

# 高强度和高模量碳纤维复合材料失效模式比较

龚博安, 韦娟芳, 冀有志

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

**摘要:**介绍了高模量碳/环氧树脂、碳/双马树脂和高强度碳/环氧3种复合材料抗拉伸、压缩、弯曲、层间剪切等力学性能的测试情况,用微观和宏观照片对比了不同强度、模量和不同树脂的失效模式差异,包括失效部位、失效的层次和类型。指出现行复合材料测试标准在测试高强度和高模量碳纤维复合材料性能时存在的问题。同时用测试数据对比了高模量碳纤维分别与双马来亚胺5405和环氧树脂5224匹配后的性能,以及高强度碳纤维与环氧BA9913匹配后的性能。

**关键词:**复合材料;力学参数;检测;失效模式

中图分类号: TQ327.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9815(2007)06-0025-05

## Failing Mode Comparing with High Module and High Strength Carbon Fiber Composite Material

GONG Bo-an, WEI Juan-fang, JI You-zhi

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000 China)

**Abstract:** This paper introduces the mechanic parameter testing for three kinds of composite materials, including high module carbon/epoxy resin, high module carbon/bismaleimide resin, high strength carbon/epoxy resin. The difference of failing modes for high module and high strength composite are showed in detail using photos in both normal view and micro view. The paper also indicates the problem associated with the testing specification, as well as the mechanic characters for the three composites by listing the measuring data.

**Key words:** composite material; mechanic parameter; testing; failing mode

### 引言

碳/环氧复合材料具有一系列优异性能,如密度低、模量高、强度高、线膨胀系数小以及优良的抗振动阻尼特性等。高模量碳纤维为在更高温下石墨化的碳纤维,它很高的比模量值非常符合航天和航空结构材料的需要,可以提高结构的基频,减低质量,所以目前在卫星结构中得到广泛的应用。高强度纤维由于其很高的比强度、较大的断后延长率和优良的疲劳特性,成为飞机结构的首选材料。

目前,用于结构复合材料的基体材料绝大多数为环氧树脂。它是一种热固性树脂材料,约在120~170℃以上可由液态加热固化,具有工艺性好、耐

腐蚀、耐高温等特点。双马来酰亚胺树脂(BMI)是先进树脂基复合材料的另一种常用树脂,其耐热性能好于环氧树脂,但工艺性能较环氧树脂差,同时具有耐湿热、耐辐射,热膨胀系数小、电性能好及耐磨等特点。对于使用在130℃以上高温的结构,为了改善高模量碳纤维材料的断裂延展性,选用了北京航空材料研究院研制的耐高温型改性(韧性)高温固化树脂体5224和5405双马来酰亚胺树脂与之相配。5224玻璃转化温度( $T_g$ )为230℃,5405  $T_g$ 为220℃。对于要求强度高而模量不高的结构,可以选用高强度低成本纤维。中温整体成型的结构型面精度较高,因此高强度纤维选用了航空制造工程研究所开发的高性能中温固化BA9913环氧树脂,其  $T_g$  为160℃。

收稿日期: 2007-10-03

作者简介: 龚博安(1984-)男,西安人,助理工程师,主要从事星载天线结构设计的研究,(电话)13772501525(电子信箱)davidgba@163.com。

1 失效模式比较

1.1 单向带抗拉伸

测试标准：GB/T 3354-1999 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法。

试件尺寸：230 mm(L) × 15 mm(b) × 2 mm(h)。

高模/5224、高模/5405、高强/BM9913这3种材料均表现为根部脱粘，因此真实值比实际测量值大。失效试件照片见图1。由于测试使用的胶粘剂及根部固定方式基本最优化，根部粘接性能提高的空间已经很小，所以为了测试到材料真实的抗拉伸强度，需要将测试标准中规定的试件厚度减小。

1.2 层压板抗拉伸

测试标准：QJ 971-86 纤维增强塑料小试样拉伸性能测试方法。

试件尺寸：180 mm(L) × 15 ± 0.1 mm(b) × 2 mm(h)。

铺层：[0° / ± 45° / 90°]<sub>5</sub>

高强度材料的面板抗拉伸破坏形式表现为纤维

束状分离（见图2）和分层（见图3）两种形式；高模量材料没有纤维束状分离现象，也很少出现分层现象（见图4）。

1.3 单向带抗压缩

测试标准：GB/T 3856-2005 单向纤维增强塑料平板压缩性能试验方法。

试件尺寸：140 mm(L) × 6 mm(b) × 2 mm(h)。

高模高强两种材料的抗压缩强度和模量均低于抗拉伸性能。高模量材料破坏时有分束、分层趋势（见图5），而高强度材料表现为整体错断（见图6）。

1.4 层压板抗压缩

测试标准：QJ1403A-2004 纤维增强塑料薄板

表1 20层[0° / ± 45° / 90°]<sub>5</sub>层压板抗拉伸强度测试结果

层压板类别	抗拉伸模量 / GPa	抗拉伸强度 / MPa
高模/5224	105	434
高模/5405	92.5	422
高强/BA9913	44.8	749

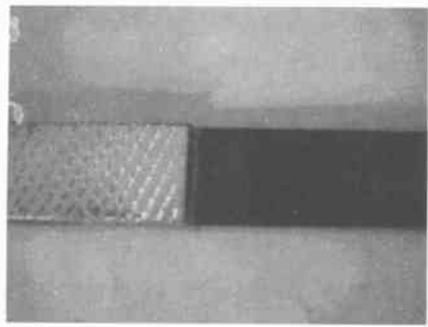


图1 单向带拉伸试件

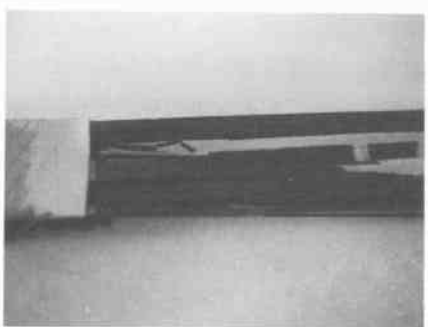


图2 高强度材料试件(1)

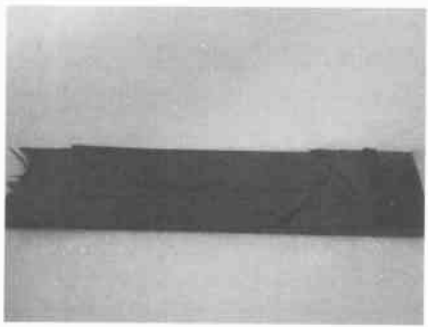


图3 高强度材料试件(2)

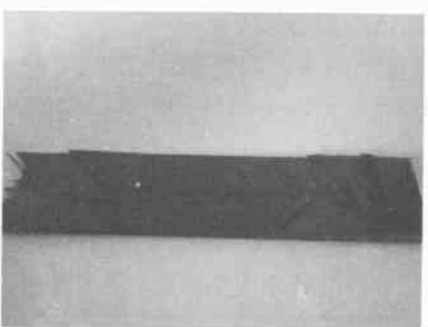


图4 高模量材料试件

压缩性能试验方法。

试件尺寸：80 mm(L)× 12.5 mm(b)× 2 mm(h)。  
两种材料破坏形式为失稳之后的整体断裂，如图 7。

1.5 单向带抗弯曲

测试标准：GB/T 3356-1999 单向纤维增强塑

表 2 单向带抗压缩测试结果

单向带类别	0°抗压缩模量 / GPa	0°抗压缩强度 / MPa
高模/5224	275	530
高模/5405	260	657
高强/BA9913	116	927

料弯曲性能试验方法。

试件尺寸：84 mm(L)× 12.5 mm(b)× 2 mm(h)。

高模量材料抗弯性能明显高于高强度材料。两种材料破坏形式均表现为表层面板受压断裂。测试时表层受压，底层受拉，因抗拉伸强度高于抗压

表 3 20层[0°/±45°/90°]<sub>5</sub>层压板抗压缩测试结果

层压板类别	抗压缩模量 / GPa	抗压缩强度 / MPa
高模/5224	276	574
高模/5405	79.5	264
高模/BA9913	42.5	490

表 4 两种高模单向带的常温和高温抗弯曲测试结果

单向带类别	0°抗弯曲模量 / GPa	0°抗弯曲模量(150℃) / GPa	0°抗弯曲强度 / MPa	0°抗弯曲强度(150℃) / MPa
高模/5224	231	223	1 100	963
高模/5405	257	227	1 050	916

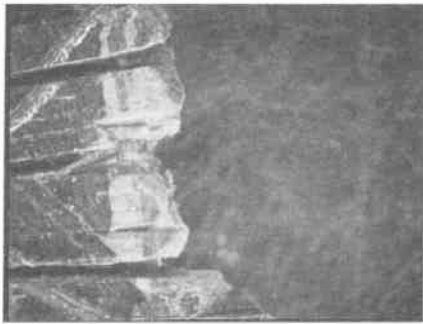


图 5 高模量材料抗压缩试件

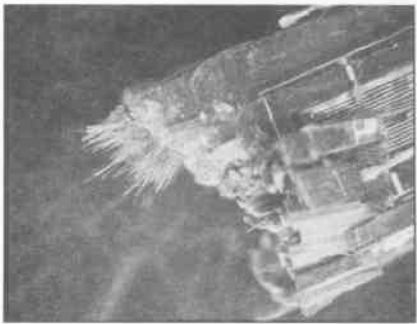


图 6 高强度材料抗压缩试件

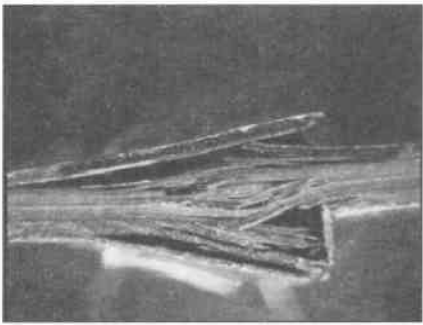


图 7 多层板抗压缩试件



图 8 高模量材料抗弯曲试件

缩强度,抗弯曲强度一般介于抗拉伸强度和抗压缩强度之间,更接近大型板壳结构的真实强度。

1.6 抗层剪

测试标准:GB/T 3357-1999 单向纤维增强塑料层间剪切性能试验方法。

试件尺寸:30 mm(L)×6 mm(b)×2 mm(h)。

3种材料在抗层剪试验中表面均出现裂纹(图10)。高强度材料有分层趋势(图11)。高模量未表现出分层,说明对于高模量材料需要研究改进测试

方法,以测试真实的抗层间剪切强度。

两种高模量材料在高温抗层剪强度均没有下降,高强度材料在130℃下降20%,因此BA9913树脂复合材料使用温度最好不要超过120℃,见表5。

1.7 面内抗剪切(±45°)

测试标准:GB/T 3355-1999 纤维增强塑料纵横剪切试验方法。

试件尺寸:250 mm(L)×25±0.5 mm(b)×2 mm(h);±45°铺层,0°取样。

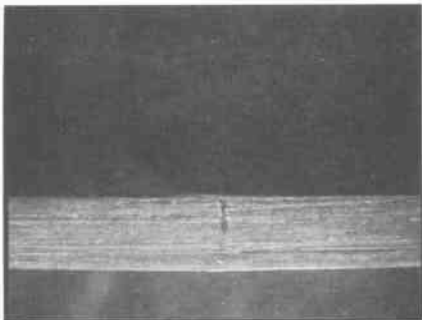


图 9 高强度材料抗弯曲试件

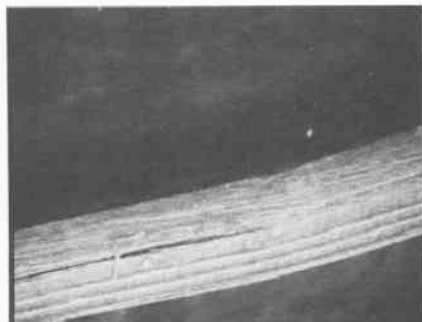


图 11 高强度材料抗层剪试件

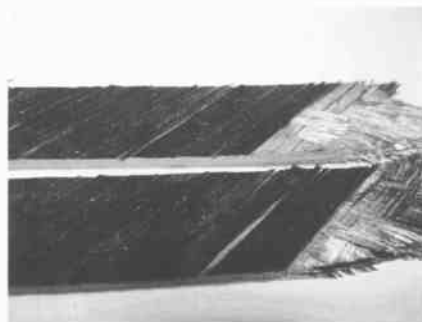


图 13 高强度材料面内抗剪切试板(±45°)

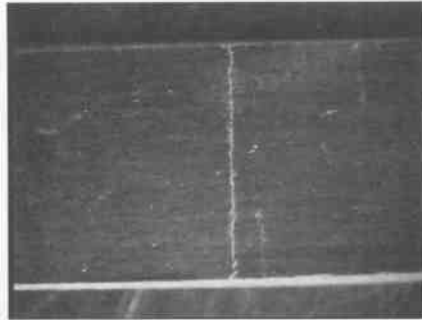


图 10 抗层剪试件表面裂纹

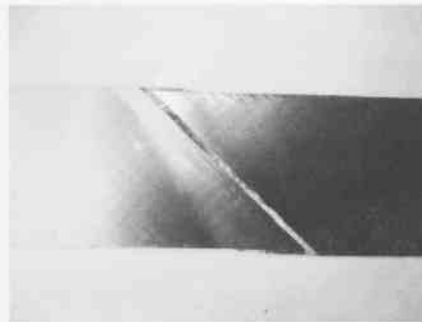


图 12 高模量材料面内抗剪切试板(±45°)

表5 层间抗剪切测试结果

层压板类别	抗剪切强度(常温)	抗剪切强度(150℃)
	/ MPa	/ MPa
高模/5224	59.0	57.5
高模/5405	57.0	57.1
高强/BA9913	69.8	44.7

表6 面内纵横抗剪切测试结果(常温)

名称	抗剪切模量 / GPa	抗剪切强度 / MPa
高模 /5224	5.08	58.6
高模 /5405	4.22	61.0
高强 /BA9913	4.22	123.0

所有破坏均沿  $\pm 45^\circ$  方向发生, 高强度材料比高模量材料破坏时层间分离和束状分离现象更为明显。由于破坏强度不仅与树脂抗剪切强度有关, 而且与纤维抗拉伸强度有关, 因此高强型材料的面内抗剪切强度远高于高模量型材料, 因此高强型材料更适合在承力复杂的金属埋件附近做加强片补强。

2 结论

通过高强型和高模型碳纤维复合材料的力学

性能测试试件失效模式分析, 得出目前现行的单向带拉伸测试标准对于高强和高模型材料不适用, 需要修改试件厚度尺寸, 单向带抗层间剪切对高强型材料是适用的, 但不适用于高模型材料, 也需要进行改进。层压板测试标准和单向带的抗压缩、抗弯曲和抗面内剪切测试标准仍然适用。

参考文献:

[1] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.  
[2] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.  
[3] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2001.  
[4] 韦娟芳. 空间4~10米可展开天线的动力耦合分析及实验技术研究[R]. 浙江大学博士学位论文, 2002.  
[5] WEIJUAN-FANG, SONG Yan-ping, GAO BO. Space composite antenna bulking failure-mode analysis and test [J]. 56th international astronautical congress(IAF), 2005: 17 - 21.

(上接24页)

fiber[M]. New York:Marcel dekker, 1998.  
[2] ISMAIL A F, RAHMAN M A, MUSTAFA A, et al. The effect of processing conditions on a polyacrylonitrile fiber produced using a solvent-free free coagulation process [J]. Materials science and engineering A, 2007.  
[3] PAUL D R. A study of spinnability in the wet-spinning of acrylic fiber[J]. J.Appl.Polym.Sci., 1968, 12(10): 2 273 - 2 298.  
[4] HAN G C, MARILYN L M, SATISH K. Oriented and exfoliated single wall carbon nanotubes in polyacrylonitrile [J]. Polymer, 2006, 47: 3 494 - 3 504.  
[5] ANDRZEJ Z. Fundamentals of fibre formation[M]. 北京:中国纺织出版社, 1976.  
[6] 高绪珊, 吴大诚. 纤维应用物理学[M]. 北京:中国纺织出版社, 2001.  
[7] BARNES H A, HUTTON J F, WALTERS K. An introduction to rheology[M]. New York:Elsevier, 1989.  
[8] 冯尚华. 非离子表面活性剂壬基酚聚氧乙烯-10醚的流变性[M]. 太原:中国日用化学工业研究院, 2004.  
[9] RANGARAJAN P, BHANU V A, GODSHALL D, et al. Dynamic oscillatory shear properties of potentially melt processable high acrylonitrile terpolymers[J]. Polymer, 2002, 43: 2 699 - 2 709.  
[10] BAHRAMI S H, BAJA P, SEN K. Effect of coagulation conditions of properties of poly(acrylonitrile-carboxylic acid)fibers[J]. J Appl Polym Sci, 2003, 89: 1 825 - 1 837.  
[11] MICHAEL J B, VINAYAK B, JAMES E M, et al. Shear rheological properties of acrylic copolymers and terpolymers suitable for potentially melt processable carbon fiber precursors[J]. J.Appl.Polym.Sci., 2004, 93: 2 856 - 2 865.  
[12] SAWAI D, YAMANE A, TAKAHASHE H, et al. Development of high ductility and tensile properties by a two-stage draw of poly(acrylonitrile): effect of molecular weight[J]. J.Polym.Sci., 1998, 36: 629 - 640.  
[13] BAJAJ P, SREEKUMAR T V, SEN K. Structure development during dry-jet-wet spinning of acrylonitrile/vinyl acids and acrylonitrile/methyl acrylate copolymers [J]. J.Appl.Polym.Sci., 2002, 86: 773 - 787.  
[14] 沈春银, 毛萍君, 张林, 等. 高相对分子质量PAN纺丝溶液的流变性[J]. 合成纤维工业, 2001, 24(2): 8 - 11.  
[15] 吴雪平, 凌立成, 吕春祥, 等. 不同分子量丙烯腈-丙烯酸酰胺共聚物溶液的流变性研究[J]. 新型炭材料, 2004, 19: 103 - 108.  
[16] WU X, LU C, WU G, et al. Rheological and thermal properties of acrylonitrile-acrylamide copolymers: influence of polymerization temperature[J]. Fibers and polymers, 2005, 6: 103 - 107.  
[17] BHANU V A, RANGARAJAN P, WILES K, et al. Synthesis and characterization of acrylonitrile methyl acrylate statistical copolymers as melt processable carbon fiber precursors[J]. Polymer, 2002, 43: 4 841 - 4 850.