

蜂窝铝的材料性能模拟计算与实验研究

车建业 何立东* 俞 龙

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 基于 ANSYS 软件建立了蜂窝铝芯和蜂窝铝板的有限元模型, 模拟计算了薄壁蜂窝铝芯在深度、对边距不同时受共面载荷作用下的应力强度。利用壳单元计算了蜂窝铝芯的共面弹性模量, 模拟分析了同样大小的蜂窝铝板在蜂窝芯格尺寸不同情况下受共面相同载荷时的应力情况, 分析结果表明选择适当的蜂窝芯格大小和深度, 可以减小蜂窝芯格及蜂窝铝板所受的最大应力。分析结果有助于找到合适的蜂窝芯格尺寸以满足较大的强度要求。最后对蜂窝铝板进行了实验研究计算, 实验结果和 ANSYS 模拟数据基本吻合。

关键词: 蜂窝铝芯; 蜂窝铝板; 弹性模量; 应力

中图分类号: TH45

引 言

在离心压缩机中, 常见的是铝制梳齿迷宫密封。这种密封泄漏量大, 还容易产生密封气流激振而导致转子失稳, 不能适应大型离心压缩机向高参数方向的发展需求。但是由于石化行业离心压缩机处理的介质很多是易燃和易爆的, 如天然气离心压缩机、裂解气离心压缩机等^[1]。因此为了在离心压缩机上应用蜂窝密封技术并防止密封与转子摩擦产生火花, 就需要研究铝制蜂窝材料的力学性能。

关于蜂窝铝芯材料的静力学理论研究, 孙德强等^[2-3]推导了蜂窝铝芯共异面弹性模量理论计算公式, 并做了 ANSYS 模拟研究。常志德等^[4]对夹芯面内弹性模量进行了理论分析。Foo 等^[5]介绍了 Nomex 蜂窝的线弹性力学性能特性的大量测试结果。有文献^[6-10]用解析、有限元实验方法对蜂窝芯弹性模量等进行了模拟。但对于随蜂窝芯格深度、对边距变化蜂窝芯材料的性能、应力状况以及对蜂窝铝的应用性研究目前还未见报道。

本文利用有限元方法和实验方法对蜂窝样品的弹性模量进行计算。考虑不同深度不同边长的蜂窝铝芯, 在受相等载荷情况下的应力状况, 得到了随对

边距和深度变化蜂窝芯格的应力变化曲线, 最后对蜂窝铝芯进行了拉伸破坏实验研究。

1 蜂窝铝芯的特征单元

双壁厚蜂窝铝芯的结构^[2]如图 1 所示, 每个单元具有 4 个长 l 、厚 t 的孔壁和 2 个长 h 、厚 $2t$ 的孔壁, b 为深度, m 为对边距, 通常 $h = l$ 。xy 面内称为共面方向。

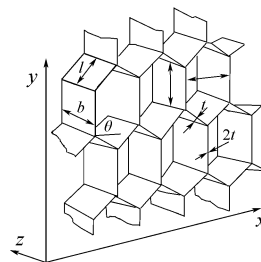


图 1 蜂窝铝芯结构示意图

Fig. 1 Diagram of the aluminum honeycomb structure diagram

为了简化计算, 根据蜂窝铝芯周期性的结构特点, 沿图 2 中虚线截取周期性特征单元来进行模拟计算, 该特征单元深度为 b , 长度 $L = 4(l \cos \theta + t)$, 高度 $H = 2(h + l \sin \theta)$ 。

2 单蜂窝芯结构的模拟计算

2.1 蜂窝铝芯载荷约束情况及弹性模量计算

表 1、表 2 为采用 ANSYS10.0 软件计算蜂窝铝芯单元弹性模量及最大应力时特征单元所受载荷和边界条件。网格划分采用 shell43 壳单元。 σ_x 、 σ_y 为

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家“863”计划(2007AA04Z422)

第一作者: 男, 1982 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: he63@263.net

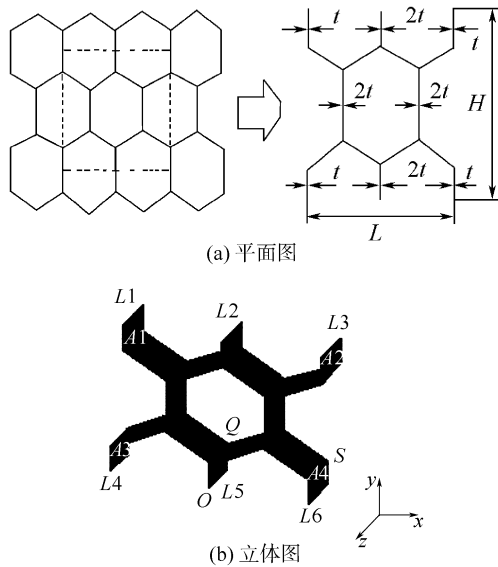


图 2 蜂窝铝的特征单元

Fig. 2 The characteristics unit of aluminum honeycomb

蜂窝芯格 x 方向和 y 方向所受最大应力。

求出表 2 受载情况下固定节点受力方向上的合力 $\sum F$, 按下式求出弹性模量 E ^[2]

$$E = H \times \sum F / (Lb \times 0.001)$$

某厂商提供的蜂窝铝板样品尺寸参数如表 3, 每组试样进行了 2 次实验。模拟结果分别为 0.544 和 0.302 MPa。

表 1 求解蜂窝铝的最大应力 σ_x 所施加的边界条件

Table 1 The boundary conditions to solve maximum stress of aluminum honeycomb

施加约束的边界	约束施加情况
面 A_2, A_4	x 方向上位移为 0
面 A_1, A_3	x 方向上位移为 0.0001
关键点 S	所有自由度上的位移为 0

表 2 求解蜂窝铝的弹性模量 E 及最大应力 σ_y 所施加的边界条件

Table 2 Boundary conditions to solve the maximum stress and elastic modulus of the aluminum honeycomb

施加约束的边界	约束施加情况
线 L_1, L_2, L_3	y 方向上位移为 -0.0001
线 L_4, L_5, L_6	y 方向上位移为 0
线 L_5	x 方向上位移为 0
关键点 O	所有自由度上的位移为 0
面 A_1, A_2, A_3, A_4	各面上节点 x 方向上位移耦合

表 3 求蜂窝铝弹性模量 E 的蜂窝芯结构参数Table 3 Structure parameters needed to calculate the elastic modulus E of the aluminum honeycomb

试样	l/mm	h/mm	t/mm	$\theta/(\circ)$	b/mm
1	2	2	0.05	30	13
2	3	3	0.05	30	13

2.2 单蜂窝铝芯格尺寸变化时蜂窝芯格所受最大应力变化的模拟计算

蜂窝铝芯格约束如表 1、表 2 所示, 蜂窝芯格大小按其六边形对边距不同分为 4.2, 3.2, 1.6, 0.8 mm 4 种情况, 蜂窝芯格深度 b 分为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm 4 种情况, 对边距变化模拟结果如图 3, 蜂窝芯格深度变化模拟结果图 4。

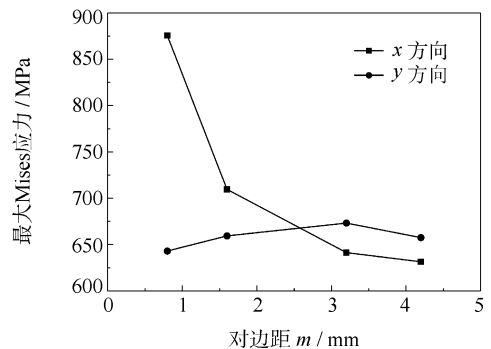
图 3 随对边距 m 变化蜂窝芯格最大应力变化情况

Fig. 3 Variation of the maximum stress of the honeycomb core vary with subtense distance

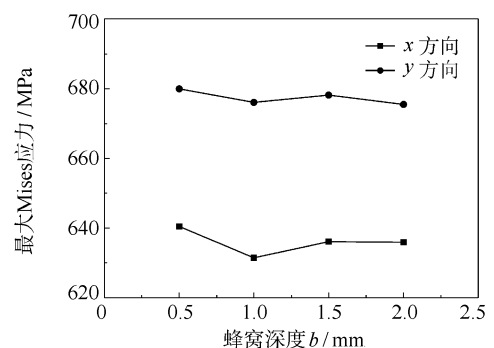
图 4 随深度 b 变化蜂窝芯格最大应力变化情况

Fig. 4 The maximum stress of honeycomb core vary with honeycomb core size

由上述的模拟结果图 3 和图 4 可以看出:

(1) 在 x 方向上, 蜂窝芯格对边距增大, 芯格所受最大应力逐渐变小, 但变小的趋势逐渐放缓。蜂窝深度变大, 芯格所受最大应力变化不大。

(2) 在 y 方向上, 蜂窝芯格对边距与深度的变

化都对蜂窝芯格最大应力影响不大。

(3)当蜂窝芯格较小时, y 向应力小于 x 向应力,当蜂窝芯格较大时,则 y 向应力略大于 x 向应力。

(4)当蜂窝深度由小变大时, y 向最大应力总是大于 x 向最大应力。

从以上的分析可以看出,适当的选择蜂窝芯格大小和深度,可以减小蜂窝芯所受的最大应力,降低蜂窝芯强度破坏的可能性。所以分析结果有益于蜂窝芯结构尺寸的优化设计。

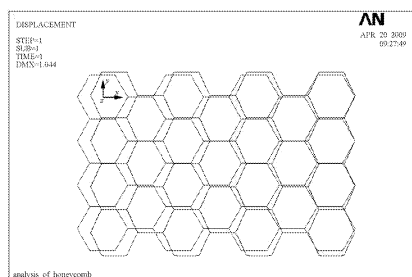
2.3 大小相同的整块蜂窝铝板的模拟计算

为了更准确的模拟蜂窝铝板在受同等大小的位移载荷时的应力情况,模拟了蜂窝芯格大小不同但蜂窝铝板总面积相同的 4 块铝蜂窝板。结果如表 4,其中一块蜂窝铝板的变形和应力分别如图 5(a)、(b)所示。

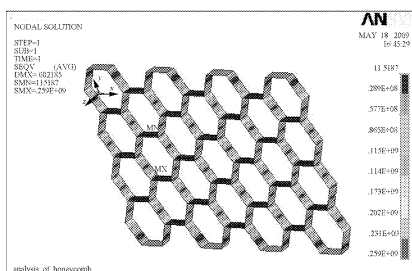
表 4 随芯格对边距变化蜂窝铝板所受最大应力变化情况

Fig.4 Variation of the maximum stress of the honeycomb panel vary with subtense distance

对边距/mm	最大应力/MPa	对边距/mm	最大应力/MPa
4.2	259	1.6	470
3.2	343	0.8	601



(a) 变形情况



(b) 应力情况

图 5 对边距 4.2 mm 的蜂窝铝板 y 向受载时变形、应力情况

Fig.5 Stress and defourmation of honeycomb panels with a subtense distance of 4.2 mm when the honeycomb core is subjected to a y direction load

由上述分析计算结果可看出,在受同样大小的位移载荷时,随着蜂窝芯格尺寸变小,蜂窝铝板所受的最大应力明显增大,也就是说蜂窝芯格越小,蜂窝铝板的抗变形能力越强。所以为了增大蜂窝铝板的强度应减小蜂窝芯格尺寸,但这样会增大制造成本。在实际选择时应在保证蜂窝板不破坏的基础上综合考虑选择合适的蜂窝。

3 蜂窝铝板材料性能实验研究

3.1 试验试样及实验装置

本试验的试样从北京强幕工贸有限责任公司购买,蜂窝铝板长宽高为:150 mm×32 mm×13 mm,蜂窝芯格边长为 2 mm 和 3 mm 两种,详细蜂窝芯格尺寸如表 4 所示。实验装置采用承德金建检测仪器有限公司生产的 XWW-20A 型万能材料试验机。

3.2 蜂窝铝板拉伸实验

共试验了两组蜂窝芯格大小不同的试件,在夹具上夹好试件后,采用位移控制在蜂窝板 y 方向缓慢加载直至蜂窝板断裂。蜂窝的装卡和拉伸过程如图 6 所示。

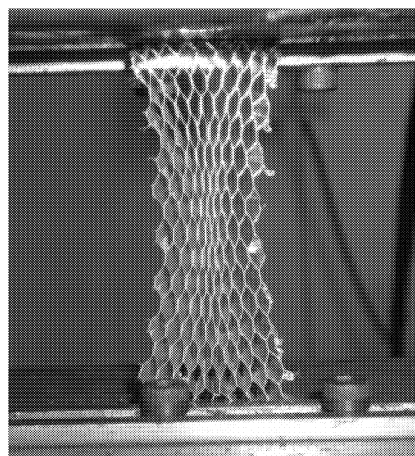


图 6 蜂窝铝板拉伸实验过程

Fig.6 The tensile text process of aluminum honeycomb panel

实验完成后,芯格边长为 2 mm 和 3 mm 的蜂窝铝板的一组位移力曲线如图 7 所示。

由图 7 可看出,芯格边长小的蜂窝铝板的弹性模量大于芯格边长大的蜂窝铝板的弹性模量(见表 4 中的实验结果),即当两块蜂窝铝板变形相同时,芯格边长 2 mm 的蜂窝铝板受力更大,约为 3 mm 板的 2 倍,这与表 4 中的有限元模拟结果相吻合。

模拟结果与实验数据平均值对比如表 5,比较发现计算结果与实验数据基本吻合,说明有限元方

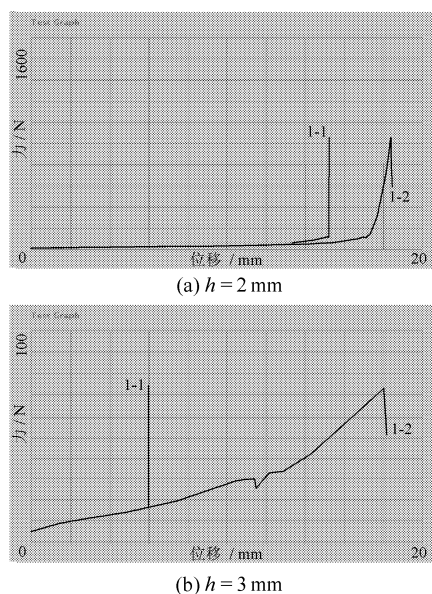


图 7 不同蜂窝芯格边长的蜂窝板拉伸位移力图

Fig.7 The displacement-force shape of honeycomb panel with different honeycomb core

法模拟蜂窝的正确性。

表 5 两种试样弹性模量有限元法与实验所得结果比较

Table 5 Comparison of the elastic modulus given by the finite element method with the and experimental value for two different samples

弹性模量 E/MPa	有限元法	实验结果平均值
试样一	0.544	0.428
试样二	0.302	0.259

4 结论

本文研究薄壁蜂窝铝芯和蜂窝铝板受共面载荷时的拉伸变形,利用 ANSYS 软件模拟了蜂窝铝芯的弹性模量并与实验进行了对比。得到了在受同样大小的载荷时,蜂窝铝芯最大应力随边长、对边距变化而变化的曲线。对有限元法模拟分析蜂窝铝材料性能的可靠性提供了一定的依据。分析结果有益于蜂窝铝的优化设计,有助于找到合适的蜂窝芯格尺寸以满足较大的强度要求。

参考文献:

[1] 杨宝亮,郝木明,莫少明,等. 非接触式机械密封在离心压缩机上的应用[J]. 流体机械, 2006, 34(7): 47-50.
Yang B L, Hao M M, Mo S M. Application of non-contacting mechanical face seal on centrifugal compressor[J].

Fluid Machinery, 2006, 34(7): 47-50. (in Chinese)

- [2] 孙德强,张卫红,孙玉谨. 蜂窝铝芯的弹性模量和材料效率分析[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 35-40.
Sun D Q, Zhang W H, Sun Y J. Elastic moduli and material efficiency of aluminum honeycomb cores[J]. Mechanics and Practice, 2008, 30(1): 35-40. (in Chinese)
- [3] 孙德强,张卫红. 双壁厚蜂窝铝芯的共面冲击力学性能[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 69-74.
Sun D Q, Zhang W H. Coplanar impact mechanical properties of double thickness aluminum honeycomb[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 69-74. (in Chinese)
- [4] 常志德,赵才其. 蜂窝板夹芯面内弹性模量的理论分析[J]. 江苏建筑, 2006(5): 29-31.
Chang Z D, Zhao C Q. The theoretical analysis of the equivalent Young's modulus of honeycomb core[J]. Jiang-Su Architecture, 2006(5): 29-31. (in Chinese)
- [5] Foo C C, Chai G B, Seah L K. Mechanical properties of nomex material and nomex honeycomb structure [J]. Composite Structures, 2006,19(3):177-183.
- [6] 赵剑,谢宗蕪,安学峰,等. 蜂窝芯材料面外等效弹性模量预测与分析[J]. 航空材料学报, 2008(4): 94-100.
Zhao J, Xie Z H, An X F, et al. Prediction and analysis of equivalent out-of-plane modulus of honeycomb core materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008 (4): 94-100. (in Chinese)
- [7] 孙士平,张卫红,邱克鹏,等. 蜂窝夹芯圆环的拓扑优化设计及尺度效应研究[J]. 力学学报, 2007, 39(6): 788-795.
Sun S P, Zhang W H, Qiu K P, et al. Integrated topology optimization and scale effect anylisis of cyclic symmetry sandwich structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007,39(6): 788-795. (in Chinese)
- [8] 刘强,黄争鸣. 考虑面层约束时蜂窝芯弹性常数的确定[J]. 力学季刊, 2009, 30(2): 229-234.
Liu Q, Huang Z M. Elastic modulus determination of honeycomb material considering skin effect[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2009, 30(2): 229-234. (in Chinese)
- [9] 泮世东,吴林志,孙雨果. 蜂窝夹芯试件破坏行为分析[J]. 力学学报, 2007, 39(5): 610-617.
Pan S D, Wu L Z, Sun Y G. Analysis of fracture behavior of honeycomb sandwich specimens[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007,39(5): 610-617. (in Chinese)

- [10] 梁森,陈花玲,陈天宁,等. 蜂窝夹芯结构面内等效弹性参数的分析研究[J]. 航空材料学报,2004,24(3):26 – 31.

Liang S, Chen H L, Chen T N, et al. Analytical study

of the equivalent elastic parameters for a honeycomb core [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004,24(3):26 – 31. (in Chinese)

Simulation and experimental study of the material properties of an aluminum honeycomb

CHE JianYe HE LiDong YU Long

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Finite element models of an aluminum honeycomb core and an aluminum honeycomb board have been set up based on ANSYS. The stress on a thin-walled aluminum honeycomb core was simulated for different depths and subtense distances. In using the shell element model to calculate the in-plane elastic modulus of the honeycomb core, aluminum honeycomb panels of the same-size suffer the same in-plane loads. The stress analysis of honeycomb panels with different cell sizes of the honeycomb cores was carried out. The results showed that the maximum stress of the honeycomb core and honeycomb board could be reduced if appropriate honeycomb core cell size and depth were selected. The results help to identify a suitable cell size for the honeycomb core to meet the needs for greater strength. Finally, an experimental study of the honeycomb panels provided by different manufacturers was carried out and the experimental data were consistent with the results of the ANSYS simulations.

Key words: aluminum honeycomb core; aluminum honeycomb board; elastic moduli; stresses