

轻质非金属材料在发射箱易碎盖体中的应用研究进展

郑连刚¹ 张之涵² 吴义韬¹ 朱 权¹ 耿坤昊¹ 柯林达¹ 陈 一³ 许福军²

1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600;
2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
3. 上海机电工程研究所, 上海 201109

摘 要: 发射箱易碎盖是武器装备发射系统的核心防护部件, 需同步满足轻量、精准易碎、高强度、低成本及优异的环境适应性等多元需求。传统金属材料因自重较大、易碎性调控困难等缺陷, 已难以适配现代装备高速机动、长周期贮存的发展方向。纤维增强树脂基复合材料、聚合物基泡沫夹芯结构复合材料及聚合物基泡沫材料作为 3 类典型的轻质非金属材料, 凭借密度低、可设计性强、耐蚀性优异等突出优势, 成为发射箱易碎盖体的主流材料。综述了 3 类轻质非金属材料在发射箱易碎盖中应用的研究进展, 重点分析了短纤/连续纤维增强树脂基复合材料、聚合物基泡沫夹芯结构复合材料及聚合物基泡沫材料的材料体系选型及性能调控机制, 深入探讨了各类材料在实际应用中面临的碎片控制、材料-结构-功能一体化等关键技术问题, 展望了未来轻质非金属材料易碎盖的发展趋势, 以期为发射箱易碎盖的材料选型、结构创新及工程化应用提供参考。

关键词: 发射箱易碎盖; 非金属材料; 纤维增强树脂基复合材料; 聚合物基泡沫夹芯结构复合材料; 聚合物基泡沫材料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)05-0011-14

Research progress on application of lightweight non-metallic materials in frangible covers of missile launchers

Zheng Liangang¹, Zhang Zhihan², Wu Yitao¹, Zhu Quan¹, Geng Kunhao¹, Ke Linda¹, Chen Yi³, Xu Fujun²

1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;
2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
3. Shanghai Institute of Electro-Mechanical Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract: Frangible covers of missile launchers are critical protective components of weapon equipment launch systems, required to simultaneously meet diverse demands including lightweight, precise frangibility, high strength, low cost and excellent environmental adaptability. Traditional metallic materials, hindered by their excessive weight and difficulties in controlling frangibility, are increasingly unable to accommodate the development trends of modern equipment towards high-speed mobility and long-term storage. Fiber-reinforced resin matrix composites, polymer-based foam core

收稿日期: 2026-03-24

作者简介: 郑连刚, 男, 1994 年生, 博士, 工程师, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料结构性能优化设计与成型工艺, zheng302507@163.com

通信作者: 许福军, 博士, 教授, 研究方向为高性能纤维增强树脂基复合材料功能设计与制备, fjxu@dhu.edu.cn

sandwich structural composites, and polymer-based foam materials, as three typical types of lightweight non-metallic materials, have become the mainstream materials for frangible covers of missile launchers due to their outstanding advantages such as low density, high designability, and excellent corrosion resistance. The research progress on the application of three types of lightweight non-metallic materials in frangible covers of missile launchers was reviewed, with a particular focus on the analysis of material system selection and performance regulation mechanisms for short fiber/continuous fiber-reinforced resin matrix composites, polymer-based foam core sandwich structural composites, and polymer-based foam materials. Key technical challenges encountered by these materials in practical applications, such as fragment control and the integration of material-structure-function, were thoroughly discussed. Additionally, the development trends of frangible covers made of lightweight non-metallic materials in the future were projected, aiming to provide references for material selection, structural innovation, and engineering applications of frangible covers of missile launchers.

Keywords: frangible cover of missile launcher; non-metallic material; fiber-reinforced resin matrix composite; polymer-based foam core sandwich structural composite; polymer-based foam material

发射箱易碎盖是安装在导弹或火箭贮运发射箱端口的一次性密封盖,其功能的实现直接决定装备的贮存可靠性与作战效能。发射前,易碎盖应密封发射箱内部腔体,以抵御温湿度循环、沙尘侵蚀、盐雾腐蚀等复杂环境的作用,保障发射箱内部组件长期贮存稳定;发射时,易碎盖应在发动机燃气压力或触发载荷下实现无阻碍破碎,且破碎阈值可控,碎片尺寸均匀,无尖锐棱角,以避免对弹体表面、发射系统及周边设备造成二次损伤。但随着现代武器装备向模块化、机动化、远程化的升级^[1-2],其对易碎盖的性能要求日趋严苛。传统的发射箱易碎盖主要是机械盖或爆破盖,多为金属材料,虽强度较高,但密度大、耐蚀性差,已难以适配现代武器装备对导弹发射箱盖的要求^[3]。因此,科研工作者将研究重心转向了轻质非金属材料体系。

近年,3类轻质非金属材料——纤维增强树脂基复合材料、聚合物基泡沫夹芯结构复合材料(以下简称“泡沫夹芯结构复合材料”)及聚合物基泡沫材料(以下简称“泡沫材料”)逐渐成为该领域研究的焦点。这3类轻质非金属材料共同特征有,密度不大于 2.0 g/cm^3 ,性能可通过材料配比与结构设计精准调控。其中:纤维增强树脂基复合材料基于纤维与树脂基体的协同作用,可实现力学性能与易碎性的平衡^[4];泡沫夹芯结构复合材料结合了非金属面板的承载能力与泡沫芯层的轻质缓冲特性,能

进一步优化比强度^[5];泡沫材料以极致轻量化为核心,基于泡沫孔径与密度的调控实现了易碎性^[6]。

国内外学者近年围绕这3类轻质非金属材料在发射箱易碎盖上的应用开展了大量研究,并在纤维增强树脂基复合材料的性能调控、泡沫夹芯结构复合材料的参数优化、泡沫材料的结构设计等方面取得显著进展。本研究将系统梳理这3类轻质非金属材料的应用现状,深入分析它们的技术优势与现存问题,并展望未来发展方向,以期对发射箱易碎盖的高性能化、轻量化及工程化应用提供参考。

1 纤维增强树脂基复合材料易碎盖

纤维增强树脂基复合材料以纤维充当增强体、树脂作为基体,经复合成型工艺制得。其比强度远高于传统金属材料,且具备特有的耐腐蚀性、电绝缘性及性能可设计性,如可通过对纤维种类、含量、铺层方式及树脂基体的调控^[7],精准匹配易碎盖对承压力学性能与易碎性的多元需求^[8]。根据纤维形态的差异,增强体可分为短纤与连续纤维2种类型,由此制得的复合材料易碎盖能在性能水平及应用场景上形成互补。

1.1 短纤增强树脂基复合材料易碎盖

短纤增强树脂基复合材料是指增强体纤维长度在 $1\sim 50\text{ mm}$ 的复合材料。这类材料成型工艺简单、

高效,且短纤在基体中分散均匀,适合规模化批量生产,且成本相对较低,在中小型导弹及火箭弹发射箱易碎盖领域具有广泛的应用。

1.1.1 材料体系的筛选与优化

目前,在短纤增强树脂基复合材料易碎盖领域,玻璃纤维是增强体的主流选择,碳纤维、玄武岩纤维等短纤也因性能优良而展现出巨大的应用潜力^[9-10]。魏凤春^[11]基于长度为 8 mm 的短切玻璃纤维和 191 不饱和聚酯树脂,以 21% 的纤维体积分数配制模压用物料,然后控制模压温度在 125 ℃,制得易碎罩。经抗压试验和冲击试验发现,制备的易碎罩能够在水中安全承受以 13 m/s 的速度运行产生的流体阻力,且能在以 100 m/s 的速度撞击水面时即发生断裂。该研究基于精确控制短切玻璃纤维的工艺参数,验证了短纤增强树脂基复合材料在易碎盖领域应用的可行性。Li 等^[12]将短切玄武岩纤维用于短纤增强树脂基复合材料易碎盖的制备,并发现,基于纤维高模量、低强度特性与易碎盖性能的适配性,易碎盖结构设计的可靠性与经济性显著提高。图 1 所示的冲击试验也验证了该易碎盖的可靠性。因此,在易碎盖强度冗余的应用场景下,短切玄武岩纤维可作为短切玻璃纤维优良的替代材料。

不同类别的纤维表面具有不同的化学官能团,因此其适配的树脂类型需经过复杂的系统权衡^[13],以实现界面处最优的应力传递^[14],确保复合材料兼顾黏结性、耐热性及易碎性。李绪东^[15]以短切玻璃纤维毡为增强体,对易碎盖基体材料的选择和适配工艺进行了探究。发现,相比于乙烯基树脂,环氧树脂脆性大,与玻璃纤维毡具有更好的结合力。接着,其采用真空灌注成型工艺制备短切玻璃纤维毡增强环氧树脂基复合材料,实现了将大部分短切玻璃纤维毡有效包裹于树脂基体内。且冲破试验发现,材料为脆性断裂,断面平齐,表明界面性能得到了优化。该研究基于对比不同树脂体系的界面性能,为短切玻璃纤维复合材料树脂的选择提供了参考依据。但该结论局限于特定体系,其他纤维与树脂的适配规律尚有待进一步研究。

1.1.2 性能的调控与优化

短纤增强树脂基复合材料易碎盖的核心性能需求是,在满足日常使用强度和刚度的前提下,实现特定触发条件下可控的、低风险的、彻底的断裂。短纤

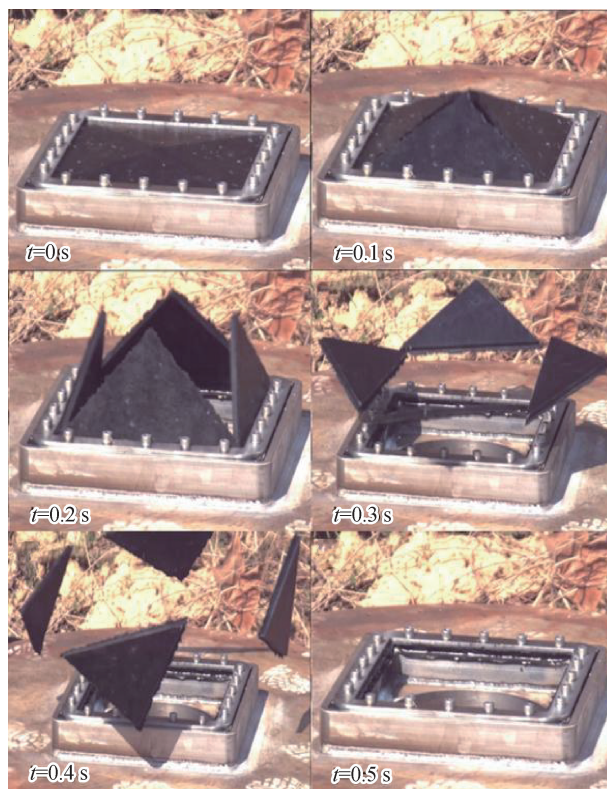


图 1 短切玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料易碎盖冲击试验

Fig. 1 Impact test of frangible covers made of short-cut basalt fiber-reinforced epoxy resin matrix composites

增强树脂基复合材料易碎盖的性能调控主要从两方面入手——纤维体积分数的调控和纤维长度的优化。

在特定纤维体积分数区间内,纤维体积分数增加,复合材料的刚度与强度显著提升,但超过临界值后,复合材料性能下降。因此,纤维体积分数宜接近临界纤维体积分数(V_{fc})^[11]。

$$V_{fc} = \frac{\sigma'_m}{\left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) \cdot \sigma_{fu} + \sigma'_m} \quad (1)$$

式中: σ'_m 为基体的有效应力; l_c 为纤维的临界长度,mm; l 为纤维的平均长度,mm; σ_{fu} 为纤维的极限抗拉强度。

纤维长度过短时,应力充分传递给基体之前纤维就已发生断裂或从基体中拔出;过长时,纤维分散困难,易出现团聚现象。因此,为确保纤维断裂时,其所受的拉力可以通过两端的界面剪切力完全传递给基体,纤维长度的设定需考虑临界长度:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau_c} \quad (2)$$

式中: σ_f 为纤维的强度; d 为纤维的直径; τ_c 为界面剪切强度。

大量研究结果表明,在中低掺量的短纤增强复合材料中,增加纤维长度会提升复合材料的力学性能^[16]。高掺量短纤增强复合材料方面, Capela

等^[17]控制碳纤维质量分数在 60%,探究了不同长度(2、4 和 6 mm)的碳纤维对高掺量短纤增强复合材料力学性能的影响,结果如图 2 所示,可以看出:随着纤维长度的增加,复合材料的强度和刚度先上升后下降,同时效率系数呈现相同趋势的变化,这与高掺量短纤增强复合材料中,纤维长度的增加会导致短纤维的分散性和无序性变化有关。

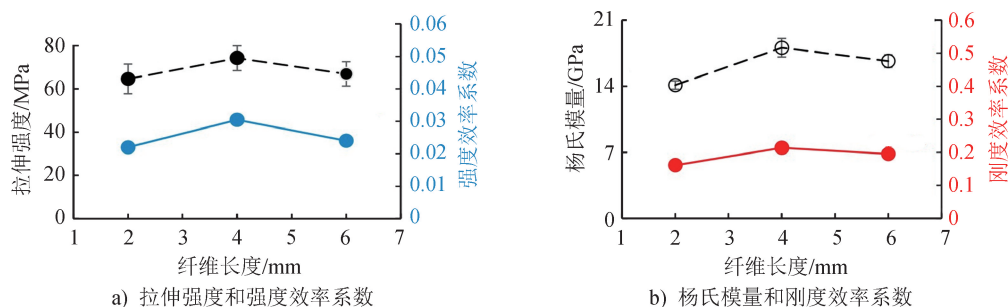


图 2 纤维长度对高掺量短纤增强复合材料力学性能的影响

Fig. 2 Effect of fiber length on mechanical properties of high-content short fiber-reinforced composites

1.1.3 应用与存在的问题

短纤增强树脂基复合材料因低成本、易加工等特性,在中小型导弹(如单兵便携式导弹)、火箭弹发射箱易碎盖,以及小型无人机发射器等场景应用方面具有显著的优势与广阔的前景,且其与高速机动发射系统有着良好的适配性。短纤增强树脂基复合材料易碎盖能满足绝大多数中低载荷易碎盖基本强度的需求,同时能在性能、工艺和成本之间取得绝佳的平衡,但也存在以下问题:(1)性能上限较低,难以满足大型、高载荷发射箱易碎盖的要求;(2)性能各向同性较明显,需进行精细的结构设计以实现精准破碎;(3)破碎后仍可能产生少量尖锐碎片,存在损伤弹体的风险。

1.2 连续纤维增强树脂基复合材料易碎盖

连续纤维增强树脂基复合材料中,增强体纤维长度与制品尺寸相当。该类复合材料通过纤维的连续承载实现更高的比强度与比模量,且性能可设计性更强,能通过铺层设计、纤维取向调控等方式精准匹配易碎盖的力学性能与易碎性要求,承受巨大的外部反向压力,适用于大型、高载荷发射箱易碎盖。

1.2.1 材料体系与结构设计

连续纤维增强树脂基复合材料常用的增强纤维主要有碳纤维、玻璃纤维和芳纶等高性能纤维^[18],树脂基体则主要采用环氧树脂、酚醛树脂及双马来

酰亚胺树脂。其中,碳纤维增强环氧树脂基复合材料比强度、比模量高,环境适应性好^[19],是当前高性能易碎盖的首选材料;玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料性能与成本的平衡性较好,在中型发射箱易碎盖中应用广泛^[20];芳纶增强环氧树脂基复合材料因特有的高韧性,适用于对冲击防护要求较高或具有系留要求的场景^[21]。

混杂增强结构利用 2 种或多种材料的协同作用解决易碎盖刚度与韧性之间的矛盾,平衡性能与成本。陈威杨^[22]选用碳纤维增强易碎盖的口盖与边框,玻璃纤维构建具备预制切口薄弱环节的密封铺层(图 3)。其利用碳纤维和玻璃纤维的刚度差,有效诱导薄弱处形成应力集中。这样,当受到冲击作用时,薄弱环节便发生破坏,从而形成 C 形开口,实现成功开盖。该研究巧妙利用了不同纤维的模量差异,实现了破坏轨迹的引导。但这种混杂增强结构设计对层间界面的结合质量要求较高,易碎盖性能的精准调控不仅受增强体梯度设计的影响,还受控于增强体-基体界面的相互作用。

Ahmad 等^[23]研究芳纶和玻璃纤维增强树脂基复合材料的界面(图 4)发现,将环氧树脂与乙烯基酯共混后,乙烯基酯的羟基与环氧树脂的氧化烷基发生作用,能提高纤维与共混树脂之间的润湿性,显著改善界面相容性,进而减少纤维脱黏引起的不可

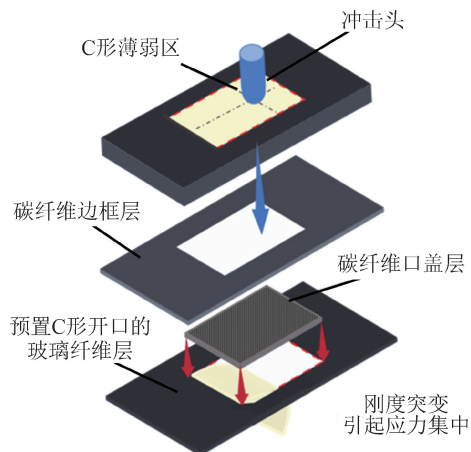


图 3 混杂增强结构易碎盖设计

Fig. 3 Design of frangible cover with hybrid reinforced structure

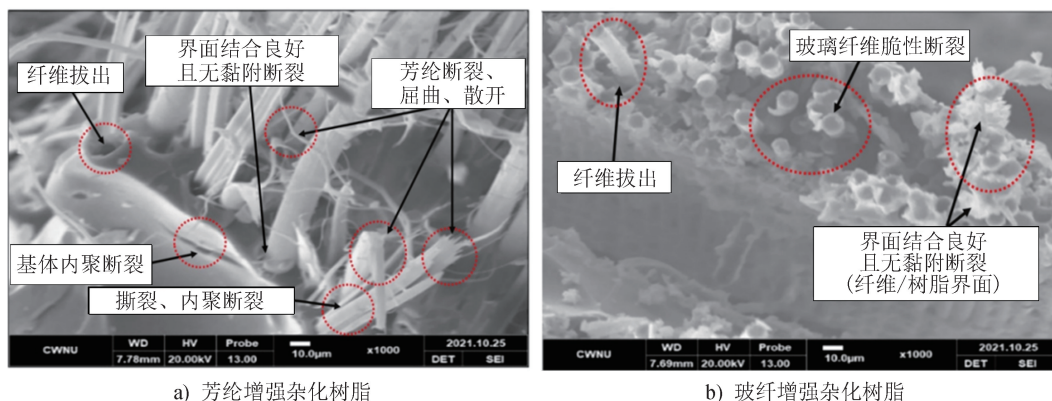


图 4 纤维增强杂化树脂拉伸断裂面 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of tensile fracture surface of fiber-reinforced hybrid resin

合材料(图 5),发现单向 0° 取向的纤维层合板中纤维为主要承力部件,层合板表现出优异的抗压强度、层间剪切强度和抗弯强度。研究总结了铺层角度对层合板承载能力的影响,这为后续层合结构在易碎盖中的应用奠定了基础。

相较于层合结构,三维织物增强复合材料具有更好的抗分层特性。Xu 等^[26]提出了一种制备三维机织预制体薄弱区的方法。如图 6 所示,其通过切割三维机织预制体中的纬纱来预制缺陷,实现了力学性能和易碎性的调控。但这种三维织物增强复合材料易碎盖制备工艺较复杂、成本较高,仅适用于特殊需求的场合^[27]。

1.2.2 易碎性的调控

为预制连续纤维增强复合材料易碎盖的薄弱区,通常会预先切割 V 形或 I 形刻痕以形成应力集中区^[28],然后利用树脂将各层已浸润基体的纤维布

预测的破坏行为,这对于改善层间界面的结合问题具有重要的借鉴意义。

此外,基于连续纤维增强体结构的多维特性,学者们研究并制定了不同的易碎盖结构设计方案。Doane^[24]于 1985 年首次提出,在铺层纤维布上通过预先刻痕以形成薄弱区域,可使盖体在弹头顶破力作用下沿刻痕直接破裂,实现预期开盖效果。这为连续纤维增强树脂基复合材料应用至易碎盖领域奠定了基础。接着,在此基础上,Turaka 等^[25]对层合结构的增强体展开研究,通过控制纤维铺设方向与铺层比例,实现了力学性能的定向调控。其制备了 4 种纤维铺设方向(即 0° 、 90° 、 $0^\circ/90^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$)的复

胶接成型,得到易碎盖整体。这种易碎盖一旦受到超过设计载荷的作用,裂纹会立即从这些刻痕处启裂并扩展,实现干净、利落地开裂。但这种易碎盖的成型受制作人员操作熟练程度影响显著,其稳定性较难保证。此外,这种易碎盖的整体强度主要由拉伸强度较低的树脂基体决定^[22],故易碎盖的厚度较大。

为了改善薄弱区稳定性差的问题,周光明等^[29]和 Cao 等^[30]提出了一种图 7 所示的胶接结构。考虑到易碎盖需承受较高的贮存压力,仅靠胶接难以满足强度要求,故在盖体与框架胶接区域的上下表面加贴布条以增强薄弱区强度。调节胶接面积和胶接方式可改变连接强度以满足技术要求。

相关学者还围绕连续纤维增强树脂基复合材料易碎盖的薄弱区展开了结构设计与分析,重点研究了薄弱区结构、位置,以及搭接厚度、搭接长度等参数对

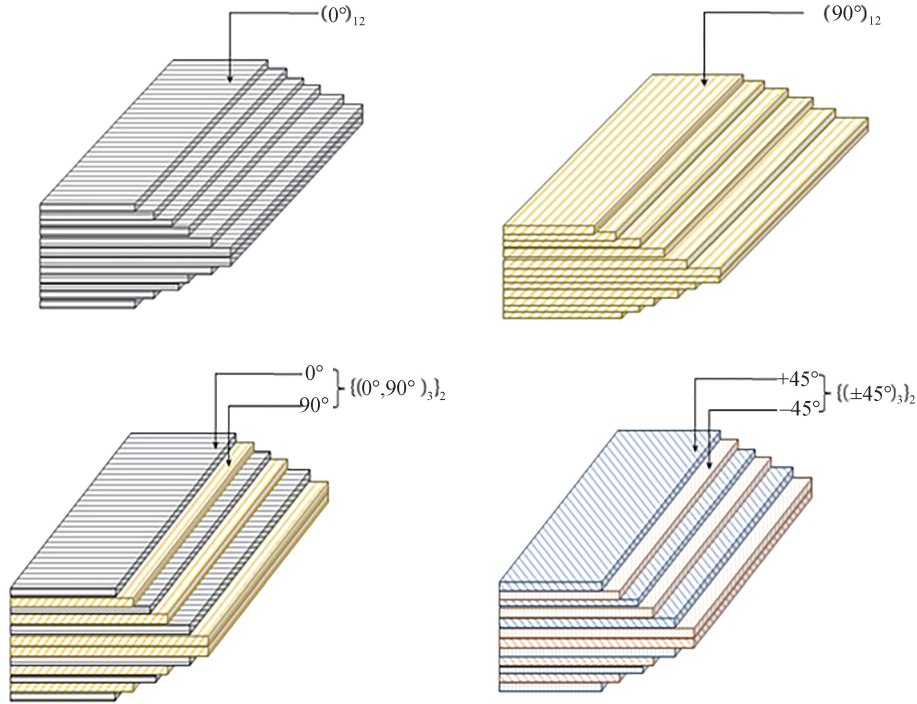


图5 不同纤维铺设方向的复合材料示意

Fig. 5 Schematic illustration of composites with different fiber laying directions

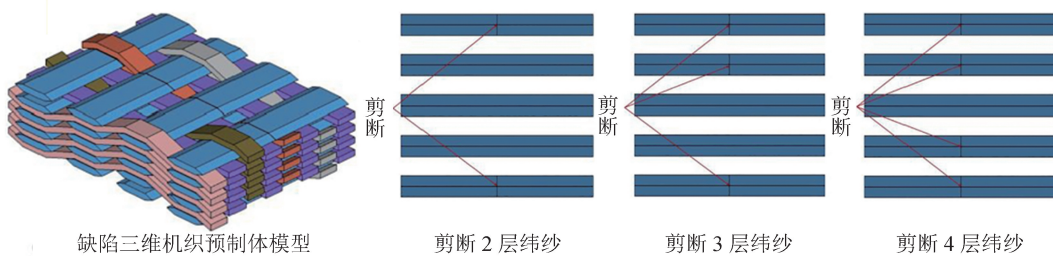


图6 缺陷三维机织预制体的制备

Fig. 6 Preparation of 3D woven preforms with defects

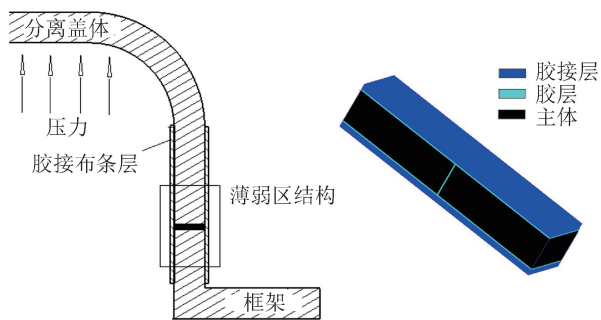


图7 薄弱区搭接结构

Fig. 7 Lap joint structure of weak zone

易碎盖性能的影响规律^[31-32]。例如, Qian 等^[33]探讨了搭接厚度(t)、搭接长度(L)对易碎盖拉伸性能的影响(图8),结果表明:拉伸强度随搭接厚度增加而

增加,但增长速率逐渐减缓;拉伸强度随搭接长度的增加而线性增加。王辉^[34]运用有限元分析法,计算出不同搭接参数条件下搭接胶层初始破坏时的拉弯组合载荷及极限破坏载荷,这为后续易碎盖总体设计时薄弱区的参数选择提供了理论依据。

连续纤维增强树脂基复合材料中,纤维的连续性会导致其易碎性较差,故需通过专门的调控技术,利用材料各向异性特点,灵活地设计铺层方向、顺序和厚度,实现材料在需要的位置精准破碎。研究中,研究人员常利用有限元分析软件(如 ANSYS、ABAQUS 等)模拟易碎盖的破碎过程^[35],优化结构设计与材料参数,实现易碎性的精准调控,提高设计效率(图9)。苑晓旭等^[36]提出全切割层与间隔切

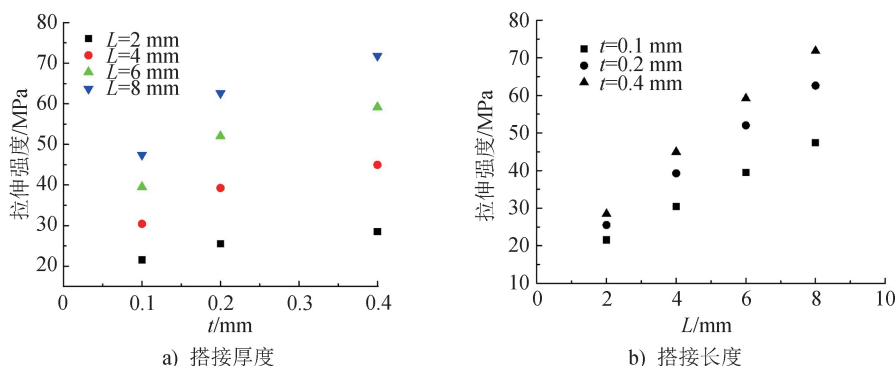
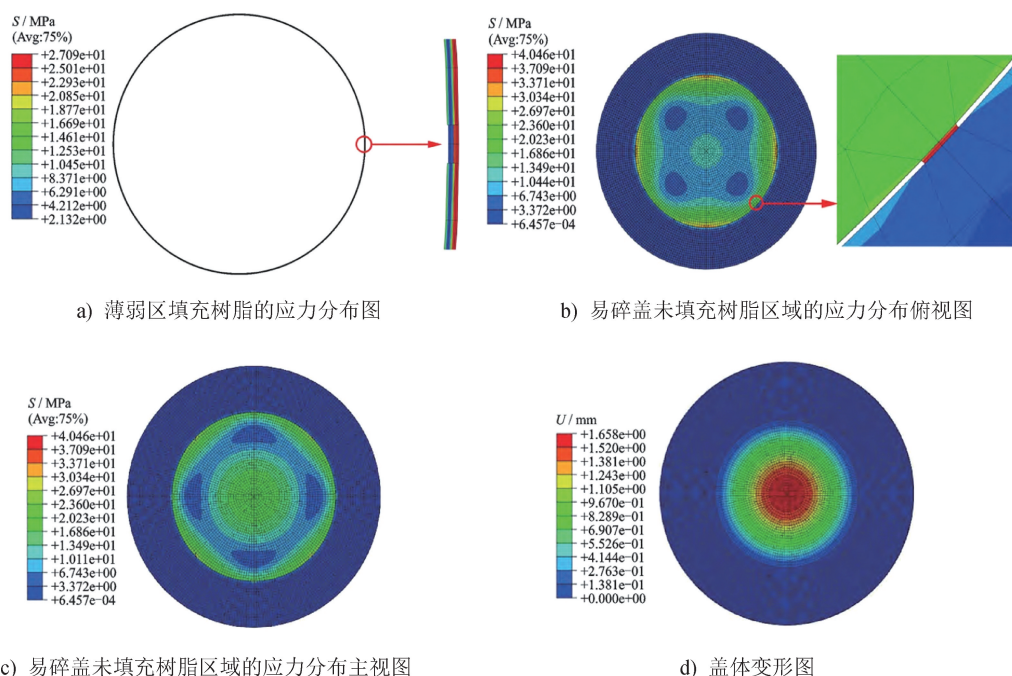


图 8 搭接厚度和搭接长度对易碎盖拉伸强度的影响

Fig. 8 Influence of lap thickness and lap length on tensile strength of frangible covers

割层混合的新结构形式,解决了易碎盖结构厚度、质量及薄弱区强度之间的矛盾。其构建了吻合度良好的易碎盖承压有限元模型和冲破损伤有限元模型,

模拟了盖体厚度对间隔割缝结构易碎盖承载能力的重要性,为轻质、结构紧凑的易碎盖结构优化奠定了理论基础。



S —应力; U —位移; Avg—应力平均阈值。

图 9 易碎盖应力分布和变形情况

Fig. 9 Stress distribution and deformation of frangible covers

针对新型导弹高头部设计的变化, Smarrazzo 等^[37]采用非对称冲击概念,对四瓣十字形的易碎盖结构进行了优化。其结合图 10 所示的有限元分析结果,先减小因偏心接触而受载过大的倒三角形瓣区域面积,提高子瓣破碎的同时性,接着进一步控制碎片尺寸,将底部正三角形瓣对称分割为 2 个子瓣,减少对弹体发射的干扰,最后模拟出较为合理的应力分布。该研究通过创新性地引入多子瓣结构的设

计理念,有效解决了偏心载荷导致的受力不均问题,并针对不同导弹外形的变化提出了有效的解决办法,提升了易碎盖的可靠性。

1.2.3 应用与发展趋势

连续纤维增强树脂基复合材料因轻质高强及可设计性佳、耐腐蚀性强等特点,在航空航天领域得到广泛应用。其已成为易碎盖材料的首选,在大型、高载荷发射箱中实现了工程应用。

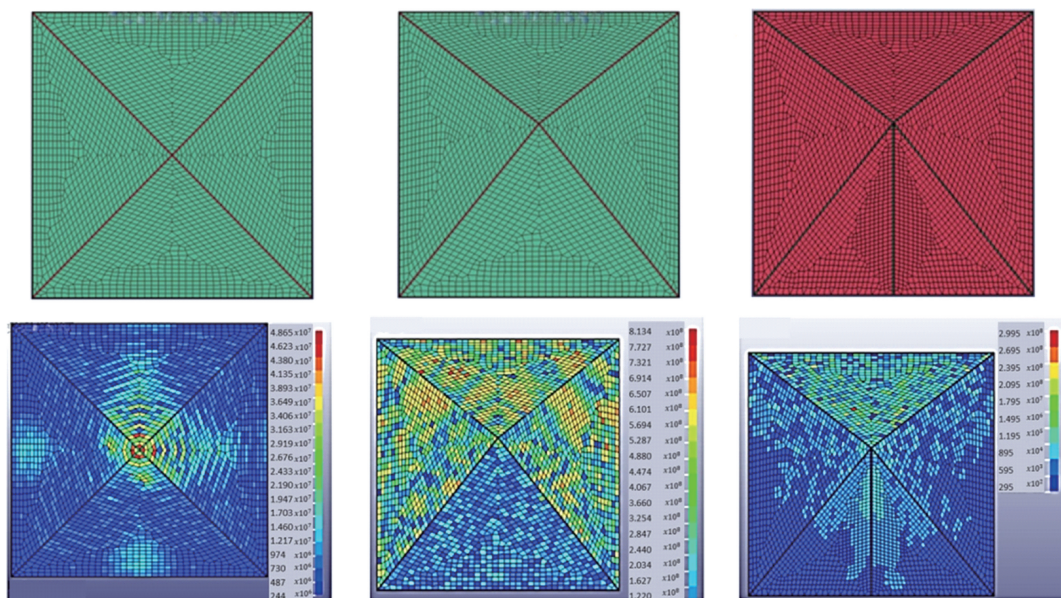


图 10 易碎盖子瓣结构

Fig. 10 Petal structure of frangible covers

当前,连续纤维增强树脂基复合材料易碎盖的发展趋势可归纳为:(1)高性能化。如材料的选用倾向于更高强度和更高模量的纤维与耐高温树脂^[38],以提升易碎盖的极端环境适应性与承载能力,满足高超声速武器等新一代装备发展的需求。(2)多功能一体化。如集成密封、防电磁干扰、防红外探测等功能,满足现代武器装备的多功能需求。(3)性能可预测化。如深入研究复合材料易碎盖的断裂齐根性、碎片可控性及破碎阈值等^[39]。(4)低成本化。如开发低成本成型工艺,推动规模化应用^[40]。

2 泡沫夹芯结构复合材料易碎盖

泡沫夹芯结构复合材料是由上下2层高强度面板与中间轻质泡沫芯材通过胶接或共固化工艺复合而成的一种三明治结构材料。这种结构结合了面板的高强度、高刚性与泡沫芯材的轻质、缓冲、吸能等特性,能在保障易碎盖承载能力的同时,进一步降低结构质量^[5],且泡沫芯材的脆性有助于提升整体的易碎性,是兼顾轻量化与高性能的理想结构形式^[41]。

2.1 结构组成与材料选型

泡沫夹芯结构复合材料易碎盖的结构组成包括面板、芯材及黏结层等,各部分的材料选型直接决定结构的综合性能^[42]。

2.1.1 面板

面板是泡沫夹芯结构复合材料的外层,直接承受外部载荷和环境侵蚀,因此需具备高强度、高刚度,以及耐磨损、耐腐蚀等特性^[43]。目前,常用的面板材料包括纤维增强树脂基复合材料、薄金属板及工程塑料板等^[44-45]。

纤维增强树脂基复合材料比强度高、性能可设计性强、环境稳定性好,可在海水、盐雾等苛刻环境中使用,产品长期运行可靠性好^[3],是泡沫夹芯结构复合材料易碎盖面板材料的首选^[33]。薄金属板的产品一致性较好,更适合大规模生产,但其固有的质量限制和塑性变形特性难以满足现代武器系统对易碎盖的性能要求。工程塑料板能够实现低成本、大批量生产,是一种经济实用的选择,可应用于某些民用防护设备和性能要求较低的场合,但其耐久性和环境适应性仍有待充分评估。

2.1.2 芯材

芯材的核心作用是支撑面板、传递载荷,同时提供轻质与易碎特性,在冲击过程中主要承受因弯曲而产生的压应力和剪应力^[22]。泡沫或蜂窝芯层是优良的热绝缘体,能减缓箱内外热量交换,并在一定时间内维持箱内恒温恒湿的环境^[46],简化装备的热管理要求。常用芯材包括聚氨酯(PU)泡沫、聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫、聚酰亚胺(PI)泡沫、酚醛

(PF) 泡沫及聚氯乙烯 (PVC) 泡沫、环氧 (EP) 泡沫等^[18,42,47-48]。不同的芯材可以满足不同类型发射装

置的多元化需求。各类泡沫芯材的性能对比见表 1^[49-50]。

表 1 各类泡沫芯材的性能

Tab. 1 Properties of various foam core materials

泡沫类型	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩强度/ MPa	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	耐温范围/ $^{\circ}\text{C}$	优点	缺点
PU	40~200	0.2~5.0	0.023~0.026	-110~130	低成本,易加工,隔声	耐高温性差,强度低,易燃
PMI	30~200	1.0~15.0	0.025~0.040	-200~180	高强度,高模量,优异的尺寸稳定性	成本高,必须防潮密封
PI	80~320	0.2~12.0	0.030~0.050	-260~400	优异的耐温性、阻燃性、耐腐蚀性	成本较高,抗冲击性能差
PF	30~150	0.8~3.0	<0.025	-60~150	耐高温及阻燃性佳	韧性差,加工困难
PVC	40~200	1.3~6.5	0.030~0.045	-40~80	耐腐蚀性及防潮性佳	耐温范围有限,密度较高
EP	50~600	0.5~10.0	0.030~0.100	-200~300	黏结性能优异,耐腐蚀性好,强度高	成型工艺复杂

2.1.3 黏结层

黏结层负责将面板与芯材牢固连接,确保载荷在各层之间有效传递,是确保泡沫夹芯结构复合材料整体结构完整性的关键。黏结层的失效会导致面板与芯材分离,显著削弱复合材料的性能。常见的黏结层材料包括环氧树脂胶、酚醛树脂胶、聚氨酯胶等。其中,环氧树脂胶黏结强度高、环境稳定性好,是泡沫夹芯结构复合材料易碎盖的首选黏结材料^[51];酚醛树脂胶耐热性强,适用于高温工况;聚氨酯胶韧性好,可缓解面板与芯材的界面应力,主要用于动态载荷或复杂变形环境。

黏结时,通常先在泡沫芯材的表面进行开槽处理,为黏合剂的流动建立通道,以增强泡沫芯材与面板之间的黏结强度,提高泡沫夹芯结构复合材料的整体性能^[52]。

2.2 结构与性能优化

2.2.1 结构设计

泡沫夹芯结构复合材料易碎盖通过引入泡沫夹

芯层增加结构厚度,并在最小化质量的前提下满足刚性要求,有效抑制变形过大,防止薄弱区过早失效^[34]。其性能与面板厚度、芯材厚度及芯材密度等结构参数密切相关^[53]。胡聪^[54]根据计算式推导出,当芯材厚度与纤维增强树脂基复合材料面板厚度的比值大于 5.77 时,泡沫夹芯结构复合材料具有较好的力学性能,芯层能够有效传递载荷,同时起到减重和吸能的作用。

Abbasi 等^[55]研究发现,增加泡沫芯材的层数并优化其密度分布,能有效提高复合材料整体的抗冲击性能。Yang 等^[56]进一步探究了泡沫夹芯结构复合材料的破坏机制,发现在冲击能量的传递过程中,面板负责承受厚度方向的拉伸和压缩应力,泡沫夹芯层通过剪切变形将局部的冲击动能耗散并沿面内方向扩散,从而出现了厚芯层试样损伤区域宽度大但深度浅的现象(图 11)。这种应力的有效分散机制显著提升了整体结构的抗冲击能力。

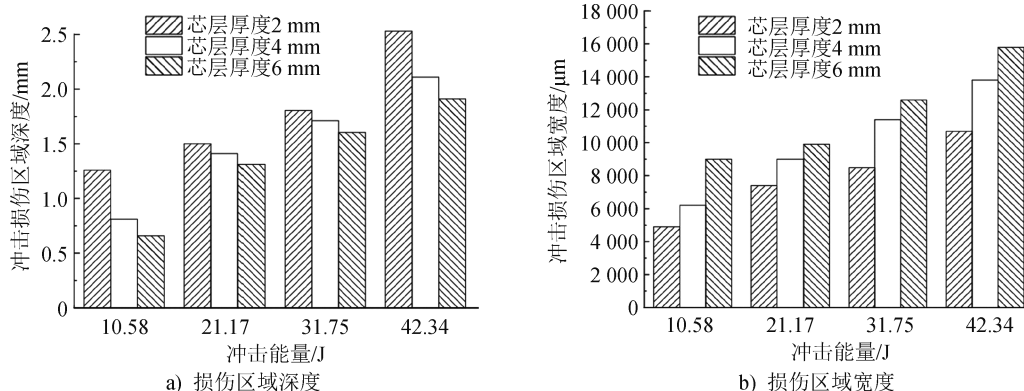


图 11 泡沫夹芯结构复合材料各层在不同冲击能量作用下的冲击损伤

Fig. 11 Impact damage of each layer in foam core sandwich structural composites under different impact energies

芯材密度优化需兼顾支撑力与轻量化。密度过低时,芯材支撑力不足,面板易发生屈曲;密度过高时,芯材结构质量增加,材料轻量化优势削弱。Nasirzadeh 等^[57]研究发现,随着泡沫密度的增加,泡沫夹芯结构复合材料的抗压强度和刚度显著提升。此外,相似的研究还表明,芯材的厚度、面内剪切模量和强度随泡沫密度的增加而增加^[58]。

2.2.2 性能优化

为进一步提升泡沫夹芯结构复合材料易碎盖的性能,许多学者对其强度、刚性、易碎性等进行了探究。王迪^[59]在拓扑互锁结构的基础上,结合有限元分析法,进一步优化了易碎盖的承压结构设计。其通过加喷涂层和偏置重心调控盖体的易碎性,引导破碎路径,实现精准破碎。冯维超等^[60]运用数值仿真与试验研究相结合的方法,系统探究了方形泡沫夹芯结构复合材料易碎盖在内压和外压载荷工况下的变形特性及其破坏损伤机制,并在此基础上构建夹层结构箱盖的三维损伤模型,从而为夹层结构箱盖的性能优化提供了理论依据。Bahkoglu 等^[52]对泡沫夹芯结构复合材料芯材的网格切割(图 12)进行了探究,发现:网格切割不仅利于后续树脂的流动,还能赋予夹层结构一定的损伤容限能力,能有效抑制冲击损伤的扩展,提高结构的安全性和可靠性,提升复合材料抗冲击性能。综上,在对泡沫夹芯结构复合材料易碎盖进行性能优化时,可以从结构设计、仿真模拟、制备工艺等角度进行多维度优化。目前,针对这三者协同作用机制的系统性研究仍较有限。

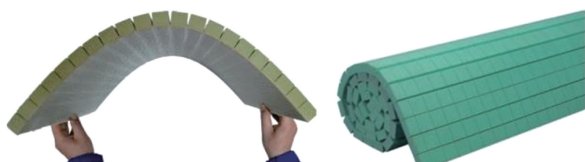


图 12 芯材的网格切割
Fig. 12 Grid cutting of core materials

2.3 应用与存在的问题

泡沫夹芯结构复合材料能在质量极轻的情况下具有较高的比强度和比刚度,为内部的导弹提供坚固的保护,是导弹发射箱易碎盖轻量化的理想材料。但随着导弹发射技术的进步,对易碎盖的要求也在不断提高。实际应用中,易碎盖不仅应具备一定的

承压能力,还应兼具良好的密封性和环境稳定性^[61]。当前,泡沫夹芯结构复合材料易碎盖高外内承载比特性及外表面耐烧蚀功能的实现等关键问题,仍有待更为系统的研究^[62],以推动易碎盖向结构功能一体化复合材料方向不断发展,顺应现代化作战的发展要求。

目前,泡沫夹芯结构复合材料易碎盖存在的难题主要集中在制备工艺上。为了使易碎盖在特定条件下能够按照设计的要求破碎或脱离,制备工艺必须与结构设计高度匹配。当结构设计要求材料性能展现出区域化差异时,制备工艺就必须实现对这种性能差异的精准控制,使得承载区域材料强度高、整体性好,薄弱区域材料强度可控地弱化,以避免非预期区域的提前破碎或整体强度不足。这些都对复合材料的制备和集成提出了高要求。

3 泡沫材料易碎盖

泡沫材料易碎盖是指完全由泡沫材料制备的发射箱易碎盖,其无需面板与黏结层,工艺简单、成本低廉,适用于低载荷和轻量化要求高的小型发射箱^[63]。

3.1 泡沫材料的选型

泡沫材料易碎盖常用材料包括聚氨酯泡沫、环氧树脂泡沫和聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫等。早期的易碎盖多采用聚氨酯泡沫制造^[64],但其力学性能与耐温性普遍不足,这限制了其应用。张中利等^[65]以闭孔型硬质聚氨酯泡沫为原料,利用其密度低、绝热性能好等优势制备易碎盖,并根据易碎盖的工作条件和性能要求改变密度,调控易碎盖的力学性能。结果发现,制备的易碎盖在外来燃气流的冲击作用下密封良好,能在弹头冲击后即发生破裂,子盖四散飞离且不影响导弹发射。聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫比强度和比模量高,但受其成本限制使用较少^[66]。

目前,大部分研究集中于环氧树脂泡沫,这是因为其特殊的化学结构能赋予材料力学强度高、环境适应性强、固化收缩率低及使用寿命长等特性^[67]。以环氧树脂泡沫为原料制备的易碎盖可设计性强、成型工艺简便、质量一致性较高,已成功运用于多个型号的易碎盖产品中^[68]。制备时,在盖体内表面预制一定结构的弱化槽,可促进应力集中并实现易碎盖齐根断裂,从而满足相关技术要求^[64]。李情兰

等^[66]提出了一种新型环氧泡沫材料易碎盖制备方法,即通过引入“预反应”制备工艺,使环氧发泡固化体系的发泡速度和固化速度相协调,改善了易碎盖内部泡孔结构的致密性和均匀性,提高了环氧泡沫材料易碎盖破裂的齐根性,实现了在设计冲破载荷下的定向断裂,有效克服了传统泡沫材料易碎盖的痛点,拓宽了泡沫材料在易碎盖中的应用。

3.2 性能的调控与优化

由于早期泡沫材料成型工艺不成熟、应用经验匮乏,泡沫材料易碎盖通常存在承压强度不够、可预测性差等缺陷,不能顺应导弹武器系统发射筒不断迭代的技术要求。为了优化泡沫材料易碎盖的力学性能,研究人员不断对泡沫材料易碎盖进行结构设计,发现通过预制应力槽,精确设计应力槽的深度、形状和分布,可在不显著增加盖体质量的前提下,实现力学性能的可控^[62,68]。这种应力槽可在成型过程中通过模具直接形成,工艺简单、成本低、效率高,避免了二次加工可能带来的性能不稳定或气密性差等问题。

卓毅等^[69]通过预制“U”形应力弱化沟槽,制备了环氧树脂基两相复合泡沫材料易碎盖。其配合泡沫材料的拉压不对称性实现了正反 2 个方向的承压要求,并通过调控应力槽实现了破裂的齐根性与碎片数量的可控制性。张晓艳等^[64]基于环氧树脂泡沫材料对圆球形易碎盖进行了结构改进。如图 13 所示,其沿经纬方向预制“∩”形应力槽,在边缘处预制“∖”形应力槽,通过改变应力槽的形状实现了性能调控,并就盖体经纬槽和边缘槽的深度对易碎盖薄弱区性能的影响开展有限元分析和试验验证,研究结果为泡沫材料易碎盖边缘弱化槽的详细设计和易碎盖性能调控提供了依据。

此外,麻小明等^[70]对易碎盖进行了轻量化、一体化设计,并结合有限元分析法和试验测试,对激波传递时间、前盖压力达到峰值时刻、撞击开盖力、发射箱前部压强和开盖压强等进行了研究。结果表明,设计的易碎盖能够在给定压力范围内碎裂,实现激波开盖,且分裂后的碎片不与火箭弹发生干涉碰撞。研究可为泡沫材料易碎盖的分离仿真提供理论依据。

3.3 应用与存在的问题

泡沫材料易碎盖因轻质、低成本及易加工等优

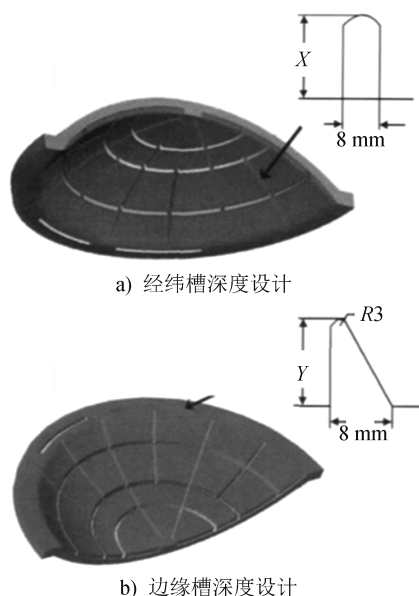


图 13 环氧树脂泡沫易碎盖的结构
Fig. 13 Frangible covers structure of epoxy resin foam

势,已在小型导弹、火箭弹等发射箱中得到应用。然而,泡沫材料易碎盖也不可避免地受材料属性及制备工艺等因素影响,存在力学性能不足、防潮控湿效果差等缺陷,这制约了其在现代发射筒密封盖上的应用^[67]。同时,由于泡沫材料的破裂往往是不规则的、随机的,可能会产生较大的碎块或意外的断裂形态,易碎盖破裂的齐根性和其性能的可控性较差,容易对弹体、发射筒、邻近设备及人员造成安全隐患,因此,易碎性能的精准调控始终是泡沫材料易碎盖优化的核心命题。

随着现代武器系统朝着体系化装备方向的不断发展,其对精细化技术创新和资源优化配置的要求不断提高,箱式发射系统对易碎盖提出了新的要求。对于垂直发射的导弹武器系统,其发射过程对相邻箱体易碎盖的安全威胁亦不容忽视。泡沫材料为脆性材料,多数泡沫材料易碎盖依靠材料本身强度抵抗外压载荷^[61],故易在外物碰撞过程中受到损伤。基于此,提升泡沫材料易碎盖的外内承载比也是研究重点关注的方向之一^[71]。

4 结束语

发射箱易碎盖作为武器系统的关键部件,其材料的选择直接决定装备的机动能力、发射可靠性与

整体作战效能。当前,纤维增强树脂基复合材料、泡沫夹芯结构复合材料及泡沫材料凭借轻质、高强与可设计性佳等优势,已成为取代传统金属材料的主流选择。但深入分析发现,3类材料在技术路径与应用场景上仍存在显著差异与挑战。

纤维增强树脂基复合材料通过纤维形态的调控实现了性能的梯度化。短纤增强体系虽以低成本、易加工见长,但其各向同性的力学性能限制了其在高动态载荷下的应用,故只适用于中低载荷场景;连续纤维增强体系虽能通过铺层设计实现承载能力的最大化,满足大型、高载荷发射箱需求,但其复杂的工艺控制与高昂的生产成本仍是制约其产业化生产的瓶颈所在。泡沫夹芯结构复合材料通过面板与芯材的协同作用,在轻量化与抗冲击性能之间实现了平衡,其在中大型发射箱中表现出色,但界面结合强度与耐久性仍是其工程应用中需持续优化的核心。泡沫材料以极致轻量化与低成本为核心竞争力,适用于小型、低载荷发射箱,但其力学性能的稳定性与环境适应性仍有待通过技术改性进一步提升。

未来,随着材料科学、制备工艺与数值模拟技术的深度融合,轻质材料发射箱易碎盖将向着高性能化、轻量化、多功能化及低成本化方向持续演进。在材料体系方面,多尺度增强技术与梯度功能材料设计将成为突破性能瓶颈的关键,例如通过纳米填料改性提升泡沫材料的力学性能,或通过混杂纤维铺层优化复合材料的抗冲击特性。在制备工艺方面,冲压成型、自动化铺放、3D打印等制造技术的应用将显著提升复杂结构件的成型精度与生产效率。同时,基于多物理场耦合的数值模拟技术将贯穿材料设计、工艺优化与性能验证的全过程,实现从“经验试错”到“预测设计”的跨越。此外,多功能集成将成为重要趋势,如在易碎盖中嵌入传感元件实现状态监测,或通过智能材料赋予其环境响应能力等。这些技术的协同发展都将为现代武器装备的升级换代提供更坚实的技术支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 于鑫, 齐天旭, 安志恒, 等. 多联装导弹发射系统的发展现状及趋势[J]. 国防科技, 2022, 43(5): 35-39.
- [2] 黄永辉, 赵楠, 何春全, 等. 导弹发射方式与发展研究[J]. 中国设备工程, 2021(7): 219-220.
- [3] 罗赞才, 郭栋, 贾刊, 等. 一种复合材料易碎盖: CN202311480602.7[P]. 2024-01-05.
- [4] 李伟, 李照谦, 南博华, 等. 树脂基复合材料易碎盖设计和优化研究进展[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9): 150-154.
- [5] 彭泉胜. 海水环境对 PET 泡沫夹芯结构力学性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [6] 安庆升, 孙立东, 阎金贞, 等. 冲破式异型结构易碎前盖设计研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(5): 73-79.
- [7] 赵烁, 居浙海, 姜亚明. 纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(5): 24-32.
- [8] 范棋鑫. 平面顶破式复合材料易碎盖结构设计及试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [9] 高硕, 周邦泽, 何梦瑶, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(12): 6-19.
- [10] 刘昱君, 樊争科, 侯琳, 等. 玄武岩纤维研究现状[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(5): 27-30.
- [11] 魏凤春. 易碎复合材料的设计、制备工艺与性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [12] LI H, LIU J Z, LIU J L, et al. Failure analysis of a frangible cover made of short-cut basalt fiber reinforced epoxy composites[J]. Polymer Composites, 2025, 46(1): 438-449.
- [13] 王志新, 王芮杰, 范王玺子, 等. 深冷处理对麻纤维/环氧树脂复合材料弯曲性能影响研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(9): 28-34.
- [14] 丁鑫泰, 高彦涛, 陆赞, 等. 碳纳米管增强 FRP 复合材料制备方法及其力学、吸波性能研究进展[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(4): 11-22.
- [15] 李绪东. 一种平板型复合材料薄膜盖的应用研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2019.
- [16] WARD H S, MOSTAFA N H. Tensile and impact properties of woven glass fibers/epoxy composites filled with short glass fibers[J]. Journal of Engineering and

- Sustainable Development, 2024, 28(5): 637-644.
- [17] CAPELA C, OLIVEIRA S E, PESTANA J, et al. Effect of fiber length on the mechanical properties of high dosage carbon reinforced[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 539-546.
- [18] 李国琴. 泡沫夹层复合材料的制备及其力学和阻燃性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [19] WAN Y M, ZHANG L L, PAN B L, et al. Synergistic augmentation of mechanical and tribological properties in bionic mortise-tenon carbon fiber/epoxy composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 311: 113202.
- [20] 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.
- [21] 徐柠浩, 方婷婷, 黄晓梅, 等. 复合材料防弹头盔的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(10): 1-8.
- [22] 陈威杨. 层合复合材料口盖机械冲击破坏机理研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- [23] AHMAD H, SHAH A U R, AFAQ S K, et al. Development and characterization of Kevlar and glass fibers reinforced epoxy/vinyl ester hybrid resin composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(9): 8133-8146.
- [24] DOANE W J. Frangible fly through diaphragm for missile launch canister: US4498368[P]. 1985-02-12.
- [25] TURAKA S, CHINTALAPUDI R, KANNAIYAN GEETHA N, et al. Experimental and numerical analysis of the microstructure and mechanical properties of unidirectional glass fiber reinforced epoxy composites[J]. Composite Structures, 2024, 331: 117887.
- [26] XU L M, CAI D A, LI C, et al. Tensile properties of defect-prefabricated 3D woven composites: experiments and simulations[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(5): 8384-8410.
- [27] 白一峰, 冷筱晓, 李磊, 等. 三维中空织物增强复合材料压缩行为研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(3): 35-40.
- [28] WANG H F, ZHOU C Y, ZHAO C F, et al. Structural design and impact simulation of glass fiber fragile cover of rocket[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1676(1): 012105.
- [29] 周光明, 袁卓伟, 王新峰. 整体冲破式复合材料薄膜盖的设计与试验研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 707-712.
- [30] CAO R, ZHOU G M, CAI D A, et al. Parametric design and experimental study for weak area structure of circle composite fragile cover[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Mechanics and Civil Engineering. Dordrecht: Atlantis Press, 2014: 49-56.
- [31] 蔡登安, 吴秀平, 杨国平, 等. 基于 Taguchi 方法的复合材料易碎盖结构参数设计[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(6): 797-802.
- [32] 曹然, 周光明, 钱元, 等. 复合材料易碎盖薄弱区结构的参数化设计[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(4): 549-553.
- [33] QIAN Y, LI W L, WANG X P, et al. Design and analysis of a new multi-part composite frangible cover[J]. Polymers, 2023, 15(15): 3307.
- [34] 王辉. 顶破式异型复合材料夹层盖的结构设计与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [35] 李仁凤, 任锐, 张翔, 等. 燃气冲破式易碎盖冲击载荷与变形预测[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 72-80.
- [36] 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.
- [37] SMARRAZZO A, GUIDA M, MARULO F, et al. Failure propagation controlling for frangible composite canister design[J]. Applied Sciences, 2022, 12(23): 12220.
- [38] 王雨生, 郭皎, 王萍. 蚕丝碳纤维复合材料的紫外老化性能探究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(2): 30-38.
- [39] 王岩, 景磊, 李树茂, 等. 复合材料发射筒前盖的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2019, 36(3): 49-52.
- [40] 武娟娟, 管全梅, 郭金城. 国产大丝束碳纤维在轨道交通车辆部件中的应用研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(4): 30-34.
- [41] 刘星宇. 复合材料泡沫夹层板抗高速冲击特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [42] SAMALI B, NEMATI S, SHARAFI P, et al. Structural performance of polyurethane foam-filled building composite panels: a state-of-the-art[J]. Journal of Composites Science, 2019, 3(2): 40.
- [43] 刘成伟, 高晓平, 王曦远, 等. 以铝蜂窝为夹芯的玻璃纤维增强复合材料夹层结构弯曲性能研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(8): 25-34.
- [44] XIAO W, YAN C, TIAN W, et al. Effects of face-sheet

- materials on the flexural behavior of aluminum foam sandwich[J]. *Steel & Composite Structures*, 2018, 29(3): 301-308.
- [45] LEE H M, KIM D H, KIM D Y, et al. Enhancement of vibration attenuation and shock absorption in composite sandwich structures with porous foams and surface patterns[J]. *Composite Structures*, 2022, 295: 115755.
- [46] 苗青. 整体顶破式方形复合材料箱盖的结构设计和顶破模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [47] 初丽辉, 丁志荣, 匡宁, 等. 树脂基纺织空心结构复合材料的声学性能试验研究[J]. *产业用纺织品*, 2013, 31(12): 13-16.
- [48] ZHENG L G, XIAO Y X, LIU L, et al. Experimental and numerical study of the behavior of epoxy foam-filled 3D woven spacer composites under bending load[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(5): 3057-3067.
- [49] 周秀燕, 王非. 泡沫复合材料的应用与发展[J]. *纤维复合材料*, 2016, 33(1): 36-39.
- [50] 张平峰, 胡亭波. 气凝胶隔热材料在船舶管路隔热中的应用[J]. *广东造船*, 2024, 43(5): 74-77.
- [51] RAJ R, PANDEY A, GUPTA G, et al. Effect of Kevlar and carbon fiber face sheet on the deformation behavior of aluminum hybrid composite foam core sandwich panel under flexural loading[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(9): 8071-8085.
- [52] BALIKOĞLU F. Curved grid-scored foam core sandwich composites under low-velocity impact loads: effects of curvature, stacking sequence, and core finishing[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(2): 1082-1095.
- [53] 钱元. 冲破式复合材料发射箱盖结构设计和试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [54] 胡聪. 湿热环境下复合材料泡沫夹层结构力学性能研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2020.
- [55] ABBASI M, ALAVI NIA A. High-velocity impact behavior of sandwich structures with Al faces and foam cores: experimental and numerical study[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 105: 106039.
- [56] YANG K, GONG P, YANG L, et al. The effect of different structural designs on impact resistance to carbon fiber foam sandwich structures[J]. *e-Polymers*, 2021, 22(1): 12-18.
- [57] NASIRZADEH R, SABET A R. Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 129-139.
- [58] GEORGE T, DESHPANDE V S, SHARP K, et al. Hybrid core carbon fiber composite sandwich panels: fabrication and mechanical response[J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 696-710.
- [59] 王迪. 易碎式发射箱盖的设计与优化[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [60] 冯维超, 周光明, 王新峰, 等. 泡沫夹层复合材料导弹发射箱盖损伤失效研究[J]. *玻璃纤维*, 2014(1): 43-48.
- [61] 杨鑫宇, 冷子凌, 李伟, 等. 易碎式导弹发射箱盖研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(12): 142-148.
- [62] 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.
- [63] SAAB A. Launch tube protective cover: US20100282055[P]. 2010-11-11.
- [64] 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.
- [65] 张中利, 于存贵, 马大为, 等. 冲击作用下易碎式密封盖数值仿真及实验分析[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(1): 62-66.
- [66] 李倩兰, 张其孟, 陈建平, 等. 一种新型环氧泡沫易碎盖及其制备方法: CN202510870373.2[P]. 2025-09-23.
- [67] 秦旭锋, 蒋和跃, 张学成, 等. 复合材料薄膜盖结构与功能一体化设计[J]. *包装工程*, 2024, 45(11): 291-296.
- [68] 刘宇盖, 蔡亮, 蔡振杰, 等. 基于有限元分析的前易碎盖外压承载能力的改进设计[J]. *理化检验(物理分册)*, 2019, 55(1): 1-4.
- [69] 卓毅, 包睿, 秦旭锋, 等. 环氧泡沫塑料易碎盖结构优化设计[J]. *包装工程*, 2017, 38(3): 46-50.
- [70] 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.
- [71] 李照谦, 宋亮, 李伟, 等. 导弹武器系统复合材料防护盖结构与性能研究[J]. *合成纤维*, 2023, 52(8): 64-67.