复合材料薄膜盖结构与功能一体化设计

秦旭锋¹, 蒋和跃², 张学成³, 张保刚⁴, 邢东桧¹, 舒倩^{1*}, 徐淑权¹ (1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.陆军装备部驻重庆地区第六军事代表室, 重庆 400000; 3.陆军装备部驻上海地区第三军事代表室, 上海 201600; 4.上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要:目的 解决传统硬质泡沫塑料易碎盖存在的承压能力不足、冲破性能不稳定、不能有效防潮控湿、 电磁兼容性差等缺陷。方法 以某型导弹武器系统发射筒密封盖为主要应用对象开展薄膜盖设计,主要 包括总体结构设计、零部件设计、功能设计及仿真验证。结果 薄膜盖经密封、承压、冲破、电磁兼容 等性能考核,均满足装备贮存使用要求,冲破盖体所受的最大峰值冲击力可稳定保持在1200~1600 N。 结论 建立了薄膜盖结构与功能一体化设计方法,可满足在研型号对新型密封盖的设计需求,并为新型 号弹箭发射筒大尺寸密封盖的顺利研制提供技术储备。

关键词:复合材料;薄膜盖;结构设计;冲破 中图分类号:TB33 文献标志码:A 文章编号:1001-3563(2024)11-0291-06 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.035

Integrated Structure and Function Design of Composite Film Cover

QIN Xufeng¹, JIANG Heyue², ZHANG Xuecheng³, ZHANG Baogang⁴, XING Donghui¹, SHU Qian^{1*}, XU Shuquan¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. The Sixth Military Representative Office of Army Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400000, China; 3. The Third Military Representative Office of Army Equipment Department in Shanghai, Shanghai, 201600, China; 4. Shanghai Electro-Mechanical Institute, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the shortcomings of traditional rigid foam plastic fragile cover, such as insufficient pressure bearing capacity, unstable bursting performance, ineffective moisture and humidity control, and poor electromagnetic compatibility. The design of film cover was carried out with the sealing cover of the launch cylinder in a missile weapon system as the main application object, including overall structural design, component design, functional design, and simulation verification. After performance evaluation, the sealing, pressure-bearing, bursting and electromagnetic compatibility of the film cover could meet the requirements of equipment storage and use. The maximum peak impact force breaking through the cover could be kept between 1 200 and 1 600 N. An integrated design method of the structure and function of the film cover is established, which can meet the design requirements of the new type of sealing cover for the model under study and provide technical reserves for the smooth development of the large-size sealing cover for the new type of missile launcher.

KEY WORDS: composite; film cover; structural design, break through

硬质泡沫塑料易碎盖是某型防空导弹发射筒的 关键构件之一,位于发射筒前端,具有发射筒前端的 密封、导弹发射时形成发射通道等功能,易碎盖可在 导弹弹头冲击作用下破裂^[1-3]。但因泡沫材料特性及 成型工艺的原因,硬质泡沫塑料易碎盖,存在承压能 力不足、冲破性能不稳定、不能有效防潮控湿、电磁 兼容性差等缺陷,已严重制约其在弹箭发射筒密封盖 上的应用。因此开发新型密封盖,实现密封盖结构与 功能一体化设计,已成为弹箭型号贮运发射系统研制 与生产的共性、关键性、基础性问题^[4-6]。

文中以某改型导弹武器系统发射筒薄膜盖为主要应用对象,开展弹箭发射筒大尺寸复合材料薄膜盖技术研究,通过结构及功能一体化设计,并进行薄膜盖样机性能试验,解决硬质泡沫塑料易碎盖存在的突出问题,满足在研型号对新型密封盖的迫切需求,并为新型号弹箭发射筒大尺寸密封盖的顺利研制提供技术储备^[7]。

1 总体结构设计

为实现气密、承压、冲破等功能性能和通用质量 特性要求,综合考虑接口适应性、轻量化、制造工艺 性、经济性等各方面因素,薄膜盖总体方案设计为薄 膜和上、下盖框组成的法兰式圆盘结构。

 1)薄膜采用特制金属/布柔性易碎材料制造,为多 层组合、局部应力弱化结构,具有特定的强度、刚度, 具备阻隔气体渗透、阻燃、屏蔽、定向破碎等综合性能。

2)上、下盖框采用金属材料成型,为台阶式圆 环结构,表面设计定位销孔、连接螺栓孔、密封圈槽 等结构,实现与发射筒端口的定位、连接、密封功能。

上下盖框与薄膜通过胶接组装成薄膜盖,可与发射 筒组成防潮密封系统,在导弹运输、贮存期间保证筒内 惰性气体不发生泄漏、外部湿气不进入,在导弹发射时 薄膜受弹头的冲击作用下定向展开、齐根脱落,不影响 导弹的出筒飞行^[8]。薄膜盖的结构如图1所示。



图 1 薄膜盖结构 Fig.1 Film cover structure

2 零部件设计

2.1 薄膜

综合密封盖指标要求和应用实际,优化设计多层

层叠组合式薄膜。主体材料选用特制金属/布柔性易 碎材料,优选层叠材料、层间复合黏接材料,以解决 承压力和冲破力之间的矛盾问题为目标。通过仿真分 析、样机试验验证等方法反复优化薄膜的铺层设计, 从而获得最佳的铺层方式。

薄膜主要包括阻隔层、增强层、控形层,各层之间通过黏接工艺复合制造,阻隔层的作用是阻隔湿气渗透,起到防潮功能,而增强层具有较高的强度,与 阻隔层结合后可使薄膜保持稳定的外形,并实现一定的强度和刚度,控形层作用是控制薄膜承压状况下的 变形量。薄膜采用变截面结构,在中心区域预置弱化 孔,舵翼出筒方向预制一定宽度弱化槽进行局部弱 化,以降低导弹出筒时的冲击力^[9]。



图 2 薄膜铺层示意图 Fig.2 Schematic diagram of film lamination

2.2 上、下盖框

上、下盖框主要承担薄膜盖与发射筒之间的连接 功能,为实现薄膜盖与发射筒之间的可靠连接和密 封,要求盖框具有较大的刚度。根据盖框外形尺寸要 求,设计具体结构如下:

1) 外径尺寸为 φ800 mm。

2)周圈表面均布通孔,用于薄膜盖与发射筒 连接。

3)周圈相应位置设置通孔,用于薄膜盖与发射 筒连接时的定位。

4)周圈相应位置设置螺纹孔,用于薄膜盖与保 护盖的连接。

5)下盖框设置密封圈槽,用于安装密封圈。

6)在盖框装配螺栓孔间隙均布沉头螺钉安装孔,通过螺钉将上、下盖框牢固连接。

3 主要功能设计

3.1 密封功能设计

密封性是保证发射筒内装导弹功能性能完整,避 免湿气侵蚀导致产品锈蚀、电子元件失效,是保证长 贮可靠的关键指标之一。薄膜盖具有尺寸大、密封面 广的特点,在进行前盖密封结构设计时,通过在下盖 框与发射筒端口装配面设置密封槽、槽内安装密封圈 以保证发射筒端口密封性;上盖框、下盖框与薄膜盖 体装配界面涂覆热固性密封胶进行黏接密封,且在黏 接面设置溢胶槽以填充上盖框、下盖框紧固连接时扩散的密封胶形成密封界面,保证上盖框、下盖框及薄膜盖体装配界面的密封性;薄膜盖体选用低透湿或零透湿的主体材料,通过自动-涂胶复合工艺进行制造,保证每批薄膜盖体质量一致性,杜绝薄膜盖体出现密封失效的风险。综上所述,前盖密封结构可靠,能满足长期贮藏性能要求。

3.2 承压、冲破功能设计

薄膜设计为多种柔性薄膜材料的层合结构,单一 柔性薄膜材料质地柔软、容易变形,不能满足薄膜盖 在高海拔压力条件下变形量较小且为弹性变形的要 求。一方面为提高薄膜整体刚度,在内表面设有弹性 模量较高的材料,形成控形层,同时通过理论计算和 承压试验确定增强层、阻隔层的铺层数量和顺序,可 实现薄膜承压功能要求。另一方面,对薄膜进行变截 面设计,在中心区域及舵翼出筒方向进行局部弱化, 在天线罩冲击作用下使薄膜能够定向展开,降低峰值 冲击力。

3.3 电磁屏蔽功能设计

导弹在全寿命过程内会面临着外部射频电磁环 境产生的电磁干扰、电磁辐射、沉积静电等效应,在 此过程中发射筒为导弹提供全方位的防护,作为发射 筒的重要组成部件前盖应也应当具备一定屏蔽阻隔 作用。薄膜主体采用特种金属/布柔性易碎材料,上、 下盖框采用铝合金材料,薄膜盖采用全金属覆盖结构 对外部射频电磁信号进行抑制或削弱,以实现薄膜盖 的电磁屏蔽需求。

4 设计性能分析

利用 ANSYS、LS_DYNA 等有限元仿真分析软件,对薄膜盖设计模型在充气、正反向承压、冲破工况下的受力情况、薄膜分层情况进行了仿真计算分析,验证薄膜盖是否满足强度、刚度要求^[10-11]。

4.1 气密性能

使用 ANSYS 有限元仿真软件分析气密性能的工况 加载情况,上、下盖框所示应力云图如图 3、图 4 所示。 分析结果显示,上盖框受到的最大应力为 1.688 3 MPa, 变形量为 3.121 7×10⁻⁴ mm;下盖框受到的最大应力为 3.92 MPa,变形量为 1.315 1×10⁻³ mm;最大应力均 位于薄膜盖与发射筒连接螺栓处。上、下盖框的最大 应力远小于铝合金材料的许用应力强度(约 400 MPa), 且变形量远小于硅橡胶密封圈的设计压缩量(约 25%),薄膜盖的结构强度、刚度设计满足密封性 能要求。



a 应力



b 变形量

图 3 上盖框云图 Fig.3 Cloud image of upper cover frame



图 4 下盖框云图 Fig.4 Cloud image of lower cover frame

4.2 正、反向承压性能

使用 ANSYS 有限元仿真分析软件按正向承压性 能工况加载,薄膜层间复合界面强度以"内聚力"的断 裂力学方法进行模拟,考虑撕开型断裂模式,其黏接 平面的应力和滑移距离为双线性关系^[12-13]。上、下盖 框所示应力云图见图 5、图 6 所示。分析结果显示, 上盖框受到的最大应力为 3.650 3 MPa,变形量为 1.075 9×10⁻³ mm,下盖框受到的最大应力为 8.475 7 MPa, 变形量为 2.843 5×10⁻³ mm,最大应力均位于薄膜盖与发 射筒连接螺栓处。上、下盖框的最大应力远小于铝合金材 料许用应力强度(约 400 MPa),且变形量远小于硅 橡胶密封圈的设计压缩量(约 25%)。

薄膜变形云图见图 7 所示,薄膜最大变形量为 14.819 mm,位于薄膜中心部位,小于 18 mm 的最大 变形指标要求,故薄膜盖的结构强度、刚度设计满足 正、反向承压密封性能和变形量的要求。

提取薄膜复合层间最大应力界面,见图 8。在承 压过程中界面所受最大应力为 8.516 7 MPa,小于层 间复合胶接剂的强度值 19.23 MPa,薄膜在承压过程 中复合界面不会产生分层现象。

4.3 冲破性能

使用 LS_DYNA 有限元仿真软件对薄膜盖冲破 性能进行分析。在落锤冲击过程中,采用关键字 *CONTACT_PRESCRIBED_MOTION_SET 对上、下 盖框胶接周圈进行固定,在导弹与薄膜内侧设置接触关键字 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE _TO_SURFACE, 设置摩擦因数、导弹质量、天线罩头部与薄膜盖接触 速度等参数,使用关键字*INITIAL_VELOCITY 加 载,设置控制卡片*CONTROL_HOURGLASS 对沙漏 能进行控制^[14-15]。提取结果云图见图 9。冲击后薄膜 完全展开,弹体穿过顺畅无卡涩。提取薄膜所受的 最大峰值冲击力为 1 303 N,满足不大于 1 900 N 的 指标要求。

5 成型及试验验证

薄膜由特种金属/布柔性易碎材料经自动涂胶-复 合工艺成型,上、下盖框采用机械加工工艺制备。自 动涂胶-复合工艺可对复合工艺中的涂胶轨迹、涂胶 厚度、涂胶均匀度等工艺参数进行有效控制,提高多 功能复合体的层间结合强度,解决传统手糊复合工艺 技术无法保证功能层间的结合强度,导致复合材料易 发生层间分离的问题。薄膜盖采用分段式层压复合工 艺进行装配。按"上盖框+薄膜盖体+下盖框"的结构, 将各件采用胶黏剂进行黏接组装,在螺栓预紧力作用 下进行固化。

对薄膜盖开展气密、承压、冲破、电磁兼容性及 各项环境试验考核,试验结果与设计仿真结果接近, 均满足指标要求,表明薄膜盖结构与功能设计过程合 理、可行。



图 5 上盖框云图 Fig.5 Cloud image of upper cover frame



图 6 下盖框云图 Fig.6 Cloud image of lower cover frame







图 8 薄膜层间界面应力云图 Fig.8 Cloud image of the interfacial stress between films



图 9 薄膜盖冲破仿真结果云图 Fig.9 Cloud image of simulation results of film cover breakthrough

1) 薄膜盖加压至(6±1) kPa, 用浸水法进行试验, 30 min 无泄露。

2)薄膜盖加压至(25±2)kPa,保持48h后气 压下降量不大于5%,盖体中心变形量为14~16mm; 试验结束后,盖体无裂纹,泄压后涂层不脱落。

3)薄膜盖由导弹冲破时,冲破盖体所受的最大 峰值冲击力为1200~1600N;冲破后,天线罩、空 气舵本体无损伤,弹体和空气舵涂层无明显脱落。

6 结语

以某改型导弹武器系统发射筒前密封盖为主要

应用对象,建立了薄膜盖结构及功能一体化设计方法,薄膜盖设计综合考虑密封防潮、承压变形控制、 定向破碎、电磁兼容等功能的实现。经过试验验证, 薄膜盖结构满足型号规定的技术指标要求。薄膜盖结 构及功能一体化设计方法可解决传统硬质泡沫塑料 易碎盖存在的突出问题,在大型弹箭发射筒上具有广 阔的应用前景。

参考文献:

- LSTC. Ls-Dyna Keyword User's Manual(Volumei)[M]. California: Livermore Software Technology, Corporation: 2007.
- [2] FANG F, LI Q, HE J, et al. Air-to-Air Missile Launch Envelope Computation Based on Neural Network[C]// International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 3844-3853.
- [3] WANG J, JIANG K, CHENG S, et al. Study of Flow Field Characteristics During the Impact of a High-pressure Gas Jet on a Bulk-loaded Liquid[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2437(1): 012020.
- [4] FEDARAVIČIUS A, JASAS K, GAIDYS R, et al. Dynamics of the Missile Launch from the Very Short-Range Mobile Firing Unit[J]. Shock and Vibration, 2023(6): 20-23.
- [5] 张晓艳,王景鹤,成晓阳,等.环氧泡沫塑料易碎保 护盖结构设计及实验验证[J].材料工程,2012,40(8):
 5-9.

ZHANG X Y, WANG J H, CHENG X Y, et al. Structure Design and Verification Test for Fragile Protection Closure Made from Epoxy-Foam Plastics[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 40(8): 5-9.

[6] 李照谦, 宋亮. 导弹武器系统复合材料防护盖结构设 计与性能研究[J]. 合成维, 2023, 52(8): 64-67.
LI Z Q, SONG L. Structure Design and Performances Research of Composite Protecting Cover to Missile Weapon System[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(8): 64-67.

- [7] XU L M, CAI D A, XU Z M, et al. Design and Analysis of a New Frangible Composite Cover with a High Ratio of External to Internal Load-Bearing Limit[J]. Applied Composite Materials, 2023, 30(1): 157-183.
- [8] 王敏,李兴德.陶瓷基复合材料火箭弹天线罩撞击玻 璃纤维易碎盖的应力响应研究[J].复合材料科学与工 程,2020(9):25-28.

WANG M, LI X D. Study on Dynamic Stress Response for Ceramic Missile Radome Impact on Composite petal-Type Fragile Cover[J]. Composites Science and Engineering, 2020(9): 25-28.

[9] 麻小明, 刘馨心, 史耀祖, 等. 发射箱易碎盖分离仿 真 与 试 验 分 析 [J]. 弹 箭 与 制 导 学 报, 2022, 42(3): 74-77.
MA X M, LIU X X, SHI Y Z, et al. Simulation and Ex-

periment Analysis of Frangible Cover Separation of a Launcher[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(3): 74-77.

- [10] SHI W H, YUE S, LIU Z, et al. Dynamics Analysis and Experimental Validation of the Aluminum Honeycomb Buffer in the Tether-Net Launcher[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(11): 3405-3417.
- [11] BOURY D, THINAT F X. Space Launcher Large Solid Propulsion Overview Market Analysis and General Trends[C]// 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver, Colorado. Reston, Virginia: AIAA, 2009: 5519.
- [12] ZHOU G M, CAI D A, QIAN Y, et al. A New Frangible Composite Canister Cover with the Function of Speci-

fied Direction Separation[J]. Applied Composite Materials, 2016, 23(4): 623-638.

- [13] 伊翠云,刘甲秋,张博文.环氧树脂基复合材料层间 性能改进研究[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(3): 27-30.
 YI C Y, LIU J Q, ZHANG B W. Research Progress on Interlaminar Performance Improvement Methods of Fiber-Reinforced Resin Composites[J]. Fiber Composites, 2023, 40(3): 27-30.
- [14] 苑晓旭,南博华,林楠,等.非穿透间隔割缝易碎盖 结构设计及分析[J].南京航空航天大学学报,2023, 55(2): 311-319.
 YUAN X X, NAN B H, LIN N, et al. Structural Design and Analysis of Non-Penetrating Interval Cutting Frangible Cover[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(2): 311-319.
- [15] 李仙会, 倪妮. 导弹贮运发射箱易碎盖燃气流冲击波 开盖技术[J]. 理化检验(物理分册), 2023, 59(5):
 69-74.

LI X H, NI N. Fragmented Technology by Gas Flow Shock Wave for Fragile Cover of Missile Launcher[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2023, 59(5): 69-74.