

文章编号: 1000-5013(2009) 04 0458- 06

网架结构抗火性能受支座约束的影响

杜 咏¹, 李国强²

(1. 南京工业大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京, 21000;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 常温下基于有限元法的网架分析设计程序较多, 但均未考虑高温下钢材物理性能和力学性能的变化, 以及支座约束对网架受力性能的影响. 为了较真实地模拟网架在火灾中的力学行为, 在 ANSYS 有限元分析程序的单元库、材料模型库基础上, 构建符合网架结构力学模型和进行瞬态热分析的数值分析模型, 并验证该数值分析模型对网架在火灾中力学反应分析的准确性, 为研究网架结构在火灾中全过程反应提供切实可行的分析工具.

关键词: 网架结构; 临界温度; 弹性支座; 有限元模型

中图分类号: TU 356. 01; TU 317+ . 1

文献标识码: A

在危害建筑物的灾害中, 火灾是最常见的灾害之一. 在诸多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. 因此, 网架结构作为大空间建筑的一种重要结构形式, 对其进行结构抗火性能的研究, 是高大空间建筑钢结构抗火设计必不可少的一部分. 文[1] 研究了均匀温度场中网架结构的几何特征、荷载比对网架结构临界温度的影响, 但未考虑支座约束对网架结构临界温度的影响. 本文在不同支座约束参数条件下, 对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 网架结构有限元模型的参量定义

1. 1 单元特性

根据网架结构有限元法的计算假定^[2], 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(拉力或压力), 可根据单元的受力特性选用 ANSYS 单元体库中 LINK 8 空间杆单元, 并选用 ANSYS 单元体库中 COMBIN 39 弹簧单元模拟网架橡胶支座的力学特性.

1. 1. 1 LINK 8 空间杆单元 简称 LINK 8 单元, 是三维空间承受单轴拉力或压力的计算单元. 其杆件两端的 i, j 节点具有 X, Y, Z 方向的 3 个位移自由度, 不能承受力矩. 通过定义材料属性及命令开关设置, 包含塑性、膨胀、应力强化、大变形对结构力学计算的影响, 如图 1 所示. LINK 8 单元要求材料性是均匀各向同性, 杆长度必须大于零. 即 i, j 两点不能重合, 杆截面面积必须大于零, 温度施加在单元节点上. 当单元两节点温度不同时, 温度沿单元长度为线性变化, 杆横截面应力为均匀分布.

1. 1. 2 COMBIN 39 弹簧单元 简称 COMBIN 39 单元, 是一维单元. 其两端的 i, j 节点具有 X, Y, Z 方向的 3 个位移自由度, 不能承受力矩, 通过定义材料属性及命令开关设置, 可包含应力强化、大变形对结构力学计算的影响. 弹性性能通过自定义的位移-力曲线确定, 如图 2 所示.

1. 2 材料属性

根据结构分析对象和加载方式的需要, 将文[3] 中高温下钢材的应力-应变关系进行简化. 定义高

收稿日期: 2008-08-13

通信作者: 杜 咏(1967-), 女, 副教授, 工学博士, 主要从事大空间建筑钢结构抗火的研究. E-mail: yongdu_mail@126. com.

基金项目: 国家科技部科研基金资助项目(2005BA908B12)

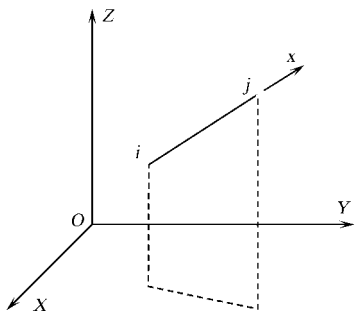


图 1 LINK 8 空间杆单元

Fig. 1 LINK 8 space bar element

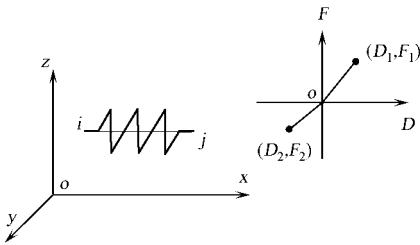


图 2 COMBIN 39 弹簧单元

Fig. 2 COMBIN 39 spring element

温下($20\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) 结构钢 Q235 的应力-应变本构关系为三折线形式, 如图 3 所示。

高温下, 结构钢 Q235 的物理参数和弹性模量按文[4]确定。(1) 物理参数。热膨胀系数 α_s 为 $1.4 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$, 导热系数 λ 为 $45\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$, 比热 C_s 为 $600\text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$, 密度 ρ_s 为 $7.85\text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 泊桑比 ν_s 为 0.3。(2) 弹性模量。 $E_t = X_t E$ 。其中, t_s 为温度($^{\circ}\text{C}$); E_t 为温度为 t_s 时钢材的弹性模量(MPa); E 为常温下钢材的弹性模量(MPa); X_t 为高温下钢材弹性模量折减系数。当 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_s < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $X_t = \frac{7t_s - 4\,780}{6t_s - 4\,760}$; 而当 600

$^{\circ}\text{C} \leq t_s < 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $X_t = \frac{1\,000 - t_s}{6t_s - 2\,800}$ 。

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和对杆件中性轴的惯性矩作为 LINK 8 单元的实常数。以上定义的数量纲均采用国际单位制。

1.4 加载方式

荷载是指结构的支座约束条件, 以及常温下的设计荷载及温度荷载。这 3 种荷载形式按以下 2 个设计的荷载步先后施加于单元的节点上, 并且满足网架结构分析仅在节点施载的加载方式。(1) 对所设计的支座约束条件下的结构模型, 在常温下施加设计荷载并对结构进行线弹性分析。(2) 将温度作为体荷载叠加在第 1 个荷载步上, 而在第 2 个荷载步中, 又将温度分为相同的若干子步, 逐级加载求解。通过逐步地施加一个恒定的温度增量求解, 一直到求解开始发散为止。

2 ANSYS 分析程序验证

为验证 ANSYS 程序建立的网架结构模型在外界作用下结构反应的正确性, 选用文[2]中的一个例题, 分别用消元法手算和 ANSYS 程序中的迭代法, 求解网架结构的整体刚度矩阵。

例 1 图 4 为正放四角锥网架, 其网格尺寸 a 为 4 m, 网架高度 h 为 3.0 m, A, B 点为固定支座, 网架杆件采用焊接钢管, 材料为 Q235, 截面面积 A 为 11.95 cm^2 (外径 89 mm \times 壁厚 4.5 mm), 上、下弦各作用均布荷载 q 为 2 kPa (包括网架自重), 求当温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时网架各杆件的内力。

在已知的边界条件下, 可求解图 4 网架结构的总刚度方程, 得结点位移, 从而可计算网架任一杆件的内力。文[3]采用消元法, 通过手算所获精确结果与 ANSYS 程序迭代法计算内力的比较结果, 如表 1

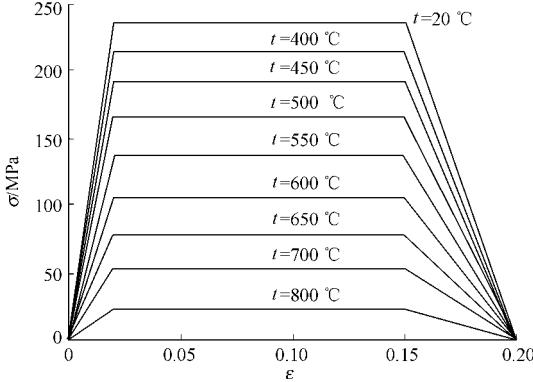


图 3 结构钢 Q235 应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relation curve of the structural steel Q235

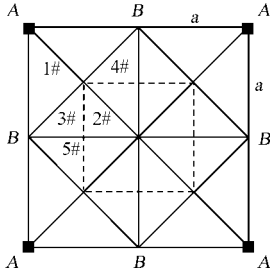


图 4 正放四角锥网架平面布置

Fig. 4 Layout of square pyramid space grids

所示. 表 1 中, F 为杆件轴力, 轴力为负表示杆件受压力, 反之为拉力, η 为误差. 由于作用在网架上的均布荷载没有剥离网架自重, 当该荷载施加在 ANSYS 网架分析模型上, 就重复计入了网架自重, 导致杆件轴力的 ANSYS 分析值与精确计算值的误差. 如果剔除这个因素, 误差就较小. 这说明, ANSYS 程序对网架结构的温度内力计算是满足结构分析要求的.

3 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. 火灾时, 结构或构件的荷载效按文[4] 中偶然组合工况取值; 常温下, 结构或构件的承载力按文[5] 承载力极限状态下的荷载效应组合进行设计.

3.1 构件荷载比

对压杆而言, 其承载力由稳定控制, 可定义受压构件荷载比 $R_o = \frac{\sigma_0}{\varphi \cdot f}$. 其中, σ_0 为火灾时偶然组合工况下构件的荷载效应(Pa); φ 为常温下压杆稳定系数; f 为钢材的强度设计值(Pa).

3.2 结构荷载比

对整体结构而言, 结构荷载比 R 可定义为火灾时偶然组合工况下, 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.

4 网架结构临界温度的判断准则

高温下, 轴心受拉或受压钢构件的截面强度为

$$\frac{N}{A_n} \leq \eta_{\gamma_R} f.$$

(1)

式(1) 中, N 为火灾下构件的轴向拉力或轴向压力设计值; A_n 为构件的净截面面积; η_{γ_R} 为高温下钢材的强度折减系数; γ_R 为钢构件的抗力分项系数, 近似取 $\gamma_R = 1.1$. 高温下轴心受压钢构件的整体稳定为

$$\frac{N}{\varphi_A A} \leq \eta_{\gamma_R} f.$$

(2)

式(2) 中, $\varphi_A = \alpha \cdot \varphi$, φ 为高温下轴心受压钢构件的稳定系数; α 为高温下轴心受压钢构件的稳定验算参数, 对于普通结构钢构件, 可根据构件长细比和温度在文[4] 中查取.

在每一步温度加载求解后, 采用 ANSYS 的内置 APDL 功能, 提取 ANSYS 非线性有限元^[6] 计算求解的单元应力值. 将每一个单元的应力值逐一导入式(1) 或式(2) 进行比较, 如果满足要求, 该单元可继续工作; 否则, 该单元已达到稳定的极限状态应退出工作, 并将退出工作的单元剔除. 结构在每一次出现剔除单元时, 其整体刚度将降低, 该剔除单元在总刚度矩阵中的位置, 会被零元素代替.

在这样的循环判断条件下, 最终会因为以下两种情况而使 ANSYS 的求解结果不收敛. (1) 总刚度矩阵中零元素过多, 造成矩阵奇异, 从而导致结果不收敛. (2) 某一节点由于与之相连的单元均出工作, 从而导致该节点形成几何可变. 这两种情况均设定为结构的承载力极限状态, 此时的温度值称为结构临界温度 t_{cr} .

5 网架结构抗火性能全过程反应分析

在以上分析基础上, 建立火灾下网架结构的全过程反应程序, 如图 5 所示. 利用 ANSYS 非线性有限元求解器, 可得网架结构在火灾中全过程反应. 考察图 5, 在“ 建立结构模型” 环节中, 可以通过杆件实常数、边界支座约束和节点几何坐标的参数变化, 得到不同的结构模型.

在“ 判断结构极限承载力状态” 环节, 可得到影响结构抗火性能的关键参数——结构荷载比 R ; 在确定的结构荷载比状态下, 可在“ 温度加载” 环节中, 通过 APDL 功能自定义网架结构所处的温度场; 在“ 施加温度增量” 环节模拟了火灾的升温过程, 对每一个温度增量荷载步求解, 可得结构在火灾升温过程中的力学反应, 最终得到结构的临界温度.

表 1 算例杆件轴力的计算比较

Tab. 1 Calculation results of the axial forces of bar

杆件号	F/ kN		η %
	ANSYS 计算值	精确解	
1#	- 17. 62	- 20. 34	13. 4
2#	- 11. 58	- 12. 31	5. 9
3#	37. 37	32. 75	14. 1
5#	- 122. 63	- 123. 25	0. 5

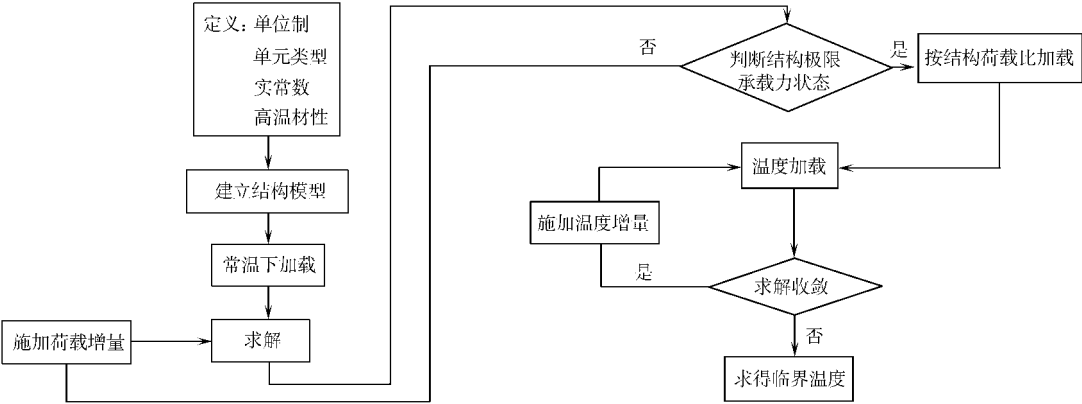


图 5 ANSYS 程序求解框图
Fig.5 Block diagram of ANSYS

6 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 4 种^[2]. 根据支座节点的构造情况, 可分别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. 以上边界约束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^[7].

周边支承是网架结构较常用的一种支承形式, 以网架结构在竖向和水平荷载下不发生刚体位移为原则, 可假定周边支承网架结构的边界条件为径向弹性约束(线弹性)、切向自由(如图 6 中 C 类型支座)、竖向固定(如图 6 中 A 类型支座)和 4 个支承边中点支座切向固定(如图 6 中 B 类型支座). 其中, 径向弹性约束刚度主要受板式橡胶支座胶料的物理性能和橡胶垫板的力学性能影响. 即

$$k = GA / d_0. \tag{3}$$

式(3)中, k 为弹性约束刚度($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$); G 为抗剪弹性模量^[7], 取 $0.98 \sim 1.47 \text{ MPa}$; A 为支座承压面积(mm^2); d_0 为橡胶层厚度(mm).

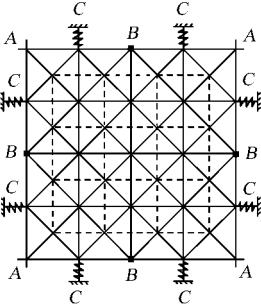
7 弹性支座约束方案

橡胶板支座水平方向刚度可根据式(3)确定. 结合国内橡胶板支座的产品规格^[8], 橡胶板支座水平方向刚度(k), 如表 2 所示. 表 2 中, 支座几何尺寸长为 l , 宽为 b . 综合考虑表 2 中橡胶板支座水平刚度变化范围, 选择 $k = 0.1 \sim 40 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 作为弹性支座约束刚度参数分析取值范围.

表 2 橡胶板支座水平刚度

Tab.2		Horizontal stiffness of rubber support				kN • mm ⁻¹	
<i>d</i> ₀ /mm	<i>l</i> × <i>b</i> /mm × mm						
	180 × 180	240 × 240	300 × 300	400 × 400	550 × 550	700 × 700	
14	2.27~ 3.40	4.03~ 6.05	6.30~ 9.45	11.20~ 16.80	21.18~ 31.76	34.30~ 51.45	
24	1.32~ 1.99	2.35~ 3.53	3.68~ 5.51	6.53~ 9.80	12.35~ 18.53	20.01~ 30.01	
34	0.93~ 1.40	1.66~ 2.49	2.59~ 3.89	4.61~ 6.92	8.72~ 13.08	14.12~ 21.19	
44	0.72~ 1.08	1.28~ 1.92	2.01~ 3.01	3.56~ 5.35	6.74~ 10.11	10.91~ 16.37	
54	0.59~ 0.88	1.05~ 1.57	1.63~ 2.45	2.90~ 4.36	5.49~ 8.24	8.89~ 13.34	
64	0.50~ 0.74	0.88~ 1.32	1.38~ 2.07	2.45~ 3.68	4.63~ 6.95	7.50~ 11.26	
74	0.43~ 0.64	0.76~ 1.14	1.19~ 1.79	2.12~ 3.18	4.01~ 6.01	6.49~ 9.73	
84	0.38~ 0.57	0.67~ 1.01	1.05~ 1.58	1.87~ 2.80	3.53~ 5.29	5.72~ 8.58	

图 6 网架支承布置
Fig.6 Layout of grid structure supports



8 支座约束参数分析

8.1 弹性约束下构件的力学反应

构件破坏一般先于整体结构破坏, 因此, 首先考察具有弹性支座约束的轴向受力构件在均匀升温状态下的力学反应. 设计轴向受力构件, 如图 7 所示, 构件长度为 l , 横截面面积为 A , 弹性模量为 E_t , 横截面惯性矩为 I , 弹性支座刚度为 k . 当升温为 Δt 时, 对支座 B 建立位移法基本方程, 有

$$r_{1,1}X_1 + r_{1,p} = 0. \tag{4}$$

其中, $r_{1,1} = \frac{E_t A}{l} + k$, $r_{1,p} = -\alpha \Delta t \cdot E_t A$. 将 $r_{1,1}$, $r_{1,p}$ 代入式(4), 可得

$$X_1 = \frac{\alpha \Delta t \cdot E_t A}{E_t A / l + k}.$$

温差 Δt 产生的杆件温度应力由两部分组成, 一部分是节点 B 被约束住时杆件的温度应力, 即

$$\sigma_1 = -E_t \alpha \Delta t; \tag{5}$$

另一部分是节点 B 约束发生位移 X_1 时, 约束反力产生的杆件应力 σ_2 , 即

$$\sigma_2 = \frac{E_t \alpha \Delta t}{1 + kl/E_t A}. \tag{6}$$

由式(5), (6)可得图 7 所示构件的温度应力 σ_t , 有

$$\sigma_t = -\left(1 - \frac{1}{1 + kl/E_t A}\right)E_t \alpha \Delta t. \tag{7}$$

考察式(7)可得, 当其他参数不变时, 构件的温度应力 σ_t 增长随着弹性支座刚度 k 的增大而增快. 当构件的温度应力等于其承载力水平时, 构件达到承载力极限状态, 该力学反应过程如图 8 所示.

8.2 弹性约束下结构的临界温度

按图 6 所示的支承布置和弹性约束刚度取值方案, 采用基于 ANSYS 通用有限元的网架结构抗火性能分析方法, 对均匀温度场中不同几何特征网架结构在不同支座弹性约束刚度下所对应的临界温度进行分析.

分别设计两种网架, 如图 9 所示. 网架 I 的尺寸为 24 m(长) \times 24 m(宽) \times 1.4 m(高), $n = 4$, 剪切刚度与整体抗弯刚度的比值(γ)为 0.238; 网架 II 的尺寸为 36 m(长) \times 36 m(宽) \times 1.6 m(高), $n = 6$, 其剪切刚度与整体抗弯刚度的比值(γ)为 0.139.

选用 ANSYS 单元库中 LINK 8 空间杆单元和 COMBIN 39 弹簧单元, 分别模拟网架结构杆件和橡胶支座约束. 当弹性刚度参数 k 为 $0.1 \sim 40 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$, 结构荷载比为 0.6 时, 可分别得到时均匀温度场中网架 I、网架 II 临界温度随支座弹性刚度变化的规律, 如图 10 所示. 由图 10 可知, 随着橡胶支座弹性刚度的增加, 网架杆件受约束程度也增加. 由式(5)可得, 构件温度应力增长也将加快, 根据图 8 所示, 构件达到承载力极限状态时的临界温度将降低的. 因此, 整体结构的临界温度随着橡胶支座弹性刚度的增加呈下降趋势.

从图 10 可以知道, 当网架 I、网架 II 的支座弹性刚度参数 k 为 $0.1 \sim 2.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 支座弹性刚度的变化对网架结构临界温度的影响程度较大; 而当其弹性刚度参数 k 为 $2.0 \sim 4.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 支座弹性刚度的变化对网架结构临界温度的影响程度较小, 橡胶支座弹性刚度的变化对网架结构临界

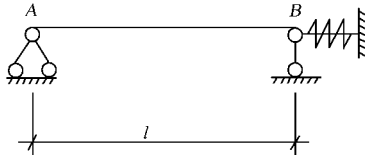


图 7 构件力学分析模型
Fig. 7 The mechanical model of members

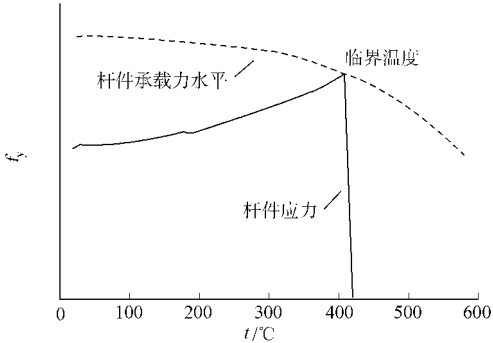


图 8 构件力学反应历程
Fig. 8 Mechanical reaction mechanisms of the members

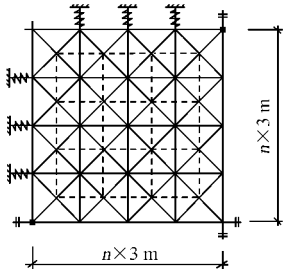


图 9 网架结构分析模型
Fig. 9 Analysis model of grid structure

温度的影响程度呈非线性状态.

从图 10 可知,当弹性刚度参数 k 小于 $0.1\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,网架结构临界温度逼近支座为自由情况下的结构临界温度($570\text{ }^{\circ}\text{C}$);而当弹性刚度参数 k 小于 $40.0\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$,网架结构临界温度逼近支座为固定情况下的结构临界温度($110\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[1]. 因此,当弹性刚度足够小时,弹性支座可近似为自由;而当径向弹性刚度足够大时,弹性支座可近似为固定支座.

9 结束语

结构力学的位移法理论分析表明,构件临界温度随着支座弹性刚度的增加呈下降趋势. 数值模拟试验结果表明,网架结构的临界温度随着橡胶支座弹性刚度的增加呈非线性下降趋势. 数值模拟得到支座约束参数对正放四角锥网架临界温度的影响规律,为大空间建筑网架结构抗火设计实用方法提供理论依据.

参考文献:

[1] 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.

[2] 沈祖炎, 陈扬骥. 网架与网壳[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 65 71.

[3] BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 5950-8: 1990 Structural use of steelwork in building: Code of practice for fire resistant design[S]. London: BSI, 1990.

[4] 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.

[5] 中华人民共和国建设部. GB 50009- 2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 6 9.

[6] 徐玉野, 王全凤, 柴振岭. 钢筋混凝土柱火灾试验数值模拟的关键技术[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29 (4): 588 592.

[7] 严 慧, 董石麟. 板式橡胶支座节点的设计与应用研究[J]. 空间结构, 1995, 1(2): 33 40.

[8] 中国工程建设标准化协会. JGJ 7- 1991 网架结构设计 with 施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 22 25.

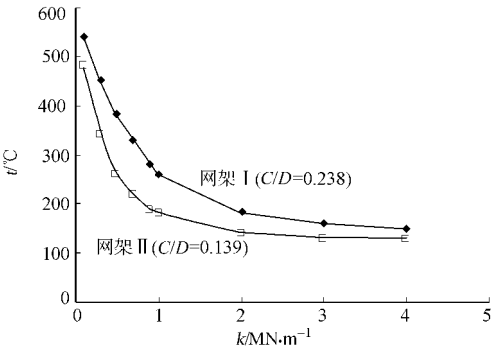


图 10 临界温度随弹性刚度变化曲线

Fig. 10 Relationship between critical temperature and elastic stiffness

Influence of Support Restraint on the Fire-Resistant Performance of Grid Structure

DU Yong¹, LI Guo-qiang²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A number of finite element method (FEM) software to analyze the grid structures at normal temperature don't take account of the influence of high temperature on material properties, mechanical properties and support restraint. In order to simulate more accurately the mechanical responses of grid structures in fire, a grid structural model is built from the element library and material table of FEM ANSYS software. This numerical model based on ANSYS can carry out the mechanical analysis and the transient heat analysis precisely, and the computer method will become an effective tool to evaluate the grid structure response through the whole fire.

Keywords: grid structure; critical temperature; elastic support; finite element method

(责任编辑: 钱 筠 英文审校: 方德平)