

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.022

井下小断面开挖融合延时起爆网路试验研究*

秦绍兵^{1,2}, 许自栋³, 王道银⁴, 秦梓航¹, 葛永翔²

(1. 中钢集团武汉安全环保研究院有限公司, 武汉 430081; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070;
3. 福建省奕顺建设工程有限公司, 泉州 362200; 4. 宜昌宝石山矿业有限公司, 宜昌 443145)

摘要: 井下小断面巷道开挖作业环境条件差、使用数码电子雷管数量多,起爆网路施工难度大、安全风险高、爆破器材成本费用高。基于开挖对象地质构造及物理力学性质和导爆索传爆特性,设计了一种数码电子雷管与导爆索融合的延时起爆网路,将同段别辅助孔和周边孔中用导爆索代替数码电子雷管,由单发数码电子雷管起爆,以降低组网复杂度,提高网路整体可靠度,并分别在广山铁矿和宝石山磷矿开展了现场试验,以验证其在不同矿种环境下的适用性。试验结果表明:在铁矿小断面巷道开挖爆破过程中,所设计的融合延时起爆网路能够大幅度降低起爆器材成本、提高起爆网路施工的便利性、改善掏槽效果、降低作业过程中的安全风险。而在地下磷矿试验过程中,由于受制于磷矿地质构造及物理力学性质的特殊性,所设计的融合延时网路未实现预期效果,还需开展进一步研究。

关键词: 小断面开挖; 数码电子雷管; 导爆索; 融合; 延时起爆网路

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0174-07

Experimental Study on Fusion Delay Detonation Network in Small Section Excavation

QIN Shao-bing^{1,2}, XU Zi-dong³, WANG Dao-yin⁴, QIN Zi-hang¹, GE Yong-xiang²

(1. Wuhan Safety and Environmental Protection Institute Co., LTD., Sinosteel, Wuhan 430081, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Fujian Yishun Construction Engineering Co., LTD., Quanzhou 362200, China; 4. Yichang Gem Mountain Mining Co., LTD., Yichang 443145, China)

Abstract: The construction of a blasting network is challenging, with high risks and costs associated with blasting equipment. Considering the geological structure, physical and mechanical properties of the excavation target, and the detonation characteristics of the detonating cable, a delayed detonation network was designed to combine a digital electronic detonator and a detonating cord. This design replaced the digital electronic detonator with the detonating cord in auxiliary and peripheral holes within the same section. In contrast, a single digital electronic detonator was used to initiate detonation to reduce the networking complexity and improve the overall reliability of the network.

收稿日期 (Date of reception): 2024-05-10

网络首发日期 (Published online): 2024-06-20

作者简介: 秦绍兵 (1966-), 男, 采矿专业硕士, 教授级高级工程师, 主要从事采矿工艺技术、控制爆破技术研究与应用等工作, (E-mail) 794278856@qq.com.

通讯作者: 秦梓航 (1996-), 男, 助理工程师, 主要从事矿山开采安全技术、职业健康管理和职业病危害控制技术研究与工作, (E-mail) 894532947@qq.com.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2022BEC040)

About the author: QIN Shao-bing (1966-), male, master of mining, professor-level senior engineer, mainly engaged in mining technology, controlled blasting technology research and application, (E-mail) 794278856@qq.com.

Corresponding author: QIN Zi-hang (1996-), male, assistant engineer, mainly engaged in the research and application of mining safety technology, occupational health management and occupational hazard control technology, (E-mail) 894532947@qq.com.

Fund Programs: The Key Research and Development Program of Hubei Province (2022BEC040)

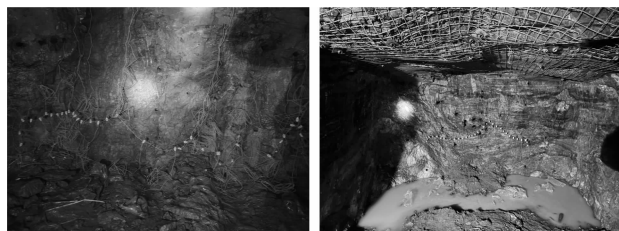
Field tests conducted at Guangshan iron mine and Gemstone phosphate mine verified the applicability of this method in different mineral environments. The results show that the fusion delay detonation network can significantly reduce detonation equipment costs, simplify initiation network construction, improve cutting effectiveness, and reduce safety risks during excavating small-section roadways in iron mines. However, during the underground phosphate rock test, the unique geological structure and the properties of phosphate rock prevented the designed network from achieving the expected results, indicating a need for further research.

Key words: small section excavation; digital electronic detonator; detonating cord; fuse; delayed initiation network

根据《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》(2021年)的进度安排,我国应全面推广工业数码电子雷管,除保留少量产能用于出口或其它经许可的特殊用途外,至2022年6月底前停止生产、8月底前停止销售普通工业雷管。相关政策的推进必将引起工程爆破领域的技术变革。

数码电子雷管作为一种新型的电子引爆装置,相较于普通工业雷管具有本质安全度高、公共安全性好、稳定可靠性高、爆破效果好、爆破振动低等优势^[1,2]。目前绝大多数省份已经全面使用数码电子雷管,但在考虑经济合理和技术可行的前提下,如何充分利用数码电子雷管的优越性,设计基于数码电子雷管的融合起爆网络,攻克各类应用场景的技术应用壁垒,依旧是急需攻关的重点方向。

如图1所示,在井下小断面、多孔数的巷道掘进过程中,由于井下环境复杂且孔间距较小,先起爆炮孔势必对未起爆雷管的芯片、引火药头等内部结构造成破坏,进而产生盲炮、拒爆现象,在降低作业效率的同时增加了盲炮处理风险^[3-6]。同时由于数码电子雷管造价高,矿山企业为节省成本,通常从钻孔量、药量和孔数方面进行压减,这势必会降低巷道成巷质量,进一步增加了井下作业安全风险和冒顶片帮事故隐患。



(a) 铁矿三心拱形断面
(b) 磷矿矩形断面
(a) Three-center arch section of iron mine
(b) Rectangular section of phosphorus mine

图1 井下小断面开挖全数码电子雷管网路现场照片
Fig. 1 Field photo of full digital electronic detonator network for small-section excavation

针对井下小断面开挖爆破所存在的问题,业内诸多学者开展了相关研究。金小淳等分析了电子雷

管在小断面隧道应用过程中出现拒爆、盲炮以及爆破效果差的原因^[7],并针对雷管特点和隧道地质条件以及孔网参数等因素,提出了适用于小断面隧道爆破开挖的逐孔起爆技术。章逸锋等为了提高小断面巷道掘进炮孔利用率^[8],优化了对角柱形掏槽爆破参数,优化后的对角柱形炮孔利用率可由80%提高至93%。万嗣鹏等为解决小断面隧道爆破开挖时爆破振动速度过大等问题^[9],从水压爆破、准直眼掏槽形式、毫秒延时爆破三个方面对爆破方案进行了优化,并从理论上给出了降振效果的最优毫秒延时范围。陈迎军等结合大红山铁矿小断面箕斗竖井中深孔爆破技术的应用情况^[10],采用导爆管雷管及电磁雷管爆破网路,提高了网路的准爆性和爆破效率,降低了爆破飞石的冲击。

因此,在现有研究的基础上,结合政策的驱动性和数码电子雷管的优越性,针对井下小断面井巷施工的掘进爆破作业需求,设计一种基于数码电子雷管的融合起爆网路的安全、高效、经济的爆破施工工艺,对于矿山企业改善巷道成巷质量、保障安全生产、降低生产成本具有重要的实际意义。

1 融合延时起爆网路设计

针对小断面开挖爆破过程中,矿岩夹制作用大(自由面小、需布置密集的掏槽孔和辅助孔)、炮孔之间相互影响大(先爆孔可能导致后爆孔中雷管芯片受损、先爆孔矿岩体位移可能破坏后爆网路)、炮孔数量多(数码电子雷管用量多、成本高)、网路复杂(炮孔密集、段别多、延时设置及组网工作出错率高)等特点^[11-15],设计了一种数码电子雷管与导爆索融合的延时起爆网路,如图2所示。即在同段别辅助孔和周边孔中用导爆索代替数码电子雷管,利用一发数码电子雷管起爆,实现爆破过程的组网简单、操作便利,并降低成本。

1.1 小断面巷道开挖的网路设计

针对三心拱形断面(多适用于铁、铜等火成岩类金属矿)和矩形断面(多适应于磷、石膏等沉积岩

类非金属矿)巷道,并结合不同的断面积,分别设计了如下数码电子雷管与导爆索融合的延时起爆网路,如图3所示为不同形状断面巷道炮孔布置平面示意图,图4所示为不同形状断面巷道延时起爆网路段别设计平面示意图,图5所示为融合延时起爆网路段别设计剖面示意图。



图2 井下小断面开挖融合延时起爆网路现场
Fig. 2 Fusion delay initiation network for small-section excavation

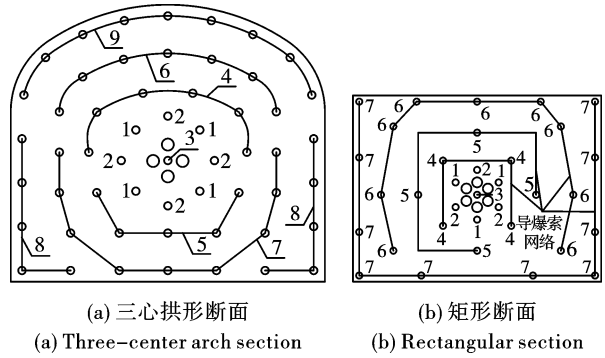
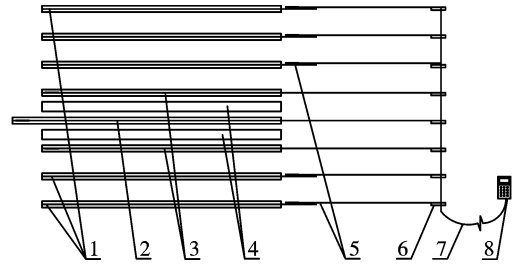


图4 不同形状断面巷道延时起爆网路段别设计平面示意图

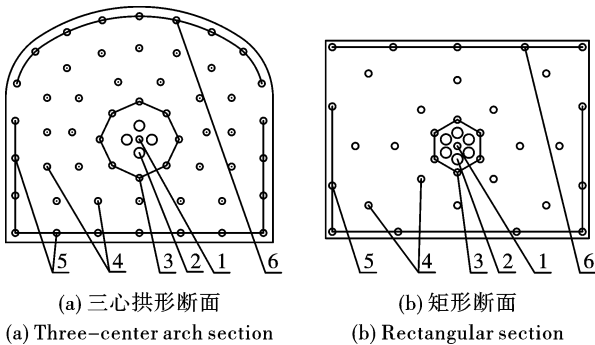
Fig. 4 Initiation network design of conventional detonators for different section shapes



- 1 - 起爆辅助孔和周边孔中装药的导爆索;
- 2 - 起爆空孔之内掏槽孔中装药的数码电子雷管及脚线;
- 3 - 起爆空孔之外掏槽孔中装药的数码电子雷管及脚线;
- 4 - 为掏槽孔提供自由面和补偿空间的空心孔;
- 5 - 起爆辅助孔和周边孔中导爆索的数码电子雷管及脚线;
- 6 - 数码电子雷管接线卡;
- 7 - 组网主线;
- 8 - 扫码组网起爆器

图5 不同形状断面巷道融合延时起爆网路设计剖面示意图

Fig. 5 Fusion delay initiation network of electronic detonators for different section shapes



- 1 - 空心孔内掏槽孔; 2 - 空心孔; 3 - 空心孔外掏槽孔;
- 4 - 辅助孔; 5 - 底板孔和边帮孔; 6 - 顶板孔

图3 不同形状断面巷道炮孔布置平面示意图
Fig. 3 Schematic diagram of blast hole layout of roadway with different section shapes

在针对以上网路设计过程中,孔数和孔位可根据现场实际情况适当调整,其中掏槽孔均为数码电子雷管直接起爆孔内炸药,其余孔均由1发数码电子雷管孔内或孔外引爆导爆索、进而引爆同段炮孔内的炸药。

1.2 小断面巷道开挖的网路延时时间设计

针对三心拱形断面和矩形断面巷道,结合不同的断面积和不同的矿岩物理力学性质,分别设计了不同的数码电子雷管与导爆索融合的起爆网路延时时间。如表1所示为金属矿山小断面巷道开挖爆破延时时间设计。

表1 金属矿山小断面巷道开挖爆破延时时间设计表
Table 1 Design table of blasting delay time for excavation of small section roadway in metal mine

段别	延时时间/ms
1	0
2	100
3	150
4	230
5	310
6	390
7	470
8	540
9	620

注:金属矿山小断面整合起爆网路延时间隔时间第1段和第2段相隔80~150ms,第2段起,每相邻段之间的间隔时间均为50~100ms。此表为其中一组现场试验的延时时间设计。

1.3 融合延时起爆网路连接方式

融合延时起爆网路连接包括导爆索与导爆索之间的连接和数码电子雷管与导爆索之间的连接, 考虑到施工的便利性及连接的可靠性, 在现场试验过程中, 导爆索与导爆索之间的连接采用绑结方式连接, 如图 6 所示。

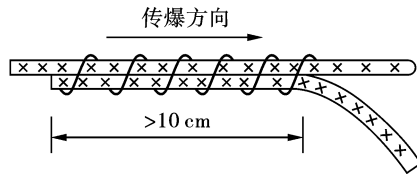


图 6 绑结法导爆索连接方式示意图
Fig. 6 Tying method of the detonating cord

数码电子雷管与导爆索之间的连接方式, 如图 7 所示。

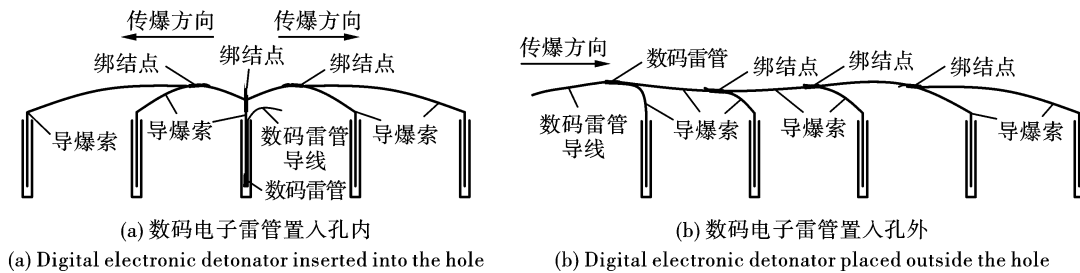


图 7 数码电子雷管与导爆索连接方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram of connection between digital electronic detonator and detonating cord

2.1 金属矿现场试验

(1) 全数码电子雷管方案

铁矿巷道为宽 4.2 m、高 3.7 m 的三心拱形断面, 原设计钻孔 56 个 (含 4 个空孔), 设计装药方式及段别为: 共 56 个孔, 4 个大孔不装药。1 段共 2 发、1 个掏槽孔; 2 段共 4 发、4 个辅助孔; 3 段共 4 发、4 个辅助孔; 4 段共 4 发、4 个辅助孔; 5 段共 4 发、4 个辅助孔; 6 段共 5 发、5 个辅助孔; 7 段共 6 发、6 个辅助孔; 8 段共 15 发、3 个辅助孔、4 个底孔、8 个周边孔 (帮部); 9 段共 9 发、2 个底孔、7 个周边孔 (拱顶); 共使用数码电子雷管 53 发。延时时间设计为: 1 段设置为 0 ms, 2 段延时 150 ms, 3 段延时 300 ms, 3 段之后的段别, 段间延时 200 ~ 500 ms。

(2) 融合延时起爆网路设计方案

针对设计的融合延时起爆网路, 按照图 4 所示的三心拱形断面炮孔形式布置, 实际共钻孔 56 个 (含 4 个空孔), 装药方式及段别为: 共 56 个孔, 4 个大孔不装药。1 段共 4 发、空孔之外的 4 个掏槽孔; 2 段共 4 发、空孔之外的 4 个掏槽孔; 3 段 1 发、空孔之内的 1 个中心掏槽孔; 4 段“1 发 + 导爆索”、共

在试验及现场应用过程中, 网路连接时应注意: 起爆导爆索的雷管与导爆索绑扎端端头的距离不应小于 15 cm, 雷管的聚能穴应朝向导爆索的传爆方向, 切忌雷管反向; 采用绑结方式连接导爆索网路时, 两根导爆索的重叠长度应不小于 10 cm。

2 现场试验

针对全数码电子雷管方案及上述所设计的融合延时起爆网路方案, 分别在鄂东广山铁矿和鄂西宝石山磷矿的小断面巷道开挖爆破过程中开展了现场对比试验, 以验证其在不同矿种井下巷道开挖爆破过程中的适用性。为保证试验效果的可比性, 同类型矿种的试验选择在同一采区相邻进路中进行, 其巷道断面形状、大小、岩性均基本相同。

6 个辅助孔; 5 段“1 发 + 导爆索”、共 5 个辅助孔; 6 段“1 发 + 导爆索”、共 7 个辅助孔; 7 段“1 发 + 导爆索”、共 9 个辅助孔; 8 段“2 发 + 导爆索”、4 个底孔、4 个周边孔 (帮部); 9 段“1 发 + 导爆索”、8 个周边孔 (拱顶)。共使用数码电子雷管 16 发、导爆索 128 m。采用数码电子雷管孔内起爆导爆索的连接方式, 延时时间设计为: 1 段设置为 0 ms, 2 段延时 100 ms, 3 段延时 150 ms, 3 段之后的段别, 段间延时均为 80 ms。

(3) 试验效果及起爆器材成本比较

通过对两种方案 12 次现场试验情况统计分析, 爆破效果对比情况如表 2 所示, 起爆器材成本对比情况如表 3 所示。

表 2 两种方案爆破效果对比表

Table 2 Comparison of blasting effect of two schemes		
	全数码雷管方案	融合起爆网路方案
孔数/个	56	56
孔深/m	2.30	2.30
循环进尺/m	2.06	2.02
炮眼利用率/%	89.6	87.8

表3 两种方案起爆器材成本对比表

Table 3 Comparison of the cost of detonating equipment of the two schemes

	全数码电子雷管方案			融合起爆网路方案		
	用量	单价/元	小计/元	用量	单价/元	小计/元
数码电子雷管/个	53	20.5	1086.5	16	20.5	328
导爆索/m	0	4.0	0	108	4.0	432
每循环成本/元			1086.5			760

根据表2、表3所示数据,两种方案的爆破效果(循环进尺)基本一致,但所设计的融合延时起爆网路方案在凿岩量、装药量不变的情况下,组网工作操作便利,起爆器材成本大大降低,单循环节约成本达326.5元。

2.2 磷矿现场试验

2.2.1 全数码电子雷管方案

磷矿巷道为宽3.8 m、高3.0 m的矩形断面,原设计钻孔38个(含6个空孔),设计装药方式及段别为:共38个孔,6个大孔不装药。采取从掏槽孔到辅助孔到顶板孔到底板孔到帮孔的逐孔起爆方式,每孔之间延时240 ms。

2.2.2 融合延时起爆网路设计方案

针对本磷矿设计的融合延时起爆网路,与图4

中矩形断面炮孔布置情况基本一致,实际共钻孔38个(含4个空孔),装药方式及段别为:共38个孔,6个大孔不装药。1段共3发、空孔之外的3个掏槽孔;2段共3发、空孔之外的3个掏槽孔;3段1发、空孔之内的1个中心掏槽孔;4段“1发+导爆索”、共4个辅助孔;5段“1发+导爆索”、共4个辅助孔;6段“1发+导爆索”、共4个辅助孔和3个顶板孔;7段“1发+导爆索”、共6个帮孔和4个底板孔。共使用数码电子雷管11发、导爆索80 m。采用数码电子雷管孔内起爆导爆索的连接方式,延时时间设计为:1段设置为0 ms,2段延时100 ms,3段延时250 ms,3段之后的段别,段间延时均为50 ms。

2.2.3 试验效果及起爆器材成本比较

两种方案的起爆器材成本对比情况如表4所示。

表4 两种方案起爆器材成本对比表

Table 4 Comparative table of cost of detonating equipment for two schemes

	全数码电子雷管方案			融合起爆网路方案		
	用量	单价/元	小计/元	用量	单价/元	小计/元
数码电子雷管/个	32	20.5	656	11	20.5	225.5
导爆索/m	0	4.0	0	80	4.0	320
每循环成本/元			656			545.5

根据表4中数据对比可知,在凿岩量、装药量不变的情况下,利用所设计的融合延时起爆网路方案时组网工作操作便利,起爆器材成本有所降低,单循环节约成本达110.5元。

经过对矿山近一个月现场试验情况统计分析,全数码电子雷管方案在孔深为2.5 m时,循环进尺可达2.4左右。使用融合延时起爆网路,现场试验情况如图8所示,受磷矿特殊矿岩地质构造及岩石物理力学性质影响,延时间隔特别难以把握。延时间隔设置不当,经常出现邻近孔内的数码电子雷管芯片被挤坏及先爆孔的冲击波和飞石炸断邻近的导爆索的情况,从而导致拒爆现象。

铁矿较为致密且多为块状构造,而磷矿具有典型的层理构造。相较于铁矿的“均匀性”,磷矿由于含有不规则层理结构面的存在,阻碍了爆炸应力波的传播并使得爆破能量传播分布具有了不均匀性,

进而导致合理的延时间隔具有极强的空间差异性。因此,对于磷矿小断面巷道开挖爆破的融合延时起爆网路设计需要考虑层理构造分布,进而优化爆破参数设计。



图8 融合延时起爆网路现场试验照片

Fig. 8 Photos of fusion delay initiation network

3 分析与结论

针对矿山井下小断面巷道开挖爆破过程存在的难题,设计了一种数码电子雷管与导爆索融合的延

时起爆网路,并分别在地下铁矿和磷矿开展了现场试验,进一步验证了该方案在不同矿种环境下的适用性,得出如下结论:

(1)突破传统工法,改变空心孔之内、外掏槽孔的起爆顺序,即先起爆空心孔之外掏槽孔,再起爆空心孔之内掏槽孔,利用该孔爆破作用将之前破碎矿岩彻底推出,形成一个较大空腔,从而为后续辅助孔爆破创造充分的自由面,可以有效改善爆破效果,提高掘进炮孔利用率。

(2)金属矿现场试验效果表明,数码电子雷管与导爆索融合的延时起爆网路应用于小断面开挖爆破,只要延时间隔选择适当,可以在保证同样爆破效果的基础上,大幅度降低起爆器材成本。同时改善了周边孔成巷质量,提高了起爆网路施工的便利性、降低了作业过程中的安全风险。

(3)融合的延起爆网路在磷矿现场试验未获得预期效果。经分析研究,延时间隔小于100 ms时,掏槽及后续孔爆破效果较差;由于磷矿相较于金属矿,具有较为复杂的层理结构,而不同倾角的层理结构对于爆破效果具有极大的影响,进而导致不同方向的延期间隔应存在差异性,故延时间隔大于100 ms时,会出现损坏相邻孔雷管芯片和先爆孔会炸断后续孔传爆导爆索等现象,从而导致拒爆;磷矿小断面开挖由于矿岩较软,孔网参数较大,炮孔数量少、深度大、单孔导爆索使用量高,使用导爆索取代数码电子雷管的成本优势不明显。

综上,数码电子雷管与导爆索融合的延时起爆网路应用金属矿小断面开挖中,在保证掘进效率的基础上,可有效改善成巷质量、提高经济效益、降低安全风险,不失为一种有益的尝试。但受制于磷矿及其他岩体特殊矿岩地质构造及岩石物理力学性质,此融合延时网路应用时,如何保障质量、效率、成本和安全,还有待在优化孔网参数、延时间隔和探索磷矿及其他岩体岩石物理力学性质及应力波传递规律等方面开展进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 杨文,岳彩新,宋家良,等.工业电子雷管抗冲击性能试验研究[J].火工品,2022(2):16-19.
- [1] YANG Wen, YUE Cai-xin, SONG Jia-liang, et al. Experimental research on the impact resistance of industrial electronic detonators [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2):16-19. (in Chinese)
- [2] 冷振东,范勇,涂书芳,等.电子雷管起爆技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2023,25(1):142-154.
- [2] LENG Zhen-dong, FAN Yong, TU Shu-fang, et al. Electronic detonator initiation technology: research progress and development strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1):142-154. (in Chinese)
- [3] 史雅语,刘慧.招宝山超小净距隧道开挖爆破技术[J].工程爆破,1997,3(4):31-36.
- [3] SHI Ya-yu, LIU Hui. Blasting technology of Zhaobaoshan Twin-tunnel with a minishort separation [J]. Engineering Blasting, 1997, 3(4):31-36. (in Chinese)
- [4] 刘忠民,杨年华,石磊,等.电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究[J].爆破器材,2021,50(5):39-42,9.
- [4] LIU Zhong-min, YANG Nian-hua, SHI Lei, et al. Experimental study on misfire in small hole-space blasting of electronic detonator [J]. Explosive Materials, 2021, 50(5):39-42,9. (in Chinese)
- [5] 戚天新,魏琳,陈小伟,等.数码电子雷管隧道爆破中盲炮问题浅析[J].西部探矿工程,2021,33(10):182-184.
- [5] QI Tian-xin, WEI Lin, CHEN Xiao-wei, et al. Analysis of blind shot in tunnel blasting with digital electronic detonator [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(10):182-184. (in Chinese)
- [6] 潘涛,陈辉峻,赵明生,等.数码电子雷管延时精度误差影响因素及改进措施研究[J].爆破,2014,31(2):135-138.
- [6] PAN Tao, CHEN Hui-jun, ZHAO Ming-sheng, et al. Study of influencing factor and improving measures of accuracy error of digital electronic detonator [J]. Blasting, 2014, 31(2):135-138. (in Chinese)
- [7] 金小淳,马志刚,杨波,等.工业电子雷管在小断面隧道中的应用效果分析[J].工程爆破,2022,28(2):128-134.
- [7] JIN Xiao-chun, MA Zhi-gang, YANG Bo, et al. Application of industrial electronic detonators in a small section tunnel [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2):128-134. (in Chinese)
- [8] 章逸锋,李洪超,张智宇,等.基于正交试验的小断面巷道掏槽爆破参数确定[J].黄金科学技术,2023,31(2):331-339.
- [8] ZHANG Yi-feng, LI Hong-chao, ZHANG Zhi-yu, et al. Determination of blasting parameters for excavation and cutting of small section roadways based on orthogonal experiments [J]. Gold Science and Technology, 2023, 31(2):331-339. (in Chinese)
- [9] 万鹏鹏,陶铁军,陈二平,等.小断面隧道快速掘进爆破方案优化研究[J].中国矿业,2020,29(11):178-183.
- [9] WAN Si-peng, TAO Tie-jun, CHEN Er-ping, et al. Study

- on optimization of blasting scheme for fast tunneling of small section tunnel [J]. *China Mining Magazine*, 20, 29(11):178-183. (in Chinese)
- [10] 陈迎军, 席 鹏, 欧阳广, 等. 中深孔爆破技术在小断面超深竖井中的应用[J]. *爆破*, 2014, 31(3):76-79.
- [10] CHEN Ying-jun, XI Peng, OUYANG Guang, et al. Application of medium-length hole blasting technique in small-section super-deep shaft [J]. *Blasting*, 2014, 31(3):76-79. (in Chinese)
- [11] 刘忠民, 杨年华, 石 磊, 等. 电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究[J]. *爆破器材*, 2021, 50(5):39-42.
- [11] LIU Zhong-min, YANG Nian-hua, SHI Lei, et al. Experimental study on misfire in small hole-space blasting of electronic detonator[J]. *Explosive Materials*, 21, 50(5):39-42. (in Chinese)
- [12] 周慈亮, 汤有富, 郑 琪, 等. 某型电子雷管在隧道控制爆破中的应用[J]. *爆破器材*, 2021, 50(3):51-54.
- [12] ZHOU Ci-liang, TANG You-fu, ZHENG Qi, et al. Application of an electronic detonator in tunnel controlled blasting[J]. *Explosive Materials*, 21, 50(3):51-54. (in Chinese)
- [13] 林文斌, 赖远标, 余 晖, 等. 工业电子雷管盲炮产生原因分析及其处理措施[J]. *现代工业经济和信息化*, 2021, 11(3):136-137, 157.
- [13] LIN Wen-bin, LAI Yuan-biao, YU Hui, et al. Causes and treatment measures of blind gun with industrial electronic detonator[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2021, 11(3):136-137, 157. (in Chinese)
- [14] 章彬彬, 程金明, 廖述能, 等. 小孔排距网路中数码电子雷管的易损因素探究[J]. *火工品*, 2023(2):77-80.
- [14] ZHANG Bin-bin, CHENG Jin-ming, LIAO Shu-neng, et al. Study on vulnerable factors of digital electronic detonators in small hole spacing network[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2023(2):77-80. (in Chinese)
- [15] 李洪伟, 吴延梦, 吴立辉, 等. 电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(1):171-181.
- [15] LI Hong-wei, WU Yan-meng, WU Li-hui, et al. Experimental study on delay time optimization of tunnel cutting holes and caving holes under electronic detonator initiation condition [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(1):171-181. (in Chinese)

(上接第 173 页)

- [13] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). *LS-DYNA Keyword User's manual* [M]. Livermore, CA, 2003.
- [14] 周传波, 谷任国, 罗学东. 坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(13):2298-2303.
- [14] ZHOU Chuan-bo, GU Ren-guo, LUO Xue-dong. Numerical simulation on cutting mode of shaft excavation by one-step deep-hole blasting in hard rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(13):2298-2303. (in Chinese)
- [15] 乔继延, 丁 桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法中淤泥的本构模型[J]. *工程爆破*, 2003(3):1-6.
- [15] QIAO Ji-yan, DING Hua, ZHENG Zhe-min. Seaooze constitutive model for toe-shooting method [J]. *Engineering Blasting*, 2003(3):1-6. (in Chinese)
- [16] ZHONG Dong-wang, GONG Xiang-chao, HAN Fang, et al. Monitoring the dynamic response of a buried polyethylene pipe to a blast wave: an experimental study [J]. *Applied sciences*, 2019, 9(8):1663.
- [17] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:214.
- [17] SHI Dang-yong, LI Yu-chun, ZHANG Sheng-min. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:214. (in Chinese)
- [18] 赵 根. 深水条件下围堰拆除爆破技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [18] ZHAO Gen. Study on technology of the cofferdam demolition blasting in deep water conditions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [19] 张玉琦, 蒋 楠, 贾永胜, 等. 运营充水状态高密度聚乙烯管的爆破振动响应特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(11):2120-2127, 2137.
- [19] ZHANG Yu-qi, Jiang Nan, JIA Yong-sheng, et al. Blasting vibration characteristics of high-density polyethylene pipes in operation water-filled state [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(11):2120-2127, 2137. (in Chinese)
- [20] 朱 斌, 蒋 楠, 周传波, 等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11):201-208.
- [20] ZHU Bin, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Effect of excavation blast vibration on adjacent buried gas pipeline in a foundation pit [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11):201-208. (in Chinese)