文章编号：1003-1480（2026）01-0014-07

基于形状记忆复合材料的水下低噪声火工分离装置设计与性能研究

樊龙龙[1]，王 琦[2]，李 琳[2]，崔思林[2]

（1. 海军装备部，陕西 西安，710043；2. 陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061）

摘 要：针对水下武器装备对低噪声分离技术的迫切需求，设计了一种基于环氧基形状记忆复合材料（SMC）的火工分离装置。以 SMC 为初始锁紧元件，利用火工药剂燃烧热量触发其变形解锁。通过动态热机械分析（DMA）测定材料玻璃化转变温度（208.5 ℃），并获取回复精度（13 次循环后≥98%）及静态力学性能（纵向模量 36.21 GPa）等关键参数。构建含点火器、火药柱与分瓣螺母的试验装置，通过水下噪声测试（1.5 m 布点）及高速摄影冲击试验验证性能。装置分离冲击降至 296g（较传统火工分离装置降低 85%），水下噪声 90.11 dB（低于 100 dB 目标），接近海洋自然噪声水平（80~90 dB）。实航测试（水平距离 1 km）表明，装置工作噪声被航行噪声掩蔽，声学隐身特性显著。SMC 与火工技术的结合实现了低冲击、低噪声分离，为水下隐蔽装备提供了新思路。

关键词：形状记忆复合材料；火工分离装置；低噪声；水下解锁；冲击抑制

中图分类号：TJ450.3 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.003

Design and Performance Study of an Underwater Low-Noise Pyrotechnic Separation Device Based on Shape Memory Composites

FAN Long-long[1]，WANG Qi[2]， LI Lin[2]，CUI Si-lin[2]

（1.Navy Equipment Department, Xi’an, 710043；2. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi’an, 710061）

Abstract：To meet the urgent demand for low-noise separation technology in underwater weapon systems, a pyrotechnic separation device based on epoxy-based shape memory composites (SMC) was designed. The SMC serves as the initial locking element, and heat generated by pyrotechnic combustion triggers its shape recovery for unlocking. Key material parameters were obtained through dynamic mechanical analysis (DMA), including a glass transition temperature of 208.5 ℃, recovery accuracy ≥98% after 13 cycles, and longitudinal elastic modulus of 36.21 GPa. An experimental setup incorporating an igniter, propellant charge, and split nut was constructed. Performance was validated via underwater noise testing (measurement at 1.5 m) and high-speed photography for impact assessment. The device achieved a separation shock of 296g, representing an 85% reduction compared to conventional pyrotechnic devices, and an underwater noise level of 90.11 dB (below the 100 dB target), approaching the natural oceanic noise range (80~90 dB). Real navigation tests at a horizontal distance of 1 km demonstrated that the operational noise was masked by vessel background noise, indicating significant acoustic stealth performance. The integration of SMC with pyrotechnic technology enables low-shock, low-noise separation, offering a novel approach for stealthy underwater systems.

Key words：Shape memory composite; Pyrotechnic separation device; Low noise; Underwater release; Shock suppression

近年来，我国海洋安全局势面临着愈发严峻的威胁，国家对发展难以被声纳探测的水中低噪声武器装

收稿日期：2025-08-16

作者简介：樊龙龙（1984-），男，工程师，主要从事火工品技术研究。

通讯作者：王琦（1982-），女，高级工程师，主要从事型号火工品设计及试验工作。

引用本文：樊龙龙，王琦，李琳，等. 基于形状记忆复合材料的水下低噪声火工分离装置设计与性能研究[J]. 火工品, 2026(1): 14-20.

备有迫切需求。水下航行器的辐射噪声水平是决定其被声呐探测、识别与定位概率的关键因素，直接关系到平台的隐蔽性[1]。传统火工分离装置依赖火药燃烧产生的高温高压燃气作为驱动力，在完成解锁功能的同时，会引发剧烈的瞬态爆炸冲击（通常>1 000g）和强烈的水下声学辐射（通常>130 dB），已成为制约整个武器系统实现全平台低噪声化的主要瓶颈之一[2-3]。

为解决该问题，现有技术主要从降低产气量、优化结构以减少碰撞摩擦等方面进行改进，但这些方法对由燃气直接膨胀产生的根本性冲击与噪声抑制效果有限。近年来，基于智能材料的非爆炸作动技术受到关注，其中采用电加热方式驱动形状记忆合金（SMA）的方案虽能实现低冲击分离，但仍存在系统结构复杂、需配备大功率电源、响应速度慢等固有缺陷[4]，难以满足火工品对高可靠性、快速响应及小型轻量化的要求。

针对上述挑战，本文提出一种基于火工热源直接激励环氧基形状记忆复合材料（SMC）的新型低噪声分离火工系统。该方案利用火工药剂燃烧产生的热量作为唯一激励源，触发 SMC 材料发生玻璃化转变并释放预存应变能，从而实现温和、可控的解锁动作，从根本上规避了高压燃气的直接作动。该技术路径兼具低冲击、低噪声、响应迅速、无需外部供电等综合优势。为支撑该装置的设计与验证，本文首先对所用环氧基 SMC 材料的关键性能参数——包括玻璃化转变温度、形状回复精度及静态力学性能——进行了系统表征，进而完成了装置的原理样机研制与实验室/实海环境下的性能测试。

1 环氧基形状记忆复合材料的设计与性能表征

1.1 材料设计与制备

形状记忆复合材料（Shape Memory Composite, SMC）是一类通过将增强相与形状记忆聚合物基体复合而成的新型智能材料，其设计与制备方法不同于金属基形状记忆合金。本研究采用热固性环氧树脂为基体，通过引入功能性增强相，构建具有优异形状记忆效应与力学性能的复合材料体系。

该材料的工作机制基于其玻璃化转变行为：当温度升至玻璃化转变温度（T_g）以上时，材料由玻璃态转变为高弹态，可在外力作用下发生大尺度变形；在维持该变形状态下冷却至 T_g 以下，分子链段冻结，变形被“冻结”并长期稳定存储；再次加热至 T_g 以上时，材料恢复高弹态，释放内应力并恢复至初始预设形状，实现“记忆”功能。利用此特性，可设计出基于 SMC 的锁紧-释放机构，实现火工动作的可控、低冲击作动，显著简化机械结构，提升系统可靠性与功能集成度。

相较于传统形状记忆合金（SMA），环氧基 SMC 在保持足够结构强度的同时，具有密度低（约为 SMA 的 1/6）、可设计性强、成本低等优势，近年来在航空航天、柔性机器人等领域展现出广阔应用前景[5-8]。然而，针对水下武器装备等高可靠性应用场景的 SMC 材料研究与工程化应用报道仍较为有限。

本研究采用双酚-A 型环氧树脂（E-44，纯度≥99%）为基体，甲基六氢邻苯二甲酸酐（MeHHPA，纯度≥99%）为固化剂，氰酸酯 2515 为增韧剂，吡啶为促进剂，并引入多壁碳纳米管（MWCNTs，直径 40 ~ 60 nm，长度 5 ~ 15 μm，纯度>97%）和短切碳纤维（1 ~ 5 μm）作为协同增强相。MWCNTs 通过浓硫酸/浓硝酸混酸法进行表面羧基化处理，以提升其在树脂基体中的分散性与界面结合强度。采用溶液共混法将功能填料均匀分散于环氧树脂中，随后加入固化剂与促进剂，经真空脱泡后注入预设形状的模具，在气囊加压条件下进行阶梯升温固化（80 ℃/2 h + 120 ℃/2 h + 150 ℃/ 2 h），最终获得具有预设形状的 SMC 构件。

1.2 玻璃化转变温度测试

玻璃化转变温度（T_g）是形状记忆复合材料的关键热力学参数，直接决定了其形状回复功能的启动温度阈值。该参数是火工装置设计中确定火工热源能量（药量）、传热路径设计及作动时序的核心依据。为准确获取材料的 T_g，采用动态机械热分析仪（TA

Instruments Q800）进行测试。

试验在拉伸模式下进行，采用位移控制，施加 1 Hz 的动态载荷。设置 3 种升温速率（1，2.5，5 ℃·min^{-1}），温度范围为 0 ~ 260 ℃，以考察升温速率对测试结果的影响。测试结果如图 1 所示。

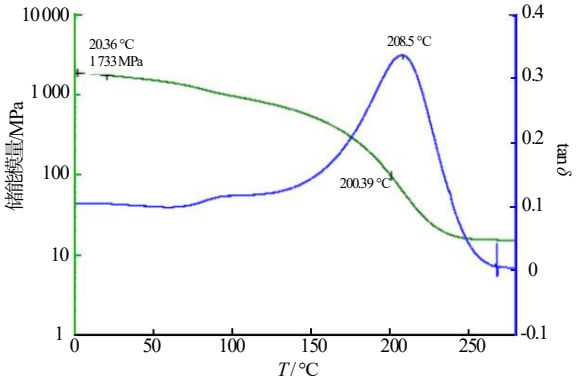


图 1　环氧基 SMC 的动态机械热分析（DMA）曲线

Fig.1　Dynamic mechanical thermal analysis (DMA) curves of the epoxy-based SMC

由图 1 可知，储能模量在约 208.5 ℃处出现显著下降，对应损耗模量的峰值，该峰值温度即为材料的玻璃化转变温度 T_g = 208.5 ℃。在 150 ℃以下，储能模量保持平稳，无显著变化，表明材料在此温度区间内处于稳定的玻璃态，具备良好的形状锁定能力。因此，确定该复合材料的许用温度下限为 150 ℃，可确保其在储存及非作动状态下形状稳定。

1.3 形状回复精度测试

形状回复精度是评价 SMC 材料循环稳定性和可靠性的重要指标，直接影响火工装置在经历环境温度波动或预测试后能否可靠完成预定动作。为评估材料的回复性能，开展回复率与循环次数、环境温度的关联性试验。

1.3.1 循环回复性能测试

采用尺寸为 150 mm × 15 mm × 3 mm 的试样（与火工装置内实际装填尺寸一致）。将试样在 150 ℃油浴中保温 5 min 后，绕半径为 R 的圆柱进行弯曲，记录初始弯曲角度θ_0。随后将弯曲试样再次置于 150 ℃油浴中加热，待其完全恢复至初始平直状态，记录第 N 次循环后的弯曲角度θ_N。形状回复率 R_N按式（1）计算：

$$R_N = \frac{\theta_0 - \theta_N}{\theta_0} \times 100\% \quad (N = 1,2,3\ldots\ldots) \qquad (1)$$

式（1）中：R_N是第 N 次展开的回复率；θ_0是初始角度；θ_N是第 N 次弯曲角度。

每组试验平行进行 2 次，取平均值，结果如图 2 所示。

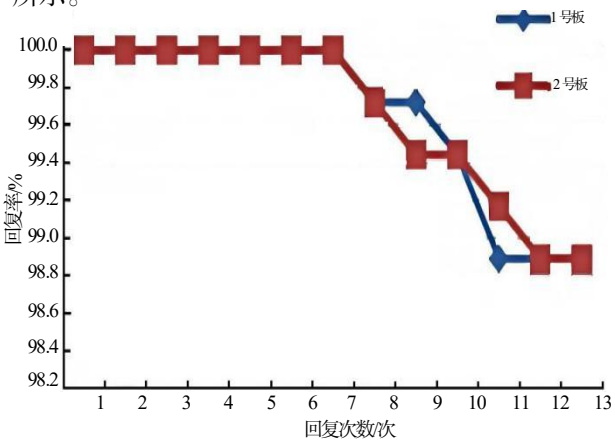


图 2　SMC 材料在 150 ℃下的形状回复率与循环次数关系

Fig.2　Relationship between shape recovery rate and cycle number of the SMC material at 150 ℃

试验表明，在 150 ℃（低于 T_g）条件下，材料仍具备一定回复能力，但回复率随循环次数增加呈缓慢下降趋势。在前 10 次循环中，回复率均保持在 99% 以上；10 ~ 13 次循环后，回复率趋于稳定，维持在 98% ~ 99%区间，表现出良好的循环稳定性。

1.3.2　温度对回复性能的影响

为探究温度对回复行为的影响，开展了不同温度下的回复率测试，结果如图 3 所示。

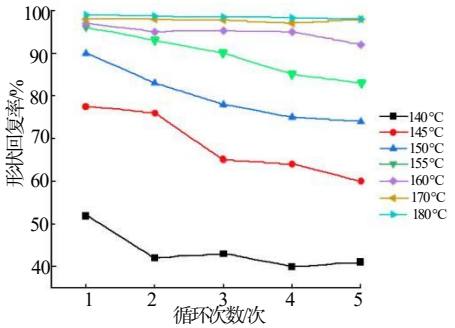


图 3　不同温度下 SMC 材料形状回复率随循环次数的变化

Fig.3　Variation of shape recovery rate of the SMC material with cycle number at different temperatures

当环境温度高于 T_g（208.5 ℃）时，材料回复迅速且彻底，回复率稳定在 90%以上。随着温度降低，回复率显著下降：温度降至 T_g -60 ℃（150~155 ℃）时，回复率降至 85%；T_g -63℃（145 ℃）时降至 67%；T_g -68 ℃（140 ℃）时进一步降至 40%，且下降趋势加快。该结果表明，为确保高精度、快速的形状回复，激励温度应显著高于 T_g。

1.4 静态力学性能测试

准确掌握形状记忆复合材料的静态力学性能是进行火工装置结构设计与力学分析的基础。由于该材料为各向异性复合材料，其力学行为在不同方向上存在显著差异，因此需系统测定其关键弹性常数，为工程化设计提供可靠参数依据。

本研究依据拉伸件尺寸遵照 ASTM D638 Type IV[9]执行，在室温环境下对制备的 SMC 试样进行拉伸与剪切试验，测定了纵向弹性模量（E_1）、横向弹性模量（E_2）、纵向泊松比（ν_{12}）、横向泊松比（ν_{23}）、面内剪切模量（G_{12}）和面外剪切模量（G_{23}）。每组试验取 5 个平行试样，结果以均值 ± 标准差表示。

1.4.1 纵向力学性能（E_1和ν_{12}）

采用 0° 铺层试样进行单轴拉伸试验，测得纵向弹性模量 E_1 和纵向泊松比ν_{12}，结果如表 1 所示。5 个试样的 E_1 平均值为（36.21 ± 2.69）GPa，ν_{12}平均值为 0.45 ± 0.07。试验测得的 E_1 值与混合率模型的预测基本符合公式（2）：

$$E_1 = E_f \nu_f + E_m \nu_m \quad (2)$$

式（2）中：E_f和 E_m分别为碳纤维和环氧基体的弹性模量；ν_f和 ν_m分别为两者的体积分数。但实测值略低于理论预测，表明由于实际纤维含量较低且界面结合等因素影响，未能完全满足等应变假设条件。

表 1　SMC 材料纵向力学性能测试结果

Tab.1　Test results of longitudinal mechanical propertiesof the SMC material

材料	E_1/GPa	ν_{12}	强度/MPa
试件 1	40.61	0.55	≥400
试件 2	35.12	0.42	≥350
试件 3	36.89	0.49	≥360
试件 4	33.96	0.39	≥330
试件 5	34.49	0.38	≥340
均值	36.21 ± 2.69	0.45 ± 0.07	≥360

1.4.2　横向力学性能（E_2，ν_{23}和 G_{23}）

采用 90° 铺层试样进行单轴拉伸试验，获得 E_2，ν_{23}。面外剪切模量 G_{23}通过公式（3）计算：

$$G_{23} = E_2/[2(1+\nu_{23})] \quad (3)$$

式（3）中：G_{23}为面外剪切模量；E_2为横向弹性模量；ν_{23}为横向泊松比。

测试结果如表 2 所示。E_2平均值为（2.83 ± 0.24）GPa；与纯环氧聚合物的弹性模量（约 2.85 GPa）非常接近；G_{23}平均值为（0.97 ± 0.11）GPa，亦与纯环氧基体的剪切模量（约 1 GPa）基本一致。这表明在垂直于纤维方向的载荷作用下，材料的变形主要由基体承担，纤维增强相的贡献较小。

表 2 SMC 材料横向力学性能测试结果

Tab.2　Test results of transverse mechanical properties of the SMC material

材料	E_2/GPa	ν_{23}	G_{23}/GPa
试件 1	2.97	0.60	0.93
试件 2	3.03	0.42	1.07
试件 3	2.46	0.47	0.84
试件 4	2.74	0.39	0.99
试件 5	2.97	0.34	1.11
均值	2.83 ± 0.24	0.40 ± 0.10	0.97 ± 0.11

1.4.3　面内剪切模量（G_{12}）

采用 45° 偏轴拉伸试样，通过粘贴双向应变片测量纵向（ε_x）和横向（ε_y）应变，利用公式（4）计算 G_{12}：

$$G_{12} = \frac{VP}{2bh(V_{\varepsilon_x} - V_{\varepsilon_y})} \quad (4)$$

式（4）中：V为合剪力，即作用在材料平面内的剪切力分量；P为施加的载荷；b为试样宽度；h为试样厚度；V_{ε_x}和 V_{ε_y}分别为纵向和垂直于纵向的载荷增量。

测试结果如表 3 所示，G_{12}平均值为（1.31 ± 0.07）GPa。该值与 G_{23}及纯环氧基体的剪切模量相近，但远低于典型高纤维含量碳纤维/环氧复合材料的 G_{12}（通常>5 GPa）[10]。这一结果进一步证实，在当前低纤维含量的复合体系中，剪切变形主要由基体主导，纤维的增强效应在剪切载荷下不显著。因此，在涉及剪切工况的设计中，可将基体性能作为主要考量因素。

表 3　SMC 材料面内剪切模量测试结果

Tab.3　Test results of in-plane shear modulus of the SMC material

材料	G_{12}/GPa
试件 1	1.33
试件 2	1.22
试件 3	1.25
试件 4	1.40
试件 5	1.34
均值	1.31 ± 0.07

2　基于 SMC 的低噪声火工分离装置设计与工作原理

基于前文对环氧基形状记忆复合材料（SMC）性能的系统表征，本文设计了一种新型低噪声火工分离装置。该装置结构示意图如图 4 所示，主要由点火器、

火药柱、SMC 片、壳体、分瓣螺母、压缩弹簧及负载连接螺杆等部件构成。

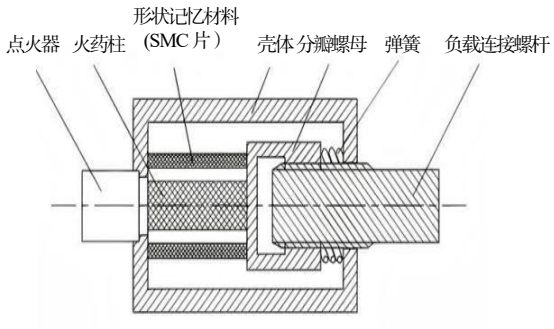
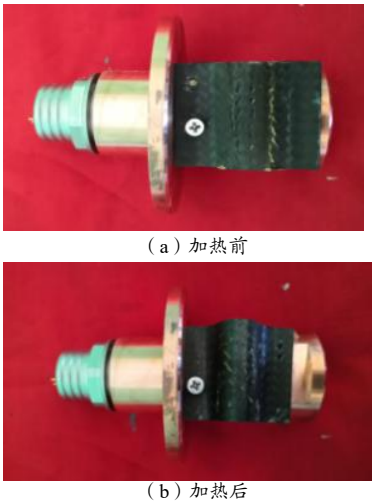


图 4　基于 SMC 的低噪声火工分离装置结构示意图
Fig.4　Schematic diagram of the low-noise pyrotechnic separation device based on SMC

装置中采用两片预成型的片状 SMC 作为核心功能元件，初始状态下对分瓣螺母施加径向顶紧力，使其与负载连接螺杆保持预紧的螺纹连接状态，实现锁止功能。

其工作原理如下：当接收到点火指令时，点火器引燃火药柱，火药迅速燃烧产生高温火焰。火焰通过热传导与热辐射方式，将热量传递至 SMC 片，使其温度在毫秒级时间内迅速升至玻璃化转变温度（T_g= 208.5 ℃）以上。SMC 片由玻璃态转变为高弹态，内部储存的应变能释放，发生由平板状向预设卷曲形状的回复变形，这一变形状况如图 5 所示。



（a）加热前

（b）加热后

图 5　SMC 片加热前后形状变化对比
Fig.5　Comparison of the shape change of the SMC strip before and after heating

图 5 清晰地展示了 SMC 片在受热后的形态变化过程，进一步说明了材料如何从锁定状态转换到释放状态。

随后，失去 SMC 片径向约束的分瓣螺母，在预压缩弹簧的作用下开始动作。此时，预压缩的弹簧释放弹性势能，推动分瓣螺母沿轴向运动并径向张开，快速解除其与负载连接螺杆的螺纹啮合，完成分离解锁动作。整个动作过程和关键组件的工作状态如图 6 所示。

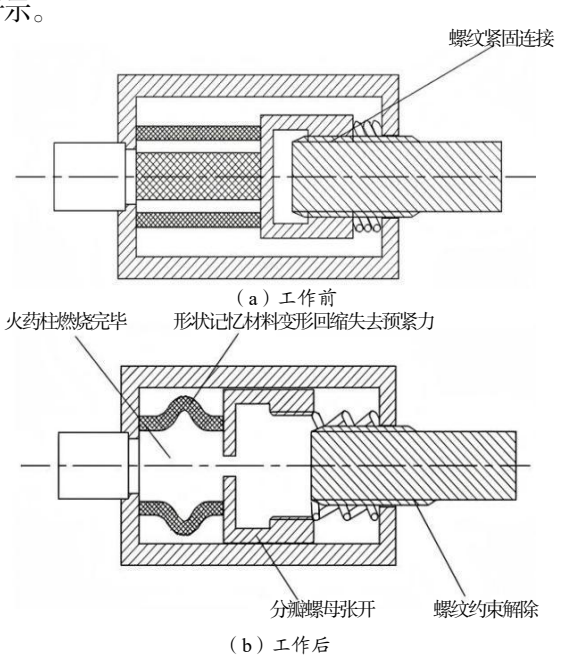


图 6　火工装置工作前后状态对比
Fig.6　Comparison of the pyrotechnic device state before and after operation

由图 6 可知各组件在不同阶段的动作情况，有助于理解装置的实际操作流程及其工作机理。该装置的作动机制实现了“火工能量→热能→材料相变→机械能”的间接能量转换，避免了传统火工品中高温高压燃气直接驱动产生的剧烈冲击与声学辐射，是实现低噪声、低冲击分离的核心。

3　火工分离装置试验测试

3.1 实验室性能测试

3.1.1 验证用装置

为了验证基于形状记忆复合材料（SMC）的火工装置是否满足设计预期，进行了噪声及工作振动的实测。将未安装 SMC 的火工装置作为对照组，二者外形相同，仅在内部构造上有所区别：实验组内部装配有 SMC 片以实现低噪声分离功能。实物图如图 7 所示。

图 7　实验用火工装置样品实物图

Fig.7　Photograph of the fabricated pyrotechnic device samples for testing

3.1.2 噪声测试实验

在实验室条件下，使用被试品进行水下噪声测试。将被试品固定于水下 1 m 处，并在距离噪声源横向 1.5 m 的位置放置两个传感器（A 点和 B 点），用于对比测试结果。实验室水下噪声测试结果如表 4 所示。

表 4　实验室水下噪声测试结果　　dB

Tab.4　Underwater noise test results in laboratory

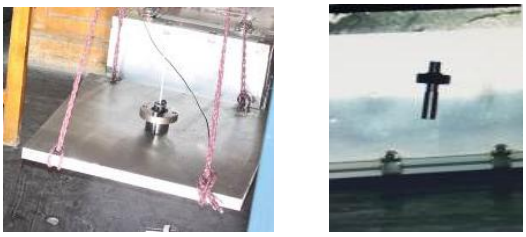
序号	类别	测试结果	平均值	
1	环氧基形状记忆复合材料驱动	A 点最高值：91.3 B 点最高值：93.0	92.1	90.11
2		A 点最高值：89.1 B 点最高值：90.2	89.6	
3		A 点最高值：87.5 B 点最高值：89.6	88.5	
4		A 点平均值：89.3 B 点平均值：90.9	90.1	
5	纯火工式驱动	A 点平均值：143.6 B 点平均值：134.3	138.9	135.3
6		A 点平均值：128.5 B 点平均值：129.7	129.1	
7		A 点平均值：137.3 B 点平均值：140.3	138.8	
8		A 点平均值：133.0 B 点平均值：135.8	134.4	

从表 4 可知，采用 SMC 驱动的火工装置噪声水平约为 90.11 dB，而传统纯火工驱动方式的噪声水平为 135.3 dB。这意味着采用 SMC 技术的装置噪声降低了约 33.4%，接近海洋背景噪声水平（80~90 dB），这表明该设计具有良好的隐蔽性。若进一步采用消声材料包裹，则有望进一步降低噪声。

3.1.3 分离冲击测试

利用高速摄影技术观察火工装置工作后螺杆移动 10 mm 时的速度，以此计算分离冲量。实验装置与分离过程的高速摄影图如图 8 所示。分离冲击测试结果如表 5 所示。

实验结果显示，采用 SMC 驱动的火工装置分离冲击为 296g，相较于传统纯火工驱动方式（2 019.5g），冲击显著减少，降幅达到约 85%。这一结果表明，新型设计能够有效降低分离过程中产生的冲击，适用于对低振动要求严格的水下应用环境。



（a）分离冲击实验装置　　（b）分离过程高速摄影图片

图 8 分离冲击测试实验装置与高速摄影图像

Fig.8　Separation impact test apparatus and high-speed photography images

表 5　分离冲击测试结果

Tab.5　Separation impact test results

序号	类别	测试结果	平均值
1	环氧基形状记忆复合材料驱动	分离冲击：271g	296.0g
2		分离冲击：290g	
3		分离冲击：322g	
4		分离冲击：302g	
5	纯火工式驱动	分离冲击：2 103g	2 019.5g
6		分离冲击：1 999g	
7		分离冲击：1 921g	
8		分离冲击：2 055g	

3.2　真实装机水下测试

为进一步评估该产品的实际工作表现，在真实海况下进行了搭载航行实验，采集了水中背景噪声以及船舶自身航行产生的噪音数据。测试位于水下 3 m 深处，水平距离为 1 km，实验曲线如图 9 所示。

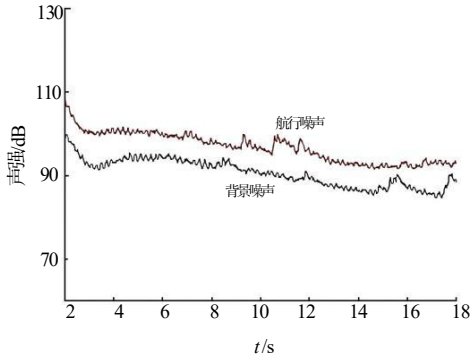


图 9　真实海况下火工装置工作声学信号实测结果

Fig.9　Field measurement results of acoustic signals from the pyrotechnic device operation in real sea conditions

实验结果表明，在真实海况背景下，背景噪声水平普遍超过 90 dB。然而，在船舶航行期间，尽管启动了火工装置，但在航行噪声曲线上并未观察到明显

的声音突变。这证明了火工装置产生的噪声水平并未显著高于船舶本身产生的噪声，且部分噪声已被海水吸收或缓冲，从而验证了低噪声设计的有效性。

4 结论

通过对环氧基形状记忆复合材料驱动的水下低噪声火工分离装置的系统研究，得出以下结论：本研究使用的环氧基记忆复合材料具有明确的玻璃化转变温度（208.5 ℃），在 150 ℃以上即可实现可靠驱动，且经历 13 次循环后形状回复率仍保持在 98%以上，表现出良好的热机械稳定性。材料的力学行为呈现出显著的各向异性特征，拉伸与剪切变形主要由环氧树脂基体承担，纤维增强相主要对纵向刚度作出贡献。这一特性简化了材料本构模型，有助于装置进行快速的结构迭代与优化设计。

该火工装置实现了“火工瞬时高热”与“形状记忆材料的温和可控变形”的耦合，达成了低噪声、低冲击的分离功能。在实验室条件下，装置达到了 90 dB（1 m 处声压级）以及冲击 ＜300g 的性能指标。相较于传统火工品，噪声降低了 33.4%，冲击降低了 85%。经过实验室及海试环境验证，装置工作时产生的声学信号均未在背景噪声中形成可分辨特征，声学隐蔽性极佳，具备“隐匿”工作的能力。装置结构高度简化，无需外部电源、电加热元件以及复杂的密封结构，火工药剂用量减少了 40%，在体积、成本和功耗方面实现了“3 降低”，显著提高了工程应用潜力。

本研究打破了“火工作动必伴随高噪声与强冲击”的传统技术模式，为水下航行器、深空探测器、导弹级间分离等对噪声与振动敏感的应用场景，提供了一种无需附加能源、可直接工程化的释放方案。该技术路线确立了“以热-机械耦合替代爆炸-机械耦合”的新设计模式，具备向其他低特征信号作动系统推广的可能性，为高隐蔽性、高可靠性智能作动技术的发展开辟了新路径。

参考文献：

[1] 李奕璇.用形状记忆合金弹簧驱动装置设计分离装置[J].金属材料与冶金工程, 2015, 43(4): 45-47.

[2] 张小勇,闫晓军,杨巧龙.形状记忆合金分瓣螺母空间解锁机构的设计与试验研究[J].机械工程学报, 2010,46(17): 145-150.

[3] 周涛, 张笑晴, 陈家荣, 等.厚朴酚形状记忆环氧树脂的制备及性能研究[J].材料导报, 2025,39(11): 20020002-7.

[4] 刘仁义, 杨琴, 等.织物增强复合材料的电热驱动形状记忆回复行为[J].纺织学报[J], 2025(1): 78-85.

[5] 仲作阳, 张海联, 周建平, 等 .航天器非火工连接分离技术研究综述[J]. 载人航天, 2019, 25(1): 128-142.

[6] 高军鹏, 蒋诗才, 等. 形状记忆叠层复合材料的制备与性能, 材料工程[J], 2015(4):167-172.

[7] 孙帅, 胡宝继, 等. 环氧树脂基热响应形状记忆复合材料的开发[J]. 河南工程学院学报, 2025(1):6-12.

[8] 王新玲，祝凯,等. 自愈合形状记忆聚氨酯复合材料的制备与性能[J].塑料科技, 2024(4):38-43.

[9] ASTM D638-14 Standard test method for tensile properties of plastics-type IV specimen[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

[10] 纪丹阳, 赵亮, 等. 国产大丝束碳纤维及其复合材料性能研究, 纤维复合材料[J], 2025(2):43-48.