http://myfj.cnjournals.com myfj\_sadri@comac.cc (021)20866796

DOI: 10.19416/j. cnki. 1674 - 9804. 2021. 04. 021

# 可用于短舱结构的机织复合材料几何参数 对力学性能的影响分析

李京菁 \*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘 要:基于建立的复合材料渐进失效模型(PD model),通过引入机织复合材料纤维束波动形态特征,对 PD 模型进行了修 正。通过与实验结果及其它模型结果的对比验证了修正后模型的有效性。同时,采用 PD 模型系统,全面地分析了平纹机织 复合材料的几何参数包括波动角、编织角、总体纤维体积分数对其力学性能的影响,获得了机织复合材料力学性能随几何参 数变化的趋势。其中指出 Graphite/Epoxy 机织复合材料由于其纤维与基体模量差异性较大而造成其力学性能相较于 E-glass/ Epoxy 机织复合材料受波动角的影响较大;编织角对机织复合材料面内力学性能的影响更为显著,面内力学性能随编织角的 变化以一种波动形式出现;机织复合材料的总体纤维体积比越大,纤维束的力学性能就越强,机织复合材料的力学性能也就 越强,且这一增长趋势接近于指数增长。

关键词:机织复合材料;几何参数;力学性能;渐进损伤模型;波动角;编织角;纤维体积分数 中图分类号:TB332 文献标识码:A



# 0 引言

机织复合材料具有较高的比刚度、比强度、较好的面内力学特性、抗腐蚀及抗疲劳特性,被广泛应用于航空航天领域,尤其是民用航空领域。随着我国自主研制的民用客机 C919、CR929 及民用航空发动机的研发<sup>[1-2]</sup>,先进复合材料因其重量轻、油耗低、污染低以及成本低等方面的优势为民用飞机的进一步发展提供了有利的保证。而短舱结构包含大量非主承力的功能性结构,故基于机织复合材料的这些优点可被大量用于飞机发动机短舱结构上。

由于机织复合材料自身的结构特点,相较于 铺层复合材料,机织复合材料引入了更多的几何 参量。而在实际应用过程中,机织复合材料会遭 遇更多问题,如成型过程中机织复合材料由于受 到模具挤压而造成局部区域变形过大而造成力学 性能的变化。故本文通过讨论机织复合材料的几 何参量对其力学性能的影响深入了解机织复合材 料的力学特性。

目前,对机织复合材料的仿真分析可以分为细 观、宏细观和宏观三种尺度下的仿真分析。细观的 优势是可以完全模拟机织结构的几何形态、纤维束 形态,计算结构准确但计算量巨大,且不方便修改结 构参数;宏细观尺度下的仿真分析同样可以反应结 构的几何形态,计算精确但计算量也较高且参数修 改不方便,不利于几何形态对力学性能的研究;宏观 尺度下的仿真分析需要精细的算法将各个参数添加 到仿真模型中,参数修改反应迅速但会牺牲精确 性<sup>[39]</sup>。本文基于宏观尺度,对 PD 模型<sup>[10]</sup>进行修 正,校核了修正后的 PD 模型的可靠性,同时系统地 分析了纤维束宽度、纤维束厚度、纤维束间间距、波 动角、编织角、纤维体积比等几何参数对力学性能的 影响,克服了三维细观有限元模型几何参数的改变

<sup>\*</sup> 通信作者. E-mail: lijingjing1@ comac. cc

**引用格式:** 李京菁.可用于短舱结构的机织复合材料几何参数对力学性能的影响分析[J].民用飞机设计与研究,2021(4): 118-125. LI J J. Influence of geometrical parameters on mechanical properties of the woven composites for the pylon[J]. Civil Aircraft Design and Research,2021(4):118-125(in Chinese).

所带来的重新建模的巨大工作量。同时,由于平纹 机织复合材料中某些参数之间的耦合作用,因此对 所要讨论的几何参数做了优化,并利用机织复合材 料的厚宽比、间隙比分别讨论了波动角对机织复合 材料力学性能的影响,大大降低了因几何参数之间 的耦合关系而造成的几何参数对机织复合材料力学 性能影响的复杂程度。

#### 1 材料性能数据及几何参数

本文以 E-Glass/Epoxy 以及 Graphite/Epoxy 平 纹机织复合材料讨论几何参数对机织复合材料力学 性能的影响,材料参数详见表1。

同时,为了验证模型的有效性,以表2中的算例 为例对模型进行校对。机织复合材料几何参数示意

图见图 1,其中几何输入量包括:纬向纤维束宽度  $A_{\ell}$ 、经向纤维束宽度 $A_{\mu}$ 、纬向纤维束间间距 $G_{\ell}$ 、经向 纤维束间间距 $G_{w}$ 、纬向纤维束厚度 $H_{\ell}$ 、经向纤维束 厚度  $H_{u}$ 、波动角  $\beta$ 、编织角  $\theta$  以及总纤维体积比  $v_{t}^{\circ}$ 。



图 1 平纹机织复合材料结构示意图

	表 1 纤维及基体的基本材料力学性能 <sup>112</sup>						
contents	$E_1$ /GPa	$E_2 = E_3/\text{GPa}$	$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$	$P_{12} = P_{13}$	P <sub>23</sub>	
E-Glass	72	72	27.7	27.7	0.30	0.30	
Graphite	388	7.2	6.8	2.4	0.23	0.50	
Epoxy	3.5	3.5	1.3	1.3	0.35	0.35	

表 2	平纹机织复合材料的几何参数 <sup>[12]</sup>	J
-----	-------------------------------	---

type	weft bundle/mm		Warp bundle/mm			11 /		II / A	
	$A_f$	$H_{f}$	$G_{f}$	$A_w$	$H_w$	$G_w$	$H_L/\mathrm{mm}$	V	$\Pi_f / A_f$
E-Glass/Epoxy	0.62	0.10	0.05	0.62	0.10	0.05	0.20	0.42	0.161
Graphite/Epoxy	2.00	0.50	0.50	2.00	0.50	0.50	1.00	0.41	0.250

#### 2 问题的引入

本文基于 PD 模型讨论几何参数对机织复合材 料性能的影响。在 PD 模型中,考虑到对于大多数 平纹机织复合材料而言其波动角一般为一极小量, 且沿纤维束走向的变化不明显<sup>[11]</sup>。因此为了简化 起见,在 PD 模型里假设波动角满足:

$$\beta = \tan\beta \tag{1}$$

且同时选取β的最大值作为PD模型的波动角 的输入,即:

$$\beta_{f} = \frac{H_{w}}{A_{w} + G_{w}}$$

$$\beta_{w} = \frac{H_{f}}{A_{f} + G_{f}}$$
(2)

表 3 为基于 PD 模型计算获得的 E-Glass/ Epoxy 平纹机织复合材料及 Graphite/Epoxy 平纹机 织复合材料的计算结果对比情况。由表3可以看 出,对于 E-Glass/Epoxy 机织复合材料而言, PD 模 型的预测结果较好,但对 Graphite/Epoxy 机织复合 材料的 E<sub>1</sub> 及 E<sub>2</sub> 弹性模量的预测结果并不理想, PD 模型及 MMPM 模型所预测的材料弹性性能均 远远高于其它几组模型的预测结果。而 PD 模型 与 MMPM 模型具有一个共同特点:均假设机织复 合材料的波动角为一极小值,这为 PD 模型的修正 提供了思路。

		2011月开展主题					
		The mechanical properties					
material type	model	$E_1$ /GPa	E <sub>2</sub> /GPa	<i>G</i> <sub>12</sub> /GPa	$P_{12}$		
	Test result <sup>[12]</sup>	19.3	19.3	_			
	PD	21.3	21.3	4.2	0.17		
	MMPM <sup>[12]</sup>	20.7	20.7	2.9	0.17		
	SAM <sup>[12]</sup>	20.3	20.3	3.7	0.23		
E-Glass/ Epoxy	EAM—PS <sup>[12]</sup>	19.6	19.6	3.7	0.20		
	$-SP^{[12]}$	17.9	17.9	3.7	0.20		
	MKM <sup>[12]</sup>	21.7	21.5	3.9	0.13		
	Kabelka M <sup>[12]</sup>	29.2	29.2	4.9	0.12		
	Test result <sup>[12]</sup>		_	_			
	PD	72.5	72.5	2.8	0.017		
	MMPM <sup>[12]</sup>	80.1	80.1	2.3	0.02		
	SAM <sup>[12]</sup>	28.8	28.8	2.8	0.08		
Graphite/ Epoxy	EAM—PS <sup>[12]</sup>	23.7	23.7	2.8	0.12		
	$-SP^{[12]}$	16.2	16.2	2.8	0.12		
	MKM <sup>[12]</sup>	32.2	32.2	3.0	0.04		
	Kabelka M <sup>[12]</sup>	44.3	44.3	3.7	0.03		

表 3 几种计算模型预测结果的对比

# 3 几何参数对力学性能的影响

本文將基于 PD 模型,并通过对模型的修正, 重点讨论几何参数对机织复合材料力学性能的 影响。

3.1 波动角β对平纹机织复合材料力学性能的影响

波动角作为一个直接影响机织复合材料力学性能的重要因素并不是独立存在的。波动角的大小会受到材料其它几何输入量如纤维束厚度 H、纤维束宽度 A 及纤维束之间间距 G 的影响。这三个几何输入量之间的相互作用共同决定着材料波动角β 的大小,而这些相互作用具体体现在材料的厚宽比(H/A)和间隙比(G/A)上。

在 PD 模型中引入波动角<sup>[13-19]</sup>,根据纤维束波 动形态的正弦曲线假设对 PD 模型进行修正。其 中,波动角β可以表示为:

$$\beta_{f} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_{w}}{2(A_{w} + G_{w})} \sin \frac{\pi x}{(A_{w} + G_{w})} \right)$$

$$\beta_{w} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_{f}}{2(A_{f} + G_{f})} \sin \frac{\pi y}{(A_{f} + G_{f})} \right)$$
(3)

其中,波动角的最大值为:

$$\beta_{f,\max} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_w}{2(A_w + G_w)} \sin \frac{\pi A_w}{2(A_w + G_w)} \right)$$

$$\beta_{w,\max} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_f}{2(A_f + G_f)} \sin \frac{\pi A_f}{2(A_f + G_f)} \right)$$

$$\overrightarrow{B}_{k}$$
(4)

 $\beta_{f} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_{w}}{2A_{w}} \sin \frac{\pi x}{A_{w}} \right)$   $\beta_{w} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_{f}}{2A_{f}} \sin \frac{\pi y}{A_{f}} \right)$ (5)

其中,波动角的最大值为:

$$\beta_{f,\max} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_w}{2A_w} \right)$$

$$\beta_{w,\max} = \tan^{-1} \left( \frac{\pi H_f}{2A_f} \right)$$
(6)

波动角推导公式:公式(3)及公式(4)分别来自 于 Naik 和 Ganesh 的 SAM 模型以及 MKM 模型。利 用这两组公式对逐步失效模型中关于波动角的计算 过程进行修正,同时分别建立 PWC\_HEM-SAM 模型 和 PWC\_HEM-MKM 模型。根据各个模型预测结果 的对比情况说明波动角对机织复合材料的力学性能 所产生的影响。

3.1.1 厚宽比(H/A)

图 2 为平纹机织复合材料的厚宽比对材料弹性 模量  $E_1$  或  $E_2(E_1 = E_2)$ 的影响,以及几种模型不同 预测结果的对比情况。图中的三条曲线分别描述了 PD 模型、PD\_SAM 模型以及 PD\_MKM 模型所获取 的弹性模量  $E_1$  随厚宽比变化的变化趋势。由图 2 可以看出当厚宽比小于 0.07 时三类模型的预测结 果差异不大;当厚宽比大于 0.1 时开始出现明显差 异,材料的弹性模量  $E_1$  均随着厚宽比的增大而降 低;当厚宽比取 0.25 时即为 Graphite/Epoxy 平纹机 织材料的取值,可以看出:PD 模型所预测的结果远 远大于除 MMPM 模型以外其它模型的预测值。而 修正后的 PD\_SAM 模型与 PD\_MKM 模型的预测结 果处于几种预测结果的集中区域。由此可以得到如 下结论:对于 Graphite/Epoxy 机织复合材料而言波 动角的影响不可忽略。





图 3 为材料弹性模量 E<sub>3</sub> 受厚宽比的影响曲线。 同 E<sub>1</sub> 和 E<sub>2</sub> 的预测结果相比,弹性模量 E<sub>3</sub> 受厚宽比 的影响较小,即材料的波动角对弹性模量 E<sub>3</sub> 的影响 较小,且基于波动角求解方式不同的三类预测模型 所预测的结果所存在的差异也较小。

图4和图5分别描述的是材料的厚宽比对剪切 模量 G<sub>12</sub>和 G<sub>23</sub>的影响。由图可以看出,宽厚比对材 料面内剪切模量影响较小,且与其它模型的预测结 果一致,但对于面外剪切模量而言,波动角的影响相 对于面内剪切模量的影响较大,这是由于波动角导 致的面外方向上纤维含量的增大。



图 3 Graphite/Epoxy 平纹机织复合材料的 厚宽比(H/A)对弹性模量 E<sub>3</sub> 的影响





厚宽比(H/A)对弹性模量 G<sub>23</sub>的影响

图 6 为 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合材料的厚 宽比对材料弹性模量  $E_1$  或  $E_2(E_1 = E_2)$ 的影响。通 过与图2的对比情况可以看出厚宽比对 E-Glass/ Epoxy 机织复合材料弹性模量的影响相对较小,尤 其是对弹性模量  $E_1$  的影响。当厚宽比取 0.25 时, PD 模型对 Graphite/Epoxy 机织复合材料弹性模量 预测结果几乎是修正后的 PD\_SAM 及 PD\_MKM 模 型预测结果的两倍,而对于 E-Glass/Epoxy 机织复合 材料而言三类模型的预测结果的差值仅为20%。 由此可见,不同材料对厚宽比的敏感性不同。对于 Graphite/Epoxy 材料而言,纤维和基体的力学性能 存在着较大的差异,其中 Graphite 的弹性模量  $E_1$  为 388 GPa, 而 Epoxy 的弹性模量 E<sub>1</sub> 仅为 3.5 GPa, 几 乎仅占纤维弹性模量的 0.9%。而 E-Glass/Epoxy 中纤维的弹性模量 E1 为 72 GPa,基体模量则占纤 维模量的4.9%。由此可以得出如下结论:当纤维 与基体的力学性能存在较大差异时,材料的厚宽 比所造成的影响也就较大。由此可以看出材料类 型和厚宽比在一定程度上共同决定着材料的力学 性能。



3.1.2 间隙比(G/A)

作为另外一种协同作用,间隙比用来同时说 明材料的波动角对平纹机织复合材料力学性能的 影响。通过讨论间隙比对均衡型 E-Glass/Epoxy 平 纹机织复合材料力学性能的影响,同时对比厚宽 比对 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合材料力学性能的 影响说明两种形式的协同作用对波动角的影响及 趋势。 图 7 为间隙比对 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合 材料弹性模量 E 的影响,弹性模量  $E_1$  或  $E_2(E_1 = E_2)$ 随间隙比的增大略有增大,而弹性模量  $E_3$  的变 化不明显。图 8 为间隙比对材料剪切模量的影响, 剪切模量  $G_{12}$ 随间隙比的增加而增加,而剪切模量  $G_{13}$ 则随间隙比的增加略有降低。



图 7 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合材料的 间隙比(G/A)对弹性模量 E 的影响



图 8 E-Glass/ Epoxy 平纹机织复合材料的 间隙比(G/A)对弹性模量 G 的影响

图 9 为 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合材料的间 隙比及宽厚比与波动角之间的关系,由图可以看出, 间隙比与厚宽比对材料力学性能的影响是相反的。 这是由于间隙比造成材料波动角的减小而导致面内 纤维向材料力学性能的增强;而厚宽比则相反,厚宽 比的增加会导致材料波动角的增大,从而导致面内 纤维向材料力学性能的损失。



**图**9 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合材料的 间隙比(*G*/*A*)及宽厚比(*H*/*A*)与波动角β之间的关系

#### 3.2 编织角 θ 对机织复合材料力学性能的影响

对于机织复合材料而言波动角β及编织角θ作 为两个重要几何参数直接决定着机织复合材料的力 学性能。波动角对于大多数机织复合材料而言均处 于一个极小量,且影响较小,仅有个别材料会对相对 较大的波动角出现较高的灵敏度,如 Graphite/Epoxy 机织复合材料。而编织角与波动角不同,它直接改变 了材料类型及其力学性能。

图 10 及图 11 分别描述的是编织角由 – 90°到 90°变化的过程中二维双向机织复合材料 E-Glass/ Epoxy 材料的弹性模量、剪切模量及泊松比的变化 过程。由图 10 可以看出,当编织角的值取近似 0° 时,二维双向机织复合材料将转化为单向复合材料, 且其弹性模量 *E*<sub>1</sub> 取最大值;当编织角取 ±90°时,材 料的弹性模量 *E*<sub>1</sub> 的取值最小。而弹性模量 *E*<sub>2</sub> 的变 化趋势与 *E*<sub>1</sub> 相反,弹性模量 *E*<sub>2</sub> 随着编织角度的增





编织角 $\theta$ 的变化对剪切模量G的影响

大而增大,当编织角取 ± 90°时弹性模量  $E_2$  取最大 值,且此时  $E_2$  与  $E_1$  的取值相等,也即此时材料的类 型为平纹机织复合材料。而弹性模量  $E_3$  几乎不受 编织角度的影响,且保持一个定值。

图 11 所描述的是 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合 材料剪切模量与编织角之间的变化关系。由图可以 看出剪切模量 G<sub>12</sub>在编织角取 ±45°时值最大;而剪切 模量 G<sub>13</sub>与 G<sub>23</sub>和 G<sub>12</sub>相比受编织角的影响较小,且当 编织角取 ±90°时 G<sub>13</sub>与 G<sub>23</sub>相等,这一特性满足复合 平纹机织复合材料的力学特征。

## 3.3 编织总体纤维体积分数对机织复合材料力学性 能的影响

当机织复合材料的几何形态保持不变的情况 下,即材料的厚宽比、间隙比以及编织角均取定值 时,总体纤维体积比将作为决定机织复合材料力学 性能的唯一重要参数。它决定着机织复合材料中纤 维的含量,而总体纤维比与纤维束纤维体积比之间 存在一定的比例关系,见公式(7)。

$$V_{f}^{y} = V_{f}^{0} \times \frac{V_{0}}{V_{0} - V_{m}}$$
(7)

图 12 为总体纤维体积比对弹性模量 *E* 的影响, 由图可以看出弹性模量 *E*<sub>1</sub> 或 *E*<sub>2</sub>(*E*<sub>1</sub> = *E*<sub>2</sub>)受总体纤 维体积比的影响较大,它们随着总体纤维体积比的增 加而增大,且随着总体纤维体积比的增加其增大的趋 势也越来越快,呈现一种指数关系的形式。而总体纤 维体积比对 *E*<sub>3</sub> 的影响不明显。图 13 显示的是总体 纤维体积比对材料剪切模量 *G* 的影响,由图可以看出 剪切模量随总体纤维体积比变化的趋势与弹性模量



图 12 总体纤维体积分数对弹性模量 E 的影响



图 13 总体纤维体积分数对剪切模量 G 的影响

类似,剪切模量 G<sub>12</sub>与总体纤维体积比存在明显的指数关系,随着总体纤维体积比的增加 G<sub>12</sub>的大小则急速增长,且总体纤维体积比越大效果越明显。而剪切模量 G<sub>13</sub>及 G<sub>23</sub>的变化则随总体纤维体积比的变化不明显。

## 4 结论

本文分别通过机织复合材料的波动角 θ、编织 角β以及总体纤维体积比分析了机织复合材料的几 何参数对其力学性能的影响。同时,根据机织复合 材料的几何形态对波动角进一步划分,分别讨论了 厚宽比 H/A 以及间隙比 G/A 与波动角之间的关系, 讨论了它们对材料力学性能的影响,最终明确了各 个参数对材料性能的影响。

几何参数对材料力学性能的影响可以总结如下:

(1)对于大多数材料的平纹机织复合材料而 言,其波动角一般处于一个极小值,且波动角的影响 可以忽略不计,但对于部分材料其波动角的影响比 较明显。例如 Graphite/Epoxy 平纹机织复合材料, 当机织复合材料中纤维与基体的材料属性的差距较 大时,波动角对该机织复合材料力学性能的影响就 不可忽略,随着波动角的增大材料的力学性能有明 显的弱化,如果忽略波动角的影响会造成预测结果 的巨大差异。而对于 E-Glass/Epoxy 平纹机织复合 材料而言,虽然材料的力学性能在较大波动角的影 响下有所变化,但其影响并不明显。

(2)厚宽比与间隙比对波动角的影响相反,厚 宽比增大则波动角增大,而间隙比增大波动角则减 小。且随着波动角的增大,平纹机织复合材料的弹 性模量 *E*<sub>1</sub> 及 *E*<sub>2</sub> 的大小有所减小,而对弹性模量 *E*<sub>3</sub> 及剪切模量大小的影响并不明显。

(3)编织角对机织复合材料力学性能的影响比 波动角显著,它能够直接决定材料的类型及其力学 性能。当偏轴向纤维束绕着主轴向纤维束转动的过 程中,材料的力学性能会按照一定形式波动,使材料 的力学形态在单向复合材料与平纹机织复合材料的 力学性能中相互转变。

(4) 机织复合材料的总体纤维体积比对平纹机 织复合材料力学性能的影响也较为明显。在其它几 何参数不变的情况下,总体纤维体积比直接决定着 纤维束的力学性能。总体纤维体积比越大纤维束的 力学性能也就越强,机织复合材料的力学性能也就 越强,且这一增长趋势接近于指数增长,即当总体纤 维体积比越大时,材料力学性能的增长就越快。

### 参考文献:

- [1] 关留祥,李嘉禄,焦亚男,等. 航空发动机复合材料
   叶片用 3D 机织预制体研究进展[J]. 复合材料学
   报,2018,35(4):748-759.
- [2] 张璇. 三维机织复合材料机匣 RTM 成型仿真分析 [J]. 塑料科技, 2018, 46(6): 88-92.
- [3] 高雄. 基于不同三维机织结构的碳纤复合材料整体 力学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [4] 郑晓霞,郑锡涛, 缎林虎. 多尺度方法在复合材料力学 分析中的研究进展[J]. 力学进展, 2010,40(1):41-56.
- [5] 罗嘉. 基于宏-细观多尺度建模的机织复合材料渐进 损伤和失效分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017
- [6] 陈继刚,薛亚红,闫世程.二维机织复合材料弹性常数的有限元法预测[J].复合材料学报,2016,33 (8):1702-1709.
- [7] 王新峰. 机织复合材料多尺度渐进损伤研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

- [8] 白江波,熊峻江,高军鹏,等.间隙率对三轴向机织
   复合材料弹性性能的影响[J].材料工程,2014(3):
   14-20.
- [9] 李明,陈秀华,汪海.二维平纹机织复合材料弹性性能预测的域分解方法[J].复合材料学报,2012,29
   (6):197-205.
- [10] LI J J, ZHAO M Y, GAO X S, et al. Modeling the stiffness, strength, and progressive failure behavior of woven fabric-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(6):735-747.
- [11] ISHIKAWA T, CHOU T W. Stiffness and strength behavior of woven fabric composites [J]. Journal of Materials Science, 1982(17): 3211-3220.
- [12] NAIK N K, GANESH V K. Prediction of on-axes elastic properties of plain weave fabric composites [J]. Composites Science and Technology, 1992, 45(2):135-152.
- [13] BARBERO E J, DAMIANI T M, TROVILLION J. Micromechanics of fabric reinforced composites with periodic microstructure [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005,42(9-10):2489-2504.
- [14] BARBERO E J, TROVILLION J, MAYUGO J A, et al. Finite element modeling of plain weave fabrics from photomicrograph measurements [J]. Composite Structures,

2006,73(1):41-52.

- [15] GANESH V K, NAIK N K. Failure behavior of plain weave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading: I—Laminate geometry [J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(16): 1748-1778.
- [16] NAIK N K, GANESH V K. Failure behavior of plain weave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading: II—Analytical predictions [J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(16): 1779-1822.
- [17] YURGARTIS S W, MOREY K, JORTNER J. Measurement of yarn shape and nesting in plain-weave composites [J]. Composites Science and Technology, 1993, 46;39-50.
- [18] KUHN J L, CHARALAMBIDES P G. Modeling of plain weave fabric composite geometry [J]. Journal of Composite Materials, 1999,33(3): 188-220.
- [19] ADUMITROAIE A, BARBERO E J. Beyond plain weave fabric—I. Geometrical model [J]. Composite Structures, 2011,93(5):1424-1432.

#### 作者简介

李京菁 女,博士,工程师。主要研究方向:结构强度,冲击 动力学,复合材料力学。E-mail: lijingjing1@ comac. cc

# Influence of geometrical parameters on mechanical properties of the woven composites for the pylon

#### LI Jingjing \*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The undulation of bundles in woven composites was introduced into the progressive damage model (PD model), and the updated PD model was verified by the results of the test and other methods. Meanwhile, the plain woven composite materials' elastic properties affected by the geometrical and material parameters were analyzed by this updated PD model. The parameters such as bundle width, bundle thickness, gap, braid angel, undulation angel and overall volume fraction of woven composite materials are discussed using the updated PD model. In conclusion, the mechanical property of Graphite/Epoxy woven composites is deeply influenced by undulation angel compared to E-glass/Epoxy woven composites, because of the big difference of mechanical property between the two contents of the material; the effect of braid angel is comparatively larger than the undulation angel on the in-plane mechanical property of woven composites; the overall volume fraction positively affects the bundle's volume fraction, and there is an exponential relationship between the volume fraction and the mechanical property of the woven composite materials.

Keywords: woven composite material; geometrical parameters; mechanical property; progressive damage model; undulation angel; braid angel; volume fraction

<sup>\*</sup> Corresponding author. E-mail: lijingjing1@comac.cc