

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.009

大口径复合材料天线反射面整体成型工艺研究

王海东, 秦泽云, 李金良, 王庆东, 刘利文

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 射电天文观测和深空探测的发展对天线反射面提出了更高精度、更大口径的要求, 通过基体树脂选型研究, 利用复合材料真空灌注工艺分别成型抛物面结构的主反射面和组成空间网格结构的横纵筋, 并采用柔性电热膜实现其大型复杂型面的均匀固化, 将二者胶粘组装为中国验证天线 (DVA-C) 整体天线反射面, 其口径尺寸为 $15\text{ m} \times 18\text{ m}$, 且兼具重量轻、型面精度高、综合成本低、安装方便简捷等优点。该反射面的整体成型制备为轻量化大口径天线反射面的研究提供了新的工艺方法和应用依据, 并达到了国际领先水平。

关键词: 复合材料; 真空灌注工艺; 天线反射面; 整体成型

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0052-05

Research On The Overall Forming Technology of Large-aperture Composite Antenna Reflector

Wang Haidong, Qin Zeyun, Li Jinliang, Wang Qingdong, Liu Liwen

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract : With the development of radio astronomy and deep space exploration, higher precision and larger aperture are required for antenna reflector. Through the study of matrix resin selection, the main reflector of parabolic structure and the transverse and longitudinal bars of spatial grid structure are respectively formed by vacuum filling technology of composite materials, and the large complex surface is uniformly solidified by flexible electric heating film, and they are glued and assembled as a whole of the DVA-C reflector. The aperture size of the body antenna surface is $15\text{ m} \times 18\text{ m}$, and it has the advantages of light weight, high profile accuracy, low overall cost, convenient installation, etc. The overall molding of antenna surface provides a new technology and application basis for the research of light weight and larger-diameter reflector, reaching the international leading level.

Keywords : composites ; vacuum filling process ; antenna reflectors ; the overall molding

平方公里阵 (SKA) 是多国合作的国际大科学工程, 其计划建造的世界最大综合孔径射电望远镜, 致力于回答宇宙起源和基本力等问题^[1-3]。SKA 拟由约 2500~3000 面 15 m 口径抛物面天线、250 个直径约 60 m 的致密孔径阵列及 250 个直径 180 m 的稀疏孔径阵列组成, 分布在 3000 km 范围形成望远镜阵列。SKA 将是世界上最大的综合孔径射电望远镜, 具有极高分辨率与快速成像能力, 将为人类认知宇宙提供重大机遇^[3]。中国验证天线 (DVA-C) 是我国针对 SKA 反射面天线单元, 结合国际先进设计理念与成熟工程经验研制的、具有自主知识产权

的一套原理样机^[4]。其主要技术指标包括: 主反射面口径为 $15\text{ m} \times 18\text{ m}$ (如图 1 所示), 有效面积 243 m^2 , 型面精度 $\leq 1\text{ mm}$, 质量 $\leq 2\text{ t}$ 。

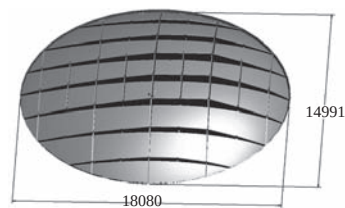


图1 主反射面三维模型

传统复合材料天线反射面的制造多采用热压罐、烘箱和手糊等成型工艺, 不适用于大尺寸面板的

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (11261140641), 国家国际科技合作专项 (2012DFB00120)

通讯作者: 王海东, 硕士, 高级工程师, 主要从事先进复合材料结构及工艺设计 E-mail : wanhadon@126.com

收稿日期: 2020-04-07

引用格式: 王海东, 秦泽云, 李金良, 等. 大口径复合材料天线反射面整体成型工艺研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):52-56, 73.

Wang Haidong, Qin Zeyun, Li Jinliang, et al. Research on the overall forming technology of large-aperture composite antenna reflector[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):52-56, 73.

成型^[5]。故对于 DVA-C 大口径复合材料整体成型天线反射面,几乎没有可借鉴经验,其技术难点对工业界提出了极大挑战,需开展大量工艺研究,包括:大尺寸模具设计与制造研究、表面金属化研究、树脂体系选型研究、大口径天线反射面真空灌注工艺研究、低成本固化方法研究和网格结构背架一体化胶粘装配研究等,需要突破诸多关键技术,笔者所在课题组针对这些问题进行了研究,并取得了相关成果。

1 主反射面的成型制备研究

1.1 大尺寸模具设计与制造研究

为制备 15 m × 18 m 复合材料天线反射面,其模具需满足的主要技术要求如下:

- (1) 模具形式为整体拼装,型面保证连续;
- (2) 主面模具型面精度 ≤ 0.4 mm;
- (3) 模具具有良好的气密性,在 -0.092 MPa 真空压力下,保压 ≥ 30 min。

对于大尺寸天线反射面模具,采用传统金属铸造模具存在诸多缺点:模具分块会较多,拼装困难;密封性差,型面精度难以保证;金属材料散热较快,加热固化困难;模具加工周期长,质量较重,成本高。

通过反复调研和试验验证,确定 DVA-C 天线模具由刚性结构和模具型面组成,其中刚性结构采用钢架和多个随型钢隔板构成,焊接完成后整体进行退火去应力处理,保证模具整体刚强度,同时达到减重目的。模具型面由方管层、玻璃钢层和树脂层构成(如图 2 所示)。

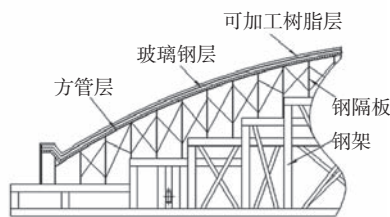


图 2 反射面模具结构组成示意图

首先对不同区域处方管按确定弧度折弯,密集排列并焊接在钢隔板阵列上,提供模具基本型面;然后按预先设计的铺层方案进行玻璃钢层的糊制,保证模具型面的力学性能;最后利用挤压机整体滚压一定厚度的环氧代木层,固化后用 CNC 数控加工模具型面,满足型面密封性和精度要求。同时对主面模具分块拼接位置进行整体化密封设计,保证其拼接密封性要求,反射面模具数模及实物如图 3 和图 4 所示。

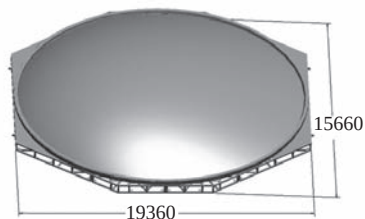


图 3 反射面模具三维模型



图 4 主反射面模具实物

最终制备的单块模具精度 0.17 mm,整体拼装精度 0.35 mm,整体模具密封性良好。

1.2 表面金属化研究

针对大口径天线反射面的表面金属化,其难点主要是如何保证大面积金属层的连续性与均匀性。

金属层与真空灌注树脂满足结合力要求(ISO 240-2013 标准),金属层及转移膜平整连续无漏喷无开裂,通过在转移膜中添加着色剂的方法,可及时发现漏喷及喷涂不均匀区域,并进行处理,保证转移膜层的整体性和均匀性。

通过反复试验,确定金属火焰喷涂的工艺参数为:喷枪距模具表面距离为 350 ~ 400 mm,喷涂速率为 250 ~ 300 mm/s,通过以上研究,成功制备了平整、连续、无漏喷、无开裂的金属反射层,其现场操作如图 5 所示。



图 5 现场金属化喷涂示意图

1.3 树脂基体选型研究

复合材料常用的树脂体系包括不饱和树脂、乙烯基树脂和环氧树脂等,笔者拟采用真空灌注工艺,针对 DVA-C 大口径天线反射面,由于是薄壁、大面积,其真空灌注工艺对树脂体系的要求较高,主要指标有:

- (1) 黏度低,黏度 ≤ 500 mPa · s;
- (2) 可操作时间较长, $t \geq 180$ min;

(3) 低温完全固化,固化温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$;

(4) 玻璃化转变温度(T_g)满足地面环境要求, $T_g \geq 100^{\circ}\text{C}$ 。

对国内外常用8种不同体系真空灌注树脂按照上述指标要求进行筛选,最终优选出最佳基体树脂是MT5702,其性能如下:黏度 $225\text{ mPa}\cdot\text{s}$,可操作时间 192 min ,固化温度 60°C , $T_g\ 110^{\circ}\text{C}$,拉伸强度 85 MPa ,压缩强度 120 MPa ,弯曲强度 125 MPa ,冲击韧性 65 kJ/m^2 。

通过动态黏度和等温黏度-时间曲线的测试及分析,确立树脂体系黏度模型,并完成天线反射面真空灌注工艺窗口预报,该树脂体系等温黏度模型及工艺窗口预报分别如式(1)和图6所示^[6]。

$$\eta_t = 1.03469 \times 10^{-10} \exp \frac{6584.16986}{T} \times \exp \left[\exp \left(21.29251 - \frac{8010.442}{T} \right) t \right] \quad (1)$$

该树脂体系在 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内充模工艺窗口时间在 $126 \sim 181\text{ min}$ 之间,适用于大尺寸天线反射面VARI成型的工艺要求。该树脂各项力学性能及其复合材料力学性能既满足了设计指标要求,又实现了降低固化温度的期望,为大尺寸整体化复合材料天线面板的型面精度控制提供了重要技术支持。

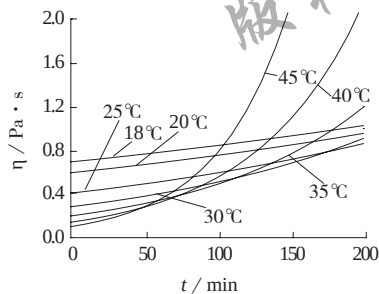


图6 树脂体系工艺窗口预报

1.4 大口径天线反射面真空灌注工艺研究

真空灌注工艺在复合材料成型过程中能够预先除去模具与纤维预成型体之间的空气,有效提高了树脂在纤维增强材料中的流动能力,是制得高质量复合材料制品的保证^[7]。与其他的复合材料成型工艺相比,真空灌注工艺更适合于成型大厚度、大尺寸的制件,通过合理的流道设计,实现树脂对纤维增强材料的充分浸渍,降低工艺风险^[8]。

天线反射面的真空灌注研究主要是对树脂导流方式的选择,在保证树脂充分浸润预成型体的基础上,尽量提高流动效率,缩短充模时间,以适应树

脂的凝胶时间。

通过试验测试预成型体渗透率,利用有限元分析软件RTM-Worx分别对DVA-C天线主面进行充模流动仿真模拟,选择最佳流道设计方案。从仿真结果可以看出,主面的4种导流方式(直线式、环式、鱼骨式和放射式)中,以放射式导流方式充模时间最短,流动效率最高,确定为主面流道设计方案,并在实际布置时通过增加注胶口数量来提高树脂注入量,以提高效率,降低风险^[9-10]。放射式导流方式仿真结果如图7所示。

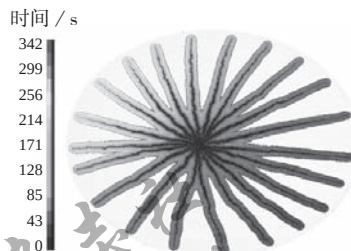


图7 主反射面导流方式仿真结果

为便于工艺操作,保证树脂充模效率,对实际流道布置进行如下优化:注胶设计由一个注胶口增加为8个,将48根流道分为8组,6根导流管共用一个注胶口,从而增加注胶量。同时在环状中心增加1个抽气口以排除中部导流环内空气,保证纤维浸渍质量。利用该方案顺利完成了 $15\text{ m} \times 18\text{ m}$ 大口径天线面蒙皮的成型,工艺实施过程如图8所示。

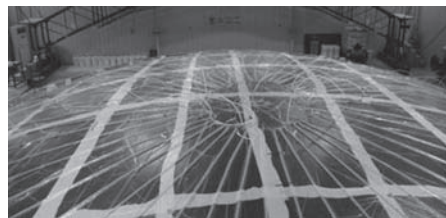


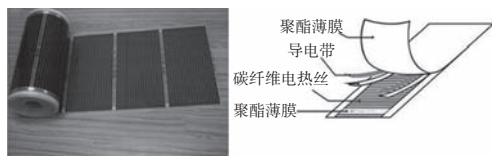
图8 主反射面真空灌注工艺实施示意图

1.5 低成本固化方法研究

对于大尺寸复合材料整体天线反射面,若采用热压罐、模压机、烘箱等方法加热固化,设备尺寸要求过大,制造成本高昂。而传统的电热毯加热方式,因为天线面板的复杂型面而难以保证其与复合材料表面充分贴合,影响传热效率和加热均匀性^[11,12]。故需要研究一种低成本的固化方法,能够适应大曲率的复杂型面,同时能够进行分区域加热控制,保证整体加热均匀性。

柔性电热膜属于一种复合性高分子电热膜(如图9所示),其表面散热面积大,加热过程中温度分

布均匀,具有良好的柔韧性,可紧贴载体,热转化效率较高,有望实现制件的低成本固化^[13]。



(a) (b)

a—实物图;b—结构示意图

图9 柔性电热膜实物及结构示意图

针对大尺寸复杂型面制品的固化,主要保证其固化温度均匀性,从而保证制品不同区域同步固化,提高其整体质量。通过研究柔性电热膜的铺放方式、温度制度对复合材料固化过程温度分布和固化程度的影响,结果表明:三种铺覆方式中,与搭接铺覆和间隔铺覆相比,拼接铺覆的温度均匀性最佳,分别提高了 26.7% 和 38.9%,故选择拼接铺覆作为 DVA-C 天线主面固化时电热膜铺覆方式。同时在电热膜加热固化的升温阶段,增加恒温平台,能够有效缩小制品不同位置的温差值,提高均匀性^[14]。

采用柔性电热膜加热方法实现了大尺寸复合材料整体天线反射面的固化成型,根据测试结果显示,产品尺寸精度、固化程度和玻璃化转变温度均满足使用要求,说明该固化方法是可行的针对大型复杂型面构件的加热固化方法,在降低固化成本同时保证了制品的加热均匀性,工艺实施如图 10 所示。



图10 主反射面电热膜固化工艺实施示意图

2 空间网格结构背架的成型制备研究

2.1 横纵筋真空灌注工艺优化

根据横纵筋外形设计真空流道,上端铺设一条注胶管,预留三个注胶口,下端铺设一条抽气管,根据背筋长度按需求预留 2 个或多个抽气口,流道设计示意图如图 11 所示。按背筋流道设计方案,依次铺放真空袋、下层导流网、下层脱模布、预成型体、上层脱模布、上层导流网,用真空袋完全包覆并密封,连接外部注胶管、抽气管,开启真空泵,保压 30 min,

配制树脂、搅拌均匀并导入,辅材铺覆及真空灌注过程如图 12 所示。

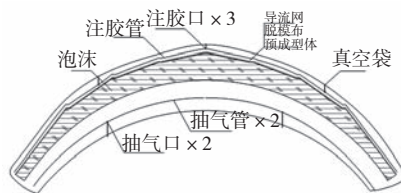


图11 横纵筋流道设计示意图

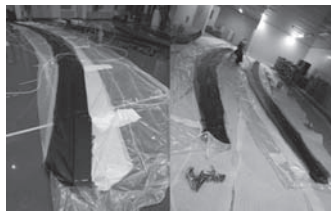


图12 横纵筋真空灌注过程

2.2 网格结构背架的胶粘组装

横纵筋通过在确定位置开槽并组装为网格结构背架,通过胶接工艺与蒙皮粘接成一体,网格结构背架的胶粘组装有以下几点要求:①背架在蒙皮上定位准确;②背架整体粘接,同时固化;③主反射面环筋加强;④背筋和蒙皮胶接位置随形加强;⑤横纵筋交叉处“L”型加强,具体实施过程如图 13 所示。



图13 天线反射面背架组装

3 吊装及测试

天线反射面胶接组装完成、固化结束后,需通过多种组合方式完成其脱模、吊装,并通过金属背架连接为整体,如图 14 所示。

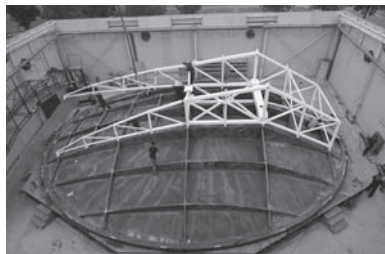


图14 主反射面吊装

利用摄影测量系统对 DVA-C 样机天线反射面精度进行测试,其结果为:天线反射面型面精度为

0.9 mm,质量 1.9 t,满足其技术指标要求,图 15 为测试过程示意图。



图 15 DVA-C 样机测试

4 结论

(1) 通过采用钢结构桁架复合玻璃钢可加工树脂模具技术,制备了 15 m×18 m 大尺寸天线反射面模具,整体型面精度可达 0.35 mm,密封性良好,满足使用要求。

(2) 通过研究转移膜着色技术和喷涂技术,确定金属火焰喷涂工艺参数为:喷枪距模具表面距离为 350~400 mm,喷涂速率为 250~300 mm/s,并成功制备了平整、连续、无漏喷、无开裂的金属反射层。

(3) 通过树脂基体选型研究和大口径天线反射面真空灌注研究,确定树脂体系为 MT5702,并以放射式流道作为真空导流方式,完成了大口径天线反射面的成型制备。

(4) 开发了复合材料柔性电热膜低成本加热固化技术,产品尺寸精度、固化程度和玻璃化转变温度均满足指标要求。

(5) 利用真空灌注工艺完成了横纵筋的成型,并组装为网格结构背架,通过胶接工艺与蒙皮粘接成一体,完成 15 m×18 m 大口径复合材料天线反射面的整体组装。

(6) 将天线反射面通过吊装、螺连与金属背架连接为整体,并利用摄影测量系统进行精度测试,结果为 0.9 mm,质量结果为 1.9 t,均满足其技术指标要求。

参考文献

- [1] 彭勃,金乘进,杜彪,等.持续参与世界最大综合孔径望远镜 SKA 国际合作[J].中国科学:物理学,力学,天文学,2013,42(12):1 292-1 307.
Peng Bo, Jin Chengjin, Du Biao, et al. China's participation in the SKA-the world's largest synthesis radio telescope[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42(12):1 292-1 307.
- [2] 郑元鹏,刘国玺,金超,等.射电望远镜天线结构与性能实现[J].无线电工程,2018,48(11):913-919.
Zheng Yuanpeng, Liu Guoxi, Jin Chao, et al. Structure design and performance realization of radio telescope antennas[J]. Radio Engineering, 2018, 48(11):913-919.
- [3] 安涛,武向平,洪晓瑜,等.SKA 大数据的科学应用和挑战[J].中国科学院:学科与领域,2018,33(8):871-876.
An Tao, Wu Xiangping, Hong Xiaoyu, et al. Science applications and challenges of SKA big data[J]. Chinese Academy of Sciences:Subject and Field, 2018, 33(8):871-876.
- [4] Jonas J L. MeerKat-the south African array with composite dishes and wide-band single pixel feeds[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8):1 522-1 530.
- [5] 杜彪,伍洋,周建寨,等.平方公里阵中国验证天线光学设计[J].中国科学:信息科学,2016,45(8):1 001-1 014.
Du Biao, Wu Yang, Zhou Jianzhai, et al. Optical design of the dish verification antenna-china(DVA-C) for square kilometer array[J]. Scientia Sinica:Informationis, 2016, 45(8):1 001-1 014.
- [6] 王亚楠,王海东,李金良,等.大尺寸天线面真空灌注用树脂流变性能分析[C].2018 年机械电子学学术会议论文集,2018(8):492-496.
Wang Yanan, Wang Haidong, Li Jinliang, et al. The rheological behavior analysis of the VARI resin system used in the large-scale composite antenna reflector[C]. Paper collection of 2018 mechanical electronics Academic Conference, 2018(8):492-496.
- [7] 杨金水,肖加余,曾竟成,等.真空导入模塑工艺树脂流动规律研究[J].宇航材料工艺,2007(5):22-26.
Yang Jinshui, Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, et al. Resin flow behavior of vacuum infusion molding process[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007(5):22-26.
- [8] 彭家顺,高建勋.叶片真空灌注工艺管路布置以及孔隙的形成[J].武汉理工大学学报,2009,31(21):98-108.
Peng Jiashun, Gao Jianxun. Piping layout and pores formation in VARTM manufacture process of wind tube blade[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(21):98-108.
- [9] 秦泽云,王海东,李金良,等.天线面蒙皮真空导入整体成型充模仿真及优化[J].无线电通信技术,2016,42(5):53-55,98.
Qin Zeyun, Wang Haidong, Li Jinliang, et al. Mold-filling simulation and optimization of VARI for large antenna reflector skin[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(5):53-55, 98.
- [10] 秦伟,李海晨,张志谦.RTM 工艺树脂流动过程数值模拟及实验比较[J].复合材料学报,2003,20(4):77-80.
Qin Wei, Li Haichen, Zhang Zhiqian, et al. Comparison between numerical simulation and experimental result of resin flow in RTM[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(4):77-80.

- aircraft component[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(4): 25-29.
- [9] 邓杰. 芳纶 / 环氧复合材料性能研究 [J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(2):6-11.
- Deng Jie. Study on the properties of aramid fibre / epoxy composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(2):6-11.
- [10] 夏于旻. 芳纶复合材料的性能、制备及应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2006(9):16-18.
- Xia Yumin. Properties and application of aramid composites[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006(9):16-18.
- [11] 李同起, 王成扬. 影响芳纶纤维及其复合材料性能的因素和改进方法 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(5):5-9.
- Li Tongqi, Wang Chengyang. Effect factors and improving methods of the properties of aramid fiber and its composite[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2003, 19 (5):5-9.
- [12] 王煦怡, 陈超峰, 彭涛, 等. 芳纶 III 在复合材料领域应用的优势探讨 [J]. 合成纤维, 2016, 45(1):22-25.
- Wang Xu-yi, Chen Chaofeng, Peng Tao, et al. Advantage application of aramid III in the field of composite materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2016, 45 (1):22-25.
- [13] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [14] Repeka L, Boyd J. Vacuum-bag-curable only prepreg that produce void-free parts[C]. 47th International SAMPE Symposium, Long Beach: DEStech Publications, Inc., 2002:1 862-1 875.
- [15] 益小苏. 先进复合材料技术研究与发展 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006:146-174.
- Yi Xiaosu. Research and development of advanced composite technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 146-174.
- [16] Centea T, Grunenfelder L K, Nutt S R. A review of out-of-autoclave prepregs-Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations[J]. Composites:Part A, 2015, 70:132-154.
- [17] Harshe R. A review on advanced out-of-autoclave composites processing[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2015, 95(3):207-220.
- [18] 廉伟. 非热压罐工艺在飞机复合材料低成本制造中前景广阔 [J]. 国际航空, 2011(10):64-66.
- Lian Wei. OOA, A promising process of reducing aircraft composite manufacturing cost[J]. International Aviation, 2011(10):64-66.
- [19] 唐见茂. 航空航天复合材料非热压罐成型研究进展 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31(6):577-583.
- Tang Jianmao. Progress in the out of autoclave progress in aerospace composites[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2014, 31(6):577-583.

(上接第 56 页)

- [11] Fernández I, Blas F, Frövel M. Autoclave forming of thermoplastic composite parts[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2003, 143-144(1):266-269.
- [12] 李敏, 张佐光, 仲伟虹, 等. 电子束作用下树脂体系的固化行为 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(2):54-56.
- Li Min, Zhang Zuoguang, Zhong Weihong, et al. Study of electron beam curing resins[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2):54-56.
- [13] Abliz D, Duan Yugang, Zhao Xinming, et al. Low-energy electron beam cured tape placement for out-of-autoclave fabrication of advanced polymer composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2014, 65:73-82.
- [14] 李金良, 顾轶卓, 李敏, 等. 复合材料柔性电热膜固化方法及温度分布 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1):1 000-1 005.
- Li Jinliang, Gu Yizhuo, Li Min, et al. The curing method and temperature distribution of composites based on flexible electric heating film[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1):1 000-1 005.