

机场航站楼屋顶钢结构防火性能化分析

王洪欣, 查晓雄, 余 敏, 王海洋

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院 城市与土木工程学科部, 518055 广东 深圳, wanghongxin15@163.com)

摘 要: 为了得到某机场航站楼屋顶钢结构的抗火性能, 利用火灾动力学、传热学和有限元分析相结合的方法, 通过火灾危险性分析, 按照可信最不利原则设定机场航站楼结构火灾场景; 运用火灾动力学软件 FDS 和传热学公式得到火灾影响区域构件温升曲线, 建立结构有限元模型, 并结合结构荷载条件和温升曲线计算出结构在设定火灾场景下的力学性能. 结果表明: 部分结构构件在火灾下内力增加很多, 甚至接近构件在火灾温度下的设计强度, 但结构整体竖向位移相对于整体跨度较小, 整体结构仍然处于安全状态. 为了整体安全, 利用结构自身强度来进行有效的抗火设计, 通过加强空间结构的整体性和超静定次数可以有效提高结构的抗火性能.

关键词: 机场航站楼; 钢结构; 抗火性能; 防火性能化

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)08-0026-05

Performance-based fire resistance on airport terminal steel roof

WANG Hong-xin, ZHA Xiao-xiong, YU Min, WANG Hai-yang

(Civil Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055
Shenzhen, Guangdong, China, wanghongxin15@163.com)

Abstract: Fire dynamics, heat transfer and finite element analysis method were used to obtain the fire resistance of airport terminal steel structure. First, the credible and most dangerous fire scenarios of airport terminal roof were adopt. Then, the fire dynamics software FDS and the heat transfer formula were used to get the temperature rise curves in the fire affected region. Finally, the model of the structure was set up by finite element method, the load conditions and temperature rise curves were combined to calculate the mechanical properties of the structure. The result shows that the internal force of some members in the structure are increased and even close to the design strength, but the vertical displacement of the structure is relatively small to the overall span of the structure, the structure is still in safe condition. From the perspective of overall security, it is efficient to carry out the fire-resistant design of structure by its own strength, and to improve the fire-resistant properties of the structure by strengthening the integrity and increasing the number of statically indeterminate.

Key words: airport terminal; steel structure; fire resistance; performance-based fire resistance

随着航空业的飞速发展、旅客数量的大幅增加,越来越多的机场航站楼建筑采用单一大屋盖结构形式,这种结构形式的建筑通常表现为面积巨大,此外还呈现空间巨大,几层空间相互连通等建筑特点,营造出内部空间开敞通透的视觉效果和华丽的建筑外表的同时,也使结构建筑的火灾

安全设计与研究遇到了很多新的挑战. 然而国内外机场火灾事故又不断发生,例如 2006 年泰国曼谷机场一号航站楼发生火灾;2008 年武汉天河机场 2 号航站楼失火等. 由于钢结构抗火能力较差,一旦机场航站楼内的重要钢结构构件在火灾中失效,将导致严重的后果^[1-3]. 因此,不少学者提出火灾下结构整体性能的研究思想^[4-6],有关整体结构在火灾下的反应和破坏方面的研究日益成为一种迫切需要.

本文以某国际机场航站楼屋顶钢结构为研究

收稿日期:2010-03-26.

基金项目:深圳市科技计划项目深港创新圈深科信(2009)37号.

作者简介:王洪欣(1983—),男,博士研究生;

查晓雄(1968—),男,教授,博士生导师.

对象,根据机场航站楼内的可燃物、通风条件和空间大小等特性,运用防火性能化设计和有限元分析相结合的方法对该航站楼内钢结构屋顶在火灾下的力学性能和整体结构的稳定性进行分析,并进行火灾下的安全性能评估,在不影响结构抗火安全水平的前提下合理提出结构的防火保护要求。

1 工程概况

本项目机场航站楼属于超长跨度空间钢结构,整个结构主要由主指廊、副指廊、十字交叉指廊、主指廊与主楼结合部位、主航站楼等 5 大部分组成。总建筑面积约为 $45.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,南北方向最大约 1 000 m,东西方向最大约 650 m,建筑最高处高度约为 46.5 m。航站楼屋盖承重体系采用复杂的大跨度空间钢桁架结构。航站楼整体建筑效果如图 1 所示,5 大部分组成如图 2 所示。本文主要分析机场航站楼屋顶钢结构的抗火性能,以主指廊 01 区域为例,介绍屋顶钢结构的抗火性能分析过程。



图 1 某机场航站楼整体效果

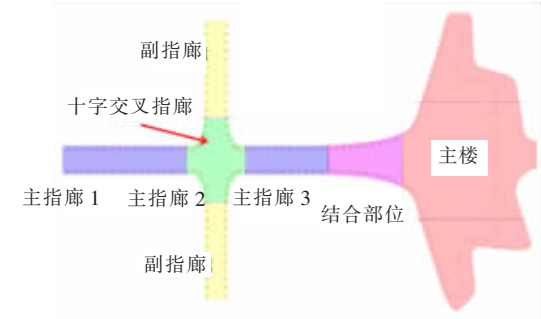


图 2 某机场航站楼区域示意图

2 荷载条件及火灾场景设定

2.1 荷载条件

根据建筑钢结构防火技术规范^[7]规定,钢结构抗火验算时,可按偶然设计状况的作用效应组合,分别采用下式较不利的情况。

$$S_m = \gamma_0(S_{Gk} + S_{Tk} + \psi_f \cdot S_{Qk}), \quad (1)$$

$$S_m = \gamma_0(S_{Gk} + S_{Tk} + \psi_q \cdot S_{Qk} + 0.4 \cdot S_{Wk}). \quad (2)$$

其中: ψ_f 为屋面活荷载的频遇值系数, ψ_q 为屋面活荷载的准永久值系数。

根据设计方提供的资料,永久荷载 S_{Gk} 为结构自重的 130%, 并包括表皮的附加自重 1.0 kN/m^2 ; 活荷载标准值 S_{Qk} 取 1.0 kN/m^2 ; 风荷载标准值 S_{Wk} 按下式取值。

$$w_k = \beta_s \mu_s \mu_z w_0. \quad (3)$$

其中: w_0 为基本风压, μ_s 为风荷载体型系数,主指廊结构风压高度变化系数 μ_z 取 1.77, 风振系数 β_s 取 2.0(根据设计方提供), 平均风压由同济大学风洞试验确定。

2.2 火灾场景及温度计算

本文主要分析机场航站楼屋顶钢结构的抗火性能,选取主指廊结构为例,介绍屋顶钢结构的抗火性能分析过程。主指廊最高层为 8.8 m 层,在进行屋顶钢结构抗火分析时,设定火灾发生在 8.8 m 层商铺内,商铺有“开放舱”进行保护。“开放舱”包括一个坚实的有足够耐火极限的顶棚,覆盖在整个火灾荷载相对较高的区域之上,如商业区域。顶棚下设自动探测报警系统、自动喷水灭火系统等,顶棚四周设有一定深度的挡烟垂壁。根据有关单位面积热释放速率的建议和以往经验,商店在灭火系统失效情况下的火灾规模保守取值为 10 MW。不考虑火灾出现阴燃阶段,假设商铺为快速 t^2 发展火,则火灾规模发展至 10 MW 约需 462 s,而机场设有自己的专职消防队,一般会在 5 min 之内到达火场展开扑救,因此假设是比较保守的。

对于机场航站楼内商店火灾来说,10 MW 的热释放速率峰值可以认为是在同一时刻燃烧的火灾面积最大可达到 18 m^2 ,根据对舱保护下火灾烟气蔓延的模拟结果,保守估计火灾对顶部钢结构的影响区域为边长 10 m 的方形区域。

考虑到不同高度及距离的钢构件可能受火灾影响的严重程度不同,具体温度分析与计算过程为:1) 舱保护下的商铺火灾对顶部和侧面构件的影响由 FDS 模拟分析,包括空间烟气的温度及构件接受的辐射热流量;2) 敞开区域的餐饮火灾由设计的火灾规模、火焰高度计算公式及传热学公式计算,包括火焰面对顶部钢构件的辐射以及烟气对流传热;3) 计算过程中均假定所有钢构件均未做防火保护。主指廊结构火灾位置如图 3 所示。经 FDS 模拟及传热学分析得到的主指廊屋顶钢构件的温升曲线,如图 4 所示。

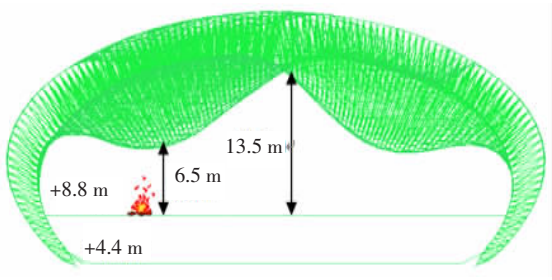


图 3 主指廊火灾位置示意图

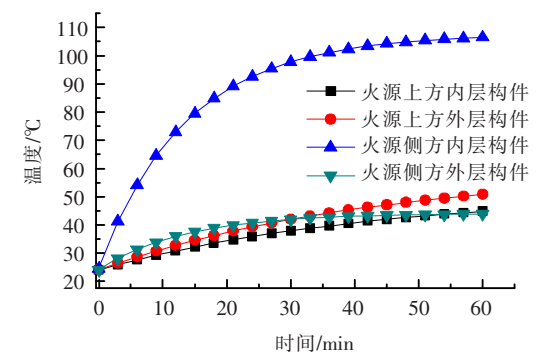


图 4 主指廊火源影响区域温升曲线

3 有限元分析

由于结构的抗火试验需要耗费相当长的时间,试验的费用也相当昂贵,对于机场航站楼等高大大空间结构,现有条件无法进行足尺试验.目前结构火灾下力学性能的分析方法主要采用非线性有限元对整体结构进行模拟,它能准确地反应整体结构在真实火灾下的实际性能^[8-9].

3.1 有限元模型建立

主桁架和斜桁架中的梁构件采用梁单元 B31 模拟,桁架中的腹杆采用杆单元 T3D2 模拟,表皮采用壳单元 S4R 进行模拟^[10].主指廊结构共有 27 种梁和杆的截面,则需分别对每种构件进行截面属性的赋予和梁截面方向的定义,有限元模型见图 5.结构构件采用 Q345 钢,结合设计方提供的资料和文献[7],钢材在高温下的材料性能见文献[7].将计算出的荷载赋予结构,根据设计方提供的支座边界资料来设定主指廊结构支座约束,最后将 FDS 模拟及传热学得到的温升曲线赋予结构对应构件上,结构温升区域见图 6.

3.2 有限元分析结果

对比式(1)、(2)的计算结果,发现结构在式(1)时更为不利.针对式(1),分别分析火源侧面内层主桁架、火源侧面外层主桁架、火源上方内层主桁架和火源上方外层主桁架的构件在不同时刻最大应力与对应温度下的设计强度.受火影响区域中的构件以“火源侧面内层主桁架”为最不利位置,见表 1.

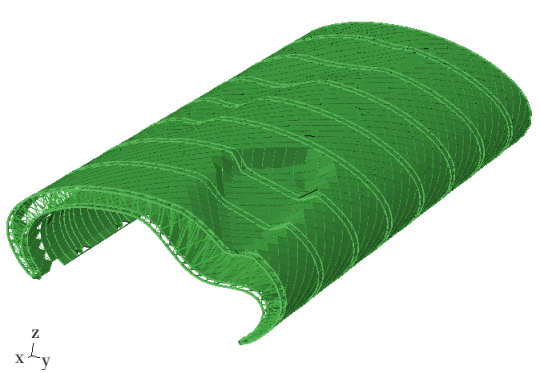


图 5 主指廊结构有限元模型

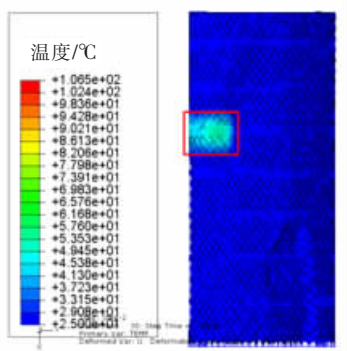


图 6 主指廊结构火灾影响区位置

表 1 不同时刻最大应力与对应温度下的设计强度(火源侧面内层主桁架)

时间/min	温度/℃	最大应力/MPa	设计强度/MPa
0	24.00	92.31	324.5
20	87.84	109.50	324.5
30	97.78	111.93	324.5
40	102.74	113.00	324.5
50	105.24	113.45	324.5
60	106.51	113.59	324.5

在式(3)的荷载条件时,最不利主桁架位置为火源侧面内层主桁架,该处构件的最大应力为 113.59 MPa,小于钢材在该火灾温度下的设计强度(325 MPa),主桁架构件满足承载力要求.主指廊结构最不利的构件为火源上方内层主桁架构件.火灾下,主桁架结构最不利位置见图 7,其主应力随时间变化曲线如图 8 所示.

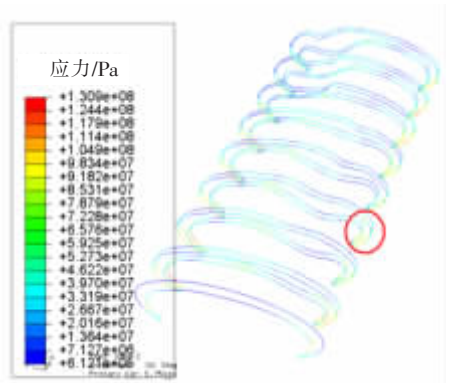


图 7 最不利主桁架构件位置

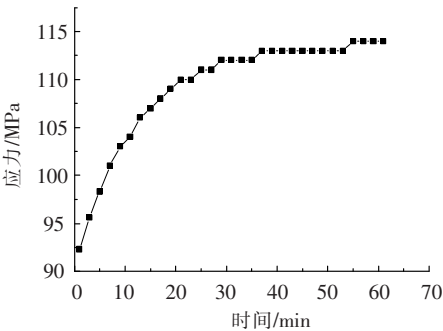


图 8 最不利主桁架构件应力-时间曲线

从上述分析可知,主桁架构件在火灾下,随着温度的升高,主应力和轴力增大,而构件弯矩减小. 由于构件温度的增加,构件受热膨胀,同时又受到周围构件的约束,而使构件轴力大幅增加. 又由于火灾下钢材模量降低,节点软化,从而约束构件端部的受弯能力下降,构件承受弯矩降低. 再加之弯矩降低的幅度小于轴力增加的幅度,构件主应力增加.

3.3 强度及稳定性验算

经上述分析,最不利位置为火源上方内层主桁架结构构件. 根据文献[7],高温下拉弯或压弯钢构件的强度和稳定承载力按下式验算,式中各参数物理含义见文献[7].

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq \eta_T \gamma_R f. \tag{4}$$

绕强轴(构件截面对应 Y 轴)时:

$$\frac{N}{\varphi_{yT} A} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_{ny} (1 - 0.8N/N'_{EyT})} + \eta \frac{\beta_{1x} M_x}{\varphi'_{1xT} W_x} \leq \eta_T \gamma_R f. \tag{5}$$

绕弱轴(构件截面对应 X 轴)时:

$$\frac{N}{\varphi_{xT} A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{nx} (1 - 0.8N/N'_{ExT})} + \eta \frac{\beta_{1y} M_y}{\varphi'_{1yT} W_y} \leq \eta_T \gamma_R f. \tag{6}$$

火源上方内层主桁架构件为最不利构件,截面面积 A 为 $7.05 \times 10^{-2} \text{ m}^2$,回转半径 i_x 为 $8.96 \times 10^{-2} \text{ m}$,长度为 1.09 m ,强轴 W_y 为 $6.01 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,强轴 W_x 为 $3.769 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. 构件轴力 N 为 $-5\,836 \text{ kN}$, X 轴弯矩 M_x 为 $1.431 \text{ kN} \cdot \text{m}$, Y 轴弯矩 M_y 为 $62.523 \text{ kN} \cdot \text{m}$,截面塑性发展系数 $\gamma_x = \gamma_y = 1.05$,最高温度为 $43.87 \text{ }^\circ\text{C}$,此时强度折减系数 η_T 为 1.0 . γ_R 为 1.1 , $\phi_{xT} = \phi_{yT} = 0.988$, $\varphi'_{1xT} = 0.99$, $\beta_{my} = \beta_{1x} = 0.802$, $\eta = 0.7$, $N'_{EyT} = 889.953 \text{ N}$. 参数物理意义见文献[7]. 强度验算结果:式(4)左端 $= 88.08 \text{ MPa} < 325 \text{ MPa}$ (右端). 稳定验算结果,强轴(Y 轴)验算:式(5)左端 $= 86.96 \text{ MPa} < 325 \text{ MPa}$ (右端). 弱轴(X 轴)验算:式(6)左端 $= 83.1 \text{ MPa} < 325 \text{ MPa}$ (右端).

由以上分析可知,主航站楼屋顶钢结构构件在最不利火灾场景下,满足强度和稳定承载力要求.

3.4 其他部分防火分析

同理,采用上述分析方法对机场航站楼其他 4 个部分在最不利火灾场景下,受火 1 h 的防火性能分析,5 个部分的最不利结构构件位置及构件最高温度见表 2. 副指廊、主指廊、十字交叉指廊和结合部位的钢结构构件在设定最不利火灾条件下的温升较小,而主楼屋顶构件的温升很大.

表 2 屋顶钢结构火灾影响区域构件温度 °C

火灾影响区域	副指廊温度	主指廊温度	十字交叉指廊温度	结合部位温度	主楼温度
主桁架下弦	44.9	44.9	39.5	130.2	392.6
主桁架下弦	50.8	50.8	43.9	104.2	237.6
内层网架	107.2	106.5	51.8	218.5	617.5
外层网架	44.0	43.8	59.8	167.3	420.6

对设定火灾下各区域屋顶钢构件的抗火承载力验算及安全性评估见表 3. 副指廊、主指廊、十字交叉指廊和结合部位的钢结构构件在设定最不利火灾条件下的满足稳定承载力的要求,而主楼屋顶主桁架构件的主应力达到构件在火灾温度下的设计强度,而且稳定承载力也不满足规范要求. 这主要因为主楼屋顶主桁架构件在设定最不利火灾场景下温升较大,一方面材料本身强度和弹性模量降低,易屈服;另一方面,构件受热膨胀,受到周围构件的约束,温度应力增加较大所导致. 但在设定火灾场景下,由于结构整体性和超静定次数

较多,结构整体竖向位移相对于整体跨度来说都不是很大,整体结构仍然处于安全状态.

4 结 论

1)采用性能化防火设计与有限元分析相结合的方法对某机场航站楼屋顶整体钢结构的防火性能进行研究,结果表明:副指廊、主指廊、十字交叉指廊和结合部位在最不利火灾场景下,结构构件离火源位置稍远,钢结构构件温升较小,从而这些部位的主桁架构件由温度增加的应力较小,满足承载力要求而不需要对其进行防火保护.

2)航站楼主楼屋顶钢构件直接暴露在火源上方,火焰的强辐射、烟气的热对流和热辐射使构件快速升温,一方面钢材自身强度和模量降低,易屈服;另一方面,构件受热膨胀,受到周围构件的约束,温度应力增加较大.但由于结构整体性和超静定次数较多,结构整体竖向位移相对于整体跨

度来说都不是很大,整体结构仍然处于安全状态.

3)以某机场航站楼屋顶空间网架结构为背景,从结构体系的整体安全的角度出发,考虑利用结构自身强度来进行有效的抗火设计,通过加强空间结构的整体性和超静定次数可以有效提高空间网架结构的抗火性能.

表 3 屋顶钢结构构件承载力及整体结构位移验算

结构区域	最不利构件位置	最大主应力/MPa		稳定承载力/MPa		结构最大竖向位移/mm		安全状况
		设计值	容许值	设计值	容许值	设计值	容许值	
副指廊	火源侧面外层主桁架	140.1	324.5	133.3	324.5	95.8	150	安全
主指廊	火源侧面内层主桁架	113.6	324.5	83.1	324.5	113.5	149	安全
十字交叉指廊	火源上方内层主桁架	177.4	324.5	134.3	324.5	73.6	149	安全
结合部位	火源上方内层主桁架	136.0	324.5	35.9	324.5	90.8	155	安全
主楼	火源上方内层主桁架	299.6	299.8	311.6	299.8	110.0	120	不安全

参考文献:

[1] 彭益锋. 机场航站楼和地铁类结构性能化防火研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[2] PENG Yifeng, HAN Xishuang, ZHA Xiaoxiong. E-vacuation safety management of airport terminal under fire circumstance[C]//2009 International Conference of Management Engineering and Information Technology. Zhengzhou: IEEE, 2009;247-250.

[3] 李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 180-181.

[4] ELGHAZOULI A Y, IZZUDDIN B A, RICHARDSON A J. Numerical modeling of the structural fire behavior of composite buildings [J]. Fire Safety Journal, 2000, 35:279-297.

[5] RICHARD LIEW J Y, TANG L K, CHOO Y S. Advanced analysis for performance-based design of steel structures exposed to fires[J]. Journal of Structural

Engineering, 2002, 1584-1593.

[6] HOWARD R B. Simulating fire effects on complex building[C]//Eight (8th) International Symposiums. Beijing: International Association for Fire Safety Science, 2005;189-200.

[7] CECS 200:2006, 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

[8] 殷颖智, 施碧波. 钢结构抗火设计在中国大型公共建筑中的应用[C]//第五届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第三届全国结构抗火学术交流会. 上海: 同济大学出版社, 2009: 29-37.

[9] 丛北华, 廖光皇, 韦亚星. 计算机模拟在火灾科学与工程研究中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 23(3): 63-69.

[10] 庄茁, 张帆, 岑松. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 123-129.

(编辑 魏希柱)