

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.021

约束条件下聚能装置对乳化炸药 引爆距离影响的研究*

刘忠磊^{1,2},王旭华²,王应魁²,李中辉²,梁龙²,孙永¹,田成林¹,王涛¹,王旭¹

(1. 山东科技大学资源学院,泰安 271000; 2. 中铁十四局集团有限公司,济南 250000)

摘要: 为研究“聚能装置+乳化炸药”在隧道光面爆破中实现周边孔空气间隔装药的可行性以及聚能装置对炸药引爆距离的改良效果,在高原某地区开展了实地试验。采用无缝钢管模拟隧道周边孔进行两节及多节“乳化炸药+聚能装置”的引爆及2#岩石乳化炸药的殉爆试验研究,通过多组实验得出最大稳定引爆及殉爆距离。试验结果表明:在无缝钢管内,长度15 cm的聚能炸药和2#岩石乳化炸药的最大稳定引爆和殉爆距离分别为230 cm和115 cm,多节聚能炸药最大稳定引爆距离达到80 cm。由于聚能装置对爆轰波的径向约束作用,同时前端的圆锥形金属药型罩爆炸所形成的聚能射流大大增加了轴向上的冲击波能量,使得乳化炸药在无缝钢管中的引爆距离显著增加,应用于隧道周边孔可代替导爆索实现空气间隔装药,增强光面爆破效果,节约成本节省时间。

关键词: 光面爆破; 聚能装置; 引爆距离; 无缝钢管; 聚能射流

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0171-08

Study on Influence of Fusion Device on Detonation Distance of Emulsion Explosives under Constraint Conditions

LIU Zhong-lei^{1,2}, WANG Xu-hua², WANG Ying-kui², LI Zhong-hui²,
LIANG Long², SUN Yong¹, TIAN Cheng-lin¹, WANG Tao¹, WANG Xu¹

(1. School of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China;

2. China Railway 14th Bureau Group Co., Ji'nan 250000, China)

Abstract: Field tests in a region of the plateau were carried out to study the “poly device + emulsion explosives” in tunnel surface blasting and to achieve the feasibility of peripheral hole air spacing charge and poly device on the explosives detonation distance. A seamless steel tube was used to simulate the tunnel peripheral hole for two or more sections of “emulsion explosives + poly device” detonation. A martyrdom test was implemented with # 2 rock emulsion explosives. The maximum stable detonation and martyrdom distance were obtained through several groups of experiments. The test results show that the maximum stable detonation and martyrdom distance 15 cm length of poly-

收稿日期 (Date of reception): 2024-01-04

网络首发日期 (Published online): 2024-02-26

作者简介: 刘忠磊 (1989-), 男, 学士、高工, 主要从事岩土工程相关工作, (E-mail) 352670649@qq.com。

通讯作者: 孙永 (1971-), 男, 教授, 主要从事隧道工程、爆破工程等方面的教学与科研工作, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278359); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放基金资助项目 (2011DA105287-FW202203); 青岛市博士后资助项目 (QDBSH20230202074); 泰安市科技创新发展项目 (政策引导类) (2022GX089)

About the author: LIU Zhong-lei (1989-), male, B.S., senior engineer, mainly engaged in geotechnical engineering related work, (E-mail) 352670649@qq.com.

Corresponding author: SUN Yong (1971-), male, professor, mainly engaged in teaching and scientific research in tunnel engineering, blasting engineering, (E-mail) skd996768@sdust.edu.cn.

Fund Programs: Supported by the national natural science foundation of china (52278359), Supported by the open fund of state key laboratory of coal mine hazard dynamics and control (2011DA105287-FW202203), Supported by qingdao postdoctoral grant (QDBSH20230202074), Tai'an scientific and technological innovation and development project (Policy guidance category) (2022GX089)

merized explosives and # 2 rock emulsion explosives are respectively 230 cm and 115 cm in the seamless steel tube. The maximum stable detonation distance of multi-section polymerized explosives can reach 80 cm. Due to the radial constraints on the detonation wave of the polymerization device, the front end of the conical metal drug mask explosion formed by the polymerization of energy jets significantly increases the axial and upward shockwave energy, which makes it possible to increase the energy of the shockwave. The emulsion explosives in seamless steel pipe detonation distance increased significantly upward shock wave energy, which can be applied to the tunnel perimeter hole, replacing the detonating cord to achieve air spacing charge and enhance the effect of surface blasting, cost savings, and time savings.

Key words: glossy blasting; concentrator; detonation distance; seamless steel tubes; concentrator jets

随着高速铁路的快速发展,地下工程的建设也愈发庞大,在传统的隧道光面爆破作业中,装药方式大多采用孔底空气间隔装药方式^[1-7],使用“导爆索+雷管”联合起爆技术^[8-14],此种方式存在效率低、成本高、工序复杂、安全度低等缺点,故为优化施工工序节约材料成本,光面爆破装药结构提出了基于炸药殉爆的新型装药方式。然而现阶段隧道掌子面掘进为提高钻孔效率以及加大开挖的循环进尺,越来越多的隧道开始使用机械打孔即三臂凿岩台车代替人工打孔。炮孔深度的增大,使得周边孔装药方式中对炸药殉爆距离的要求也提高了。

针对炸药的殉爆及聚能射流引爆,国内外许多学者开展了大量的研究工作,并取得了丰硕成果。冯常顺等采用2号硝铵炸药做了不同约束条件下的殉爆试验^[15],之后应用于石灰石矿山取得良好爆破效果。张福宏建立了炮孔中炸药殉爆的经验公式^[16,17],之后应用于隧道光面爆破中,爆破效果达到预期;陈庆凯等研究了乳化炸药爆炸的约束条件对殉爆距离的影响^[18];李启月等研究了炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离的影响^[19];姜家明等研究了周边孔PVC间隔装药方式炸药的稳定殉爆距离^[20]。王利侠等通过数值模拟与试验研究了聚能射流引爆B炸药的起爆机制^[21];梁斌等通过数值模拟的方法研究了不同口径对聚能射流引爆带壳炸药的影响^[22]。

上述研究主要分析了炸药殉爆距离的影响因素及聚能射流引爆炸药的可行性,然而由于炸药殉爆距离较短从而不适合隧道长进尺爆破,并且多数聚能射流引爆炸药的研究只针对高爆速烈性炸药,对于隧道爆破用的低速乳化炸药的聚能射流引爆的研究很少。故本文提出了一种隧道周边孔“聚能装置+乳化炸药”新型装药方式,以高原某隧道实际应用为基础,为其他隧道工程爆破中周边孔间隔装药提供数据支持。

1 试验机理

1.1 乳化炸药殉爆机理

关于炸药的起爆,一方面是以热传导为主的爆炸燃烧作用,另一方面是以冲击波为主的冲击波压力作用。但两种传导方式最终都是依靠热点的形成与成长进行起爆,热点起爆过程可以划分为热点形成、热点发展、低速爆轰及高速爆轰4个阶段。对于乳化炸药由于其爆速低,冲击波压力较小,为了形成热点进行起爆,采用气泡敏化来增加炸药起爆感度,当微小的气泡受到冲击波压力迅速被压缩产生热点,从而进行起爆。

1.2 聚能射流引爆机理

现阶段,国内外学者对于聚能射流引爆的研究主要集中在高爆速军用炸药聚能射流引爆反应装甲,对于低爆速工业炸药长距离聚能射流引爆裸装炸药的研究较少。根据以往的研究,聚能射流冲击起爆过程可以划分为点火阶段和爆轰增长阶段。然而被发药是否可以被射流引爆,主要和射流速度、射流直径、被发药量、冲击感度及材料等因素有关。高速的射流冲击到被发药表面时首先在炸药中产生一股冲击波,激发炸药产生局部爆轰,由于射流直径很小,炸药的临界直径很大,爆轰在传播过程中急速衰减,稳定传播距离较小。然而利用聚能装置头部的圆锥形金属药型罩能够对射流起到加速作用,同时金属在受到爆炸高温时熔化形成金属射流增大了射流直径,而且乳化炸药通过采用气泡敏化增加了起爆感度,决定了被发炸药能够在长距离情况下被射流引爆。

在实际工程应用中,乳化炸药主要被放置在隧道掌子面炮孔内,试验时将炸药放置在无缝钢管内,两者都为爆轰波提供了外界约束,使得主发药卷爆炸侧向扩散作用减小,爆轰波随时间与距离的增长导致能量的衰减速度减小,殉爆及射流引爆距离相应增加。由于在炮孔及钢管内都采用不耦合装药,

不耦合系数较小,管道效应影响相应也较小,因此试验中可以不考虑管道效应对于殉爆及射流引爆距离的影响。

2 传爆试验

2.1 试验样品

如图1所示,聚能装置是由PVC材质的聚能管与金属药型罩组成,PVC聚能管为侧面开口的圆筒形,且PVC聚能管内壁两侧有两条聚能槽,金属药型罩为圆锥形,内置于PVC聚能管一端。整体长度为140 mm。

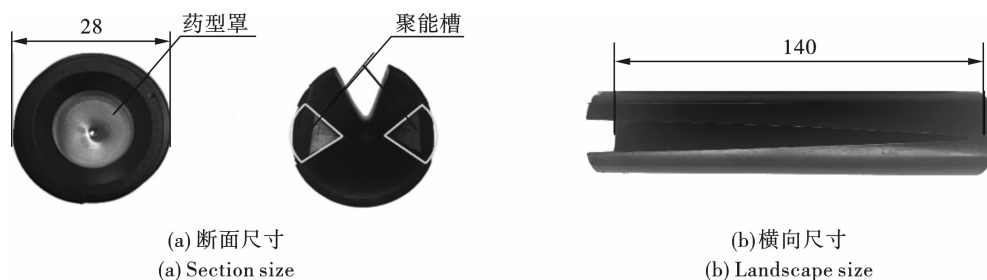


图1 聚能装置3d结构图(单位:mm)

Fig. 1 Fusion device 3d structure diagram(unit:mm)

试验用炸药为2#岩石乳化炸药,其规格参数如表1所示。雷管选用塑料导爆管雷管。试验分为乳化炸药间殉爆距离和“乳化炸药+聚能装置”的引爆距离试验两项,试验用乳化炸药药卷长度均取15cm。主发炸药和被发炸药传爆方向上的端部全部切平口,避免炸药端部形状及塑膜包装对炸药殉爆距离的影响。

表1 试验炸药规格参数

Table 1 Test explosives specifications

直径/mm	长度/mm	质量/g	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆轰速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
32	150	300	1.24	4000

2.2 试验装置设计

装药结构如图2所示。图中 H_i 为主发炸药与管口的距离, S_i 为殉爆距离即主发炸药与被发炸药之间的长度,为使两者之间爆炸产生的冲击波在钢管内能

PVC聚能管侧面开口可以方便装药,对炸药爆后能量分布无影响。金属药型罩为圆锥形,内置于PVC外壳一端。应用于隧道周边孔装药结构中,药型罩朝向炮孔开口处,聚能槽与开挖轮廓线重合。聚能装置的工作原理是利用炸药爆炸产生的爆轰产物将能量传递给药型罩,由于金属药型罩具有很小的可压缩性,所以能量几乎全部以动能的形式向前传递,同时圆锥形的药型罩使得能量在轴线处发生汇集碰撞,能量密度进一步增加,形成一股具有很高动能的金属射流,金属射流引爆下一节炸药。

够稳定传播,故主发炸药首端距离钢管管口的距离应不小于殉爆测试的距离,即 $H_i \geq S_i$;另外为了防止被发炸药因为冲击波被冲出钢管,将整个装置使用胶带固定在竹片上,同时控制被发炸药末端与钢管尾端间距 D 不小于30 cm。引爆主发炸药后,通过观察被发炸药装药段钢管断裂情况以及现场炸药的残留情况共同判断被发炸药是否发生殉爆。

由于试验场地处于山地无人区地带,试验器材运送不方便,故试验较为简易,如图3所示,具体是将无缝钢管放置在地面上,通过水平尺找平,确保主被发炸药轴线水平并重合,然后在主发炸药的塑膜包装内塞入聚能装置,将炸药与聚能装置组合体以及被发炸药按照需要测试的距离绑定在顺直的竹片上,竹片对装置起固定作用,同时有利于主被发炸药距离的控制,然后在主发炸药内插入塑料导爆管雷管,最后投送进无缝钢管内。试验管材规格参数见表2。

表2 试验管材规格参数

Table 2 Test pipe specification parameters

外径/mm	壁厚/mm	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	极限抗拉强度/ ($\text{m} \cdot \text{cm}^{-3}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
60	4	200	370	500	1520

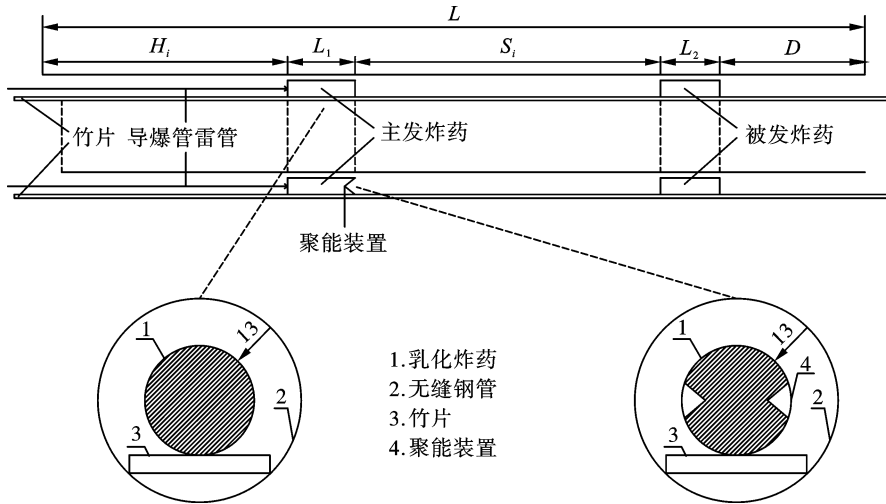


图2 相似模拟试验装药结构

Fig. 2 Similar simulation of test charge structure



图3 聚能装置装药结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the charging structure of the fusion device

2.3 试验方案

前期通过查阅大量文献以及隧道内周边孔中进行的乳化炸药距离测试整理结果如表3所示,结合前期的调研试验结果,选取130 cm作为初始殉爆距离,并且每组试验之间取10 cm作为单次殉爆步距。

表3 前期乳化炸药殉爆试验结果

Table 3 Martyrdom test results for pre-emulsion explosives

药卷长度/cm	约束条件	最大殉爆距离/cm
15	无缝钢管	100
	混凝土模型	110
17	无缝钢管+双槽聚能管	130
30	无缝钢管	110
	隧道周边孔	120

首次试验取110 cm作为初始殉爆距离,通过无缝钢管的断裂情况以及被发炸药的残留情况判断被发炸药是否被引爆,若被引爆,则增加10 cm间距,若连续增加三次10 cm距离依然能成功引爆则一次性增加20 cm,否则减小间距,通过多次试验确定出普通乳化炸药和带聚能装置乳化炸药在无缝钢管内殉爆及最大引爆距离的大致范围,其中最大引爆距离是指加聚能装置后炸药连续稳定传爆的距离,然后缩小步距到5 cm,一步步测试出普通乳化炸药和带聚

能装置乳化炸药在无缝钢管中稳定殉爆的最大距离。最后根据测试出的在无缝钢管中最稳定的殉爆及最大引爆距离,结合隧道内周边孔实际孔深及所需药量计算出实际现场爆破所需的药卷数量及间隔距离,再做几组多节“聚能装置+乳化炸药”引爆试验。

3 试验结果及分析

3.1 殉爆试验结果

无聚能装置条件下的长度为15 cm的乳化炸药在无缝钢管约束下殉爆距离的测试结果及有聚能装置条件下长度为15 cm的乳化炸药在无缝钢管约束下及模拟实际隧道内周边孔装药方式的传爆距离测试结果见表4。鉴于此试验存在一定的误差,并且为确保被发炸药完全被引爆,故试验时严格按照先以10 cm作为单次步距,当被发炸药没完全被引爆时减小步距至5 cm再次进行试验。通过多次试验结果可知在外径60 mm、壁厚4 mm的无缝钢管内,长度15 cm的乳化炸药在无聚能装置作用下稳定的殉爆距离为115 cm,在有聚能装置作用下稳定的最大引爆距离为230 cm,且模拟隧道周边孔实际装药方式4节炸药连续传爆的距离能够稳定在80 cm。

图4为现场试验被发炸药完全起爆的整体效果,被发炸药完全起爆时地面上存在两个明显的爆坑,且钢管分为3节。图5为4节炸药射流引爆完全起爆的整体效果,地面上存在4个明显的爆坑,钢管断裂为5节。图6为被发炸药未完全起爆的整体效果图,无缝钢管的被发炸药段未完全断裂。

3.2 结果分析

由试验结果可知,长度15 cm的乳化炸药和乳化炸药+聚能装置在无缝钢管内的殉爆及最大引爆距

离分别为 115 cm 和 230 cm,聚能射流引爆的距离相较于殉爆距离提升了正好一倍,表明聚能装置对乳化炸药爆炸引爆距离有极大的提升。而且试验模拟隧道周边孔实际装药情况使用 4 节炸药连续引爆时,聚能射流能够实现连续稳定引爆且引爆距离达到 80 cm,当距离大于 80 cm 炸药无法引爆时,通过现场试验分析是由于冲击波将炸药推出钢管,故在炸药能够固定的情况下聚能射流连续引爆的距离将更大。

表 4 炸药殉爆及聚能射流引爆试验结果

Table 4 Explosive martyrdom and fusion jet detonation test results

试验类型	实验编号	殉爆距离/cm	钢管长度/cm	是否完全引爆
乳化炸药殉爆	1	110	300	是
	2	120	300	否
	3	115	300	是
	4	115	300	是
	5	115	300	是
	6	115	300	是
乳化炸药 + 聚能装置	1	110	300	是
	2	120	310	是
	3	130	320	是
	4	150	360	是
	5	170	400	是
	6	190	440	是
	7	210	480	是
	8	230	520	是
4 节乳化炸药 + 聚能装置	9	250	560	否
	10	240	540	否
	11	235	540	否
	12	230	520	是
	13	230	520	是
	14	230	520	是
	1	110	420	否
2	100	410	否	
3	90	400	否	
4	80	390	是	
5	85	400	否	
6	80	390	是	
7	80	390	是	

文献[18]采用约束材料为外径 50 mm、壁厚 2 mm 的低碳铁管,文献[19]采用约束材料为外径 57 mm、壁厚 4 mm 的无缝钢管,本文采用约束材料为外径 60 mm、壁厚 4 mm 的无缝钢管,殉爆距离测试结果对比如表 5 所示。本文测出试验炸药殉爆距离与两篇文献相比均较大,且加聚能装置后的引爆距离较加双槽聚能管的距离更大。通过普通乳化炸

药的殉爆距离比较表明外界约束条件对炸药殉爆距离有一定影响,约束条件越好炸药殉爆距离越大,而聚能装置对于炸药爆炸引爆被发炸药距离的提升极大且能够实现远距离的多节炸药稳定传爆。



图 4 被发炸药完全起爆的整体效果

Fig. 4 Overall effect of complete detonation of detonated explosives

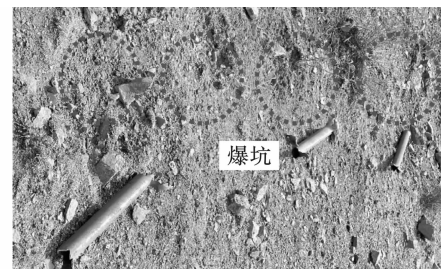


图 5 4 节炸药完全起爆的整体效果

Fig. 5 Overall effect of complete detonation of 4 sections of explosives



图 6 被发炸药为发生完全起爆的整体效果

Fig. 6 Overall effect of the detonated explosive in the event of a complete detonation

4 工程实例

4.1 现场施工

为研究“聚能装置 + 乳化炸药”光面爆破装药结构现场实际应用效果,选取某高原铁路隧道进口,高原隧道进口全长 3500 m,断面尺寸为 12.8 m × 8.8 m,用于试验段的岩性主要为燕山期侵入花岗闪长岩,距断裂带较近,岩体较破碎围岩稳定性较差,平均抗压强度为 95 ~ 120 MPa。方案设计周边孔采用“聚能装置 + 乳化炸药”间隔装药结构,周边孔孔数为 51 个,孔深 3.8 m,孔径为 45 mm,间距为 50 cm,周边孔的外插角为 2°,雷管采用数码电子雷

管,段别设置为8段,不同孔起爆的微差间隔时间为50 ms。使用规格为 $\phi 32$ mm的乳化炸药,单孔装药量1.2 kg。周边孔采用聚能装置间隔装药方式,在装药之前首先进行聚能装置炸药组装,先将一整节乳化炸药的一端使用美工刀切平,将聚能装置按压插入乳化炸药的塑膜包装内,绑定在竹片底端,然后将三节半条乳化炸药使用美工刀将两端切平按同样

方式将聚能装置插入塑膜包装内,绑定在竹片上,每节炸药间隔50 cm,且全部聚能装置的侧面开口处指向竹片。最后将一节不带聚能装置的整节乳化炸药绑在竹片上,炸药间隔50 cm,装药长度305 cm。将组合体运至需要爆破的掌子面,在底药插入数码电子雷管,然后慢放入周边孔内,最后将数码电子雷管进行组网起爆。

表5 不同约束条件下的殉爆距离及聚能射流引爆距离测试结果

Table 5 Martyrdom distance under different constraints and the test results of the detonation distance of the fusion jet

数据来源	试验炸药	炸药规格	约束条件	管材规格		殉爆距离/cm
				外径/mm	壁厚/mm	
文献[18]	乳化炸药	$\phi 32$ mm \times 200 mm \times 200 g	低碳钢管	50	2	30 ~ 40
文献[19]	乳化炸药	$\phi 32$ mm \times 170 mm \times 170 g	无缝钢管	57	4	105
本文	乳化炸药	$\phi 32$ mm \times 150 mm \times 150 g	无缝钢管	60	4	115
			无缝钢管 + 聚能装置	60	4	230

4.2 爆破效果

经过现场进行10次循环的“聚能装置+乳化炸药”应用分析,周边孔采用此间隔装药方式爆后循环进尺介于3.4~3.6 m之间,更加稳定。使用的数码电子雷管数量提高,平均一个循环使用220发,但不使用导爆索。与周边孔爆破效果评价相关的半孔率有9次超过80%,属于较好水平,仅有一次低

于80%,属于一般水平。炮孔利用率仅第一次试验低于90%,后续试验全部高于90%,属于较好水平。每个循环的装药时间明显下降,平均用时1小时相关指标参数见表6。爆破后现场实际调研图7(a)中整体轮廓平顺度较好,半孔痕清晰。图7(b)中爆堆集中密集,大块率一般。

表6 “聚能装置+乳化炸药”装药方式爆破参数及爆后效果统计

Table 6 Blasting parameters and post-blast effect statistics for the “Fusion device + emulsion explosive” charging method

序号	进尺/m	雷管数/发	导爆索/m	半孔率/%	炮孔利用率/%	装药时间/h
1	3.4	220	0	82.35	89.47	1.2
2	3.5	220	0	78.43	92.10	1.1
3	3.5	200	0	84.31	92.10	1.1
4	3.6	230	0	86.27	94.73	1.0
5	3.5	220	0	88.23	92.10	1.1
6	3.5	220	0	84.31	92.10	0.9
7	3.5	220	0	82.35	92.10	0.9
8	3.5	220	0	82.35	92.10	1.0
9	3.6	220	0	86.27	94.73	0.9
10	3.5	220	0	88.23	92.10	0.9



(a) 爆破后断面
(a) Blasted section

(b) 爆堆
(b) Blast mound

图7 光爆效果

Fig. 7 Explosion of light effect

5 结论

(1)普通乳化炸药和“聚能装置+乳化炸药”在无缝钢管中被发炸药发生殉爆和引爆的最大距离分别为115 cm和230 cm,表明聚能装置前端的圆锥形金属药型罩爆炸所形成的金属射流对乳化炸药引爆距离影响极大,增大了乳化炸药在无缝钢管中的引爆距离。

(2)使用“聚能装置+乳化炸药”的间隔装药方

式能够实现多段炸药的长距离稳定传爆,在隧道光面爆破中具有极大的应用价值。

(3)通过现场应用,“聚能装置+乳化炸药”可实现炸药的全部引爆,爆破后效果较好,半孔留痕率、炮孔利用率较高,聚能装置能够代替导爆索,节约成本节省时间。

参考文献 (References)

- [1] 吴亮,钟冬望,蔡路军. 空气间隔装药中光面爆破机理数值分析[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(16):77-81,149.
- [1] WU Liang,ZHONG Dong-wang,CAI Lu-jun. Numerical analysis of glossy blasting mechanism in air-spaced charging[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(16):77-81,149. (in Chinese)
- [2] 钟立辉,蒋志明,于永纯,等. 孔底空气间隔装药增强破碎作用研究[J]. 工程爆破,2023,29(4):43-51.
- [2] ZHONG Li-hui,JIANG Zhi-ming,YU Yong-chun, et al. Study on the enhancement of crushing effect by air-spaced charging at the bottom of hole[J]. Engineering Blasting, 2023,29(4):43-51. (in Chinese)
- [3] MENG Ning-kang,CHEN Yong,BAI Jian-biao, et al. Numerical simulation of directional fracturing by shaped charge blasting[J]. Energy Science & Engineering,2020,8(5):1824-1839.
- [4] LOU Xiao-ming,WANG Zhen-chang,CHEN Bi-gang, et al. Theoretical calculation and experimental analysis on initial shock pressure of borehole wall under axial decoupled charge[J]. Shock and Vibration,2018,2018:1-14.
- [5] WANG Ming-zheng,SHI Xiu-zhi,ZHOU Jian, et al. Multi-planar detection optimization algorithm for the interval charging structure of large-diameter longhole blasting design based on rock fragmentation aspects[J]. Engineering Optimization,2018,50(12):2177-2191.
- [6] TIAN Guo-bin,DAI Jun,WU Yi, et al. Influence of charge hole spacing on the crack propagation behavior under the effect of empty-hole directional blasting[J]. Advances in Civil Engineering,2020,2020:1-10.
- [7] ZHANG Quan,WANG Jiong,GUO Shan, et al. Shaped charge hydraulic blasting:an environmental, safe, and economical method of directional roof cutting[J]. Geofluids, 2021,2021:1-20.
- [8] 刘博,胡静云,史秀志. 导爆索-导爆管起爆网路在多点爆区联合起爆中的应用[J]. 爆破,2021,38(3):62-66.
- [8] LIU Bo,HU Jing-yun,SHI Xiu-zhi. Application of detonating network of detonating cord and detonating tube in joint detonation of multi-point blast zone[J]. Blasting, 2021,38(3):62-66. (in Chinese)
- [9] 杨玉银,陈长贵,黄浩,等. 隧洞开挖光面爆破装药结构的改进与应用[J]. 工程爆破,2016,22(4):72-76,86.
- [9] YANG Yu-yin,CHEN Chang-gui,HUANG Hao, et al. Improvement and application of glossy blasting charging structure for tunnel excavation[J]. Engineering Blasting, 2016,22(4):72-76,86. (in Chinese)
- [10] CHIQUITO M,CASTEDO R,LÓPEZ L M, et al. Blast wave characteristics and TNT equivalent of improvised explosive device at small-scaled distances[J]. Defence Science Journal,2019,69(4):328-335.
- [11] LIU Ze-lin,YI Wei. Experimental study on the mechanical characteristics of saturated granite under conventional triaxial loading and unloading tests[J]. Sustainability,2022,14(9):5445.
- [12] SINGH C P,AGRAWAL H,MISHRA A K, et al. Reducing environmental hazards of blasting using electronic detonators in a large opencast coal project-a case study[J]. J Mines Met Fuels,2019,67(7):345-350.
- [13] VARESH R. Electric detonators:EBW and EFI[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21(3):150-154.
- [14] AGRAWAL H,MISHRA A K. Evolution of digital detonators as an intelligent tool for control blasting in Indian mines[C]//Annales de chimie Science des Matériaux, 2017:41.
- [15] 冯常顺,廖先鏊. 空气间隔药包殉爆起爆法[J]. 钢铁,1964(8):15-16.
- [15] FENG Chang-shun,LIAO Xian-kui. Air spaced packet martyrdom detonation method of initiation[J]. Iron & Steel,1964(8):15-16. (in Chinese)
- [16] 张福宏. 炸药药卷在炮眼中殉爆距离计算经验式的建立[J]. 隧道建设,2003(2):7-9.
- [16] ZHANG Fu-hong. Establishment of an empirical formula for calculating the martyrdom distance of an explosive coil in the eye of a gun[J]. Tunnel Construction, 2003(2):7-9. (in Chinese)
- [17] 张福宏. 炸药殉爆距离的新认识及在光面爆破中的应用[C]//中国土木工程学会,中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 中国土木工程学会第十一届、隧道及地下工程分会第十三届年会论文集. 中铁西南科学研究院,2004:5.
- [17] ZHANG Fu-hong. New understanding of the martyrdom distance of explosives and its application in surface blasting[C]//Chinese Society of Civil Engineering, Chinese Society of Civil Engineering, Tunneling and Underground Engineering Branch. Proceedings of the Eleventh Annual Conference of the Chinese Society of Civil Engineering

- and the Thirteenth Annual Conference of the Chinese Society of Tunneling and Underground Engineering, Southwest Research Institute of China Railway, 2004; 5. (in Chinese)
- [18] 陈庆凯, 夏亚伟, 刘占富, 等. 约束条件对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(1): 5.
- [18] CHEN Qing-kai, XIA Ya-wei, LIU Zhan-fu, et al. The effect of constraint conditions on the gap distance of emulsion explosive[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(1): 5. (in Chinese)
- [19] 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, 12.
- [19] LI Qi-yue, ZENG Hai-deng, ZHAO Xin-hao, et al. Influence of double groove energy gathering tubes on the detonation distance of emulsion explosives under constraint of blast hole[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(6): 1-4, 12. (in Chinese)
- [20] 姜家明, 杨 翎, 马朝阳, 等. PVC 间隔装药光面爆破技术在掘进爆破中的应用[J]. 采矿技术, 2023, 23(2): 80-84.
- [20] JIANG Jia-ming, YANG Ling, MA Zhao-yang, et al. Application of PVC spacer charging surface blasting technology in tunneling blasting[J]. Mining Technology, 2023, 23(2): 80-84. (in Chinese)
- [21] 王利侠, 周 涛, 贺海民, 等. 聚能射流引爆屏蔽 B 炸药的数值模拟及试验[J]. 爆破器材, 2015, 44(5): 56-60.
- [21] WANG Li-xia, ZHOU Tao, HE Hai-min, et al. Numerical simulation and experimental investigation of initiation of shielded composition b impacted by shaped charge jet[J]. Explosive Materials, 2015, 44(5): 56-60. (in Chinese)
- [22] 梁 斌, 余春祥, 聂 源, 等. 不同口径聚能装药射流引爆带壳装药数值模拟[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 310-317.
- [22] LIANG Bin, YU Chun-xiang, NIE Yuan, et al. Numerical simulation of different caliber shaped charge jet initiating different thickness shelled explosive[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2021, 40(3): 310-317. (in Chinese)

(上接第 155 页)

- [11] ZHAO De-hui, XU Jin-yu, BAI Er-lei. Study on toughening effect in EPS concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 105-107: 1717-1722.
- [12] 胡 俊, 任建伟, 吴德义. 冲击荷载下 EPS 混凝土微观动态损伤分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1903-1907, 1913.
- [12] HU Jun, REN Jian-wei, WU De-yi. Microscopic dynamic damage analysis of EPS concrete under impact load[J]. Bulletin of Silicate, 2018, 37(6): 1903-1907, 1913. (in Chinese)
- [13] 李胜林, 凌天龙, 张会歌, 等. 早龄期混凝土动态力学性能实验研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 502-510.
- [13] LI Sheng-lin, LING Tian-long, ZHANG Hui-ge, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete at early age[J]. Journal of Mining Science, 2020, 5(5): 502-510. (in Chinese)
- [14] 郭东明, 闫鹏洋, 凡龙飞, 等. 喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 85-91, 136.
- [14] GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, FAN Long-fei, et al. Study on wave and dynamic characteristics of shotcrete and surrounding rock composite[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 85-91, 136. (in Chinese)
- [15] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1586-1597.
- [15] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, XU Jin-yu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of polymer modified carbon fiber reinforced concrete[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 40(3): 1586-1597. (in Chinese)
- [16] 丁国博, 许金余. 早强 EPS 混凝土动态压缩力学行为的 SHPB 试验研究[J]. 混凝土, 2011(1): 28-33.
- [16] DING Guo-bo, XU Jin-yu. Study on dynamic compressive mechanical behavior of early-strength EPS concrete by SHPB test[J]. Concrete, 2011(1): 28-33. (in Chinese)
- [17] 于周平, 杨伟军, 黄登科, 等. 纤维对聚苯颗粒混凝土力学性能影响的研究[J]. 混凝土, 2022(11): 68-72, 76.
- [17] YU Zhou-ping, YANG Wei-jun, HUANG Deng-ke, et al. Study on effect of fiber on mechanical properties of polystyrene granular concrete[J]. Concrete, 2022(11): 68-72, 76. (in Chinese)