文章编号：1003-1480（2026）01-0061-05

一种非电传爆系统输出接头延期结构设计与实现

孙晓霞，张亮亮，关文超，段卜仁，汪宇晨，秦 崟，徐秀娟

（辽宁北方华丰特种化工有限公司，辽宁 抚顺，113003）

摘 要：针对某火工系统中传爆组件 1 路延期输出的需求，设计了 1 种输出接头延期结构，在可靠起爆与传爆的同时实现高精度延期。通过药剂选择与传火传爆序列设计、消爆腔与传火孔设计以及密闭式燃烧 3 个方面的匹配设计，实现了限制性导爆索对输出接头的非接触起爆，并达到了（80 ±25）ms 的延期时间要求。采用雷管直接起爆限制性导爆索时，170 mm 长的限制性导爆索起爆输出接头形成的半敞开燃烧环境会导致延期时间偏长且精度较差；而使用 600 mm 长的限制性导爆索起爆输出接头时测试得到的延期时间与实际使用基本相当，表明可以使用较长限制性导爆索对延期输出接头的燃烧环境进行约束。

关键词：非电传爆系统；输出接头；延期结构；限制性导爆索

中图分类号：TJ45+6 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.010

Design and Realization of an Output Joint Delay Structure in Non-electric Detonation Transfer System

SUN Xiao-xia，ZHANG Liang-liang，GUAN Wen-chao，DUAN Bu-ren，WANG Yu-chen，QIN Yin，XU Xiu-juan

(Liaoning North Huafeng Special Chemical Limited Company, Fushun, 113003)

Abstract： A delay structure of output joint was designed to meet the demand of delay output for a detonation transfer assembly in a non-electric detonation transfer system, the delay structure should achieve high precision delay while reliably initiating and transmitting detonation. Through the matching design of pyrotechnics selection and fire-transmitting sequence, explosion-eliminating chamber and fire-transmitting hole, and closed combustion, the non-contact initiation of the confined detonating fuse to the output joint can be realized, and the delay time of (80 ±25) ms can be achieved . When a detonator is used to initiate the confined detonating fuse directly, a semi-open combustion environment is formed as a 170 mm long confined detonating fuse initiating the output joint, resulting in a longer delay time with lower precision. While using a 600 mm long confined detonating fuse initiating the output joint, the measured delay time is basically equivalent to that of the actual use, suggesting that a longer confined detonating fuse can be used to constrain the combustion environment of the delay output joint.

Key words： Non-electric detonation transfer system；Output joint；Delay structure；Confined detonating fuse

非电传爆系统是由多个独立的火工装置通过中间装置或部件组成的系统，广泛应用于火箭、导弹、空间飞行器等领域。该系统通常由首发元件、传爆元件和终端元件 3 部分组成，必要时还会配备延期元件。传爆元件又称传爆组件，主要由歧管（输入端）、限制性导爆索（传爆）和输出接头（输出端）组成，输出接头是传爆组件传递爆轰的输出端。黄运鎏等[1]在输出装药壳体内设置内锥体，以降低爆轰波的侧向损失；樊龙龙[2]设计了一种介于直插式结构和内锥套结构之间的台阶式输出端接头；卢勃勃等[3]对限制性导爆索高温适应性进行了研究及试验验证，研究表明其能够耐受 215 ℃/ 24 h 后稳定传递爆轰能量；于霖等[4]

收稿日期：2025-04-18

作者简介：孙晓霞（1974-），女，正高级工程师，从事火工品技术研究。

引用本文：孙晓霞，张亮亮，关文超，等. 一种非电传爆系统输出接头延期结构设计与实现[J].火工品, 2026(1): 61-65.

提出了一种导爆索组件的一体化防热方案。

当非电传爆系统有延期要求时，输出接头通常通过隔板延期点火器（或隔板延期起爆器）与终端火工装置相连；而在长距离延期点火和传火时，通常将不同长度的延期索置于延期雷管内部，与限制性导爆索共同组成传爆系统。非电传爆系统中，延期元件通常作为独立的火工元件。例如，某火工系统工作时，电起爆器首先引爆限制性导爆索组件，该组件负责传递爆轰波，其中 1 路爆轰波传递至切割分离装置，其余 4 路传递至延期点火器，延期点火器延时后点燃分离火箭[5]。

针对某型号火工系统对传爆组件 1 路输入、2 路输出（1 路为瞬发输出，1 路为延期输出）的要求，本研究提出了 1 种输出接头延期结构。该结构不仅能够实现可靠传爆和起爆，还能实现高精度的延期功能，同时减少了火工系统组件数量，进而减少了传爆界面的数量，提高了系统的可靠性。

1 设计要求

1.1 起爆与延期要求

某型号火工系统要求传爆组件 1 路延期起爆切割索组件，延期时间为（80 ± 25）ms，同时要求传爆组件采用限制性导爆索传爆，限制性导爆索长度为 165 ~ 170 mm。

1.2 通用指标要求

传爆组件需满足以下通用性能指标：高温贮存、低温贮存、高温工作、低温工作、温度冲击、低温低气压、高温低气压、湿热环境适应性、加速度、发射冲击、着陆冲击、功能性冲击、弹射冲击、挂飞振动、大机动飞行振动、自由飞振动、公路运输、运输跌落、可靠性、贮存寿命等，以满足总体设计要求。

2 输出接头延期结构设计

非电传爆系统的输出接头是连接限制性导爆索与终端火工装置之间的关键部件，其主要功能是确保终端火工装置的可靠起爆。输出接头的输出端通常采用扩爆管，通过增大限制性导爆索的输出能量，进而确保终端火工装置的可靠引爆。输出接头中心为 1 个直径与柔性导爆索外径相同的小孔，柔性导爆索穿在小孔内，端面紧贴扩爆管；扩爆管可装配起爆药和猛炸药两层装药，起爆端的密封盖片非常薄（如 0.05 mm 的铝箔），如图 1 所示[6]。

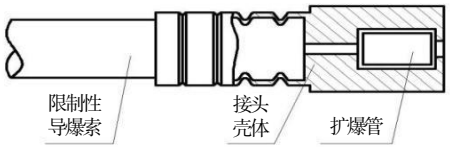

图 1 限制性导爆索接头结构

Fig.1 A joint structure of confined detonating fuse

该火工系统的延期结构位于传爆组件输出接头中，其要求输出接头能够可靠地接收来自限制性导爆索的爆轰波，并能可靠输出并起爆切割索组件，同时实现高精度的延期。基于此，本研究设计了输出接头的延期结构，如图 2 所示。主要进行了 3 个方面的设计：（1）药剂选择与传火传爆序列设计；（2）消爆腔与传火孔设计；（3）密闭式燃烧设计。由于各部分彼此影响，需要进行合理的匹配。

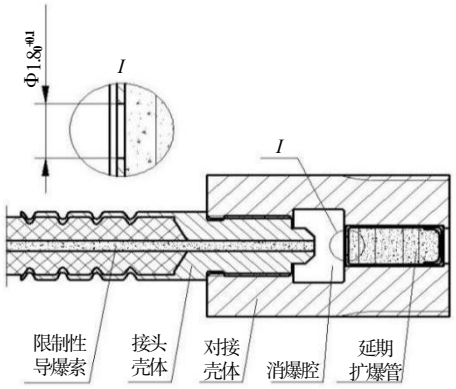

图 2 输出接头延期结构

Fig.2 Delay structure of output joint

由图 2 可见，输出接头作用原理为限制性导爆索的爆轰波在消爆腔中衰减为点燃延期扩爆管的火焰，火焰经延期扩爆管输入端传火孔进入，点燃点火药，经延期药精确延期后点燃起爆药，进而引爆猛炸药。

2.1 药剂选择与传火传爆序列设计

延期时间作为延期火工品的关键技术指标，其设计核心是延期药的选择及其稳定燃烧性能。因此，首先对输出接头延期扩爆管的药剂选择和传火传爆序列进行了设计。

2.1.1 延期药的选择

在选择延期扩爆管的延期药时，优先考虑了延期精度较高的微气体 Si-Pb_3O_4 延期药。该延期药的主要成分包括硅粉（Si）、四氧化三铅（Pb_3O_4）、硫化锑（Sb_2S_3）和硒粉。Si-Pb_3O_4 延期药是一种广泛应用于军民领域的毫秒级延期药，燃烧反应在气固相之间进行，Pb_3O_4 分解放出的氧气包围在高温硅颗粒周围，其化学反应式如下：

$$2Pb_3O_4 \longrightarrow 6PbO+O_2 \quad (1)$$

$$Si+O_2 \longrightarrow SiO_2 \quad (2)$$

$$2PbO+Si \longrightarrow SiO_2+2Pb \quad (3)$$

Si-Pb_3O_4 延期药中的燃烧调节剂 Sb_2S_3 在 300 ℃开始发生氧化还原反应，此时还没有达到 Pb_3O_4 的分解温度，故发生固-固相反应，化学反应式如下：

$$Sb_2S_3+Pb_3O_4 \longrightarrow 3PbS+Sb_2O_3+0.5O_2 \quad (4)$$

生成的氧气又与 Sb_2S_3 发生气-固相反应，化学反应式如下：

$$2Sb_2S_3+9O_2 \longrightarrow 2Sb_2O_3+6SO_2 \quad (5)$$

温度到达 500 ℃时有吸热峰，Sb_2S_3 发生熔解降低反应温度；直到 600 ℃时产生强烈燃烧反应的放热峰，熔解的 Sb_2S_3 在延期药内部阻碍 Si 与 Pb_3O_4 相互接触，从而抑制燃烧速度[7-8]。随着 Sb_2S_3 质量比的增加，燃速先明显下降，再缓慢下降；当 Sb_2S_3 质量比为 20%时，延期精度最好[9]。在上述 3 种组分基础上，外加硒粉时，延期精度则更好。添加硒粉对延期药的燃烧速度影响不大，但可有效减小燃烧界面波动，提高延期药燃烧稳定性[10]。

硅系延期药剂在燃烧过程中产生较多的固体残渣，能够在一定程度上维持半密闭燃烧状态，有利于提升延期精度。此外，当药层具备一定的厚度与较高的密度时，硅系延期药剂展现出良好的抗离心及抗过载性能，能够满足传爆组件的力学环境要求。

2.1.2 点火药的选择

本研究选用的点火药与延期药主要成分基本相同，为微气体 Si-Pb_3O_4 点火药，其选择依据如下：

（1）Si-Pb_3O_4 点火药的撞击感度、摩擦感度及静电感度均较低，是一种安全性高且成本低廉的点火药。

（2）Si-Pb_3O_4 点火药的火焰感度较好，能够有效承接上一级限制性导爆索的能量，并将其转化为点火能量。

（3）由于毫秒级火工品作用时间极短，Si-Pb_3O_4 点火药在点燃延期药的同时，可以对来自限制性导爆索的冲击能量起到一定程度的衰减作用。

（4）Si-Pb_3O_4 点火药的燃烧温度达到 1 800 ℃，高于硅氧化物熔点（1 713 ℃），其燃烧产物会保持熔融状态，可使延期扩爆管输入端保持半密闭状态，有利于延期药的稳定燃烧。

2.1.3 炸药与起爆药的选取

为确保切割索组件的可靠起爆，传爆组件输出接头设计为爆轰输出，主装药采用猛炸药。

选用六硝基芪作为猛炸药，因其具有极好的热安定性和真空安定性，且与限制性导爆索及切割索内装药保持一致。六硝基芪的装药量需兼顾输出接头工作后接头不断裂和终端切割索组件接口不破坏的双重需求。起爆药选用羧甲基纤维素叠氮化铅，因其具有爆轰成长期短、极限药量小、起爆能力强的特点，适用于各种尺寸雷管。

2.1.4 传火传爆序列

为确保点火的可靠性、燃烧的稳定性以及延期的精确性，本研究设计了 2 种 Si-Pb_3O_4 延期药，成分相同但配比不同。低段别含 21% Sb_2S_3，高段别含 29% Sb_2S_3。低段别 Si-Pb_3O_4 延期药燃烧速度快，易点燃，在传火序列中起过渡作用，保证了燃烧过程的连续性。

综上所述，延期扩爆管传火传爆序列设计为：Si-Pb_3O_4 点火药→低段别 Si-Pb_3O_4 延期药→高段别 Si-Pb_3O_4 延期药→羧甲基纤维素叠氮化铅→六硝基芪。

2.2 消爆腔与传火孔设计

毫秒级延期火工品的延期时间及精度与其结构尺寸紧密相关。毫秒级延期火工品设计的核心在于衰减发火药的冲击能量。在本研究设计的输出接头延期结构中，延期扩爆管由限制性导爆索起爆。限制性导爆索输出爆轰波，而延期扩爆管需要将爆轰波转化为火焰，实现从爆轰到燃烧的转换，同时满足高精度延期的要求。延期点火器装药直径为Φ5 mm 时消爆腔长度宜选 5~8 mm；引信传爆序列中，延期雷管的点

火通道直径通常为Φ1~2 mm[6]。基于此，进行了如下设计：（1）消爆腔设计。通过控制延期扩爆管点火药与限制性导爆索输出端的距离和传火空间，即依靠一定的空气隙衰减来自限制性导爆索的爆轰波，使爆轰转为燃烧。同时，消爆腔还作为延期药燃烧的气室，为延期药燃烧气体产物提供释放空间，从而增加了延期药燃烧的稳定性。该结构中消爆腔长度设计为 4.5 mm、容腔体积设计为 0.17 mL。（2）传火孔设计。延期扩爆管输入端的传火孔是接收上级火焰的点火通道。为确保延期扩爆管的结构强度以及内部火工药剂的稳定燃烧，防止燃烧产物的移动，并进一步衰减限制性导爆索的点火冲击，传火孔设计为$\phi 1.8^{+0.1}_{0}$ mm。

2.3 密闭式燃烧设计

延期火工品的延期时间长短与延期精度不仅取决于延期药和结构尺寸，还与燃烧环境密切相关。这是因为微气体延期药的燃烧速率与燃烧压强密切相关，燃烧环境是否密闭对延期药的稳定燃烧影响很大。

本研究设计的输出接头延期结构中，延期扩爆管由长度仅为 165 ~ 170 mm 的限制性导爆索起爆。限制性导爆索作用后药芯部分成为空腔，连通到传爆组件的输入端。该火工系统中，传爆组件输入端与电起爆器连接。为此，进行了以下密闭式燃烧设计：

（1） 传爆组件密封设计。传爆组件设计为全密封结构，各零部件采用掐印连接、螺纹连接以及连接处涂胶等方式进行密封，防止外部湿度、高空低气压等环境对产品的影响。

（2） 传爆组件与电起爆器间密封设计。传爆组件输入端与电起爆器间设计为螺纹连接及连接处涂胶的方式进行密封。

（3）电起爆器作用后密封设计。电起爆器设计采用玻璃烧结电极塞，烧结后经 80 MPa、2 min 液压强度检查不泄漏，采用喷氦法在 101 kPa 气体压力差下泄漏率不超过 10^{-5} cm^3 · s^{-1}，确保爆炸产生的气体不会从插针端泄漏。

2.4 试药装配中限制性导爆索长度设计

延期药的延期时间和延期精度受药剂原材料、配比、粒度、制造过程等多种因素影响，因而通常需要在生产前对延期药进行试药。为节约成本、缩短周期，试药过程采用简化装配，即仅装配图 2 所示的延期输出接头，不装配传爆组件输入端和电起爆器，直接使用电雷管起爆限制性导爆索。由于雷管作用后完全炸毁，延期输出接头通过限制性导爆索药芯部分空腔直接与空气连通，形成半敞开燃烧环境，与实际使用时电起爆器与传爆组件间的密闭式燃烧环境存在差异，该半敞开燃烧环境导致试药测试得到的延期时间精度差且长于装配成传爆组件测试得到的延期时间。经多方案试验，确定将限制性导爆索长度由 170 mm 加长到 600 mm，由较长限制性导爆索对延期输出接头的燃烧环境进行约束，从而改善延期时间和精度。

3 主要性能试验

3.1 延期时间测试

延期输出接头使用某电雷管起爆，雷管紧贴到限制性导爆索输入端端面上；装配成传爆组件和火工系统时由某电起爆器起爆。进行起爆试验的同时，采用通断靶进行延期时间测定，雷管/电起爆器通电作为一靶启动信号，缠绕在延期输出接头输出端端面/切割索上的靶线断开作为二靶停止信号，使用时间测量仪进行延期时间测定。试验情况见表 1。

表 1 延期时间试验结果

Tab.1 Test results of delay time

序号	数量/发	测试条件	延期时间/ms			
			数据	均值	极差	标准偏差
1	9	限制性导爆索长度 170 mm	98.8, 90.8,91.2, 102.0,104.4,105.2, 101.6,100.8,95.2	98.8	14.4	5.35
2	8	限制性导爆索长度 600 mm	86.0,89.6,81.6, 78.0,90.0,90.4, 82.4,83.6	85.2	12.4	4.55
3	6	装配成传爆组件	76.8,87.6,81.6, 81.6,80.0,81.6	81.5	10.8	3.51
4	6	限制性导爆索长度600mm经低温(-50 ℃)工作	95.7,99.7,90.8, 92.6,90.0,89.7	93.1	10.0	3.92
5	6	限制性导爆索长度600mm经高温(60℃)工作	80.3,82.7,81.7, 79.4,83.6,75.0	80.5	8.6	3.08
6	2	装配成火工系统	70.6,70.5			
7	2	装配成传爆组件经加速度、发射冲击、着陆冲击和高温工作	76.2,78.3			

表 1 试验结果表明，该输出接头延期结构设计合理，传爆组件经力学、温度等环境试验后延期输出一路的延期时间稳定，延期精度好，高低常温环境下均能够满足（80 ± 25）ms 的指标要求。使用 170 mm 长限制性导爆索测试得到的延期时间最长且精度最差，使用 600 mm 长限制性导爆索测试得到的延期时间和延期精度次之，装配成传爆组件测试的延期时间最短且精度最好；且使用 600 mm 长限制性导爆索测试得到的延期时间与装配成传爆组件测试的延期时间基本相当，表明可以使用 600 mm 长限制性导爆索进行延期时间试药。同时，由表 1 可知，低温环境下延期时间显著长于高温环境下延期时间，且低温环境下延期时间精度稍差于高温环境下延期时间。延期药的温度感度（温度系数）来源于化学反应速率，具有随温度升高而加快、随温度降低而减慢的固有属性。低温环境下，气室温度低，气室压力随温度上升速度减慢，且低温环境下热散失增大，药剂热传导速率下降，势必导致燃烧稳定性变差，延期时间精度变差。

3.2　产品交付与适配性试验

研制过程中，累计交付了 40 套传爆组件，进行了各项地面适配性试验，并成功完成了飞行试验，飞行试验中传爆组件延期输出一路的延期时间为 78.0 ms，结果表明传爆组件满足起爆与延期时间等技术指标和使用要求。

4　结论

针对某型号火工系统用传爆组件 1 路延期输出的要求，本研究提出了 1 种输出接头延期结构，在可靠传爆与起爆的同时实现了高精度延期，研究表明：

（1）通过优化传火传爆序列（Si-Pb_3O_4 点火药→低段别 Si-Pb_3O_4 延期药→高段别 Si-Pb_3O_4 延期药→羧甲基纤维素叠氮化铅→六硝基芪），设计长度为 4.5 mm 且容腔为 0.17 mL 的消爆腔、$\phi 1.8^{+0.1}_{0}$ mm 的延期扩爆管输入端传火孔，以及传爆组件、传爆组件与电起爆器之间、电起爆器作用后的密封等匹配设计，实现了限制性导爆索对输出接头的可靠起爆，并达到了（80 ± 25）ms 的延期时间设计要求。

（2）直接使用雷管起爆 170 mm 长的限制性导爆索时，由于雷管作用后完全炸毁，形成了半敞开燃烧环境，导致测试得到的延期时间长于实际使用。而当直接使用雷管起爆 600 mm 长的限制性导爆索时，测试得到的延期时间与实际使用时间基本一致。这表明，采用较长的限制性导爆索可以有效约束延期输出接头的燃烧环境，进而保证延期时间的准确性和稳定性。

综上所述，本文提出的输出接头延期结构设计合理，能够有效满足火工系统对传爆组件的起爆与延期时间要求，同时减少了系统组件数量，降低了传爆界面数量，提高了系统的可靠性和实用性。

参考文献：

[1] 黄运銮,夏冬星,杨安民,程涛.12 路无起爆药非电传爆系统设计研究[J].火工品,2016(4):9-12.

[2] 樊龙龙.柔性爆炸网络用无起爆药起爆接头研究[J].船舶电子工程,2015(9):176-179

[3] 卢勃勃,程涛,张玉若,等.某型限制性导爆索高温适应性研究[J].火工品,2020(4):1-4.

[4] 于霖,盛希,刘强,等.导爆索组件一体化防热方案设计及验证[J].兵器装备工程学报,2019,40(1):39-43.

[5] 刘竹生,王小军,等. 航天火工装置[M].北京:中国宇航出版社,2012.

[6] 王凯民.火工品工程[M].北京:国防工业出版社,2014.

[7] 王凯民,褚恩义,常皓. 火工烟火药剂性能与应用[M]. 北京:兵器工业出版社,2023.

[8] 黄朝元.浅谈硅系延期药燃烧传播影响因素[J]. 煤矿爆破,2011(4): 29-31

[9] 陈磊. 铅丹-硅系延期药的配方研究[D].淮南:安徽理工大学,2016.

[10] 蒙可.硅系延期药燃烧界面特性的研究[D].淮南:安徽理工大学, 2019.