乳化炸药殉爆实验及应用研究①

李波[1,2], 史秀志[2], 胡青华[1], 王文洋[3]
(1.江西赣锋锂业集团股份有限公司, 江西 新余 338004; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 3.深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿, 广东 韶关 512325)

摘 要: 针对矿山巷道光面爆破中导爆索爆破成本高的问题,利用炸药殉爆特性,仅用 1 发雷管实现孔内传爆。通过不同直径炸药、药量、约束条件下的炸药殉爆实验,得到不同条件下的炸药殉爆距离。结果表明:直径 27 mm 乳化炸药在 PVC 管中和炮孔中的殉爆距离分别为 10 和 90 cm,约束条件对炸药殉爆距离影响显著;炸药量从 150 g 增加至 300 g,殉爆距离至少增加了 5 cm,炸药殉爆距离随药量增加而增加;炸药直径对殉爆距离也有影响,相比直径 27 mm 炸药,直径 35 mm 炸药在炮孔中的殉爆距离增加了 5 cm。爆破工业试验表明,采用殉爆传爆法,爆破后的巷道成形较好,不仅满足矿山掘进要求,而且节省了爆破成本。

关键词: 巷道施工; 乳化炸药; 殉爆; 殉爆距离; 掘进爆破
中图分类号: TD235 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.003
文章编号: 0253-6099(2025)06-0014-05

Experimental Study and Application of Sympathetic Detonation of Emulsion Explosives

LI Bo[1,2], SHI Xiuzhi[2], HU Qinghua[1], WANG Wenyang[3]
(1.*Ganfeng Lithium Group Co., Ltd., Xinyu* 338004, *Jiangxi*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*; 3.*Fankou Lead-Zinc Mine of Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonfemet Co., Ltd., Shaoguan* 512325, *Guangdong*, *China*)

Abstract: To address high cost of smooth blasting using detonating cords for mine's roadways, explosive train in blast hole with only one detonator was realized by taking advantage of sympathetic detonation (SD) of explosive. After performing experiments on SD with emulsion explosive in different charge diameters, with different charge weight and other constraint conditions, the SD distances under different conditions were obtained. The results show that SD distances of emulsion explosive with a charge diameter of 27 mm in a PVC tube and blast holes are 10 cm and 90 cm respectively, and constraint conditions have a significant impact on the SD distance of explosives. With the charge weight increasing from 150 g to 300 g, the SD distance is at least 5 cm longer, indicating the SD distance increases with the increase of charge weight. On the other hand, the charge diameter of emulsion explosive also exerts some impact on the SD distance. The SD distance of emulsion with a charge diameter of 35 mm in blast holes is 5 cm longer than that of the emulsion with charge diameter of 27 mm. Industrial experiments on blasting show that the roadway constructed by adopting sympathetic detonation can be well formed, which can not only meet requirements of the subsequent tunnelling in mine but also cutting blasting cost.

Key words: roadway construction; emulsion explosive; sympathetic detonation; sympathetic detonation distance; tunnelling by explosion

矿山进行光面爆破时,孔内一般使用导爆索进行传爆,这样会耗费大量爆破器材,增加工人劳动强度,降低施工效率[1-2]。因此,在爆破工程中,有必要研究一种安全高效、成本低的爆破新技术[3-4]。利用殉爆机

① **收稿日期**: 2025-05-28
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374152)
作者简介: 李波(1999—),男,江西丰城人,硕士研究生,主要从事采矿与爆破技术方面的工作。E-mail:2973241771@qq.com
通信作者: 史秀志(1966—),男,河北邢台人,教授,博士研究生导师,主要从事爆破工程与技术安全研究。E-mail:baopo@csu.edu.cn

理实现孔内炸药传爆就是一种值得研究的爆破技术。殉爆是指主发药包爆炸后对周围间隔一定距离的炸药产生引爆的现象[5],具体过程为:主发炸药爆炸后产生冲击波,作用于被发炸药,并在局部产生热点,以热点为中心向四周扩散,附近炸药发生化学反应,并产生能量引起炸药温度升高使热点扩展,逐渐引发燃烧,进而引起爆轰[6]。热点形成的假说和机理主要有孔洞塌缩机理、剪切摩擦生热机理、气泡压缩机理[7]。

前人已针对炸药殉爆进行了大量研究,主要通过实验研究影响炸药殉爆距离的因素[8-12]。基于前人研究,本文研究炸药在不同条件下的殉爆距离,并将所得结论应用于实际爆破工程中,在不使用导爆索,而只使用 1 发电子雷管的条件下,完成孔内所有炸药传爆。

1　炸药在 PVC 管中的殉爆实验

在实际爆破工程中,炮孔中的炸药存在一个约束条件,约束条件对炸药殉爆距离影响很大。在较为破碎的岩体中,工人很难直接打孔装药,常常需要在炮孔内插入 PVC 管等材料,再进行装药。基于此,选取直径 42 mm 的 PVC 管和直径 27 mm 的 2 号岩石乳化炸药进行殉爆实验,炸药参数见表 1。雷管选用长 4 m 的数码电子雷管,延期时间设置为 0。每次实验均使用 3 根药卷,每根药卷 150 g。

表 1　PVC 管中炸药参数

Table 1　Parameters of explosive in PVC tube

密度/(g·cm^{-3})	直径/mm	长度/mm	质量/g	爆轰速度/(m·s^{-1})
1.15	27	230	150	3 800

实验装药结构如图 1 所示。主发药卷与 1 号被发药卷的间隔距离 L,和 1 号被发药卷与 2 号被发药卷间隔距离相同;2 号被发药卷与管口需有一段缓冲距离 L_1。每次实验 $L_1 \geqslant 50$ cm,以防止被发药卷还未殉爆就被空气冲击波冲出管口。

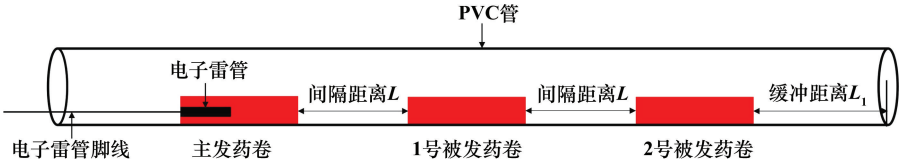


图 1　PVC 管装药结构

Fig. 1　Charge structure in PVC tube

首先采用沙地法进行无约束条件下炸药殉爆距离实验。在沙地上压出与炸药直径相同的半圆沟,将炸药相对置于沟槽内,主发炸药内插入电子雷管,插入深度为雷管长度的 2/3,起爆后观察现场是否有残留药卷,实验得出无约束条件下炸药殉爆距离为 5 cm。

然后进行 PVC 管殉爆实验,实验在专用的爆破硐室进行,装药时保持地面平整,通过使用卷尺来定位药卷在管道内的位置。实验先从间隔距离 $L=10$ cm 开始,如果炸药能够完全殉爆,则加大间隔距离继续实验。随着间隔距离增大,被发药卷受到的爆炸冲击波逐渐减小,直至爆轰波不足以将被发药卷完全殉爆。直径 27 mm 乳化炸药在直径 42 mm 的 PVC 管中的殉爆实验结果见表 2。

表 2　PVC 管殉爆实验结果

Table 2　Experimental results of sympathetic detonation of explosive in PVC tube

间隔距离/cm	实验结果
10	PVC 管被破坏,被发药卷完全殉爆,未发现残留药卷
15、20、25、30	PVC 管被破坏,被发药卷均未完全殉爆,现场有残留乳化炸药

为保证实验结果的真实性和可靠性,间隔距离为 10~30 cm 的殉爆实验分别进行了 3 次,实验现象相同。间隔距离 10 cm 时,被发药卷能够完全殉爆;间隔距离大于 10 cm,被发药卷不能完全殉爆,现场有残留炸药,随着间隔距离增大,残留炸药量越来越多。实验结果表明:直径 27 mm 乳化炸药在 PVC 管中稳定殉爆距离约为 10 cm,是无约束条件下炸药殉爆距离的 2 倍。PVC 管的约束作用能够在一定程度上减小主发药卷爆炸时产生的空气冲击波的侧向扩散,使得爆轰波能够沿着 PVC 管轴向传播,从而增加了乳化炸药的殉爆距离。同时,爆炸产生的高温会使 PVC 管破坏,现场残留了大量 PVC 管碎片。

2　炸药在岩石中的殉爆实验

在实际爆破工程中,炸药主要是在岩石中进行爆破,因此,有必要在井下进行现场实验,研究乳化炸药在岩石中的殉爆情况,得到不同直径和药量的乳化炸药在岩石中的稳定殉爆距离。

2.1　实验方案

实验地点位于凡口铅锌矿 -280 m 中段狮岭南

S17#穿脉巷道,巷道两帮岩石主要为条带瘤状灰岩,岩石物理力学参数见表 3。实验前先在巷道两帮的炮孔位置进行标记,如图 2 所示。采用凿岩台车进行钻孔,炮孔与水平面平行,直径 40 mm,长度 3.0 m,在实验巷道两帮分别钻凿 8 个炮孔,共 2 排 4 列,分布形式一致。为避免起爆时各个炮孔之间相互影响,设置排距为 2 m,列距为 3 m,炮孔分布示意图如图 3 所示。

表 3 岩石物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of rock

参数	数值
纵波速度/(m·s^{-1})	4 814
岩石密度/(kg·m^{-3})	2 700
波阻抗/(kg·m^{-2}·s^{-1})	1.3×10^{7}
抗拉强度/MPa	4.73
抗压强度/MPa	65.71

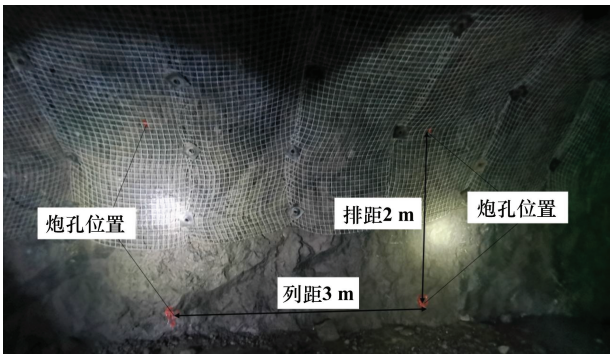


图 2 炮孔标记点

Fig. 2 Marking points of blast holes

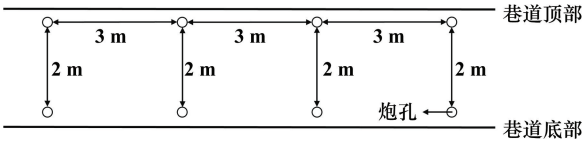


图 3 实验炮孔分布图

Fig. 3 Distribution of blast holes in experiment

实验分 2 组进行,第 1 组实验同时起爆 6 个炮孔,使用直径 27 mm 的乳化炸药药卷(参数同表 1);第 2 组实验同时起爆 10 个炮孔,使用直径 35 mm 的乳化炸药药卷,参数见表 4。通过调整炸药间隔距离,观察炸药在炮孔中的殉爆情况,研究直径 27 mm 的乳化炸药和直径 35 mm 的乳化炸药在岩石中的稳定殉爆距离。

表 4 第 2 组实验炸药参数

Table 4 Explosive parameters for second group experiment

密度/(g·cm^{-3})	直径/mm	长度/mm	质量/g	爆轰速度/(m·s^{-1})
1.15	35	270	300	4 000

2.2 第 1 组实验结果

每个炮孔装 3 层药卷,每层药卷 150 g,用卷尺测量炸药之间的距离,并用绝缘胶布将炸药固定在竹片上,保证每层药卷间隔距离一致。用竹竿将绑有炸药的竹片轻轻推入炮孔内,确保炸药没有发生位置移动。实验装药结构如图 4 所示。为防止爆破冲击波将炸药冲出孔口影响实验效果,用炮泥将孔口堵塞。本组实验 6 个炮孔间隔距离分别设置为 50、70、90、100、105、110 cm。实验时 6 个炮孔同时起爆,延期时间均设置为 0。实验后用强光手电筒照射查看孔内炸药殉爆情况,并用钢管伸入炮孔内查验孔壁内是否有未殉爆的残留药卷,实验结果见表 5。

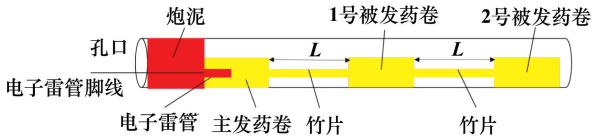


图 4 现场实验装药结构

Fig. 4 Schematic diagram of charging structure

表 5 直径 27 mm 乳化炸药实验结果

Table 5 Experimental results of emulsion explosive with charge diameter of 27 mm

间隔距离/cm	实验结果
50、70、90	被发药卷完全殉爆,未发现残留药卷
100、105、110	被发药卷未完全殉爆,孔内未见成型药卷,孔壁内有残留炸药

由表 5 可知,直径 27 mm 的乳化炸药在岩石中的稳定殉爆距离为 90 cm,比在 PVC 管中的稳定殉爆距离大很多。

合理的约束条件可以改善炸药爆轰性能,增强炸药殉爆能力,并在一定程度上减小主发药卷爆炸时产生的空气冲击波侧向扩散,使得爆轰波能够沿轴向传播。约束条件对炸药殉爆距离影响大,约束条件越好,爆炸产生的能量衰减越缓慢,炸药殉爆能力越强。从爆炸能量传递和转化的角度来看,乳化炸药在 PVC 管中的约束条件很差,爆炸所产生的能量会在断裂处大量散失,以及转化为 PVC 管碎片飞散的动能,只有少部分能量沿着管道作用于被发药卷。而在岩石中的炮孔约束条件较好,减少了爆炸产生的能量沿径向传播至空气介质,并且只有很少一部分能量转化为岩石的弹性势能(实验后炮孔未见明显损伤,可认为岩石只产生弹性变形,未产生塑性变形),大部分能量还是沿孔内传播作用于被发药卷。因此,乳化炸药在岩石中的殉爆距离会远大于在 PVC 管中的殉爆距离。

2.3　第 2 组实验结果

本组实验起爆 10 个炮孔,为探究炸药药量对殉爆距离的影响,其中 5 个炮孔每层装药 1 根,记为实验 1;另外 5 个炮孔每层装药半根(半根药卷质量 150 g),记为实验 2。实验 1 的 5 个炮孔间隔距离设置为 60、80、90、95、100 cm,实验 2 的 5 个炮孔间隔距离设置为 80、90、95、100、105 cm。因现场实验条件有限,凿岩台车最深进尺 3 m,故实验 1 的最大间隔距离设置为 100 cm。实验流程与前文一致,实验结果见表 6。

表 6　直径 35 mm 乳化炸药实验结果

Table 6　Experimental results of emulsion explosive with charge diameter of 35 mm

实验组别	间隔距离/cm	实验结果
1	60、80、90、95、100	被发药卷完全殉爆
2	80、90、95	被发药卷完全殉爆
2	100	被发药卷未完全殉爆,孔壁有残留炸药
2	105	被发药卷未完全殉爆,孔内有未殉爆的成型药卷

由表 6 可知,实验 1 直径 35 mm 乳化炸药主发药卷和被发药卷质量均为 300 g 时,其在岩石中的稳定殉爆距离至少为 100 cm。实验 2 直径 35 mm 乳化炸药主发药卷和被发药卷质量均为 150 g 时,其在岩石中的稳定殉爆距离为 95 cm。

2.4　对比分析

对比各实验结果可知,当炸药药量从 150 g 增加至 300 g 时,乳化炸药在岩石中的殉爆距离增加;乳化炸药直径由 27 mm 增大至 35 mm 时,乳化炸药在岩石中的稳定殉爆距离由 90 cm 增大至 95 cm。因此,增大炸药药量和药卷直径均能增加炸药殉爆距离。

3　工业试验

通过前文实验结果,开展掘进爆破现场工业试验,对常规光面爆破方案进行优化,并在新型光面爆破方案中取消使用导爆索。

掏槽孔和辅助孔采用连续装药,顶板炮孔使用光面爆破技术,并用殉爆传爆法取代传统的导爆索起爆法。在掘进爆破时,岩石破裂会使得爆破能量外泄,因此将前文的研究结论应用于实际爆破工程时,需要考虑能量泄漏对炸药殉爆距离的影响,综合考虑,本次爆破炸药间隔距离设置为 70 cm,孔内只使用 1 发电子雷管。为加强起爆能量,孔底装 2 根药卷,孔口用炮泥堵塞。装药结构如图 5 所示。

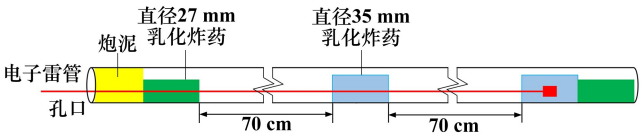


图 5　工业试验装药结构

Fig. 5　Charging structure for industrial experiment

本次爆破炮孔深度 2.65 m,掘进进尺 2.4 m,爆破后现场无残留炸药,说明炸药间隔距离设置为 70 cm 可以完全殉爆。根据现场观测,半孔率达到 85% 以上,超欠挖均小于 20 cm,开挖断面平整美观,爆后块度均匀。因此,利用炸药殉爆机理进行光面爆破所形成的巷道能够满足矿山的掘进要求,爆破后的巷道轮廓形状如图 6 所示。



图 6　巷道轮廓形状

Fig. 6　Photographs of roadway on site

4　结论

1)乳化炸药在 PVC 管中殉爆距离为 10 cm,在岩石炮孔中殉爆距离为 90 cm,在岩石中的殉爆距离远大于在 PVC 管中的殉爆距离,外界约束条件对炸药殉爆影响较大。

2)炸药直径由 27 mm 增大至 35 mm 时,乳化炸药在岩石中的殉爆距离由 90 cm 增至 95 cm;炸药量从 150 g 增加至 300 g 时,乳化炸药殉爆距离由 95 cm 增大至 100 cm。增加炸药直径和炸药量均能增大炸药的殉爆距离。

3)对比传统的导爆索传爆法,在保证爆破效果的前提下,采用殉爆传爆法可以取消使用导爆索,降低生产成本,提高矿山经济效益。

4)本文实验受限于实验条件,在井下殉爆实验时仅通过人工目测和钢管检查,无法完全准确判断炸药殉爆情况,后续可以采用超声检测或工业内窥镜等更

可靠的检测手段。同时,本文实验研究的变量较为单一,样本数量较少,今后可以研究炸药不耦合系数、殉爆惰性介质等其他影响炸药殉爆距离的因素,并结合数值模拟的方法进行研究。

参考文献(References):

[1] 汪旭光,吴春平. 我国爆破行业发展成就、挑战与机遇[J]. 中国矿业, 2024,33(12):1-9.
WANG Xuguang,WU Chunping. Blasting industry in China: Achievements, challenges and opportunities[J]. China Mining Magazine, 2024,33(12):1-9.

[2] 薛斌,徐恒阳,魏快快,等. 新型光面爆破技术在边坡开挖中的应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):28-31.
XUE Bin, XU Hengyang, WEI Kuaikuai, et al. Application of new smooth blasting technology in slope excavation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):28-31.

[3] 赵文奎,黄海仙,李启月,等. 基于孔壁压力的边坡预裂爆破参数设计与试验[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):1-5.
ZHAO Wenkui, HUANG Haixian, LI Qiyue,et al. Design and experiment of slope presplit blasting parameters based on borehole wall pressure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):1-5.

[4] 陈帮洪,陈星明,武尚荣, 等. 基于LS-DYNA的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):47-53.
CHEN Banghong, CHEN Xingming, WU Shangrong,et al. Numerical simulation of blasting with wedge cut based on LS-DYNA software and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):47-53.

[5] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙:中南大学出版社, 2011.
LI Xibing. Rock drilling and blasting engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.

[6] 王泽溥,郑志良. 爆炸及其防护[M]. 北京:兵器工业出版社, 2008.
WANG Zepu, ZHENG Zhiliang. Explosion and its protection[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2008.

[7] 汪成运,魏志丰,何鹏鹏. 炸药殉爆的研究进展与展望[J]. 爆破器材, 2022,51(6):1-8.
WANG Chengyun, WEI Zhifeng, HE Pengpeng. Research progress of sympathetic detonation of explosives[J]. Explosive Materials, 2022,51(6):1-8.

[8] 刘晓文,高玉刚. 炸药在水介质中殉爆特性分析[J]. 工程爆破, 2022,28(4):102-107.
LIU Xiaowen, GAO Yugang. Analysis of explosive martyrdom in water medium[J]. Engineering Blasting, 2022,28(4):102-107.

[9] 李波. 孔内不耦合装药殉爆距离研究[D]. 长沙:中南大学, 2024.
LI Bo. Study of sympathetic distance of uncoupled charges in holes[D]. Changsha: Central South University, 2024.

[10] 李启月,曾海登,赵新浩,等. 炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):1-4.
LI Qiyue, ZENG Haideng, ZHAO Xinhao, et al. Influence of double groove energy gathering tubes on the denotation distance of emulsion explosives under constraint of blast hole[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):1-4.

[11] XIAO Y C, XIAO X D, FAN C Y, et al. Study of the sympathetic detonation reaction behavior of a fuze explosive train under the impact of blast fragments[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021,35(6):2575-2584.

[12] WU X D,GONG M, WU Y F, et al. Experimental and numerical study on the cumulative-deck charging structure based on explosive sympathetic detonation in tunnel smooth blasting[J]. Alexandria Engineering Journal, 2025,116:561-573.

引用本文:李波,史秀志,胡青华,等. 乳化炸药殉爆实验及应用研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):14-18.
LI Bo, SHI Xiuzhi, HU Qinghua, et al. Experimental study and application of sympathetic detonation of emulsion explosives[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):14-18.

(上接第13页)

[17] 卢宏建,南世卿,甘德清,等. 大型铁矿山露天转地下开采过渡方案优化[J]. 金属矿山, 2014(11):1-6.
LU Hongjian, NAN Shiqing, GAN Deqing, et al. Optimization of transitional scheme from open-pit to underground mining for large-scale iron mine[J]. Metal Mine, 2014(11):1-6.

[18] 卢宏建,甘德清,杨中建. 庙沟铁矿露天转地下过渡期稳产措施与边坡稳定性[J]. 金属矿山, 2013(1):7-10.
LU Hongjian, GAN Deqing, YANG Zhongjian. Production steady and slope stability analysis during the transition period of open pit to underground in Miaogou iron mine[J]. Metal Mine, 2013(1):7-10.

[19] 胡颖鹏. 露天转地下楔形过渡开采诱导塌陷坑控制滑坡危害技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2021.
HU Yingpeng. Study on the technology of controlling landslide hazard by inducing the collapse crater during the wedge-shaped transition from open-pit to underground mining[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.

引用本文:蒋权,李杰林,叶永飞,等. 庙冲铁矿露天转地下开采过渡期协同开采顺序及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):8-13.
JIANG Quan, LI Jielin, YE Yongfei, et al. Mining sequence and stability during transition from open-pit to underground mining in Miaochong iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):8-13.