

间隙率对平纹及三轴向织物复合材料弹性性能的影响

高军鹏^{1,2} 白江波³ 邓华^{1,2} 益小苏^{1,2}

(1 先进复合材料重点实验室,中航复合材料技术中心,北京 100015)

(2 北京航空材料研究院,北京 100095)

(3 北京航空航天大学,北京 100083)

文 摘 采用有限元分析方法研究了间隙率对平纹及三轴向复合材料叠层弹性性能的影响。首先,根据平纹织物复合材料几何构型和基本参数,建立了平纹织物复合材料的面密度和单胞边长与间隙率之间的关系;然后,建立了平纹织物复合材料的拉伸、压缩和剪切有限元模型,利用该模型分析了间隙率对其弹性性能的影响;最后,分析了间隙率对平纹织物复合材料与三轴向织物复合材料叠层弹性性能的影响。研究发现,平纹织物复合材料的比拉伸模量和比压缩模量随其间隙率的增加而略微增加,比剪切模量随其间隙率的增加减小,平纹织物复合材料与三轴向织物复合材料叠层的等效模量极曲线平纹织物复合材料的间隙率的增加而极性减弱。

关键词 平纹织物复合材料,三轴向织物复合材料,间隙率,弹性性能,等效模量,极曲线

中图分类号:TB332,V258

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.005

Effect of Gap Ratio on Elastic Properties of Plain Weave Fabric and Laminate With Triaxial Weave Fabric Composites

GAO Junpeng^{1,2} BAI Jiangbo³ DENG Hua^{1,2} YI Xiaosu^{1,2}

(1 Science and Technology on Advanced Composites Laboratory, AVIC Composites Center, Beijing 100015)

(2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(3 Beihang University, Beijing 100083)

Abstract The effect of gap ratio on elastic properties of plain weave fabric (PWF) and laminate with triaxial weave fabric (TWF) and PWF composites was numerically investigated by FEA method. Firstly, based on geometry construction and basic parameters of PWF composites, the relationship was determined between both surface density and length of representative unit cell and gap ratio. Secondly, the tension, compression and tear model of PWF composites are established to study the effect of gap ratio on elastic properties of PWF composites. Finally, the effect of the gap ratio on the laminate with PWF and TWF composites was investigated. It is found that the specific stiffness of tension and compression increase with the increasing of gap ratio, and the specific stiffness of tear increases with the increasing of gap ratio. The polarity of polar curve of equivalent stiffness of laminate with PWF and TWF composites decreases with the increasing of gap ratio of PWF composites.

Key words Plain weave fabric (PWF) composites, Triaxial weave fabric (TWF) composites, Gap ratio, Elastic properties, Equivalent stiffness, Polar curve

0 引言

先进复合材料由于具有高的比模量和比强度,较低的密度、以及可设计性强等突出优点,在航空航天领域得到越来越广泛的应用^[1-3]。结构减重是航空

航天复合材料结构设计中的一个重要课题。两维三向复合材料具有镂空网格结构及准各向同性,采用平纹织物复合材料与其复合,可得到一种具有准各向同性、质量较轻的复合材料结构。

收稿日期:2013-12-30

基金项目:国家973计划(2010CB631100),重点实验室基金(9140C440507120C4403)

作者简介:高军鹏,1979年出生,博士,高级工程师,主要从事树脂基复合材料技术研究。E-mail: johnper@163.com

杨振宇等^[4]在对三维四步编织物结构分析的基础上,进一步完善了基元、面元和角元的三细胞模型;王立朋等^[5]基于细观分析与体积平均法建立了二维编织/RTM 复合材料刚度的理论分析方法;孙颖等^[6]采用有限元法预测了二步法三维编织复合材料的有效弹性性能,数值计算结果与实验结果吻合较好;严雪等^[7]建立了预测二维三轴编织复合材料弹性性能的理论分析模型和力学性能的有限元模型,两种模型预测结果均与试验结果吻合良好;Xiong 等^[8-10]将平纹织物复合材料弯曲的纤维束抽象为正弦曲梁,建立了总的势能函数方程,并完成了试验验证,精度很高。

为了能够得到一种综合性能相对较优的复合材料蒙皮,需要将三轴向织物和平纹织物进行复合。本文在文献[11]的基础上,进行了间隙率对平纹织物复合材料及其与三轴向织物复合材料叠层弹性性能的影响研究,拟为最终超轻量化复合材料蒙皮的优化设计提供基础。

1 平纹织物复合材料几何构型与基本参数

平纹织物复合材料典型编织形式见图 1。

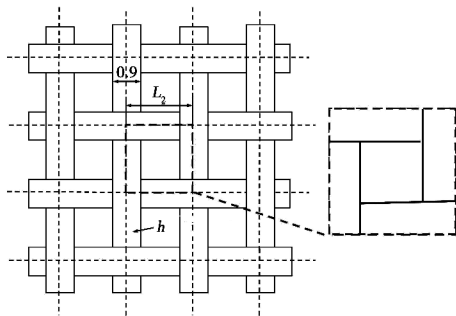


图 1 平纹织物复合材料几何构型及单胞几何参数

Fig. 1 Geometry construction and basic parameters of PWF composites

$$\rho_{A2} = \frac{1.599 \times h \times \{0.9 \times 10^{-3} \times h [3.6 + 4\sqrt{h^2 + (L_2 - 0.9)^2}]\}}{L_2^2 \times 10^{-6}} \quad (4)$$

式(3)和式(4)建立了平纹织物复合材料单胞中性轴组成的正方形边长 L_2 和面密度 ρ_{A2} 与间隙率 k_2 之间的关系,其毯式曲线如图 2 所示。

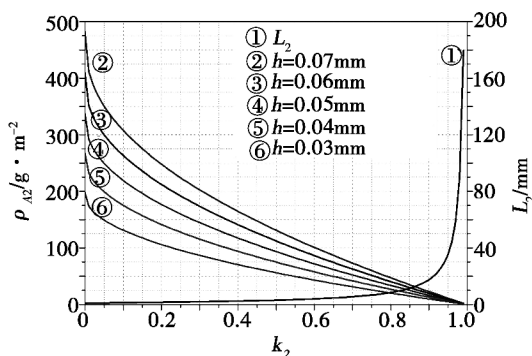


图 2 ρ_{A2} 与 L_2 随 k_2 的变化

Fig. 2 Surface density ρ_{A2} and feature length L_2 with increase of gap ratio k_2

分析时采用的纤维束材料参数与 Kueh 等^[12]的研究报告一致(表 1)。

表 1 材料性能

Tab. 1 Tow material properties

material	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E_1 / GPa	$E_2 = E_3 / \text{GPa}$	$G_{12} = G_{13} / \text{GPa}$	G_{23} / GPa	$\nu_{12} = \nu_{13}$
T300	1.76	23.3	23.1	0.896	0.896	0.2
Hexcel 8552	1.30	0.467	0.467	0.170	0.170	0.37
Tow	1.599	15.309	1.287	0.441	0.438	0.26

所有模型中丝束的宽度不变,固定为 0.9 mm,丝束的厚度为 h 。取出一个单胞(图 1),由中性轴组成的正方形(虚线部分)边长为 L_2 。

平纹织物复合材料的间隙率 k_2 定义为间隙面积比单胞总面积,可表示为

$$k_2 = \frac{A_{\text{gap}}^{\text{P}}}{A_{\text{total}}^{\text{P}}} \quad (1)$$

式中, $A_{\text{gap}}^{\text{P}}$ 为单胞间隙面积, $A_{\text{total}}^{\text{P}}$ 为单胞总面积,分别可以表示为

$$\begin{cases} A_{\text{total}}^{\text{P}} = L_2^2 \\ A_{\text{gap}}^{\text{P}} = (L_2 - 0.9)^2 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得

$$L_2 = \frac{0.9}{1 - \sqrt{k_2}} \quad (3)$$

一个单胞的纤维面密度为

图 2 给出了当纤维束宽度一定的情况,不同丝束厚度时面密度与间隙率之间的关系,当丝束宽度一定,间隙率的取值范围为 $k_2 \in (0, 1)$ 。通过上述方法可以设计出满足平纹织物复合材料轻量化(面密度)要求的纤维束几何参数和单胞边长。

2 平纹织物复合材料有限元计算模型

在前面分析的基础上,采用 ANSYS 软件中的实体单元进行建模和分析。根据 Kueh 等^[12]研究报告中的纤维束的几何参数(纤维束宽度为 0.9 mm,厚度为 0.06 mm)和表 1 进行建模。

由于平纹织物复合材料受载后变形不复杂,可以通过合理设置边界条件即可符合变形条件,故所有分析模型只需采用单胞模型(图 3)即可达到比较高的精度。本文分析的平纹织物复合材料经纬向纤维比例为 1:1,所以只需研究 0° 方向的拉伸/压缩模量,

90°方向的拉伸/压缩模量与之相等。对于0°拉伸/压缩模型[图3(a)]:约束端CD约束除y向的全部自由度,并且在约束端选择一个关键点约束所有自由度,约束端AD和BC约束x向和绕z轴旋转的自由度,加载端AB约束全部旋转自由度和z向自由度;在加载端AB施加位移载荷 u_x ;计算分析后可得到约束端的支反力合力 F_x 及y向位移 u_y 。0°拉伸/压缩模量和泊松比可表示为

$$\begin{cases} S_x = \frac{F_x}{u_x} \\ \nu_{xy} = -\frac{u_y}{u_x} \end{cases} \quad (5)$$

式中, S_{lx} 和 S_{cx} 分别表示拉伸和压缩模量。

对于剪切模型[图3(b)]:约束端约束全部自由度,加载端(三个端面)先分别进行节点耦合(角点A、B、C、D位置的节点不耦合),形成刚性端面,在加

载端AB约束所有转动自由度和z向自由度并在中心耦合节点施加一个y向力 T_y ,在另外两个加载端分别施加一对相反的x向力 T_x ,可形成剪切受力状态,根据力矩平衡可得

$$T_x L_2 = T_y L_2 \quad (6)$$

即

$$T_x = T_y \quad (7)$$

计算分析后可得到大加载端在y向位移 u_y ,剪切应变可近似表示为

$$\gamma_{xy} = \frac{u_y}{L_2} \quad (8)$$

剪切模量可表示为

$$S_{xy} = \frac{T_y}{L_2 \gamma_{xy}} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)中,可得

$$S_{xy} = \frac{T_y}{u_y} \quad (10)$$

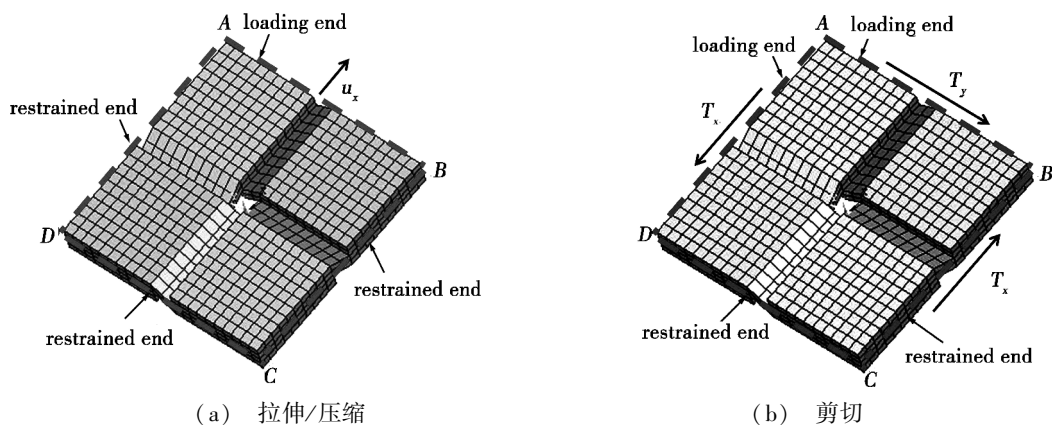


图3 有限元模型

Fig.3 FEA models

3 间隙率对平纹织物复合材料弹性性能的影响

平纹织物复合材料会存在正方形的间隙(图1),需要注意只有当完全没有正方形的间隙时其 k_2 才为

0,但实际情况下不可能,所以建模时将 k_2 取0.01来对极限情况进行近似。图4给出了 $k_2=0.01$ 时各模量分析模型的变形位移云图。

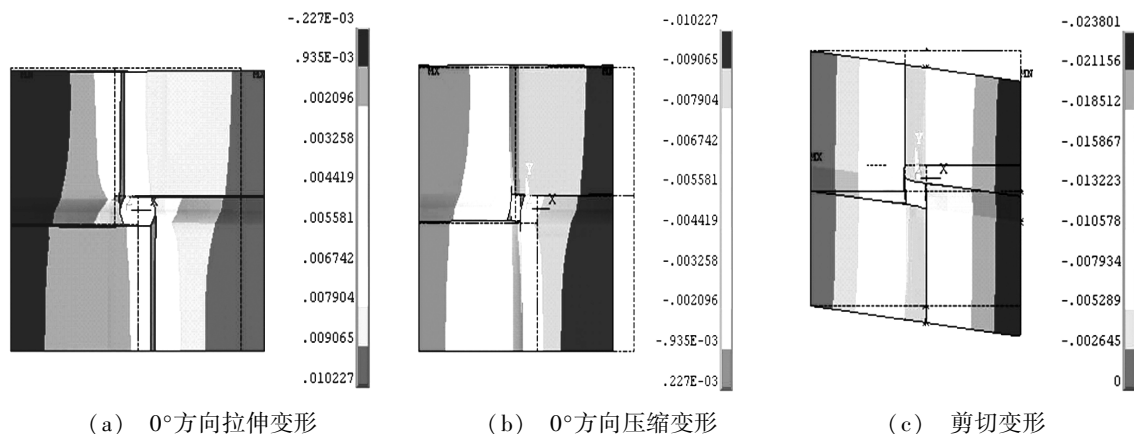


图4 当 $h=0.06$,且 $k_2=0.01$ 时各模量分析模型的变形位移云图

Fig.4 Deformation distribution of stiffness analysis models with $h=0.06$ and $k_2=0.01$

图5~图8给出了0°方向拉伸/压缩模量、剪切模量和泊松比以及比模量随间隙率 k_2 的变化。

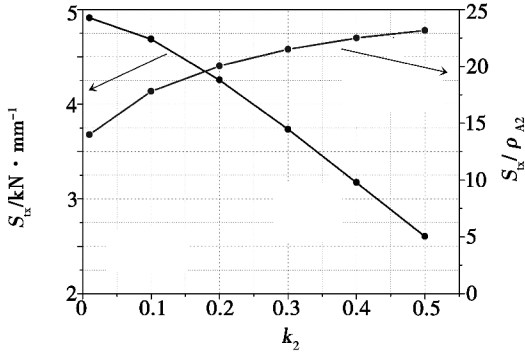


图5 0°方向 S_{0x} 与 S_{0x}/ρ_{A2} 随 k_2 的变化

Fig. 5 S_{0x} of 0° direction versus S_{0x} and S_{0x}/ρ_{A2} with increase of k_2

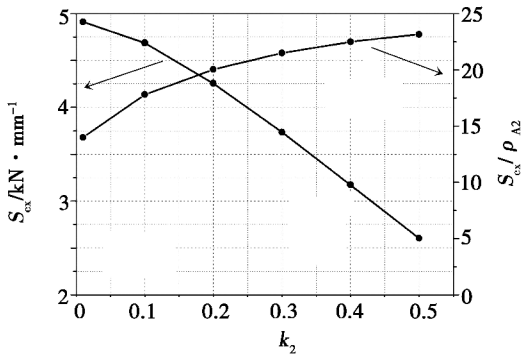


图6 0°方向 S_{0cx} 与 S_{0cx}/ρ_{A2} 随 k_2 的变化

Fig. 6 S_{0cx} of 0° direction versus S_{0cx} and S_{0cx}/ρ_{A2} with increase of k_2

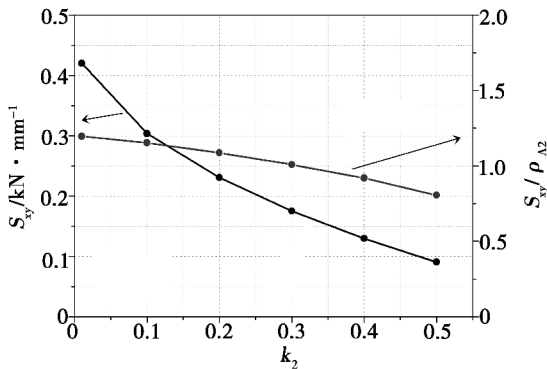


图7 剪切模量 S_{xy} 与 S_{xy}/ρ_{A2} 随 k_2 的变化

Fig. 7 S_{xy} and S_{xy}/ρ_{A2} with increase of k_2

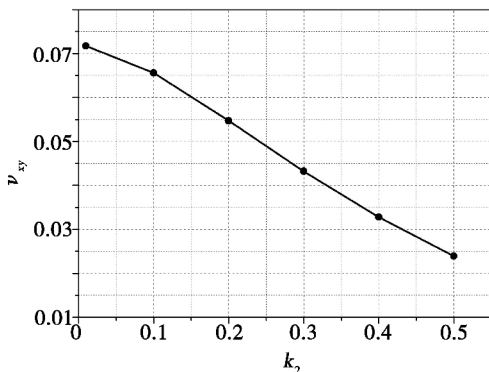


图8 ν_{xy} 随 k_2 的变化

Fig. 8 ν_{xy} with increase of k_2

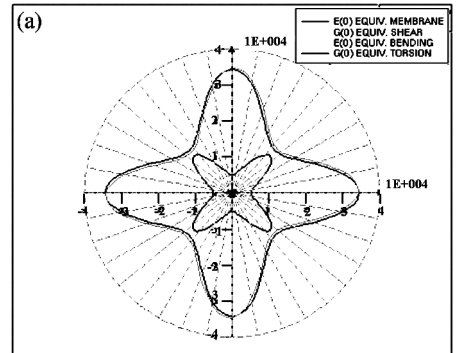
可知:(1)0°方向拉伸模量和压缩模量相等;(2)0°方向拉伸/压缩模量、剪切模量和泊松比随 k_2 的增加而减小;(3)0°方向比拉伸/压缩模量随 k_2 的增加而略微增加,比剪切模量随 k_2 的增加减小。在90°方向拉伸/压缩模量与0°方向一致。

4 间隙率对平纹织物复合材料与三轴向织物复合材料叠层弹性性能的影响

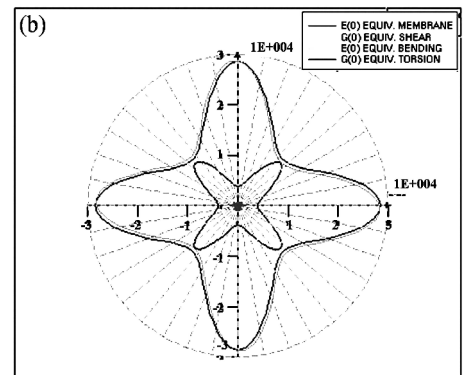
文献[11]比较详细的研究了间隙率对三轴向织物复合材料弹性性能的影响。本文的目标是希望为设计满足轻量化要求的超轻复合材料蒙皮提供一套方法,而这种超轻复合材料蒙皮就是由三轴向织物复合材料和平纹织物复合材料叠层复合而成,文献[11]和本文前3节的研究内容为该目标提供了基础。

三轴向织物复合材料具有准各向同性的特点,拉伸/压缩模量较小,剪切模量较大,泊松比较大;而平纹织物复合材料在0°方向和90°方向力学性能相等,拉伸/压缩模量较大,剪切模量较小,泊松比较小。因此,将二者进行叠层复合就可得到性能介于两者之间的轻量化蒙皮结构。提出两种蒙皮叠层方式:方式1为1层三轴向织物复合材料与1层平纹织物复合材料;方式2为1层三轴向织物复合材料与2层平纹织物复合材料,三轴向织物复合材料在2层平纹织物复合材料之间。

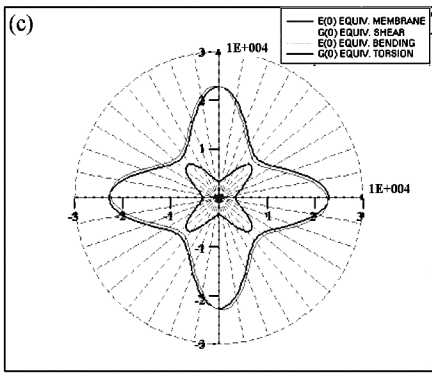
将三轴向织物复合材料的间隙率 $k=0.34$ 固定,改变平纹织物复合材料的 k_2 ,通过SYSPLY软件分析了各个复合模型当隙率 k_2 改变时对等效模量分布极曲线(图9)和材料性能(表2)的影响。



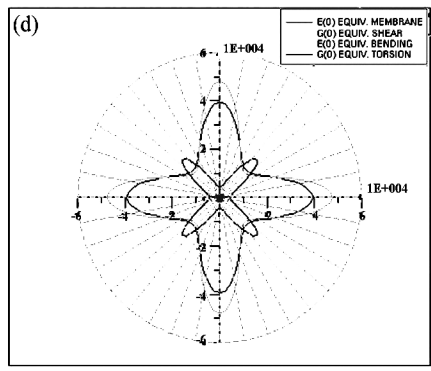
(a) 叠层方式1, $k_2=0.01$



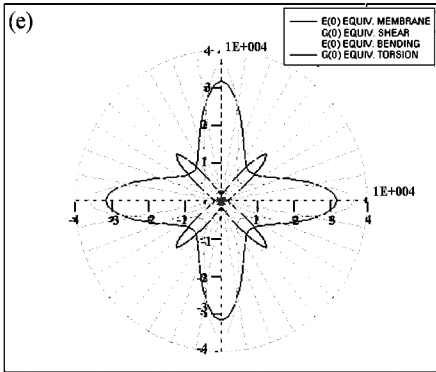
(b) 叠层方式1, $k_2=0.3$



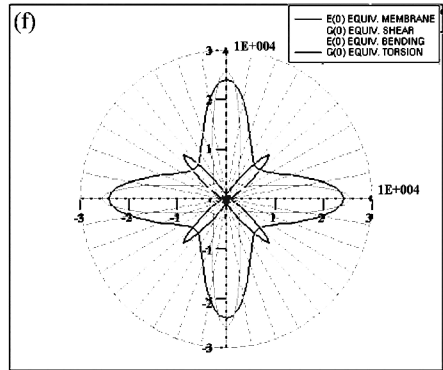
(c) 叠层方式 1, $k_2 = 0.5$



(d) 叠层方式 2, $k_2 = 0.01$



(e) 叠层方式 2, $k_2 = 0.3$



(f) 叠层方式 3, $k_2 = 0.5$

图 9 三轴向织物复合材料和平纹织物复合材料叠层复合后的等效模量极曲线

Fig. 9 Polar curve of equivalent stiffness of laminate with PWF and TWF composites

从图 9 可知:(1)当 k 固定时,叠层方式 1 和方式 2 等效模量极曲线随 k_2 的增加极性均减弱;(2)当 k 和 k_2 固定时,叠层方式 2 比方式 1 的等效模量极曲线极性更强。从表 2 可知:(1)叠层复合后材料的弹性

性能介于纯粹的三轴向织物复合材料和平纹织物复合材料的弹性性能之间;(2)固定三轴向织物复合材料的 k ,各弹性性能随平纹织物复合材料 k_2 增加均减小,而泊松比的变化趋势则相反。

表 2 三轴向织物复合材料和平纹织物复合材料的叠层性能

Tab. 2 Elastic properties of the laminate with PWF and TWF

		$S_x / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$S_y / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$S_{xy} / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	ν_{xy}
TWF	$k = 0.34$	2041.2	1388.0	624.3	0.559
	$k_2 = 0.01$	4910.4	4910.4	420.0	0.072
PWF	$k_2 = 0.3$	3733.7	3733.7	175.2	0.043
	$k_2 = 0.5$	2603.4	2603.4	90.6	0.024
stack method 1	$k = 0.34, k_2 = 0.01$	3440.1	3440.1	515.1	0.186
	$k = 0.34, k_2 = 0.3$	2857.6	3440.1	392.7	0.191
	$k = 0.34, k_2 = 0.5$	2286.5	2857.6	350.4	0.215
stack method 1	$k = 0.34, k_2 = 0.01$	3942.8	2286.5	483.4	0.139
	$k = 0.34, k_2 = 0.3$	3166.3	3942.8	320.2	0.143
	$k = 0.34, k_2 = 0.5$	2412.7	3166.3	263.8	0.148

5 结论

(1)根据平纹织物复合材料几何构型,建立了平纹织物复合材料的面密度和单胞边长与间隙率之间的关系。

(2)建立了平纹织物复合材料拉伸、压缩和剪切的有限元计算模型,分析了 k_2 改变时对平纹织物复

合材料的拉伸模量、压缩模量、剪切模量和泊松比和比模量的影响,发现拉伸模量、压缩模量、剪切模量和泊松比随 k_2 的增加而均下降,比拉伸/压缩模量随 k_2 的增加而略微增加,而比剪切模量随 k_2 的增加减小。

(下转第 35 页)