

# 蜂窝胞壁厚度与边长对等效模型计算精度的影响

康洪军<sup>1</sup>,江兰馨<sup>2</sup>,王明猛<sup>2</sup>

(1. 中车唐山机车车辆有限公司 产品研发中心,河北 唐山 063000;  
2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**为提高铝蜂窝夹层板仿真计算精度,研究了正六边形蜂窝胞壁厚度与胞体边长的比值 $\lambda$ 对其理论等效模型的影响。对正六边形铝蜂窝夹层板的简化板模型进行研究,包括Reissner理论模型、蜂窝板理论模型和层合板低阶剪切理论模型。对理论模型与精细化模型在自由边界下的模态频率进行误差分析,结果表明:蜂窝芯层均质化后的夹层板等效模型计算精度最高;Reissner理论等效模型与蜂窝板理论等效模型计算精度随着 $\lambda$ 的增加而增大;层合板低阶剪切理论模型各阶模态频率随 $\lambda$ 的增大基本保持不变。

**关键词:**蜂窝夹层板;等效模型;模态计算;计算精度

**中图分类号:**U270.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0061-05

## Influence of Cell Wall Thickness and Side Length on Calculation of Honeycomb Equivalent Model

KANG Hongjun<sup>1</sup>,JIANG Lanxin<sup>2</sup>,WANG Mingmeng<sup>2</sup>

(1. CRRC Tangshan Rolling Stock Co. Ltd., Product Research Center, Tangshan 063000, China;  
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To reduce the numerical calculation error of aluminum honeycomb sandwich plates in engineering applications, the influence of the cell wall thickness to side length ratio on calculation of the honeycomb sandwich plate equivalent model is studied. This paper makes a study of the simplified plate equivalent model of the honeycomb plates, including Reissner theory model; honeycomb plate theory model and laminar plate low-order shear theory model. Under the free boundary, the error analysis of the modal frequencies of the theoretical model and the refined model is carried out. The results show that the calculation error of the core-homogenization equivalent model is the lowest; the calculation error of the Reissner theory and the honeycomb plate theory reduces with the growth of  $\lambda$ ; The order frequency of the low-order shear theory model of the laminate plate remains steady with the growth of  $\lambda$ .

**Keywords:** honeycomb sandwich plate; equivalent model; modal calculation; calculation error

## 0 引言

近年来,随着车辆轻量化技术的发展,铝蜂窝板结构以其特轻的质量、良好的强度与刚度以及降噪等特性在国外轨道车辆尤其是高速列车(如磁浮列车)上开始得到应用,并显示出广阔前景,在国内也受到了较大的关注。

铝蜂窝夹层板结构多样,可通过设计其面板厚度、芯层高度、蜂窝胞壁厚度和蜂窝胞体边长等参数并进行实验以提高其力学性能。当前的工程软件如ANSYS、NASTRAN中没有专门的蜂窝结构单元,若使用蜂窝的精确模型仿真车体,则工作量和计算量过大。所以,在进行铝蜂窝车体仿真计算时只能采用三维实体模型或等效板模型<sup>[1]</sup>。其中三维实体模型计算精度较高,但是计算量大;等效板模型计算量小,应用更为广泛。当前蜂窝夹层板的等效板模型有Reissner理论模型<sup>[2-3]</sup>、蜂窝板理论模型和

层合板低阶剪切理论模型。分析以上等效理论可发现,正六面体蜂窝结构的胞壁厚度与边长的比值对等效模量、等效密度和等效泊松比均有影响。以上理论研究并没有考虑蜂窝胞壁厚度与边长比值对不同等效板模型计算精度的影响,但在实际应用中胞壁厚度与边长之比对等效板模型计算精度的影响规律是不一致的。研究蜂窝夹层板长厚比对等效板模型计算精度的影响规律,对于含蜂窝夹层板用于车体计算时等效模型的选择方面有着重要的影响。

本文首先归纳了芯层均匀壁厚正六边形铝蜂窝夹层板的等效板模型,包括Reissner理论模型、蜂窝板理论模型和层合板低阶剪切理论模型;然后针对自由边界下的不同胞壁厚度的蜂窝夹层板,将等效板模型的模态分析结果与精细化模型进行对比,分析胞壁厚度与边长之比对模态频率计算精度的影响;最后,总结了胞壁厚度与边长之比对等效板模型动力学计算精度的影响规律,为含蜂窝夹层板构件的计算提供参考。

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200506)

**第一作者简介:**康洪军(1965—),男,河北故城人,教授级高工,工程硕士,研究方向为轨道车辆系统集成及总体技术。

## 1 正六边形铝蜂窝夹层板的等效模型

在铝蜂窝夹层板结构中,蜂窝与面板之间胶层厚度小、质量轻且不是主要承载件,故在进行蜂窝精确建模时忽略胶层的影响。本文主要研究芯层均匀壁厚的正六边形铝蜂窝夹层板的简化板模型。图1为蜂窝夹层板的几何参数; $h_t$ 为上、下面板厚度; $h_c$ 为芯层厚度; $H$ 为总厚度; $t$ 为蜂窝胞壁厚度; $l$ 为蜂窝胞体边长。

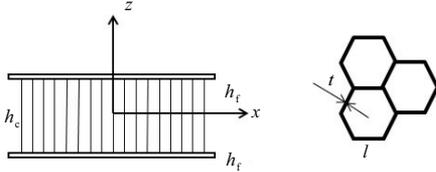


图1 蜂窝夹层板简易模型

本文研究铝蜂窝胞壁厚度与边长之比对蜂窝夹层板等效模型计算精度的影响时,保持蜂窝胞体边长不变,通过改变胞壁厚度来探究两者之比对等效模型计算精度的影响。胞壁厚度与边长之比为 $\lambda = t/l$ 。图2为蜂窝夹层板的精细化有限元模型。

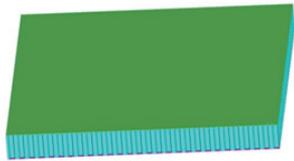


图2 蜂窝夹层板精细化有限元模型

蜂窝夹层板中,面板和蜂窝芯材均采用牌号为6A02的铝材。材料6A02常规力学性能参数如表1所示,蜂窝夹层板仿真结构组合类型如表2所示。

表1 材料6A02常规力学性能参数

弹性模量/ MPa	密度 $\rho$ / ( $t/mm^3$ )	泊松比 $\mu$	屈服强度 $\sigma_s/MPa$
$7.2 \times 10^4$	2.7	0.30~0.34	194

表2 蜂窝夹层板结构参数仿真组合类型 单位: mm

部件	定值	变量 $t$ 取值
芯材	$h_c = 48.5, l = 6$	0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35
面板	$h_t = 1$	—

### 1.1 芯材均质化

芯层均质化是将精细化模型的蜂窝芯层等效为等厚度实体芯层。假设芯层结构极软,仅仅能够抵抗横向切应力,忽略其弯曲刚度和面内刚度;因其上、下面板极薄,假设上、下面板服从 Kirchhoff 假设,只能承受面内应力,忽略其抵抗横向切应力的能力<sup>[4]</sup>。根据 Gibson 提出的胞元材料理论,在进行分析时将其简化为线弹性 Bernoulli-Euler 梁,则可将蜂窝芯层等效为正交各向异性的均质化

材料,材料参数计算公式如下:

$$\begin{cases} E_{cs} = E_{cy} = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s \left( \frac{t}{l} \right)^3, E_{cz} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} E_s \\ G_{cax} = G_{cyz} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{t}{l} G_s, G_{cxy} = \frac{\sqrt{3}}{3} E_s \left( \frac{t}{l} \right)^3 \\ \mu_{cax} = \mu_{cyz} = \frac{E_{cx}}{E_{cy}} = \mu_s, \mu_{cxy} = 1, \rho_c = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{t}{l} \rho_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_s$ 、 $G_s$ 、 $\mu_s$ 、 $\rho_s$  分别为蜂窝芯层结构材料的弹性模量、切变模量、泊松比和密度; $E_{cx}$ 、 $E_{cy}$ 、 $E_{cz}$  分别为蜂窝芯层均质化后等效的3个主方向的弹性模量; $G_{cxy}$ 、 $G_{cax}$ 、 $G_{cyz}$  为蜂窝芯层均质化后等效的面内切变模量; $\mu_{cxy}$ 、 $\mu_{cax}$ 、 $\mu_{cyz}$  为蜂窝芯层均质化后等效的泊松比; $\rho_c$  为蜂窝芯层均质化后等效的芯层密度。

### 1.2 Reissner 理论模型

Reissner 理论等效模型是将芯层均质化后的蜂窝夹层板等效为与原模型不等厚的单层板。假设表层处于薄膜应力状态,忽略芯层平行于  $xy$  面内应力分布,由于在芯层和表面中  $z$  方向的应力极小,故忽略  $z$  方向的应力<sup>[4]</sup>。根据以上假设,Reissner 理论等效模型的基本参数计算公式如下:

$$\begin{cases} t_r = \sqrt{3} (h_t + h_c), E_r = \frac{2E_t h_t}{t_r} \\ \rho_r = \frac{\rho_c h_c + 2\rho_t h_t}{t_r}, \mu_r = \mu_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_r$ 、 $\rho_r$ 、 $E_r$ 、 $\mu_r$  分别为 Reissner 理论等效模型等效后的厚度、密度、弹性模量和泊松比; $E_t$ 、 $\mu_t$ 、 $\rho_t$  分别为蜂窝夹层板面板材料的弹性模量、泊松比和密度。

### 1.3 蜂窝板理论模型

蜂窝板理论将整个蜂窝夹层板等效成等刚度、同尺寸、等厚度的正交各向异性板。利用哈密顿原理可得出蜂窝夹层结构的等效参数<sup>[5]</sup>,根据以上原理,蜂窝板理论模型的基本参数计算公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{e_{11} e_{22} - e_{12}^2}{e_{22}}, E_y = \frac{e_{11} e_{22} - e_{12}^2}{e_{11}} \\ G_{xy} = e_{66}, G_{xz} = e_{44}, G_{yz} = e_{55} \\ \mu_{xy} = -\frac{e_{12}}{e_{22}}, \rho_r = \frac{d\rho_t + h\rho_c}{d+h} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_x$ 、 $E_y$ 、 $G_{xy}$ 、 $G_{xz}$ 、 $G_{yz}$ 、 $\mu_{xy}$ 、 $\rho_r$  分别为蜂窝板理论模型等效后的弹性模量、切变模量、泊松比和密度。其中中间变量计算公式如下:

$$\begin{cases} e_{11} = \frac{[(h+d)^3 - h^3] e_{11} + h^3 e_{c11}}{(h+d)^3} \\ e_{22} = \frac{[(h+d)^3 - h^3] e_{22} + h^3 e_{c22}}{(h+d)^3} \\ e_{12} = \frac{[(h+d)^3 - h^3] e_{12} + h^3 e_{c12}}{(h+d)^3} \\ e_{66} = \frac{[(h+d)^3 - h^3] e_{66} + h^3 e_{c66}}{(h+d)^3} \\ e_{44} = \frac{d e_{t44} + h e_{c44}}{h+d}, e_{55} = \frac{d e_{t55} + h e_{c55}}{h+d}, d = h_t, h = \frac{1}{2} h_c \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} e_{c11} = e_{c22} = \frac{1}{1-\mu_{cxy}^2} E_{cx}, e_{c12} = \frac{\mu_{cxy}}{1-\mu_{cxy}^2} E_{cx} \\ e_{c44} = G_{cxz}, e_{c55} = G_{cyz}, e_{c66} = G_{cxy} \\ e_{f11} = \frac{1}{1-\mu_f^2} E_f, e_{f12} = \frac{\mu_f}{1-\mu_f^2} E_f \\ e_{f44} = e_{f55} = e_{f66} = G_f \end{cases}$$

### 1.4 层合板低阶剪切理论模型

层合板低阶剪切理论是将芯层均质化后的蜂窝夹层板等效为与原板相同尺寸且层间位移低阶连续的3层剪切板,等效板的第1层和第3层为各向同性,中间层为正交各向异性<sup>[6]</sup>。上、下面板参数为已知铝板参数、芯材参数为均质化后芯层参数,利用 ANSYS 中复合层合板理论对 91 号单元进行建模,低层合板理论模型的基本参数计算公式如下:

$$\begin{cases} E' = E''' = E_f, E_x'' = E_y'' = E_{cx}, E_z'' = E_{cz} \\ G'' = C_{yz}'' = G_{cyz}, C_{xy}'' = G_{cxy} \\ \mu' = \mu''' = \mu_f, \mu_x'' = \mu_y'' = \mu_{cxz}, \mu_{xy}'' = \mu_{cxy} \\ \rho' = \rho''' = \rho_f, \rho'' = \rho_c \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E'$ 、 $\mu'$ 、 $\rho'$  分别为铺层建模时第1层和第3层材料的弹性模量、泊松比和密度;  $E_x''$ 、 $E_y''$ 、 $E_z''$  为铺层建模时中间层材料的3个方向的弹性模量;  $G_{xy}''$ 、 $G_{yz}''$ 、 $G_{zx}''$  为中间层材料的面内切变模量;  $\mu_x''$ 、 $\mu_y''$ 、 $\mu_z''$  为中间层材料的3个主方向的泊松比;  $\rho''$  为中间层材料的等效密度。

## 2 蜂窝结构胞壁厚度与边长之比对等效模型的影响分析

运用有限元计算软件 ANSYS 对精细化模型和相应等效模型进行自由边界下的模态计算,将等效模型的模态计算结果与精细化模型计算结果做误差分析。各模型建模过程中,面板和芯层厚度、胞体边长不变,改变蜂窝胞壁厚度,分析  $\lambda$  对等效模型计算精度的影响。

进行精细化模型建模时,蜂窝夹层芯层与上、下面板均采用壳单元建模。进行芯层均质化后的理论模型建模时,芯层采用实体单元 (Solid185) 建模,上、下面板采用壳 (Shell181) 单元建模。Reissner 理论模型采用均质板模,蜂窝板理论模型采用 lamina 板建模,层合板低阶剪切理论模型采用复合材料层合板模块建模。仿真计算时采用的蜂窝夹层板几何尺寸为 500 mm×500 mm,蜂窝胞体边长  $l=6$  mm,蜂窝胞壁厚度  $t = 0.1$  mm、0.15 mm、0.2 mm、0.25 mm、0.3 mm、0.35 mm。

通过式(1)计算不同胞壁厚度下芯层均质化的材料参数,并且建立不同胞壁厚度下与精细模型对应的均质化模型。在自由边界下,计算精细化模型与均质化模型的前4阶模态。表3为精细化模型自由边界下前4阶模态频率值,图3为  $t=0.2$  mm 的精细化模型的阵型图。分析不同  $\lambda$  下,均质化等效模型与精细化模型的误差值,结果如表4所示。

表3 精细化模型自由边界下的模态频率

t/mm	1阶/Hz	2阶/Hz	3阶/Hz	4阶/Hz
0.10	747.27	1 155.14	1 399.42	1 699.41
0.15	723.44	1 114.79	1 381.13	1 696.92
0.20	695.57	1 068.80	1 344.82	1 661.63
0.25	668.65	1 025.09	1 305.63	1 617.36
0.30	643.87	985.31	1 267.95	1 571.89
0.35	621.38	949.54	1 233.03	1 528.04

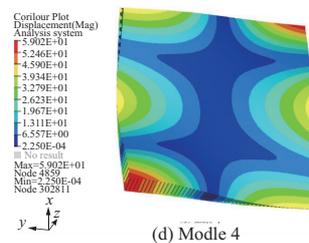
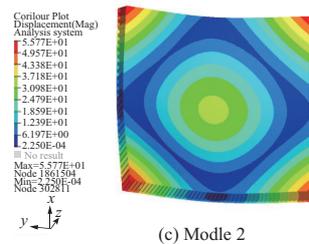
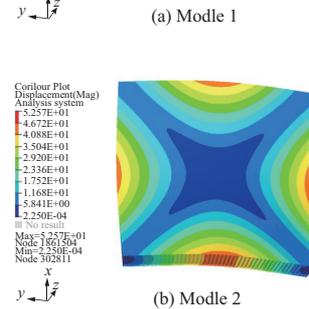
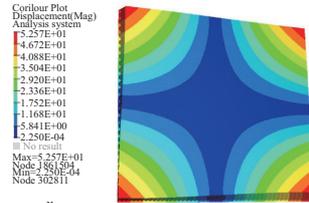


图3  $t=0.2$  mm 的精细化模型阵型图

表4 不同  $t$  下均质化模型的模态频率

t/mm	1阶		2阶		3阶		4阶	
	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%
0.10	749.37	0.28	1 153.23	-0.17	1 392.48	-0.50	1 703.14	0.22
0.15	724.87	0.20	1 111.21	-0.32	1 375.37	-0.42	1 698.64	0.10
0.20	696.26	0.10	1 066.10	-0.25	1 339.30	-0.41	1 618.80	0.04
0.25	668.31	-0.05	1 022.42	-0.26	1 301.01	-0.41	1 618.79	0.09
0.30	643.28	-0.09	981.20	-0.41	1 272.90	0.39	1 575.70	0.25
0.35	620.23	-0.19	947.98	-0.37	1 240.20	0.58	1 533.80	0.38

通过式(2)计算不同胞壁厚度下 Reissner 理论模型的材料参数,在自由边界下,计算 Reissner 理论模型的前 4 阶模态频率,并将其结果与精细化模型的模态结果相对比,分析不同  $\lambda$  下 Reissner 等效模型与精细化模型的误差值,结果如表 5 所示。

表 5 不同  $t$  下 Reissner 模型的模态频率

$t/\text{mm}$	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%
0.10	836.45	11.95	1 250.61	5.26	1 560.43	11.51	2 018.17	18.76
0.15	776.89	7.39	1 161.61	4.20	1 449.32	4.94	1 874.51	10.47
0.20	728.51	4.74	1 089.30	1.92	1 359.10	1.06	1 757.70	5.78
0.25	688.15	2.92	1 028.90	0.37	1 283.75	-1.68	1 660.43	2.66
0.30	653.84	1.55	977.64	-0.78	1 219.80	-3.80	1 577.60	0.36
0.35	624.21	0.46	933.33	-1.71	1 164.50	-5.56	1 506.10	-1.44

通过式(3)计算不同胞壁厚度下蜂窝板理论等效模型的材料参数。在自由边界下,计算蜂窝板理论等效模型的前 4 阶模态,并将其结果与精细化模型的模态结果相对比,分析不同  $\lambda$  下蜂窝板等效模型与精细化模型的误差值,结果如表 6 所示。

表 6 不同  $t$  下蜂窝板模型的模态频率

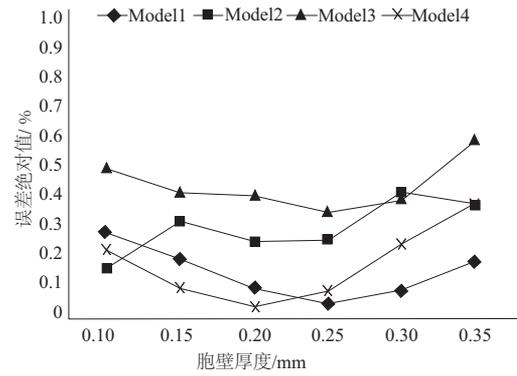
$t/\text{mm}$	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%
0.10	858.65	14.90	1 302.41	12.75	1 625.93	16.19	2 125.49	25.07
0.15	799.01	10.45	1 210.81	8.61	1 521.62	10.17	1 981.59	16.78
0.20	753.72	8.36	1 143.10	6.95	1 443.40	7.33	1 879.40	13.11
0.25	715.03	6.94	1 083.81	5.73	1 391.35	6.57	1 792.02	10.80
0.30	681.88	5.90	1 035.10	5.05	1 354.00	6.78	1 718.40	9.32
0.35	652.96	5.08	992.86	4.56	1 323.50	7.34	1 654.50	8.27

通过式(4)计算不同胞壁厚度下层合板低阶剪切理论模型的材料参数。在自由边界下,计算层合板低阶剪切理论模型的前 4 阶模态,并将其结果与精细化模型的模态结果相对比,分析不同  $\lambda$  下层合板等效模型与精细化模型的误差值,结果如表 7 所示。

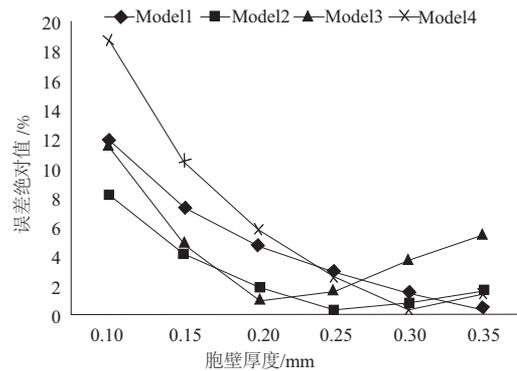
表 7 不同  $t$  下层合板低阶剪切模型的模态频率

$t/\text{mm}$	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%	值/Hz	误差/%
0.10	772.37	3.36	1 209.11	4.67	1 452.83	3.82	1 769.37	4.12
0.15	748.08	3.41	1 168.01	4.77	1 429.93	3.53	1 772.89	4.48
0.20	718.78	3.34	1 118.40	4.64	1 384.00	2.91	1 737.30	4.55
0.25	690.29	3.24	1 072.01	4.58	1 346.99	3.17	1 693.21	4.69
0.30	664.05	3.13	1 031.10	4.65	1 323.50	4.38	1 649.80	4.96
0.35	640.18	3.03	994.07	4.69	1 302.30	5.62	1 607.20	5.18

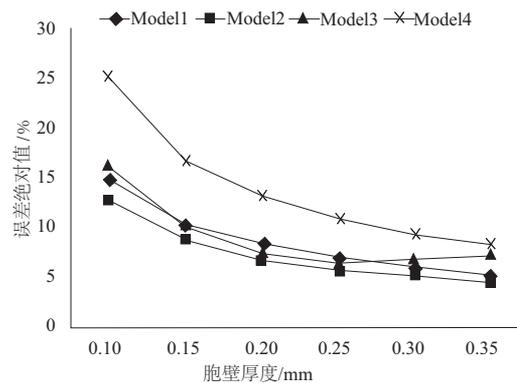
将胞壁厚度不等的各等效模型的计算结果与相应精细化模型进行对比,将其误差绝对值绘制成折线图,如图 4 所示。



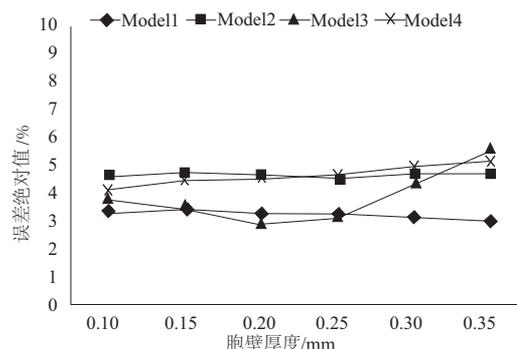
(a) 均质化模型



(b) Reissner模型



(c) 蜂窝板模型



(d) 层合板低阶剪切模型

图 4 各等效模型误差绝对值

由图 4 可以观察到蜂窝胞壁的厚度变化对均质化等效模型的模态计算精度基本无影响,前 4 阶的计算误差绝对值维持在 1% 以下,误差主要来源为模型简化时

计算量的简化。胞壁厚度的变化对层合板低阶剪切理论模型的模态计算精度影响不大,前4阶的计算误差绝对值维持在3%~6%的范围内。在 $t \leq 0.2 \text{ mm}$ 时,层合板低阶剪切理论模型的计算优于蜂窝板理论等效模型;在 $t \leq 0.15 \text{ mm}$ 时,层合板低阶剪切理论模型的计算优于Reissner和蜂窝板理论等效模型。Reissner理论等效模型的模态计算精度随着胞壁厚度的增大而减小,并随着胞壁厚度的增加计算精度趋于稳定,在 $t = 0.1 \text{ mm}$ 时,Reissner模型的精度最低,当 $t \geq 0.15 \text{ mm}$ 时,Reissner理论等效模型有较好的计算精度。同样,蜂窝板理论等效模型的模态计算精度也随着胞壁厚度的增加而减小,并随着胞壁厚度的增加计算精度趋于稳定,在 $t \geq 0.15 \text{ mm}$ 时,其计算精度维持在5%左右,在胞壁厚度在 $0.2 \text{ mm} \leq t \leq 0.35 \text{ mm}$ 时,Reissner等效模型精度为板壳类模型中最高的,精度误差 $< 2\%$ 。

### 3 结语

对蜂窝不同胞壁厚度与边长之比的各个理论等效模型与精细化模型模态计算结果比较可得出以下结论:

1) 不同胞壁厚度与边长的比值下,均质化理论等效模型模态计算结果精度最高,与精细化模型对比误差 $< 1\%$ 。

2) Reissner理论等效模型和蜂窝板理论等效模型模态的计算精度随着胞壁厚度与边长比例的增大而减小,在 $\lambda \geq 0.025$ 时,两种理论模型前4阶模态的误差 $< 10\%$ 。

蜂窝板理论等效模型的精度低于Reissner理论等效模型。

3) 层合板低阶剪切理论模型的模态计算精度随胞壁厚度与边长的比值变化基本不变,与精细化模型的计算误差维持在5%左右。

#### 参考文献:

- [1] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报,2000(3): 92-95.
- [2] 张铁亮,丁运亮,金海波. 蜂窝夹层板结构等效模型比较分析[J]. 应用力学学报,2011,28(3): 275-282.
- [3] REISSNER E. On bending of elastic plates[J]. Quarterly of Applied Mathematics,1947,5(1): 55-68.
- [4] 赵金森. 铝蜂窝夹层板的力学性能等效模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006: 7-28.
- [5] HOLT P J,WEBBER J P H. Finite elements for honeycomb sandwich plates and shells: part 1: formulation of stiffness and consistent load matrices[J]. Aeronautical Journal,2016,84: 113-123.
- [6] 刘健,周春燕. 长厚比对正六边形铝蜂窝夹层板等效板模型动力学计算精度的影响[J]. 复合材料学报,2016,33(8): 1838-1847.
- [7] 徐胜令,宋宇. 正交异性蜂窝夹层板的动力学分析[J]. 复合材料学报,1998,15(4): 74-80.
- [8] LORNA J Gibson, MICHAEL F Ashby. 多孔固体结构与性能[M]. 刘培生,译. 北京:清华大学出版社,2003.

收稿日期:2020-06-03

(上接第47页)

2) 提出基于AHP-TOPSIS的综合方法。研究验证了所构建评价体系的合理性,该方法有利于多目标复杂问题的条理化,有效消除主观因素对评价结果的影响,有利于直观衡量电梯维保企业的质量信用水平,可以为电梯维保企业和监管部门提供参考和借鉴,促进并引导企业实施质量信用分级管理,有效提高特种设备安全管理水平。

3) 本文研究还存在一定局限,主要是由于评价专家、企业人员的技术背景和个人偏好不同,可能导致对评价指标的理解和熟悉存在差异,一定程度上影响质量信用评价的客观性和准确性。同时,电梯维保企业质量信用评价是一个动态发展过程,本研究选择的指标主要针对企业的当前状态,还缺乏对评价动态性的考虑,需要在未来深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 市场监督管理总局. 关于2019年全国特种设备安全状况的通告[J]. 中国特种设备安全,2020(4):1-4.
- [2] 国务院. 质量发展纲要(2011-2020年)[J]. 机械工业标准化与质量,2012(4):8-10.

- [3] 周莉. 企业质量诚信管理实施规范 国家标准系列解析(上)—有关标准的基本定位[J]. 标准科学,2014(5): 76-78.
- [4] 咸奎桐,叶如意. 基于产品质量记录的企业质量信用评价模型及应用研究[J]. 世界标准化与质量管理,2008(1):45-48.
- [5] 罗雪,谈立. 层次分析法在企业质量信用等级评定标准中的应用研究[J]. 中国质量与标准导报,2017(6):66-74.
- [6] 王铁旦,罗雪. 基于情景模糊的食品企业质量信用评价研究[J]. 昆明理工大学学报(社会科学版),2015(3):59-67.
- [7] 钱建平,李海燕,杨信廷,等. 基于可追溯系统的农产品生产企业质量安全信用评价指标体系构建[J]. 中国安全科学学报,2009(6):135-141.
- [8] 彭成辉,陈芙蓉,李洪浩. AHP在电梯维保质量评价中的应用研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2017(1):41-45.
- [9] 陈兆芳,张岐山. 基于熵权和灰色关联方法的电梯安全评价及其应用[J]. 安全与环境工程,2016(4):109-112.
- [10] 李向东,贡业轩,姜武. 神经网络在电梯功能安全评估中的应用[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1):214-218.

收稿日期:2020-09-09