

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.025

不同材质聚能管在破碎围岩光面爆破中的应用研究^{*}

李欣然^{1a}, 张昌锁^{1a}, 谢 炜^{1a}, 张胜利^{1b}, 闫 鹏², 裴富国², 高山森²

(1. 太原理工大学 a. 矿业工程学院; b. 原位改性采矿教育部重点实验室, 太原 030024;
2. 山西昔榆高速公路有限公司, 晋中 030600)

摘 要: 本研究针对隧道光面爆破中常规聚能爆破方法存在装药集中度大、装药施工困难以及底部集中装药易引起超挖和围岩损伤等问题, 设计了一种 PVC 半管扣合结构的新型聚能管。在初步验证其效果的基础上, 进一步提出针对软弱破碎围岩的可重复使用钢制切缝聚能管。通过数值模拟对比 PVC 聚能管与钢制切缝聚能管的聚能效应, 发现钢制切缝聚能管不论是切缝处的峰值应力还是形成的裂纹长度, 都明显大于 PVC 聚能管, 钢制切缝聚能管在切缝方向与非切缝方向的峰值压力比值为 5.51, 远大于 PVC 聚能管的比值 1.65, 体现了更强的聚能效果与保护效果; 在双孔爆破中, 钢制切缝聚能管线装药密度为 113 g/m 即可达到 PVC 聚能管 314 g/m 的爆破效果, 表现出更优的定向断裂能力和对破碎软弱围岩的保护效果。在节理裂隙较发育的隧道围岩中进行爆破试验结果表明, PVC 聚能管可实现炸药在炮孔中的均匀分散与能量定向释放, 提高半孔率, 减小对保留围岩损伤。通过对有无钢制切缝聚能管的爆破试验前后的对比, 验证了其聚能效果与可重复使用性。研究表明: 所提出的钢制切缝聚能管更适用于软弱破碎围岩爆破工程, 能够在低药量条件下有效控制爆破扰动, 具有较好的工程应用与推广价值。

关键词: 光面爆破; 破碎围岩; 聚能切缝爆破; 钢制切缝聚能管; 数值模拟

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0235-10

Application of Shaped Charge Tubes with Different Materials in Smooth Blasting of Fractured Surrounding Rock

LI Xin-ran^{1a}, ZHANG Chang-suo^{1a}, XIE Wei^{1a}, ZHANG Sheng-li^{1b}, YAN Peng², PEI Fu-guo², GAO Shan-sen²

(1. a. School of Mining Engineering; b. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanxi Xiyu Expressway Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: This study investigates limitations of conventional shaped-charge blasting in tunnel smooth blasting applications, including excessive charge concentration, operational challenges in charge placement, and induced over-break and surrounding rock damage from concentrated bottom charges. To address these problems, an innovative PVC semi-tubular clasp-shaped charge tube was developed. Following initial effectiveness validation, a reusable steel slit-type charge tube was subsequently designed specifically for weak and fractured surrounding rock mass. Numerical

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-23

网络首发日期 (Published online): 2026-06-15

作者简介: 李欣然 (2001-), 女, 山西省临汾人, 硕士研究生, 从事工程爆破方向的研究, (E-mail) 850192470@qq.com。

通信作者: 张昌锁 (1968-), 男, 山西省原平人, 教授、博士生导师, 从事工程爆破及岩土力学方向的研究, (E-mail) zhangchangsu@tyut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374134); 山西省自然科学基金资助项目 (202203021221082)

About the author: LI Xin-ran (2001-), female, born in Linfen city, Shanxi province, master's degree candidate, engaged in research in the field of engineering blasting, (E-mail) 850192470@qq.com.

Corresponding author: ZHANG Chang-suo (1968-), male, born in Yuanping city, Shanxi province, professor, doctoral supervisor, engaged in research in engineering blasting and geotechnical mechanics, (E-mail) zhangchangsu@tyut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52374134), Natural Science Foundation of Shanxi Province (Grant No. 202203021221082)

simulations comparing shaped-charge effects between PVC and steel slit-type charge tubes revealed that the steel variant exhibited a substantially greater peak stress concentration at the slit and generated longer fracture propagation lengths than its PVC counterpart. The steel slit-shaped charge tube achieved a peak pressure ratio of 5.51 between the slit and non-slit directions, significantly surpassing the PVC tube's ratio of 1.65, thereby demonstrating superior directional energy concentration and protection of the surrounding rock mass. In double-hole blasting tests, the steel slit-shaped charge tube achieved results equivalent to those of the PVC tube at a significantly lower linear charge density (113 g/m vs. 314 g/m), demonstrating enhanced directional fracturing efficiency and superior protection for the weak and fractured surrounding rock mass. Field tests in jointed tunnel rock confirmed that the PVC-shaped charge tube enabled uniform explosive distribution and controlled directional energy release, effectively increasing half-cast hole rate while minimizing damage to the retained surrounding rock mass. Comparative blasting tests with/without the steel slit-shaped charge tube confirmed its effective directional energy concentration and reusability. Results demonstrate this steel tube's superior suitability for blasting projects in weak and fractured surrounding rock masses, achieving effective disturbance control with reduced explosive quantities while showing significant potential for practical engineering applications and widespread implementation.

Key words: smooth blasting; fractured surrounding rock; shaped charge slitting blasting; steel slitted shaped charge tube; numerical simulation

在隧道掘进爆破工程中,光面爆破技术被广泛应用于维持围岩稳定性和改善成型质量。在软弱破碎岩层中实施光面爆破时,因岩体强度低、节理发育、自稳能力差,易受爆破扰动而发生冒顶、片帮或塌方,对光面爆破技术提出了更高要求^[1]。为此,采用聚能爆破方法实现能量的定向释放和断裂控制,已成为提高光面爆破效果的关键技术手段^[2]。目前普遍采用的聚能爆破方式根据作用原理与结构形式的不同,主要分为三类:切槽爆破、聚能装药爆破以及切缝装药爆破。多年以来,国内外学者围绕上述方法开展了大量研究,并在理论探索与工程应用方面取得了丰富成果。

切槽爆破技术通过专用设备在炮孔内壁预定聚能方向加工 V 型沟槽^[3]。爆炸作用下,槽口尖端因应力集中效应,能够引导爆生裂隙优先沿预定方向产生并扩展。杨仁树等利用动态应变测试系统探究切槽炮孔的爆破效应^[4],结果表明沿切槽方向应力场较强,裂纹扩展较好。李清等应用动焦散线测试系统分析探讨了切槽爆破的应力场^[5],结果表明切槽角为 60°时聚能效果最好。程雨航等发现了炮孔壁缺陷处会削弱应力波和爆生气体的作用^[6],抑制裂纹扩展。尽管切槽爆破能够实现良好的定向爆破效果,但其成孔难度较高、钻孔工序耗时较长。当岩体完整性与均质性较差时,切槽炮孔往往难以成形。因此,切槽炮孔爆破方法未能在隧道爆破中获得广泛应用。

聚能装药是一种通过改变药卷形状实现聚能效应。在药卷两侧形成向内凹陷的锥形或半圆形空腔,并在该空腔表面覆盖一层金属药型罩的装药结

构,起爆后,空腔周围炸药的爆轰产物会驱使药型罩沿其轴线发生高速汇聚变形,从而形成一股具有高密度能量的聚能射流^[7]。穆朝民等在煤层增透爆破中应用聚能装药技术^[8],实现了对煤体的定向增强致裂,同时保障顶板结构的稳定性。朱飞昊等将聚能装药用于掘进构造带中^[9],在提高聚能效果的同时抑制了动力灾害的发生。Meng 等发现采用聚能装药爆破可以削弱坚硬顶板强度^[10],控制巷道变形,并提高巷道稳定性。许国庆等提出了一种弧形聚能装药结构^[11],通过数值模拟试验得出比锥形药包炸药消耗少且有效装药率高,形成的应力更集中,更有利于形成初始裂纹。聚能装药爆破相较于切槽爆破虽在工艺上更为简便,但其装药槽结构形态各异、变形复杂,常规药卷在装填过程中难以实现充分贴合,导致实际施工操作中具有一定困难。此外,聚能射流的形成强烈依赖于金属材料性能,若使用能量较低的炸药,其定向破裂作用将明显减弱。因此,聚能装药在隧道爆破中的应用范围仍然较为有限。

切缝装药爆破的实质是在药卷的外侧设置具有一定密度和强度的管状外壳,管状外壳上开有不同形状的切槽。该结构能够增强缝口区域的爆破能量,同时削弱其他方向的爆炸载荷,从而使裂隙优先沿切缝方向产生并扩展^[12]。Yang 等分别通过爆破试验确定了切缝装药的轴向与径向不耦合系数的最优值^[13]。杨仁树等观察了不锈钢管、PVC 管和有机玻璃管下的爆炸冲击波与爆生气体^[14,15],并通过分析冲击波超压,得出不锈钢管沿切缝方向与垂直切缝方向的超压比最大。刘朕等提出的双聚能药包爆

破技术能够减少药量的同时增加聚能效果^[16]。傅师贵等研究了不同地应力下切缝装药爆破时炮孔间各点应力峰值与裂纹扩展速度^[17]。田家璇等采用PVC管设计的新型聚能管实现了岩石的定向断裂^[18]。切缝装药因其具有良好的定向断裂效果、相对简便的制备工艺以及较高的经济性,能够适应多种复杂工程条件,已被广泛应用于各类岩体中的定向断裂控制,特别是在光面爆破和预裂爆破中表现尤为突出^[19]。然而,目前常用的切缝管长度通常为40~80 cm,此类尺寸虽便于装药操作,却难以满足深孔爆破的工况需求。若增加切缝管长度,虽可适应更深钻孔,但会显著增加装药难度,易导致炸药分布不均、局部装药过密,影响爆破安全性与成缝质量。

为了克服以上缺点,本文设计了一种兼具良好聚能效果与装药便利性的PVC聚能管,并提出了一种可重复使用的高强度聚能钢制切缝聚能管,旨在提升软弱破碎围岩中的聚能爆破效果,有效降低施工风险。

1 聚能管的设计

1.1 PVC聚能管的设计

传统光面爆破周边眼装药方法是采用竹片间隔装药,药包间距40~45 cm,如图1所示,该装置虽然能够实现分散装药,但每段装药量较大。若药卷长度过短,在装填过程中容易发生松动甚至脱落,而过

大的每段装药对于破碎围岩容易引起岩体局部过度扰动,增加超挖量。

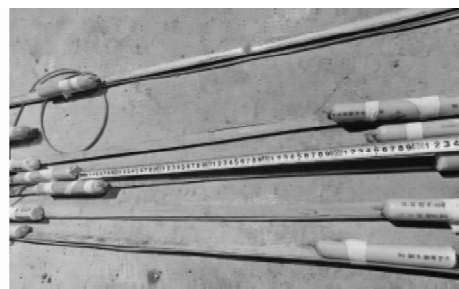


图1 竹片间隔装药

Fig. 1 Decked charges with bamboo strips

因此设计了一种由聚能半管与固定环组装而成的新型聚能结构(结构示意图参见图2)。该聚能半管采用PVC材质,外径36 mm,内径32 mm与炸药直径匹配。长度可根据炮孔深度选取,以适应不同爆破工况的需求。半管圆心角设置为165°,能够在扣合后侧向形成有效切缝,并可结合实际爆破要求调整该角度大小从而改变切缝宽度,增强切缝爆破效果。固定环布置于聚能半管内部,用PVC短管制成,外径32 mm与半管内径匹配。用于保持半管扣合后的形状,并防止在运送过程中炸药滑动,从而实现装药量的精确控制与分散装药。此外,整体PVC管能够实现周边眼的快速装药,同时也有助于提高施工效率与操作安全。

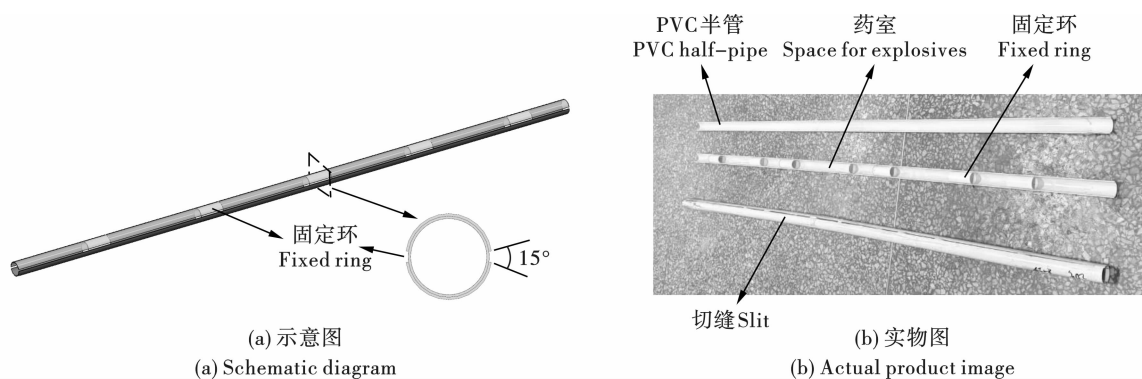


图2 PVC聚能管结构示意图与实物图

Fig. 2 Schematic diagram and actual image of PVC shaped charge tube

1.2 钢制切缝聚能管的设计

对于隧道破碎围岩,为了更好地减小对保留围岩的扰动,需要进一步减少药量提高聚能管的聚能效果,因此设计了钢制切缝聚能管。选用由Q235钢材制成的无缝钢管,其内径为20 mm,外径为38 mm。为提高钢管的可重复使用性,设置了间隔切缝,同时设计了聚能管的长度为1 m。在其两侧对称布置各20个均匀分布的切缝,切缝间隔为

18 mm,切缝尺寸为长30 mm×宽8 mm,具体结构如图3所示。

2 切缝效果数值模拟

2.1 单孔爆破数值模拟

(1) 数值模型与参数

本次模拟通过HyperMesh进行前处理建模,采用LS-DYNA及LS-PrePost分别进行计算及后处理。

空气和炸药采用 ALE 算法进行计算^[20],而岩石和切缝管采用 Lagrange 算法,空气、炸药、岩石和切缝

管之间采用流固耦合。

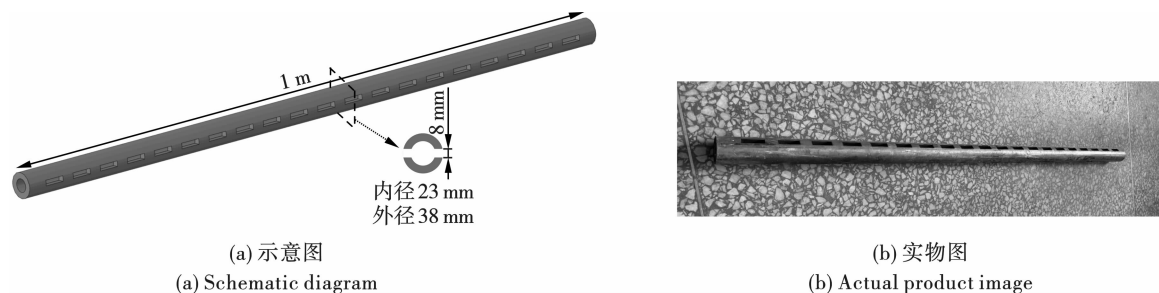


图 3 钢制切缝聚能管结构示意图与实物图

Fig. 3 Schematic diagram and actual image of steel slitted shaped charge tube

考虑到三维模型中单元网格规模庞大,为保证计算精度,在数值模拟过程中对 1 m 长的原型钢管进行了合理简化。原设计中钢管共有 20 个切缝,采用其中一个切缝单元段用以表征钢管在轴向方向上的结构特征。简化后的模型如图 4 所示。

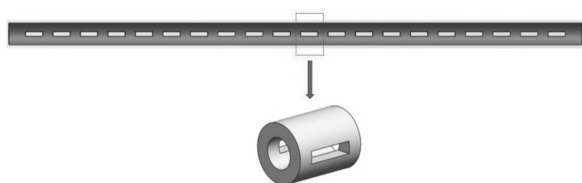


图 4 切缝管简化后模型

Fig. 4 Simplified model of slitted pipe

岩石尺寸为长 100 cm × 宽 100 cm × 高 4.9 cm,模型上下表面设置固定边界,其他方向均设为无反射边界。炮孔位于模型中部,直径设置为 40 mm,药卷的直径为 12 mm,切缝管外径为 38 mm,内径为 20 mm,切缝的宽度为 8 mm,长度为 3 cm。岩石选取 Johnson-Holmquist-Concrete 模型^[21],由于 HJC 本构模型不考虑材料的拉伸损伤,因此设置 * MAT_

ADD_EROSION 关键字,关键字设置拉应力失效和剪应变失效,用来模拟岩石爆破裂纹扩展状态。模型建立如图 5 所示,相关参数见表 1 ~ 表 5。

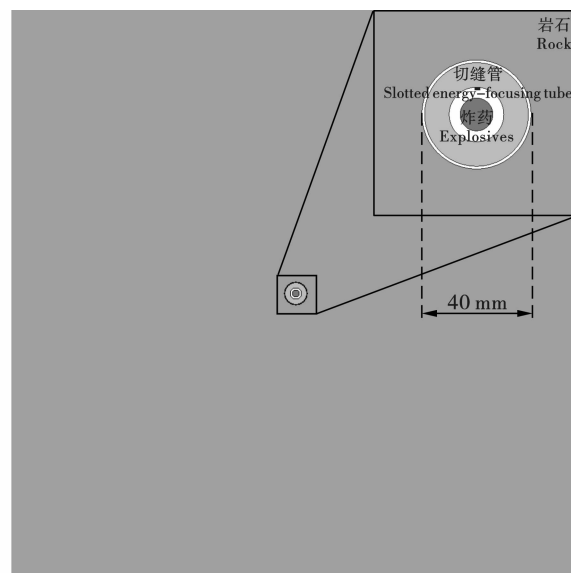


图 5 单孔爆破模型

Fig. 5 Single-hole blasting model

表 1 岩石材料参数

Table 1 The parameters of rock

密度 Density/ (kg · m ⁻³)	剪切模量 Shear modulus/ GPa	压力硬化系数 Pressure hardening coefficient/N	抗压强度 Compressive strength/MPa	最大拉应力 Maximum tensile stress/MPa	损伤常数 Damage constant D_1	损伤常数 Damage constant D_2
2600	14.86	0.61	80	6.2	0.04	1

表 2 炸药材料参数

Table 2 The parameters of explosive

密度 Density/ (kg · m ⁻³)	D / (m · s ⁻¹)	P_{CJ} / GPa	A	B	R_1	R_2	ω	单位体积内能 Specific internal energy per unit volume/GPa
1100	3500	4.3	42	0.1	4.6	1.15	0.28	3.51

注: D 为爆轰速度; P_{CJ} 为 CJ 压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 、 E_0 为状态方程参数。

表 3 空气材料参数
Table 3 The parameters of air

密度 Density/ (kg · m ⁻³)	<i>C</i> ₀	<i>C</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	<i>C</i> ₄	<i>C</i> ₅	<i>C</i> ₆	单位体积内能 Specific internal energy per unit volume/GPa	相对体积 Relative volume
1290	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5	1

注:*C*₀ 到 *C*₆ 为 LINEAR POLYNOMIAL 线性多项式状态方程参数,*C*₀ 定义初始压力,*C*₁ 是体积黏性,*E*₀ 为单
单位体积。

表 4 钢管材料参数
Table 4 The parameters of steel tube

密度 Density/ (kg · m ⁻³)	弹性模量 Modulus of elasticity/GPa	泊松比 Poisson ratio	屈服应力 Yield stress/MPa	切线模量 Tangent modulus/MPa	<i>src</i>	<i>srp</i>
7850	210	0.3	355	27	4000	5

表 5 PVC 管材料参数
Table 5 The parameters of PVC

密度 Density/ (kg · m ⁻³)	弹性模量 Modulus of elasticity/GPa	泊松比 Poisson ratio	屈服应力 Yield stress/MPa	<i>src</i>	<i>srp</i>
1300	3	0.25	22	252	5.96

(2) 模拟结果与分析

模拟结果如图 6 所示,10 μs 时刻,爆轰波作用阶段,切缝管的存在使聚能方向岩体率先承受高幅值的集中压应力,该应力值远超岩体的动态抗压强度,导致该区域迅速生成初始裂隙。随后,爆轰波能

量逐渐衰减,转化为应力波继续在岩体中传播。此后,爆生气体迅速贯入已形成的裂隙中,使得裂纹尖端岩体承受拉应力而发生破坏,裂纹在爆生气体的持续推动下进一步扩展。

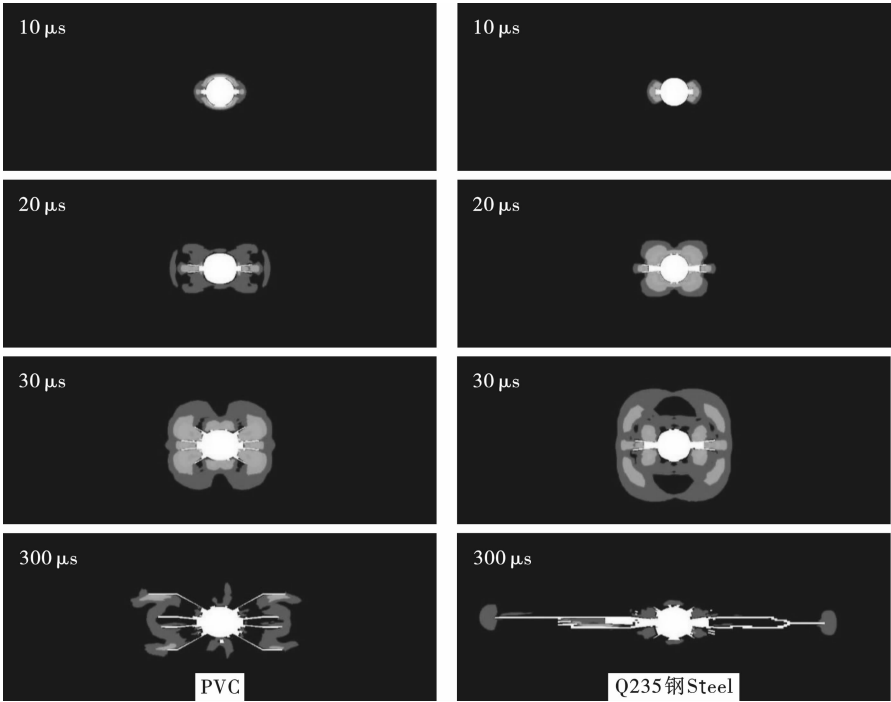


图 6 裂纹扩展等效应力云图
Fig. 6 Von Mises stress nephogram of crack growth

在非聚能方向,首先由于切缝的存在,爆轰产物优先从切缝中冲出,降低了其他方向爆轰产物的压力;其次炸药与管壁间存在空气间隙,爆轰波在穿过该空气层后显著衰减为应力波。在钢制切缝聚能管爆破中,在钢制切缝聚能管不破裂的时候,其余部分在经钢管切缝透出的爆轰产物分散在管壁-孔壁间空气缓冲后,才传递至围岩。此时岩体所受压力已低于其抗压强度,从而有效维护了该区域岩体的完整性,抑制了被非聚能岩体的裂隙产生与扩展。相比之下,在 PVC 聚能管爆破中,爆轰波作用后 PVC 管迅速破裂,导致非聚能方向岩体失去保护,部分爆轰气体作用于非聚能方向岩体。同时由于可进入裂隙中的爆轰气体量减少,裂隙扩展能力显著减弱,因此 PVC 聚能爆破所形成的裂纹长度远小于钢制切缝聚能管。

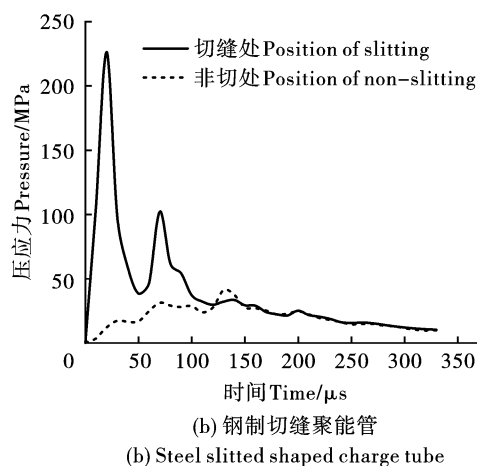
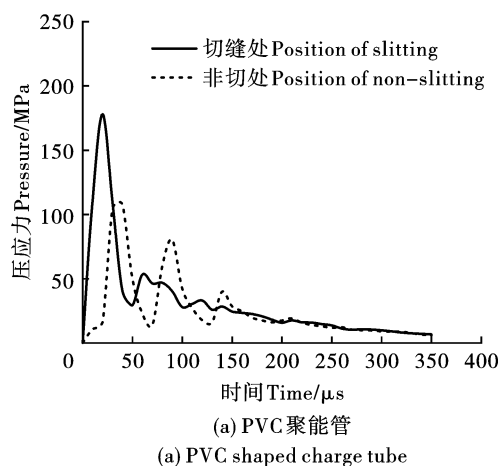


图 7 空气单元压力时程曲线

Fig. 7 Pressure time-history curve of the air elements

2.2 钢制切缝聚能管的可复用性模拟

为评估钢制切缝聚能管的可重复使用性能,建立了包含空气、炸药与切缝管的数值模型,采用重启算法模拟炸药在管内重复爆破 5 次,每次历时 500 μs 。在切缝管的非切缝处均匀选取 8 个测点,其塑性应变变化如图 8 所示。结果表明,每次爆破后塑性应变虽有所累积,但增幅较小,单元的最大塑性应变为 0.015。模拟结果表明,钢制切缝聚能管在重复使用 5 次后仍具备继续使用的条件,显示出良好的经济性,有助于降低材料运输频次与工程成本。

2.3 113 g/m 线装药密度下双孔爆破数值模拟

(1) 模型建立

光面爆破一般同时起爆周边孔,为此对双孔同时起爆条件下炮孔周围岩体受力变化情况 & 爆破后岩体裂隙扩展规律进行模拟分析。

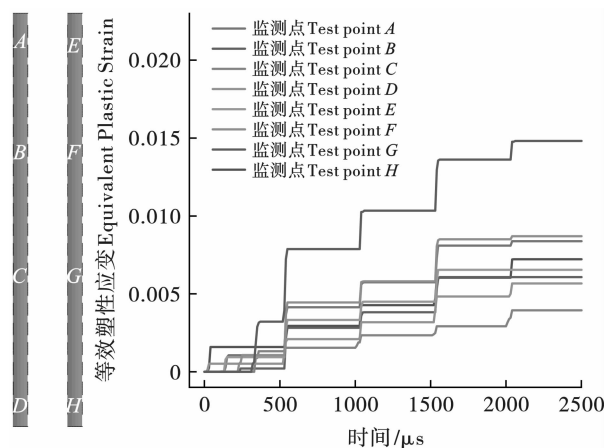


图 8 各测点位置及其等效塑性应变曲线

Fig. 8 Locations of each test point and their equivalent plastic strain curves

岩石尺寸大小为长 120 cm $\times$ 宽 80 cm $\times$ 厚

4.8 cm,在岩体模型中设计布置 2 个爆破孔,钻孔孔径为 40 mm,间距为 50 cm,药卷的直径为 12 mm,如图 9 所示,模型上下表面设置固定边界,其他方向均设为无反射边界,钢管和 PVC 管尺寸参数与前文一致。

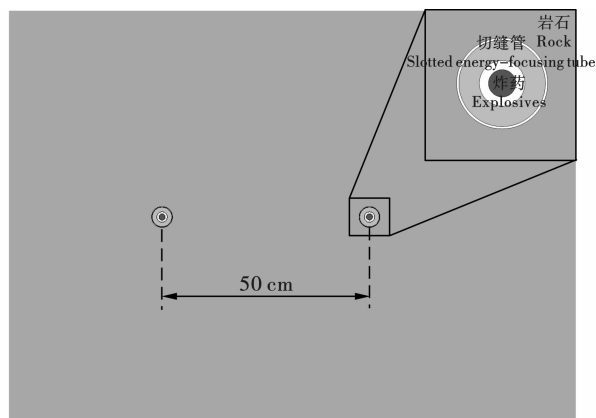


图 9 双孔爆破模型

Fig. 9 Double-hole blasting model

(2) 模拟结果分析

图 10、11 所示,在起爆后 $10\ \mu\text{s}$ 时刻,钢管与 PVC 聚能管均在聚能方向形成初始裂缝。随着应力波持续传播,爆生气体随之贯入裂隙并进一步推动其扩展。在钢管模型中,由于钢管结构强度高、耐压性能好,能有效维持爆生气体压力,使其在裂缝中作用时间更长、能量释放更充分,因此裂缝持续稳定扩展并最终实现贯通。

而在 PVC 聚能管中,尽管初始时刻在聚能方向形成集中应力并产生裂隙,但由于 PVC 材料强度较弱,在爆轰波作用下很快发生破坏。管体失效后,部分爆生气体泄漏至非聚能方向,导致作用于切缝内的气体压力和持续时间显著降低。如图 11 所示,后续阶段中爆生气体难以在切缝中维持足够的扩展动力,裂缝扩展较早终止。

上述现象表明,钢管不仅在初始阶段能有效聚集爆炸能量,在持续加载阶段也更能保持爆生气体的作用效率,其整体聚能效果远优于 PVC 聚能管。

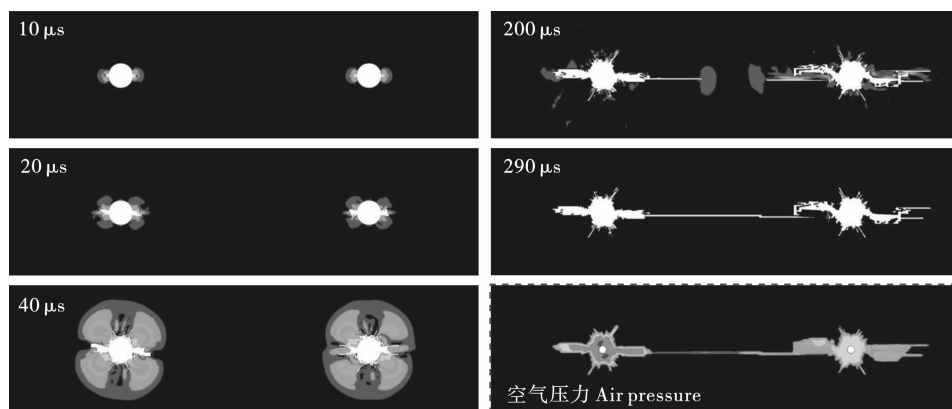


图 10 钢制聚能管裂纹扩展等效应力云图

Fig. 10 Von Mises stress nephogram of crack growth in steel-made slotted energy-focusing tube

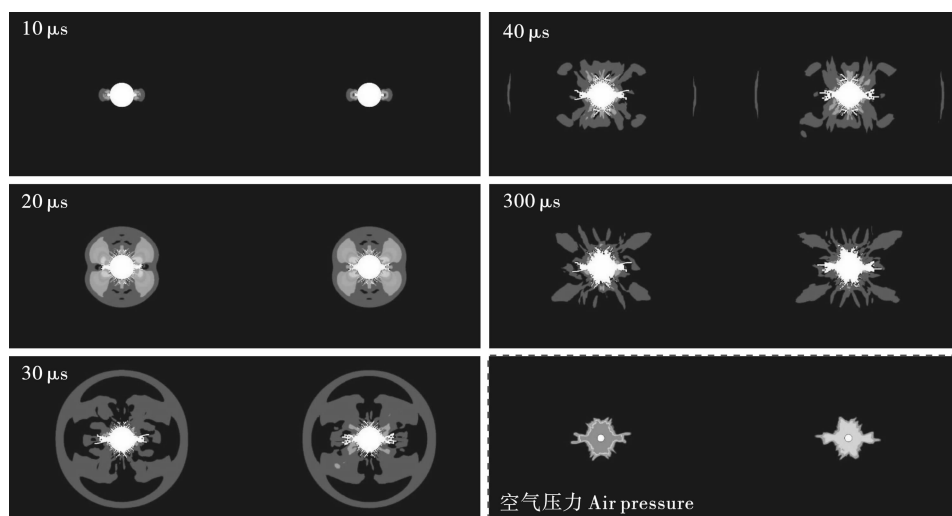


图 11 PVC 聚能管裂纹扩展等效应力云图

Fig. 11 Von Mises stress nephogram of crack growth in PVC shock tube

2.4 不同线装药密度下 PVC 聚能管双孔爆破数值

鉴于前述研究中线装药密度为 113 g/m 时 PVC 聚能管的爆破效果不佳,为探究线装药密度对其聚能爆破性能的影响,本文进一步开展了线装药密度为 200 g/m 和 314 g/m 的数值模拟研究。三组工况下的裂纹扩展形态与演化过程如图 12 所示。

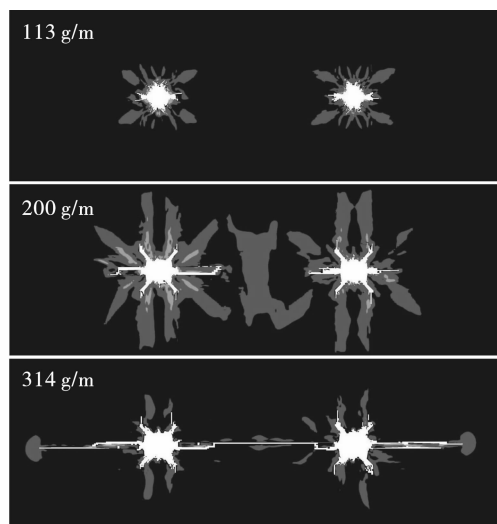


图 12 $t = 500 \mu\text{s}$ 不同线装药密度下的裂纹扩展等效应力云图

Fig. 12 Von Mises stress nephogram of crack growth at $t = 500 \mu\text{s}$ under different linear charge densities

从图中可以看出,随着线装药密度的增大,裂纹扩展长度不断增加,仅当线装药密度为 314 g/m 时,裂纹才能够完全贯通。这一结果表明,在使用 PVC 聚能管进行爆破时,若想获得理想的爆破效果,需增大药量。而采用钢制切缝聚能管时线装药密度为 113 g/m 即可达到与 PVC 聚能管线装药密度 314 g/m 相当的爆破效果。在软弱围岩爆破中,减少炸药用量可有效降低爆破扰动,更好地维持围岩的稳定性,从而提升成缝质量与控制精度。

3 现场工程试验

3.1 PVC 聚能管工程试验

为验证 PVC 聚能管的聚能效果,在隧道断面左右两侧分别采用普通装药与 PVC 聚能管装药,观察其半孔率、轮廓平整度及超欠挖现象。

(1) 聚能管的装配

如图 13 所示,爆破实施前,首先依据预设的炸药空气间隔将固定环与 PVC 半管黏合固定,随后将导爆索贯穿整个 PVC 聚能管进行铺设,再将乳化炸药切割为对应 75 g 药量长度。完成切割后,将乳化炸药按照预定间隔依次贴紧固定环放置,线装药密度为 140 g/m。再将一段整卷炸药作为起爆药放置在聚能管一端,填孔装药时将这部分位于炮孔底部,用以增强底部装药。图 14 为装置放置现场。

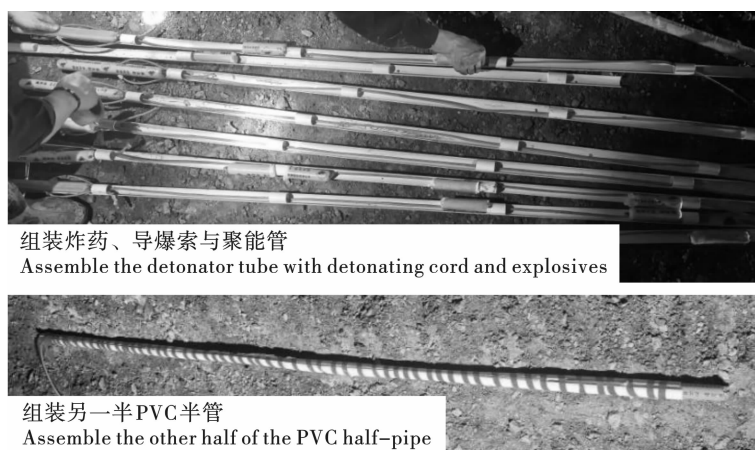


图 13 聚能管装配过程

Fig. 13 Assembly process for shaped charge tube

(2) 爆破效果分析

图 15 为普通装药与 PVC 聚能管装药爆破后的断面对比图。可以看出,左侧普通装药有部分欠挖且轮廓不平整,半孔率较低。而右侧采用 PVC 聚能管装药的隧道轮廓较为平整,基本沿周边孔连线方向,半孔率达 95% 以上。实践结果表明,PVC 聚能管能够有效增强爆炸能量的聚集效果,并实现更加均匀的能量释放,从而显著降低爆破对岩体的损伤,

减少大块率,有效控制碎石粒径。这不仅有助于提升施工效率,也降低了综合成本,为复杂地质与空间约束条件下的隧道爆破工程提供了可靠的技术手段与工程保障。

另外,使用激光测距仪对隧道断面进行测量,根据测量结果进一步对比两种装药方法。将断面均匀划分为 60 个测点后连续测量记录,如图 16 所示为围岩断面检测结果。通过对比现场实际数据,

断面左侧所采用的普通装药爆破方案超欠挖情况较为严重,最大超挖量达到 0.562 m,而断面右侧通过采用 PVC 聚能优化方案后,最大超挖量降低至约 0.203 m,并未出现欠挖现象。由此可见,该装置不仅实现了分散装药,而且增强了聚能效果,在控制超欠挖现象方面具有明显优势。



图 14 聚能管放置现场
Fig. 14 Shaped charge tube installation Site

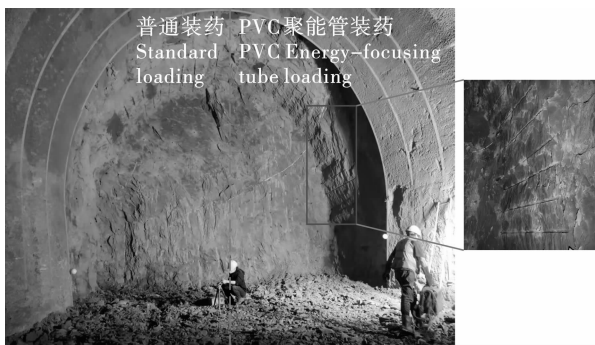


图 15 隧道断面图
Fig. 15 Tunnel section diagram

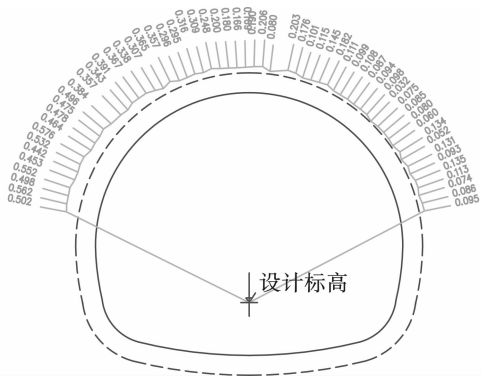


图 16 围岩断面检测结果
Fig. 16 Detection results of surrounding rock section

3.2 钢制切缝聚能管工程试验

选取两根 Q245 钢材的无缝钢管,内径为 40 mm,外径为 42 mm,长度为 110 cm,一根中放入上文设计的钢制切缝聚能管,一根不放,分别在其中放入 3 根导爆索,每根导爆索炸药含量约为 15 g,如图 17、18 所示,只有导爆索的钢管形态未见明显变

化,而放入钢制切缝聚能管的钢管被炸烂为麻花状,切缝管爆后形态也未见明显差异,可见放入的切缝管具有较强的聚能作用,同时也验证了钢制切缝聚能管的可重复使用性能。



图 17 无钢制切缝聚能管的爆破结果
Fig. 17 Blasting results without steel slitted shaped charge tube

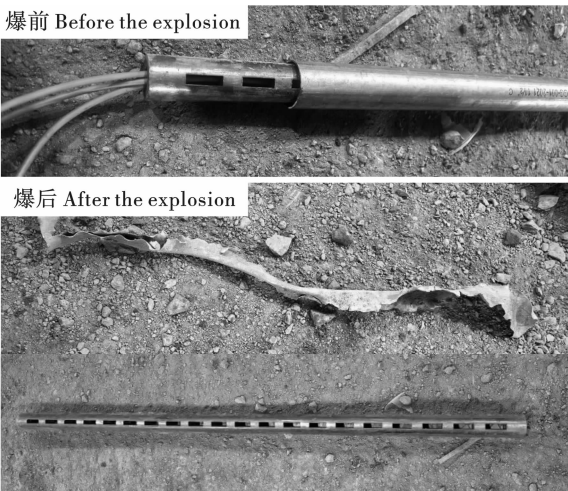


图 18 有钢制切缝聚能管的爆破结果
Fig. 18 Blasting results with steel slitted shaped charge tube

4 结论

- (1) 基于聚能效应设计的采用 PVC 半管与固定环组合的 PVC 聚能管和钢制切缝聚能管均可实现一定的聚能效应,使能量沿切缝方向集中释放,形成初始裂纹。在爆生气体作用阶段,钢制切缝聚能管最终形成的裂纹远长于 PVC 聚能管;钢制切缝聚能管的切缝方向与非切缝方向的峰值压力的比值为 5.51,而 PVC 聚能管的比值为 1.65,体现了更好的聚能效果与保护效果。
- (2) 钢制切缝聚能管使用 PVC 聚能管三分之一的药量就可达到相同的爆破效果。这表明钢制切缝聚能管可在低药量条件下实现聚能效果并控制爆破扰动,有利于软弱破碎围岩中的光面爆破轮廓成型,减小超挖。
- (3) 通过现场工程试验验证了 PVC 聚能管可以

实现炸药在炮孔内分散布设,有效改善了能量分布,隧道成型效果较好。对比有无钢制切缝聚能管的爆破结果,验证了钢制切缝聚能管的聚能效果且具有可重复使用性。

参考文献 (References)

- [1] 黄高翔,许国庆,姚 强,等.小断面隧洞聚能水压光面爆破试验[J].爆破,2025,42(1):89-96.
- [1] HUANG Gao-xiang, XU Guo-qing, YAO Qiang, et al. Test of shaped-charge hydraulic smooth blasting for small section tunnel[J]. Blasting, 2025, 42(1): 89-96. (in Chinese)
- [2] 朱 凯,张学民,龙立敦,等.C型开口聚能管爆破机理与隧道光爆优化效果研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(10):3849-3863.
- [2] ZHU Kai, ZHANG Xue-min, LONG Li-dun, et al. Study on blasting mechanism of C-type opening energy-gathering tube and optimization effects on tunnel smooth blasting[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2024, 55(10): 3849-3863. (in Chinese)
- [3] 陈思羽,黄正祥.炸高对线性聚能装药射流毁伤混凝土墙体效果的影响[J].爆破器材,2024,53(3):43-47.
- [3] CHEN Si-yu, HUANG Zheng-xiang. Influence of stand-off on the damage of linear shaped charge jet on concrete walls[J]. Explosive Materials, 2024, 53(3): 43-47. (in Chinese)
- [4] 杨仁树,宋俊生,杨永琦.切槽孔爆破机理模型试验研究[J].煤炭学报,1995(2):197-200.
- [4] YANG Ren-shu, SONG Jun-sheng, YANG Yong-qi. Model experiment study on the blasting mechanism of slotted holes[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 1995(2): 197-200. (in Chinese)
- [5] 李 清,王平虎,杨仁树,等.切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验[J].爆炸与冲击,2009,29(4):413-418.
- [5] LI Qing, WANG Ping-hu, YANG Ren-shu, et al. Dynamic focusing line experiment on the dynamic mechanical characteristics of slot hole blasting[J]. Explosions and Impacts, 2009, 29(4): 413-418. (in Chinese)
- [6] 程雨航,刘 锋,代 伟,等.炮孔壁缺陷对切槽爆破裂纹扩展的影响[J/OL].爆炸与冲击:1-18. [2025-09-23]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1148.03.20250108.1641.033>.
- [6] CHENG Yu-hang, LIU Feng, DAI Wei, et al. Influence of notch hole wall defects on the expansion of notch blast cracks[J/OL]. Explosions and Impacts: 1-18. [2025-09-23]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1148.03.20250108.1641.033>. (in Chinese)
- [7] 刘亚昆,尹建平,张洪成,等.爆炸成型横向效应增强弹丸成型及侵彻研究[J].兵器装备工程学报,2025,46(8):110-117.
- [7] LIU Ya-kun, YIN Jian-ping, ZHANG Hong-cheng, et al. Study on the formation and penetration of the explosively formed penetrator with enhanced lateral efficiency[J]. Journal of Armament Engineering, 2025, 46(8): 110-117. (in Chinese)
- [8] 穆朝民,王海露,黄文尧,等.高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J].岩土力学,2013,34(9):2496-2500.
- [8] MU Zhao-min, WANG Hai-lu, HUANG Wen-yao, et al. Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability[J]. Geotechnical Mechanics, 2013, 34(9): 2496-2500. (in Chinese)
- [9] 朱飞昊,刘泽功,高 魁,等.构造带内巷道定向聚能爆破掘进围岩损伤特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2037-2047.
- [9] ZHU Fei-hao, LIU Ze-gong, GAO Kui, et al. Experimental study on rock damage of roadway excavation by cumulative blasting in structural coal[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2037-2047. (in Chinese)
- [10] MENG Ning-kang, CHEN Yong, BAI Jian-biao, et al. Numerical simulation of directional fracturing by shaped charge blasting[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(5): 1824-1839.
- [11] 许国庆,黄高翔,王协康,等.新型弧形聚能爆破作用下的岩石破裂演化机制研究[J].岩土力学,2025(10):1-14.
- [11] XU Guo-qing, HUANG Gao-xiang, WANG Xie-kang, et al. Research on rock cracking and evolution mechanism under the action of new type of arc-shaped charge blasting[J]. Geotechnical Mechanics, 2025(10): 1-14. (in Chinese)
- [12] 耿晓轲,杨鹏辉,余文洋,等.基于环向切缝药包的隧道掏槽爆破技术[J].工程爆破,2025,31(4):93-101.
- [12] GENG Xiao-ke, YANG Peng-hui, YU Wen-yang, et al. Technology of tunnel cutting blasting based on circumferential slit charge[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(4): 93-101. (in Chinese)
- [13] YANG Guo-liang, YANG Ren-shu, HUO Chuan, et al. Numerical simulation of air-deck slotted charge blasting[J]. Advanced Materials Research, 2011, 143: 787-791.
- [14] YANG Ren-shu, YOU Yuan-yuan, ZUO Jin-jing, et al. Study of rock damage characteristics in decoupled slit charge blasting based on computer tomography scanning[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 290: 109532.