

# 国家大剧院壳体钢结构火灾危险性研究

徐亮, 张和平, 朱五八, 杨昀

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

**[摘要]** 研究火灾烟气对国家大剧院壳体钢结构的影响。运用场模拟和经验公式相结合的方法, 计算了火灾时公共大厅的温度场分布, 验算钢结构的温度低于 250℃ 时, 不会被火灾破坏。

**[关键词]** 国家大剧院; 钢结构; 火灾

**[中图分类号]** TK121 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)03-0059-05

## 1 概述

国家大剧院位于人民大会堂西侧, 由 3 座独立的剧场组成, 总建筑面积  $16.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 其中主体建筑  $10.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。为实现大剧院的完整统一, 3 个剧场由 1 个跨度为 210 m  $\times$  140 m 巨型钢结构壳形屋顶包裹在内, 形成封闭空间, 即公共大厅 (图 1)。壳体钢结构虽然为非燃烧材料, 但钢不耐火, 温度达 400℃ 时, 钢的屈服强度降至室温下的一

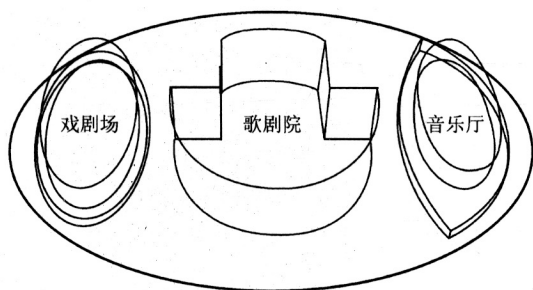


图 1 国家大剧院主体示意图

Fig.1 Structure diagram of national theater

半, 温度达到 600℃ 时, 钢材的强度和刚度基本丧失。如果钢结构建筑没有防火保护措施, 一旦发生

火灾, 很容易遭到破坏<sup>[1]</sup>。本文就大剧院公共大厅和剧场如发生火灾时, 产生的高温烟气对壳体钢结构可能造成的影响进行了研究。

## 2 钢结构安全判据

国内外已有的研究表明, 钢材的机械性能与温度有关, 当温度升高时, 钢材的屈服强度、抗拉强度和弹性模量的总趋势是降低的, 但在 150℃ 以下时变化不大。当温度在 250℃ 左右时, 钢材的屈服强度反而有较大提高, 但这时的相应伸长率较低、冲击韧性变差; 当温度超过 300℃ 时, 钢材的屈服强度、抗拉强度和弹性模量开始显著下降, 而伸长率开始显著增大, 钢材产生徐变; 当温度超过 400℃ 时, 强度和弹性模量都急剧降低; 到 500℃ 左右, 其强度下降到常温下的 40%~50%, 钢材的力学性能, 诸如屈服点、抗压强度、弹性模量以及荷载能力等都迅速下降, 低于建筑结构所要求的屈服强度<sup>[2]</sup>。对钢结构抗火承载力极限状态有重要影响的高温钢材参数主要为屈服强度与弹性模量, 图 2 给出了钢材的屈服强度与弹性模量随温度变化的曲线<sup>[3]</sup>。图 2 表明 250℃ 时, 钢材的屈服强度与弹性模量较常温时降低不多, 约降 20%, 因

**[收稿日期]** 2004-06-04; **修回日期** 2004-08-09

**[基金项目]** 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2001CB409603); 国家自然科学基金资助项目 (5007604, 50323005)

**[作者简介]** 徐亮 (1981-), 男, 江西景德镇市人, 中国科学技术大学博士研究生

此在作者的研究中,选取 250℃ 作为钢材的破坏温度,具有较高的安全系数。

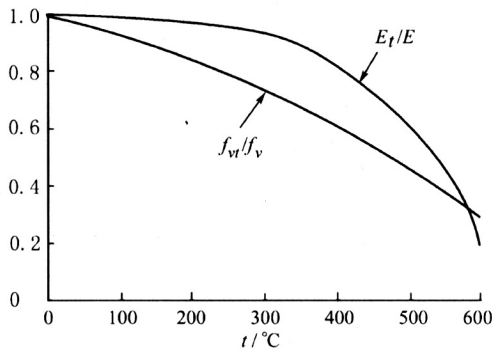


图2  $f_{vT}/f_v$ 、 $E_T/E$  随温度的变化

Fig.2  $f_{vT}/f_v$ 、 $E_T/E$ . vs. temperature curves

$E_T$ 、 $E$ —高温和常温下钢材的弹性模量  
 $F_{vT}$ 、 $f_v$ —高温和常温下钢材的屈服强度

### 3 火灾场景设置

#### 3.1 可能的火灾场景

国家大剧院壳体下公共大厅中地面、墙面等装饰材料均为不燃或难燃材料,公共大厅内火灾荷载很小。由公共大厅内的可燃物导致发生火灾的可能性和规模都很小,因此不考虑公共大厅内本身发生火灾的情况。国家大剧院壳体内的3座剧场虽然拥有各自的消防安全系统,考虑特殊情况,当建筑发生火灾时,建筑开向公共大厅的门窗开启或破裂的状况下,烟气有可能蔓延到共享空间并对钢结构造成威胁。因此选取可能发生火灾并且相对壳体钢结构比较危险的位置主要有:**a.** 音乐厅北面首层的商店;**b.** 戏剧场北面首层的酒吧;**c.** 歌剧院顶层的仓库;**d.** 音乐厅;**e.** 歌剧院;**f.** 戏剧院。

#### 3.2 火灾曲线的设计

参照《民用建筑防排烟技术规程》<sup>[4]</sup>,国家大剧院内的商店和酒吧火灾可按照无喷淋的超市(20 MW)来计算喷淋失效的火灾场景,按设有喷淋的商场(5 MW)来计算喷淋有效的火灾场景。歌剧院顶层仓库火灾按照无喷淋的仓库(20 MW)来计算无喷淋的火灾场景,按照有喷淋的仓库(4 MW)来计算有喷淋的火灾场景,3个剧场按照无喷淋的公共场所(8 MW)来计算喷淋失效的火灾场景,按照有喷淋的公共场所(2.5 MW)来计算有喷淋的火灾场景。各场景的火灾曲线按照快速

$t^2$  火增长。

### 4 火灾模拟计算

国家大剧院公共大厅内采用自然排烟,排烟窗口位于壳体顶部,天窗采用感烟探测器开启。作者假定排烟天窗开启失效,利用场模拟和经验公式相结合的办法,分别对各火灾场景的烟气运动和温度分布进行了计算。由于未考虑自然排烟的效果,这时的烟气将聚集在公共大厅内,使得计算得到的温度会高于有自然排烟情况下的温度。场模拟采用三维非定常计算,边界条件取绝热固壁,壳体取钢结构,采用带浮力修正的  $k-\epsilon$  湍流模型,热辐射采用 P1 辐射模型,开口采用压力出口边界条件。经验公式采用 NFPA92B<sup>[5]</sup> 推荐的公式进行烟气温度计算:

虚点源位置:

$$Z_0 = 0.083 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D_f \quad (1)$$

羽流质量流率:

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} Z^{5/3} + 0.0018 \dot{Q}_c \quad (2)$$

羽流中心温度:

$$T_{cp} = T_a + C \left( \frac{T_a}{g C_p^2 \rho_a^2} \right)^{1/3} \frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{(Z - Z_0)^{5/3}} \quad (3)$$

其中  $\dot{Q}$  为火源功率 (kW),  $\dot{Q}_c$  为火源热释放速率的对流部分,  $D_f$  为火源等效直径 (m),  $T_a$  为环境温度 (k),  $g$  为重力加速度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C$  为常数约 9.1。

#### 4.1 火灾场景的场模拟

利用场模拟的方法对火灾场景 1 (音乐厅北面首层的商店发生 20 MW 火灾), 火灾场景 3 (歌剧院顶层的仓库发生 20 MW) 的烟气运动蔓延进行了计算。火灾场景 1 的模型结构如图 3 所示,其中黑色点代表着火位置,模拟结果如图 4~8 所示。火灾场景 1 的模型中包括了 3 个剧场以及公共大

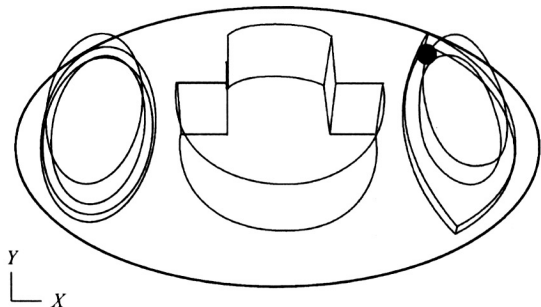


图3 火灾场景 1 结构示意图

Fig.3 Structure diagram of fire scenario 1

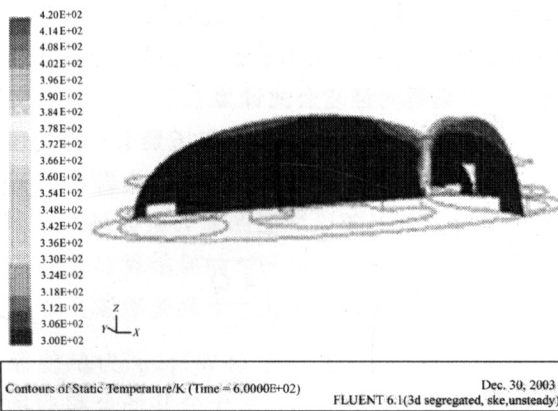


图 4 600 s 时温度分布

Fig.4 Temperature distribution at 600 s

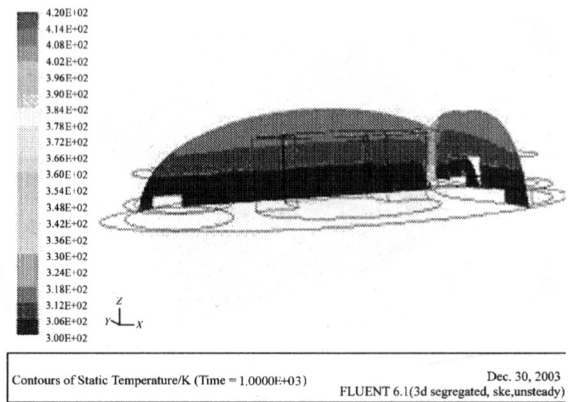


图 7 1000 s 时温度分布

Fig.7 Temperature distribution at 1000 s

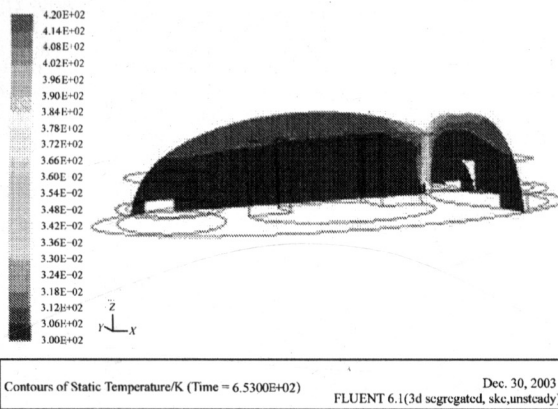


图 5 653 s 时温度分布

Fig.5 Temperature distribution at 653 s

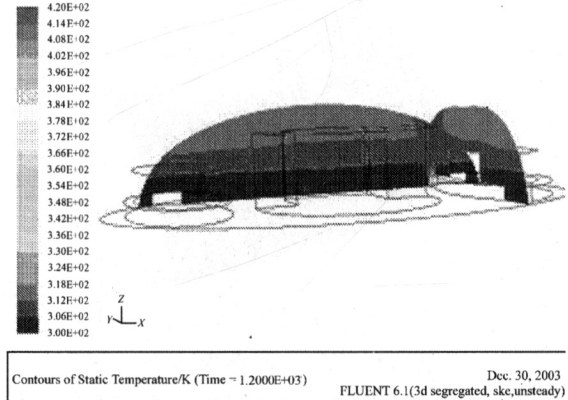


图 8 1200 s 时温度分布

Fig.8 Temperature distribution at 1200 s

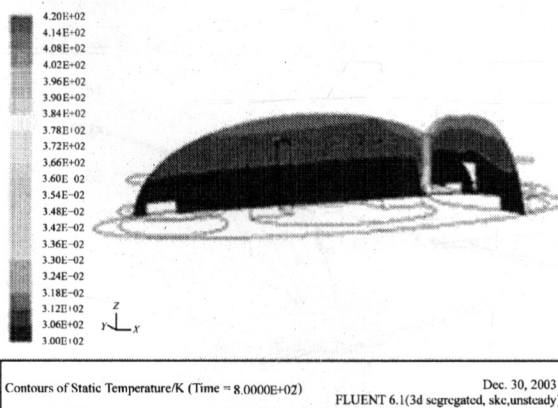


图 6 800 s 时温度分布

Fig.6 Temperature distribution at 800 s

厅，因此计算的区域非常大，这使得计算的耗时很长（半个月）。对于火灾场景 3，歌剧院顶层仓库发生火灾，火源上方的壳体钢结构处于最危险的位置。因此，截取局部壳体和建筑物进行火灾计算，

既能节省计算时间又能比较真实的反应危险处的钢结构的温度。火灾场景 2 模型结构如图 9 所示，其中黑色圆圈代表着火位置，模拟结果如图 10~12 所示。

从图 4~8 可以看出火灾场景 1（音乐厅北面

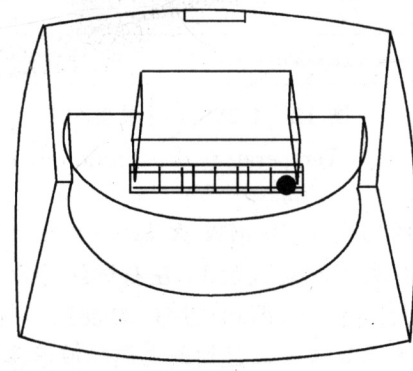


图 9 火灾场景 3 结构示意图

Fig.9 Structure diagram of fire scenario 3

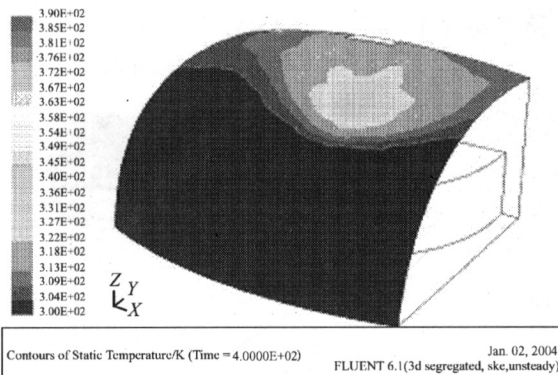


图 10 400 s 时温度分布

Fig. 10 Temperature distribution at 400 s

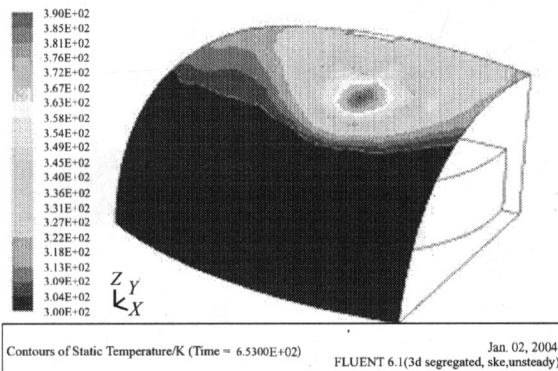


图 11 653 s 时温度分布

Fig. 11 Temperature distribution at 653 s

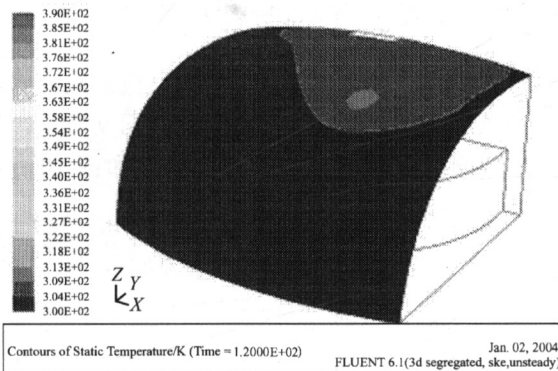


图 12 1 200 s 时温度分布

Fig. 12 Temperature distribution at 1 200 s

首层的商店发生 20 MW 火灾), 火源上方的壳体钢结构在火灾发生后 653 s 左右达到了最高温度 61 °C, 而公共大厅上部烟气层的温度只有 39 °C, 由于公共大厅非常大, 直到最大热释放速率过后, 上部烟气层才达到一个相对稳定的状态。从图 10~12 可以看出火灾场景 3 (歌剧院顶层的仓库发生 20 MW 火灾), 火源上方的壳体钢结构在最大热释

放速率下经 653 s 左右达到了最高温度 117 °C, 最大热释放速率过后, 壳体钢结构的温度逐渐降低。

#### 4.2 火灾场景的经验公式计算

利用经验公式对所有的火灾场景中烟气温度进行了计算, 其中环境温度取 20 °C, 火源的有效直径按照式 4 进行计算:

$$D_f = \sqrt{\frac{4 \dot{Q}}{\pi q''}} \quad (4)$$

其中:  $\dot{Q}$  为火源功率 (kW),  $q''$  为单位面积上热释放速率 (kW/m<sup>2</sup>), 对于公共场合和商场等取 500 kW/m<sup>2</sup>[6], 对于仓库取 1 000 kW/m<sup>2</sup>[7]。各火灾场景中火源与正上方壳体钢结构距离如表 1 所示, 烟气温度计算结果如表 2 所示。

表 1 火源与钢结构距离

Table 1 Distance between fire and steel construction

火灾场景	火源距壳体钢结构距离/m
1	24.5
2	33.2
3	14.1
4	10.2
5	9.4
6	14.75

表 2 各火灾场景烟气温度

Table 2 Smoke temperatures in different fire scenarios

火灾场景	火源规模/MW	烟气峰值温度/°C
1	20	81
	5	46
2	20	58
	5	36
3	20	178
	4	80
4	8	155
	2.5	90
5	8	173
	2.5	91
6	8	96
	2.5	56

从表 2 可以看出各火灾场景烟气峰值温度相差很大, 最高的是火灾场景 3 水喷淋失效情况下的烟气温度能达到 178 °C, 最低的是火灾场景 2 水喷淋

工作情况下烟气温度仅有 36 ℃。经验公式计算的火灾场景 1 音乐厅北面首层的商店发生 20 MW 火灾时的烟气峰值温度为 81 ℃, 场模拟计算的温度为 61 ℃, 经验公式计算得到火灾场景 3 歌剧院顶层的仓库发生 20 MW 火灾时的烟气峰值温度为 178 ℃, 场模拟计算的温度为 117 ℃。从场模拟和经验公式计算结果的对比可以知道经验公式计算得到的烟气温度要高于场模拟得到的烟气温度。

## 5 结果分析与结论

利用场模拟和经验公式的相结合方法对火灾烟气对国家大剧院壳体钢结构的影响进行了研究。场模拟计算的火灾场景 1 (20 MW) 和火灾场景 3 (20 MW) 的钢结构的温度要比经验公式的计算结果分别低 20 ℃ 和 61 ℃, 这可能因为场模拟计算中考虑了钢结构自身的热传导散热, 同时由于壳体自身的弧形形状特点, 热空气不会在火源上方钢结构处停留, 而会通过对流流向更高的位置, 进而减小了该处的温升。经验公式计算的各剧场火灾场景中, 火灾场景 5 (8 MW) 的烟气温度最高能达到 173 ℃, 低于钢结构的安全温度 250 ℃。事实上火灾场景 5 (8 MW) 的烟气温度达不到 173 ℃, 因为在经验公式的计算中按照 8 MW 的火源产生的热量计算烟气温度, 实际上 8 MW 的火灾发生在歌剧院内, 只有部分的烟气通过开口进入公共大厅, 因此实际壳体钢结构处的烟气温度要低于经验公式计算得到的温度。

通过对场模拟结果和经验公式计算结果比较

和分析得到了下面的结论:

场模拟的温度要低于经验公式计算得到的烟气温度;

壳体钢结构在作者设计的火灾中所达到的最高温度远低于设定的钢结构的破坏温度 250 ℃, 所以国家大剧院发生设计的火灾时所产生的热量不会导致钢结构的破坏;

为了更加有效的保护壳体钢结构, 国家大剧院的公共大厅 (酒吧、商店等) 火灾荷载大小和位置必须严格的控制;

确保公共大厅内 3 个剧场的消防设施正常工作, 从而减小剧场内发生火灾时, 其火势对壳体钢结构可能的破坏作用。

### 参考文献

- [1] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [2] 张树平, 于安林. 钢结构设计防火保护对策 [J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30 (1): 29~32
- [3] 李国强. 钢结构抗火设计方法的发展 [J]. 钢结构, 2000, 15 (3): 47~49
- [4] DGJ08-88-2000 民用建筑防排烟技术规程 [S].
- [5] NFPA 92B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas [M]. Quincy, Mass: National Fire Protection Association, 2000.
- [6] British Standard DD240 Fire Safety Engineering in Building, Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles [S]. 1997
- [7] Hadjisophocleous, et al. Performance criteria used in fire safety design [J]. Automation in Construction, 1999, Vol 8 (4): 489~501.

## Study on Fire Risk Assessment on Steel Constructions of National Theater

Xu Liang, Zhang Heping, Zhu Wuba, Yang Yun

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

**[Abstract]** The purpose of this paper is to study how the high-temperature smoke would affect the steel constructions of the national theater. CFD method and empirical equations are employed to calculate the temperatures in the huge public hall interactively. A steel construction safe temperature of 250 ℃ is determined, and the calculated smoke temperatures are under the determined steel construction safe temperature, which proves the steel constructions of the national theater will not be damaged by the smoke produced in fires.

**[Key words]** national theater; steel constructions; fire