型考虑了火源功率及热环境温度分布的不均匀性，能较真实地模拟火灾，可用于钢交错桁架结构性能化抗火设计的细致分析。但值得注意的是，场模拟得到的火场热环境温度与建筑房间的布局联系密切。建筑房间布局在使用中可能发生改变，将影响设计结果的可靠性。因此，建筑布局如发生变化，应进行结构耐火复核，排除对结构具有高风险影响的布局。

(2) 国际标准升温曲线对火灾热环境的确定有一定的局限性。运用其进行钢交错桁架的性能化抗火分析时，分析结果可能与实际情况有一定偏差，从而导致建筑的防火设计偏保守。但国际标准升温曲线不受受火空间形状、燃料分布等因素的限制，其结果仍具有较好的参考价值。

(3) 火灾的衰减阶段的降温和火源功率也会对结构的抗火性能产生一定影响。因此在进行钢结构交错桁架抗火分析时，考虑火源功率、火灾荷载及火灾持续时间等因素的影响是必要的，在能够准确确定以上室内参数时，采用参数化的室内升温曲线对热环境进行分析更为符合实际。但是，

ENV 1991 - 2 - 2 在火灾增长阶段不考虑火源功率对室内温升的影响，因此其升温曲线也缺乏针对性。

(4) 由于钢交错桁架结构的层高较小，在火灾比较大的情况下，不易形成稳定的热烟气层，如采用区域模型，所得的只是室内热烟气的平均温度，无法给出对结构有重要影响的局部高温，这将无法保证设计结果的可靠性与安全性，因此在钢交错桁架结构的性能化抗火设计中不宜选用区域模型对火灾热环境进行分析。

参考文献：

[1] Jinkoo Kim, Joon - ho Lee, Young - moon Kim. Inelastic Behavior of Staggered Truss Systems [J]. Struct. Design Tall Spec.

build, 2007, 16(1): 85 - 105.

[2] AISC. 2002. Steel Design Guide 14: Staggered Truss Framing System [R]. American Institute of Steel Construction: Chicago.

[3] 裴蓓, 余明高, 刘华. 建筑火灾烟气运动数值模拟方法及评价[J]. 河南理工大学学报, 2008, 27(1): 12 - 16.

[4] John A. Purkiss. Fire Safety Engineering Design of Structures [M]. Oxford: Butterworth - Heinemann, 1996.

[5] 田玉敏, 梁强. 歌剧院火灾场景下人员疏散安全性的检验[J]. 消防科学与技术, 2007, 26(2): 149 - 153.

[6] 安永林, 彭立敏, 杨伟超. 基于 FDS 仿真火灾温度下隧道衬砌安全评估[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 96 - 100.

[7] Rehm R G, Pitts W M, Baum H R, et al. Initial model for fires in the world trade center towers [R]. Gaitherburg: Building and Fire Research Laboratory, NISTIR6879, 2003.

[8] Eurocode3 Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules, Structural Fire Design [S]. London: British Standards Institution, 2000.

Applicability Analysis of Fire Models in Performance-based Fire Protection Design for Steel Staggered-Truss System

Chen Changkun, Zhang Dong and Liu Guanglin

(Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Four kinds of fire models, which are commonly used in performance-based fire protection design are analyzed and summarized. The fire environment of steel staggered-truss is simulated using these four models. The effect of different fire models on fire-resistance analysis of steel staggered-truss is explored. And the applicability of fire models to the performance-based fire protection design on steel staggered-truss structure is discussed further. The result indicates that the rate of heat release, fire load and fire duration can make great influence on the fire resistance analysis of steel staggered-truss system. ISO834 and parametric equation approach are lack of pertinence. The results may be too conservative. The temperature obtained by zone model is low, so that it is not suitable for the performance-based fire protection design on this structure. Field model considers the heterogeneity of environmental temperature, and its result is close to the real fire, so that it is commended to the performance-based fire protection design on steel staggered-truss structure.

Key words: fire model; staggered truss; fire resistance of structure; steel structure