复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 27 卷 第 1 期 2 月 2010 年
Vol. 27 No. 1 February 2010

文章编号：1000-3851(2010)01-0123-06

大丝束碳纤维薄层化技术

罗云烽，孙永春，段跃新*，赵 研
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100191）

摘 要： 采用机械式多辊系统薄层化技术，分析研究了大丝束碳纤维在不同形状辊子组合上的受力状态和可能的纤维运动状态，以及不同形状辊子组合对纤维损伤、薄层化后纤维分布状态的影响，在此基础上确定采用等径异型辊组合作为薄层化装置的核心部件，研究了采用 3 种不同曲率的等径异型辊时，不同纤维张力对大丝束碳纤维薄层化效果的影响。最终确定了该套薄层化装置达到最佳薄层化效果的等径异型辊的曲率半径应为 330 mm，所施加的纤维张力应为 46.6 N。

关键词： 大丝束碳纤维；薄层化；薄层化技术；异型辊；等径异型辊
中图分类号： TQ327.3 **文献标志码：** A

A technology used in spreading large tow carbon fibers

LUO Yunfeng, SUN Yongchun, DUAN Yuexin*, ZHAO Yan
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A mechanical multi-rollers system was used to spread large tow carbon fibers, the force condition of large tow carbon fibers on different shaped rollers and the possible movement of fibers were analyzed, and the damage level and the distribution of spreaded fibers spreaded by different shaped rollers were studied also. After a multi-rollers system within several equal diameter special-shaped rollers as kernel parts was determined, what kind of roles those factors such as the curvature of the special-shaped rollers and the tension play in spreading large tow carbon fibers were studied. It is determined that the optimal curvature radius of the special-shaped rollers and optimal tension exerted on fibers are 330 mm and 46.6 N respectively.

Keywords: large tow carbon fibers; spreading; spreading technology; special-shaped rollers; several equal diameter special-shaped rollers

树脂基复合材料的力学性能主要取决于纤维[1]。目前，用于先进复合材料中的增强纤维大部分是碳纤维[2-3]，而其中以聚丙烯腈基碳纤维为最多。它分为航空航天级(Aerospace grade)和商用级(Commercial grand)2 种。前者多为小丝束(Small tow, ST)纤维，后者多为大丝束(Large tow, LT)纤维。

如今，碳纤维的价格已经成为制约碳纤维大规模应用的主要因素[4]。大丝束碳纤维，如 48 K、60 K以至于 360 K、480 K 等的价格要比小丝束的便宜得多，但其大量应用尚有困难。这主要是由于树脂基体对大丝束碳纤维束的内部浸润性差，单丝间容易产生孔隙等缺陷，同时由于丝束直径增加，在成型过程中出现纤维屈曲及铺层角度错位的可能性增加，导致力学性能分散性大，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[5-8]在很大程度上能减少此类缺陷的产生[9-10]。

本文中采用一种新的多辊机械式薄层化技术对大丝束碳纤维薄层化可行性方案进行了探讨。研究了纤维在不同形状辊子组合上的受力状态及可能的纤维运动状态，不同形状辊子组合对纤维损伤、薄层化后纤维分布状态的影响；并对不同的等径异型辊曲率、不同纤维张力对薄层化效果的影响进行了研究。研究结果为进一步推广大丝束碳纤维在碳纤维增强复合材料中的应用，大幅降低先进复合材料

收稿日期： 2009-03-06；**收修改稿日期：** 2009-05-22
基金项目： 航空基金(2007ZF51018)
通讯作者： 段跃新，高工，主要研究方向为树脂基复合材料成型工艺 E-mail: duanyuexin@126.com

的成本提供应用基础。

1　实验方法与材料

实验所用薄层化装置为自行设计并制造，如图 1所示。实验中分别对纤维束在直辊、非等径异型辊和等径异型辊上的基本受力状态、大致的运动形式及薄层化后纤维分布状态和薄层化时辊子对纤维造成的损伤进行了研究。

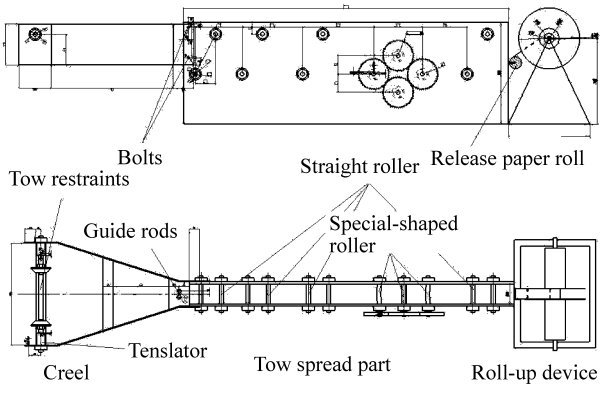


图 1　自行设计的薄层化装置图

Fig. 1　Self-designed large-tow-fibers spreader device

实验所用大丝束碳纤维为 SIGRAFIL C30 T050 EPY(50 K)，由德国 SIGRAFIL 公司提供。

2　实验结果与讨论

2.1　异型辊结构的影响

2.1.1　纤维在不同异型辊上的受力及运动分析

根据结构的不同，辊子大致可分为 3 类，即直辊、非等径异型辊和等径异型辊。图 2 中所示分别为直辊、非等径异型辊和等径异型辊的典型结构。若薄层化装置主体采用直辊，则要求有很大的纤维张力才能达到薄层化效果，势必对纤维造成极大损伤，本文中未予采用。

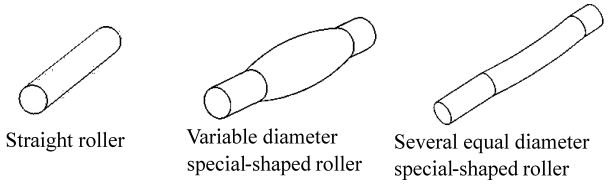


图 2　典型形状的辊子

Fig. 2　Typical special-shaped rollers

当纤维束与等径异型辊的凸面接触时，若等径异型辊与非等径异型辊曲率半径相同，此时纤维束在上述 2 种异型辊上的受力形式相同。图 3 为纤维束上、下层纤维在异型辊上的受力状态。

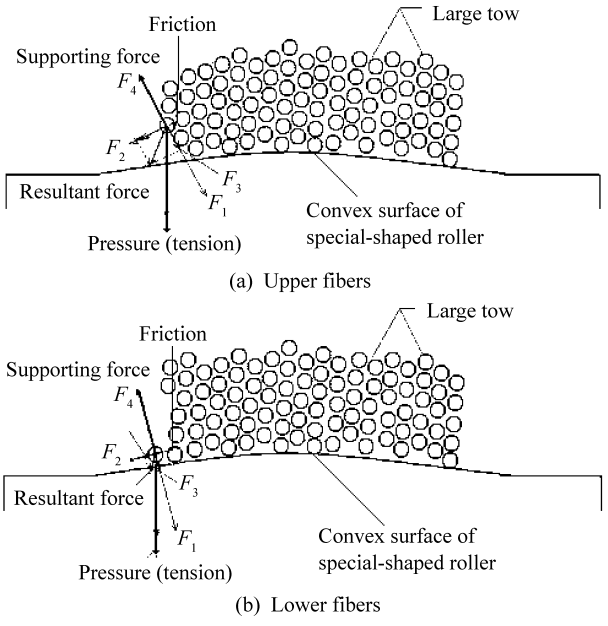


图 3　纤维束在异型辊凸面上的受力状态

Fig. 3　Force state of fiber bundles on the convex surface of special-shaped roller

上层纤维受到的力为压力、下层纤维对其支持力以及与下层纤维之间的摩擦力。下层纤维受压力(来自于张力的分量)、异型辊对其支持力以及与异型辊之间的摩擦力。由于碳纤维与金属之间的摩擦系数较大，因此下层纤维受到的摩擦力比上层纤维的要大得多；另外，上层纤维所受的支持力来自于下层纤维，使得上层纤维受到的支持力要比下层的小，从而上层纤维受到向外的合力比下层纤维的要大。下层纤维受到向外的合力接近于零，使下层纤维在薄层化过程中基本保持不动；而上层纤维受到向外的合力较大，在薄层化过程中，上层纤维有向纤维束宽度方向扩展的趋势，即薄层化过程主要是通过上层纤维向纤维宽度方向两侧扩展来实现的。

当纤维束与等径异型辊的凹面接触时，纤维受力状况将发生变化。图 4 为纤维束与等径异型辊接触面为凹面时纤维的受力状态。初期，纤维受到合力的作用，有向内运动的趋势，但随之支持力急剧增大，中央部分纤维受到向外的力的作用，合力由向内变为受力平衡。进而，当纤维处于下凹面时，初期纤维有向内运动的趋势，随即达到平衡。

2.1.2　不同异型辊对纤维损伤和分布的影响

非等径异型辊工作时纤维走丝情况示意图见图 5。并作以下假设：(1) 纤维在异型辊部分运动

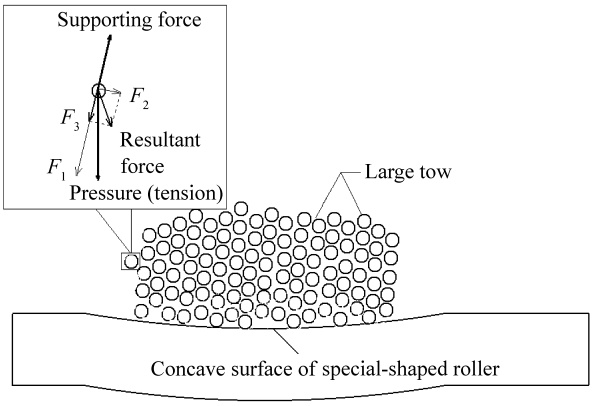


图 4　纤维束在异型辊凹面上的受力状态

Fig. 4　Force state of fiber bundles on the concave surface of special-shaped roller

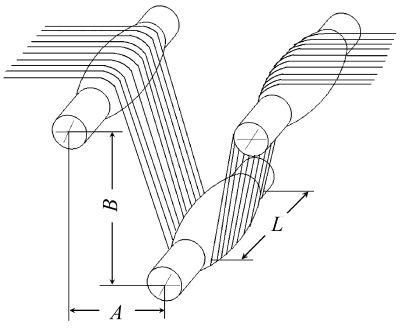


图 5　非等径异型辊工作示意图

Fig. 5　Working schematic diagram of variable diameter special-shaped rollers

时受到的张力为一定值；(2) 纤维与辊子在纤维长度方向上没有相对滑动；(3) 纤维束与两侧的 2 个异型辊始终为水平接触；(4) 纤维束平均分布于异型辊中央部分两侧。由上述近似假设条件可推导出大丝束碳纤维在非等径异型辊上运动时的受力状态。

若设纤维束边缘所在处辊子的半径为 r，辊子中央部分比纤维边缘部分半径大 Δr，辊子曲率半径为 R，纤维束宽度为 L(如图 5 所示)，纤维束边缘纤维在辊子上走的路程为 S，纤维束中央部分多走的路程为 ΔS，纤维束贴附在辊子上的总角度为 θ，则

$$\theta = 4\left[\pi - \left(\arctan\frac{A}{B} + \arccos\frac{2r}{\sqrt{A^2B^2}}\right)\right] \tag{1}$$

$$S = r\theta + 2\sqrt{A^2 + B^2 - 4r^2} \tag{2}$$

因为

$$\Delta r = R - \sqrt{R^2 - L^2/4} \tag{3}$$

所以

$$\Delta S = 4\Delta r\left\{\pi - \left[\arctan\frac{A}{B} + \arccos\frac{2(r+\Delta r)}{\sqrt{A^2+B^2}}\right]\right\} + 4r\left[\arccos\frac{2r}{\sqrt{A^2+B^2}} - \arccos\frac{2(r+\Delta r)}{\sqrt{A^2+B^2}}\right] + 2\left[\sqrt{A^2+B^2-4(r+\Delta r)^2} - \sqrt{A^2+B^2-4r^2}\right] \tag{4}$$

参照图 6，在式(4)中，$4r\left[\arccos\frac{2r}{\sqrt{A^2+B^2}} - \arccos\frac{2(r+\Delta r)}{\sqrt{A^2+B^2}}\right]$等于$\overset{\frown}{EF}$长度的 4 倍，而后半部分 $2\left[\sqrt{A^2+B^2-4(r+\Delta r)^2} - \sqrt{A^2+B^2-4r^2}\right]$等于割线$\overset{\frown}{EF}$长度 4 倍的相反数。两者相加即为($\overset{\frown}{EF} - \overset{\frown}{EF}$)的 4 倍。当$\angle EOF$很小时，其值可以忽略。

故可将式(4)简化为

$$\Delta S = 4\Delta r\left\{\pi - \left[\arctan\frac{A}{B} + \arccos\frac{2(r+\Delta r)}{\sqrt{A^2+B^2}}\right]\right\} \tag{5}$$

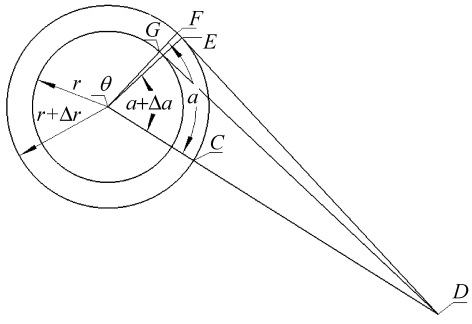


图 6　非等径异型辊上纤维行程计算示意图

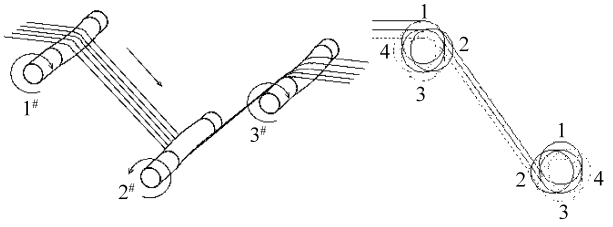
Fig. 6　Schematic diagram of calculating fiber travel on variable diameter special-shaped rollers

图 6 为非等径异型辊上纤维行程计算示意图。其中：小圆为纤维束边缘所在圆；大圆为异型辊中央部分所在圆；O 点为圆心；D 为纤维束在两异型辊之间的中点；E 为纤维与异型辊中央部分相切点；F 为大圆上一点；G 为纤维束边缘与异型辊相切点。

设辊子端头处直径为 20 mm，辊子弯曲段长 100 mm，辊子曲率半径为 300 mm，以及 A = 120 mm、B = 90 mm，并设纤维束宽度 24 mm，可求得 ΔS = 0.8 mm，应变增量 $\Delta\varepsilon \approx 2.3\times10^{-3}$。如纤维模量取 220 GPa，则纤维受到的额外应力约为 506 MPa，而实验中实际最大张力为 53.9 N，换算

为应力约为 28 MPa，中央部分纤维受到的额外应力远远大于薄层化时的张力。

等径异型辊工作示意图及简图如图 7 所示。其中：1、2、3、4 位置分别表示异型辊中央部分所在圆分别处于最上、最右、最下、最左方。



(a) Working schematic diagram　(b) Front view of rollers 1# and 2#

图 7　等径异型辊工作示意图

Fig. 7　Working schematic diagram of several equal diameter special-shaped rollers

为了便于理解，先进行异型辊在位置 1、3 时的计算，在位置 2、4 的计算随后进行。1#、2#、3# 异型辊的协同作用，使 1#、2#、3# 异型辊同时处于正上方或正下方。由图 7 中可以看出，位置 1 异型辊端头所在圆与位置 3 处于同一竖直方向上，且间距相等，即相当于位置 1 和位置 3 使整个异型辊部分移动了一定距离。在前后直辊与异型辊距离较远时，可以认为纤维束在这两个位置上时，中央部分纤维与宽度方向两端的纤维在异型辊部分的长度是一样的，即纤维束中央部分并未受到额外的应力作用。

异型辊在位置 2、4 时，相当于 2# 异型辊相对于 1#、3# 异型辊有一定的水平位移，并且位置 2 和位置 4 是以中心位置为对称面的对称关系。由于纤维束宽度方向各部分所在异型辊曲率相同，故可以简化模型，如图 8 所示。图中，M、N 为位置 2、4 简化后的点；O 为基准点；A 等于 120 mm；B 等

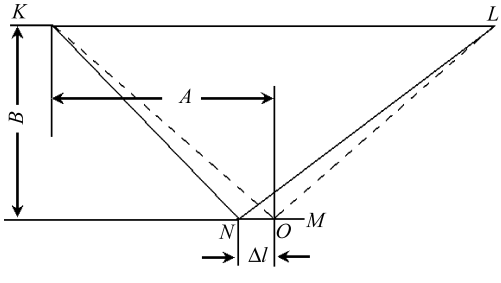


图 8　等径异型辊上纤维行程简化计算示意图

Fig. 8　Schematic diagram of calculating fiber travel on several equal diameter special-shaped rollers

于 90 mm；在异型辊曲率半径为 300 mm，大丝束碳纤维宽度为 24 mm 时，Δl 约为 0.24 mm。此时

$$\Delta S = \sqrt{B^2+(A+\Delta l)^2}+\sqrt{B^2+(A-\Delta l)^2}-2\sqrt{B^2+A^2} \tag{6}$$

代入各参数，即可求得 ΔS 约为 1.38×10^{-4} mm，应变增量 $\Delta\varepsilon\approx4.6\times10^{-7}$。如纤维模量取 220 GPa，则纤维受到的额外应力约为 0.1 MPa。

由上述讨论可以看出，非等径异型辊将大大增加纤维束中央部分纤维的张力(额外应力为薄层化过程中受到的应力的 18 倍)，这会造成纤维在薄层化过程中大量损伤。而等径异型辊能大幅减小额外应力(仅为薄层化过程中受到的应力的 0.36%)，这可以大大减少纤维在薄层化过程中受到的损伤。再者，对于非等径异型辊，由于没有来自纤维宽度方向两侧的约束，大丝束碳纤维向宽度方向两侧扩展后可能成为边缘厚、中央薄的非均匀丝带。而利用等径异型辊下凹面的约束作用可以改善边缘厚、中央薄的均匀性问题。

2.2　影响薄层化效果因素的研究

选取 3 组不同曲率的异型辊(每组曲率相同)来研究异型辊曲率和纤维张力对薄层化效果的影响。图 9 和表 1 分别为实物图及曲率半径。

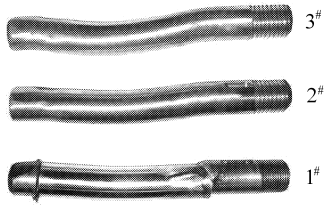


图 9　3 组等径异型辊实物图

Fig. 9　Three groups of several equal diameter special-shaped rollers

表 1　异型辊曲率半径

Table 1　Curvature radius of special-shaped rollers

Group of special-shaped rollers	Curvature radius/mm	
	Actual value	Approximate value
1#	408.3	410
2#	331.6	330
3#	216.4	220

要达到同样的薄层化效果，可以采用小曲率半径异型辊、小张力组合，也可用大曲率半径异型辊、大张力组合。

在薄层化过程中，纤维张力越大，薄层化过程对纤维造成的损伤势必越严重。但当异型辊曲率半径小到一定值时，会造成纤维过于分散而使薄层化效果变差。图 10 为倾斜角为 θ 时纤维在辊子上的受力状态示意图，其中 F_s、F_f、F_p分别表示纤维受到的支持力、摩擦力和压力。

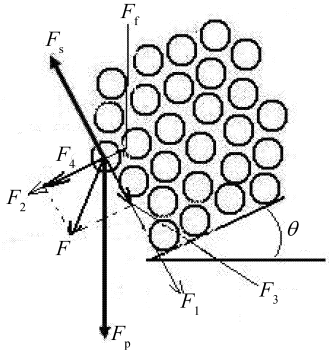


图 10　薄层化过程中纤维受力状态示意图

Fig. 10　Force state of large tow fiber bundles during spreading process

表 2 为薄层化后纤维束宽度对比值，可以看出，纤维束在 1# 辊与 2# 辊上薄层化后宽度比值上相差不大。当纤维张力较小(≤34.3 N)时，1# 辊薄层化后的宽度稍大；而在纤维张力较大(46.6 N)时，2# 辊薄层化后的宽度稍大。3# 辊薄层化效果较差，在纤维张力较小时，3# 辊的薄层化效果与 1#、2# 辊有一定的差距；在张力变大后，虽然纤维在 3# 辊上的薄层化后宽度急剧增加，但随之而来的是纤维的分离和偏离，如图 11 所示，而采用 1#、2# 辊薄层化后纤维在宽度方向上的均匀性上也很接近。

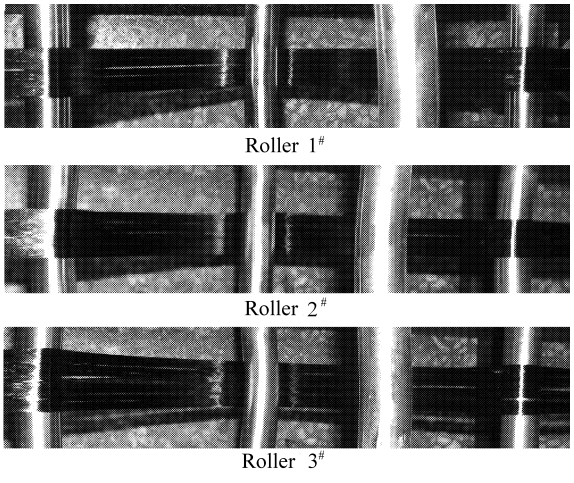


图 11　薄层化后纤维束状态图

Fig. 11　State of fiber bundle after spreading

表 2　薄层化后纤维束宽度对比

Table 2　Width of fiber bundle after spreading

Group of roller	Tension/N	Width on last rollers/mm	Width on roll-up device/mm
	19.6	21.7	24.7
1#	34.3	23.3	24.3
	53.9	25.0	28.0
	22.1	21.7	23.7
2#	34.3	22.0	23.7
	46.6	27.0	28.3
	17.9	18.7	20.7
3#	34.3	25.3	26.0
	53.9	30.7	35.3

异型辊曲率增大(曲率半径减小)可以增加大丝束碳纤维薄层化后的宽度，减小大丝束厚度，但当曲率增大到一定值时(对应的曲率半径约为 220 mm 时)，纤维束分离或偏离较严重。异型辊曲率半径不小于 330 mm 时，纤维张力的增大有利于得到更好的薄层化效果。当异型辊曲率半径为 330 mm，纤维张力为 46.6 N 时，薄层化效果达到最佳。

3　结　论

(1) 在能达到薄层化效果的前提下，相对于非等径异型辊，等径异型辊对纤维造成的损伤很小，并且能利用下凹面对纤维的制约作用改善纤维束中间薄、边缘厚的非均匀性问题。相对于其它气吹或超声波薄层化技术专利，该技术原理更简单，装置成本更低廉。

(2) 要得到较好的薄层化效果，异型辊曲率应在 330 mm 左右，且张力越大，薄层化后纤维束宽度越大，但纤维张力的大小还应考虑张力对纤维损伤的影响。在本文中，当异型辊曲率半径为 330 mm，纤维张力为 46.6 N 时，薄层化效果达到最佳。

参考文献：

[1] 青联复合材料. 复合材料综述[R/OL]. http://www.qinglianfrp.com/Article/news/200505/7.html.

[2] 王荣国，武卫莉，谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1999：1-4.

[3] 倪礼忠，陈　麒. 复合材料科学与工程[M]. 北京：科学出版社，2002：197-182.

[4] 王曼霞，赵稼祥. 碳纤维的发展、问题与对策[J]. 玻璃钢/复合材料，2000(1)：48-51.
Wang Manxia, Zhao Jiaxiang. Development, problems and countermeasures of carbon fibers [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2000(1): 48-51.

[5] Krueger Ronald G, Braunfels T X. Apparatus and method for spreading fibrous tows into linear arrays of generally uniform density and products made thereby: US, 6311377 B1[P]. 2001-11-06.

[6] Peritt Jonathan M, Everett Richard, Edelstein Alan, et al. Electrostatic fiber spreader including a corona discharge device: US, 5200620 [P]. 1993-04-06.

[7] Lifke Joseph Lee, Busselle Lincoln Drake, Finley Dana Jesse, et al. Method and apparatus for spreading fiber: US, 6049956 [P]. 2000-04-18.

[8] Iyer Shridhar, Lansing East, Drzal Lawrence T, et al. Method and system for spreading a tow of fibers: US, 5042122 [P]. 1991-08-27.

[9] Sihn Sangwook, Kim Ran Y, Kawabe Kazumasa, Tsai. Stephen W. Experimental studies of thin - ply laminated composites [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 996-1008.

[10] Tsai Stephen W, Sihn Sangwook, Kim Ran Y, et al. Thin ply composites [C] // 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Austin, Texas: AIAA, 2005.