

[文章编号] 1003-4684(2020)01-0010-04

两种新型蜂窝结构的承载性能对比

游 颖, 张泽涛, 郭 琪

(湖北工业大学机械与工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 蜂窝结构有精巧、适用及节省材料等优点,其轴向承载力是一个非常重要的力学性能。以某型号电动车底盘部的甲板为例,研究菱形和圆形组合、三角形和六边形组合的新型蜂窝结构力学性能,对比其结构稳定性、轴方向的强度和刚度;基于 Ansys workbench,通过改变壁厚,优化夹芯层整体的强度和刚度。结果表明,三角形和六边形组合蜂窝在轴向结构稳定性、整体的强度和刚度方面都要优于菱形和圆形组合的蜂窝结构。

[关键词] 组合蜂窝; 轴向承载力; 力学性能; 有限元分析

[中图分类号] TH122 [文献标识码] A

蜂窝结构一般由上下面板和中间夹着比较厚的夹芯层组合而成,因其比强度高,比刚度大,而且具有耐高温、质量轻、隔音等优异的性能,在汽车、航空航天、造船、航海等领域得到广泛应用^[1]。杨志韬等研究复合材料蜂窝结构具有较好的力学性能^[2],李响等研究类蜂窝结构时发现其具有较强的能量吸收能力^[3-4]。传统的蜂窝结构夹芯结构形式有三角形、圆柱形、四边形和六边形等,其材质可以是玻璃纤维、金属材料或复合材料,最常用的金属材料是铝合金。然而不同的蜂窝结构所表现出的性能有所不同,如矩形蜂窝结构的散热性能最好,而六边形蜂窝结构的承载力最好^[5]。组合型蜂窝是由两种单一蜂窝结构组合而成,分别是由圆形、三角形、六边形等规则排列合成。相比常见的圆形、六边形、蜂窝结构,菱形和圆形组合蜂窝不仅具有良好的整体刚度和强度,而且轴向承载力强^[6]。以某种型号电动车底盘部甲板为研究对象,提出两种新型组合(圆形和菱形组合、三角形和六边形组合)蜂窝结构,分别对其稳定性、强度和刚度进行分析。

1 蜂窝夹层结构的设计

本文利用三维软件对这几种组合型蜂窝结构的夹芯层建立几何模型。在进行建模时应遵循以下原则^[7]:1)所有圆形、三角形、六边形通过规则排列形成蜂窝夹芯;2)这三种蜂窝结构的长、宽、高都相等,也就是说,相同尺寸的夹芯结构所包含的胞元数目

相同;3)所形成的蜂窝夹芯结构的壁厚处处相等。

模型尺寸为 900 mm×450 mm×50 mm,壁厚均为 7 mm(图 1),菱形和圆形组合的 3D 模型中每个圆柱的截面积均相等,使每个菱形的边长相同;三角形和六边形组合的三维模型(图 2)中的三角形均为等边三角形,其中六边形均为正六边形。创建两种结构三维模型,去掉蜂窝结构上下面板,研究该夹芯结构的轴向承载力性能。

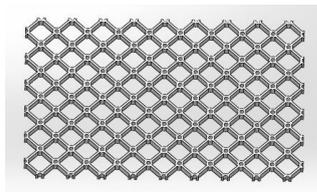


图 1 菱形和圆形组合

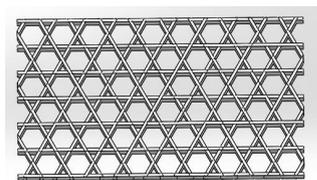


图 2 三角形和六边形组合

2 两种新型蜂窝的结构稳定性分析

目前,国内外对蜂窝结构轴向力方面的研究相对较少^[8],而实践证明,蜂窝结构的夹芯层坍塌是结构损坏的关键因素之一,由于过大的压力导致夹芯层结构的稳定性失衡。本文通过运用 ANSYS 分析

[收稿日期] 2019-05-27

[第一作者] 湖北工业大学博士基金项目(BSQD12007);武汉大学水射流省级重点实验室项目(20141155)

[第一作者] 游 颖(1969-),女,湖北赤壁人,湖北工业大学副教授,研究方向为机械设计及数字化制造

[通信作者] 张泽涛(1993-),男,陕西渭南人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为机械设计

这两种胞元结构的稳定性。

由于蜂窝结构胞元壁厚尺寸较小,可视为小位移的线弹性范畴,故分析中不考虑受载变形过程中结构构形的变化,以线性屈曲来讨论分析结构的稳定性。Midas 的线性屈曲分析可计算板结构的临界荷载系数。

结构的静力平衡方程为

$$[K]\{U\} + [K_G]\{U\} = \{P\} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 表示结构的弹性刚度矩阵; $[K_G]$ 表示结构的几何刚度矩阵; $\{U\}$ 表示结构的位移; $\{P\}$ 表示作用在结构上的载荷。

由于结构的几何刚度矩阵由各单元的几何刚度矩阵构成,因此各单元的几何刚度矩阵与结构的内力相关,即

$$[K_G] = \sum [k_G] \quad [k_G] = F[\bar{k}_G]$$

式中: $[\bar{k}_G]$ 表示结构的几何刚度矩阵; F 表示内力。

故几何刚度矩阵可用临界荷载系数与使用初始荷载的几何刚度矩阵表示,即

$$[K_G] = \alpha[\bar{K}_G]$$

式中: α 表示临界荷载系数; $[\bar{K}_G]$ 表示失稳分析所用的初始载荷计算的几何刚度矩阵。

$$[K + \lambda K_G]\{u\} = \{p\} \quad [K_{eq}] = [K + \lambda K_G]$$

上述平衡方程失稳的条件是等效刚度矩阵的行列式的值为零。

非稳定状态 $|[K_{eq}]| < 0 (\lambda < \lambda_{cr})$

失稳状态 $|[K_{eq}]| = 0 (\lambda = \lambda_{cr})$

稳定状态 $|[K_{eq}]| > 0 (\lambda > \lambda_{cr})$

由此可得 $|K + \lambda_i [K_G]| = 0$

式中, λ_i 表示特征值,即临界荷载系数。 λ_i 的值即为临界荷载系数。

根据上式可知,只要求得两种胞元结构的特征值,然后比较特征值的大小,特征值越大,结构就越稳定。

三角形和六边形组合的结构,其胞元是由单个正六边形组成(图 3);圆形和菱形组合的结构,其胞元是由半圆形和菱形组成(图 4)。由于两种结构的长和宽相同,因此不同结构的胞元横截面积也相差不多,故在做屈曲分析时取相同的载荷,经测量得到两种结构的横截面积分别为 19.59 cm^2 和 20.56 cm^2 。

对两种新型蜂窝线性特征值屈曲的分析,采用 ANSYS workbench 进行数值模拟。首先对两种组合蜂窝的胞元进行建模,取轴向长度均为 30 cm ,材料均采用铝合金 2024,密度为 2770 kg/m^3 ,弹性模量为 77 GPa ,泊松比为 0.33 ;令特征值的阶数量为

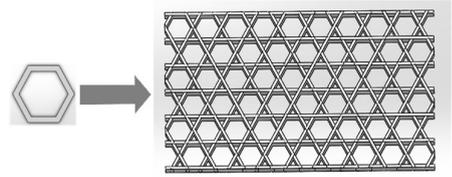


图 3 三角形和六边形组合的胞元结构

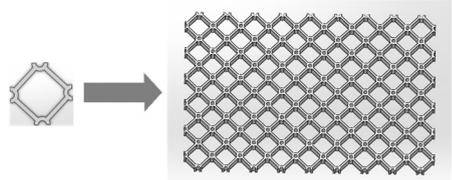


图 4 圆形和菱形组合的胞元结构

10 阶,以便比较不同特征值下各胞元结构的变形情况;网格的划分均相同,采用六面体网格,网格尺寸均为 5 mm ;其中一面为固定约束,边界采用无摩擦固定约束;载荷类型均为 Pressure,大小为 50 MPa 。为了对两种胞元结构的特征值进行更加直观的比较分析,分别把分析得出的 10 阶特征值进行汇总(表 1)。

表 1 两种胞元结构的特征值

不同组合阶数	菱形和圆形组合的特征值	三角形和六边形组合的特征值
1	77.60	178.89
2	103.87	210.75
3	103.96	210.97
4	104.29	211.27
5	105.15	211.38
6	113.56	211.57
7	115.01	212.13
8	115.09	231.69
9	115.12	231.36
10	116.26	232.29

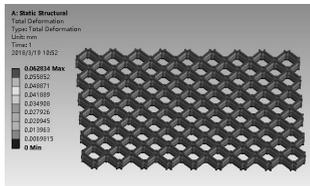
对比表 1 中两种胞元结构的特征值可知,在材料、网格划分、约束、载荷和其他条件都相同的情况下,三角形和六边形组合的特征值较大,菱形和圆形组合的特征值相对较小,而发生屈曲的临界载荷为第一阶模态的特征值与初始载荷的乘积,由于两种结构的初始载荷相同,其值越大,发生屈曲的临界载荷越大。因此,三角形和六边形组合的结构稳定性优于菱形和圆形组合的结构。

3 轴向载荷作用下两种新型蜂窝结构的强度与刚度

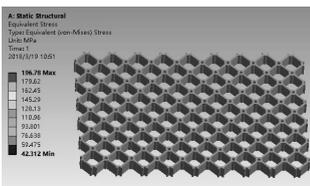
圆形和菱形组合的新型蜂窝的夹芯结构与传统的单一型蜂窝的夹芯结构进行轴向承载性能对比结果表明,新型蜂窝夹芯结构的承载性能优于传统型^[6]。本文主要对比该新型蜂窝与三角形和六边形

组合的新型蜂窝的轴向承载性能。

首先,分别将三维模型导入到 ANSYS 中,定义其材料属性等其他条件均相同,抗拉强度为 390 MPa,网格划分方式也完全相同,其中一面均为固定约束,边界采用无摩擦固定约束,而在另一面施加 100 MPa 的压力。最后进行有限元仿真,得到夹芯层的应力和位移分析结果如图 5、6 所示。

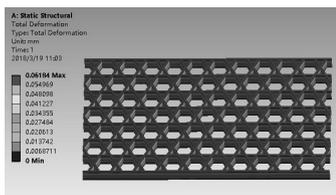


(a) 应力云图

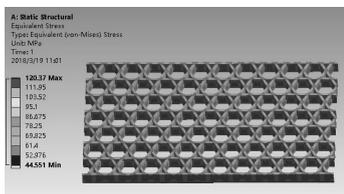


(b) 位移云图

图 5 圆形与菱形组合有限元分析结果



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图 6 三角形与六边形组合有限元分析结果

从图 5、图 6 可以看出,圆形与菱形组合的新型蜂窝,其最大应力为 196.78 MPa,最大位移为 0.063 mm;三角形和六边形组合的新型蜂窝的最大应力为 120.37 MPa,最大位移为 0.062 mm。由此可见,当壁厚为 7 mm 时,圆形与菱形组合的结构应力较大,三角形和六边形组合的应力较小。因此,三角形和六边形组合的新型蜂窝在整体刚度和强度上均优于圆形与菱形组合的蜂窝。

为进一步研究对比两种结构的轴向承载性,引入轴向弹性模量,弹性模量的大小可作为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,弹性模量越大,对应材料发生弹性变形所需要的应力越大,相反,弹性模量越小。在相同的应力作用下产生的变形量越小,反映材料抵抗弹性变形能力的指标,是衡量轴向承载力的重要参数。

由公式 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ 可知,因为两种结构的截面大小基本相同,当施加相同载荷时,对应的应力也相同,即 $\sigma_1 = \sigma_2$;而 ϵ 为线应变,即位移变化与厚度的比值。由于初始厚度相同,故由分析结果可知,三角形和六边形组合的结构位移变化较小,即 ϵ 越小, E 越大,进一步说明三角形和六边形组合的蜂窝结构优于菱形和圆形组合。

4 两种新型结构在不同壁厚下强度和刚度的变化

因为壁厚对整体结构等效弹性系数的影响最大^[9],所以在改变壁厚时,使整体的尺寸不发生变化,这显然保证了单一结构的数量也维持不变,分析壁厚与整体刚度与强度之间的关系时更加准确。同样在 ANSYS 中的材料设置、受力、边界载荷以及其他条件都相同,然后分别取壁厚为 4、5、6、7 mm,对其进行有限元仿真分析,得到不同壁厚的结构的最大的应力和位移值见表 2。

表 2 不同壁厚结构的最大应力和最大位移

壁厚/mm	圆形和菱形		三角形和六边形	
	最大应力/MPa	最大位移/mm	最大应力/MPa	最大位移/mm
4	197.28	0.085	206.64	0.079
5	201.22	0.071	197.05	0.069
6	185.36	0.061	115.29	0.058
7	196.78	0.063	120.37	0.062

壁厚在 4~5 mm 时两种结构的应力相差不大,都小于 390 MPa,但在位移变化方面,菱形和圆形组合大于三角形和六边形组合;当壁厚在 6~7 mm 时,不论是应力方面还是位移变化方面,圆形和菱形组合都要大于三角形和六边形组合。综上所述,在

不同壁厚的条件下,三角形和六边形组合的蜂窝结构在刚度和强度方面都要优于菱形和圆形组合的蜂窝结构。

5 结论

围绕两种新型组合蜂窝结构的稳定性、整体刚度和强度几个方面来研究对比其轴向承载性能,实验结果均满足强度要求。通过分析可知,不同结构所表现的稳定性有所差异,不同壁厚下的强度和刚度不同,三角形和六边形组合的蜂窝结构各方面性能均优于菱形和圆形组合的蜂窝结构。

1)稳定性方面,三角形和六边形组合结构稳定;刚度和强度方面,三角形和六边形组合结构具有更好的刚度和强度,并且在不同壁厚下亦是如此。

2)在相同材料和相同尺寸的蜂窝结构中,三角形和六边形组合的蜂窝结构在其稳定性、刚度和强度方面优于圆形和菱形组合的蜂窝结构。

3)若需要承载一定荷载的蜂窝结构而对尺寸没有特别要求时,选择尺寸较小的三角形和六边形组合的蜂窝结构,可达到对结构进行轻量化设计的目的。

[参 考 文 献]

[1] 王博,王斌,程耿东.Kagome 蜂窝夹层平板的多功能优

化设计[J].复合材料学报,2007(03):109-115.

[2] 杨志韬,于国财,刘鑫,等.多级复合材料蜂窝结构的力学性能[J].复合材料学报,2019,36(09):2110-2118.

[3] 李响,周幼辉,童冠.类蜂窝结构的内面冲击特性研究[J].西安交通大学学报,2017,51(03):80-86,110.

[4] 何强,马大为,张震东.含随机填充孔圆形蜂窝结构的内面冲击性能[J].爆炸与冲击,2015,35(03):401-408.

[5] Joo J H, Kang K J, Kim T, et al. Forced convective heat transfer in all metallic wire-woven bulk Kagome sandwich panels [J]. International Journal Of Heat And Mass Transfer, 2011, 54(25-26):5658-5662.

[6] 何彬,李响.一种新型组合蜂窝的抗冲击性能研究[J].机械设计与制造,2015(06):49-51,54.

[7] 何彬,李响.一种新型组合蜂窝结构的轴向承载性能研究[J].机械强度,2016,38(02):328-332.

[8] Li X, You M. Mechanical property analysis and numerical simulation of honeycomb sandwich structure's core [J]. Advanced Materials Research, 2013, 631-632:518-523.

[9] Li X, Li G, Wang C H, et al. Optimum design of composite sandwich structures subjected to combined torsion and bending loads [J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3-4):315-331.

Comparison of Load-bearing Performance of Two New Honeycomb Structures

YOU Ying, ZHANG Zetao, GUO Qi

(School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Honeycomb structure has been widely used for its advantages of delicate structure, applicability and saving materials. The axial bearing capacity of the honeycomb structure is a very important mechanical property. Taking the deck of the chassis part of an electric vehicle with a certain model as an example, the mechanical properties of the novel honeycomb structure with diamond and round combination, triangular and hexagonal combination are studied, and the structural stability and the strength and rigidity of the shaft direction are compared. Based on the Ansys workbench, the strength and rigidity of the whole sandwich layer are optimized by changing the wall thickness. The results show that the triangular and hexagonal combined honeycomb is superior to the honeycomb structure of the diamond and the round combination in terms of the stability of the axial structure, the strength and the rigidity of the whole.

Keywords: combined honeycomb; axial bearing capacity; mechanical properties; finite element analysis

[责任编辑:张 众]