

高性能纤维复合材料在航空阻尼材料方面的应用

冯艳丽，张楚旋，白玉龙，王 烽，胥国军

(中国航天科工六院四十六所 内蒙古航天新材料科技有限公司，呼和浩特 010010)

摘要：综述对金属和非金属阻尼材料用于飞机消音减振材料进行了比较，给出了阻尼减振用纤维材料的选择依据。分析了国外在减振阻尼用零件材料方面选用芳纶而不选用碳纤维的原因，提出了纤维增强复合材料中阻尼提高的改性途径。并将杂环芳纶中的F-12纤维和Armos纤维与对位芳纶Kevlar纤维进行了综合性能对比，可为用户选择应用阻尼用纤维材料提供参考。

关键词：阻尼材料；对位芳纶；杂环芳纶；纤维增强复合材料；综合性能；对比分析；选择应用

中图分类号：V258.3 文献标识码：A 文章编号：1007-9815(2013)04-0042-04

The application of high performance fiber reinforced composites in aeronautical damping materials

FENG Yan-li, ZHANG Chu-xuan, BAI Yu-Long, WANG Feng, XU Guo-Jun

(Inner Mongolia Aerospace New Material of Science and Technology Co., LTD. the 46th Research Institute, the Sixth Academy of CASIC, Hohhot 010010 China)

Abstract: This paper compared metal damping materials with nonmetal damping materials used as erasure and vibration-reduction materials in aircraft. The basis of choosing the fiber used in damping materials was given. The reason why damping materials overseas used aramid fiber rather than carbon fiber was analysed. The modified way to improve damping properties of the fiber reinforced composite was proposed. At the same time the comprehensive properties of F-12 fiber and Armos fiber which belong to heterocyclic aramid fiber were contrasted with the properties of Kevlar para-aramid fiber, which can give a reference to users to choose and using the fiber as damping materials.

Key words: damping materials; para-aramid fiber; heterocyclic aramid fiber; fiber reinforced composite; comprehensive property; contrastive analysis; choose and using

现代航空航天飞行器日益向高速和轻质化方向发展，随之而产生的宽频振动也越来越严重。振动过大会直接影响机器或结构的工作效率、寿命、安全性、稳定性等性能，有时甚至会造成系统失效，并且由振动所引起的噪声也会对环境产生干扰和危害，因此，需要采取一定的措施来减振和降噪。

另外，大型航天器起飞时，会有很大的速度增量和声振，因此会伴有一个能量很高和频度范围很广的振动发生及输入，因此设计时要考虑材料的阻尼特性，即振动能量的消耗和振动波在该材料中的传播因素。

通过阻尼进行减振和降噪的技术就是阻尼技术，是控制结构共振和降低噪声最有效的方法。

收稿日期：2013-07-14

作者简介：冯艳丽（1966-），女，呼和浩特人，研究员，从事F-12高性能芳纶制备和应用技术研究及F-12纤维织物技术研究，（电话）0471-5685850（电子信箱）fyl7776@126.com。

各类阻尼材料已广泛应用于航天导弹卫星、航空飞机、舰船、汽车工业等许多领域，深受国外重视，欧美、日本等发达国家对于阻尼材料和技术的研究及工程应用多处于保密状态，我国在这方面的研究起步较晚，与国外相比还存在较大差距，多数研究工作还有待进一步深入。因此，研究材料的阻尼行为，开发具有较高阻尼能力的结构材料对于解决由振动和噪声而造成的问题具有非常重要的意义。

1 金属和非金属阻尼材料用于飞机消音减振材料的比较

噪声疲劳对飞机机体特别是机身后段和尾翼产生的疲劳破坏问题正被越来越多的人所重视。因此，在现代飞机上，大多数采用降噪设计来降低结构噪声，增加结构的疲劳寿命来提高飞机的耐疲劳强度。

发动机消音板就是一个典型的降噪部件，过去其典型构造为多孔金属网面、带孔或不带孔的面板和具有谐振腔的蜂窝芯粘接的层状结构。由于其所处的特殊位置和工作环境，使得消音材料比较容易出现分层，一些小消音材料甚至会整块儿飞脱。

为了改善这一状况，现在用于飞机消音板的材料主要选用高强、高模、高阻尼等综合性能优异的纤维增强树脂基复合材料来代替金属材料。其原因有以下几点：

所有材料都具有一定的阻尼。但金属材料如钢、铝、镁等内部阻尼很小，倒是传递振动和噪声的良好介质，因此金属材料基本不具备降振和减噪的能力。但金属材料强度和模量高，常作为结构材料使用。

由于高聚物粘弹材料分子链段较多，耗能环节多，使得它们具有较好的阻尼性能，具有很强的降振和降噪能力，几乎是目前认为的最理想的减振和降噪材料，但这类阻尼材料的刚度和强度较低，难以作为单独的结构材料使用。

将具有粘弹性的高聚物与其它结构材料（如高性能纤维）复合成一定的阻尼结构，就形成了既有高强度，又有优良阻尼特性的纤维增强树脂基复合材料，与金属材料相比，其阻尼能力

要高出一到两个数量级，因此成为飞机发动机消音减振衬板材料的首选。

2 阻尼减振用纤维材料的选择依据

树脂基复合材料由于其粘弹性而使树脂基体的阻尼性能得以提高，同时界面的存在也使复合材料的阻尼性能大幅提高，因此树脂基复合材料既是较好的结构材料，又具有良好的阻尼性能，是非常好的阻尼材料。

按阻尼材料划分，纤维增强复合材料属于聚合物基阻尼复合材料，它是用纤维增强具有一定力学强度和较高损耗因子的聚合物而形成的复合材料。主要品种有碳纤维增强复合材料和芳纶增强复合材料（如Kevlar/Epoxy阻尼复合材料）等。其阻尼主要来自于复合材料的界面滑动、界面处的位错运动及基体和复合相的固有阻尼。

将纤维复合材料作为阻尼减振材料时，所选择纤维材料本身的阻尼要较高，考虑纤维含量对纤维复合材料的影响及外因如频率、温度、振幅等对纤维复合材料的影响。纤维增强复合材料的阻尼具有各向异性和高度可调整性，并依赖于微观结构的排列，把改善调整阻尼，提高力学性能，并保持高强、高模特性等综合起来进行优化，使复合材料结构具有更好的综合性能。

另外，阻尼减振骨架材料的性能在很大程度上取决于纤维材料的性能。一般来说，组成骨架材料的纤维应具有如下基本性能：

强度高、模量高和密度小，具有轻质和高强的特性；

良好的耐热性能、耐湿热性能和耐疲劳性能；

尺寸稳定性好。即在负荷下的变形及蠕变小，热态时的热收缩小；

同树脂的粘接性好；

具有良好的耐腐蚀性和阻燃性。

表1列出了世界上3种主要高性能芳纶的性能数据。

表1中，由中国航天科工六院四十六所研制和生产的F-12纤维强度明显高于进口美国Kevlar-49纤维，与同类纤维俄罗斯的Armos纤维性能水平相当，其极限氧指数略低于Armos纤维而高于

Kevlar纤维，与Armos纤维相比，F-12纤维有较低的吸湿率，成品纤维受湿气的影响较小。

F-12纤维的力学性能达到了目前世界上工程化应用中性能最好的Armos纤维的性能水平，是

优良的结构材料。同时，它又具有芳纶阻尼性优良的特点，因此F-12纤维树脂基复合材料是性能优异的阻尼材料，可作为飞机消音减振衬板首选的增强材料。

表1 3种高性能芳纶的主要性能指标

纤维种类	应用特性	密度/(g·cm ⁻³)	拉伸强度/GPa	拉伸模量/GPa	伸长率	极限氧指数	分解温度/℃	回潮率	热胀系数10 ⁻⁶ /K	玻璃化温度/℃
中国F-12杂环芳纶	高强、高模	1.44	4.5~5.0	120~150	2.8%~3.5%	37	540	2.55%	±1	264.6
俄罗斯Armos纤维	高强、高模	1.43	4.2~4.8	140	3.0%~4.0%	39~42	560	3.35%	±1	231.7
美国Kevlar-49纤维	高模	1.45	2.7~3.2	113	2.4%~3.0%	29	500	2.99%		345.0

3 国外在减振阻尼用零件材料方面选用芳纶而不选用碳纤维的原因

国外从1960年代开始，减振阻尼材料以Kevlar/环氧、石墨/环氧等纤维增强树脂基复合材料为主，从理论上研究了结构聚合物基阻尼复合材料的阻尼机理、阻尼测量以及基体树脂、固化剂、纤维种类、纤维铺设方式、复合材料结构等对其阻尼性能的影响。但对于所采用的研究方法高度保密，鲜见报道。

纤维增强复合材料的阻尼损耗因子通常不会超过1%，是普通金属材料的10~100倍，表2列出了不同材料的损耗因子数据。

表2数据显示，在由两相组成的复合材料中，Kevlar纤维复合材料的两相都可以看成是粘弹性的，并且其阻尼系数在两相中接近。玻璃纤维和碳纤维则被视为弹性体，因此它们与Kevlar纤维阻尼系数会有数量级的差别。

实验数据还表明，Kevlar纤维复合材料的阻尼系数较高且恒定，不依赖于具体材料的杨氏模量。其中石墨/环氧和Kevlar49/环氧的阻尼损耗因子相差10倍之多，这样导致了二者在阻尼性能上的较大差异。

为此国内研究了纤维增强复合材料中纤维种类对复合材料阻尼性能的影响。实验分别制备了

以Kevlar纤维和碳纤维为单一增强材料的两种环氧树脂复合材料：Kevlar纤维增强复合材料和碳纤维增强复合材料。选择不同频率和振幅测试材料的损耗因子，在频率为1 Hz，振幅为0.015%条件下，损耗因子测试结果如图1。

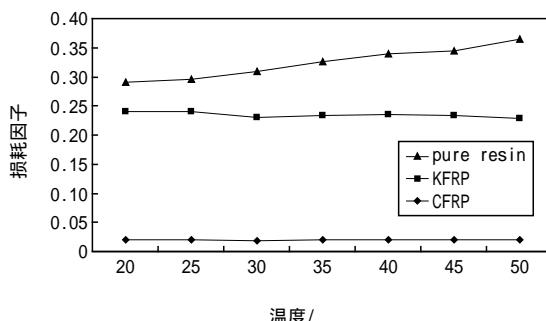


图1 复合材料和树脂浇注体在不同温度下的损耗因子

图1中，Pure resin曲线为基体树脂耗损因子，CFRP曲线为碳纤维复合材料耗损因子，KFRP曲线为Kevlar纤维复合材料耗损因子。实验结果表明：Kevlar纤维复合材料的阻尼性能远优于碳纤维复合材料。

就材料体系而言，碳纤维目前是复合材料制品中广泛应用的一种力学性能优良的增强材料，具有高强度、高模量、低密度等突出优点，但其阻尼性能偏低。Kevlar类纤维密度更低和比强度高，具有优良的阻尼性能，属于增强材料中的高阻尼纤维。事实上，玻璃纤维复合材料的阻尼性能也远远高于碳纤维复合材料。因此国外在减振阻尼用零件材料方面会选用芳纶而不选用碳纤维。

据资料报道，在飞机发动机消音结构中，

表2 不同阻尼材料的损耗因子数据

材料	损耗因子($\times 10^{-4}$)	材料	损耗因子($\times 10^{-4}$)
不锈钢	6	石墨/环氧	17
球墨铸铁	30	Kevlar49/环氧	180
玻纤/环氧	29	固化的聚醚树脂	400

CFM56-3发动机的消音结构就是采用了Kevlar-49纤维增强环氧树脂复合材料层压板制造, 内嵌在风扇机向匣内侧的消音衬板, 其表面加了加强肋。

另外, 国外采用频率扫描及衰减瞬变技术对Kevlar纤维复合材料的阻尼因子进行了测定, 两种技术得到的结果相近, 表3中给出了阻尼因子的均值和标准偏差。

表3 不同测试方法得出Kevlar49/环氧复合材料的阻尼因子

样品形式	杨氏模量/GPa	纤维体积分数	样品数量/个	衰减瞬变法		频率扫描法	
				阻尼因子 $\sigma \times 10^3$			
单向层片	73.72	60%	16	6.692	0.087	7.228	0.611
编织(0, 90°)	30.86	47%	20	6.674	0.138	6.803	0.614

复合材料由基体和增强材料两相组成, 可根据两相不同的比例(体积分数)来预测复合材料的阻尼值, 特别是在Kevlar纤维复合材料中, 两相性能相近, 这种预测更切合实际, 预测是基于振动在粘弹性材料中能量传播的消耗, 前提是纤维及基体各自的模量和阻尼系数已知。

文献报道, 环氧树脂的损耗因子0.026, Kevlar纤维的损耗因子0.018, 石墨纤维的损耗因子0.0015, 表4中把理论计算的结果与实测值进行对比, 其一致性较好。

表4 计算与实测不同复合材料阻尼值的比较

材 料	弹性模量E		损耗因子		复合材料阻尼		
	复合材料	树脂	纤维	树脂	纤维	计算值	实测值
Kevlar/环氧(单向)	9.3	0.878	1.85	0.026	0.0180	0.0180	0.0180
Kevlar/环氧(编织)	4.0	0.878	1.85	0.026	0.0180	0.0190	0.0200
碳纤维/环氧(单向)	13.4	0.878	32.0	0.026	0.0015	0.0024	0.0017
玻纤/环氧(单向)	6.6	0.878	10.0	0.026	0.0015	0.0027	0.0029

国内阻尼复合材料研究的着眼点主要集中在玻璃纤维、芳纶和碳纤维混杂复合材料的阻尼性能及其应用上, 目前研究水平尚处于探索阶段。

4 纤维增强复合材料中阻尼提高的改性途径

纤维与基体之间存在的相对滑移和基体固有的粘弹性使得纤维增强复合材料具有良好的阻尼特性, 其影响因素主要有基体特性、纤维种类、

纤维直径、纤维体积比、铺层顺序、铺设角度、载荷条件及混杂方式等。

目前, 提高复合材料阻尼的途径可以分为两大类, 一是增加材料的固有阻尼, 另一种途径是对复合材料外加阻尼。获得高阻尼复合材料最有效的途径是采用高阻尼基体、复合相及设计和制备高阻尼界面。纤维增强复合材料常用的阻尼改性方法有:

选用具有高阻尼的纤维或基体, 如Kevlar纤维和碳纤维阻尼相比就有数量级的差别。

在复合材料结构层表面作阻尼处理。

制备共固化阻尼复合材料。

将复合材料和高阻尼的粘弹性材料粘合在一起, 约束层阻尼处理、层间阻尼处理。

利用两种以上纤维制成混杂纤维复合材料。

对于复合材料而言, 阻尼优化必须从全局性能要求出发, 将材料的阻尼、刚度、强度等宏观性能同时作为设计目标, 来得到满足各项指定功能要求的复合材料。也就是说, 材料阻尼性能的获得, 不能以牺牲材料的刚度和强度性能为代价。

国内学者对玻璃纤维和碳纤维混杂后对环氧玻璃化转变和阻尼性能影响的研究结果表明: 经GF/CF混杂后, 复合材料的阻尼性能符合混杂定律, 阻尼因子介于GF复合材料和CF复合材料之间, 并且都比基体的阻尼因子大。在这样的混杂方式下, 玻璃纤维的引入增加了复合材料的阻尼性能, 而碳纤维正好相反, 碳纤维含量越多, 阻尼越小, 也就是说碳纤维的加入降低了阻尼性能, 如图2。

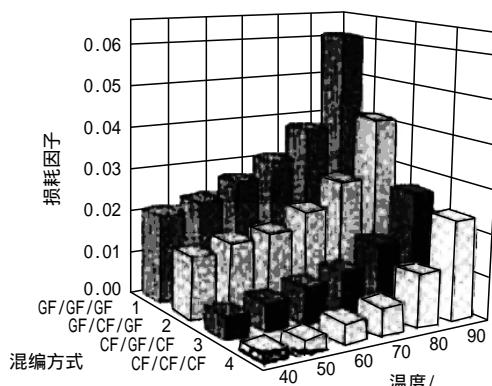


图2 混杂纤维环氧复合材料的阻尼性能
(双悬臂梁模式, 应变=0.1%)

(下转第61页)

- [11] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 1-11.
- [12] 任兆杏, 丁振峰. 低温等离子体技术[J]. 自然杂志, 1996, 18(4): 201-207.
- [13] 苏武, 黄英, 吴道伟. PBO纤维表面改性新进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, (4): 19-23.
- [14] Liu Dong, Chen Ping, Chen Mingxin, et al. Effects of argon plasma treatment on the interfacial adhesion of PBO fiber/bismaleimide composite and aging behaviors[J]. Applied Surface Science, 2011, (257): 10 239-10 245.
- [15] 邱峻, 潘婉莲. PBO纤维表面改性与热处理研究[J]. 合成纤维, 2008, (1): 14-17.
- [16] 张英东, 王宜, 胡健, 等. PBO纤维表面改性技术研究进展[J]. 合成纤维工业, 2004, 27: 37- 39.
- [17] Park J M, Kim D S, Kim S R. Improvement of inter facial adhesion and nondestructive damage evaluation for Plasma-treated PBO and kevlar fibers pepoxy composites using micro mechanical techniques and surface wettability[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 264: 431-445.
- [18] 傅倩, 凤德, 刘小云, 等. PBO纤维界面粘接性能的改善[J]. 宇航材料工艺, 2008, (1): 15-18.
- [19] 刘丹丹, 王宜, 胡健, 等. PBO纤维表面等离子改性及界面性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 10-14.
- [20] 李瑞华, 曹海琳. PBO纤维表面等离子体接枝改性研究[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(4): 396.
- [21] 张承双. 氧气等离子体改性PBO纤维的表面及PBO/PPESK复合材料界面的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [22] 杜艳欣. PBO纤维的国内外研究状况及应用前景[J]. 现代纺织技术, 2007, (3): 53-57.

(上接第45页)

5 结论

在航空、航天飞行器等方面, 良好的阻尼材料可有效减振和降噪, 因阻尼性能是复合材料及其结构动力学性能的一项重要指标。

给出了选择阻尼减振用纤维材料的依据。

碳纤维与芳纶在阻尼性能上的数量级差别, 使得在减振阻尼材料方面选择芳纶而不选用碳纤维。

将芳纶类纤维中的F-12、Kevlar和Armos纤维进行了综合性能对比, 可为用户选择阻尼用纤维材料提供参考。

参考文献

- [1] 范永忠, 孙康, 吴人洁. 环氧树脂混杂复合材料的阻

尼性能研究[J]. 功能材料, 2000, 31: 94-96.

- [2] 顾健, 武高辉. 新型阻尼材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 12: 53-56.
- [3] 田农, 薛忠民, 陈淳, 等. 纤维增强聚合物基复合材料阻尼性能的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 1: 85-88.
- [4] 任勇生, 刘立厚. 纤维增强复合材料阻尼研究进展[J]. 力学与实践, 2004, 2: 9-16.
- [5] 侯永振. 纤维增强复合材料的阻尼研究[J]. 橡塑资源利用, 2007, 6: 20-30.
- [6] 许砚琦. 结构阻尼复合材料的研究与制备[J]. 航空制造技术, 2001, 15: 75-77.

欢迎订阅 敬请赐稿 诚邀广告