

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.008



单层球面网壳火灾爆炸动力响应

贺拥军¹, 周冬星¹, 周绪红²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:以 K8 型单层球面网壳为研究对象, 考虑几何非线性和温度对材料性能的影响, 完整模拟了单层球面网壳在发生火灾的不同阶段受到爆炸冲击作用时的动力性状。据 B-R 准则, 通过爆炸峰值超压与结构动力特征响应之间的关系, 可判定 K8 型单层球面网壳在不同火灾阶段, 爆炸冲击作用下的动力稳定性临界峰值超压。分析了单层球面网壳的矢跨比、屋面荷载、约束布置等参数对其在不同火灾阶段的爆炸冲击动力稳定性的影响。研究表明: 火灾对网壳结构在爆炸冲击作用下的动力稳定性有较大影响, 当网壳杆件最高温度达 500 °C 以上时, 结构的抗爆能力明显降低。矢跨比、屋面质量、约束布置对网壳在火灾不同阶段的抗爆能力均有不同程度的影响。

关键词:球面网壳; 火灾; 爆炸冲击; 动力响应

中图分类号: TU392.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0055-07

Dynamic response of single-layer reticulated domes under fire and blast loads

He Yongjun¹, Zhou Dongxing¹, Zhou Xuhong²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The Kiewitt-8 single-layer reticulated domes were taken as case study. Considering the influence of geometric nonlinearity and temperature on the properties of the material, the dynamic behavior of the single-layer reticulated domes subjected to blast loading in different fire stages was simulated. According to the B-R criterion, the dynamic stability critical overpressure loads of K8 single-layer reticulated domes subjected to blast loading in different fire stages could be determined by the relationship between the peak overpressure of blast and the structural dynamic response. And the influence of parameters such as the rise-span ratio, the roof load and the constraint settings on the dynamic stability of single-layer reticulated domes subjected to blast loading in different fire stages were analyzed. The results show that fires have a great influence on the dynamic stability of the reticulated domes under the impact of explosion, When the

收稿日期: 2017-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701201); 湖南省高校科技创新团队滚动资助计划(湘财教指(2015)616号)

作者简介: 贺拥军(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钢结构及大跨空间结构理论与应用研究, E-mail: hyj0087@163.com。

Received: 2017-04-08

Foundation item: National Key R & D Program (No. 2016YFC0701201); Hunan Science and Technology Innovation Team Rolling Funding Project (Hunan Financial Education Quota (2015) No. 616)

Author brief: He Yongjun(1970-), professor, doctoral supervisor, main research interests: theory and application of steel structure and large span spatial structure, E-mail: hyj0087@163.com.

maximum temperature of the reticulated dome rods rises to more than 500°C , the anti-explosion ability of the dome greatly decreases. The rise-span ratio, the roof load and the restraint settings have different effects on the anti-blast ability of the reticulated domes in different fire stages.

Keywords: reticulated domes; fire; blast loading; dynamic response

网壳结构具有自重轻、结构刚度好等特点,往往被广泛运用于覆盖面积较大的空间,如大型体育馆、展览馆等。近些年,恐怖分子针对人口活动密集的大型场馆的破坏袭击时有发生,一旦遭遇袭击,引起火灾甚至火灾下的爆炸,将造成严重的后果。关于火灾下大空间温度场分布,利用有限元软件可以较好地模拟大空间建筑在发生火灾时的温度分布^[1-3],李国强等^[1]根据模拟数据,总结归纳得出了实用的大空间火灾升温经验公式。学者们利用有限元软件对钢结构或大跨钢结构在火灾下的性能进行了研究,研究表明火灾对钢结构材料性能有较大影响^[4],同时,火源位置、功率以及燃烧速率等都对网壳结构火灾下的整体性能有较大影响^[5-7],针对钢构件的高温分析与网壳结构整体分析发现,钢结构的耐火时间不超过 2 h^[8-9]。在网壳结构抗爆研究方面,文献^[10-11]采用简化爆炸荷载模型的方式,对网壳结构在爆炸作用下的结构性能进行有限元模拟,并讨论了有限元方法分析网壳抗爆性能的可行性;文献^[12-13]对矢跨比、爆炸点、炸药量对网壳结构抗爆性能的影响进行了研究。

网壳结构在火灾下的性能与网壳结构在爆炸冲击下的性能的研究往往分开讨论,而实际情况中火灾与爆炸冲击往往是耦合地对结构造成破坏,更加复杂。因此,对单层球面网壳结构在火灾爆炸冲击耦合作用下的结构动力响应,以及结构在不同火灾阶段的临界爆炸峰值超压的研究极具现实意义。

采用 ANSYS/LS-DYNA,以高大空间建筑火灾作用下空气升温实用公式为基础,模拟分析了单层球面网壳在发生火灾的情况下耦合爆炸冲击超压作用的动力响应,并根据结构动力稳定判定准则^[14-16],确定了在火灾的不同阶段,单层球面网壳的动力稳定临界爆炸峰值超压;讨论了矢跨比、屋面质量、约束条件等参数对单层球面网壳火灾爆炸下动力稳定性的影响。

1 网壳动力稳定判定方法及模拟正确性验证

1.1 动力稳定判定方法

B-R 准则^[14]可以描述为:通过大量的逐级加

载,由系统运动方程获得位移与荷载的关系,将微小位移变化引起结构位移突然增加时的荷载定义为临界荷载,其本质是 Liapunov 意义上的运动失稳;只要位移-荷载曲线的拐点足够明显,Budiansky 建议把曲线的拐点作为动力屈曲的临界点。采用 B-R 准则对网壳在火灾爆炸情况下的动力稳定性进行判定,具体实现方法如下:在对网壳结构进行全过程火灾模拟的过程中,选择网壳杆件最高温度分别达到 20、100、200、300、400、 500°C 的时间点,对网壳结构施加爆炸冲击超压荷载,以研究网壳在发生火灾不同阶段的抗爆能力。通过所施加的爆炸峰值超压荷载与网壳节点最大位移之间的关系曲线,采用 B-R 准则对网壳的动力稳定进行判定,得到火灾不同阶段下,网壳结构的临界爆炸峰值超压。

1.2 有限元模拟正确性验证

通过典型算例,考察所采用的有限元模拟方法的正确性。运用有限元软件,采用瞬态动力分析中的完全法,针对图 1 所示的网壳施加三角脉冲荷载,根据 B-R 准则得到其动力稳定临界荷载,并与文献^[17]采用理论计算所得临界荷载进行比较,如表 1。对比可知,所采用的有限元模拟分析方法计算结果与典型算例结果较为吻合。

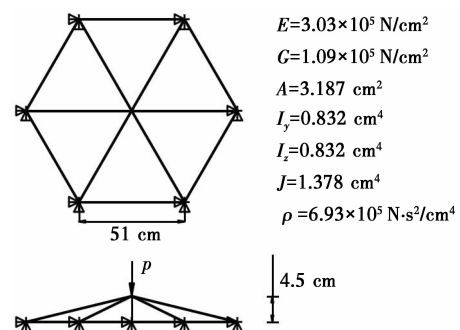


图 1 12 单元穹顶网壳

Fig. 1 12 element dome

表 1 12 单元穹顶网壳计算结果

Table 1 12 element dome calculation results

荷载类型	荷载作用时间/s	临界荷载文献 ^[17] 理论计算结果/N	临界荷载有限元模拟计算结果/N
三角脉冲荷载	0.1	410	417.3
	0.5	250	243.2

2 火灾爆炸作用下单层 K8 球面网壳动力稳定性

2.1 有限元模型

采用的分析对象为单层 K8 型球面网壳,如图 2 所示;跨度为 40 m,矢跨比为 1/4,考虑火源位置及爆炸点处于网壳中心正下方,距离网壳顶点 15 m 处。网壳的径向分频数为 6;主径向和环向杆件截面均为 $\Phi 121 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 。

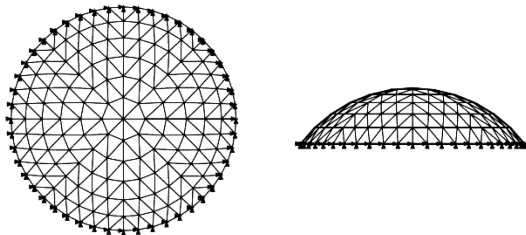


图 2 单层 K8 型球面网壳
Fig. 2 Kiewitt8 single-layer reticulated dome

网壳采用周边支座采用固端约束,杆件单元及节点编号如图 3 所示。

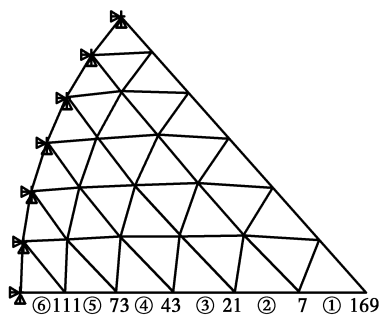


图 3 网壳杆件、节点编号
Fig. 3 Number of members and nodes

2.2 火灾空气升温和钢构件升温模型

采用欧洲规范^[18],对钢材在高温下的热膨胀系数、导热系数、比热等物理特性和屈服强度、弹性模量的折减系数、应力-应变关系等力学性能进行计算取值,图 4 为不同温度下钢材应力-应变曲线,火灾全过程模拟中,通过将火灾下杆件温度-时间变化曲线转化为随时间变化的温度荷载施加于相应杆件,从而模拟高温下钢材的材料性能随温度的变化效应。

依据李国强、杜咏针对高大空间建筑火灾升温经验公式的研究,即中国《建筑钢结构防火技术规程》对网壳结构火灾下内部空气升温采用高大空间建筑火灾作用下空气升温实用公式,基于高大空间火灾数据统计及《建筑钢结构防火技术规程》,本文考虑火源功率类型为大功率,火灾增长类型为快速。考虑无保护层取初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

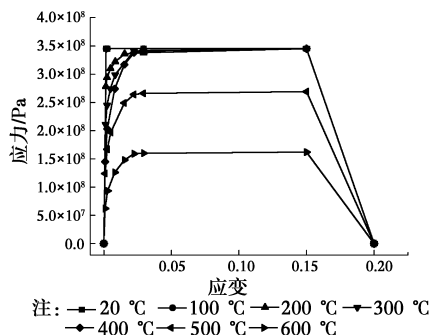


图 4 不同温度下钢材应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of steel at different temperatures

得到火灾发生至 6 000 s 内单层球面网壳各杆件的升温曲线,以主径向 6 根杆件为例,火灾下杆件温度-时间曲线如图 5 所示。

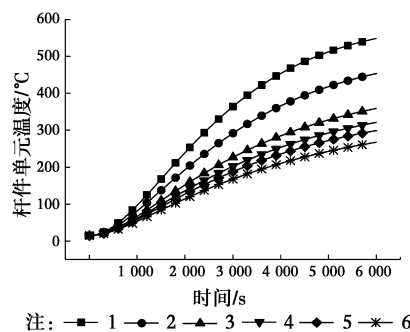


图 5 网壳杆件火灾温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of members under fire

2.3 火灾过程中爆炸超压作用下动力分析

通过 ANSYS 有限元模拟,采用瞬态动力分析中的完全法对网壳结构进行火灾下爆炸冲击动力分析,考虑网壳屋面荷载为 1.0 kN/m^2 ,转换为质量单元施加于节点上,考虑大变形和大转角;采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比为 0.02。

以全时程-动力方式将火灾下钢构件的升温曲线作为随火灾时间变化的温度荷载施加于网壳杆件。结合抗爆动力学相关理论^[19],简化爆炸时产生的超压-时程曲线为三角脉冲超压荷载-时程曲线,如图 6,假定其均布作用于网壳球面,方向从球心垂直球面向外;设定爆炸冲击作用时间为 0.1 s,采用自动时间步长进行模拟计算。

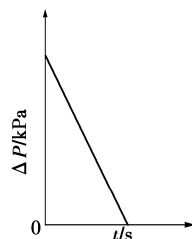


图 6 简化爆炸超压荷载

Fig. 6 Simplified explosion overpressure load

根据网壳杆件最高温度值将火灾全过程分为 6 个阶段,即网壳杆件最高温度分别达到 20、100、200、300、400、500 ℃等 6 个阶段。在上述的 6 个阶段分别对网壳结构进行大量的逐级加载的爆炸冲击模拟,根据 B-R 准则,探究网壳结构在火灾不同阶段的临界爆炸峰值超压。

选取图 3 所示的主径向 6 个节点为位移测点,按上述的 6 个阶段分别进行爆炸冲击模拟,记录不同爆炸峰值超压下位移测点的最大位移响应,将所得的数据分别绘制成不同火灾温度阶段下网壳结构节点位移-爆炸峰值超压曲线,如图 7 所示。可以看出,不同火灾温度阶段下网壳结构节点位移-爆炸峰值超压曲线均体现为 3 个阶段,即爆炸冲击对网壳

结构稳定的影响阶段。以火灾温度为 300 ℃阶段下爆炸冲击模拟所得节点位移时程曲线为例,如图 8 所示,网壳结构在不同的爆炸超压作用下的位移响应可以分为 3 个阶段:

1)弹性阶段 该阶段的爆炸峰值超压值较小,网壳在经受爆炸峰值超压之后,位移能够得到恢复;该阶段的位移量较小,以高温下的热膨胀为主。

2)塑性阶段 该阶段网壳经受爆炸后,产生塑性积累,网壳中心附近节点的位移不能恢复,网壳整体刚度降低。

3)破坏阶段 爆炸峰值荷载已达到网壳的临界爆炸峰值超压,节点位移突然陡增,结构已被破坏。

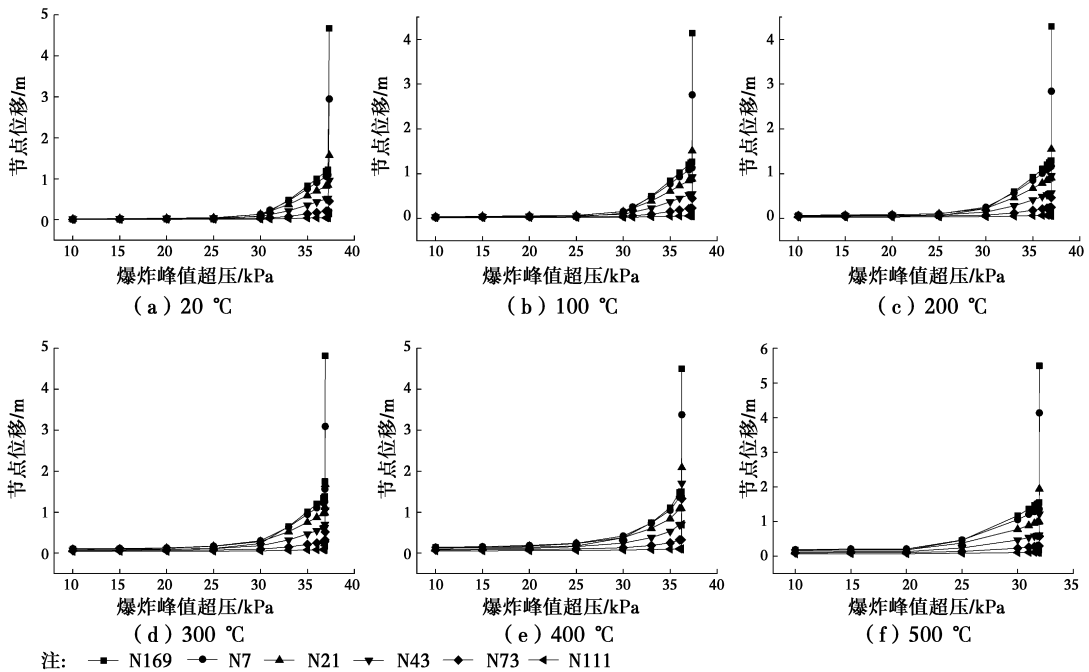


图 7 不同温度阶段下爆炸峰值超压-最大位移曲线

Fig. 7 Explosion peak overpressure-maximum displacement curve under different temperature

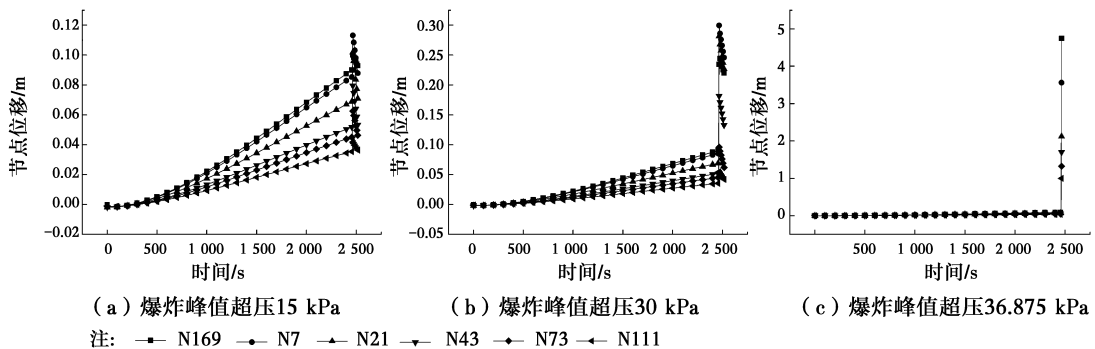


图 8 300 ℃ 情况下模拟爆炸的节点位移时程曲线

Fig. 8 Node displacement time-history curve for simulated explosion at 300 ℃

此外,由图 7 所得数据,根据 B-R 准则,可以得到火灾不同阶段,单层球面网壳的临界爆炸峰值超

压,如图 9 所示。可以看出,在杆件最高温度达在 20~400 °C 的温度区间时,网壳的临界爆炸峰值超压随温度略有下降;当杆件最高温度达到 500 °C 时,临界爆炸峰值超压下降非常明显,此时网壳所有杆件温度均达 300 °C 以上,整体刚度下降幅度较大,导致临界爆炸峰值超压发生陡降。

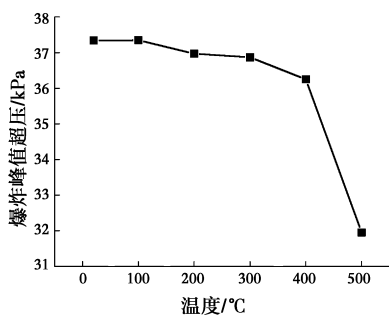


图 9 温度-爆炸峰值超压曲线

Fig. 9 Temperature-explosion peak overpressure curve

3 不同参数对单层球面网壳火灾爆炸性能的影响

3.1 矢跨比

选定跨度为 60 m 的单层球面网壳,通过改变矢高,对矢跨比分别为 1/4、1/5、1/6、1/7 的单层球面网壳进行对比分析。

根据高大空间建筑火灾作用下空气升温实用公式,针对不同矢跨比的网壳空间进行计算,得到不同矢跨比网壳杆件温度-时间关系。

经过大量的爆炸冲击模拟,依据 B-R 准则得到矢跨比分别为 1/4、1/5、1/6、1/7 的单层球面网壳在火灾不同温度阶段下的临界爆炸峰值超压,见表 2。

表 2 不同矢跨比下网壳临界爆炸峰值超压

Table 2 Critical explosion peak overpressure of dome with different span ratio

矢跨比	峰值超压/kPa				
	20~100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
1/4	30.98	30.58	30.65	30.59	26.92
1/5	25.86	25.75	25.55	25.43	22.57
1/6	22.34	22.18	21.87	21.53	16.78
1/7	19.91	19.73	19.47	19.16	14.45

随矢跨比的减小,单层球面网壳在火灾不同阶段的临界爆炸峰值超压荷载呈下降趋势。这是由于随着矢跨比减小,网壳结构在爆炸冲击方向的整体刚度下降所导致。同样的不同矢跨比网壳随着温度

升高,其抗爆性能均呈下降趋势。

3.2 屋面质量

以跨度为 40 m、矢跨比为 1/4 的单层球面网壳为例,研究不同屋面质量对单层球面网壳火灾爆炸作用下的临界爆炸峰值超压的影响。上文已研究屋面荷载为 1.0 kN/m² 的情况,本节增加考虑无屋面质量荷载和屋面质量荷载为 2.0 kN/m² 和 3.0 kN/m² 的情况。

经过大量模拟爆炸冲击得到跨度为 40 m、矢跨比为 1/4 的单层球面网壳在不同屋面质量荷载下,火灾爆炸情况中的临界爆炸峰值超压,如表 3。

表 3 不同屋面质量荷载下网壳临界爆炸峰值超压

Table 3 Critical explosion peak overpressure of dome with different roof load

屋面质量荷载/ (kN·m ⁻²)	峰值超压/kPa				
	20~100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
0	36.13	35.78	35.65	34.93	30.92
1.0	37.34	36.97	36.85	36.25	31.95
2.0	38.54	38.10	37.90	37.43	32.66
3.0	39.62	39.11	38.88	38.43	33.22

屋面质量对网壳的抗爆性能存在一定的影响。由于爆炸超压作用方向与屋面质量荷载的作用方向相反,所以,网壳结构的抗爆性能随屋面质量的增加而提升。随着网壳杆件温度的上升,网壳结构临界爆炸峰值超压的下降逐渐明显。

3.3 约束条件

支座约束条件也是影响火灾爆炸作用下网壳结构动力性能的重要参数之一。网壳均采用将所有边缘节点固定铰支约束的方式,以跨度 40 m、矢跨比为 1/4 的单层球面网壳为例,采用固定铰支座,分别对网壳边缘的 8、16、24 个节点进行固定铰支约束,如图 10 所示,进行火灾爆炸作用下的动力分析。

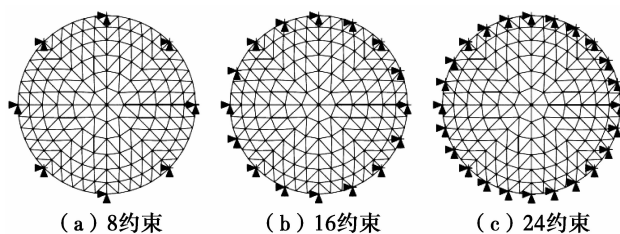


图 10 网壳支座约束设置情况

Fig. 10 Constrained settings of the dome

得到不同约束条件下单层球面网壳在火灾不同阶段的爆炸峰值超压,见表 4 和图 11。根据表 4 和图 11 数据可知:

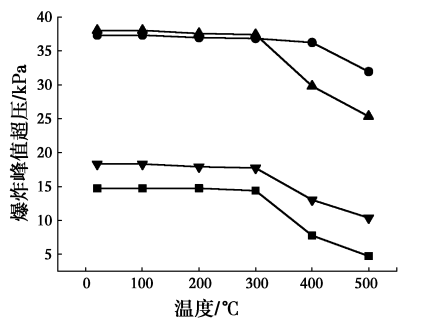
1)在采用8约束与16约束情况下,由于网壳约束支座设置较少,导致结构的整体刚度偏小,网壳的临界爆炸峰值超压在各个火灾阶段均偏低,且当杆件最高温度达到400℃后,结构刚度发生明显下降,其抗爆性能也随之显著降低。

2)当约束支座设置增加至24个节点时,网壳结构的自由度降低,结构刚度增加,网壳在各个火灾阶段的抗爆性能明显提高。结构整体刚度和抗爆性能也在杆件最高温度达到400℃后显著降低。

3)24约束情况下与全约束情况进行对比发现,当网壳杆件最高温度在20~300℃区间内,24约束的网壳抗爆性能略优于全约束的网壳;但杆件最高温度达到400℃以后,24约束的网壳整体刚度的下降幅度超过全约束网壳,导致其抗爆性能下降更为明显。

表4 不同约束条件下网壳临界爆炸峰值超压
Table 4 Critical explosion peak overpressure of dome with different constrained settings

约束条件	峰值超压/kPa				
	20~100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
8约束	14.72	14.73	14.38	7.75	4.72
16约束	18.32	17.91	17.73	13.02	10.37
24约束	38.04	37.58	37.42	29.81	25.34
全约束	37.34	36.97	36.85	36.25	31.95



注: ■—8约束 ▼—16约束 ▲—24约束 ●—全约束

图11 变约束条件下网壳爆炸峰值超压-温度曲线

Fig. 11 Explosion peak overpressure-temperature curve of dome with different constrained settings

4 结论

对单层球面网壳在火灾爆炸作用下的动力稳定性进行了研究。得到以下结论:

1)以高大空间实用火灾升温公式为基础,采用火灾全过程模拟耦合爆炸冲击的方式,可以进行网壳在火灾高温与爆炸冲击共同作用下的全过程模拟分析。

2)通过爆炸峰值超压与网壳结构位移之间的关系曲线,可以掌握网壳结构随爆炸峰值超压的增大、结构动力性状不断变化直至失稳的全过程。根据B-R准则可以判定单层球面网壳在火灾不同温度阶段的爆炸冲击临界超压荷载。

3)矢跨比对网壳在火灾爆炸作用下的动力性能有较大的影响,随着矢跨比的减小,网壳在火灾爆炸作用下的动力稳定性降低,屋面质量对网壳在火灾爆炸作用下的动力稳定性有一定的影响。约束条件对网壳在火灾爆炸作用下的动力稳定性影响较大。约束设置越多的网壳在较高温度阶段的抗爆能力越强。

参考文献:

- [1] 李国强,杜咏. 实用大空间建筑火灾升温经验公式[J]. 消防科学与技术,2005,24(3):283-287.
LI G Q, DU Y. Experimental formula for fire temperature rise in large space building [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24 (3): 283-287. (in Chinese)
- [2] YIN B, YANG H, SHI Y, et al. Temperature field distribution of large-space structures under various fire scenarios[J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(8):1122-1127.
- [3] 于志超,朱国庆,田承飞. 大空间温度场预测模型与实验分析[J]. 消防科学与技术,2016,35(10):1372-1375.
YU Z C, ZHU G Q, TIAN C F. Prediction model and experimental analysis of large space temperature field [J]. Fire Science and Technology, 2016,35(10):1372-1375. (in Chinese)
- [4] IU C K. Nonlinear fire analysis of steel structure using equivalent thermal load procedure for thermal geometrical change [J]. Fire Safety Journal, 2016, 86: 106-119.
- [5] YANG L, FENG X U. Numerical calculation of temperature rise in the large space grid structure under local fire conditions [J]. Fire Science & Technology, 2014,43:21-30.
- [6] BAI Y, ZHAI J L, SHI Y J, et al. Analysis of overall stability bearing capacity of single-layer shell structures under high temperature condition [J]. Science China Technological Sciences, 2013,56:751-757.
- [7] 刘东宇,刘红波,廖祥伟. 荏平体育馆弦支穹顶叠合拱复合结构抗火性能分析[J]. 工业建筑,2016,46(11):7-12.
LIU D Y, LIU H B, LIAO X W. Fire resistance of chord dome composite arch structure in chiping gymnasium [J]. Industrial Buildings, 2016, 46 (11):

- 7-12. (in Chinese)
- [8] ŚWITA P, KAMIŃSKI M. Probabilistic buckling analysis of the beam steel structures subjected to fire by the stochastic finite element method[J]. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2016, 21(1):485-510.
- [9] 薛素铎, 王广勇. 凯维特单层球面网壳抗火性能研究[J]. *工业建筑*, 2008(Sup1):452-454.
XUE S D, WANG G Y. Study on fire resistance of KeweiTe single-layer spherical reticulated shell [J]. *Industrial Architecture*, 2008 (Sup1): 452-454. (in Chinese)
- [10] MA J L, WU C Q, ZHI X D, et al. Prediction of confined blast loading in single-layer lattice shells[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(7): 1029-1044.
- [11] 韩庆华, 金晓东. 爆炸荷载作用下单层球面网壳结构的动力稳定性[C]// 天津大学、上海交通大学. 第十届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2010:9.
HAN Q H, JIN X D. Dynamic stability of single-layer reticulated shells under explosive loading [C]// Tianjin University, Shanghai Jiaotong University. Tenth National Modern Structural Engineering Symposium Proceedings, 2010: 9. (in Chinese)
- [12] 高轩能, 李超, 江媛. 单层球面网壳结构在内爆炸作用下的动力响应[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015(Sup1):102-109.
GAO X N, LI C, JIANG Y. Dynamic response of single-layer reticulated dome structure under internal explosion [J]. *Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology)*, 2015 (Sup1): 102-109. (in Chinese)
- [13] 马加路, 支旭东, 范峰, 等. 外爆荷载下 Kiewitt-8 型单层球面网壳的动力响应[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(21): 65-70.
MA J L, ZHU X D, FAN F, et al. Dynamic response of Kiewitt-8 single-layer reticulated dome under external explosive loading [J]. *Vibration and Shock*, 2015, 34(21): 65-70. (in Chinese)
- [14] BA P F, ZHANG Y G, WU J Z, et al. The failure criterion of single-layer spherical lattice shell based on kinetic energy [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1):1-7.
- [15] HUI J L, YANG L F, LUO Y F. Dynamic stability of large-span suspen-domessubjected to seismic excitations [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 378-379: 209-212.
- [16] 王策, 沈世钊. 单层球面网壳结构动力稳定分析[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(6):17-24.
WANG C, SHEN S Z. Dynamic stability analysis of single-layer spherical reticulated shells [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2000, 33(6): 17-24. (in Chinese)
- [17] 孙建恒, 夏亨熹. 网壳结构非线性动力稳定分析[J]. *空间结构*, 1994(1):25-31.
SUN J H, XIA H X. Nonlinear dynamic stability analysis of reticulated shell structure [J]. *Space Structures*, 1994 (1): 25-31. (in Chinese)
- [18] European committee for standardization, ENV 1993-1-2, Eurcode 3, Design of Steel Structures, Part1. 2: Structural Fire Design[S]. 1993.
- [19] 李国豪. 工程结构抗爆动力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989:167.
LI G H. Anti-explosive dynamics of engineering structures [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989: 167. (in Chinese)

(编辑 胡玲)