

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0069-05

低爆速粉状乳化炸药在光面爆破中的应用

方安明¹, 方应飞¹, 夏治园²

(1. 杭州市市政公用建设开发集团有限公司, 浙江 杭州, 310007; 2. 安徽江南爆破工程有限公司, 安徽 宁国, 242300)

摘要: 针对平硐开拓光面爆破施工工况, 采用粉状乳化炸药、矿物质粉、多孔有机物密度调节剂混合制备出一种低爆速粉状乳化炸药, 通过调节各组分比例, 控制爆速在 1 200~3 000 m/s 范围内, 以适配光面爆破作业。采用 LSDYNA 进行数值模拟分析并开展现场实际应用, 结果表明: 低爆速粉状乳化炸药耦合装药结构对孔壁破坏较小, 爆破作用更均匀, 半孔率可达 90%, 超欠挖量在 10cm 以内, 有效提高了边墙成型效果, 边墙半孔率提高 50%。本研究为光面爆破施工提供了借鉴。

关键词: 粉状乳化炸药; 低爆速; 光面爆破; 半孔率; 调节剂

中图分类号: TJ55; TD235 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.013

Application of Low Detonation Velocity Powder Emulsion Explosive in Smooth Blasting

FANG An-ming¹, FANG Ying-fei¹, XIA Zhi-yuan²

(1. Hangzhou Municipal Public Construction and Development Group Co. Ltd., Hangzhou, 310007; 2. Anhui Jiangnan Chemical Co. Ltd., Ningguo, 242300)

Abstract: Aiming at the smooth blasting construction condition of adit development, a low detonation velocity powder emulsion explosive was prepared by mixing powder emulsion explosive, mineral powder and porous organic density regulator. The detonation velocity was controlled within the range of 1 200~3 000 m/s through adjusting the composition ratio of each component, which is suitable for smooth blasting operation. Through LSDYNA numerical simulation analysis and field application, it is found that the coupling charging structure of low detonation velocity powder emulsion explosive has less damage to the hole wall, and the blasting effect is more uniform. The half-hole rate can reach 90%, and the over-excavation amount is less than 10cm, which effectively improves the forming effect of the side wall and increases the half-hole rate of the side wall by 50%. The study provides a reference for smooth blasting construction.

Key words: Powder emulsion explosive; Low detonation velocity; Smooth blasting; Half-hole rate; Regulator

在地下矿山或隧道开拓过程中, 巷道掘进爆破一般应满足两方面的质量要求^[1-2]: 一是要保证岩体充分破碎, 方便岩渣装运; 二是减少爆破对围岩的损伤, 这既有利于降低工程支护费用, 又有利于巷道的长期安全。为了获得光滑的巷道轮廓面, 巷道或隧道掘进通常采用光面爆破技术^[3]。然而, 在传统导爆索间隔装药光面爆破施工中, 常会存在以下问题^[4]: (1) 施工步骤繁琐。采用导爆索间隔装药结构须提前绑缚导

爆索, 制作起爆药包等, 单孔装药耗时长, 施工效率较低; (2) 施工成本高。多采用导爆索将炸药绑扎成炸药串的方法, 但导爆索价格昂贵, 因而光爆成本高, 偶尔会遇到导爆索供应不足问题, 导致光面爆破作业无法照常进行; (3) 传爆中断及残药问题。由于是不耦合装药结构, 更易产生管道效应导致炮孔中的装药爆轰中断而留下残药; (4) 爆破效果问题。传统导爆索药串在掘进爆破作业中均存在光爆半孔残留率低

收稿日期: 2023-03-23

作者简介: 方安明 (1971-), 男, 高级工程师, 从事隧道工程、桥梁工程施工质量、安全研究及管理。

通讯作者: 夏治园 (1995-), 男, 硕士, 从事计算爆破和工程爆破工作。

或超欠挖较严重等问题。

面对传统导爆索工艺存在的相关问题,研究人员考虑采用低爆速炸药耦合装药结构代替成品炸药间隔装药结构,改善围岩超欠挖量,降低施工成本,并提高爆破效率和光面爆破效果。武轩等^[5]在多孔粒状铵油炸药中分别添加珍珠岩、火山岩、陶粒滤料3种惰性物质,以调节炸药的密度和爆速,提高了黑岱沟露天矿煤层的块煤率;孙宝亮等^[6]以粒径为200~300 μm的硅藻土颗粒作为乳化基质的载体来制备低爆速乳化炸药,并分析硅藻土质量分数对炸药的粒径和爆轰机理的影响;贾占山等^[7]以双基发射药作为敏化剂,硝酸铵作为氧化剂,二者混合后制成一种含双基发射药的低爆速炸药;周国安等^[8]以黏土颗粒为惰性添加剂制备出一种新型乳化炸药,采用探针法和铅柱压缩法分别测得该新型乳化炸药的爆速及猛度,并对黏土颗粒降低乳化炸药爆速的机理进行分析;刘建程等^[9]提出了一种低能量密度炸药连续装药光面爆破技术,利用LSDYNA进行数值模拟,对比分析了2号岩石乳化炸药间隔装药和低能量密度炸药连续装药的应力场;叶志文^[10]以膨化硝酸铵为氧化剂、复合油为还原剂、珍珠岩为稀释剂制成低爆速膨化硝酸铵炸药,根据稀释剂含量的不同爆速在1 800~3 000 m/s内可调,适用于各种光面爆破及其它控制爆破。

针对某矿山平硐开拓实际工况,笔者以粉状乳化炸药为基础药粉,通过添加惰性材料,混合后制成低能量密度炸药进行平硐开拓光面爆破作业,并通过数值模拟以及实际工程应用,探究光面爆破效果。

1 低爆速粉状乳化炸药

低爆速粉状乳化炸药是一种特制的光面爆破用炸药,主要成分包括粉状乳化炸药、爆速调节剂和密度调节剂。其中爆速调节剂主要成分为矿物质粉,用于调控炸药的爆炸速度和威力。密度调节剂主要是多孔有机物,用于调控炸药的密度。低爆速粉状乳化炸药可以对炮孔连续装药,能够促使炸药爆炸能量均匀、合理分布,避免炸药爆破时冲击波初始压力的击碎作用,着重发挥爆轰气体的准静压作用,保护岩体

的完整性和稳定性,实现炸药能量的最大利用,达到爆破效果、爆破质量和经济效益同步提高的目的。

低爆速粉状乳化炸药中爆速调节剂为40~120目的矿物质粉,通常是一类矿物质。为了与粉体炸药组分的形态相一致,便于与粉状炸药组分相混合,矿物质通常选取粉状物,如滑石粉、珍珠粉、膨润土中的一种或多种。钝感矿物质粉在专用炸药中的添加比例对炸药的爆炸威力、爆炸速度等爆轰性能有直接的影响,通常在30%~70%范围,最佳的比例范围是40%~60%。这样既能保持炸药的爆炸威力和速度,又不会破坏爆炸对象需要保护的部分。经过高温处理后,矿石中的结晶水消失、留下孔道,成为多孔性物质微颗粒,因而具有一定韧性,受外力作用时,具有一定的弹性、收缩性,同时不会造成炸药的机械感度特别是摩擦感度增加。

低爆速粉状乳化炸药中密度调节剂为有机多孔材料,为聚乙烯、聚丙烯、聚异丁烯、聚氨酯中的一种或多种微颗粒物,其颗粒度在120目左右。这种微颗粒有机物经90~120℃温度处理0.5~1.5 h后,有机颗粒中含有的偶氮基团、过氧基团等组分受热分解逸出而发泡,成为多孔性颗粒物,这种多孔性有机颗粒物具有较低的密度。

制备时将粉状炸药与矿物质粉在室温下放入搅拌机中混合均匀,之后加入密度调节剂直至混合均匀,将制得的混合炸药装入药管中。经过测试,制备的混合炸药密度为0.4~1.2 g·mL⁻¹,爆速为1 000~4 000 m/s,通过调节爆速调节剂和密度调节剂的占比,可以控制爆速在1 200~3 000 m·s⁻¹范围内。考虑到石灰岩矿山爆破开采,爆速适宜控制在1 500~2 000 m·s⁻¹。

2 光面爆破数值模拟

2.1 仿真目的

为进一步对比传统2号岩石乳化炸药间隔装药结构与低爆速粉状乳化炸药耦合装药光面爆破效果差异,采用LSDYNA建立双炮孔成缝切面、剖面有限元分析模型,并使用LS-Prepost后处理软件对比分析炮孔孔壁应力、爆破成缝效果,判断低爆速粉状乳化

炸药光面爆破效果指标（半孔率、超欠挖量等）。

2.2 材料参数

2种炸药的主要性能指标如表1所示。由表1可以看出，低爆速粉状乳化炸药的密度和爆速等性能参数都小于2号岩石乳化炸药。

表1 炸药主要性能指标对比

Tab.1 Comparison of main performance indexes of explosives

| 炸药种类 | 2号岩石乳化炸药 | 低爆速粉状乳化炸药 |
|--------------------------|----------|-----------|
| 密度/(g·cm ⁻³) | 1.0~1.3 | 0.85~1.15 |
| 殉爆距离/cm | ≥5 | ≥2 |
| 爆速/(m·s ⁻¹) | ≥4 200 | ≥1 800 |
| 猛度/mm | ≥16 | ≥7 |
| 做功能力/mL | 280 | 70 |

2.3 几何模型

按照图1建立双炮孔成缝切面与剖面几何模型，其中图1乳化炸药偏心装药模型，分为顶孔和墙孔模型，受重力影响呈现不同模型形态，各模型几何参数如表2所示。

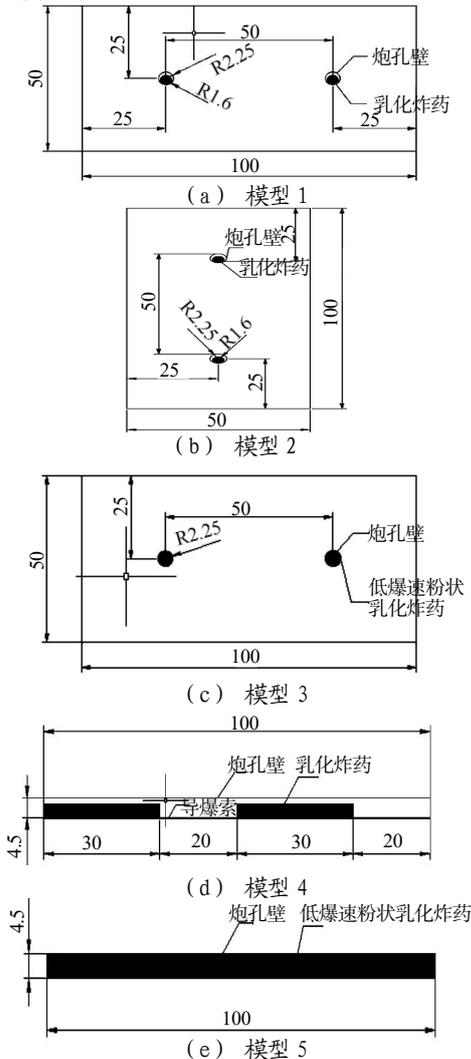


图1 双炮孔成缝切面几何模型（单位：cm）

Fig.1 Geometric model of double-blast-hole seam section

表2 双炮孔成缝切面模型几何参数
Tab.2 Geometrical parameters of double blast hole slotting section model

| 模型编号 | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 | 5号 |
|---------|------|------|-----------|------|-----------|
| 炸药类型 | 乳化炸药 | 乳化炸药 | 低爆速粉状乳化炸药 | 乳化炸药 | 低爆速粉状乳化炸药 |
| 模型类型 | 顶孔切面 | 墙孔切面 | 切面 | 剖面 | 剖面 |
| 炮孔孔径/cm | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| 药卷直径/cm | 3.2 | 3.2 | 4.5 | 3.2 | 4.5 |
| 炮孔孔距/cm | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 空气间隔/cm | - | - | - | 2 | 2 |
| 药卷长度/cm | - | - | - | 30 | 30 |

2.4 有限元模型

采用LS-DYNA数值仿真软件建立上述模型。乳化炸药及低爆速粉状乳化炸药采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN关键字定义，同时利用JWL状态方程描述其爆炸产物压力与体积的关系，药卷与炮孔孔壁之间的耦合介质为空气，LS-DYNA中采用*MAT_NULL空白材料模型，空气选用线性多项式描述其方程，通过*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL关键字定义，岩体采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC各向同性随动塑性强化材料模型，模拟爆炸荷载作用下炮孔周围岩体短时间内屈服破坏。采用*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID关键字定义流固耦合关系。整体模型采用映射法进行网格划分，在对称面施加相对的位移约束。在磁铁矿组分外表面添加无反射边界条件^[1]，设置剪切波和膨胀波的吸收，设置*MAT_ADD_EROSION关键字，采用抗拉、抗压强度定义材料失效。

2.5 模拟结果分析

采用LS-Prepost后处理软件分析炮孔孔壁应力、炮孔成缝效果等，如图2所示。

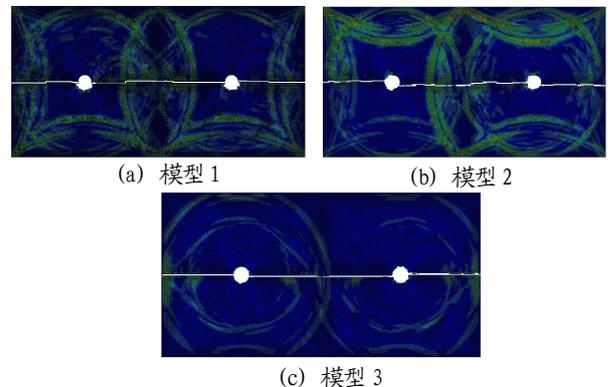


图2 模型1-3成缝效果

Fig.2 Seam-forming effect of model 1~3

由图2可以看出，在模型1中，药卷受重力作用位于炮孔底部，药卷与上层炮孔壁存在月牙状空气

间隔层,有效保护了上层孔壁不受破坏,炮孔成缝效果较好,上层半孔保留完整。模型2中,墙孔中药卷受重力影响,贴近药卷一侧的孔壁破坏严重,半孔保留效果、成缝效果相对模型1较差。模型3中,低爆速粉状乳化炸药耦合装药对于孔壁的破坏较为均匀,孔壁均受较均匀的轻微破坏,整体成缝效果和半孔保留程度与模型1接近。

在模型1孔壁周围布置测点1~3,模型1与2工况相近,模型3孔壁布置测点4,如图3所示。各测点测得的有效应力变化如图4所示。



图3 模型测点1~4

Fig.3 Model measuring point 1~4

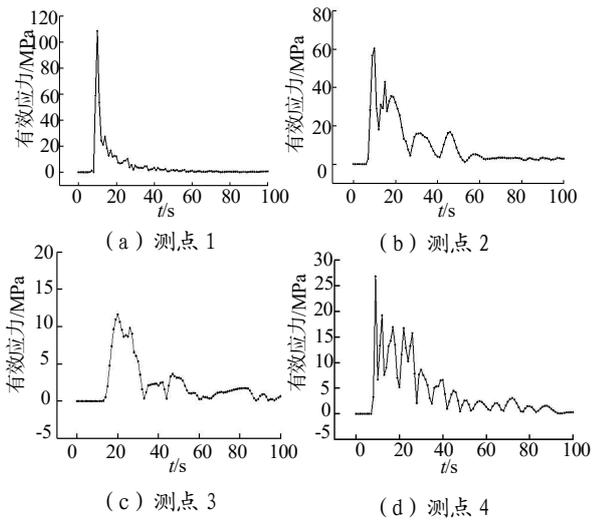


图4 关键测点有效应力变化情况

Fig.4 Variation of effective stress at key measuring point

图4中(a)~(d)分别为模型1下方岩石孔壁、侧边岩石孔壁、上方岩石孔壁及模型3岩石孔壁关键节点有效应力变化趋势。由图4可以看出模型1下方孔壁最大有效应力可达108MPa,侧边为60MPa,上方为11.8MPa,模型3为28MPa。由此可见低爆速粉状乳化炸药对孔壁破坏较为均匀,但相较于模型1存在空气间隔的上层孔壁,成型效果略差,相较于模型2墙孔爆破成型,整体半孔效果有较大提升,可有效控制超挖问题。

在模型4装药段和空气段各选取1个测点5~6,

在模型5孔壁处选择1个测点7,如图5所示,其有效应力变化情况如图6所示。

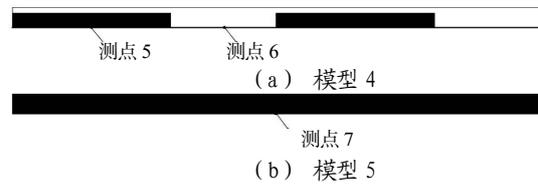
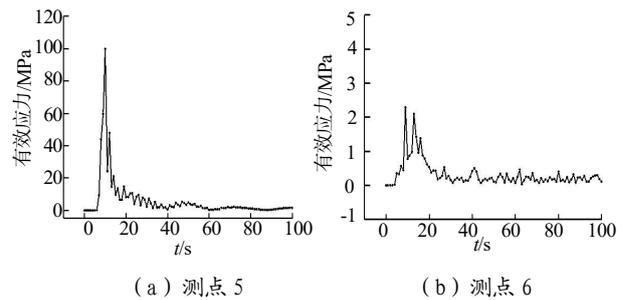


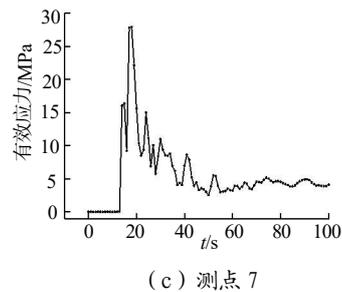
图5 模型测点5~7

Fig.5 Model measuring point 5~7



(a) 测点5

(b) 测点6



(c) 测点7

图6 各测点有效应力变化

Fig.6 Variation of effective stress at each measuring point

由图6可以看出,在模型4装药段岩石破坏较为明显,有效应力可达107MPa,在墙孔爆破过程中易导致超挖,空气段爆破破坏不明显,有效应力约为2MPa,易导致欠挖现象。模型5中炮孔壁破坏较为均匀、轻微,有效应力为28MPa,有利于整体轮廓爆破成型。

3 工程实例

为验证低爆速粉状乳化炸药光面爆破效果,选取某矿山平硐开拓爆破作业中进行现场应用。采用特质的光面爆破装药装置装填低爆速粉状乳化炸药,对比2号岩石乳化炸药间隔装药结构与低爆速粉状乳化炸药耦合装药光面爆破效果差异。爆破效果如图7所示。

由图7可以看出,相较于乳化炸药间隔装药结构,低爆速粉状乳化炸药耦合装药光爆效果明显提高,顶

板半孔清晰连续,光爆率90%以上;在边墙成型效果上,低爆速粉状乳化炸药的成型效果更为显著,边墙半孔率提高约50%,超欠挖量在10cm以内,光爆效果得到了明显提升,为此类光面爆破施工作业提供了借鉴。

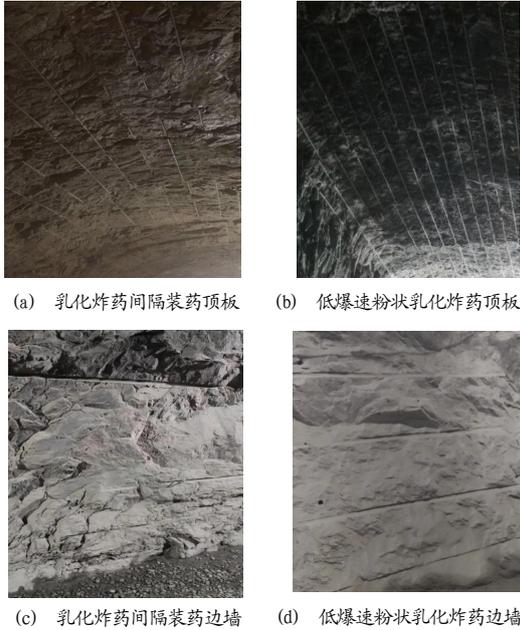


图7 光爆效果差异

Fig.7 Difference of smooth blasting effect

4 结论

(1) 采用粉状乳化炸药为爆炸组分、矿物质粉为爆速调节剂和多孔有机物密度调节剂混合制备出低爆速粉状乳化炸药,通过调节爆速调节剂和密度调节剂的占比,可以控制爆速在1 200~3 000 m/s范围内,适用于光面爆破作业。

(2) 通过数值仿真分析对比了2号岩石乳化炸药间隔装药结构与低爆速粉状乳化炸药耦合装药结构光面爆破效果,根据孔壁有效应力、成缝效果发现:低爆速粉状乳化炸药炮孔孔壁破坏较小,整体爆破作

业均匀,光爆效果较好,可有效控制超欠挖量。

(3) 开展了低爆速粉状乳化炸药耦合装药结构现场实验,发现相较于2号岩石乳化炸药间隔装药结构,低爆速粉状乳化炸药耦合装药光爆后顶板半孔清晰连续,光爆率90%以上,在边墙成型效果上,半孔率提高约50%左右,超欠挖量在10cm以内,光爆效果明显提升。

参考文献:

- [1] 闫长斌,王贵军,王泉伟,等.岩体爆破累积损伤效应与动力失稳机制研究[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [2] 王廷武,刘清泉,杨永琦,等.地下与地面工程控制爆破[M].北京:煤炭工业出版社,1990.
- [3] 阜新矿业学院,译.光面爆破[M].北京:煤炭工业出版社,1979.
- [4] 杨玉银.光面爆破孔内间隔装药传爆方法的改进与应用[J].工程爆破,2001(2):73-78.
- [5] 武轩,郭占江,闫海勇,王建英.低爆速多孔粒状铵油炸药的实验研究[J].工程爆破,2022,28(02):111-115.
- [6] 孙宝亮,黄文尧,汪泉,等.硅藻土为载体的低爆速乳化炸药制备与性能[J].含能材料,2023,31(01):26-34.
- [7] 贾占山,关渊华,卜宪强,等.含退役双基发射药的低爆速炸药的研究[J].爆破器材,2016,45(06):39-43.
- [8] 周国安,马宏昊,沈兆武,等.以黏土颗粒为惰性剂的低爆速乳化炸药爆炸性能及爆轰机理[J].火炸药学报,2018,41(03):289-293,302.
- [9] 刘建程,陈名英,高朋飞.低能量密度炸药连续装药光面爆破技术研究[J].现代矿业,2020,36(11):86-89.
- [10] 叶志文.光面爆破用低爆速膨化硝酸铵炸药的研制[J].矿冶工程,2007(05):5-8.
- [11] LS-DYNA Keyword User's Manual[R].California: Livermore Software Technology Corporation,2003.