一种交织铺层结构层合板性能

孙文文　张建宝　孙宏杰　刘永佼　孙建波

（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　结合复合材料自动纤维铺放(AFP)技术，提出了一种交织铺层结构层合板成型方法，制备了非交织、交织正交层合板、非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板复合材料，并对交织铺层结构复合材料的层间结构和性能进行了分析研究。结果表明：交织正交层合板的拉伸、压缩、弯曲性能较非交织板性能均有所下降，但其层间剪切性能有明显提高，提高幅度约为16%；随着交织铺层组厚度的增加，交织层合板的拉伸性能呈下降趋势；交织层合板的开孔后拉伸、开孔后压缩和冲击后压缩强度保持率均高于非交织板，且冲击后分层损伤面积明显低于非交织板。交织铺层结构层合板相对于普通非交织层合板具有更好的损伤容限能力。

关键词　复合材料，AFP，铺层结构，CAI，开孔拉伸，开孔压缩

中图分类号：TB332，TQ327　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.03.012

Mechanical Properties of Composite Material With New Laminate Mode

SUN Wenwen　ZHANG Jianbao　SUN Hongjie　LIU Yongjiao　SUN Jianbo

（Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology，Beijing　100076）

Abstract　A processing method for composite laminates with intersection ply mode was putted out in this paper based on automated fiber placement (AFP) technology. The samples of the composite laminates were prepared, including crossing, crossing intersection ply laminates and traditional, two-direction intersection, four-direction intersection ply quasi-isotropic laminates. Then, the laminate mode and mechanical properties of the composites were studied by mechanical properties testing, microscopy and ultrasonic testing (UT). The results show that the tensile, compressive, and flexural properties of crossing intersection ply laminates are lower than traditional, but the interlaminar shear strength is increased by 16%. With the deepening of intersection, the tensile properties are weaker. The open hole tension, compression and compressive residual strength after impact (CAI) residual ratio of quasi-isotropic intersection ply laminates is higher than traditional. Intersection ply laminates have higher damage tolerance than normal ply laminates.

Key words　Composite, AFP, Laminate mode, CAI, Open hole tension, Open hole compression

0　引言

先进纤维增强树脂基复合材料由于具有高比强度和比模量、良好的可设计性等[1]优点，被广泛应用于航空航天、汽车、船舶、土木等工程领域[2-5]。传统的纤维增强树脂基复合材料层合板，采用预浸料无纬布按一定的铺层顺序及角度进行铺放，加温加压固化。然而，由于纤维的强度远高于树脂基体的强度，层合板层间性能弱、抗冲击性能差，层合板的低层间强度和高层间应力会导致层合板分层失效。分层损伤会明显降低层合板的强度与刚度，严重时甚至引起整个结构的失效。如何解决或提升复合材料结构层合结构的弱层间性能、低抗冲击损伤容限等问题，一直是树脂基结构复合材料研究的热点问题。

通过在树脂基复合材料结构厚度方向的加强，如3D编织、缝合和Z-pin技术[6-10]等，可提高复合材料层间性能。但是3D编织技术费用高，设计和分析较为复杂，应用有一定的局限性，缝合技术过程工艺质量较难控制。Z-pin技术借鉴了缝合复合材料技术中不连续缝线方法，在层合板的预成型体中直接嵌入固化好的纤维短棒或金属短棒，然后再固化形成层合板。但是制备Z-pin预成型体耗时、费力及高昂的价格，也限制了它的应用。

目前国内南京航空航天大学、中航工业复合材料技术中心、西安交通大学、哈尔滨工业大学和航天

收稿日期：2018-09-22

第一作者简介：孙文文，1988年出生，硕士研究生/工程师，主要从事树脂基结构复合材料的研究工作。E-mail：sww0709@163.com

材料及工艺研究所等分别开展了复合材料自动铺丝技术研究工作，在自动铺丝的原材料制备技术、工艺技术、装备技术、软件技术等各个方面皆有一定研究进展[11-15]，研制出了拥有自主知识产权的自动铺丝技术体系，并在航天领域某型号舱段上实现工程应用。但在交织铺层结构层合板制作和性能研究方面自动铺丝的相关研究工作尚未见诸报道。

本文采用AFP技术、热压罐固化工艺制备了非交织、交织正交层合板及非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板复合材料，对非交织、交织正交层合板的拉伸、压缩、弯曲及层间剪切等性能进行了对比分析，最后针对非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板的开孔拉伸、开孔压缩和冲击后压缩(CAI)性能进行对比分析研究。

1 实验

1.1 材料

国产T800级碳纤维/603B热熔法预浸料，预浸料面密度165 g/m^2，树脂质量分数34%±2%，单层厚度0.15 mm，自制。表1为国产T800级碳纤维/603B复合材料单向板的力学性能。

表1 复合材料单向板力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of unidirectional laminate

0° tensile		0° compressive		0° flexural		0° interlaminar shear	fiber volume
strength /MPa	modulus /GPa	strength /MPa	modulus /GPa	strength /MPa	modulus /GPa	strength /MPa	content /%
2794	174	1425	183	1702	126	99	60

将国产T800级碳纤维/603B热熔法预浸料分切成宽度为6.35 mm的预浸丝(图1)备用，宽度精度±0.15 mm。



图1 预浸丝

Fig. 1 Prepreg tows

1.2 试样制备

1.2.1 正交层合板制备

利用上述分切的预浸丝，采用自动铺丝系统，制备$[0/90]_{6S}$非交织正交层合板(普通正交层合板)和$[(0/90)_{交}]_{6S}$交织正交层合板若干，用于后续试验分析。其中交织正交层合板成型方法如图2所示。

首先进行第一层0°预浸丝铺放(采用双丝束预浸丝，带宽12.7 mm)，在相邻预浸丝束间留有一定宽度的间隙(预留间隙为一个预浸丝束宽度)，完成一层后，进行另外一个方向(90°)层的铺放，铺放过程中也预留一定宽度的间隙，第三、四层铺层时分别把第一、二铺层时预留的间隙填满，此时完成$[(0/90)_{交}]$两层完整的同一厚度的铺层，然后依照此四个步骤的铺放方式，重复以上步骤，完成后续铺层，得到$[(0/90)_{交}]_{6S}$交织正交层合板。其铺放过程如图3所示。

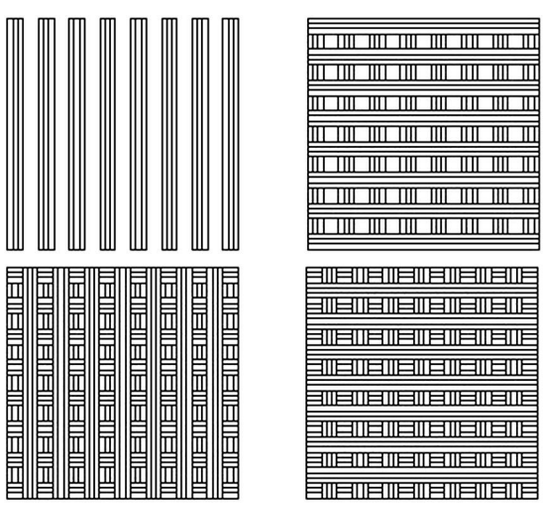


图2 交织正交层合板构型

Fig. 2 Pattern of crossing intersection ply laminate

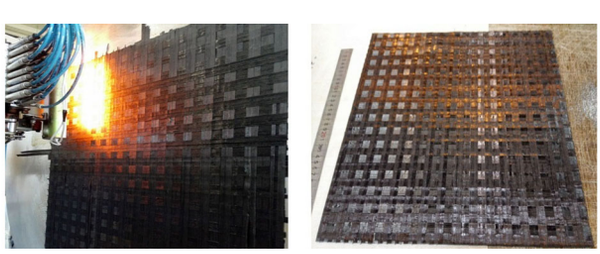


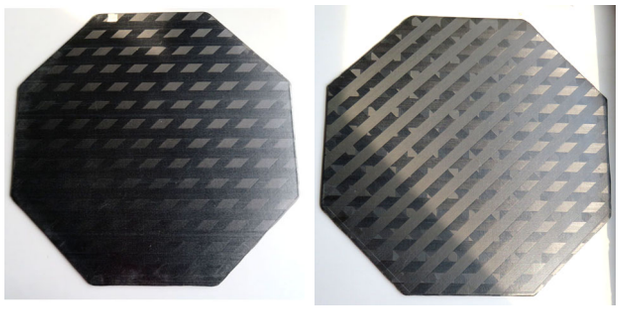
图3 交织正交层合板铺放过程

Fig. 3 AFP processing of crossing intersection ply laminate

1.2.2 准各向同性层合板制备

利用国产T800级碳纤维/603B预浸丝，采用自动铺丝系统，制备$[+45/0/-45/90]_{nS}$(n=2、3、4)准各向同性层合板和$[+45/0/-45/90]_{nS}$(n=2、3、4)交织准各向同性层合板若干，用于后续试验分析。图4(a)所示的铺层为$[(+45/0)_{交}/(-45/90)_{交}]_{nS}$($n$=2、3、4)；图4(b)

所示的铺层为$[(+45/0/-45/90)_{交}]_{nS}$($n$=2、3、4)。



(a) 两向交织　　(b) 四向交织

图4 交织准各向同性层合板

Fig. 4 Intersection ply quasi-isotropic laminates

1.3 试验方法及仪器

1.3.1 正交层合板试验

$[0/90]_{6S}$非交织和$[(0/90)_{交}]_{6S}$交织正交层合板分别制作成纵向拉伸、压缩、弯曲及层间剪切试样,试样制作及测试依据分别为GB/T 1447—2005、GB/T 1448—2005、GB/T 1449—2005及Q/Dq 281—96,其中纵向层间剪切试样尺寸为20 mm×10 mm×δ(试样厚度)。所用试验机为AG-X3000数控电子万能试验机。

纤维体积分数按GB/T 3366—2004进行,纤维体积分数和横截面微观观察皆采用Nikon Eclipse L150显微镜,数字照片通过显微镜附带的数字相机获得。

1.3.2 准各向同性层合板试验

将$[+45/0/-45/90]_{2S}$非交织、$[(+45/0)_{交}/(-45/90)_{交}]_{2S}$两向交织、$[(+45/0/-45/90)_{交}]_{2S}$四向交织准各向同性层合板制作拉伸和开孔拉伸试样,拉伸试样制作及测试依据为GB/T 1447—2005,开孔拉伸试样制作及测试依据为ASTMD5766—2007,试样尺寸为300 mm×36 mm×δ(试样厚度2.4 mm,在试样正中间制孔,孔径Φ6 mm)。

将$[+45/0/-45/90]_{3S}$非交织、$[(+45/0)_{交}/(-45/90)_{交}]_{3S}$两向交织、$[(+45/0/-45/90)_{交}]_{3S}$四向交织准各向同性层合板制作压缩和开孔压缩试样,压缩试样制作及测试依据为GB/T 1448—2005,开孔压缩试样制作及测试依据为ASTMD6484—2004,试样尺寸为300 mm×36 mm×δ(试样厚度3.6 mm,在试样正中间制孔,孔径Φ6 mm)。

将$[+45/0/-45/90]_{4S}$非交织、$[(+45/0)_{交}/(-45/90)_{交}]_{4S}$两向交织、$[(+45/0/-45/90)_{交}]_{4S}$四向交织准各向同性层合板制作冲击后的压缩试样,试样制作及测试依据为GB/T21239—2007,冲击后压缩试样尺寸为150 mm×100 mm×δ(试样厚度4.8 mm),冲击能量为6.67 J。试样冲击后按GJB1038.1A—2004进行超声C扫描缺陷分析,最后进行冲击后压缩试验测试。所用试验机为AG-X3000数控电子万能试验机。

纤维体积分数测试如1.3.1所述。

2 结果与讨论

2.1 正交层合板力学性能对比

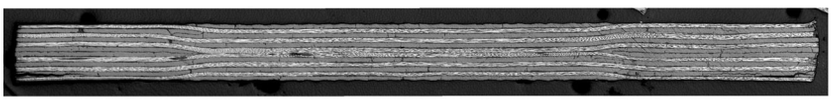
表2中列出了非交织及交织正交层合板试样力学性能,两种层合板的纤维体积分数基本相同,分别为56.7%、56.9%。可以看出,交织正交层合板纵向拉伸、压缩、弯曲性能较非交织板的均有所降低,其中交织正交层合板纵向拉伸强度及模量较非交织板分别下降约12.6%、5.3%;纵向压缩强度及模量分别下降约11.6%、10.0%;纵向弯曲强度及模量分别下降约12.7%、7.4%。但交织正交层合板层间剪切性能较非交织板有明显提高,幅度约为16.0%。

表2 非交织及交织正交层合板力学性能

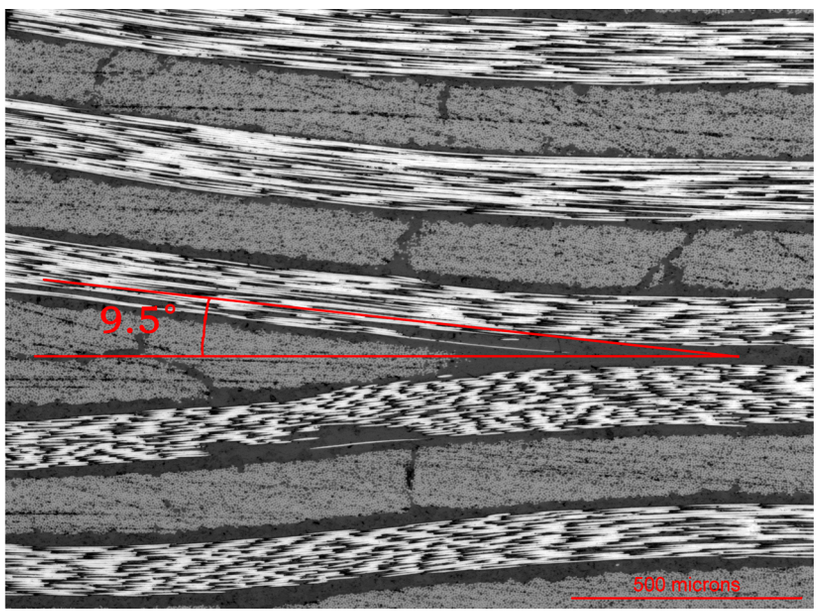
Tab. 2 Mechanical properties of cross-ply and crossing intersection ply laminates

laminate	0° tensile		0° compressive		0° flexural		0° interlaminar shear strength /MPa	fiber volume content /%
	strength /MPa	modulus /GPa	strength /MPa	modulus /GPa	strength /MPa	modulus /GPa		
cross-ply	1190	83.3	638	92.7	1500	98.1	70.7	56.7
crossing intersection ply	1040	78.9	564	83.4	1310	90.8	82.0	56.9

交织正交层合板各铺层内纤维在交叉节点处纤维呈周期性的弯曲现象[图5(a)],弯曲坡角大约9.5°[图5(b)],致使纤维取直度相对于普通正交层合板明显下降,从而致使交织正交层合板的拉伸、压缩、弯曲性能较普通层合板有所下降。尽管交织正交层合板铺层纤维呈周期性弯曲,但如图5(a)所示,交织正交层合板无论纤维方向平行于断面的铺层,还是垂直于断面的铺层皆呈现连续状态,即相邻层间树脂界面有纤维穿过。层间裂纹扩展至纤维弯折处,不再像普通层合板层间裂纹仅在平面内扩展,而是向相邻铺层进行拓展,如此不仅增加了裂纹扩展的行程,而且其裂纹扩展方向亦随之转变,交织正交层合板层间界面性能得到改善,层间剪切强度有较为明显的提高。



（a） 弯曲现象



（b） 弯曲坡角大约9.5°

图5 交织正交层合板横截面

Fig. 5 Microstructures of cross section of crossing intersection ply laminates

2.2 开孔拉伸性能

非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板拉伸和开孔拉伸性能如表3所示。

表3 准各向同性层合板拉伸性能

Tab. 3 Tensile mechanical properties of quasi-isotropic ply laminates

laminate	0° tensile strength /MPa	0° open hole tensile strength/MPa	residual ratio /%	fiber volume content /%
non-intersection ply	725	553	76.3	56.5
two-direction intersection ply	636	512	80.5	56.8
four-direction intersection ply	626	495	79.1	56.5

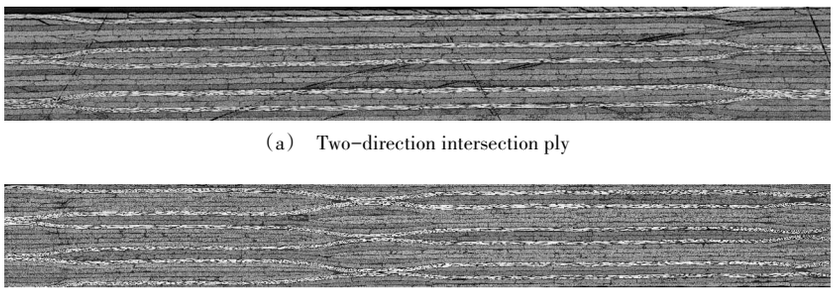
从表3中可以看出，两向交织和四向交织准各向同性层合板拉伸强度较非交织板明显下降，其中两向交织和四向交织准各向同性层合板拉伸强度分别下降约12.3%和13.7%。四向交织准各向同性层合板拉伸性能下降幅度略高于两向交织板，主要是由于四向交织准各向同性层合板铺层中纤维在节点处需要分两次穿越3层预浸料的厚度，其铺层内纤维在节点处的弯曲程度比两向交织板的更大一些（图6），致使其拉伸性能更低一些。

非交织准各向同性层合板开孔前后的拉伸强度分别为725 MPa、553 MPa，其开孔后拉伸强度保持率为76.3%，而两向交织和四向交织准各向同性层合板较非交织板略有提高，分别为80.5%、79.1%。这可能是由于两向交织和四向交织准各向同性层合板的铺层结构实现了层间的交联耦合，其可以有效阻滞层间裂纹扩展，致使层合板的开孔损伤容限有所提高。

2.3 开孔压缩性能

表4是非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板压缩和开孔压缩性能数据。可以看出，两向交织和四向交织准各向同性层合板压缩性能分别下降11.0%、8.0%，四向交织准各向同性层合板压缩性能略高于两向。交织准各向同性层合板压缩性能低于非交织板，这主要是由于交织层合板铺层纤维取直度相对于普通板明显下降，从而致使其压缩性能有所下降。虽然四向交织层合板节点处铺层内纤

维的弯曲程度明显高于两向交织板(图6),理应四向交织层合板压缩性能低于两向交织板,但试验结果正好相反,可能是由于层合板压缩试样破坏模式以失稳屈曲为主,四向交织层合板交织铺层组厚度为0.15 mm×4层=0.6 mm[图6(b)],相对于两向交织的0.15 mm×2层=0.3 mm[图6(a)]具备更高的抗屈曲失稳的能力。



(a) Two-direction intersection ply

(b) Four-direction intersection ply

图6 交织准各向同性层合板横截面

Fig. 6 Microstructures of cross section of quasi-isotropic intersection ply laminates

表4 准各向同性层合板压缩性能

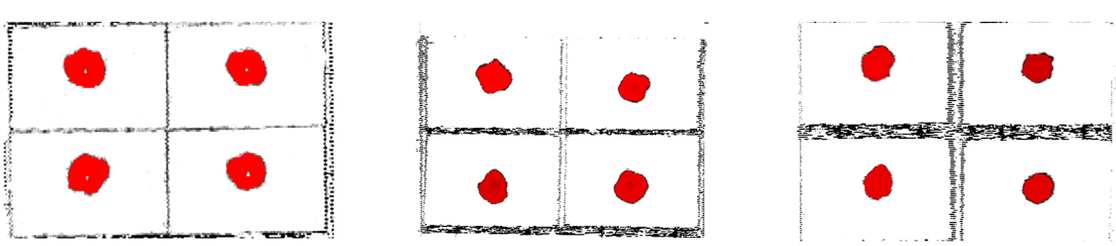
Tab. 4 Compressive mechanical properties of quasi-isotropic ply laminates

laminate	0° compressive strength /MPa	0° open hole compressive strength /MPa	residual ratio /%	fiber volume content /%
non-intersection ply	538	339	63.0	56.1
two-direction intersection ply	479	341	71.2	56.2
four-direction intersection ply	495	401	81.0	55.9

从表4中可以看出,四向交织准各向同性层合板开孔后压缩性能在三者中最高,为401 MPa,比非交织板339 MPa高18.3%,且四向交织准各向同性层合板开孔后压缩强度保持率为81.0%,两向交织板71.2%,皆高于非交织板的63.0%,表明交织铺层组厚度对压缩强度的影响仍然存在。开孔后压缩强度保持率测试结果表明交织准各向同性层合板有利于提高复合材料层合结构的开孔损伤容限。与交织正交层合板相似,交织准各向同性层合板层间树脂界面有纤维穿过,层间裂纹扩展至纤维弯折处,不再像普通层合板的层间裂纹仅在平面内扩展,而是向相邻铺层进行拓展,交织层合板层间韧性得以提高,减缓了开孔附近的损伤扩展。

2.4 冲击后压缩性能

非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板冲击后压缩试样在6.67 J能量冲击后,经超声探伤分析,层合板损伤情况如图7所示。两向交织和四向交织准各向同性层合板冲击后分层损伤面积明显低于非交织板,表明交织准各向同性层合板的抗冲击损伤能力明显高于非交织板。两向交织准各向同性层合板的冲击损伤面积略大于四向交织板,可能是由于四向交织板的铺层为$(+45/0/-45/90)_{交}$,其相对于两向交织的铺层$(+45/0)_{交}/(-45/90)_{交}$交织的层数更多,且交织铺层组合趋于各向同性。



(a) Non-intersection (b) Two-direction intersection (c) Four-direction intersection

图7 准各向同性层合板冲击后的损伤情况

Fig. 7 Damage degree of quasi-isotropic intersection ply laminates after impact

表5列出了非交织、两向交织和四向交织准各向同性层合板冲击后压缩性能。从表5中数据可知，与开孔后压缩强度类似，四向交织准各向同性层合板冲击后压缩强度最高，为308 MPa，非交织和两向交织层合板冲击后压缩强度大致相当，与四向交织板相比，分别降低11.4%和10.4%。该结果仍表明交织铺层组厚度对压缩强度影响较大。冲击后压缩强度保持率以四向交织板最高，为62.2%，两向交织板冲击后压缩强度保持率次之，为57.6%，非交织板冲击后压缩强度保持率最低，50.7%。与开孔压缩强度保持率降低趋势是一致的。该结果再次表明交织铺层结构对层间损伤具有一定的抵抗能力，有利于层合板的损伤容限。

表5　准各向同性层合板冲击后压缩性能

Tab. 5　Compressive residual strength after impact of quasi-isotropic ply laminates

laminate	0° compressive strength /MPa	0° CAI /MPa	residual ratio /%	fiber volume content /%
non-intersection	538	273	50.7	55.9
two-direction intersection	479	276	57.6	56.4
four-direction intersection	495	308	62.2	55.9

3　结论

（1）交织正交层合板纵向拉伸、压缩和弯曲性能较非交织板的性能均有所下降，但交织板层间剪切性能较非交织板的有明显提高，提高幅度约为16.0%。

（2）两向交织和四向交织准各向同性层合板拉伸强度较非交织板明显下降，且四向交织板拉伸强度下降幅度略高于两向交织板，表明随着交织铺层组厚度的增加，层合板拉伸性能呈下降趋势。

（3）两向交织和四向交织准各向同性层合板开孔后拉伸和开孔后压缩强度保持率均高于非交织板，表明交织准各向同性层合板有利于提高复合材料层合结构的开孔损伤容限。

（4）两向交织和四向交织准各向同性层合板冲击后分层损伤面积明显低于非交织板，且冲击后压缩强度保持率均高于非交织板，表明交织准各向同性层合板有利于提高复合材料层合结构的抗冲击损伤能力。

（5）综合以上结果，表明交织铺层结构层合板相对于普通非交织层合板具有更好的损伤容限能力。

参考文献

[1] 张志民. 复合材料结构力学[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1993.

[2] 汤旭，李征，孙程阳. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 中国高新技术企业，2016(13)：39-42.

[3] 贺光玉，向宇. 先进复合材料在汽车工业中的应用[J]. 汽车零部件，2013(5)：86-92.

[4] 吴良义. 先进复合材料的应用扩展(Ⅱ)先进复合材料在船舶和体育休闲用品的应用技术市场预测[J]. 化工新型材料，2011(39)：44-55.

[5] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料，2014(9)：99-104.

[6] MOURITZ A P，BANNISTER M K，FALZON P J，et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing，1999(30)：1445-1461.

[7] DRANSFIELD K A，BAILLIE C，MAI Y W. Improving the delamination resistane of CFRP by stitching-a review[J]. Composites Science and Technology，1994，50(3)：305-317.

[8] CARTIE D D R，TROULIS M，PARTRIDGE I K. Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates[J]. Composites Science & Technology，2006，66(6)：855-861.

[9] CHANG P，MOURITZ A P，COX B N. Flexural properties of z-pinned laminates[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing，2007，38(2)：244-251.

[10] 郑锡涛，罗贵，李宇徒. 复合材料层间性能改善方法研究进展[J]. 航空制造技术，2013(15)：26-29.

[11] 肖军，李勇，文立伟，等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展[J]. 中国材料进展，2009，28(6)：28-32.

[12] 张小辉，段玉岗，李涤尘，等. 原位光固化复合材料纤维铺放制造工艺[J]. 航空制造技术，2011(15)：45-48.

[13] 段玉岗，刘芬芬，陈耀，等. 纤维铺放压紧力及预浸带加热温度对复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报，2012，29(4)：148-156.

[14] 富宏亚，韩振宇，路华. 纤维缠绕/铺带/铺丝成型设备的发展状况[J]. 航空制造技术，2009(22)：43-46.

[15] 张洋. 自动铺丝研究进展与主要影响因素分析研究[C]. 北京：第17届全国复合材料学术会议，2012.