

文章编号: 1006—2106(2009)12—0102—04

# 福州南站房屋面钢结构性能化防火评估与设计<sup>\*</sup>

张 峰<sup>1\*\*</sup> 史健勇<sup>2</sup> 于文静<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063 2 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 研究目的: 福厦铁路福州南站建筑功能复杂, 建筑结构选型独特。站房广厅和候车大厅采用超大空间的建筑布局, 超出了国内现有建筑防火设计规范的有关规定。特别是对于屋盖体系这样重要的钢结构, 套用国内现有规范方法难以满足防火安全性与经济性要求。基于性能化设计思想, 对南站站房工程钢屋盖主体结构的防火安全性进行了评估。首先确定钢结构防火性能目标, 其次对整体结构在可能最不利火灾场景下的力学性能进行分析, 最后根据结构的受火性能是否满足防火性能目标来评估结构的防火安全性及需要采取的防火保护措施。

**研究结论:** 通过性能化分析, 确定了站房工程的防火设计和技术措施, 研究结果也已获得消防评估专家组的认同和采纳, 可供类似工程的结构防火设计参考。

**关键词:** 性能化; 钢结构; 防火; 火灾场景

**中图分类号:** TU998.1 **文献标识码:** A

## Performance—characterized Assessment and Design of Fire Protection for Roofing Steel Structure of Fuzhou South Railway Station

ZHANG Feng, SHI Jian—yong, YU Wen—jing

(1. China Railway Survey and Design Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430063, China; 2. Shanghai Jiaotong University Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Research purposes: The Fuzhou South Railway Station of Fuzhou—Xiamen Railway is complicated in architectural function with unique style in architectural structure. The large space architectural arrangement is adopted to the station hall and the waiting room, which goes beyond the regulation for fire protection stipulated in the relative design code in China. Using the method stipulated in the current Chinese code is difficult to meet the security and the economic requirement of the fire protection for the important steel roof system. Thus, based on the performance—characterized design thoughts, the security of fire protection is assessed to the main structure of steel roof. First, the target of fire protection of the steel structure is determined. Then the mechanical performance of the whole structure in the probable worst fire situation is analyzed. At last, the security of fire protection and necessary measure for fire protection are evaluated according to whether the security of fire protection can meet the performance target of the fire protection or not. Research conclusions: Through performance—characterized analysis, the reasonable and economical design of fire and the technical measures are determined for the station building. The research result is accepted by the experts of the fire protection and can be as reference to the fire protection design of the similar structure.

**Key words:** performance—characterized; steel structure; fire protection; fire disaster scene

\* 收稿日期: 2009—10—13

\*\* 作者简介: 张峰, 1963年出生, 男, 高级工程师。

## 1 福州南站概况

福州火车南站 2030 年设计年旅客发送量为 1 600 万人, 高峰小时上车人数 7 200 人, 旅客最高聚集人数 6 000 人, 车站设正线 2 条、旅客列车到发线 12 条, 基本站台 2 座, 中间站台 5 座。其站房工程由东、西站房综合楼、换乘广场、高架车道及落客平台、站台无柱雨棚等单项工程组成。其中, 东、西站房综合楼建筑面积为 49 986 m<sup>2</sup>, 建筑高度 53.49 m, 地面以上 3 层。东、西站房广厅的室内空间高达 35 m 以上, 首层地面相对标高为 ±0.000 m, 二层楼面标高为 6.60 m, 三层楼面标高为 14.60 m。其中自标高 6.6 m 以上设有高达 35 m 左右的挑空广厅。候车大厅及东、西站房中部设有地下二层地铁车站, 埋深 14.40 m。

东、西站房综合楼采用钢筋混凝土框架结构体系, 屋面采用大跨度双向空间钢桁架结构体系, 由东、西两个站房坡屋面及平屋面组成。结构形式上, 南北向跨中采用了张弦梁结构形式, 每隔 12 m 设置一榀, 共 9 榀, 支承在下部混凝土柱子或混凝土梁上。南北向两端屋面由于坡度较小且室内部分需要吊顶, 结构高度有一定的限制, 因此采用平面桁架结构形式, 南北两端各 2 榀。跨中 7 榀张弦梁钢结构的上弦采用方钢管, 两端 2 榀采用 3 m 高的平面桁架。由于站房南北向两端各悬挑 12 m, 因此在南北向每隔一定间距布置一榀平面桁架。同时为了满足屋面支撑设计的需要, 沿每榀 12 m 主结构的中间位置布置横梁, 这样将结构在南北向划分为 6 m × 6 m 的网格。

福州南站东、西站房综合楼功能复杂, 建筑空间大、且各空间相互连通, 客流量较大、人流流线设计要求高。由于铁路旅客站房建筑功能的特殊性, 现行的防火设计规范未能涵盖此类建筑, 难以完全执行现行的防火设计规范相关规定。

本文遵循安全适用、技术先进、经济合理的原则, 采用以性能化为基础的消防设计理念和办法, 通过对结构整体在可能最不利火灾场景下的力学性能进行分析, 以评估结构的受火性能是否满足抗火性能安全目标, 并据此确定需要采取的防火保护措施。

## 2 传统抗火设计方法的不足

我国《建筑防火设计规范》<sup>[1]</sup>和《高层民用建筑设计防火规范》<sup>[2]</sup>仍采用传统方法进行钢结构抗火设计, 即根据建筑的功能与重要性及结构构件的重要性, 确定建筑的耐火等级及相应各种结构构件的耐火极限, 然后基于标准构件 (一般为标准梁) 的标准升温试验结果, 确定满足规范耐火极限要求的结构防火保护

措施。按照《建筑防火设计规范》福州南站东、西站房综合楼钢屋盖的耐火极限应不低于 1.5 h, 必须以相应厚度的防火涂料进行保护。由于传统方法既不考虑实际火灾对结构真实升温的影响, 也不考虑实际结构 (作为一个整体) 在火灾下的真实状态, 因此得到的防火设计结果有可能并不安全, 也可能过于保守 (有时实际结构并不需要防火保护), 造成不必要的浪费, 并影响建筑美观与使用。

性能化抗火设计与当前规范的指令性规定不同, 不明确规定结构抗火设计的具体解决方案, 而是确定结构抗火设计的目标 (总体目标和相应的功能目标) 及相关功能目标, 通过具体建筑的火灾场景模拟及实际结构的受火性能分析, 提出满足结构抗火性能目标的解决方案<sup>[3-5]</sup>。

## 3 火灾温度场分析

由于福州南站东、西站房综合楼室内空间高大通透, 因此采用流体力学原理进行高大空间火灾模拟, 确定最高空气温度。

### 3.1 火灾场景设计

火灾场景模拟是根据建筑的防火分区类型、火荷载类型、数量及分布情况、建筑开口情况、主动消防设施等情况, 预测出未来可能发生火灾时建筑中温度变化及烟气运动规律。温度是影响结构抗火设计的重要因素, 因此火灾场景模拟不仅是性能化火灾安全设计的基础, 也是抗火设计的基础。在本项目中, 根据危险性分析设计有多种火灾场景, 本次场景模拟从保证结构安全的角度进行设计。

**3.1.1 该场景的火源点设在站台层广厅 14.6 m 平台上, 模拟商业 (燃料岛) 火灾, 该位置处于屋盖钢结构下方, 是人员活动区域距离屋面体系最近的高度, 发生火灾对屋面结构体系的影响最大。**

**3.1.2 火灾荷载的设定。**火灾的设定就是要依据建筑物的结构和可燃物的种类、数量与分布, 确定在预期的火灾过程中热释放速率的变化规律。由于站房结构的空比较大, 根据其中可燃物数量, 参考国内外相似的特征火灾荷载调查数据, 确定此次模拟的火灾规模的大小为 8 MW。实际火灾规模偏安全的取为 10 MW。

**3.1.3 火灾增长曲线的设定。**适用于快速 t<sup>2</sup> 火, 其热释放速率公式:

$$Q = \alpha \cdot t^2 \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——火灾热释放速率;

$t$ ——火源点燃后的时间;

$\alpha$ ——火灾增长系数。

(4) 考虑自然排烟, 假定喷淋失效。图 1 显示了

该火灾场景的布置。

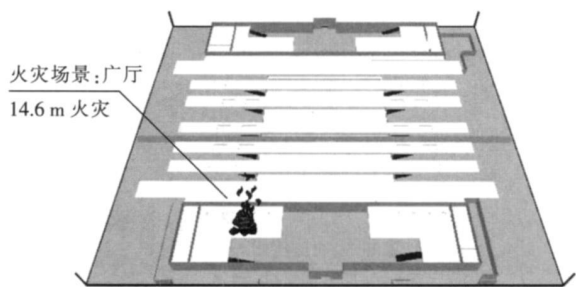


图 1 火灾场景的布置

### 3.2 火灾模拟分析

根据火灾场景的设计,首先进行火灾模拟分析。经过计算模拟,从得到的热释放速率(HRR)—时间曲线上(如图2所示)可以看出,最高温度峰值出现在400 s左右,从结果文件查得温度达425℃。随后持续稳定到模拟结束。因此,可以根据热释放速率曲线,确定屋面结构最高温度出现的时间和大小。从分析结果看出,屋面结构最高温度发生的位置位于靠近火源上方的屋面构件附近,由于钢结构受热的滞后效应,屋顶钢结构体系内部温度在800 s左右到达峰值,最高温度达95℃。另外,从垂直温度分布结果可以看出,站台层候车区平台(标高14.6 m)上方13 m以下的区域,环境温度超过了325℃的临界温度指标。

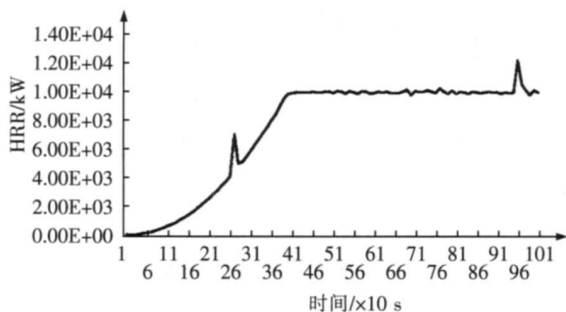


图 2 热值—时间曲线

## 4 火灾下结构反应分析

### 4.1 结构分析模型及材料特性

火灾下的结构反应采用ANSYS有限元软件进行分析。模型中杆件采用Beam44单元,索采用Link40单元,梁柱节点处的滑动支座采用Comb4单元。

结构构件钢材为Q345B,常温下的弹性模量为 $2.06 \times 10^5$  MPa,设计强度为295 MPa,泊松比为0.3,热膨胀系数为 $1.4 \times 10^{-5}$ ,密度为7850 kg/m<sup>3</sup>。高温下钢材的应力—应变关系采用EUROCODE3提出的不考虑强化的光滑曲线材料模型<sup>[6]</sup>(如图3所示)。材料强度及初始弹性模量随温度的变化根据《建筑钢结构防火技术规程》<sup>[7]</sup>确定。

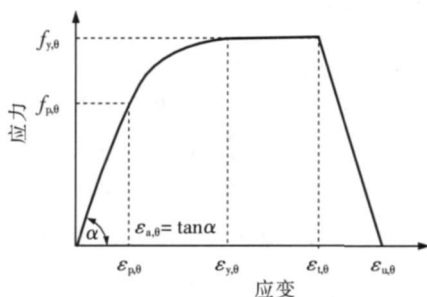


图 3 欧洲规范给出的应力—应变关系(不考虑强化)

钢结构防火安全性判定准则有3种<sup>[5]</sup>:

(1)临界温度法,根据火灾模拟的结果,判断处于较高温度区域的钢构件的耐火性能,对超过某一临界温度的钢构件可判定其失效,需要采用防火保护。

(2)判断单个构件在高温作用下的承载力和变形,以此判定其承载力和变形是否满足要求。其判定准则按照规范要求进行。承载力极限判定准则,结构的承载力 $R$ 应不小于火灾下的荷载效应 $S_d$ , $R \geq S_d$ 。

变形判定准则,即结构主要构件的变形 $\delta$ 不能超过确定的容许值, $\delta/L \leq 1/250$ 。

(3)结构体系应力判定准则,采用非线性分析的方法对整体结构进行分析,判定结构的整体力学性能,特别是监视重要构件的性能以及发现一些非受火原因而可能破坏的构件。判定准则为结构内应力不能超过对应温度下的屈服应力。本项目将采用结构体系应力判定准则为主要判定依据,辅以临界温度法判断钢结构防火安全性。临界温度判定指标采用日本耐火安全检证法提供的临界温度指标,即325℃。

### 4.2 结构整体抗火分析

热—结构耦合分析的原理是在外界环境温度已知的情况下,首先通过传热分析得到结构体系各部分随时间变化的温度场,再计算在此温度场下结构受常规荷载和其他作用共同影响下的受力状况。由于结构钢的导热性较好,目前对钢结构进行抗火计算时(尤其是整体抗火分析)多假设构件截面温度均匀分布,或者采用线性分布的温度场。这对于大空间结构来说,其屋面体系多为悬索、网架等杆系结构,即使是桁架、刚框架结构,由于其截面相对于整个体系来说,也是非常小的,因而采用以上假设是合适的<sup>[8]</sup>。

分析方法采用有限元法,采用杆单元、梁单元。分析时采用有限元非线性分析的增量平衡方程:

$$([{}^tK]_L + [{}^tK]_{NL}) \{\Delta_t u\} = \{{}^{t+\Delta t}R\} - \{{}^tF\} \quad (2)$$

式中  $[{}^tK]_L = \sum_{i=1}^{n_h} [{}^tK]_{L,i}$ ——线性刚度矩阵;

$[{}^tK]_{NL} = \sum_{i=1}^{n_h} [{}^tK]_{NL,i}$ ——非线性刚度矩阵;

$\{^t F\}$ —— 时刻的单元结点力矩阵;

$\{^t R\}$ —— 时刻的结点荷载矩阵;

$e_n$ —— 单元总数。

本工程采用热—结构耦合分析的方法对站房钢结构体系进行了火灾下的受力分析。站房屋面结构体系主要构件采用张弦梁结构, 下弦采用预应力索, 通过以往的研究和分析可知, 预应力索在高温情况下会发生松弛, 因此会对降低张弦梁的承载能力。但从前面的温度分析结果来看, 张弦梁下弦预应力拉索的最高温度不超过  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因而具有较好的安全性。但从偏安全的角度考虑, 预应力拉索应采取一定的防火保护措施, 可涂刷超薄型防火涂料。

图 4~图 5 显示了该结构体系在模拟火灾作用下力学反应状况。

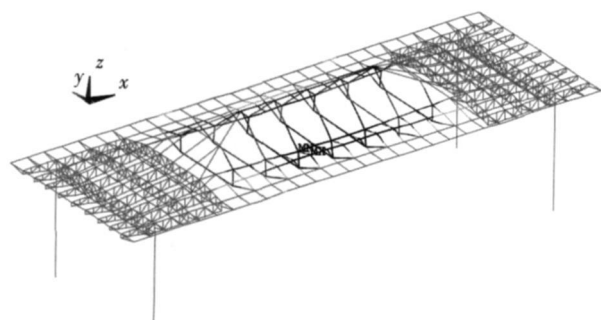


图 4 火灾下的结构位移

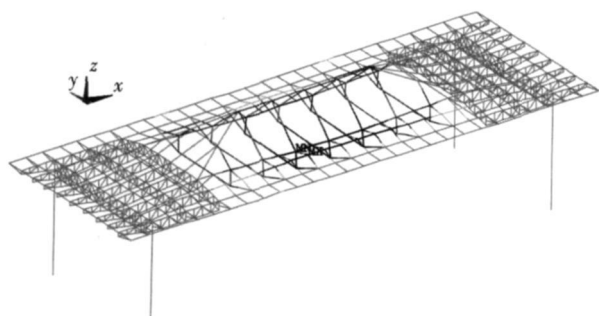


图 5 火灾下的结构应力

从结构分析中可以看出, 在火灾高温下, 张弦梁下弦预应力拉索会产生松弛, 由于张弦梁为自平衡结构, 拉索松弛会引起拱架上弦的位移增大, 但由于温度较低, 拉索内应力为  $1\ 300\text{ MPa}$ , 拱架杆件内部最大应力达  $240\text{ MPa}$  均小于极限应力, 仍处于安全范围内。此外, 靠近火源带有拉索下弦的桁架 ZHJ 在高温作用下会产生高于常温的内部应力, 应注意下弦拉索的防火保护。从得到的分析结果中还可以看出, 不仅靠近火源的构件会受到影响, 在距离火源较远的其他部位的构件内力也会随温度变化而变化, 这主要是因为火灾引起的烟气运动形成空间的不均匀温度场, 同时也由于结构整体性特点, 造成结构体系内部的内力重分

配, 使得距离火源较远的构件内部应力也会发生变动。另外, 由于设计上采用滑动支座设计, 使得屋架体系的位移变化对下部混凝土柱不会造成太大影响, 没有因为杆件膨胀而产生较大的水平推力。

### 4.3 结构抗火设计建议

本文根据设定火灾场景下的结构分析结果, 提出如下建议:

(1) 高于站台层候车区平台 (标高  $14.6\text{ m}$ )  $13\text{ m}$  以上区域的屋面钢结构受到的影响不大, 可不采取防火保护措施。

(2) 位于站台层候车区平台 (标高  $14.6\text{ m}$ ) 上方  $13\text{ m}$  以下的钢结构体系应涂刷防火涂料, 可采用耐火时间为  $1.5\text{ h}$  的超薄型防火涂料。

## 5 结论

福州南站东、西站房综合楼钢屋盖结构在火灾下, 构件的相互作用会对构件内力产生较大的影响。由于屋盖张弦梁的预应力损失造成预应力拉索的松弛, 会对其上的拱架上弦产生影响, 引起拱架上弦的位移增大。然而, 在设计的火灾场景下, 无防火保护的屋面钢结构在火灾中均能满足强度和稳定性要求, 一旦发生火灾, 钢屋盖满足“不破坏”的抗火设计目标, 故福州南站高于站台层候车区平台 (标高  $14.6\text{ m}$ )  $13\text{ m}$  以上区域钢屋盖结构无需采用防火保护。

通过对福州南站东、西站房综合楼主体钢屋盖结构进行火灾温度场模拟及整体结构抗火分析, 可得出更加合理的防火保护要求, 确保整体结构及构件在规定的耐火时间内保持结构稳定性, 保证结构抗火安全。

## 参考文献:

- [1] GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S].
- [2] GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范[S].
- [3] Meacham B. J. and Custer R. L. P. Performance based fire safety engineering: An introduction of basic concepts [J]. Journal of fire protection engineering, SFPE, Boston, 1995(2): 35—54.
- [4] 李国强, 李兆治. 钢结构性能化抗火设计的初步设想 [J]. Fire Science and Technology, 2004(1): 46—48.
- [5] 霍然, 袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003.
- [6] DD ENV 1993—1—2: 2001 Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1.2: General rules—Structural fire design [S]. 2001.
- [7] CECS200: 2006 建筑钢结构防火技术规程[S].
- [8] 史健勇, 赵金城. 复杂空间钢结构整体性防火分析的系统方法研究[J]. 土木工程学报, 2008(11): 51—62.

(编辑 梅志山)