

文章编号: 1000-5013(2012)06-0671-05

# 不同支承平面下网架的抗火性能

黄文钦, 高轩能

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 考虑不同支承平面和边界的不同约束刚度条件, 通过对正放四角锥网架结构在均匀温度场中结构反应的全过程分析, 得到不同参数条件下, 正放四角锥网架结构的耐火时间, 构件内力及结构变形的特征. 结果表明: 考虑大空间平板网架结构的薄膜效应, 采用下平面支承半刚性约束的网架结构, 耐火时间长, 内力和变形相对较小, 从而具有更优越的抗火性能.

**关键词:** 正放四角锥网架结构; 抗火性能; 支承平面; 均匀温度场; 薄膜效应

**中图分类号:** TU 356.01

**文献标志码:** A

国外对钢结构防火问题的研究起步较早, 而国内自 20 世纪 80 年代末至 20 世纪 90 年代初, 才由中国建筑科学研究院和同济大学开始针对高温钢材特性、各类钢构件、高强螺栓连接节点、钢框架结构的抗火试验与理论方面开展研究<sup>[1]</sup>. 然而, 在大空间建筑钢结构的抗火研究方面尚缺乏系统的研究. 在诸多的钢结构受火灾破坏及倒塌的事故中, 大空间建筑网架结构在火灾中的破坏时有发生, 严重的还引起倒塌<sup>[2]</sup>. 网架结构作为一种重要的结构形式在大空间建筑中有着广泛应用, 对其进行结构抗火性能的研究是必不可少的. 文献<sup>[3]</sup>研究了均匀温度场中, 网架结构的几何特征、荷载比、支座约束刚度等对网架结构临界温度的影响, 却未考虑在不同支承平面下, 支座约束刚度对网架结构临界温度影响的差异. 本文基于 ANSYS 非线性有限元分析程序, 对不同支承平面条件改变支座约束刚度的正放四角锥网架, 在火灾均匀温度场中的全过程反应进行数值模拟.

## 1 结构分析方案

### 1.1 网架形式及尺寸

取文献<sup>[4]</sup>中某实际工程的正放四角锥网架, 作为参数分析的算例. 考虑到网架跨度较大, 网格尺寸均取  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ . 跨度和网架平面长宽比共同确定了网架所覆盖的面积, 而高大空间的尺度是指高度不小于  $6\text{ m}$ , 独立空间地(楼)面面积不小于  $500\text{ m}^2$  的建筑空间. 工程中长宽比变化范围常为  $1.0 \sim 1.4$ , 而算例采用的是长宽比为  $1.0$ , 跨度为  $30\text{ m}$  的模型.

### 1.2 杆件截面尺寸及材质

网架杆件采用 Q345 无缝钢管, 考虑到长细比限值、荷载设计值, 及市场供应管材型号等因素, 管材截面选择 3 种规格管材, 规格如表 1 所示. 表 1 中: 1 号杆件用于下弦杆; 2 号杆件用于腹杆; 3 号杆件用

表 1 网架杆件编号及规格

Tab. 1 Structural element number and specification

杆件编号	S/mm×mm	A/mm <sup>2</sup>	$\gamma/\text{m}^{-1}$	$\lambda$	$\xi$
1	89×4	1 068	261	100	0.638
2	108×6	1 922	175	83	0.763
3	127×8	2 991	133	71	0.834

收稿日期: 2012-03-22

通信作者: 高轩能(1962-), 男, 教授, 主要从事结构灾害控制的研究. E-mail: gaouxn1962@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008133); 福建省科技计划重点基金资助项目(2006H0030)

于上弦杆;S为钢管截面尺寸(外径×壁厚);A为截面面积; $\gamma$ 为形状系数; $\lambda$ 为长细比,杆长3m; $\xi$ 为常温下(20℃)的稳定系数.

### 1.3 网架结构的支承

网架结构的支承有周边支承、点支承等,而边界约束有自由、弹性、固定及强迫位移等.根据支座节点的构造情况,假定支承网架结构的边界约束为两向可侧移、一向可侧移、无侧移铰支座或弹性支座.约束以上边界,可分别通过平板压力(拉力)支座、单面(双面)弧形压力支座、球铰压力支座和板式橡胶支座的构造实现.文中采用的是不同支承平面下,周边支承,切向自由,法向弹性的约束支座.

### 1.4 杆件温度荷载

在工程应用中,根据钢构件表面是否具有隔热保护层,钢构件可分为有保护层,及无保护层.同时,根据保护层材料吸收热量相对于钢构件的多少,又可将其分为轻质保护层与非轻质保护层.钢构件传热方式及温度的分布往往与保护层有关,不同保护层具有不同形式.文献[5]针对无保护层的轻质钢构件,提出了升温过程的简化计算公式.基于此,利用ANSYS编制了相关的计算程序,对用到的升温过程进行分析计算.其计算式为

$$\Delta\theta = K \cdot \frac{1}{\rho_s c_s} \cdot \gamma(\theta_g - \theta_s) \cdot \Delta t. \quad (1)$$

式(1)中: $K$ 为综合传热的系数( $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ ), $K = \alpha_r + \alpha_c$ ;  $\alpha_r$ 为以热辐射方式向构件表面传热的传热系数( $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ );  $\alpha_c$ 为以热对流方式向构件表面传热的传热系数( $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ );  $\theta_g$ 为空气温度( $^\circ C$ );  $\theta_s$ 为钢构件温度( $^\circ C$ );  $\rho_s$ 为钢的密度( $kg \cdot m^{-3}$ );  $c_s$ 为钢的比热( $J \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$ );  $\Delta t$ 为时间间隔(s);  $\gamma$ 为构件的截面形状系数( $m^{-1}$ ).无保护层腹杆及上下弦杆的温度-时间曲线,如图1所示.

### 1.5 网架结构的荷载比

荷载比是评价结构或构件的抗火承载力的关键参数之一,文献[6]中,在不同参数条件下,对正放四角锥网架结构在均匀温度场中的结构反应进行全过程分析.得出正放四角锥网架结构耐火极限主要由结构荷载比 $R_0$ 确定的结论.结构荷载比 $R_0$ 是指在火灾偶然组合工况下,结构的荷载与结构在弹性极限状态下的相应承载力的比值.

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元模型

2.1.1 单元特性 根据文献[3]网架结构有限元法的计算假定,可将结构离散化为由每一根杆件组成的单元,该单元只存在轴力.根据单元的受力特性,选用ANSYS单元库中LINK 8空间杆单元,ANSYS单元库中COMBIN 12弹簧单元,模拟网架支座弹性约束的力学特性.

2.1.2 材料属性 根据结构分析对象和加载方式的需要,将高温下钢材的应力-应变关系进行简化.定义高温下( $20^\circ C < \theta \leq 800^\circ C$ )结构钢Q345的应力-应变本构关系为三折线形式.

2.1.3 实常数 由于构件的轴向变形,高温下钢结构构件的截面积存在微量变化.在网架结构的薄壁圆钢管杆件计算中,忽略截面积变化的微量,均采用常温下杆件的截面积作为LINK 8单元的实常数,杆件截面见表1.

2.1.4 网架模型 对应采用两种网架模型,如图2所示.图2中:网架1为上平面支承方式,尺寸为30m(长)×30m(宽)×2.0m(高), $n=10$ ;网架2为下平面支承方式,尺寸为30m(长)×30m(宽)×2.0m(高), $n=10$ .

### 2.2 加载方式

1) 对所设计的结构模型,在常温下施加设计荷载,并对结构进行线弹性分析.

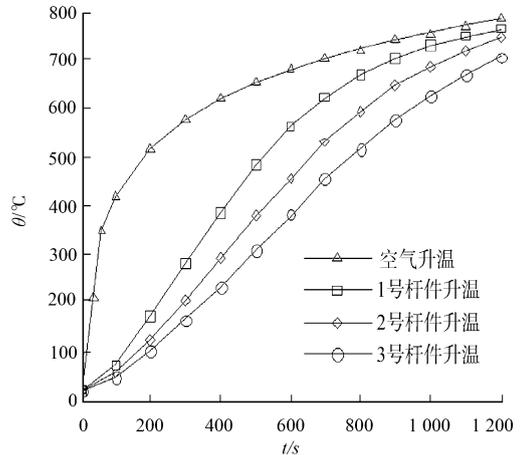


图1 杆件的温度-时间关系曲线

Fig. 1 Temperature-time curves of structural element

2) 在第 1 个荷载步基础上, 按照标准升温. 20 s 的温度增量作为一个荷载步, 将其作为体荷载叠加, 逐级加载求解, 一直到求解满足破坏准则。

网架结构抗火验算是按偶然状况设计的作用效应组合, 故在一般情况下, 荷载比  $R$  可在 0.3~0.8 之间取值<sup>[7]</sup>。为满足分析要求, 取荷载比  $R=0.6$ , 作为常温下施加的设计荷载。

### 2.3 破坏准则

火灾发生时, 结构整体承载力极限状态判别标准有如下两个方面:

1) 网架丧失支持能力, 当网架不能继续承受荷载时(表现为挠曲率发生突变), 即认为网架不能继续承载;

2) 网架产生不适于继续承载的过大的变形, 当网架的挠度达到计算跨度的 3.5% 时, 表明结构达到了耐火极限<sup>[5,8]</sup>。

当火灾发生后, 在扑救火灾和抢救人民生命财产的重要时间内, 确保网架结构不发生倒塌是很有必要的。正放四角锥网架, 具有比较好的整体稳定性。因而, 结构的破坏通常是在火灾的作用下, 外荷载作用产生过大位移, 从而导致结构无法继续承载。因此, 主要计算结构整体位移随时间的变化, 并以网架的挠度达到计算跨度的 3.5% 作为中止程序的条件。

### 2.4 结果分析

2.4.1 结构变形分析 对正放四角锥网架进行分析, 由温度场、耐火极限判别准则, 及位移-时间曲线可确定其耐火极限。不同支承平面和支座边界约束条件下, 位移最大节点的位移-时间曲线, 如图 3 所示。图 3 中:  $k_s, k_x$  分别表示上、下支承方式下对应的不同边界约束刚度。为便于分析, 以支座约束法向自由为例, 将节点的位移-时间曲线分为 5 段: A 段为位移缓慢增长区; B 段为较快增长的稳定增长区; C 段为较快增长后位移趋于平缓的调整区; D 段为位移增长出现拐弯的位移增长加快区; E 段为位移急剧增加的破坏区。由此可以得到 3 点结论。

1) 支座约束法向自由时, 节点的位移-时间曲线 5 个阶段都较为明显。两种支承方式对网架的耐火极限和网架变形特性影响较小, 相差不大。

2) 支座约束法向固定时, 对于上支承方式, 网架变形较快。节点的位移-时间曲线主要表现在 A, B 段, 基本以直线增长, 直至被破坏, 且极限耐火时间最短。对于下支承方式, 网架节点位移在很长时间内, 保持很小的范围内浮动; 而接近耐火极限时, 以极快的速度突然下降至完全倒塌。节点的位移-时间曲线主要表现在 A 段有向上走的趋势, B 段持续时间段, 幅度小, C 段持续时间较长, 极限耐火时间最长。

3) 随着支座约束法向约束刚度的增加, 对于上支承方式, 网架极限耐火时间减小, 变形速度加快; 对于下支承方式, 网架极限耐火时间增加, 变形速度减慢。

2.4.2 结构内力分析 对正放四角锥网架进行内力分析, 下平面支承不同法向约束刚度的边跨下弦杆应力-时间关系, 如图 4 所示。由图 4 可得到以下 2 点结论。

1) 支座约束法向固定时, 对于下平面支承, 应力较大构件主要集中在网架四角及边跨区域; 对于上平面支承, 应力较大杆件主要集中在跨中, 支承平面内的杆件内力要远大于非支承平面内杆件内力。故而下平面支承方式是以支承平面内边跨和四角杆件为控制杆件, 上平面支承方式是以支承平面内跨中杆件为控制杆件。

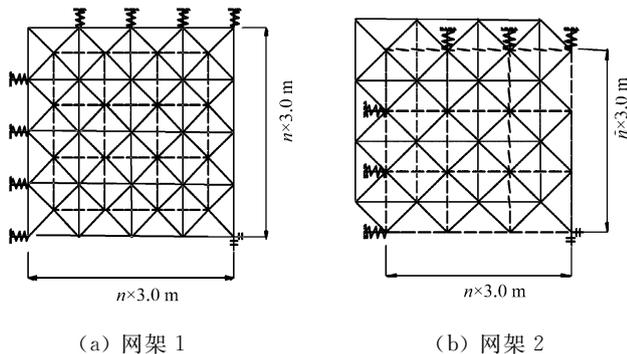


图 2 网架模型

Fig. 2 Grid structure model

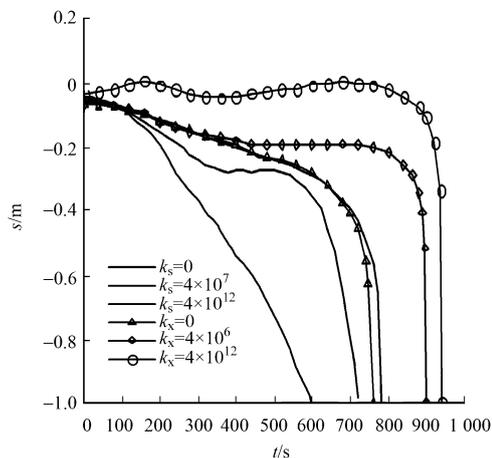


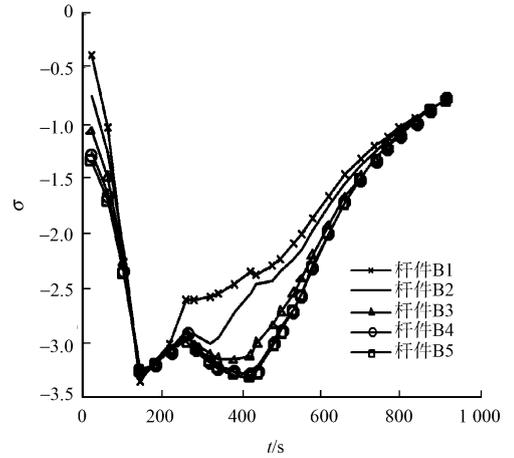
图 3 位移最大节点位移-时间关系

Fig. 3 Maximum displacement of node-time curves

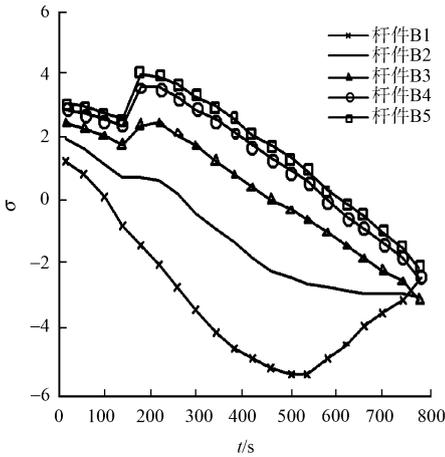
2) 随着法向约束刚度的减小,控制杆件最大内力降低,故而法向约束刚度的释放有效减小控制杆件内力.从受力的角度分析,控制杆件由于支座约束,其温度应力无法得到释放,最大内力较其他区域杆件更快地增长.

2.4.3 原因分析 在火灾发展的初期,其温度上升相对较小,钢材的弹性模量和屈服强度也只有很小的降低,而热膨胀效应对结构位移和内力有较大影响.对于下平面支承方式网架,边界法向约束越大,控制杆件内力增长就越快,过大的约束使其在较低温度就发生屈服.下弦杆侧向位移受到约束,而上弦杆侧向位移得到释放,故而杆件的温度膨胀使网架中部节点位移有向上走的趋势,减缓了网架的变形.

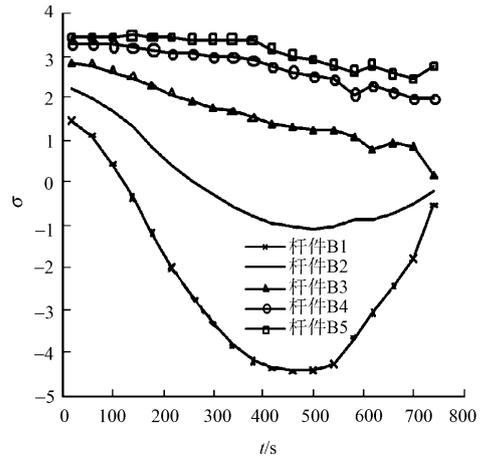
从有限元分析中发现:火灾发展初期,网架跨度较小,荷载较小,下平面边界约束较大时网架中部节点位移是向上走的.对于上平面支承方式,边界法向约束越大,控制杆件内力增长就越快.上弦杆侧向位移受到约



(a) 法向约束  $k=4 \times 10^{12}$



(b) 法向约束  $k=4 \times 10^5$



(c) 法向约束  $k=0$

图4 下平面支承不同法向约束刚度的边跨下弦杆应力-时间关系

Fig. 4 Stress of lower chord in side bay-time curves for different normal constraint stiffness on lower chord supporting

束,而下弦杆侧向位移得到释放,故杆件的温度膨胀使网架中部节点位移有向下走的趋势.其与荷载作用引起的位移相叠加,加快了网架变形.

在火灾发展的中期,温度上升相对较高,钢材的弹性模量及屈服强度均显著下降,网架呈现出较为明显的凹陷变形特征.对于下平面支承方式网架,板的薄膜效应在结构中起到较大作用.与混凝土板的薄膜效应相似,其作用主要取决于边界约束条件.边界的法向约束越大,结构变形越平缓,持续的时间越长,结构的抗火性能越优越.对于上平面支承方式网架,板的薄膜效应却无明显体现.

在火灾发展的后期,温度较高,钢材的弹性模量及屈服强度均急剧下降,温度对结构材料属性的不利影响与温度应力相叠加,位移将急剧增加.通过内力和位移分析,网架最终完全倒塌是由于温度过高,材料属性出现不利的影 响.网架刚度降低,在荷载和温度应力的共同作用下,网架产生过大的变形,从而导致结构倒塌.

### 3 结论

性能化结构抗火设计有两项目标:

1) 不致因为结构破坏,影响建筑内人员的逃生及消防人员灭火;

2) 不致因为结构破坏,使建筑火灾损失更大<sup>[9]</sup>.

避免人员伤亡,减小经济损失是性能化抗火安全评估中的关键,有以下 3 点分析结果.

1) 采用上平面支承方式正放四角锥平板网架,其极限耐火时间随着边界约束刚度的增加而减小,结构的整体变形增大,杆件内力增加,边界法相自由抗火性能最好,然而,这仅仅相当于下平面支承方式的最不利情况.

2) 下平面支承网架,随着边界约束刚度的增加,结构耐火时间增加,但幅度不大,而构件内力增长较快,并出现局部构件屈曲.故而采用半刚性约束,有利于结构内力的释放,并能保证结构拥有较长耐火时间.

3) 采用下平面支承,半刚性约束方式,结构在火灾发展较长时间内变形小,内力增长慢,整体和局部构件破坏都不严重.

#### 参考文献:

- [1] 李国强,吴波,韩林海. 结构抗火研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展,2006,8(1):1-13.
- [2] 奇尔顿 J. 空间网格结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [3] 沈祖炎,陈扬骥. 网架与网壳[M]. 上海:同济大学出版社,1997:65-71.
- [4] 刘锡良. 平板网架设计与施工图集[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
- [5] 李国强,韩林海,楼国彪,等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [6] 杜咏. 大空间建筑网架结构实用抗火设计方法[D]. 上海:同济大学,2007.
- [7] 金辉. 预应力组合网架抗火性能数值分析[D]. 天津:天津大学,2005.
- [8] 白音. 大空间钢结构火灾下受力性能与抗火计算方法研究[D]. 北京:清华大学,2008.
- [9] 刘国军. 预应力组合网架结构的性能化抗火研究[D]. 泉州:华侨大学,2010.

## Fire Resistance of Grid Structure on Different Supporting Planes

HUANG Wen-qin, GAO Xuan-neng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The fire-resistant time, internal force of component and structural deformation of orthogonal square pyramid space grids, with supporting on different planes and under different constraint stiffness boundary conditions, are obtained by analyzing the response in uniform temperature field. It is indicated that: considering the membrane effect of long-span grid structure, the grid structure with half-rigid restraints on lower plane has longer fire-resistant time, and smaller internal force and deformation, so such grid structure has better fire resistance.

**Keywords:** orthogonal square pyramid space grids; fire resistance; supporting plane; uniform temperature field; membrane effect

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)