

《成飞情报》  
92·增刊

# 复合材料手册译文集

## 设计分册



**COMPOSITES**

成都飞机工业公司技术情报室

# 前 言

《复合材料手册》为《工程材料手册》的第一卷,由美国金属学会国际手册委员会指导编辑,从世界各国汇集了大量的复合材料技术数据和情报信息,是当今世界上公开发表的复合材料资料中规模最大、最完善和最现代化的工程资料集。手册包括复合材料应用有关的各个方面的主要课题:纤维和基体以及复合材料本身的性能和成形方法,复合材料及其结构的分析与设计,复合材料测试,复合材料的制作和装配工艺,质量控制,失效,应用和经验等。本手册将为从事复合材料研制的研究人员、工程师和技术人员解决一系列最新的实际工程问题,提供有益的帮助。

翻译出版的复合材料手册将分为设计、工艺二个分册。本分册为设计分册,由原文手册中的第四章和第七章中的部份文章组成,内容有:复合材料分析设计和复合材料结构分析设计。

复合材料分析设计的一章中,计有:“复合材料分析设计综述”、“设计要求”、“材料性能分析”、“复合材料的阻尼特性分析”、“层压板的强度、失效和疲劳分析”、“层压板的断裂分析”、“复合材料的损伤容限”等7篇文章。对复合材料单向板的弹性模量、热膨胀系数、湿胀系数、粘弹性、热和电的传导性、拉伸、压缩和剪切强度、复合应力下的强度、疲劳、蠕变和冲击损坏特性以及迭层板的薄膜和弯曲板的应力—应变关系、湿热效应、非弹性性能、强度和失效、层间应力、断裂、疲劳、冲击和损伤容限特性进行了论述,供设计选用。

复合材料结构分析设计一章中,计有:静强度、疲劳强度、稳定性考虑、层板优化设计的排序法、结构分析、结构数值设计与分析,连接设计等7篇文章。文中强调了复合材料结构的分析设计技术难度远高于金属结构,指出在整个设计和制造过程中,设计人员工作的好坏将直接影响产品成本的高低。要求设计人员在整个研制过程中,要始终扮演主要角色。对复合材料结构的静强度、疲劳强度和稳定性作了深入的研究与讨论。同时,还介绍了复合材料迭层板的刚度和强度排序优化设计法,有限元应力分析方法的工程应用及其各种程序的编辑与比较。在连接设计一节中,介绍了适用于工程实践的分析方法及试验鉴定方法。

总之,本设计分册的主要内容为复合材料与其结构的分析设计,是每个复合材料设计人员必须掌握的基本知识;同时可供从事复合材料研究、生产、使用的工程技术人员及有关大专院校师生参考。

本分册由成都飞机工业公司科技委组织,公司情报室编辑出版;(薛炽寿、陈宗瑾、林宗轩主审;陈思秋、冯钊、陈嘉友、叶雷鹰、王春林、王绍俭等翻译和校对;王绍俭、雷泽奇主校;罗一才编辑。

《复合材料手册设计分册》

编 译 组

# 复合材料手册译文集

## ——设计分册

### 目 录

<b>第一章 复合材料分析和设计</b> .....	(1)
复合材料分析和设计综述.....	(3)
设计要求.....	(10)
材料性能分析.....	(16)
复合材料阻尼特性分析.....	(44)
层压板强度、失效和疲劳分析.....	(59)
层压板断裂分析.....	(82)
复合材料损伤容限.....	(91)
<b>第二章 复合材料结构分析与设计</b> .....	(102)
静强度.....	(103)
疲劳强度.....	(108)
稳定性考虑.....	(118)
层压板优化设计的排序法.....	(125)
结构分析.....	(140)
结构数值分析与设计.....	(148)
连接设计.....	(172)

# 第一章 复合材料分析和设计

陈嘉友译 王绍俭校

## 导 论

为充分利用复合材料优点,需要掌握设计过程中的分析工具和方法。“复合材料分析和设计综述”一文总结了这些设计概念和复合材料结构特性,并指出了可行的分析和试验方法。

单向复合材料、迭层板、试验方法及结构分析和设计各方面都需要考虑和掌握。本节集中研究前两个方面的问题。这里包括文章“结构分析的计算机程序”,因为它包含可用于单向复合材料和迭层板程序。此外,这篇文章中还包含了结构分析程序,它将在“复合材料结构分析和设计”一章中进行深入研究。

“设计要求”一文对性能的藕合作用、特性、制造方法以及影响材料选择的成本进行了描述。后面的几篇文章论述了基本的单向纤维复合材料的特性。

单向板复合材料性能必须仔细考虑,它是表征纤维增强复合材料的数据。以上称为有效性能,即与其体积含量有关的状态变量的统计平均值。需要掌握的性能包括:

- 弹性模量
- 热膨胀系数
- 湿膨胀系数
- 粘弹性性能
- 热电传导
- 拉伸、压缩和剪切强度
- 复合应力下的强度
- 疲劳、蠕变和冲击损伤特性

“复合材料阻尾特性分析”一文对粘弹性性能进行了进一步考查,并给出了试验数据。

迭层板分析是另一重要问题。迭层板分析的目标是根据给定的复合材料单向板性能,研究计算整个迭层板性能的方法。分析目标包括以下各方面:

- 薄膜和弯曲响应的应力—应变关系
- 湿热效应
- 非弹性表现
- 强度与破坏
- 层间应力
- 裂纹
- 疲劳
- 冲击及损伤容限

这些专题反映出掌握结构迭层特性的复杂性。当与迭层结构有联系的大量几何变量增加到将要考虑的性能表中时,就明显需要一个分析方法。通常,分析加上一定的试验,才能给出结构分析和设计确定迭层板性能。

迭层板理论基础在迭层板性能分析一文中进行了陈述。接下去的一系列文章涉及到迭层板响应的各重要的特定方面,其侧重点为失效。

掌握了单层性能和迭层性能之间的关系以后,就可着手进行材料性能的统计计算工作。详细的问题在“利用试验数据获得设计性能”中进行讨论。

纤维复合材料分析和设计方法,目前已发展到用计算机进行计算的阶段。最后两篇文章回顾了复合材料可用的计算机软件,给出了基本材料和迭层板性能的特定编码。

本节表明复合材料和结构的分析与设计确实存在一个理论方法。使用这些方法,纤维增强复合材料相互之间以及与其他材料的结合应用将会进一步增长。改善材料组合性能,简化纤维增强复合材料的制造过程,将会促进该材料作为重要的结构材料的应用。

# 复合材料分析和设计综述

陈思秋译 叶雷鹰校

用混合材料弥补单一材料的性能缺欠具有悠久的历史,例如古代将稻草掺进泥砖,或者今天的复合材料,都是利用了多种材料的优点。古罗马的工匠们用石头凝成混凝土来修造建筑物,拯救了罗马帝国。不幸的是,这一方法随着罗马帝国的灭亡而消亡了,直到波兰水泥的发明才得到重现。日本人将坚硬而脆性的材料与延展性材料相结合,制作出了按今天的标准来看也是相当好的层压刀剑。两类复合材料继续发展,泥砖已发展成增强塑料,它在主要考虑成本的领域得到越来越广泛的应用;而纤维复合材料在材料性能为关键的领域占据统治地位,如航空结构。

本文涉及复材的特性、使用潜力、使用原因,以及使用中的一些原则。

**纤维增强材料** 该材料在以下几方面得到广泛应用:

- 天然纤维(黄麻和剑麻)。在过去是出于

经济考虑而使用的,但现在一般用性能较好、成本较低的合成纤维代替。

- 合成有机纤维。热塑性的(如尼龙、聚酯、聚丙烯)和热固性的(如芳纶)两者都具有低密度和高强度,但刚度低。由于刚度低,其应用范围受到了限制。

- 合成无机纤维(如玻璃、硼、硫、氧化铝和氧化硅)。由于成本低应用最广泛,其中玻璃的应用远超过了其它纤维。

各种增强材料性能在表1中表示。密度从聚脂的  $1.36\text{g/cm}^3$  变化到氧化铝的  $3.96\text{g/cm}^3$ 。强度从聚脂的  $1100\text{Mpa}$  ( $160\text{ksi}$ ) 变化到 S—玻璃钢的  $4130\text{Mpa}$  ( $600\text{ksi}$ )。刚度的范围为  $13.8\text{Gpa}$  ( $2.0 \times 10^6\text{psi}$ ) 到大于  $345\text{Gpa}$  ( $50 \times 10^6\text{psi}$ )。一种或多种纤维可以和很多基体材料的任何一种结合。因此,复材设计者对机械性能的选择范围比采用传统结构材料时更广泛。几乎所有这些增强材料(除聚脂类)在能

表1 纤维材料性能

材 料	密度 $\text{g/cm}^3$	纵向杨氏模量		拉伸强度	
		Gpa	$10^6\text{Psi}$	Mpa	Ksi
聚脂.....	1.36	13.8	2.0	1100	160
E—玻璃.....	2.52	72.3	10.5	3450	500
S—玻璃.....	2.49	85.4	12.4	4130	600
Kelvar49.....	1.44	124	18.0	2760	400
T—300.....	1.72	218	31.6	2240	325
VSB—32.....	1.99	379	55.0	1210	175
FP.....	3.96	379	55.0	1380	200
硼.....	2.35	455	66.0	2070	300
碳化硅.....	3.19	483	70.0	1520	220
GY—70	1.97	531	77.0	1720	250

够承受的整个拉伸载荷范围内均表现出线性应力—应变关系,如图1所示。由图1可见,模量很高的纤维仅能承受1%应变或更低;芳纶和玻璃能够承受3~4%应变。但是,受基体材料的非线性响应影响,在复材中不能得到和纤维的相同的线性范围。

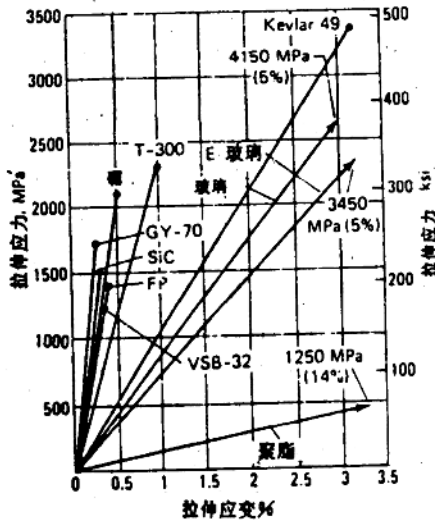


图1 各种纤维的应力—应变关系。一般地,纤维刚度越大,破坏应变越小。只有树脂的应力—应变曲线在破坏应力之下不符合线性变化

**基体材料** 基体材料的范围从树脂类到金属和陶瓷。树脂类具有低密度因而强度低,非线性应力—应变关系(图2)以及高破坏应变等特性。树脂基体复材更易制作,能够比金属或陶瓷基复材具有更高增强材料体积比含量。鉴于此,树脂类是最广泛使用的基体材料。因此,本文重点论述树脂基复材技术,包括设计和分析方法,以及如何使其缺陷降至最低从而最大程度发挥其优点。

树脂基材料有热塑性和热固性两种。热塑性材料能够重复加热和反复成型,主要用于注模成型或热成型石墨层压板。注模所用树脂通常含有短纤维增强剂,包括丙烯、尼龙、乙烯(聚乙烯氯化物、聚乙烯醇缩醛、偏二

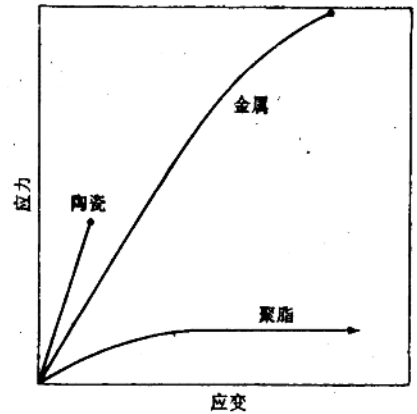


图2 三种基体材料的特征应力—应变曲线。陶瓷直到破坏仍然具有线性应力—应变曲线,破坏应变低。金属曲线具有严格线性部分,破坏前屈服,具有几倍于陶瓷的破坏应变。树脂在低应力下屈服,到破坏时应变超过金属的

氯乙烯)、聚乙烯、聚丙烯和丙烯腈(ABS)。用于层压板的树脂包括丙烯、聚砜或聚醚砜和聚醚。这些热塑性树脂主要在需要考虑制造成本,特别是在复杂外形的成型时选用。复材结构一般选用热固树脂,包括:树脂类——成本低,抗化学腐蚀性能高;乙烯脂——强度容易受工艺影响;环氧——高强度。其它热固树脂具有特殊性能,如丁二烯用来改善电性能,聚酰亚胺和硅树脂可提高使用温度。热塑性材料可以在高于205°C(400°F)使用。由于环氧的结构性能优异,可作为纤维复材的基体材料。

### 复合材料

纤维增强复材的基本结构块是纤维在基体内沿单向排列,如图3所示。在层板单元中,基本纤维单位一般为纤维束,它含有上百根纤维。这些纤维束可以彼此分开,如图4所示,或者更一般地说,它们可以分开或接合从而在整个横切面上形成任意的但较均匀的分佈(图5)。

图5显示了复材中典型的杂乱情况,孔隙不规则,纤维之间有一定接触。所显示的局

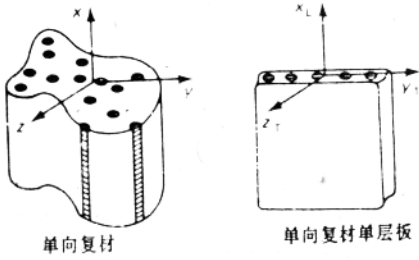


图3 基本纤维复材单位和坐标轴系。对于单层板,下标L、T用于表示纵向和横向



图4 垂直于纤维方向的单层板横切面,显示了纤维束

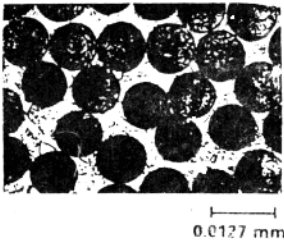


图5 在单层板内典型的玻璃纤维随机分布

部横切面为玻璃纤维情况;碳纤维也在分布上随机,而且在纤维横切面上具有一定的不规则性。在适当的放大倍数下也可见金属晶体结构具有类似的不规则形式。金属和复材都存在杂乱排列,其程度随放大倍数而变化。

排列杂乱程度随放大倍数而变化这个情况对于了解复材机理分析的研究是重要的。例如考虑图6中所示的 embed 在热解石墨基中的碳化硅纤维,在10000X时,可以辨认单个组分,这时适于考虑局部组分性能。因此,可以将纤维处理为具有统计强度分布和某些可定义几何形状的脆性材料。各组分用于定义微观尺度上的特征单元。在1000X上,可以看见大量的这类单元。综合起来,它们定义典型区域,称作典型体积元(RVE)。该元的性质用来定义材料性能。正是在RVE尺度上(相应于纤维束及其相关基体),能够定义复材的等效性能。他们是状态变量的平均值,即为材料性能。通过RVE,材料性能能够从微观尺度转换到宏观尺度。单元的组合性能为平均体积性能,它逐点变化(这里点可以选在RVE中心上),此时在宏观上尺度(200X)上定义统计变量。这些组合与整个材料相比仍然具有非常小的尺寸,而且重要的是,它们小于特征尺寸,从而任何平均应力或应变变量都将明显变化。

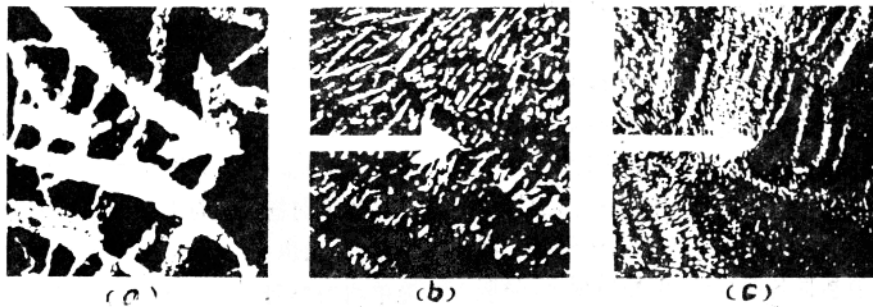


图6 各种视率下用电子微观扫描复材,表明非均匀组分复材在10000X时分布均匀。(a)10000X(b)1000X(c)200X



**术语** 力学性能, 诸如刚度和膨胀系数, 与材料状态变量有关, 如应力、应变和温度。如果性能逐点变化, 如在复材 RVE 水平上一样, 可将材料归为非均质的。因为常常在 RVE 内考虑状态变量的平均值, 将使用等效性能概念。该概念在图 7 中表明。非均质材料在 Y 方向上承受均匀应力  $\sigma_y$ , 具有在 X 方向上逐点变化的内部应力分布, 其平均值约为  $\bar{\sigma}_y$ , 等于均质材料的均匀应力。

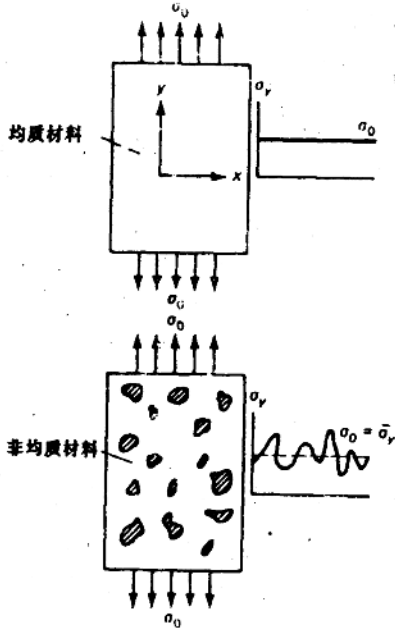


图 7 非均质材料的非均匀应力的平均值等于均质材料的均匀应力

如果性能随方向变化, 则材料为各向异性的, 有很多类型。那些表现出特殊对称性的材料具有特殊名称, 如正交各向异性。图 8 上的曲线在任意方向上以其与原点距离为材料的等效刚度, 表明单向碳纤维复材和双向玻璃纤维组织都是各向异性, 但性质很不同, 而铝是各向同性的。纤维复材在纤维方向  $0^\circ$  上显示了最大刚度, 而在  $90^\circ$  时最小。玻纤组织在双向编织的  $45^\circ$  方向上显示最小特征刚度。铝在所有方向上刚度不变。

性能 单向纤维增强复材表现出与均质

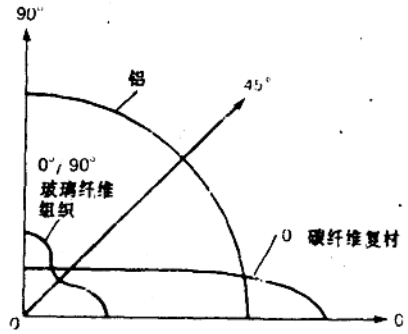


图 8 在任意角度下到原点的径向距离表明复材的方向性实质

各向异性材料一样的性能。一般地, 纤维在给定的横切面上的分布是相当随机的, 使得在横向上不产生特殊的增强方向。因此, 单向复材是等效的横向各向同性材料。可见横向各向同性材料的等效性能完全可以由五个弹性常数表征, 如图 9 中说明的 (注意横向或 TT 面是各向同性的), 即:

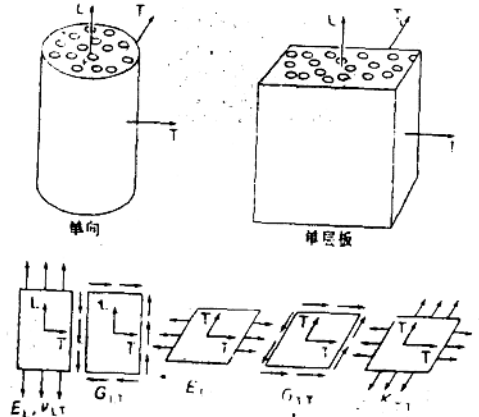


图 9 用于估价基本弹性性能的载荷条件

● 纵向杨氏模量  $E_L$  和相应的泊松比  $\nu_L$ , 这里  $E_L$  由纵向应变  $\epsilon_L$  与作用在纤方向上的简单均匀单向应力  $\sigma_L$  的反比定义:

$$E_L = \sigma_L / \epsilon_L \quad (1)$$

●  $\nu_{LT}$  由相应的横向应变  $\epsilon_T$  与纵向应变之比的负数定义:

$$\nu_{LT} = \nu_L = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} \quad (2)$$

●纵向剪切模量  $G_{LT}$  由剪切应变  $\gamma_{LT}$  与纵向面内纯剪切应力  $\tau_{LT}$  之反比定义:

$$G_{LT} = G_L = \frac{\tau_{LT}}{\gamma_{LT}} \quad (3)$$

●横向体积模量  $K_{TT}$  在等量横向应力  $\sigma_T$  情况下定义, 它产生等量横向应变  $\epsilon_T$  (在缺乏纵向应变时):

$$K_{TT} = K = \frac{\sigma_T}{2\epsilon_T} \quad (4)$$

●横向剪切模量  $G_{TT}$  类似于  $G_{LT}$ , 只不过  $\tau_{TT}$  为纯剪切应力,  $\gamma_{TT}$  在横向平面内:

$$G_{TT} = G_T = \frac{\tau_{TT}}{\gamma_{TT}} \quad (5)$$

估算了五个基本的弹性常数后, 可以计算所期望的任意其它常数, 例如, 横向杨氏模量  $E_T$  在 TT 面内所有方向上相同, 为:

$$E_T = \frac{4KG_T}{K + [1 + \frac{4Ku_L^2}{E_L}]G_T} \quad (6)$$

按照载荷条件定义基本弹性常数后, 可以测量设计和分析所需的弹性性能值。该经验方法与对于复材组分性能一样, 对于金属是必需且充分的。复材要复杂一些, 因为其组分以多种方式组合。因此, 计算所有可能组分情况的性能实际上变得不可能。相应地, 已经建立了分析方法, 由组分性能得到预定的复

材性能。

在讨论以诸如表 1 中显示的那些纤维性能为基础的方法之前, 应该回顾表 2 和图 10, 因为它们总结了在目前工艺状态下所得到的典型性能值。表 2 给出典型纤维—环氧复材和增强剂的力学性能数据, 包括目前有效的刚度范围 72.3~530GPa (10.5~77.0×10<sup>6</sup>Psi)。新纤维陆续在实际中使用。作为比较, 包括了铝合金 2024~T3 和 7075~T6、

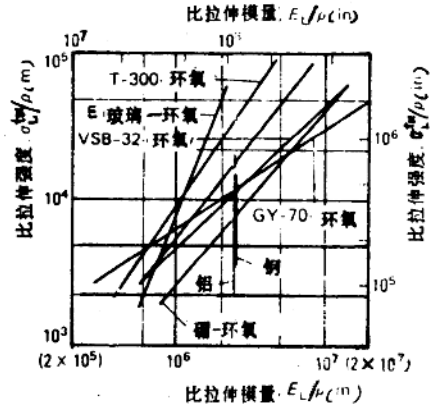


图 10 金属结构和多种增强剂复材的强度/重量和刚度/重量近似的范围。复材的最大值在所有情况下都是单向增强的

表 2 典型纤维—环氧复材和金属结构的性能

材 料	密度 g/cm <sup>3</sup>	杨氏模量				剪切模量		泊松比 $\nu_{LT}$	最大拉伸强度			
		$E_L$		$E_T$		$G_{LT}$			$\sigma_{LT}^u$		$\sigma_{TT}^u$	
		MPa	10 <sup>6</sup> psi	MPa	10 <sup>6</sup> psi	MPa	10 <sup>6</sup> psi		MPa	ksi	MPa	ksi
单向复材 ( $V_f=0.6$ )												
E-玻璃	1.94	45	6.5	12	1.7	4.4	0.64	0.25	1000	150	34	5
Kevlar-49	1.30	76	11.0	5.5	0.8	2.1	0.3	0.34	1380	200	28	4
T-300	1.47	132	19.2	10.3	1.5	6.5	0.95	0.25	1240	180	45	6.5
VSB-32	1.63	229	33.2	6.9	1.0	5.5	0.8	0.25	1170	170	41	6
硼	1.86	274	39.8	15	2.2	52	7.5	0.25	1310	190	34	5
GY-70	1.61	320	46.4	5.5	0.8	4.1	0.6	0.25	690	100	41	6
金属												
2024-T3	2.77	72.3	10.5	72.3	10.5	27.6	4.0	0.31	462	67	455	66
7075-T6	2.80	71.0	10.3	71.0	10.3	27.6	4.0	0.31	544	79	530	77
4130	7.84	207	30.0	207	30.0	82.7	12.0	0.25	655	95	655	95

(表 2 右半部分)

材 料	最大压缩强度		最大剪切强度			
	$\sigma_c^0$	$\sigma_c^0$	$\sigma_s^0$	$\sigma_s^0$	$\tau_{LT}^0$	$\tau_{LT}^0$
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
单向复材						
E-玻璃	550	80	140	20	40	6
Kevlar49	280	40	140	20	55	8
T-300	830	120	140	20	62	9
VSB-32	690	100	140	20	680	11
硼	2480	360	310	45	100	15
GY-70	620	90	140	20	96	14
金属						
2024-T3	345	50	345	50	276	40
7075-Tb	475	69	475	69	324	47
4130	1100	160	1100	160	380	55

铬钼钢 4130 的性能。表 2 给出了所有复材的特征等效值,这些复材在纤维方向上应用纤维特性得到增强,而在纤维横向上一般非等效增强。

性能上的差异,正得到成功的应用,如已经推广的纤维增强复材。这是 Galile(伽利略)所预见的,他定义了一个重要的材料量度方法,即用由该材料制作的均匀杆从某高度上垂直悬挂而不折断的最大长度进行量度。结构性能的这种量度就是简单的材料强度和密度比,在表 2 中等于  $\sigma_c^0/\rho$  部分(米或英尺)。在考虑偏转和强度时结构性能是用表 2 的模量与密度比类似量度的。

为了对材料进行一般性比较,简单的量度  $\sigma_c^0/\rho$  和  $E_L/\rho$  在单轴向承载时足以描述复材结构的重量减轻可能性。这种比较在图 10 中给出,这里对大范围的复材和金属结构图示出比拉伸强度  $\sigma_c^0/\rho$  和比模量  $E_L/\rho$  值。对于铝和钢,其在热处理范围和合金含量变化范围之内有效的强度范围由  $\sigma_c^0/\rho$  值表示;亦即模量不受这种变化影响。然而对于复材,强度和刚度都可以随增强剂构形和体积比含量的变化而显著变化。因此,复材曲线包含  $\sigma_c^0/\rho$  和  $E_L/\rho$  值的范围。

最大  $\sigma_c^0/\rho$  和  $E_L/\rho$  值代表纤维复材提供的明显的重量减轻可能性——对于比强度或模量或两者,在绝大多数情况中为二到三倍。不幸的是,在实用中要实现这些可能性,由于缺乏适当的比例,主要是低横向性能而复杂化。为提供改善的模向性能,一般将复材制成层压板,如胶合板,它在不同的铺叠方向上具有单独的铺层。因此,层压板得到的横向性能占用了单向材料所固有的某些潜能。这种损失由图 10 中曲线的最低值证明。

其它增强形式 除了在性能上提供最大潜能的连续纤维,其它增强形式包括:

●短纤维 通常在形状复杂的情况中用于模压混合物。

●连续股纱或多纤维束 可以节省制作厚截面的经费。

●网垫 即长度不一的纤维随意或半定向排列,这是为了整体中增强剂的经济性,也用于所要求的性能与经济性相比不重要时构成复杂形状情况。

●多种构形的纤维编织品 为了用单向纤维得到期望的最大性能,以及短纤维和网垫的加工和成形容易。

在很多制作过程中,预先用树脂浸渍增强剂,形成半固化复材,称为预浸带。它可以在制作过程的最后固化阶段形成所期望的样式。

制作过程 对于纤维增强复材,通常需要一个压模或卷筒来得到所期望的形状,固化条件的选择需要适当,温度和压力是时间的函数。制作方案包括:

●接触压模 预浸带放置在开敞模具内进行固化。用柔软袋子包裹该复材,利用压力(或真空)和加热加速固化,提高构件质量,该过程称作袋子铸模,使用高压器能够进一步升高压力。接触压模一般在产品数量少到不足以适应闭合模子价格时使用。

●压模和注模 使用相匹配的闭合模子(阳模和阴模),复材或者在模子关闭前放入(压模)或者注入入闭合模子(注模)。在加热

和压力下,可以制作一定数量的构件。

●纤维缠绕 将纤维绕在卷筒上形成构件。现已生产出了成熟的纤维卷绕机,能够缠绕复杂形状,其增强剂铺向精确。

●脉冲挤压的连续工艺 在制作低价格、精细的具有恒定横截面的光滑形状时较经济。

●编织 由挤压或纤维缠绕派生而来,在制作过程中纤维编织带代替了单一的纤维,以便得到横向强度,但是损失了一定的纵向性能。

制作过程的多样化,使得设计者为了满足特殊的复材性能要求,在特定位置和方向上精确地铺叠一定数量的纤维时要具有灵活性。复材从组分的选择到最终形状的设计过程完整化,将在下述段落讨论。

## 复材结构的设计过程

解决任何结构设计问题的第一步是建立设计要求,不仅包含功能的或性能的(力学的、热的、电的和化学的)要求,而且包含经济的和使用对象的要求。为满足这些要求,设计者必须选择材料、构形和制作工艺。这对于复材和常规材料是基本相同的,不过复材还要求选择材料跟设计结构一道进行,因此,在设计过程中需要更多的步骤。

第一步是选择复材组分和体积比。亦即选择复材单向结构,它是复材结构的基本元素。可是,一般需要多向性能;这在下一个步骤即用基本单向元素适当设计多向铺叠的方法得到。正是在第二步中复材的设计过程与各向同性材料设计过程具有相同的起点。由此,设计者继续确定结构件的每一个构形和整个结构设计构形。

通过增加设计步骤,从而用设计过程迭代来改善复材设计成为可能。因此,在最后结构设计步骤中进行结构性能,改变组分性能和层压板构造,从而改善复材结构性能。

商业应用中的设计 使用复材的目的在于延长结构或产品的寿命和降低制作成本,

而非强度和刚度的改善,以及伴随的重量减轻。通过整体结构的设计应用从而减少构件数量,降低制作成本。选择材料和设计结构一道进行,赋予设计者新的灵活性,如图 11 中所建议的。设计过程中的一般限制和要求适用于结构和材料的处理。结构设计方法很早就建立了;材料设计方法是新的,但已经得到有效的发展,因此,如果充分了解这两种方法,就可以放心地加以应用。

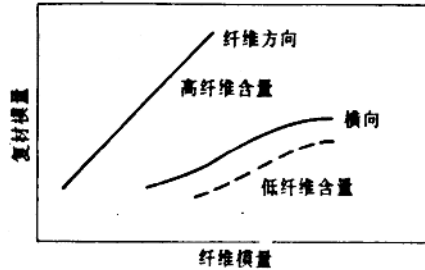


图 11 纤维和复材刚度之间的特性关系沿纤维方向成正比,横向不成正比。

## 使用特性

绝大多数复材已经在航海应用中获得了经验。在该领域,复材作为结构性材料,维护方便,使用寿命长,其耐久性主要来自飞机工业中所考虑的安全设计。在飞机应用中,必须更全面地评价其使用特性。

耐久性 飞机结构中纤维复材的耐久性受设计中定量因素的影响,如疲劳载荷和环境条件;还受使用因素影响,如损伤容限和现场检测和修复。

疲劳特性 在很多方面与金属不同。对于单向复材,在简单拉伸时,疲劳极限一般具有较高的与最大拉伸强度的百分比。因此,可以预料复材耐久能力优于金属。然而,对于更复杂的载荷或者增强型式,该优越性减小。特别在压缩或完全反向拉伸—压缩载荷循环条件作用下,复材比金属更易损伤。层内裂纹和层间缺陷常常在某些内部铺层应力集中区增长,它们不能用肉眼发现。

环境效应 环境因素对复材耐久性的影响进一步使疲劳寿命分析复杂化。太阳直射

下的温度和零下温度的交替变化,使结构产生热应力,这是因为复材内纤维和基体以及相邻结构的膨胀不同。复材吸湿,特别是基体对各种纤维吸湿量不尽相同,产生类似于伴随温度增加的膨胀。材料内温度增加都影响其性能。在复材设计和分析中必须考虑温度和湿度的相互作用。

**损伤容限** 作为一般法则,材料越耐久,其冲击容限越大,纤维复材缺乏延展性。我们最关心的是由于偶然和不可避免的使用引起的损伤。火车铁轨上蹦起的石子,板钳掉落在机翼上,或者鸟、冰雹撞击复材结构,能够引起侧向冲撞损伤,而复材对此特别敏感。对纤维复材的侧向冲撞会发生裂纹和裂纹形式的损伤,它通常在内表面形成很严重的损伤,而且常常从外表面不能检测。内表面损伤为内部铺层脱粘和局部分离(分层)等。在这方面,已经作了很多研究以减轻损伤。

**试验、检测和修复** 确定复材在其使用寿命内的任何阶段能否充分工作,比金属的复杂得多。原因在于复材本身的设计和制作需要检测和质量合格。在使用时,复杂性增加,因为损伤可以在内部或外部产生。

材料制作的质量控制能够通过破坏性的或非破坏性的试验进行。破坏性方法包括从材料切割试样,以作为代表性结构;它通常用于简单的强度(挠曲或短梁剪切)或质量(加强件体积比或孔隙含量)试验。非破坏性试验或评价(NDT 或 NDE)方法,在整个材料上进行非破坏性的、电的、紫外线的或 x 射线标记。自动扫描仪器标出有问题的区域,标出裂纹、空穴和脱粘。

对于使用中出现的多种损伤形式已经有了修复技术。通常的方法是用粘结或焊接金属或复材增强板从损伤区域过渡到邻近(未损伤)表面。

## 设计要 求

陈思秋译 叶雷鹰校

本设计要 求 是复合材料的使用规范。出厂产品的特殊设计要 求,只能由生产厂家的专家提出。文中讨论的重点是与复材聚合物基体(热固和热塑树脂)有关的关键设计要 求。尽管很多金属设计要 求对复材也适用,但仍然需要我们作某些修改和增补。

本文将讨论复合材料的固有性质,或按构件设计要 求铺设纤维过程中可能产生的新的设计要 求。这里将介绍成功的设计过程,并给出典型的先进聚合物复合材料构件例子。

### 设计要 求

理想的构件设计是使系统的整个功能得到优化。功能是在价格、重量和外壳几何形状制约下对使用能力的量度。为估价复材结构的功能,设计者必须考虑系统总价格、材料各向异性性质、材料性能数据表、环境、损伤容限、制作和质量控制、组装以及检验和修复。尽管上述项目的绝大多数在常规材料结构如金属结构中也考虑,但是由于复材功能对这些项目高度敏感,因此必须特别重视。

**系统总价格** 在比较金属和复材结构价格时,必须考虑原材料价格。设计一替换构件(复材替换金属)几乎可以肯定是较昂贵的,

因为复材原材料价格是金属材料的10~100倍,而且,复材生产属于劳动密集型。但是,通过减少中间环节而降低制作、组装、存货、检验和机加工(例如,螺栓孔)要求,从而显著降低系统价格是可能的。较少的连接也能够改善尺寸控制(接近实际形状),从而降低总结构的加工和重复劳动。无论通过减轻结构总重量,或者减小旋转或直线运动构件的惯量矩,都能节省附加材料,提高机器(例如:飞机、火箭或汽车)的燃油效率。减轻重量也能够改善使用性能,如增加航程、速度或有效载荷。所以,当用复材替换构件时,必须根据构件的整体性考虑系统总功能。

**各向异性** 很多结构材料具有均质和各向同性性质。这意味着材料的强度、刚度和湿膨胀系数在所有方向和所有局部位置都相等。高级聚合复材结构是在铺层内连续地铺设纤维的,本质上基本属于各向异性的,即沿着不同的轴向表现出不同的性能、强度、刚度、热膨胀系数(CTE)和湿膨胀系数在不同方向上可能产生10倍以上的变化。例如,在厚度方向上的强度和刚度性能显著低于沿平面各方向的性能;同时,沿平面的热、湿膨胀系数大于厚度方向上的。

由于这些刚度和强度的差异,设计者必须全面了解刚度要求、载荷方向及其大小,以保证纤维的正确排列。与金属材料相反,层压板的刚度和强度设计可以满足广泛的需求变化。因为温度和湿度的变化产生大的应力,所以还需要考虑连接构件之间热湿膨胀系数的差异。

复材结构固有的各向异性性质是生产高效能结构的关键。设计者必须掌握全部制作工艺要求,并且学习和掌握计算机模型技术,例如估算各向异性复材结构性能的有限元分析程序和特别程序。

**设计数据表** 获得精确可靠的材料性能值,尽管该过程既昂贵又费时,但它是实现功能设计的最重要环节。单向复材在室温和标准条件下的材料性能和容限,可以从供货者

和有关参考文献中得到。

设计者可以使用层压板理论结合单层性能和每一铺层的纤维铺设方向,来预测层压板总的性能特点。层压板理论适用于绝大多数结构情况,但是必须注意其局限性。

在制作构件之前,必须估价用该原材料制作的试验件,以得到验证给定铺层或接头的真实性能和容限。设计者必须将该数据与模型预测进行比较,以验证分析结果。

要确定吸潮、释潮和氧化对层压板性能的影响其方法是非常昂贵和费时的,因为并非所有的加速试验过程都能提供稳定而精确的最终性能预测值。在某些情况下,由于长期裸露而降低性能。设计者必须考虑层压板性能在整个使用期间的改变值,并且在每一极限点上进行分析。

为得到弹性模量和强度等的设计容限,必须对计划的层压板结构进行统计研究,给出A—基、B—基、S—基和典型基设计容限。存活率大于99%,且置信度为95%时为A—基容限值。存活率大于90%,且置信度为95%时为B—基容限值。S—基是最小期望值,而典型基为平均期望值。

**环境影响** 同前面设计数据表的讨论一样,环境(包括热、冷、潮湿、紫外线和酸),在一段时间后会降低机械性能。变化量取决于纤维—树脂体系。设计者所关心的是在普通大气环境影响下的热/湿条件。在恶劣的热/湿条件下,复材的弹性和强度值很容易降至原来的一半。热/湿条件主要影响基体材料,当基体性能起重要作用,如在承受压缩载荷时,我们要考虑该条件,并且在预期的大气环境条件下进行试验。

在工业市场上使用复材的一个优点是抗腐蚀性。然而,需要试验确定复材长期裸露于大气环境中其性能的影响程度。例如,应用于汽车的复材结构必须能够容和或者避免接触水、油、汽油、电解酸、刹车液、传动液、冷却剂。结构必须能够承受震荡、紫外线(UV)、雨淋、冰雹、道路盐渍和极限温度。如果这些

条件长期存在就转化为必须遵守的材料使用准则。

**损伤容限** 该容限是对结构有裂纹产生后的最大使用能力的量度。裂纹包括划痕、凹陷、孔、穴、分层和裂缝，它们都可能在不正确的制作或管理过程中产生。设计者应该知道并非所有的裂纹都能被探测。而且，叠合铺层紧固件孔或阶梯变化尽管是设计型式，但仍然类似于裂纹，因为它们具有强烈应力集中区域，通常容限较低时发生破坏。

一个基本的设计考虑是通过分析和实验，保证存在两条可选择的载荷路径，使得复材结构甚至在有裂纹时也能充分使用。初化基体材料(如热塑性)表现出强的抗冲击损伤能力。由于在两次飞行的间隔时间内可以不检测可能的损伤，故从跑道上踢飞的石头或机械工具掉落在飞机机身蒙皮上是关心的冲击损伤主要来源。复材结构的冲击损伤并不都是可见的，然而复材结构可承受使性能降低的内部损伤。

在设计复材构件时也必须考虑残余应力。当金属构件在非约束状态下受热或冷却时，将发生尺寸变化，但是并不一定产生内部应力，相反，能够将复材设计为尺寸稳定热膨胀系数低的构件，但会导致内部应力显著增加。曾经有复材构件在固化期间冷却时断裂。这些残余应力迭加在实际使用中承受的外部载荷上。

建立裂纹扩展率和残余强度及刚度模型的分析方法，应该用于指导设计上的改进，而非提供精确解。观察和测量压缩强度是确定结构损伤容限量的一个通常的试验方法。考虑冲击损伤容限的关键是：

- 预期冲击能量范围
- 冲击频率
- 系统中构件性能的极限值
- 检查和修复能力
- 残余强度多载荷路径
- 抛射体形状

**制作和质量控制** 构件制作前后应该将

材料特征化。因为热固树脂基复材的贮存时间有限，所以在使用前需要恒定冷冻温度以使聚合反应最慢。这些原材料甚至在正常贮存时也会发生变化。认真记录和监测材料的寿命是必需的；在用复合材料制作产品时应该重新评定其质量。在选择材料时，必须考虑能否提供加工和固化所需的特殊设备。要求固化时间随材料的不同而显著变化。固化时间必须相当快，以适应产品需要，可以将固化层压板产品铺制得比需要的太，然后切割成适当的长度。剩余部份用来作质量控制试验。

局部翘曲通常由于粗劣的模具设计或不适当的固化时间而产生，也可能在固化不对称铺叠顺序层压板或小弯角时产生。对称和平衡层压板可以消除残余固化应力，具有小弯角的特别模具可以减少翘曲。

飞机及与空间有关的项目常常要求复材构件制造者使用以构件标识系统为基础的系列号码；它记录了关键的材料性能以及复材的全部使用历史。而后者记录了产品制作工艺和固化时间细节，标明了制作者，并且给出了所有环境变化资料。这些文件要求尽管繁琐和费钱，但对于迅速确定材料使用前后可能产生的问题的原因和大小都是必需的。

其它检验要求集中于性能。例如联邦航空管理局作了长期而大量的试验，给出了关于新构件和飞机能否使用的质量评审方法。新复材构件需要的试验或使用次数可以大于金属构件。因为试验评审会显著增加开发资金和研制周期，所以设计者应该注意将任何给定构件的新材料体系规范化的全部含义。

**组装** 组装指复材结构的连接和加工。连接将载荷从一个构件传递到另一个。由于连接具有预料的高载荷和应力集中以及复材层压板的脆性本质，所以当连接的设计和制作具有可靠性时，经济性是关键。绝大多数热固性基体层压板具有有限的屈服能力。当应力超出载荷极限，层压板产生微裂纹或者发生灾难性的破坏，这与绝大多数金属不同，金属在表现出屈服后，应力重新分布。因此，应

特别重视优化布局 and 连接设计,以保证使用可靠。

目前应用的两个基本连接型式是机械紧固连接和胶粘合连接。制作机械紧固连接(螺栓或铆钉)的第一步是在层压板上钻一个孔;孔上应力集中因子依赖于层压板的铺叠顺序和使用的材料,可能是六到八。

机械紧固连接需要预加压紧载荷以提供有效的载荷传递路径。由紧固件施加的预加压紧载荷量是重要的,因为复材厚度方向的强度不足以防止挤压,而挤压会显著扩大损伤区域一段时间后,粘弹性效应如蠕变会降低紧固件的预加载荷。复材蠕变率应该在预期的环境条件下通过试验确定。热和湿膨胀系数的差异以及连接构件之间刚度的不匹配,也会在紧固件和层压板上产生附加载荷。

胶粘结连接是通过胶粘剂将两个或更多构件结合在一起的(例如,搭头连接)。与机械紧固件一样,正确设计的胶连接应该具有最小的热和湿膨胀系数及刚度渐变传递。此外,胶的固化温度不应该超过粘结材料的极限温度。环境条件如温度、湿度和化学物质对胶本身会产生有害的影响。层压板表面预处理必须彻底而且必须满足所有规范,以保证粘结牢靠。另外必须针对预期的连接内载荷条件,选择正确的胶粘剂,因为某些胶粘剂的剪切性能较好而别的拉伸性能较好。

对复材结构的管理包括搬动和贮存。与各向同性金属结构不同,各向异性复材的设计主要是为了满足特殊方向上的刚度和强度要求。因此,甚至在使用前将它们搬动时也应该避免在非期望方向加载或者施加非期望的载荷值。在管理大型结构时,用接触点抬起和搬动构件是一个可行的办法。当然,掉落或碰撞复材构件会形成损伤区域。

应该将贮存构件的表面弄干净以避免划伤复材表面。某些复材甚至在固化后对环境条件如潮湿和UV(紫外线)也敏感。应该全面了解任何特殊的贮存要求以避免性能下降。

**检查和修复** 不是所有复材中的损伤区域都是可以观察的,而且,那些可见的损伤区域不能靠肉眼定量观察。损伤位置和大小对于确定是否应该修复或能否修复是必须的。

无损技术(NDE)可以用来检查复材构件。为了保证构件功能,必须在设计过程中将需要用于重新验证构件的检查表和无损技术规范化。也应该将推荐的修复过程和期望的修复性能值制成文件。推荐的修复技术能够适应工作位置的变化。某些复材构件必须在外面修复,而其它的必须在专门工厂维修,需要分析和试验来证明修复是否有价值。

### 设计过程

标准的金属构件设计/制作过程,很久以来都是线性的分段的制作过程。这几乎不是同时将消费者、市场、设计、制造、质量控制和材料供应等结合在一起进行考虑。该线性方法对于复材结构设计不会有效,因为复材构件形状、材料规范、制作方法是联系在一起的。三阶段的协作概念,在设计过程中可供选择的方法,已经得到有效的使用。

在协作系统方法的第一阶段中,定义了功能要求诸如价格、尺寸、重量、性能、载荷规范和环境,建立了初步设计。在第二阶段中,估价和验证了第一阶段中规定的新材料、连接设计和制作技术。此外,可以对极限区域作详细的有限元分析。在第三阶段中,制作了全尺寸原型以估计价格、使用能力和来自环境因子的影响。如果所有规范都是成功的,就可以开始制造产品。随着复材技术在材料、设计、制作和检查方面的成熟和标准化,并且证明是可靠的,协作方法可以发展为更线性的形式。

### 应用例子

本段将讨论复材结构材料的典型应用例子。本例讨论尺寸稳定的刚度——极限支撑结构的设计要求。具有低热膨胀的复材支撑的典型应用于医用激光、硅片加工设备、卫星天线。虽然复材支撑是较简单的构件,仍适合



于说明很多已经讨论了的影响构件设计的因素。飞机/航天工厂已经生产了更大更复杂的

结构,但是,全面讨论其设计考虑已经超出了本文范畴。

表1 设计研究中输入的层压板材料性能

材 料	弹性模量(a)		弹性模量(b)		剪切模量		热膨胀系	热膨胀系
	GPa	10 <sup>6</sup> psi	GPa	10 <sup>6</sup> psi	GPa	10 <sup>6</sup> psi	数(a)	数(b)
T300/934	148	21.5	9.7	1.4	4.6	0.66	0.0T8	20.7
P-55/934	228	33	6.9	1.0	4.1	0.6	-0.9	27
P-75/934	283	41	6.6	0.95	6.6	0.95	-1.3	27
GY-70/934	296	43	7.6	1.1	2.0	0.29	-0.13	30.2

(a)纤维方向 0°上,(b)横向 90°上。

该支撑结构所给的设计要求是:

- 热膨胀系数(CTE)  $0 \pm 0.09 \times 10^{-6} / K$ , 在  $-20^{\circ}C \sim 18^{\circ}C (-10 \sim 65^{\circ}F)$  时。
- 150cm (60in) 长, 3.0cm (1.2in) 外直径, 0.38cm (0.15in) 壁厚。
- 轴向弹性模量 110GPa ( $15.5 \times 10^6$ psi)。
- 殷钢端的装配连接坎填在支撑它的两端。
- 最小重量。

这些规范是对于低 CTE、高刚度和轻重量的要求,不适合于标准金属材料,但是适合高级碳纤维环氧树脂复合材料。所以,象这样的性能使然项目,制作复合材料构件的价格不再是设计中最优先考虑的。由于 CTE 和弹性模量要求是至关重要的,因此在初步设计中强调材料、铺层叠合和制作技术的选择。制作技术应使诸如能有害地影响管子性能的纤维错位和孔隙百分比含量最小。此外,必须建立特殊的检查技术以验证管子组装的全部 CTE,包括殷钢紧固端。该应用例子说明了需要用来建立功能型复材构件三阶段协作方法。

在设计分析中,用传统的层压板分析方法对 12 种不同材料体系和铺层铺设方向族进行了研究。因为铺层铺设方向、层压板模量和 CTE 是互相联系的,使用图表查找满足 CTE 和最小弹性模量要求的材料和铺层铺设方向。一般地,对零 CTE,使用两个对称铺

层铺设方向族:小角度 +/- 铺叠和 ( $O_x, \pm \theta$ ), 这里  $x$  是铺层的变化数目,  $\theta$  是铺层的变化角度。对于这两个层压板族结合使用四种不同材料可以汇同热膨胀系数和弹性模量数据。在设计研究中使用一种低模量纤维 (T300), 一种中间模量纤维 (P-55) 和两种高模量纤维 (P-75 和 GY-70)。对于所研究的层压板,每一种材料在 0°方向上使用,在角铺层中使用的模量是较低的。

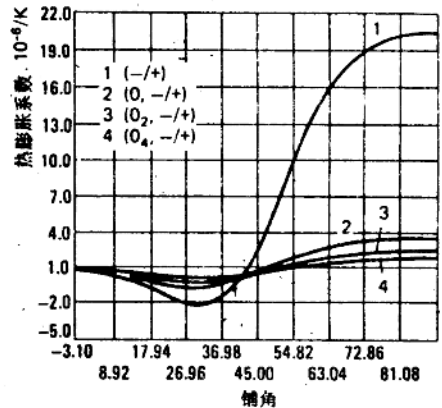


图1 典型石墨层压板的纵向 CTE

图 1 和图 2 中的 CTE 和弹性模量点表明通过使用不同的材料和铺层铺设方向,大范围的力学性能是有效的。对于现在的管子设计,传统的平板 ( $O_x, \pm \theta$ ) 铺叠不能成功地满足模量要求。困难在于当使用较高模量纤维以满足模量要求时,那些纤维的微小负 CTE 开始占优势。因此,满足模量要求的层压板具有大的负 CTE。