

复合材料层压板三维方向 基本工程常数测定方法探讨

北京航空工艺研究所 华一轮

一、前言

随着复合材料应用的发展,复合材料设计计算的范围也随之扩大,由平面问题(二维问题)发展到立体问题(三维问题)。在1-2面内层压板基本性能的计算可沿用“复合材料设计”中的经典层压板理论,用九个基本工程常数进行计算,这些工程常数的测定方法比较成熟,具体数据也能查到。但在1-3、2-3面内,对单向板和 $\pm 45^\circ$ 板的基本性能测定方法及具体数据则很少能查到,也很少有资料报道。本文是作者对单向板和 $\pm 45^\circ$ 板在1-3面与2-3面内基本性能测定方法进行的探索。现把具体所用的方法及取得的结果作如下介绍。

二、三维测试对试件的要求

三维测试与二维测试不同之处在于要使试件能测定1-3面及2-3面的性能。然而,国家标准规定的试件厚度为2mm,在厚度方向不易贴片。本试验对三维拉、压性能的测试采用厚度为8mm的试件,剪切性能则视测试方位不同而分别采用厚度为3mm与8mm的试件。

试件的原材料是以环氧648+BF₃MEA作基体,T300-3000B碳纤维增强。层压板在热压罐内加温加压固化,经无损检测确保试板质量合格后加工成试件。

三、三维压缩 E_3^c 及 μ_{ij}^c 的测定

1.测试原理 压缩试验的技术关键是如何保证加载后试件测试段应力分布均匀,防止试件在加压过程中失稳,防止试件端头压塌。这些要求除了对试件两加压力端的平行度加工要求较高外,其他要求比薄试件容易做到。又由于测定模量与泊松比时并不要求试件加载至破坏,因而难度要小些。本试验采用图1所示的夹具夹持安装试件。

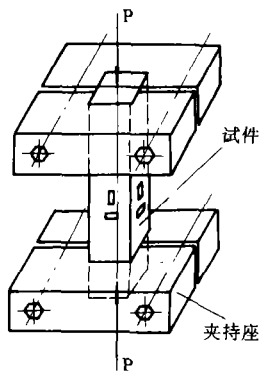


图1 压缩试验试件夹持安装图

2.试件尺寸

(1) 1, 2向试件 $b \times h \times l = 10 \times 8 \times 50$ (mm)

(2) 3向试件 $a \times b \times h = 30 \times 30 \times 8$ (mm)

3.试件测试方位 试件测试方位及应变片的粘贴位置见图2。

4.测试结果 三个方向的压缩弹性模量与6个泊松比见表1。为了比较用本方法与国家标准测试方法在测试结果上的差异,在1, 2向的测试项目采用了两种测试方法。

按照层压板原理,已知两个方向的弹性模量及一个泊松比,第二个泊松比可计算出来,其关系式如下:

$$\frac{E_i}{\mu_{ij}} = \frac{E_j}{\mu_{ji}} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

六个泊松比中三个为测试值,三个为计算值(括号内为计算值)。

这些测试结果是否正常,可用几种方法进行判断。

1) 关于两种方法测试结果是否一致。对1, 2向的性能,作者用了两种方法进行测试,其中第一种是国家标准的方法。如果用第二种方法测得的结果与第一种无显著差异,那就说明第二种方法可行。现在用t检验的方法来分析两种测试方法测得的总体均值是否有显著性差异。

设国标(第一种方法)测得的总体均值为 μ_0 ,第二种方法测得的总体均值为 \bar{X} 。

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s} \sqrt{n}$$

式中s为均方差,n为试件数量。如果计算得的|t|值小于t检查表中查得的 t_α 值,说明两种结果无显著差异,反之则差异显著。现把计算结果列于表2。

检验结果说明,当选取的显著性水平要求较低时($\alpha = 0.001$),两种方法测得的 E_1^c, E_2^c 值差异并不显著,而选取的显著性水平要求较高时($\alpha = 0.05$),两种方法的测试结果就有显著差异; μ_{12}^c 用两种方法的测试值无显著差异,也就是说,厚板测试经进一步改进后是可以满足测定这些性能的要求的。

2) 关于数据间的相互关系是否正确

按常规,单向板的 $E_2^c \approx E_3^c$, $\mu_{12}^c \approx \mu_{13}^c$ 。 $\pm 45^\circ$ 板, $E_1^c = E_2^c$, $\mu_{21}^c = \mu_{12}^c$, $\mu_{23}^c = \mu_{13}^c$, $\mu_{31}^c = \mu_{32}^c$ 。单向板的 $E_3^c \approx \pm 45^\circ$ 板的 E_3^c 。

测得数据说明,相互关系正确。

四、三维拉伸 E_1^t 及 μ_{ij}^t 的测定

1.测试原理 对于拉伸试验的主要要求是试件受载后有均匀的应力场,试件夹持段不被夹坏。用于1, 2向测定2mm试件拉伸的夹头,对厚试件同样适用。所缺少的是第3方向(即层间方向)拉伸性能的测试方法。本试验采用了图3所示的装置测定层间拉伸性能,试件用胶剂剂

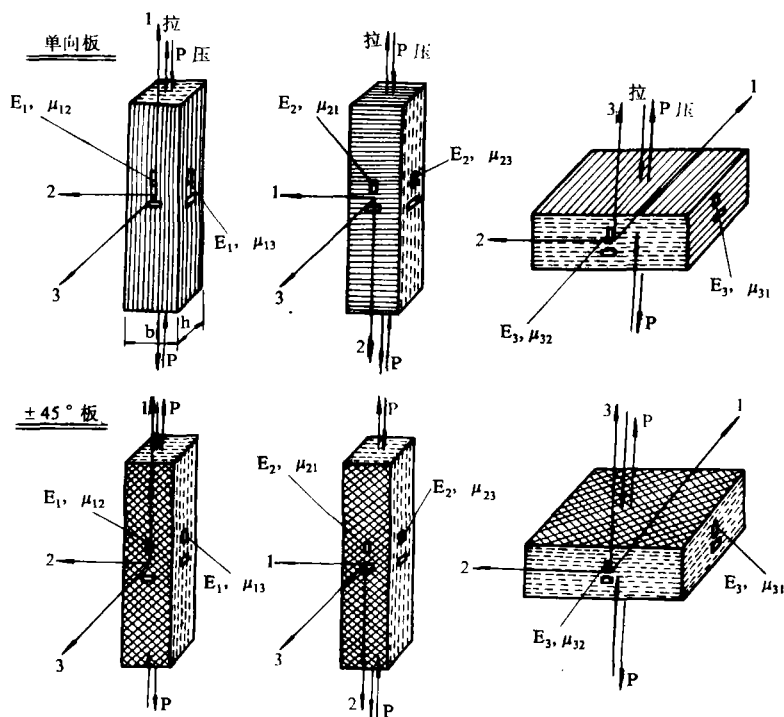


图 2 三维拉、压 E_i 及 μ_{ij} 测试方位示意图

表 1 三维方向压缩弹性模量 E_i^c 及泊松比 μ_{ij}^c 的测试结果

层压板种类	测试方法	E_1^c (GPa)	E_2^c (GPa)	E_3^c (GPa)	μ_{12}^c	μ_{21}^c	μ_{13}^c	μ_{31}^c	μ_{23}^c	μ_{32}^c
单向板	国标	132	10.4		0.34	(0.0268)				
	厚试件	108.3	9.3	10.9	0.345	(0.0284)	0.285	(0.0282)	0.525	(0.607)
±45°板	国标	14.3	14.3							
	厚试件	14.7	14.7	9.8	0.83	(0.83)	0.136	(0.091)	0.136	(0.091)

表 2 单向板 E_1^c , E_2^c , μ_{12}^c 两种测试结果 t 检验

项 目	μ_0	\bar{X}	$\frac{\bar{X} - \mu_0}{\mu_0} \%$	N=n-1	S	t	$t_{0.05}$	$t_{0.001}$	判 断
E_1^c	132GPa	108.3GPa	17.9	3	6.1	-7.77	3.18	12.94	$t_{0.05} < t < t_{0.001}$
E_2^c	10.4GPa	9.3GPa	11.5	8	1.01	-3.27	2.31	5.04	$t_{0.05} < t < t_{0.001}$
μ_{12}^c	0.34	0.345	1.5	3	0.024	0.42	3.18	12.94	$ t < t_{0.05}$

粘在夹头上，夹头装在有配合槽、能调节对中的拉杆上实行拉伸。

2. 试件尺寸

(1) 1, 2 向试件 $b \times h \times l = 10 \times 8 \times 170$ (mm)

(2) 3 向试件 $a \times b \times h = 30 \times 30 \times 8$ (mm)

3. 测试方位 同图 2，不同的是载荷方向与压缩相反。

4. 测试结果 见表 3。

表 3 三维方向拉伸 E_i^t 及 μ_{ij}^t 的测试结果

层压板种类	测试方法	E_1^t (GPa)	E_2^t (GPa)	E_3^t (GPa)	μ_{12}^t	μ_{21}^t	μ_{13}^t	μ_{31}^t	μ_{23}^t	μ_{32}^t
单向板	国标	135.4	8.8		0.31	(0.0192)				
	厚试件	127.5	9.4	10.25	0.33	(0.0243)	0.37	(0.00297)	0.49	(0.534)
±45°板	国标	15.55	15.55		0.76	0.76				
	厚试件	17.2	17.2	—	0.72	0.72	—	—	—	—

(1) 两种方法测试结果的差别

设国标的测试结果为 μ_0 ，厚试件的测试结果为 \bar{X} ，两值的差异见表 4。

表 4 结果说明，四个项目中有两项不论显著性水平要求高低如何，测试结果无显著差异。有两项处于中间状态。当 $\alpha=0.05$ 时，有显著差异；当 $\alpha=0.01$ 时则无显著差异。总的来说拉伸的显著性水平要求取得比压缩的高 ($\alpha=0.05$ 及 0.01)。能取得这样的结果，说明拉伸用两种

方法测试结果的差异比压缩的小些，即拉伸性能的第二种测试方法可行性更佳。

(2) 数据间的相互关系

单向板 $E_2^I \approx E_3^I$, $\mu_{12}^I \approx \mu_{13}^I$ 。

$\pm 45^\circ$ 板 $E_1^I = E_2^I$, $\mu_{12}^I = \mu_{21}^I$, $\mu_{13}^I = \mu_{23}^I$ 。

单向板的 E_1^I 略大于 E_1^C , E_2^I 略小于 E_2^C 。

除了最后一项稍差外，其余相互关系正常。

表 4 单向板 E_1^I , μ_{12}^I , $\pm 45^\circ$ 板 E_1^I , μ_{12}^I 两种测试结果 t 检验

项目	μ_0	\bar{X}	$\frac{\bar{X}-\mu_0}{\mu_0} \%$	$N=n-1$	S	t	$t_{0.05}$	$t_{0.01}$	判 断
单向 E_1^I	135.4GPa	127.5GPa	-5.8	5	3.51	-5.03	2.57	4.03	$t_{0.05} < t < t_{0.01}$
单向 μ_{12}^I	0.31	0.33	6.5	2	0.036	0.78	4.30	9.93	$ t < t_{0.05} < t_{0.01}$
$\pm 45^\circ$ E_1^I	15.55GPa	17.2GPa	10.6	4	1.64	2.012	2.78	4.60	$ t < t_{0.05} < t_{0.01}$
$\pm 45^\circ$ μ_{12}^I	0.76	0.72	-5.3	2	0.0115	-4.92	4.30	9.93	$t_{0.05} < t < t_{0.01}$

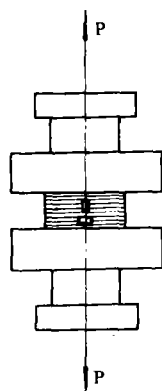


图 3 第 3 方向拉伸性能测定方法

五、三维剪切模量 G_{ij} 的测试

1. 测试原理 剪切性能通常采用弯曲的方法来测定。要准确地测定剪切性能，必须使弯曲造成的不利影响减至最小。本方法采用反四点弯曲的方法测定 G_{ij} 。测试原理见图 4。

图 4 所示是反四点弯曲时试件上的载荷分配与弯矩、剪力图。说明在试件中点弯矩为零，处于纯剪状态。从此处测得的剪切模量 G_{ij} 应是准确的。

2. 试件尺寸

测定 G_{12} 的试件 $b \times h \times l = 10 \times 3 \times 54$ (mm)

测定 G_{13} 、 G_{23} 的试件 $b \times h \times l = 6 \times 8 \times 54$ (mm)

3. 测试方位 见图 5。

4. 测试结果 见表 5。

剪切模量的测试，除单向板的 G_{12} 外（二种方法结果一致），其余只采用了一种方法。各数值间的关系应满足如下几条：

单向板： $G_{12} \approx G_{13}$ $G_{23} < G_{12}$, G_{13} 。

$\pm 45^\circ$ 板： $G_{13} = G_{23}$ $G_{12} > G_{13}$ 。

$\pm 45^\circ$ 板的 $G_{12} >$ 单向板的 G_{12} 。

测试值满足了以上的关系，但具体数据显示出 $\pm 45^\circ$

板的 G_{12} 偏低，单向板的 G_{12} 及 G_{13} 差别也稍大些。

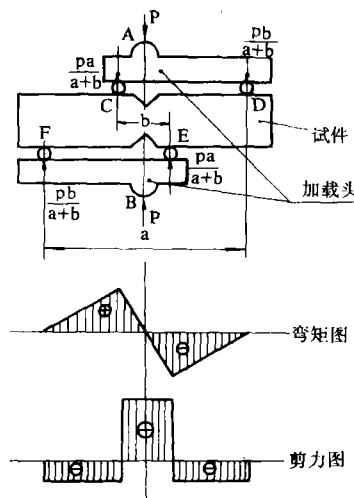


图 4 反四点弯曲测量剪切性能原理图

表 5 三维方向剪切模量 G_{ij} 的测试结果

层压板种类	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
单向板	4.45	4.93	1.15
$\pm 45^\circ$ 板	19.6	4.18	4.18

六、讨论

本文阐述了拉、压、剪三维性能的测试方法以及所得的测试结果说明了以下几点：

1. 本试验采用的测试方法在原理上是正确可行的，测得数据的数值和相互关系上基本正确。

2. 由于是初次尝试，试验研究工作还处于探索阶段。试验数据做得不多，在个别数值相近的数据关系上不太合

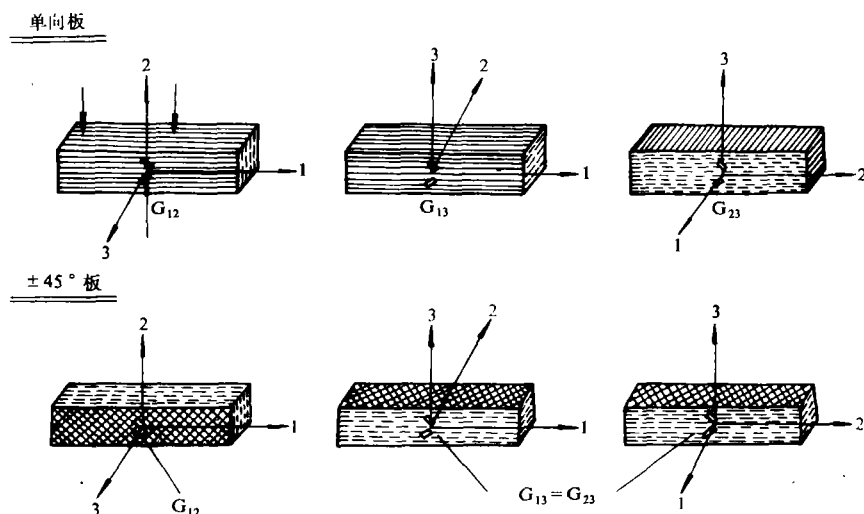


图5 剪切模量 G_{ij} 测试方位示意图

理, $\pm 45^\circ$ 板的 G_{12} 值偏低, 这些都说明测试方法还不够完善。但从数据的整体来看, 大约有一半是正确的; 另一半处于中间状态, 即显著性水平要求高些, 不能满足要求; 显著性水平要求低些, 能满足要求。这些情况说明, 经过进一步改进测试方法, 严格试件加工和贴片测试, 这

些测试方法是可以用于实际测试复合材料的有关性能的。

3. 本文所得的这些数据, 基本反映了该种材料的性能水平, 可供设计三维计算时参考。

(601 研究所范式忠同志对作者该项工作提出了宝贵意见, 李忠贤、刘永增同志参加了测试工作, 在此表示衷心感谢。)

层压板 ARALL 及其应用

ARALL 是芳酰胺铝层压板 (ARamid ALuminium Laminate 的英文缩写), 是 Alcoa 公司的商标, 于 70 年代后期由 Delft 大学和 Fokker 飞机公司首先研制。1981 年以来, 美国 Alcoa 公司进一步开发并商品化。3M 公司与 Alcoa 公司合作发展了用于该层压板的芳酰胺纤维/环氧树脂预浸料系统。

Alcoa 公司最近宣布了 ARALL-3 层压板首次应用于 C-17 军用运输机货舱门蒙皮。与使用普通铝合金相比, 在 9.7m 长, 5.6m 宽的部位使用 ARALL 层压板可减重 60kg, 约轻 26%。

ARALL 层压板由一层预浸料 (灌封在结构环氧胶粘剂中的单向芳酰胺纤维) 夹在铝合金薄板之间构成。纤维取向与铝板轧制方向平行。这种固化的混合复合材料的特点是有自止裂能力, 是以拉伸为主, 疲劳和断裂为重要判据的结构理想候选材料。它的密度比铝合金低 15~20%, 拉伸强度 (沿纤维方向) 比 7075 或 2024 高 60%, 刚性相同, 可以采用普通金属加工方法生产。此外, 层压板外层金属使纤维/树脂系统不受湿气、雷电和冲击引起的损伤。目前可以提供 4 种产品。其中 ARALL-1, -2, -3 层压板是由 50 (重量) % 纤维和 50 (重量) % 树脂的预浸料分别同铝合金 7075-T6, 2024-T3 和 7475-T76 在 120℃ 固化组成的, 最高使用温度为 90℃。ARALL-4 是由预浸料和铝合金 2024-T8 在 175℃ 固化而成的, 最高使

用温度 160℃。每层铝板厚度为 0.3mm, 预浸料厚度为 0.2mm。标准层压板结构为 2/1 (2 层金属板, 1 层预浸料) 到 5/4 (5 层金属板, 4 层预浸料) 几种。C-17 运输机货舱门蒙皮选用 3/2 和 4/3 的 ARALL-3。

除 C-17 货舱门蒙皮外, Douglas 和 Alcoa 公司还对 ARALL 的其他可能应用范围进行鉴定, 包括机身压力舱隔板、大货舱舱门蒙皮、垂直和水平安定面的蒙皮等。Fokker 公司计划把 ARALL 用于 Fokker-100 应急舱门, Fokker-50 改型的下翼板, Fokker-100 改型的机身蒙皮。Lockheed 公司计划把 ARALL 用于 C-130 襟翼下蒙皮。Boeing 公司将其用于 Boeing707 改型的 E-3AWAC 舱板。

(赵金凤摘译)

一种新的粘接技术

美国宾夕法尼亚州一家航空产品和化学制品有限公司, 开发出一种采用氟化方法处理塑性表面, 进而达到牢固粘接的新技术。该处理方法避免了因溶剂析出和废弃物产生所出现的问题及所需的费用。它可提供以前使用涂层和粘接剂粘接塑料和橡胶时所达不到的粘接水平。与其它化学改性技术相比, 这种氟化工艺是通过控制极化作用来提高粘接强度的, 而这种极化作用又是通过基质表面上的化学反应产生的。它能依材料和用途不同进行调整。这种表面处理是均匀的、稳定的, 可在室温及大气压下实施。

(赵文龙摘译)