

# 压缩载荷下夹层结构斜坡过渡区域性能分析

黄翔 周光明 陆方舟 蔡登安 曹然

(南京航空航天大学,机械结构力学及控制国家重点实验室,南京 210016)

**文 摘** 建立了泡沫夹层结构斜坡过渡区域的三维(3D)有限元模型,进行了斜坡过渡区域的坡度角分析优化。基于有限元分析软件 MSC. Patran/Nastran,建立了考虑斜坡过渡区面板铺层递减的泡沫夹层结构的有限元模型,研究了结构在单轴压缩载荷作用下的力学行为,进一步讨论了坡度角对于夹层结构过渡区域结构强度和稳定性的影响规律。研究表明,泡沫夹层结构坡度角在  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$  时能够达到提高结构承载能力及减轻结构质量的双重目的。

**关键词** 泡沫夹层结构,失效分析,坡度角设计,结构稳定性

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.016

## Analysis of Sandwich Structure Ramp Transition Region Under Compression Load

HUANG Xiang ZHOU Guangming LU Fangzhou CAI Deng'an CAO Ran

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** A three-dimensional finite element model is established to analyze and optimize the slope angle of sandwich structure ramp transition region. Based on the finite element analysis software MSC, Patran/Nastran the finite element model of sandwich structure considering the decrease of panel layer of transient slope zone. After studying the structural mechanical behavior formed in uniaxial compression load, the article further discussed the influence of slope angle for the intensity and stability of regional structure of sandwich structure transition. The results show that when the foam sandwich structure slope angle is between  $25^{\circ}$  to  $30^{\circ}$ , it can improve structure bearing capacity and reduce the structure weight of dual purpose.

**Key words** Foam core sandwich structure, Failure analysis, Ramp design, Structural stability

### 0 引言

泡沫夹层结构具有了高比强度、比刚度的性能优点。但由于芯层材料的压缩和剪切强度远低于面板蒙皮材料,在夹层结构与相邻结构相连接时容易出现芯层的破坏,夹层结构连接时通常需要设计斜坡过渡区域以满足连接要求。而夹层结构在斜坡过渡区域结构高度发生改变,这样的结构很容易导致结构受载后出现应力集中和稳定性的问题。当前,夹层结构在工程结构中得到了广泛应用,夹层结构的过渡连接问题对提高工程结构的可靠性具有重要的研究意义。

目前,国外众多学者已经对夹层结构连接的强度

和稳定性进行了理论分析和试验研究。关于夹层结构的失效形式, Vinson<sup>[1]</sup> 和 Ley<sup>[2]</sup> 等人以夹层结构单轴压缩应力状态为基础,深入研究了面板和芯层厚度对于结构强度及稳定性的影响。Kassapoglou 等<sup>[3]</sup> 进一步提出了采用解析法研究带斜坡过渡区域的夹层结构在弯曲载荷作用下的失效问题,并得出了芯层应力大小受过渡角变化影响的规律;而 Hadi 等人<sup>[4]</sup> 选择合适的应力函数<sup>[5]</sup> 总结了芯材的横向剪切变形,建立了关于夹层结构总体屈曲和面板皱屈失效的统一分析理论。Léotoing<sup>[6]</sup> 则采用有限元法研究了夹层结构的稳定性<sup>[7-8]</sup> 问题,并对有限元模型的规模进行

收稿日期:2014-10-28

基金项目:江苏省高校优势学科建设工程项目资助(PAPD);南京航空航天大学研究生创新基地开放基金项目(kfj130104)

作者简介:黄翔,1990年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构设计及性能研究。E-mail:huangxiang\_hx@126.com

通讯作者:周光明,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn

了讨论。Hojjati 等<sup>[9]</sup>制作了不同芯层材料的夹层斜坡过渡试件并进行了拉伸加载试验,考察了结构斜坡过渡区域各处的应力变化情况。但以上方法均忽略了面板材料设计时铺层递减的结构特征对于结构整体的影响,同时过渡区域的破坏往往表现为多种失效形式耦合的情况,单一考虑一种失效形式无法验证结构设计的可靠性。

国内对夹层结构过渡区域的研究较少,对于夹层结构连接过渡区域的研究鲜有报道。本文旨在分析研究夹层结构过渡区域参数对结构强度和稳定性的影响规律,为夹层结构的工程应用和连接设计提供相应的设计参考。基于 MSC. Patran/Nastran 有限元分析软件,建立了泡沫夹层结构的三维分析模型,分析单轴压缩情况下夹层结构发生强度破坏和总体屈曲的临界失效载荷,讨论在考虑过渡区域蒙皮铺层递减的模型下连接过渡角、芯层厚度等因素对其强度和稳定性的影响。

### 1 斜坡过渡区域模型

夹层结构的斜坡过渡区域由上、下面板和中间泡沫芯层三部分构成,在夹层结构和单块式层压板之间起到过渡连接作用。在实际铺层设计时,单块式层压板一般作为与其他结构连接的连接构件,需要进行局部加强以传递挤压和剪切载荷,而附加铺层同时终止于芯层斜坡的边缘将会导致刚度不一致并引起过渡区域结构过早破坏,因此斜坡过渡区域需要进行附加铺层的递减以满足强度设计要求。

斜坡过渡区域总长 90 mm,宽 40 mm,复合材料单层厚度为 0.2 mm。夹层结构上、下蒙皮厚度  $h_1$  均为 0.6 mm,芯层厚度  $h_c = 9.2$  mm。整体压板部分总厚度  $h_1 = 2.8$  mm,长度 30 mm。从单块式层压板到全高度面板的铺层分两次递减,均递减 0.4 mm,第一次递减距离斜坡边缘区域 10 mm,第二次递减距离斜坡边缘 14 mm。其几何外形如图 1 所示。

斜坡过渡区域模型采用 Hex 单元进行离散,在网格模型的层合板端施加固支约束,夹层结构端施加位移载荷,建立完成的有限元模型如图 2 所示。本文采用 MSC. Nastran 分析求解结构的强度和稳定性,输出结构的应力、位移及屈曲系数。

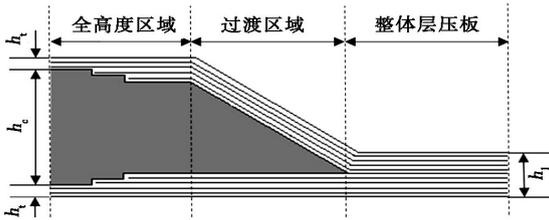


图 1 斜坡区域几何外形截面图

Fig. 1 Geometric sectional view of the sandwich structure ramp  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 3 期



图 2 斜坡区域有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the sandwich structure ramp

试验测得蒙皮复合材料力学性能参数见表 1。泡沫芯层材料拉伸模量 180 MPa,泊松比为 0.33,拉伸强度 3.6 MPa。

表 1 蒙皮复合材料力学性能参数

Tab. 1 Material parameters of the panel

$E_{11}, E_{22}$	$G_{12}$	$\mu_{12}$	$E_{33}$	$G_{23}, G_{31}$	$\mu_{23}, \mu_{31}$
/GPa	/GPa		/GPa	/GPa	
19.35	3.39	0.12	5.54	2.12	0.24

## 2 斜坡过渡区域结构分析

### 2.1 强度准则

单轴压缩载荷下,斜坡过渡区域结构处于平面应变状态。加载时由于夹层结构部分和层合板部分的厚度不同会产生作用于斜坡区域的附加弯矩,并对结构产生剪切应力。同时蒙皮和芯层是两种不同的材料,剪力作用下蒙皮和芯层接触的部分会产生应力的突变。假设结构所受总弯矩  $M$ ,蒙皮和芯层的弹性模量为  $E_f$  和  $E_c$ ,结构的等效刚度为  $(EI)_{eq}$ , $z$  为距离中性轴距离。蒙皮和芯层在  $x$  方向上的应力计算公式如下:

$$\sigma_f = \frac{zME_f}{(EI)_{eq}} \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{zME_c}{(EI)_{eq}} \quad (2)$$

在斜坡过渡结构中,芯层泡沫材料的模量和强度都远小于蒙皮材料,由计算可知距离中性轴越远的部分所受的应力越大。因此可以看出结构在蒙皮与芯层接触部分所受应力最大,这部分结构在受载时最易发生失效。本文只考虑蒙皮和芯层发生破坏的理想状态,因此采用最大应力准则<sup>[10]</sup>进行强度校核。

$$\sigma_{max} \leq \sigma_b \quad (3)$$

### 2.2 斜坡过渡区域坡度角

斜坡过渡区域的坡度角是影响结构承载能力的重要因素,根据以往试验研究分析<sup>[11]</sup>,斜坡过渡区域坡度角较大 ( $\theta > 40^\circ$ ) 时,斜坡区域占据空间较小,但载荷难以传递到上面板。另外,固化时的压力可能导致芯层被压塌。坡度角较小 ( $\theta < 15^\circ$ ) 时,载荷易于向上传递,固化时芯层被压塌的可能性较大。此时高度较小的芯层在整个夹层结构中占较大的部分,夹层板弯曲刚度较低,结构容易失效破坏。因此,斜坡过渡

区域坡度角的设计是本文研究的重要内容。

### 3 坡度角对斜坡结构的影响

为分析坡度角  $\theta$  对斜坡区域强度和稳定性的影响,建立了坡度角分别为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$  以及  $40^\circ$  的有限元模型,计算在约束条件作用下的应力及稳定性,通过比较在不同角度下的斜坡区域力学性能,分析得出过渡区域的最佳坡度角。

#### 3.1 斜坡过渡角对斜坡强度的影响

根据斜坡过渡区域的静强度有限元计算结果,结构的薄弱区域出现在蒙皮与芯层结构的交界处,这与上节的理论分析相同。并且由于芯层中的剪应力主要由芯层结构承受,芯层结构在计算中先于蒙皮发生强度失效破坏,因此选取芯层强度作为结构强度的主要参考。图 3 为压缩载荷下芯层安全系数随坡度角变化的关系图。可以看出,随着坡度角  $\theta$  的增加芯层安全系数先增长后降低。

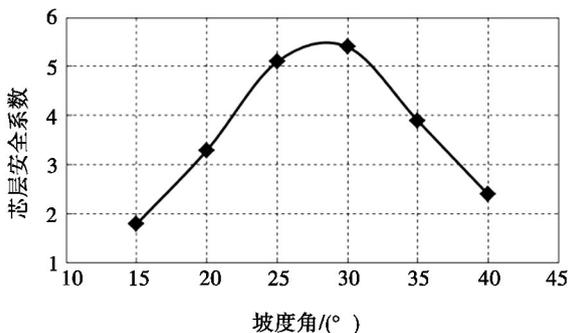


图 3 芯层安全系数随坡度角的变化

Fig. 3 Safety coefficient curve of different slope angle

斜坡强度的最优坡度角出现在  $25^\circ \sim 30^\circ$  处。当坡度角小于此值时,坡度角越小,结构整体刚度越小,载荷作用下的斜坡区域变形越大,芯层受力也越大。应力集中主要出现在斜坡的上下两端边缘处。当坡度角大于最优值时,随着坡度角的增加,斜坡向上面板传递的载荷变少,上面板受力逐渐减小,下面板承受主要载荷,芯层下端所受剪切载荷变大。斜坡下端边缘受面板的挤压作用愈加明显,应力集中主要出现在这部分区域。图 4 和图 5 中列举了  $15^\circ$  和  $40^\circ$  时蒙皮和芯层的结构受力情况。

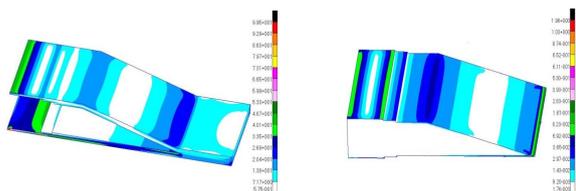


图 4 坡度角  $15^\circ$  结构应力云图

Fig. 4 Cloud picture of stress in slope angle  $15^\circ$

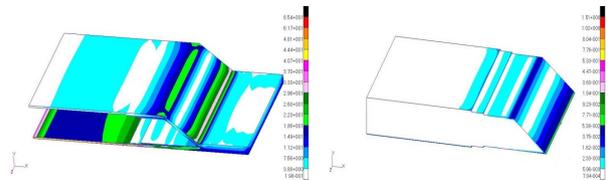


图 5 坡度角  $40^\circ$  结构应力云图

Fig. 5 Cloud picture of stress in slope angle  $40^\circ$

#### 3.2 斜坡过渡角对结构稳定性的影响

根据斜坡结构静强度有限元计算的结果,进一步采用 MSC. Nastran 的线性屈曲有限元数值计算方法 (SOL105) 分析结构的稳定性。图 6 为压缩载荷下一阶临界屈曲系数随坡度角变化的关系图。可以看出,随着坡度角  $\theta$  的增大,临界屈曲系数呈逐渐减小的趋势,起初变化较小,  $30^\circ$  之后急剧降低。

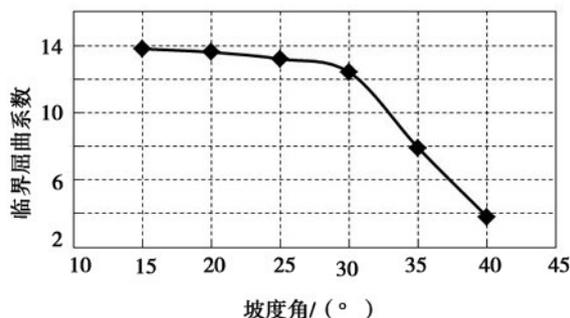


图 6 临界屈曲系数随坡度角的变化

Fig. 6 Critical buckling coefficient curve of different slope angle

从图 6 可以看出,随着坡度角的增大,斜坡结构的临界屈曲系数随之减小;坡度角从  $15^\circ$  增加到  $30^\circ$  时,临界屈曲系数仅增加了 10.14%;但坡度角再从  $30^\circ$  增加到  $40^\circ$ ,临界屈曲系数降低了 71.35%,结构的承载能力大幅降低。坡度角的减小意味着夹层厚度的减小,因此,可通过优化坡度角达到提高结构承载能力及减轻结构质量的双重目的。

### 4 结论

本文建立了泡沫夹层结构斜坡过渡区域的 3D 有限元模型,并考虑了面板的铺层递减,对其进行了压缩载荷作用下的强度和稳定性分析,并考察了坡度角对斜坡力学性能的影响,得到以下几点结论。

(1) 单轴压缩载荷下泡沫夹层结构斜坡过渡区域的破坏形式,多表现为与面板相接的芯层材料的破坏。

(2) 坡度角的大小存在最优值,小于或者大于此值,夹层结构斜坡区的结构强度都将有所降低。

(3) 坡度角的减小能够有限地增长斜坡结构的稳定性,当其小于一定值后,屈曲系数不再增长。

(4) 综合考虑斜坡区域的强度和稳定性的力学

性能,在单轴压缩载荷作用下泡沫夹层结构的最优坡度角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间,最优坡度角达到了提高结构承载能力及减轻结构质量的双重目的。

### 参考文献

[1] Vinson J R. Optimum design of composite honeycomb sandwich panels subjected to uniaxial compression[J]. AIAA journal, 1986, 24(10): 1690-1696

[2] Ley R P, Lin W, Mbanefo U. Facesheet wrinkling in sandwich structures[M]. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1999

[3] Kassapoglou C, Fantle S C, Chou J C. Wrinkling of composite sandwich structures under compression[J]. Journal of composites technology & research, 1995, 17(4): 308-316

[4] Hadi B K. Wrinkling of sandwich column: comparison between finite element analysis and analytical solutions[J]. Composite Structures, 2001, 53(4): 477-482

[5] Vadakke V, Carlsson L A. Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(6): 583-590

[6] Leotoing L, Drapier S, Vautrin A. Using new closed-form solutions to set up design rules and numerical investigations for global and local buckling of sandwich beams[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2004, 6(3): 263-289

[7] 贺尔铭, 张钊, 胡亚琪, 等. 单轴压缩载荷下夹层梁结构屈曲及皱曲模拟研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(5): 668-674

[8] 张铁亮, 丁运亮, 金海波. 基于有限元法的蜂窝夹层结构稳定性研究[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3): 184-190

[9] Paris I L, Hojjati M, Oceau M. Characterization of composites sandwich ramp failure under tensile loading[C]//Proceedings of the ICCM. 2012

[10] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006

[11] 卡萨波格罗著, 颜万亿译. 飞机复合材料结构设计与分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011

(编辑 任涛)

(上接第 44 页)

针对喷涂粉体填料的增强纤维,选用织物粉体填料面密度为 $3.43 \text{ g/m}^2$ 的改性纤维和空白增强纤维,参照 GB/T14344—2008《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》考察两种纤维织物力学性能。状态温度为 $(23 \pm 2) ^{\circ}\text{C}$ 、调节湿度为 $(50 \pm 5) \% \text{ RH}$ 、拉伸速率为 $50 \text{ mm/min}$ ,测试结果表明:没喷涂粉体填料的增强纤维织物断裂强力为 $429.322 \text{ N}$ ,改性后纤维织物断裂强力为 $385.504 \text{ N}$ ,喷涂有粉体填料的改性增强纤维织物相比于空白试样断裂强力出现下降。说明粉体填料经树脂包裹黏附在增强纤维表面,粉体填料的加入会对增强纤维束的物理性能产生影响。总体来说,粉体填料会对增强纤维的力学性能产生影响,使其断裂强力下降 $10\%$ 左右,但粉体填料改性后,改性增强纤维基本能满足力学性能技术指标,为复合材料实现多功能化提供有效的技术支撑。

### 3 结论

(1)由真空辅助 RTM 成型工艺技术原理,对比了粉体填料随树脂和增强纤维两种途径进入复合材料内的工艺途径,优化选择了粉体填料随增强纤维进入复合材料并改性复合材料这一工艺途径,并由此确定了配制粉体悬浮液喷涂增强纤维的工艺方法。

(2)确定了粉体填料的配方组分为:粉体填料(a)、分散剂 HT-8163、黏结剂树脂、溶剂乙酸乙酯,并确定了为使粉体填料能有更好的分散效果,分散剂与粉体填料的质量比为 $1:0.5$ ,超声分散 $5 \text{ h}$ 。

(3)采用喷枪利用悬浮液将粉体填料喷涂于增强纤维上,可以看出粉体填料能通过树脂较均匀的黏附与增强纤维表面,有利于随增强纤维改性复合材料。悬浮液中粉体填料含量与增强纤维粉体填料面密度之间呈正比例关系。改性后纤维断裂强力相比改性前下降 $10\%$ 左右,但仍能满足纤维复合材料的基本力学性能技术指标。

### 参考文献

[1] 李泊松,王继辉,邓京兰. 真空辅助 RTM 成型技术的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2001(1):17-18

[2] 梁志勇,段跃新,林云,等. 乙烯基酯树脂体系流变特性及 RTM 工艺窗口预报[J]. 材料工程,2001(8):36-39

[3] 盛永清. 航空树脂基复合材料技术发展[J]. 西安航空技术高等专科学校学报,2008,26(1):12-1

[4] 洪晓斌,谢凯,刁岩,等. 真空辅助成型(VARI)用低黏度环氧树脂研究进展[J]. 化工新型材料,2006,34(8):11-13

(编辑 李洪泉)