

# 薄层化大丝束碳纤维复合材料性能研究

## Study on Property of Spreaded Large Tow Carbon Fiber Composites

北京航空航天大学 罗云烽 孙永春 段跃新 肇 研

**[摘要]** 采用自制多辊系统薄层化装置对 12K 和 50K 大丝束碳纤维进行了薄层化试验,并研究了薄层化对大丝束碳纤维的渗透特性以及复合材料的内部结构和弯曲性能的影响。结果表明,对 12K 和 50K 大丝束碳纤维,利用自制的薄层化装置均可以得到较理想的薄层化效果;薄层化后由于纤维束厚度变薄,预成型体中纤维分布更均匀,预成型体的渗透率降低,渗透均匀性提高;薄层化后大丝束碳纤维增强的复合材料内部缺陷更少或更小,纤维-树脂分布均匀性提高;复合材料弯曲模量和弯曲强度均有提高,且性能分散性更小。

**关键词:** 复合材料 大丝束碳纤维 薄层化 渗透率 缺陷

**[ABSTRACT]** Large tow carbon fibers (12K and 50K) are spreaded on a self-designed multi-rollers system within several special-shaped rollers as kernel parts. And effect of spreading process on the permeability characteristics of large tow carbon fiber, on the inner structure and bending performance of large tow carbon fiber reinforced composites are studied. Results show both 12K and 50K large tow carbon fibers can be spreaded ideally by using self-designed spreading system. Thanks to thinner thickness of fiber tow, the uniformity of fiber distribution in perform is improved, the permeability of perform is decrease to half, and the uniformity of permeation is improved. There are less internal defects and smaller internal defects in spreaded large tow carbon fiber reinforced composites, and more uniformity of fiber-resin distribution is obtained. The bending performance such as bending modulus and bending strength of composites are improved, and the discrepancy of performance of composite is smaller.

**Keywords:** Composites Large tow carbon fiber Spreading Permeability Defect

连续纤维增强树脂基复合材料的力学性能主要由纤维决定<sup>[1]</sup>,而用于先进复合材料中的增强纤维大部分是碳纤维。随着先进复合材料应用范围的扩大,作为最重要的增强体,拥有高强、高模、耐高温<sup>[2]</sup>等众多优异

性能的碳纤维的应用也日益广泛,碳纤维需求量不断增加,并随新应用领域的开发而成倍增长。

现阶段,碳纤维的价格已经成为制约其大规模应用的主要因素<sup>[3]</sup>,因此各个碳纤维生产公司都致力于降低碳纤维的价格。在当今世界上,美国卓尔泰克(Zoltek)公司的碳纤维售价最便宜,该公司生产的碳纤维 PANEX33-0048(48K)售价约为 T-300(12K)的一半<sup>[4]</sup>,使先进复合材料的成本可以大幅度降低。

当然,大丝束碳纤维的应用也面临技术问题,由于树脂基体对大丝束纤维束内部的浸润性差,单丝间容易产生孔隙且容易造成纤维相和树脂相的富集与分离等缺陷,从而使复合材料强度、刚度受影响,性能降低,性能的分散性也相应较大,不能满足结构设计的要求。而国内外正在开发的大丝束碳纤维薄层化技术<sup>[5-8]</sup>在很大程度上能减少此类缺陷的产生<sup>[9-10]</sup>。本课题利用自制的大丝束碳纤维薄层化装置<sup>[11]</sup>对大丝束碳纤维进行薄层化,并研究薄层化对大丝束碳纤维的成型工艺性能和大丝束碳纤维增强复合材料性能的影响。

## 1 试验方法

试验用大丝束碳纤维为 T700SC(12K)和 SIGRAFIL C30 T050 EPY(50K),制备复合材料所用树脂为环氧 840S,渗透特性测试液体采用色拉油代替树脂进行。

薄层化在自制大丝束碳纤维薄层化装置上完成。薄层化对大丝束碳纤维渗透特性影响的试验在自制渗透率测定模具中进行,通过测定色拉油浸润纤维时间和距离的关系,按一维 Darcy 定律求得纤维铺层的渗透率。

通过制备 50K 碳纤维单向板,按 GB/T 3356—1999 单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法测定 50K 碳纤维复合材料的弯曲性能,并通过金相显微镜分析复合材料试样的形貌,研究薄层化对复合材料性能和纤维微观分布的影响。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 大丝束碳纤维薄层化效果

图 1(a)和(b)分别为 50K、12K 薄层化前后宽

度的对比。从图中可以看出,50K 碳纤维宽度从 6mm 分散到了 28mm,而 12K 碳纤维宽度从 6mm 分散到了 13mm。也即,50K 的大丝束碳纤维由原厚 0.40mm 薄层化至约 0.0857mm (即约为原来的 0.21 倍),12K 的由原厚为 0.111mm 被薄层化至约 0.051mm (约为原来的 0.46 倍)。薄层化效果都较好,但 50K 的要比 12K 的更优异。

因为 50K 的碳纤维束比 12K 的要粗得多,在原始

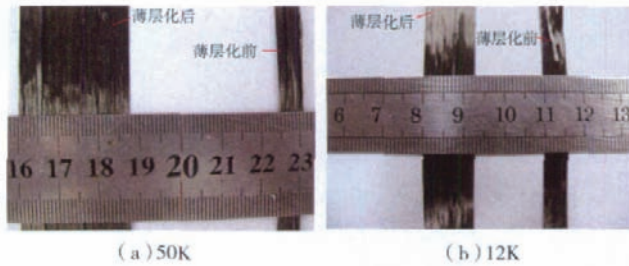


图1 50K和12K碳纤维薄层化效果  
Fig.1 Effects of spreaded tow of 50K and 12K carbon fibers

纤维宽度一样时(均为 6mm),50K 的大丝束碳纤维的厚度比 12K 的厚得多。当纤维束在异型辊上时,在张力作用下,丝束内的所有纤维均趋向于向异型辊靠近,纤维束层越厚,这种“向心力”也就越大,从而使 50K 的大丝束碳纤维薄层化效果较 12K 的要好。

## 2.2 薄层化对纤维渗透特性的影响

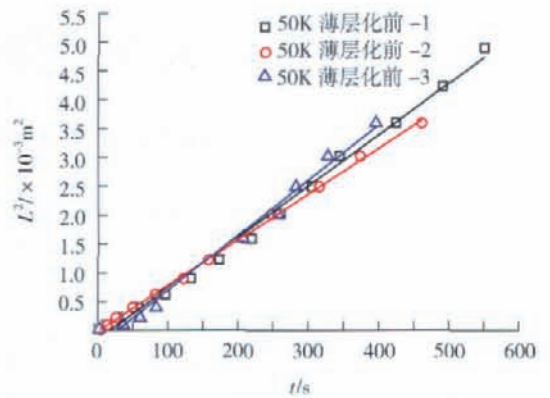
用色拉油代替树脂测定 50K 碳纤维预成型体的渗透率,试验数据处理结果如图 2 及表 1 所示。

可以看出,薄层化后大丝束碳纤维预成型体的渗透率要比薄层化前小,约为原来的 0.47 倍。薄层化前后,大丝束碳纤维预成型体的渗透特性差别也较大,从图 3 中可以明显看出,色拉油在薄层化后大丝束碳纤维的预成型体中的流动前峰较平滑,“手指效应”(finger-effect,流动前峰呈手指状)较薄层化前不明显。

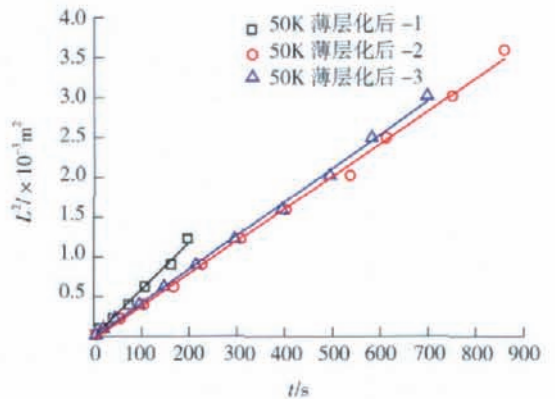
在单向纤维铺放过程中,由于受到人为因素的影响,各纤维束与纤维束之间必然存在方向上的差别,但纤维束内各纤维的方向是一致的,这样就必然使得纤维束与纤维束之间存在较大的空隙,而纤维束内的空隙很小。薄层化后,纤维束的厚度减小,纤维束内部空间所占比例下降(纤维束“比表面积”增加),预成型体内纤维分布更趋于均匀。

树脂(色拉油)在大空隙中流动的速率要比小空隙中快得多,甚至可能只在大空隙中流动,而不进入排列紧密的纤维束内,造成手指效应。

由薄层化前的大丝束制成的预成型体纤维和空隙分布较薄层化后不均匀,存在更多大空隙,从而使树脂(色拉油)在薄层化前的大丝束碳纤维预成型体中的流动速率较薄层化后大,亦即薄层化后预成型体的渗透率



(a) 薄层化前



(b) 薄层化后

图2 50K碳纤维薄层化前后的 $L^2-t$ 曲线  
Fig.2  $L^2-t$  curves of 50K carbon fiber before and after spreading

表1 50K碳纤维薄层化前后渗透率的比较

编号	渗透率 / $m^2$	
	薄层化前	薄层化后
1	3.78E-12	2.61E-12
2	4.19E-12	1.80E-12
3	5.94E-12	2.12E-12
平均值	4.64 E-12	2.18 E-12

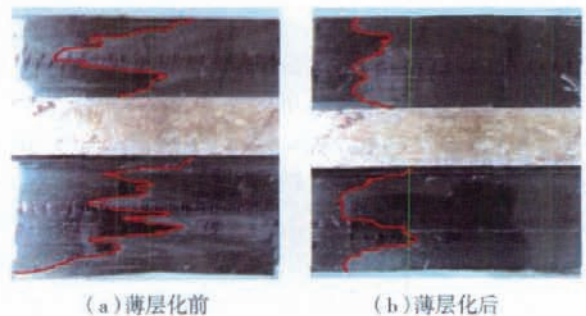


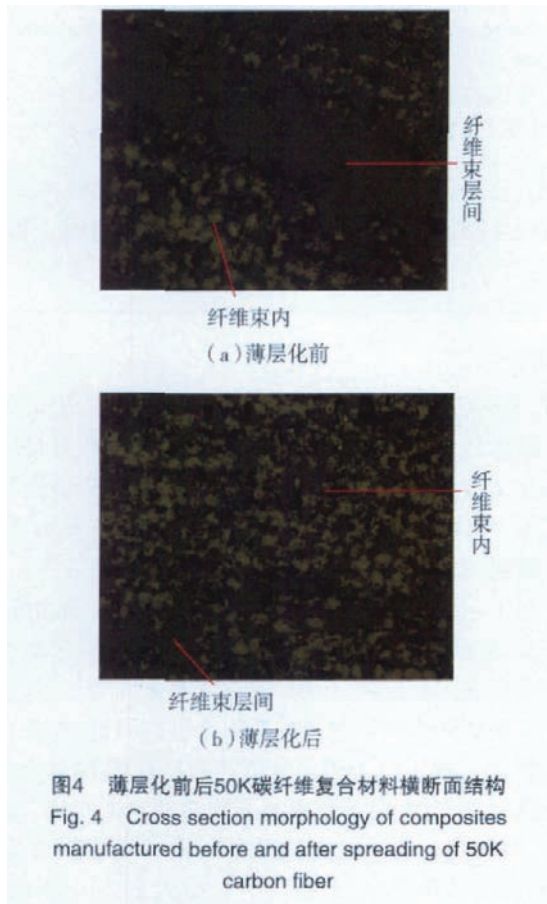
图3 50K碳纤维中的流动前峰  
Fig.3 Flow front peak in 50K carbon fiber

将减小。同时,薄层化前纤维和空隙分布的不均匀将导致树脂(色拉油)浸润的不均匀,“手指效应”更明显,而薄层化后这种现象会弱化。

## 2.3 薄层化对增强复合材料性能的影响

### 2.3.1 薄层化对复合材料内部结构的影响

薄层化前后的 50K 大丝束碳纤维增强环氧 840S 树脂复合材料(纤维体积含量相同)的横断面结构金相图见图 4。



可以看出,薄层化前复合材料中有明显的富树脂层,而薄层化后纤维束之间的树脂层不明显,纤维-树脂分布较均匀。

薄层化前后的 12K 大丝束碳纤维增强环氧 840S 树脂复合材料(纤维体积含量相同)的横断面结构金相图如图 5 所示。

可以看出,薄层化前复合材料中有较明显的富树脂层,而薄层化后纤维束之间的树脂层变得不明显,纤维-树脂分布较均匀。

因此,对大丝束碳纤维进行薄层化可以在较大程度上改善其复合材料的纤维-树脂分布均匀性,从而提高复合材料的性能。但是在试验中也发现在大丝束碳纤维复合材料成型过程中,薄层化后的丝束更容易产生纤维滑移,使成型后的复合材料内部更易存在缺陷,可能

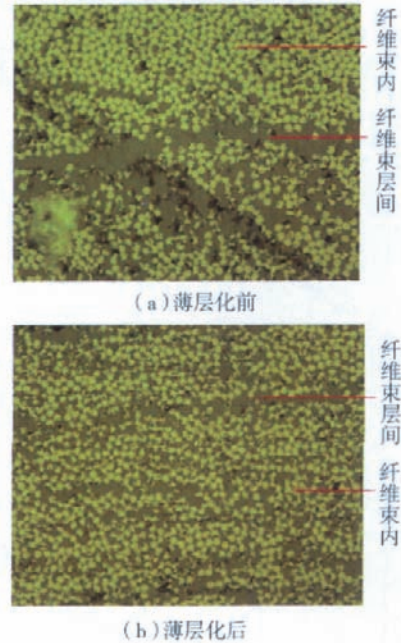


图5 12K碳纤维薄层化前后复合材料横断面结构

Fig. 5 Cross section morphology of composites manufactured before and after spreading of 12K carbon fiber

会引起性能的下降。

### 2.3.2 薄层化对复合材料弯曲性能的影响

薄层化前后的单向 50K 大丝束碳纤维增强复合材料(纤维体积含量都为 60%)弯曲性能试验的应力-应变曲线如图 6 所示,统计结果见表 2。

薄层化后,单向大丝束碳纤维增强环氧 840S 树脂复合材料的弯曲模量和弯曲强度均有提高,且性能分散性更小。在成型过程中,薄层化后的大丝束碳纤维丝束更薄(约为原来的 0.21 倍),树脂更容易浸润纤维束内部,从而使纤维束内部产生贫胶等缺陷的可能性更小;而且成型后的复合材料内部纤维-树脂分布更均匀,富树脂层更薄,从而使其弯曲性能更好。

表2 复合材料弯曲性能测试结果

编号	弹性模量 /GPa			弯曲强度 /MPa		
	薄层化前	薄层化后	增量 /%	薄层化前	薄层化后	增量 /%
1	97.7	114.5	—	1253.2	1512.5	—
2	105.3	111.5	—	1281.5	1448.8	—
3	110.1	109.6	—	1444.2	1492.9	—
4	101.9	103.7	—	1354.6	1351.2	—
5	104.8	104.8	—	1297.6	1409.7	—
平均	103.9	108.8	4.7	1326.2	1443.0	8.8
离散系数 /%	3.9	3.7	—	5.1	4.0	—

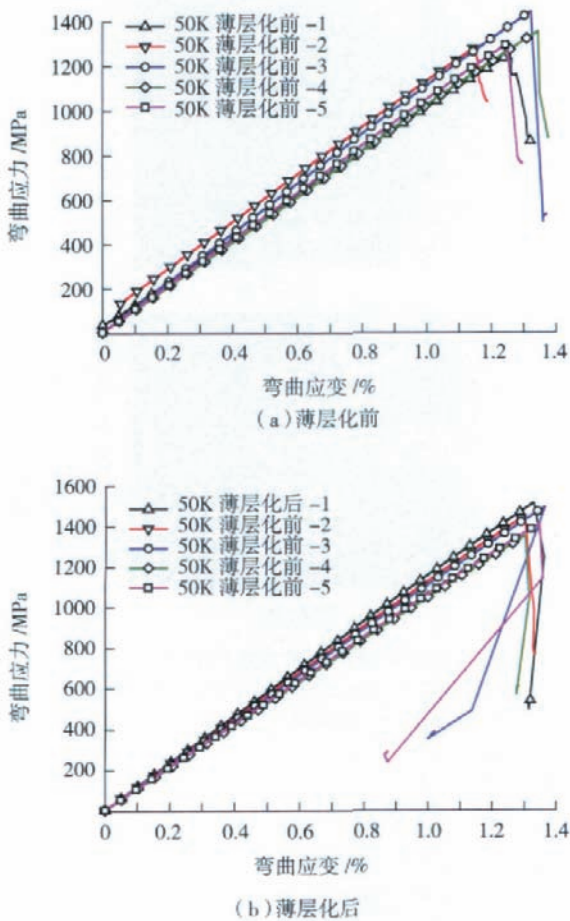


图6 薄层化前后50K碳纤维应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of 50K carbon fiber before and after spreading

### 3 结论

(1) 对 12K 和 50K 大丝束碳纤维, 利用自制的薄层化装置均可以得到较理想的薄层化效果。

(2) 薄层化后, 大丝束碳纤维预成型体渗透率降低至原来的 0.47 倍, 但渗透均匀性有明显提高。

(3) 薄层化后大丝束碳纤维增强复合材料内部缺陷更少或更小, 纤维-树脂分布均匀性提高; 复合材料弯曲模量和弯曲强度均有提高, 且性能分散性更小。

### 参考文献

[1] 青联复合材料. 复合材料综述. <http://www.qinglianfrp.com/Article/news/200505/7.html>.  
 [2] 邢声远. 高强高模的碳纤维. <http://www.bjcp.gov.cn/bjcpzcdesh/ssxf/fztd/xwjz/19675.shtml>.  
 [3] 王曼霞, 赵稼祥. 碳纤维的发展, 问题与对策. 玻璃钢 / 复合材料, 2000(1): 48-51.  
 [4] 于翘, 陈万金, 罗焱. 值得重视的复合材料研究新动向. 宇航材料工艺, 1999(1): 7-11.  
 [5] Ronald G K, Braunfels T X. Apparatus and method for spreading

fibrous tows into linear arrays of generally uniform density and products made thereby: United States Patent, 6311377 B1. 2001-11-06.

[6] Peritt J M, Everett R, Edelstein A, et al. Electrostatic fiber spreader including a corona discharge device: United States Patent, 5200620. 1993-04-06.

[7] Lifke J L, Busselle L D, Finley D J, et al. Method and apparatus for spreading fiber: United States Patent, 6049956. 2000-04-18.

[8] Iyer S, Lansing E, Drzal L T, et al. Method and system for spreading a tow of fibers: United States Patent, 5042122. 1991-08-27.

[9] Sihna S, Kima R Y, Tsai S W, et al. Experimental studies of thinly laminated composites. Composites Science and Technology, 2007(67): 996-1008.

[10] Tsai W, Sihna S, Kim R Y, et al. Thin ply composites. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference 18-21, Austin, Texas, 2005.

[11] 罗云烽, 孙永春, 段跃新, 等. 大丝束碳纤维薄层化技术. 复合材料学报, 2010, 27(1): 123-128. (责编 良辰)

(上接第 74 页)

组织, 为挤压锭坯在挤压前的加热及挤压变形提供再结晶的驱动力, 产生大量的新晶粒而使原始组织及最终的挤压加工组织细化。两相合金在两相区温度内加热与在  $\beta$  相区温度加热不同, 由于有  $\alpha$  晶粒和  $\beta$  晶粒相互限制, 组织长大不严重<sup>[2]</sup>。

在 Ti-6Al-4V 合金两相区温度内挤压,  $\alpha$  相和  $\beta$  相都参与变形, 在挤压变形过程中, 合金中的两相组织都沿变形方向被拉长、压扁, 随着变形量的增加, 从金相照片所观察到组织的这种变形形态更加明显, 另外在两相区挤压过程中由于产生变形热及挤压模具对合金的散热的共同作用, 会使变形金属的温度发生变化,  $\alpha$  相和  $\beta$  相在变形的同时随温度的升高  $\alpha$  相将转变为  $\beta$  相, 随温度的降低将有更多的  $\alpha$  相从  $\beta$  相中析出, 而且  $\alpha$  相和  $\beta$  相在变形过程中都会发生不同程度的动态再结晶, 影响组织形貌。

### 3 结论

(1) 采用两相区挤压工艺, 成功地制备出符合标准要求的 Ti-6Al-4V 合金挤压管材。

(2) 采用  $\beta$  区预淬火 + 两相区挤压可以使挤压管材的综合性能较  $\beta$  区挤压得到提高。

### 参考文献

[1] 亚力山大 B K 著, 宁兴龙 译. 钛合金半成品. 宝鸡: 宝鸡有色金属研究所出版社, 1984: 135-140.  
 [2] 杜春青, 王宗贞. TC11、TC4、IMI679 合金  $\beta$  晶粒长大倾向性的研究 // 第六届全国钛及钛合金学术交流会文集 (2), 西安, 1987: 127.

(责编 侧卫)