

# 基于轻量化目标的发射箱纤维增强材料铺层设计

蔡建, 徐淑权, 秦旭锋

(中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 以某型发射箱复合材料箱体为对象, 探讨复合材料箱体的纤维增强材料铺层设计方法。**方法** 以箱体质量的控制为目标, 运用复合材料层合板力学理论结合有限元分析方法进行纤维增强材料铺层计算。**结果** 将纤维的体积分数控制在43.6%, 箱体玻璃纤维布铺层总数量为10层, 可实现箱体的质量控制目标为 $(23 \pm 1)$ kg。**结论** 获得的纤维增强材料铺层方式可有效保证箱体的质量一致性和尺寸控制要求。

**关键词:** 复合材料发射箱; 纤维增强材料; 铺层设计

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)03-0046-04

## Overlay Design of Fiber-reinforced Material of Launch Box Based on the Target of Lightweight

CAI Jian, XU Shu-quan, QIN Xu-feng

(No. 59 Research Institute of Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The aim of this work was to explore the method of overlay design of fiber-reinforced material for a type of launch box. With the goal of controlling the weight of the box, the composite laminates mechanical theory combining with the method of finite element analysis were used to calculate the overlay design of fiber-reinforced material. When the fiber volume content was controlled in 43.6% and the total number of glass fiber cloth laminate layers was 10, the goal of box weight control in range of  $(23 \pm 1)$  kg was achieved. The method of overlay design of fiber-reinforced material could effectively ensure the weight consistency and size control requirements.

**KEY WORDS:** composite launch box; fiber-reinforced material; overlay design

箱式发射技术是当前和今后先进弹箭武器系统发展的重点和趋势, 其核心和关键是集贮存、运输及发射功能于一体的发射箱。随着各种先进弹箭系统趋向精确制导、高度灵活机动和小型化方向发展, 对发射箱的体积、质量、环境适应性等方面提出了更为严格的要求, 小型化、轻量化是其主要发展趋势<sup>[1-4]</sup>。随着纤维增强复合材料技术的不断发展, 国内外相继开展了大量的复合材料发射箱研究工作, 并获得了成功应用<sup>[5-7]</sup>。箱体作为发射箱的主要组成部分, 承担着容装导弹、安装定向器及主承力作用, 采用纤维增强复合材料代替传统金属材料制造发射箱箱体是实现

轻量化目标的重要解决方案<sup>[8-9]</sup>。文中以某型发射箱为例, 探讨基于轻量化目标和低成本化的复合材料箱体纤维增强材料铺层设计方法。

### 1 复合材料箱体结构特点及质量控制目标

某型发射箱用复合材料箱体为矩形截面薄壁结构, 采用结构与功能一体化功能铺层设计, 在箱体结构铺层中引入阻隔屏蔽层, 以赋予箱体良好的潮气阻隔性和电磁屏蔽性能, 为满足系统轻量化、结构紧凑化要求, 其内腔设计长度  $L$ 、宽度  $B$ 、壁厚  $t$  分别为

收稿日期: 2015-07-17

作者简介: 蔡建(1970—), 男, 四川安岳人, 研究员级高级工程师, 主要从事防护包装技术应用研究。

2350,360,4 mm。箱体结构与功能铺层设计见图1。

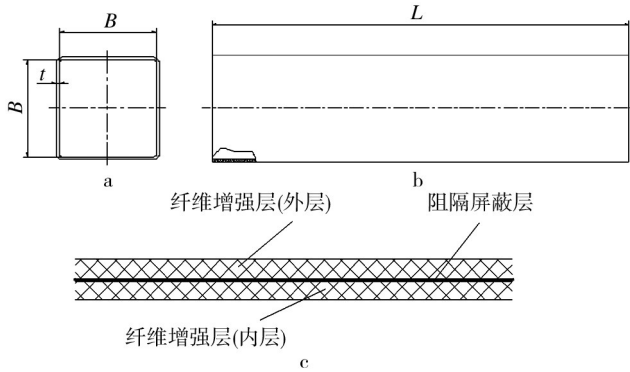


图1 箱体结构与功能铺层设计

Fig.1 Overlay design of structure and function of box

根据系统轻量化指标要求,复合材料箱体的质量控制目标为(23 ± 1)kg。

## 2 材料选用与成形工艺方案

为确保箱体满足承载、使用服役环境条件的性能要求,同时有效控制箱体的制造成本,实现系统低成本化制造目标。通过对比分析常用的几类热固性基体树脂和增强纤维材料的物理化学特性,结合以往有关复合材料构件设计和应用方面的成功经验,综合考虑材料性能、工艺性以及经济成本等方面因素,确定选用环氧乙烯基类树脂为基体树脂、玻璃纤维为增强材料。

为提高箱体成形效率,确定采用玻璃纤维编织布在线浸润、分步卷绕成形工艺方案,卷绕、铺放工艺过程见图2。

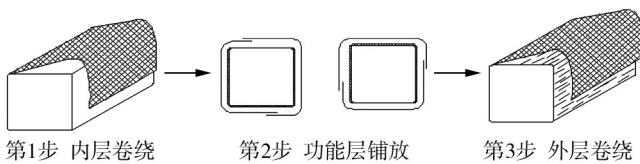


图2 箱体分步法卷绕铺放成形工艺过程

Fig.2 The forming process of winding placement of box using the sub-step method

## 3 纤维增强材料铺层设计

### 3.1 数学模型建立

根据质量控制目标推算纤维增强材料的体积含量控制范围,建立如下数学计算模型<sup>[10-11]</sup>:

$$\begin{cases} m = \rho_f \cdot V_f + \rho_r (V - V_f) \\ m_{\min} < m < m_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为箱体质量(g); $\rho_f$ 为纤维增强材料密度(g/cm<sup>3</sup>); $\rho_r$ 为树脂密度(g/cm<sup>3</sup>); $V_f$ 为纤维增强材料体积(cm<sup>3</sup>); $V$ 为箱体材料体积(cm<sup>3</sup>); $m_{\min}$ 为箱体设计质量下限(g); $m_{\max}$ 箱体设计质量上限(g)。

### 3.2 基于变形分析的箱体弹性模量获取

通过对设计的箱体进行三维建模有限元分析,以改变箱体材料的弹性模量为输入条件、变形位移不大于0.5 mm为控制目标,获得箱体的弹性模量控制下限<sup>[12-15]</sup>。分析结果显示箱体的纵向、横向弹性模量必须在大于17 GPa的条件下,其产生的位移变形才能满足要求。箱体材料弹性模量为17 GPa时的位移变形分析云图见图3,通过改变材料的弹性模量分析获得的箱体位移变形随弹性模量的变化趋势曲线,见图4。

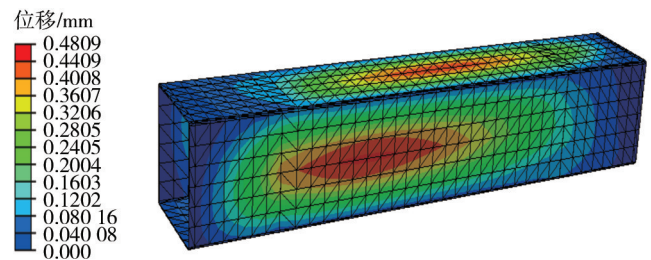


图3 箱体材料弹性模量为17 GPa时的位移变形分析云图

Fig.3 Displacement deformation analysis when the elastic modulus of box material was 17 GPa

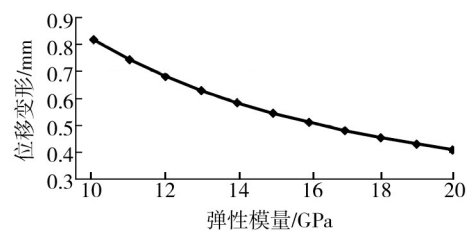


图4 箱体位移变形随弹性模量的变化趋势曲线

Fig.4 Variation trend curve of box displacement deformation with elastic modulus

### 3.3 增强材料含量控制范围分析

为了兼顾箱体纵向和横向的刚强度,设计选用0°/90° 编织玻璃纤维布为增强材料。根据复合材料层合板力学理论<sup>[16]</sup>,箱体复合材料纵向、横向弹性模量简化计算公式为:

$$E_{11} = E_f \cdot v_{11} + E_r (1 - v_f) \quad (2)$$

式中: $E_{11}$ 为箱体复合材料纵向、横向弹性模量; $E_f$

为玻璃纤维弹性模量;  $E_r$  为树脂弹性模量;  $v_f$  为纤维编织布的体积分数;  $v_{11}$  为纵向或横向纤维的体积分数。

对于  $0^\circ/90^\circ$  玻璃纤维编织布, 纵向或横向纤维体积分数  $v_{11}$  与纤维编织布体积分数  $v_f$  之间有如下关系:

$$v_{11} = \frac{1}{2}v_f \quad (3)$$

玻璃纤维弹性模量  $E_r$  约为 75 GPa, 树脂弹性模量约为 3 GPa。通过公式(2)—(3)计算得出, 纤维编织布体积分数  $v_f$  必须大于 40.6% 方能满足箱体纵向、横向弹性模量大于 17 GPa 的要求。另外, 根据公式(1), 已知玻璃纤维增强材料密度约为  $2.5 \text{ g/cm}^3$ 、环氧树脂基树脂密度约为  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , 箱体设计体积为  $13\,694 \text{ cm}^3$ 。经计算得出箱体纤维增强材料体积  $v_f$  的控制范围为  $4955 \text{ cm}^3 < v_f < 6383 \text{ cm}^3$ , 即纤维增强材料的体积分数需控制在 36.2%~46.6% 之间。综合分析计算结果可知, 箱体铺层设计时应将玻璃纤维的体积分数控制在 40.6%~46.6% 之间。

### 3.4 增强材料铺层数量计算及工艺铺层方式确定

玻璃纤维布铺层数量按式(4)计算:

$$N = \frac{\rho_f V_f}{S \rho_s} \quad (4)$$

式中:  $N$  为玻璃纤维布铺层数量;  $\rho_f$  为玻璃纤维密度 ( $\text{g/cm}^3$ );  $V_f$  为箱体中玻璃纤维体积 ( $\text{cm}^3$ );  $S$  为箱体中层表面积 ( $\text{cm}^2$ );  $\rho_s$  为玻璃纤维布单位面积质量 ( $\text{g/cm}^2$ )。

选用的玻璃纤维布单位面积质量约为  $430 \text{ g/m}^2$ , 纤维的体积分数控制为上限和下限的平均值 43.6%, 由公式(4)计算得到箱体玻璃纤维布铺层总数量  $N$  为 10 层, 根据计算结果确定箱体卷绕成形采用以中间阻隔屏蔽层外层的内 4、外 6 的铺层方式, 见图 5。

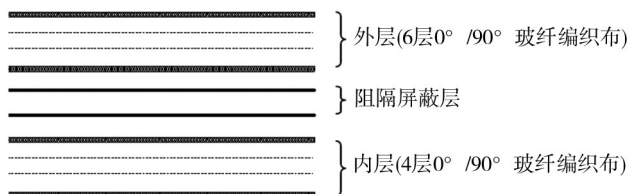


图5 箱体纤维增强材料工艺铺层方式

Fig.5 Overlay pattern of fiber-reinforced material for box

### 3.5 工艺验证试验

根据铺层设计结果进行了试制工艺验证试验, 共制备了 15 套箱体样件, 其质量、壁厚检测结果见表 1。

箱体材料力学性能测试结果显示, 拉伸强度为 330 MPa, 弯曲强度为 437 MPa, 弯曲弹性模量为 17 GPa, 拉伸弹性模量为 17.8 GPa, 冲击强度为  $176 \text{ kJ/m}^2$ 。从检测结果可以看出, 利用前述分析计算获得的纤维增强材料铺层方式成形箱体可以较好地控制箱体的质量, 满足了预定的设计目标。

表1 复合材料箱体质量、壁厚检测结果

Tab.1 Test results of weight and wall thickness of composite box

编号	质量/kg	壁厚/mm	编号	质量/kg	壁厚/mm
01	22.62	3.82	09	23.20	4.16
02	22.83	3.84	10	22.13	3.72
03	23.04	4.06	11	23.51	4.20
04	23.15	4.06	12	22.81	3.88
05	23.36	4.12	13	22.85	3.92
06	22.54	3.78	14	23.89	3.92
07	22.96	3.98	15	22.58	3.80
08	23.06	4.02			

## 4 结语

通过以箱体质量为控制目标, 运用复合材料层合板力学理论, 结合有限元分析方法计算纤维增强材料体积分数控制范围, 进而计算得到纤维增强材料的卷绕成形工艺铺层方式。结合试制生产原材料、工艺参数及过程控制, 有效保证了箱体的质量一致性和尺寸控制满足规定的要求, 为类似复合材料构件铺层设计提供了一种简单可行的设计方法。

### 参考文献:

- [1] 杨坚, 贺晔红, 李嘉禄. 航空发动机用复合材料支架成型工艺探索[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(4): 36—38.  
YANG Jian, HE Hua-hong, LI Jia-lu. A Molding Process Explore of Composite Scaffold Used in Aeroengine[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(4): 36—38.
- [2] 张玲翔. 飞航导弹箱式发射技术[J]. 飞航导弹, 2009(1): 20—28.  
ZHANG Ling-xiang. Box Launch Technology of Cruise Missile [J]. Cruise Missile, 2009(1): 20—28.
- [3] 张剑. 导弹发射箱结构优化设计[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(8): 59—63.  
ZHANG Jian. Optimization Design of Box Structure Missile Launch[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(8): 59—63.
- [4] 叶大水, 吴博文, 余文成. 发射箱箱盖机构故障分析及解决

- 措施[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(4):20—21.  
YE Da-shui, WU Bo-wen, YU Wen-Cheng. Failure Analysis and Solutions of the Front Cover Mechanism of Launch Canister[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(4):20—21.
- [5] 崔敏, 程泽林, 陈英. 基于VARTM工艺的大型闭合截面复合材料箱体的研制[J]. 宇航材料工艺, 2012(4):26—29.  
CUI Min, CHENG Ze-lin, CHEN Ying. Development of a Large Closed Cross Section of Composite Material of Box Based on VARTM Process[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(4):26—29.
- [6] 钱元, 周光明, 贺卫东. 轻质复合材料发射箱盖结构与参数优化[J]. 航空学报, 2013, 34(4):826—831.  
QIAN Yuan, ZHOU Guang-ming, HE Wei-dong. Lightweight Composite Launcher Cover Structural Design and Parameters Optimization[J]. Journal of Aeronautics, 2013, 34(4):826—831.
- [7] 冯维超, 周光明, 王新峰. 泡沫夹层复合材料发射箱盖损伤失效研究[J]. 技术研究与应用研究, 2014(1):43—46.  
FENG Wei-chao, ZHOU Guang-ming, WANG Xin-feng. Foam Sandwich Composite Launcher Cover Damage Failure Research[J]. Technology and Applied Research, 2014(1):43—46.
- [8] 蔡建, 詹永富, 罗俊杰. 发射箱复合材料箱体的设计与选材[J]. 四川兵工学报, 2010, 30(8):37—38.  
CAI Jian, ZHAN Yong-fu, LUO Jun-jie. Composite Cabinet Design and Material Selection of Launch Box[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 30(8):37—38.
- [9] 蔡建, 詹永富. 大尺寸纤维复合材料箱体零拔模斜度缠绕成型模具设计[J]. 包装工程, 2011, 32(23):52—53.  
CAI Jian, ZHAN Yong-fu. Zero Draft Angle Winding Mold Design of Big Size Fiber Composite Material of the Box[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23):52—53.
- [10] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构设计与制造[M]. 程小全, 张纪奎, 译. 北京:航空工业出版社, 2010.  
NIU Chun-yun. Utility Aircraft Composite Structure Design and Manufacture[M]. CHENG Xiao-quan, ZHANG Ji-kui, Translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.
- [11] 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.  
YI Xiao-su. Advanced Composites Technology Research and Development[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [12] FELI S, ASGARI M R. Finite Element Simulation of Ceramic/Composite Armor Under Ballistic Impact[J]. Composite Structures, 2011, 42(4):771—780.
- [13] CARLSSON L A, KARDOMATEAS G A. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites[M]. New York: Springer, 2011.
- [14] BAMBAL A S. Mechanical Evaluation and FE Modeling of Composite Sandwich Panels[M]. Ann Arbor: West Virginia University, 2007.
- [15] GAY D, HOA S V, TSAI S W. Composite materials: design and applications[M]. Florida: CRC press, 2010.

(上接第39页)

- between Rolls in Reverse Coating under Different Speed Ratio [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [10] 涂伟萍. 水性涂料[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.  
TU Wei-ping. Aqueous Coatings[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [11] 耀宗. 现代水性涂料[M]. 北京:中国石化出版社, 2005.  
YAO Zong. Modern Aqueous Coatings[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [12] 陈珍树. 水性丙烯酸氨基烤漆的制备和性能研究[J]. 中国涂料, 2008, 23(8):39—43.  
CHEN Zhen-shu. Preparation and Property Study of Water-borne Acrylic Amino Baking Coatings[J]. China Coating, 2008, 23(8):39—43.
- [13] 威克斯, 琼斯, 帕巴斯. 有机涂料科学和技术[M]. 经桴良, 姜英涛, 译. 北京:化学工业出版社, 2002:119—120.  
WICKS Z W, JONES F N, PETER S. Organic Coatings Science and Technology[M]. JING Fu-liang, JIANG Ying-tao, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2002:119—120.
- [14] 张亚林. 镀锌机组辊涂机故障分析与改进[J]. 上海金属, 2008(9):55—56.  
ZHANG Ya-ling. Analysis of Roll Coater Fault in Galvanizing Line and Its Improvement[J]. Shanghai Metals, 2008(9):55—56.
- [15] 洪婷. 耐高温水性金属闪光烘烤漆的制备与性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.  
HONG Ting. Preparation and Study of Properties of High-temperature Resisted Water-Based Metallic Baking Paint[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.