

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.010

## 复合顶板均散保压预裂爆破技术研究与应用\*

张志忠<sup>1</sup>, 刘玉山<sup>1</sup>, 张雪峰<sup>1</sup>, 郝兵元<sup>2</sup>, 王晨龙<sup>2</sup>, 张涛<sup>3</sup>

(1. 山西华阳集团新能股份有限公司二矿, 阳泉 045000; 2. 太原理工大学, 太原 030024;

3. 山西吉昌泰矿山工程技术有限公司, 太原 030024)

**摘要:** 复合顶板具有多层不同岩性的分层, 各分层厚度、矿物成分、波阻抗以及节理裂隙等存在显著差异, 这常常导致预裂切缝孔装药结构与分层的物理力学性质不匹配, 易造成硬岩分层无法预裂, 软岩分层因过度消耗爆炸能量形成鸡窝状爆坑, 预裂切缝难以沿炮孔全长有效贯通。为实现复合顶板均匀预裂, 采用 LS-DYNA 软件分析了装药结构对复合顶板预裂效果的影响, 在此基础上提出了复合顶板均散保压预裂爆破技术; 通过开展现场试验, 结合爆后对爆生裂隙发育情况的窥视评价, 验证了该均散保压预裂爆破技术的可行性。研究表明: 爆生气体由硬岩分层向软岩分层逃逸是造成复合顶板预裂爆炸能量利用不均的主要原因; 复合顶板均散保压预裂爆破技术按照复合顶板分层结构将预裂孔分割成多个腔体, 各分层具有独立的爆后保压腔体, 满足了预裂各分层的爆炸能量需求, 避免了炸药能量过度消耗在软岩分层, 提高了硬岩分层预裂效果。

**关键词:** 复合顶板; 均散保压预裂爆破技术; 均匀预裂

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)03-0086-09

## Research and Application of Dispersed Charge Pre-splitting Blasting Technology for Uniform Fracturing Composite Roof

ZHANG Zhi-zhong<sup>1</sup>, LIU Yu-shan<sup>1</sup>, ZHANG Xue-feng<sup>1</sup>, HAO Bing-yuan<sup>2</sup>, WANG Chen-long<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>3</sup>

(1. No. 2 Mine of Shanxi Huayang Group New Energy Co., Ltd., Yangquan 045000, China;

2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Jichangtai Mine

Engineering Technology Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Differences in thickness, mineral composition, wave impedance, and joint fissures. This often leads to a mismatch between the charge structure of the pre-splitting and cutting holes and the physical and mechanical properties of the layers, which can easily cause the complex rock layers to fail to pre-split. The soft rock layers form chicken-nest-shaped explosive pits due to excessive consumption of explosive energy, making it difficult for pre-splitting and cutting holes to penetrate the entire length of the blast hole effectively. To attain consistent pre-splitting of the composite roof, the LS-DYNA software was employed to analyze the impact of the charging structure on the pre-split-

收稿日期 (Date of reception): 2024-09-27

网络首发日期 (Published online): 2025-07-21

作者简介: 张志忠 (1975-), 男, 山西五台人, 高级工程师、本科, 主要从事煤矿安全高效绿色开采理论及技术研究工作, (E-mail) 1373711284@qq.com。

通讯作者: 张涛 (1994-), 男, 山西大同人, 工程师、硕士研究生, 主要从事采空工程及工程爆破理论及技术研究工作, (E-mail) 962941834@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (12102294)

**About the author:** ZHANG Zhi-zhong (1975-), male, born in Wutai, Shanxi Province, undergraduate, mainly engaged in research on the theory and technology of safe, efficient and green mining in coal mines, (E-mail) 1373711284@qq.com.

**Corresponding author:** ZHANG Tao (1994-), male, born in Datong, Shanxi Province, postgraduate, mainly engaged in research on the theory and technology of mining engineering and engineering blasting, (E-mail) 962941834@qq.com.

**Fund Programs:** The Youth Project of the National Natural Science Foundation of China (12102294)

ting effect of the composite roof. Based on this foundation, a uniform-dispersion and pressure-holding pre-splitting blasting technique was proposed for the composite roof. Field experiments were conducted, and in conjunction with the preliminary evaluation of the progression of post-blast fractures, the viability of this uniform-dispersion and pressure-holding pre-splitting blasting method was substantiated. The research results indicate that the escape of explosive gas from hard rock layers to soft rock layers is the primary reason for the uneven energy utilization in the pre-cracking explosion of the composite roof. The composite roof uniform dispersion pressure pre-splitting blasting technology divides the pre-splitting holes into multiple chambers according to the layered structure of the composite roof. Each layer has an independent post-explosion pressure holding chamber, which meets the explosive energy requirements of each pre-splitting layer, thereby avoiding excessive consumption of explosive energy in soft rock layers and enhancing the pre-splitting effect in hard rock layers.

**Key words:** composite roof; dispersed charging and pressure retaining pre-splitting blasting technology; uniform fracturing composite roof

切顶卸压沿空留巷无煤柱开采技术是解决常规长壁开采一面双巷留设煤柱采煤工艺存在的煤炭回采率低、巷道掘进量大以及由此带来的采掘衔接紧张等问题的有效手段之一<sup>[1]</sup>。切顶卸压沿空留巷无煤柱开采技术通过切断采场覆岩大结构向留巷围岩小结构荷载传递荷载路径,人工调整采场覆岩运移特征,达到留巷围岩小结构处于应力降低区的目的,消除采动应力影响严重化,降低留巷矿压剧烈化,并联合顶板补强支护、临时支护以及挡矸支护等支护技术实现留巷围岩小结构稳定。可见,切顶卸压是切顶沿空留巷技术的关键环节,切顶效果将直接决定矸石充填采空空间程度及限制高位岩梁结构运动空间,进而影响沿空留巷围岩控制<sup>[2-4]</sup>。

目前,切顶卸压沿空留巷研究大多集中在假设取得良好切顶效果后的留巷围岩控制机理及技术方面,侧重于切顶留巷“支-卸”协调控制的支护单方面研究,并未从卸压方面深入研究适应分层结构的复合顶板预裂爆破技术<sup>[5-10]</sup>。复合顶板具有多层岩性分层,各岩性分层厚度、矿物成分、波阻抗、层理以及节理裂隙发育程度往往存在较大差异,进而造成爆破作用下各岩性分层呈不同的爆生裂纹扩展规律。在切顶留巷不得制约采面高效生产前提下,难以根据复合顶板结构进行针对性爆破切顶卸压,只能按照大药量、小间距切缝孔的传统单一粗暴预裂爆破方式进行卸压。传统单一的顶板预裂爆破方式因未充分考量复合顶板的分层赋存特征,常引发装药结构与顶板分层岩性力学特性的匹配失衡问题。该问题不仅导致炸药爆炸能量有效利用率显著降低,还会造成硬岩分层预裂失效、软岩区域形成蜂窝状爆坑缺陷。尤为关键的是,爆炸能量被软岩分层过度吸收损耗,致使复合顶板在切缝孔全长范围内难以形成贯通裂隙网络,最终导致整体卸压效果显著弱化。见图 1。

根据复合顶板分层结构特点,形成与软、硬岩分层分布相适应的装药结构是实现复合顶板均匀预裂的关键。切缝孔装药结构对预裂切缝效果具有重要影响作用,体现在以下两方面:

(1)复合顶板切缝孔内药卷布置在硬岩分层范围时,爆炸应力波从硬岩内部传播至软、硬岩层界面将会发生显著反射,促进硬岩分层破坏;而软岩分层裂隙发育,波阻抗小于其上下两侧的硬岩分层,爆炸应力波透射至软岩内部较小,导致除硬岩以外的其他分层难以开裂,见图 1(a)所示。

(2)复合顶板切缝孔内药卷布置在软岩分层范围时,爆炸应力波直接作用在孔壁软岩上,硬岩分层孔壁不承受爆炸应力波作用,仅承受爆生气体作用。由于软岩裂隙发育,爆炸应力波将在裂隙面发生多次反射拉破岩体,造成药卷四周软岩过度粉碎,并在爆生气体挤压作用下形成鸡窝状鼓包。此时,切缝孔内药卷四周软岩过渡粉碎消耗了大部分爆炸能量,仅在爆生气体作用下硬岩分层难以开裂,见图 1(b)所示。

硬岩分层布置大药量、软岩分层布置小药量的均散装药结构可提供各分层切缝所需的爆炸能量,提高爆炸能量利用率,进而达到复合顶板切缝孔全长均匀预裂的目的。同时,为了防止硬岩分段炸药爆炸能量向软岩分层逃逸,在硬岩分层和软岩分层两个药段中间封堵炮泥加以阻断,进而延长爆炸应力波和爆生气体对硬岩分层的作用时间,实现各取所需、均匀预裂的目的,见图 1(c)所示。从孔底至孔口药量逐渐减小的常规空气间隔装药,并未考虑复合顶板岩性结构,存在装药与岩性不匹配问题,爆后切缝从孔底到孔口裂隙范围逐渐减小,总体上倒锥形,相邻预裂孔切缝难以贯通,见图 1(d)所示。

为此,针对复合顶板预裂中装药结构与分层岩性力学特性匹配失衡、爆生气体向软岩分层逸散、硬

岩分层破岩效能不足、软岩分层过度破碎、爆炸能量利用率低下及复合顶板均匀致裂困难等系列问题,提出复合顶板均散保压预裂爆破技术。该技术具有两大创新特征:特征一:采用均散装药结构适配复合顶板岩性分层赋存规律,通过差异化药量分配精准

满足各分层预裂的能量需求;特征二:在各分层药柱间设置炮泥封堵结构,将切缝孔分割为独立腔体单元,构建各分层专属的爆后保压腔体,实现爆炸应力波作用时间的分层延长调控。

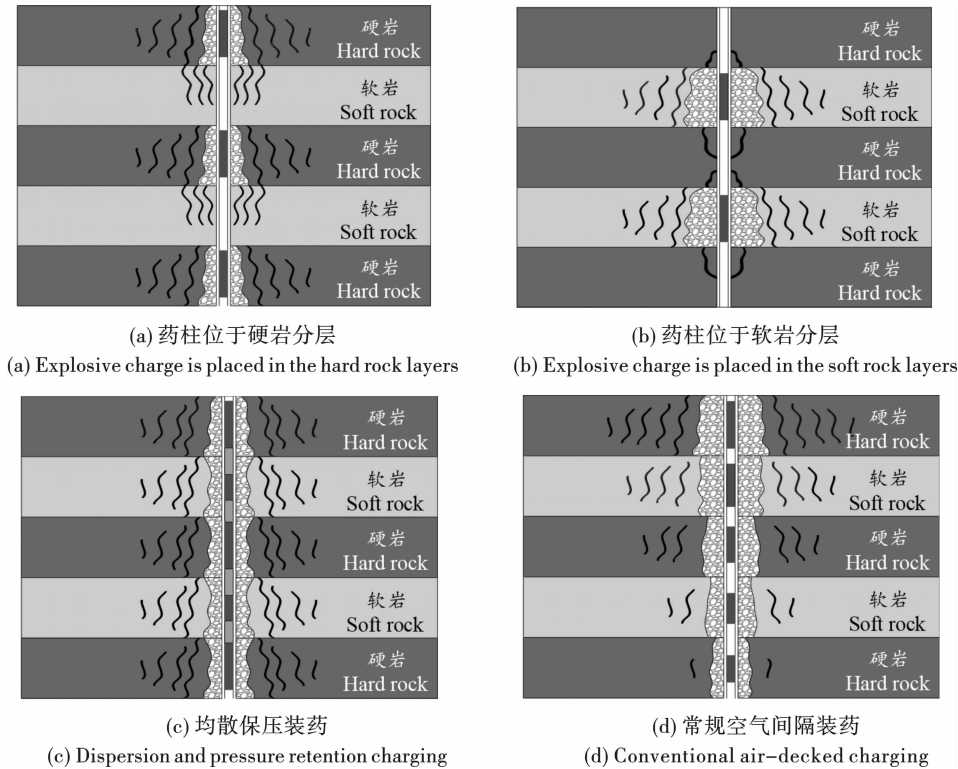


图1 装药结构对复合顶板切缝效果影响示意图

Fig. 1 Influence of explosive configuration on the pre-splitting blasting results of composite roof

## 1 复合顶板均散保压预裂爆破效果数值模拟分析

### 1.1 数值模型建立

采用 LS-DYNA 软件建立复合顶板预裂爆破数值模型,分析装药结构对复合顶板爆破切缝效果的影响作用,为复合顶板均散保压预裂爆破技术提供重要依据。

依据图1建立4种复合顶板预裂爆破数值模型,分别对应图1(a)~(d)装药结构。数值模型唯一不同之处在于装药结构,模型尺寸均为 $10\text{ m} \times 10.5\text{ m}$ ,模型四周施加无反射边界条件;硬岩、软岩及顶底岩层厚度均为 $1.5\text{ m}$ ;炮孔直径 $\phi 50\text{ mm}$ ,炸药直径 $\phi 35\text{ mm}$ ,不耦合系数 $1.43$ ;炮孔深 $9\text{ m}$ ,封堵炮泥段长 $1.5\text{ m}$ ;硬岩层和软岩层药柱均位于岩层中部。模型1装药长度 $3\text{ m}$ 装药结构为 $1-0-1-0-1$ ;模型2装药长度 $1.6\text{ m}$ 装药结构为 $0-0.8-0-0.8-0$ ;模型3装药长度 $4.6\text{ m}$ 装药结构

为 $1-0.8-1-0.8-1$ ;模型4装药长度 $3\text{ m}$ 装药结构为 $1-0.8-0.6-0.4-0.2$ ;模型5建立在模型3的基础上,该模型为均散保压装药,装药长度 $3\text{ m}$ 装药结构为 $1-0.8-0.6-0.4-0.2$ ,孔内各药柱之间封堵炮泥。除均散保压装药模型5外,孔内药柱以外的其余部分均为空气柱。孔内药柱起爆点均位于药柱底端中心位置,孔内各药柱同时正向起爆,模拟现场采用1段煤矿需用数码电子雷管起爆各段药柱。

采用流固耦合算法,岩石采用 Lagrange 算法,炸药和空气采用 ALE 算法,空气为耦合域,复合顶板均散保压预裂爆破模型见图2所示。模型含有乳化炸药、硬岩、软岩、爆破孔孔底孔口岩层、封堵炮泥、聚能管和空气七种材料。乳化炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 模型和 EOS\_JWL 状态方程表示,乳化炸药材料模型参数和状态方程参数见表1所示<sup>[11,12]</sup>。硬岩、软岩和爆破孔孔底孔口岩层均采用描述岩石、玻璃等脆性材料动力响应特征的

JH2 本构模型, 参数见表 2 所示<sup>[11,13-15]</sup>。封堵炮泥采用 MAT\_DRUCKER\_PRAGER 模型, 参数见表 3 所示<sup>[16]</sup>。聚能管为聚氯乙烯 PVC 材质, 采用 MAT\_MODIFIED\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY 本构

模型, 参数见表 4 所示<sup>[11]</sup>。空气采用 MAT\_NULL 本构模型和 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程表征<sup>[11]</sup>。

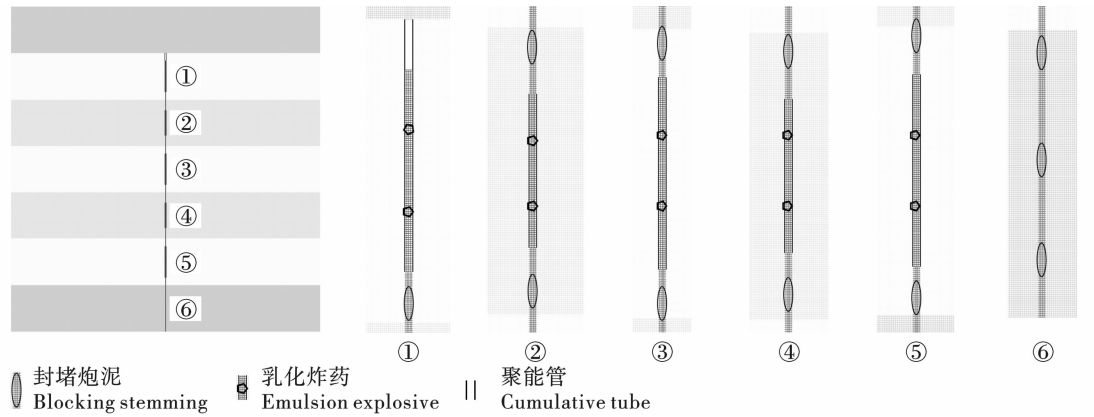


图 2 复合顶板均散保压预裂爆破模型

Fig. 2 Numerical model of the dispersed charge pre-splitting blasting technology for uniform fracturing composite roof

表 1 乳化炸药材料模型和 JWL 状态方程参数<sup>[11,12]</sup>

Table 1 Emulsion explosive parameters and JWL state equation parameters<sup>[11,12]</sup>

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

表 2 岩石 JH2 模型参数<sup>[11,13-15]</sup>

Table 2 JH2 parameters of rock<sup>[11,13-15]</sup>

参数 Parameters	硬岩及顶底岩层 Hard rock, topmost and bottommost rock layers	软岩 Soft rock	参数 Parameters	硬岩及顶底岩层 Hard rock, topmost and bottommost rock layers	软岩 Soft rock
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.66	2.6	$HEL / \text{GPa}$	4.5	3.2
$G / \text{GPa}$	21.9	12.31	$P_{HEL} / \text{GPa}$	3.7	2.32
$A$	0.76	0.76	$\beta$	0.5	1
$B$	0.25	0.25	$D_1$	0.005	0.005
$C$	0.005	0.005	$D_2$	0.7	0.7
$M$	0.62	0.62	$K_1 / \text{GPa}$	25.7	26.67
$N$	0.62	0.62	$K_2 / \text{GPa}$	-4500	-37.59
$T / \text{MPa}$	54.0	40.0	$K_3 / \text{GPa}$	300000	5213.7
			$\sigma_{F \max}$	0.25	0.25

表 3 封堵炮泥 DP 模型参数<sup>[16]</sup>

Table 3 DP parameters of stemming<sup>[16]</sup>

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	内聚力 Cohesion / MPa	内摩擦角 Internal friction angle / °	泊松比 Poisson's ratio
1.5	1.748	0.105	2.14	0.271

表 4 聚能管聚氯乙烯 MPLP 模型参数<sup>[11]</sup>

Table 4 MPLP parameters of PVC energy gathering tube<sup>[11]</sup>

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{MPa}$	$PR$	$\sigma_y / \text{MPa}$	$ETAN / \text{MPa}$	$FAIL$	$LCSS$
830.397	3057.78	0.45	6.895	344.75	0.25	3451

## 1.2 装药结构对复合顶板预裂爆破效果分析

装药结构对复合顶板爆破效果影响特征见图3所示,图中为起爆后1.5 ms的岩石损伤和爆生气体压力分布特征;分别选取4个模型爆破孔底部两段药柱中间的空气单元监测爆生气体流动特征,4个监测点分别为 $AP_1$ 、 $AP_2$ 、 $AP_3$ 和 $AP_4$ ,监测结果见图4所示。

模型1装药结构为1-0-1-0-1,3段1 m长药柱分别位于1.5 m厚的硬岩分层中部,药柱之间为长2 m的空气柱,孔口封泥长1.5 m。药柱爆炸后,沿炮孔全长范围只有硬岩分层所在位置产生了损伤破坏,软岩分层未见损伤破坏;硬岩损伤范围总体呈瓢虫状分布,中部呈短轴约为17.1 cm的椭圆状;冲击波在每层硬岩顶部的硬、软岩界面反射,造成硬岩分层顶部在水平方向产生了明显的拉伸损伤,其损伤范围最大半径达97.7 cm;3段1 m长药柱之间为长2 m的空气柱,提供了爆生气体向软岩分层流动通道;相邻药柱爆生气体在软岩分层中部 $AP_1$ 处汇聚碰撞,气体压力由5 MPa急剧上升为40 MPa,削弱了爆生气体对硬岩分层爆生裂隙扩展的驱动作用。

模型2装药结构为0-0.8-0-0.8-0,两段0.8 m长药柱分别位于1.5 m厚的软岩分层中部,药柱之间为长2.2 m的空气柱,孔口封泥长1.5 m。较模型1相比,仅在软岩中部形成了半径约60 cm的“鸡窝”状爆坑,且裂隙区爆生裂纹均顺着传爆方向向孔底扩展。两段药柱爆生气体在硬岩分层中部 $AP_2$ 叠加后,爆生气体压力由5 MPa增加至10 MPa,硬岩分层在该气体压力10 MPa作用下未产生明显损伤破坏。

模型3装药为模型1和模型2的叠加方式,装药结构为1-0.8-1-0.8-1,3段1 m长和2段0.8 m长的药柱分别位于1.5 m厚的硬岩和软岩分层中部,药柱之间为空气柱,孔口封泥长1.5 m。与模型1和模型2相比,硬岩分层损伤破坏范围无明显变化,软岩分层损伤破坏范围有所增大。模型3硬岩分层炸药爆炸后爆生气体向软岩分层流动,孔底2段药柱爆生气体叠加后压力由初始19 MPa迅速增加至37 MPa,减小硬岩分层损伤破坏,加剧了软岩分层损伤破坏。

模型4装药量从孔底至孔口依次减少,是目前普遍采用的复合顶板预裂装药方式。模型4装药结构为1-0.8-0.6-0.4-0.2,药柱长度自孔底到孔口按0.2 m依次减少,各药柱之间为空气柱,孔口

封泥长1.5 m。药柱爆炸后,岩石损伤范围孔底大、孔口小,整体呈倒梯形分布,易导致切缝孔从中部至孔口部分难以有效贯通。由图4模型4的 $AP_4$ 爆生气体压力变化监测曲线可知,硬岩分层1 m长药柱爆炸后爆生气体灌入软岩分层,致使 $AP_4$ 位置爆生气体压力由初始18 MPa迅速升高至30 MPa,加剧了软岩分层损伤破坏,未达到复合顶板均匀预裂的目的。

复合顶板预裂成缝是爆炸应力波和爆生气体耦合作用的结果<sup>[10]</sup>。空气间隔装药相邻药柱之间的空气柱为爆生气体能量向软岩分层流动提供了便利条件,进而加剧了软岩分层的损伤破坏,弱化了硬岩分层的损伤破坏,难以达到复合顶板各分层均匀致裂的目的。

## 1.3 复合顶板均散保压预裂效果分析

为阐明复合顶板均散保压预裂作用效果,在模型3的基础上建立模型5,采用封堵炮泥填充各药柱之间的空气柱。

与模型3相比,各分层损伤范围均有所增大,其中硬岩分层损伤范围半径由17.1 cm增大至23.7 cm,增加了38.6%;软岩分层损伤范围由圆形变化为梯形,损伤范围最大半径由61.54 cm增大至67.63 cm,增加了9.9%,并在软岩分层底部沿水平方向产生了半长约为148.5 cm拉伸损伤。

可见,通过炮泥封堵工艺将切缝孔分割为独立腔体单元,各分层形成专属爆后保压腔体,不仅阻断爆生气体跨分层迁移通道,更实现爆炸作用时间的分层精准延长。该机制显著提高爆炸能量有效利用率,最终达成复合顶板全分层均匀致裂效果,从根本上解决了常规空气间隔装药下相邻炮孔裂隙贯通困难的技术瓶颈。

## 2 工程实践

### 2.1 复合顶板均散保压预裂切缝装药设计

根据81511工作面辅助进风顺槽留巷段顶板岩性钻孔窥视结果,复合顶板结构为泥岩(3.51 m)+砂质泥岩(6.03 m)+细粒砂岩(4.46 m)。直接顶泥岩易风化,节理裂隙发育,受采动影响后碎裂成块,不具备抵抗爆炸作用的能力,易发生冲孔导致顶板局部冒落。为此,切缝孔封泥长度不小于泥岩厚度3.51 m。结合切缝孔孔深13 m,单节聚能管1.5 m长,单孔6节聚能管,每节聚能管安放1发1段煤矿许用数码电子雷管,最终确定封泥长度为4.0 m。

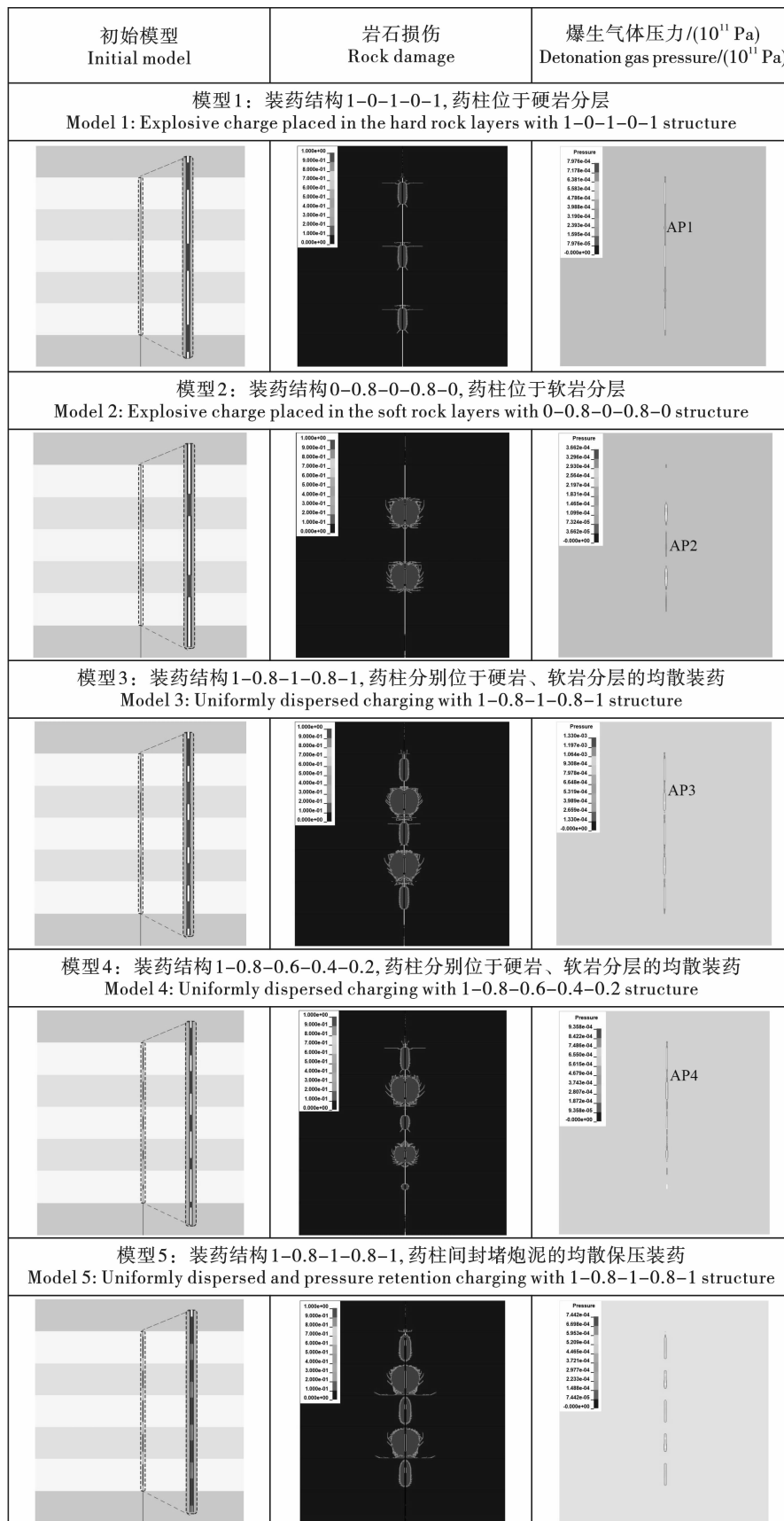


图 3 装药结构对复合顶板爆破效果影响

Fig. 3 Influence of explosive configuration on the pre-splitting blasting results of composite roof

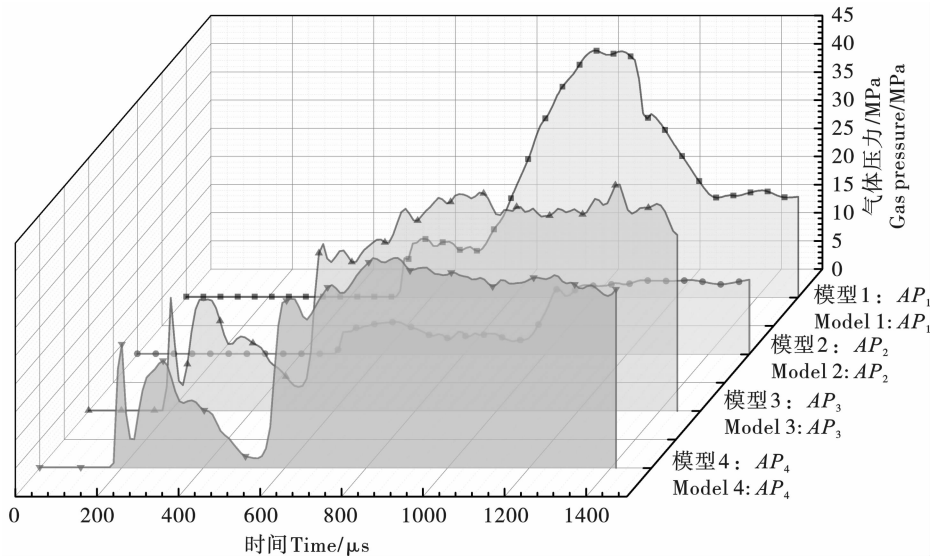


图4 监测点  $AP_1 \sim AP_4$  爆生气体压力

Fig. 4 Explosive gas pressure at monitoring points  $AP_1 \sim AP_4$

综合17次81511工作面辅助进风顺槽预裂爆破切缝效果评价,确定细粒砂岩预裂爆破线装药密度为500~700 g/m,砂质泥岩预裂爆破线装药密度为150~300 g/m。切缝孔底部3 m为细粒砂岩,线装药密度取600 g/m,则细粒砂岩分层预裂所需药量为1.8 kg;切缝孔距底部3 m~孔口4 m范围为砂质泥岩,线装药密度取233 g/m,则砂质泥岩分层预裂所需药量为1398 g,取1.4 kg。

现场使用的三级煤矿许用乳化炸药药卷规格为 $\phi 35 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ g}$ 。细粒砂岩分层段预裂需9卷炸药,孔底第一节聚能管放置5卷炸药,第二节聚能管放置4卷炸药。砂质泥岩分层段预裂需7卷炸药,自孔底起第三节、第四节和第五节聚能管均放置2卷炸药,第六节聚能管放置1卷炸药。具体装药见图5中装药结构一所示。

为避免细粒砂岩分层段爆生气体向砂质泥岩分层段逃逸,按照复合顶板均散保压预裂爆破技术特征,结合图5均散布药装药结构一,沿层理面位置,在第二节聚能管底部封堵炮泥将切缝孔分割成2个独立的爆炸保压腔体,见图5中装药结构二所示。

## 2.2 复合顶板均散保压预裂切缝效果评价

复合顶板均散保压预裂切缝试爆共16孔,孔间距500 mm,分2组,每组各5个装药孔,第1组和第2组分别按装药结构一和装药结构二进行装药,每组内第4孔为预留观察孔,一次起爆10孔,炮孔布置见图6所示。爆破后采用风管对观察孔进行吹孔,随后采用钻孔窥视仪探测爆生裂隙发育特征,见图7所示。

由6#和13#观察孔爆生裂隙窥视结果对比分析可知,两个观察孔砂质泥岩软岩分层爆生裂隙均为大型张拉裂隙。由于装药方式二封堵炮泥阻断了细粒砂岩硬岩分层爆生气体向砂质泥岩软岩段逃逸,为此,6#观察孔砂质泥岩段较13#观察孔岩石完整性低,破碎程度高;6#观察孔细粒砂岩段较13#观察孔裂隙发育程度低,未出现13#观察孔细粒砂岩的大型张拉裂隙。

由此可见,通过封堵炮泥将炮孔分割为2个独立腔体的均散保压装药可有效改变炸药爆炸能量有效利用率,减少爆炸能量向软岩分层逃逸,避免炸药能量过度消耗在软岩分层,有效提高硬岩分层破岩效果,可达到炮孔全长均匀致裂复合顶板的目的。

## 3 结论

(1)常规空气间隔装药采用孔底至孔口药量递减的布置方式,因未考量复合顶板分层赋存特征,存在装药结构与岩性力学特性匹配失衡问题。爆后切缝裂隙范围自孔底向孔口呈倒锥形递减,相邻预裂孔切缝难以形成贯通网络。空气柱为爆生气体向软岩分层逸散提供泄能通道,不仅显著降低炸药爆炸能量有效利用率,还导致硬岩分层未能有效切开、软岩区域形成蜂窝状爆坑,最终致使复合顶板全分层难以均匀预裂。

(2)复合顶板均散保压预裂爆破技术遵循“硬岩层位大药量、软岩层位小药量”的差异化配置原则,构建适配复合顶板分层赋存特征的药量配置体系,满足各岩性层切缝预裂的能量要求。此外,为阻

断爆炸能量向软岩层位的逸散路径, 在硬岩与软岩药柱间设置炮泥封堵结构, 通过形成独立保压腔体

延长爆炸应力波与爆生气体的作用时效, 最终达成复合顶板全分层均匀预裂的目标。

岩性 Lithology	厚度 Thickness	炮孔位置 Borehole position
细粒砂岩 Fine-grained sandstone	4.46 m	
砂质泥岩 Sandy mudstone	6.03 m	
泥岩 Mudstone	3.51 m	

(a) 炮孔位置  
(a) Borehole position

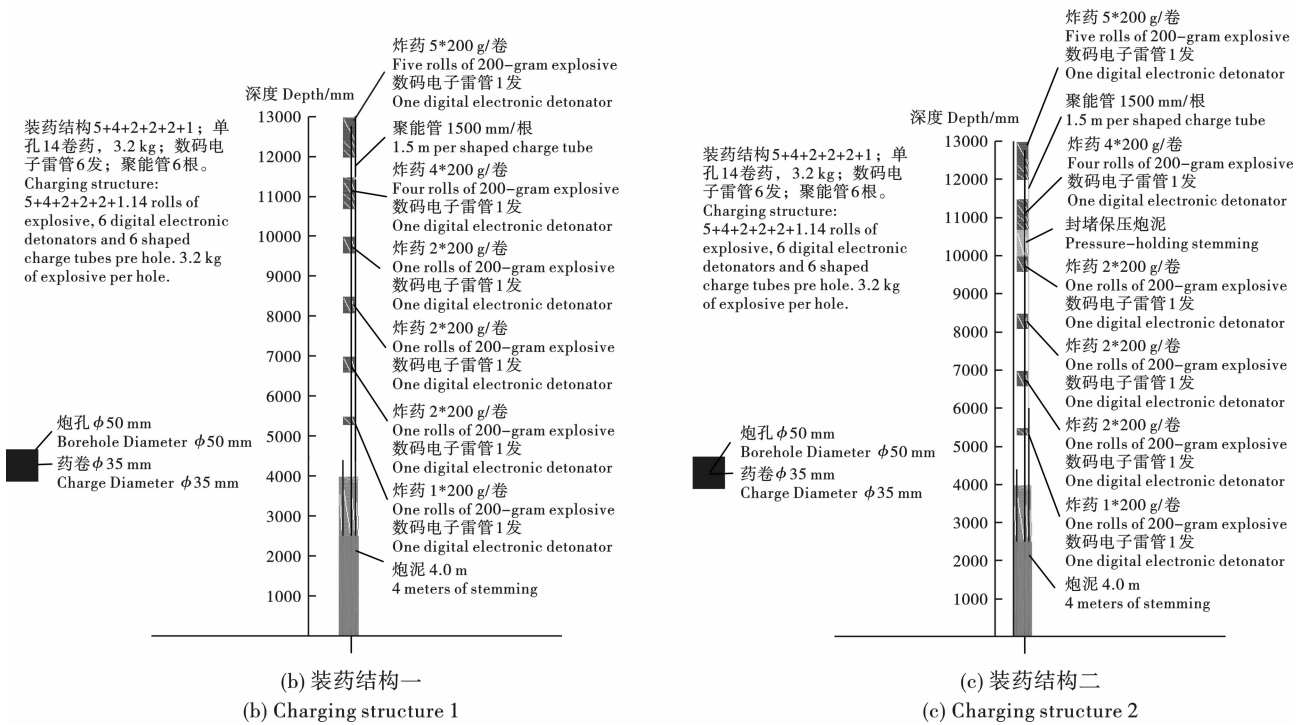


图 5 留巷试验段复合顶板均散保压预裂切缝装药结构

Fig. 5 Charge structure of the uniform fracturing composite roof pre-splitting blasting in the gob-side entry retaining experimental section

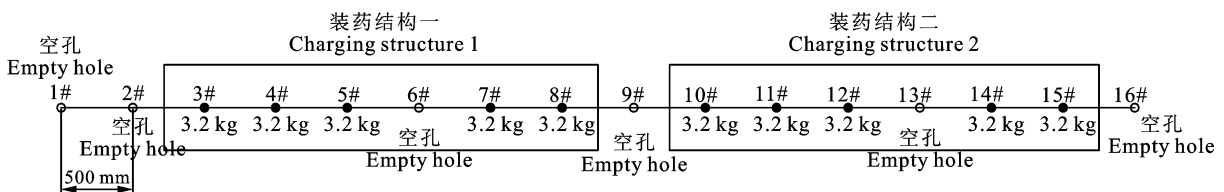


图 6 复合顶板均散保压预裂切缝试爆炮孔布置

Fig. 6 Borehole arrangement in the uniform fracturing composite roof with dispersed charge pre-splitting blasting test

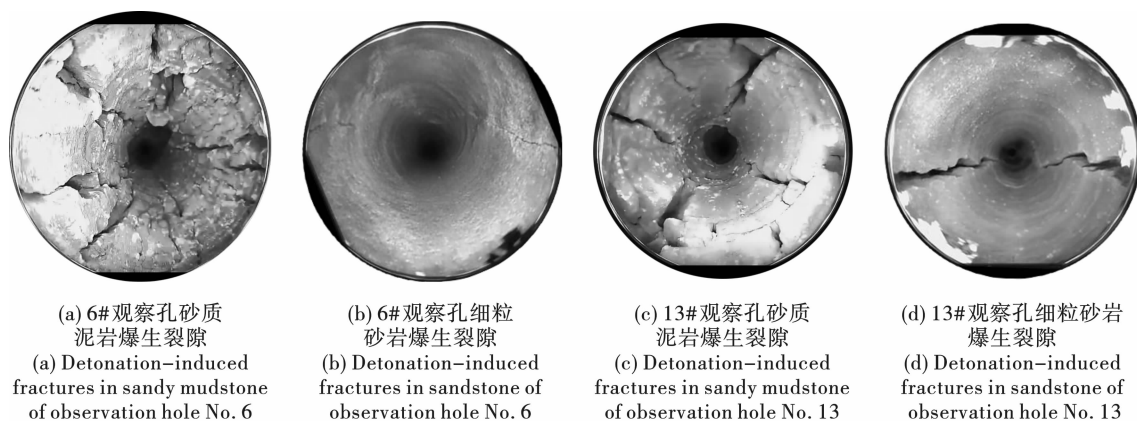


图7 观察孔爆生裂隙窥视结果

Fig. 7 Observation results of explosive cracks in the observation hole

(3) 复合顶板预裂爆破处理的核心为硬岩分层,均散保压预裂爆破技术通过差异化药量配置与分层保压机制,不仅显著提升硬岩分层的预裂切顶效能,更有效解决了软岩分层因过度破碎所导致的爆炸能量无效耗散问题。

#### 参考文献 (References)

- [1] 何满潮,陈上元,郭志彪,等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017,46(5):959-969.
- [1] HE Man-chao, CHEN Shang-yuan, GUO Zhi-biao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(5): 959-969. (in Chinese)
- [2] 王 炯,朱道勇,宫伟力,等. 切顶卸压自动成巷岩层运动规律物理模拟实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(11):2536-2547.
- [2] WANG Jiong, ZHU Dao-yong, GONG Wei-li, et al. Physical simulation experiment on the movement of rock strata upon automatic roadway forming by roof cutting and pressure releasing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2536-2547. (in Chinese)
- [3] 何满潮. 无煤柱自成巷开采理论与110工法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 869-881.
- [3] HE Man-chao. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(5): 869-881. (in Chinese)
- [4] 何满潮,高玉兵,盖秋凯,等. 无煤柱自成巷力学原理及其工法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 19-30.
- [4] HE Man-chao, GAO Yu-bing, GAI Qiu-kai, et al. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19-30. (in Chinese)
- [5] 王方田,尚俊剑,赵 宾,等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构特征及锚索强化支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2296-2305.
- [5] WANG Fang-tian, SHANG Jun-jian, ZHAO Bin, et al. Surrounding rock structural characteristics and anchor-cable strengthen support technology of the gob-side entry retaining with roof cutting and pressure releasing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2296-2305. (in Chinese)
- [6] 高玉兵,杨 军,王 琦,等. 无煤柱自成巷预裂切顶机理及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3349-3359.
- [6] GAO Yu-bing, YANG Jun, WANG Qi, et al. Mechanism of roof presplitting in a nonpillar mining method with entry automatically retained and its influence on the strata behaviors [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3349-3359. (in Chinese)
- [7] 陈上元,赵 菲,王洪建,等. 深部切顶沿空成巷关键参数研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 332-342, 350.
- [7] CHEN Shang-yuan, ZHAO Fei, WANG Hong-jian, et al. Determination of key parameters of gob-side entry retaining by cutting roof and its application to a deep mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 332-342, 350. (in Chinese)
- [8] 张国锋,许有青,葛鹏涛. 唐山沟矿厚层砂岩顶板切缝沿空成巷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1397-1406.
- [8] ZHANG Guo-feng, XU You-qing, GE Peng-tao. Research on cut gob-side entry retaining in thin coal seam of Tangshan ditch [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1397-1406. (in Chinese)

- [9] 杨 辉,袁翊硕,柴亚博,等. 复杂环境下 180 m 高烟囱定向拆除爆破[J]. 工程爆破,2022,28(2):84-92.
- [9] YANG Hui, YUAN Yi-shuo, CHAI Ya-bo, et al. Directional demolition blasting of 180 m high chimney in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2):84-92. (in Chinese)
- [10] 袁 方,罗 鹏,王 威,等. 复杂环境下含人字形内衬的 180 m 烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2024,41(1):120-126.
- [10] YUAN Fang, LUO Peng, WANG Wei, et al. Demolition of a 180 m chimney with herringbone lining by blasting in complex environment[J]. Blasting, 2024, 41(1):120-126. (in Chinese)
- [11] 杨 军,陈国梁,张光雄. 建筑物结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [11] YANG Jun, CHEN Guo-liang, ZHANG Guang-xiong. Numerical simulation of blasting demolition of building structures[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [12] 孔庆亮,夏治园,王 刚,等. 高耸钢混结构造粒塔的定向爆破拆除设计及分离式共节点模拟研究[J]. 爆破器材,2024,53(1):57-64.
- [12] KONG Qing-liang, XIA Zhi-yuan, WANG Gang, et al. Directional blasting demolition design of high-rise granulating tower with steel-concrete structure and research on separate common node simulation[J]. Blasting Equipment, 2024, 53(1):57-64. (in Chinese)
- [13] 李 勇. 高耸构筑物拆除爆破倒塌过程的数值模拟与应用[D]. 贵阳:贵州大学,2016.
- [13] LI Yong. Numerical simulation and application of demolition blasting collapse process of high-rise buildings[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [14] 孔庆亮,夏治园,王 刚,等. 双筒型旧硝酸造粒塔爆破拆除数值模拟与施工设计[J]. 爆破,2024,41(2):151-159.
- [14] KONG Qing-liang, XIA Zhi-yuan, WANG Gang, et al. Numerical simulation and construction design of blasting demolition of double-barrel old ammonium nitrate prilling tower[J]. Blasting, 2024, 41(2):151-159. (in Chinese)
- [15] 刘健修,高朋飞,马国强,等. 18 层框-筒结构楼房拆除爆破数值模拟分析[J]. 工程爆破,2024,30(3):74-81.
- [15] LIU Jian-xiu, GAO Peng-fei, MA Guo-qiang, et al. Numerical simulation analysis of demolition blasting of 18-story frame-tube building[J]. Engineering blasting, 2024, 30(3):74-81. (in Chinese)

(上接第 94 页)

- [9] 贾后省,王 林,彭 博,等. 弱黏结复合顶板沿空留巷分级“控顶-卸压”机理与应用[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(6):1191-1202.
- [9] JIA Hou-sheng, WANG Lin, PENG Bo, et al. Mechanism and application of classification “roof control-pressure relief” of gob-side entry retained with weakly caking compound roof[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2023, 52(6):1191-1202. (in Chinese)
- [10] 王玉杰. 爆破工程[M]. 2 版. 武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [10] WANG Yu-jie. Engineering blasting[M]. Second edition. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [11] 辛春亮,薛再清,涂 建,等,编. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京:机械工业出版社,2021.
- [11] XIN Chun-liang, XUE Zai-qing, TU Jian, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2021. (in Chinese)
- [12] 史维升. 不耦合装药条件下岩石爆破的理论研究和数值模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2004. DOI:10.7666/d.Y683189.
- [12] SHI Wei-sheng. Numerical simulation and theory study of rock blasting without interaction charge[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2004. DOI:10.7666/d.Y683189. (in Chinese)
- [13] BANADAKI MMD, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 34(2):16-25.
- [14] 吴 波,任子明,刘 聪,等. JH2 模型参数的确定及动静荷载耦合作用下隧道围岩损伤研究[J]. 爆破,2023,40(3):68-78.
- [14] WU Bo, REN Zi-ming, LIU Cong, et al. Determination of Johnson-Holmquist-II constitutive model parameters and study on tunnel surrounding rock damage under coupling of dynamic and static loads[J]. Blasting, 2023, 40(3):68-78. (in Chinese)
- [15] PU Chuan-jin, YANG Xin, ZHAO Han, et al. Numerical investigation on crack propagation and coalescence induced by dual-borehole blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157:103983.
- [16] 赵 凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- [16] ZHAO Kai. The attenuation and dispersion effects on explosive wave of layered protective engineering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)