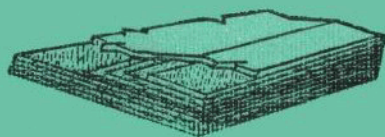


KEVLAR和 混合复合材料设计手册

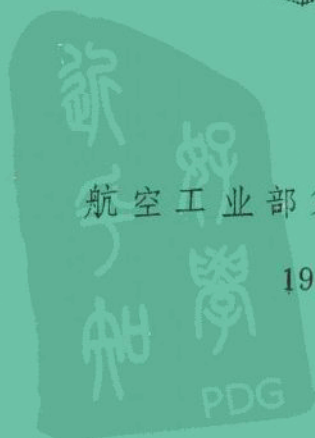
翻译 陈绍杰

校对 范成忠



航空工业部第六〇一研究所

1986



KEVLAR和 混合复合材料设计手册

翻译 陈绍杰

校对 范成忠

译 者 的 话

本手册译自波音内部用设计文件《Kevlar/混合复合材料设计手册》，该手册系《波音先进复合材料设计手册》(D6—44714)的附件，后者已于1984年由《航空工业部科学技术情报研究所》翻译出版。两者合起来即为一份完整的波音飞机公司内部用的有关复合材料的设计文件。

本手册主要包括Kevlar纤维及其编织物的各种性能、Kevlar复合材料以及Kevlar/碳混合复合材料的各种性能和推荐的设计方法及有关的设计资料。手册提供了大量的设计曲线、表格，适用性较强，且简便易用。

本手册可供有关方面从事设计、材料和工艺专业的技术人员使用，也可供院校师生参考使用。

由于译者水平有限，时间匆促，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

1985年12月

目 录

前言	(1)
1.0 KEVLAR	(1)
1.1 物理性能	(3)
1.2 无纬布性能	(4)
1.3 环境对Kevlar/环氧的影响	(4)
1.4 基本的设计数据——Kevlar/环氧编织物	(5)
1.5 编织物力学特性	(8)
1.6 挤压强度	(12)
1.7 疲劳特性	(14)
1.8 Kevlar和玻璃钢的比较	(14)
2.0 Kevlar—碳纤维混合复合材料	(14)
2.1 波音混合复合材料的发展工作	(16)
2.2 混合复合材料定义	(16)
2.3 表示法	(16)
2.4 图纸资料	(19)
2.5 压缩强度	(19)
2.6 混合复合材料的弯曲	(22)
2.7 混合复合材料的挤压强度	(23)
2.8 对蜂窝夹层板冲击的考虑	(23)
3.0 推荐的设计方法	(27)
3.1 全Kevlar	(31)
3.2 Kevlar/碳混合复合材料结构	(32)
参考资料	(33)
附录A. Kevlar和玻璃钢的比较	(35)
附录B. 对洛克希德—NASA, Kevlar板的评论	(35)

KEVLAR 和混合复合材料设计手册

前言

本文件目的在于提供基本的设计数据和背景资料(注1)。文件所提供的数据来自波音的试验(BMT材料鉴定数据和公司所进行的各种试验)、工业部门所进行的试验(如Fuji重工业公司)以及结构设计发展部报告#77中选出的资料。目的在于最大限度地直接应用这些数据,特别是用到767和757的次结构上。

我们将长期地研究和发展更为通用和多用的数据,帮助设计者将Kevlar和Kevlar-碳纤维混合复合材料用在新的有潜力的部位上。

对Kevlar编织物和Kevlar-碳纤维混合复合材料,波音的材料和工艺规范是:

材料规范:

BMS8-168——碳纤维250°F固化系统。

BMS8-212——碳纤维350°F固化系统。

BMS8-219——Kevlar250°F固化系统。

BMS8-218——Kevlar350°F固化系统。

工艺规范:

BAC5570——250°F固化系统。

BAC5562——350°F固化系统。

比之本出版物所包含的资料还搜集了更多的资料,对有关本题目更为广泛的资料,如断裂、热循环和蠕变等,感兴趣的工程师们可和结构设计发展组联系。

当可得到进一步充分的资料时本文件将加以充实和提高。

1.0 KEVLAR

Kevlar是杜邦公司(Dupont)作为它的Aramid纤维系——芳香族聚酰胺一个成员的注册商标,其化学成份是杜邦的专利。

Kevlar49是几个新的纤维之一,以前称为PRD—49,并于1972年进入商用。它是杜邦公司经过多年研究而由有机聚合物形成的具有很高的拉伸强度和模量的产品〔参考资料5〕。

杜邦在市场上有两种形式的Kevlar,即49和29,其中Kevlar-29是Kevlar-49的一种低模量、低成本的改型。目前波音在商用飞机上不许使用Kevlar-29,故在本文件中Kevlar一词总是用来代表Kevlar-49。

由于Kevlar具有高强度、中等刚度(模量)和低密度的特点,它一向被用来增强塑料并得到几个机种的接受(NASA对L-1011几块板的飞行使用鉴定)。此外还有船舶、运动器材和其他的商业上的应用。在航宇工业中,Kevlar现在被用来增强飞行器、商用固定翼飞机和直升机上的非受力件和半受力件,特别是起代替玻璃钢的作用。Kevlar正被打算与碳/环氧混用以改进冲击韧性。

本文件包括了编织物（特别是181型的）和混合复合材料的拉伸、压缩和剪切的应力-应变曲线。温度和环境对 Kevlar 的影响尚未很好地加以研究并形成文件，然而波音正计划改进这一缺陷。目前正在评定温度加上潮湿对 Kevlar 某些机械和物理性能的影响，单独的和与其他材料比较的，两者均在评定中。附录A中包括了玻璃钢和Kevlar热、湿和压缩性能的比较。在力学性能上除有一个最大为8%的降低外（注2），编织物与0°/90°或±45°的无纬布的迭层是类似的。这部分是由于编织物上纤维体积含量低，部分则是由于形成波曲的影响。

目前按下列工作指令管理波音的 Kevlar发展计划（从1979年3月21日起）：

EWA 58251109——Kevlar/环氧复合材料的发展。

EWA 52211201——接近主要结构的复合材料的应变和板的试验。

EWA AD01KV——基本的 Kevlar 和 Kevlar/ 碳 混合复合材料的发展 试验 计划——250°F固化系统的。

表1给出了Kevlar 和碳纤维复合材料的规范，包括树脂含量上建议的改变。表2给出了某些有关本文件中提到的树脂的说明性资料。

181、285和120型编织物的Kevlar/环氧间力学特性关系见表14。

Kevlar181型是一个380股的8束有光泽的编织物，而285型是粗达181型三倍的1140股的4束编织物，其力学特性稍低，重量和固化后的厚度两者相仿。

表1 材料规范

规 范		建议的树脂含量			实际的树脂含量		
		重 量 百分比	正常预浸料 每层重量 (lb/ft ²)	正常固化的 每层厚度 (in)	重 量 百分比	正常预浸料 每层重量 (lb/ft ²)	正常固化的 每层厚度 (in)
BMS8-188.250°F固化碳/环氧	级别95				35±2	0.030	0.0035
	级别145				35±2	0.046	0.0054
	级别190				35±2	0.060	0.0071
	类 型 3K-70-P、PW				35±2	0.061	0.0075
	类 型 3K-70-CSW				35±2	0.059	0.0073
	类 型 3K-135-8H				35±2	0.116	0.0144
BMS8-219.250°F BMS8-218.350°F 固化Kevlar/环氧	类 型 120				55±3	0.028	0.0040
	类 型 285				50±3	0.069	0.0100
	类 型 120	57±3}	0.029	0.0043	50±3	0.025	
	类 型 285				52±3	0.072	0.0105

表2

树脂基体种类

牌 号	供应厂商	固化温度°F	注
* F-155	Hexcel	250	通常与玻璃纤维和Kevlar合用**
F-550	Hexcel	250	通常与碳纤维合用**
5209	Narmco	250	
* F-161	Hexcel	350	通常与玻璃纤维和Kevlar合用**
BP 907	American Cyanamid	350	对Kevlar的结合力比934好
5208	Narmco	350	通常与碳纤维合用**
934	Fiberite	350	

* 目前在波音规范中用于Kevlar和玻璃纤维。

** 在BCAC(波音商用飞机公司)内部。

1.1 物理性能

与典型的密度一道,对选定的纤维、编织物和树脂,表3给出了120型和181型Kevlar编织物迭层板的基本的热胀系数值。Kevlar/环氧的密度小于玻璃钢的;用Kevlar复合材料直接代换相等厚度的玻璃钢可减重26%(基于目前的BMS标准)。

表3 热胀系数和密度比较(典型值*)

	编 织 物 型	树 脂	纤维重量百分比 V _f	热胀系数 in/in/°F×10 ⁻⁶	使用温度范围 °F
Kevlar/环氧 的编织物迭层板	120	②	②	②	②
	181	Narmco5208	69	2.3/3.3④	75-255(参考8)
	285	②	②	②	②

材 料	纤维重量百分比 V _f	密度 LB/IN ³
120型Kevlar/环氧	③	③
120型玻璃纤 维/环氧	③	0.067 (BMS 8-79)
181型Kevlar/环氧	50①	0.048
181型玻璃纤 维/环氧	③	0.067 (BMS 8-79)
285型Kevlar/环氧	③	③

①预浸带值。

②181型的值可暂用于120型和285型。

③可能时数据将加以补充。

④经/纬向。

* 波音的基本数据和参考资料8的数据。

1.2 无纬布性能

由于波音目前不拟使用Kevlar无纬布，故本文件不包括其性能数据。然而在SDDR#77中进行了讨论。

典型的编织物性能较相当的无纬布铺层低8%。

1.3 环境对Kevlar/环氧的影响

杜邦〔参考资料3〕声称他们的纤维具有良好的热稳定性和物理特性，在 低 达 - 320°F 的冷冻温度下，纤维实质上不会脆断，性能也不降低。杜邦还讲在高温下其纤维也不软化或燃烧，大约在800°F时才能焦化。

对任何位于飞机外表的环氧基制件来讲，防雨蚀是一个明显要考虑的问题。经 Hughes 飞机公司同意杜邦已出版了某些资料，示于表 4。这些资料表明Kevlar较之E 和 S—玻璃纤维/环氧在防雨蚀上已有明显的改进。

洛克希德的L-1011计划包括了地面环境方面的问题，第四年度飞行使用报告给出了最后的结果。各种气候对放于世界上六处试件的影响也包括在内。所用的材料系统是 250°F 固化的Kevlar/F-155环氧，三年中其吸潮高为2.04%，低为1.6%。对这些试件进行了弯曲、层剪和压缩试验。三年来所进行的弯曲和压缩试验的结果概括在表 5 中，巴西的数据排除在外，因缺少吸潮值。

表4 Epon828环氧（250°F固化）单向迭层板抗雨蚀的能力*

增强材料	纤维体积含量(%)	平均重量损失 (mg/ft ²)	侵蚀程度
Kevlar-49	65.6	20	中 等
“E” 玻璃纤维	65.5	98	深 度
“S” 玻璃纤维	74.3	72	深 度

- 旋转臂试验。
- 微滴直径1.2mm。
- 雨密度等于7.5 IN/HR。
- 单向端头定位复合材料。
- 速度：333米/秒。
- 暴晒：30秒。
- * 数据取自参考资料 1，未加验证，可用于初步设计。

表5 250°F固化的Kevlar/F-155环氧的弯曲和压缩性能*

		压 缩	弯 曲	
		** F _{cu} ksi	*** F _{fu} ksi	E msi
基 准 高 低	准 值	19.92	57.46	3.63
	值	21.76	55.48	3.50
	值	18.17	48.38	3.19
“B” 基准的波音估计值		18.15	48.79	

- * 数据取自参考资料 4，未加验证，可用于初步设计。
- ** F_{cu}：许用的压缩破坏强度
- *** F_{fu}：许用的弯曲破坏强度

1.4 基本的设计数据——Kevlar/环氧编织物

表 6 中给出了“B”基准（注 2）的基本设计数据，由波音的试验导出。要注意，160°F 下吸潮值可能明显地高于实际使用中可达到的吸潮百分比。正在努力 建立一个更符合使用实际的试验环境。压缩弹性极限尚未确定时，目前在160°F 吸潮下的试验，指明了一个大约 3000μin/in的比例极限（图 1 和图 2）。试验前，这些试件在100%RH，160°F 下浸泡了两周。对波音的材料规范讲，这是一个正常的浸泡时间，其（或这个试验方法）导致了一个较高的吸潮量并产生了一个被认为是很保守的设计值。

洛克希德根据设计强度要求设计了 L-1011的Kevlar 板，对翼身整流板和发动机 核心整流罩，采用了较大的安全余度（>1.5），对翼身整流罩用了0.14。

表 7 中比较了洛克希德的Kevlar/环氧验收的试验数据和波音的材料鉴定数据，还比较了洛克希德设计许用值和波音基本设计值，它们之间较大的差异尚未能充分理解，但可能的原因是：

- 1.洛克希德的数据，仅在较少的几批试件下于1972年得到。
- 2.波音的经验是同炉件间的变化较小，而炉与炉之间的 变化较大，这点 造成了统计强度许用值上的明显下降。

图 1 和图 2 得自BMT材料鉴定数据，当进行迭层板热、 潮情况下的压缩试验时，它指明了模量和破坏强度上较大的分散度。

除非另加说明E为最初的模量。

这个资料并不完整，不久将予以扩大和修正。为目前的使用，这里还包括了额外的非波音的数据。

表6 Kevlar Hexcel编织物、F-155材料系统、250°F 固化的迭层板的主要设计数据***

			室温/干态 ③		160°F/湿态(100%RH, 两周)	
			120型(21层)	285型(10层)	120型(21层)	285型(10层)
经 向	压 缩	强度* psi	15600	18700	7400 ①	7300 ②
		模量** msi	3.47	3.24	2.73	3.13
	拉 伸	强度* psi	69700	71300	35800	30400
		模量** msi	4.14	3.73	2.74	3.81
纬 向	压 缩	强度* psi	16100	18800	6400	8400
		模量** msi	3.67	3.34	2.46	2.89
	拉 伸	强度* psi	56700	54700	27300	30000
		模量** msi	3.84	3.66	2.56	2.64

① 5%吸潮 ② 4.3%吸潮 ③ 压缩：湿态；拉伸：干态。

* “B” 基准 ** 平均值

*** 数据来自材料鉴定试验，为波音材料规范的最小可接受值，数值取自三批(每批五个)试件。

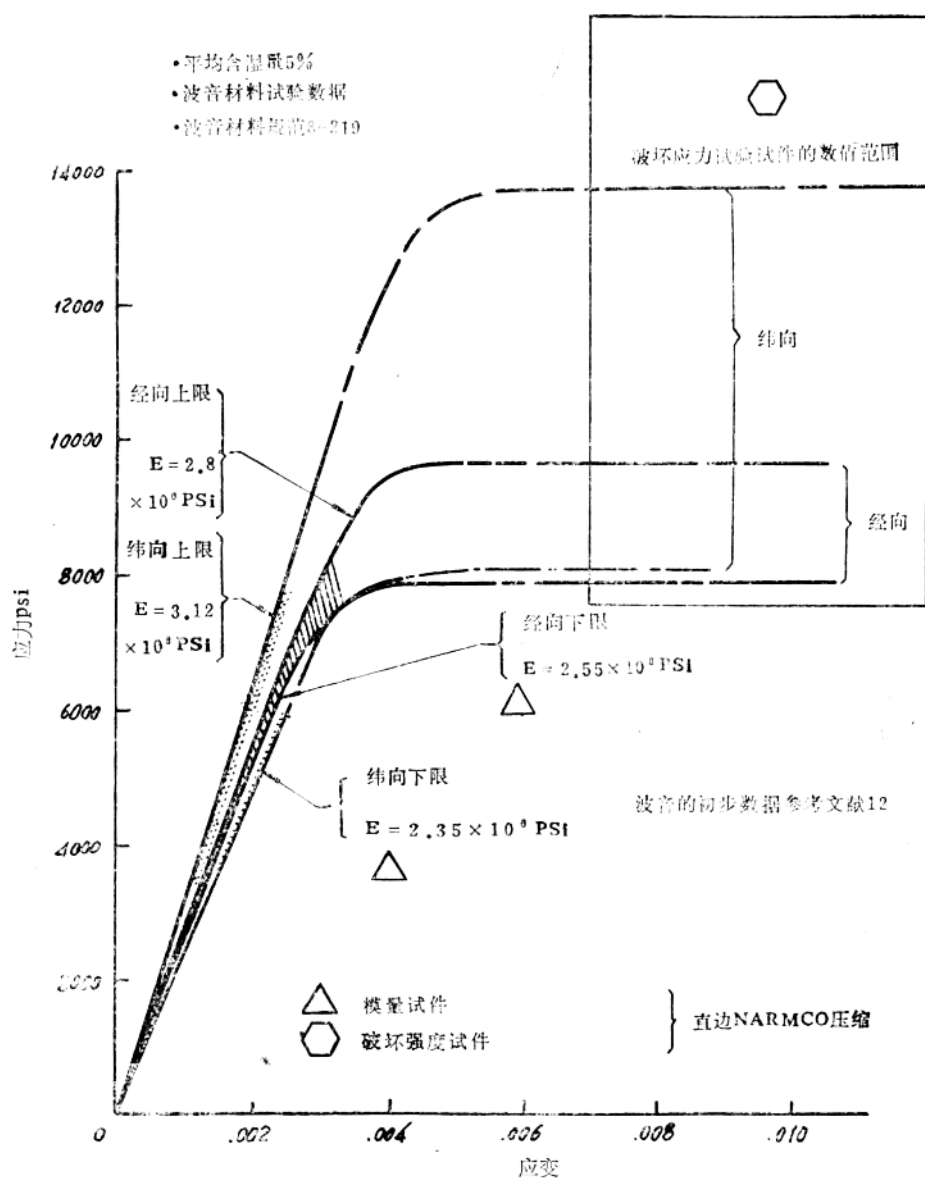


图1 KEVLAR/环氧、120型, 160°F, 湿态压缩的应力-应变曲线

- 平均含湿量 4.3%
- 波音材料试验数据
- 波音材料规范8-219

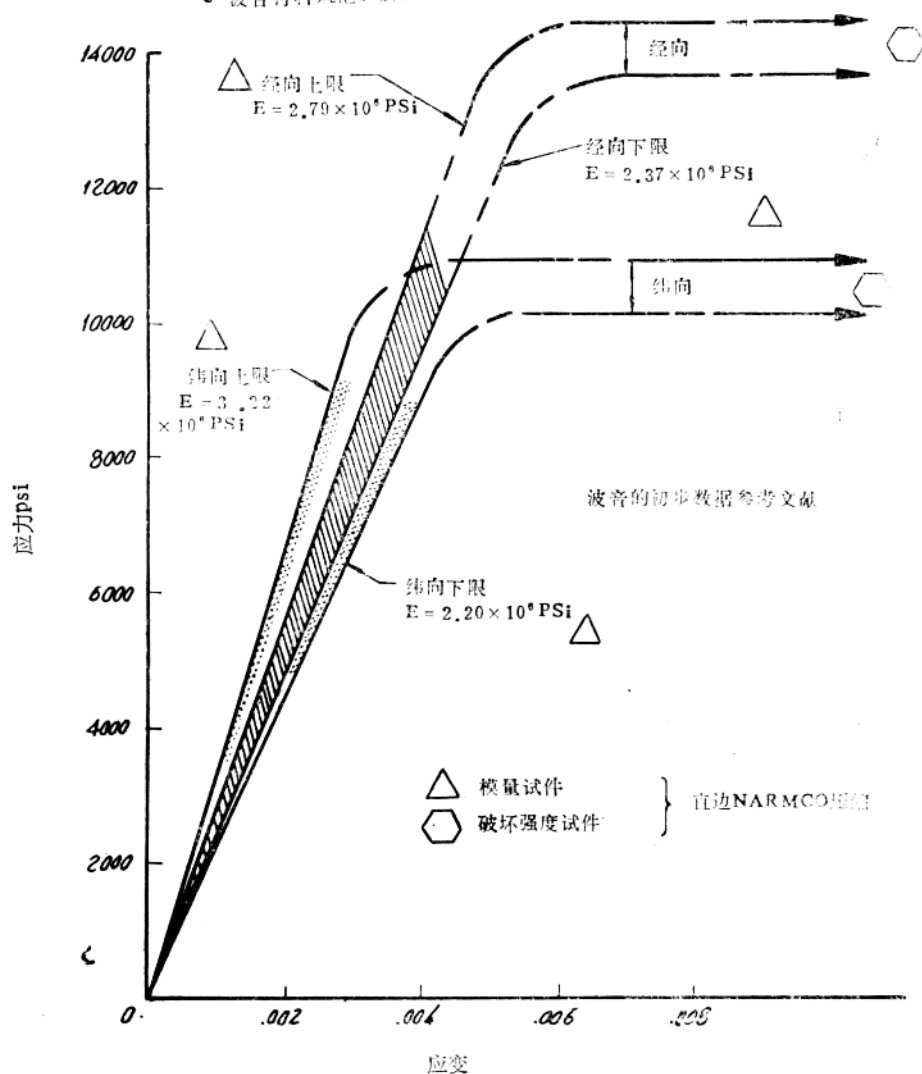


图2 KEVLAR/环氧、285型, 160°F, 湿态压缩应力-应变曲线

表7 波音和洛克希德数据的比较(250°F固化系统, 波音规范BMS 8-219*)
波音鉴定数据/洛克希德验收数据

类型	波音(经向和纬向的最小值)				洛克希德①			
	室温,干态		室温,湿态		室温,干态		室温,湿态	
	Et msi	Ftu ksi	Ec msi	Fcu ksi	Et msi	Ftu ksi	Ec msi	Fcu ksi
285	3.5	67.1	3.4	21.0	4.5 ^②	62.1 ^②	N.A	21.0 ^②
120	3.8	70.7	3.6	18.0	3.8	57.6	N.A	20.8

设计强度数据③

类型 (见③)	波音设计数据				洛克希德许用值			
	室 温 干 态				室温干态		室温湿态	
	Et msi	Ftu ksi	Ec msi	Fcu ksi	Et msi	Ftu ksi	Ec msi	Fcu ksi
	3.66	54.7	3.34	15.6	3.76	56.11	3.61	20.13
%差	-2.7	-2.5	-7.5	-22.5	基 准			

①未区别经向和纬向。②181型(50Z/每码)编织物。③洛克希德报告(参考资料6)中未指明类型(120或181)或取向(经向或纬向)的差别。
*基本的波音数据和参考资料6的数据。

1.5 编织物力学特性 (非波音数据)

图3和图8在经向和±45°方向给出了具有BP907环氧和5208环氧的Kevlar-181型编织物的典型拉伸、压缩和剪切的应力-应变曲线。这些都是350°F固化体系的。性能上较大的差别与两种环氧体系有关，部分地是由于纤维含量的不同。由于编织的过程中，经向和纬向的性能不同，其间经向较纬向更被校准、拉直，因而处于较大的拉力下。

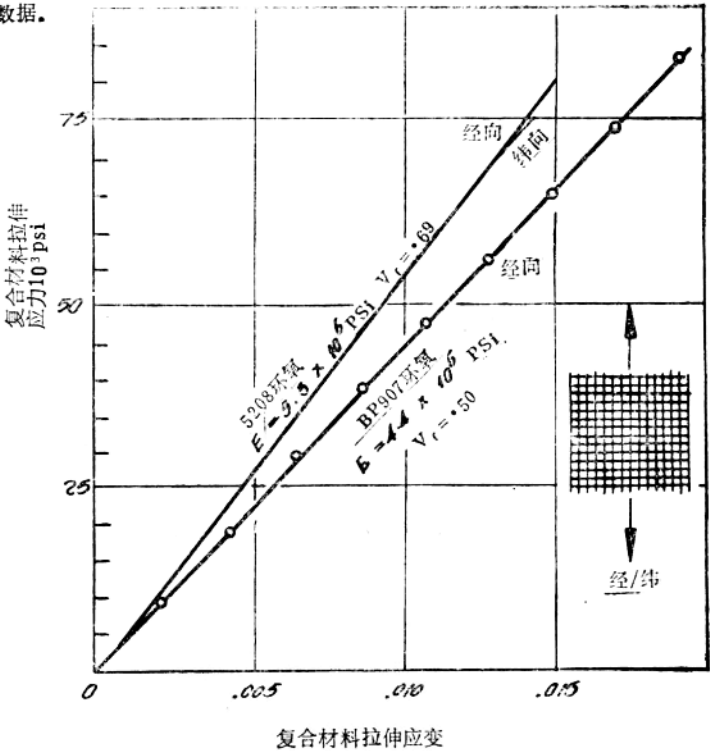


图3 室温,干态下KEVLAR-49的181型编织物拉伸的应力-应变曲线初步数据:此数据取自参考文献1,没有核证,可用于初步设计

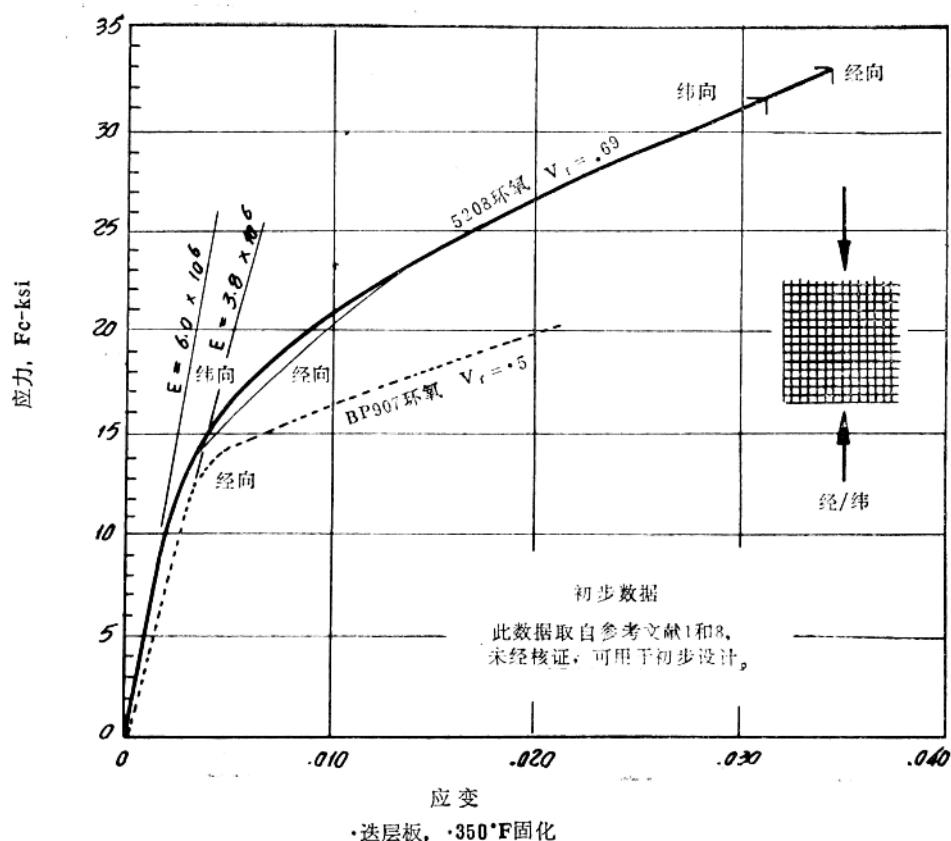


图4 室温, 干态下, KEVLAR-49的181型编织物压缩的应力-应变曲线

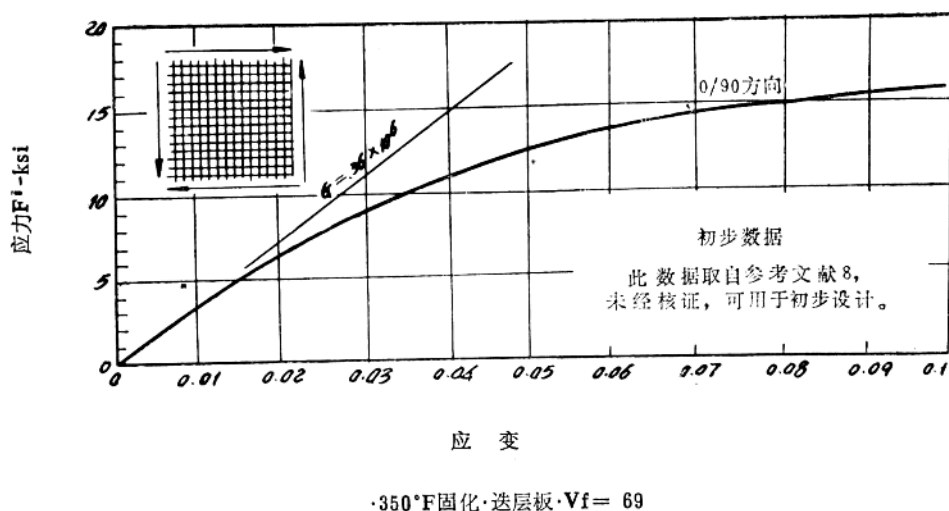


图5 室温, 干态下, KEVLAR-49的181型编织物与5208环氧的剪切应力-应变曲线

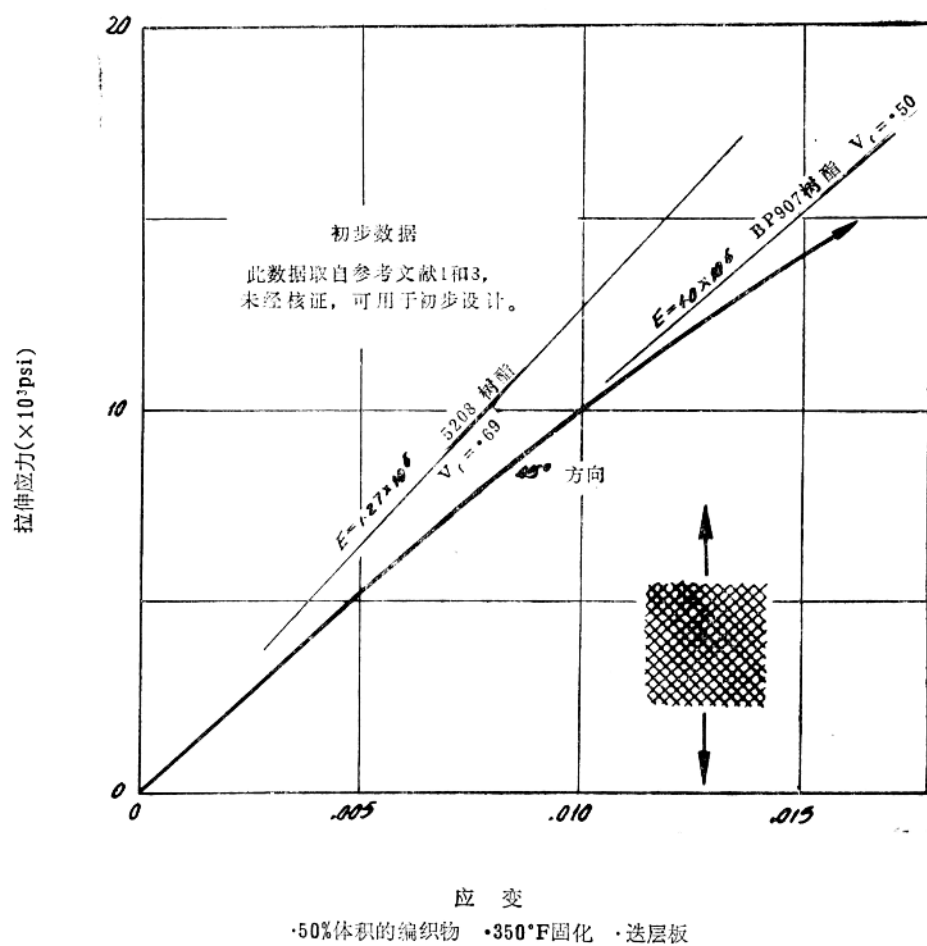


图6 室温，干态下，KEVLAR-49的181型编织物拉伸的应力-应变曲线

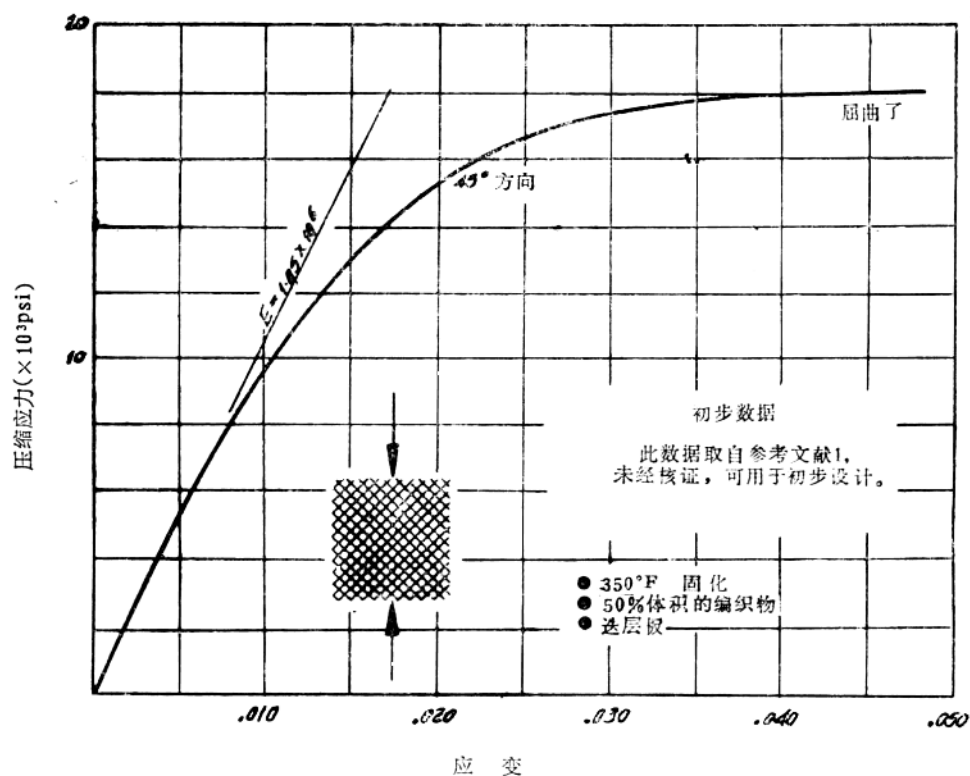
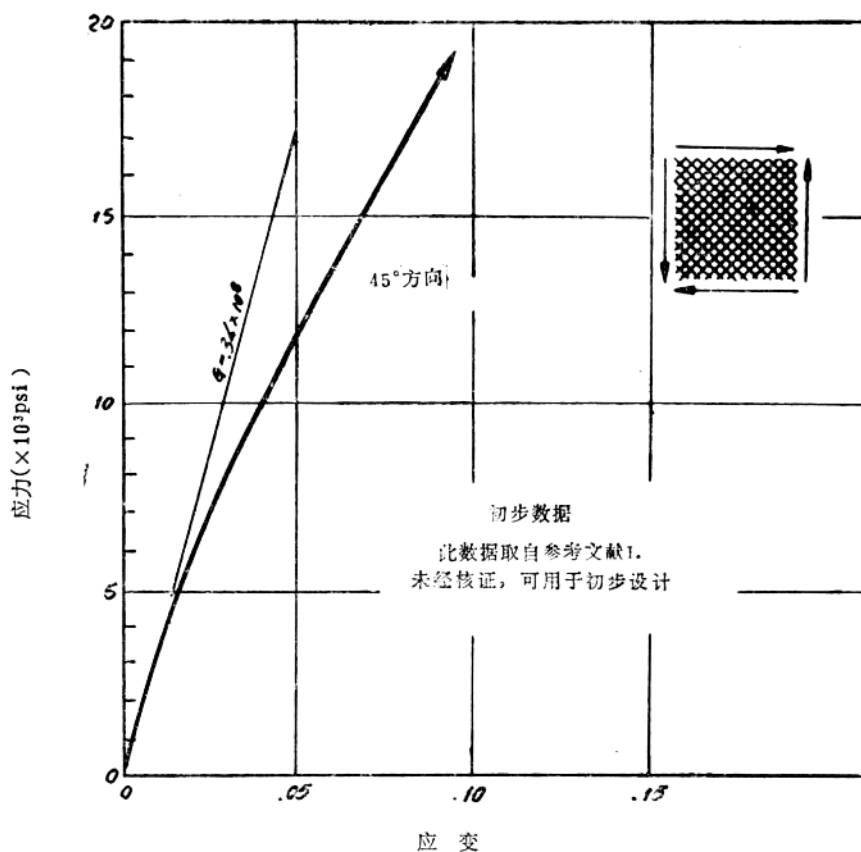


图7 室温干态下, KEVLAR-49的181型编织物与
BP907环氧压缩的应力-应变曲线



·50%体积的编织物 ·350°固化 ·迭层板

图8 室温干态下, KEVLAR-49的181型编织物与BP907环氧平面(轨道)剪切的应力-应变曲线

1.6 挤压强度

屈服挤压应力定义为, 在该载荷挠度曲线上出现第一个非线性点时的载荷, 除以初始孔直径和板厚的乘积。

破坏挤压应力定义为试件所能承受的最大载荷除以初始孔直径和迭层板厚度的乘积。

表8给出了来自三个出处的挤压强度数据, 波音数据〔参考资料7〕是针对Kevlar和混合复合材料的, 且仅针对一种结构形式的试件。

在一次电话谈话中, 参考资料9的作者对Kevlar迭层板表述了下列见解:

1. 螺栓的抗挤压能力2倍于销接的。
2. 螺栓的抗挤压能力实质上取决于扭矩(假定螺母至少是一个紧配合)。

表8中包含的是碳和Kevlar两种混合结构的挤压强度, 其被引用在混合复合材料部分。

表8 Kevlar混合复合材料挤压强度（典型值；室温干态，除另有标注外。）*

	迭层板的组成		迭层板厚度 (in)	挤压应力 Psi		注
	纤维	树脂		屈服	破坏	
Kevlar	(0, 90)n编织物	未指明	0.154	12000	30000	①
	(0, 90)n181型编织物	E-781	0.150	10100	25200	⑤ ⑧ ⑨
	(±45) ₃ 编织物	934	0.046	14900	26300	②
	(±45)n181型编织物	E-781	0.150	14100	25100	⑤ ⑧ ⑨
	(±45) _{2i} 无纬布	934	0.075	18000	35900	②
	((0, 90)/(±45)) 181型编织物	E-781	0.100	45000	75000	④ ⑧
	((0, 90)/(±45)) 181型编织物	E-781	0.100	21000	36000	⑥ ⑧
0.100			16500	32000	⑦ ⑧	
0.100			12500	25000	⑥ ⑩	
0.100			12000	20000	⑦ ⑩	
混合复合 材料③	((±45) ₂ ^{GR} /0 K) _i 无纬布	5208	0.046	21700	34100	②
	((±45) ^{GR} /0 K) _{2i} 无纬布	5208	0.063	20700	48000	②

①参考资料 1.

②参考资料 7，边距2.0，孔直径0.5.

③GR-碳纤维T300, K——Kevlar.

④迭层板在325°F固化，并在350°F后处理 4 小时，螺母拧紧力矩对 0.25英寸直径的螺栓为35英寸-磅； 5 个试件的平均值。

⑤销钉挤压试验，边距 3 D，0.25英寸直径的销钉； 5 个试件的平均值。

⑥0.25直径的销钉。

⑦0.375直径的销钉。

⑧参考资料 9；低孔隙率的迭层板(<1.0%)。

⑨参考资料 9；高孔隙率的迭层板(>1.0%)。

⑩参考资料 9；低孔隙率，300°F，干态。

* 初步数据，取自注中指出的参考资料，未加以验证，可于初步设计中使用。