

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.023

成品乳化炸药临界爆轰直径试验研究^{*}

张建华¹, 梁伟韬¹, 黄刚², 郝成磊³

- (1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070;
2. 易普力-武汉理工绿色与智慧矿山联合研发中心, 武汉 430070;
3. 北方爆破科技有限公司, 北京市海淀区 100080)

摘要: 针对矿山预裂爆破尚无专用炸药, 常用的32 mm成品乳化炸药爆速过高且威力过大的问题, 提出通过减小炸药直径来降低其爆速与威力的施工方法。基于临界直径理论, 采用数值模拟与试验验证相结合的分析方法; 通过LS-DYNA软件建立PVC管装药三维模型, 结合点火增长反应速率方程和流固耦合算法模拟爆轰波的传播过程, 根据爆轰曲线判定炸药是否稳定爆轰; 使用BSS-1型智能十段爆速仪对不同直径乳化炸药进行爆速现场实测, 根据测得的爆速确定乳化炸药的临界直径。结果表明模拟与实验数据基本吻合: 炸药直径14 mm时可实现稳定爆轰, 12 mm时爆轰中断, 临界直径位于12~14 mm区间, 直径14 mm以上时, 爆速随直径增大而递增。本研究通过数值模拟与现场试验相互印证, 确定了矿山用成品乳化炸药的临界直径范围, 为其预裂爆破参数优化与安全控制提供了数据支撑。

关键词: 乳化炸药; 爆轰特性; 临界直径; 爆速; 数值模拟

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0220-09

Experimental Study on Critical Detonation Diameter of Finished Emulsion Explosive

ZHANG Jian-hua¹, LIANG Wei-tao¹, HUANG Gang², HAO Cheng-lei³

- (1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Green and Intelligent Mining Technologies Joint R&D Center, Explosives Co., Ltd. WUT, Wuhan 430070, China; 3. North Blasting Technology Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100080, China)

Abstract: To address the absence of specialized explosives for mine presplitting blasting and excessive detonation velocity/power of conventional 32 mm emulsion explosives, this study proposed reducing the explosive diameter to moderate detonation characteristics. By combining critical diameter theory with numerical simulation analysis, a PVC tube charge model was developed in LS-DYNA. The detonation wave propagation was simulated using ignition-growth reaction-rate equations and fluid-solid coupling algorithms, with detonation-curve analysis verifying explosive stability. The BSS-1 intelligent ten-stage detonation velocity meter was employed to measure detonation velocities of

收稿日期 (Date of reception): 2026-01-26

网络首发日期 (Published online): 2026-06-15

作者简介: 张建华(1963-), 男, 陕西省渭南市, 博士、教授、博导, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) zjhwt@sina.com。
通信作者: 黄刚(1986-), 男, 湖北省黄冈市, 副教授、博士、硕导, 从事采矿、爆破、安全等方面的教学与研究工作, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No. 52109165)

About the author: ZHANG Jian-hua (1963-), male, from Weinan city, Shaanxi province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in mining, blasting, and safety in both teaching and academic work, (E-mail) zjhwt@sina.com.

Corresponding author: HUANG Gang (1986-), male, born in Huanggang city, Hubei province, Ph. D, Associate professor, master's supervisor, mainly engaged in mining, blasting, and safety in both teaching and academic work, (E-mail) huanggang2016@whut.edu.cn.

Fund Programs: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52109165)

emulsion explosives of different diameters, thereby enabling the determination of their critical diameter from experimental data. Results demonstrate strong agreement between simulations and experiments: stable detonation occurs at 14 mm diameter, while failure occurs at 12 mm, establishing the critical diameter range as 12 ~ 14 mm. Additionally, when the diameter exceeds 14 mm, the detonation velocity exhibits a positive correlation with diameter increase. This study, cross-validation of numerical simulations and field experiments, identifies the critical diameter range for industrial emulsion explosives in mining applications, offering empirical support for optimizing presplitting blasting parameters and enhancing safety management.

Key words: emulsion explosive; detonation characteristics; critical diameter; detonation velocity; numerical simulation

露天矿山边坡稳定性的研究一直是广受学者关注的研究领域,预裂爆破是保障边坡轮廓控制与岩体稳定的关键爆破技术^[1,2]。在矿山开采过程中,常常需要在露天矿山高陡边坡邻近边帮处进行爆破工作,此时爆破产生的应力波直接作用于既有边坡,对既有边坡的稳定性有极大影响,有时甚至会造成边坡失稳破坏,从而出现滑坡现象^[3]。预裂爆破对炸药有特殊要求,通常选用低威力、低爆速、低密度的炸药,以确保形成平整的裂缝面,同时减少对保留岩体的破坏。成品乳化炸药的优点在于有良好的抗水性能,爆破性能优良,传爆性好,小直径下有雷管敏感度,密度在 $0.9 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$,但炸药厂生产的炸药药卷最小直径为 32 mm,爆速高,并不合理适配预裂爆破。

炸药的临界直径是指爆轰波可以稳定传播的最小装药直径。对于达到临界直径的药柱,引爆压力近似等于 CJ 压力;低于临界直径,爆轰波在传播过程中能量损失过快,无法维持化学反应,导致爆轰中断。随着直径不断增加,引爆压力逐渐减小,爆速逐渐增加。通过临界直径这一重要参数,在进行矿山预裂爆破设计时可确定合理装药直径防止炸药拒爆,提高炸药利用率和爆轰威力,可令炸药的使用更安全和经济,降低矿山成本。临界直径的研究也促进了对炸药爆炸反应动态过程的理解,优化爆炸效率并提升炸药的安全性。因此,在矿山爆破使用炸药前,准确计算和测量炸药临界直径是一项重要的步骤,以确保炸药的能量输出和可靠性^[4]。

由于炸药配方和工艺条件的不同,炸药的临界直径是不同的。胡建华等通过楔形槽验证了乳化炸药在无约束条件下的临界直径范围在 7 ~ 10 mm 之间^[5];刘彦和白帆通过实验和数值模拟确定了 C-1 炸药的临界直径为 1.34 mm^[6];赵海霞和张玉磊也分别通过实验研究了不同装药条件下的装药直径与爆速以及约束条件的相互影响关系^[7];刘攀等通过数值模拟得出新型熔铸载体 DNP 炸药的临界直径为 8.20 mm,与实验值吻合较好^[8];皮铮迪等依据实

验结果标定炸药的点火增长模型参数后通过数值模拟得到了三种炸药的临界起爆阈值和 POP 关系^[9];在描述非均质炸药冲击起爆和爆轰反应的化学反应速率模型方面,国内外提出了多种模型,如压力相关的 Forest fire 反应速率模型,基于热点概念建立的 Lee-Tarver 点火增长(Ignition and Growth, I&G)反应速率模型,考虑中间态变量的多过程热点反应速率的 JTF (Johnson-Tang-Forest) 模型,与炸药初始微观结构相关的 Kim 反应速率模型,熵相关的 CREST 模型等^[10,11]。段继等针对点火增长方程参数多且不易标定的不足^[12],引入半周期三角函数对模型进行优化。何超等通过仿真模拟得出模型参数^[13],并计算得到 C-1 炸药的临界直径为 1.34 mm。李劲模拟冲击起爆对改进型点火增长方程进行二次开发^[14],得出其计算结果与原模型相吻合。许伟等通过安全性数值模拟和试验优化了 Lee-Tarver 模型,计算了壳体和装药的动力学响应^[15]。

使用 LS-DYNA 有限元软件模拟分析在 PVC 管约束下乳化炸药的爆轰压力,确定其临界直径。基于模拟爆轰压力的演化规律、冲击波传播特性,初步锁定临界直径的合理范围。考虑到数值模拟与实际工况的差异,进一步开展矿山现场试验,选取多组不同直径的乳化炸药,使用爆速仪精准测量爆速数据,分析不同直径下的爆速规律,确定最符合实际的临界直径。

1 乳化炸药临界直径数值模型

1.1 基于 LS-DYNA 数值计算模型

为模拟乳化炸药临界直径,建立 PVC 管约束下直径为 12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm 五组三维数值计算模型,图 1 展示了 12 mm 直径下在空气中炸药爆轰的数值模型示意图,由乳化炸药,传爆药,空气域和 PVC 管组成。建立有限元模型时,单元类型选取 Solid164 六面体结构,PVC 管采用 Lagrange 网格划分,乳化炸药、传爆药和空气域均采用 Euler 网格划分和 ALE 算法。采用非线性有限元计

算方法对炸药的起爆过程进行模拟^[16]。单元采用流固耦合算法,该算法应用于爆炸冲击、管道爆裂等流体大变形场景,可以模拟在 PVC 管约束的情况下炸药冲击起爆过程,单位制采用 cm-g- μ s。

图 1 模型总长 20 cm,其中 1 为传爆药,2 为 PVC 管,3 为乳化炸药,4 为空气域。装药体系由长度为 2 cm 的传爆药和长 18 cm 的乳化炸药组成。乳化炸药从 2.5 cm 处开始设置测点,每隔 2.5 cm 依次设置测点,共设置 6 个 A、B、C、D、E、F 测点。传爆药选用高爆速炸药,确保为乳化炸药提供稳定、可靠的起爆能量,避免因起爆不充分导致的爆轰异常。约束部件为 PVC 管,直径为 14 mm,壁厚 2 mm,包裹于炸药外侧进行约束。空气域环绕于 PVC 管外部,完整还原爆轰过程中的气相传播介质,有效避免边界效应对爆轰波传播特性的干扰,确保模拟结果能够真实反映 PVC 管约束下乳化炸药的爆轰规律。

1.2 模型参数及状态方程

(1) 传爆药材料模型

传爆药采用高能炸药材料模型 * MAT_HIGH_

表 1 传爆药材料 JWL 状态方程参数

Table 1 JWL equation of state parameters of booster material

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1695	8425	854.5	20.493	4.6	1.3	0.25	8.5

(2) 乳化炸药材料模型

在模型中,通过传爆药对乳化炸药进行起爆,乳化炸药采用 2# 岩石乳化炸药参数。点火增长反应速率模型在炸药冲击起爆以及爆轰传播过程中被广泛使用^[18]。为了模拟乳化炸药在传爆药冲击下的起爆过程,乳化炸药采用 10 号材料本构模型 * MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 和三项式点火增长状态方程 * EOS_IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE。当低于乳化炸药的临界直径时,

EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程^[17],根据状态方程,对炸药的起爆时间和起爆位置进行确定,JWL 状态方程见式(1)

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料输入参数; P 为爆轰产物的压力; V 为相对体积装药,即单位体积装药产生的爆轰产物的体积; E_0 为初始比内能。

材料模型和状态方程参数见表 1。

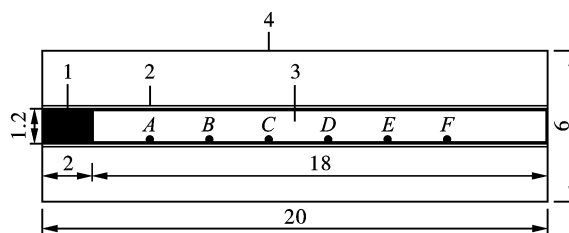


图 1 12 mm 直径炸药爆轰的数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model of 12 mm diameter explosive detonation

乳化炸药不完全爆轰或拒爆导致炸药中间产物未知,对于爆炸未反应物和爆轰产物,均使用含温度形式的 JWL 状态方程见式(2)。

$$P = A e^{R_1 \bar{v}} + B e^{-R_2 \bar{v}} + \frac{\omega C_v}{v} T \quad (2)$$

未反应炸药状态方程参数由乳化炸药 Hugoniot 数据拟合^[19],爆轰产物状态方程可由 Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) 热化学代码计算。表 2 列出了爆炸未反应物和爆轰产物 JWL 状态方程的对应参数。

表 2 乳化炸药未反应物与爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 2 JWL equation of state parameters of emulsion explosive unreacted and detonation products

参数 Parameters	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	$\omega C_v/(\text{GPa} \cdot \text{K}^{-1})$
未反应炸药 Unreacted explosives	1.028×10^5	-2.53	12.8	3.3	1×10^{-3}
爆轰产物 Detonation products	276.2	8.44	5.2	2.1	3×10^{-4}

三项式点火增长模型的反应速率见式(3),第一项为点火项,描述炸药冲击后压缩产生的热点形成与初始反应阶段,第二项为增长项,描述炸药中热点缓慢反应增长阶段;第三项为完成项,描述热点会合后炸药在高温高压下开始大范围快速反应阶段

$$\frac{dF}{dT} = \frac{I(1-F)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x}{0 < F < F_{ig \max}} + \frac{G_1(1-F)^c F^d p^y}{0 < F < F_{G1 \max}} + \frac{G_2(1-F)^e F^g p^z}{F_{G2 \min} < F < 1} \quad (3)$$

式中: F 是反应分数, $F=0$ 代表未反应, $F=1$

代表反应完全; ρ 和 ρ_0 代表当前密度和初始密度; I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 g 、 x 、 y 、 z 、 $F_{ig\max}$ 、 $F_{G_1\max}$ 和 $F_{G_2\min}$ 为控制炸药冲击起爆感度的常数。

马沛冉等研究点火增长模型各参量的调控机理得出当 $0 < p < 1$ 时^[20],冲击起爆所需压力为负相关关系,当 $p \geq 1$ 时,冲击起爆所需压力为正相关关系。炸药的感度特性决定点火项。参数点火速率常数 I 取高数值时炸药敏感,热点瞬间引发反应,低数值反应难以启动;点火阈值 a 取值高时炸药需要很强冲击才能起爆,炸药钝感,取值低时轻微压缩即可起爆;点火衰减指数 b 取值高时点火过程集中在初期,之后迅速减弱,取值低时点火过程持续时间更长;压缩度敏感指数 x 增加会加速点火。炸药的爆速与威力决定增长项和完成项。增长速率常数 G_1 取值高时燃烧增长快,易快速过渡到爆轰,低时燃烧传播慢,会导致熄爆;增长压力指数 y 取值高时增长过程依赖压力,高压下剧烈加速,低时增长过程对压力变化不敏感;增长未反应物指数 c 作用于增长项,与 b 类似;增长反应物指数取值高时加速能力强,低时加速能力弱,依赖外部压力。完成速率常数 G_2 取值高时反应以极高速度完成,形成稳定爆轰,低时最终反应完成慢;完成压力指数 z 取值高时完成过程对压力敏感;完成未反应物指数 e 取值高时末期反应速率随剩余反应物较少而快速下降;完成反应物指数

g 取值高时末期反应自我驱动能力强。炸药的物理状态决定反应进度。参数 $F_{ig\max}$ 、 $F_{G_1\max}$ 和 $F_{G_2\min}$ 定义三个阶段的范围。

2[#]岩石乳化炸药具有雷管感度且机械感度较低,对冲击波敏感,对机械撞击相对钝感,是高爆速,高威力的油包水型乳胶体炸药。依据炸药特性和 J B Ribeiro 等通过实验和遗传算法得出的乳化炸药点火增长参数范围确定^[13]。乳化炸药的模型参数如表 3 所示。

表 3 乳化炸药的模型参数			
Table 3 Model parameters of emulsion explosive			
参数	数值	参数	数值
Parameters	Numerical value	Parameters	Numerical value
a	0.002	d	0.03
b	0.673	G_2	27.957
x	12.291	e	0.534
G_1	116.502	g	0.63
y	2.026	z	3.918
c	0.407	I	8.2×10^5

(3)PVC 管材料模型

在 LS-DYNA 自定义材料模型库中,采用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 随动硬化弹塑性材料模型模拟 PVC 管,材料参数如表 4 所示。

表 4 PVC 管材料参数					
Table 4 Parameters of PVC Pipe Material					
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	PR	σ_y/GPa	E_t/GPa	FS
1400	3	0.45	0.05	0.03	0.25

表 4 中 ρ 为 PVC 管材密度, E 为杨氏模量, PR 为泊松比, σ_y 为屈服应力, E_t 为切线模量, FS 为失效应变。

(4)空气材料模型

空气介质采用 * MAT_NULL 材料本构模型和线性多项式状态方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 进行模拟,空气状态方程见式(4),材料参数见

表 5。
$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)$$
(4)

式中: $C_0 \sim C_6$ 为材料常数; E 为单位体积空气介质的初始内能。

表 5 空气材料及状态方程参数								
Table 5 Parameters of the air equation of state of explosives								
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E
1.20	0	0	0	0	0.4	0.4	0	25

1.3 数值模拟结果分析

为了研究成品乳化炸药的爆轰特性,选取不同直径炸药经传爆药传爆后 $A \sim F$ 测点的爆轰压力时

程曲线进行分析,如图 2 所示。在 14 ~ 20 mm 直径区间内,各装药表现出稳定爆轰特征。各测点的压力时程曲线高度基本一致:爆轰波阵面有序地到达

下游各测点,压力峰值出现时间按传播距离依次延迟,呈现清晰的波传播时序。峰值压力稳定维持在 4.4 ~ 5 GPa 区间且压力衰减速率基本一致,表明在此直径范围内,乳化炸药的爆轰化学反应区结构完整、反应充分,爆轰波以恒定爆速传播,能量释放速率高且均匀。20 mm 直径乳化炸药中, A 测点在 5.35 μs 率先达到峰值压力,后续 B ~ F 测点峰值依次延迟至 10.7 ~ 32.1 μs ,但峰值压力幅值无明显衰减,爆轰波在炸药内传播时阵面平整,无次级波峰,未出现因侧向稀疏波过早侵入而导致反应区中断或波阵面发生畸变、衰减的现象。18 mm、16 mm、14 mm 直径炸药的爆轰压力时程曲线特征与 20 mm 直径相似,仅测点间的峰值延迟时间随直径减小而缩短,进一步验证了该直径区间内乳化炸药的爆轰稳定性。

当药卷直径降至 12 mm 时,爆轰特性发生显著劣化:各测点随时间爆轰压力逐渐降低,压力峰值降至 4.2 GPa 以下, F 测点峰值不足 1 GPa,且压力衰减速率明显加快,各测点峰值的离散性显著增大。

表明 12 mm 直径药卷已低于乳化炸药的临界爆轰直径,爆轰波在传播中能量散失急剧增加,爆轰反应区温度无法维持自持条件,出现明显的能量衰减,波阵面稳定性下降,甚至存在熄爆风险。

根据峰值压力到达各测点的时间可计算出各测点的爆速,图 2(a) 中 A ~ F 点峰值到达时间加长,爆速分别为 3105.3 m/s、3065.4 m/s、2777.8 m/s、2232.1 m/s、2016.1 m/s、1596.6 m/s。各测点爆速衰减明显,爆轰波能量损耗持续加剧,无法稳定爆轰。14 ~ 20 mm 直径下,各测点爆速波动极小,分别稳定在 3620.8 m/s、4152.5 m/s、4483.7 m/s、4670.4 m/s,爆轰波传播状态稳定,爆速逐步提升。随着直径增大削弱侧向稀疏波对化学反应区的侵入深度与强度,减少了能量损耗,使炸药化学反应更充分。该现象符合爆轰理论中经典的爆速-直径关系当炸药直径大于临界直径时,爆速随直径增大而趋近理论 CJ 爆速。实验结果为非理想炸药临界尺度效应与反应区动力学研究提供了重要实证依据。

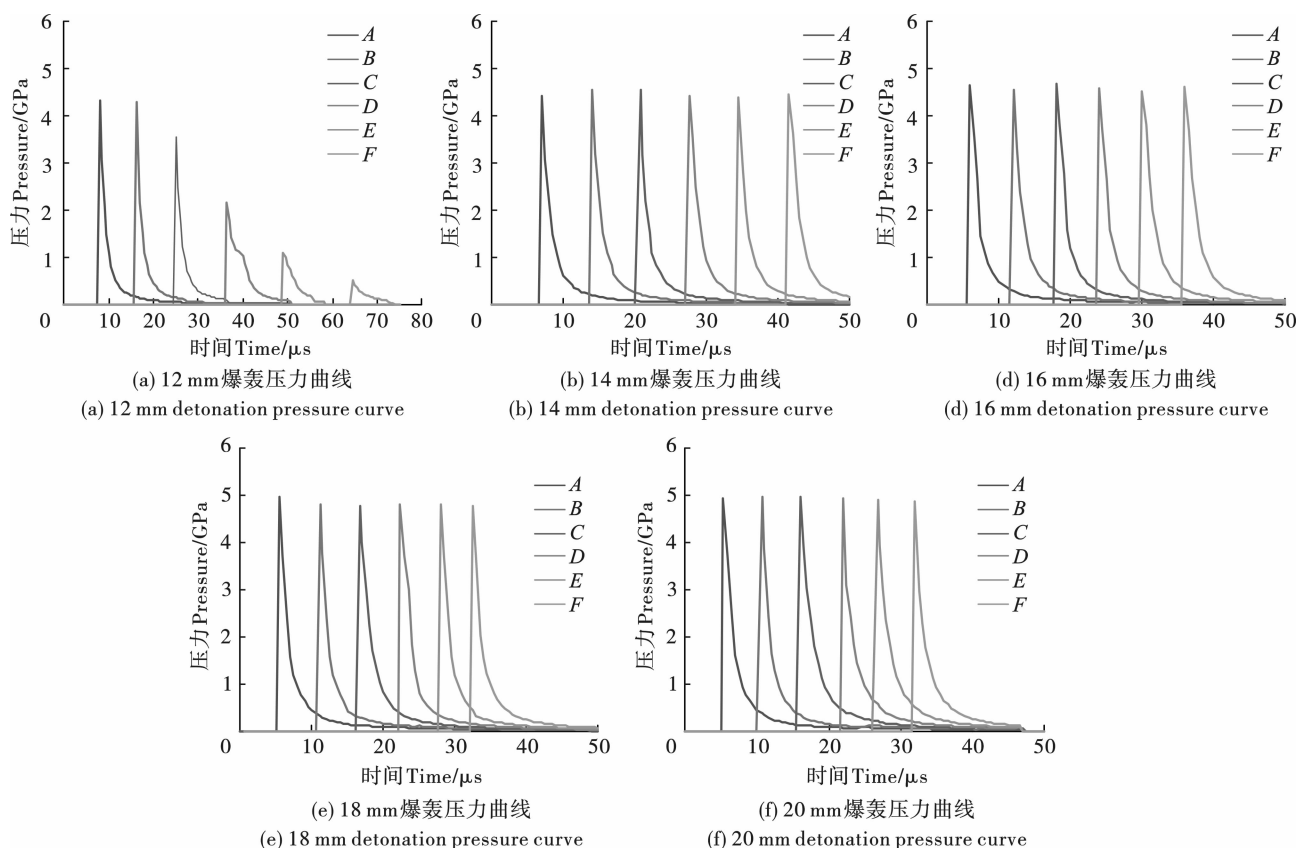


图 2 不同直径炸药爆轰压力时程曲线变化趋势

Fig. 2 The change trend of detonation pressure time history curve of explosives with different diameters

2 矿山现场测试试验

2.1 现场测试器材及流程

为合理判断乳化炸药的临界爆轰直径,在矿山

现场测试不同直径乳化炸药的爆速。使用的器材主要包括:同一批次规格工艺完全相同的乳化炸药、8 号数码电子雷管、BSS-1 型智能十段爆速仪、1.5 m 长同一厂商生产的内径为 12 mm、14 mm、16 mm、

18 mm、20 mm 的 PVC 管,厚度均为 2 mm 等。

试验场地选址于矿山内地形开阔、无浮石掉落风险、远离构筑物及人员活动区域的台阶,区域地质条件稳定,无明显坡度起伏,可保障试验过程中的人员安全与设备稳定。场地清理完毕后,按 PVC 管内径大小将试验分为 5 组,分别编号为 1 组(12 mm)、2 组(14 mm)、3 组(16 mm)、4 组(18 mm)、5 组(20 mm),每组进行 3 次试验,以降低随机误差对测试结果的影响。试验前,对每组 PVC 管进行内壁清洁处理,去除杂质与油污,避免影响炸药装填密度的均匀性。为精准捕捉爆轰波阵面的传播时间,每组 PVC 管沿轴线方向设置 1、2、3、4 号测点的探针,如图 3 所示。各测点探针均采用高频响应电离探针,探针插入深度为 PVC 管内径的

1/2,确保针尖与炸药轴线重合,避免因探针位置偏差导致信号失效。由于雷管起爆瞬间会释放高速冲击波,在近距离内,该冲击波会直接压缩炸药,而非通过炸药自身化学反应形成的爆轰波驱动传播。此时探针检测到的信号并非爆轰波阵面的到达时间,而是雷管冲击波的到达时间。为避免探针与雷管距离过近导致测得的爆速失真,每组试验的 1 号测点布置在距离雷管插入处管口 20 cm 处。该距离可确保爆轰波在到达 1 号测点前充分形成并稳定传播,有效排除雷管冲击波的近区干扰。2、3、4 号测点按等间距 40 cm 布置,相邻测点间距通过游标卡尺精确测量,测量误差 ≤ 0.02 mm,确保爆速计算中距离参数的准确性。

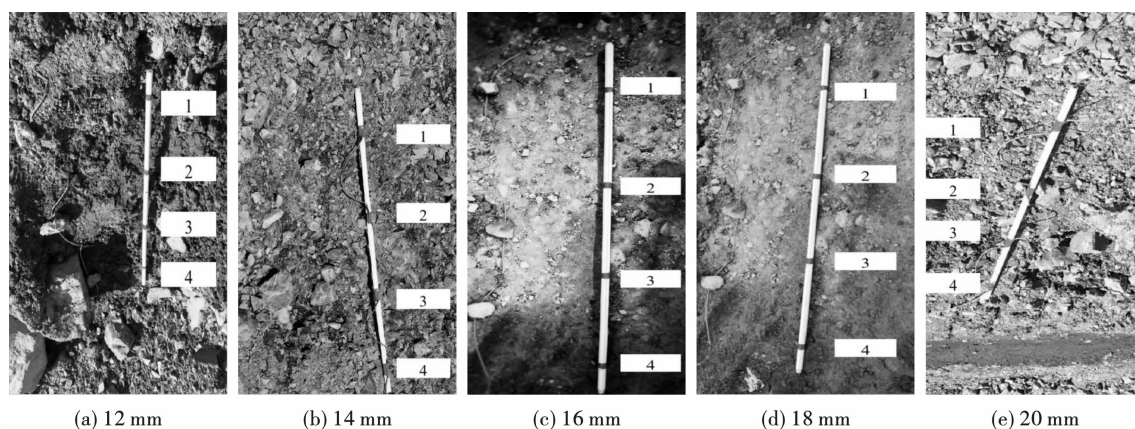


图3 五种不同直径乳化炸药的现场试验

Fig. 3 Field test of five kinds of emulsion explosives with different diameters

试验前,按“电离探针→信号传输线→BSS-1 型智能十段爆速仪→便携式电源”的顺序完成系统连接,设置采样频率为 1 MHz、触发方式为外部同步触发。同时,对起爆系统进行导通性检查,确保雷管引线连接牢固、无短路现象。所有设备调试完毕后,所有试验人员撤离至安全距离,设置警戒区并安排专人值守,避免无关人员进入试验区域。起爆后,爆速仪自动记录爆轰波到达各测点的时间数据,试验完成后,及时回收设备并检查 PVC 管爆轰完整性。对不同直径 PVC 管约束下各测点乳化炸药爆速数据进行统计分析,各测点爆速见表 6。

2.2 试验结果分析

根据表 6 中不同直径乳化炸药爆速数据分析,在第 2~5 组试验中,同一直径乳化炸药的各测点爆速近似一致,爆速差不大于 150 m/s。从爆速变化规律来看,随着炸药直径的增大,乳化炸药爆速呈现递增趋势:14 mm 组平均爆速为 3527.22 m/s,但一组数据异常,推测乳化炸药装入管内时未均匀压入

导致装药密度变化进而影响炸药爆速。16 mm 组提升至 4085.63 m/s,18 mm 组达 4399.33 m/s,20 mm 组进一步增至 4601.67 m/s。装药直径增大使得爆轰波阵面的反应区厚度与装药直径的匹配度提升,爆轰过程中能量损耗减少,炸药化学反应更充分,爆轰波传播稳定性增强。2~5 组的爆轰试验过程中速度稳定,达到了稳定爆轰。试验选用乳化炸药为 2[#]岩石乳化炸药,该炸药的爆速标准值为 5100 m/s,说明该四组试验均未达到理想爆轰,但是能够达到稳定爆轰,由此得出 2~5 组的装药直径均大于该乳化炸药在 PVC 管约束下的临界爆轰直径。由表 7 可知,14~20 mm 直径下模拟与试验爆速相对误差均小于 3%,验证了数值模型的可靠性。

第 1 组试验中 1~4 号测点爆速分别为 3512 m/s、3150 m/s、2680 m/s,差值达 400 m/s,超出稳定爆轰的允许误差范围,即为不稳定爆轰。其余两组 12 mm 直径炸药爆炸时未全部爆炸,药卷残留长度大于 10 mm,如图 4 所示,产生了拒爆现象。

表 6 各组爆轰情况及测点爆速

Table 6 Detonation of each group and detonation velocity of measuring points

编号 Number	1~2 点爆速 Detonation velocity of 1~2 points/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2~3 点爆速 Detonation velocity of 2~3 points/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3~4 点爆速 Detonation velocity of 3~4 points/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均爆速 Average detonation velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆轰情况 Detonation status
1	3512	3150	2680	2950.33	不稳定爆轰 Unstable detonation
1	3180	2650	*		
1	2530	*	*		
2	3465	3603	3557	3527.22	稳定爆轰 Stable detonation
2	3490	3580	3530		
2	3440	3560	3520		
3	4137	4140	3956	4085.63	稳定爆轰 Stable detonation
3	4110	4120	3580(异常)		
3	4155	4130	3937		
4	4420	4359	4435	4399.33	稳定爆轰 Stable detonation
4	4400	4366	4385		
4	4438	4370	4421		
5	4551	4588	4665	4601.67	稳定爆轰 Stable detonation
5	4563	4595	4657		
5	4548	4577	4671		

注: * 表示无此项

表 7 数值模拟与现场试验爆速

Table 7 Numerical simulation and field test detonation velocity

装药直径 Charge diameter/mm	模拟爆速 Simulating detonation velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	试验平均爆速 Average detonation velocity of test/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	差值 Differentials/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 Relative error/%
14	3620.8	3527.22	93.58	2.65
16	4152.5	4085.63	66.87	1.64
18	4483.7	4399.33	84.87	1.92
20	4670.4	4601.67	68.73	1.49

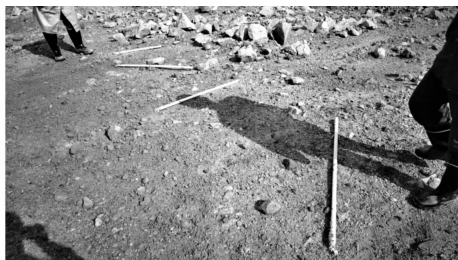


图 4 12 mm 直径爆炸残余药卷

Fig. 4 12 mm diameter explosive residual cartridge

爆轰波传播过程中,爆轰波阵面的能量损耗大于炸药化学反应释放的能量,导致爆轰波强度持续

衰减,最终无法维持稳定传播,出现爆轰提前中止或拒爆现象,由此可明确,12 mm 直径的装药无法满足该乳化炸药稳定爆轰的最小直径要求,即其临界爆轰直径大于 12 mm。结合全部试验结果,2[#]岩石乳化炸药在 PVC 管约束下,其临界爆轰直径处于 12~14 mm 区间。这一结论为矿山现场爆破作业的炸药直径选型提供了关键依据:实际应用中应选择不小于 14 mm 的直径,以确保炸药稳定爆轰,充分释放能量;若直径需小于 14 mm,则需通过优化起爆能量、增强约束条件等方式,保障爆轰稳定性。

基于上述试验研究,针对矿山用成品乳化炸药,合理的在临界直径在 12~14 mm 之间。

3 结论

本研究通过数值模拟与现场试验相结合的方法,确定了矿山用成品乳化炸药的临界爆轰直径范围。通过 LS-DYNA 建立 5 种不同直径炸药爆轰的数值计算模型,分析不同直径炸药的爆轰波传播特性,结合现场试验结果得出以下结论:

(1)压力时程曲线表明,直径 ≥ 14 mm 时,显示出典型的稳定传播特征:各监测点压力峰值依次延迟、幅值稳定在 4.4~5 GPa,且波形衰减规律一致,证实爆轰化学反应区结构完整,侧向稀疏波干扰可控。当直径减小至 12 mm 时,压力峰值沿传播方向急剧衰减,波形紊乱,由于直径过小导致反应区能量释放无法补偿侧向能量耗散,进而引发爆轰熄爆的物理过程。

(2)直径 14 mm 及以上各组,其各段爆速差值在 150 m/s 左右,平均爆速随直径增大而递增,符合稳定爆轰的判定标准。12 mm 直径装药表现出典型的不稳定爆轰特征:各测点间爆速衰减显著,且多次重复试验均出现 PVC 管内炸药未完全爆轰的拒爆现象,并留有明显残药。12 mm 已低于该炸药在给定约束下维持稳定传播的最小直径。试验结果与模拟预测基本吻合,其临界直径在 12~14 mm 的区间内。

(3)约束条件对乳化炸药临界直径影响显著。无约束条件下,炸药爆轰波侧向能量损耗剧烈^[2],临界直径仅 7~10 cm;而 2 mm 厚 PVC 管约束时,管壁可有效抑制侧向能量散失,减少爆轰波衰减,使临界直径增至 12~14 mm。约束强度与临界直径呈正相关,适当增强约束能降低爆轰波能量损耗,提升爆轰稳定性,进而扩大临界直径范围。

参考文献 (References)

- [1] 张志忠,刘玉山,张雪峰,等. 复合顶板均散保压预裂爆破技术研究与应用[J]. 爆破,2025,42(3):86-94,144.
- [1] ZHANG Zhi-zhong, LIU Yu-shan, ZHANG Xue-feng, et al. Research and application of pre-splitting blasting technology for composite roof with dispersed pressure[J]. Blasting, 2025, 42(3):86-94, 144. (in Chinese)
- [2] 杨兴祥,张浩,孔维森,等. 破碎岩体条件下露天铅锌矿预裂爆破对边坡稳定性影响研究[J]. 云南冶金, 2025, 54(6):39-43.
- [2] YANG Xing-xiang, ZHANG Hao, KONG Wei-sen, et al. Study on the influence of pre-splitting blasting on slope stability in open-pit lead-zinc mine under the condition of broken rock mass[J]. Yunnan Metallurgy, 2025, 54(6):39-43. (in Chinese)
- [3] 向华仙,苗涛,郭骏飞,等. 多条软弱夹层角度对边坡预裂爆破效果影响研究[J]. 爆破,2025,42(4):51-61.
- [3] XIANG Hua-xian, MIAO Tao, GUO Jun-fei, et al. Study on the influence of multiple weak interlayer angles on slope pre-splitting blasting effect[J]. Blasting, 2025, 42(4):51-61. (in Chinese)
- [4] 冯志红,刘玉存. RDX 炸药对传爆药临界直径的数值模拟[J]. 火工品,2007(1):21-23.
- [4] FENG Zhi-hong, LIU Yu-cun. Numerical simulation of the critical diameter of RDX explosive versus booster explosive[J]. Initiators, 2007(1):21-23. (in Chinese)
- [5] 胡建华,高宏伟,张立. 乳化炸药的临界爆轰直径的实验研究[C]//中国力学学会工程爆破专业委员会第八次换届工作会议暨学术交流会议论文集. 中国力学学会工程爆破专业委员会,中国力学学会,2015:6.
- [5] HU Jian-hua, GAO Hong-wei, ZHANG Li. Experimental study on critical detonation diameter of emulsion explosives[C]//Proceedings of the Eighth General Meeting and Academic Exchange Meeting of the Engineering Blasting Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics. Engineering Blasting Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, Chinese Society of Mechanics, 2015:6 (in Chinese)
- [6] 何超,刘彦,白帆,等. CL-20 基压装炸药爆轰直径效应[J/OL]. 兵工学报,20240219. 1307.002. [2026-03-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240219.1307.002>.
- [6] HE Chao, LIU Yan, BAI Fan, et al. Detonation diameter effect of CL-20-based pressed explosive[J/OL]. Army Journal, 20240219. 1307.002. [2026-03-06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240219.1307.002>. (in Chinese)
- [7] 赵海霞,胡双启,张少明,等. 装药直径和约束条件对小直径装药爆速影响研究[J] 弹箭与制导学报,2010,30(1):95-100.
- [7] ZHAO Hai-xia, HU Shuang-qi, ZHANG Shao-ming, et al. Study on the influence of charge diameter and constraint conditions on the detonation velocity of small diameter charge[J]. Journal of Missiles, Rockets and Guidance, 2010, 30(1):95-100 (in Chinese)
- [8] 刘攀,毕晓露,朱英中,等. 新型熔铸载体 DNP 炸药的临界直径研究[J]. 爆破器材,2025,54(4):28-32.
- [8] LIU Pan, BI Xiao-lu, ZHU Ying-zhong, et al. Study on the critical diameter of new melt-cast carrier DNP explosive[J]. Blasting Equipment, 2025, 54(4):28-32. (in Chinese)
- [9] 皮铮迪,陈朗,刘丹阳,等. CL-20 基混合炸药的冲击起爆特征[J]. 爆炸与冲击,2017,37(6):915-923.
- [9] PI Zheng-di, CHEN Lang, LIU Dan-yang, et al. Impact

- initiation characteristics of CL-20-based mixed explosives [J]. *Explosion and Shock*, 2017, 37 (6): 915-923. (in Chinese)
- [10] A C H, D B L, J N W, et al. Understanding the shock and detonation response of high explosives at the continuum and meso scales [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(1): 011303-011303.
- [11] 段卓平, 白志玲, 黄风雷. 非均质固体炸药冲击起爆与爆轰研究进展[J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 237-253.
- [11] DUAN Zhuo-ping, BAI Zhi-ling, HUANG Feng-lei. Advances in research on shock initiation and detonation of heterogeneous solid explosives[J]. *Acta Propellanta Sinica*, 2020, 43(3): 237-253. (in Chinese)
- [12] 段 继, 李 劲, 智小坤, 等. Lee-Tarver 反应速率模型的优化开发与应用[J/OL]. *高压物理学报*: 1-17. [2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240219.1307.002>.
- [12] DUAN Ji, LI Jin, ZHI Xiao-kun, et al. The optimal development and application of Lee-Tarver reaction rate model[J/OL]. *Acta Physica Sinica*: 1-17. [2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240219.1307.002>. (in Chinese)
- [13] 何 超, 刘 彦, 白 帆, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷基压装炸药爆轰直径效应[J]. *兵工学报*, 2024, 45(12): 4283-4294.
- [13] HE Chao, LIU Yan, BAI Fan, et al. Detonation diameter effect of hexanitrohexaazaisowurtzitan pressed explosive [J]. *Army Journal*, 2024, 45(12): 4283-4294. (in Chinese)
- [14] 李 劲. 改进型点火增长模型的二次开发与应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [14] LI Jin. Secondary development and application of improved ignition growth model [D]. Taiyuan: North University of China, 2024. (in Chinese)
- [15] 许 伟, 段 继. 战斗部装药在破片撞击下的冲击起爆特性研究[J]. *火工品*, 2026(1): 21-28.
- [15] XU Wei, DUAN Ji. Study on shock initiation characteristics of warhead charge under fragment impact [J]. *Explosive Device*, 2026(1): 21-28. (in Chinese)
- [16] Hallquist J O. LS-DYNA user's manual: nonlinear dynamic analysis of structures in three dimensions [M]. California: University of California, 2001: 823-826.
- [17] 辛春亮, 薛再清, 涂 建, 等. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [18] 苗飞超, 周 霖, 张向荣, 等. 点火增长反应速率方程在 LS-DYNA 软件中嵌入及应用 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 1411-1417.
- [18] MIAO Fei-chao, ZHOU Lin, ZHANG Xiang-rong, et al. Ignition growth reaction rate equation is embedded and applied in LS-DYNA software [J]. *Army Journal*, 2019, 40(7): 1411-1417. (in Chinese)
- [19] Ribeiro B J, Silva C, Mendes R. Estimation of the reactive flow model parameters for an ammonium nitrate-based emulsion explosive using genetic algorithms [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2010, 28(S1): 180-204.
- [20] 马沛冉, 蔡宣明, 侯 阳, 等. 三项式点火增长模型及各参量调控机理研究 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(3): 317-325.
- [20] MA Pei-ran, CAI Xuan-ming, HOU Yang, et al. Trinomial ignition growth model and control mechanism of each parameter [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2024, 45(3): 317-325. (in Chinese)

(上接第 219 页)

- [12] 苗晓鹏, 陈 慧, 焦国芮, 等. 平行双自由面爆破岩墙自稳临界宽度研究 [J]. *工程爆破*, 2022, 28(6): 51-57.
- [12] MIAO Xiao-peng, CHEN Hui, JIAO Guo-rui, et al. Research on critical width of blasting with parallel double free surfaces [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 51-57. (in Chinese)
- [13] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns in the blasting demolition of buildings [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110417.
- [14] SHARAFAT A, TANOLI W A, RAPTIS G, et al. Controlled blasting in underground construction: A case study of a tunnel plug demolition in the Neelum Jhelum hydroelectric project [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 93: 103098.
- [15] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, SUN Jin-shan, et al. Monitoring and analysis of the collapse process in blasting demolition of tall reinforced concrete chimneys [J]. *Sensors*, 2023, 23: 6240.
- [16] 潘洪武. 城市危旧房治理难点与改造对策 [J]. *住宅与房地产*, 2017(29): 218.
- [16] PAN Hong-wu. Difficulties and reconstruction countermeasures in the governance of urban dangerous and old houses [J]. *Housing and Real Estate*, 2017(29): 218. (in Chinese)
- [17] 周文斌, 承财政, 杨 帆, 等. 数码电子雷管在露天矿爆破中延期时间优化探讨 [J]. *爆破*, 2024, 41(1): 172-177.
- [17] ZHOU Wen-bin, CHENG Cai-zheng, YANG Fan, et al. Discussion on delay time optimization of electronic detonator in open-pit blasting [J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 172-177. (in Chinese)