

物资无伞空投用缓冲材料研究进展

郭洁^a, 郭彦鹏^{b*}, 师帅^a, 刘超奇^a, 邬朝鹏^a

(武警工程大学 a.装备管理与保障学院 b.研究生大队, 西安 710086)

摘要: **目的** 为促进无伞空投用缓冲材料的研究和应用, 改进和优化无伞空投用缓冲材料性能, 为我国物资投送提供更可靠、更高效的保障支撑。**方法** 在无伞空投用缓冲材料研究现状综述的基础上, 比较不同材料的缓冲性能特点及适用性。**结果** 随着缓冲材料技术的不断进步, 传统缓冲材料结合泡沫金属、智能材料等新型复合缓冲材料, 能够有效提高物资着陆安全性与稳定性, 降低装备损坏与维修成本, 提升抢险救援效率。**结论** 无伞空投用缓冲材料未来发展方向为提高缓冲性能和稳定性, 关注绿色环保包装材料、吸能缓冲材料、创新物资包装方式以及集成信息化智能材料, 以满足各类物资对无伞空投缓冲材料的需求。

关键词: 无伞空投; 缓冲材料; 缓冲性能; 复合材料; 智能材料

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)17-0278-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.17.033

Research Progress on Cushioning Materials for Parachute-free Airdrops

GUO Jie^a, GUO Yanpeng^{b*}, SHI Shuai^a, LIU Chaoqi^a, WU Chaopeng^a

(a. College of Equipment Management and Security, b. Postgraduate Brigade,
Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

ABSTRACT: The work aims to promote the research and application of cushioning materials for parachute-free airdrop, improve and optimize the performance of cushioning materials for parachute-free airdrop, and provide a more reliable and efficient support for material delivery in China. On the basis of summarizing the research status of cushioning materials for parachute-free airdrop, the cushioning performance characteristics and applicability of different materials were compared. With the continuous progress of cushioning material technology, traditional cushioning materials combined with new composite cushioning materials such as foam metal and intelligent materials could effectively improve the safety and stability of material landing, reduce equipment damage and maintenance costs, and improve the efficiency of emergency rescue and relief. The future development direction of cushioning materials for parachute-free airdrop is to improve the cushioning performance and stability, and pay attention to green packaging materials, energy-absorbing cushioning materials, innovative material packaging methods, and integration of informationalized and intelligent materials, in order to meet the needs of all kinds of materials for parachute-free airdrop cushioning materials.

KEY WORDS: parachute-free airdrop; cushioning materials; cushioning performance; composite material; intelligent material

无伞空投指装备物资不系降落伞, 直接从飞行器上投掷的方式, 通过缓冲材料吸收分散着陆时的冲击

力, 以保护物资不受损坏, 大幅缩短空投过程并提高了投送的精确度。虽然有伞空投仍是当今主流的空投

收稿日期: 2024-04-18

*通信作者

方式,但有伞空投受气流影响较大,难以保证着陆点的准确。相比之下,无伞空投的成本更低,且更为省时、省力,特别是在极端气候和恶劣环境下,无伞空投成为应急投送和紧急救援的重要物资补给手段。因此,无伞空投逐渐成为物资投送研究的热点,越来越受到国内外的重视。

国外在无伞空投领域的研究起步较早,已取得显著成就。目前,美国在该领域处于领先地位,已经从最初的低价值耐摔物品,发展到包括易碎、易燃物品,乃至高价值精密仪器设备,正朝着无差别物资无伞空投方向发展。美国 TRIAD 空投系统 (Tri-wall Aerial Delivery System, TRIAD) 底部由三层蜂窝纸板制成,最大负载为 623 kg。Copter 盒子一次性空投系统底部的蜂窝纸板能缓冲大部分冲击能量,最多可装载 54 kg 的设备和用品。RRDAS 空投系统 (Rapid Rigging De-Rigging Airdrop System, RRDAS) 依靠自动充气气囊在压缩载荷下的变形,吸收着陆冲击能量。该系统最大空投高度为 230 m,最大负载质量为 10 t^[1]。FDS 自由落体空投系统 (Freedrop Delivery System, FDS) 是美军专为山地地形研发的低空空投系统,能够将成捆的物资包装装入一个由蜂窝纸板制成的具有缓冲功能的纸箱,每架 UH-60 黑鹰直升机可以携带 272 kg 的物资。俄罗斯在无伞空投领域也取得了进展,采用复合高分子材料研发了一种弹性油囊,能够无伞空投 200 L 的燃料和润滑油。国外主流无伞空投技术主要依赖于缓冲材料的吸能特性来保护空投物资,因此,缓冲材料的发展进步对推动无伞空投技术的应用具有直接影响。

国内对无伞空投的研究起步较晚,主要集中于无伞空投理论研究及仿真分析。近年来,随着包装理念的创新和缓冲材料技术的发展,国内对无伞空投的研究逐渐深入,特别是在缓冲材料的应用上取得了一些成果。赵西友等^[2]设计的液体盛装袋采用热塑性聚氨酯,可以在 200 m 高度完成液体类物资的无伞空投,这表明复合高分子材料在无伞空投包装中具有潜在的应用价值。习赵军等^[3]对盛装 2 kg 饮用水的双层聚氨酯/聚乙烯水袋 50 m 高空无伞空投跌落过程进行了有限元仿真分析,为无伞空投包装材料的安全性设计与评估提供了理论依据。贾山等^[4]利用泡沫铝和拉杆吸能机构设计的无伞空投包装,实现了 20 kg 物资在 50 m 高空的无伞空投,并将落地缓冲过程的最大过载限制在 2 500g_n 以内。张宇婷等^[5]设计的罐壁材料层为聚乙烯-发泡-聚乙烯的无伞空投储液罐,进一步证实了多层复合材料在提高空投安全性方面的优势。史永胜等^[6]研究了无伞空投箱所用的复合材料层合板进行了研究,探索了在降低成本的同时提高抗冲击性能的可能性。杨国华等^[7]采用缓冲性能较强的蜂窝纸板制成特种包装箱,在 200 m 高空进行物资器材无伞空投。

本文对无伞空投用缓冲材料的研究现状进行综述,比较各类缓冲材料的优势与局限性,并对未来发展趋势进行展望,以期为我国无伞空投技术的发展提供参考。

1 无伞空投用缓冲材料的分类

在无伞空投技术中,缓冲材料的设计和应用对确保物资安全着陆具有决定性作用。缓冲材料指在无伞空投物资的底部或四周包裹一层具有吸能、消能、分散能量的材料,以便在物资接触地面受到应力冲击的时候,缓冲材料利用其内部的弹性物质或气体,将地面撞击的冲击力和振动转化为弹性变形。缓冲材料的选择和包装非常重要。不同的物资、不同的高度、不同的着陆点需要选择不同的材料和结构。一般来说,缓冲材料的弹性应与机械运动中的冲击与振动相匹配。过硬或过软的缓冲材料都会影响落地缓冲效果。此外,缓冲材料的包装尺寸和形状也需要根据具体应用场景进行设计,以保证其在落地时候能够有效保护无伞空投物资。无伞空投缓冲原理分为结构压缩性、气体压缩性和弹性恢复性 3 种。根据缓冲原理不同,缓冲材料主要分为蜂窝纸板、瓦楞纤维板、高分子泡沫、气囊、金属泡沫复合材料以及智能材料等。

2 无伞空投用缓冲材料研究进展

2.1 蜂窝纸板缓冲材料研究

蜂窝纸板作为一种低碳可再生的环保节能材料,具有轻质、低密度、用料少、成本低和良好的缓冲性能等优点。蜂窝纸板利用蜂窝状的结构来增加强度,如图 1 所示。这种设计提供了高度的结构稳定性和抗弯曲性,使材料在保持轻量的同时能够承受更大的压力和冲击。此外,蜂窝纸板的多孔夹层结构还具有一定的抗振动性能,可以减小外部振动对结构的影响。将蜂窝纸板用于制作无伞空投包装箱,可靠性高、费用低,并且包装可回收再利用^[8]。

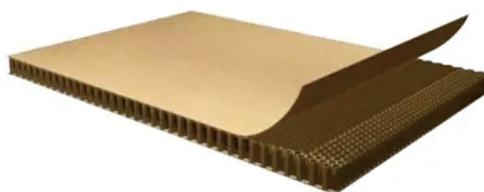


图 1 蜂窝纸板

Fig.1 Honeycomb cardboard

20 世纪 50 年代,美国工程师 Moorhead 发明了一种轻质但强度高的蜂窝结构材料,最早用于降落伞空投物资,起到缓冲作用,减少物资落地时的损伤,

至今仍是主要的空投系统缓冲材料。为了不断提升蜂窝纸板的结构性能并降低成本,研究学者多年来对其进行了深入研究。Smardzewski 等^[9]研究了蜂窝纸板的力学性能模型,将数值计算结果与实验测量结果进行比较,结果显示蜂窝纸板的芯材具有显著的正交各向异性。Gabriela 等^[10]介绍了蜂窝纸板边缘挤压试验的计算方法,基于生产蜂窝纸板所用纸张原料的力学性能和几何参数进行计算,并通过与不同纤维材料制成的各种几何参数纸板的边缘挤压试验测量结果进行对比,验证了该方法的有效性,对改进蜂窝纸板的设计和制造具有重要意义。Ashraff 等^[11]使用 ANSYS 软件对不同厚度面板的六角形铝蜂窝夹层结构进行了均质化建模分析,包括静态变形、应力分布和应变分布等结构分析。Minupala 等^[12]提出蜂窝夹层结构可以有效实现轻量化部件设计,并通过由连续纤维增强热塑性塑料覆盖层和热塑性蜂窝芯制成的夹层材料来实现。研究结果表明,蜂窝纸板的性能可以通过改变其结构参数和选择材料来优化,以满足物资无伞空投的应用需求。Jesus 等^[13]认为,在空投过程中蜂窝纸板的缓冲性能硬度过高,因此寻找更适合载荷冲击的复合缓冲材料,以取代空投系统中蜂窝纸板的应用。Wei 等^[14]使用纤维增强复合材料开发了具有优异缓冲性能的超轻蜂窝材料,与金属聚合物和蜂窝纸板相比,纤维增强复合材料具有高比刚度、高比强度、出色的疲劳性能、耐腐蚀性和耐高温性等优点。由于其轻质和优越的缓冲性能,被视为传统蜂窝纸板的替代品。该研究还为复合材料成分与缓冲性能之间的复杂关系提供了宝贵的见解,有助于开发更高效的蜂窝纸板复合缓冲材料。

综上所述,蜂窝纸板作为一种低成本的无伞空投缓冲材料,其研究和应用已取得显著进展。未来的研究将集中在提高蜂窝纸板的环境适应性和耐久性,同时探索新型蜂窝复合材料和制造技术,以提供更为有效和可靠的缓冲保护。

2.2 瓦楞纤维板缓冲材料研究

瓦楞纤维板因其成本低、质量小、回收率高和环境影响小等特点而广泛应用于空投物资的外包装缓冲材料。如图 2 所示,瓦楞纸板由 2 层不同类型的纸板构成,包括面板和夹芯层。面板是一种专门为瓦楞纸板设计的纸板,而夹芯层则是置于 2 个面板之间的波纹状纸板,它的波纹结构像拱门一样,能够抵抗侧向压力,为纸板内部提供缓冲的空气,从而增强了瓦楞纸板的整体结构强度。面板和夹芯层一般采用成本低廉的淀粉基胶黏剂,这种胶黏剂不仅便宜,还能保证瓦楞纸板的可回收性。瓦楞纸板环保无害且成本低廉,通过折叠、插接、拼合和黏合等多种方式,非常适合用作无伞空投包装箱

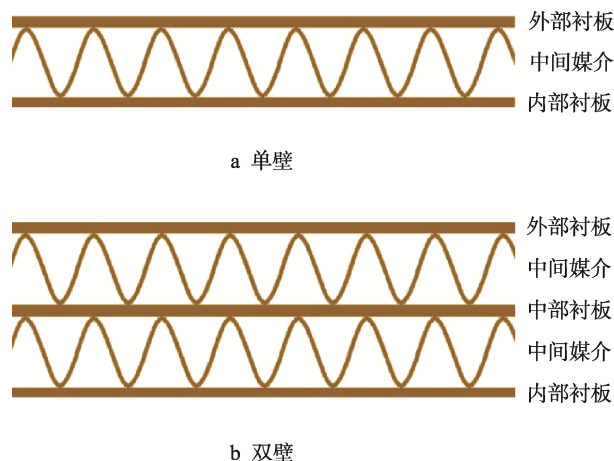


图 2 瓦楞纤维板的结构

Fig.2 Schematic structure of corrugated fibreboard

纸质防震衬垫。

19 世纪末, Albert 发明了单面瓦楞纸板,用于包装易碎物品,美国开始研究用瓦楞纸板制造包装运输箱。近年来,许多学者对瓦楞纸板在物资包装方面的力学性能进行了大量研究。Campbell 等^[15]研究发现不同瓦楞尺寸的缓冲性能存在显著差异,且高湿度条件下缓冲效果降低。Singh 等^[16]研究了瓦楞纤维板箱的抗压强度受到温度、含水量、湿度、凹槽尺寸和纸板的基重等因素的影响。日本神户大学 Chen 等^[17]通过对比瓦楞纸板缓冲垫的缓冲曲线,以确定在实际包装时缓冲材料尺寸和厚度的准确性和可行性。Zulaikah 等^[18]研究了瓦楞纸板在拉伸和压缩载荷下的力学性能,瓦楞纸板上的凹槽使应力-应变曲线呈锯齿状,提高了缓冲材料的弹性、耐用性,并具有更好的能量吸收能力。Safwa 等^[19]研究了纸板复合材料在缓冲包装中的热成型过程,分析了不同的热成型参数对材料变形和应力分布的影响。Xi 等^[20]研究了瓦楞纸板各向异性机械特性的特征,通过模拟瓦楞纸板在不同高度下落的情况,分析了瓦楞纸板包装的缓冲性能。

综上所述,瓦楞纸板作为无伞空投缓冲材料的研究已经取得了一系列重要成果。作为一种经济、环保的缓冲材料,瓦楞纸板的性能可以通过不同的设计和处理方法进行优化,以满足无伞空投中自由落体条件下的缓冲需求。

2.3 高分子泡沫缓冲材料研究现状

高分子泡沫材料具有非常轻的密度,可以减轻包装的质量,降低运输成本,同时具备出色的缓冲性能。如图 3 所示,泡沫材料是由塑料、橡胶等聚合物内部含有大量气泡的微孔材料构成。当泡沫材料受到外部冲击时,泡沫的头部能够迅速变形和压缩,将冲击力分散到整个材料表面。这种变形和压缩过程将外部冲

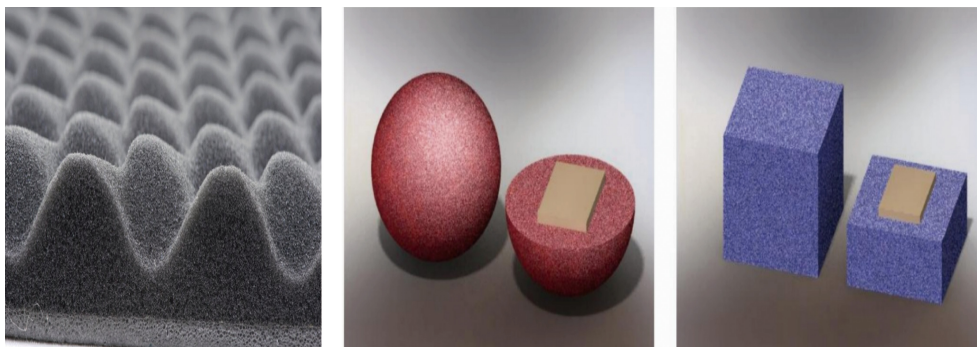


图 3 高分子泡沫缓冲材料
Fig.3 Polymer foam cushioning material

击转化为内部的形变能力。其次,当外部冲击停止时,泡沫材料通过弹性的形变过程吸收和破坏能量的传递,泡沫材料的结构迅速恢复原状,从而降低永久性变形的风险。这种回弹性使泡沫材料成为可靠的缓冲材料,因此在无伞空投包装应用中,可以显著降低物资损坏的风险。常见的高分子泡沫缓冲材料是塑料泡沫,通常由聚苯乙烯(EPS)、聚乙烯(EPE)或聚氨酯(EPU)制成。

20 世纪 80 年代,由 EPS 或 EPU 制成的合成泡沫因其出色的缓冲性能和低成本而成为主流泡沫材料,吸引了众多学者进行研究。Rodriguez 等^[21]采用数值分析方法研究了 EPS 泡沫缓冲材料的能量吸收特性,重点分析了 3 种不同密度的 EPS 泡沫在 3 种加载速率下的机械响应。实验结果显示,在高加载速率下,更高密度的 EPS 泡沫具有更好的能量吸收能力。此外,EPS 泡沫的能量吸收和压缩应力响应可以通过有限元模型进行有效预测。Kassim 等^[22]研究了模塑 EPS 泡沫垫的包装设计, EPS 能有效吸收冲击,研究通过实验方法和设计仿真分析,确定了 EPS 垫包装设计中准确的设计参数。

聚苯乙烯等石化基材料虽然缓冲性能极佳,但其废弃物在自然环境中难以降解,严重污染环境。与此相比,可生物降解的天然高分子泡沫材料具有生物相容性、生物降解性和可再生性,是一种环境友好材料,受到了世界各国的广泛关注。Mishra 等^[23]采用可生物降解且价格相对低廉的木质纤维素制备绿色环保材料,以取代传统的塑料包装材料。Sohn 等^[24]研究了一种可生物降解的生物基高倍发泡材料技术,其产品可以在使用后作为堆肥回收利用。Gustafssona 等^[25]探讨了当前塑料包装缓冲材料对环境的影响,提出了基于泡沫纤维素的可持续替代方案,加快泡沫纤维素缓冲材料的开发和使用,同时满足经济和可持续性目标。斯道拉恩索推出了名为 Papira®的由木浆泡沫制成缓冲材料,增强缓冲材料的性能。采用纤维素泡沫成型方法可以生产出多孔保护缓冲包装材料,纤维素泡沫材料与其他可生物降解材料相比具有低成本的优势,可作为泡沫材料的替代品^[26]。水基纤维泡

沫成型技术是将天然纤维和人造纤维与其他类型的原材料一起制成轻质泡沫材料,泡沫的物理性质,如微孔结构、强度行为和传输特性,对产品的缓冲性能有着重要影响^[27]。通过调整泡沫的特性,比如空气含量、泡沫稳定性和气泡尺寸,可以精确控制材料的微观结构,为无伞空投缓冲材料的定制和工艺的改进提供了科学依据。Zhang 等^[28]成功制备了一种具有超高能量吸收能力的可生物降解缓冲包装材料,可用于在极端环境下无伞空投运送产品。研究结果表明,当外部冲击速度超过剪切增稠液(Shear Thickening Fluid, STF)的临界剪切速率时,增加 STF 的质量分数和含量可增强泡沫的能量吸收特性,STF 可使最大冲击加速度降低 85%,显著提高其动态缓冲性能。Narke 等^[29]对新型 FIBI 缓冲材料进行了测试,结果表明, FIBI 缓冲材料冲击吸收性能要优于聚氨酯,可多次重复使用且具有生物降解性等特点。

综上所述,木质纤维素基泡沫缓冲包装材料具有低密度、不溶于水、良好的缓冲吸能性以及高抗压强度等特点,因此在替代传统泡沫塑料方面展现出巨大的潜力和应用前景。随着全球对减少塑料使用和推动循环经济的关注,泡沫材料正朝着更环保、可持续发展的方向发展。随着新技术的不断优化以及环保法规的加强,预计未来可生物降解的泡沫材料将在无伞空投应用中发挥重要作用,展现出更加环保高效的特性。

2.4 气囊缓冲材料研究现状

缓冲气囊因其轻质、可折叠、节省空间、优良的缓冲性能和经济性而广泛应用。气囊在受到撞击时,通过压缩内部气体和利用材料的弹性来吸收冲击能量。在经历若干次反弹后,气囊可以有效减少载体的动能。根据不同的场合和需要,气囊可以设计成不同的形状。根据气囊缓冲机理的不同,通常将其分为排气式气囊、密闭式气囊和组合式气囊,如图 4 所示。

最早对缓冲气囊的研究主要集中在火星、月球等航空器着陆技术上。缓冲气囊的理论已取得深入研究,并在实践中也获得了显著的成果。1997 年,美国火星探测器“探路者号”将着陆器包裹在一个安全



图 4 缓冲气囊分类

Fig.4 Cushioning airbag classification

气囊中, 由 24 个子气囊构成, 这些气囊在着陆过程中起到了关键的缓冲作用, 使探测器能够安全地降落在火星表面^[30]。这种设计后来也被用于其他火星探测器的着陆系统, 证明了其有效性和可靠性, 如图 5 所示。Shook 等^[31]采用有限元 LS-DYNA 对猎户座乘员舱第二代气囊着陆系统进行了设计和分析, 着陆系统由 6 个安全气囊组件组成, 每个安全气囊组均由外部主气囊和内部防触底气囊组成。外部气囊中有一个主动通风口, 通风口控制排出气体的流量, 内部气囊用于在地面撞击之前控制主气囊的形状, 提供离地间隙, 显著提高了缓冲效率和性能。Zhou 等^[32]提出了一种新的组合气囊分析模型, 通过仿真分析和地面试验对充气缓冲过程进行了计算和验证, 利用该分析模型, 分析了不同布局组合气囊的登月缓冲过程, 确定了最优布局。Lu 等^[33]研究了新一代装甲车辆着陆缓冲气囊, 分析了不同着陆条件下气囊的缓冲性能及其各种影响因素, 基于高精度仿真模型, 验证了所设计的气囊缓冲系统对新一代重型机载装甲车辆具有良好的缓冲效果。

美国 Mid-Mountain 公司开发出更轻质的安全气囊织物, 采用 ARMATEX®涂层织物制造。这种结构可以提供力学稳定性和耐磨性, 确保气囊具备高效的缓冲性能。2022 年, 美国测试了 RRDAS 空投系统^[1],

如图 6 所示, RRDAS 系统的托盘底部安装了 10 个可重复使用的缓冲气囊。充气后, 这些气囊能够承受 10 t 的载荷, 可以在 230 m 的高度自动展开充气。落地时, 通过排气孔吸收冲击力, 从而保护货物。与传统空投系统相比, RRDAS 的组装时间缩短了 25%, 拆卸时间缩短了 40%。虽然 RRDAS 是有伞空投系统, 主要用来空投装甲车辆等大型装备, 但随着自充气气囊缓冲技术的成熟, 凭借可重复使用和回收时间短等优势, 美国也计划在无伞空投上使用该装置。目前, 随着智能算法应用的普及, 智能控制缓冲气囊已如雨后春笋般呈现于各个领域^[34-35], 推动气囊缓冲技术向控制智能化、功能多样化方向发展^[36]。

综上所述, 缓冲气囊技术在重型装备的着陆缓冲领域已取得重要突破, 缓冲气囊以其卓越的能量吸收效率和灵活的结构设计, 证明了其在无伞空投技术领域的重要地位。随着智能控制缓冲气囊技术的持续发展, 其在无伞空投系统中的应用展现出巨大的潜力, 特别是在增强空投系统的智能性、安全性以及提升其可持续性方面, 满足了多样化的物资投送需求。

2.5 泡沫金属复合材料研究现状

泡沫金属复合材料是一种轻质高强度的材料, 具有低密度、高冲击吸收、耐高温、耐火性、耐腐蚀、

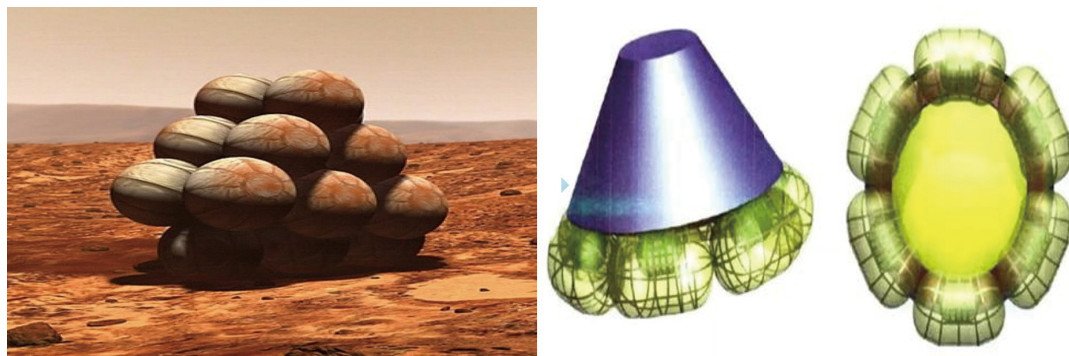


图 5 “探路者号”气囊和“猎户座”第二代气囊

Fig.5 "Pathfinder" airbag and "Orion" second-generation airbag



图 6 RRDAS 空投系统缓冲气囊
Fig.6 Rapid Rigging De-Rigging Airdrop System cushioning airbags

高电磁屏蔽和耐候性等优点。该材料是在金属或金属合金中加入添加剂, 并采用发泡工艺制成的, 它结合了金属和气泡的特性, 提供优异的冲击吸收、能量耗散及负载承载能力。泡沫金属复合材料通常用于抗冲击和缓冲性能要求较高的场合, 广泛应用于汽车工业、航空航天、装备防护等多个领域。此外, 在无伞空投中, 使用泡沫金属复合材料包裹精密仪器, 可以有效发挥减震和吸能的效果。

国外对泡沫金属复合材料的研究较早, 美国研制了一种泡沫铝空投箱, 用于缓冲物资, 如图 7 所示。该箱由两层叠加的泡沫铝板组成, 并在相邻的泡沫铝板之间安装了压缩弹簧, 这使得泡沫铝板拥有出色的冲击吸收特性, 并通过压缩弹簧达到缓冲效果。这种双重的冲击吸收特性有助于避免在空中撞击地面时对内部材料造成损害。泡沫铝作为无伞空投缓冲材料, 具有轻质、高强度和高刚度的特点, 不仅可以提高强度和耐用性, 还提升了空投的效率和精确度, 并能够降低成本, 非常适合空投救援物资。Marx 等^[37]讨论了不同类型复合金属泡沫的加工和基本力学、微观结构和物理性能, 并重点研究了复合泡沫金属的高应变率性能、弹道性能、辐射衰减和热性能的最新进展。Garg 等^[38]研究了含有开孔金属泡沫夹芯夹层的自由振动和弯曲行为, 详细探讨了

孔隙分布、端部条件、夹芯厚度、泡沫系数对梁行为的影响。Grilec 等^[39]通过准静态单轴压缩研究闭孔泡沫铝, 以确定外力对泡沫铝能量吸收特性的影响, 分析了能量吸收能力和能量吸收效率与压缩力的关系, 结果表明高密度泡沫的能量吸收能力增强得更快。Kováčik 等^[40]讨论了混合石墨和 SiC 粉末对泡沫铝性能的影响, 在恒定密度下研究了所制备的含有增强颗粒的泡沫铝的微观结构和力学性能, 并与纯泡沫铝进行了比较, 结果显示粉末的加入改变了泡沫的缓冲性能。

综上所述, 泡沫金属复合材料的研究与开发为无伞空投用缓冲材料的设计和应用提供了新的方向。随着研究的深入, 泡沫金属复合材料的缓冲性能将进一步优化, 以实现良好的抗冲击和能量吸收能力, 在无伞空投缓冲材料领域是一个非常重要的研究方向。

2.6 智能缓冲材料研究现状

受到自然界生物的启发, 日本科学家高木俊宜首先将智能概念引入材料和结构领域, 提出了智能材料 (Smart Materials) 的概念。智能材料是一种具有感知、分析和处理环境刺激, 并能进行自我响应、自诊断、自适应、自学习和自修复的材料结构^[41]。智能材料被认为是继天然材料、合成高分子材料和人工设计

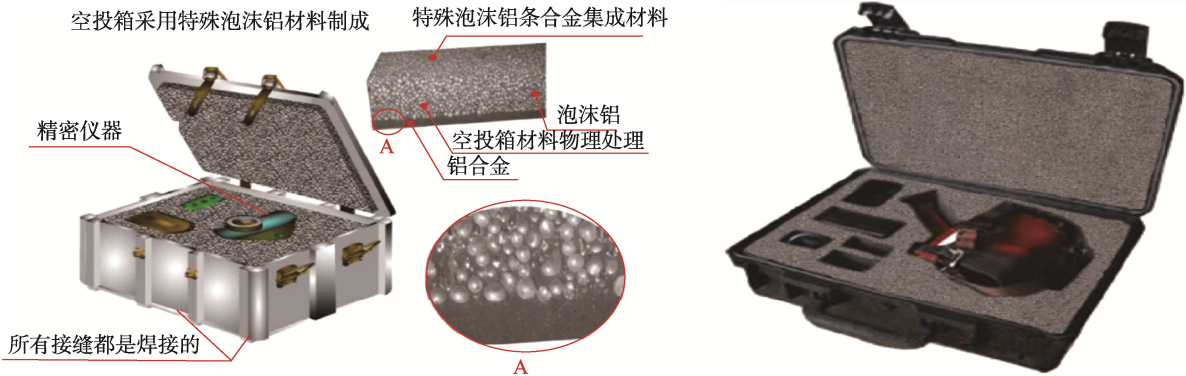


图 7 泡沫铝缓冲物资箱
Fig.7 Aluminium foam cushioning material box

材料之后的第四代材料,是现代高技术新材料发展的重要方向之一。智能材料的应用将促进缓冲技术的发展,使传统意义下的缓冲材料实现结构功能化和功能多样化。

研发新型材料以不断取代传统材料是材料发展的永恒话题。英国工程师理查德·帕尔默发明的 D3O 材料是一种由“智能分子”组成的非牛顿液体抗冲击材料,该材料由黏胶液和聚合物化合而成^[42-43],可在不同的重力冲击下呈现出坚硬与柔软 2 种力学性能状态。在遭受外力剧烈冲击时, D3O 能够有效分散所受冲击力,具有较高的减振性能,适用于制造防碰撞保护产品。2013 年,美国麻省理工学院的 Tibbitts 提出 4D 打印概念^[44]。4D 打印技术研究主要集中在开发能够响应外界刺激的智能材料上^[45-46],如图 8 所示,使用智能材料进行增材制造,可以使成型固件在外界环境的刺激下发生形状、结构或功能的时间维度上的改变。4D 打印材料抗冲击原理不仅依靠材料的缓冲结构,更多依赖于智能材料内部微观上分子的摩擦、碰撞等吸收能量,这种特殊的吸能结构大大提高了缓冲性能。目前,4D 打印常见的智能材料包括形状记忆水凝胶 (Shape Memory Hydrogels, SMH)、形状记忆陶瓷 (Shape Memory Ceramics, SMCR)、形状记忆合金 (Shape Memory Alloys, SMA)、形状记忆复合材料 (Shape Memory Composites, SMC) 和形状记忆聚合物 (Shape Memory Polymers, SMP)^[47]。随着科学研究的不断深入,智能材料可以制成具有防护、环境感应、压力监测和定位追踪功能的缓冲材料,

从而提高无伞空投的精度和安全性。4D 打印将在机器人开发、智能材料制造、航空航天以及生物医学等多个领域展现广阔的应用前景^[48]。

综上所述,智能材料与 4D 打印技术的结合带来了革命性的变革,为无伞空投缓冲材料的应用提供了新的思路和方法,不仅提升了空投物资的安全性,也为应急救援等领域提供了更加高效和可靠的解决方案。随着这些技术的不断成熟和创新,预计智能材料将在未来的无伞空投系统中扮演更加重要的角色,更好地适应复杂多变的环境需求。

3 缓冲材料性能对比

无伞空投技术在物资投送领域展现出独特的优势,同时对包装缓冲材料提出了更高的要求。在选材上,应选择耐锈蚀、耐高低温、防水防潮、质量轻、刚性强、韧性好的材料。投送不同物资类型时,需要比较不同材料的性能。由于缓冲原理不同,无伞空投在匹配物资类型、空投精确性和空投成本等方面存在较大差异。不同缓冲材料在性能上各有优势和局限,其性能特点及物资适用性见表 1。

综上所述,通过对各类缓冲材料的性能的对比,可知蜂窝纸板和瓦楞纤维板具备良好的加工性、成本低、强度和高刚度、使用温度范围比泡沫塑料宽、没有环境污染等优点,是最常用的无伞空投物资缓冲材料。缓冲气囊可以重复使用,具有较强的地面适应能力。当气囊采用多层聚乙烯薄膜与高强度、耐磨损的尼龙

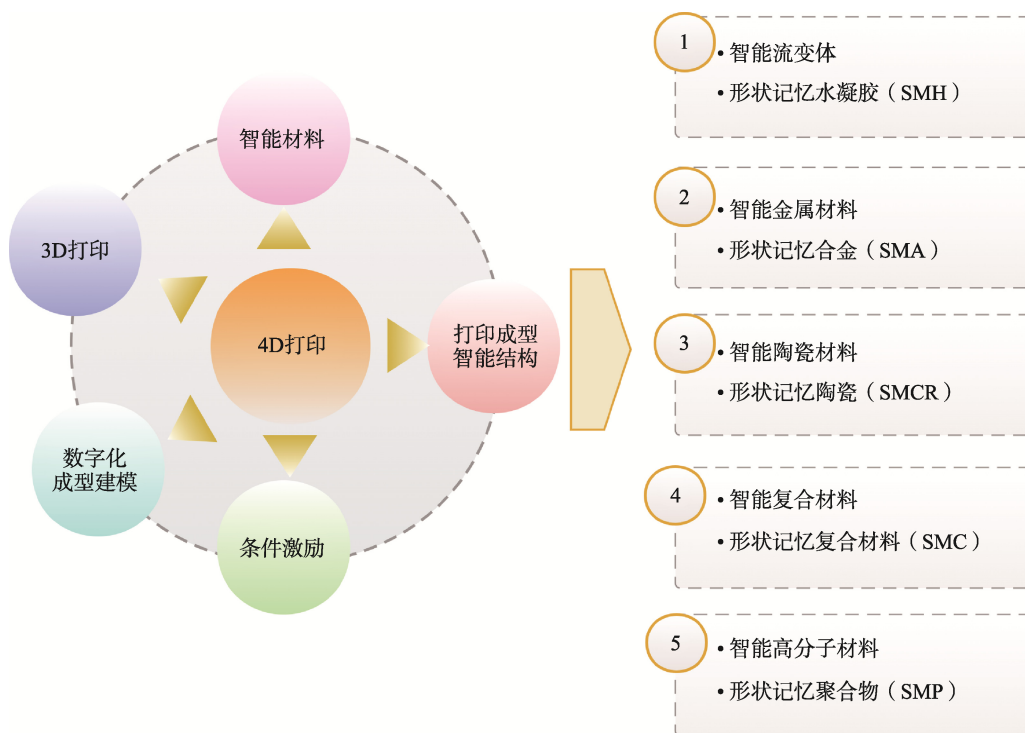


图 8 4D 打印智能材料
Fig.8 Smart materials for 4D printing

表 1 缓冲材料性能比较
Tab.1 Comparison of cushioning material performance

缓冲材料类型	缓冲原理	优点	缺点	匹配物资类型
蜂窝纸板	利用蜂窝状结构增加稳定性和抗弯曲性, 通过塑性变形吸收和分散冲击力	高强度、轻量化、防震性能好、环保可再生	加工性差, 物理性能有限, 对湿度敏感, 防潮性能较差, 容易受到雨雪天气影响	急救药品、食物和水、通信器材等轻型非易碎物资
瓦楞纤维板	通过波纹状形态提高强度和稳定性	轻便、环保、成本低, 具有较宽的使用温度范围	易损坏, 湿度敏感, 强度和承载能力有限	食物、衣物、散装液体、医疗用品、小型零件等轻质物资
高分子泡沫	采用多孔结构吸收和分散能量, 其内部气体能够缓冲冲击力	密度轻、成本低, 缓冲防震性能优越	压缩后不易恢复, 且耐候性较差	应急物资包、小型发电机、通信设备和维修器材等易碎及敏感物资
气囊	气囊内部气体压缩做功吸收冲击能量, 排气装置控制冲击载荷	安装简便、可折叠、质量轻、强度高、良好的弹性和恢复性	维护要求高, 耐用性较差, 对环境条件敏感, 容易在尖锐物体的撞击下破裂	坦克、装甲车等重型及高价值物资
复合泡沫金属	形变吸收和分散冲击能量, 金属基体保持结构稳定性和重复使用性	温湿度稳定性好、密度低、冲击吸收高、耐火性强及电磁屏蔽	成本高, 技术难度大, 可能造成环境污染, 不易回收	医疗物资、通信设备、弹药、武器装备、精密仪器和燃料等通用物资
智能缓冲材料	在落地撞击时改变其刚度或形状, 以吸收更多的冲击力, 保护空投物资不受损	响应外部刺激, 具有自组装、多功能和自修复等特性, 能够提高系统效率, 安全可靠	处于理论研究阶段, 用于 4D 打印的智能材料种类有限, 打印效率低, 设计复杂, 且成本相对较高	通信设备、精密仪器等贵重物资

布作为缓冲气垫的表面材料时, 可广泛应用于坦克、装甲车等重型物资的空投。然而, 缓冲气囊技术也存在缓冲行程有限和控制精度不高等缺点。高分子泡沫缓冲材料能有效提高物资着陆的安全性、稳定性、降低装备损坏与维修成本, 提升应急救援效率。新型复合泡沫金属和智能缓冲材料由于成本高、技术难度大, 目前仍处于理论研究阶段, 应用尚不成熟。下一步应针对新型复合材料在无伞空投的应用现状, 对其关键技术进行深入研究, 重点探讨新型复合材料中各种不同类型的缓冲性能及其缓冲机理, 并通过数值模拟和过程仿真手段分析不同材料的吸能过程与吸能效果。

4 无伞空投缓冲材料未来发展趋势

随着科技的不断进步, 高性能缓冲材料的研制和应用进一步提高了无伞空投精度, 实现了快速高效的物资补给, 并为无伞空投提供了巨大的发展前景。

一是加强环保缓冲材料的开发利用。随着环保意识日益增强, 低碳环保已成为缓冲材料的主流趋势, 探索基于生物基材料的解决方案显得尤为重要, 这些材料不仅具备出色的缓冲性能, 还具有可生物降解和可回收利用的特点, 满足了当前对生态环保的要求, 提高了环境治理水平。

二是创新物资包装设计以提升质量。物资的包装方式直接关系到缓冲性能和下降的加速度, 结合生物

仿生设计, 借鉴飞行生物的空气动力学结构和原理, 设计出更具有适应性和高效缓冲性能的包装。在下降过程中凭借特殊的空气动力学设计起到减速效果, 从而降低落地时承受的冲击力。此外, 设计多层缓冲结构, 通过不同层次的缓冲材料, 实现多级的冲击吸收和缓冲效果。

三是聚焦新型聚合物吸能材料的发展。随着新型材料技术的不断发展, 纳米纤维材料、复合泡沫金属材料等更先进材料的研发, 将带来更高的吸能和抗冲击性能。通过优化聚合物材料的分子结构和制备工艺, 使其能够承受更大的冲击力并保持较低的变形。随着 4D 打印技术的发展, 未来的缓冲材料可能会通过增材制造来生产, 这将为复杂形状和定制化设计的新型聚合物缓冲结构带来新的可能。

四是集成智能化技术的智能缓冲材料。智能材料可以用于制造自充气气囊开关, 当气囊与地面接触时将自动充气, 为物资提供额外的缓冲保护。无伞空投物资包装也可以集成智能化技术, 在包装中加入传感器、物联网、射频识别等设备, 以实时监测投送物资的状态、性能、接收和使用情况。智能材料在未来具有广泛的应用前景和巨大的发展潜力。

5 结语

本文综述了国内外无伞空投用缓冲材料的研究进展, 详细总结了各类缓冲材料的性能特点, 瞄准无

伞空投技术向智能化、集成化、低成本、无污染、再利用的方向发展。集成信息化的智能缓冲材料能大幅提高物资无伞空投的精确性和可靠性,势必引领未来无伞空投发展的新趋势。

参考文献:

- [1] 郭洁, 蒋明明, 林德鑫. 自由空投系统物资匹配分析对我国的启示[J]. 机械工程, 2023, 5(7): 103-105.
GUO J, JIANG M M, LIN D X. Enlightenment of Material Matching Analysis of Free Airdrop System to China[J]. Mechanical Engineering, 2023, 5(7): 103-105.
- [2] 赵西友, 李彦平, 王静伟, 等. 滚塑无伞空投储水罐的设计与分析[J]. 中国塑料, 2019, 33(1): 111-115.
ZHAO X Y, LI Y P, WANG J W, et al. A Design and Analysis of Rotationally Molded Water Storage Tank in Free Drop[J]. China Plastics, 2019, 33(1): 111-115.
- [3] 习赵军, 胡麟, 李毅超, 等. 聚氨酯/聚乙烯水袋无伞空投跌落仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 211-215.
XI Z J, HU L, LI Y C, et al. Numerical Investigation of Free Drop of Polyurethane/Polyethylene Water Bag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 211-215.
- [4] 贾山, 高翔宇, 陈金宝, 等. 低空无伞无损空投包装设计及其自稳和缓冲性能验证[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 1-14.
JIA S, GAO X Y, CHEN J B, et al. Design of Low Altitude Free Drop Packaging and Verification of Its Self-Stability and Cushioning Performance[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(2): 1-14.
- [5] 张宇婷, 耿小凯, 任春华, 等. 无伞空投储液罐的高空跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 66-74.
ZHANG Y T, GENG X K, REN C H, et al. Simulation Analysis of Liquid Storage Tank for Free Drop[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 66-74.
- [6] 史永胜, 孙文泽. 纤维混杂铺层对无伞空投箱抗冲击性的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 300-308.
SHI Y S, SUN W Z. Effects of Fiber Hybrid Layer on Impact Resistance of Airdrop Box without Parachute[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(1): 300-308.
- [7] 杨国华, 杨佳琳, 王兵, 等. 一种低空投送用缓冲蜂窝纸箱: 中国, 218259621U[P]. 2023-01-10.
YANG G H, YANG J L, WANG B, et al. A Kind of Cushioning Honeycomb Carton for Low Altitude Delivery: China, 218259621U[P]. 2023-01-10.
- [8] 刘胜祥, 王兴业, 徐丽丽, 等. 蜂窝纸板在空投包装中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 25-29.
LIU S X, WANG X Y, XU L L, et al. Application of Honeycomb Paperboard in the Packaging of Airdrop[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 25-29.
- [9] SMARDZEWSKI J, GAJCKI A, WOJNOWSKA M. Investigation of Elastic Properties of Paper Honeycomb Panels with Rectangular Cells[J]. Bioresources, 2019, 14(1): 1435-1451.
- [10] GABRIELA K F, WŁODZIMIERZ S, ZBIGNIEW K. Calculation of Honeycomb Paperboard Resistance to Edge Crush Test[J]. Materials, 2020, 13(7): 1706-1720.
- [11] ASHRAFF ALI K S, SURESH KUMAR S, ALLEN JEFFREY J, et al. An Insight into Stress and Strain Analysis over on Hexagonal Aluminium Sandwich Honeycomb with Various Thickness Glass Fiber Face Sheets[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 493-499.
- [12] MINUPALA V K, ZSCHEYGE M, GLAESSER T, et al. Numerical Modelling of the Thermoforming Behaviour of Thermoplastic Honeycomb Composite Sandwich Laminates[J]. Polymers, 2024, 16(5): 594-609.
- [13] JESUS P, HOLT M, JACOB W, et al. Experimental Characterization of Impact Attenuation for Small Payloads[C]// 26th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. Toulouse: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022: 2721.
- [14] WEI X Y, XIONG J, WANG J, et al. New Advances in Fiber-Reinforced Composite Honeycomb Materials[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(8): 1348-1370.
- [15] CAMPBELL A. The Use of A-flute, B-flute, AC-flute, and BC-flute Corrugated Paperboard as A Cushioning Material[D]. South Carolina: Clemson University, 2010.
- [16] SINGH S P, SINGH J, SAHA K. Effect of Palletized Box Offset on Compression Strength of Unitized and Stacked Empty Corrugated Fiberboard Boxes[J]. Journal of Applied Packing Research, 2011, 5(3): 157-167.
- [17] CHEN Z, KATSUHIKO S. Simplified Performance Evaluation Methods for Cushioning Materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 136-142.
- [18] ZULAIKAH S, TRIAWAN F, BUDIMAN B A. Study on the Mechanical Properties and Behavior of Corrugated Cardboard under Tensile and Compression Loads[J]. Materials Science Forum, 2023, 1092: 45-54.
- [19] SAFWA M, YEDDU H K, LEMINEN V. Modeling of the Thermoforming Process of Paperboard Composites for Packaging[J]. Bioresources, 2024, 19(2): 2120-2134.
- [20] XI H F, SHU X B, CHEN M J, et al. Drop Cushioning Dynamic Effects of Corrugated Cardboard With Effective Anisotropic Constitutive Model[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2024, 20(1): 142-158.
- [21] RODRIGUEZ A E, PLASCENCIA H, LEDESMA E R, et al. Numerical Analysis of Energy Absorption in Expanded Polystyrene Foams[J]. Journal of Cellular Plastics, 2020, 56(4): 411-434.

- [22] KASSIM N, RAHIM S Z A, IBRAHIM W A R A W, et al. Sustainable Packaging Design for Molded Expanded Polystyrene Cushion[J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1723-1742.
- [23] MISHRA R K, SABU A, TIWARI S K. Materials Chemistry and the Futurist Eco-Friendly Applications of Nanocellulose: Status and Prospect[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2018, 22(8): 949-978.
- [24] SOHN S J, KIM K H, KIM W S, et al. Biodegradable Foam Cushions as Ecofriendly Packaging Materials[J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1731-1744.
- [25] GUSTAFSSONA E, SONESA R, COWANB W, et al. The Road to Sustainable Packaging Cushioning-Foamed Cellulose Fibre[EB/OL]. (2024-04-18)[2024-06-17]. <http://hdl.handle.net/2429/87852>.
- [26] NECHITA P, NĂSTAC S M. Overview on Foam Forming Cellulose Materials for Cushioning Packaging Applications[J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 1963-1986.
- [27] TUOMO H, KETOJA J A, HARRI K, et al. Foam Forming of Fiber Products: A Review[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2022, 43(10): 1462-1497.
- [28] ZHANG B, TAO W, REN Z, et al. Biodegradable Wastepaper-Based Foam with Ultrahigh Energy-Absorbing, Excellent Thermal Insulation, and Outstanding Cushioning Properties[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(49): 17543-17551.
- [29] NARKE A, YADAV M. FIBI-Buffer an Alternative Packaging Material for Polyurethane[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72: 1479-1485.
- [30] STEIN J, SANDY C. Recent Developments in Inflatable Airbag Impact Attenuation Systems for Mars Exploration[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Structural Dynamics and Materials Conference. Norfolk, 2003: 1900-1906.
- [31] SHOOK L S, TIMMERS R B, HINKLE J. Second Generation Airbag Landing System for the Orion Crew Module[C]// 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Seattle: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 2009-2989.
- [32] ZHOU X, ZHOU S M, LI D K, et al. Research on Design and Cushioning Performance of Combined Lunar Landing Airbag[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 191: 55-78.
- [33] LU C, CHEN J, WANG C, et al. Landing Cushioning Analysis of New Generation Heavy Airborne Armored Vehicles[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2024, 96(4): 621-630.
- [34] IBRAHIM M, SHAWISH S, ALDROUBI S, et al. Airbag Protection and Alerting System for Elderly People[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(16): 9354.
- [35] QIAN L. A Technical Study on Snowboard Suits Equipped with Intelligent Airbag Buffering Devices[J]. *Highlights in Art and Design*, 2024, 5(2): 68-70.
- [36] 沈超, 杜建国, 李万华, 等. 气囊缓冲技术研究现状与应用启示[J]. *噪声与振动控制*, 2023, 43(2): 1-8.
- [37] SHEN C, DU J G, LI W H, et al. Research Status and Application Inspiration of Airbag Buffer Technology[J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(2): 1-8.
- [38] MARX J, RABIEI A. Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(11): 1-13.
- [39] GARG A, CHALAK H D, BELARBI M O, et al. A Parametric Analysis of Free Vibration and Bending Behavior of Sandwich Beam Containing an Open-Cell Metal Foam Core[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(1): 368-341.
- [40] GRILEC K, BUNJAN I, JAKOVljević S. The Influence of Applied Force on Aluminium Foams Energy Absorption[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2021, 28(4): 1388-1394.
- [41] KOVÁČIK J, NOSKO M, MINÁRIKOVÁ N, et al. Closed-cell Powder Metallurgical Aluminium Foams Reinforced with 3 vol.% sic and 3 vol.% Graphite[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 2031-2046.
- [42] BARBER Z H, CLYNE T W, SITTNER P. Smart Materials[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30: 1515-1516.
- [43] DADA M, GHREWATI B E, DAS M R. Protection of Vital Facilities from the Threat of External Explosion Using D3O Material[C]// Recent Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 475-483.
- [44] SHARGAWI A A, JORGENSEN M J, HAKANSSON N A, et al. Energy Absorbency and Impact Resistance of D3O®Materials Under Dynamic Impact Loadings[J]. *Science Publishing Group*, 2023, 10(1): 1-10.
- [45] TIBBITS S. 4D Printing: Multi-Material Shape Change[J]. *Architectural Design*, 2014, 84: 116-121.
- [46] MOHOL S S, SHARMA V. Functional Applications of 4D Printing: A Review[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, 27(8): 1501-1522.
- [47] KANTAROS A, GANETSOS T, PIROMALIS D. 3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry 4.0[J]. *Papers Ssrn*, 2023, 4: 12-22.
- [48] MAHMOOD A, AKRAM T, CHEN S G, et al. Revolutionizing Manufacturing: A Review of 4D Printing Materials, Stimuli, and Cutting-Edge Applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 266: 110952.
- [49] FU P, LI H, GONG J, et al. 4D Printing of Polymeric Materials: Techniques, Materials, and Prospects[J]. *Progress in Polymer Science*, 2022, 126: 1-16.