

支承形式对正放四角锥网架抗火性能的影响

孙伟建, 高轩能, 张惠华

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 采用 ANSYS 非线性有限元分析软件,建立正放四角锥网架在高大空间火灾作用下的热-结构耦合有限元计算模型. 考虑边界不同支座弹簧刚度的影响,对该模型在火灾均匀温度场中的全过程反应进行数值模拟计算,同时研究均匀升温条件下杆件的内力变化情况. 结果表明:采用不同支承形式时,无论法向弹簧刚度多大,周边支承形式的网架结构临界温度均最高,具有更优越的抗火性能;采用同种支承形式的正放四角锥网架时,其法向弹簧刚度越大,临界温度越高;在升温过程中,法向弹簧刚度大小对同一上弦杆内力影响较小;均匀升温条件下,各上弦杆件内力呈现出由角部向跨中先减小后逐渐增大,沿网架边界由角部向中间逐渐减小的变化趋势,随着弹簧刚度的增大,内力最大杆的位置由角部转移到跨中.

**关键词:** 正放四角锥网架; 抗火性能; 支承形式; 弹簧刚度; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TU 356 **文献标志码:** A

正放四角锥网架结构是近年来我国大量兴建的建筑形式,它具有空间刚度大、整体性强、抗震性好和制作安装方便等优点,是当今大型公共建筑及工业建筑最主要的结构形式之一. 然而,随着一些钢结构在火灾时发生局部破坏或整体倒塌,人们越来越重视钢结构,尤其是大空间钢结构在火灾下的安全问题. 目前,国内外的研究者针对梁、柱、板和框架结构做了大量的工作<sup>[1-6]</sup>,但在网架结构的抗火方面研究较少<sup>[7-9]</sup>. 文献[7]采用 SFCAD 网架设计软件对平板网架的受力性能进行了系统研究,提出了正放四角锥网架火灾高温下的简化计算方法——修正拟夹层板法;文献[8]以某正放四角锥预应力组合楼层网架为工程背景,运用性能化防火设计方法,对其整体抗火性能和安全评估进行了研究分析;文献[9]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,但未考虑不同支承形式对正放四角锥网架结构抗火性能的影响. 因此有必要对其进行研究. 本文采用非线性有限元分析软件 ANSYS,建立了正放四角锥网架在高大空间火灾作用下的热-结构耦合有限元模型,并在考虑边界不同支座弹簧刚度的影响情况下,对该模型在火灾均匀温度场中的全过程反应进行数值模拟计算.

1 网架有限元模型

1.1 相关参数及基本假定

某正放四角锥网架结构,其跨度 24 m×24 m,网格数为 8×8,网格尺寸为 3 m×3 m,网架高度为 2 m,距离地面高度为 12 m,屋面恒荷载为 1.0 kPa,活荷载为 0.4 kPa. 杆件均采用 Q345 无缝钢管,上

表 1 网架杆件编号及规格

Tab. 1 Numbers and dimensions of space truss members

编号	钢管截面/ mm×mm	A/cm <sup>2</sup>	μ	λ	φ
1	75×3.75	9.05	281	118	0.507
2	60×3.50	6.21	303	150	0.339

下弦采用表 1 中的 1 杆,腹杆采用表 1 中 2 杆,网架杆件编号及规格如表 1 所示. 表 1 中:A 为截面面积;μ 为截面形状系数, $\mu=\frac{d}{t \times (d-t)}$ ;λ 为长细比,杆长为 3 m;φ 为稳定系数. 钢材在高温下的弹性模量和屈服强度折减系数均按 CECS 200:2006

《建筑钢结构防火技术规范》<sup>[10]</sup> 选用。

在进行网架结构抗火分析时,遵循以下 4 个基本假定:1) 结构无防火保护层;2) 温度沿构件长度方向均匀分布;3) 按照高大空间升温曲线计算结构温度场;4) 将欧洲规范 EC3 中所规定的高温下钢材的应力-应变关系进行简化,定义高温( $20\text{ }^{\circ}\text{C}<\theta\leqslant800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下结构钢 Q345 的应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )关系为三折线形式(图 1)。

1.2 网架模型的建立

根据网架特性,选用 ANSYS 单元库中 LINK 8 空间杆单元来模拟网架杆件,COMBIN 14 弹簧单元模拟网架支座弹性约束的力学特性,对 5 种不同支承形式的正放四角锥网架整体建模。各网架模型平面布置图,如图 2 所示。图 2(a)为周边支承网架,四角点采用 A 类支座,其他支座均为 B 类支座;图 2(b)为周边多点支承网架,四角点采用 A 类支座,四周边跨中位置设置 B 类支座;图 2(c)为四角点支承网架,在距离两边界 1.5 个网格的下弦节点处设定 4 个 A 类支座;图 2(d)为对边支承网架,四角点仍采用 A 类支座,对称两边采用 B 类支座;图 2(e)为三边支承网架,除有一自由边外,其他同周边支承布置。对于 A 类支座,假定其三向固定,可转动;B 类支座假定其竖向固定,切向自由,法向弹性,可转动。

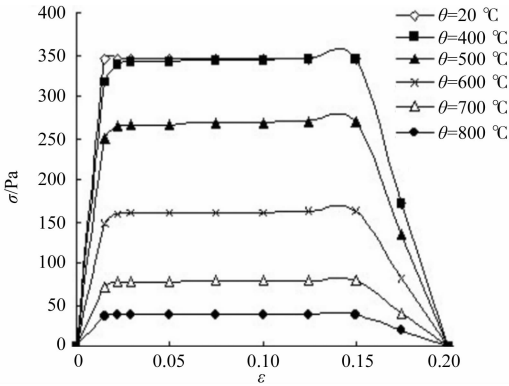


图 1 高温下钢材应力-应变曲线图  
Fig. 1 Stress-strain curve of steel under high temperatures

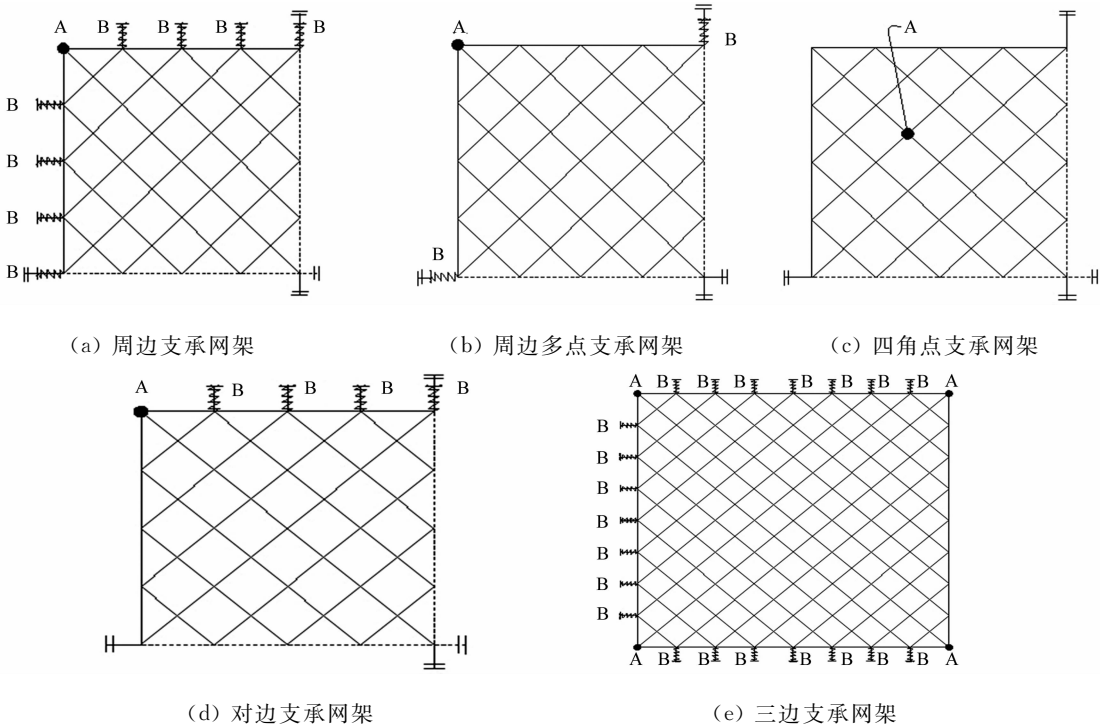


图 2 不同支承形式下的网架模型

Fig. 2 Space truss models under different support conditions

1.3 杆件温度荷载

李国强等<sup>[11]</sup>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,基于此公式,文中利用 ANSYS 编制了相关的计算程序,对杆件升温过程进行数值模拟。假定火源最大热释放率均取 25 MW,且位于底面中心,为简化计算,取不均匀系数为 1,即均匀升温,则杆件升温曲线与空气升温曲线比较,如图 3 所示。

1.4 破坏准则

火灾下,结构整体承载力极限状态有 2 点判别标准<sup>[11]</sup>:1) 网架丧失整体稳定;2) 网架产生不适于

继续承载的整体变形, 即当网架挠度达到计算跨度的 1/30 时, 表明结构达到了耐火极限. 参考以上标准, 鉴于正放四角锥网架整体稳定性比较好, 火灾升温作用下往往是由于在外荷载作用下产生过大位移, 导致无法继续承载而造成的结构破坏. 因此, 以网架挠度达到短边计算跨度的 1/30 作为中止程序的条件.

2 计算结果及分析

2.1 支承形式对位移变化的影响

不同弹簧刚度( $k$ )下, 周边支承、周边多点支承、对边支承、三边支承及点支承形式网架结构的最大节点位移-温度( $\Delta\theta$ )曲线, 如图 4 所示. 由图 4 可见: 当  $k=0$  时, 其临界温度( $\theta_{cr}$ )分别为 485.6, 464.3, 110.6, 90.4  $^{\circ}\text{C}$ ; 当  $k=1\times 10^6$  时, 其临界温度分别为 515.3, 482.4, 126, 126  $^{\circ}\text{C}$ ; 当  $k=+\infty$  时, 临界温度分别为 549.8, 518.8, 210.7, 164.0, 544.5  $^{\circ}\text{C}$ . 由此可得出如下结论: 1) 支承形式对网架结构的抗火性能影响显著, 其中周边支承的网架的抗火性能最好; 2) 对于同种支承形式网架, 弹簧刚度越大, 临界温度越高, 抗火性能越好; 3) 当构件温度约达到 500  $^{\circ}\text{C}$  时, 位移急剧增加并很快使构件丧失承载能力. 从图 4 中还可看出: 在对边支承和三边支承形式下, 正放四角锥网架的耐火能力很低, 这不利于网架结构抗火.

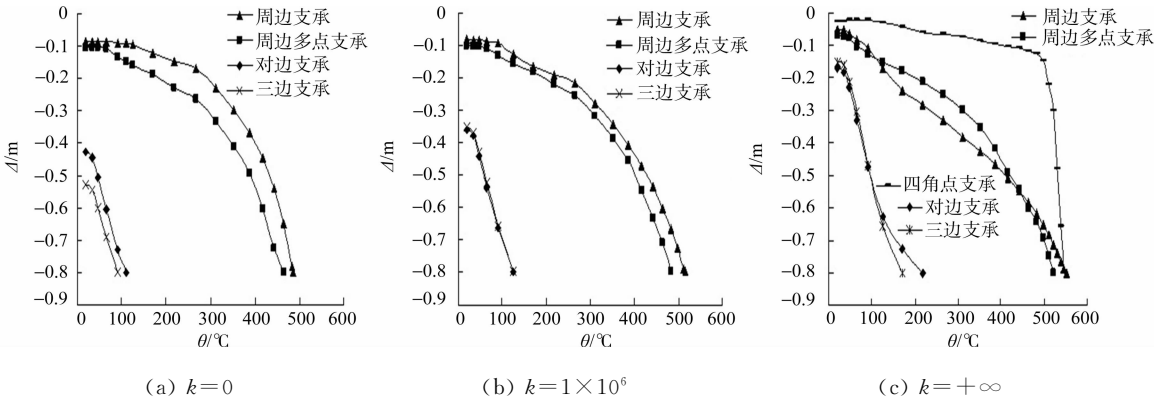


图 4 最大节点位移-温度曲线

Fig. 4 Maximum displacement of node-temperature curves

对于对边支承和三边支承形式的网架, 由于自由边的存在对网架内力分布和挠度均不利, 故在静力条件下即可达到较大的节点位移. 在升温初期, 材料属性稍微退化, 但影响不大. 由于热膨胀引起的几何非线性及自由边的叠加作用, 当开始升温, 其变形就急剧增加, 故在 100  $^{\circ}\text{C}$  左右即达到极限准则. 随着弹簧刚度的不断增大, 支座约束变大, 其临界温度也随之升高.

对于周边和多点支承形式的网架, 当支座弹簧刚度较小时, 在火灾发展的初期, 杆件温度上升相对较低, 钢材的弹性模量和屈服强度降低较小, 由于热膨胀效应使网架结构中心起拱, 节点的竖向位移有缓慢的减小. 但当温升较高(300  $^{\circ}\text{C}$  左右)时, 钢材的弹性模量和屈服强度都急剧下降, 同时温度应力与屈服强度比值增大很多, 网架的竖向位移呈现出急剧下降的特点, 结构趋于破坏; 而当结构支座刚度较大时, 由于温度应力得不到释放, 结构中有许多杆件会产生较大的压应力, 从而使结构位移在温升较低即可呈现出明显下降的趋势. 当温升较高时, 材料属性的退化与温度应力相叠加, 位移将加速增大. 但是, 此时由于法向弹簧刚度较大, 对于竖向位移的迅速增大又有一定的限制作用, 位移又不像支座刚度较小时增大速率那么大.

对于点支承网架, 由于设计带有一定长度的悬挑网格, 可使跨中挠度降低, 故升温前节点位移较小; 当温升较低时, 由于其周边无约束, 由热膨胀产生的温度应力能够有较大程度释放, 且钢材的弹性模量和屈服强度降低较小, 不会对位移有明显的影响; 随着温度升高, 钢材的弹性模量和屈服强度下降愈发

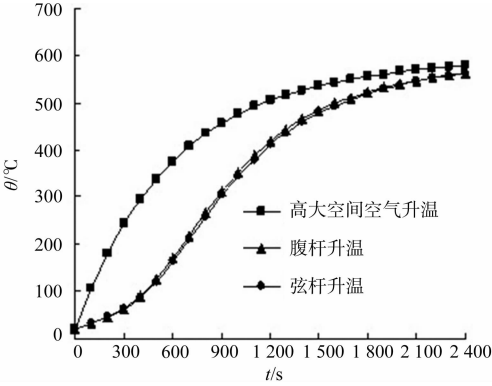


图 3 杆件升温过程与空气升温比较  
Fig. 3 Temperature-rise comparison between air and space truss members

明显;当温度达到 500 ℃时,网架位移立刻以极快的速率突然下降,大批杆件瞬间失效,网架倒塌。

2.2 火灾均匀升温对杆件内力变化的影响

对于周边支承网架(图 5(a)),选取 1#,2#,3#,4# 不同位置的四根上弦杆,探讨不同弹簧刚度情况下杆件内力的变化规律,其轴力-温度( $F-\theta$ )曲线如图 5 所示。从图 5 可知:以 352.1 ℃作为参考温度(此时恰好升温 1 000 s),当  $k=0$  时,四根上弦杆的轴力分别为-108.1,-75.4,-90.6,-59.4 kN;当  $k=1\times 10^6$  时,其轴力分别为-107.6,-78.4,-94.5,-60.1 kN;当  $k=+\infty$  时,轴力分别为-105.0,-86.2,-99.7,-58.2 kN。由此可知,网架上弦杆内力变化规律性较强。

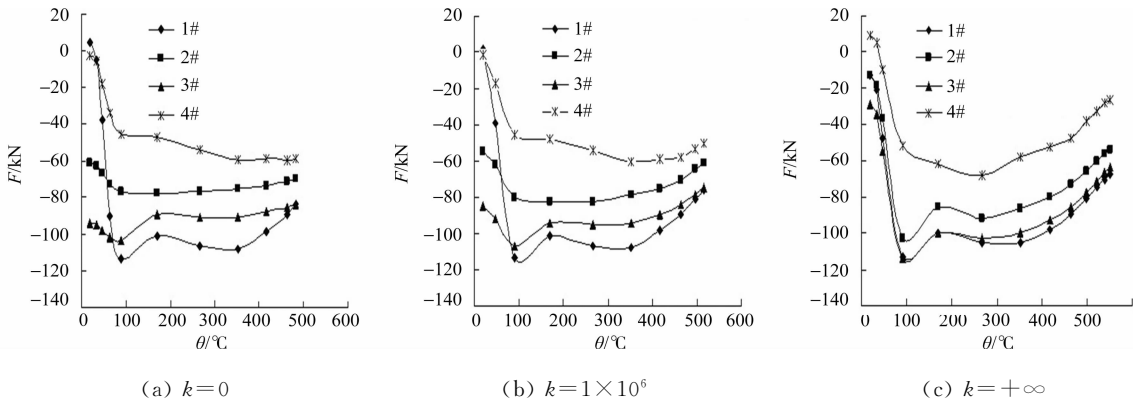


图 5 不同上弦杆的轴力-温度曲线

Fig. 5 Axial force-temperature curve of upper chord members

杆件升温过程均大致可分为两个阶段.第一阶段为常温状态升温至 400 s(温度为 90.4 ℃),此时杆件的屈服强度不变,弹性模量也损失不大,结构主要受热膨胀作用,温度应力增大,从而使轴力不断增大;第二阶段从 400 s 至结构失效,该阶段随着温度升高,钢材的屈服强度和弹性模量不断下降,结构软化,杆件轴力也开始降低,直至网架出现过大大变形而中止。

无论弹簧刚度多大,杆件轴力由角部向跨中均先减小后逐渐增大,沿网架边界自角部向中间呈现逐渐减小的趋势;当弹簧刚度较小时,轴力最大杆出现在角部,这主要是由于周边支座约束刚度大,杆件升温热膨胀效应使轴力比较大;随着弹簧刚度的增大,轴力最大杆会转移到跨中。

随着弹簧刚度的逐渐增大,各杆的轴力均有减小的趋势,越靠近跨中位置,这种趋势越明显,但总体而言,其减小幅度不大。由此可见,弹簧刚度对同一上弦杆轴力影响较小。

3 结论

采用 ANSYS 非线性有限元分析软件,考虑边界不同弹簧刚度条件,对不同支承形式正放四角锥网架结构的防火性能进行研究,可以得到以下 5 点主要结论。

1) 对于周边支承网架、点支承网架及周边多点支承形式网架,均是由于温度过高(大致在 500 ℃左右),其钢材的弹性模量和屈服强度急剧下降,在材料属性退化和温度应力的共同作用下,网架产生过大的变形而导致结构倒塌;周边支承与周边点支承网架的临界温度相近,说明支承数量对网架防火性能影响不是很大;对于点支承网架,虽然受火前期、中期性能较好,但当达到一定温度时会发生瞬间倒塌,故不建议工程采用。

2) 对于三边支承网架与对边支承的网架,由于其自由边的不利影响和热膨胀效应共同作用,往往在较低的温度下就会破坏;当随着支座弹簧刚度的增大,两者的临界温度会有升高的趋势,但这种趋势变化不大,因此也不建议工程采用。

3) 法向弹簧刚度对正放四角锥网架防火性能有一定影响。对于同种支承形式的网架,在一定范围内弹簧刚度越大,其临界温度越高,防火性能越好。故建议在易发生火灾的场所,为了人员能够有更多时间安全撤离,应设置弹簧刚度足够大的支座。

4) 升温过程中,法向弹簧刚度大小对同一上弦杆内力影响较小;上弦杆件内力会呈现由角部向跨中先减小后逐渐增大,而沿网架边界自角部向中间逐渐减小的变化趋势,其内力变化规律与静力场中明

显不一致,故有待于对温度场中弦杆、腹杆作更深层次的研究.

5) 支承形式对网架结构的抗火性能影响显著,相比于其他支承形式网架,周边支承正放四角锥网架临界温度高,抗火性能好,为实际工程网架结构设计中支承形式选择提供理论参考.

参考文献:

[1] BUCHANAN A H. Structural design for fire safety[M]. [s. l. ]:John Wiley & Sons LTD,2001:73-97.  
[2] WAKD F L. Experimental behavior of a steel structure under natural fire[J]. Fire Safety Journal,2006,41(7):509-522.  
[3] LAMONT S. Behavior of structures in fire and real design-A case study[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2006,16(5):5-35.  
[4] WANG Y C,LENNON T,MOORE D B. The behavior of Steel frames subject to fire[J]. J Construct Steel Res, 1995,35(3):291-322.  
[5] RICHARD J Y. Advanced analysis and behaviour of steel structures in fire[M]. [s. l. ]:John Wiley & Sons LTD, 2001:57-91.  
[6] 李国强,陈凯. 门式刚架结构实用抗火设计方法[J]. 建筑结构,2001,31(6):14-18.  
[7] 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,2008:66-80.  
[8] 刘国军. 预应力组合网架结构的性能化抗火研究[D]. 厦门:华侨大学,2010:40-71.  
[9] 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,2007:101-112.  
[10] 中国工程建设标准化协会. CECS 200: 2006 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006:9-11.  
[11] 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, 2006:149-150.

Fire-Resistant Behavior of Square Pyramid Space Trusses  
under Different Support Conditions

SUN Wei-jian, GAO Xuan-neng, ZHANG Hui-hua

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

**Abstract:** To investigate the fire-resistant behavior of square pyramid space trusses under different support conditions, a numerical fire-structure coupling analysis model under the large space fire was established by the nonlinear finite element software ANSYS. Considering the influence of different constraint sping stiffness, the whole process response of square pyramid space trusses in uniform temperature field was simulated, and the internal forces were calculated. The numerical results show that the square pyramid space trusses with surrounding support conditions has the highest critical temperature irrelevant to the value of spring stiffness, which shows superior fire-resistant behavior; and the critical temperature of square pyramid space trusses increases with increasing the spring stiffness for a certain support condition. The spring stiffness influences slightly the internal force of a same upper chord during the temperature increment. Under uniform temperature field, the internal force of upper chords presents a tendency of the initial decrease, but increase after reaching a minimum from the corner to the span centre; and presents a tendency of gradual decrease along the boundary from the corner to the middle position. The position of the upper chord member with maximum internal force is transferred from the corner to the span center with increasing the spring stiffness.

**Keywords:** square pyramid space trusses; fire-resistant behavior; support conditions; spring stiffness; temperature field, numerical simulation

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)