

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.008

约束条件下乳化炸药殉爆距离研究*

田丰¹, 史秀志¹, 李波², 王文洋³, 王衍海³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 江西赣锋锂业集团股份有限公司, 新余 338025;
3. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿, 韶关 512325)

摘要: 在矿山掘进爆破工程中, 光面爆破通常使用导爆索传爆, 这种工艺施工效率低, 耗费大量爆破器材, 增加矿山的生产成本, 可以通过利用炸药殉爆特性完成孔内炸药传爆解决此问题。采用不同约束材料下乳化炸药殉爆实验和岩石中炸药殉爆过程数值模拟结合的研究方法, 以稳定殉爆距离为评判指标, 分析约束条件、不耦合系数等因素对炸药殉爆距离的影响, 得到不同直径和长度的乳化炸药在炮孔中的稳定殉爆距离。通过研究得出以下结论: 约束条件对炸药殉爆距离影响十分显著, 约束条件越好, 乳化炸药殉爆距离越大; 径向不耦合系数一定的条件下, 乳化炸药直径对殉爆距离影响较小, 炸药殉爆距离随药卷直径增大而增加; 乳化炸药的殉爆距离随径向不耦合系数增加而减小, 随药卷长度增加而增加。进行工业试验验证, 将炸药间隔距离设置为 70 cm, 结果表明使用殉爆传爆法与采用导爆索传爆的常规施工方法相比, 顶板孔光面爆破所用爆破器材成本降低 33.1 元/米, 降低了 36.1%。

关键词: 矿山掘进; 光面爆破; 乳化炸药; 约束条件; 殉爆距离

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)03-0063-15

Study on Transmission Distance of Emulsion Explosives under Constrained Conditions

TIAN Feng¹, SHI Xiu-zhi¹, LI Bo², WANG Wen-yang³, WANG Yan-hai³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Ganfeng Lithium Group Co., Ltd., Xinyu 338025, China; 3. Shenzhen Zhongjin Lingnan Non-ferrous Metal Company Limited Fankou Lead-zinc Mine, Shaoguan 512325, China)

Abstract: In mine excavation blasting engineering, smooth blasting typically uses detonating cords to transmit the explosion. This process has low construction efficiency, consumes a significant amount of blasting equipment, and increases the mine's production costs. To solve this problem, the sympathetic characteristics of explosives can be utilized to initiate detonation within holes. A research method that combines experiments on emulsion explosives' sympathetic detonation under various confinement materials with numerical simulations of the sympathetic detonation process in rocks is adopted. By analyzing the impact of confinement conditions, decoupling coefficients, and other factors on the sympathetic detonation distance of explosives, the stable sympathetic detonation distances of emulsion explosives with varying diameters and lengths in boreholes are identified. The conclusions are as follows: confinement

收稿日期 (Date of reception): 2024-12-07

网络首发日期 (Published online): 2025-03-19

作者简介: 田丰 (2000-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事矿山控制爆破方面研究, (E-mail) tianfeng20613@163.com。

通讯作者: 史秀志 (1966-), 男, 河北邢台人, 教授、博士生导师, 主要从事爆破理论与技术研究, (E-mail) baopo@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52374152) 爆破荷载下含分层结构面充填体损伤演化与分部揭露渐变失稳机制

About the author: TIAN Feng (2000-), male, from Lvliang, Shanxi Province, postgraduate, mainly engaged in mining blasting research, (E-mail) tianfeng20613@163.com.

Corresponding author: SHI Xiu-zhi (1966-), male, from Xingtai, Hebei Province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on blasting theory and technology, (E-mail) baopo@csu.edu.cn.

Fund Programs: the General Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 52374152)

conditions significantly influence the sympathetic detonation distance of explosives, with improved confinement resulting in a greater sympathetic detonation range. Under a specific radial uncoupling coefficient, the diameter of the explosive exerts a minor influence on the sympathetic detonation distance, which increases as the charge diameter enlarges. Additionally, the sympathetic detonation distance diminishes with an increase in the radial uncoupling coefficient and extends with the length of the explosive charge. Industrial trials were conducted to verify the findings, with the explosive spacing set at 70 cm. The results indicate that, in comparison to the conventional construction method utilizing detonating cord, the cost of blasting materials for smooth blasting in roof holes was diminished by 33.1 yuan per meter, representing a reduction of 36.1%.

Key words: mine excavation; smooth blasting; emulsion explosive; constraint condition; explosion distance

矿山巷道掘进爆破的周边孔通常需要进行光面爆破,以凡口铅锌矿为例,其装药结构一般为孔内使用雷管起爆、导爆索传爆,但这种工艺施工效率低、成本高。为降低光面爆破成本,可以取消装药结构中的导爆索,使用电子雷管直接起爆炸药,利用炸药殉爆特性引爆被发药包,完成孔内炸药传爆。

被发药包殉爆概率 100% 时主发药包与被发药包之间介质的最大长度称为最大稳定殉爆距离^[1]。炸药的殉爆距离主要与主发炸药参数、被发炸药参数、炸药药量、外部的约束条件等因素有关,国内外学者对炸药殉爆机理及炸药殉爆距离的影响因素进行了很多研究^[2-9],陈庆凯通过现场殉爆实验研究发现乳化炸药在铁管中殉爆距离大于在 PVC 管中^[10],即约束条件越好,乳化炸药稳定殉爆距离越长,且殉爆距离随装药不耦合系数增加而降低。李启月为研究在炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离的影响^[11],通过殉爆实验发现乳化炸药在聚能铁管中的殉爆距离与在普通铁管中相比增加了 25 cm,聚能槽能够对爆炸产生的能量进行约束,减少能量散失。但这些研究主要针对殉爆距离的一个影响因素开展,没有对殉爆距离不同影响因素进行综合研究。

很多学者也通过数值模拟的方式对炸药殉爆距离的影响因素进行研究^[12-18],周保顺使用 LS-DYNA 研究了非均质炸药主发药包产生的冲击波超压及其作用时间对被发药包的作用效果^[19],并得出炸药殉

爆距离与主发药包的爆轰压力、作用时间和被发药包的爆轰感度有关;王晨通过有限元数值模拟软件研究壳装厚度对炸药殉爆距离的影响^[20],发现壳厚为 3 mm 时,临界殉爆距离最大。但这些数值模拟研究主要是对固体壳装炸药展开,对于乳化炸药殉爆数值模拟研究很少。

在工程爆破中,炸药多是放置于炮孔中,炮孔对炸药有约束作用,因此研究约束条件及在约束条件下不同因素对乳化炸药殉爆距离的影响具有工程实际意义。本文通过现场殉爆实验和数值模拟,基于掘进爆破中光面爆破所使用的乳化炸药,研究约束条件、不耦合系数、药卷直径等因素对炸药殉爆距离的影响,得到不同条件下炸药的稳定殉爆距离,并将研究成果应用于工业试验中,与采用导爆索传爆的常规施工方法进行经济效益对比,为利用殉爆完成光面爆破提供参考。

1 不同约束材料下乳化炸药殉爆实验

1.1 实验方案设计

为探究约束条件、径向不耦合系数、药卷直径对炸药殉爆距离的影响,得出不同条件下乳化炸药的稳定殉爆距离,进行殉爆实验。实验选用直径 42 mm、52 mm 的镀锌铁管和直径 42 mm、52 mm 的 PVC 管,药卷直径 27 mm、35 mm 的 2 号岩石乳化炸药,所用管材参数如表 1 所示,乳化炸药规格参数如表 2 所示。

表 1 不同管材参数表

Table 1 Different pipe material parameters

管材 Pipe material	外径/mm Outer diameter/mm	壁厚/mm Wall thickness/mm	抗拉强度/MPa Tensile strength/MPa	熔点/°C Melting point/°C
PVC 管 PVC pipe	42	2.0	1	185 ~ 205
镀锌铁管 Galvanized iron pipe	42	2.0	410	1520
	52	2.0	410	1520

表 2 实验炸药参数表

Table 2 Experimental explosive parameters

密度/(g · cm ⁻³) Density/(g · cm ⁻³)	直径/mm Diameter/mm	长度/mm Length/mm	质量/g Mass/g	爆轰速度/(m · s ⁻¹) Detonation velocity/(m · s ⁻¹)
1.15	27	230	150	3900
1.15	35	270	300	4000

实验时模拟孔内装药结构如图 1 所示,主发药包使用电子雷管起爆。主发药包与管口的距离为 L_1 ,主发药包与 1 号被发药包、1 号被发药包与 2 号被发药包间隔距离都为 L_2 ;2 号被发药包与管口的距离为 L_3 。为防止被发药包未殉爆前被空气冲击

波冲出管口, L_3 取值不应过小,取 $L_3 \geq 30$ cm。为避免药卷质量对实验的影响,每次实验药卷质量都为 150 g。主发药包和被发药包端部都使用美工刀切平,避免药包端部形状对炸药殉爆距离的影响。殉爆实验方案如表 3 所示。

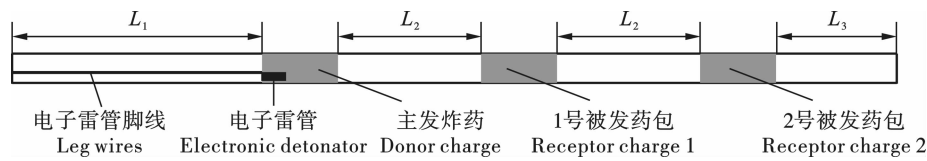


图 1 实验装药结构

Fig. 1 Experimental charge structure

表 3 实验方案表

Table 3 Experimental schedule

影响因素 Influencing factors	实验材料 Experimental materials
约束条件 Constraint conditions	直径 42 mm 的 PVC 管和镀锌铁管,直径 27 mm 的乳化炸药 PVC pipe and galvanized iron pipe with a diameter of 42 mm, and emulsion explosive with a diameter of 27 mm
径向不耦合系数 Radial uncoupling coefficient	直径 42 mm、52 mm 的镀锌铁管,直径 27 mm 的乳化炸药 Galvanized iron pipes with diameters of 42 mm and 52 mm, and emulsion explosive with a diameter of 27 mm
药卷直径 Diameter of the explosive cartridge	直径 42 mm、52 mm 的镀锌铁管,直径 27 mm、35 mm 的乳化炸药 Galvanized iron pipes with diameters of 42 mm and 52 mm, and emulsion explosives with diameters of 27 mm and 35 mm

1.2 实验结果分析

1.2.1 约束条件对炸药殉爆距离的影响

正式实验前对乳化炸药进行测试,得出无约束条件下炸药殉爆距离为 5 cm。每次实验调整不同间隔距离,通过观察被发药包装药段管材断裂情况及管壁内是否有残留炸药来判断被发药包是否发生殉爆。图 2 为殉爆实验后的 PVC 管,图 3(a)、(b)、(c)分别为镀锌铁管在被发药包都发生殉爆、只有 1 号被发药包殉爆、被发药包均未殉爆时的管材破坏情况,图 4 为管壁内残留乳化炸药示意图。

直径 27 mm 的乳化炸药在直径 42 mm 的 PVC 管和镀锌铁管中的实验结果如表 4 所示。

实验结果表明:直径 27 mm 的乳化炸药在直径 42 mm 的 PVC 管中稳定殉爆距离为 10 ~ 15 cm,直

径 27 mm 的乳化炸药在直径 42 mm 的镀锌铁管中的稳定殉爆距离为 80 cm。对比实验结果,镀锌铁管的熔点、强度远高于 PVC 管,炸药爆炸产生的爆轰波在镀锌铁管中被约束的效果更好,能量衰减更为缓慢,殉爆距离远远超过了 PVC 管。综上可知约束条件对于乳化炸药殉爆距离的影响是极为显著的,约束条件越好,乳化炸药殉爆距离越大。



图 2 殉爆实验后的 PVC 管

Fig. 2 PVC pipe after explosion test

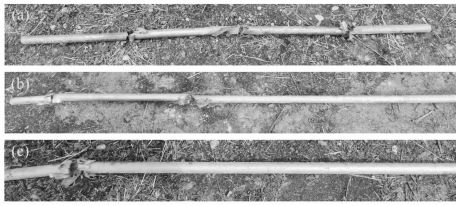


图 3 殉爆实验后的镀锌铁管

Fig. 3 Galvanized iron pipe after explosion test



图 4 管壁残留乳化炸药

Fig. 4 Emulsion explosive residue on pipe wall

表 4 不同约束条件下炸药殉爆实验结果

Table 4 Experimental results of sympathetic detonation under different constraint conditions

管材 Pipe	间隔距离/cm Spacing distance/cm	被发药卷殉爆结果 Results of sympathetic detonation of the receptor cartridge
PVC 管 PVC pipe	10	完全殉爆 Complete sympathetic detonation
	15、20、25、30、40	均未完全殉爆 No complete sympathetic detonation
镀锌铁管 Galvanized iron pipe	30、40、60、80	完全殉爆 Complete sympathetic detonation
	85、90	均未完全殉爆 No complete sympathetic detonation

1.2.2 径向不耦合系数对炸药殉爆距离的影响

由前文可知,直径 27 mm 乳化炸药在直径 42 mm 镀锌铁管中的稳定殉爆距离为 80 cm。直径

27 mm 乳化炸药在直径 52 mm 镀锌铁管中的实验结果如表 5 所示。

表 5 炸药殉爆实验结果

Table 5 Results of sympathetic detonation test with diameter of 27 mm

间隔距离/cm Spacing distance/cm	被发药卷殉爆结果 Results of sympathetic detonation of the receptor cartridge
10、20、30、40、45	完全殉爆 Complete sympathetic detonation
50	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1

实验结果表明:直径 27 mm 的乳化炸药在直径 52 mm 的镀锌铁管中的稳定殉爆距离为 45 cm。装药不耦合系数由 1.41 增大至 1.78,殉爆距离由 80 cm 减少至 45 cm。综上可知随着装药不耦合系数的增大,炸药殉爆距离减少。

1.2.3 药卷直径对炸药殉爆距离的影响

直径 27 mm、35 mm 的乳化炸药在直径 42 mm、52 mm 的镀锌铁管中径向不耦合系数分别为 1.41 和 1.37,两者径向不耦合系数大致相同。由前文可知,直径 27 mm 乳化炸药在直径 42 mm 镀锌铁管中的稳定殉爆距离为 80 cm。直径 35 mm 乳化炸药在直径 52 mm 镀锌铁管中的实验结果如表 6 所示。

实验结果表明:直径 35 mm 的乳化炸药在直径 52 mm 的镀锌铁管中的稳定殉爆距离为 85 cm,药卷直径从 27 mm 增大至 35 mm,殉爆距离只增加了 5 cm。综上可知药卷直径对炸药殉爆距离的影响较小,药卷直径增大,殉爆距离也增加。

2 岩石中炸药殉爆过程数值模拟

2.1 数值模型及模拟方案

上一节通过殉爆实验探究了不同因素对乳化炸药殉爆距离的影响,但实验只是对炸药殉爆现象有一个定性研究,利用数值模拟的方法可以更深入的研究炸药殉爆过程中应力波传播和压力变化规律。

本节利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件对乳化炸药在岩石炮孔中的殉爆过程进行研究,探究径向不

耦合系数和药卷长度对殉爆距离的影响,得到不同条件下炸药稳定殉爆距离。

表 6 炸药殉爆实验结果

Table 6 Results of explosive detonation test with diameter of 35 mm

间隔距离/cm Spacing distance/cm	被发药卷殉爆结果 Results of sympathetic detonation of the receptor cartridge
10、30、40、50、70、80、85	完全殉爆 Complete sympathetic detonation
90	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1
100	均未完全殉爆 No complete sympathetic detonation

采用三维模型建模,模型单元对称,为提升计算效率采用 1/4 模型建模。参照凡口铅锌矿井下掘进爆破炮孔参数,设置炮孔深度为 3.0 m,炮孔直径为 38 mm。岩体尺寸大小为 3.0 m × 3.0 m × 3.0 m。使用 ANSYS 模拟软件建立模型,网格划分在 HyperMesh 软件内完成,岩石网格单元大小为 2 cm,炸药、空气、ALE 网格单元大小设置为 0.5 cm。建立的数值模型如图 5 所示,模型网格划分如图 6 所示。

心为监测点 2,分析监测点处压力随时间的变化情况,将监测点处的峰值压力与使用 JWL 状态方程所计算出的炸药完全反应后的爆轰压力作对比,进一步判断两条被发炸药的殉爆情况。数值模拟方案如表 7 所示。

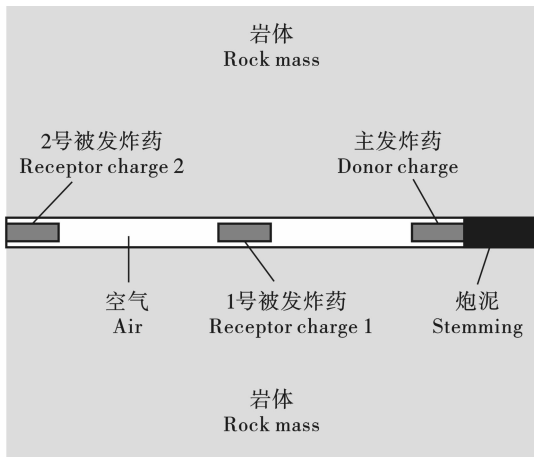


图 5 数值模型示意图

Fig. 5 Numerical model diagram

建立不同直径和不同长度的乳化炸药模型进行数值模拟,改变主发炸药与 1 号被发炸药及两条被发炸药之间的间隔距离,通过分析主发炸药起爆后两条被发炸药的殉爆情况来进行研究。首先对主发炸药起爆后不同时刻下的压力云图进行分析,观察两条被发炸药在主发炸药爆炸产生的爆轰波冲击下的起爆情况,判断被发炸药是否完全殉爆并形成稳定的爆轰波。同时在两条被发炸药的

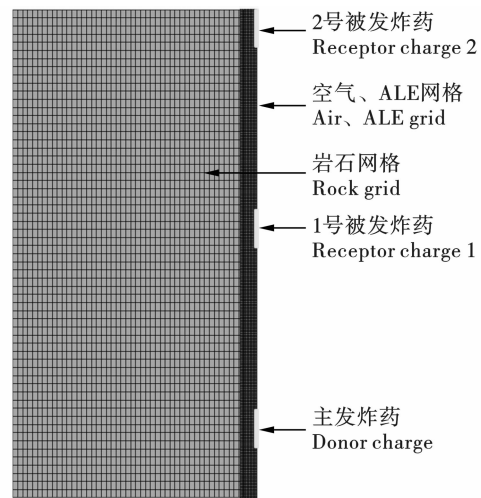


图 6 模型网格划分示意图

Fig. 6 Mesh division schematic diagram of the model

选用 LS-DYNA 内置的 3 号岩石材料 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC,根据凡口铅锌矿岩石物理力学参数报告,材料模型中的各项参数如表 8 所示。

主发炸药模型采用 8#材料:“ * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN”,炸药及 JWL 状态方程参数如表 9 所示。

被发炸药采用点火增长模型“ * EOS_IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE”,被发炸药的速率方程参数如表 10 所示。

选用 * MAT_NULL 作为空气材料,其状态方程参数如表 11 所示。

表 7 殉爆数值模拟方案

Table 7 Numerical simulation scheme for sympathetic detonation

方案编号 Scheme number	影响因素 Influencing factors	炸药直径/mm Diameter/mm	药卷长度/cm Length/cm	间隔距离/cm Spacing distance/cm
1-1		22	23	60, 80, 85, 90
1-2	径向不耦合系数	27	23	60, 80, 90, 95, 100
1-3	Radial uncoupling coefficient	30	23	80, 90, 95, 100
1-4		35	23	90, 100, 105, 110
2-1		27	15	60, 70, 75, 80
2-2	药卷长度	27	19	60, 80, 85, 90
1-2	Length of the explosive cartridge	27	23	60, 80, 90, 95, 100
2-3		27	27	80, 90, 95, 100, 105

表 8 材料模型参数表

Table 8 Material mode parameter table

参数 Parameter	数值 Numerical value	单位 Unit
岩石密度 Rock density	2700	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
抗拉强度 Tensile strength	4.73	MPa
抗压强度 Compressive strength	65.71	MPa
弹性模量 Elastic modulus	20.6	GPa
泊松比 Poisson's ratio	0.25	N/A
屈服强度 Yield strength	69.73	MPa
切线模量 Tangent modulus	168.7	MPa

表 9 炸药及 JWL 状态方程参数

Table 9 Explosive and JWL equation of state parameters

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$V_d/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa
1150	4000	4.6	177	9.9	5.78	2.08	0.3	7

表 10 被发炸药反应速率方程参数

Table 10 Reaction rate equation parameters of explosive being fired

a	b	c	d	e	f	$I/\mu\text{s}^{-1}$	x	γ	z	$G_1/(\text{GPa}^{-2} \mu\text{s}^{-1})$	$G_2/(\text{GPa}^{-2} \mu\text{s}^{-1})$
0	0.667	0.667	0.01	0.667	0.667	4.0e4	7.0	1.0	2.0	0.01	0.01

表 11 空气及其状态方程参数

Table 11 Air and its equation of state equation parameters

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E/GPa
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.025

2.2 径向不耦合系数对炸药殉爆距离的影响

对直径分别为 22 mm、27 mm、30 mm、35 mm，长度都为 23 cm 的乳化炸药在不同间隔距离条件下进行数值模拟，将 1/4 模型对称后出图。不同时刻下的压力云图如图 7 所示，为节省篇幅后文未将所有间隔距离云图展示。在两条被发炸药的中间布置监测点，监测点处压力随时间变化的曲线如图 8 所示，图中不同颜色的曲线代表不同的间隔距离条件。

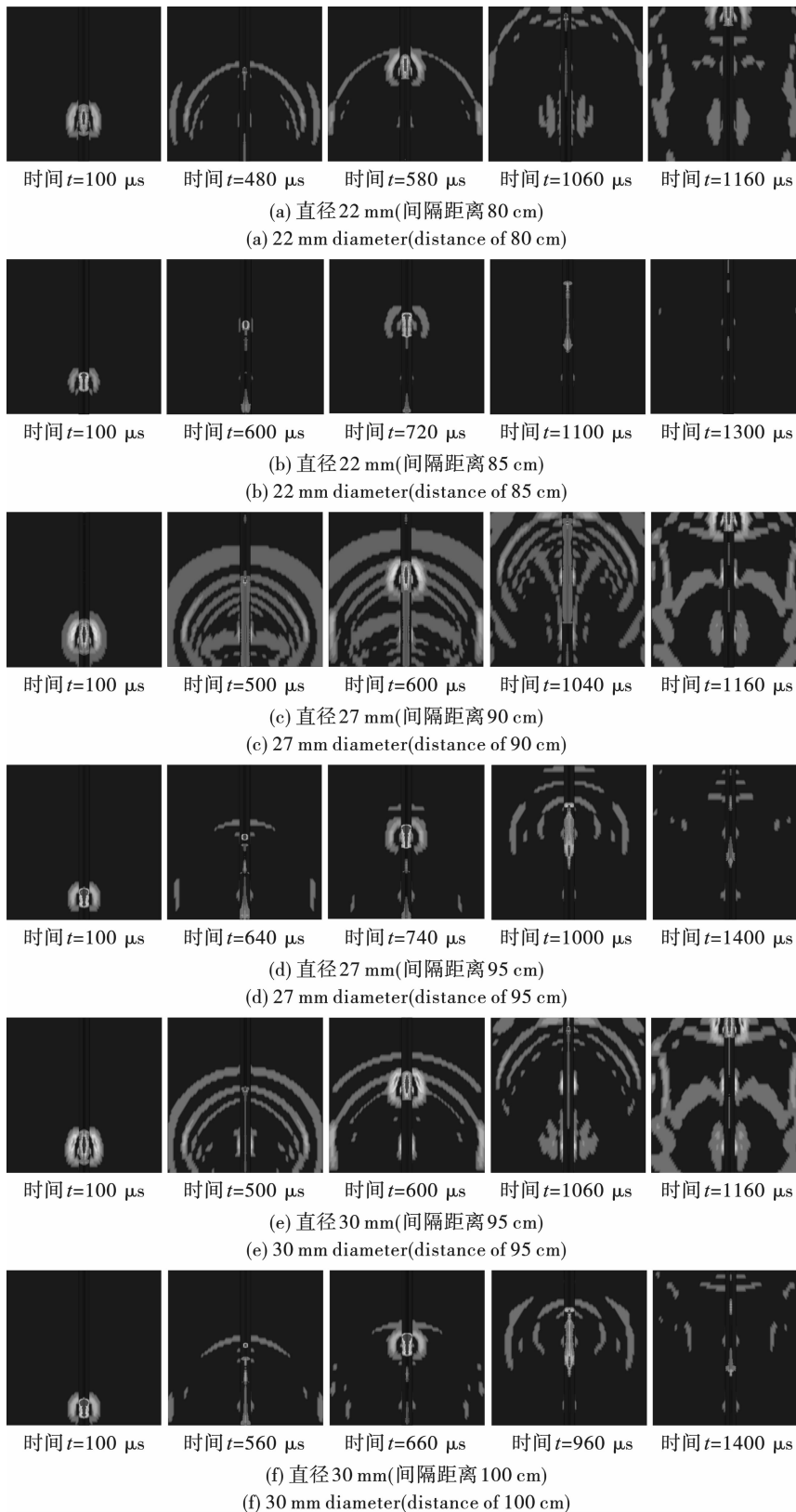
JWL 状态方程是一种广泛应用于爆炸力学和爆轰产物膨胀过程模拟的状态方程，可以用来计算炸药完全反应后的爆轰波压力，如式(1)所示

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

将表 9 中的参数代入上式中，计算得到乳化炸药完全反应后的爆轰波压力 P 为 3.68 GPa，分析监

测点 1、2 处的压力曲线图,若监测点峰值压力能达到 3.68 GPa,则说明该被发炸药能殉爆并完全反应,若监测点峰值压力达不到 3.68 GPa,则说明被

发炸药未发生殉爆或没有完全殉爆。分析压力云图和压力曲线图,殉爆模拟实验结果如表 12 所示。



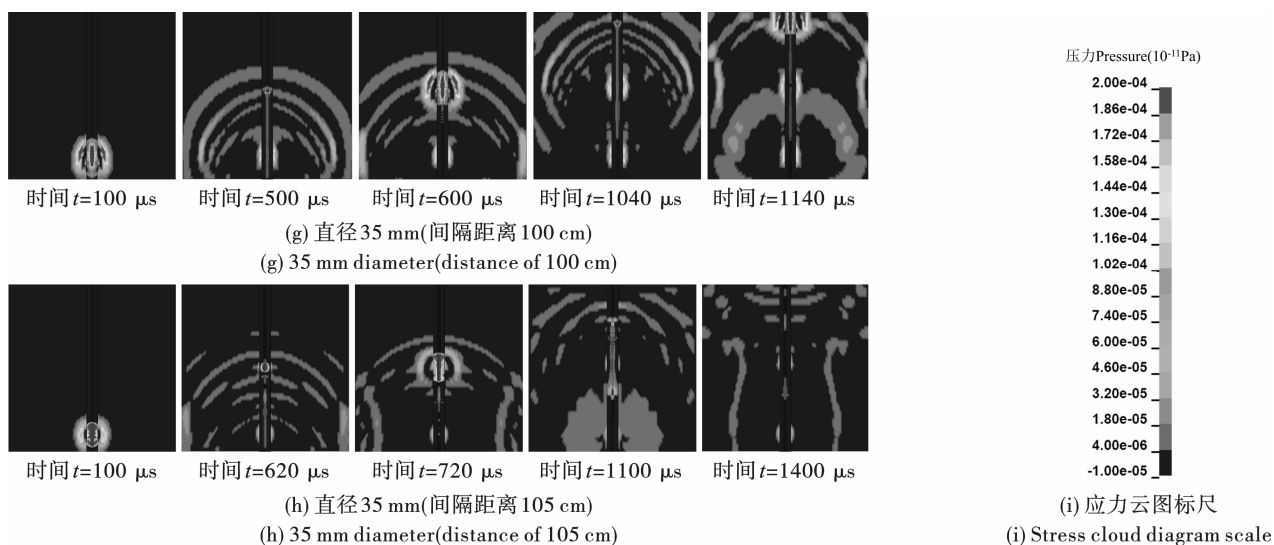


图 7 不同直径乳化炸药不同间隔距离下殉爆模拟压力云图
Fig. 7 Simulated pressure cloud diagrams of sympathetic detonation for emulsion explosives of different diameters at various spacing distances

表 12 不同直径乳化炸药殉爆模拟实验结果

Table 12 Simulation results of emulsion sympathetic detonation with different diameters

炸药直径/ mm Diameter/ mm	径向不耦合 系数 Radial uncoupling coefficient	间隔距离/cm Spacing distance/cm	被发炸药殉爆结果 Results of sympathetic detonation of the receptor charge	稳定殉爆距离/cm Stable sympathetic detonation distance/cm
		60、80	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	
22	1.73	85	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1	80
		90	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	
		60、80、90	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	
27	1.41	95	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1	90
		100	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	
		80、90、95	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	
30	1.27	100	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1	95
		90、100	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	
35	1.09	105、110	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	100

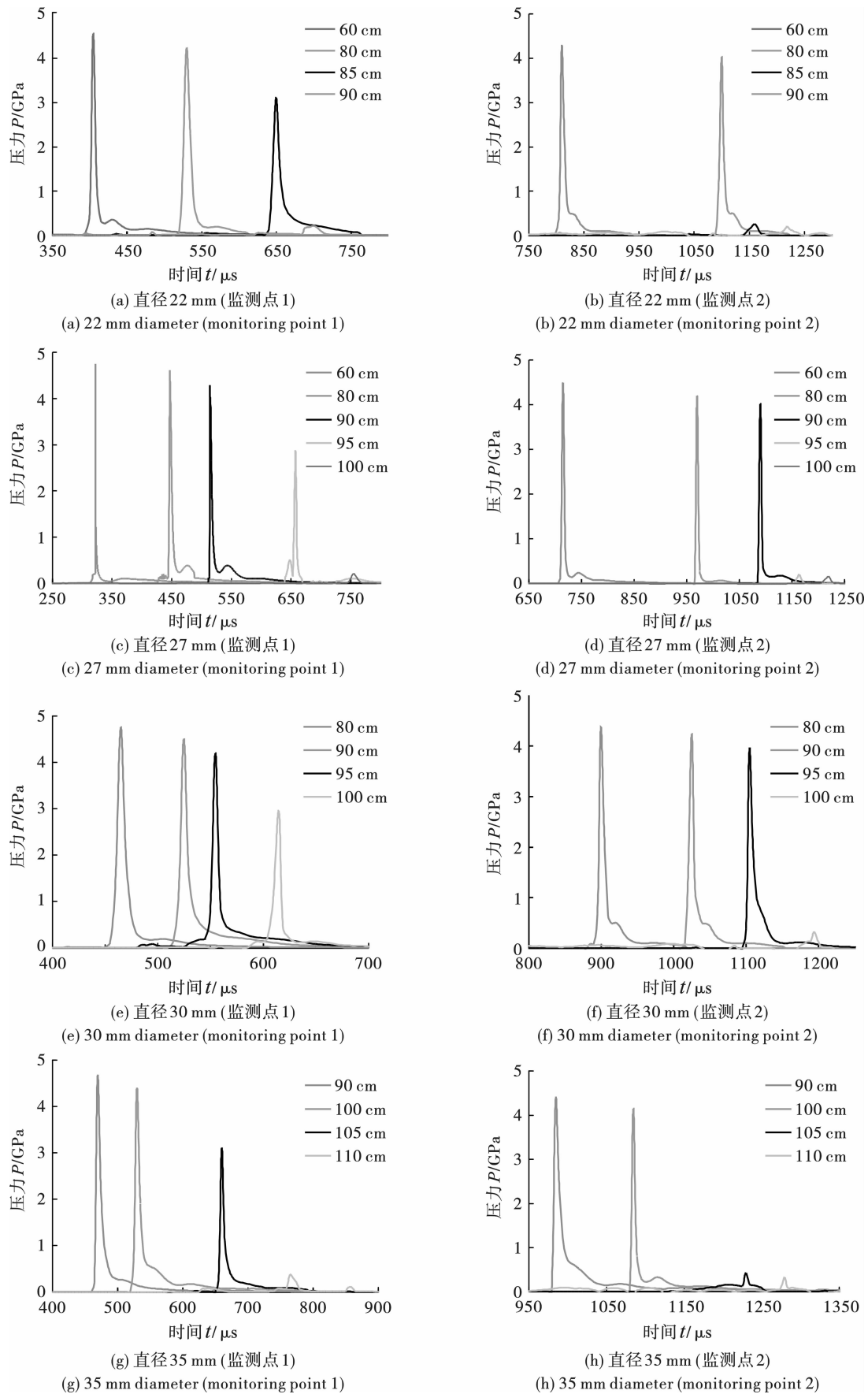


图 8 不同直径乳化炸药不同间隔距离下监测点处压力曲线图

Fig. 8 Pressure curves at monitoring points for emulsion explosives with different diameters and spacing intervals

炸药殉爆距离随径向不耦合系数的变化如图 9 所示。

由图 9 可得,在药卷长度一致的情况下,随着径向不耦合系数的增大,炸药的殉爆距离会减小。

2.3 药卷长度对殉爆距离的影响

对药卷长度为 15 cm、19 cm、23 cm、27 cm,直径为 27 mm 乳化炸药在不同间隔距离条件下进行数值模拟,不同时刻下的压力云图如图 10 所示。监测点处压力随时间变化的曲线如图 11 所示。

分析压力云图和压力曲线图,殉爆模拟实验结果如表 13 所示。

炸药殉爆距离随药卷长度的变化如图 12 所示。

由图 12 可得,在炸药直径都为 27 mm 的条件下,炸药殉爆距离随着药卷长度的增加而增加。

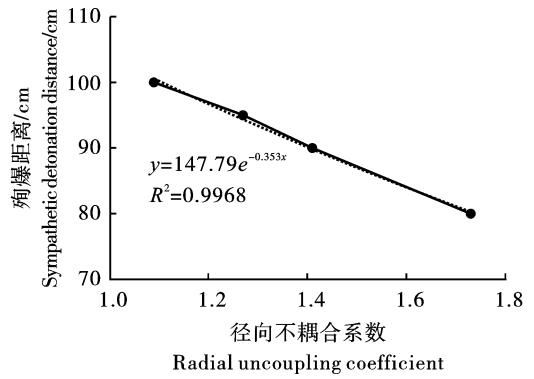
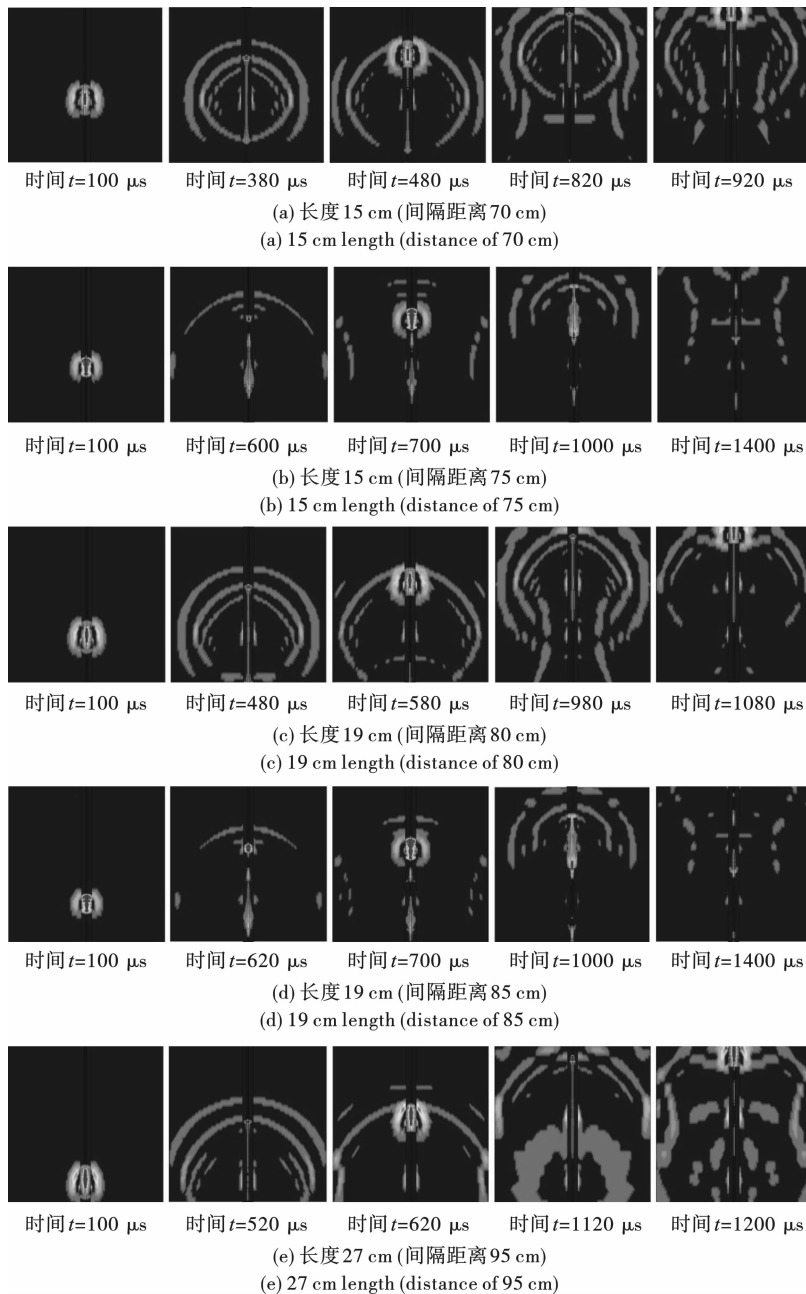


图 9 殉爆距离随径向不耦合系数变化示意图
Fig. 9 Image of detonation distance varying with radial uncoupling coefficient



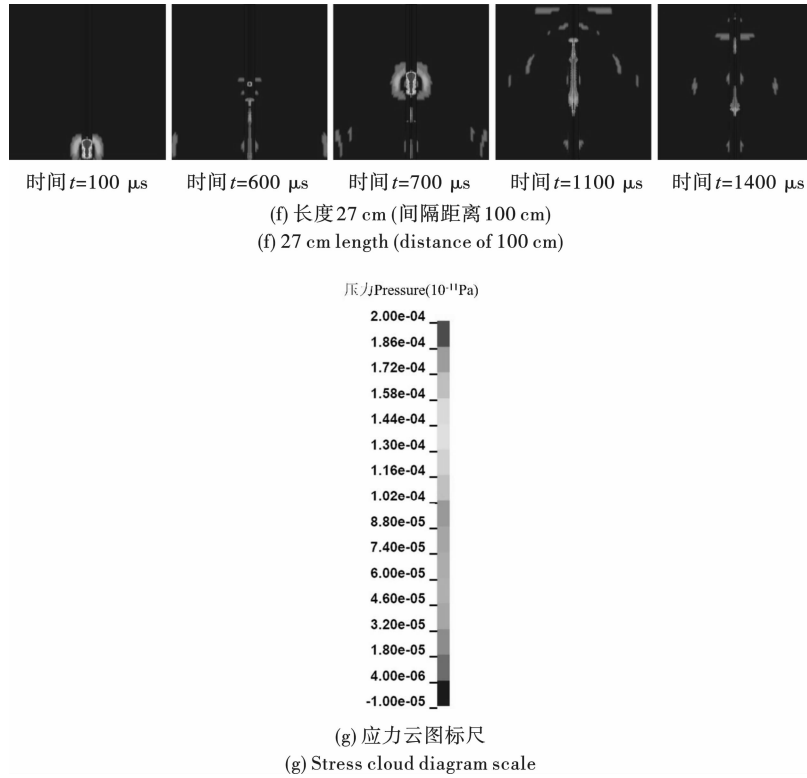


图 10 不同长度乳化炸药不同间隔距离下殉爆模拟压力云图
Fig. 10 Simulated pressure cloud diagrams of sympathetic detonation for emulsion explosives of different lengths at various spacings

表 13 不同长度乳化炸药殉爆模拟实验结果

Table 13 Simulation results of emulsion explosive detonation with different lengths

炸药长度/cm Length/cm	间隔距离/cm Spacing distance/cm	被发炸药殉爆结果 Results of sympathetic detonation of the receptor charge	稳定殉爆距离/cm Stable sympathetic detonation distance/cm
15	60、70	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	70
	75	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1	
	80	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	
19	60、80	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	80
	85、90	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	
23	60、80、90	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	90
	95	只有 1 号被发炸药殉爆 Sympathetic detonation occurred only in receptor charge 1	
	100	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	
27	80、90、95	都发生殉爆 All receptor charges underwent sympathetic detonation	95
	100、105	均未殉爆 None of the charges underwent sympathetic detonation	

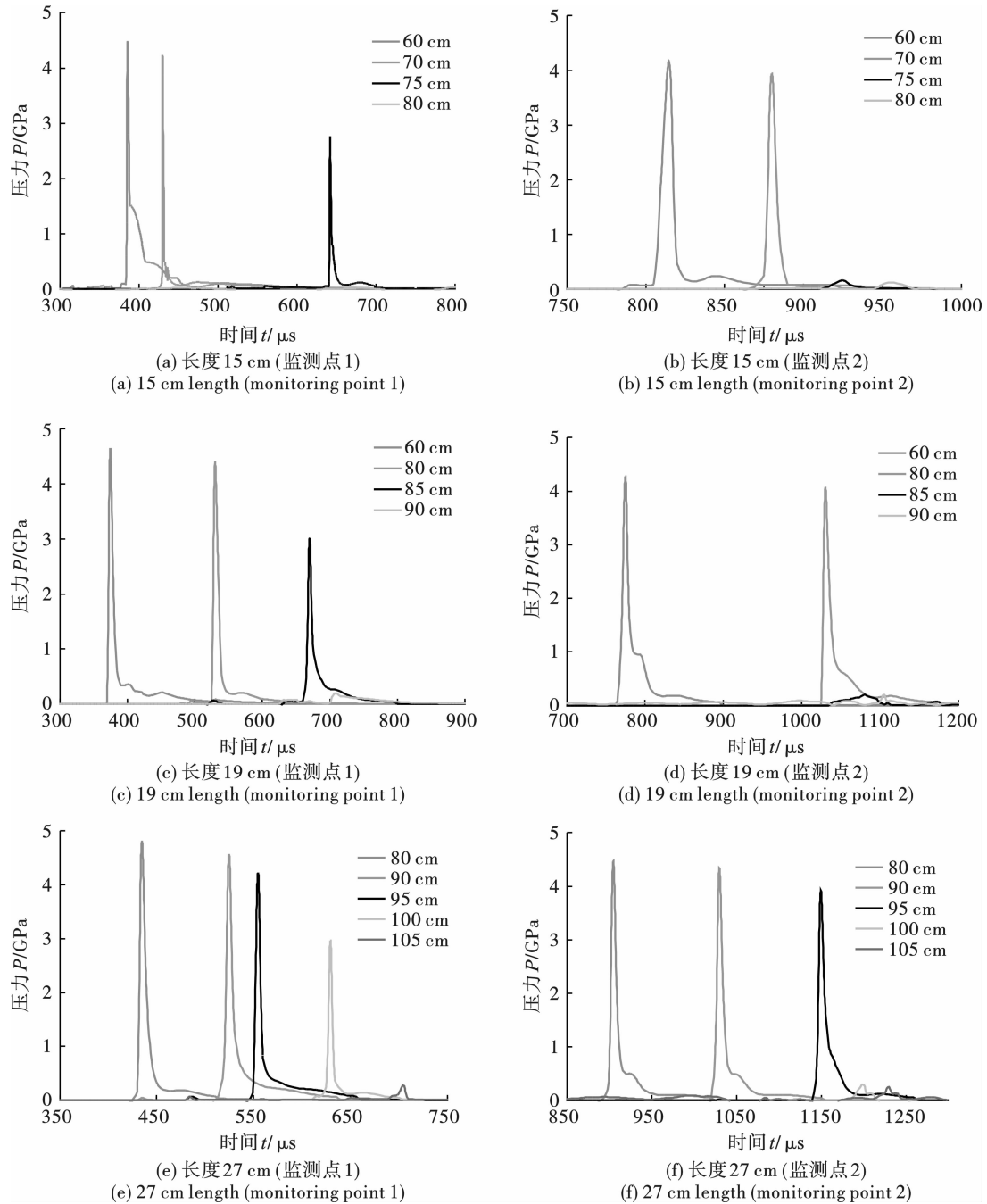


图 11 不同长度乳化炸药不同间隔距离下
监测点处压力曲线图

Fig. 11 Pressure curves at monitoring points for emulsion explosives with different lengths and spacing intervals

3 工业试验

3.1 爆破方案

由前文可得直径 27 mm、35 mm 乳化炸药在炮孔中的稳定殉爆距离分别为 90 cm、100 cm。本节通过在凡口铅锌矿进行掘进爆破现场工业试验,验证殉爆传爆法的可行性。

本次工业实验地点位于凡口铅锌矿 -240 m 中段,狮岭南 18#穿脉巷道。实验巷道的岩石主要为

条带瘤状灰岩,属于中等稳固,裂隙发育程度较低,岩石完整性较好。两种不同爆破方式的装药结构如图 13 和图 14 所示。与常规光面爆破装药结构相比,使用殉爆传爆装药结构取消使用导爆索,并且增大了炸药间隔距离。

根据岩石性质及断面大小,设置炮孔共 42 个,采用直眼掏槽爆破方案,中心炮孔为掏槽孔,其周边 4 个炮孔为空孔,中间三个顶板孔距离顶板 0.1 m,炮孔布置如图 15 所示。炮孔深度 2.65 m,炮孔直

径 38 mm,使用直径 27 mm、35 mm 乳化炸药以及数码电子雷管进行工业试验。

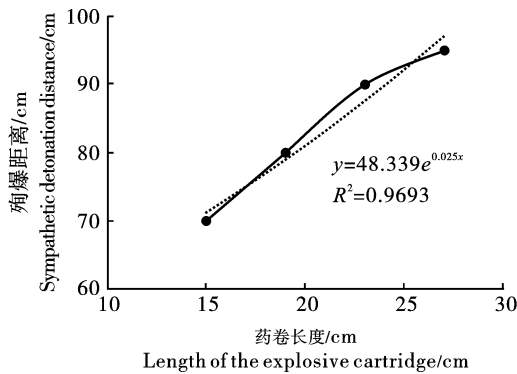


图 12 殉爆距离随药卷长度变化示意图

Fig. 12 Variation of detonation distance with the length of charge

3.2 爆破效果及经济效益分析

本次爆破炮孔深度为 2.65 m,掘进进尺为 2.52 m,炮孔利用率达到了 95%,现场未发现残留乳化炸药,说明炸药间隔距离设置为 70 cm,炸药可以完全殉爆,并且可以取得较好的爆破效果。爆破后根据现场观测,半孔率达到 90% 以上,开挖断面形状规则,岩面平整,巷道成型较好,超欠挖量在规定指标以内,现场拍摄到的爆破后轮廓形状如图 16 所示。与采用雷管传爆的常规施工方法进行经济效益对比(由于掏槽孔、辅助孔、边帮孔、底孔装药结构相似,因此主要对比顶板孔的爆破器材消耗),结果如表 14 所示。从表中看出每掘进一米,顶板孔光面爆破所用爆破器材成本降低 33.1 元。殉爆传爆法在保证爆破效果的前提下,可以减少生产成本,简化工艺流程。因此,殉爆传爆法可以应用于矿山掘进爆破工程当中,并能为相似工程提供借鉴。

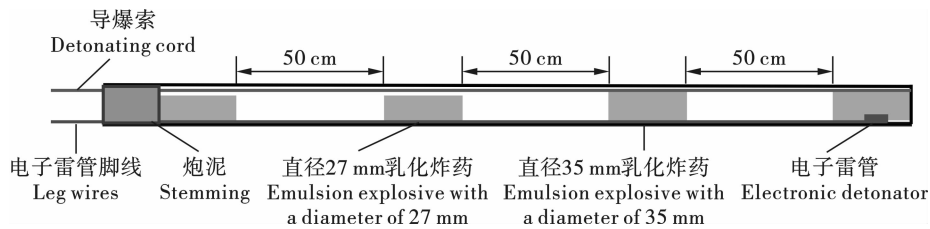


图 13 导爆索传爆装药结构示意图

Fig. 13 Structure diagram of detonating charge for detonating cord

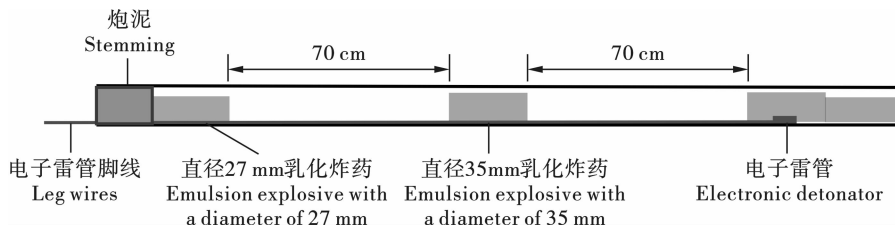


图 14 殉爆传爆装药结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of explosive charge structure

表 14 掘进爆破经济效益对比

Table 14 Comparison of economic benefits in tunneling blasting

项目 Project	导爆索传爆法 Detonating cord initiation method	殉爆传爆法 Sympathetic detonation propagation method
消耗炸药/卷 Consumes explosives/roll	7.9	7.9
炸药成本/元 The cost of explosives/yuan	27.7	27.7
消耗导爆索长度/m Consumes the length of the detonating cord/m	6.3	0
导爆索成本/元 Detonating cord cost/yuan	33.1	0
消耗数码电子雷管/个 Consumes digital electronic detonators/piece	2	2
数码电子雷管成本/元 Digital electronic detonator cost/yuan	31	31
成本合计/元 Total cost/yuan	91.8	58.7
成本对比/% Cost comparison/%	100	63.9

注:表 14 所得数据为每掘进一米,顶板孔光面爆破所消耗爆破材料费用。

Note: The data obtained in Table 14 are the cost of blasting materials consumed for smooth blasting of roof holes per meter of excavation.

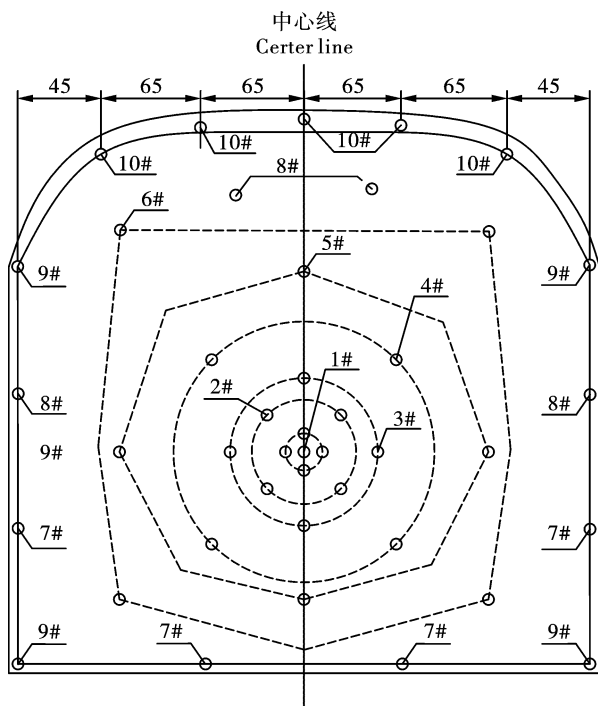


图 15 炮孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 15 Blasthole layout schematic diagram(unit:cm)

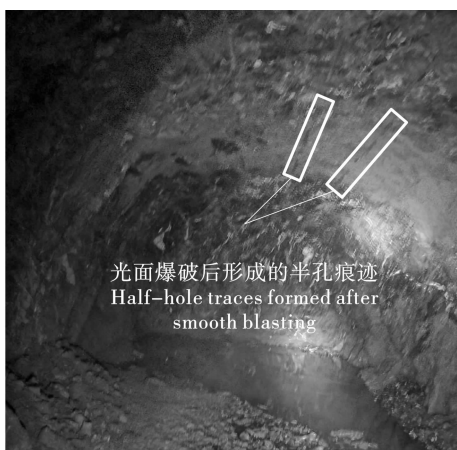


图 16 光面爆破后断面轮廓

Fig. 16 Smooth blasting result

4 结论

通过现场实验和数值模拟,研究分析不同因素对炸药殉爆距离的影响,得到不同乳化炸药在炮孔中的稳定殉爆距离,并进行工业试验验证。得出以下结论:

(1)约束条件对炸药殉爆距离影响十分显著,约束条件越好,乳化炸药殉爆距离越大;径向不耦合系数一定的条件下,乳化炸药直径对殉爆距离影响较小,炸药殉爆距离随药卷直径增大而增加。

(2)炸药殉爆距离随径向不耦合系数增大而减小,随药卷长度增加而增加。

(3)炸药间隔距离设置为 70 cm,使用殉爆传爆法与采用导爆索传爆的常规施工方法进行经济效益对比,顶板孔光面爆破所用爆破器材成本降低 33.1 元/米,降低了 36.1%。

参考文献 (References)

- [1] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙:中南大学出版社, 2011.
- [1] LI Xi-bing. Rock drilling and blasting engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 刘忠磊,王旭华,王应魁,等. 约束条件下聚能装置对乳化炸药引爆距离影响的研究[J]. 爆破, 2024, 41(3):171-178.
- [2] LIU Zhong-lei, WANG Xu-hua, WANG Ying-kui, et al. Study on influence of fusion device on detonation distance of emulsion explosives under constraint conditions[J]. Blasting, 2024, 41(3):171-178. (in Chinese)
- [3] 王清标,王涛,田成林,等. 周边孔聚能装置间隔装药在光面爆破中的应用研究[J]. 爆破, 2024, 41(1):77-84.
- [3] WANG Qing-biao, WANG Tao, TIAN Cheng-lin, et al. Application of shaped charge device and decked charge in perimeter holes of smooth blasting[J]. Blasting, 2024, 41(1):77-84. (in Chinese)
- [4] 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.
- [4] JIANG Jia-ming, YANG Ling, MA Chao-yang, et al. Application of PVC interval charge smooth blasting technology in excavation blasting[J]. Mining Technology, 2023, 23(2):80-84. (in Chinese)
- [5] 马晶晶,龙运杰,唐虹靖,等. 炮孔约束下炸药殉爆距离试验研究[J]. 采矿技术, 2023, 23(6):165-169.
- [5] MA Jing-jing, LONG Yun-jie, TANG Hong-jing, et al. Experimental study on the detonation distance of explosives under the constraint of blast holes[J]. Mining Technology, 2023, 23(6):165-169. (in Chinese)
- [6] 徐德成,李广,刘咏竹,等. 高温敏化时间对乳化炸药性能的影响[J]. 爆破, 2016, 33(3):118-121.
- [6] XU De-cheng, LI Guang, LIU Yong-zhu, et al. Effects of high-temperature sensitization time to emulsion explosives performance[J]. Blasting, 2016, 33(3):118-121. (in Chinese)
- [7] 胡建华,高宏伟,张立. 乳化炸药的临界爆轰直径的实验研究[J]. 爆破, 2015, 32(3):156-161.
- [7] HU Jian-hua, GAO Hong-wei, ZHANG Li. Experimental of critical detonation diameter of emulsion explosive[J].

- Blasting,2015,32(3):156-161. (in Chinese)
- [8] KO Y, KIM S, YANG H. Assessment for the sympathetic detonation characteristics of underwater shaped charge [J]. Geosystem Engineering,2017,20(5):286-293.
- [9] P W B, P B J, K N N, et al. Shock initiation of explosives: High temperature hot spots explained [J]. Applied Physics Letters,2017,111(6):061902-061902.
- [10] 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):45-49.
- [10] 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):45-49. (in Chinese)
- [11] 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.
- [11] 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)
- [12] XIAO Y, XIAO X, FAN C, 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):1-10.
- [13] DONG L Y, WANG Z J, XIAO Y C, et al. Sympathetic detonation reaction behavior of a fuze explosive train [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves,2021,57(5):607-619.
- [14] 李兴隆,吴奎先,路中华,等. 叠层复合装药殉爆安全性试验及数值模拟 [J]. 含能材料,2022,30(3):204-213.
- [14] LI Xing-long, WU Kui-xian, LU Zhong-hua, et al. Sympathetic detonation test and simulation of laminated composite charge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2022,30(3):204-213. (in Chinese)
- [15] 谢冰岩. 引信传爆序列殉爆防护数值模拟与研究 [J]. 电声技术,2021,45(12):125-128.
- [15] XIE Bing-yan. Numerical simulation and research on the protection of fuze explosive train [J]. Audio Engineering,2021,45(12):125-128. (in Chinese)
- [16] 范一清,王 昊. 引信传爆序列殉爆特性数值模拟方法 [J]. 探测与控制学报,2017,39(5):7-9,19.
- [16] FAN Yi-qing, WANG Jiong. Numerical simulation of sympathetic detonation of fuze explosive trains [J]. Journal of Detection & Control,2017,39(5):7-9,19. (in Chinese)
- [17] 叶海旺,农冬灵,赵明生,等. 混装乳化炸药水孔装药数值模拟及试验研究 [J]. 爆破,2011,28(4):11-14,19.
- [17] YE Hai-wang, NONG Dong-ling, ZHAO Ming-sheng, et al. Numerical simulation and experiments study on emulsion explosive charging in water-filled-hole [J]. Blasting,2011,28(4):11-14,19. (in Chinese)
- [18] 陈 朗,王 晨,鲁建英,等. 炸药殉爆实验和数值模拟 [J]. 北京理工大学学报,2009,29(6):497-500,524.
- [18] CHEN Lang, WANG Chen, LU Jian-ying, et al. Experiment & simulation of sympathetic detonation tests [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2009,29(6):497-501. (in Chinese)
- [19] 周保顺,王少龙,徐明利,等. 非均质炸药殉爆试验数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报,2009,29(5):145-148.
- [19] ZHOU Bao-shun, WANG Shao-long, XU Ming-li, et al. Numerical simulation of sympathetic detonation of heterogeneous condensed explosives [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2009,29(5):145-148. (in Chinese)
- [20] 王 晨,伍俊英,陈 朗,等. 壳装炸药殉爆实验和数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):152-158.
- [20] WANG Chen, WU Jun-ying, CHEN Lang, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell [J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(2):152-158. (in Chinese)

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。