

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0001-05

一种基于形状记忆合金的低冲击分离装置

陈文龙, 吴瑞德, 齐雅松, 张小兵, 赵为, 李中卫, 刘丽娟

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 为了降低火工分离装置在作用过程中产生的爆炸冲击, 提出了一种基于 NiTi 形状记忆合金 (SMA) 材料的火工分离装置, 利用 SMA 材料在高温下回复原来形状时产生的恢复力为锁止、分离机构提供动力, 并对锁止、分离机构及电点火器开展低冲击设计。功能性验证试验表明该火工分离装置在作用过程中产生的冲击加速度值为 306g, 远低于传统火工分离装置工作过程中的冲击加速度, 实现了低冲击的目的。

关键词: 分离装置; 形状记忆合金; 电点火器; 低冲击

中图分类号: TJ450.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.001

A Low-shock Separation Device Based on Shape Memory Alloy

CHEN Wen-long, WU Rui-de, QI Ya-song, ZHANG Xiao-bing, ZHAO Wei, LI Zhong-wei, LIU Li-juan

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: In order to reduce the explosion impact of the separation device in the process of action, a pyrotechnic separation device based on NiTi shape memory alloy (SMA) material was proposed. This device provided motivation for a locking separation mechanism by the restoring force, which was generated as the material returning to its original shape at high temperature. Meanwhile, the low shock designs on the locking separation mechanism and electric igniter were carried out. The functional test results show that the shock acceleration value generated by the designed device during the operation is 306g, which is far lower than that of the traditional pyrotechnical separation device, the requirement of low shock is satisfied.

Key words: Separation device; Shape memory alloy; Electric igniter; Low shock

火工分离装置是用于完成连接分离功能的装置, 其用途非常广泛, 如推拉负载、锁定机构、释放机构、操作开关、弹射舱盖等^[1]。传统的火工分离装置利用火药燃烧产生的高温高压燃气作为驱动力完成分离解锁功能, 完成功能的同时会瞬间释放出爆炸能量, 这些瞬时产生的化学能和机械能对结构产生瞬态的爆炸冲击响应 (也称火工品冲击)^[2], 从而导致结构部件之间发生撞击, 引起失效。此外, 爆炸冲击所产生的材料应力波, 还会使外形尺寸与波长同量级的微型电子芯片产生很高频率的响应, 从而对电子设备、

集成电路和微机械设备等产生危害。美国已经研发出多种替代方案: 电机驱动分离装置、石蜡驱动分离装置、电磁铁驱动分离装置和形状记忆合金 (SMA) 分离装置等^[3]。其中形状记忆合金^[4]由于结构简单、作用冲击小等优点, 成为首选驱动元件^[5], 逐渐应用于国防和航空航天领域。

传统火工分离装置的最大冲击加速度在 2 000 g ~ 3 000g 之间, 而卫星分离过程中的冲击加速度不得大于 1 000g。针对卫星载荷分离系统的低冲击需求, 本文设计了一种基于形状记忆合金的低冲击分离

收稿日期: 2021-11-26

作者简介: 陈文龙 (1979-), 男, 高级工程师, 从事先进火工技术研究。

装置。在直推式分离螺母的基础上增加形状记忆合金驱动元件，用形状记忆合金驱动元件的恢复力代替传统火工分离装置的燃气推力，完成分离解锁功能，以降低传统火工分离装置作用过程中产生的爆炸冲击。

1 低冲击分离装置结构及作用原理

设计的低冲击分离装置的结构如图 1 所示，主要包括锁止、分离机构、驱动机构和电点火器。分离前装置的主要作用是实现连接承载功能。当需要结构件分离时，电点火器发火，引燃驱动机构内的主装药，主装药燃烧产生的热量通过传热结构传递给形状记忆合金驱动棒，使其升温至发生相变，相变过程中产生的恢复力驱动内筒活塞沿轴向向前运动，与分瓣螺母间产生轴向相对位移，分瓣螺母径向约束解除，在压缩弹簧弹力的作用下径向张开，解除对螺栓的结构约束，实现负载的解锁分离功能。

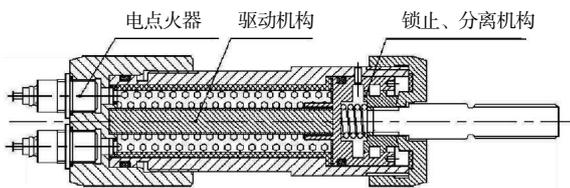


图 1 低冲击分离装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the low shock separation device

分离装置作用过程中，电点火器工作会产生一定的冲击；锁止、分离机构启动即内筒活塞与壳体产生相对运动，定位销钉被剪断过程中会产生一定的冲击；内筒活塞运动至与下堵盖碰撞时会产生一定的冲击。本文从这 3 方面着手开展低冲击分离装置设计。

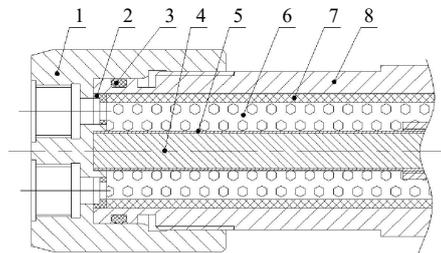
2 分离装置的低冲击设计

2.1 驱动机构的低冲击设计

2.1.1 驱动机构设计

驱动机构主要由上堵盖、挡药环、密封圈、驱动元件、套管、主装药、绝热套和壳体等部件构成，如图 2 所示。在正常使用状态下，驱动机构能够适应环境条件而不发生误动作；在需要解锁分离时，主装药

燃烧加热驱动元件，驱动元件缓慢（秒级）恢复产生的形状恢复力克服销钉剪切力和零件之间的摩擦力，缓慢驱动内筒活塞运动，完成解锁功能^[9]。一方面，驱动元件缓慢恢复形变剪断销钉过程中产生的冲击远小于常规装置的燃气动力瞬间剪断销钉产生的冲击；另一方面，驱动元件缓慢推动内筒活塞运动到位，内筒活塞获得的速度远低于燃气驱动条件下的速度，使得内筒活塞到位时因与限位机构碰撞产生的冲击大大降低。上述两方面均可有效降低装置工作过程中的冲击。



注：1 为上堵盖，2 为挡药环，3 为密封圈，4 为驱动元件，5 为套管，6 为主装药，7 为绝热套，8 为壳体。

图 2 驱动机构示意图

Fig.2 Schematic diagram of driving mechanism

2.1.2 记忆合金选择

相对于燃气驱动，形状记忆合金具有缓慢驱动的特点，因此以形状记忆合金^[7]作为动力源的分离解锁方案是实现低冲击的关键技术途径。目前常用的形状记忆合金有 NiTi, Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni 合金，被誉为热驱动的功能材料。其中，NiTi 形状记忆合金拥有相对合适的相转变温度范围（80.15℃）^[8]和最佳的形状记忆效应，并且该合金还具有比强度高、耐腐蚀、耐磨损和热加工性能好等优点，因此选用 NiTi 基形状记忆合金^[9]作为驱动元件，其 DSC 扫描曲线如图 3 所示^[10]。

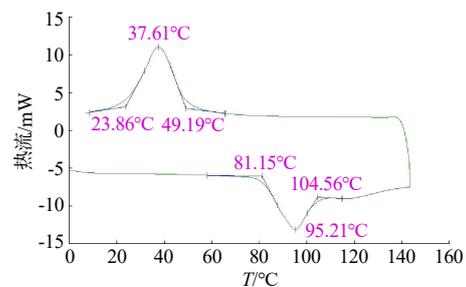


图 3 NiTi 合金样本 DSC 扫描图

Fig.3 DSC curves of NiTi memory alloy

由图 3 可知：NiTi 合金的马氏体逆相变起始点

A_s 为 81.15°C ，马氏体逆相变结束点 A_f 为 104.56°C ，由此可知主装药剂的燃烧温度高于 104.5°C 即可满足使用要求。

2.1.3 主装药选择及药量确定

延期药燃烧时，反应区的能量通过传导、热辐射及微量燃烧气体产物的扩散作用传入未燃烧部分和周围介质，燃烧过程中反应区内产物的质点运动方向与燃烧波阵面方向相反，不存在其它火工药剂爆燃或爆炸时产生的强烈冲击、压缩作用，同时延期药燃烧过程基本不产生或只产生微量气体，不会产生基于气体的驱动力，因此选定钨系延期药作为主装药。其燃烧热为 1997 J/g ，燃烧温度为 $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ 。

装药量的设计原则是：能够为形状记忆驱动元件发生马氏体逆相变提供足够的热量，并考虑在实际应用时可能遇到的极限环境温度条件。在不考虑结构中其它热损失的前提下，延期药燃烧释放出的热量 ($Q_{\text{放}}$) 应该大于记忆元件发生相变需要吸收的热量以及使周边结构达到相同温度所吸收的热量之和 ($Q_{\text{吸}}$)，并且应该具备一定的能量裕度。

$$Q_{\text{吸}} = (c_1 m_1 + c_2 m_2)(T_2 - T_1) + m_1 Q_{\text{相变}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{放}} = m_3 E \quad (2)$$

式 (1)~(2) 中： c_1 为记忆合金元件的比热， $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； c_2 为邻近吸热结构的比热 (不含记忆元件)， $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； m_1 为记忆元件的质量， kg ； m_2 为邻近吸热结构的质量 (不含记忆元件)， kg ； $Q_{\text{相变}}$ 为记忆合金相变热， $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； T_2 为奥氏体相变结束的温度， $^\circ\text{C}$ ； T_1 为环境温度， $^\circ\text{C}$ ； m_3 为延期药的质量， kg ； E 为延期药的反应热， J/kg 。

设定药剂产生的热量裕度为 10，则通过式 (1)~(2) 可推算出最小装药量为：

$$m_3 = 10 \cdot [(c_1 m_1 + c_2 m_2)(T_2 - T_1) + m_1 Q_{\text{相变}}] / E \quad (3)$$

根据公式 (3) 可以估算出延期药的装药量。

2.1.4 驱动元件性能测试

常温下将 NiTi 基形状记忆合金压缩预制成 $\Phi 8\text{mm}$ 圆棒。作用过程中主装药将其加热，当温度超过其相变温度时，驱动元件开始缓慢发生相变，产生驱动力，为装置提供动力。为了测试 NiTi 基形状记忆合金棒 (尺寸为 $80\text{mm} \times \Phi 8\text{mm}$) 的回复应变，采

用油浴对样品 (图 4) 进行加热，测试结果见表 1。



图 4 记忆合金元件样品

Fig.4 Memory alloy component samples

表 1 记忆合金元件回复应变试验数据

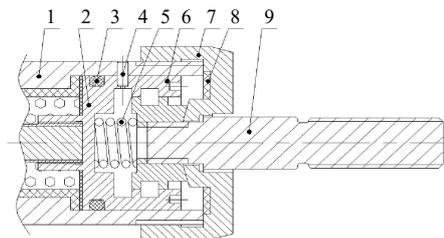
Tab.1 Test data of memory alloy element recovery strain

$T/^\circ\text{C}$	伸长量/mm	回复应变量/%
65	0	-
75	0.25	0.31
95	0.40	0.50
105	0.51	0.63
115	1.08	1.33
135	3.43	4.11
145	3.56	4.26

由表 1 可知，样品最大伸长量为 3.56mm ($>2.00\text{mm}$)，最大回复应变为 4.26% 。基于此，装置的解锁行程需小于 3.56mm 。

2.2 锁止、分离机构的低冲击设计

锁止、分离机构采用直推式分离螺母结构，如图 5 所示。内筒活塞径向约束分瓣螺母，保证分瓣螺母不分开，能够可靠锁止负载。解锁时，驱动机构提供驱动力，剪断销钉，推动内筒活塞轴向运动，运动 2mm 距离后，分瓣螺母径向约束解除。在弹簧的弹力作用下，分瓣螺母沿下堵盖的倾斜端面运动，分瓣螺母分开，释放负载，完成分离功能。



注：1 为壳体，2 为内筒活塞，3 为密封圈，4 为销钉，5 为弹簧，6 为分瓣螺母，7 为下堵盖，8 为缓冲垫，9 为螺栓。

图 5 锁止、分离机构结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the structure of the locking separation mechanism

上述过程中，内筒活塞在运动过程中获得一定的速度，在运动到位时与限位机构一下堵盖发生碰撞，在下堵盖内端面既与内筒活塞碰撞位置设计非金属材料缓冲垫，吸收内筒活塞的动能，从而减小两者碰撞过程中的冲击，达到降低冲击的目的。

2.3 电点火器的低冲击设计

电点火器采用传统钝感电火工品，如图6所示。电点火器装药和驱动机构主装药在作用过程中均会产生一定的冲击，为实现装置整个作用过程中的低冲击目标，需要研究电点火器内部装药之间以及电点火器输出装药与驱动机构主装药之间的能量匹配关系，在保证点火可靠性的前提下减小电点火器始发装药和输出装药的药量^[1]，达到降低冲击的目的。

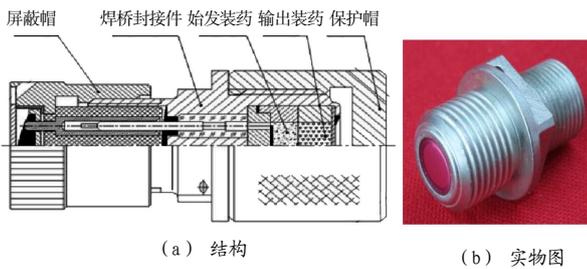


图6 钝感电点火器结构示意图和实物图

Fig.6 Schematic diagram and physical picture of the insensitive electric igniter

为确定能够可靠点燃电点火器输出装药的最小始发装药药量，以2mg为步长进行升降法试验，始发装药不同药量的点火能力试验数据如表2所示。由表2可以看出，当始发装药量降至10.00mg时仍能够可靠点燃输出装药，而采用压装方式的最小始发装药量为10.00mg。为了更好地研究药剂之间的能量匹配关系，采用在桥带上涂覆始发装药的方法，进一步减小药量。结果表明始发装药能够可靠点燃输出装药的最小药量为4.00mg。

表2 始发装药点火能力试验数据

序号	始发装药药量/mg	输出装药药量/mg	是否点燃
1	20.00	100.00	是
2	18.00	100.00	是
3	16.00	100.00	是
4	14.00	100.00	是
5	12.00	100.00	是
6	10.00	100.00	是
7	8.00	100.00	是
8	6.00	100.00	是
9	4.00	100.00	是
10	2.00	100.00	否

为确定能够可靠点燃驱动机构主装药的电点火器输出装药的最小药量，以10.00mg为步长进行升降法试验，输出装药的设计点火距离为10mm，试验时将此距离设定为30mm以验证输出装药的点火能力，试验数据如表3所示。从表3可以看出，输出装药量在50.00~100.00mg之间均能够可靠点燃主装药。

为保证装置具有较高的点火可靠性，对3种不同装药量的电点火器进行输出性能测试，密闭爆发器容积为5mL，试验装置如图7所示。在电点火器轴向安装1个加速度传感器（与点火器输出方向相同），爆发器中部垂直点火器安装方向安装压力传感器，具体试验数据如表4所示。

表3 输出装药点火能力试验数据

序号	输出装药药量/mg	距离主装药距离/mm	是否点燃
1	100.00	30.00	是
2	90.00	30.00	是
3	80.00	30.00	是
4	70.00	30.00	是
5	60.00	30.00	是
6	50.00	30.00	是

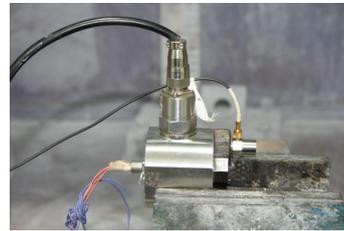


图7 电点火器密闭爆发器试验
Fig.7 Closed bomb test of electric igniter

表4 电点火器输出性能测试数据

始发装药药量/mg	输出装药药量/mg	作用时间/ms	压力/MPa	冲击加速度×g
50.00	350.00	8.00	5.72	1210.00
		6.50	5.02	1120.00
		7.80	6.10	1510.00
		5.50	5.38	1140.00
		7.60	0.86	132.00
20.00	100.00	6.80	1.35	-
		7.50	0.88	136.00
		7.90	1.62	450.00
		7.80	0.75	54.00
4.00	100.00	7.30	0.60	65.00
		7.70	0.81	73.00
		6.80	0.92	68.00

从表4可以看出，通过对电点火器始发装药和输出装药药量的调整，在保证点火可靠性的前提下，电点火器的压力峰值从约5MPa下降到不足1MPa，冲击加速度也由约1200g下降到约50g，显著降低了电点火器在作用过程中产生的爆炸冲击。因此确定钝感电点火器的始发装药药量和输出装药药量分别为4.00mg和100.00mg。

3 分离装置功能性试验

为验证分离装置在完成功能的同时能否满足低

冲击的要求,对作用过程中装置产生的冲击加速度进行测试,试验工装如图8所示。采用一块600mm×600mm的铝板作为工装,试验过程中用软质绳索将工装吊起,保持工装处于悬空状态。该结构避免了工装连接构件之间、工装与地面之间由于相互碰撞而引起的谐振,减少了对测试结果的影响。装配前各结构配合面均用细砂纸打磨,并擦净配合表面的杂质,再在配合表面涂适量润滑脂,以降低传感器、产品与工装之间由于机械振动引起的干扰。

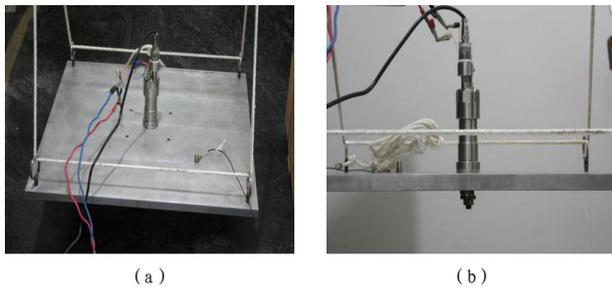


图8 功能性试验试验工装
Fig.8 Functional test device

将分离装置安装于工装中央,下端用螺母拧紧,并施加120 N·m力矩,此时螺栓所受拉力为5t。将传感器通过螺柱固定于距装置轴线150mm处,用以测试装置在作用过程中产生的冲击加速度。试验测得的冲击加速度—时间曲线如图9所示。测得的冲击加速度值为306g,远小于传统的火工分离装置的冲击加速度(大于1000g)。

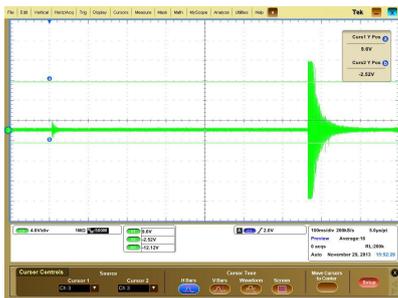


图9 冲击加速度—时间曲线
Fig.9 Impact acceleration—time curve

4 结论

针对航空、航天领域对低冲击分离装置的需求,提出了一种基于NiTi形状记忆合金材料的火工分

离装置。从电点火器、驱动机构和锁止、分离机构的低冲击设计入手,在保证点火可靠性的前提下,得到以下结论:

(1) 采用降低装药量的方法可降低电点火器的点火冲击;

(2) 采用形状记忆合金在高温下缓慢恢复形变产生的恢复力代替传统装置的燃气动力,为锁止、分离机构提供驱动力,在可靠完成分离功能的同时,可以减小剪切销钉过程的冲击,降低运动部件的运动速度,从而降低到位冲击;

(3) 增加非金属缓冲结构,可以降低碰撞冲击。

(4) 功能性测试表明,该装置在作用过程中产生的冲击加速度值为306g,远小于传统的火工分离装置。

参考文献:

- [1] 白志富,果琳丽,陈岱松.新型非火工星箭连接分离技术[J].导弹与航天运载技术,2009(1):31-37.
- [2] 吴瑞德,常英珂,陈小松,等.基于形状记忆合金的分离装置驱动机构研究[J].火工品,2020(5):10-13.
- [3] 曹乃亮,董得义,李志来.基于形状记忆合金的空间分离装置研究进展[J].航天返回与遥感,2014,35(5):9-18.
- [4] 崔维昊,张清泉,田昀,等.新型NiTi基记忆合金回复特性研究[J].载人航天,2021,27(2):143-148.
- [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] 潘雪婷.SMA驱动的高承载低冲击线式分离装置设计与分析[D].黑龙江 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [7] 韩妙玲,王冬,田昀,等.微纳卫星联动式连接分离装置设计与分析[J].机械科学与技术,2020,39(9):1463-1470.
- [8] 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.
- [9] 张小勇,闫晓军,杨巧龙.形状记忆合金花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.
- [10] 冯金玲,李振华,袁江波,等.航天火工分离装置用药剂的耐高温性能研究[J].火工品,2016(4):35-39.