

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.06.014

柔性导向三维正交结构复合材料预制体建模研究^{*}

刘云志,单忠德,战丽,李志坤

(机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100083)

摘要:针对碳纤维增强复合材料三维织物的表征问题,采用柔性导向三维织造技术,织造了三向正交结构复合材料预制体,根据织造工艺重复性与对称性的特点,建立了柔性导向三维正交结构预制体单元模型,并推导出织物单元体各向纤维体积分量的预测公式。然后,进行碳纤维预制体织造实验,织造了五组碳纤维三向正交结构织物,实测得到预制体中 $X/Y/Z$ 三向纤维体积分量,并与建立的体积分量预测公式进行对比,证明了所建模型的适用性。最后分析了预制体纤维体积分量理论值与实测值产生偏差的原因,得出预制体中纤维束并非处于伸直状态等一系列结论。

关键词:复合材料;碳纤维;三维正交结构;单元模型;柔性织造;纤维体积分量

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)06-0063-04

Research on Modeling of 3D Orthogonal Flexible Weavon Composite Preform

Liu Yunzhi, Shan Zhongde, Zhan Li, Li Zhikun

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract : Targeting at the problem of characterization of carbon fiber reinforced composites, the 3D orthogonal structure preform was weavon by using the 3D flexible weaving technology. According to the characteristics of weaving process, a 3D orthogonal structural model and prediction formulas of the volume fraction of the model were established. Then, five groups of carbon fiber fabric were manufactured to test the fiber volume fraction and the calculated values by the prediction formula were compared with the test ones. At last, the reasons which caused the difference between the theoretical values and experimental values were analyzed.

Keywords : composites ; carbon fiber ; 3D orthogonal structure ; unit model ; flexible weaving ; fiber volume fraction

复合材料由于质轻、高强的特点被广泛应用于大型航空航天器、高速车辆、兵器工业等领域,近年来其功能逐渐从次承力结构向主承力结构转变,对传统二维层合板结构复合材料性能提出了新的挑战^[1]。三维织造复合材料的出现在很大程度上提高了复合材料的性能,克服了二维复合材料抗冲击性能差、层间强度低、容易分层等缺点^[2]。三维织物增强复合材料以其结构的多样性、可设计性、良好的成型性而成为复合材料研究的新热点。三维织物经向和纬向纱线在织造平面内交织,提供材料面内性能;厚度方向上的纱线固定经纬两向纤维,提高结构的稳定性^[3-4]。在三维织造复合材料中,三维正交织物具有结构简单、生产方便、成本较低等特点,受到广泛的关注。三维正交结构织物中经纱和纬纱呈伸直平行排列,并且经纬纱线相互垂直,具有很强的面内刚度;贯穿于厚度方向的 Z 向纱线与经纬纱线成 90° 相交,在织物表层捆绑经纬纱线,既提高了厚度方向的断裂韧性,又保证了织物结构的整体性与稳

定性^[5-7]。

国内外复合材料领域相关科研人员对三维正交结构预制体进行了大量研究。F. T. Peirce^[8]提出纱线截面圆形的假设,并认定纱线完全是柔性的,不具备抗弯刚度;J. H. Byun等^[9]提出纤维束截面凸透镜截面假设,表示了纱线在织物中被压缩这一现象;郭兴峰等^[10-11]做出经纱和纬纱为直线排布, Z 向纱线为直线和正弦曲线组合排布的假设,建立了三维正交结构织物的几何模型;杨彩云等^[12]分别计算了纤维束截面为圆形、矩形、跑道形、凸透镜形四种情况下复合材料的弹性模量,得出圆形截面假设与实验数据差异较大的结论;机械科学研究总院提出柔性导向三维织造技术^[13-16],在织物厚度方向上引入导向套,实现复合材料复杂件降维织造,有效

^{*} 国家重大科技专项(2014ZX04001-181)

联系人:单忠德,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为先进成形制造技术与装备、绿色制造工艺及装备

收稿日期:2016-03-21

解决了复合材料复杂变截面零件的三维织造,在纤维束截面矩形假设的基础上建立了不同织造路径下的参数化预制体单胞模型。

笔者采用柔性导向三维织造技术,纱线铺放路径为 $0^\circ/90^\circ$,织造复合材料三维预制体,经纤维束替换导向套后得到三向正交结构织物,对其几何结构进行分析,构建了三维织物的几何模型,推导出预制体纤维体积含量理论计算公式,为进一步优化织造结构,研究三维织造复合材料的弹性性能提供了依据。

1 柔性导向三维正交织物单元体建模

柔性导向三维织造技术织造的预制体, X 和 Y 向由一束长纤维经导向套导向缠绕而成,在这两个方向上的纤维束没有任何交织, Z 向导向套经纱线替代后,构成全纤维预制体,实现 $X/Y/Z$ 三个方向上的纤维束互相垂直。

柔性导向三维织造复合材料预制体织造流程:首先,根据拟织造预制体的截面形状在数字化导向模板上排布导向套,完成预制体表面轮廓的构造;其次,通过携纱器带动纤维束按照预定的织造路径在导向套阵列中往复运动,完成厚度方向上的空间叠加,并通过压实工艺实现预制体中 X/Y 向纤维体积含量的要求;然后,采用约束装置控制预制体 Z 向尺寸,拆除导向模板,用纤维束替换掉预制体中的 Z 向导向套,完成预制体表面纤维捆绑固定;最后,在约束装置中取出预制体,完成织造。

为了便于分析,将预制体结构进行了简化,并做出如下假设:(1) 由于纤维束截面形状复杂,假设纤维截面形状为矩形;(2) 纤维沿长度方向处于伸直状态,单丝在纤维束中连续、平行排列;(3) 忽略面内纤维束缠绕导向套曲线部分以及纤维束替代 Z 向导向套后相邻 Z 向纤维束过渡部分;(4) 三维正交结构预制体均匀一致;(5) 导向套在织造过程中无变形。图1为未替换 Z 向导向套前复合材料复制体结构简图。

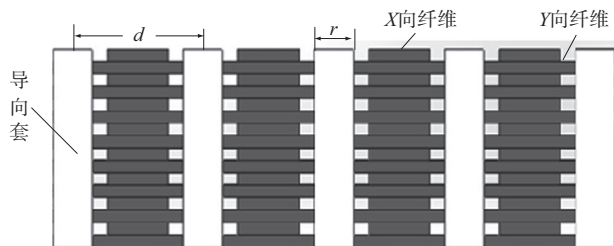


图1 三维预制体结构简图

根据导向模板上导向套阵列的空间结构特点,假设存在一个高度为 $2h$ 的特征单元,整个导向套阵列所构成的几何空间可以由假设的特征单元叠加而成,如果此特征单元不能再细化为更小的单元,则称此单元为最小单元体,简称单元体,如图2所示。单元体主要由①,②,③三个空间区域组成,分别为 $X/Y/Z$ 三个方向纤维束铺放空间,单元体高度 h 由压实工艺决定。

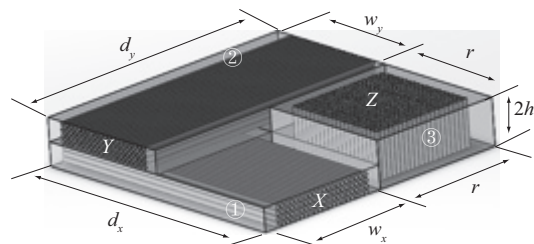


图2 织物单元体示意图

复合材料预制体的纤维体积含量是表征其性能的重要指标,为了得到预制体中纤维体积含量,首先定义如下参数: d_x 为 X 向导向套中心距; d_y 为 Y 向导向套中心距; w_x 为 X 向导向套间隙; w_y 为 Y 向导向套间隙; r 为导向套直径; h 为单层纤维束压实厚度。

单元体的整体结构尺寸由上述相关参数确定,在确定单元体的整体尺寸后可以得到铺放纤维束的三个空间区域在单元体中的占比,再通过计算所铺放纤维束的体积,进而得到单元体内纤维体积含量。

纤维束铺放区域①,②,③在单元体内的占比分别为 V_{f1}, V_{f2}, V_{f3} ,则有:

$$V_{f1} = \frac{w_x}{2d_y} \times 100\% \quad (1)$$

$$V_{f2} = \frac{w_y}{2d_x} \times 100\% \quad (2)$$

$$V_{f3} = \frac{r^2}{d_x d_y} \times 100\% \quad (3)$$

纤维束的粗细指标为 T (单位 Tex, $1 \text{ Tex} = 1 \text{ g} / 1000 \text{ m}$),纤维束密度为 ρ ,纤维在纤维束中的占比为 ε ,纤维束的截面积 S 可按式(4)由纤维束粗细指标得到。纤维束截面面积与铺放空间截面面积之比即为该空间内纤维体积含量。

$$S = \frac{T}{\rho \varepsilon} \times 10^{-3} \quad (4)$$

图3示出 $X/Y/Z$ 三向纤维束在铺放空间中截面图。单元体中 $X/Y/Z$ 三个方向纤维束在各自铺放区域内体积含量为 V_{f1}, V_{f2}, V_{f3} ,由单元体几何关

系可得:

$$V_{fx1} = \frac{S_x}{h(d_y - r)} \quad (5)$$

$$V_{fy2} = \frac{S_y}{h(d_x - r)} \quad (6)$$

$$V_{fz3} = \frac{S_z}{r^2} \quad (7)$$

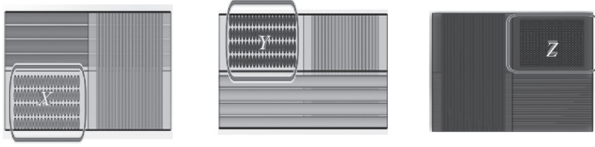


图3 X/Y/Z三向纤维束在铺放空间中截面图

通过式(1)~(7),可以计算单元体中各向纤维体积含量,从而建立织造参数与纤维体积含量的关系。

$$V_{fx} = V_{f1} \cdot \frac{S_x}{h(d_y - r)} \quad (8)$$

$$V_{fy} = V_{f2} \cdot \frac{S_y}{h(d_x - r)} \quad (9)$$

$$V_{fz} = V_{f3} \cdot \frac{S_z}{r^2} \quad (10)$$

$$V_f = V_{fx} + V_{fy} + V_{fz} = \frac{S_x}{2d_y h} + \frac{S_y}{2d_x h} + \frac{S_z}{2d_x d_y} \quad (11)$$

式中: V_f ——单元体纤维总含量;

V_{fx} ——单元体 X 向纤维含量;

V_{fy} ——单元体 Y 向纤维含量;

V_{fz} ——单元体 Z 向纤维含量。

2 柔性导向三维正交织物单元体模型校验分析

为了比较纤维体积含量理论计算值与实测结果的差异情况,进行三维正交结构预制体织造实验。实验样品分为五组,导向套直径为 1.5 mm,导向套间距为 2.8 mm,纤维为日本东丽 T300 系列碳纤维^[17]。五组试样具体织造参数分别为:试样 a,导向套排布方式 10×7 ,X/Y 方向采用 $2 \times 3K$ 纤维束织造,Z 向采用 $4 \times 3K$ 纤维束织造,最终平均层厚 0.234 mm;试样 b,导向套排布方式 9×8 ,X/Y 方向采用 $2 \times 3K$ 纤维束织造,Z 向采用 $4 \times 6K$ 纤维束织造,最终平均层厚 0.167 mm;试样 c,导向套排布方式 9×8 ,X/Y 方向采用 $2 \times 3K$ 纤维束织造,Z 向采用 $4 \times 3K$ 纤维束织造,最终平均层厚 0.179 mm;试样 d,导向套排布方式 9×7 ,X/Y 方向采用 $2 \times 3K$ 纤维束织造,Z 向采用 $4 \times 6K$ 纤维束织造,最终平均层厚 0.183 mm;试样 e,导向套排布方式 9×7 ,X/Y 方向采用 $6K$ 纤维束织造,Z

向采用 $2 \times 3K + 2 \times 6K$ 纤维束织造,最终平均层厚 0.165 mm。织造的三维正交结构预制体实物如图 4 所示。

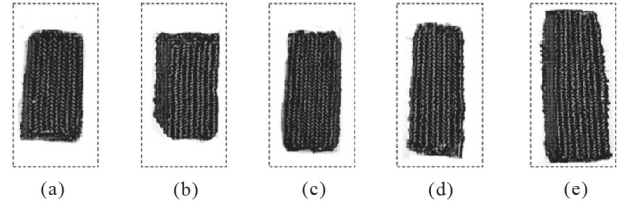


图4 三维正交结构预制体实物图

根据柔性导向织造工艺,织造三向正交结构织物,织造过程分为面内织造和 Z 向纤维替换导向套两个阶段,在前一阶段测量 X/Y 向纤维质量,后一阶段测量三向纤维总质量。由于 X/Y 向纤维路径及层数完全一样,因此二者质量相同,Z 向纤维质量可由总质量和 X/Y 两向纤维质量求得。取织造纤维密度为 1.76 g/cm^3 ,则织造的三向正交结构预制体各向纤维体积含量可由下式计算。

$$V_f = \frac{\text{预制体质量} / \text{纤维密度}}{\text{预制体整体体积}} \times 100\% \quad (12)$$

表 1 为纤维体积含量理论预测与测量值对比分析结果。比较表 1 中的理论预测值与实际测量值发现,除了试样 a 中 X/Y 向纤维体积含量和试样 e 中 Z 向纤维体积含量差异略大之外,其余各组试样各向纤维体积含量差异较小,通过建立单元体得到的计算值基本上可以反映预制体中纤维体积含量的主体情况。进一步分析发现,实验测得的 X/Y 向纤维体积含量比理论计算得到的 X/Y 向纤维体积含量要大;Z 向纤维体积含量测量值与理论计算值的关系也遵从上述规律。

表 1 纤维体积含量理论预测与测量值对比分析 %

试样号	项目	V_{fx}	V_{fy}	V_{fz}	V_f
试样 a	理论值	9	9	5.6	23.6
	实测值	10.1	10.1	5.2	25.4
	偏差	6.2	6.2	1.7	7.6
试样 b	理论值	12	12	11.6	35.6
	实测值	12.5	12.5	11.8	36.8
	偏差	4.2	4.2	1.7	3.3
试样 c	理论值	11.3	11.3	5.8	28.4
	实测值	11.6	11.6	6	29.2
	偏差	2.7	2.7	3.4	2.8
试样 d	理论值	11.1	11.1	11.6	33.8
	实测值	11.7	11.7	11	35.3
	偏差	5.4	5.4	2.6	4.4
试样 e	理论值	13	13	8.7	34.7
	实测值	13.1	13.1	10.1	36.3
	偏差	0.8	0.8	6	4.6

造成实际测量值与理论计算值差异的原因有:

(1) 采用柔性导向织造技术,在织造过程中,边缘导向套与纤维束产生缠绕,从而起到导向作用。在建立单元体模型时,考虑到导向套与纤维束缠绕部分在整个预制体中所占比例较小,为了方便计算,故忽略了此部分。因此通过理论计算得到的纤维体积含量略低于通过称重法测量得到的纤维体积含量。(2) 单元模型中假设纤维束为伸直状态,在实际织造的预制体中纤维束并非呈理想的直线状态,而是存在弯曲现象,使得理论计算值偏小。(3) 预制体中 X/Y 向纤维束呈正交状态,导向套的存在使得相邻两束同向纤维束之间有间隙,在压实过程中被压实纤维束会被挤入上述间隙中,造成纤维束的人为弯曲,对单元模型的准确性造成影响。(4) 理论计算中没有考虑 Z 向纤维在预制体上下表面的跨越长度。实际织造中, Z 向纤维替换导向套后,为了保持纤维的连续性,相邻两根 Z 向纤维有一段过度长度,这部分长度在单元体建模时被忽略,从而造成计算值比测量值小。(5) 导向模板边缘导向套受到 X/Y 向纤维的拉力作用,使得边缘导向套向导向套阵列中心弯曲,造成预制体上表面面积减小,进而引起导向套中心距变小,最终造成连接上下表面的 Z 向纤维束呈现倾斜状态,其实际长度要大于单元体模型中 Z 向纤维束长度,从而引起单元模型 Z 向纤维体积含量预测值偏小。

3 结论

对采用柔性导向三维织造技术织造的复合材料纤维预制体进行分析研究,做出纤维束截面为矩形、预制体中纤维束处于伸直状态等基本假设,建立了三向正交结构预制体单元体模型;进一步对单元模型进行分析,得到单元体纤维体积含量预测公式;通过实测对理论计算的单元体纤维含量进行校验,验证了单元体模型的可行性。理论计算得到的纤维体积含量与实际测量得到的纤维体积含量存在一定的偏差,分析原因为:实际预制体中的纤维束并非处于伸直状态,而是存在一定的弯曲;单元体建模时忽略了导向套缠绕部分以及预制体上下表面的跨越长度;预制体织造过程中导向套发生变形等。

参考文献

- [1] 苗馨匀. 三维正交机织物结构的几何表征和数学表征[D]. 郑州: 中原工学院, 2009.
- Miao Xinyun. Geometrical and mathematical characteri-zation of

3D orthogonal woven fabric architecture[D]. Zhengzhou:Zhongyuan University of Technology, 2009.

- [2] 戎琦. 三维机织复合材料的织造技术[J]. 纤维复合材料, 2007, 31(1):31-33.
- Rong Qi. Weaving technology of 3D woven composites[J]. Fiber Composite Material, 2007, 31(1):31-33.
- [3] 高金花, 李炜. 三维纺织结构增强复合材料的几何模型[J]. 纤维复合材料, 2006, 31(4):31-35.
- Gao Jinhua, Li Wei. Geometry model of three-dimensional textile reinforced composites[J]. Fiber Composite Material, 2006, 31(4):31-35.
- [4] 易洪雷, 丁辛. 三维机织复合材料力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(2):161-169.
- Yi Honglei, Ding Xin. Progressing in the study on mechanical properties of 3D woven composites[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(2):161-169.
- [5] Peter S T. Handbook of composites[M]. 2nd ed. London:Chapman & Hall, 1998.
- [6] Antonio M. 3D textile reinforcements in composite materials[M]. CRC Press, 1999.
- [7] 王善元, 张汝光. 纤维增强复合材料[M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 1998.
- Wang Shanyuan, Zhang Ruguang. Fiber reinforced composite materials[M]. Shanghai:China Textile University Press, 1998.
- [8] Peirce F T. The geometry of cloth structure[J]. Journal of the Textile Institute, 137, 28(3):45-96.
- [9] Byun J H, Chou T W. Elastic properties of three-dimensional angleinterlock fabric performs[J]. Journal of the Textile Institute, 1990, 81(4):538-548.
- [10] 郭兴峰, 黄故, 王瑞. 三维正交机织物结构的几何模型[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4):183-187.
- Guo Xingfeng, Huang Gu, Wang Rui. Geometric model of three dimensional orthogonal woven fabric structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4):183-187.
- [11] 郭兴峰, 王瑞, 黄故. 三维正交机织物参数对纤维体积含量的影响[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2):123-127.
- Guo Xingfeng, Wang Rui, Huang Gu. Influence of 3D orthogonal woven fabric parameters on the fiber vol-ume fraction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2):123-127.
- [12] 杨彩云, 李嘉禄, 田玲玲. 复合材料中纱线的几何形态[J]. 复合材料学报, 2007, 24(4):123-127.
- Yang Caiyun, Li Jialu, Tian Lingling. Geometry configuration of yarn in composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4):123-127.

(下转第 83 页)

- 2010:153-154.
- Fu Hongsheng. Plastic molding mold design[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2010:153-154.
- [5] Liu H G, Ke J P, Yu H. The process simulation complex of cell phone casing model injection molding[J]. Advanced Materials Research,2012,507:132-136.
- [6] 陈新斌. 组合模芯在“凹腔口包”制品模中的应用[J]. 工程塑料应用,1991(1):48-50.
- Chen Xinbin. Application of the built-up mould core in “reentrant cavity port-package” mould[J]. Engineering Plastics Application, 1991(1):48-50.
- [7] 王志宏. 虚实杂零件在装配模块下的拟合方法[J]. 科技创新与应用,2015(35):93-94.
- Wang Zhihong. Virtual fitting method under complicated parts in the assembly module[J]. Technology Innovation and Application, 2015(35):93-94.
- [8] 高东强,杨飞,闫媛媛. 逆向工程在塑料产品及其模具设计中的应用[J]. 中国塑料,2014(1):99-102.
- Gao Dongqiang, Yang Fei, Yan Yuanyuan, et al. Reverse engineering in the application of plastic products and mould design[J]. China Plastics,2014(1):99-102.
- [9] 郭建芬,陈以蔚. UG 在自由曲面产品逆向工程与模具设计中的应用[J]. 工程塑料应用,2007,35(8):60-62.
- Guo Jianfen, Chen Yiwei. Application of UG in reverse engineer and mold design for free-form feature[J]. Engineering Plastics Application,2007,35 (8):60-62.
- [10] 卢科青. 逆向工程中多传感器集成的自由曲面数字化测量及其数据预处理方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2010:50-51.
- Lu Keqing. Multisensor integration in reverse engineering of freeform surface digital measurement and data preprocessing methods research[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010:50-51.
- [11] 鞠华,王文,谢金,等. 逆向工程中自由曲面的自适应数字化算法研究[J]. 计量学报,2003,24(2):99-102.
- Ju Hua, Wang Wen, Xie Jin, et al. Reverse engineering:Research on adaptive digitizing for free-form surface[J]. Acta Metrologica Sinica,2003,24 (2):99-102.

英帝国理工学院成功制备超薄高分子膜

据悉,一种纳米多孔膜材料的新合成方法研发成功,利用该方法制作出的高性能膜材料可实现高通量、高选择性的化学品分离,未来在石油化工行业、水处理与净化、反渗透海水淡化等领域有望实现更高效节能的应用。

英国帝国理工学院的团队发表报告称,他们将近年来新研发的有机微孔高分子材料合成方法与传统成熟的界面聚合膜工艺结合,成功制备出富含分子尺度孔道的超薄高分子膜。研究人员说,核心技术是采用刚性且扭曲的有机单体分子,通过一步界面聚合反应,从而得到大面积交联的高分子薄膜,扭曲的骨架结构产生大量的超微孔,通过设计高分子结构可以在分子尺度调控膜内微孔的大小和分布,膜的厚

度可在数百纳米到 20 nm 之间调控,而且交联的网络结构极大提高了材料的耐溶剂性能。

据研究人员介绍,他们利用新方法制作纳米多孔分离薄膜,并测试了膜的有机溶剂纳滤以及气体分离性能。因为降低了膜的厚度和引入分子尺度的孔道及可溶胀性,有机溶剂的渗透通量比目前市场上的相关滤膜材料高 10~100 倍,同时膜对于分子量在 200~1 000 的物质具有较高的截留率(高于 95%),而且膜材料能在较长时间内保持较高过滤效率,实现高通量、高选择性、高稳定性的分离。

基于这一成果,未来有望设计开发出多种新型有机多孔高分子材料和超薄膜材料,这类材料在气体存储、分离、催化和储能等领域的应用都极具潜力。

(环塑网)

(上接第 66 页)

- [13] Qiao Juanjuan, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Study on choice of guide sleeve material based on 3D hybrid woven forming of composites[C]. Proceedings of the International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture,2011:87-90.
- [14] 单忠德,康怀荣,臧勇. 三维织造层间增强的纤维棒复合材料微观结构模型及力学性能有限元分析[J]. 复合材料学报,2015,32(1):138-149.
- Shan Zhongde, Kang Huairong, Zang Yong. Microstructure model and finite element analysis of mechanical properties of fiber-barcomposites reinforced by three dimensional weaving[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32(1):138-149.
- [15] 单忠德,刘丰,乔娟娟. 复合材料三维织造成形技术及装备[C].2011 年“天山重工杯”全国机电企业工艺年会暨第五届机械工业节能减排工艺技术研讨会论文集,2011:405-407.
- Shan Zhongde, Liu Feng, Qiao Juanjuan. Technology and equipment of 3D woven composites[C]. Processings of the 2011 National Mechanical and Electrical Technology Enterprises and Fifth Annual Conference on Energy Saving and Emission Reduction of Mechanical Industrial Technology Seminar, 2011:405-407.
- [16] 单忠德,陈思思,刘丰. 基于数字化导向模板的复合材料预制体及其制备方法:中国,ZL20121057768920[P].2013-05-12.
- Shan Zhongde, Chen Sisi, Liu Feng. Composites preform and preparation method based on digital guide template:China, ZL20121057768920[P].2013-05-12.
- [17] 贺福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- He Fu. Carbon fiber and raphite fiber[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2010.