

树脂基复合材料增韧的新途径——相迁移增韧技术

New Approach to Toughening Resin Matrix Composites——Phase Migration Toughening Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 孙占红 阳晓辉 李小兵 刘天舒

[摘要] 对复合材料常用增韧技术的特点进行了综合分析,在此基础上提出了一种全新的树脂基复合材料增韧技术——相迁移增韧,在大幅提高复合材料韧性的同时,又保持了预浸料良好的工艺性,经在环氧和双马复合材料体系中的工程化应用,表明相迁移增韧技术是树脂基复合材料增韧的一个有效途径。

关键词: 相迁移 增韧 树脂基复合材料

[ABSTRACT] Based on analyzing the characteristics of common toughening technology, a new toughening technology of resin matrix composites —phase migration toughening is proposed. While improving toughness of composites greatly, phase migration toughening technology keeps good processability of prepregs. Engineering applications of phase migration toughening technology in epoxy and bismaleimide composites systems demonstrate that it is an effective toughening approach to resin matrix composites.

Keywords: Phase migration Toughening Resin matrix composites

树脂基复合材料具有比强度和比刚度高、耐疲劳性好、耐腐蚀性好、可设计性强等优点,因而在飞机结构上得到越来越广泛的应用。但树脂基复合材料也有其弱点,就是它的抗损伤能力差,这在一定程度上制约了其在飞机结构特别是主承力结构上的应用。复合材料的抗损伤能力或简称为“韧性”,一般用冲击后压缩强度来度量。因此如何提高本征脆性树脂基复合材料的韧性,以满足飞机损伤容限设计要求,从而扩大其在飞机结构特别是主承力结构上的应用是树脂基复合材料发展需要解决的关键问题^[1-2]。

目前,树脂基复合材料的增韧主要是通过通过在体系中引入热塑性树脂作为增韧剂来实现的^[1]。热塑性树脂既具有较高的韧性又具有较好的耐热性,因此采用热塑性树脂增韧的树脂基复合材料,在韧性提高的同时还能保持其耐热性不降低。

1 常用的热塑性树脂增韧技术

按照增韧方式的不同,热塑性树脂增韧技术主要有原

位增韧、插层增韧、离位增韧^[1-3]。原位增韧是在热固性树脂体系中引入与其互溶的热塑性树脂,在固化过程中热化学交联反应诱导热固性-热塑性复相体系产生相分离,通过反应诱导相分离达到提高材料体系韧性的效果。由于复合材料抗损伤最薄弱的部位是在层间,因此原位增韧的增韧效果有限。

插层增韧/离位增韧是针对复合材料抗损伤能力最为薄弱的层间部位,通过在层间插入热塑性树脂胶膜或将热塑性树脂增韧相置于层间,达到抑制分层损伤和增加层间韧性的效果,从而较大程度地提高复合材料的韧性。但插层增韧由于在层间插入的热塑性树脂胶膜缺乏粘性,因而需要以牺牲预浸料原有的良好工艺性为代价。离位增韧由于其工艺方法与常规预浸料的工艺特征有一定差异,还需进一步适应工程化应用。

基于以上分析,本文提出了一种全新的树脂基复合材料增韧技术——相迁移增韧。

2 相迁移增韧技术的基本原理

相迁移增韧的原理是在热固性树脂中加入与其具有一定相容性的热塑性树脂,在复合材料成型过程中,体系中的热塑性树脂增韧相产生向复合材料层间的迁移,结果体系中的大部分热塑性树脂增韧相富集在复合材料层间,从而达到对复合材料抗损伤能力最为薄弱的层间部位增韧的效果。图1是相迁移增韧复合材料层间形貌的金相照片,图2是图1中复合材料层间形貌的放大细节金相照片,从图中可以清晰地看到热塑性树脂增韧相集中分布在上下两层纤维之间,这表明大部分热塑性树脂增韧相通过迁移而位于复合材料层间。此外,在热塑性树脂增韧相发生迁移后,复合材料内部的热固性树脂和剩余的热塑性树脂在固化过程中通过反应诱导相分离从而达到对复合材料内部的增韧。复合材料层间和复合材料内部增韧效果的协同效应将极大地提高整个复合材料体系的韧性。

相迁移增韧技术的机理和特点决定了其不但可以大幅提高树脂基复合材料的韧性,还保持了预浸料良好的工艺性,并且容易实现工程化应用,是树脂基复合材料增韧技术的一个新的发展亮点。

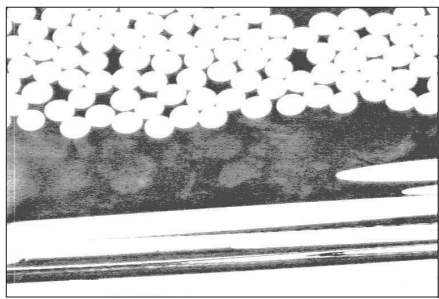


图1 相迁移增韧复合材料层间形貌(金相照片)

Fig.1 Interlaminar morphology of phase migration toughening composites(metallographic photograph)

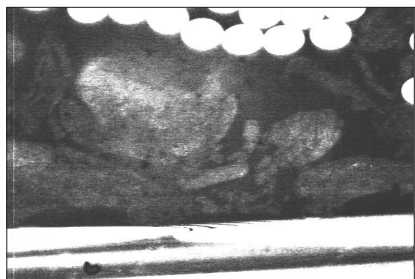


图2 相迁移增韧复合材料层间形貌放大细节(金相照片)

Fig.2 Detail magnification of interlaminar morphology of phase migration toughening composites(metallographic photograph)

3 相迁移增韧技术的应用

目前相迁移增韧技术已应用于环氧和双马复合材料体系的增韧。采用相迁移增韧技术制备了BA9916-II高温固化高韧性环氧预浸料及其复合材料和BA9913中温固化高韧性环氧预浸料及其复合材料,包括CCF300/BA9916-II、T800/BA9916-II、CCF300/BA9913、T700/BA9913预浸料及其复合材料;还制备了QY9611和QY9511高韧性双马预浸料及其复合材料,包括CCF300/9511和T700/9611预浸料及其复合材料。以T800/BA9916-II复合材料和T700/QY9611复合材料为例,T800/BA9916-II复合材料主要力学性能及其与国外同类高韧性复合材料X850的对比如表1所示,T700/QY9611复合材料的主要力学性能如表2所示。

由表中性能数据可以看到,T800/BA9916-II和X850复合材料的冲击后压缩强度基本相同,表明采用相迁移增韧技术增韧的复合材料体系的韧性水平达到了国外同类高韧性复合材料的韧性水平,其综合力学性能与国外同类高韧性复合材料相当。

目前采用相迁移增韧技术增韧的环氧和双马预浸料已实现工程化生产,至今累计生产数十批约十余万 m^2 的高韧性环氧和双马预浸料,并用于多个型号的军机和民机结构研制及生产中。

表1 T800/BA9916-II复合材料主要力学性能及其与国外同类高韧性复合材料X850的对比

力学性能(室温干态)	试验标准 / MPa	典型值 /MPa	
		T800/BA9916-II	X850
0° 拉伸强度	ASTM D 3039	3298	2887
90° 拉伸强度	ASTM D 3039	60.8	74.8
0° 压缩强度	ASTM D 6641	1462	1416
面内剪切强度	ASTM D 3518	136	121
层间剪切强度	ASTM D 2344	108	98
开孔拉伸强度	ASTM D 5766	535	532
开孔压缩强度	ASTM D 6484	301	277
冲击后压缩强度 (6.7J/mm)	ASTM D 7137	313	315

注:(1)X850为美国Hexcel公司开发的T800级碳纤维高韧性环氧复合材料;(2)复合材料树脂含量为35%,纤维面密度为190g/m²。

表2 T700/QY9611复合材料的主要力学性能

力学性能(室温干态)	典型值 /MPa
0° 拉伸强度	2920
90° 拉伸强度	62.8
0° 压缩强度	1392
面内剪切强度	152
层间剪切强度	113
开孔拉伸强度	529
开孔压缩强度	377
冲击后压缩强度(4.45J/mm)	322

4 结论

(1)相迁移增韧技术是一种全新的树脂基复合材料增韧技术,该技术通过复合材料体系中热塑性树脂增韧相向复合材料层间的迁移,实现复合材料韧性的大幅提高;

(2)相迁移增韧技术的机理和特点决定了其不但可以大幅提高树脂基复合材料的韧性,同时还保持了预浸料良好的工艺性,并且容易实现工程化应用;

(3)相迁移增韧技术经在环氧和双马复合材料体系中的工程化应用,表明它是树脂基复合材料增韧的一个有效途径。

参考文献

- [1] 张明,安学锋,刘立朋,等.航空级复合材料层板的定域相变控制与增韧研究进展.中国材料进展,2009,28(6):13-18.
- [2] 益小苏,许亚洪,程群峰,等.航空树脂基复合材料的高韧性研究进展.科技导报,2008,26(6):84-92.
- [3] 高峰,矫桂琼,贾普荣,等.层间增韧复合材料研究.宇航材料工艺,2001,4:36-39.

(责编 亦非)