

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.015

炮孔堵塞长度对爆破效果的影响研究*

郭东明, 蓝樊革, 张伟, 朱若凡, 叶贵川, 赵志峰

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 在爆破工作中, 炮孔堵塞的效果对爆破工作的效果与安全有很大的影响, 为了提高爆破效果、降低爆破成本, 确定炮孔堵塞的最佳长度很有必要。结合爆轰波理论和理论力学, 采用理论分析与 LS-DYNA 数值模拟相结合的办法, 进行炮孔堵塞长度对爆破效果影响的研究, 并通过现场进行验证。研究结果表明: 炮孔深度在 0.6~1.4 m 时, 最佳的炮孔堵塞比例为 0.38~0.54, 且随炮孔深度的增大而减小, 炮孔深度在 1.6~2.4 m 时, 最佳的炮孔堵塞比例为 0.36~0.38; 炮孔深度超过 1.2 m, 同时炮孔堵塞长度 $\geq 1/2$ 炮孔深度后, 存在炮孔堵塞过长效应导致爆破效果不佳。径向不耦合系数 R 对炮孔的最佳堵塞长度具有显著的影响, 当 $R \leq 1.8$ 时, 最佳炮孔堵塞长度随着 R 的增大而减小, 当 $R > 1.8$ 时, 最佳炮孔堵塞长度不随 R 改变。在大同王村煤业有限责任公司 8107 顶回风巷进行了现场试验, 分别对 1.2 m 和 2.2 m 的掏槽孔以及 2.0 m 的辅助眼进行试验, 炮孔的最佳堵塞长度分别为 50 cm、90 cm 和 80 cm, 与理论计算、数值模拟的结果相吻合。

关键词: 炮孔堵塞长度; 数值模拟; 堵塞比例; 爆破效果; 径向不耦合系数

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)03-0108-08

Study of Influence of Stemming Length on Blasting Effect

GUO Dong-ming, LAN Fan-ge, ZHANG Wei, ZHU Ruo-fan, YE Gui-chuan, ZHAO Zhi-feng

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the field of blasting work, stemming has a significant impact on the effectiveness and safety of blasting operations. To improve the blasting effect and reduce blasting costs, it is essential to determine the optimal length of stemming. This study uses a combination of explosion wave theory, theoretical mechanics, and LS-DYNA numerical simulation to analyze the impact of stemming length on blasting effect, which is then validated through field experiments. The study results indicate that when the blast hole depth is between 0.6 m and 1.4 m, the optimal stemming ratio is between 0.38 and 0.54, and with an increase in blast hole depth, the optimal ratio decreases. When the blast hole depth is between 1.6 m and 2.4 m, the optimal stemming ratio is between 0.36 and 0.38. If the blast hole depth exceeds 1.2 m, and the stemming length equals or exceeds half of the blast hole depth, a detrimental effect may occur. The radial uncoupling coefficient R exerts a significant effect on the optimal stemming length. When R is less than or equal to 1.8, the optimal stemming length decreases with an increase in R . However, when R is greater than

收稿日期 (Date of reception): 2022-09-16

网络首发日期 (Published online): 2023-04-03

作者简介: 郭东明 (1974-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事矿山爆破与岩土工程领域的研究, (E-mail) wjgdm@126.com。

通讯作者: 蓝樊革 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破工程与岩土工程领域的研究, (E-mail) 13263138966@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974315)

About the author: GUO Dong-ming (1974-), male, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in the field of mine blasting and geotechnical engineering research, (E-mail) dmgucumb@126.com

Corresponding author: LAN Fan-ge (1998-), male, master candidate, mainly engaged in the field of blasting engineering and geotechnical engineering research, (E-mail) 13263138966@163.com.

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51974315)

1.8, the optimal stemming length remains unchanged. Additionally, field experiments were conducted at the Wangcun Coal Mine Limited Liability Company 8107 return airway, including tests on 1.2 m and 2.2 m cut holes and a 2.0 m auxiliary hole. The optimal stemming lengths were found to be 50 cm, 90 cm, and 80 cm, respectively, which aligns with the results of theoretical calculation and numerical simulation.

Key words: stemming length; numerical simulation; stemming ratio; blasting effect; radial decoupling coefficients

地下空间开发技术的发展, 无论是隧道还是煤矿巷道掘进, 爆破是常见的掘进方法^[1]。炮孔堵塞是爆破工程中关键的步骤, 堵塞的效果不仅对爆破效果有很大影响, 而且影响施工进度和设备安全^[2,3]。炮孔堵塞长度太短, 堵塞物易被爆生气体推出, 对巷道中的设备造成损毁; 炮孔堵塞长度过长, 爆炸体积减小, 降低爆破作用效果^[4]。

大量理论和试验证明了炮孔堵塞对爆破效果有巨大的影响作用^[5-7]。宗琦分析了堵塞物的运动规律^[8], 并通过现场试验验证存在最佳的堵塞长度。王琛联系炮孔深度推导出堵塞长度与孔深的关系^[9]。在此基础上张艳军考虑堵塞材料在起爆后会产生压缩^[10], 建立了压缩性堵塞模型。

秦声等人通过实验得出不同岩性、炮孔深度条件下的最佳堵塞长度^[11]。郝亚飞认为在单自由面爆破条件下, 炮孔堵塞长度对爆破振动速度具有较大的影响^[12], 径向不耦合系数同样对爆破效果影响很大。王伟等对爆炸应力波进行监测^[13], 发现径向不耦合系数在2~3时爆破效果最佳。梁为民对炮孔孔壁压力进行分析^[14], 认为不耦合装药结构提高了爆破效果。孟德君研究了不同装药结构对爆炸能量传递的影响^[15], 发现不耦合装药结构使爆炸能量分布更均匀。

通过数值分析软件, 结合大同王村煤业有限责任公司8107顶回巷的爆破设计方案, 在设计中进行不耦合系数1.31的条件下, 对炮孔深度与最佳堵塞长度的规律进行研究, 与此同时探究其他径向不耦合系数对于最佳堵塞长度的影响, 以此指导工程。

1 炮孔爆破数值模拟

1.1 模型建立

模拟现场巷道开挖面直眼和楔形炮孔的爆破, 为了减少计算量, 建立1/2模型, 网格划分如图1。模型网格尺寸偏小, 可得到清晰的应力演变图。

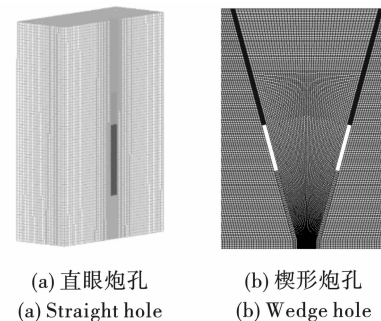


图1 网格划分图

Fig. 1 Grid generation diagram

模型设置炮孔直径42 mm, 以孔深 L_k 和径向不耦合系数 R 为变量, 孔深变量范围在0.6~2.4 m, 孔深变化梯度为0.2 m。不耦合系数 R 变量选2.625、2.1、1.68、1.31、1.2、1。模型中空气和炸药设置共节点, 与岩石、堵塞物采用流固耦合设置, 自由面反射。

1.2 模型参数

炸药采用煤矿许用炸药, 模型采用高能燃烧模型8号材料及JWL状态方程描述炸药爆燃过程, 炸药具体参数如表1。

表1 炸药相关参数

Table 1 Parameters of emulsion explosives

密度/($g \cdot cm^{-3}$)	爆速/($cm \cdot \mu s^{-1}$)	A	B	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.0	0.32	214	0.18	4.15	0.95	0.15	4.12

炮孔堵塞材料选用随动硬化模型的3号材料, 为了研究围岩的损伤程度和损伤范围, 选择

272RHT材料模型。各材料的力学参数如表2、表3。

表2 炮泥的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of stemming

密度/($g \cdot cm^{-3}$)	弹模/MPa	屈服强度/MPa	泊松比 ν_0	f	N
1.9	35.38	0.65	0.4	0.05	0.15

表3 围岩的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock

密度/($g \cdot cm^{-3}$)	剪切模量/GPa	弹模/GPa	抗压强度/MPa	压应变率	A	N
2.57	19.6	5.12	91.4	0.3	1.6	0.61

2 模拟结果与分析

单孔的等效应力云图如图2。起爆后0.1 ms内形成椭圆球传播面,0.18 ms孔口方向的应力传播较快。0.48 ms时,应力波到达临空面并反射形成拉应力,与后续应力波叠加共同作用。在0.9 ms时

柱状药包产生的爆轰基本结束。楔形孔起爆应力演化如图3,双孔起爆后应力波同样先是椭圆球形式传播,0.54 ms后应力波到达临空面并反射,0.9 ms时应力波向四周衰减传播,此时岩体内的应力场主要由反射波构成。

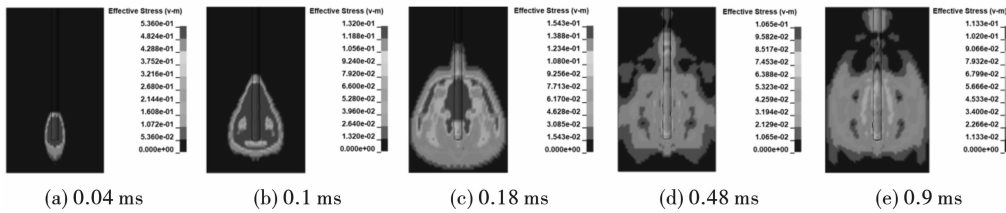


图2 单孔起爆时等效应力演化图

Fig. 2 Equivalent stress evolution of single hole

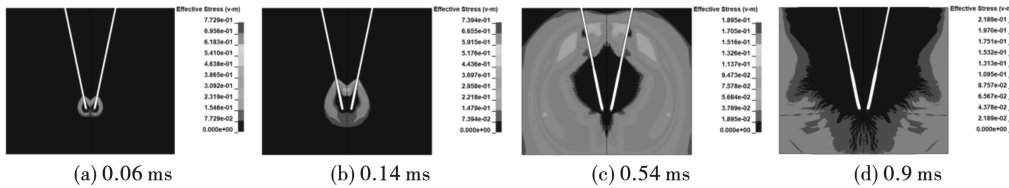


图3 楔形孔起爆时等效应力演化图

Fig. 3 Equivalent stress evolution of wedge holes

2.1 测点布置

通过比较测点的动态响应参数来得出最佳的堵塞长度。单孔选取三个测点,三个测点都位于距离炮孔中轴线50 cm处,测点1位于炮孔孔底处,测点2位于炮孔中部,测点3位于孔口处。双孔起爆测点位于两炮孔中轴线上,测点A位于炮孔中部,测点B位于临空面。具体位置如图4所示。

深为0.6 m、0.8 m时,堵塞长度分别为28 cm、35 cm参数取得最大值。由图可知,1.0 m孔深在40~45 cm范围内测点各项参数取得最大值,符合文献[4]提出的 L_k 为1.0 m最佳堵塞长度0.35~0.45 m范围内。同理,将1.2 m、1.4 m孔深最佳堵塞汇总在表4中。

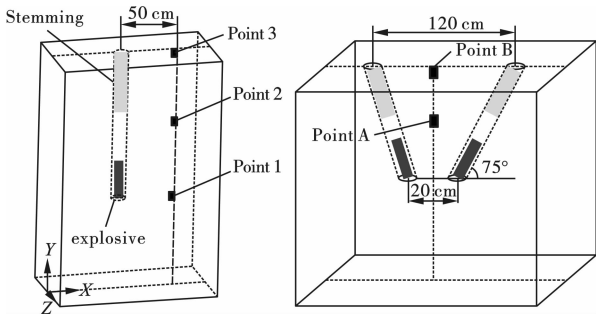


图4 测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

2.2 动态响应参数

0.6~1.2 m孔深模型各测点数据如图5,当孔

表4 各孔深的最佳堵塞长度及炮孔堵塞比例

Table 4 Optimal stemming length and stemming ratio

孔深/m	最佳堵塞长度/cm	K_1	K_2	K
0.6	30~35	0.500	0.583	0.542
0.8	35~40	0.438	0.500	0.469
1.0	35~45	0.350	0.450	0.400
1.2	40~50	0.330	0.417	0.373
1.4	45~55	0.321	0.393	0.357
1.6	55~60	0.344	0.375	0.359
1.8	60~70	0.333	0.389	0.361
2.0	70~75	0.35	0.375	0.363
2.2	75~85	0.341	0.386	0.363
2.4	85~90	0.354	0.375	0.365

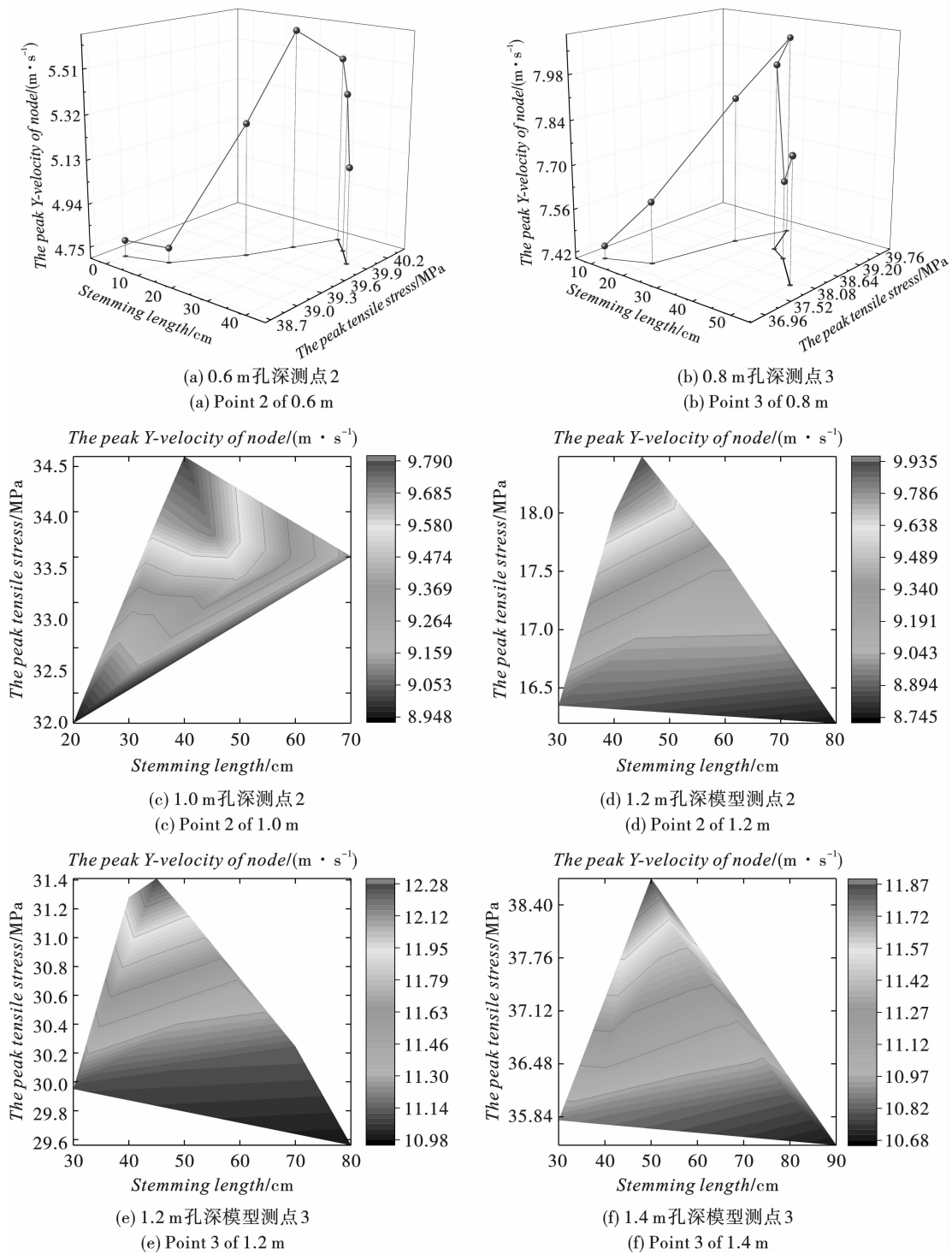


图 5 各孔深测点的参数峰值

Fig. 5 The peak of parameters of measuring point

楔形孔模型数据曲线如图 6。由图可知, 总体上拉应力峰值先增大后减小, 且最大堵塞长度对应的拉应力峰值最小。其中 2.0 m 孔深的最佳堵塞长度为 70 cm, 符合文献[16,17]试验得出的 2 m 炮孔最佳堵塞长度 0.5~0.7 m。

各孔深最佳堵塞长度汇总如表 4。

表 4 中 K_1 、 K_2 分别为最佳堵塞比例下、上限以

及各孔深最佳堵塞比例 K 。绘制曲线如图 7 所示。

图 7 表明孔深为 0.6~1.2 m 时最佳堵塞比例 K 较大, K 随着孔深增大迅速减小, 在孔深 1.4 m 之后趋于稳定。表明 0.6~1 m 孔深在起爆时, 应尽量将炮孔封堵满, 堵塞长度不应小于 35 cm, 1.4~2.4 m 炮孔按照堵塞比例 0.36~0.38 进行封堵。

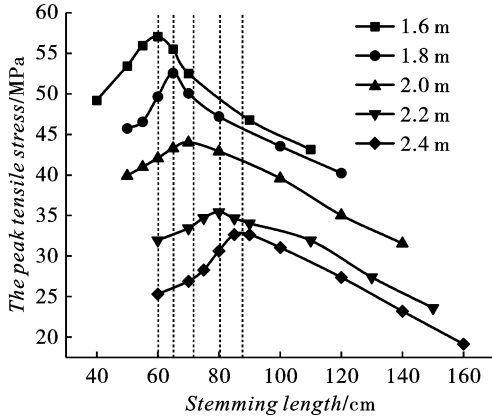


图6 楔形孔测点A的拉应力峰值

Fig. 6 The peak tensile stress of point A in wedge hole

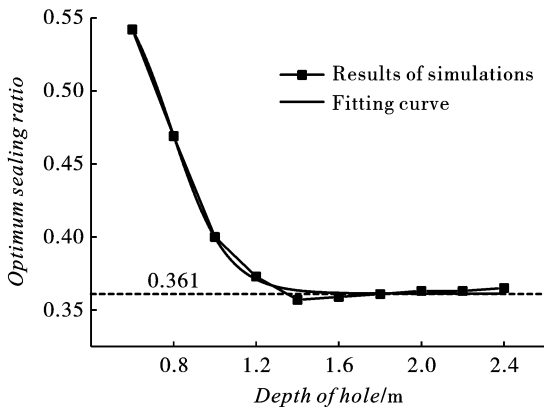


图7 最佳炮孔堵塞比例随孔深的变化规律

Fig. 7 Variation of optimum stemming ratio with hole depth

从图6中不难发现,长堵塞与短堵塞的动力响应参数较低,且随着孔深增加,长堵塞测点应力峰值以及质点振动速度峰值渐低于短堵塞。

1.2 m、2.4 m 孔深岩石损伤如图8、图9。

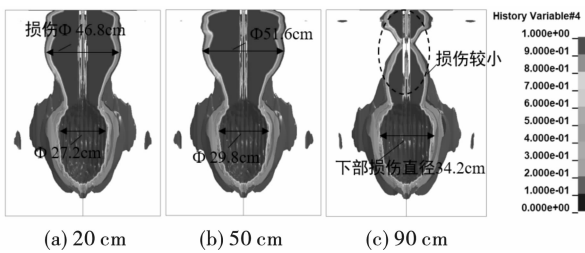


图8 1.2 m 孔深岩石损伤图

Fig. 8 Rock damage of 1.2 m blasting hole

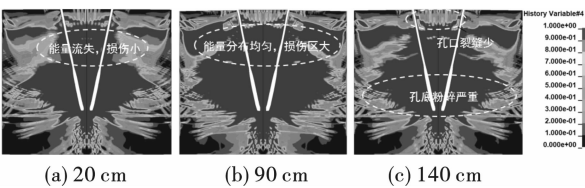


图9 2.4 m 孔深岩石损伤图

Fig. 9 Rock damage of 2.4 m blasting hole

由图8可知,1.2 m 孔深时堵塞 20 cm 的上部损伤直径为 46.8 cm,而 50 cm 堵塞为 51.6 cm,增大了 10.3%,90 cm 长堵塞炮孔上部损伤较小,但下部损伤直径最大。2.4 m 孔深岩石损伤如图 9,20 cm 堵塞损伤范围小的原因在于炮孔内的空气段长,气体膨胀消耗能量,降低气体压力。140 cm 长堵塞孔口裂缝少,孔底粉碎严重,堵塞过长导致孔内炸药反应不足,起爆后破岩能量分布不均匀,孔口能量较少,爆炸体积减小,爆破效果不佳。

综上,结合图5等值线图可知,当炮孔深度超过 1.2 m,堵塞长度超过炮孔深度的 1/2 之后,堵塞物造成孔口部位围岩的破坏能力降低,而孔底粉碎现象严重,岩体内动态响应参数峰值较小以及作用时间较短等爆破效果不佳的问题,即为堵塞物的堵塞过长效应。

2.3 径向不耦合系数 R 影响

不同径向不耦合系数造成孔内爆轰压力变化和能量分布,进而影响炮泥的最佳堵塞长度。在不同 R 条件下,1.2 m 孔深的围岩总能量随堵塞长度的变化,得出最佳堵塞长度,如图 10 所示。

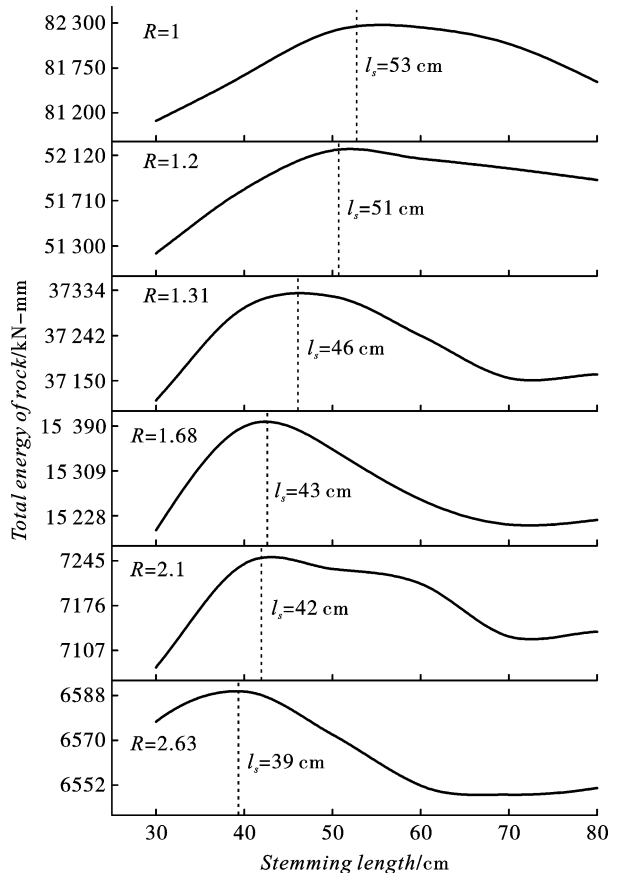


图10 围岩总能量随堵塞长度变化规律

Fig. 10 Variation of energy in rock with stemming length

2.0 m 孔深的测点 B 处拉应力峰值拟合曲线后绘制如图 11 所示。

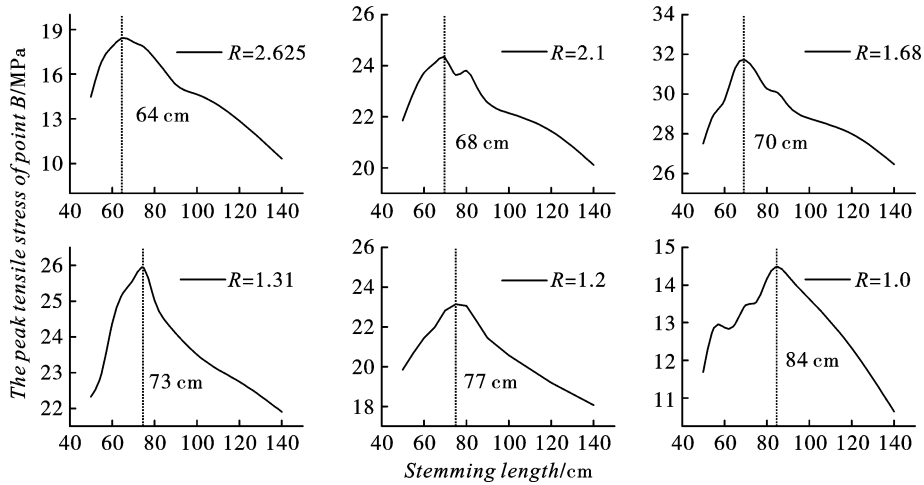


图 11 测点 B 拉应力峰值

Fig. 11 The peak tensile stress of point B

将不同 R 条件下, 1.2 m、2.0 m 孔深的最佳堵塞长度 $x_{1.2}$ 、 $x_{2.0}$, 炮孔堵塞比例 $K_{1.2}$ 、 $K_{2.0}$ 汇总如表 5。

表 5 最佳堵塞长度与不耦合系数

Table 5 Optimal stemming length and decoupling coefficients

R	$x_{2.0}/\text{cm}$	$K_{2.0}$	$x_{1.2}/\text{cm}$	$K_{1.2}$
1.000	84	0.420	53	0.442
1.200	77	0.385	51	0.425
1.310	73	0.365	46	0.383
1.680	70	0.350	43	0.358
2.100	68	0.340	42	0.350
2.625	64	0.320	39	0.325

表 5 数据绘制关系曲线如图 12。1.2 m 和 2.0 m 孔深的整体变化趋势相一致, 在 $R=1 \sim 1.8$ 时, K 都随着 R 迅速下降, 在 $R=1.8$ 之后下降速度放缓, 最后都近似趋于同一渐近值。迅速下降段的主要原因是空气层的存在, 炮孔内爆轰压力减小, 在保证相同的破岩时间, 其他爆破参数不变条件下, 堵塞长度可相对减小。平缓段, 炸药能量传递效率趋于稳定, 空气层厚度对堵塞长度的影响降低。该变化规律表明了径向不耦合系数对于最佳堵塞比例具有一定的影响, 特别当 R 在 1 ~ 1.8 范围内变化最佳封孔比例降低将近 20%。

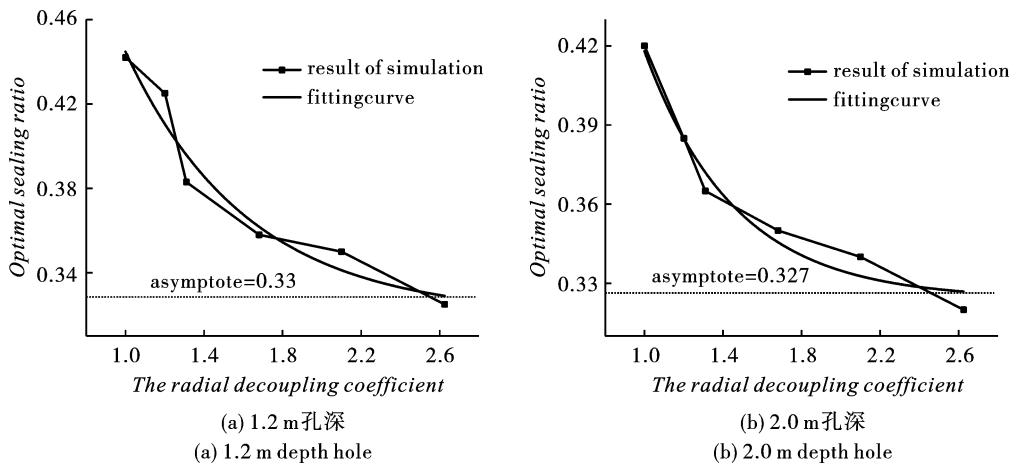


图 12 最佳炮孔堵塞比例随径向不耦合系数的变化规律

Fig. 12 Variation of optimal stemming ratio with radial decoupling coefficient

3 工程实验

大同王村矿 8107 顶回风巷以泥岩和砂岩为主, 裂隙发育较多。该巷道掘进过程中, 爆破方案设计 1.2 m 直眼掏槽孔、2.2 m 楔形掏槽孔以及 2.0 m 辅

助眼如图 13。

炮孔直径 42 mm, 药包直径 35 mm, 炸药、围岩和炮泥相关参数由实验室测得如表 1、2、3。8107 顶回风巷爆破原始条件如表 6。

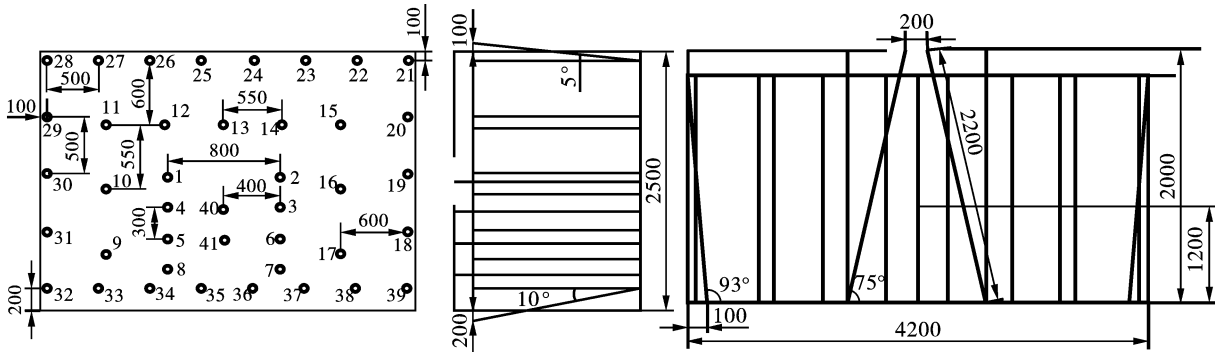


图 13 炮孔布置图(单位:mm)
Fig. 13 layout of hole(unit:mm)

表 6 8107 顶回风巷爆破原始条件
Table 6 Original blasting conditions of 8107 ventilation passage

巷道断面/ m ³	炸药用量/ kg	最小抵抗线 w/m	岩石普氏 系数	炮眼平均 深度/m
10.5	23.4	0.3	3~8	2

表 7 堵塞长度理论计算与模拟结果
Table 7 Theoretical calculation and modeling results of stemming length

孔深/m	堵塞长度理论 值 L ₁ /cm	模拟结果最大 值 L ₂ /cm	(L ₁ - L ₂)/L ₁
1.2	55.4	50	0.097
2.2	93.6	85	0.092
2.0	82.1	75	0.086

3.1 堵塞长度计算

将现场的参数带入炮孔堵塞物长度计算公式^[17],计算得出堵塞长度理论值。查表 5 得到模拟结果,由于数值模拟具有理想化围岩材料的特点,与实际围岩条件不同,实际堵塞长度应取模拟结果范围的最大值。将两者列入表 7。

理论值和模拟值差异控制在 10% 内,故可认为理论公式计算结果与数值模拟结果一致。

3.2 现场实验

根据理论计算值和模拟结果,设计现场不同的炮孔堵塞方案,进行堵塞试验时,仅改变堵塞长度,炮孔深度依据爆破方案设计的孔深以及布置位置。具体堵塞方案如表 8。

表 8 爆破堵塞方案
Table 8 Schemes of blasting stemming

孔深/m	装药长度/m	堵塞方案/cm					
		1	2	3	4	5	6
1.2	0.3	50	60	70	80	90	90
2.0	0.6	60	70	90	110	130	140
2.2	0.6	70	80	100	120	140	160

根据表 8 设置的爆破方案进行炮孔堵塞,不同堵塞方案的爆破效果如表 9 所示。

表 9 堵塞方案的爆破效果
Table 9 Blasting effect of schemes

方案 编号	炮孔 利用率	炸药单耗/ (kg · m ⁻³)	进尺/m	每循环岩石 体积/m ³
1	0.84	1.330	1.68	17.6
2	0.89	1.251	1.78	18.7
3	0.88	1.265	1.76	18.5
4	0.86	1.293	1.72	18.1
5	0.83	1.345	1.66	17.4
6	0.80	1.393	1.60	16.8

现场爆破情况表明堵塞方案 2 和 3 的爆破效果是最好的,方案 1、4 次之,方案 5 和 6 存在堵塞过长效应导致爆破效果不佳。由于对材料进行简化处理,不考虑围岩节理和原始损伤,数值模拟得出的最佳堵塞长度,在实际爆破作业中应将长度适当增大。堵塞长度过长时,炮孔利用率低,炮孔临空面的岩体较难被炸药能量破碎,抛掷距离短,近炮孔底部岩体粉碎现象严重。

4 结论

(1) 炮孔堵塞长度对爆破效果具有较大的影响。利用 LS-DYNA 数值计算得到 0.6 ~ 1.4 m 孔深

条件下,炮孔的最佳堵塞比例为0.4~0.54,且随着孔深增大而逐渐减小。1.6~2.4 m孔深时,炮孔最佳堵塞比例为0.36~0.38。

(2)径向不耦合系数 R 能够影响孔内应力波及爆生气体的强度,对最佳炮孔堵塞长度具有一定影响。通过软件进行数值计算发现当 $R \leq 1.8$ 时,炮孔的最佳堵塞长度随着 R 的增大而快速减小,在 $R > 1.8$ 之后 R 对最佳堵塞比例 K 影响不大。

(3)数值模拟结果显示当炮孔深度超过1.2 m,炮孔堵塞比例超过0.5之后,炮孔起爆后出现测点动态应力峰值低、作用时间短、孔底岩石过度粉碎、孔口岩石破坏程度不足的情况,为堵塞过长效应作用,为堵塞过长效应。

(4)在大同王村煤业有限责任公司8107顶回巷掘进面进行现场试验,得到1.2 m的直眼掏槽孔合理堵塞长度范围为60~70 cm;2.0 m辅助眼合理堵塞长度为70~90 cm;2.2 m的楔形掏槽孔最佳堵塞长度为80~100 cm。结果与理论计算值、数值模拟值吻合,验证了研究结果的可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [1] QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956. (in Chinese)
- [2] 刘达, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞钻爆开挖爆破振动主频衰减公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2015-2026.
- [2] LIU D, LU WB, CHEN M, et al. Attenuation formula of the dominant frequency of blasting vibration during tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2015-2026. (in Chinese)
- [3] 蔚立元, 李术才, 徐帮树. 舟山灌门水道海底隧道钻爆法施工稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3453-3459.
- [3] WEI L Y, LI S C, XU B S. Stability analysis of Zhoushan subsea tunnel with drill-and-blast construction method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3453-3459. (in Chinese)
- [4] 赵新涛, 程贵海, 冯国建. 炮孔堵塞长度的计算与实验研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(2): 165-171.
- [4] ZHAO X T, CHENG G H, FENG J G. Calculation and experimental study of blast-hole stemming length [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(2): 165-171. (in Chinese)
- [5] 张袁娟, 韩红强, 黄金香, 等. 炮孔堵塞对爆破效果影响研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 101-103.
- [5] ZHANG YJ, HAN HQ, HUANG JX, et al. Study on influence of blast-hole stemming to blasting effect [J]. Coal Technology, 2014, 33(5): 101-103. (in Chinese)
- [6] 任志峰, 余红兵, 赵明生, 等. 堵塞长度对巷道掘进掏槽爆破效果影响研究[J]. 爆破, 2017, 34(2): 51-54, 109.
- [6] REN S F, YU H B, ZHAO M S, et al. Study of influence of stemming length on cutting blasting effect in tunnel excavation [J]. Blasting, 2017, 34(2): 51-54, 109. (in Chinese)
- [7] 冯志斌, 袁绍国, 王政. 炮孔堵塞长度对巷道爆破效果影响研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(5): 90-91.
- [7] FENG Z B, YUAN S G, WANG Z. Study on influence of blasting cracking length on roadway blasting effect [J]. Coal Technology, 2018, 37(5): 90-91. (in Chinese)
- [8] 宗琦. 炮孔堵塞物运动规律的理论探讨[J]. 爆破, 1996(1): 8-11.
- [8] ZONG Q. Investigation into move regularity about stemmed material in hole charge blasting [J]. Blasting, 1996(1): 8-11. (in Chinese)
- [9] 王琛, 文忠, 曹梦宇. 隧道爆破中炮泥的作用与堵塞长度计算[J]. 采矿技术, 2011, 11(5): 118-120.
- [9] WANG C, WEN Z, CAO MY. Function of stemming and calculation of stemming length in tunnel blasting [J]. Mining Technology, 2011, 11(5): 118-120. (in Chinese)
- [10] 张艳军, 陈岩武, 雷美荣, 等. 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析[J]. 爆破, 2021, 38(3): 45-49, 129.
- [10] ZHANG YJ, CHEN YW, LEI MR, et al. Drilling blasting hole stemming length analysis [J]. Blasting, 2021, 38(3): 45-49, 129. (in Chinese)
- [11] 秦声, 吴德义, 樊凌川. 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(4): 1-4.
- [11] QIN S, WU DY, FAN LC. Reasonable calculating stemming length in the bore hole of blasting roadway [J]. China Mine Engineering, 2021, 50(4): 1-4. (in Chinese)
- [12] 郝亚飞, 李海波, 刘恺德, 等. 单自由面爆破振动特征的炮孔堵塞长度效应[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3105-3110, 3142.
- [12] HAO YF, LI HB, LIU KD, et al. Blasthole stemming length effects of single free-face blasting vibration characteristic [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3105-3110, 3142. (in Chinese)

- tion of explosive demolition of frame structure collapse in situ[J]. *Blasting*, 2014, 31(2):100-103. (in Chinese)
- [9] 费鸿禄,刘 梦,张玉莹,等. 10层框架结构楼房爆破拆除的数值模拟[J]. *工程爆破*, 2016, 22(3):48-53.
- [9] FEI Hong-lu, LIU Meng, ZHANG Yu-ying, et al. Numerical simulation of blasting demolition of 10-storey frame structure building [J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(3):48-53. (in Chinese)
- [10] 汪旭光. *爆破设计与施工*[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [11] 杨仕教,张文龙,郑建礼. 复杂环境下3座塔形框架结构景观房的控制爆破拆除[J]. *爆破器材*, 2016, 45(1):51-55.
- [11] YANG Shi-jiao, ZHANG Wen-long, ZHENG Jian-li. Controlled blasting demolition of three landscape rooms with turiform frame construction in complicated environment [J]. *Blasting Materials*, 2016, 45(1):51-55. (in Chinese)
- [12] 余德运,杨 军,陈大勇,等. 基于分离式共结点模型的钢筋混凝土结构爆破拆除数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(4):349-354.
- [12] YU De-yun, YANG Jun, CHEN Da-yong, et al. Numerical simulation of reinforced concrete structure based on separate element node model[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(4):349-354. (in Chinese)
- [13] 高文乐,朱茂迅,李元振,等. 发电厂双曲线型冷却塔的定向爆破拆除及爆破效果数值分析[J]. *爆破器材*, 2020, 49(4):52-57.
- [13] GAO Wen-le, ZHU Mao-xun, LI Yuan-zhen, et al. Directional blasting demolition of hyperbolic cooling tower in power plant and numerical analysis of blasting outcome [J]. *Blasting Materials*, 2020, 49(4):52-57. (in Chinese)
- [14] 刘 伟,叶家明,胡 彬,等. 高强度钢筋混凝土结构楼房拆除爆破及数值模拟[J]. *安徽理工大学学报:自然科学版*, 2020, 40(2):19-27.
- [14] LIU Wei, YE Jia-ming, HU Bin, et al. Study on demolition blasting of high-strength reinforced concrete structure buildings and its numerical simulation[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2020, 40(2):19-27. (in Chinese)
- [15] 王希之,王自力,龙 源,等. 高层建筑物爆破拆除塌落震动的数学模型[J]. *爆炸与冲击*, 2002(2):188-192.
- [15] WANG Xi-zhi, WANG Zi-li, LONG Yuan, et al. A Mathematical model of collapse vibration in blasting demolishing tall buildings [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002(2):188-192. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第115页)

- [13] 王 伟,李小春. 不耦合装药下爆炸应力波传播规律的试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6):1723-1728.
- [13] WANG W, LI XC. Experimental study of propagation law of explosive stress wave under condition of decouple charge [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6):1723-1728. (in Chinese)
- [14] 梁为民, LIU Hong-yuan, 周丰峻. 不耦合装药结构对岩石爆破的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(12):1215-1218, 1228.
- [14] LIANG WM, LIU HY, ZHOU FJ. Influence of air-decoupling charge on rock blasting [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(12):1215-1218, 1228. (in Chinese)
- [15] 宗 琦,孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003(4):641-645.
- [15] ZONG Q, MENG D J. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003(4):641-645. (in Chinese)
- [16] 刘冰川. 深孔爆破一次成井炮孔堵塞理论研究及应用[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [16] LIU BC. Study on Hole Stemming Theory of one-step deep hole raise blasting and its application [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [17] 赵新涛,黄海龙. 影响岩体爆破质量的垂直炮孔堵塞长度研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(7):94-99.
- [17] ZHAO X T, HUANG H L. Study on vertical hole stemming length affecting rock blasting quality [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(7):94-99. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚