

金属射流冲击传爆用聚能罩结构和稳定传爆距离仿真计算研究

王馨悦¹, 王晨龙^{1,3}, 李志强^{1,2,3,4}

(1. 太原理工大学航空航天学院, 山西 太原 030024

2. 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 山西省力学基础学科研究中心, 山西 太原, 030024

4. 力学国家级实验教学示范中心, 山西 太原, 030024)

摘要: 切顶卸压沿空留巷技术在煤矿开采中广泛应用, 但其预裂爆破采用的多分段空气间隔装药结构, 需为每段药柱配备单独雷管起爆, 存在单孔雷管用量大、成本高、操作复杂及安全风险突出等问题。为解决这一工程瓶颈, 提出将金属聚能射流冲击传爆技术应用于复合顶板预裂爆破, 通过 LS-DYNA 数值模拟方法, 系统开展药型罩结构优化、金属射流冲击传爆影响因素以及稳定传爆距离研究。研究表明: 铝制药型罩综合性能最优, 当锥角为 60°、壁厚为 1mm 时, 可形成速度高、长度长且连续性良好的聚能射流; 铜制药型罩因强度高、压垮能量阈值大, 低威力装药条件下难以形成有效射流; 铅制药型罩虽易驱动, 但射流稳定性差、易断裂; 当装药长径比大于 3 时, 有效装药量达到饱和, 新增装药能量多通过径向膨胀与热耗散损失, 射流最高速度与稳定速度均趋于稳定; 空气自由场中壁厚为 1mm, 锥角为 60° 的铝制药型罩射流冲击传爆的可靠距离上限为 90cm, 超过此距离射流拉伸衰减导致压力不足, 无法起爆乳化炸药; 钢管等密闭约束可显著抑制爆轰产物径向膨胀, 提升能量利用率, 进而延长性罩金属射流冲击传爆距离。

关键词: 金属射流; 冲击传爆; 药型罩结构; 分段装药; 稳定传爆

中图分类号: O358

文献标识码: A

引言

切顶卸压沿空留巷技术是煤矿开采中针对复合顶板煤系地层设计的一种新型开采工艺, 相较于传统的“一面双巷”开采, 该技术通过定向爆破卸压降低顶板大面积垮落的风险, 同时降低煤柱损失, 提高资源回收率^[1-3]。然而, 留巷复合顶板的预裂爆破一般为不耦合分段间隔装药, 每段药柱依靠一枚数码电子雷管起爆, 如图 1 所示, 单孔雷管数目偏多, 导致留巷工程雷管消耗量大, 且数码电子雷管成本高昂, 管控严格, 审批手续复杂, 火工品供应时常延误, 会严重制约留巷工程的施工进度; 此外, 现场操作中雷管引线过多易导致导线搭接错误或在封堵填塞炮泥时被炮棍破坏, 进而引发拒爆, 带来显著安全隐患^[4-6]。因此, 在复合顶板条件下, 如何优化爆破技术、提高爆炸能量利用效率, 同时规避雷管使用过程中的技术与管理难题, 是当前切顶卸压沿空留巷技术研究亟待突破的关键问题。



(a) 留巷切顶多雷管装药 (b) 单孔雷管数目过多
(a) Multi-detonator charging for retained roadway roof cutting (b) Excessive detonators per borehole

图 1 留巷复合顶板预裂爆破单孔多发雷管现场

Fig. 1 On-site Application of Single-Hole Multiple Detonators in Presplitting Blasting for Composite Roof Strata of Retained Roadway

在应对上述雷管使用瓶颈方面，将金属聚能射流冲击起爆技术应用于间隔装药的稳定传爆过程，显示出一定的潜力。聚能射流冲击起爆基于聚能效应形成高速金属射流，通过射流撞击产生高强度冲击波和局部高温，从而引爆炸药^[7-8]，其技术原理已在军事和部分民用爆破领域得到应用^[9-12]。刘忠磊^[13]等对炸药殉爆距离在隧道光面爆破环境中添加聚能装置进行研究，表明聚能装置可以增加乳化炸药在无缝钢管中的殉爆距离；李启月^[14]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，结果表明约束条件越好，殉爆距离越大；陈思敏^[15]等研究了射流对运动带壳装药冲击起爆的机理，表明壳体的约束会导致炸药的临界起爆阈值降低，聚能射流高速冲击下底部约束对炸药受射流冲击的起爆过程影响明显，侧向约束的影响作用很小。此外，聚能射流的成型受药型罩结构和炸药装药条件等因素影响^[16-17]，Wang^[18]等人通过实验和数值模拟方法研究了药型罩材料对射流形成及其侵彻能力的影响，结果表明铜射流侵彻能力最强且速度高于钢射流但低于铝射流；Saran^[19]等采用闪光 X 射线摄影技术针对不同厚度，不同构型以及不同合金成分的铝制药型罩对射流特性进行了定量分析，结果表明药型罩材料和结构均会影响射流成型；黄正祥^[20]和宁建国团队^[21]分别研究了锥角、壁厚对压垮行为和侵彻性能的规律，指出需综合考虑多参数匹配以优化射流性能；李伟兵^[22]等对不同装药长径比下聚能杆式侵彻体的成型情况进行研究，结果表明当长径比超过一定值时，继续增加长径比对射流速度的影响很小。然而，现有研究多集中于 TNT、RDX 等高能猛炸药，针对煤矿许用乳化炸药的相关系统性研究仍较为缺乏。特别是在小口径低威力装药条件下，关于药型罩结构优化与装药尺寸设计的研究尚显不足。此外，在切顶卸压沿空留巷复合顶板预裂爆破这一特定场景中，如何将金属聚能射流冲击起爆技术应用于间隔装药的稳定传爆，其可行性与有效性仍有待系统深入的研究验证。

针对上述问题，本文将金属聚能射流技术引入切顶卸压沿空留巷预裂爆破切顶工艺。通过 LS-DYNA 仿真软件系统开展以下研究，首先，基于煤矿许用乳化炸药特性，研究适用于小口径低威力装药条件的药型罩结构与装药尺寸，通过改变药型罩锥角、壁厚和材料等参数，分析其对射流形态、速度分布及稳定性的影响规律；建立不同长径比装药数值模型，揭示爆轰波传播、能量耦合与射流成型演化间的内在机制，以提升射流速度、能量及方向性。其次，通过建立多种环境工况下的传爆试验，测定不同约束条件对乳化炸药传爆距离的影响。

1 模型构建与方案设计

1.1 药型罩结构与装药结构数值模型构建

为系统研究小口径装药条件下煤矿许用乳化炸药聚能射流的成型特性，本文基于 LS-DYNA 平台建立了一系列数值模型。本文研究的模型具有轴对称特性，因此建立了二维轴对称模型进行仿真。其中，乳化炸药尺寸为 $\varnothing 32 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。药型罩的关键结构参数，包括壁厚 D 、锥角 γ 及材料，被选为研究变量，并依据表 1 所列因素水平开展正交试验设计，共计 27 组工况，以系统分析药型罩结构对射流形态与速度的影响规律。炸药及药型罩的材料参数分别列于表 2 与表 3^[23]。

模型构建中，网格精度是确保结果准确性的关键。为此，本文首先进行了网格敏感性

分析。本文以 1 mm 壁厚药型罩为研究对象，对比了不同网格尺寸下的射流速度曲线及射流形态，如图 2、图 3 所示。可以得到，当网格尺寸细化至 0.4 mm 与 0.5 mm 时，射流头部速度曲线的相对偏差较小，且射流形态基本一致，说明该尺寸区间网格收敛。因此，在药型罩及炸药核心区域采用 0.5 mm 的精细网格，外围区域则过渡至 1 mm 的较疏网格。

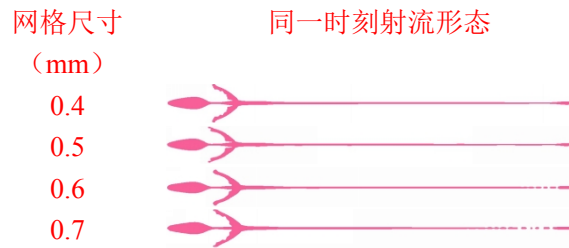


图 2 不同网格尺寸下同一时刻的射流形态图

Fig. 2 Jet Morphology at the Same Moment under Different Grid Sizes

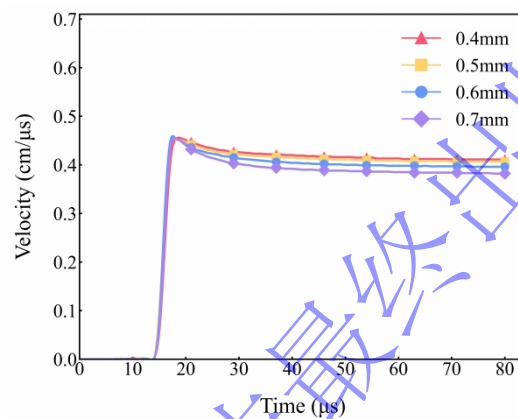


图 3 不同网格尺寸下射流头部速度曲线图

Fig. 3 Jet Tip Velocity Curves under Different Grid Sizes

表 1 正交实验的各因素水平

Table 1 The levels of each factor in the orthogonal experiment

Level	Factor		
	D/mm	$\gamma/^\circ$	Material
1	1	60	Aluminum
2	2	90	Copper
3	3	120	Lead

表 2 乳化炸药材料模型和 JWL 状态方程参数

Table 2 Emulsion explosive parameters and JWL state equation parameters

$\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_{CJ}(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	$P_{CJ}(10^2\text{GPa})$	$A(10^2\text{GPa})$	$B(\text{GPa})$	R_1	R_2	ω	$E_0(10^2\text{GPa})$
1.1	0.45	9.7	2.14	0.182	4.2	0.9	0.15	0.04192

表 3 金属药型罩材料模型和状态方程参数

Table 3 Material model and equation of state parameters for metal shaped charge liner

Material	$\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_\theta(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	S	Γ	n	c	m
Aluminum	2.71	0.535	1.34	1.97	0.28	0.02	1.34
Copper	8.93	0.394	1.49	2.02	0.31	0.025	1.09
Lead	11.2	0.198	1.58	2.77	1	0.1	1

此外，针对煤矿常用乳化炸药规格 ($\varnothing 32 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$)，本文进一步研究了装药结

构的影响。定义装药长径比 $\lambda = H/D$ ，以半卷炸药对应的长径比 $\lambda=3.125$ 为基准，固定装药直径为 32 mm，通过调整装药高度实现长径比在 1~6 范围内的变化，从而探究装药结构对射流成型速度及稳定性的影响机制。

1.2 空气自由场中稳定传爆距离仿真方案

为确定聚能射流在空气自由场中的稳定传爆距离，本节选用经结构优化后的铝制药型罩（壁厚 1 mm，锥角 60°）作为研究对象。被发乳化炸药的起爆行为采用三项式点火增长模型（Lee-Tarver 模型）进行描述，其表达式见式（1），相关参数见表 4^[24]。当炸高低于 50 cm 时，射流具有较高速度、良好连续性及头部压力，易于引爆炸药；但随着炸高增加，射流将出现断裂、速度衰减等现象，导致其侵彻与起爆能力显著下降。因此，为确定可靠传爆的临界距离，本研究重点针对 50 cm 至 90 cm 范围内的炸高开展数值模拟，系统分析该区间内传爆能力的演变规律。

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a\right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d P^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g P^z \quad (1)$$

表 4 乳化炸药的点火增长模型参数

Table 4 Reaction rate constant of emulsion explosives

Lee-Traver model					
I	40.0	G1	41.7	G2	200
b	0.667	c	0.667	e	0.667
a	0.09	d	0.333	f	1.00
x	7.00	y	1.12	z	2.00

1.3 不同环境约束对传爆距离的影响

在实际爆破工程中，装药常处于多种约束条件下，为探究密闭环境对殉爆距离的影响，本研究建立了多种约束工况下的冲击起爆模型。具体包括聚氯乙烯（PVC）聚能管约束工况，其材料参数见表 5^[23]，用于模拟实际应用中装药的固定条件；岩石约束工况，模拟聚能管置于炮孔内所受围岩侧向约束，岩石材料参数见表 6^[23]；以及双侧及三侧刚体约束工况，用于模拟高强度密闭环境。各约束条件的模型示意图如图 4 所示，所有工况炸高统一设置为 90 cm。通过对比分析不同约束条件下射流的形态、速度分布及起爆结果，系统评估密闭空间对传爆过程的增强机制与影响规律。

表 5 聚能管聚氯乙烯模型参数

Table 5 Parameters of PVC energy gathering tube

$\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E(\text{MPa})$	PR	$\sigma_y(\text{MPa})$	$ETAN(\text{MPa})$	FAL	$LCSS$
0.83	3057.78	0.45	6.895	344.75	0.25	3451

表 6 岩石本构模型参数

Table 6 Parameters of rock constitutive model

$\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E(\text{GPa})$	A	B	C	M	N	D_1	D_2
3.47	32	0.7	0.23	0.005	0.61	0.61	0.005	0.7

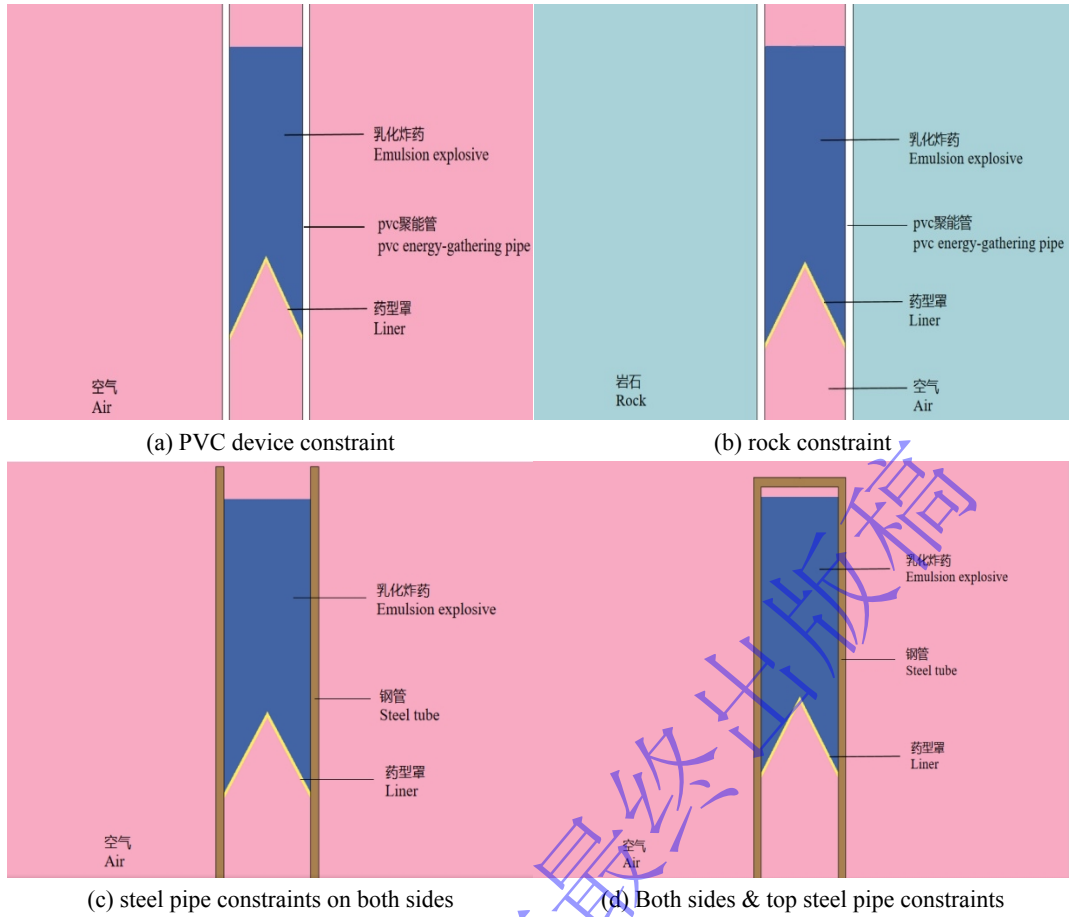


图 4 不同约束环境下模型示意图

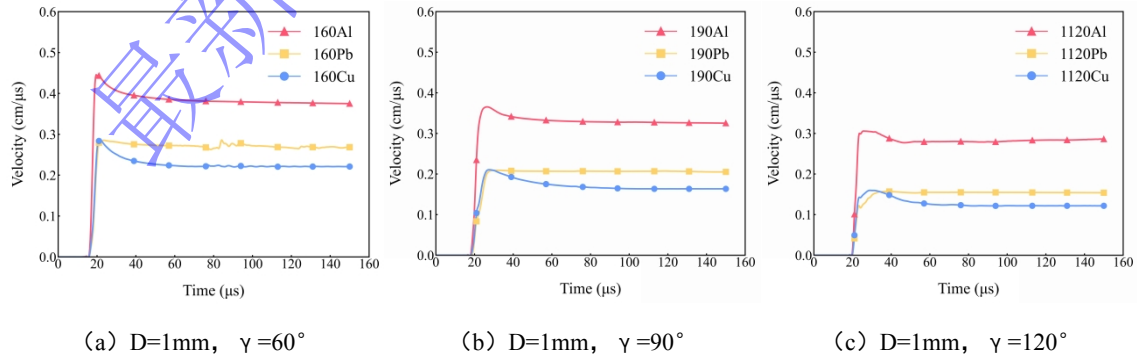
Fig. 4 Schematic diagram of the model under different constraint environments

2 结果与分析

2.1 金属射流成型稳定性影响因素分析

2.1.1 药型罩结构对射流成型稳定性的影响

基于上文正交试验设计的 27 组药型罩结构，通过数值模拟获取了各工况下射流头部速度随时间的变化曲线，结果如图 5 所示，其中，命名为 160a1 的曲线对应壁厚 1mm、锥角 60° 的铝药型罩，其余曲线命名规则依此类推。



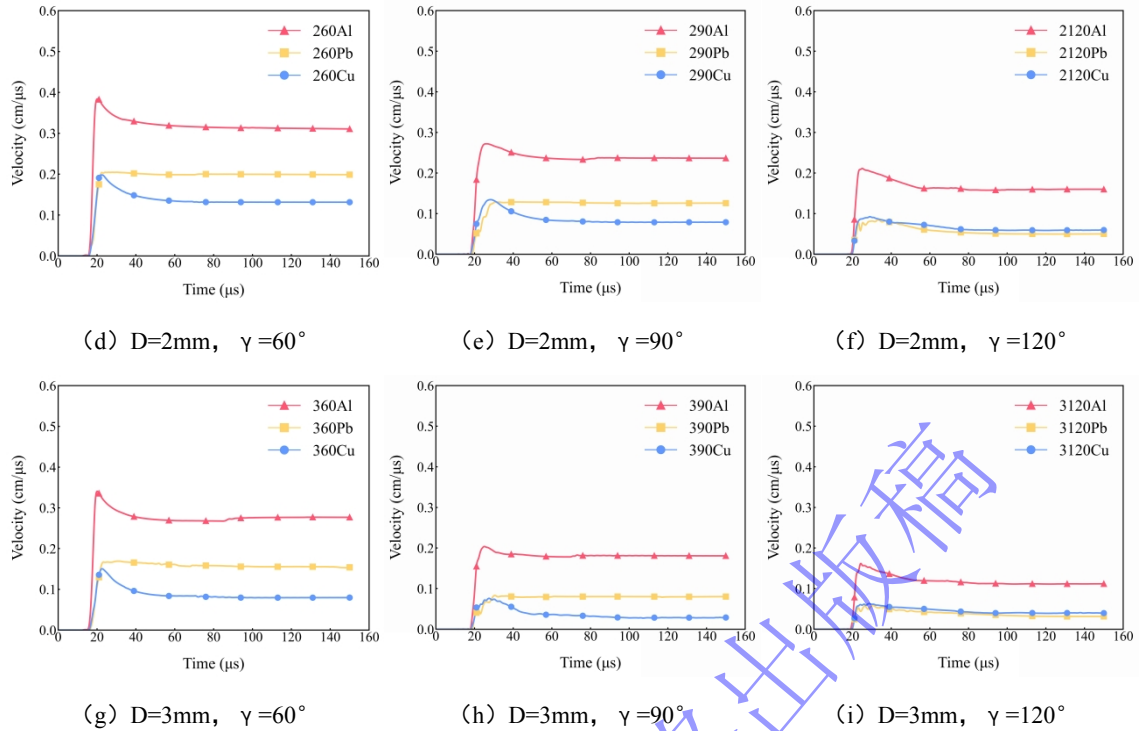


图 5 三种药型罩材料在不同壁厚和锥角下射流头部速度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of jet head velocity vs. time for three types of drug-mask materials under different wall thicknesses and cone angles

由图 5 可知，在材料与壁厚相同时，射流速度随锥角增大而增加；在材料与锥角相同时，射流速度随壁厚增加而增加。在材料影响方面，除图(b)和图(c)中 120° 工况外，铝药型罩形成的射流速度普遍高于铅药型罩，铅药型罩又高于铜药型罩。综上，该装药结构下，材料、锥角和壁厚三因素均对射流形成具有显著影响。此外，图 6 展示了 $150\mu\text{s}$ 时刻不同药型罩结构的射流形态，纵坐标为该时刻射流长度，横坐标为不同药型罩结构，可结合射流形态做进一步分析。

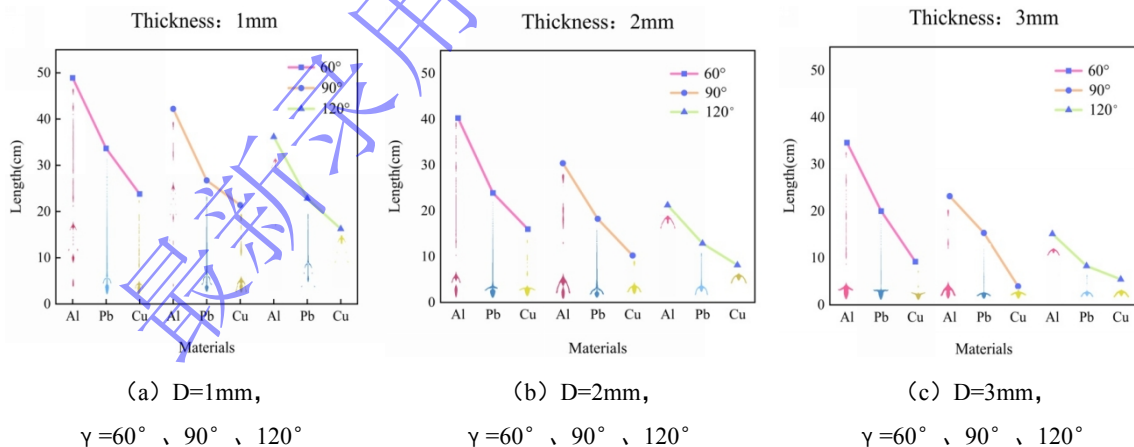


图 6 不同结构下射流在同一时刻的长度和形态

Fig. 6 Length and morphology of the jet at the same time instant under different working conditions.

由图 6 可知，在药型罩材料方面，铝的综合性能优于铜和铅。铜罩在壁厚为 1mm 、锥角 60° 和 90° 时可形成射流，但杆体连接处易断裂； 120° 时则形成低速爆炸成型弹丸。壁厚增至 2mm 和 3mm 后，铜罩在所有锥角下均未形成有效射流，仅产生“蘑菇状杆体”。其原因在于低威力小口径装药爆轰能量有限，而铜强度高、压垮能量阈值大，导致压垮速

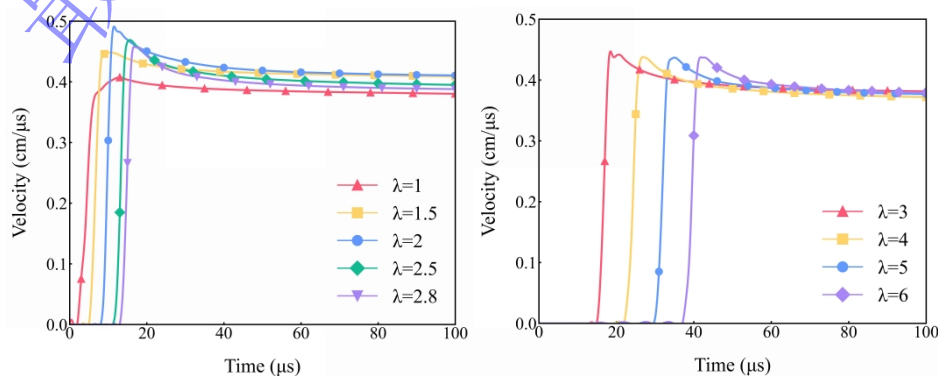
度低且不充分。根据 PER 理论^[25]，药型罩在爆轰波作用下的压垮过程可简化为微元在法向与切向速度分量作用下的汇聚行为。锥角越大，微元法向速度分量越小，导致压垮过程迟缓。铜材料由于强度高、压垮能量阈值大，在低威力装药条件下难以获得充分压垮速度。尤其当锥角增大至 120°、壁厚增至 2 mm 时，法向速度分量进一步降低，压垮过程中断，形成“蘑菇状杵体”而非连续射流。铅罩除壁厚 3mm、锥角 120° 外均能形成射流，因其强度低、易于驱动，但铅射流速度随壁厚或锥角增大而显著下降。厚壁条件下射流质量远低于杵体，材料利用率低，且头部易断裂。薄壁时延展性有助于初始成形，但拉伸过程中应力集中和塑性发热导致颈缩处温升软化，射流断裂为“念珠状”颗粒，故铅仅适用于小炸高条件。铝罩表现最佳，在所有工况下射流长度均优于铜和铅。壁厚 1mm、锥角 60° 和 90° 时材料利用率高，120° 时形成 EFP，铝的强度与延展性适中，在有限爆轰能下更易压垮拉伸。但当壁厚过大时，能量转化效率降低，导致射流断裂。

综上，在本研究条件下，铝药型罩在壁厚 1mm、锥角 60° 或 90° 时表现最佳，能够形成速度较高、长度较长且较稳定的聚能射流。

2.1.2 装药长径比对射流速度稳定性的影响

图 7 展示了不同长径比条件下射流速度随时间的变化曲线。根据该曲线可进一步获取射流稳定速度及最高速度随长径比的变化趋势，结果如图 8 所示。从图 7 可以看出，随着长径比增大，射流压垮的起始时刻逐渐延迟。这是由于装药高度增加后，爆轰波传播至药型罩的时间延长，从而导致射流压垮的启动相应推迟。在图 7 (a) 所示长径比 1~3 的范围内，射流速度随长径比增大呈现先升高后降低的趋势，该规律通过补充 $\lambda=1.5$ 、2.5 与 2.8 三组仿真数据得以验证。分析表明，这一现象源于有效装药量变化与爆轰波传播效应的共同作用，且主导机制随长径比发生变化。在 $\lambda=1\sim 2$ 区间内，随着长径比增加，稀疏波从装药边缘向内部传播，其汇聚点逐渐移向中心轴，有效装药量相应增加，更多能量参与驱动药型罩，因而射流速度提高。当长径比进一步增大时，爆轰波传播距离增加导致能量径向耗散与波形劣化，驱动效率下降成为主导因素，致使射流速度出现回落。在图 7 (b) 所示长径比大于 3 的条件下，除起爆延迟外，速度-时间曲线形态趋于一致。结合图 8 可知，此时射流最高速度与稳定速度均基本保持不变。其原因在于，当长径比超过临界值后，稀疏波汇聚点稳定位于装药中心轴，有效装药量达到饱和；继续增加长径比，新增装药处于稀疏波作用范围以外，其所对应的能量主要通过径向膨胀和热耗散等形式损失，无法对药型罩形成有效驱动，因此射流动能不再增强，速度趋于稳定。

对直径 32 mm 的煤矿许用乳化炸药与 60° 锥角的铝制药型罩组合而言， $\lambda \geq 3$ 时有有效装药量趋于饱和，该临界值受炸药爆轰性能与药型罩材料的共同影响。若炸药爆速提高或药型罩材料更易驱动，该临界值可能会发生偏移，建议在实际工程中根据具体装药条件进行针对性验证。



(a) $\lambda < 3$

(b) $\lambda \geq 3$

图 7 射流头部速度曲线

Fig. 7 Velocity curves of the jet tip under different length-to-diameter ratios.

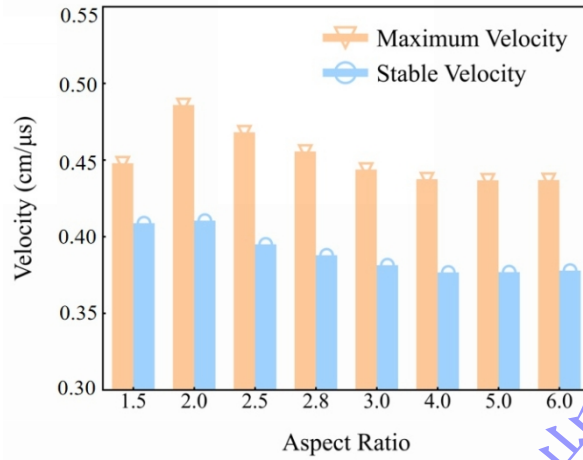


图 8 射流最高速度和稳定速度随长径比变化曲线

Fig. 8 Jet tip velocity versus length-to-diameter ratio

2.2 不同环境下稳定传爆距离确定

2.2.1 空气自由场中临界传爆特性

当聚能射流冲击乳化炸药时，首先在射流与炸药的相互作用区内形成若干热点；随着热点温度升至临界值，其局部发生的快速化学反应开始向周围未反应炸药中传播，进入燃烧阶段。燃烧释放的能量导致局部压力迅速升高，进而促使燃烧转换为低速爆轰。在此阶段，不断增强的压力波进一步加速炸药分解反应速率，形成正反馈循环，最终使低速爆轰迅速发展为爆速更高的稳定爆轰。如图 9 所示为 50-90cm 炸高下金属射流冲击起爆乳化炸药不同时刻的压力云图，在 50cm 炸高下，射流于 156 μ s 时刻接触到炸药，其产生的冲击压力达到 5.0 GPa，而乳化炸药的冲击波临界起爆压约为 2.5Gpa 左右^[26]，因此在射流冲击下，炸药“热点”被激发，这些局部高温点率先发生高速化学反应，产生的反应波随后以特定速度向炸药内部扩展，在 162 μ s 时，压力约达到 8GP，最终于 181 μ s 左右完成整个爆轰过程，形成约 11 GPa 的爆轰压力。当炸高为 60cm、70cm 和 80cm 时射流冲击乳化炸药的过程与 50cm 炸高工况类似，这三种炸高下乳化炸药同样通过“热点”机制起爆：高能射流冲击瞬间在炸药内部产生剧烈压缩，形成局部高温区域，激发高速化学反应，进而形成爆轰波并向内部传播，最终完成整个爆轰过程。然而，随着炸高增加，射流发生显著拉伸和速度衰减，导致其冲击炸药的起始侵彻压力整体呈现下降趋势。具体表现为，在 60cm、70cm 和 80cm 炸高下，射流分别于 182 μ s、209 μ s 和 240 μ s 时刻接触炸药，接触瞬间产生的冲击压力分别约为 4.46GPa、3.93GPa 和 3.49GPa。可见，射流冲击能量会随着炸高的增加而降低，尽管如此，在上述各炸高条件下，冲击压力仍足以可靠激发炸药内部的“热点”，引发高速化学反应和爆轰波传播，最终完成爆轰。当炸药间隔为 90cm 时，射流于 264 μ s 时冲击被发乳化炸药，随着射流的继续冲击，压力逐渐降低，272 μ s 时为 1.0GPa 左右，由于冲击压力不足，炸药内部未能形成有效“热点”，导致高速化学反应无法持续传播。至 369 μ s 射流完全击穿炸药时，被发装药中仍无稳定爆轰波生成。

Detonation Transmission Distance	Contact Moment	Detonation Initiation Moment	Detonation Completion Moment
----------------------------------	----------------	------------------------------	------------------------------

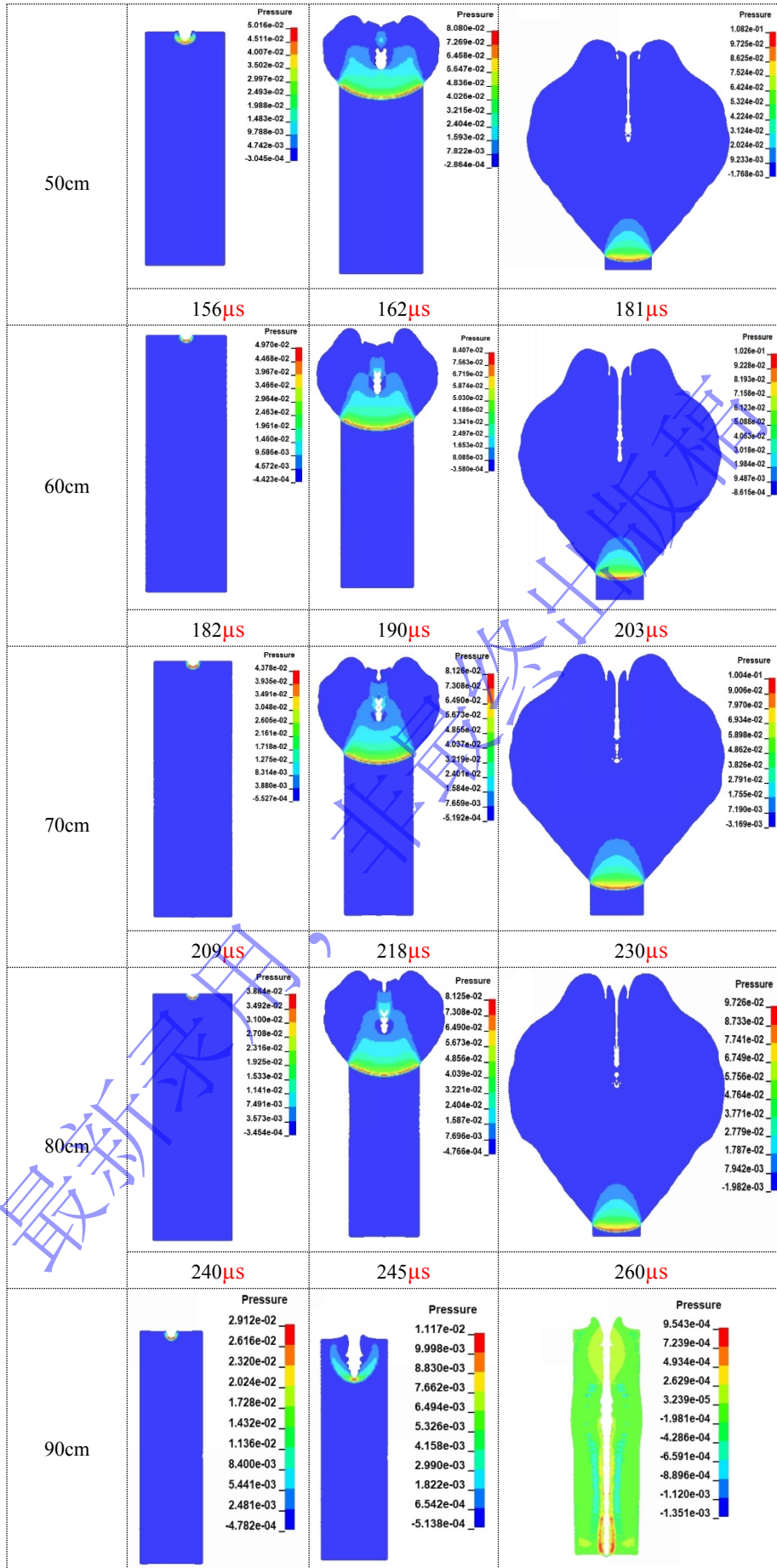




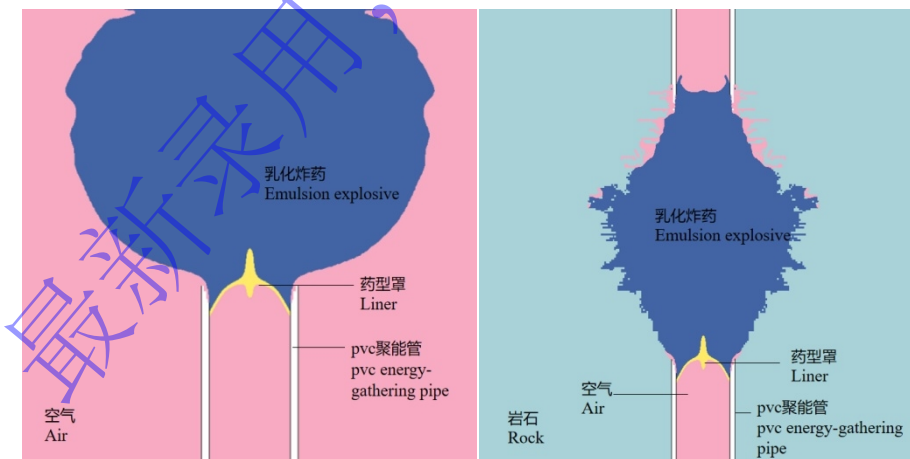
图 9.不同炸高下被发乳化炸药冲击起爆压力云图

Fig.9 Pressure Contour Maps of Secondary Emulsion Explosives Initiated by Impact at Different Standoff Heights

综合不同炸高工况的数值模拟结果可知：当炸药间隔较小时，射流对乳化炸药的冲击压力大，其冲击压缩作用能瞬时激发炸药“热点”并触发自持爆轰；而间隔过大时，射流因严重拉断和速度衰减导致压力骤降，无法突破临界起爆阈值，基于射流压力衰减规律与起爆失效机制，在本文聚能装药结构下，乳化炸药的合理殉爆距离上限为 90cm。

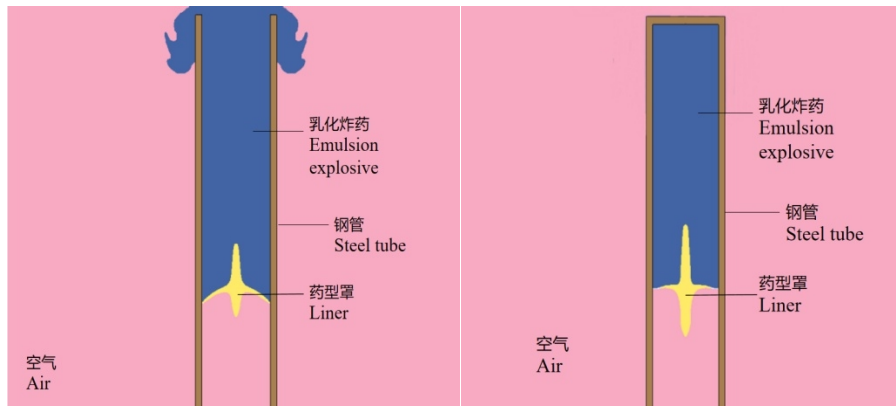
2.2.2 约束条件下传爆增强机制分析

在不同环境约束条件下，爆轰波扩散过程表现出显著差异。如图 10 展示了不同环境约束下药型罩压垮阶段的示意图，从中可以看出约束环境对炸药爆轰波传播过程的影响，如图 10 (a) ,在 PVC 聚能管约束工况下，由于 PVC 材料硬度较低，在炸药爆轰冲击下迅速发生碎裂，其网格单元被迅速删除，无法形成有效密闭空间，炸药在该约束下爆轰波迅速扩散，和空气自由场中类似，因此该工况下的射流冲击过程与空气自由场基本一致。而在岩石约束环境中，图 10 (b) 所示，岩石在一定程度上对主发装药起到了保压作用，爆轰波扩散得以抑制，同时有效提升了射流速度；但与此同时，部分炸药能量耗散于侵彻岩石，导致射流速度的提升较为有限。而在双侧钢管约束下，可以凭借其高强度有效抑制爆轰产物的径向膨胀，成功实现保压效果。从图中可以看出，不同约束工况下药型罩压垮时的形态也不相同，密闭约束环境下射流头部质量明显更大，不仅显著提升了射流速度，其连续性和稳定性也得以优化，图 11 展示了 35 微秒时刻不同环境工况下的射流速度云图。各约束环境的物理机制导致了速度分布的差异，对比可见，在 PVC 装置约束与空气自由场条件下，射流形态与速度分布差异较小；而在岩石约束下，射流速度相较前两者略有提升，岩石的保压效果并不是很明显，这可能是由于部分炸药能量消耗于侵彻岩石；值得注意的是，在左右两侧钢管约束条件下，射流速度得到了显著提升；当在炸药上方额外增加钢管约束以阻止炸药爆轰波向上方传播时，速度会进一步提升，因此，约束条件的增强可以有效抑制爆轰产物的侧向膨胀，提高了能量利用率，使射流速度和长度显著增加。



(a) PVC device constraint

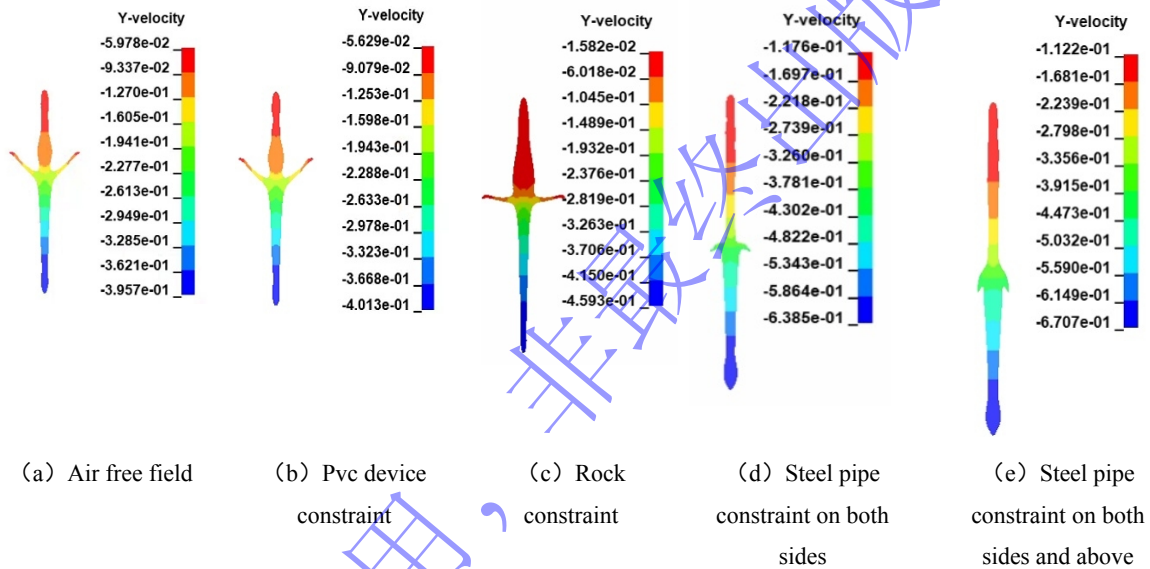
(b) rock constraint



(c) steel pipe constraints on both sides (d) Both sides & top steel pipe constraints

图 10 不同约束条件对炸药爆轰波传播的影响

Fig.10 Velocity contour plot of the jet at $35\mu\text{s}$ under different operational environments



(a) Air free field (b) Pvc device constraint (c) Rock constraint (d) Steel pipe constraint on both sides (e) Steel pipe constraint on both sides and above

图 11 不同环境工况下射流在 $35\mu\text{s}$ 时刻速度云图

Fig.11 Velocity contour plot of the jet at $35\mu\text{s}$ under different operational environments

综上，PVC 约束无法提供有效的保压作用，因此在 90 cm 炸高下，其起爆效果与空气自由场相似，均未能成功引爆被发装药。相比之下，其余三种约束条件均能在不同程度上实现保压效果，从而均能成功引发下方炸药的爆轰。图 12 展示了不同约束条件下被发乳化炸药的爆轰过程示意图。值得注意的是，被发装药的爆轰形态受约束条件影响显著：如图 12 (c) 和图 12 (d) 所示，在理想保压条件下，射流冲击起爆后，被发装药的完整爆轰过程均被约束于钢管内部完成。

由于药型罩厚度仅有 0.1cm，因此在形成射流的过程中对网格精度的要求较高，当炸高超过 90cm 时，网格数量随之增长，由于计算资源有限，未能定量测定在其他环境工况下稳定殉爆的极限距离。但是通过射流形态和速度的变化可以推演得到，不同环境工况的殉爆距离预期排序为钢管密闭工况优于岩石约束工况优于空气自由场工况，该排序证实密闭环境可以通过有效抑制能量损失提升能量利用率，能够突破传统殉爆距离的限制。

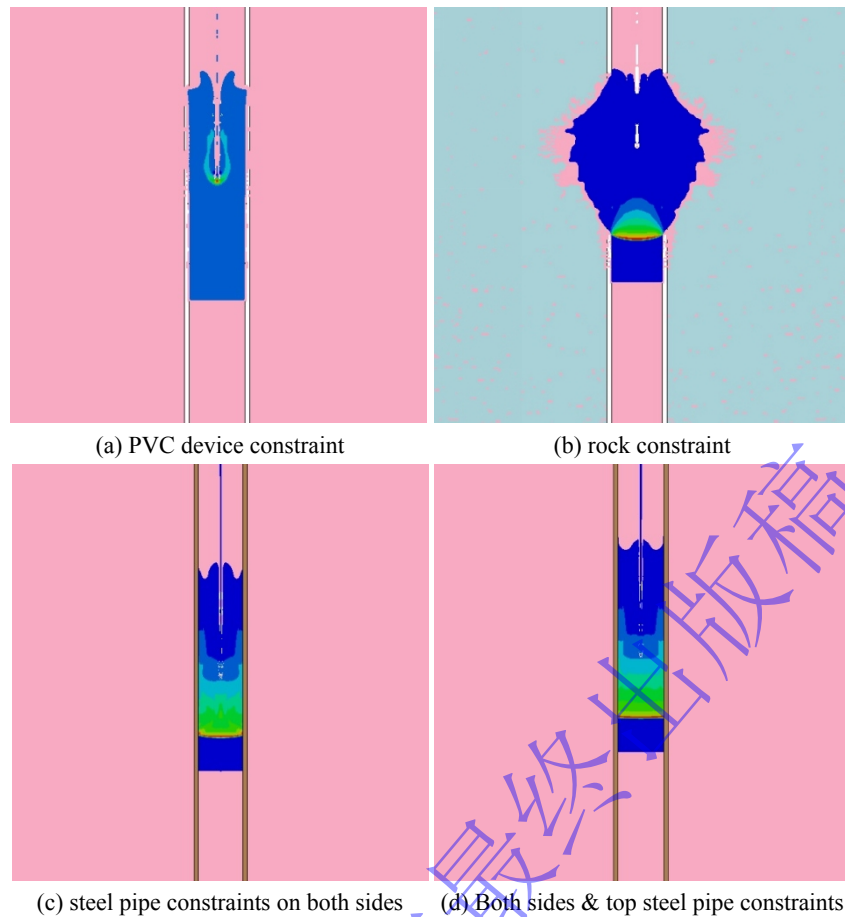


图 12 不同约束条件下被发乳化炸药爆轰示意图

Fig. 12 Schematic Diagram of Detonation of Cartridge Emulsified Explosives Under Different Constraint Conditions

3 结论

本研究围绕煤矿复合顶板预裂爆破中雷管用量过大、起爆可靠性低的工程问题，系统探究了基于金属聚能射流的冲击传爆技术，主要得出以下结论：

(1) 通过正交试验，分析了小口径乳化炸药条件下药型罩结构与材料对射流性能的影响。数值模拟结果表明，从药型罩材料而言，铜质药型罩因强度较高，压垮过程不充分，易形成杵体或爆炸成型弹丸；铅质药型罩虽易于驱动，但射流稳定性较差，易出现颈缩断裂现象，在结构乳化炸药下，铝制药型罩能够形成速度较高、连续性良好的聚能射流；在铝制药型罩中，综合性能最优的组合为锥角 60° 、壁厚 1 mm 的铝制药型罩。

(2) 通过调节装药长径比，考察了有效装药量对爆轰波传播特性及射流能量的影响。对于直径为 32 mm 的常规乳化炸药药卷，当长径比 $\lambda \geq 3$ 时，有效装药量趋于饱和，最高速度和稳定速度基本稳定在 4200 m/s 和 3800 m/s 左右。

(3) 通过设置不同炸高条件，研究了空气自由场中乳化炸药的可靠传爆距离。结果表明，在采用壁厚 1 mm 、锥角 60° 的铝制药型罩时，射流冲击传爆的可靠距离上限为 90 cm 。

(4) 通过构建不同环境约束条件，探讨了密闭环境对传爆效果的影响。结果显示，密闭约束能够显著抑制爆轰产物的径向膨胀，从而提高能量利用率。在不同约束材料中，PVC 管因材质易碎无法提供有效约束，被发乳化炸药无法起爆；岩石约束可提供有限的保压效果，在 90 cm 炸高下，被发乳化炸药成功起爆，射流速度提高约 15% ；而双侧及三侧钢管约束则能明显抑制爆轰产物径向膨胀，在 90 cm 炸高下，被发乳化炸药成功起爆，射

流速度分别提升约 59%、67%，证实密闭环境可有效延长可靠传爆距离。

参考文献

- [1] Wang Y, Wang Q, Tian X, et al. Stress and deformation evolution characteristics of gob-side entry retained by roof cutting and pressure relief[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: 104419.
- [2] Yang J, He M, Cao C. Design principles and key technologies of gob side entry retaining by roof pre-fracturing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 309-318.
- [3] Cao C, Xie Z, Zhang N, et al. Differential roof cutting for roadway support in dual gob-side entry retention on a single working face— Multilevel continuous anchor-grouting control technology: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 163: 108475.
- [4] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011:322,360-363.
WANG X G. *Blasting design and construction*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011:322,360-363.
- [5] 孙磊,贺海强,沈国华.电子雷管在某露天铜矿使用问题探究[J].*煤矿爆破*,2019,37(02):14-17.
SUN L, HE H Q, SHEN G H. Study on the use of electronic detonators in an open pit coppermine[J]. *Coal Mine Blasting*, 2019, 37(02): 14-17.
- [6] 张英豪,张泽楠.数码电子雷管应用问题的探讨[J].*火工品*,2018,(04):54-57.
ZHANG Y H, ZHANG Z N. Discussion on the Application of Digital Electronic Detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018, (04): 54-57.
- [7] Frey R, Lawrence W, Chick M. Shock evolution after shaped charge jet impact and its relevance to explosive initiation[J]. *International journal of impact engineering*, 1995, 16(4): 563-570.
- [8] Arnold W, Rottenkolber E. High explosive initiation behavior by shaped charge jet impacts[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 184-193.
- [9] Mehmannaavaz H, Ramezani A, Nabakhteh M A, et al. A practical review study on shaped charge in the last two decades (2000–2020)[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2021, 12(4): 665-693.
- [10] 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(01):77-84
WANG Q B, WANG T, TIAN C L, et al. Application of shaped charge device and decked charge in perimeter holes of smooth blasting[J]. *Blasting*, 2024, 41(01): 77-84.
- [11] Clutter J K, Belk D. Simulation of detonation wave interaction using an ignition and growth model[J]. *Shock Waves*, 2002, 12(3): 251-263.
- [12] 张雪梅,谢兴博,钟明寿,等.不同聚能装药水中冲击引爆靶后B炸药特性研究[J/OL].*兵工学报*,1-14[2025-07-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20250305.1631.002.html>.
ZHANG X M, XIE X B, ZHONG M S, et al. Study on the characteristics of explosive B after different shaped charge impact detonation target in water[J/OL]. *Acta Armamentarii*, 1-14[2025-07-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20250305.1631.002.html>.
- [13] 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(03):171-178.
LIU Z L, WANG X H, WANG Y K, et al. Study on influence of fusion device on detonation distance of emulsion explosives under constraint conditions[J]. *Blasting*, 2024, 41(03): 171-178.
- [14] 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(06):1-4+12.

- LI Q Y, ZENG H D, ZHAO X H, 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(06): 1-4+12.
- [15] 陈思敏.射流对运动带壳装药冲击起爆机理研究[D].南京理工大学, 2022.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000102.
CHEN S M. Research on the initiation mechanism of moving shelled charge under jet impact[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2022. DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.000102.
- [16] 黄正祥.聚能装药理论与实践[M].北京理工大学出版社,2014.
HUANG Z X. Theory and practice of shaped charge[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [17] Chou P C, Flis W J. Recent developments in shaped charge technology[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1986, 11(4): 99-114.
- [18] Wang C, Ding J, Zhao H. Numerical Simulation on Jet Formation of Shaped Charge with Different Liner Materials[J]. Defence Science Journal, 2015, 65(4).
- [19] Saran S, Ayisit O, Yavuz M S. Experimental investigations on aluminum shaped charge liners[J]. Procedia Engineering, 2013, 58: 479-486.
- [20] 黄正祥.聚能杆式侵彻体成型机理研究[D].南京理工大学,2003.
HUANG Z X. Mechanism study on jetting projectile charge formation[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [21] 王成,王万军,宁建国.聚能装药对混凝土靶板的侵彻研究[J].力学学报,2015,47(04):672-686.
Wang Cheng, Wang Wanjun, Ning Jianguo. Investigation on shaped charge penetrating into concrete targets. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(3): 672-686
- [22] 李伟兵,王晓鸣,李文彬,等.装药长径比对聚能杆式侵彻体成型的影响[J].弹道学报,2011,23(04):61-65.
LI W B, WANG X M, LI W B, et al. Effect of length-diameter ratio of charge on jetting projectile charge forming[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(04): 61-65.
- [23] 辛春亮,薛再清,涂建,等.有限元分析常用材料参数手册[M].机械工业出版社,2020.
XIN C L, XUE Z Q, TU J, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. China Machine Press, 2020.
- [24] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. The Physics of Fluids, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [25] Pugh E M, Eichelberger R J, Rostoker N. Theory of jet formation by charges with lined conical cavities [J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(5): 532-536.
- [26] 宋锦泉.乳化炸药爆轰特性研究[D].北京科技大学,2000.
SONG J Q. Research on detonation characteristics of emulsion explosives[D]. University of Science and Technology Beijing, 2000.

Study on the Liner Structure for Metal Jet Impact Initiation and the Stable Initiation Distance

WANG Xinyue¹, WANG Chenlong^{1,3}, LI Zhiqiang^{1,2,3,4}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Material Strength and Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. Shanxi Provincial Research Center for Basic Disciplines of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

4. National Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: Gob-Side Entry Retaining by Roof Cutting and Pressure Relief is widely employed in coal mining. However, the multi-segment air-decked charge structure used in its pre-splitting blasting requires a separate detonator for each charge segment, leading to problems such as high detonator consumption per borehole, elevated costs, operational complexity, and significant safety risks. To address this engineering challenge, the application of shaped metal jet impact-induced initiation technology in composite roof pre-splitting blasting has been proposed. Using LS-DYNA numerical simulation, a systematic investigation was conducted on liner structure optimization, factors affecting metal jet impact initiation, and the stable initiation distance. The findings demonstrate that the aluminum liner exhibits the optimal overall performance. With a cone angle of 60° and a wall thickness of 1 mm, it generates a shaped jet with high velocity, considerable length, and good continuity. In contrast, the copper liner, due to its high strength and high collapse energy threshold, fails to form an effective jet under low-power explosive charge conditions. Although the lead liner is readily accelerated, it produces jets with poor stability that are susceptible to necking and fragmentation. When the charge length-to-diameter ratio exceeds 3, the effective charge mass reaches saturation. Additional explosive energy is primarily dissipated through radial expansion and heat loss, resulting in the stabilization of both the maximum jet velocity and stable jet velocity. In an unconfined air environment, the maximum reliable initiation distance for a shaped jet from an aluminum liner (1 mm wall thickness, 60° cone angle) is 90 cm. Beyond this distance, jet stretching and attenuation lead to insufficient pressure to initiate the emulsion explosive. Confinement provided by steel pipes can significantly suppress the radial expansion of detonation products, enhancing energy utilization efficiency and consequently extending the initiation distance of the metal jet.

Keywords: metal jet; impact initiation; liner structure; decked charge; stable initiation