

文章编号:1674-8190(2016)01-007-10

超薄碳纤维预浸料复合材料国内外 发展现状和趋势

康欣然,朱书华,何梦临,彭新未,张华松
(南京航空航天大学 航空宇航学院,南京 210016)

摘要: 超薄碳纤维预浸料复合材料是近年来复合材料研究的新趋势,国内超薄碳纤维预浸料复合材料的相关研究起步较晚,研究方向单一,系统地总结归纳有助于未来研究方向的调整与研究目的明确。本文综述了2000年至今国内外大部分超薄碳纤维预浸料与常规碳纤维预浸料复合材料的对比试验,包括无损拉伸试验、开孔拉伸试验、无损压缩试验、机械连接试验、冲击试验、疲劳试验以及环境影响等,通过对比分析认为:薄层化后的预浸料复合材料在抗裂纹萌发和裂纹扩展方面具有显著的性能优势,从而影响了碳纤维预浸料复合材料成品的各项性能参数,表明超薄碳纤维预浸料复合材料优异的应用前景。

关键词: 预浸料;超薄;碳纤维;发展现状;综述

中图分类号: TB332

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.01.002

Current Situation and Development Tendency of Thin-ply Laminated Composites

Kang Xinran, Zhu Shuhua, He Menglin, Peng Xinwei, Zhang Huasong

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study on ultrathin-ply carbon fiber laminated composites is a new research trend in recent years. The study of this kind of composite in our country started relatively late and the research direction is nearly single. To comprehensively summarize the research status is helpful for the future research and making a clear research direction. Numbers of experiments data compared ultrathin-ply laminated composites with normal laminated composites are presented, including unnotched tension, open hole tension, compression, mechanical connection, compact, fatigue and environmental influence experiments. It shows that the laminated composites made from ultrathin-ply prepregs are of a great advantages of damage resistance, i. e. it can defer the happening of fracture and resist the expanding of fracture. It influences the performance of laminates and indicates a good application prospect.

Key words: prepreg; ultrathin-ply; carbon fiber; development situation; summarize

0 引言

先进复合材料在航空航天领域得到成功应用不过十余年,但因其具有高比强度、高比刚度、可设

计性强、便于大面积整体成型等优点,在航空航天领域的应用日益广泛。碳纤维预浸料复合材料是先进复合材料的重要分支,在军用和民用飞机上拥有较为广泛的市场。

近年来,国外通过超声波将碳纤维预浸料层板扩展薄层化后,使得单层纤维预浸料的厚度更薄,普通碳纤维预浸料的厚度约为0.125 mm,单位面积纤维重量约为130 g/m²,而超薄碳纤维预浸料的单层厚度仅为0.04 mm,单位面积重量小于

收稿日期:2015-12-11; 修回日期:2016-02-10

基金项目:国家自然科学基金(11302105)

航空科学基金(2014ZF52074)

通信作者:康欣然,438344996@qq.com

40 g/m²。对于飞行器中某些很薄的部位(例如无人机的机翼舵面),预浸料单层厚度变薄可以在很大程度上增强复合材料铺层方向的可设计性,这对于复合材料在飞行器中的应用具有重要意义。同时,通过试验对比研究发现,用薄层化后的碳纤维预浸料制造而成的层合板,具有更强的抗裂纹萌发和扩展的能力,力学性能也有比较明显的改善。

系统地总结归纳超薄碳纤维预浸料的发展现状,对调整未来超薄碳纤维预浸料的研究方向、明确其研究目的具有重要意义。本文综述了近十余年来国内外大部分超薄碳纤维与普通碳纤维预浸料复合材料的性能对比试验,按试验类型列举了两种规格材料的试验结果,并将不同的研究成果有机结合起来,全面、直观地总结出超薄碳纤维的各项性能变化,为未来超薄碳纤维预浸料复合材料的试验研究和设计提供有益参考。

1 国内外预浸料制造工艺发展现状

不同于普通预浸料的制造,在超薄预浸料的制造过程中,纤维基本不会受到应力作用,减少了生产过程中纤维的损伤率,从而影响层合板最终的力学性能。

普通碳纤维预浸料的制造工艺流程如图1所示,首先在保护膜上均匀涂上一层树脂,通过烘干机进行初步预热,封装后转移到预浸料生产线通过自动铺丝机把碳纤维丝束铺覆在预热后的树脂上进行浸润,然后裹上保护膜,最后通过滚筒归置好制成的预浸料产品。

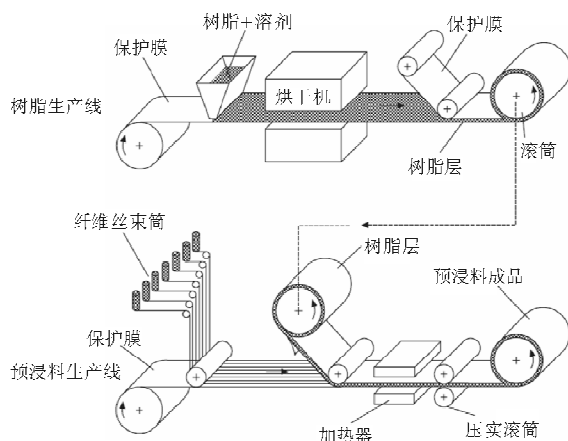


图1 碳纤维预浸料的制造工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbon fiber prepreg manufacturing process

不同规格的碳纤维丝束往往是一条丝束中包含有若干根碳纤维,例如2K的丝束就是一条丝束中包含2000根纤维。此时的纤维丝束在横向排列上是不均匀的,纤维丝束内部的纤维含量比重很大,两根丝束之间的区域基本以树脂为主。因此,在制造工艺上,通常采用扩纤工艺流程让纤维丝束随着树脂流动横向扩展,使得碳纤维含量在平面内的各个部分分布均匀,同时降低产品厚度,若单层预浸料的厚度达到0.08 mm以下,则形成了普遍认为的超薄预浸料。不同的扩纤工艺,制造出的预浸料的产品性能也各不相同,下文简要介绍目前最普遍的三种扩纤工艺。

1.1 碾压法

传统工艺的扩纤流程一般属于碾压法,例如张宝艳等^[1]介绍的将普通厚度的预浸料铺在预热平台上,加热使树脂保持一定的流动性,利用展平辊对其施加压力,辅以刮刀板作用,使纤维丝束在压力的作用下随着树脂流动进行横向扩展,从而达到降低厚度的效果。

该方法成本低,但是在纤维延展时,若展平辊的压力过高,则会使预浸料受力不均,致使其内部纤维断裂,最终制造出的层板的力学性能不好;而若展平辊的压力不够,又会限制其扩纤效果,使预浸料的厚度达不到理想范围。同时,预浸料的树脂含量必须达到一定浓度才能保证其横向流动性,限制了产品对树脂浓度的把控。

1.2 气流负压法

H. M. El-Dessouky 等^[2], Kazumasa Kawabe 等^[3]介绍了气流负压法扩纤工艺:把普通预浸料放置在一个高温真空筒上,用气流压力代替展平辊的压力,通过拉布机的横向往复运动使预浸料带横向扩展,以达到使预浸料的宽度增加、厚度减小的目的。

该方法能有效降低预浸料带的厚度,最低可使其厚度降低至0.035 mm,且预浸料受力均匀,有效减少了纤维断裂问题。气流负压法扩纤流程如图2所示。

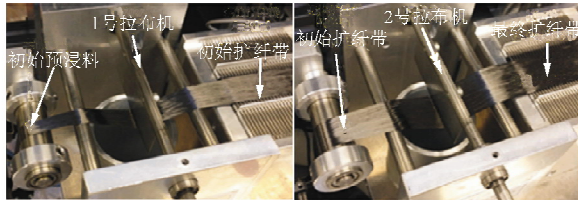


图 2 气流负压法扩纤流程

Fig. 2 Schematic diagram of CF tow-spreading by pneumatic method

1.3 超声引导法

超声引导法是近年来新兴的一种扩纤方法,其工作原理是:纤维丝束在悬浮状态下,引用不同频率的超声波通过震动作用使纤维丝束横向扩展,从而达到减小厚度的目的,扩纤后的产品单层厚度可达 0.04 mm 以下。

该方法具有不依赖树脂流动性,纵向拉伸应力小,纤维损伤率低等优点,可有效提高纤维准直度(即能使纤维丝束中屈曲的纤维拉直),同时可控制树脂浓度。目前,日本东芝集团和天津昂林贸烽公司^[4]对该方法已有不同程度的开发。

上述三种方法扩纤效果对比如表 1 所示。

表 1 T300-12K 材料扩纤前后参数对比

Table 1 T300-12K parameters comparison before and after the expansion of fiber prepreg

原始数据及处理方法	拉伸强度/MPa	最大幅宽/mm	拉伸强度损伤率/%	树脂浸润性
碳纤维处理前	3 500	6.5	—	—
碾压法	2 450	14	30	差
气流负压法	2 975	18	15	中
超声引导法	3 465	18	1	优

2 国内外试验研究发展现状

2.1 国内研究现状及分析

北京航材院较早地进行了碳纤维预浸料薄层化研究,张宝艳等^[1]采用碾压法制成了厚度为 0.08 mm 的超薄碳纤维预浸料,并进行了相关基础力学试验,结果表明:薄层化后复合材料的纵横向拉伸强度提高了约 5%,弯曲强度因树脂品种不同而有所差异,层间剪切强度略有降低,但压缩强度比普通预浸料复合材料降低了 15% 左右。常规预浸料和超薄预浸料的基本力学性能对比如表 2~表 3 所示。

表 2 环氧 5228/T700 复合材料基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of epoxy 5228/T700 composite materials

复合材料	测试条件	力学性能						
		纵向拉伸强度/MPa	纵向拉伸模量/GPa	泊松比	纵向压缩强度/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	层间剪切强度/MPa
常规预浸料	RT	2 467	130	0.318	1 296	1 679	127	103
超薄预浸料	RT	2 554	138	0.302	1 061	1 896	131	97.6

表 3 双马 5428B/T700 复合材料基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of 5428B/T700 composite materials

复合材料	测试条件	力学性能							
		纵向拉伸强度/MPa	纵向拉伸模量/GPa	泊松比	纵向压缩强度/MPa	纵向压缩模量/GPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	层间剪切强度/MPa
常规预浸料	RT	2 853	158	0.316	1 272	155	1 930	146	98.6
超薄预浸料	RT	3 133	154	0.287	1 227	154	1 998	137	94.2

天津昂林贸烽公司^[4]利用超声引导法延展的碳纤维预浸料,其单层厚度达到了 0.04 mm,用其制造的编织布复合材料进行了相关基础力学试验,结果表明:除拉伸强度、模量有大幅提高外(拉伸强

度提高约 20%,模量提高约 10%),层间剪切强度也提高了 15% 左右;压缩强度依然有所下降(下降约 7%),弯曲强度略有下降(下降约 3%)。试验具体数据如表 4 所示。

表4 薄层化后碳纤维预浸料复合材料与常规预浸料基础力学性能对比

Table 4 Mechanical properties contrast of composites material before and after spreading

复合材料	测试条件	力学性能							
		纵向拉伸强度/MPa	纵向拉伸模量/GPa	横向拉伸强度/MPa	横向拉伸模量/GPa	纵向压缩强度/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	层间剪切强度/MPa
常规预浸料	RT	918	56	775	56	709	703	127	60
超薄预浸料	RT	1 169	61	1 210	63	663	683	131	70

2.2 国外研究现状

近年来,美、日等国对超薄碳纤维预浸料的各项性能进行了比较系统的测试。例如,R. Amacher等^[5]对M40JB系列碳纤维丝束的超薄与非超薄碳纤维预浸料层板的无损拉伸、开孔拉伸/压缩、弯曲、面内剪切、冲击等基础力学性能进行了较为全面的对比研究,结果表明薄层化后的层板的拉伸强度提高了10%,其具有良好的抗疲劳特性。

与国内相关研究结果相比,R. Amacher等^[5]、S. Sihm等^[6]的试验表明,薄层化后的碳纤维预浸料其压缩强度提高了10%以上,不同的是,R. Amacher等^[5]采用的是M40JB碳纤维增强体,S. Sihm等^[6]采用的是MR50K碳纤维增强体,而张宝艳等^[1]、刘军等^[4]采用的是T700碳纤维增强体,对于预浸料薄层化后的相关性能是否与纤维增强体的类型有关,还有待进一步研究。

常规碳纤维预浸料与薄层化后的碳纤维预浸料的拉伸对比试验^[6-9]、低速冲击对比试验^[10-14]、疲劳对比试验和机械连接对比试验^[5]均表明,薄层化后的层板具有抑制或延缓自由边/层间基体裂纹萌发的能力,显著提高了相关性能,同时,抗湿热环境影响的能力也优于普通层板^[15]。

2.2.1 无损静拉试验(UNT)

T. Yokozeki等^[8]从单层性能及层板性能角度,对超薄碳纤维复合材料进行拉伸试验并与常规碳纤维复合材料进行对比,结果表明,降低单层厚度可有效改善产品的拉伸强度,如图3所示^[8]。原因是薄层化后的碳纤维预浸料层板能有效抑制横向裂纹及其扩展作用,加强了基体对纤维的保护作用,故使拉伸强度得以提高。

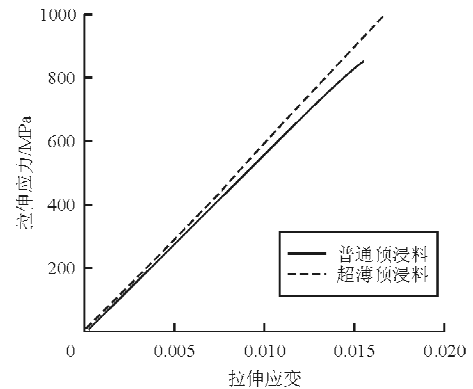


图3 无损拉伸试验结果图

Fig. 3 Unnotched stress-strain curves in tension

2.2.2 开孔拉伸及疲劳试验(OHT)

S. Sihm等^[6]、T. Yokozeki等^[7-8]针对超薄和非超薄预浸料层板的开孔拉伸性能进行了对比试验,如图4~图5所示。结果表明,薄层化后的预浸料层板能有效抑制或延缓开孔自由边的裂纹产生和扩展,但拉伸强度并未有所提高。

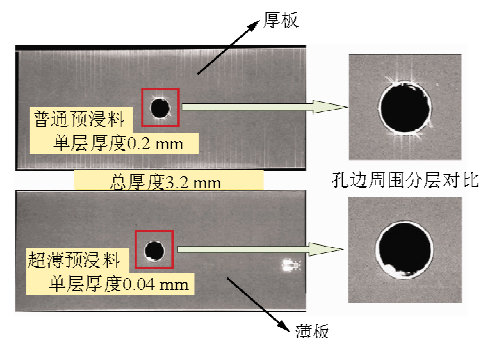
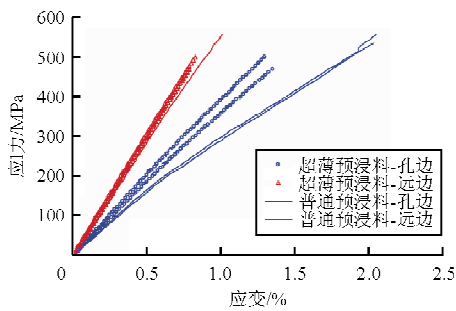
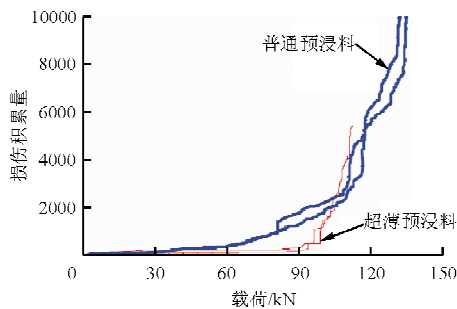


图4 448 MPa应力下,薄层化前后孔边分层对比图
Fig. 4 Hole of layered comparison before and after the expansion of fiber prepreg at 448 MPa



(a) 应力应变曲线



(b) 损伤积累随载荷的变化曲线

图 5 开孔拉伸试验对比图

Fig. 5 Stress-strain curves of thin and thick laminates after static loading

从图 5 可以看出:薄板的损伤积累明显滞后且小于厚板。在薄板的开孔拉伸试验^[6]中,最大拉伸强度又比厚板略微有所下降(图 5(a)),并且从斜向剪切断裂形式变为横向纤维断裂形式,分层现象更加少见,如图 6 所示^[7]。

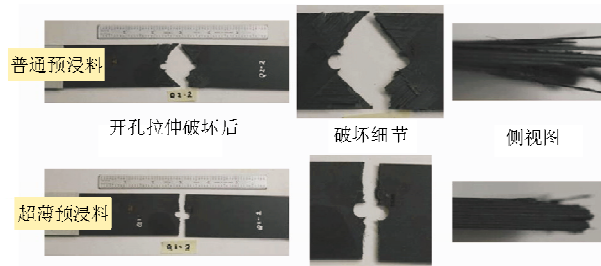


图 6 开孔静拉试验结果对比图

Fig. 6 Contrast of ultimate failure after open-hole tension static loading

2.2.3 压缩试验

针对不同型号的碳纤维增强体预浸料,文献[5-7]分别进行了超薄和普通厚度层板的压缩性能对比试验,结果显示,采用 M40JB 碳纤维增强体的预浸料薄层化效果最明显,压缩强度提高了 24%,

如图 7 所示^[5](采用夹芯板三点弯/四点弯测上面板的压缩强度);采用 MR50K 碳纤维增强体的预浸料层板,压缩强度提高了 15%左右,如图 8 所示^[6](采用短梁压缩方式);而采用 T700 型碳纤维增强体的预浸料层板,其压缩强度下降了约 5%^[11]。

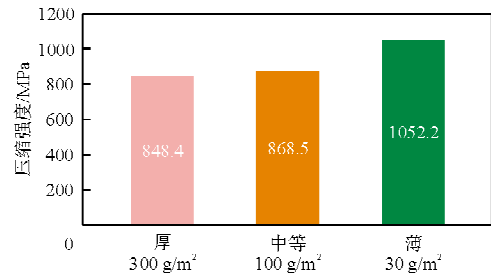
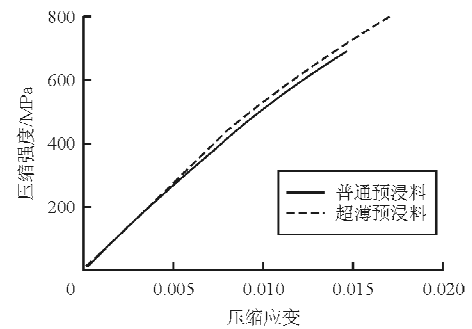
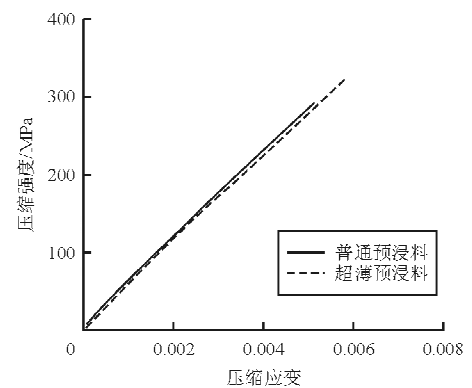


图 7 M40JB 碳纤维增强体预浸料层板压缩试验结果

Fig. 7 Compression test results of M40JB carbon fiber reinforced prepreg laminates



(a) 无损压缩



(b) 开孔压缩

图 8 MR50K 碳纤维增强体预浸料层板压缩试验结果

Fig. 8 Compression test results of MR50K carbon fiber reinforced prepreg laminates

2.2.4 机械连接试验

R. Amacher 等^[5]的试验表明:薄层化后的碳

纤维预浸料层板的机械连接性能有显著提高(约为 23%),尤其是在湿热环境下(温度为 90℃),优势更为明显,如表 5 所示。原因是厚板在承受挤压应力时,分层现象十分明显(如图 9 所示)这不仅容易导致出现初始裂纹损伤,裂纹扩展速度也比薄层化后的层板快很多。

表 5 机械连接试验结果对比

Table 5 Test contrast of mechanical connection strength

层板类型	机械连接强度/MPa	机械连接强度(湿热)/MPa
厚板	476	156
中等厚度板	573	294
薄板	584	372

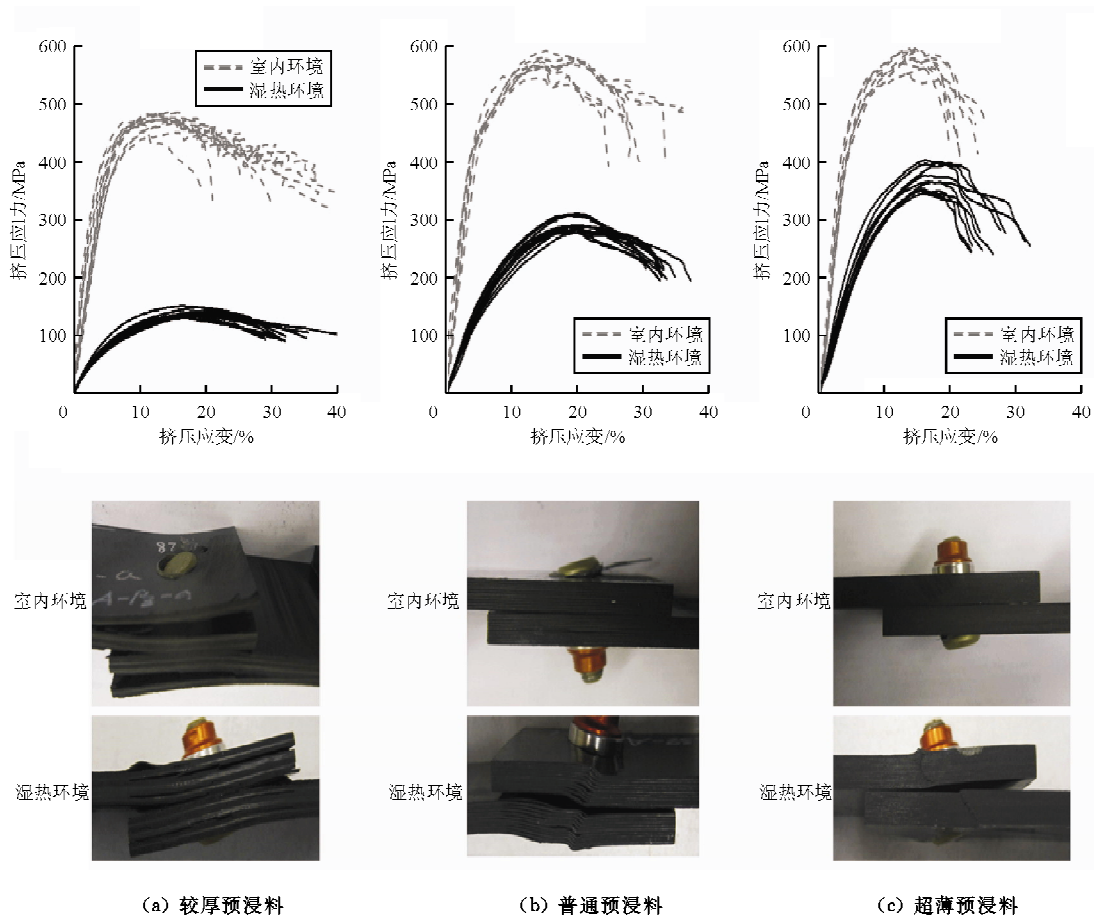
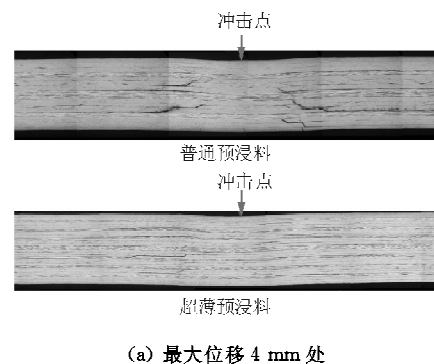


图 9 机械连接试验对比图

Fig. 9 Contrast figure of mechanical connection test

2.2.5 低速冲击试验

复合材料单层厚度的变化对微观损伤累积现象有较大影响^[5,7-8,10],为了研究超薄和非超薄层板的低速冲击性能,T. Yokozeki 等^[7]进行了试验研究,结果表明,薄层化后的层板裂纹密度明显少于厚层板,如图 10 所示^[7]。在冲击后的剩余压缩强度上,超薄预浸料层板也明显高于非超薄预浸料层板,如图 11 所示^[8]。在冲击载荷上,薄层化后的层板的最大冲击载荷有较大幅度的下降,如图 12 所示^[7]。



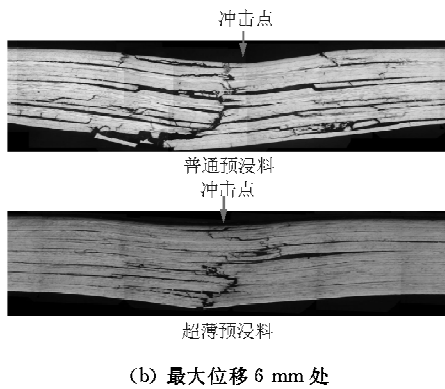


图 10 冲击试验损伤截面图

Fig. 10 Cross-sectional images of impact damaged laminates

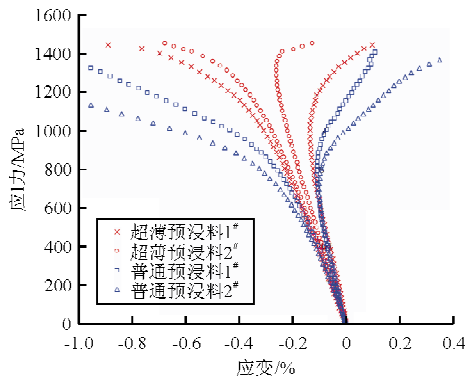


图 11 冲击后剩余压缩强度对比图

Fig. 11 The contrast figure of residual compression strength after impact damage

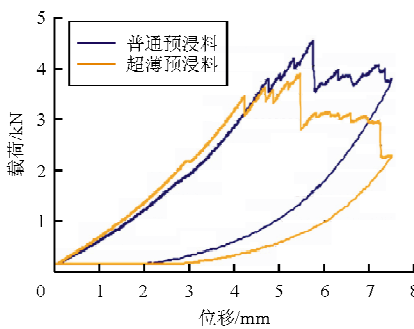


图 12 冲击试验中凹坑的载荷-变形曲线

Fig. 12 Load-deflection curves in indentation tests

2.2.6 疲劳试验

T. Yokozeki 等^[7] 针对超薄与非超薄预浸料层板的疲劳特性进行了对比试验,测试经过一定循环次数的疲劳载荷后,基体的最大拉伸强度,结果表明超薄预浸料层板的基体不易出现裂纹,加载一定循环次数的疲劳载荷后层板的最大拉伸强度也比普通

预浸料层板提高了约 20%。再次印证了薄层化后的预浸料层板确实能够有效抑制和延缓基体裂纹的产生,如图 13 所示。

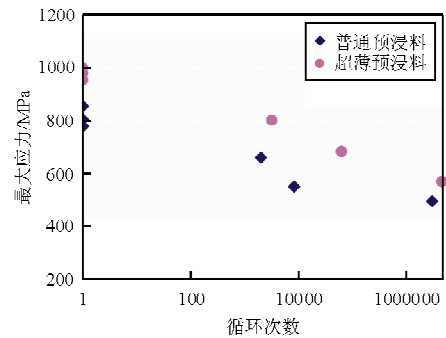
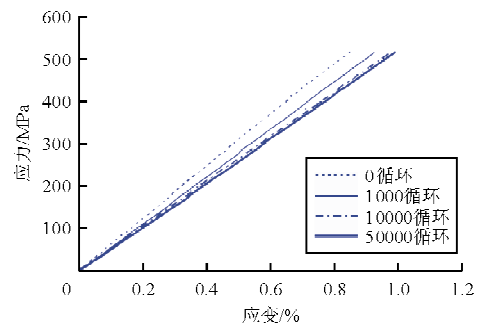


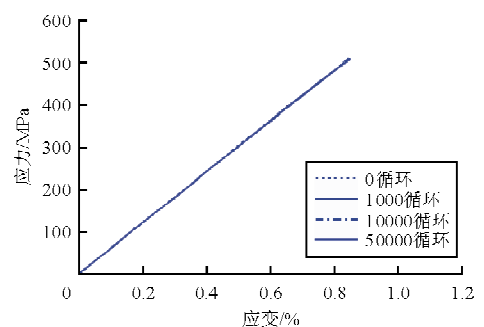
图 13 疲劳载荷图

Fig. 13 Fatigue load-cycles curve

S. Sihm 等^[6] 也做了超薄预浸料与普通预浸料层板的疲劳性能对比试验,结果表明普通预浸料层板随着疲劳循环次数的增加,层板的拉伸刚度逐渐降低,而超薄预浸料层板基本不变,如图 14 所示。



(a) 普通预浸料



(b) 超薄预浸料

图 14 不同循环次数的疲劳载荷后拉伸应力应变图

Fig. 14 Tensile stress-strain curve after different fatigue loading times

这说明薄层化后的预浸料层板可以抑制疲劳裂

纹的产生和扩展,裂纹和纤维断裂数量的减少使得层板的刚度基本不发生变化,而普通预浸料层板由于基体裂纹和纤维基体间的界面脱粘导致相同应力水平下应变变大。

对比 50 000 次循环载荷后的两种层板,薄层化后的预浸料层板其剩余拉伸强度明显高于普通预浸料层板,如图 15 所示^[6]。

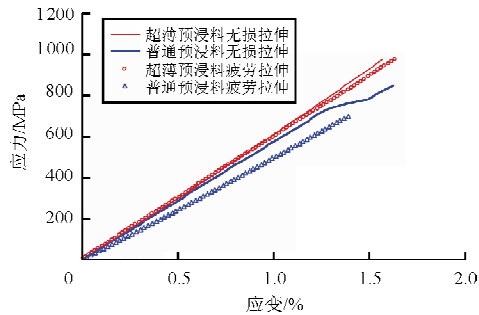


图 15 483 MPa 应力水平下 50 000 次疲劳载荷后的剩余拉伸强度对比图

Fig. 15 Residual stress-strain curves of UNT QI thin and thick laminates for static loading and after 50 000 cycles of fatigue loadings at a stress level of 483 MPa

2.2.7 环境影响试验

为了研究环境对预浸料层板的影响, J. B. Moon 等^[16]对超薄与非超薄预浸料层板进行了环境敏感度试验,结果表明在湿热工作环境下,相比于普通预浸料层板,超薄预浸料层板的性能更为稳定,下降率同比大幅降低,如图 16 所示^[16]。

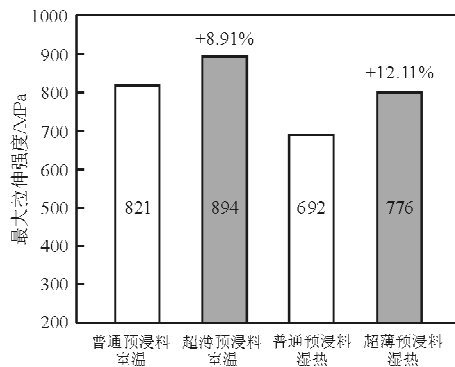


图 16 室温与湿热环境下拉伸性能对比图

Fig. 16 Contrast of tensile stiffness of various CFRP composite before and after exposure to simulated hot and humid environment

2.3 国内外试验研究结果总结

超薄碳纤维预浸料复合材料不仅在尺寸上具有

巨大优势,在力学性能方面也比常规预浸料复合材料更加优异,而且对微裂纹及裂纹扩展有很好地抑制作用,具体可归纳为:

(1) 尺寸优势。目前,无人机要求越来越轻量化和功能化,机翼的某些部位原本就设计的很薄,有的只有 1 mm 厚,普通预浸料只能铺 6~8 层,无法满足设计要求,而超薄预浸料却可以铺 25 层,在铺层比例分配上具有一定的设计空间富余,即具有更强的可设计性。

(2) 预浸料单层厚度减小后,其内部屈曲的纤维束被拉直,使力的分布更均匀;同时,预浸料层与层之间的气泡更容易被排出,孔隙率明显下降,层板的树脂浸润性更好,如图 17 所示。

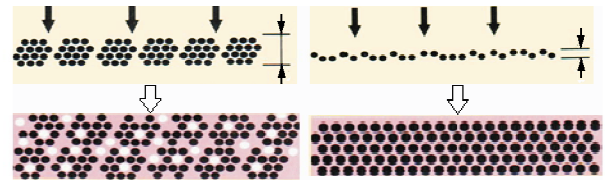


图 17 薄层化前后树脂浸润效果示意图

Fig. 17 Schematic diagram of resin infiltration effect after spreading

(3) 薄层化后的层板能有效抑制或延缓基体裂纹的萌发及扩展,其疲劳性能、开孔拉伸性能和横向剪切性能都有显著提高。

(4) 在拉伸试验中,超薄预浸料层板的断裂形式一般为 90°方向横向断裂,而普通预浸料层板多为 ±45°断裂,二者区别明显,其原因或与基体裂纹的扩展被抑制有关。

薄层化后的预浸料层板,其树脂性能还存在一些问题,目前,国内能做到的树脂颗粒的最小直径为 50 μm,最初应用于薄层化后的碳纤维预浸料层板,其性能并没有明显提高;而应用了粒径直径为 20 μm 的新型树脂后,薄层化后的碳纤维预浸料层板的性能才有了明显提高。表明提高预浸料层板的力学性能是一个综合性问题,以往试验或有不尽之处,未来还需进行更多的试验和探索。

3 国内外相关应用和发展趋势

目前,国内对超薄碳纤维预浸料的市场应用还处于萌芽状态;国外,例如德国的一些航模产品的机身部位,已率先应用了超薄碳纤维预浸料的编织布,

汽车引擎盖等也有采用这种编织布制造的趋势。

针对薄层化后的预浸料层板的相关特性,国外开发出了一些功能性复合材料。例如 G. Czél 等^[15]利用超薄碳纤维预浸料层板在达到破坏载荷前能够保持良好的线弹性这一特点,开发出了一种玻璃纤维与超薄碳纤维预浸料混杂的层板,该层板具有二次断裂特性,改善了复合材料的脆性,具有一定程度上的“韧性”——即在碳纤维断裂后,玻璃纤维还能继续承受一定的载荷,保证该复合材料的失效并不是灾难性的从最高直接降到 0,满足了一些结构件的功能要求,如图 18 所示^[15]。

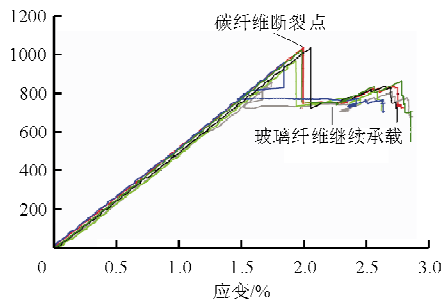


图 18 超薄预浸料混杂层板拉伸试验应力应变图
Fig. 18 Stress-strain tension curve of the hybridisation laminates with thin-ply carbon prepreg

J. D. Fuller 等^[17], B. Schläpfer 等^[18]利用薄层化后的预浸料层板其应力应变曲线更平滑、基体不容易产生裂纹的特性,通过铺层设计(即 $[\pm\theta]_n$ s)制造出一种假延展性复合材料,如图 19 所示,可以看出断裂后层板内部的纤维方向发生了变化,使其具有较大的应变。该种结构的层板虽然在强度上有所降低,但是其断裂应变得到了很大程度的提高,也具有一定的“韧性”。

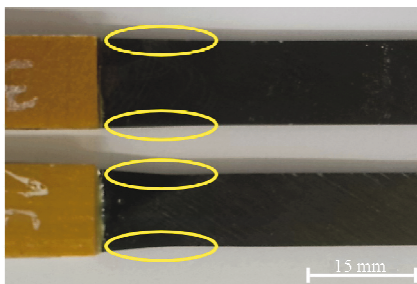


图 19 不同铺层下拉伸断裂后试验结果
Fig. 19 Tensile fracture under different layer after test results

J. B. Moon 等^[16]、T. Tsuda 等^[19]、T. Ogasawara

等^[20]对新型多壁碳纤维纳米管预浸料层板(区别于常规 T700 碳纤维丝束增强体)进行了薄层化研究,其单层厚度可达 0.02 mm 甚至更低,带来的薄层化影响也更为明显;但其增强体结构并不是以丝束形式提供,普通的扩纤工艺不适用于这种材料。

综上所述,薄层化后的碳纤维预浸料复合材料因其更强的断裂稳定性而备受关注,人们已开始将新型复合材料向金属特性方面融合,致力开发出更为可靠的新型材料。

4 结束语

近年来,随着基础工艺的不断成熟,国内外对超薄碳纤维预浸料复合材料的各项研究也日趋频繁,新型扩纤技术的应用使得预浸料复合材料的力学性能得以提高,但是成本也有所增加。

本文通过综合对比国内外相关试验研究,发现超薄碳纤维预浸料复合材料具有的主要优势包括:①尺寸优势,在某些很薄的飞机结构部位,其铺层顺序具有更强的可设计性;②层板的基体抗裂纹和层间分层能力得到了明显提高,在开孔拉伸、冲击、疲劳载荷后的剩余拉伸强度试验中得到了充分体现,尤其是低速冲击载荷下剩余压缩强度的提高有效解决了复合材料对冲击载荷敏感的短板问题。③在结合新型小颗粒直径的树脂产品后,超薄碳纤维预浸料编织布复合材料除了压缩强度下降了约 5% 外,其 0° 、 90° 拉伸强度和层间剪切强度都有 20% 以上的提高,模量也有 5% 左右的提高,未来具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 张宝艳, 许健翔, 陈祥宝, 等. 高性能超薄预浸料的制备与性能研究[C]. 北京: 全国首届青年复合材料学术交流会, 2007.
Zhang Baoyan, Xu Jianxiang, Chen Xiangbao, et al. Research on preparation and performance of the high-performanced ultra-thin prepreg[C]. Beijing: The First National Youth Composite Academic Exchange, 2007. (in Chinese)
- [2] H M El-Dessouky, Lawrence C A. Ultra-lightweight carbon fibre/thermoplastic composite material using spread tow technology[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 50(7): 91-97.
- [3] Kazumasa Kawabe, Sasayama H, Tomoda S. New carbon fiber tow-spread technology and applications to advanced composite materials[J]. Society for the Advancement of Material and Process Engineering Journal, 2009, 45(2): 6-17.

- [4] 刘军, 朱星名, 胡伯仁, 等. 基于超声引导法的薄层化碳纤维性能研究[J]. 热加工工艺, 2014(8): 108-109, 119.
Liu Jun, Zhu Xingming, Hu Boren, et al. Based on the ultrasound guided method of carbon fiber ultrathin prepreg performance research[J]. Hot Working Technology, 2014(8): 108-109, 119. (in Chinese)
- [5] Amacher R, Cugnoni J, Botsis J, et al. Thin ply composites, experimental characterization and modeling of size-effects[J]. Composites Science & Technology, 2014, 101(8): 121-132.
- [6] Sihn S, Ran Y K, Kawabe K, et al. Experimental studies of thin-ply laminated composites[J]. Composites Science & Technology, 2007, 67(6): 996-1008.
- [7] Yokozeki T, Kuroda A, Yoshimura A, et al. Damage characterization in thin-ply composite laminates under out-of-plane transverse loadings[J]. Composite Structures, 2010, 93(1): 49-57.
- [8] Yokozeki T, Aoki Y, Ogasawara T. Experimental characterization of strength and damage resistance properties of thin-ply carbon fiber/toughened epoxy laminates[J]. Composite Structures, 2008, 82(3): 382-389.
- [9] Sebaey T A, González E V, Lopes C S, et al. Damage resistance and damage tolerance of dispersed CFRP laminates; effect of the mismatch angle between plies[J]. Composite Structures, 2013, 101(15): 255-264.
- [10] John A Nairn. Matrix microcracking in composites[J]. Polymer Matrix Composites, 2000(6): 403-432.
- [11] Guillaumet G, Turon A, Costa J, et al. Damage occurrence at edges of non-crimp-fabric thin-ply laminates under off-axis uniaxial loading[J]. Composites Science & Technology, 2014, 98(16): 44-50.
- [12] Arteiro A, Catalanotti G, Xavier J, et al. Notched response of non-crimp fabric thin-ply laminates[J]. Composites Science & Technology, 2013, 79(5): 97-114.
- [13] Arteiro A, Catalanotti G, Xavier J, et al. Large damage capability of non-crimp fabric thin-ply laminates[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 63(63): 110-122.
- [14] Wisnom M R, Khan B, Hallett S R. Size effects in unnotched tensile strength of unidirectional and quasi-isotropic carbon/epoxy composites[J]. Composite Structures, 2008, 84(1): 21-28.
- [15] Czél G, Wisnom M R. Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2013, 52(5): 23-30.
- [16] Moon J B, Kim M G, Kim C G, et al. Improvement of tensile properties of CFRP composites under LEO space environment by applying MWNTs and thin-ply[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2011, 42(6): 694-701.
- [17] Fuller J D, Wisnom M R. Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 69: 64-71.
- [18] Schläpfer B, Brunner A J, Kress G. Optimal design and testing of laminated light-weight composite structures with local reinforcements considering strength constraints Part II: Testing[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 61(3): 279-287.
- [19] Tsuda T, Ogasawara T, Moon S Y, et al. Nanoscopic observations for evaluating the failure process of aligned multi-walled carbon nanotube/epoxy composites[J]. Composites Science & Technology, 2013, 88(10): 48-56.
- [20] Ogasawara T, Moon S Y, Inoue Y, et al. Mechanical properties of aligned multi-walled carbon nanotube/epoxy composites processed using a hot-melt prepreg method[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(16): 1826-1833.

作者简介:

康欣然(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

朱书华(1979—),女,博士,副教授。主要研究方向:复合材料、鸟撞、飞行器结构设计。

何梦临(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

彭新未(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

张华松(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

(编辑:马文静)