

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0001-06

内冲击激发式安全雷管的研制与适配性测试

邓小娟¹, 代鹏举², 董金龙³, 刘晓娟⁴, 王 爱⁵

(1. 上海鲲程电子科技有限公司, 上海, 201100; 2. 广东宏大民爆集团有限公司, 广东 广州, 510000; 3. 湖南湘科控股集团有
限公司, 湖南 长沙, 410000; 4. 江西新余国泰特种化工有限责任公司, 江西 新余, 338000; 5. 湖南神斧集团湘南爆破器材有
限公司, 湖南 永州, 425000)

摘 要: 针对工业雷管在使用过程中因起爆药感度高而引发的安全事故和环境污染问题, 研制了一种新型内冲击激发式安全雷管 (简称“IID 雷管”), 并开展其与不同点火药的适配性测试。通过采用猛炸药作为主要装药, 以及设计激发组件, 实现了高效有序的起爆和传爆过程; 通过与不同点火药的适配测试, 以及对起爆能力、延期精度等关键功能的全面评估, 验证了 IID 雷管在与 LTNR 和 K-K 等药剂适配时, 各项性能均满足行业标准。此外, IID 雷管结构工艺简单、安全环保, 具有广泛的应用前景。

关键词: 安全雷管; 数码电子雷管; 内冲击激发; 无起爆药雷管; 激发组件

中图分类号: TJ45+2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.001

Development and Adaptation Test of the Safe Inner-incentive Non-primary Electronic Detonator

DENG Xiao-juan¹, DAI Peng-ju², DONG Jin-long³, LIU Xiao-juan⁴, WANG Ai⁵

(1. Shanghai Kuncheng Electronic Technology Co. Ltd., Shanghai, 201100; 2. Guangdong Hongda Civil Explosive Group Co. Ltd., Guangzhou, 510000; 3. Hunan Xiangke Holding Group Co. Ltd., Changsha, 410000; 4. Jiangxi Xinyu Guotai Special Chemical Co. Ltd., Xinyu, 338000; 5. Hunan Shenfu Group Xiangnan Explosive Materials Co. Ltd., Yongzhou, 425000)

Abstract: In view of the safety accidents and environmental pollution caused by industrial detonators, a safe inner-incentive non-primary electronic detonator ("IID detonator") was developed, and the adaptation test for IID detonator with different ignition powders were conducted. By using the high explosive as the main charge, and designing excitation component, the efficient and orderly initiation and detonation transmission process is realized. Through the adaptation test with different ignition powders, and the comprehensive evaluation of key functions such as initiation ability and delay accuracy, it show that IID detonators can meet the industry standards when compatible with LTNR and K-K agents, etc. In addition, IIDs detonator structure process is simple, with the characteristics of safety and environmental protection, as well as a wide range of promotion and application prospects.

Key words: Safety detonator; Digital electronic detonator; Inner-incentive; Non-primary explosive detonator; Excitation component

基于民爆行业高质量发展需求, 民用工程雷管不断更新迭代, 传统的火雷管、电雷管以及导爆管雷管被逐步淘汰, 电子雷管成为行业主导。电子雷管以其安全性、可靠性及三码绑定系统, 不仅极大满足了现代爆破需求, 同时强化了工业雷管的公共安全管理水平。然而, 尽管电子雷管在技术上有所进步, 但目前

电子雷管仍沿用有起爆药的传统基础雷管, 由于起爆药相比猛炸药机械感度偏高, 故起爆药生产、雷管装填、雷管运输、爆破施工以及爆破哑炮排除等全生命周期内的安全问题以及生产过程中的废水处理等问题需要引起高度重视。为了提高起爆药生产过程的安全性和自动化生产程度, 实现人机隔离, 需要持续大

收稿日期: 2024-08-22

作者简介: 邓小娟 (1994-), 女, 工程师, 主要从事电子雷管技术研究。

引用本文: 邓小娟, 代鹏举, 董金龙, 等. 内冲击激发式安全雷管的研制与适配性测试[J]. 火工品, 2025(1): 01-06.

量的技术改造投入^[1]。同时，如果电子雷管遭遇非正常渠道丢失或遗弃，即使该雷管被解剖切去芯片部分，其基础雷管仍然可以被普通的引火线（索）、点火头等点燃引爆，仍具备雷管爆炸威力，这无疑对全社会的公共安全管理构成一定的风险或隐患。因此，研制不含起爆药的安全雷管对生产安全、环境保护和公共安全管理等方面具有重要意义。

近三四十年来，许多研究机构都进行了不同程度的无起爆药雷管产品研发和生产，有效地推动了无起爆药雷管的技术进步，如冲击片雷管^[2]、飞片雷管^[3]、装填敏化剂夹层的无起爆药雷管等，但是由于产品工艺要求苛刻和产品可靠性等方面的原因，这类产品均未获得大规模的推广使用。

本研究基于无起爆药雷管设计原理，研制一种内冲击激发式安全雷管（简称“IID 雷管”），仅使用猛炸药，通过激发组件与管壳、有孔加强帽构成一个有序的起爆、传爆序列，实现雷管可靠起爆，并开展其与不同点火药的适配性测试，为各类民用雷管生产提供技术支持。

1 IID 雷管的设计

目前无起爆药工业雷管的研制主要从探索起爆药替代品和优化雷管结构两个方面来开展，以解决雷管燃烧转爆轰的问题^[4]。

在寻求起爆药的替代品时，通常采用添加敏化剂、氧化剂和金属粉等手段，以改变炸药点火和爆轰成长等特性。虽然名义上实现了全猛炸药装药，但是这些装药的感度接近烟火药甚至接近起爆药，加之雷管实际生产中需要对炸药进行2次加工，存在装药工艺繁杂、要求苛刻的问题，因此，尚未实现真正意义上的工业化生产。这种现状不仅导致了无起爆药雷管的概念混淆，还在一段时间引发了人们对无起爆药雷管装药方式及起爆可靠性等方面的疑虑。

在雷管中仅装填可用的猛炸药，如 RDX/PETN 等，不需要任何改性或掺杂，并通过雷管结构改进或适度提高雷管管壳的约束强度来实现雷管可靠的爆轰输出，应是无起爆药雷管研究的本质。

1.1 设计原理

IID 雷管设计原理如图 1 所示。

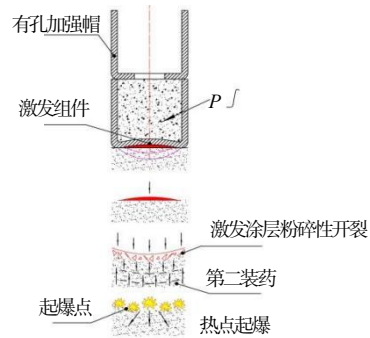


图 1 IID 雷管设计原理

Fig.1 Design principle of IID detonator

IID 雷管的起爆原理为：点火头受到外部能量激发产生火焰，通过有孔加强帽的传火孔将第三装药（炸药）点燃，装药在雷管管壳、有孔加强帽和激发组件构成的双重约束下，由低速燃烧发展为高速燃烧，瞬间产生大量的热和气体产物，使得有孔加强帽和激发组件之间狭小且相对密闭的空间内压力突升，对激发组件形成高压冲击，压迫激发组件底部膨胀变形，造成激发组件底部的脆性硬涂层破裂；涂层碎裂物呈细长尖锐形状并具有较高初速，在持续的膨胀力驱动下，碎裂物不断加速，直接刺入第二装药层中；由于第三装药密度相对偏低，具有一定的压缩性，在炸药和涂层碎裂物有效的相对位移运动中产生足以起爆炸药的热点（热核），热点爆炸迅速成长为高速爆轰，进而起爆雷管的主装炸药，从而实现雷管的爆轰能量输出。

1.2 总体结构及实现方式

IID 雷管的总体结构设计如图 2 所示。

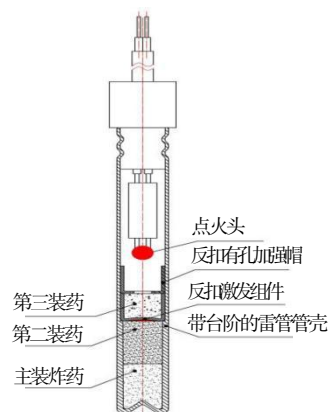


图 2 IID 雷管结构示意图

Fig.2 Structure of the IID detonator

由图2可见, IID雷管采用厚壁带台阶管壳, 在雷管底部装填第一装药(主装炸药), 经压制后装填第二装药, 再装填激发组件, 随后装填第三装药, 再装填有孔加强帽进行合压, 制成IID专用基础雷管, 最后经电引火元件装配等工序制成IID电子雷管。

2 关键技术

2.1 激发组件设计

IID雷管的激发组件结构如图3所示。在IID雷管结构中, 激发组件是一种新型结构, 该部件的主体是底部带凹坑的无孔加强帽, 在凹坑部位烧结固化涂层。选用凹坑设计不仅便于涂层的吸附与烧结固化, 还会显著增强激发组件底部在翻转时的变形能力。

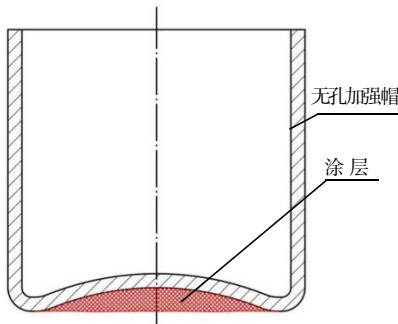


图3 激发组件结构图

Fig. 3 Structure diagram of excitation component

2.2 激发组件底部涂层设计

2.2.1 涂层材料的选择

涂层应光滑平整, 经烧结固化后可与无孔加强帽底部有较强的黏附力, 二者形成一刚性结构。同时该涂层碎裂后可形成细长尖锐的碎片, 类似于传统冲击片雷管、飞片雷管等结构中的“飞片”。

因此涂层材料可选择:

- (1) 瓷釉、陶釉等玻璃质硅酸盐无机材料;
- (2) 有机高分子聚合物材料, 无增塑剂、柔韧剂等改性。此类物质本质属性是玻璃质物质, 有较强的静态应力强度。

2.2.2 涂层结构的选择

激发组件底部涂层在整个起爆过程中具有至关重要的作用。为进一步验证涂层的可靠性, 选取了多种不同类型的无孔加强帽, 保持其他因素不变, 进行

铅板测试的对比试验, 试验结果见表1。经验证, 底部涂层有助于雷管起爆可靠性。

表1 激发组件底部涂层起爆可靠性验证
Tab. 1 Initiation reliability verification of the excitation component bottom coating

序号	样品类型	试验数量/发	起爆成功率/%
1	普通加强帽(无凹坑)	50	90
2	带凹坑, 无涂层	50	92
3	带凹坑, 涂层不完整	50	99
4	带凹坑, 有涂层	50	100

2.2.3 涂层厚度的选择

此外, 在IID雷管的起爆、传爆序列中, 涂层碎裂产生的高速碎片对第二装药进行撞击, 促使其快速爆轰成长。如果涂层产生的碎片太少或太大均可致使“飞片”速度不够, 可能将影响第二装药爆炸的可靠性。为了确定合适的涂层厚度, 选取0.1~1.0 mm厚度范围内的涂层进行了对比试验, 试验结果如表2所示。

表2 激发组件底部涂层厚度测试结果
Tab. 2 Test results of the different thicknesses of excitation component bottom coating

序号	涂层厚度/mm	试验数量/发	试验结果
1	0.1	20	1发半爆
2	0.2	50	全部正常起爆
3	0.3	50	全部正常起爆
4	0.4	50	全部正常起爆
5	0.5	50	全部正常起爆
6	0.6	50	全部正常起爆
7	0.7	20	2发半爆
8	0.8	20	2发半爆
9	0.9	20	3发半爆
10	1.0	20	5发半爆

根据表2试验结果, 可见涂层厚度过小时其碎裂破片过少不足以激发第二装药, 涂层过厚时, 激发组件底部翻转和涂层碎裂所需的压力和能量更多, 会过多消耗雷管能量, 产生拒爆。当涂层厚度在0.2~0.6 mm之间可实现可靠传爆, 激发第二装药。

2.3 抗震性能设计

在以往的无起爆药雷管结构设计中, 为了提高雷管爆炸可靠性, 通常采用第二装药结构, 对装药的装药量或装药高度要求极为苛刻, 且第二装药不能有明显的压制, 否则会产生大概率的半爆现象。这些要求使人们一直误解无起爆药雷管抗震能力差, 特别是不能被倒置反向起爆使用, 且生产工艺要求苛刻。

客观分析当雷管有二道装药时, 该雷管受到震动后, 第二装药必然要发生整体下顿, 形成空腔, 使得

连续的装药结构被空腔中断，如图4~5所示。

当雷管受到正向震动且被正向使用时，第二装药上部的空腔有利于被上级装药所激发起爆。但是雷管被反向震动且反向倒置起爆时，第二装药下顿产生的空腔隔开了主装炸药，第二装药被起爆产生的冲击波能量被空腔衰减，严重时主装炸药不能被有效起爆，出现大概率的雷管输出能力降低或半爆现象。

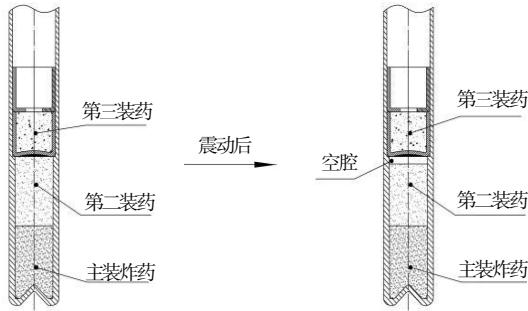


图4 雷管受到正向震动后第二装药出现空腔

Fig.4 A cavity appears in the secondary charge of the detonator after being subjected to positive shock vibration

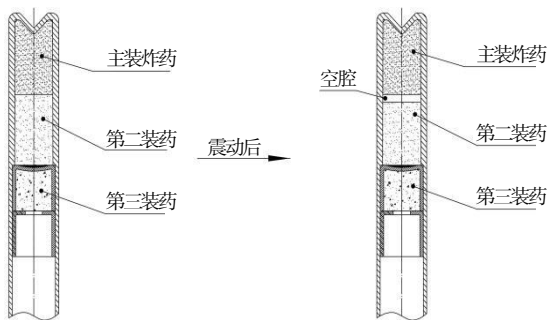


图5 雷管受到反方向震动后第二装药出现空腔

Fig.5 A cavity appears in the secondary charge of the detonator after being subjected to reverse shock vibration

在IID雷管结构设计中，使用了激发组件，其激发起爆能力相对较强，400 mg的第二装药采用一次性装填，在松装药高下也可进行适度压缩，这样既保证了雷管的起爆可靠性，又能提高雷管的抗震动能力，起爆方式不受任何限制。由于第二装药可被适度压制，使得IID雷管生产工艺条件要求相对宽松。

3 试验

3.1 试验设备及药剂

仪器设备：电子天平、压药设备、卡口机、模具、高低温湿热试验箱（SDK701FH）、铅板、震动试验

机、起爆控制器、延期时间检测仪、电子控制模块、86/24带台阶管壳、有孔加强帽（孔径2.5mm）和不同厚度的激发组件。

试验药剂：PETN（结晶、石墨造粒）、点火药剂LTNR（三硝基间苯二酚铅）、K-K（苦味酸钾系）、LLDDNP（硫化锑系）和LLG（硫氰酸铅系）。

选取4种不同类型的点火药剂，分别与IID雷管组装后进行雷管（86/24管壳-电子引火元件）性能测试。

3.2 装药结构参数

IID雷管的装药结构参数如表3所示。

表3 IID雷管装药结构参数

Tab.3 Charge parameters of IID detonator

工序	药量/mg	高度/mm	备注
主装炸药	380~410	压高 10.2~10.5	石墨造粒 PETN
第二装药	390~410	松装 25.5~26.3	PETN
激发组件	-	-	JF-04/JF-03
第三装药	200~210	-	PETN
有孔加强帽	-	-	YK-25
压合高度/mm	-	30.2~30.6	-

与不同点火药头适配的IID雷管装药结构参数基本一致，唯一差别在于激发组件的厚度不同，JF-04壁厚较JF-03略微偏厚，根据点火药剂的特性进行选择。LTNR点火药剂火焰感度高，点火一致性好，使用JF-04厚壁激发组件更有利于提高约束，可在有孔加强帽和激发组件间快速地形成高温高压气体，推动激发组件底部破裂。K-K、LLDDNP、LLG等点火药剂火焰感度相对偏低，适配JF-03激发组件，若采用偏厚的激发组件会使得约束过强，导致高温高压气体无法释放，从而产生半爆或拒爆等。

3.3 试验方法

分别选取4种不同点火药剂（LTNR、K-K、LLDDNP和LLG）与IID雷管进行适配，并进行各项功能测试：（1）起爆能力测试：按照GB/T 13226-1991工业雷管铅板试验方法进行；（2）延期精度测试：按照WJ 9085-2015工业数码电子雷管要求进行；（3）高低温下的起爆能力测试；（4）抗震性能测试：对雷管分别正反向震动后进行正反向起爆能力测试，验证雷管抗震性能。

4 测试结果与分析

4.1 起爆能力测试

按照 GB/T 13226-1991 工业雷管铅板试验方法标准的测试要求,分别将上述适配不同点火药头的 100 发雷管直立于铅板(35 mm×5 mm)中央,用电子雷管专用起爆器起爆,结果 4 类适配不同点火药头的电子雷管起爆后铅板全部穿孔,且炸孔直径在 11.2~12.5 mm 的范围内,显示出均匀的炸孔效果,表明该雷管起爆能力可满足要求。部分铅板样品如图 6 所示。

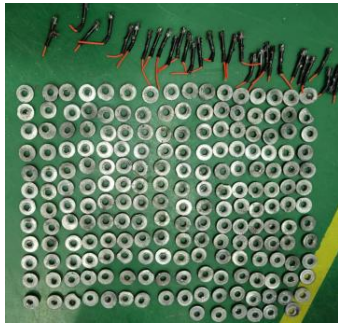


图 6 部分铅板炸孔照片

Fig.6 Photos of blasted-holes in some lead plates

4.2 延期精度测试

根据 WJ 9085-2015 工业数码电子雷管的测试要求,在-20, 70 °C及常温试验条件下对雷管进行延期时间测试。为进一步验证高温下雷管性能,将 70 °C 提高至 85 °C,验证 IID 雷管延期精度。延期精度测试结果如表 4 所示。

表 4 4 种点火药头与 IID 雷管适配延期精度测试数据

Tab.4 Test data of delay accuracy for 4 kinds of ignition matchhead adapted to IID detonators

点火药剂	温度/°C	标准差	最大误差
LTNR	-20	0.664	0.761
	常温	0.673	0.777
	85	0.654	0.705
K-K	-20	1.132	1.463
	常温	1.031	1.453
	85	1.084	1.477
LLDDNP	-20	2.907	16.52
	常温	2.389	17.24
	85	2.345	15.66
LLG	-20	0.651	2.43
	常温	0.608	2.29
	85	0.499	2.32

由表 4 可见, IID 雷管的点火、激发起爆、传爆等爆炸序列作用过程连续,爆炸成长时间短,几乎不受使用环境影响,在-20 °C和 85 °C下有等同的延时精度。

4.3 高低温下的起爆能力测试

按照 WJ 9085-2015 工业数码电子雷管耐温性能测试要求,分别取 20 发 4 种点火药剂适配的 IID 雷管样品置于-20 °C冷冻箱和 85 °C的高温箱内 4 h,取出后即刻进行雷管输出能力测试,结果雷管未出现瞎火和半爆现象。在-20 °C存放的样品铅板炸孔直径分布范围在 10.5~12.2 mm,在 85 °C存放的样品铅板炸孔直径分布范围在 11.5~12.4 mm。



(a) -20 °C低温



(b) 85 °C高温

图 7 部分高低温后的铅板炸孔照片

Fig.7 Photos of lead plate detonation holes after high and low temperature test

由此可见, IID 雷管在低温、高温等特殊环境中具有较好的耐温性能,符合 WJ 9085-2015 工业数码电子雷管标准。同时经与常温下雷管的输出能力对比,可见 IID 雷管在低温、高温等特殊环境中的起爆能力变化差异不大。

4.4 抗震性能测试

按照 WJ 9085 工业数码电子雷管抗震性能测试要求,试验的 4 种点火药头适配的 IID 雷管均符合抗震要求。以 LTNR 点火药剂适配的 IID 雷管为例,分别取 100 发 IID 电子雷管置于震动试验机中,连续进行正向/反向震动 10min,震动结束后分别进行正向、反向起爆能力测试,测试结果如表 5 所示。

表5 LTNR 药头适配的 IID 雷管正反向震动后起爆能力测试

Tab.5 Detonation capability test of LTNR ignitor adapted to IID detonator after positive and negative direction vibration tests

测试条件	测试数量/发	震动测试结果	起爆能力测试结果
正向震动 10 min 后进行正向起爆	100	震动过程中雷管未发生爆炸、结构松散或损坏等。	正向起爆全部穿孔, 平均孔径约 11.5 mm。
正向震动 10 min 后进行反向起爆	100	震动过程中雷管未发生爆炸、结构松散或损坏等。	反向起爆全部穿孔, 平均孔径约 11.5 mm。
反向震动 10 min 后进行正向起爆	100	震动过程中雷管未发生爆炸、结构松散或损坏等。	正向起爆全部穿孔, 平均孔径约 11.5 mm。
反向震动 10 min 后进行反向起爆	100	震动过程中雷管未发生爆炸、结构松散或损坏等。	反向起爆全部穿孔, 平均孔径约 11.2 mm。

由表5可见, IID 电子雷管具有较好的抗震性能和正向、反向起爆能力, 这主要是由于激发组件本身的激发起爆能力相对较强, 使得第二装药可适度压缩, 从而保障雷管装药结构的稳定性较好。

5 结论

本研究将猛炸药作为主要装药, 摒弃传统的起爆药, 设计了结构独特的激发组件, 将其应用到雷管装药结构中形成了点火-燃烧-激发起爆-传爆的爆炸序列, 从而具备灼热点起爆条件。在炸药快速燃烧产生的冲击力作用下, 激发组件可靠起爆炸药, 实现了雷管装药爆炸。

(1) IID 雷管装药结构与传统无起爆药雷管基本相同, 通过变换激发组件型号可实现与多种不同类

型点火药剂匹配, 且关键性工艺条件要求相对宽松, 无需进行大幅度的工序调整和工艺条件的变动, 使得 IID 雷管具有宽泛的应用条件。

(2) 经过上万发产品测试试验, IID 雷管结构稳定可靠, 可与各类点火头构成的电子引火元件配套生产工业电子雷管, 同时抗震性能好, 反向起爆能力强, 高低温条件下均能可靠起爆, 可满足各类不同特殊环境下的使用需求, 具有较大的推广应用空间。

(3) 列举了4种不同点火头与 IID 雷管适配的情况, 既包括燃烧慢的 LLDDNP 点火头, 也包括点火速度较快的 LTNR 和 LIG 点火头, 由于不同点火头输出的火焰持续时间长短不一, 其点燃炸药的能力也不同, 导致炸药燃烧的状态也各有差异, 后续将进一步加大试验研究, 为无起爆药雷管的发展和推广提供更多可行方案。

参考文献:

- [1] 李卫兵. 起爆药生产废水中重金属离子的治理方法[J]. 科技信息, 2011(9): 768-769.
- [2] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报, 2005(4): 10-13, 17.
- [3] 王俊杰, 黄寅生, 李锦涛, 等. 飞片式无起爆药雷管结构研究[J]. 火工品, 2016(4): 13-16.
- [4] 汪旭光, 沈立晋. 工业雷管技术的现状和发展[J]. 工程爆破, 2003 (3): 52-57.