

张艳梅,刘敏.钢框架加劲肋壁板结构的受力失稳性能研究[J].地震工程学报,2020,42(1):32-37.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.032

ZHANG Yanmei,LIU Min.Instability Behavior of the Steel Frame Rib-Stiffened Panel Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):32-37.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.032

钢框架加劲肋壁板结构的受力失稳性能研究

张艳梅¹, 刘 敏²

(1. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160; 2. 东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要: 钢框架壁板由于在宏观上参与了整体建筑结构的受力,为钢框架构件承担部分外荷载,使得壁板结构在受力性能方面需要进一步改善。加劲肋壁板可以保证其与外框架的连接状况较好,改善整体构件的受力性能。为此,提出钢框架加劲肋壁板结构的受力失稳性能研究。采用动力学分析方法计算壁板结构位移值,依照位移值大小判断壁板结构是否处于稳定状态,获取壁板结构稳定性。利用实例测试分析钢框架加劲肋壁板结构的受力失稳性能,发现滞回曲线形状拥有梭形滞回曲线的特点,整个结构受力后具有塑性变形性能与抗震性能;骨架曲线反映出实验试件承载力支持第一阶段壁板结构弹性设计所需且提供第二阶段弹塑性抗震设计所需以及延性要求,本文检测模型能够判断钢结构建筑壁板结构失稳性。

关键词: 钢结构; 建筑构件; 壁板结构; 受力性能

中图分类号: TB12

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0032-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.032

Instability Behavior of the Steel Frame Rib-Stiffened Panel Structures

ZHANG Yanmei¹, LIU Min²

(1.Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China;

2.Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: The mechanical properties of the panel structure must be improved because the steel frame panel contributes to the stress of the whole building structure and bears some part of the external load of the steel frame members. The rib-stiffened panel can achieve a good connection with the outer frame and improve the mechanical performance of the whole structure. Therefore, the mechanical instability performance of the steel frame rib-stiffened panel structures is investigated in this study. Here, the dynamic analysis method is used to calculate the displacement of the panel structure. The stability of the panel structure can be judged according to the displacement value; thus, the stability of the panel structure can be ensured. The example test results denote that the hysteretic curve shape exhibits the characteristics of the shuttle hysteretic curve, and the whole structure exhibits plastic deformation performance and aseismic performance after

收稿日期:2019-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(11401094)

第一作者简介:张艳梅(1985-),女,河北衡水人,硕士,讲师,研究方向:结构工程、钢结构。E-mail:waoi.zhangyanmei@163.com。

being subjected to tension; the skeleton curve denotes that the bearing capacity of the test specimens can satisfy the requirement of elastic design with respect to the wall panel structure in the first stage and achieve the elastic-plastic seismic design and ductility requirements in the second stage. The proposed detection model can judge the instability of the steel panel structures.

Keywords: steel structure; building components; panel structure; mechanical properties

0 引言

地震灾害中建筑物的坍塌是造成人们生命财产损失的主要原因。当前大部分建筑物都是钢结构建筑,因此研究钢结构建筑壁板结构稳定性很有意义。查阅相关文献发现,当前关于钢结构建筑在壁板稳定性已有较多研究成果^[1]。王娟^[2]根据 Revit 塑造高层建筑模型和结构模型设计了壁板结构失稳定 BIM 模型,实现了高层建筑在连续振动下的壁板结构稳定性分析,但是该方法分析时间较长。于健等^[3]应用有限元软件 ABAQUS 对搅拌摩擦点焊加筋壁板进行剪切稳定性计算,采用模拟焊点连接的有限元模型,为该结构型的优化设计及工程应用提供分析参考,该方法工作量较大,耗时较长。叶柳青等^[4]基于激波主导流动下弹性壁板的热气动弹性稳定性问题建立了基于当地活塞流理论的分析模型,采用数值仿真方法来验证其正确性,研究结果表明只有斜激波前后不同的动压值全部满足颤振稳定性边界的情况时,壁板的气动弹性才能够稳定,但是该方法没有考虑低维振动情况下的滞回退化现象。

针对上述方法存在的问题,本文提出一种新型壁板结构稳定性分析方法,设计一种钢结构建筑的失稳定模型,通过该模型分析壁板破裂程度和位移变化情况,获取相应的分析结果。

1 失稳性模型设计

1.1 振动对壁板结构破坏程度

从内外力角度分析壁板结构破坏程度,低维振动条件下会局部破坏钢结构建筑壁板结构^[5-6],主要是破坏壁板结构的荷载力,而在剩余部分的壁板结构中会平均分配荷载力^[7]。以分析剩余壁板结构和原始壁板结构的具体荷载力为目的,保持钢结构建筑其他结构不变,分析钢结构建筑壁板结构的损坏程度,通过内力分析判断钢结构支吊架壁板结构的支撑力^[8-10]。同时低维振动情况下外力分析钢结构建筑壁板结构破坏程度时,需将壁板结构中底层内柱移除,研究移除前后壁板结构沿纵轴方向上的剪力^[11]。

假设 n 表示内力分析结果, w 表示外力分析结

果,那么壁板总体破坏程度可表示为:

$$\begin{cases} n = K \left[\frac{2\alpha}{s} - \left(\frac{\alpha}{s} \right)^2 \right], & \alpha \leq s \\ w = \frac{K - K_0}{s - \alpha} (\beta_0 - \beta_r), & \beta_r \leq \beta_0 \\ z = 0.93 \left(\frac{\alpha}{s} \right)^2 + 0.3nl, & \left(\frac{\alpha}{s} \right)^2 \leq nl \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 表示壁板结构总体破坏程度; K 表示控制参数; α 表示循环应变差专有指标; β_0 表示初始应变指标; β_r 表示应变指标; s 表示壁板界面与单元材料属性; nl 表示内力和外力之间的相互作用。依照上述公式可分析钢结构建筑壁板结构破坏程度。

1.2 动力学分析壁板位移

低维振动会引发壁板结构位移发生改变,假设用 y 表示壁板基底位移, y_1 表示壁板总位移, y_2 表示壁板相对于地面位移,壁板引起的相对运动,该相对运动导致壁板出现弹性恢复力和阻尼恢复力^[12],依照 D'Alembert 原理可获取壁板动力平衡方程,方程表达式如下所示:

$$L(t) + L_1(t) + L_2(t) = 0 \quad (2)$$

如果研究系统是线性系统,那么可得到公式:

$$\begin{cases} L(t) = m y_1(t) \\ L_1(t) = k y_2(t) \\ L_2(t) = c y_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $L(t)$ 表示壁板运动产生的惯性力; $L_1(t)$ 表示壁板相对运动产生的弹性恢复力; $L_2(t)$ 表示壁板相对运动产生的阻尼力; m 表示质量; k 表示弹性恢复系数; c 表示阻尼恢复系数。由于 $y_1 = y + y_2$,将式(2)代入式(1),可以得到:

$$m y_2(t) + c y_2(t) + k y_2(t) = -m y(t) \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,可将公式右端当成是低维振动等效荷载,可获取式(5),同时令 $c/m = A$, $k/m = B, 2\pi w K (Q^{\frac{1}{3}}/R) \epsilon \sin \theta = C$, $k (Q^{\frac{1}{3}}/R) \epsilon \sin \theta \eta = D$,可简化式(5)为式(6),

$$m y_3(t) + c y_3(t) + k y_3(t) = m K (Q^{\frac{1}{3}}/R) \epsilon \sin \theta e^{\eta} \cdot [2\pi w \cos(2\pi \omega t + \varphi_0) - \eta \sin(2\pi \omega t + \varphi_0)] \quad (5)$$

$$y_3(t) + Ay_3(t) + By_3(t) = Ce^{-\eta t} \cos(2\pi\omega t + \varphi_0) + De^{-\eta t} \cos(2\pi\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

式中: θ 为质点与振动波源连线方向与竖向夹角, 单位为($^\circ$); Q 为单段最大破坏力; η 为振幅衰减系数; R 为振动波心距; φ_0 为低维振动波主频。经过分析可知式(6)是一种二阶常微分方程, 通常二阶常微分方程中没有与其相关的求解公式^[13], 需采用拉氏变换求解上述二阶常微分方程。拉氏变换式(6)得到:

$$r_2 y(\bar{r}) + Ary(\bar{r}) + Bry(\bar{r}) = C \frac{r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}}{\left(r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}\right)^2 + 4\pi^2\omega^2} + D \frac{r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}}{\left(r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}\right)^2 + 4\pi^2\omega^2} \quad (7)$$

式中: r 为时间。从式(7)中求解得到:

$$y(\bar{r}) = \frac{1}{r^2 + Ar + B} \cdot \left[C \frac{r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}}{\left(r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}\right)^2 + 4\pi^2\omega^2} + D \frac{r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}}{\left(r + \eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}\right)^2 + 4\pi^2\omega^2} \right] \quad (8)$$

对上式做拉氏逆变换得到:

$$y_3(t) = \frac{C}{\sqrt{B + \frac{A^2}{4}}} e^{-\left(\eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega}\right)t} \cdot \int_0^t e^{\left(\eta + \frac{\varphi_0}{2\pi\omega} - \frac{A}{2}\right)\tau} \left[\cos 2\pi\omega(t - \tau) + \frac{D}{C} 2\pi\omega(t - \tau) \right] \cdot \sin \sqrt{B - \frac{A^2}{4}} \tau d\tau \quad (9)$$

依照式(9)中得到的位移值, 判断钢结构建筑壁板结构是否处于稳定状态^[14-15], 当位移值小于一定值时, 表示钢结构建筑壁板结构处于稳定状态, 反之钢结构建筑壁板结构处于失稳定状态。

2 实例分析

2.1 试件概况

本试验研究对象为钢框架加劲壁板足尺试件, 试件外形尺寸 4 170 mm × 4 710 mm, 高度 4 120

mm, 跨度 3 060 mm; 梁柱连接处均由盖板加强, 壁板与框架梁由连接角钢焊接连接, 整体试件采取分块连接, 钢壁板单侧布置角钢及槽钢加劲肋, 壁板上槽钢背对背用 M18 高强螺栓连接, 梁连接处采用 M30 高强螺栓端板连接; 在柱脚上应用刚性连接设计; 除了螺栓连接之外, 整体试件的其余连接部位都采用焊接连接进行后续操作。试件的主要连接构件尺寸为: 连接角钢 56 × 36 × 3; 加劲槽钢 6.5 — 30 #; 加劲角钢 63 × 40 × 4; 盖板 300 × 265 × 15; 横向加载板 425 × 425 × 28; 竖向加载板 300 × 300 × 28; 框架柱高 300 mm、宽 300 mm, 腹板厚度 10 mm、翼板厚度 16 mm; 框架梁高 290 mm、宽 215 mm, 腹板厚度 8 mm、翼板厚度 12 mm; 壁板厚 4.6 mm。试件结构如图 1, 部分细节如图 2。

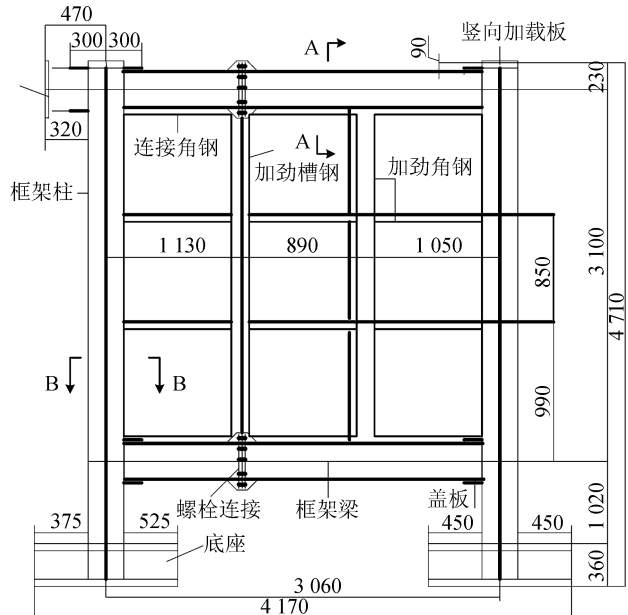


图 1 试件立面结构图

Fig.1 Vertical structural drawing of test piece

2.2 测验方式

试件用地脚锚栓固定在实验场地地面上。为了防止试件底座的移动, 使用横梁将底座和两侧相互支撑, 形成固定支护端, 确保试件底座已固定。为了实现建筑结构的机械力学性能考察, 测试试件的失稳条件, 将面外支撑分别设置于顶层梁和柱高处。

2.3 加载方式

荷载变形双控制是以《建筑抗震试验方法规程》为试验加载过程基础, 测试试件拟静力的加载程序。试件屈服前采取荷载控制并分级加载的方式, 即每级荷载加载一次; 在试件屈服后, 重复两次各级加载。加载力分别为 20、30 和 50 t。循环加

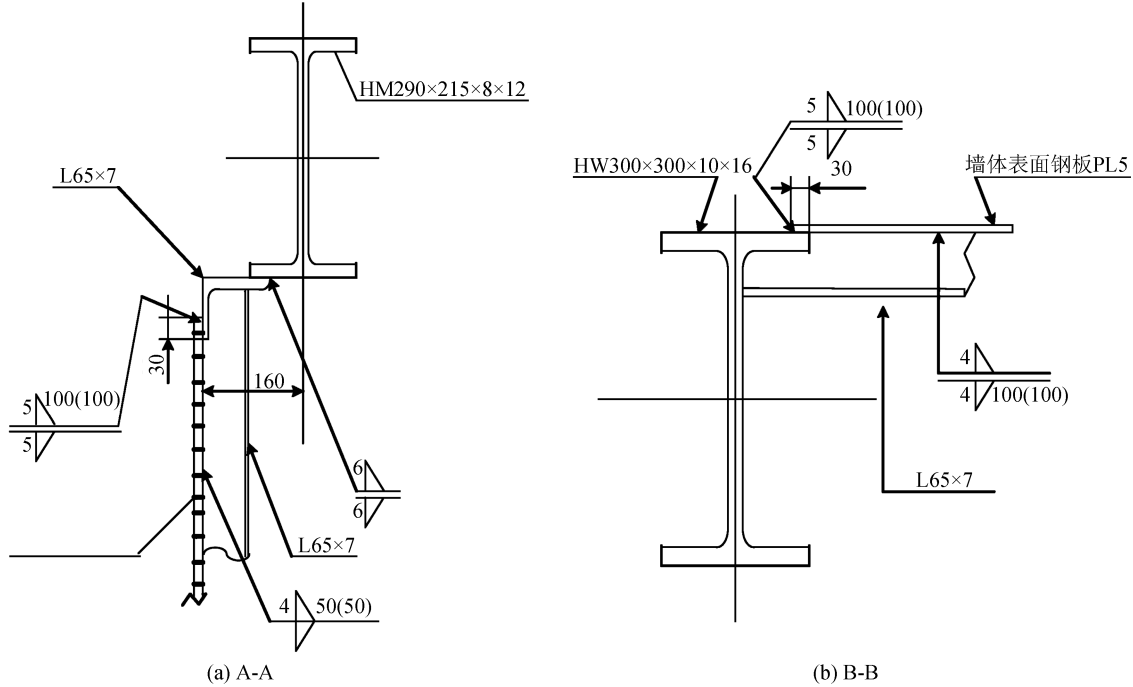


图 2 部分细节结构图
Fig.2 Structure of some details

载后,直至承载力下降到最大承载力的 85%,终止试验。

表 1 为各钢板的厚度。

表 1 钢板厚度
Table 1 Thickness of steel plate

位置	厚度/mm
墙板	4.6
角钢	7.4
槽钢	7.3
柱腹板	12.03
柱翼缘	17.65
梁腹板	9.2
梁翼缘	12.54

2.4 滞回曲线

滞回曲线反映了结构在反复过程中的刚度退化和能量消耗。反 S 形和 Z 形、弓形还有梭形是滞回曲线的典型形状。这些不同形状滞回曲线的特点为:反 S 形和 Z 形滞回曲线形状不饱满,受到更多的滑移影响,承重构件承载能力差,试件吸收能量不强;弓形滞回曲线的形状比较饱满,虽比梭形饱满程度要低,但具有“捏缩”效应,表明弓形滞回曲线比反 S 形和 Z 形滞回曲线形状受滑移的影响小;梭形滞回曲线的形状饱满程度最高,结构的不可恢复变形能力强,没有出现“捏拢”现象,具有很好的承载能力和吸收能量。

图 3 为得到的实际滞回曲线,其中横坐标是柱

顶水平位移,即在试件顶梁中心线处测得具体数值,纵坐标是施加的水平荷载。

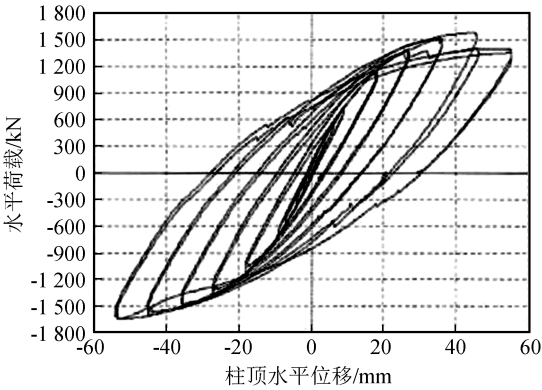


图 3 滞回曲线
Fig.3 Hysteresis curve

通过图 3 得出:

- (1) 图 3 显示出的形状是典型的梭形滞回曲线,其特征与大部分梭形滞回曲线相同,数据显示整体试件的塑性变形能力不弱,具有很好的抗震性、承载性和耗能性。
- (2) 在最初开始加载时,试件的初始刚度大,处于弹性工作阶段,而滞回曲线基本是过原点的直线,所包围的面积非常小,耗能较少。
- (3) 加载循环次数的逐渐增加,各个部分的不同结构开始屈服,最初屈服的是框架柱柱脚,其次是

部分壁板,最后试件刚度开始缓慢下降。与此同时,滞回线将缓慢开启,包含区域面积逐渐增大,具有一定的吸收能量的功能。此时试件状态为弹塑性状态。

2.5 骨架曲线

骨架曲线是将具体的滞回曲线在各个变形幅值中达到的荷载峰值进行连接而形成的曲线。图4展现的骨架曲线为本次测试的结果。

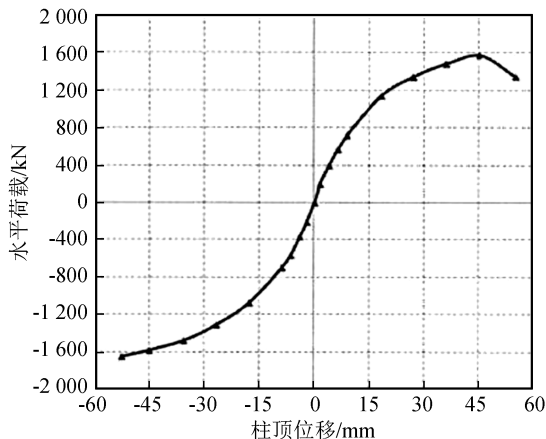


图4 骨架曲线

Fig.4 Skeleton curve

图4大致分为两个部分:

(1) 第一部分为弹性阶段。在试件屈服前骨架曲线中的荷载和位移大体体现为直线分布,层间侧移角为 $1/505$,侧向水平位移为 9 mm 。

(2) 第二部分是弹塑性阶段。试件屈服后,荷载和位移关系表现为曲线分布,其层间侧移角 $1/84$,侧向水平位移为 45 mm 。当柱翼缘开裂时,全部曲线的塑性流动程度不明显,而当到达峰值时,曲线逐渐趋于平缓,说明试件的承载性能具有较强的鲁棒性,不仅能够支持第一部分的弹性设计,还能为第二部分弹塑性抗震设计提供性能所需和延性要求。

综上所述,通过本文模型的检测后,可以分析得出钢结构建筑壁板结构受力失稳性能。

3 结果

钢结构建筑的使用量正在逐步提升,其中该建筑壁板结构的稳定性与人们生命安全紧密相连。通过现实分析可以发现,使用大部分传统方法来判断钢结构建筑壁板部分失稳定结构存有着一定误差,因此本文设计了一种钢结构建筑壁板结构失稳定检测模型,计算钢结构建筑壁板结构的位移值,通过滞回曲线和骨架曲线实例测试钢框架加劲肋壁板结构

的塑性变形能力和承载能力。经过实验分析发现,该方法能够判断钢结构建筑壁板结构失稳性,适合应用到实际检测中,为以后的相关研究提供参考。

参考文献(References)

- [1] 陈学森,施刚,王喆,等.箱形柱-工形梁端板连接节点试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(8):113-123.
CHEN Xuesen, SHI Gang, WANG Zhe, et al. Experimental Study of End-plate Connections between Box-section Columns and I-section Beams[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(8):113-123.
- [2] 王娟.高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型设计[J].地震工程学报,2018,40(3):413-420.
WANG Juan. Panel Structure Instability BIM Model Design of High-rise Buildings under Continuous Vibration [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3):413-420.
- [3] 于健,王新峰.搅拌摩擦点焊加筋壁板剪切稳定性分析[J].焊接学报,2017,38(6):91-95,133.
YU Jian, WANG Xinfeng. Study on Stability Performance of Friction Stir Welded Stiffened Panel under Shear Load[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(6):91-95,133.
- [4] 叶柳青,叶正寅.激波主导流动下壁板的热气动弹性稳定性理论分析[J].力学学报,2018,50(2):221-232.
YE Liuqing, YE Zhengyin. Aeroelastic Stability Analysis of Heated Flexible Panel in Shock-dominated Flows[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(2):221-232.
- [5] 陈安,魏玉龙,廖江海,等.机身加筋壁板复合加载损伤容限性能试验[J].航空学报,2017,38(1):305-312.
CHEN An, WEI Yulong, LIAO Jianghai, et al. Damage Tolerance Test of Stiffened Fuselage Panel under Complex Load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1):305-312.
- [6] 赵智力,李睿,刘鑫,等.箱形容器圆形法兰-板壳结构的焊接变形及控制[J].焊接学报,2018,39(1):115-118,134.
ZHAO Zhili, LI Rui, LIU Xin, et al. Welding Deformation and Control of Box-shaped Container Circular Flange-plate-shell Structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1):115-118,134.
- [7] 回丽,陈晓伟,周松,等.激光焊接带口盖加筋壁板剪切性能分析[J].北京航空航天大学学报,2019,45(3):446-453.
HUI Li, CHEN Xiaowei, ZHOU Song, et al. Shear Property Analysis of Laser Welding Stiffened Panel with Cover[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(3):446-453.
- [8] 付守冲,杨立军,王扬,等.5A06 铝合金交叉筋壁板激光诱导自由成形扭曲现象研究[J].科学技术与工程,2016,16(35):45-51.
FU Shouchong, YANG Lijun, WANG Yang, et al. The Study of the Twisting Phenomenon of Panel with Crossed Reinforcing

Bars under Laser Forming Technology[J].Science Technology and Engineering,2016,16(35):45-51.

[9] 陈金睿,陈普会,孔斌,等.考虑筋条扭转弹性支持的轴压复合材料加筋板局部屈曲分析方法[J].南京航空航天大学学报,2017,49(1):76-82.

CHEN Jinrui,CHEN Puhui,KONG Bin,et al.Local Buckling Analysis of Axially Compressed Stiffened Laminated Panels Considering Rotational Restraint of Stiffeners[J].Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(1):76-82.

[10] 郭俊,关志东,黎增山,等.带口盖加筋复合材料壁板剪切性能[J].复合材料学报,2016,33(2):399-407.

GUO Jun,GUAN Zhidong,LI Zengshan,et al.Shear Properties of Composite Stiffened Panel with Cover[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(2):399-407.

[11] 梅冠华,张家忠,康灿,基于流-固耦合算法的跨/超声速曲壁板气动弹性分析[J].振动与冲击,2016,35(22):54-60,71.

MEI Guanhua,ZHANG Jiazhong,KANG Can. Aeroelastic Analysis of Curved Panels in Transonic/supersonic Airflow Based on a Fluid-structure Coupling Algorithm[J].Journal of Vibration and Shock,2016,35(22):54-60,71.

[12] 赵洁,陆华,王明春.筋条分层损伤复材加筋壁板的稳定性分析及修理[J].机械强度,2016,38(4):871-874.

ZHAO Jie,LU Hua,WANG Mingchun.Stability Analysis and Repair of Stiffened Composite Wall Slab with a Delaminatong at the Stringer Interface[J].Journal of Mechanical Strength,2016,38(4):871-874.

[13] 刘兴宇,汪海,韩克岑.单轴力多约束条件下复合材料单向加筋壁板结构效率分析方法[J].复合材料学报,2016,33(1):183-188.

LIU Xingyu,WANG Hai,HAN Kecen.A Method for Structure Efficiency Analysis of Unidirectional Stiffener Composite Panels in Single-axial Compression under Multi-constraint Case[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(1):183-188.

[14] 王贻明,徐恒,吴爱祥,等.基于尖点突变模型的临时矿壁系统失稳机制及矿壁厚度优化[J].采矿与安全工程学报,2016,33(4):662-667,675.

WANG Yiming,XU Heng,WU Aixiang,et al.Study on Instability Mechanism and Thickness Optimization of Temporary Ore Wall Based on Cusp Catastrophe Model[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(4):662-667,675.

[15] 魏利军,王向阳,罗艾民,等.基于贝叶斯网络的化工园区地震次生灾害情景分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):73-78.

WEIlijun,WANG Xiangyang,LUO Aimin,et al. Scenario Analysis on Secondary Disasters of Earthquake in Chemical Industry Park Based on Bayesian Network[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):73-78.