

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.009

轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离研究*

石硕龙¹,周冲²,高文学¹,李卓¹,张小军¹

(1. 北京工业大学,北京 100124;2. 中交路桥建设有限公司,北京 101117)

摘要: 为了实现隧道掘进光面爆破效果的精准控制,利用 LS-DYNA 流固耦合算法和三项式点火增长状态方程,建立了聚能射流冲击引爆炸药模型,进行了轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离研究,并基于承平高速(北京段)红石门隧道爆破开挖工程,开展了轴向聚能装药结构现场试验。研究表明:1) 采用工业上常用的轴向聚能装药结构时,在主装药起爆 110 μs 后,聚能射流头部运动了约 25 cm,此时射流与药体分离,之后,聚能射流会在运动中被拉断成不连续的多节,从而不利于被发装药的引爆,因此,选择合理的炸药间隔,对聚能射流能否引爆被发装药至关重要;2) 基于射流头部压力和炸药反应度分析,当炸药间隔超过 50 cm 后,射流冲击被发装药时的冲击压力小于乳化炸药的临界起爆压力。随着炸药间隔的增大,被发装药被引爆时,射流侵彻炸药的逐渐增加,当炸药间隔超过 90 cm 后,射流不能引爆被发炸药;3) 基于承平高速(北京段)隧道爆破工程,进行了炸药间隔为 50 cm 和 70 cm 的两组试验,试验结果显示炸药间隔为 70 cm 时超欠挖控制更好,所以,在本项工程的条件下,合理的殉爆距离为 70 cm。

关键词: 隧道掘进;光面爆破;聚能装药;冲击起爆;殉爆距离

中图分类号: TP18; TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)03-0078-08

Research on Rational Sympathetic Detonation Distance of Emulsion Explosives in Axial Shaped Charge Loading Structure

SHI Shuo-long¹, ZHOU Chong², GAO Wen-xue¹, LI Zhuo¹, ZHANG Xiao-jun¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 101117, China)

Abstract: To attain precise regulation of the smooth blasting effects during tunnel excavation, this paper employs the LS-DYNA fluid-solid coupling algorithm and a cubic polynomial ignition and growth equation of state to develop a numerical model of shaped charge jet initiation of explosives. A study on the optimal detonation distance for emulsified explosives within an axially shaped charge configuration was conducted. Additionally, field experiments on axial energy-focused charge structures were performed based on the tunnel blasting excavation project of the Hongshimen Tunnel on the Chengping Expressway (Beijing section). The research results indicate the following: (1) When employing the commonly used axial energy-focused charge structure in industry, approximately 25 cm of movement occurs at the tip of the energy-focused jet 110 μs after the main charge detonation. At this point, the jet separates from the plug. Subsequently, the energy-focused jet becomes discontinuous and fragmented during its motion, which may ad-

收稿日期 (Date of reception): 2025-02-24

网络首发日期 (Published online): 2025-04-09

作者简介: 石硕龙(2000-), 男, 在读硕士研究生, 从事隧道工程方向的研究工作, (E-mail) shishuolong@emails.bjut.edu.cn。

通讯作者: 高文学(1962-), 男, 教授、博士研究导师, 主要从事路基与隧道工程方向的教学与研究工作, (E-mail) wxgao@bjut.edu.cn。

基金项目: 爆破工程湖北省重点实验室开放基金(项目编号 BL2021-23)

About the author: SHI Shuo-long(2000-), male, currently a master's degree candidate, engaged in research in the field of tunnel engineering, (E-mail) shishuolong@emails.bjut.edu.cn.

Corresponding author: GAO Wen-xiu(1962-), male, professor, and doctoral research supervisor, primarily engaged in teaching and research in the fields of roadbed and tunnel engineering, (E-mail) wxgao@bjut.edu.cn.

Fund Programs: Open Fund of Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering (Project No. BL2021-23)

versely affect the initiation of the explosive charge. Therefore, selecting an appropriate explosive spacing is crucial for the successful detonation of the initiated explosive by the energy-focused jet. (2) Based on the analysis of jet head pressure and explosive reaction characteristics, it is observed that when the explosive spacing exceeds 50 cm, the impact pressure exerted by the jet on the initiated explosive is less than the critical initiation pressure of the emulsified explosive. As the explosive spacing increases, the distance that the jet penetrates the explosive during detonation also gradually increases. When the explosive spacing exceeds 90 cm, the jet fails to initiate the explosive charge. (3) Field tests were conducted based on the tunnel blasting project of the Chengping Expressway (Beijing section) with explosive spacings of 50 cm and 70 cm. The test results revealed that better control of over-excavation and under-excavation was achieved at a spacing of 70 cm. Therefore, under the conditions of this project, a reasonable detonation distance is determined to be 70 cm. The findings of this study can provide valuable references for similar smooth blasting efforts in tunnel engineering.

Key words: tunnel excavation; smooth blasting; shaped charge loading; impact initiation; transmission distance

在我国道路交通建设中,公路隧道建设在我国基础设施建设中扮演着重要的角色^[1]。光面爆破是隧道爆破掘进中应用最广泛的施工方式,它可以保证在围岩充分破碎的情况下,控制超欠挖,使隧道掌子面开挖轮廓平整光滑^[2-5]。传统的光面爆破,通常采用雷管与导爆索联合起爆方式,施工工艺复杂,如果导爆索应用受限,将影响隧道工程施工质量和施工进度^[6-8],因此,一些学者提出了基于聚能射流冲击引爆炸药的光面爆破新型装药结构^[9]。

聚能射流冲击引爆炸药首先应用于军工领域。朱瑞等人研究聚能射流对钢壳 B 炸药的侵彻解体问题^[10],采用 AUTODYNA-2D 软件模拟了聚能射流形成过程,并综合推断出聚能射流解体带壳 B 炸药的方法和机理。王利侠等人利用 LS-DYNA 数值模拟结合实验的方法研究了聚能射流对屏蔽 B 炸药的冲击起爆问题^[11],其模拟结果与实测结果基本一致。汪明星等人对聚能射流引爆裸露和带壳炸药的过程进行了数值模拟研究^[12],分析了射流引爆裸露炸药和带壳炸药两者间的不同作用过程,并对射流引爆炸药的机理进行了探讨。

随着炸药殉爆技术的不断发展,聚能装置被引入爆破工程中,王清标等发现聚能装置与工业电子雷管相结合的新型起爆方式^[13],可以提高隧道光面爆破效果,同时大大降低了耗材费用。刘忠磊等研究了在隧道光面爆破中聚能装置对炸药殉爆距离的改良效果^[14],结果表明由于聚能装置形成的聚能射流大大增加了乳化炸药在无缝钢管中的殉爆距离。但由于聚能装置较晚应用于光面爆破,以上学者研究聚能射流引爆乳化炸药时大多采用现场试验的方法,较少采用数值模拟的手段,无法深入研究聚能射流与炸药的相互作用机理。轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离。

本文以承平高速公路京平段红石门隧道掘进爆破工程为依托,运用 LS-DYNA 模拟分析聚能射流引爆乳化炸药的作用过程,重点研究轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离,研究成果对实际隧道光面爆破施工具有一定指导意义。

1 聚能射流冲击引爆炸药机理

金属聚能射流形成过程如图 1 所示。在炸药爆炸作用下,金属罩以高速度向中心挤压并在轴线上发生碰撞。这种碰撞导致的高压作用使得药型罩内表面速度远大于药型罩的压垮速度,药型罩在短时间内快速变形。随后,药型罩在中心线上压合,在碰撞点速度运动的动坐标系上,以相对速度 V_2 流向碰撞点。撞击后,金属将分成射流和杵体两部分^[15],但射流速度 V_j 会远大于杵体速度 V_s ;射流金属约占金属罩总质量的 6% ~ 11%。

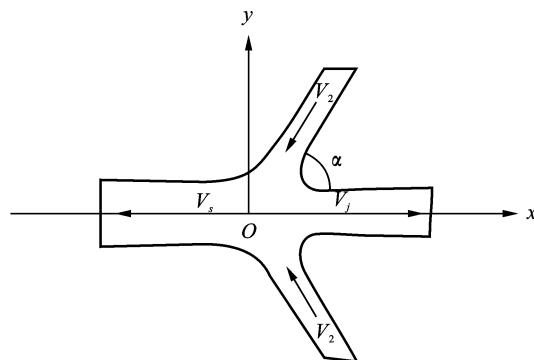


图 1 金属射流形成过程

Fig. 1 Formation process of metal jet

对于射流冲击起爆炸药的研究,目前普遍认为,非均质炸药起爆总是以“热点”形成开始,然后进一步成长并最终导致炸药的爆轰^[16]。根据热点理论,采用聚能装药结构时,炸药爆炸后金属聚能罩(如

图2所示)形成高速射流。当金属射流击中布设一定距离的炸药时,会在冲击部位形成“热点”。随着热点剧烈化学反应的传播,最终引爆炸药。

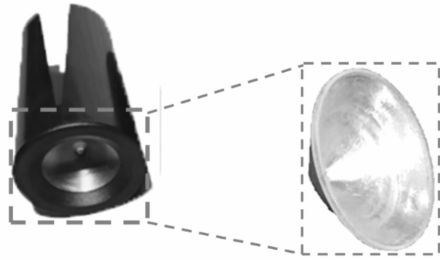


图2 工业用聚能罩结构图

Fig. 2 Structural diagram of energy gathering tube cover

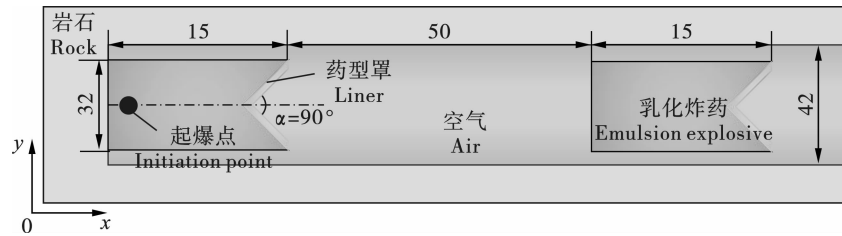


图3 炸药间隔50 cm时数值计算模型示意图(单位:cm)

Fig. 3 Schematic diagram of numerical model for explosive spacing of 50 cm(unit:cm)

为减少运算时间,建模采用2D轴对称模型,单位制采用cm-g- μ s。建立有限元模型时,岩石采用Lagrange网格划分,主装药、药型罩、被发装药和空气均采用Euler网格划分。单元采用流固耦合算法,该算法可以较好地模拟在有围岩的情况下金属射流的形成和炸药的冲击起爆过程。

2.2 数值模型参数

隧道背景工程围岩为白云岩。采用LS-DYNA

2 计算模型及相关参数

2.1 数值计算模型

采用LS-DYNA软件建立聚能射流引爆炸药的数值计算模型。在模型中,聚能装药采用无外壳装药形式,药型罩材料为金属铝,厚度为1.5 mm,锥顶角为90°。主装药和被发装药均使用2#岩石乳化炸药。根据相关研究,空气间隔不应超过药卷直径的32倍^[17]。对于直径32 mm的乳化炸药,该限值为1.02 m。为研究聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离,建立炸药间隔为30 cm、50 cm、70 cm、90 cm四组数值计算模型。图3展示了炸药间隔为50 cm时的数值计算模型示意图。

材料库中111号HJC本构模型,其本构参数见表1。药型罩采用15号JC本构模型和4号GRUNEISEN状态方程,以描述其在高温、高压、高速运动下的状态。空气介质采用9号NULL本构方程和1号状态方程定义。主装药采用8号高能炸药本构模型,并用2号JWL状态方程来描述炸药爆轰过程中的状态。

表1 白云岩HJC参数

Table 1 HJC parameters of dolomite

ρ (kg·m ³)	G/GPa	f_c /MPa	A	B	C	N	S_{max}	T/MPa	P_c /MPa
2840	7.0	213	0.3	1.8	0.005	0.9	5.07	1.7	71

为了模拟炸药在聚能射流冲击下的起爆过程,被发装药采用10号材料本构模型与7号三项式点火增长状态方程进行描述。三项式点火增长模型是由Lee-Tarver基于热点理论和圆筒试验提出的,是当前应用较为广泛的反应速率模型^[18]。三项式点火增长模型主要包括炸药未反应物和反应物的状态方程以及反应速率方程。对于爆炸未反应物和反应物,通常使用JWL状态方程来描述其膨胀压力,其状态方程见式(1)。乳化炸药的JWL参数见表2。

$$P = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega c T}{V} \quad (1)$$

三项式点火增长模型的反应速率方程如式(2)所示,其中第一项为点火项,描述炸药受到冲击后热点形成阶段;第二项为增长项,描述炸药中热点慢速反应增长阶段;第三项为完成项,描述热点汇合后高温高压下炸药开始大范围的快速反应阶段。

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a\right)^x +$$

$$G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^f p^z \quad (2)$$

式中: λ 为炸药反应度; t 为反应时间; $a, b, c, d, e, g, x, y, z, I, G_1, G_2$ 为控制炸药冲击起爆感度的常数。由于 2# 岩石乳化炸药的状态方程参数缺乏数据,相关内容参考性质最接近的乳化炸药确定,如表 3 所示^[19]。

表 2 乳化装药未反应物和反应物 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of JWL equation of state for unreacted and reactive materials in emulsion charge

参数 Parameter	未反应产物 Unreacted products	反应产物 Reaction products
A/Mbar	1028	75.39
R_1	17.88	11.95
B/Mbar	-0.000629	0.4718
R_2	-1.5427	2.87
ωC_V	1.0×10^{-5}	3.0×10^{-6}

表 3 乳化炸药的反应速率常数

Table 3 Reaction rate constant of emulsion explosives

参数 Parameter	数值 Numerical value	参数 Parameter	数值 Numerical value
a	0.002	d	0.030
b	0.673	G_2	27.957
x	12.291	e	0.534
G_1	116.502	g	0.630
y	2.026	z	3.918
c	0.407	I	8.2×10^5

3 数值模拟结果分析

3.1 聚能射流形成过程

为了研究聚能射流形成规律,选取聚能射流未冲击被发装药前不同时刻的速度云图来进行分析,如图 4 所示。从射流的形态看,药型罩压垮之后 ($t \geq 25 \mu\text{s}$),由于射流和杆体间的速度差,碰撞点处出现了明显的“颈缩”现象;射流出药型罩时头部速度约为 2700 m/s。经过一段时间运动后,射流头部

速度达到 3050 m/s,这说明聚能射流头部速度不断变化。同时,射流在运动过程中存在明显的速度梯度,这种速度梯度导致了射流部分的拉伸。

数值模拟显示,当 $t = 110 \mu\text{s}$ 时射流长度达到 20 cm。此时,射流头部运动了约 25 cm,射流与杆体分离。随着聚能射流继续运动,聚能射流会被拉伸成不连续的多节,这不利于被发装药的引爆。因此选择合理的装药间隔,对聚能射流能否引爆被发装药至关重要。

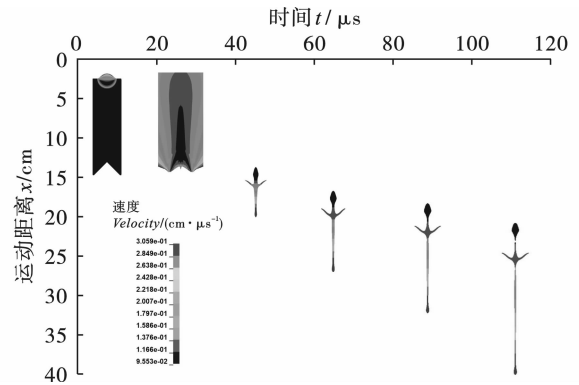


图 4 聚能射流形成过程中的速度云图

Fig. 4 Velocity cloud map during the formation process of concentrated energy jet

3.2 聚能射流头部压力分析

当炸药间隔为 30 cm 时聚能射流头部压力值较大^[20],很容易超过 2# 岩石乳化炸药的临界起爆压力 ($P = 2.5 \text{ GPa}$)。因此,炸药被瞬间引爆。分析炸药间隔为 50 cm、70 cm、90 cm 时的压力云图,分别如图 5 ~ 图 7 所示。在 50 cm、70 cm 两种情况下,聚能射流分别在 185 μs 、250 μs 时冲击被发乳化炸药。此时,聚能射流头部最大压力值均小于 2.5 GPa,炸药没有立刻起爆。然而,随着射流持续侵彻,被发装药内的热点不断增加。当射流分别侵彻 2 cm、3.7 cm 后,被发装药中的最大压力值达到 10.4 GPa,导致被发装药引爆并形成稳定的爆轰。同时,分析射流形态发现,当炸药间隔达到并超过 70 cm 时,射流头部出现明显的断裂现象,如图 6(b) 所示。



图 5 炸药间隔距离 50 cm 时被发乳化炸药压力云图(单位:cm)

Fig. 5 Pressure cloud map of emulsion explosive when the distance between explosives is 50 cm(unit:cm)



图6 炸药间隔距离70 cm时被发乳化炸药压力云图(单位:cm)

Fig. 6 Pressure cloud map of emulsion explosive when the distance between explosives is 70 cm(unit:cm)

炸药间隔90 cm的压力云图如图7所示。 $t = 320 \mu\text{s}$ 时冲击被发乳化炸药。此时,射流头部压力仅为1.3 GPa,远小于乳化炸药的临界起爆压力;到

$t = 350 \mu\text{s}$ 时,射流击穿炸药在这一时刻,被发炸药中并未形成稳定爆轰。



图7 炸药间隔距离90 cm时被发乳化炸药压力云图

Fig. 7 Pressure cloud map of emulsion explosive when the distance between explosives is 90 cm

通过分析不同炸药间隔的数值模拟结果,可以得出以下结论:在炸药间隔距离较小的情况下聚能射流头部压力较大,聚能射流的冲击作用可直接导致被发装药起爆,并在药卷中形成稳定爆轰;当炸药间隔过大时,聚能射流会出现拉断现象,且不能引爆炸药。通过对射流头部压力的分析,本文初步认为在图3所示的聚能装药结构条件下,乳化炸药合理的殉爆距离不应超过90 cm。

3.3 炸药反应度分析

炸药反应度是数值分析中表征炸药爆炸与否的重要参考指标。当反应度大于0.1时,表示炸药处于燃烧状态;当反应度等于1时,则表示炸药已完全爆炸^[21]。本文提取了不同间隔距离的炸药反应度云图,分析轴向聚能装药结构合理殉爆距离,如图8、图9所示。



图8 炸药间隔为50 cm时被发乳化炸药反应度云图(单位:cm)

Fig. 8 Cloud map of reaction degree of emulsion explosive when the interval between explosives is 50 cm(unit:cm)



图9 炸药间隔为70 cm时被发乳化炸药反应度云图(单位:cm)

Fig. 9 Cloud map of reaction degree of emulsion explosive when the interval between explosives is 70 cm(unit:cm)

炸药间隔距离为30 cm时,当聚能射流冲击炸药后,在射流头部直径1.5 cm的范围内,炸药反应度瞬间达到1;随后,爆炸在炸药内部扩散并形成稳

定爆轰。当炸药间隔为50 cm和70 cm时被射流冲击的炸药并没有直接被引爆,被冲击部位的炸药反应度先达到0.5~0.8之间的燃烧状态;之后,随着

射流不断侵彻炸药,炸药内部反应度不断上升,最终引爆炸药并形成稳定爆轰。

当炸药间隔为 50 cm 时,射流侵彻 1 cm 后,在射流头部直径 0.8 cm 的范围内,炸药反应度达到 1;随后,侵彻 2 cm 后,炸药被大范围引爆。而当炸药间隔为 70 cm 时,射流侵彻 3.7 cm 后,炸药被大范围引爆。

图 10 展示了炸药间隔为 90 cm 时的炸药反应度云图。射流冲击炸药后,炸药反应度只能达到 0.2~0.5 之间。这种有限的燃烧程度不足以使射流在后续的冲击过程中引爆炸药。直到 350 μs 后,射流击穿炸药。此时,只有一小部分炸药的反应度达到 1,大部分炸药仍处于燃烧状态,反应度在 0.5~0.6 之间。因此,炸药未能形成稳定爆轰。



图 10 炸药间隔为 90cm 时被发乳化炸药反应度云图

Fig. 10 Cloud map of reaction degree of emulsion explosive when the interval between explosives is 90 cm

上述聚能射流头部压力与炸药反应度分析结果表明,采用聚能装药结构时引爆乳化炸药的合理殉爆距离不应超过 90 cm。

105.1 m,属于中长隧道。隧道围岩主要由两种岩石构成:蓟县系杨庄组含粉砂泥晶白云岩,长城系高于庄组白云岩。受断层构造和区域构造应力影响,隧道围岩整体裂隙较为发育,但局部较为完整。

4 现场应用

现场试验区域的围岩等级为 IV 级,采用上下台阶法进行施工。现场设计循环进尺为 3.5 m;掏槽孔孔深 3.9 m,孔间距为 0.6~0.8 m,排距为 0.5~0.6 m;辅助孔孔深 3.7 m,孔间距为 0.9~1.0 m,排距为 0.7~1.1 m;周边孔孔深 3.7 m,孔间距 0.50~0.55 m;光爆破层厚度 0.7~0.75 m。具体炮孔布置如图 11 所示。

4.1 工程背景

本研究以承平高速公路(北京段)红石门隧道爆破掘进工程为依托,探讨了轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离。红石门隧道具有以下特征:左线长度为 855.1 m,右线长度为 897.9 m,左右线间距为 42.7~42.9 m。隧道最大埋深约

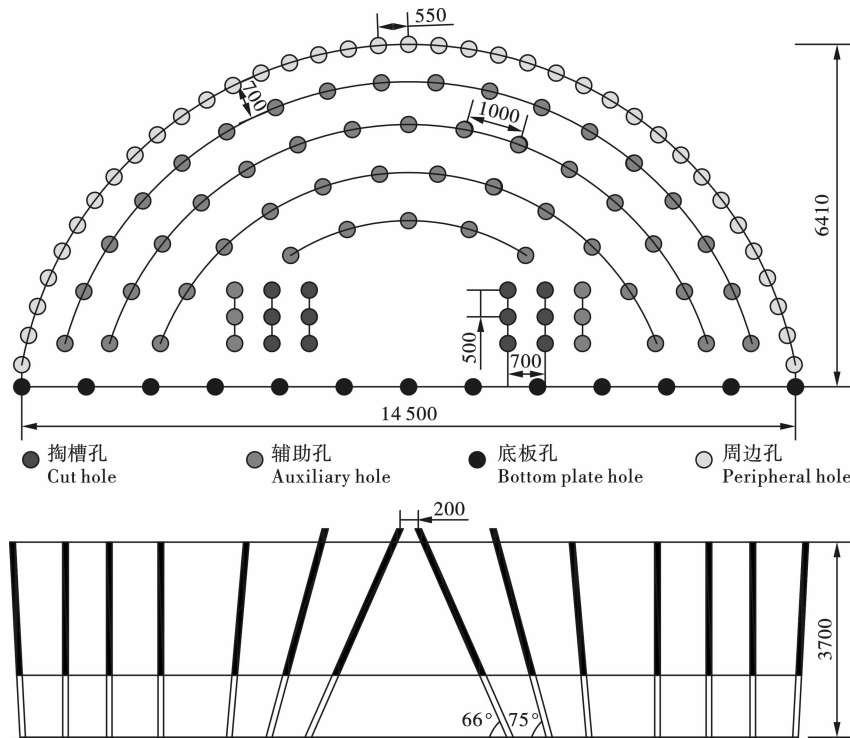


图 11 隧道上台阶爆破炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 11 Tunnel section blasting design diagram(unit:mm)

4.2 周边孔聚能爆破试验

现场试验光面爆破周边孔采用轴向聚能间隔装药,其线装药密度为 200 ~ 250 g/m。结合数值模拟结果和现场实际情况,试验设计了两种聚能装药结

构,炸药间隔分别设置为 50 cm、70 cm。两种装药结构均为底部加强装药 400 g,其余部位装药 150 g。图 12 为这两种装药结构示意图。

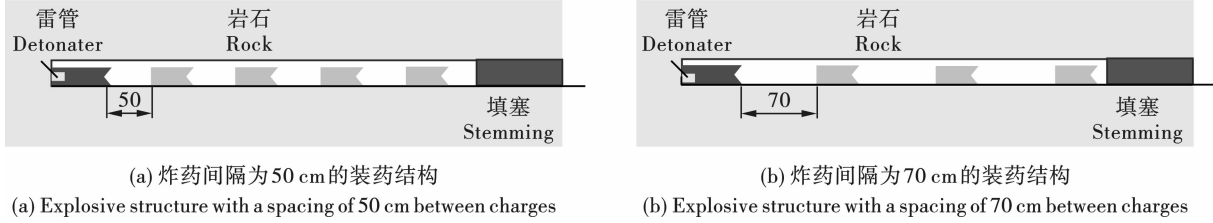


图 12 两种轴向聚能装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 12 Two types of peripheral pore aggregation charge structures(unit:cm)

试验后,通过使用全站仪扫描隧道断面的方式记录每组的光面爆破效果,如图 13 所示。统计两组

试验的爆破效果并将其列于表 4 中,通过对比两组试验效果,得到可以应用于实际工程的合理殉爆距离。

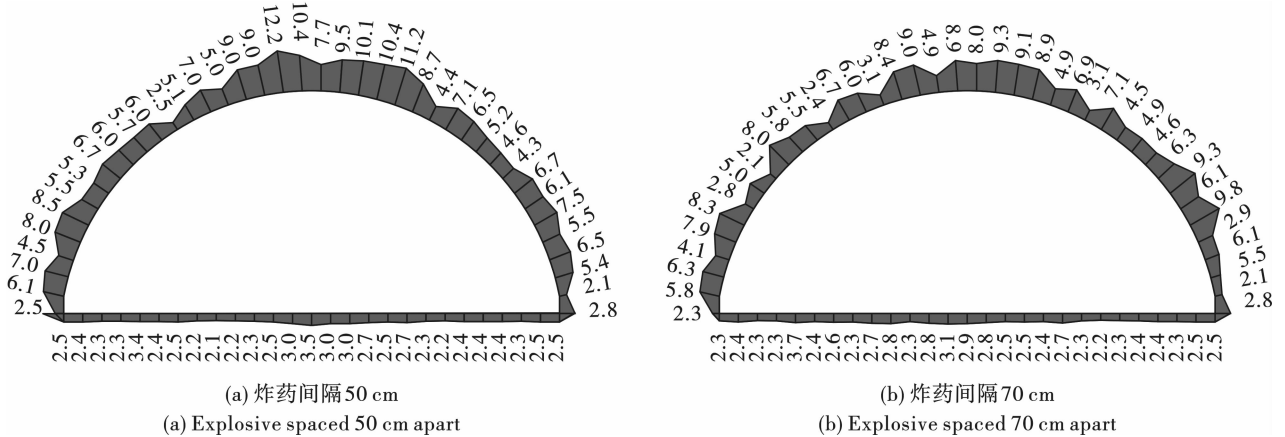


图 13 两组试验隧道断面扫描结果

Fig. 13 Scanning results of two sets of test tunnel sections

表 4 试验结果对比

Table 4 Comparison of experimental results

试验组 Test group	试验变量 Experimental variables	引爆结果 Explosion result	半孔率 Half porosity/%	炮孔利用率 Blast hole utilization rate/%	平均超挖量 Average over excavation volume/cm	最大超挖量 Maximum over excavation volume/cm
1	炸药间隔 50 cm Explosive spaced 50 cm apart	全部引爆 Detonate all	88.35	91.22	6.6	12.2
2	炸药间隔 70 cm Explosive spaced 70 cm apart	全部引爆 Detonate all	84.27	88.76	5.7	9.8

采用聚能装药结构,发现现场炸药间隔 50 cm 和 70 cm 时均能全部起爆。这验证了轴向聚能装药结构可以实现炸药间隔在 70 cm 内的稳定传爆,同时也证明了利用聚能单代替导爆索进行光面爆破的可行性。

通过对比两组聚能光面爆破试验效果,当炸药间隔为 50 cm 时,其半孔率、炮孔利用率均高于炸药间隔 70 cm,但平均超挖量增加 0.9 cm,最大超挖量增加 2.4 cm,同时每循环进尺装药量有所增加。后又在现场进行了炸药间隔 90 cm 的试验,发现有部

分聚能药卷未充分引爆,炮孔内存在残药现象。

基于上述试验研究,针对本项隧道工程,合理的乳化炸药殉爆距离为70 cm。

5 结论

(1)数值模拟研究表明,采用轴向聚能装药结构,聚能射流在运动100 μs 时,射流头部运动了约25 cm,此时射流与杆体分离。随着聚能射流继续运动,聚能射流会被拉断成不连续的多节,影响聚能射流冲击炸药时的压力大小,从而不利于被发装药的引爆,因此,选择合理的炸药间隔,对聚能射流能否引爆被发装药至关重要。

(2)通过对聚能射流头部压力和炸药反应度分析,发现当炸药间隔超过50 cm后,射流冲击被发装药时的冲击压力小于乳化炸药的临界起爆压力;当炸药间隔为50 cm、70 cm时,射流分别侵蚀被发装药2 cm、3.7 cm后引爆被发装药;而当炸药间隔达到90 cm后,被发装药的反应度最大只能达到0.6,被发装药中未能形成稳定爆轰,因此,轴向聚能装药结构中乳化炸药合理殉爆距离不应超过90 cm。

(3)基于现场光面爆破试验发现,采用轴向聚能装药结构,炸药间隔50 cm和70 cm时均能全部起爆,验证了聚能装药结构的实用性。当炸药间隔为50 cm时,其半孔率、炮孔利用率均高于炸药间隔70 cm,但平均超挖量增加0.9 cm,最大超挖量增加2.4 cm,同时每循环装药量有所增加,所以,在本项隧道工程的条件下,合理的殉爆距离为70 cm。

参考文献 (References)

- [1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展40年[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(4):537-544.
- [1] YAN Jin-xiu. Achievements and challenges of tunneling technology in china over past 40 years[J]. Tunnel Construction,2019,39(4):537-544. (in Chinese)
- [2] 潘强. 隧道光面爆破定向断裂与围岩损伤的机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- [2] PAN Qiang. Study on mechanism of directional fracture and surrounding rock damage in tunnel smooth blasting [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [3] 俞定. 地铁隧道全断面开挖光面爆破技术应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [3] YU Ding. Study on application of smooth blasting technology in full-section excavation of subway tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (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] 杨仁树,车玉龙,孙强,等. 地铁区间隧道不同装药结构光面爆破应用研究[J]. 爆破,2013,30(2):90-94.
- [5] YANG Ren-shu, CHE Yu-long, SUN Qiang, et al. Applied research on smooth blasting with different charge structure in metro running tunnel [J]. Blasting, 2013, 30(2):90-94. (in Chinese)
- [6] 张志呈,蒲传金,史瑾瑾. 不同装药结构光面爆破对岩石的损伤研究[J]. 爆破,2006(1):36-38,55.
- [6] ZHANG Zhi-cheng, PU Chuan-jin, SHI Jin-jin. Rock damification by smooth blasting of different charge structures [J]. Blasting, 2006(1):36-38,55. (in Chinese)
- [7] 陶明,罗福友,王云茂,等. 露天矿山大孔径无导爆索光面爆破技术[J]. 采矿技术,2022,22(3):137-140.
- [7] TAO Ming, LUO Fu-you, WANG Yun-mao, et al. Smooth blasting technology without detonating cord for large aperture in open-pit mines [J]. Mining Technology, 2022, 22(3):137-140. (in Chinese)
- [8] 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.
- [8] YANG Yu-yin, CHEN Chang-gui, HUANG Hao, et al. Improvement and application of charging structure of smooth blasting in tunnel excavation [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(4):72-76,86. (in Chinese)
- [9] 田家璇,张昌锁,李泽,等. 新型聚能管设计及工程应用[J]. 爆破,2025,42(1):159-165,198.
- [9] TIAN Jia-xuan, ZHANG Chang-suo, LI Ze, et al. Design and engineering application of new energy concentrating tube [J]. Blasting, 2025, 42(1):159-165,198. (in Chinese)
- [10] 朱瑞,郭涛,毛益明,等. 聚能射流解体带壳B炸药的数值模拟与实验研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(11):32-39.
- [10] ZHU Rui, GUO Tao, MAO Yi-ming, et al. Numerical simulation and experimental study of shaped charge jet on disintegrating composition Bina shell [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(11):32-39. (in Chinese)

- [7] FLEISCHMANN M, HENDRA P J, McQUILLAN A J. Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode [J]. *Chemical Physics Letters*, 1974, 26(2): 163-166.
- [8] JEANMAIRE David L, Van DUYNÉ Richard P. Surface raman spectroelectrochemistry: Part I. Heterocyclic, aromatic, and aliphatic amines adsorbed on the anodized silver electrode [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1977, 84(1): 1-20.
- [9] GAO Rong-ke, QIAN Hai-yang, WENG Chao-gui, et al. A SERS stamp: Multiscale coupling effect of silver nanoparticles and highly ordered nano-micro hierarchical substrates for ultrasensitive explosive detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 321: 128543.
- [10] LIU Min-min, CHEN Wei. Graphene nanosheets-supported Ag nanoparticles for ultrasensitive detection of TNT by surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 46: 68-73.

(上接第85页)

- [11] 王利侠,周涛,贺海民,等. 聚能射流引爆屏蔽B炸药数值模拟及试验[J]. *爆破器材*, 2015, 44(5): 56-60.
- [11] 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)
- [12] 汪明星,廖竹良,李裕春,等. 聚能射流引爆炸药的数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(12): 2872-2878.
- [12] WANG Ming-xing, LIAO Zhu-liang, LI Yu-chun, et al. Numerical simulation of high explosives ignited by shaped charge jet [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(12): 2872-2878. (in Chinese)
- [13] 王清标,王涛,田成林,等. 周边孔聚能装置间隔炸药在光面爆破中的应用研究[J]. *爆破*, 2024, 41(1): 77-84.
- [13] WANG Qing-biao, WANG Tao, TIAN Cheng-lin, et al. Holes of smooth blasting application of shaped charge device and decked charge in perimeter [J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 77-84. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] 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)
- [15] 黄建军. 聚能射流对运动体斜侵彻的仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [15] HUANG Jian-jun. Simulation study of a moving body in oblique penetration of shaped charge jet [D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [16] 赵飞扬. 组合药型罩对双层反应装甲冲击起爆研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [16] ZHAO Fei-yang. Study on the detonation of double layer eraimpacted by combination liner [D]. Taiyuan: North University of China, 2019. (in Chinese)
- [17] 陈必港. 隧道掘进光面爆破空气柱长度的研究与应用[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [17] CHEN Bi-gang. Research and application of air column length for smooth blasting in tunnel excavation abstract [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)
- [18] 李鹏永,张侃,赵铮. 某种固体推进剂点火增长仿真模型研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(5): 43-48.
- [18] LI Peng-yong, ZHANG Kan, ZHAO Zheng. Study on simulation model of ignition growth of solid propellant [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(5): 43-48. (in Chinese)
- [19] J B Ribeiro, C Silva, R Mendes. Estimation of the reactive flow model parameters for an ammonium nitrate-based emulsion explosive using genetic algorithms [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2010, 28(1): 180-204.
- [20] 宋锦泉. 乳化炸药爆轰特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2000.
- [20] SONG Jin-quan. Study on the detonation characteristics of emulsion explosives [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2000. (in Chinese)
- [21] 李鹏永,张侃,赵铮. 某种固体推进剂点火增长仿真模型研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(5): 43-48.
- [21] LI Peng-yong, ZHANG Kan, ZHAO Zheng. Study on simulation model of ignition growth of solid propellant [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(5): 43-48. (in Chinese)