

# 高温下钢框架敏感构件评估方法

高英棋 左 辉 董凯杰 宋宇宇

(河南工业大学, 郑州 450000)

**【摘要】**敏感性较大的构件受火时易使结构发生连续倒塌,引起结构安全性的降低,应提前加强保护。为了确定钢框架结构受火时可能引起结构连续倒塌的敏感构件,本文提出了一种高温下钢框架结构敏感构件的计算方法。使用 ANSYS 有限元软件进行数值模拟,提取构件在不同温度荷载作用下的应力值,计算得到高温作用下构件的敏感性系数,最终确定结构中最敏感的构件。

**【关键词】**钢框架; 敏感性系数; 高温

**【中图分类号】**TU311.41 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2020)03-0134-05

**【DOI】**10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2020.03.20

## 引言

钢结构以自重轻、施工方便等优点广泛应用于厂房、机场等大跨空间结构,但由于钢材耐火性较差,力学特性随着环境温度的升高会产生很大的变化,安全性能急剧降低,结构存在较大安全隐患,发生火灾时往往会造成巨大的损失。对结构薄弱区域增加防护措施,可减少灾难发生,所以提前确定在高温下可能会引起结构连续倒塌的敏感构件十分重要。

当前钢框架研究多采用数值模拟与实验研究相结合的方法<sup>[1-2]</sup>,李思禹等<sup>[3]</sup>以钢桁架结构为研究对象,模拟分析了钢桁架结构在热力耦合作用下的受力性能、钢屋架的耐火能力。当前在结构设计时,更多是考虑结构的力学性能和耐火能力,但是结构中总是存在薄弱构件,使结构的安全性能降低。因此,能高效地进行响应敏感性分析也显得日益重要,有学者对结构的构件进行了敏感性分析,分别建立了结构鲁棒性和冗余度、敏感性的关系<sup>[4-7]</sup>。李天福<sup>[8]</sup>用数学方法,将各个位置的杆件性能与温度的关系拟合成一条曲线,分别描述了上下表面、上下弦杆、腹杆等位置的杆件结构性能与温度的关系。白珂冰<sup>[9]</sup>将杆件三向敏感性系数的

平均值作为评价重要性的指标。Pandey<sup>[10]</sup>发现约束的超静定次数已经不能准确评价结构冗余度,因此对结构响应的灵敏度进行分析,提出一个计算连续体结构冗余度指标的方法。韩庆华等<sup>[11]</sup>对立体桁架结构进行敏感性分析,得到极端荷载作用下结构的连续倒塌破坏模式以及敏感构件、关键构件的分布规律。赵啸峰等<sup>[12]</sup>提出失效杆件的确定一般采用敏感性分析方法,敏感性系数与受损杆件的影响范围呈正相关。沈利来等<sup>[13]</sup>认为结构的冗余度指标与其结构单元的敏感性系数成反比,低冗余构件周围易发生连续性倒塌。另外,文献<sup>[14]</sup>指出,对于正在施工的钢结构,可采用反映结构受力及变形的全自动监测系统,进行应变监测和变形监测,以实时确定施工过程中的薄弱构件。

当前建筑结构抗连续倒塌性能分析多针对常温条件,对钢框架结构火灾下抗连续倒塌的研究较少。本文针对高温荷载下钢框架结构的抗连续倒塌性能,对2层4跨6列钢框架结构的构件敏感性进行了分析,并探讨一种高温荷载下钢框架结构构件敏感性的评估方法。

## 1 构件敏感性系数

构件敏感性系数是在结构受损时,评价某一构

**【基金项目】** 河南工业大学科教融合项目“高温下空间结构抗连续倒塌性能指标分析”(编号:26400133)

**【作者简介】** 高英棋(1997-),女,在读本科生,主要研究方向:大跨结构数值分析。

件敏感程度的指标,对敏感构件进行强化可提高结构的安全性。本文通过确定一种计算构件敏感性的方法,对结构中各个构件的敏感性系数值进行比较,判断出敏感构件。

日本钢结构协会以某些构件失效后的承载能力的变化量与初始状态下的承载能力为分析对象,将前者与后者的比值定义为敏感性指标  $S. I.$ , 表达式为<sup>[15]</sup>

$$S. I. = \frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_0$  为初始状态下的结构承载能力,  $\lambda_{damage}$  为某些构件失效后的结构承载能力。公式(1)以结构的承载能力作为参数,利用敏感性指标的变化趋势评价结构抗连续倒塌的能力,当  $S. I. \rightarrow 1$  时,失效构件为敏感构件,当  $S. I. \rightarrow 0$  时,失效构件为非敏感构件。

徐颖等<sup>[16]</sup>提出在进行敏感性分析时,构件受损前后的应力比对敏感性系数有较大影响。本文选择构件应力作为分析参量。但是公式(1)仅以构件失效前后的结构承载力进行分析,未考虑温度作用引起的构件损伤,无法反应构件在不同温度下的敏感性。

为了探究不同温度作用下构件的敏感性,本文以构件作为最小评价单位,以温度作为控制变量,基于应力变化计算构件的敏感性指标,表达式为

$$S_{ij}^k = \left| \frac{\gamma_i^k - \gamma_i^0}{\gamma_i^0} \right| \quad (2)$$

式中,  $\gamma_i^0$  为初始状态下构件  $i$  的应力值,  $\gamma_i^k$  为区域  $j$  在温度荷载  $k$  作用下受损后构件  $i$  的应力值;  $S_{ij}^k$  为构件  $i$  对区域  $j$  在温度荷载  $k$  作用下受损的敏感性系数,敏感性系数  $S_{ij}^k$  可以反应在结构各处损伤时构件  $i$  的响应程度。  $S_{ij}^k$  数值越大,则构件  $i$  越敏感(即敏感构件),表明构件越不安全;  $S_{ij}^k$  数值越小(即非敏感构件),表明构件越安全。

本文将用 ANSYS 有限元分析软件进行数值仿真,以构件的应力作为有效响应,提取各构件在受损区域不同损伤程度下的应力数据,计算得出各构件的敏感性系数  $S_{ij}^k$ 。在区域  $j$  损伤的情况下,若除区域  $j$  自身以外其他构件的敏感性系数均很大,则整个结构对区域  $j$  的损伤很敏感,区域  $j$  对于整个结构来说十分重要。

在公式(2)的基础上,提出结构敏感构件的评

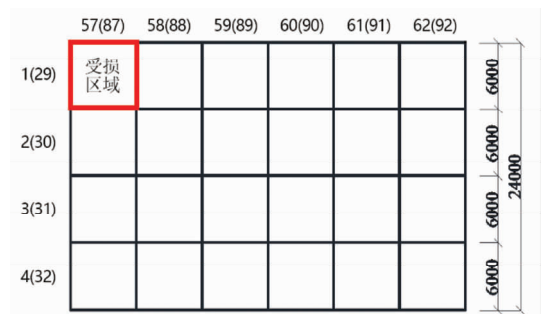
估方法:

- 1) 利用 ANSYS 有限元软件建立模型;
- 2) 分析模型并设置不同工况,进行实验模拟;
- 3) 提取并处理数据,按照公式(2)计算得出结构中各构件的敏感性系数  $S_{ij}^k$ ;
- 4) 定性分析构件敏感性系数  $S_{ij}^k$ , 评估敏感构件。

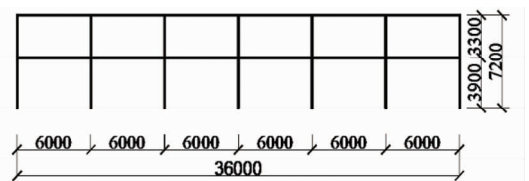
上述评估方法可以定性分析结构中各构件对结构局部高温受损的敏感性,在某种工况下,  $S_{ij}^k$  数值越大,则构件  $i$  越敏感(即敏感构件),表明构件越不安全;  $S_{ij}^k$  数值越小(即非敏感构件),表明构件越安全;若  $S_{ij}^k \rightarrow 0$ ,则此工况对构件  $i$  无影响。在高温条件下为了保证结构的安全性,同一结构中应避免敏感构件大量存在。

## 2 钢框架模型有限元分析

本文设计了 2 层 4 跨 6 列模型,底层层高 3.9m,二层层高 3.3m,横向柱间距 6.0m,纵向柱间距 6.0m,如图 1 所示。为了模拟梁在实际工程中受到的荷载,将均布面荷载等效成均布线荷载,对上层所有梁施加 50kN/m 的均布线荷载。选取结构第一层中 4 个梁杆件作为受损区域,对受损区域施加 20 ~ 651℃ 的温度荷载,如图 1(a) 所示。



(a) 钢框架模型俯视图及受损区域标注



(b) 钢框架模型立面图

图 1 钢框架模型及加温区域布置图

采用 ANSYS 进行建模,梁和柱的单元类型为 beam188,弹性模量  $E = 2.06\text{GPa}$ ; 抗拉强度  $\sigma_b =$

235MPa; 材料密度  $\rho = 7850 \text{kg/m}^3$ ; 泊松比  $\mu = 0.3$ ; 热膨胀系数  $\alpha = 1.25 \times 10^{-5}$ 。材料模型采用 KINH 模型, 定义不同温度下的应力应变关系, 如图 2 所示。柱截面类型 H 型, 选用 HW118 × 250mm × 10 × 13mm。每个单元划分成 4 个网格, 共生成 663 个节点, 774 个单元。对底端柱节点施加  $x, y, z$  的三向固定约束, 完成有限元模型的建立。

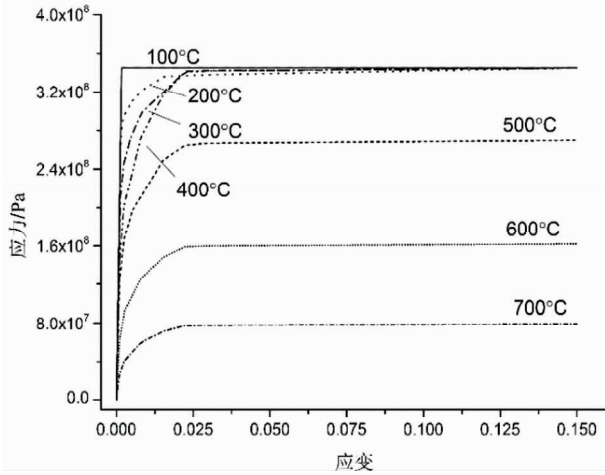


图 2 高温下材料应力应变关系图

对受损区域施加温度荷载, 进行有限元分析。当温度荷载达 600℃ 时, 4 个梁杆件的强度大小趋于零, 梁杆件对柱杆件几乎无约束作用, 如图 3 所示。

由于 4 个施加温度荷载的梁杆件失去对连接柱的约束, 柱 1 在  $xy$  平面失去侧向支撑, 柱 2 失去  $x$  向支撑, 柱 3 失去  $y$  向支撑, 3 根柱发生不同程度的挠曲变形, 在柱顶端处产生较大弯矩。柱 1 顶端产生最大变形  $U_{1y} = 37 \text{mm}$ ,  $U_{1x} = 32 \text{mm}$ ,  $U_{1z} = 0.4 \text{mm}$ ,

LOCAL SOLUTION  
SUB = 1  
TIME = 8.3  
SUOV (AVG)  
DKK = -0.59703  
SWR = -16.0, 61  
SWK = -8.875E+09

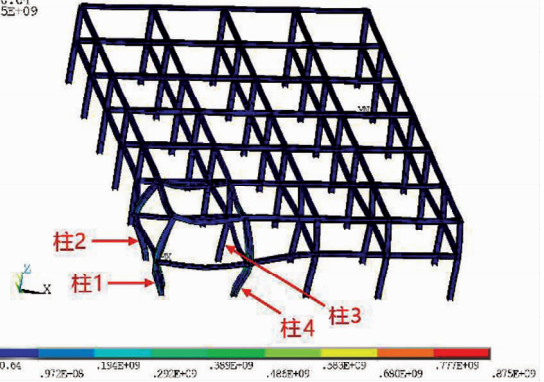


图 3 600℃ 时刚架结构 MISES 应力云图

柱 2 顶端处变形  $U_{2y} = 38 \text{mm}$ ,  $U_{2x} = 1.9 \text{mm}$ ,  $U_{2z} = 0.7 \text{mm}$ , 柱 3 顶端处变形  $U_{3y} = 3.4 \text{mm}$ ,  $U_{3x} = 32.8 \text{mm}$ ,  $U_{3z} = 0.6 \text{mm}$ , 与 4 号柱顶端相连的两根梁发生较大变形, 由于另两根梁对 4 号柱的  $x, y$  方向的侧向支撑, 其产生的侧向位移  $U_{4y} = 3.4 \text{mm}$ ,  $U_{4x} = 1.9 \text{mm}$ ,  $U_{4z} = 0.9 \text{mm}$ , 图中梁和柱均产生较大挠度。

### 3 构件敏感性分析

通过数值模拟结果, 提取在 20 ~ 651℃ 内各构件的应力值, 根据公式(2) 计算得出结构中各构件的敏感性系数。构件 1 - 4、构件 57 - 62 为受损区域相邻的梁杆件, 这 10 个构件的敏感性系数数值如表 1 所示。取构件编号 2、30、59 和 89 为典型构件, 构件 2 和 59 位于结构第一层, 构件 30 和 89 位于结构第二层。分析典型构件的敏感性系数, 如图 4 所示。

表 1 敏感性系数

温度(℃)	20	105	197	301	403	505	599	651
构件 1	0	3.9168	8.0896	12.8036	17.3501	21.7685	24.7361	24.6183
构件 2	0	1.7123	3.5306	5.5783	7.5484	9.4564	10.7570	10.6774
构件 3	0	0.9294	1.9166	3.0284	4.0982	5.1334	5.8333	5.7842
构件 4	0	0.4849	1.0000	1.5801	2.1383	2.6785	3.0450	3.0205
构件 57	0	2.3517	4.8714	7.7373	10.5255	13.2769	15.5362	16.5713
构件 58	0	1.2892	2.6643	4.2215	5.7302	7.2110	8.3959	8.9064
构件 59	0	0.7770	1.6059	2.5444	3.4537	4.3451	5.0510	5.3457
构件 60	0	0.5307	1.0969	1.7380	2.3592	2.9682	3.4518	3.6552
构件 61	0	0.3781	0.7816	1.2384	1.6810	2.1150	2.4597	2.6045
构件 62	0	0.2196	0.4541	0.7196	0.9768	1.2291	1.4302	1.5147

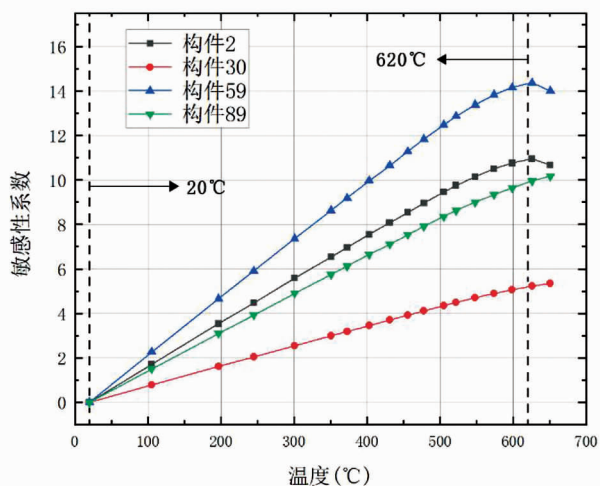


图4 典型构件敏感性系数

由图4所示,在20~620°C内,随着温度的升高,构件的敏感性系数均不断升高,表明随损伤区域所受的温度荷载不断增大,结构中其余构件越来越敏感;从620°C左右开始,构件的敏感性系数曲线增速减缓,敏感性系数较高的构件开始呈下降趋势,表明结构产生内力重分布,此时其余构件的受力情况由不利向有利转变。构件2和构件59的敏感性系数分别大于构件30和构件89,表明此工况下结构一层的构件较为敏感。

提取在20~651°C内各构件的应力值,计算得出结构中受损区域的敏感性系数,如图5所示。

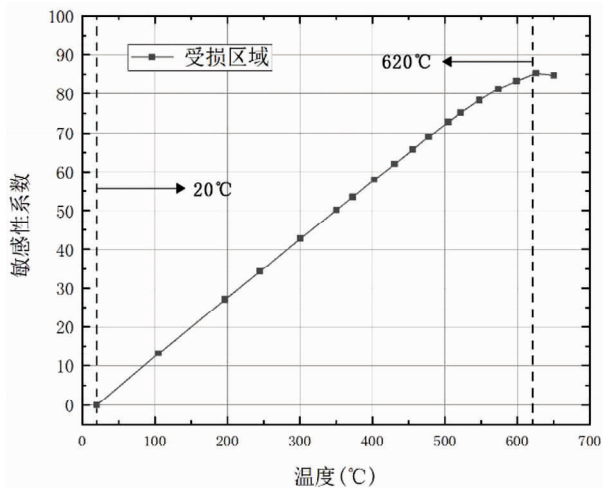


图5 受损区域敏感性系数

由图5所示,在20~620°C内,随着温度的升高,受损区域的敏感性系数均不断升高,从620°C左右开始,受损区域的敏感性系数呈下降趋势。

数据表明,受损区域的敏感性系数变化趋势与其他构件一致:敏感性系数随温度荷载的增大而不断增大,但当升温到620°C左右时,所有构件和受损区域的敏感性系数均开始下降,其中受损区域自身的敏感性系数远大于其他构件。

根据本文提出的评估方法,在本文算例所设置的工况下,受损区域自身敏感性最高,其余构件中,靠近受损区域的构件2、构件3、构件58和构件59敏感性系数最高,此4个构件为敏感构件。

## 4 结果与讨论

通过本文提出的敏感构件评估方法,可得出构件的敏感性系数,敏感性系数表征了结构中部分构件受损时,其他构件的敏感程度,反映出受损部位对整体结构稳定性的影响。通过本文钢框架结构算例分析,结果表明:靠近损伤部位且位于边缘中部的构件敏感性较高。应提前对敏感性较高的构件进行火灾防护、避免或减轻火灾危险。

## 参考文献

- [1] 叶日贵. 多层钢结构振动台试验与数值模拟分析[J]. 钢结构, 2019, 34(2): 77-80.
- [2] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 大型钢结构节点承载力的有限元分析[J]. 土木工程信息技术, 2013, 5(3): 32-36.
- [3] 李思禹, 刘栋栋, 陈杲杲. 青岛西站钢屋架结构耐火能力分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 435-439.
- [4] 彭伊, 古泉. 防屈曲支撑弹塑性模型: 响应及敏感性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(S1): 44-50, 57.
- [5] 蔡建国, 王峰岚, 韩运龙, 等. 大跨空间结构重要构件评估实用方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 7-11.
- [6] Biondini F, Frangopol D M, Restelli S. On structural robustness redundancy and static indeterminacy[C]//Structures Congress 2008. Vancouver: ASCE, 2008, 24.
- [7] Shea G H. Recommended lateral force requirements and commentary[M]. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1999.
- [8] 李天福. 大跨铝合金穹顶结构性能及其安全监测技术研究[D]. 东南大学, 2016.
- [9] 白珂冰. 基于吊杆破断的中承式拱桥抗连续性倒塌分析[D]. 厦门大学, 2017.
- [10] Pandey P C, Barai S V. Structural sensitivity as a measure of redundancy[J]. Journal of Structural Engineering,

- 1997, 123(3): 360-364.
- [11] 韩庆华, 傅本钊, 徐颖. 立体桁架结构敏感性分析及抗连续倒塌性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3293-3300.
- [12] 赵啸峰, 申波, 马克俭, 等. 平面桁架结构连续倒塌动力分析方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(1): 15-22.
- [13] 沈利来, 缪卫清, 常军. 基于敏感性的冗余度在框架结构优化设计中的应用[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2019, 32(1): 64-69.
- [14] 乔茂伟, 刘云飞, 韦永斌, 等. 钢结构应力及变形自动监测系统设计及应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(1): 98-104.
- [15] 日本钢结构协会, 美国高层建筑和城市住宅理事会, 高冗余度钢结构倒塌设计指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [16] 徐颖, 韩庆华, 练继建. 单层球面网壳抗连续倒塌性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 105-112.

## Evaluation Method for Sensitive Components of Steel Frame at High Temperature

Gao Yingqi, Zuo Hui, Dong Kaijie, Song Ningning

(Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** When exposed to fire, the components with high sensitivity are easy to initiate continuous collapse of structure, resulting in reduction of the structural safety. Therefore, the protection should be strengthened in advance. In order to determine the sensitive components of the steel frame structure that may cause the continuous collapse when fire occurs, this paper proposes a calculation method to determine the sensitive component of steel frame structure under high temperature. The finite element software, ANSYS, is used for numerical simulation to extract the stress values of components under loadings of different temperatures, and to obtain the sensitivity coefficient of components at high temperature. Finally, the most sensitive components in the structure can be identified.

**Key Words:** Steel Frame; Sensitivity Coefficient; High Temperature