文章编号：1003-1480（2025）05-0056-06

固体火箭发动机用承压式爆炸箔点火器的设计与性能研究

杨 智[1]，张小川[2]，王玉强[1]，褚佑彪[1]，刘 钧[1]，张 秋[1]，简昊天[1]，杜晋龙[1]

（1. 西安航天动力技术研究所，陕西 西安，710025；2. 陕西中天火箭技术股份有限公司，陕西 西安，710025）

摘 要：为确保固体火箭发动机点火过程的高安全性及点火后的密封承压性能，基于集成爆炸箔芯片与“冲击-爆轰-爆燃”传火序列，设计了满足 30 MPa 承压指标的爆炸箔点火器，并采用玻璃烧结、金线键合、集成装配及整体灌封工艺制备了样品。开展了爆炸箔点火器的典型环境适应性试验，并对试验后样品的冲击发火性能、密封承压性能进行了测试及表征。研究结果表明：环境试验前后电性能基本保持稳定，试验后样品输出峰值压强为 8.6 MPa，发火延迟时间为 6.4 ms，满足发动机可靠点火要求；成功与直列式电源、点火药盒进行了发火-点火联合匹配试验，验证了冲击发火性能；作用后爆炸箔点火器的密封承压性能满足 30 MPa/60 s 的发动机工作压强要求。

关键词：固体火箭发动机；集成爆炸箔芯片；爆炸箔点火器；冲击发火性能；密封承压性能

中图分类号：TJ450.3 ；V435 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.007

Design and Performance Study of a Pressure-Resistant Exploding Foil Igniter for Solid Propellant Rocket Engine

YANG Zhi[1]，ZHANG Xiao-chuan[2]，WANG Yu-qiang[1]，CHU You-biao[1]，LIU Jun[1]，ZHANG Qiu[1]，JIAN Hao-tian[1]，DU Jin-long[1]

(1.Xi’an Aerospace Propulsion Technique Institute, Xi’an, 710025；2. Shaanxi Zhongtian Rocket Technology Co. Ltd., Xi’an, 710025)

Abstract：To ensure high-safety ignition and sealed pressure-resistance performance after ignition in solid propellant rocket engine, an exploding foil igniter (EFI) with 30 MPa pressure-resistance specification was designed based on integrated exploding foil chip and the "shock-detonation-deflagration" low explosive train. Samples were prepared using glass sintering, gold wire bonding, integrated assembly, and overall potting processes. The typical environmental adaptability tests on the EFI samples were conducted, then the shock firing performance and sealing pressure performance after tests were evaluated. The results show that the electrical properties remain basically stable before and after the environmental tests, the peak output pressure is 8.6 MPa with a firing delay of 6.4 ms, meeting the engine's reliable ignition requirements. The joint firing-ignition matching experiments were also successfully performed with an in-line power supply and an ignition cartridge, verifying the shock firing performance. The sealing pressure performance of the EFI after tests can meet the engine's working pressure requirement of 30 MPa/60 s.

Key words： Solid propellant rocket engine； Integrated exploding foil chip； Exploding foil igniter； Shock firing performance；Sealed pressure-bearing performance

直列式安全发火装置（In-Line Safe-Arm Device）是新一代高安全性火工装置，由全电子安全保险装置与钝感爆炸箔（或冲击片）火工品构成。该装置最初主要应用于弹药引信系统，近年来其应用范围已逐渐扩展至固体火箭发动机点火领域[1-2]。在固体发动机点火系统中，爆炸箔点火器（Exploding Foil Igniter, EFI）

收稿日期：2025-04-26

作者简介：杨智（1994-），男，高级工程师，主要从事直列式点火及起爆系统技术研究。

通讯作者：王玉强（1981-），男，高级工程师，主要从事航天火工装置技术研究。

引用本文：杨智，张小川，王玉强，等.固体火箭发动机用承压式爆炸箔点火器的设计与性能研究[J]. 火工品, 2025(5): 56-61.

主要由爆炸箔芯片、钝感炸药柱、烧结座及外壳组成，其功能是接收脉冲高压能量，并经历“桥箔非线性电爆-电爆驱动飞片-飞片冲击发火”的界面能量转换过程，从而实现高瞬发度燃烧火焰输出，进而点燃点火药盒及发动机主装药。

目前，研究者对核心换能元件的界面能量匹配理论进行了深入研究[3]，系统性地探究了桥箔、飞片层、加速膛以及钝感药柱的结构设计参数[4-8]，为高集成度、低发火能量冲击片火工技术的发展提供了理论支撑。同时，基于多种工艺，广泛开展了爆炸箔芯片的批量制备研究，全面掌握了爆炸箔芯片的桥箔电爆特性、飞片运动历程、钝感药柱冲击发火等关键性能[9-14]，极大地推动了直列式安全发火装置的应用。

依据不同的点火位置，固体发动机可采用头部、中部及尾部 3 种点火方式。在这些方案中，头部和尾部点火要求点火器或发火管在作用后保持结构完整性，且必须能够承受发动机工作过程产生的燃气内压，该压强通常不低于 20 MPa，且持续时间不少于 30 s。

为推进冲击片火工技术在固体发动机中的应用，本研究在前期集成爆炸箔芯片技术研究的基础上[15]，设计了一款适用于固体发动机的承压式爆炸箔点火器。通过采用玻璃烧结技术、金线键合技术、集成装配工艺以及整体灌封技术，成功制备了样品。随后，对样品进行了典型的自然环境和力学环境适应性试验，并对试验后样品的冲击发火性能及密封承压性能进行了测试和表征。

1　设计

1.1　集成化结构

设计的承压式爆炸箔点火器的结构如图 1 所示。该点火器主要由集成爆炸箔芯片、烧结座、初级 HNS-IV（IV型六硝基芪）药柱、次级 BPN（硼/硝酸钾）药柱、初级药定位环、硅橡胶垫圈、O 形橡胶密封圈、电连接器及外壳构成。其装配方式为同轴对正，各部件依次装配并利用螺纹拧紧固定。为缩小爆炸箔点火器的整体尺寸，对直径为Φ1.0 mm 的烧结座插针进行半切加工，在其一端形成高度约 1.0 mm 的台阶结构，随后将爆炸箔芯片夹持固定于两根插针之间。外壳采用 M14 × 1-6g 螺纹，整体结构的最大外径为 21 mm，点火器主体的总长度为 30 mm。

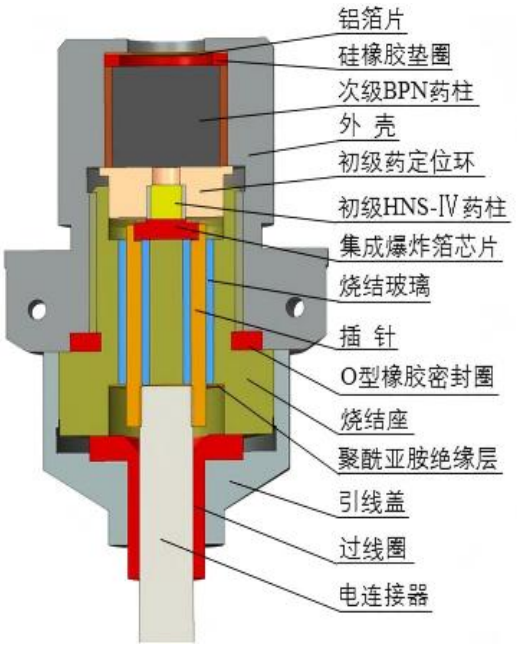


图 1　承压式爆炸箔点火器结构剖面

Fig.1　Sectional view of pressure-resistance EFI

1.2　能量传递序列

在装药结构的设计中，引入了“冲击-爆轰-爆燃”传火序列，即“飞片-HNS-IV-BPN”方案，以替代传统的“冲击-燃烧”序列。该方案旨在充分利用小尺寸薄飞片产生的短脉冲冲击能量，从而从火工品角度提升样品的一致性、安全性和可靠性。在设计中，HNS-IV药柱的密度设定为 1.60 g·cm^{-3}，其尺寸为直径 2.0 mm、高 2.0 mm（药环壁厚为 0.25 mm），装药量为 10 mg；BPN 药柱的密度设定为 1.65 g·cm^{-3}，其尺寸为直径 7.0 mm、高 6.0 mm（药环壁厚为 0.5 mm），装药量为 381 mg。

1.3　承压结构仿真

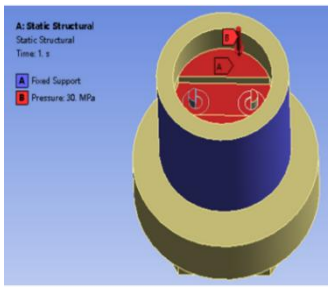
为评估工作后爆炸箔点火器的承压性能，开展了烧结座结构的静力学仿真分析。分析过程中所采用的材料力学性能参数见表 1。

仿真分析设置及其结果云图如图 2 所示。在螺纹连接表面施加固定约束，初始压强载荷设定为 30 MPa。

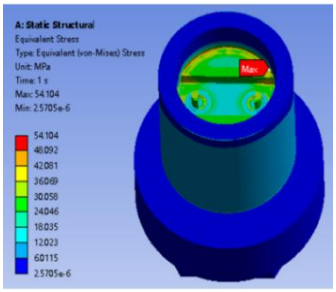
表 1 玻璃烧结座的材料力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of glass sintering part

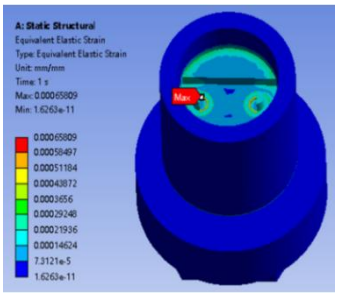
材料	密度ρ/(g·cm^{-3})	弹性模量 E/GPa	泊松比 v	屈服强度或断裂强度σ/MPa
316L 不锈钢	7.98	195	0.26	175
4J50 可伐合金	8.21	160	0.30	400
烧结玻璃	2.25	70	0.25	80



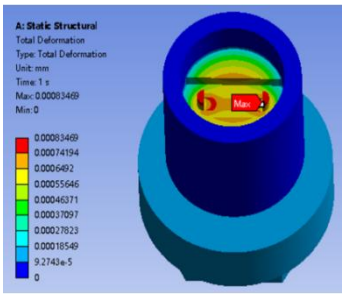
（a）载荷及约束分析设置



（b）等效应力分析云图



（c）等效应变分析云图



（d）总变形分析云图

图 2 玻璃烧结座结构的静力学仿真分析

Fig.2 Structural statics simulation of glass sintering part

由图 2 可见，最大等效应力为 54.104 MPa，该值出现在烧结座不锈钢内端面的圆环处，远低于材料的屈服强度 175 MPa；最大等效应变为 $6.580\,9\times10^{-4}$，该值出现在烧结玻璃的表面；最大总变形为 $8.346\,9\times10^{-4}$ mm，该值出现在插针的表面。由此可见，应变和变形极小，可忽略不计，不影响结构功能。

静力学仿真结果表明，烧结座在 30 MPa 压强载荷下无屈服风险，且变形量极低，完全满足发动机承压工况需求，并具备显著的结构安全裕度。

2 试验

2.1 爆炸箔点火器样品制备

关于集成爆炸箔芯片的设计、制备及发火性能参考文献[15]，本文只简要阐述基于集成爆炸箔芯片的爆炸箔点火器的制备流程。爆炸箔点火器的制备包括爆炸箔芯片装配、金线键合、药柱压制、集成装配及整体灌封步骤，如图 3 所示。

（1）爆炸箔芯片装配：将按比例混合均匀的环氧树脂胶均匀涂覆在由不锈钢-玻璃-插针组成的烧结座的芯片卡槽内；随后，在显微镜下将爆炸箔芯片精确放置于卡槽中；最后，将装配好的部件放入烘箱进行固化处理，如图 3（a）所示。

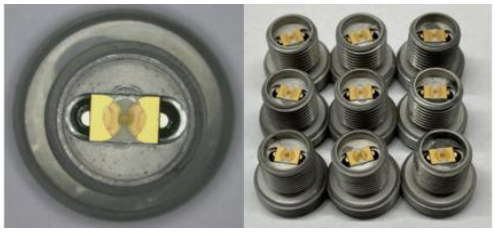
（2）金线键合工艺：将已装配好的爆炸箔芯片-烧结座固定在多功能键合机平台，键合参数如下：压力 19 g，时间 90 ms，在芯片焊盘与烧结座插针之间单边各键合 8 根金线；在显微镜下涂覆导电银浆，并将键合好的部件放入烘箱进行固化，固化温度为 100 ℃，时间为 30 min，如图 3（b）所示。

（3）药柱压制工艺：将按 1.2 节药柱密度和尺寸计算得到的药剂粉末，定量称取倒入放置药环的压药模具中，控制压药压力（约 250 MPa），压制获得初级 HNS-IV药柱及次级 BPN 药柱，如图 3（c）所示。

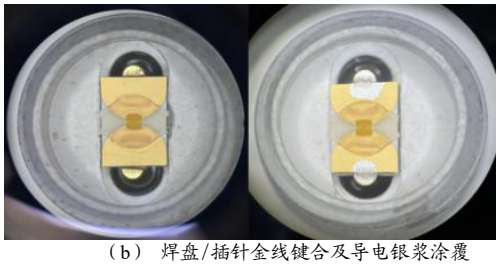
（4）集成装配工艺：将初级 HNS-IV药柱装入初级药定位环，然后将 O 形橡胶密封圈套入烧结座，完成两组件装配；随后，依次将铝箔片、硅橡胶垫圈、次级 BPN 药柱装入外壳，并使用扳手将外壳与烧结座拧紧；将过线圈和引线盖套入电连接器导线，将聚酰亚胺绝缘层套入插针根部，并使用电烙铁焊接导线与插针，如图 3（d）所示。

（5）整体灌封工艺：将环氧树脂胶灌入烧结座焊接处的剩余空间，于室温下固化 48 h，固化完成后，将引线盖与烧结座拧紧，完成样品制备，如图 3（d）

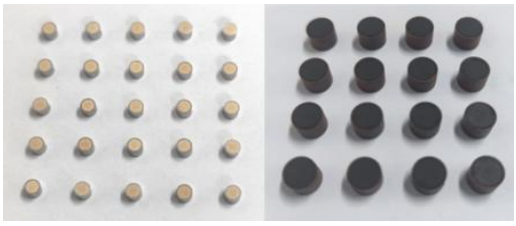
所示。待其与直列式电源通过高压插头/插座连接后，即可实现发火输出。



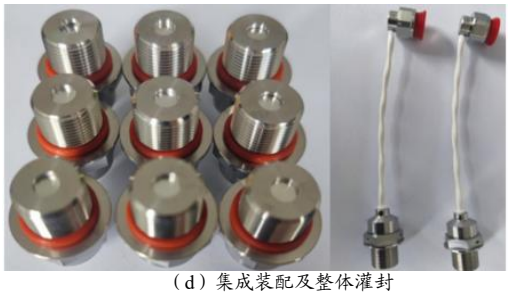
（a） 集成爆炸箔芯片装配



（b） 焊盘/插针金线键合及导电银浆涂覆



（c）初级 HNS-IV药柱及次级 BPN 药柱



（d）集成装配及整体灌封

图 3　承压式爆炸箔点火器制备流程

Fig.3　Preparation process of pressure-resistance EFI

由图 3 可见，集成爆炸箔芯片能够准确放置在烧结座卡槽中，结构尺寸匹配度高；左右两侧各 8 根金线均成功键合于插针与焊盘表面，导电银浆均匀涂覆在金线表面及其间隙，这一设计有助于增强脉冲电流的导通性能；初级 HNS-IV药柱与次级 BPN 药柱分别在金属药环和聚合物药环内成型，表观形貌均良好，药柱的成型质量为点火性能的稳定奠定了基础；通过集成装配并灌封所制备出的承压式爆炸箔点火器，具备密封高压电连接器的特征，不仅保障了点火器在复杂环境下的电气性能，还为实际应用中的安全性和可靠性提供了有力支撑。

2.2　环境适应性试验

选取的环境试验条件包括自然环境条件（温度冲击、高温贮存、低温贮存）与力学环境条件（随机振动、高频冲击）。具体测试参数设定如下：（1）温度冲击试验，在-55 ℃条件下持续 4 h，随后迅速转移至 71 ℃条件下保持 4 h，转换时间不大于 5 min，循环执行 3 次。（2）高温贮存试验，在+70 ℃条件下贮存不小于 48 h。（3）低温贮存试验，在-55 ℃条件下贮存不小于 48 h。（4）随机振动试验（均方根值 g=35.5 g），频率范围 20~100 Hz 时，功率谱密度为 0.019 95 $g^2 \cdot Hz^{-1}$；100~400 Hz 时，功率谱密度按 7.72 dB/Oct 递增；400~580 Hz 时，功率谱密度为 0.698 25 $g^2 \cdot Hz^{-1}$；580~620 Hz 时，功率谱密度为 0.997 5$g^2 \cdot Hz^{-1}$；620~1 100 Hz 时，功率谱密度为 0.698 25 $g^2 \cdot Hz^{-1}$；1 100~1 200 Hz 时，功率谱密度为 1.197$g^2 \cdot Hz^{-1}$；1 200~2 000 Hz 时，功率谱密度为 0.698 25 $g^2 \cdot Hz^{-1}$。测试需在 X、Y、Z 3 个方向上进行，每个方向持续 30 s。（5）高频冲击试验（Q=10）：频率范围 50~800 Hz 时，冲击谱值为 80g~4 000g；频率范围 800~5 000 Hz 时，冲击谱值为 4 000g。测试需在 ± X、+Y、+Z 4 个方向上各执行 1 次。

坐标系的定义：将输出端面中心设定为坐标原点，并将爆炸箔点火器主体指向电连接器的轴向设定为 +X 轴。依据右手法则，确定 Y 轴和 Z 轴的方向。环境试验的顺序为：温度冲击→高温贮存→低温贮存→随机振动→高频冲击，共计进行 9 发试验：3 发试验在自然环境试验后进行随机振动；3 发试验在自然环境试验后进行高频冲击；另外 3 发试验在自然环境试验后进行随机振动和高频冲击。在每项试验前后，均对爆炸箔点火器试样的外观及电性能进行检测，其中电性能包括桥路电阻和绝缘电阻。桥路电阻的设计值为（35 ± 5）mΩ，绝缘电阻的设计值为 R≥20 MΩ（DC 500 V）。

2.3　冲击发火性能测试及点火匹配特性表征

输出压强测试：为评估环境试验后样品的输出性能并据此评价引燃点火药盒的可靠性，在 10 mL 密闭爆发器中测量样品的输出压强——时间曲线，即 p—

—t 曲线，共进行了 5 次测试。

点火匹配特性表征：为了直观表征环境试验后样品与点火药盒的点火匹配特性，采用直列式电源输出脉冲高压能量，开展直列式发火装置与点火药盒的发火-点火联合匹配试验，共进行了 4 发试验。试验装置如图 4 所示。图 4 中爆炸箔点火器和点火药盒分别通过螺纹连接于直列式电源和发动机点火顶盖。

图 4　发火-点火联合匹配试验装置

Fig.4　Firing-ignition matching test device

试验所用直列式电源的发火能量为 1 700 V/0.22 μF，典型短路输出的高压脉冲电流曲线如图 5 所示，其峰值电流为 1 842 A，对应的峰值电流时间为 237 ns。

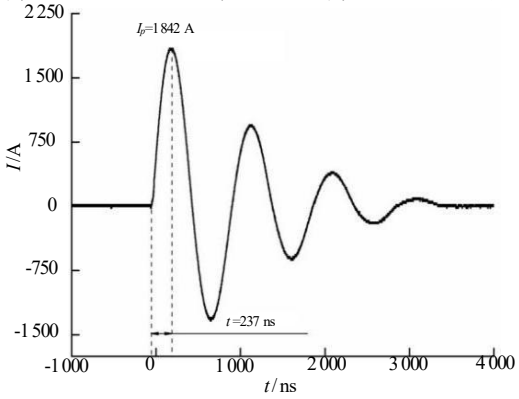


图 5　直列式电源典型短路输出的高压脉冲电流曲线

Fig.5　High-voltage pulse current curve of typical short-circuit output of in-line power supply

2.4　爆炸箔点火器密封承压性能测试

为评估爆炸箔点火器在发动机点火后的密封承压能力，本研究采用水压模拟发动机工作过程的燃气压强。将作用后的点火器安装至专用试验工装，从输出端施加 30 MPa 的水压，持续作用时间为 60 s，观察样品的结构完整性和泄漏情况。

3　结果

3.1　环境试验后冲击发火性能

每项环境试验前后检测了爆炸箔点火器的桥路电阻和绝缘电阻，结果均满足设计指标要求，其中桥路电阻范围为 31.40 ~32.99 mΩ，绝缘电阻均大于 20 MΩ。环境试验后，在 10 mL 密闭爆发器中测量得到的典型爆炸箔点火器的 p——t 曲线如图 6 所示。

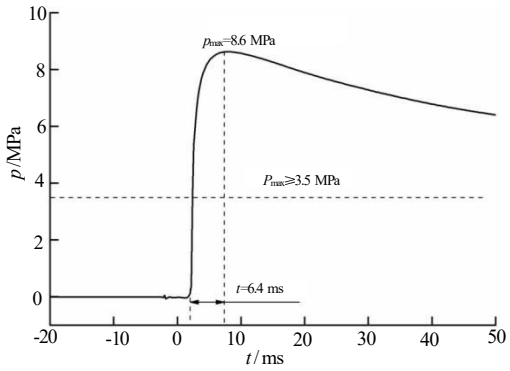


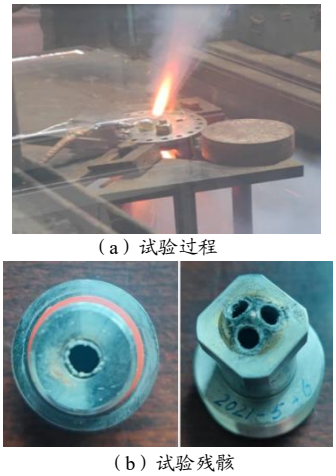
图 6　输出压强——时间曲线

Fig.6　The output pressure *vs* time curve

由图 6 可知，样品在 10 mL 密闭爆发器中产生的峰值压强达到 8.6 MPa，发火延迟时间为 6.4 ms。与常规发动机可靠点火技术指标（峰值压强不小于 3.5 MPa，发火延迟不超过 20 ms）进行对比，可以得出结论：经过典型环境试验后，该爆炸箔点火器的输出性能依然能够满足发动机可靠点火的要求。

3.2　点火匹配特性表征结果

直列式发火装置（包括直列式电源和爆炸箔点火器）与点火药盒的发火-点火联合匹配试验过程及结果如图 7 所示。



（a）试验过程

（b）试验残骸

图 7　直列式发火装置与点火药盒联合匹配试验

Fig.7　Matching test of in-line safe-arm device and ignition cartridge

由图 7 可见，采用单路发火方案，直列式电源输出脉冲高压电流，触发爆炸箔点火器经历“桥箔电爆-飞片加速-冲击起爆-爆轰转燃烧”的过程，最终输出

燃烧火焰以点燃点火药盒。试验结果显示，爆炸箔点火器及点火药盒的均保持良好的结构完整性。

3.3 作用后密封承压性能

随机抽取经过工作循环的爆炸箔点火器进行水压检验，共计 3 发。在试验过程中，所有样品均保持完好，未出现任何结构损坏及泄漏现象。试验结果表明，该爆炸箔点火器作用后能够满足承受 30 MPa 压强持续 60 s 的发动机工作压强要求。

4 结论

本研究在先前工作的基础上，针对固体火箭发动机点火的高安全性需求以及点火后密封承压性能的技术要求，设计并制备了一种适用于固体火箭发动机的承压式爆炸箔点火器。对爆炸箔点火器经历典型环境试验后的电性能、冲击发火性能、发火-点火联合匹配特性、作用后密封承压性能进行了测试和表征。得到以下结论：

（1）采用“飞片-HNS-IV-BPN”方案，充分利用了飞片冲击发火的爆炸箔技术。基于玻璃烧结、金线键合、集成装配及整体灌封等工序，制备了带有密封高压插头的小型承压式爆炸箔点火器。该点火器的安装螺纹规格为 M14，点火器主体的总长度为 30 mm。

（2）在经历典型环境适应性试验后，爆炸箔点火器的电性能变化较小。环境试验后，样品的输出峰值压强为 8.6 MPa，发火延迟时间为 6.4 ms，均满足技术指标要求，并且成功地与直列式电源、点火药盒进行了发火-点火匹配试验。

（3）爆炸箔点火器作用后其密封承压性能满足 30 MPa/60 s 的发动机工作压强要求，试验结果表明设计的承压式爆炸箔点火器具有良好的型号应用前景。

参考文献：

[1] 汪柯, 施长军, 郭莎, 等. 低成本全电子安全与解除保险装置研究现状[J]. 火工品, 2024(3): 14-21.

[2] Wang Z, Xue P, Zeng Q, et al. Design, fabrication and performance test of an integrated exploding foil initiator system[J]. Defence Technology, 2024, 42(12): 125-135.

[3] 陈清畴, 马弢, 李勇. 爆炸箔起爆器作用机理研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(1): 79-88.

[4] Chen Q, Ma T, Li Y. Sensitivity prediction of exploding foil initiator[J].Propellants, Explosives, Pyrotechnics,2019(44): 455-463.

[5] 钱石川, 甘强, 任志伟, 等. 爆炸箔起爆器发火阈值影响因素的数值模拟[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 248-254.

[6] 陈楷, 徐聪, 朱朋, 等.加速膛与复合飞片对集成爆炸箔起爆器性能的影响[J].含能材料, 2018, 26(3): 273-278.

[7] 王云鹏, 郭晋,李帅,等.飞片参数及冲击角度对能量激发的影响研究[J].火工品, 2023(1): 22-27.

[8] 牛犇, 张玉若, 梁车平,等. 冲击片雷管换能界面轴向距离能量耗散失效分析[J].火工品, 2024(3): 30-35

[9] 曾庆轩, 郑志猛, 吕军军. 冲击片雷管集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012(5): 1-3.

[10] 李可为, 褚恩义, 薛艳, 等. 基于非硅微制造工艺的爆炸箔起爆器研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 261-266.

[11] Zhu P, Chen K, Xu C, et al. Development of a monolithic micro chip exploding foil initiator based on low temperature co-fired ceramic[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018 (276): 278-283.

[12] Yang Z, Zhu P, Chu Q, et al. A micro-chip exploding foil initiator based on printed circuit board technology[J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1 435-1 444.

[13] Bowden M, Neal W. High fidelity studies of exploding foil initiator bridges, part 1: experimental method[J].AIP Conference Proceedings, 2017(1 793): 060 020.

[14] Neal W, Bowden M. High fidelity studies of exploding foil initiator bridges, part 2: experimental results[J]. AIP Conference Proceedings, 2017(1 793): 030 022.

[15] 杨智, 王一飞, 黎浩学, 等. MEMS 集成爆炸箔芯片的发火性能研究[J]. 火工品, 2024(5): 1-7.