

某机场航站楼钢屋盖防火设计

胡众^{1,2}, 周健^{3*}, 丁霖³

(1. 合肥市城乡建设局 合肥市建筑质量安全监督站, 合肥 230001; 2. 安徽民航机场集团有限公司 合肥新桥国际机场改扩建工程建设指挥部, 合肥 230086; 3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 为使大跨钢屋盖结构防火设计同时满足安全可靠、功能适用和经济合理的要求, 对合肥新桥机场 T2 航站楼钢屋盖进行了基于仿真模拟的防火设计。首先对典型的钢管混凝土柱、钢柱进行了基于构件的防火性能仿真模拟, 分析和比较了无防火保护和在不同等效热阻防火涂料保护下的温度场分布和构件耐火极限; 对屋盖桁架和钢梁进行了基于整体结构的防火性能仿真模拟, 得到了考虑热膨胀效应下的屋盖构件耐火极限。最后基于分析结果, 提出了防火设计方案如下: 支承钢屋盖的钢管混凝土柱和钢柱采用膨胀型防火涂料保护以实现 3 h 耐火极限; 离楼面 9 m 以上钢屋盖构件不采用防火保护措施。

关键词: 航站楼; 钢结构; 防火设计; 耐火极限; 防火仿真模拟; 膨胀型防火涂料

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0046-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240816001

Fire Resistance Design of Steel Roof for Terminal Building of an International Airport

HU Zhong^{1,2}, ZHOU Jian^{3*}, DING Lin³

(1. Hefei Urban and Rural Construction Bureau, Hefei Construction Quality and Safety Supervision Station, Hefei 230001, China; 2. Anhui Civil Aviation Airport Group Co., Ltd., Hefei Xinqiao International Airport Reconstruction and Expansion Project Construction Headquarters, Hefei 230086, China; 3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

*Corresponding author: jian_zhou@ecadi.com

Abstract: In order to ensure that the fire resistance design of large-span steel roof structures meets the requirements of safety, reliability, functional applicability, and economic rationality, a special fire resistance design based on simulation was carried out for the steel roof of T2 terminal building of Hefei Xinqiao Airport. Firstly, component based fire resistance simulations were conducted on typical concrete-filled steel tubular columns and steel columns, analyzing and comparing the temperature field distribution and fire resistance of components without fire protection and under different equivalent thermal resistance fireproof coating protection. The fire resistance performance of roof trusses and steel beams was simulated based on the overall structure, and the fire resistance of roof components considering thermal expansion effect was obtained. Finally, based on the analysis results, a fire-resistant design scheme was proposed for the concrete-filled steel tubular columns and steel columns supporting the steel roof, which were

收稿日期: 2024-08-16

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划(202303AA080012)

作者简介:

胡众(1976—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事工程管理方面的工作。E-mail: huzhong126@126.com。

通信作者:

周健(1968—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事建筑结构设计方面的工作。E-mail: jian_zhou@ecadi.com。

protected by an intumescent fireproof coating to achieve a 3-hour fire resistance, and the steel roof components more than 9 meters away from the floor were not protected by fire protection.

Keywords: terminal building; steel structure; fire design; fire resistance; fire simulation; intumescent fireproof coating

根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)^[1]的要求,对于防火等级为Ⅰ级的航站楼建筑,支承大跨屋盖的结构柱需满足3.0 h的耐火极限要求,大跨屋盖需满足1.5 h的耐火极限要求。

耐火极限为3.0 h的钢柱通常采用非膨胀型防火涂料进行防护。航站楼支承大跨屋盖的柱均位于公共区域,外观要求高且容易被来往旅客和行李车辆碰撞。若采用非膨胀型防火涂料进行防火保护,圆锥形截面的外观圆度和平整度难以达到理想效果,且硬度相对较低的非膨胀型防火涂料容易被碰撞脱落。因此,在满足耐火极限的前提下,希望尽可能采用薄型防火涂料或不做防火涂料以实现美观且坚固耐碰撞的表面效果。

耐火极限为1.5 h的钢结构通常也需要采用膨胀型防火涂料进行防火保护。对于采用桁架、网架等由大量小截面构件组成的高大钢屋盖结构,防火涂料的用量大且施工难度高,同时在航站楼大空间中,可燃物极少,屋盖结构与地面可燃物的距离通常也较远,结构面临的火灾危险性相对降低,因此具有不做额外防火保护的可能性。

我国于2006年颁布了建筑工程行业规范《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200—2006)^[2],首次提出对于多功能、大跨度、大空间建筑,可采用有科学依据的性能化设计方法,模拟实际火灾升温以分析结构的抗火性能。国家标准《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)^[3]首次明确了钢结构防火设计方法分为基于整体结构耐火验算的防火设计方法和基于构件耐火验算的防火设计方法。杨乃颢等^[4]提出了空间网格结构抗火反应非线性有限元分析方法。杜咏等^[5]分析了正放四角锥网架结构在火灾均匀温度场中的临界温度。薛素铎等^[6]对火灾下张弦梁结构的性能进行了研究。成飞等^[7]对大长细比约束圆钢管杆件在高温下的承载力进行了试验研究。对大跨度建筑钢结构进行抗火分析与设计时,采用性能化分析方法已得到了工程设计人员的普遍认可。

本文以合肥新桥国际机场T2航站楼主楼钢屋盖为例,首先对支承屋盖的典型钢管混凝土柱、钢柱进行了基于构件的抗火性能仿真模拟,分析和比较了无防火保护和在不同等效热阻防火涂料保护下的温度场分布和构件耐火极限。然后对屋盖桁架和钢梁进行了基于整体结构的抗火性能仿真模拟,得到了考虑热膨胀效应下的屋盖构件耐火极限。最终根据分析结果确定了该工程钢屋盖结构采用的防火措施。

1 屋盖结构概况

合肥新桥国际机场T2航站楼总建筑面积约为35万m²,由1座主楼、2条横指廊以及3条竖指廊组成,东西总长为1380 m,南北最大宽度为420 m,设计年旅客吞吐量为4000万人次。其中主楼面宽约为478 m,进深约为267 m,下部主体结构为设置黏滞阻尼器的钢筋混凝土框架,屋盖采用大跨度钢结构,屋面最高处约为42 m,如图1所示。



图1 建筑效果图

Fig. 1 Architectural rendering

如图2所示,主楼屋面覆盖了办票大厅、商业区和候机区3个不同的功能区域。如图3所示,建筑师对3个区域的屋面采用了不同的处理方式:人流最为密集的办票大厅区域屋面设置了点状分布的悬井天窗,商业区采用了1个整体大面积条状的垂帘天窗和一个三角天窗,候机区设置1条侧天窗。

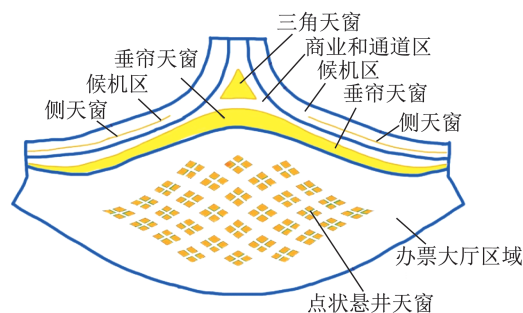
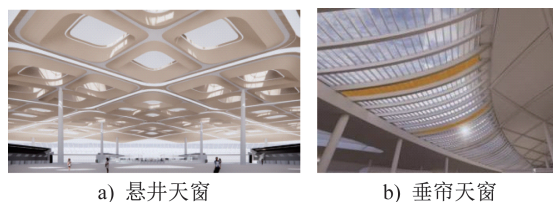


图2 主楼功能区域分布

Fig. 2 Distribution of functional areas in main building



a) 悬井天窗

b) 垂帘天窗

图3 不同天窗形式

Fig. 3 Skylight in different forms

基于屋面天窗的布置情况,钢屋盖在不同部位采用了不同的结构体系。

对于办票大厅区域,结合菱形悬井天窗斜向矩阵状排列的条件,总体采用了以双向斜交布置的矩形空间桁架为主结构、三角形空间桁架为次结构的桁架体系。主桁架斜向最大跨度为70.0 m,上下弦杆中心结构高度为3.5 m。在两侧未设置天窗区域和南侧悬挑区域,对主桁架方向进行调整。在主桁架交点位置间隔布置支承屋盖钢柱,如图4所示,最大柱网尺寸为54 m×36 m,沿正交方向。支承屋盖柱下部刚接、顶部与屋盖铰接,呈下大上小的圆锥形。办票大厅中部区域柱直径由底部的1.5 m收至顶部的1.1 m,边柱的直径由底部的2.0 m收至顶部的1.1 m,柱底刚接、柱顶铰接。

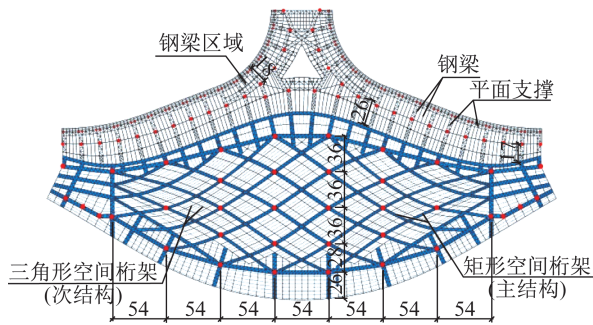


图4 主楼屋盖平面布置(单位:m)

Fig. 4 Layout of main building roof (unit: m)

商业区域的进深由17 m变化至26 m,一边搁置于办票大厅桁架的悬挑端,一边由一排钢柱支承。由于全长设置了下凹的垂帘天窗,结构需外露,为统一形式,跨越采用钢梁结构,局部梁间设置平面支撑以提高沿长向的面内刚度,如图5所示。

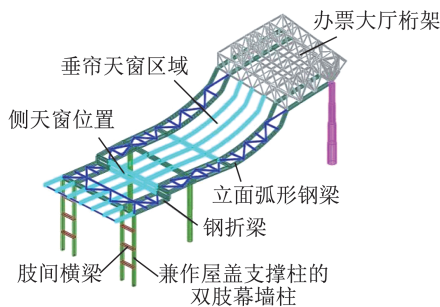


图5 垂帘天窗区域结构布置

Fig. 5 Structural layout of hanging curtain skylight area

候机区位于幕墙内侧18 m的宽度范围内,采用折梁形式以拟合侧天窗所需立面。为提高候机区的宽敞度,外立面幕墙的支承构件兼作屋盖支撑柱,该支承构件为双肢柱形式,每18 m为一组,肢间距为3.6 m、肢截面尺寸为700 mm×300 mm,双肢间结合幕墙划格设两道横梁连接形成连肢柱,以增强双柱的面内刚度和稳定性。

连肢柱下端位于楼面悬臂端,采用铰接连接以减小其对下部结构的刚度需求;上端与钢梁刚接(图5)。主楼屋盖及其支承结构整体构成如图6所示,其中绿色为桁架,棕色为钢梁,蓝色为钢柱,红色为钢管混凝土柱。

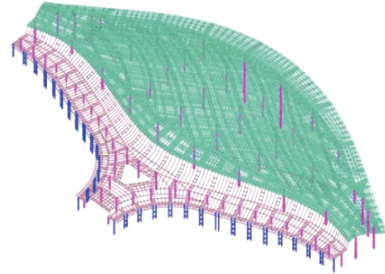


图6 主楼钢屋盖及其支承结构整体构成

Fig. 6 Overall composition of main building's steel roof and its supporting structure

2 钢管混凝土柱的抗火仿真模拟

为提高采用膨胀型涂料的可能性,对于办票大厅和商业区域截面较大的锥形及圆形柱,均采用了钢管混凝土柱的形式,利用柱内混凝土的吸热作用,减缓钢管在火灾下的升温速率,从而提高其抗火能力,延长其耐火极限。通过构件温度场传热和构件耐火极限的二阶段分析,确定了构件的防火保护措施。

2.1 抗火分析柱的确定

钢管混凝土柱在火灾下的承载能力与多个因素相关,主要包括柱的截面尺寸、荷载比、长细比、约束作用和柱的火灾升温条件等,在同样的火灾升温曲线下,钢管混凝土柱的截面越小、荷载比越大、长细比越大、约束作用越弱,其抗火能力越差。支承办票大厅区域钢屋盖的钢管混凝土柱共有ZA、ZB1和ZB2三种,其几何信息和最大荷载比如表1所示,其中柱截面的尺寸为底面直径~顶面直径×壁厚。

表1 钢管混凝土柱信息

Table 1 Information of concrete-filled steel tubular columns

编号	柱截面/mm	最大柱高/m	最大荷载比
ZA	D2 300~1 200×50	11.82	0.40
ZB1	D2 000~1 100×50	18.90	0.48
ZB2	D1 500~1 100×40	22.42	0.50

选用其中抗火条件最弱的柱ZB2进行抗火模拟分析并确定其防火要求,进而将该防火要求偏保守地应用于其他所有柱。

《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)^[3]仅给出了长细比为60以下的钢管混凝土柱在标准火灾下

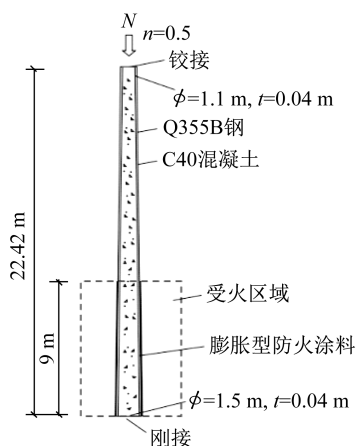


图7 钢管混凝土柱 ZB2

Fig. 7 Concrete-filled steel tubular column ZB2

的承载力系数,以及不同荷载比下各设计耐火极限对应的非膨胀涂料厚度需求。该柱采用膨胀型防火涂料防腐、且截面长细比超出上述范围,因此需要开展专门的试验或抗火仿真分析来确定防火保护需求。基于条件限制,本文选择采用抗火仿真分析方法。

2.2 仿真模型的建立

2.2.1 温度场传热分析模型

温度场传热分析采用ABAQUS软件中的实体单元模型,钢管、混凝土和防火涂料均采用8节点三维实体单元来模拟。计算模型中假设钢-混凝土界面完全传热,忽略钢管和核心混凝土界面间的接触热阻。

钢管混凝土柱在高温下的热工参数包括导热系数、比热容、热膨胀系数等如表2所示。空气的热对流系数为 $25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,防火涂层的辐射传热系数为 $0.92 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,无保护钢材的辐射传热系数为 $0.7 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ [3,8],如图8所示。

表2 材料热工性能参数

Table 2 Thermal performance parameters of materials

材料	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	比热容/ ($\text{W}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{K})^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
混凝土	Lie&Denham 公式 ^[9]	EN 1992-1-2 相关公式 ^[10]	2 400
钢材	Lie&Denham 公式 ^[9]	EN 1992-1-2 相关公式 ^[10]	7 850

为确定经济性高的保护方案,采用4种不同等效热阻系数的防火涂料进行计算,不同等效热阻系数代表其膨胀型涂料厚度不同,并同无防火涂料保护的情况进行对比。

结合航站楼的空间特点,钢管混凝土柱离楼面9 m以上的部分受火源影响已经很小,故不考虑其温升影响^[11];对于离楼面9 m以下的部分,偏保守地采用ISO-834标准火灾升温曲线^[12]进行计算。

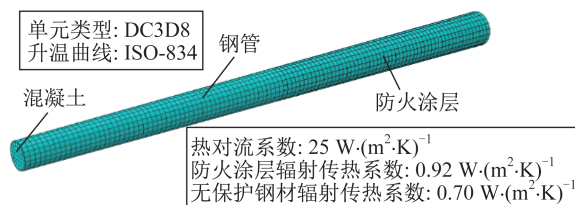


图8 钢管混凝土柱温度场计算模型

Fig. 8 Temperature field calculation model of concrete-filled steel tubular column

2.2.2 构件耐火极限分析模型

钢管采用的钢材牌号为Q355B,采用弹塑性模型;混凝土强度等级为C40,采用塑性损伤模型;钢管和混凝土均采用C3D8R单元来模拟,二者之间的接触方式采用界面滑移模型,切向摩擦系数(库仑摩擦)为0.20^[13]。柱边界约束条件为上端铰接、下端刚接。网格划分与温度场传热计算模型的网格划分保持一致。锥形钢管混凝土受火计算模型如图9所示。

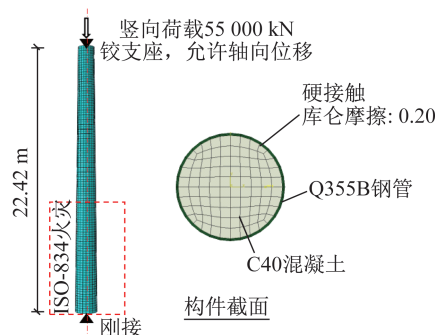


图9 耐火极限计算模型示意

Fig. 9 Diagram of fire resistance calculation model

2.3 无保护钢管混凝土柱分析结果

2.3.1 温度场分析结果

基于温度场传热分析模型,对钢管混凝土柱 ZB2 在无防火保护下的温度场进行分析,截面各部位的温度-时间关系曲线如图10所示。由图可知,截面温度由外向内依次下降。由于混凝土的吸热作用,相较于环境温度的变化,钢管温度的上升速度较为缓慢,且由于混凝土偏差的导热性能,混凝土温度变化具有滞后性,与混凝土表面距离越大,温度越低。在经历ISO-834标准火灾3 h后,钢管外壁温度达到 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$,混凝土中部(1/4直径处)温度为 $44\text{ }^\circ\text{C}$,混凝土中心温度仅为 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 。钢管混凝土柱全截面温度分布如图11所示,钢管表面温度已经超过 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$,混凝土最外层的温度也达到了近 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 耐火极限分析

按荷载比为0.5向柱 ZB2 的柱顶施加竖向荷载,依据上节温度场分析结果中柱身钢管和混凝土的温度分布情

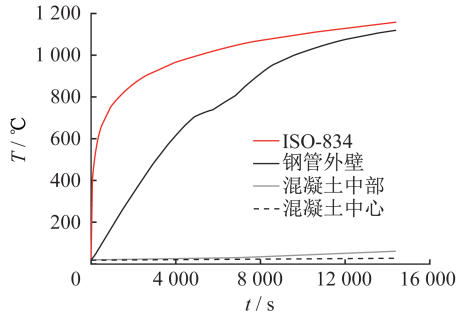


图 10 无防火保护的柱 ZB2 的截面温度-时间关系曲线

Fig. 10 Sectional temperature-time relationship curves of column ZB2 without fire protection

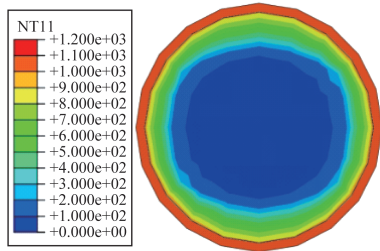


图 11 无防火保护的柱 ZB2 截面温度分布(单位:°C)

Fig. 11 Sectional temperature distribution of column ZB2 without fire protection (unit: °C)

况,开展柱的耐火极限分析。柱构件耐火极限根据《建筑构件耐火试验方法 第7部分 柱的特殊要求》(GB/T 9978.7—2008)^[14]中的相关要求判定,对于轴向承重构件,当其轴向压缩量 δ 超过 $0.01H$ 或轴向压缩速率 ν 达到 $0.003H$ 时,即视为达到耐火极限,其中 H 为柱高。对于柱 ZB2, δ 和 ν 的限值分别为 224 mm 和 $67.3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

无防火保护钢管混凝土柱 ZB2 柱顶位移-时间关系曲线如图 12 所示。柱 ZB2 在荷载比为 0.5 时的耐火极限为 53 min,此时的钢管外壁温度为 $520 \text{ }^\circ\text{C}$,由此可知无防火保护钢管混凝土柱耐火极限明显无法满足 3 h 的耐火极限要求,必须采用防火保护措施。

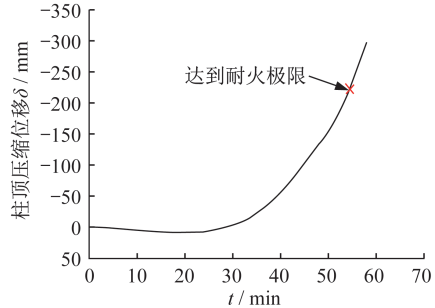


图 12 无防火保护的柱 ZB2 柱顶位移-时间关系曲线

Fig. 12 Top displacement-time relationship curves of column ZB2 without fire protection

2.4 膨胀型防火涂层保护的钢管混凝土柱分析结果

分析模型 ZB2-T1、ZB2-T2、ZB2-T3、ZB2-T4 在柱 ZB2 表面分别设置等效热阻为 $0.10 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 、 $0.07 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料。

2.4.1 温度场分析结果

在防火涂料保护下,钢管与混凝土的温度上升速率均明显下降,且防火涂料的等效热阻越大,构件截面温度上升速度越慢。不同防火涂料保护下的柱 ZB2 截面温度分布如图 13 所示。各模型钢管外壁、混凝土中部和混凝土

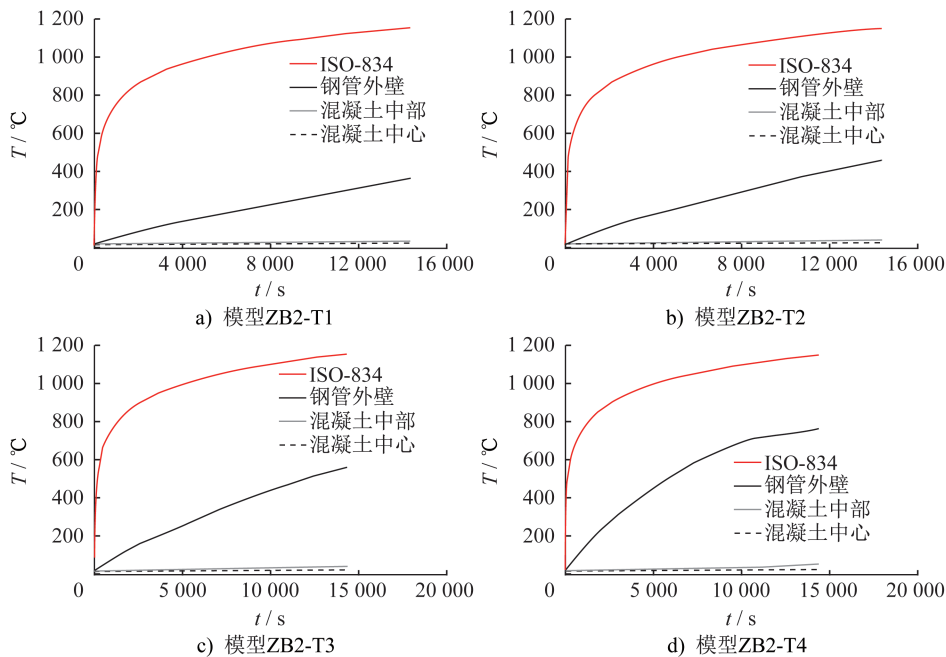


图 13 膨胀型防火涂层保护的柱 ZB2 截面温度-时间关系曲线

Fig. 13 Temperature-time relationship curves of column ZB2 protected by intumescent fireproof coating

土中心的温度如表3所示。

表3 标准火灾3h后各测点温度

分析模型	钢管外壁	混凝土中部	混凝土中心
ZB2-T1	287	28	21
ZB2-T2	373	30	21
ZB2-T3	464	33	21
ZB2-T4	713	40	22
无保护	1 039	44	23

柱截面上各测点温度与等效热阻的关系如图14~15所示,可见当等效热阻 R 达到 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 时,钢管外壁的温度小于 300 C 。

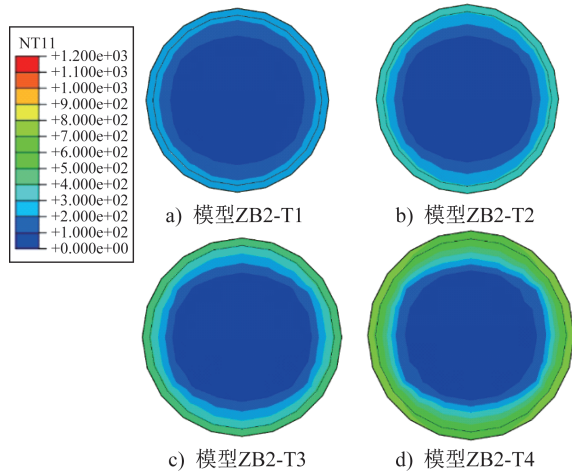


图14 不同等效热阻下的截面温度分布 (单位: C)

Fig. 14 Temperature distribution of cross-sections under different equivalent thermal resistances (unit: C)

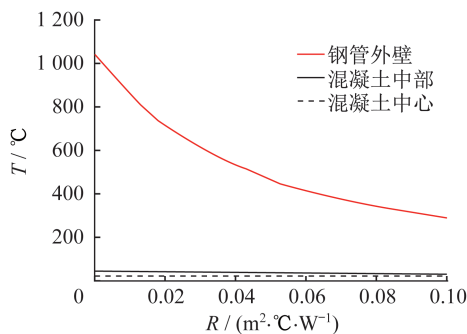


图15 不同等效热阻下的截面典型位置温度对比

Fig. 15 Comparison of temperature at typical locations of cross-sections under different equivalent thermal resistances

2.4.2 耐火极限分析

基于前述温度场计算结果,对不同等效热阻条件下

的钢管混凝土柱耐火极限进行有限元计算,柱顶位移-时间曲线如图16所示。

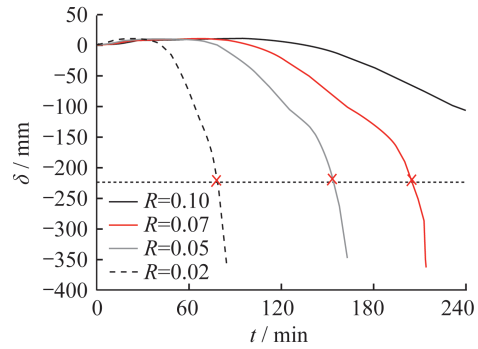


图16 膨胀型防火涂层保护的柱ZB2柱顶位移-时间关系

Fig. 16 Top displacement-time relationship of column ZB2 protected by intumescent fireproof coating

由图16可知,随着防火涂层等效热阻的增加,耐火极限增加。各等效热阻下的耐火极限如表4所示。等效热阻为 $0.10 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 时的耐火极限均大于3h。

表4 膨胀型防火涂层保护的钢管混凝土柱耐火极限
Table 4 Fire resistance of concrete-filled steel tubular columns protected by intumescent fireproof coating

分析模型	等效热阻/ $(\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1})$	耐火极限/h
ZB2-T1	0.10	>4.00
ZB2-T2	0.07	3.37
ZB2-T3	0.05	2.53
ZB2-T4	0.02	1.28

3 方钢管柱的抗火仿真模拟

主楼候机区域的幕墙柱兼作支承屋盖柱,由于柱截面尺寸仅为 $250 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$ 和 $300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$,且有多道水平加劲板,内部浇筑混凝土难度较高,因此均采用纯钢柱。采用与上节钢管混凝土相同的方法,对其进行耐火极限仿真分析,确定其防火保护措施。

3.1 分析钢柱的选择

兼作支承屋盖柱的幕墙柱有两种截面尺寸,每一种的高度和柱端约束情况也都相同,因此选择了竖向荷载下荷载比最大的柱作为分析对象,分别是截面尺寸为 $700 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (壁厚)、柱长 $L=15.5 \text{ m}$ 、荷载比 $n=0.4$ 的钢柱ZD,和截面尺寸 $650 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ (腹板厚) $\times 25 \text{ mm}$ (翼缘厚)、柱长 $L=14.2 \text{ m}$ 、荷载比 $n=0.55$ 的钢柱LMZ1,钢柱的材料牌号为Q355B,如图17所示。

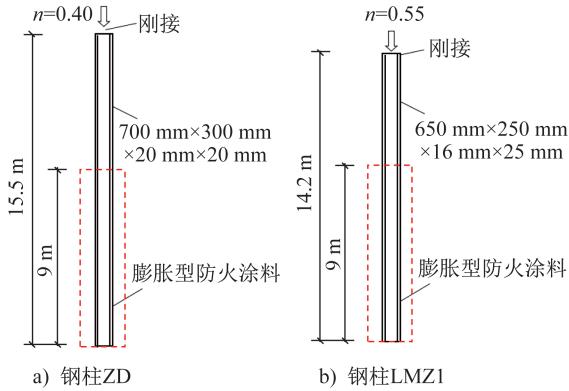


图 17 钢柱 ZD、LMZ1

Fig. 17 Steel column ZD, LMZ1

3.2 钢柱仿真模型的建立

除不包含混凝土、没有钢-混凝土界面传热外,方管柱的模型单元、热工参数、升温曲线的选择均同前述钢管混凝土柱的对应情况。

3.3 无保护钢柱分析结果

基于温度场传热分析模型,无保护钢柱表面温度-时间关系曲线如图 18 所示。钢柱 ZD 和 LMZ1 在 3 h 后钢表面温度皆超过 1 100 °C,远高于各自的临界温度。其中,钢柱 ZD 和 LMZ1 表面达到临界温度的耐火极限分别为 26 min 和 20 min。因此需要采用防火保护措施。

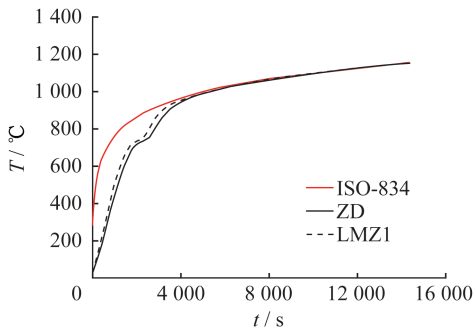


图 18 无保护钢柱表面温度-时间关系曲线

Fig. 18 Temperature-time relationship curves of unprotected steel column surface

3.4 膨胀型防火涂层保护的钢柱分析结果

柱 ZD-T1~ZD-T4 和 LMZ1-T1~LMZ1-T4 分别为采用等效热阻为 0.05 m²·°C·W⁻¹、0.10 m²·°C·W⁻¹、0.15 m²·°C·W⁻¹和 0.20 m²·°C·W⁻¹的防火涂料保护的钢柱,钢柱表面温度-时间关系曲线如图 19 所示。钢柱耐火极限随着防火涂层等效热阻的增加而增加。如图 19 所示,柱 ZD-T3、ZD-T4 和 LMZ1-T4 的耐火极限均超过 3 h。

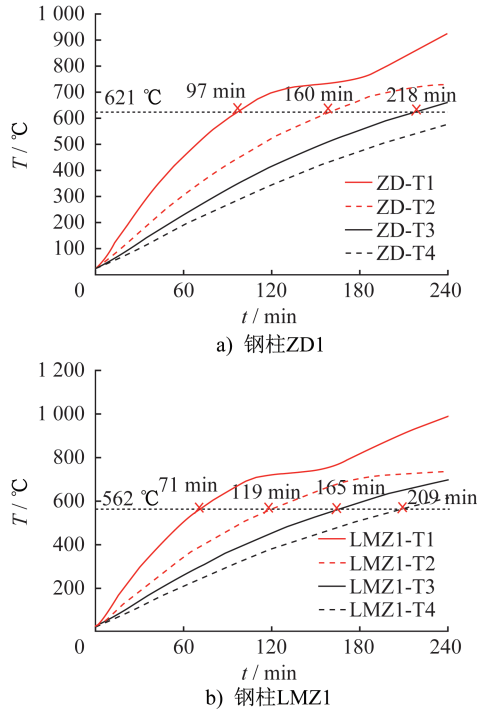


图 19 膨胀型防火涂层保护的钢柱表面温度-时间关系曲线

Fig. 19 Temperature-time relationship curves of steel column surface protected by intumescent fireproof coating

4 钢屋盖抗火仿真模拟

在对钢屋盖构件进行抗火分析时,需综合考虑两个关键因素的影响:一是火灾下由于整体结构热膨胀导致的构件应力水平的提高,二是此时构件温度升高导致钢材强度的降低或者临界温度的降低。

4.1 分析场景的选择

本项目中钢屋盖构件距地面的可燃物较远,结构面临的火灾危险性相对较低。通过火灾场景分析,根据可燃物情况及其与钢屋盖构件的距离,选取两个对航站楼屋盖结构威胁最大的典型火灾场景,进行基于整体结构耐火验算的防火设计,验证不采用防火涂层保护方案的可行性。

如图 20 所示,所选场景 1 的起火位置为办票大厅值机柜台,可燃物为柜台、行李等,楼面距屋盖桁架下弦 19.5 m。根据 NFPA 92B—2000^[15],将单个行李火灾规模取为 2.5 MW,单个值机柜台最大火灾规模取为 1.7 MW。该火灾场景考虑两个相邻的值机柜台和行李同时着火,考虑一定的安全系数,热释放速率设定为 10.0 MW。火灾增长类型为快速火,火灾增长系数 α 取 0.044 kW·s⁻²。设计火灾以快速火方式增长到 10.0 MW,之后维持该热释放速率稳定燃烧。

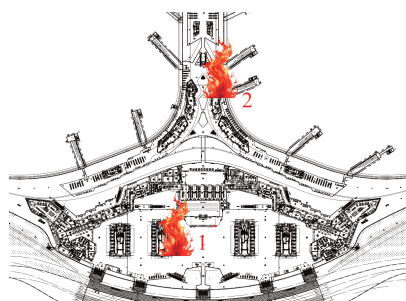


图 20 典型火灾场景位置分布

Fig. 20 Typical fire scene location distribution

如图 20 所示,所选场景 2 起火位置为开敞商业区,考虑开敞商业区内的商品、杂物等着火,楼面距离钢屋盖梁底 11.5 m。按无喷淋商店最大热释放速率取为 10.0 MW,考虑火灾增长类型为快速火,火灾增长系数 α 取 $0.044 \text{ kW}\cdot\text{s}^{-2}$,设计火灾以快速火方式增长到 10.0 MW,之后维持该热释放速率稳定燃烧。

4.2 钢屋盖仿真模型的建立

基于 ABAQUS 软件建立钢屋盖有限元模型,如图 21 所示。钢桁架、钢梁和柱的单元类型均为 B31 梁单元。为便于安全地考虑钢网架在火灾下的工作情况,同时考虑场景 1 和场景 2 两种火灾场景,以火灾荷载和 1.0 倍恒荷载、0.5 倍活荷载、0.4 倍风荷载进行荷载不利组合计算。

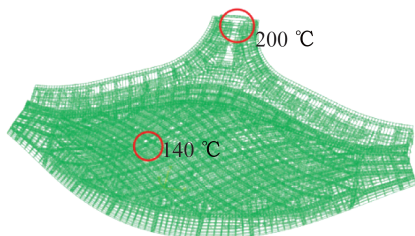


图 21 钢盖计算模型

Fig. 21 Calculation model of steel roof

4.3 分析结果

4.3.1 无防火保护钢屋盖的构件热膨胀效应分析

经火灾场景模拟,场景 1 在模拟全过程中火源影响范围的最大半径为 12 m,场景 2 的火源影响范围的最大半径为 18 m。上述受火源影响范围内钢屋盖构件升温后,由于构件受热膨胀,受火区域杆件应力发生重分布且增大,在最不利工况组合下,钢屋盖升温前后的 Mises 应力分布如图 22 所示。升温前杆件最大荷载比分别为 0.60,升温后大部分杆件的应力仍小于 200 MPa,荷载比最大杆件位于场景 2 的火灾影响区域,荷载比为 0.94。

场景 1 影响范围内没有柱构件,屋盖升温对周围柱的内力影响较小。场景 2 影响范围内有 4 根柱构件,和常

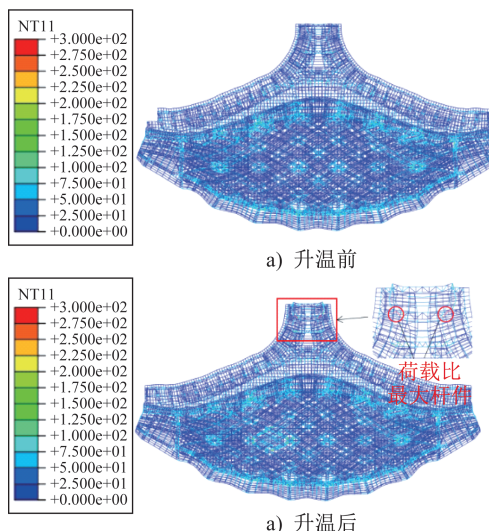


图 22 最不利工况升温前后 Mises 应力分布 (单位: MPa)

Fig. 22 Mises stress distribution contour before and after temperature rise under the most unfavorable loadcase (unit: MPa)

温工况相比,火灾升温工况下,柱的内力变化范围为 $-30\% \sim 15\%$ 。

4.3.2 考虑热膨胀效应后的钢屋盖构件临界温度

根据各工况下升温前后局部杆件的最大荷载比,计算得到荷载比最大杆件对应的临界温度如表 4 所示。

表 4 荷载比最大杆件临界温度

Table 4 Critical temperature of maximum load ratio member

升温前		升温后	
杆件最大荷载比	荷载比最大杆件临界温度/°C	杆件最大荷载比	荷载比最大杆件临界温度/°C
0.60	542	0.94	383

由表可知,不考虑升温导致的热膨胀效应时,最大杆件的临界温度为 542 °C;考虑升温热膨胀效应后,最大杆件的临界温度为 383 °C。上述火灾场景下,钢屋盖构件的最高瞬时温度均低于此临界温度,表明不进行防火保护可以保证结构安全。

5 防火措施的选择

根据前述抗火仿真模拟分析结果,最终按如下方式对航站楼钢屋盖及其支承柱进行防火设计:对于钢管混凝土柱,要求采用在耐火极限为 3 h 的条件下,等效热阻不小于 $0.07 \text{ m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料进行保护。兼作幕墙柱的支承屋盖柱,要求采用在耐火极限为 3 h 的条件下,等效热阻不小于 $0.20 \text{ m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料

进行保护。屋盖构件总体不需要防火涂料保护,偏保险起见,对距离楼面高度小于9 m的构件,不论其下方是否存在潜在可燃物,均采用耐火极限为1.5 h的膨胀型防火涂料进行保护。

6 结论

本文对合肥新桥机场T2航站楼钢屋盖的典型钢管混凝土柱、钢柱及钢屋盖构件进行了抗火性能仿真模拟分析,得到如下结论:

(1) 无防火保护的钢管混凝土柱ZB2耐火极限为53 min。采用在耐火极限为3.00 h的条件下,等效热阻不小于 $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $0.10 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料对楼面以上9 m高度范围内的构件进行保护后,耐火极限分别延长至3.37 h和4.00 h以上,可满足柱的耐火极限要求。

(2) 无防火保护的方钢管柱ZD的耐火极限为26 min。采用在耐火极限为3.00 h的条件下,等效热阻为 $0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $0.20 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料对楼面以上9 m高度范围内的构件进行保护后,耐火极限分别延长至3.63 h和4.00 h以上。无防火保护的钢柱LMZ1耐火极限为20 min,采用在耐火极限为3.00 h的条件下,等效热阻为 $0.20 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 的膨胀型防火涂料对楼面以上9 m高度范围内的构件进行保护后,耐火极限延长至3.48 h。采取上述防火措施后均可满足柱的耐火极限要求。

(3) 最不利典型火灾场景1和2下,当考虑热膨胀效应时,高于9 m的屋盖网架杆件最大荷载比为0.89~0.94,对应杆件临界温度为383 °C,高于典型火灾场景在相应位置的温度。在不采取防火保护措施的情况下,均能够满足耐火极限要求。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB 50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Fire Protection Design of Buildings: GB 50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)

[2] 中国工程建设标准化协会. 建筑钢结构防火技术规范: CECS 200—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings: CECS 200—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese)

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the

People's Republic of China. Technical Code for Fire Protection of Building Steel Structures: GB 51249—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)

[4] 杨乃颢, 徐国彬, 高日, 等. 空间网格结构抗火反应非线性有限元分析[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(4). DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.1998.04.011.
YANG Naixie, XU Guobin, GAO Ri, et al. Nonlinear finite element analysis of space frames against fire [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 1998, 22(4). DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.1998.04.011. (in Chinese)

[5] 杜咏, 李国强. 火灾均匀温度场中正放四角锥网架结构临界温度研究[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(6): 25-30.
DU Yong, LI Guoqiang. Critical temperature of regular half-octahedra grid structure in uniform fire temperature field [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(6): 25-30. (in Chinese)

[6] XUE S D, HE Z Y, LI X Y. Performance of beam string structure under fire [J]. Spatial Structures, 2011, 17(2): 90-96. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2011.02.015.

[7] 成飞, 杜咏, 张永振. 大长细比约束圆钢管杆件高温承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 76-83. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.05.010.
CHENG Fei, DU Yong, ZHANG Yongzhen. Experimental study on fire resistance of axially restrained steel chords with large slenderness ratio at elevated temperature [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 76-83. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.05.010. (in Chinese)

[8] 韩林海, 陶忠, 刘威. 钢管混凝土结构: 理论与实践[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 24-34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2001.06.004.
HAN Linhai, TAO Zhong, LIU Wei. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 2001, 29(6): 24-34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2001.06.004. (in Chinese)

[9] LIE T T, CHABOT M, IRWIN R J. Fire resistance of circular hollow steel sections filled with bar-reinforced concrete [R]// Proceedings of Internal Report, No. IRC-IR-651. Ottawa: National Research Council of Canada.

[10] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures—Part 1.2: General Rules Structural Fire Design: EN 1994-1-2: 2007[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.

[11] 路世昌, 于年灏, 黄益良. 大型民用机场航站楼防火设计要点综述[J]. 建筑安全, 2022, 37(5): 40-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2022.05.012.
LU Shichang, YU Nianhao, HUANG Yiliang. A comprehensive review of fire safety design considerations for large civil airport terminal buildings [J]. Construction Safety, 2022, 37(5): 40-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2022.05.012. (in Chinese)