

文章编号:1006-1355(2021)04-0007-06

不同冲击角度下联方型网壳的冲击性能

吴 长^{1,2}, 杨佑佩^{1,2}, 王仁红^{1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050;

2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘 要: 为了研究联方型网壳在不同冲击角度下的变形模式及冲击性能, 利用 ANSYS/LS-DYNA 分析软件建立联方型网壳模型, 设计并模拟水平面和竖直面条件下不同冲击角度及不同冲击速度下的冲击工况, 根据模拟结果总结联方型网壳结构在不同冲击角度下的6种变形模式, 分析冲击力持时、关键杆件应力和关键节点位移随冲击角度和冲击速度的变化规律, 研究对结构变形最不利的竖直面中速冲击工况下的结构能量和加速度峰值变化规律, 最后提出联方型网壳结构在两个冲击平面的最不利冲击角度。

关键词: 振动与波; 联方型网壳; 有限元分析; 不同角度冲击; 动力响应; 变形模式

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.04.002

Performance of Reticulated Shells under Different Impact Angles

WU Chang^{1,2}, YANG Youpei^{1,2}, WANG Renhong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of

Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract : Impact performance of the reticulated shells under different impact angles is studied. The model of the reticulated shell is established by using ANSYS/LS-DYNA. The impact conditions of horizontal and vertical surfaces with different impact angles and different impact velocities are designed and simulated. According to the simulation results, six deformation modes of the reticulated shell structure under different impact angles are summarized. The variation laws of impact forces, key member stresses and key node displacements with impact angles and impact velocities are studied. The structure energy and acceleration peak value change rules in the vertical plane under medium speed impact condition is studied. Finally, the most detrimental impact angles of the reticulated shell structure in two impact planes are proposed.

Key words : vibration and wave; reticulated shell; finite element analysis; different impact angle; dynamic response; deformation mode

网壳结构被用于当地的标志性建筑物, 具有十分重要的政治意义和经济价值。其受到冲击荷载与爆炸荷载等非常规荷载的作用而发生破坏将会造成难以想象的生命财产损失, 并对当地社会产生不可磨灭的影响。因此开展网壳结构在冲击荷载下的动力响应研究, 探索其失效模式及规律具有重要意义。

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608245)

作者简介: 吴长(1981-), 女, 兰州市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为钢结构及空间结构冲击动力分析。

通信作者: 杨佑佩(1995-), 男, 甘肃省靖远县人, 硕士研究生, 主要研究方向为网壳结构冲击动力分析。

E-mail: 2278868630@qq.com

范峰等^[1-2]分析了冲击荷载作用下网壳结构的塑形发展过程和冲击力持续时间随冲击质量与冲击速度的变化, 并探讨了结构的失效机理。马肖彤等^[3-4]认为水平冲击荷载作用下结构的动力响应过程可以分为5个关键性阶段和3种冲击模式, 推导了首次冲击中网壳结构吸收的能量和结构动位移的简化计算方法, 并总结了动力响应与结构能量之间的关系。王秀丽等^[5-6]根据冲击荷载特性提出了冲击碰撞问题中的单层网壳结构动力稳定性判定准则, 根据结构动力响应模式获得冲击荷载作用下单层网壳动力失稳的临界能量区域, 同时研究了荷载作用在不同冲击点时网壳结构动力失稳的临界荷载。王人立^[7]通过有限元模拟分析, 提出了开合屋盖的动力稳

定判别准则。胡晨曦^[8]考虑了几何非线性和材料非线性等因素对网壳结构冲击响应的影响。目前对于不同冲击角度下钢结构的性能研究多针对单个构件和柱面网壳等^[9-11],而对于网壳结构的研究集中在飞机及重型车辆在水平方向撞击时^[12-13]以及在结构顶点遭遇竖向冲击时结构的失效模式及动力响应。

现实生活中建筑结构遭遇撞击时,冲击物的冲击角度是随机的。随着冲击角度的不同,结构与冲击物的相对位置关系不同,导致结构的动力响应不同,所以冲击物的冲击角度必然影响网壳结构的动力响应,但目前对于网壳结构的冲击研究绝大部分集中于竖向以及水平冲击,考虑冲击角度的研究较少。因此研究不同冲击角度下网壳结构的动力响应具有现实意义。

本文对联方型网壳进行了竖直面和水平面不同冲击角度及速度下的模拟分析,总结了结构的变形模式,并分析了结构在最不利冲击角度下的动力性能,其结果可以为网壳结构的抗冲击设计提供依据。

1 数值模拟方法

1.1 分析模型

本文选取一个联方型网壳,对其进行不同角度冲击下的动力响应研究。网壳共有6环,每环由斜杆将网壳分为24个区域,结构具体参数如表1所示。

表1 联方型网壳参数

斜杆	环杆	跨度	矢跨比
159 mm×6 mm	140 mm×6 mm	40 m	1/5

使用 ANSYS/LS-DYNA 分析软件对结构进行模拟计算,网壳结构杆件采用 beam161 单元,冲击物采用 solid164 单元;结构材料模型采用考虑应变率效应的分段线性塑性模型,冲击物选用直径为1m的球体,材料模型采用不考虑变形的刚性体模型;接触采用点面接触,并在结构最外环节点处采用固定约束;网壳结构和冲击物的材料参数见表2。

表2 材料参数

	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	泊松比	失效 应变
冲击物	7 850	206	235	0.3	—
网壳结构	7 850	206	235	0.3	0.25

1.2 模拟工况及测点编号

模拟工况分为水平面的冲击与竖直面的冲击两大组,冲击物以不同的冲击角度和冲击速度冲击结构的三环节点(将结构从顶点向外标注为1至6环),

冲击工况参数变化见表3。

图1与图2为两个冲击平面的冲击示意图,图中位于结构三环节点的黑点代表冲击点。

表3 冲击工况参数

冲击参数	变化范围		
速度/(m·s ⁻¹)	低速	中速	高速
	5、10	20、50	100
角度	0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°		

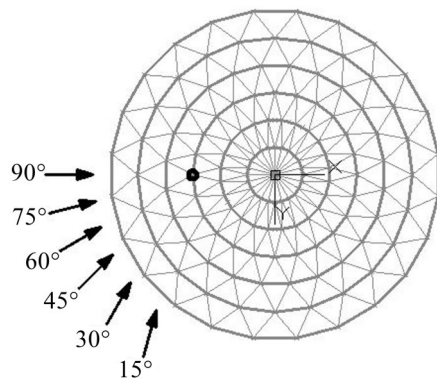


图1 水平面冲击示意图

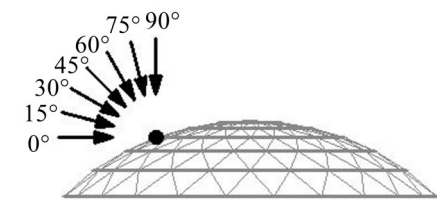


图2 竖直面冲击示意图

图3为测点编号图,其中测点1、2、3位于三环节点,且测点1位于冲击点上侧,测点3与测点1关于y轴对称,测点2位于y轴;测点R1处杆件为冲击点右上方连接结构二环与三环的斜杆,测点R3处杆件与R1处杆件关于y轴对称,测点R2处杆件为y轴与结构二环相交的杆件。

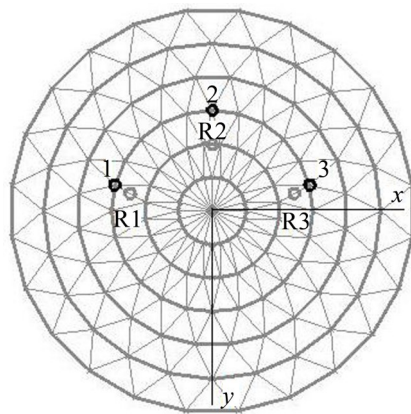


图3 测点编号图

2 联方型网壳变形模式及分析

2.1 联方型网壳变形模式

联方型网壳结构在不同冲击角度和不同冲击速度下的变形模式总结为6种:

- ① 结构局部损伤;
- ② 结构局部凹陷并伴有杆件断裂;
- ③ 结构局部塌陷;
- ④ 结构局部塌陷并伴有杆件断裂;
- ⑤ 结构局部剪切;
- ⑥ 结构出现两次冲切破坏。

图4为各变形模式典型图例,各工况的变形模式见表4。网壳结构最不利的变形模式为③和④,从表4可以看出变形模式③和④出现在竖直面中速冲击工况下,冲击角度在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间。

表4 各冲击工况下变形模式

冲击平面	冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	变形模式							
		冲击角度							
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
水平面	5	—	①	①	①	①	①	①	
	10	—	①	①	①	①	②	①	
	20	—	①	②	②	②	②	①	
	50	—	⑥	⑥	⑥	⑥	⑤	①	
	100	—	⑤	⑥	⑥	⑥	⑥	⑥	
竖直面	5	①	①	①	①	①	①	①	
	10	①	①	①	①	①	①	①	
	20	①	②	①	③	③	③	④	
	50	①	②	⑤	⑤	④	④	⑤	
	100	⑤	⑤	⑤	⑤	⑤	⑤	⑤	

注:“—”代表没有模拟该工况,水平面 0° 冲击没有意义

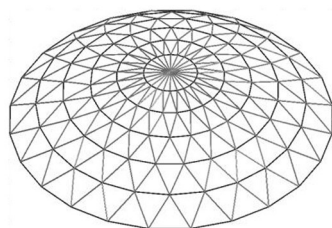
2.2 冲击力持时与结构变形发展

冲击力持时是研究结构变形发展的重要因素,图5为冲击力持时变化图,相同的冲击角度下,低速冲击时结构冲击力持时最大,随着冲击速度的增大,冲击力持时逐渐减小。相同的冲击角度下,水平面 30° 角冲击时结构冲击力持时最大,以 15° 角 100 m/s 速度冲击结构时,冲击力持时数据异常的原因是此工况下冲击物对冲击点及其冲击方向的杆件和节点进行了连续冲击,导致冲击力持续时间增大;以竖直面 75° 角冲击时结构冲击力持时最大。

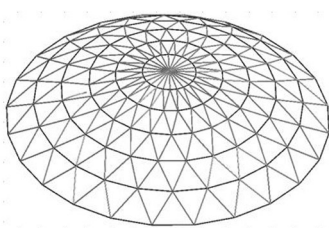
结合表4得到,低速冲击时,冲击力持时对结构的变形影响较小。中速冲击时,水平面冲击工况下冲击力持时对结构的变形影响较小,竖直面冲击工况下冲击力持时的增加造成结构变形的扩大。高速冲击时,冲击力持时对结构的变形影响较小。

2.3 能量变化与结构变形发展

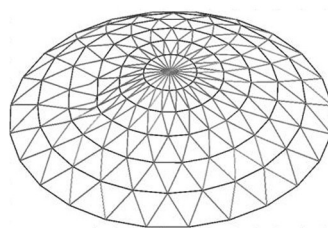
在冲击完成后,除冲击物自身动能外,绝大部分剩余冲击能量被结构吸收,这部分能量在应变能、动能和位能之间相互转化,以对结构变形最不利的在竖直面以 50 m/s 速度进行冲击工况为例,研究结构在不同冲击角度下的应变能和动能变化。图6显示结构的应变能随着冲击角度的增加逐渐增大,当冲击角度超过 60° 后结构应变能逐渐减小。其中发生结构坍塌的 60° 角和 75° 角冲击工况下的结构应变能明显较大,其他冲击角度工况下结构应变能比较接近, 0° 角冲击工况下应变能出现两个台阶的原因是结构受到两次冲击。如图7所示,结构动能峰值随角度的变化规律与应变能一致,冲击完成 0.2 s 后,动能几乎为0,此时应变能趋于平稳,对结构的冲击



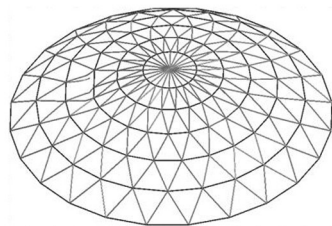
模式①结构局部损伤



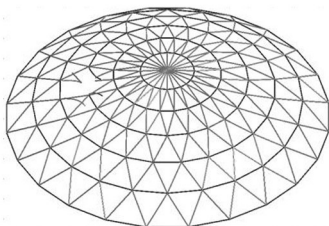
模式②结构局部凹陷并伴有杆件断裂



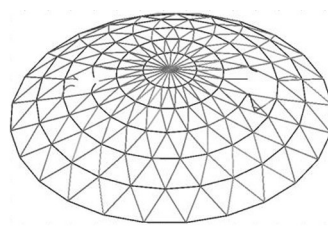
模式③结构局部塌陷



模式④结构局部塌陷并伴有杆件断裂



模式⑤结构局部剪切



模式⑥结构出现两次冲切破坏

图4 结构变形模式示意图

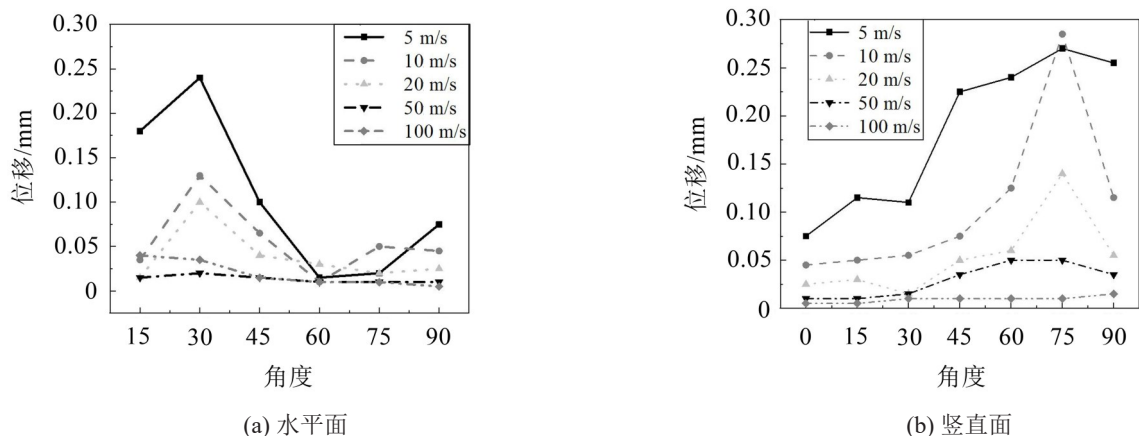


图5 冲击力持时变化图

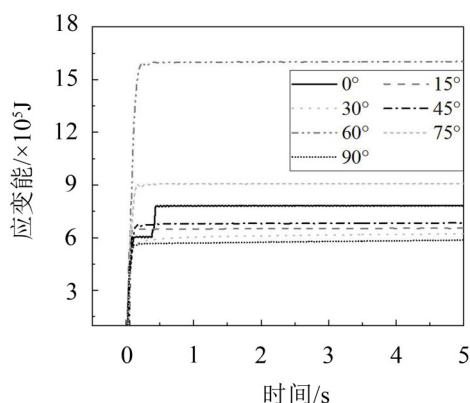


图6 结构应变能变化图

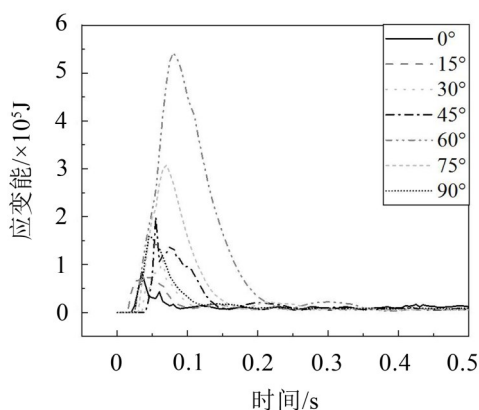


图7 结构动能变化图

完成。

3 联方型网壳抗冲击参数分析

3.1 杆件应力变化规律分析

冲击荷载下结构的应力研究以位于冲击区的杆件R1为例,其应力变化见表5。

当冲击物速度从5 m/s逐渐提高时,杆件R1的应力也逐渐增加;在冲击物速度达到20 m/s~50 m/s

左右时,R1杆件应力超过屈服极限达到最大;冲击物速度再次提升后,R1杆件应力减小。冲击力持续时间和冲击力大小是导致应力变化的主要因素,冲击速度由低速逐渐增大时,冲击力逐渐增大,虽然持续时间逐渐减小,但作用到结构的能量增大,导致R1杆件应力也逐渐增加;当冲击速度过大时,由于冲击力持续时间太短,导致结构还没有对冲击作出反应冲击就已经完成,因而冲击速度为100 m/s时,

表5 应力变化

冲击平面	冲击速度/(m·s ⁻¹)	杆件应力极值/MPa						
		冲击角度						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
水平面	5	—	151.2	160.6	131.5	210.5	192.9	152.1
	10	—	155.5	164.8	135.5	387.7	332.2	198.2
	20	—	288.0	---	---	442.3	346.5	371.1
	50	—	383.9	---	---	324.9	---	365.4
	100	—	---	---	---	171.6	167.8	149.4
竖直面	5	152.1	150.4	160.5	160.2	149.4	149.5	145.8
	10	198.2	287.0	182.9	297.6	231.7	206.6	156.3
	20	371.1	403.9	391.6	338.0	381.1	378.5	201.3
	50	365.4	385.2	333.6	367.8	428.0	389.7	187.0
	100	149.4	165.2	170.8	168.6	174.3	307.7	163.8

注:“—”代表没有模拟该工况,水平面0°冲击没有意义;“---”代表该工况下杆件被破坏,数据没有参考价值。

R1杆件应力出现减小现象。

在水平面变换冲击角度,低速冲击时,杆件R1应力最大值出现在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间且材料已屈服;中速、高速冲击时,杆件R1应力最大值出现在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间。在竖直面变换角度冲击,低速冲击时,杆件R1应力最大值出现在 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 左右,其中部分杆件材料屈服;中速冲击时,杆件R1应力最大值出现在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间;高速冲击时,杆件R1应力最大值出现在 75° 左右;低速冲击时杆件R1应力最大角度出现异常的原因是,在低速冲击工况下,冲击角度为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,冲击物在冲击点处被抬升,杆件R1遭受冲击从而导致应力增大。

3.2 节点位移变化规律分析

节点位移能直接反映结构的变形情况,对在各冲击工况下网壳结构的节点位移进行研究分析很有必要,以位于冲击区的节点1为例,其位移变化见图8和图9。竖直面模拟工况中,中速冲击时,冲击角度为 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时,节点1位移最大。理论上冲击物垂直冲击构件所造成的变形最大,而位于模拟网壳结构三环的冲击点处的法向量与水平面的夹角理论值为 69.3° ,这与模拟结果相吻合。

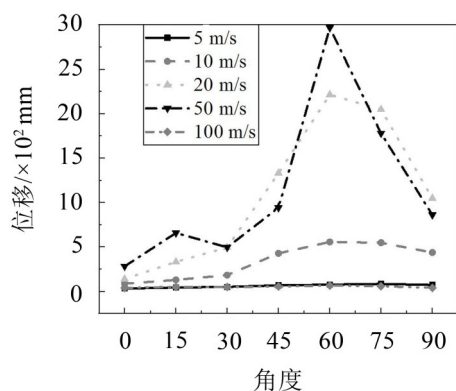


图8 测点1竖直面冲击位移

水平面模拟工况中,同样是中速冲击下节点1位移最大;但低速冲击时节点1最大位移出现在 60° 左右,中速冲击时,冲击角度为 15° 左右时,节点1位移最大。其中以 15° 角高速冲击时,节点1破坏,位移数据没有参考价值。测点1与冲击点的连线与水平面冲击 0° 方向的夹角为 15° ,但低速冲击时,在冲击完成后,冲击物冲击能量太小及网壳结构的弧度导致冲击物被抬升冲向高空;而在中高速冲击下,在冲击测点1后冲击物的冲击方向并没有发生太大的改变,继而冲击了测点1,因而造成以 15° 角冲击时测点1位移最大。

3.3 节点加速度变化规律分析

加速度是动力学问题研究的重点之一,在冲击

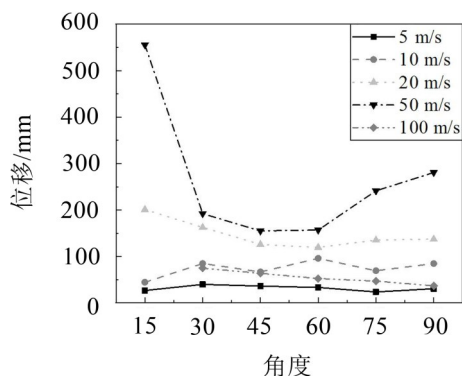


图9 测点1水平面冲击位移

荷载作用下网壳结构的节点加速度可以反映出结构的振动效应。实际工程中应尽量避免结构坍塌的发生,而模拟工况中仅在竖直面中速冲击工况下网壳结构会发生坍塌,图10为竖直面中速冲击工况下结构3个测点的加速度峰值变化图。

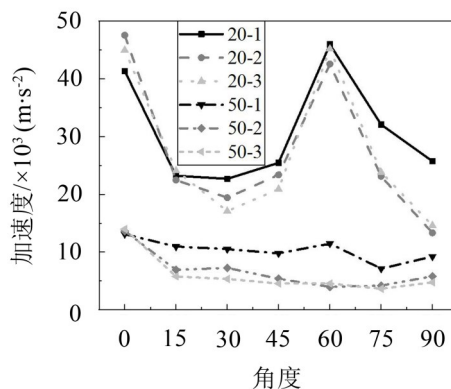


图10 测点加速度峰值变化图

3个测点的加速度峰值变化趋势基本一致,在20 m/s冲击速度工况下,测点加速度峰值随着角度的增加而减小,但冲击角度达到 30° 后,测点加速度峰值开始逐渐增大,在 60° 左右达到顶峰,之后随着冲击角度的增大测点加速度峰值又逐渐减小。在50 m/s冲击速度工况下,测点加速度峰值随着角度的增加而减小,但直到冲击角度达到 45° 后,冲击区测点1加速度峰值开始逐渐增大,在 60° 左右达到顶峰,非冲击区测点2、3加速度峰值仍持续减小,之后随着冲击角度的增大又逐渐减小。20 m/s冲击速度工况下的结构的变形较50 m/s冲击速度工况下结构的变形大,导致结构的振动更加剧烈,使得结构加速度整体较大。

4 结语

本文利用ANSYS/LS-DYNA有限元分析软件建立了联方型球面网壳的模型,并使用正确的分析方法对竖直面和水平面不同冲击角度工况下的网壳结构进行了数值模拟,最后通过对60个冲击工况下

结构动力响应的分析,得出以下结论:

在不同冲击角度下联方型网壳结构变形模式归结为6种:

- ① 结构局部损伤;
- ② 结构局部凹陷并伴有杆件断裂;
- ③ 结构局部塌陷;
- ④ 结构局部塌陷并伴有杆件断裂;
- ⑤ 结构局部剪切;
- ⑥ 结构出现两次冲切破坏。

在对结构变形模式最不利的竖直面中速冲击工况下,以 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 角冲击时结构的应变能及动能明显大于其他冲击角度工况下的值,且结构加速度最大值达到峰值。该结果表明结构在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 角冲击工况下,结构吸收的冲击能量最多,且结构自身的振动剧烈。

通过深入分析确定了不同冲击角度工况下冲击力持时、关键杆件应力和关键节点位移的变化规律。在竖直面进行中速冲击时,冲击力持续时间的增加会造成结构变形的扩大与加深,导致结构发生局部坍塌;在水平面冲击时杆件R1应力变化无明显规律,在竖直面冲击时杆件R1应力在冲击角度最不利区域时最大;以水平面中速 15° 角冲击时,测点1位移最大,在竖直面冲击时,测点1位移在以 60° 角冲击时的工况下最大。

对于本文所研究的联方型网壳,在冲击结构中部节点工况下,竖直面冲击时最不利角度在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间,水平面冲击时最不利角度在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间。联方型网壳结构竖直面最不利冲击方向为冲击点处于法向量所在方向,水平面冲击时结构杆件较密集的方向为联方型网壳结构的最不利冲击方向。

参考文献:

- [1] 范峰,王多智,支旭东,等. K8型单层球面网壳抗冲击荷载性能研究[J]. 工程力学,2009,26(6):75-81.
- [2] 王多智,范峰,支旭东,等. 冲击荷载下单层球面网壳的失效机理[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):169-177.
- [3] 马肖彤,包超,王秀丽,等. 水平冲击荷载下K6型单层网壳结构抗冲击性能研究[J]. 空间结构,2016,22(4):29-34+7.
- [4] 马肖彤,包超,王秀丽,等. 基于能量原理的单层网壳结构抗冲击性能简化分析方法研究[J]. 工业建筑,2017,47(11):155-162.
- [5] 王秀丽,马肖彤. 冲击荷载作用下受损网壳结构全过程动力响应分析[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(3):14-19.
- [6] 马肖彤,王秀丽. 冲击荷载作用下单层网壳结构动力稳定性研究[J]. 振动与冲击,2015,34(2):119-124+133.
- [7] 王人立. 径向开合屋盖精细化模拟及动力稳定性研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [8] 胡晨曦. 单层网壳结构非线性冲击响应研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [9] 王喆. 不同冲击角度冲击荷载作用下方钢管混凝土结构动力响应研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [10] 林晓虎,杨庆生. 加筋圆柱壳结构受鸟体撞击的有限元模拟[C]// 中国航空学会. 第17届全国复合材料学术会议论文集. 北京,中国航空学会,2012:114-117.
- [11] 杨庆丰,张荣. 基于LS-DYNA圆钢管抗侧向冲击性能分析[J]. 低温建筑技术,2014,36(12):38-41.
- [12] ZHENG LIANG, CHEN ZHIHUA. Finite element analysis of a single-layer reticulated dome under impact loading[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163: 327-331.
- [13] WEI LU, JUNLIN WANG, HUA GUO, et. al. Dynamic response of latticed shell and its steel column supports under impact load[J]. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2020, 15(2): 253-260.

(上接第6页)

- [10] 赵卫鹏,孙晋伟,桑志国,等. 2自由度悬架质量辨识[J]. 机械设计与制造,2019(7):89-91.
- [11] 殷琚,陈辛波,吴利鑫,等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(3):398-407.
- [12] 赵丰. 基于路面感知的车辆智能悬架控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [13] 吕显瑞,黄庆道. 最优控制理论基础[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [14] 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [15] 李国正. 支持向量机导论[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [16] 武洪强. 基于支持向量机的路面状态视频图像识别技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [17] 刘新宇,黄启德. 基于SVM分类器的道路湿滑图像分类方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(4):784-787.
- [18] SHI X, HUANG Q, CHANG J, et al. Optimal parameters of SVM for temperature prediction[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, (368): 162-167.