

C_f/Mg 复合材料异形纤维预成形体制备方法*

Preparation Methods of Shaped Preforms for C_f/Mg Composites

西北工业大学机电学院 房鑫 齐乐华 周计明 卫新亮 关俊涛 张丽丹

[摘要] 针对 C_f/Mg 复合材料异形纤维预成形体制备成本高、难度大等问题,提出了纤维 0°/90° 等比例铺放、0°/90° 不等比例铺放、纤维缠绕定型、纤维编织加固等 4 种不同的预成形体制备方法。结果表明:内层采用碳纤维束环向缠绕可对预成形体进行有效增强,保证织物排列紧密,避免剪切造成的织物蓬松等问题,体积分数可提高至 40% 左右;表层采用编织工艺整体加固可以有效抵抗液态金属冲刷,尺寸稳定性良好,较未使用编织加固前提高了 65%。

关键词: C_f/Mg 复合材料 异形 纤维预成形体制备

[ABSTRACT] In order to solve high cost, difficulty in fabricating C_f/Mg composites shaped preforms, four fabricating processes named “0°/90° equal proportion fiber placement”, “0°/90° unequal proportion fiber placement”, “filament winding stereotype” and “weaving reinforcement” are proposed. The experimental results show that the performance of preforms fabricated by inner layer filament winding is significantly improved. Fibers are closely arranged, textile fluffy caused by cutting is avoided, thus, the volume fraction can be increased to about 40%. Preforms fabricated by surface layer weaving reinforcement can resist the erosion of liquid metal effectively. Compared with preforms unused weaving reinforcement, dimension stability is improved by 65%.

Keywords: C_f/Mg composites Shaped Preforms Preparation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.095

碳纤维增强镁基复合材料(C_f/Mg)具有高比强度、比模量、低热膨胀系数以及良好的阻尼性能,已在航空航天和汽车工业中得到应用^[1-3],主要用于制造大型的、质量轻的构件,如光学系统反射镜^[4]、卫星和雷达天线、波导管^[5]、航天站的安装板^[6]等。随着 C_f/Mg 复合材料应用范围的扩展,成本问题成为制造业日益关注的焦点。在复合材料成本构成中制造成本约占 60%~70%,

其中纤维预成形体占制造成本的 25%^[7]左右,高的预成形体制备成本已成为限制 C_f/Mg 复合材料构件广泛应用的瓶颈。

碳纤维预成形体的现有制备技术主要包括纤维铺放、缠绕、缝合、编织^[8]。Alliant Techsystems 公司采用纤维铺放工艺成功制备出风扇机匣和 Atlas5 型运载火箭的预成形体^[9]。美国宇航局和空军材料研究室采用纤维缠绕工艺成功研制出北极星 A3 导弹发动机壳预成形体^[10]。道格拉斯公司采用缝合工艺制备的预成形体已在机翼和机身蒙皮上得到应用^[11]。Boeing 公司采用三维编织工艺研制了“J”形机骨架预成形体^[12]。然而,以上工艺需要昂贵的配套设施支持,存在工艺投资大、成本附加值高的问题,不适于制备异形纤维预成形体。

本文结合现有制备技术提出了复合式制备工艺,采用已开发的成形装置制备了 4 种纤维预成形体,通过研究纤维预成形体的成形性及其影响因素,为 C_f/Mg 复合材料异形纤维预成形体制备提供理论基础。

1 纤维预成形体制备方法

1.1 试样结构及原材料

C_f/Mg 复合材料异形预成形体包括锥筒段和直筒段 2 部分,其中锥筒段上部带有内凸缘,直筒段下部带有外凸缘,如图 1 所示,试样尺寸如下:试样总高 160mm,直筒段高 80mm,外径 90mm,锥筒段锥度为 18°,试样壁厚 2mm,内外凸缘宽度为 6mm。



图1 异形预成形体剖视图

Fig.1 Cutaway view of shaped preform

* 国家自然科学基金(51275417,51221001)和国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA8011004B)资助项目。

试验原材料预选用东丽 T300-12k 单向布, 东丽 T300-3k 碳纤维布, 东邦 ST3-3k 碳纤维束, 具体参数^[13]如表 1 所示。

表1 试验原材料参数

性能参数	单向布	碳纤维布	碳纤维束
拉伸强度 /GPa	3530	3150	4410
拉伸模量 /GPa	230	220	235
伸长率 /%	1.8	2.0	1.9
线密度 / (g·m ⁻¹)	0.8	-	0.35
面密度 / (g·m ⁻²)	300	198	-
厚度 /mm	0.167	0.23	-

1.2 纤维预成形体制备方案

预成形体为对称结构, 应用过程中承受压缩载荷, 本文考虑增强纤维沿构件轴向(90°)排布, 以充分利用复合材料纤维方向承载能力高的优势; 但受压时, 考虑到构件的局部可能会发生屈曲变形, 其环向(0°)也需增强。从降低纤维预成形体应力水平、提高轴压承载能力的角度而言, 轴向铺层比例控制在 60%~80% 比较合适^[14]。本文结合相关工艺成形条件, 提出了 4 种不同的纤维预成形体复合式成形方案。

(1) 纤维 0°/90° 等比例铺放工艺。

纤维铺放是将纤维直接铺放在芯模表面, 压实加固形成预成形体。其优点是操作简便, 成本低, 生产周期短^[15]。纤维预成形体的制备材料选用东丽 T300-12K 单向布。将单向布按尺寸剪裁, 以便于锥筒段及凸缘部分成形; 单向布沿 0°/90° 正交排列, 然后逐层铺放在芯模表面; 上凸缘向内翻折固定, 下凸缘同理; 如此反复直至规定厚度; 整个预成形体径向缝合增强。环向纤维受剪裁, 规则排布约束消失, 断口处纤维易变形、脱落, 需在铺放的同时浸润乙醇和酚醛树脂的混合溶液固化定型。制备的纤维预成形体实物如图 2 所示。

(2) 纤维 0°/90° 不等比例铺放工艺。

纤维预成形体的制备材料选用东丽 T300-12K 单向布、T300-3K 碳纤维布。将单向布按尺寸剪裁, 然后按 90° 单向排布铺放在芯模表面, 依次固定上下凸缘; 用碳纤维布包覆单向布提供环向增强相; 如此反复直至规定厚度; 整个纤维预成形体沿径向缝合增强。实物如图 3 所示。

(3) 纤维缠绕定型工艺。

纤维缠绕是将连续纤维按一定规律缠绕在芯模上制备预成形体的方法。其优点是能保证纤维的连续完整, 结构效率高, 技术相对成熟, 制件力学性能优良^[16]。纤维预成形体的制备材料选用东丽 T300-3K 碳纤维布、



图2 0°/90° 等比例铺放工艺制备的预成形体 (试样1)

Fig.2 Shaped preform fabricated by 0°/90° equal proportion fiber placement



图3 0°/90° 不等比例铺放工艺制备的预成形体 (试样2)

Fig.3 Shaped preform fabricated by 0°/90° unequal proportion fiber placement

T300-12K 单向布和东邦 ST3-6K 碳纤维束。单向布沿轴向依模铺覆, 用碳纤维布包覆单向布提供环向增强相, 有效避免了环向纤维破坏带来的性能损失, 而且可以防止纤维脱落、变形; 每两层铺覆完成后, 使用碳纤维束周向固定一层, 如此反复直至规定厚度; 纤维预成形体径向缝合增强。实物如图 4 所示。

(4) 纤维编织加固工艺。

编织工艺是将增强纤维织造成整体织物的方法。其优点是制件损伤容限和抗拉伸破坏能力强, 可以织造复杂形状预成形体, 进而减少连接, 提高构件的整体性能^[17]。在依模铺覆-缠绕定型的基础上加入编织工艺, 用以实现制件的整体成形。纤维预成形体的制备材料选用东丽 T300-12K 单向布和东邦 ST3-6K 碳纤维束。单向布沿轴向依模铺覆, 碳纤维束环向缠绕定型, 单向布和纤维束层合式织物堆叠直至规定厚度; 利用缝合工艺对二维纤维预成形体进行厚度方向的增强; 采用已开



图4 纤维缠绕定型工艺制备的预成形体(试样3)

Fig.4 Shaped preform fabricated by filament winding stereotype

发的纤维预成形体成形装置完成外层编织加固,提供高的环向强度和刚度,抵抗复合材料制备过程中合金液的冲击。实物如图5所示。



图5 纤维编织加固工艺制备的预成形体(试样4)

Fig.5 Shaped preform fabricated by weaving reinforcement

2 试验测试及结果分析

2.1 异形预成形体体积分数

测定纤维体积分数的方法有显微镜法、化学消化法、电阻率法和计算法等。本文采用方法简单、成本低廉的计算法测定。其计算公式为:

$$V_f = \frac{W_f}{V_c \cdot \rho_f}, \quad (1)$$

式中, V_f 为纤维体积分数; W_f 为纤维质量(g); ρ_f 为纤维密度; V_c 为纤维制件体积。

采用电子称、全自动激光扫描仪分别对4个试样的纤维质量 W_f 和纤维制件体积 V_c 进行测量,纤维密度 ρ_f 为 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$,将测量数据带入计算公式(1)中,测量结果与纤维体积分数如表2所示。

2.2 异形预成形体成形尺寸

异形预成形体成形尺寸包括外形尺寸、圆度误差、锥度和环/轴向铺层比例。采用千分尺分别对4个试样外形尺寸进行测定,比较仪测量直筒段任意截面圆度误差,三坐标法测量锥筒段锥度,根据试样选用的不同铺层材料、铺层方法计算环/轴向铺层比例。测量结果与标准试样成形尺寸进行对比,如表3所示。

表2 试样纤维质量 W_f 和纤维制件体积 V_c

测量内容	试样1	试样2	试样3	试样4
纤维质量 W_f/g	57	60	63	65
纤维制件体积 V_c/cm^3	102.3	98.4	90.2	89.9
纤维体积分数 /%	31	33	38	40

表3 试样成形尺寸

成形尺寸	外形尺寸/mm			圆度误差/mm	锥度 / (°)	环/轴向铺层比例
	直筒段外径	直筒段壁厚	锥筒段壁厚			
标准试样	90	2.0	2.0	0	18°	1:4 ~ 2:3
试样1	97	2.5	3.3	2.9	21°	1:1
试样2	95	2.4	2.4	1.2	20°	1:4
试样3	92	2.1	2.1	0.7	19°	2:5
试样4	90	2.0	2.0	0.1	18°	1:4

2.3 异形预成形体尺寸稳定性

尺寸稳定性是衡量纺织品成形性的重要指标。使用洗衣机对异形预成形体反复水洗,通过测量试样在洗涤后整体变形程度及局部纤维纹理的变化来判断尺寸稳定性。将试样分别放入水平转鼓型前装料式洗衣机中,在旋转速度为 $(179 \pm 2)\text{r}/\text{min}$ 条件下,洗涤 10min 并干燥,测试结果如图6所示。

试样1表层纤维大量脱落,上下凸缘变形量较大,锥筒段纤维扭曲,直筒段纤维发生明显变化;试样2表层纤维少量脱落,上下凸缘变形量大,锥筒段纤维扭曲,直筒段纤维未发生明显变化;试样3纤维无脱落,上下凸缘变形量小,直筒段缠绕层纤维部分滑移,锥筒段纤维未发生明显变化;试样4纤维无脱落,上下凸缘变形量较小,锥筒段、直筒段纤维未发生明显变化。

2.4 结果分析

试样1、2均采用了纤维铺放工艺制备,不同之处在于其环向性能分别由单向布、碳纤维布提供。测量结果显示:试样1体积分数为31%,试样2为33%,说明单向布受剪裁变形量较碳纤维布大,织物更加蓬松,体积分数较低;试样3、4均采用了纤维铺放加缠绕工艺制备,不同之处在于其环向性能分别由碳纤维布、碳纤维束提供。体积分数测量结果显示试样3为38%,试样4



图6 试样尺寸稳定性测试结果

Fig.6 Test results of specimens dimension stability

为 40%，说明碳纤维布受剪裁变形量较碳纤维束大，织物相对蓬松，体积分数较低。

试样成形尺寸的测量结果显示，试样 1、2 与标准试样尺寸相差甚大，其中，试样 1 直筒段壁厚超出规定壁厚的 25%，锥筒段壁厚超出 65%；试样 3、4 与标准试样的尺寸接近。分析认为，试样 1、2 均采用纤维铺放工艺制备，相邻铺层间预紧力不足，导致整个异形预成形体成形尺寸存在较大偏差；试样 3、4 成形过程中加入缠绕工艺，缠绕张力使相邻铺层紧密贴合，试样成形尺寸得到充分保证。

通过尺寸稳定性测试，4 个试样的损伤程度各不相同。分析认为，试样 1、2 环向纤维剪裁破坏，整体结构蓬松，不足以抵抗水流的冲刷造成破坏；试样 3 缠绕层纤维约束少且铺排于外侧，受载易发生变形；试样 4 采用编织工艺整体加固，有效抵抗水流冲刷，效果明显。

3 结论

(1) 单向布、碳纤维布受剪裁局部排列不规律，纤维变形量大，织物蓬松，异形预成形体体积分数低，采用碳纤维束作为环向性能增强相，织物密实，体积分数提

高至 40% 左右。

(2) 纤维缠绕可以提高相邻铺层间预紧力，织物排列规律，组织紧密，试样成形误差比未包含缠绕工艺的降低 65%，尺寸精度得到保证。

(3) 外侧采用编织工艺整体加固，可以有效抵抗挤压浸渗过程中液态金属的冲刷，尺寸稳定性明显优于未加固的异形预成形体，成形性良好。

参考文献

- [1] Wang W G, Xiao B L, Ma Z Y. Evolution of interfacial nanostructures and stress states in Mg matrix composites reinforced with coated continuous carbon fibers. *Composites Science and Technology*, 2012, 72: 152-158.
- [2] Dieringa H, Hort N, Kainer K U. Magnesium Based MMCs Reinforced with C-Fibers. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing*, 2004, 6(2): 136-141.
- [3] 顾金海, 张小农, 顾明元. 纤维增强 AZ91 镁基复合材料的阻尼性能. *航空材料学报*, 2004, 24(6): 29-33.
- [4] RUSSELL-STEVENSON M, TODD R, PAPAKYRIACOU M, et al. Microstructural analysis of a carbon fibre reinforced AZ91D magnesium alloy composite. *Surface and Interface Analysis*, 2005, 37:336-342.
- [5] RUSSELL-STEVENSON M, TODD R, PAPAKYRIACOU M, et al. The effect of thermal cycling on the properties of a carbon fibre reinforced magnesium composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 397:249.
- [6] WENDT R, MISRA M, Fabrication of near-net shape graphite/magnesium composites for large mirrors. *Advances in Optical Structure Systems*, 1990, 1303:554.
- [7] 陈亚莉. 低成本复合材料技术新进展. *航空工程与维修*, 2001(1):17-19.
- [8] TONG L, MOURTIZE A P, BANNISTER M K. 3D Fiber Reinforced polymer composites. Elsevier, 2006.
- [9] 李勇, 肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用. *纤维复合材料*, 2002(3):39.
- [10] LEHTINIEMI P, DUFVA K, BERG T, Natural fiber-based reinforcements in epoxy composites processed by filament winding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011(23):1947-1955.
- [11] 姜亚明, 谢霞, 邱冠雄, 等. 多向纤维缠绕预制件的纤维取向. *纺织学报*, 2006, 27(6):36-40.
- [12] 肖红波, RTM 成型三维编织复合材料的应用. *国外建筑科技*, 2006, 27(1):8-10.
- [13] 贺福. 纤维及石墨纤维. 北京: 化工工业出版社, 2010.
- [14] 肖加余, 曾竟成, 刘钧, 等. 用软膜辅助 RTM 整体制备复合材料主承力件. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010.
- [15] 赵新明, 段玉岗, 刘潇龙, 等. 低能电子束原位固化树脂基复合材料纤维铺放制造及性能研究. *机械工程学报*, 2013, 49(11):121-127.
- [16] LEHTINIEMI P, DUFVA K, BERG T. Natural fiber-based reinforcements in epoxy composites processed by filament winding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011(23):1947-1955.
- [17] 祁瑞. 三维编织技术和三维编织复合材料. *新材料产业*, 2010(1):46-49.

(责编 玲犀)