文章编号：1003-1480（2026）01-0001-07

基于球壳阵列缓冲结构的爆炸螺栓降冲击仿真

景天雨[1,2]，姜永生[2]，王献超[1]，李世栋[1]，倪彦朝[1]，康会峰[2,3]，康 骁[4]

（1. 北京机电工程总体设计部，北京，100854；2. 北华航天工业学院 河北省微纳卫星协同创新中心，河北 廊坊，065000；3.北华航天工业学院 河北省跨气水介质飞行器重点实验室，河北 廊坊，065000；4. 北京理工大学 先进结构技术研究院，北京，100081）

摘 要：为抑制航天器分离过程中爆炸螺栓解锁所诱发的火工冲击，本研究提出一种球壳阵列缓冲垫块，并运用任意拉格朗日-欧拉（ALE）流固耦合方法，系统探究其孔隙率、高度以及材料对冲击响应谱（SRS）的影响。研究结果显示：缓冲垫块借助逐层胞元的屈曲、弯曲以及局部破碎，实现“级联式”能量吸收，能够显著降低高频冲击。当孔隙率为 70%、高度为 3 层（约 14.4 mm）时，SRS 峰值达到最低，测点 1 和测点 2 的 SRS 峰值分别降低 48.1% 和 52.7%，且该结构可通过 3D 打印技术制造。对 4340 钢、Ti-6Al-4V、2024 铝以及紫铜等材料进行对比分析发现，低屈服强度的铜合金与铝合金在中高频段展现出明显的降冲击优势，其中铜材料使 4 500 Hz 处的 SRS 峰值相较于钛合金降低 4 324g。综合考量缓冲性能、工艺可行性以及航天无多余物要求，推荐选用孔隙率为 70%、高度为 3 层的 2024 铝合金阵列垫块。本研究为爆炸螺栓的降冲击设计提供了可直接用于工程实践的参数依据。

关键词：爆炸螺栓；球壳阵列；缓冲结构；孔隙率；冲击响应谱

中图分类号：TJ450.3；TQ560.5 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.001

Impact Mitigation Simulation of Explosive Bolts Based on a Spherical-Shell Array Buffer Structure

JING Tian-yu[1,2]，JIANG Yong-sheng[2]，WANG Xian-chao[1]，LI Shi-dong[1]，NI Yan-zhao[1]，KANG Hui-feng[2,3]，KANG Xiao[4]

（1.The System Design Institute of Mechanical-electrical Engineering，Beijing，100854；2. Hebei Collaborative Innovation Center of Micro Nano Satellites, North China Institute of Aerospace Engineering，Langfang，065000；3. Hebei Provincial Key Laboratory of Cross-Media Flight Vehicles，North China Institute of Aerospace Engineering，Langfang，065000；4. Institute of Advanced Structure Technology，Beijing Institute of Technology，Beijing，100081)

Abstract：To mitigate the pyro-shock generated by explosive-bolt unlocking during spacecraft separation, a spherical-shell array cushion is proposed. Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE) fluid-solid coupling simulations were performed to quantify the influence of porosity, height and material on the shock response spectrum (SRS). The pad absorbs energy in a “cascading” mode through sequential cell buckling, bending and local fracture, markedly attenuating high-frequency shock. At 70% porosity and three-unit-cell height (≈14.4 mm), SRS peaks at measurement points 1 and 2 are reduced by 48.1% and 52.7%, respectively, and the geometry is readily additively manufactured. Among 4340 steel, Ti-6Al-4V, 2024 Al and pure copper, the low-yield-strength copper and aluminium alloys outperform the others in the mid- and high-frequency bands; copper lowers the 4 500 Hz SRS peak by 4 324g compared with titanium. Balancing attenuation performance, manufacturability and the zero-debris requirement of space missions, a 70 % porosity, three-layer 2024 aluminium alloy pad is recommended. The findings provide directly applicable design parameters for low-shock explosive-bolt systems.

Key words：Explosive bolt；Spherical-shell array；Buffer structure；Porosity；Shock response spectrum（SRS）

爆炸螺栓作为一种点式火工分离装置，在航天器 分离过程中发挥着重要作用。然而，其解锁过程中产

收稿日期：2025-12-10
作者简介：景天雨（1990-），男，工程师，从事分离结构设计研究。
基金项目：国防基础科研项目（JCKY2022407）。
引用本文：景天雨，姜永生，王献超，等. 基于球壳阵列缓冲结构的爆炸螺栓降冲击仿真[J]. 火工品, 2026(1): 01-07.

生的冲击波会对航天器内部设备造成严重损害，尤其是在高频、高幅值的冲击环境下，精密电子设备和微机构的失效风险显著增加[1-2]。爆炸螺栓在分离过程中的冲击响应主要来源于内部炸药爆炸与解锁过程中的机械撞击（尤其是螺杆与回收装置之间的碰撞[3]）。目前，针对爆炸螺栓冲击抑制的主要技术路径包括优化装药量、调整预紧力以及引入缓冲结构等[4-6]。然而，前两种方法在实际应用中存在一定局限性：减小装药量可能削弱分离可靠性，而降低预紧力则会削弱连接刚度，影响整体结构性能。相比之下，增加缓冲结构是减小机械撞击从而降低整体冲击响应的一种有效且可行的方式。

在各类缓冲形式中，阵列结构由于具备开放的胞元形态、宽广的孔隙率可调范围，以及轻质、高强、多功能（如散热、吸声）等优异特性，已在航空航天、汽车与生物医疗等领域获得广泛应用[7-8]。近年来，已有学者将阵列结构引入爆炸螺栓缓冲设计中，并开展了一系列研究，例如，王玉玺等[9]通过有限元仿真分析了装药量与断裂端面尺寸对冲击响应的影响；杨浩[10]研究了不同切口参数下爆炸螺栓的断裂特性与冲击响应，指出切口角度 90° 、深度 0.08 cm 为较优参数组合；高志波[11]基于多孔材料应力波理论，证实蜂窝与金字塔点阵结构具有优异的隔冲性能；康骁等[12]通过引入三维手性负泊松比点阵，显著降低了捕获器的冲击响应谱（SRS）峰值，凸显了点阵结构在冲击能量吸收方面的潜力。

然而，上述工作多聚焦于结构形式或宏观参数优化，而阵列结构的孔隙率，高度以及材料是影响其吸能特性的重要因素。张忠凯等[13]虽发现泡沫铝在缓冲性能方面表现突出，但其结构强度低、易产生碎屑等缺陷，在强调“无多余物”的航天环境中难以满足工程应用要求。

针对现有研究中关于阵列结构参数与材料影响机制的不足，本文基于任意拉格朗日-欧拉（ALE）流固耦合数值方法，系统探究球壳阵列缓冲垫块的孔隙率、高度及材料属性对爆炸螺栓冲击响应谱的影响规律，旨在为发展兼具高效吸能、良好工艺性与零碎片风险的新型缓冲结构提供理论依据与可工程化的参数指导，以更好地满足航天器高可靠分离与精密载荷保护的双重需求。

1　分离装置及缓冲结构设计

1.1　分离装置

本文所采用的分离装置如图 1 所示，主要由测板、爆炸螺栓壳体、活塞、螺母、保护帽以及阵列形式的缓冲垫块等部件组成。其中，测板采用尺寸为 30 cm × 30 cm × 1.5 cm 的方形铝板模拟实际结构。

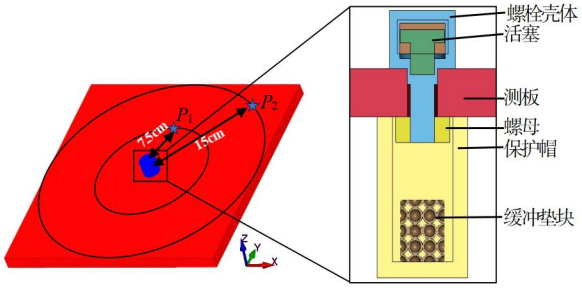


图 1　爆炸螺栓分离装置几何模型及测点布置

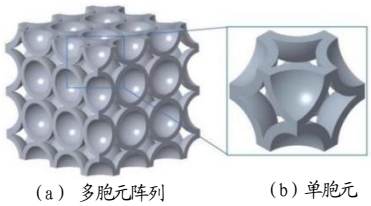
Fig.1　Geometric model of the explosive bolt separation device with sensor location

图 1 中标注的测点 P_1 和 P_2 分别位于距离爆炸中心 7.5 cm（中场）和 15 cm（远场）处，用于采集加速度数据。

爆炸螺栓分离装置的解锁过程为：当接收到解锁信号时，爆炸螺栓壳体内部预先安装的高能炸药发生爆炸，产生高温高压气体。气体压力驱动活塞向下运动，使爆炸螺栓壳体在结构薄弱处因应力集中而发生剪切断裂。断裂后的两部分壳体沿相反方向运动，从而实现被连接结构的分离，分离方向为 Z 轴方向。

1.2　缓冲结构

本文采用的球壳阵列缓冲垫块如图 2 所示。



（a）多胞元阵列　　（b）单胞元

图 2　单胞元结构及多层球壳阵列缓冲垫块示意图

Fig.2　Schematic of a single unit cell and multi-layer spherical-shell array buffer pads

由图 2 可知，单胞元由 8 个 1/8 球形壳体组成，外形尺寸为 4.8 mm × 4.8 mm × 4.8 mm。多个胞元按周期性方式紧密排列，形成完整的缓冲结构。该构型

能使载荷在各方向上均匀传递与分散，有效缓解应力集中，并赋予结构较高的强度与优异的抗冲击性能。

在冲击载荷作用下，垫块的多层胞元依次发生塑性变形，通过胞元壁的弯曲、屈曲等变形方式耗散大量冲击能量，进而保护主体结构与内部设备。本文通过调节胞元壁厚以实现不同的结构孔隙率，并通过改变胞元层数（1 层对应一个完整的胞元高度）以调整垫块总高度。具体设计参数见表 1。

表 1　球壳阵列缓冲垫块的结构设计参数

Tab.1　Structural design parameters of the spherical-shell array buffer pad

设计参数	变量值
孔隙率/%	60，65，70，75
高度/层	1，2，3，4，5

本文中垫块采用的材料及材料属性如表 2 所示。

表 2　缓冲垫块候选材料的力学性能参数

Tab.2　Mechanical properties of the candidate buffer pad materials

材料	密度ρ/(g·cm^{-3})	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	屈服强度 A/MPa	抗拉强度 B/MPa	硬化指数 n	冲击功/J
4340 钢	7.85	200	0.30	735	473	0.26	90
Ti-6Al-4V	4.43	135	0.35	1 060	1 090	0.40	22
2024 铝	2.79	73	0.33	265	426	0.34	26
紫铜	8.96	119	0.40	90	210	0.31	100

2　仿真模型及参数设置

2.1　仿真模型

爆炸螺栓的解锁过程涉及复杂的流固耦合问题，传统的单一拉格朗日方法或欧拉方法难以对其进行有效的数值模拟。为此，本研究采用任意拉格朗日-欧拉（ALE）方法，该方法结合了两者的优势，通过允许网格独立于材料运动，既能跟踪材料粒子运动，又能避免网格畸变，特别适用于模拟爆炸冲击等大变形问题。考虑到模型的对称性，为提升计算效率，建立 1/2 对称模型，并在对称面上施加相应的对称边界条件。模型的网格划分如图 3 所示。

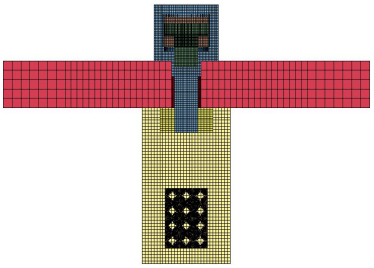


图 3　ALE 流固耦合仿真网格模型

Fig.3　Mesh model for ALE fluid-structure interaction simulation

在仿真中，流体域采用 ALE 网格，尺寸为 0.5 mm。为确保流固耦合界面数据传递的准确性，允许流体网格与固体部件网格在交界处适度重叠。其余固体部件均采用拉格朗日网格：其中测板网格尺寸为 3 mm，并在爆炸中心附近区域进行局部加密；缓冲垫块使用四面体网格，其他部件则采用六面体网格，尺寸均为 0.5 mm。接触设置方面，在螺栓壳体与螺母、保护帽与测板以及缓冲垫块与保护帽之间定义绑定约束；其余所有可能发生接触的部件表面之间均定义自动接触，摩擦系数设为 0.1。

2.2　材料模型

本研究中炸药选用 TNT，并通过 JWL 状态方程来描述炸药在爆炸螺栓腔室内爆炸的过程，具体参数如表 3 所示。

表 3　TNT 材料 JWL 状态方程参数[9]

Tab.3　JWL equation of state parameters for TNT explosive

ρ/(kg·m^{-3})	D/(m·s^{-1})	E/(MJ·kg^{-1})	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1 630	6 930	6	373.8	3.747	4.15	0.9	0.35

JWL 状态方程的表达式为：

$$\rho = A\left(1-\frac{\omega}{R_1\gamma}\right)\mathrm{e}^{-R_1\gamma} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2\gamma}\right)\mathrm{e}^{-R_2\gamma} + \frac{\omega E}{\gamma} \quad (1)$$

式（1）中：A，B，R_1，R_2，ω均为炸药固有参数；γ为相对体积；E为比内能。

对于爆炸螺栓，在解锁时会受到内部炸药爆炸冲击的影响而产生严重的塑性变形和断裂，因此采用 Johnson-Cook（J-C）本构模型来描述其材料特性。J-C 模型主要用于高应变率、大变形及高温条件下金属材料失效过程的计算，其表达式如下：

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)(1 - T^{*m}) \quad (2)$$

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0) \quad (3)$$

式（2）~（3）中：σ_y为动态屈服强度；A 为静态屈服强度；B 为硬化常数；C 为与应变率相关的常数；ε为等效塑性应变；n 为硬化指数；$\dot{\varepsilon}$为等效塑性应变率；$\dot{\varepsilon}_0$为初始应变率。T 为当前温度，K；T_0 为室温，取 298 K；T_m 为材料融化温度，K；m 为热指数，具体参数如表 4 所示。

表 4　爆炸螺栓材料 Johnson-Cook 本构模型参数[14]

Tab.4　Johnson-Cook constitutive parameters of the explosive bolt material

ρ_0/(kg·m^{-3})	A/MPa	B/MPa	n	m	C	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}	T_m/K
7 850	910	586	0.26	1.03	0.014	1	1 720

2.3　冲击响应谱

冲击响应谱（Shock Response Spectrum,SRS）是一种用于描述结构在瞬态冲击载荷作用下响应特性的工具，包括速度谱，位移谱和加速度谱等。在航天工程领域，通常采用加速度冲击响应谱作为评估冲击响应大小的标准。其计算方法是将冲击信号作为基础激励，应用于一系列具有不同固有频率的单自由度振动系统中，求出每个系统在冲击作用下的最大加速度响应，并以固有频率为横坐标、最大加速度响应为纵坐标绘制曲线。

本文采用加速度冲击响应谱作为衡量爆炸螺栓冲击响应大小的指标，计算参数依据国家标准[15]，放大系数为 10，频点间隔为 1/12 倍频程，采样率为 100 kHz。冲击响应谱分析的频率范围为 100 ~5 000 Hz，通过对提取的加速度时域曲线进行频谱转换，得到加速度冲击响应谱（简称冲击响应谱）。不加缓冲垫块时的爆炸螺栓测点 2 处的加速度时频转换曲线如图 4 所示。

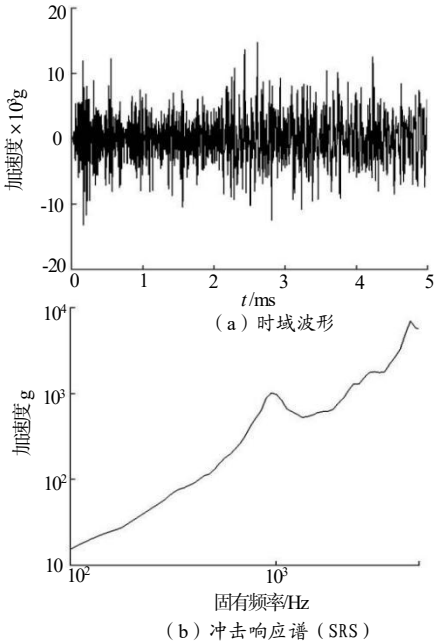


图 4　无缓冲垫块时测点 P_2 处加速度信号

Fig.4　Acceleration signal at measurement point P_2 without buffer pad

3　计算结果

3.1　球壳阵列缓冲垫块降冲击过程

球壳阵列缓冲垫块在爆炸螺栓解锁过程中的动态变形演化如图 5 所示。

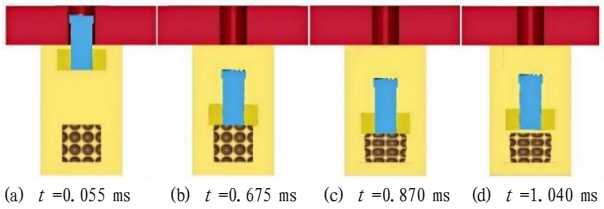


图 5　球壳阵列缓冲垫块在冲击载荷下的动态变形过程

Fig.5　Dynamic deformation process of the spherical-shell array buffer pad under impact loading

由图 5 可见，在初始时刻（0.055 ms），爆炸螺栓壳体被剪切断裂，螺杆开始向下运动；至 0.675 ms，螺杆接触缓冲垫块，垫块首先发生弹性变形，随后随冲击能量持续输入，迅速进入塑性阶段。胞元结构通过壁面屈曲、弯曲及局部压溃等方式吸收大量冲击动能。得益于多层阵列设计，各层胞元依次参与变形，形成“级联式”能量耗散机制，有效延缓冲击波传播并分散载荷。部分胞元因过度变形而发生局部破碎，进一步增强了能量耗散能力。至 0.870 ms，螺杆位移达极值并出现反弹趋势，此时垫块变形程度最大；至 1.040 ms，螺杆脱离垫块，吸能过程结束。整个过程中，缓冲垫块通过可控的塑性变形与局部破坏，显著削弱了传递至测板的冲击载荷。在缓冲垫块的变形过程中，通过仿真分析了关键部位的应力应变分布情况。两个不同时刻缓冲垫块的应力应变云图如图 6 所示。

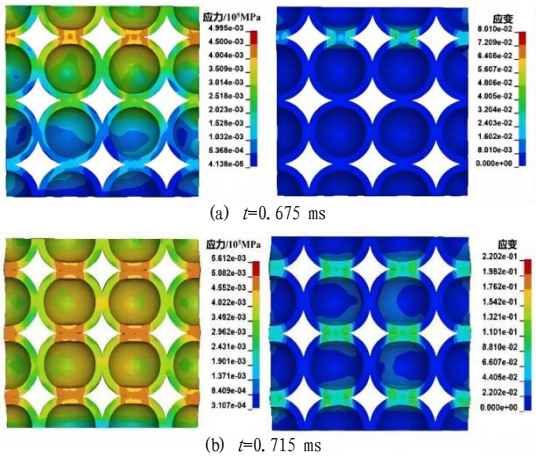


图 6　缓冲垫块在典型时刻的等效应力与等效塑性应变分布云图

Fig.6　Contour plots of equivalent stress and equivalent plastic strain in the buffer pad at representative time instants

从图 6 可以看出，冲击初期，应力集中于接触层胞元；随着变形发展，应力通过胞元壁的屈曲与弯曲向内层传递。高应变区域主要集中于胞元连接节点及壁厚较薄处，证实这些部位是能量吸收的核心区域。

3.2　孔隙率和高度对降冲击效果的影响

孔隙率（定义为孔隙体积与总体积之比）和结构高度是决定球壳阵列缓冲性能的关键参数。不同孔隙率（60%~75%）与高度（1~5 层）组合下垫块的冲击后变形形貌如图 7 所示。

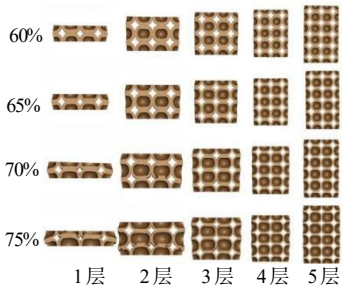


图 7　不同孔隙率与高度下缓冲垫块的冲击后变形形貌

Fig.7　Impact deformation morphology of buffer pads with different porosities and heights

横向分析表明，随着高度增加，结构稳定性显著提升。单层结构（1 层）因刚度不足，易被挤压堆叠，能量吸收能力有限；2 层结构通过上下层协同承载，实现层间能量传递；3 层及以上结构则展现出明显的多阶段变形特征——接触层率先屈曲，中间层与远端层依次参与，形成时间维度上的“级联吸能”机制。纵向分析显示：在相同高度下，孔隙率增大导致胞元壁厚减小，结构整体强度降低，但塑性变形能力增强，从而提升能量吸收效率。宏观上，孔隙率与高度共同调控结构的刚度-吸能平衡，进而决定其冲击响应特性。

为量化降冲击效果，固定高度为 3 层时，不同孔隙率对应的冲击响应谱（SRS），如图 8 所示。结果显示：随着孔隙率从 60%增至 75%，SRS 峰值在全频段（100~5 000 Hz）持续下降，尤以中高频段（1 000~5 000 Hz）最为显著。进一步提取 5 000 Hz 内 SRS 最大峰值，如图 9 所示。由图 9 可知，随着孔隙率的增加，相同高度下的冲击响应谱峰值呈现出显著的下降趋势。而在相同孔隙率条件下，随着高度的不断增加，冲击响应谱的最大峰值先减小后略微上升，3 层时达到最优。该非线性趋势源于双重机制：一方面，增加高度延长了冲击波传播路径，促进能量衰减；另一方面，过高层数（≥4 层）导致结构刚度过大，抑制塑性变形，反而削弱吸能能力。

定量分析表明：当孔隙率为 75%、高度为 3 层时，SRS 峰值最低（测点 1：145 1g；测点 2：156 2g），但此时最小胞元壁厚仅 0.42 mm，在当前商业金属增材制造工艺技术下可靠成形较为困难。超出当前金属增材制造工艺的可靠成形极限。

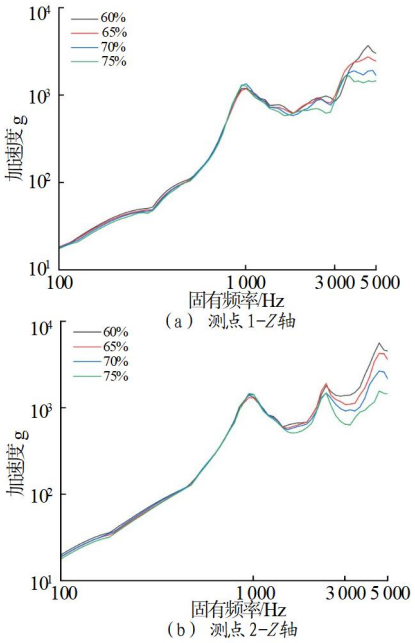


图 8　3 层高度下不同孔隙率冲击响应谱

Fig.8　Shock response spectra under three-layer height with different porosities

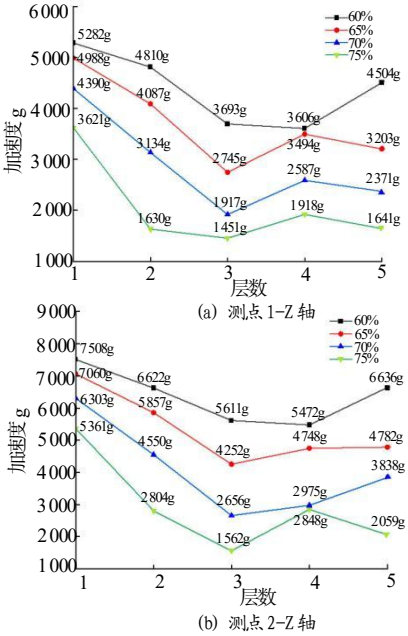


图 9　不同孔隙率与高度组合下冲击响应谱（SRS）峰值变化规律

Fig.9　Variation of SRS peak values with porosity and height combinations

相比之下，孔隙率 70%、高度 3 层的方案在制造

可行性与缓冲性能之间取得最佳平衡：测点 1 与测点 2 的 SRS 峰值分别为 1 917g 和 2 656g，较孔隙率 60% 工况分别降低 48.1%和 52.7%，且该工况下垫块最小胞元壁厚为 0.54 mm，在当前商业金属增材制造工艺技术条件下成型可靠性更高，同时，该尺寸满足航天器对安装空间的约束要求。

综上所述，垫块结构的孔隙率和高度对冲击能量的吸收和耗散有着密切影响。两者主要通过影响垫块结构的强度，改变缓冲垫块的塑性变形能力，进而影响垫块结构的吸能效应。在实际应用中，选择孔隙率为 70%、高度为 3 层的垫块结构能够在保证制造可行性的前提下，有效降低爆炸螺栓的冲击响应，实现较好的缓冲效果。

3.3　材料特性对降冲击性能的影响

基于孔隙率 70%、高度 3 层的基准结构，对比分析了紫铜、2024 铝合金、4340 钢、Ti-6Al-4V 合金（后简称铜、铝、钢、钛）4 种不同材料的缓冲性能差异。铜、铝、钢、钛 4 种不同材料下垫块结构在遭受冲击载荷时的变形情况如图 10 所示。

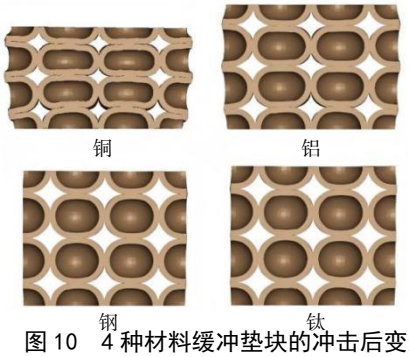


图 10　4 种材料缓冲垫块的冲击后变形对比

Fig.10　Post-impact deformation comparison of buffer pads made of four materials

由图 10 可知，铜与铝垫块在冲击后呈现显著塑性变形，而钢与钛结构以弹性变形为主，塑性变形耗能较差。这归因于前者较低的屈服强度（见 1.2 节表 2），使其更易启动塑性耗能机制。

测点 1 与测点 2 的 Z 向加速度 SRS 如图 11 所示。在全面评估不同材料的冲击响应谱（SRS）后发现，整体排序为铜<铝<钢<钛，表明铜和铝在吸收冲击能量方面表现优于钢和钛。具体到不同频段，低频段（<1 000 Hz）时，铜的 SRS 峰值显著低于其他材料，显示出其在低频范围内的卓越降冲击能力；进入中频段（1 000~3 000 Hz），铝开始展现出明显的降冲优势，其 SRS 峰值相较于钢和钛有显著下降；而在高频段（>3 000 Hz），铜与铝的 SRS 峰值大幅低于钢与钛，特别是在 4 500 Hz 处，铜的 SRS 峰值比钛合金低 4 324g，进一步证明了铜和铝在这段频率范围内对冲击能量的高效吸收特性。这一系列结果表明，在设计爆炸螺栓缓冲结构时，选择合适的材料对于优化各频段的降冲击效果至关重要。

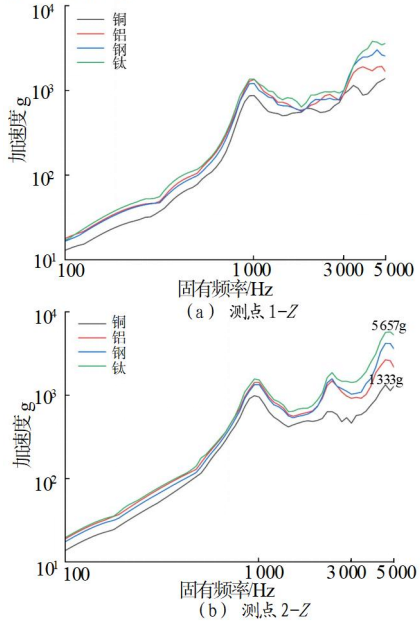


图 11　不同材料缓冲垫块的冲击响应谱对比

Fig.11　Comparison of shock response spectra for buffer pads made of different materials

在图 11 中，测点 2 的 SRS 曲线在约 1 000 Hz、2 400 Hz 和 4 500 Hz 处存在 3 个显著拐点，拐点峰值的柱状图如图 12 所示。

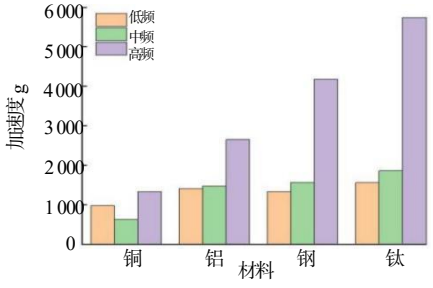


图 12　不同材料在特征频点处的冲击响应谱峰值（测点 2）

Fig.12　Peak shock response spectra values of different materials at characteristic frequencies (Measurement point 2)

3 个拐点对应不同频段能量传递特性转折。柱状图显示，各拐点处铜与铝的 SRS 峰值明显低于钢与钛，验证其优越的中高频吸能能力。这一现象根本原因是材料屈服强度有差异，低屈服强度材料易塑性变形，能高效耗散冲击能量，但强度过低会致结构过早密实化或碎裂，引发二次冲击风险。虽铜的缓冲性能最优，

但其高密度与较差的 3D 打印成形性限制工程应用。综合吸能性能、工艺可行性及“无多余物”要求，2024 铝合金是更优工程选择。所以，爆炸螺栓缓冲结构设计时，应结合载荷特性、空间约束与制造能力，多目标权衡优选材料，最大程度保护精密载荷安全。

4 结论

本文基于任意拉格朗日-欧拉（ALE）流固耦合数值方法，研究球壳阵列缓冲结构在爆炸螺栓降冲击应用中的性能影响机制，考察孔隙率、高度及材料 3 类关键参数对冲击响应谱（SRS）的调控作用，得出结论如下：

（1）球壳阵列缓冲垫块通过胞元壁的屈曲、弯曲及破碎形成“级联式”能量耗散机制，能吸收并衰减高频冲击能量，降低传递至航天器主体的冲击载荷。

（2）缓冲结构的孔隙率与高度对降冲击性能有显著耦合影响。研究范围内，孔隙率 70%、高度 3 层的构型综合性能最优，该组合吸能效率高，胞元壁厚满足金属增材制造工艺要求，兼顾航天器安装空间限制。

（3）材料特性对中高频段冲击抑制效果起决定性作用。相同结构参数下，低屈服强度的紫铜与 2024 铝合金缓冲性能优于 4340 钢和 Ti-6Al-4V，4 500 Hz 处铜的 SRS 峰值比钛合金低 4 324g。但紫铜 3D 打印易产生缺陷、成形稳定性差，2024 铝合金塑性好、强度适中、增材制造工艺成熟，是更具工程实用价值的优选材料。

综上所述，推荐采用孔隙率 70%、3 层高度的 2024 铝合金球壳阵列缓冲垫块，可在保障制造可靠性与安全准则的前提下，实现爆炸螺栓分离装置的高效低冲击设计，为航天器精密载荷冲击防护提供可工程应用的技术方案。

参考文献：

[1] 王军评, 毛勇建, 吕剑, 等. 爆炸螺栓冲击响应的主要影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 42-49.

[2] 胡迪科, 龙新军, 任海辽, 等. 点式星箭分离冲击环境减缓设计与减冲性能试验验证[J].航天器环境工程,2024,41(1): 61-67.

[3] 汤林, 杨树涛, 林鑫, 等. 中小型航天器爆炸螺栓解锁冲击响应特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(S1): 40-45.

[4] Li Y H, Li X G, Wen Y Q,et al. Optimal design of an explosive separation device based on LS-DYNA[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition), 2016(25):24-28.

[5] 潘忠文,赵宇辉,胡振兴,等.一种多材料组合的爆炸螺栓降冲击技术研究[C]//第十五届全国结构振动与动力学学术研讨会暨第三届全国冲击及防护工程学术研讨会论文集.北京:中国振动工程学会, 2023.

[6] 黄含军, 王军评, 毛勇建, 等 .爆炸螺栓预紧力对冲击响应影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 166-169.

[7] 吉芬.点阵结构引领轻量化设计新方向——激光 3D 打印中空点阵舱门结构应用研究[C]//中国航空学会会议论文集.成都:中国航空学会, 2016.

[8] 周浩, 张啸雨, 范华林, 等. 面向增材制造的航天器点阵结构设计与应用[C]//2018 年全国固体力学学术会议摘要集(下), 哈尔滨:中国力学学会,2018.

[9] 王玉玺, 王娟, 康骁, 等.飞行器爆炸螺栓分离冲击环境散布分析[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(6): 38-45.

[10] 杨浩.基于有限元的爆炸螺栓断裂特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[11] 高志波.基于多孔材料的航天器火工冲击隔离特性研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.

[12] 康骁,肖阳,王笑,等. 捕获器负泊松比蜂窝降冲击设计及其动态响应研究[J].宇航总体技术 ,2022,6(5): 10-17.

[13] 张忠凯, 夏冬星, 杨安民, 等. 三种缓冲材料在某型爆炸螺栓降冲击中的应用研究[J]. 火工品, 2018(2): 25-28.

[14] Holmquist T J, Templeton D W, Bishnoi K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large stain, high-stain rate, and high pressure applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001(25): 211-231.

[15] GB/T 29716.4-2018 机械振动与冲击 信号处理 第 4 部分:冲击响应谱分析[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2018.