文章编号：1003-1480（2025）05-0051-05

基于MCT集成封装的低电感爆炸箔起爆系统设计与放电性能研究

张 腾，张玉若，梁车平，何 强，牛 犇

（陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061）

摘 要：为解决传统爆炸箔起爆系统（EFIs）的高电感、大体积和低能量利用率问题，提出一种基于 MOS 控制晶闸管（MCT）集成封装的低电感 EFI 设计。该设计通过将 MCT 与 EFI 一体化封装，缩短了放电回路，结合电容放电单元（CDU）优化，有效降低了系统寄生参数。实验显示，集成式设计电感降至 44 nH，放电周期缩短至 841 ns，性能优于分装式设计。在 800 V 电压下，集成式 CDU 峰值电流达 1 283 A，较分装式提高 3.9%，放电效率提升。实验验证了该设计在降低发火能量、缩小体积和提升可靠性方面的优势，为高精度起爆系统的小型化与高效能化提供新思路。

关键词：爆炸箔起爆系统；MOS 控制晶闸管；集成封装；低电感设计；放电特性

中图分类号：TJ450.3 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.006

Design and Discharge Characteristics of a Low-Inductance Exploding Foil Initiator System with Integrated MCT Packaging

ZHANG Teng，ZHANG Yu-ruo，LIANG Che-ping，HE Qiang，NIU Ben

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

Abstract：To address the issues of high inductance, large volume, and low energy efficiency in traditional exploding foil initiator system(EFIs) , a low-inductance EFI design based on integrated MOS-controlled thyristor (MCT) packaging was proposed. By integrating the MCT with the EFI into a single package and optimizing the capacitor discharge unit (CDU), the discharge circuit path is shortened, effectively reducing system parasitic parameters. Experimental results demonstrate that the integrated design achieves a circuit inductance of 44 nH and a discharge period of 841 ns, outperforming the packaged design. At a 800 V charging voltage, the integrated CDU delivers a peak current of 1 283 A, 3.9% higher than the packaged version, with improved discharge efficiency. The experiments validate the advantages of this design in reducing ignition energy, minimizing system size, and enhancing reliability, providing new insights for the miniaturization and high-efficiency development of high precision initiation systems.

Key words： Exploding foil initiator system (EFIs)； MOS-controlled thyristor (MCT)； Integrated packaging； Low-inductance design；Discharge characteristics

爆炸箔起爆系统（Exploding Foil Initiator system, EFIs）也称为直列式安全起爆系统（In-line Safe and Arming Appartus），由电容放电单元（Capacitor Discharge Unit，CDU）与爆炸箔起爆器（Exploding Foil Initiator,EFI）两部分构成核心组件[1-2]。该系统凭借高安全性、可靠性及可检测性的优势，广泛应用于军工与航天领域。其发火回路可以等效为高压电容-开关-EFI 组成的 R-L-C 电路，当前研究聚焦于回路小型化、

收稿日期：2025-03-12

作者简介：张腾（2000-），男，在读硕士研究生，从事钝感起爆与点火技术研究。

基金项目：十四五共用技术项目（No.90903060201）。

引用本文：张腾，张玉若，梁车平，等. 基于 MCT 集成封装的低电感爆炸箔起爆系统设计与放电性能研究[J]. 火工品, 2025(5): 51-55.

低能化与集成化设计[3]。传统 EFIs 的放电回路中开关体积较大，且需通过导线或扁平线缆与雷管连接，导致回路长度增加、空间占用显著，同时引入额外寄生电感，直接影响冲击片雷管的起爆性能。因此，缩短开关与雷管间距、实现高密度集成成为降低回路电阻与电感、提升发火感度及能量利用率的关键路径[4]。

在集成化技术发展历程中，国内外学者取得系列突破：2011 年，周密团队[5]创新采用离子刻蚀工艺制备集成平面开关爆炸桥箔，其电爆炸性能与采用火花隙开关的参数一致性较好，且具备工艺简化、成本可控优势，为 EFIs 小型化奠定了基础；2015 年，该团队进一步开发陶瓷基板双面集成技术，于正面制备爆炸桥箔、反面集成高压平面开关，组装形成高压平面开关一体化冲击片雷管，验证了其与火花隙开关电爆炸参数的一致性[6]，推动了传统开关替代进程。2019 年，覃新等[7]针对国产 MOS 控制晶闸管（MOS Controlled Thyristor, MCT）与高压陶瓷电容的适配性开展研究，成功构建电感 10 nH、电阻 100 mΩ级 CDU，通过负载短路实验揭示电容值对峰值电流、上升时间等参数的调控规律，明确放电电压与峰值电流的线性关联特性。2023 年，曹兴等[8]系统探究 PCB 平面三电极空气火花隙开关性能，发现最小击穿电压随导通次数与阴阳极间隙增大而升高，响应时间与导通次数正相关，间隙尺寸与放电寿命呈显著正相关，为开关耐久性设计提供了理论支撑。

基于上述技术积累，本研究提出一种 MCT 与 EFI 的集成封装新方法：通过结构创新将 MCT 内置于 EFI 壳体，实现开关-雷管一体化设计；结合 CDU 拓扑优化，构建紧凑型低寄生参数放电回路。通过负载端短路实验，系统研究集成 MCT 的 EFI 放电特性，定量分析回路电感、放电周期及电压对峰值电流的作用规律，为高精度起爆系统的小型化与效能提升提供解决方案。

1　MCT 与 EFI 的集成设计

1.1　CDU 回路的优化

电容放电单元（CDU）作为爆炸箔起爆系统的能量控制核心，其性能直接决定脉冲电流幅值、上升速率及系统可靠性。典型 CDU 由高压储能电容（C）、限流电阻（R）、放电开关（MCT）、触发电路及保护模块构成[9]。当前 CDU 正朝着小型化、智能化和高可靠性发展，以满足小体积、精准控制以及高稳定和可靠性的要求[10]。本研究所设计的 CDU 等效电路如图 1 所示。

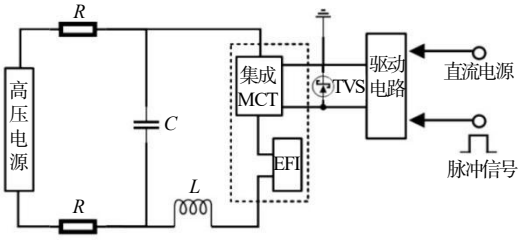


图 1　CDU 放电回路等效示意图

Fig.1　Equivalent schematic diagram of CDU discharge circuit

如图 1 所示，R 代表电路板中的限流电阻和回路等效电阻；C 为高压储能电容器；L 为回路中的等效电感；虚线框中的部分则是本研究所设计的集成 MCT 的 EFI。为了缩短回路中器件间的导线长度，降低回路电感，进而提高发火能量的利用率，研究中将高压电容安装在电路板正面，而背面则连接集成 MCT 的 EFI。当高压电容放电时，产生的大电流会流经金属桥箔，所产生的焦耳热会瞬间加热桥区，使其气化、爆炸，从而达到引爆炸药或驱动飞片的效果。

1.2　MCT 与 EFI 的集成设计

集成 MCT 的 EFI 的结构如图 2 所示，其主要组件包括壳体、六硝基芪（HNS）主装药柱、加速膛、飞片、爆炸箔、陶瓷基底[11]和集成设计的 MCT 等。

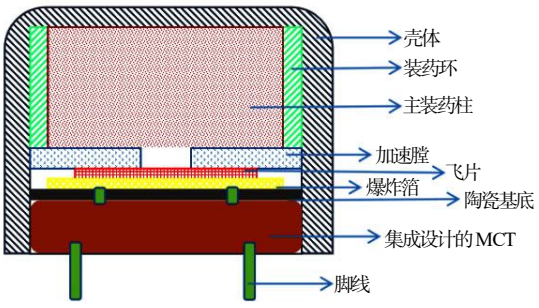


图 2　集成 MCT 的 EFI

Fig.2　EFI integrated with MCT

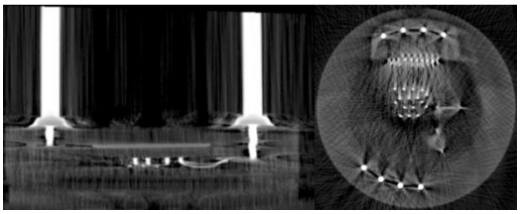
与常规的 EFI 相比，这种设计将 MCT 与 EFI 集成封装在同一个壳体中，开关上端面的两个电极直接与雷管的两个引脚相连，从而很大程度上缩短了放电

回路的长度。而开关的下端面作为封装整体的外端面，整体嵌入管壳内，同时起到电极塞的作用，由此形成了一个集成 MCT 的冲击片雷管。从外观上看，其主要特点是系统体积小、集成度高。经实测，集成后 EFI 整体体积 $V \leqslant 0.85\ \mathrm{cm}^3$，较分装式系统缩减 40% 以上。

1.3　MCT 集成封装工艺与性能表征

MCT 是一种具有低电阻、低电感和强导通能力的高压开关，作为大功率 MOS 控制半导体器件的典型代表，它能够控制能量泄放通道，在纳秒级的时间尺度内可承载数千安培的大电流，正向阻断耐压上千伏的高电压[12]。基于 MCT 特殊的导通性能和可重复使用的优点，它在几十伏低电压刺激下即可导通，可用于系统作用前的状态自检，具有优良的可检测性能。

本研究设计的集成 MCT 形状类似硬币，采用注塑封装的工艺制备，尺寸为 8 mm（d）×2 mm（h）。与杨智等[13]设计制作的尺寸为 13.5 mm（l）×7.5 mm（w）×2.5 mm（h）的平面触发火花隙开关相比，该集成设计的 MCT 体积更小。采用 CT 拍摄了开关截面影像，如图 3 所示。



（a）垂直截面　　（b）水平截面

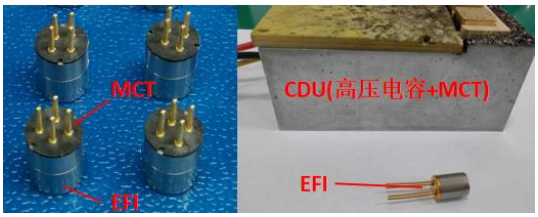
图 3　CT 拍摄整体封装的 MCT

Fig.3　CT imaging of MCT packaged as a whole

开关上端面有两个电极，用于连接 EFI 的两个引脚，下端面则有 4 根脚线，其中 2 根脚线用于接收触发信号，另外 2 根脚线与 CDU 的控制电路相连。

2　集成 MCT 的 EFI 放电性能研究

为了对比集成式与分装式两种 EFI 的放电回路特性，本研究采用 0.4 μF 的电容与两种 MCT 组成 CDU，在不同充电电压下进行放电性能研究，得到两种回路的放电电流、放电周期和峰值电流等参数。图 4 为集成 MCT 的 EFI 和分装 MCT 的 EFI 的结构对比，除分装式的 MCT 与 EFI 通过导线连接外，其余参数均保持一致。



（a）集成式　　（b）分装式

图 4　2 种放两电回路对比图

Fig.4　Comparison diagram of two discharge circuits

在 CDU 回路中，由于集成设计的 MCT 最高耐压限制，充电电压需控制在 1 250 V 以内。本研究选取了 600，700，800，900，1 000，1 100，1 200 V 作为测试电压，实验所用冲击片雷管均未安装输出药柱，且负载端用铜带短接处理。

放电性能测试电路示意图如图 5 所示。

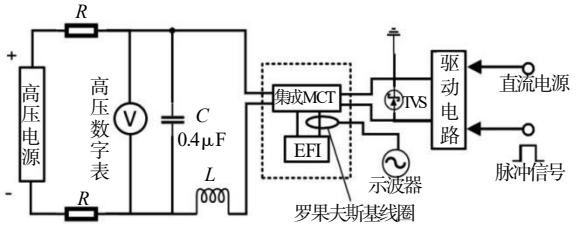


图 5　放电性能测试原理图

Fig.5　Schematic diagram of discharge performance testing

测试过程中，利用高压直流电源给 CDU 的电容器充电，高压数字电压表实时监测电容器电压，非接触式的感应线圈[14]（罗果夫斯基电流环）采集放电过程中短路处铜导线的电流信号，并通过示波器存储电流变化波形。EFIs 配备有驱动电路，需要外接电源才能工作，同时需要连接触发信号源，在起爆时发出指令，导通 MCT，接通放电回路，完成放电过程。

CDU 的放电回路理论计算如式（1）~（2）所示[2,15]，回路电感：

$$L = \frac{T^2}{C}[4\pi^2 + (\ln I_1 - \ln I_2)^2]^{-1} \qquad (1)$$

放电周期：

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \qquad (2)$$

式（1）~（2）中：I_1 和 I_2 分别为第 1 和第 2 峰值电流，A；t_1 和 t_2 分别为第 1 和第 2 峰值电流对应的时间，ns；电流周期为 T，ns，且 $T=t_2-t_1$。将测得

的相关参数带入公式（1）~（2），即可计算得到不同电压下的回路电感和电阻。

3　结果与分析

表 1 和表 2 分别列出了两种 CDU 在不同充电电压下的放电参数。

表 1　集成式回路的放电参数

Tab.1　Discharge parameters of integrated circuit

输入电压 U/V	第 1 峰值电流 I_1/A	第 1 峰值时间 t_1/ns	第 2 峰值电流 I_2/A	第 2 峰值时间 t_2/ns
600	944	280	317	1 120
700	1 109	280	381	1 130
800	1 283	275	496	1 115
900	1 458	280	603	1 120
1 000	1 627	275	721	1 125
1 100	1 829	270	836	1 110
1 200	2 016	275	915	1 105

表 2　分装式回路的放电参数

Tab.2　Discharge parameters of packaged circuit

输入电压 U/V	第 1 峰值电流 I_1/A	第 1 峰值时间 t_1/ns	第 2 峰值电流 I_2/A	第 2 峰值时间 t_2/ns
600	897	305	298	1 250
700	1 056	300	334	1 240
800	1 235	305	451	1 245
900	1 417	295	548	1 235
1 000	1 583	300	643	1 215
1 100	1 778	300	692	1 225
1 200	1 966	295	737	1 230

由表 1~2 可见，随着充电电压从 600 V 增加到 1 200 V，放电回路中的峰值电流也逐渐增大；由于测试所用 CDU 回路的器件参数均相同，所以回路电阻、电感和周期基本相同，因而峰值电流的时间基本一致。集成式 CDU 回路的放电峰值电流从 944 A 增加到 2 016 A，峰值时间稳定在 275 ns 左右；分装式 CDU 回路的放电峰值电流从 897 A 增加到 1 966 A，峰值时间稳定在 300 ns 左右。

两种放电回路的峰值电流和峰值时间对比图分别如图 6~7 所示。

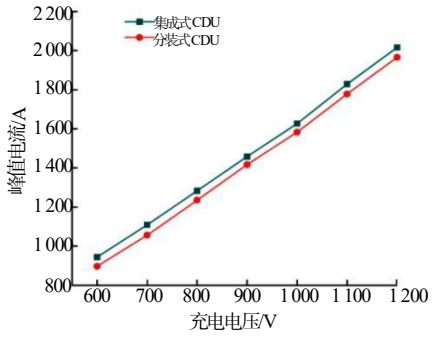


图 6　两种 CDU 的峰值电流对比图

Fig.6　Comparison of peak current between two types of CDU

由图 6 可见，在放电过程中，随着充电电压的增大，两系统的峰值电流几乎呈线性增长。集成式 CDU 回路的峰值电流略高于分装式 CDU 回路，但两者差值均在 50 A 以内，可以认为峰值电流基本相同。

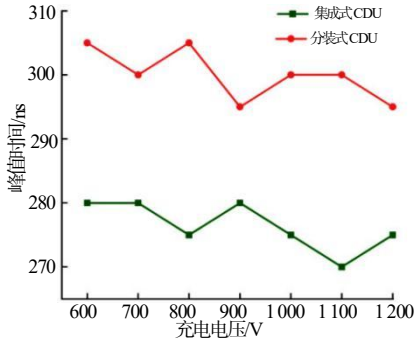


图 7　两种 CDU 的峰值时间对比图

Fig.7　Comparison of time corresponding to peak current between two types of CDU

由图 7 可见，集成式 CDU 相较于分装式 CDU 的峰值时间短约 25 ns，这是由于集成设计的 MCT 与 EFI 封装在一个管壳内，几乎无间隔，省略了分装式回路开关与 EFI 之间的连接导线，有助于减少回路中的电阻和寄生电感，从而加快回路放电速度。

将表 1~2 中的 I_1、I_2、t_1 和 t_2 等参数带入公式（1）~（2），分别计算出在不同电压下 CDU 回路的周期电感和电阻，得到两种系统的性能参数如表 3 所示。

表 3　两种系统性能参数

Tab.3　Two types of system performance parameter

参数类型	集成式 CDU	分装式 CDU	性能变化率/%
回路电感 /nH	44	53.94	上升 18.5
放电周期/ns	841	934	上升 10.0
峰值电流（800 V）/A	1 283	1 235	上升 3.9
体积/cm^3	≤0.85	≥1.5	下降 43.3

由表 3 可见，集成式 CDU 回路放电周期约为 841 ns，电感约为 44 nH，相比于分装式 CDU 具有更优的性能参数，电感值更低。

为进一步验证集成设计的 MCT 的导通起爆性能，对全装药的冲击片雷管进行了起爆测试研究，起爆试验线路如图 8 所示。

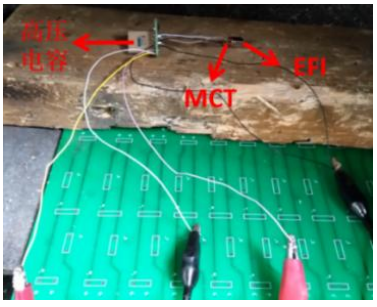


图 8　集成 MCT 的 EFI 起爆试验

Fig.8　Initiation test of EFI integrated with MCT

在包含 0.4 μF 电容的 CDU 中，进行了 3 次起爆试验，3 发雷管均完全起爆，最低起爆电压达到 800 V，这表明该集成设计的 MCT 与 0.4 μF 高压电容组成的 CDU 具有可靠起爆冲击片雷管的能力。

4 结论

本研究设计了一种用于与 EFI 集成封装的 MCT，该设计显著缩短了 CDU 放电回路的长度，有效降低了回路电感，对提高系统的能量利用率和起爆效率具有重要作用。

研究结果表明，集成 MCT 的 EFI 在放电性能上优于传统分装式设计。通过对比不同充电电压下的放电性能，发现集成式 CDU 回路的峰值电流略高于分装式，且峰值时间缩短了约 25 ns，这主要得益于集成设计减少了回路中的寄生电感，从而加快了回路的放电速度。

此外，集成 MCT 的 EFI 在 800 V 的起爆电压下成功起爆了全装药的冲击片雷管，验证了其可靠性和实用性，证明集成设计的 MCT 适合用于 EFI 的 CDU 系统。集成 MCT 的设计不仅显著缩小了系统体积，还提高了系统的集成度，为 EFIs 的小型化和高效化提供了新的解决方案。

综上所述，集成 MCT 的 EFI 设计在降低电感、缩小体积以及增强系统可靠性方面表现出显著优势。未来，随着 MCT 技术的进一步优化和集成化设计的深入发展，EFIs 将在更广泛的领域中得到应用，为高精度起爆系统的设计和性能提升提供重要支持。

参考文献：

[1] 韩克华,王丽萍,任西,等. 高压脉冲功率源与冲击片雷管发火能量匹配关系特性试验方法[J] .火工品, 2012(3): 45-49.

[2] 覃新. 基于MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性研究[D] . 南京: 南京理工大学, 2019.

[3] 汪柯,唐科,陈楷,等. 基于 MEMS 工艺的爆炸箔芯片与高压开关研究现状[J] . 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 95-103.

[4] 杨智,朱朋,徐聪,等. 微芯片爆炸箔起爆器及其平面高压开关研究进展[J] .含能材料, 2019, 27(2): 167-176.

[5] 周密,任西,钱勇,等. 平面开关与爆炸桥箔的集成设计及研究[J] .火工品, 2011(5): 33-35.

[6] 周密,同红海,任西,等. 集成高压平面开关的冲击片雷管设计研究[J] . 兵工学报, 2015, 36(04): 626-630.

[7] 覃新,朱朋,徐聪,等. 基于 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性[J] .含能材料, 2019, 27(5): 417-425.

[8] 曹兴,韩克华,杨康,等. PCB 平面三电极空气火花隙开关导通特性试验研究[J] .火工品, 2023(1): 1-5.

[9] Pengfei Xue, Peng Xiong, Heng Hu, et al. Integration of the exploding foil initiator with capacitor discharge unit and its performance characterization[J]. Measurement,Part C, 2025 (242):116 069.

[10] 吕军军,李明愉,曾庆轩,等. 爆炸箔起爆系统的发展[J] . 科技导报, 2011, 29(36): 61-65.

[11] 侯新朋,彭志凌,宋进宇,等. 桥区结构对爆炸箔起爆器发火性能的影响[J] . 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 103-107, 113.

[12] 彭朝飞,陈万军,孙瑞泽,等. MCT 与 Clustered IGBT 在大功率应用中的比较研究[J] . 电子与封装, 2014(6): 32-36.

[13] 杨智,朱朋,初青芸,等. PCB 基密封并联平面触发火花隙开关的设计及性能[J] . 含能材料, 2021, 29(6): 543-551.

[14] 薛朝妹,党瑞荣. 基于RogoWski 线圈的冲击片雷管检测[J] . 探测与控制学报, 2011, 33(2): 27-30.

[15] 党瑞荣,杨振英. 桥箔爆发电流的计算与测量[J].火工品, 2000(2): 13-15.