预裂爆破轴向不耦合装药合理空气柱长度研究①

师强强[1,2], 朱星星[1,2]
(1.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 2.马鞍山矿山研究院爆破工程有限责任公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 合理的轴向空气柱长度可以使相邻炮孔间形成贯通裂缝,同时孔壁不产生粉碎区,对预裂爆破具有重要作用。通过理论计算分析了孔壁初始冲击压力沿炮孔轴向的变化特征;针对巴润露天矿爆破工程,初步估算了预裂爆破合理的轴向空气柱长度,约为 1.5 m,并采用数值模拟分析不同轴向空气柱长度下的爆破后应力变化趋势。结果表明:空气柱段孔壁初始压力沿炮孔轴线呈“U”形分布特征,空气柱中间位置处孔壁压力最小。轴向空气柱长度 1.5~2.0 m 时,数值模拟应力值回落至 10 MPa 左右时出现振荡,可满足岩石孔间裂缝起裂和扩展的要求。巴润采场工程实践表明,空气柱长度 1.5 m 时预裂爆破后坡面不平整度小于 10 cm、半壁孔痕率大于 85%、爆破振动合成速度为 5.782 cm/s,各项指标较优。

关键词: 预裂爆破; 数值模拟; 空气柱长度; 冲击压力; 爆破振动; 不耦合装药; 裂缝贯通; 不平整度; 孔痕率; 爆破振动
中图分类号: TD235 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.005
文章编号: 0253-6099(2026)01-0030-07

Reasonable Air Column Length of Axial Decoupling Charge in Presplit Blasting

SHI Qiangqiang[1,2], ZHU Xingxing[1,2]
(1.*Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd.*, *Maanshan* 243000, *Anhui*, *China*; 2.*Maanshan Institute of Mining Research Blasting Engineering Co., Ltd.*, *Maanshan* 243000, *Anhui*, *China*)

Abstract: Reasonable axial length of an air column can lead to crack penetration between adjacent blast holes without generating crushed zone on hole wall, which plays an important role in presplit blasting. The variation characteristics of initial impact pressure on the hole wall along the axial direction of blast hole were analyzed by theoretical calculation. For the blasting engineering of Barun Open-pit Mine, a reasonable axial length of air column for presplit blasting was preliminarily estimated to be about 1.5 m, and then the variation of stress after blasting with different axial lengths of air column was analyzed by numerical simulation. The results show that the initial pressure on the hole wall in the air column section presents a “U-shaped” distribution along the axis of blast holes, and the minimum pressure exists at the middle of the air column. When the axial length of an air column is 1.5-2.0 m, the numerical simulated stress oscillates when it drops to about 10 MPa, which can meet the requirements of crack initiation and propagation between rock holes. The engineering practice in the stope of Barun mine shows that when the air column length is 1.5 m, the slope roughness after presplit blasting is less than 10 cm, the half-hole mark rate greater than 85% and the resultant velocity of blasting vibration is 5.782 cm/s, presenting excellent indicators.

Key words: presplit blasting; numerical simulation; air column length; impact pressure; blasting vibration; decoupling charge; crack penetration; roughness; hole mark rate; blasting vibration

预裂爆破作为边坡靠界爆破的重要技术手段,可以有效削弱爆破对露天边坡的损伤破坏[1]。预裂爆破轴向不耦合装药可以降低爆轰波的初始压力,使空气柱段的孔壁压力明显小于岩石的动态抗压强度,合理的轴向空气柱长度可以使相邻炮孔间形成贯通裂缝,同时孔壁不产生粉碎区,从而达到控制边坡稳定性的目的[2-3]。目前学者已在轴向不耦合装药理论和实践方面做了大量研究[4-7],轴向不耦合装药技术在露天

① **收稿日期**: 2025-07-28
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2907302)
作者简介: 师强强(1989—),男,江苏丰县人,硕士,高级工程师,从事爆破工程技术方面的研究。E-mail:shiqiang_308@163.com

矿山预裂爆破中得到了广泛应用,但是,针对多段空气间隔装药条件下分段空气柱合理长度的研究较少。在不同孔深、岩性和爆破器材条件下,合理的分段轴向空气柱长度很难准确量化,难以有效指导实际生产。本文结合理论分析、数值模拟和工程实践,研究了适用于边坡预裂爆破的轴向不耦合装药的合理空气柱长度。

1　轴向不耦合装药合理空气柱长度估算

1.1　孔壁初始冲击压力

任意一点冲击波峰值压力和距离的关系[8-9]为:

$$P = \frac{0.98^{\alpha}\left(\frac{\rho W_{\mathrm{s}}}{W_{\mathrm{T}}}\right)^{\frac{\alpha}{3}} d_{\mathrm{c}}{}^{\alpha} B}{R^{\alpha}} \tag{1}$$

令 $K = 0.98^{\alpha}\left(\frac{\rho W_{\mathrm{s}}}{W_{\mathrm{T}}}\right)^{\frac{\alpha}{3}} B$,则式(1)简化为:

$$P = K\left(\frac{R}{d_{\mathrm{c}}}\right)^{-\alpha} \tag{2}$$

式中:P 为任意一点冲击压力,MPa;R 为计算点的爆心距,m;d_{c} 为柱状药包直径,m;α 为压力沿炮孔轴向的衰减系数,取 0.72[10];B 为常数,取72 MPa[10];ρ 为药包密度,kg/m^3;W_{s}为实际炸药的比爆热,kJ/kg;W_{T}为 TNT 炸药的比爆热,取 4 200 kJ/kg。

将柱状药包假设为等效球状药包的叠加,中部空气间隔装药孔壁初始冲击压力如图 1 所示。图中 l_1 和 l_2 分别为上、下 2 个装药段长度,E_i 为第 i 个等效球状药包,P_{E_i}表示等效球状药包 E_i 在 O 点的应力波峰值应力,2 个装药段可分别等效为 i、j 个等效单元球形药包。

上、下 2 个装药段在任意 O 点产生的冲击压力表示为:

$$P = \sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=1}^{n_2}\left[K\left(\frac{x + 2id_{\mathrm{e}}}{d_{\mathrm{c}}}\right)^{-\alpha} + K\left(\frac{l_{\mathrm{a}} - x + 2jd_{\mathrm{e}}}{d_{\mathrm{c}}}\right)^{-\alpha}\right] \tag{3}$$

式中:d_{e} 为球形药包等效半径,m;i、j 分别为上、下 2 个装药段球形药包编号,从装药段顶部到底部依次递增;x 为 O 点到装药段顶部的距离,m;l_{a} 为空气柱长度,m。

对式(3)进行分析,假设空气柱长度为 3.0 m,在空气柱上等间隔取 13 个点进行计算,1、13 号点(如图 1所示)为空气柱端部位置,7 号点为空气柱中间位置,得出孔壁初始冲击压力沿炮孔轴向的变化曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,空气柱端部(药柱端部)处 1 号点初始冲击压力最大,从 1 号点到 2 号点压力突然降低,从 2 号点开始压力降低趋势逐渐变缓,冲击压力在空气柱中间位置处最小,冲击压力曲线整体呈“U”形分布。

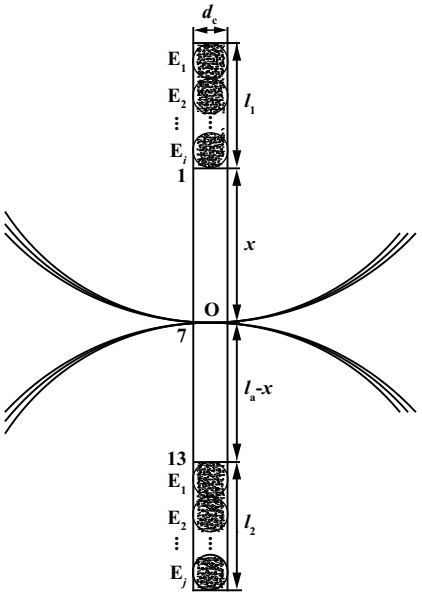


图 1　中部空气间隔装药孔壁初始冲击压力

Fig. 1　Initial impact pressure on hole wall for central air-deck charging

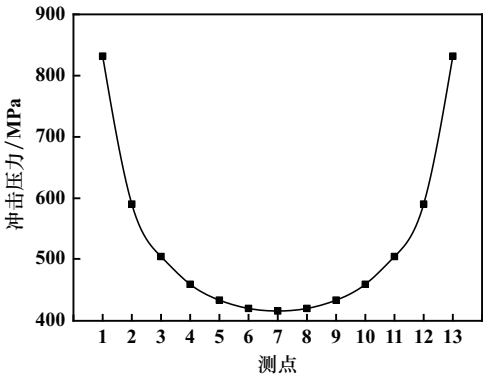


图 2　孔壁初始冲击压力沿炮孔轴向的变化曲线

Fig. 2　Variation curve of initial impact pressure on hole wall along axial direction of borehole

1.2　合理空气柱长度分析

轴向不耦合装药可以有效降低爆轰波的初始压力,合理空气柱长度既要保证相邻孔间能够形成贯通裂缝,又要保证孔壁处不产生粉碎区,孔壁初始冲击压力[9]满足下式:

$$\begin{cases} P > \sigma_{\mathrm{cd}} \\ P < \sigma_{\mathrm{kd}} \end{cases} \tag{4}$$

式中:σ_{cd}为岩石动态抗拉强度,MPa;σ_{kd}为岩石动态抗压强度,MPa,取 10 倍的静态抗压强度[9]。

巴润露天矿爆破工程炸药参数及矿岩性质为:预

裂药柱直径 45 mm,长度 0.5 m;预裂孔孔距 1.3 m,孔径 120 mm;乳化炸药加工制成预裂药柱,2 支药卷为 1 组进行绑扎,炸药爆热3 600 kJ/kg;岩石为板岩,静态抗压强度取 90.0 MPa,动态抗拉强度取 7.0 MPa。

经计算 $K=367$,等效球形药包个数 $n=\dfrac{\sqrt{6}l_e}{6d_c}=9$,$l_e$ 为装药段总长度;球形药包等效半径 $d_e=\dfrac{\sqrt{6}}{2}d_c=0.055$ m。代入式(3),得出不同空气柱长度下空气柱中间位置和空气柱端部位置的冲击压力分布曲线,如图 3 所示。

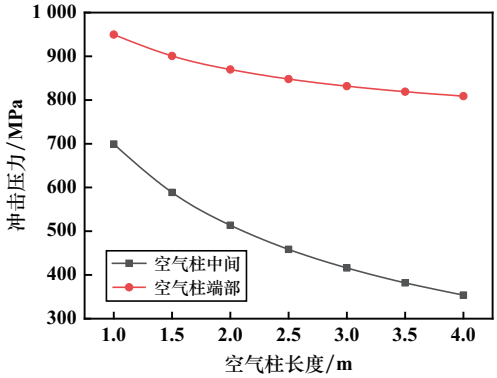


图 3 空气柱不同位置处冲击压力随空气柱长度的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of impact pressure with air column length at different positions of air column

空气柱长度 1.0 m 时,空气柱端部的冲击压力大于岩石动态抗压强度(900 MPa),孔壁易产生粉碎区,不利于形成半壁孔。空气柱长度大于 1.5 m 后,空气柱端部的冲击压力均小于岩石动态抗压强度,可以满足形成裂缝且不形成粉碎区的条件。

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

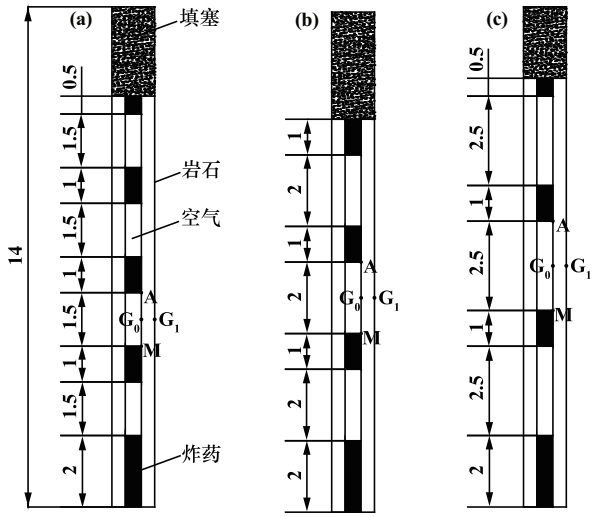
利用 LS-DYNA 软件建立 3 组模型,进行爆破后应力对比分析。模型尺寸长 1.3 m,宽 1.3 m,高 15.0 m,炮孔孔深 14.0 m,炮孔孔径 120 mm。孔内采用轴向不耦合装药结构,药卷直径 45 mm,长度 0.5 m,起爆点均位于药卷底部,模型 1、2、3 装药结构见图 4。依据合理空气柱长度的估算结果,3 组模型的空气柱长度分别取 1.5、2.0 和 2.5 m[11]。

2.2 材料力学参数

采用 JWL 状态方程模拟炸药:

$$P_{CJ}=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \quad (5)$$

式中:P_{CJ}为爆轰压力,GPa;V 为初始相对体积;E_0 为炸药单位体积内能,GPa;ω、A、B、R_1、R_2均为材料常数。



(a) 模型 1;(b)模型 2;(c) 模型 3

图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical computation model

采用 NULL 材料模型以及 LINEAR_POLYNOMIA 状态方程模拟空气:

$$\begin{cases}P_{CJ}=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_1\\ \mu=\dfrac{1}{V}-1\end{cases} \quad (6)$$

式中:C_0、C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6 均为状态方程参数;μ 为泊松比;E_1 为空气单位体积内能,GPa。

炸药、板岩和空气模拟参数见表1~3[12-13]。

表 1 炸药参数

Table 1 Explosive parameters

密度 ρ_0/(g·cm^{-3})	爆速 D/(m·s^{-1})	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V
1.2	4 000	5.5	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192	1.0

表 2 板岩力学参数

Table 2 Slate rock mechanics parameters

密度 ρ_1/(g·cm^{-3})	弹性模量 E/10^4 MPa	泊松比 ν	抗压强度 R_c/MPa	抗拉强度 R_t/MPa
2.8	2.2	0.25	90.0	7.0

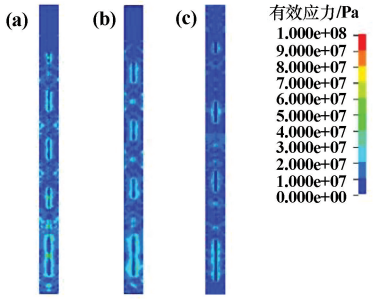
表 3 空气状态方程参数

Table 3 Parameters of air state equation

密度 ρ_2/(g·cm^{-3})	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_1/GPa	V
1.29×10^{-3}	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-4}	1.0

2.3 结果分析

1 ms 时各组模型的应力云图如图 5 所示。



（a）模型 1；（b）模型 2；（c）模型 3

图 5　1 ms 时各组模型的应力云图

Fig. 5　Stress contours of each model at 1 ms

对 3 个模型空气间隔区域分别均匀取 13 个监测点，标记为 A～M（图 4 中仅标注出了首尾 A、M 2 个点，其他 11 个点依次等间距选取），其中 A、M 这 2 个测点设置在装药段和空气交接处，其压力既可认为是炸药端部的压力，也可认为是装药段的应力。各测点上的最大等效应力如图 6 所示。

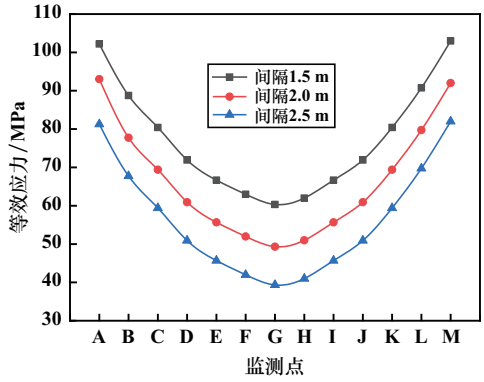


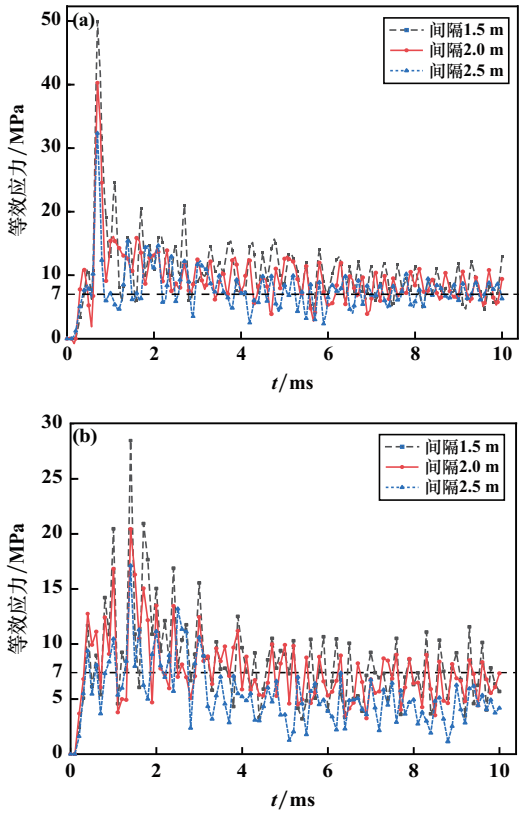
图 6　不同空气柱长度下空气柱段不同测点等效应力曲线

Fig. 6　Equivalent stress curves of different measuring points in air column section under different air column length

由图 6 可知，等效应力曲线整体呈“U”形分布特征，装药段的应力明显大于空气柱段的应力，且随着与装药段距离增大，应力逐渐减小，到空气柱 1/2 位置处达到最小值，与理论分析结果基本一致。

分析 3 组模型空气柱中间位置孔壁处 G_0 点和模型边界处 G_1 点的应力-时程曲线，如图 7 所示。

炸药爆炸后，由于 G_0 点距爆炸点位置较近，该点应力迅速达到峰值，而后应力波向四周传播，1.7 ms 时 G_1 点应力达到峰值。受应力波传播衰减的影响，G_1 点应力峰值明显低于 G_0 点，3 组模型孔壁位置 G_0 处应力峰值分别为 49.9、42.3 和 38.4 MPa。随后，应力曲线迅速衰减，衰减至 10～15 MPa 时出现振荡情形，3 条曲线平均应力均大于9.0 MPa。曲线振荡区域的应力峰值和平均值均大于岩石的抗拉强度 7.0 MPa，使孔壁处满足起裂扩展条件[14]。



（a）G_0 点；（b）G_1 点

图 7　G_0 和 G_1 监测点应力-时程曲线

Fig. 7　Stress-time history curves of monitoring points G_0 and G_1

3 组模型孔壁位置 G_1 处应力峰值分别为 28.5、20.4和 18.1 MPa，而后模型 1 和模型 2 应力值回落至 10 MPa 左右时出现振荡，但仍然可以满足起裂扩展条件。模型 3 应力值回落至 7.0 MPa 以下出现振荡，模型 3 振荡区域平均应力值为 5.3 MPa，曲线振荡区域峰值和平均值均小于岩石的抗拉强度，岩石成缝条件较差，成缝长度达不到孔距的一半。综合考虑孔间起裂条件和成缝长度，确定轴向空气柱长度1.5～2.0 m可以满足预裂爆破相邻孔间形成贯通裂缝的效果。

3　工程实践

依据上述分析，在包钢巴润露天矿进行预裂爆破工程实践。试验采场岩石为板岩，岩石静态抗压强度 90.0 MPa，容重 27.4 kN/m^3。预裂药柱 Φ45 mm×500 mm，重 0.6 kg。预裂孔和缓冲孔倾斜角度与设计坡面角一致，倾角 60°。预裂孔、缓冲孔直径 120 mm，主爆孔直径 152 mm，倾角 90°，现场爆破试验参数如表 4 所示[15-16]；以试验 1 为例，装药和空气间隔结构如图 8 所示。

表 4 现场爆破试验参数

Table 4 Parameters for field blasting test

试验序号	孔径/mm	孔深/m	角度/(°)	孔间距/m	填塞长度/m	平均线装药密度/(kg·m^{-1})	各药柱装药数量/节						各空气柱长度/m				
							①	②	③	④	⑤	⑥	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
1	120	14	60	1.3	2.5	0.68	4	2	2	2	2	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	120	14	60	1.3	2.5	0.57	4	2	2	2	1	–	1.5	1.5	1.5	1.5	–
3	120	14	60	1.3	3.0	0.55	4	2	2	2	–	–	2.0	2.0	2.0	–	–
4	120	14	60	1.3	2.0	0.49	4	2	2	1	–	–	2.5	2.5	2.5	–	–

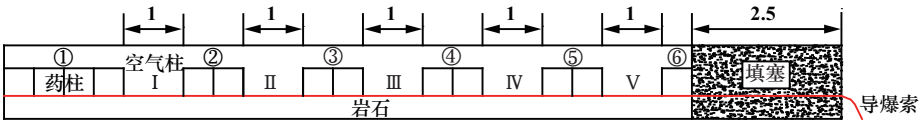


图 8 试验 1 装药和空气间隔结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of charge structure and air - deck structure in test 1

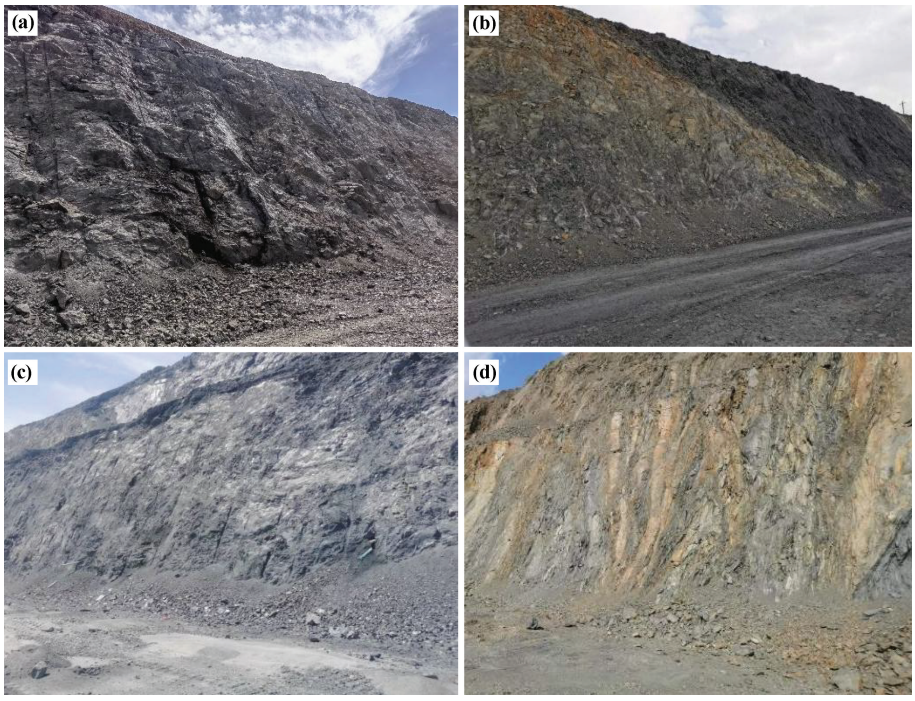
采掘完成后对 4 组试验进行现场实测统计,实测数据如表 5 所示,爆破效果如图 9 所示。

表 5 实测数据统计

Table 5 Statistical analysis of practical measurements

试验序号	贯通裂缝/cm	不平整度/cm	半壁孔率/%	效果评价
1	>5	<20	>70	一般
2	3~5	<10	>85	好
3	1~3	<20	>75	较好
4	1~3	<30	>50	差

试验 1 轴向空气柱长度 1.0 m,形成的贯通裂缝较宽,边坡壁面岩石破坏严重,特别是边坡下部存在明显超挖,半壁孔痕率 70% 左右,最大不平整度20 cm,爆破效果一般。试验 2 轴向空气柱长度1.5 m,孔间裂缝贯穿明显,半壁孔痕率达到 85%,边坡不平整度小于 10 cm,爆破效果较好。试验 3 轴向空气柱长度 2.0 m,孔间裂缝上部贯穿明显,下部局部区域未形成贯穿裂缝,半壁孔痕率为 75%,不平整度 10~20 cm,爆破效果较好。试验 4 轴向空气柱长度 2.5 m,空气柱区域裂缝存在明显没有贯通的情况,半壁孔痕率较差,仅 50%,不平整度 20~30 cm,爆破效果差。对比试验结果可知,试验 2 的爆破效果更好,试验 4 的爆破效果极差。



(a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4

图 9 爆破效果图

Fig. 9 Explosion effect photo

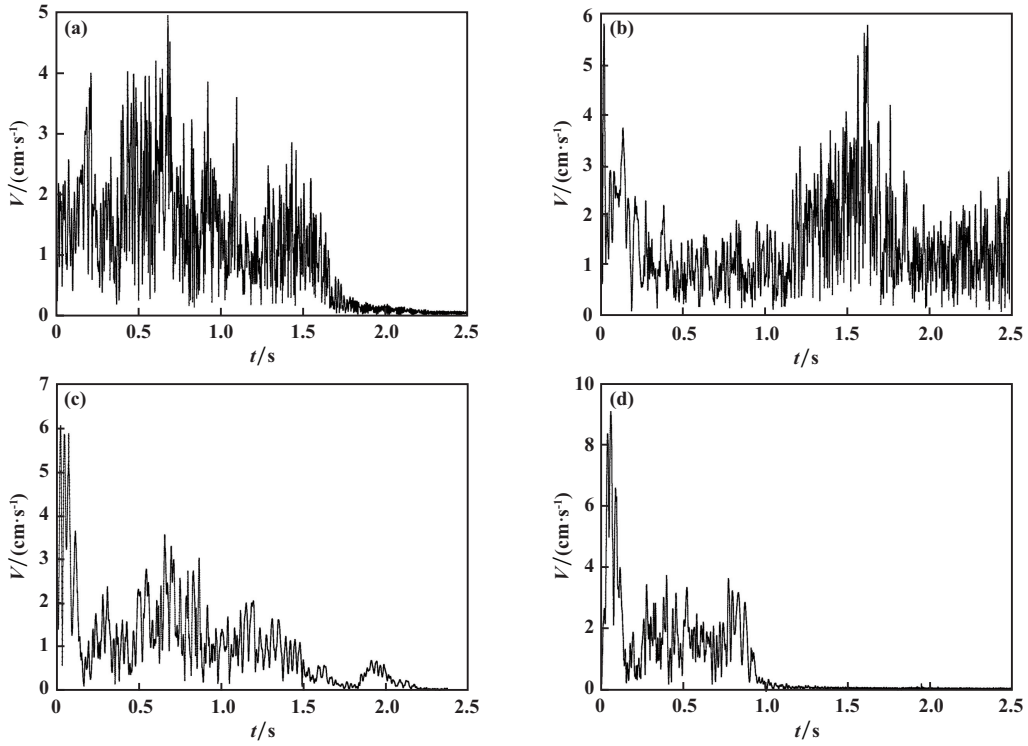
爆破时采用 TC-4850 爆破测振仪在爆区后方 45 m 左右范围内布置振动监测点,现场采集爆破振动数据,结果如表 6 所示,爆破振动波形图如图 10 所示。

由表 6 和图 10 可知,随着空气间隔长度增大,各测点爆破振动速度逐渐增大,空气柱长度从2.0 m增大到 2.5 m 时,爆破振动速度增大尤为明显。结合爆破振动数据和现场实测统计数据,轴向空气柱长度控制在 1.5 m 时,有利于相邻孔间形成贯通裂缝,达到减小爆破振动、形成稳定边坡的目的。

表 6　爆破振动测试数据统计

Table 6　Statistics of blasting vibration test data

试验序号	最大段药量/kg	距爆区距离/m	振动速度/(cm·s^{-1})			合成速度/(cm·s^{-1})
			X 分量	Y 分量	Z 分量	
1	260	48.8	4.728	2.454	5.547	4.955
2	260	42.6	3.908	4.352	3.697	5.782
3	260	45.1	7.103	5.273	3.801	6.094
4	260	49.0	5.061	4.206	8.440	9.076



(a) 试验 1;(b) 试验 2;(c) 试验 3;(d) 试验 4

图 10　各组试验爆破振动波形图

Fig. 10　Blasting vibration waveforms from tests

4　结论

1) 通过冲击压力叠加公式对预裂爆破轴向不耦合爆破作用进行理论分析,得出空气柱段的压力分布曲线整体呈“U”形分布,初步估算了轴向不耦合装药合理的空气柱长度为 1.5 m。

2) 轴向空气柱长度 1.5、2.0、2.5 m 的数值模型爆破应力计算结果表明,孔壁初始冲击压力峰值沿炮孔轴向压力曲线整体呈“U”形分布特征,且随着与装药段距离的增大,压力逐渐减小,在空气柱 1/2 位置处达到最小值。轴向空气柱长度 1.5、2.0 m 时应力值回落至 10 MPa 左右时出现振荡,可满足岩石孔间裂缝起裂和扩展的要求。轴向空气柱长度为 2.5 m 应力值回落至 7.0 MPa 以下出现振荡,曲线振荡区域峰值和平均值均小于岩石的抗拉强度,岩石成缝条件较差。

3) 巴润采场预裂爆破轴向不耦合装药工程实践表明,空气柱长度为 1.5 m 时,坡面不平整度小于 10 cm、半壁孔率大于 85%、爆破振动合成速度为 5.782 cm/s,各项指标均很理想,有利于相邻孔间形成贯通裂缝,达到减小爆破振动、形成稳定边坡的目的。

参考文献(References):

[1] 赵文奎,黄海仙,李启月,等. 基于孔壁压力的边坡预裂爆破参数设计与试验[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):1-5.
ZHAO Wenkui, HUANG Haixian, LI Qiyue, et al. Design and experiment of slope presplit blasting parameters based on borehole wall pressure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):1-5.

[2] 梁瑞,解丽娜,周文海,等. 中部空气间隔装药结构不耦合状态光面爆破效果研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):25-28.
LIANG Rui, XIE Lina, ZHOU Wenhai, et al. Research on smooth blasting with decoupled explosive charge in a mid column air deck system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(1):25-28.

[3] 康永全,薛里,孙崔源,等. 间隔不耦合装药结构形式及特点分析[J]. 工程爆破, 2020,26(5):62-67.
KANG Yongquan, XUE Li, SUN Cuiyuan, et al. Structural form and characteristic analysis of charge structure with deck decoupling[J]. Engineering Blasting, 2020,26(5):62-67.

[4] 郑炳旭,吴亮,宋锦泉,等. 空气间隔装药预裂爆破空气比经验公式分析[J]. 工程爆破, 2014,20(5):8-12.
ZHENG Bingxu, WU Liang, SONG Jinquan, et al. Empirical formula of air-decking ratio in air-decking pre-splitting blasting[J]. Engineering Blasting, 2014,20(5):8-12.

[5] 楼晓明,唐志恒,牛明远,等. 深孔轴向多段间隔装药孔壁冲击压力分布[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):6-11.
LOU Xiaoming, TANG Zhiheng, NIU Mingyuan, et al. Distribution of impact pressure on hole wall in deep-hole blasting with multi-stage axial air deck[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):6-11.

[6] 刘玉丰,方芳,李海谦,等. 不耦合装药结构爆炸孔壁压力分布特性的数值模拟[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):30-33.
LIU Yufeng, FANG Fang, LI Haiqian, et al. Numerical simulation of pressure distribution of blastholes with decoupled charges[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):30-33.

[7] 朱红兵,卢文波,吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学, 2007,28(5):986-990.
ZHU Hongbing, LU Wenbo, WU Liang. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(5):986-990.

[8] 楼晓明,王振昌,陈必港,等. 空气间隔装药孔壁初始冲击压力分析[J]. 煤炭学报, 2017,42(11):2875-2884.
LOU Xiaoming, WANG Zhenchang, CHEN Bigang, et al. Initial shock pressure analysis for hole wall with air-decked charge[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(11):2875-2884.

[9] 韩雪靖,王宝,罗瑞. 紫金山地下采场深孔爆破轴向不耦合系数的研究[J]. 金属矿山, 2018(9):63-68.
HAN Xuejing, WANG Bao, LUO Rui. Study on axial uncoupling coefficient of deep hole blasting in Zijinshan underground stope[J]. Metal Mine, 2018(9):63-68.

[10] 邵晓宁. 炮孔水压爆破孔壁压力计算[J]. 煤矿爆破, 2005,23(4):10-12.
SHAO Xiaoning. The calculation on hole wall shock pressures of water-pressure blasting[J]. Coal Mine Blasting, 2005,23(4):10-12.

[11] 孙丽. 空气间隔轴向不耦合装药预裂爆破数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
SUN Li. Study on numerical simulation of presplitting blasting with air-spaced axial uncoupled charge[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[12] 朱强,陈明,郑炳旭,等. 空气间隔装药预裂爆破岩体损伤分布特征及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(增刊1):2758-2765.
ZHU Qiang, CHEN Ming, ZHENG Bingxu, et al. Damage distribution characteristics and control technology of rock mass in presplitting blasting with air-spaced charge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(S1):2758-2765.

[13] 吴亮,钟冬望,蔡路军. 空气间隔装药中光面爆破机理数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009,31(16):77-81.
WU Liang, ZHONG Dongwang, CAI Lujun. Numerical simulation of the mechanism for air-decked smooth blasting[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(16):77-81.

[14] 杨国梁,杨仁树,姜琳琳. 轴向间隔装药爆破沿炮孔的压力分布[J]. 爆炸与冲击, 2012,32(6):653-657.
YANG Guoliang, YANG Renshu, JIANG Linlin. Pressure distribution along borehole with axial air-deck charge blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):653-657.

[15] 徐晓东,杜文秀. 高台阶并段预裂爆破半隔孔导向爆破技术研究[J]. 金属矿山, 2023(11):154-160.
XU Xiaodong, DU Wenxiu. Study on high bench parallel section presplitting blasting with half separated hole guided blasting technique[J]. Metal Mine, 2023(11):154-160.

[16] 师强强,潘祖瑛,李二宝. 高台阶松软岩体预裂爆破半隔孔导向作用效果的试验研究[J]. 现代矿业, 2021,37(3):40-44.
SHI Qiangqiang, PAN Zuying, LI Erbao. Experimental study on guiding effect of half-spaced guide hole in pre-splitting blasting of high step soft rock mass[J]. Modern Mining, 2021,37(3):40-44.

引用本文:师强强,朱星星. 预裂爆破轴向不耦合装药合理空气柱长度研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):30-36.

SHI Qiangqiang, ZHU Xingxing. Reasonable air column length of axial decoupling charge in presplit blasting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):30-36.