高寒露天金属矿压水填塞增效爆破技术研究*

李昂[1,2],刘建国[1,3],付毅[4],赖渊平[5],林春平[5],林明磊[1,2],穆拉提·居尔艾提[1,2]

(1.北京科技大学 大安全科学研究院, 北京 100083;
2.北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;
3.北京科技大学 国家卫健委粉尘工程防护重点实验室, 北京 100083;
4.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭县 364200;
5.西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 850212)

摘要:针对高寒露天金属矿高台阶深孔爆破存在破岩不均匀、大块率高的问题,提出了一种露天矿压水填塞增效爆破技术。利用数值模拟方法,研究了细沙填塞与压水填塞两种工况下,炸药爆炸后岩体内等效应力与损伤的时空变化规律,分析了压水填塞增效爆破机制,并在西藏巨龙铜矿开展了爆破漏斗试验,以验证数值模拟结果的准确性。结果表明:传统细沙填塞爆破时,爆破等效应力向上传播速度慢且不均匀,导致爆破能量主要聚集在炮孔底部,对上部岩体破碎程度不足。压水填塞爆破时,由于水的不可压缩性及对爆炸应力的良好传播性能,爆破应力在水柱中快速、均匀传播至炮孔中上部,可实现上下部岩体的均匀破碎。与细沙填塞爆破相比,上侧压水填塞爆破漏斗表面最大长度、漏斗深度与漏斗体积分别增加了13.33%、12.07%、90.88%。研究结果可为高寒露天金属矿高效爆破采矿提供参考。

关键词:高寒露天矿,深孔爆破,压水填塞,大块率,爆破漏斗

中图分类号:TD235 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0040-13

Research on Enhanced Blasting Technology with Water Stemming in High-Altitude Cold Open-Pit Metal Mines

Li Ang[1,2], *Liu Jianguo*[1,3], *Fu Yi*[4], *Lai Yuanping*[5], *Lin Chunping*[5], *Lin Minglei*[1,2], *Mulati Jueraiti*[1,2]

(1.Research Institute of Macro-Safety Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3.NHC Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China;
5.Xizang Julong Copper Co., Ltd., Lhasa, Xizang 850212, China)

Abstract: To address the prevalent issues of uneven rock fragmentation and high boulder rate in high-bench deep-hole blasting within high-altitude cold open-pit metal mines, an enhanced blasting technology utilizing water stemming for open-pit mines was proposed. A numerical simulation method was employed to investigate the spatiotemporal variation patterns of effective stress and damage within the rock mass after explosive detonation under two working conditions: fine sand stemming and water stemming. The mechanism of water stemming enhanced blasting was analyzed. Furthermore, blasting crater tests were conducted at the Xizang Julong Copper Mine to verify the accuracy of the numerical simulation results. The results indicate that during conventional blasting with fine sand stemming, the equivalent stress propagates upward slowly and unevenly, causing most of the blasting energy to concentrate at the bottom of the borehole, resulting in insufficient fragmentation of the upper rock mass. In contrast, during water stemming blasting, due to the incompressibility of water and its excellent stress transmission properties, the blasting stress propagates rapidly and uniformly through the water column to the middle and upper parts of the borehole, leading to effective fragmentation of both the upper and lower rock masses. Compared with fine sand

* **收稿日期**:2025-07-20
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2024YFC2909500,2022YFC2903901);国家自然科学基金项目(52474205,52204198)
作者简介:李昂(2002—),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事矿山高效爆破方法研究。E-mail:la488211@163.com
通信作者:刘建国(1993—),男,陕西榆林人,博士,副教授,主要从事矿山尘毒危害与高效爆破的教学与研究工作。E-mail:liujg@ustb.edu.cn

stemming blasting, the upper water stemming blasting increases the maximum surface length, depth, and volume of the blasting crater by 13.33%, 12.07%, and 90.88%, respectively. The research results can provide a reference for efficient blasting and mining in high-altitude cold open-pit metal mines.

Key words: High-altitude cold open-pit mine, Deep-hole blasting, Water stemming, Boulder rate, Blasting crater

0 引言

近年来,随着国际地缘政治冲突与大国博弈的不断升级,加之突发性全球危机,使得全球矿产资源贸易受到冲击。为保障我国战略性矿产资源供应安全,加大对我国境内高海拔、低品位、难开采金属矿产资源的开采力度,是我国矿业未来发展的必然趋势[1-3]。当前,高海拔露天矿仍以爆破开采为主,受季节温差大、空气稀薄、氧气浓度低等极端气候条件影响[4-6],岩体冻融损坏显著、炸药性能衰减,进而造成爆破单耗高、大块率高等突出问题[7-8]。

针对露天矿爆破单耗高、大块率高等问题,国内外学者开展了大量研究。刘菊平等[9]利用微差爆破和分段装药技术,通过增加爆破自由面和改善炸药孔内分布的均匀性,实现了露天矿爆破大块率与炸药单耗的同步降低。张衍昊等[10]利用数值模拟与现场试验相结合的方法,通过优化孔网参数与孔间延期爆破时间,实现了露天矿深孔台阶爆破碎石平均块度小于 60 cm 的爆破效果。Jiang 等[11]通过优化炮孔长径比与封孔长度,增加岩石破碎能量利用率,进而有效改善了露天矿台阶爆破效果。此外,Ding 等[12]利用岩粉、矿渣、NaOH 溶液和水玻璃($Na_2O \cdot nSiO_2$)合成了一种新型炮孔封堵材料,通过现场试验,发现应用该材料封孔后,露天矿台阶爆破后 90%以上的碎石块度小于 57 cm,显著降低了大块率。由此可知,炮孔填塞材料对爆破效果具有显著影响。

水是典型的不可压缩液体,其压缩系数约为 0.5×10^{-4},仅为空气的 1/30 000～1/20 000,在 100 MPa 压力下,空气的压缩体积为 12 倍,而水的压缩体积仅为 1.04 倍[13]。同时,相关研究表明,爆炸在空气中产生的初始冲击波压力为 80～130 MPa,而在水中爆炸产生的初始冲击波压力则超过 10 000 MPa[14],约为空气的 100 倍。这使得爆炸能量在水中的传播效率更高,可有效延长爆炸气体对岩石的作用时间,提高爆炸能量利用率。目前,国内外学者利用数值模拟与实验室试验,针对水介质改善爆破效果开展了一系列研究。例如,Zhu 等[15]利用 AUTODYN 软件模拟了爆炸波在水、沙子和空气中的传播特性,发现爆炸波在水中的传播效率最高,对岩体造成的损伤最显著。Chi 等[16]通过室内试验开展了空气与水介质不耦合装药的爆破试验研究,发现在相同的不耦合系数下,水介质中爆破的岩体破碎程度明显大于空气介质,表明水填塞可提升爆破效果。综上所述,露天矿爆破过程中,在炸药上方填压一定长度的水柱(即压水填塞),对改善爆破效果具有明显的促进作用。然而,目前对压水填塞爆破技术的应用大多集中在隧巷道爆破方面[17-18],在露天矿爆破中的应用与研究较为匮乏。

基于此,本文以高寒露天矿压水填塞增效爆破技术为研究对象,首先利用 LS-DYNA 软件对压水填塞与细沙填塞两种爆破工况进行数值模拟研究,量化分析两种工况下的等效应力传播过程与岩体损伤程度,揭示压水填塞改善爆破效果的作用机制;此外,在典型高海拔露天金属矿——西藏巨龙铜矿(平均采场海拔 5 300 m)开展爆破漏斗试验,验证数值模拟结果的准确性。本研究提出一种改善露天矿爆破效果的新型技术,即压水填塞增效爆破技术,该技术在降低露天矿爆破大块率、改善爆破效果方面具有显著潜在应用价值。

1 试验方法与材料

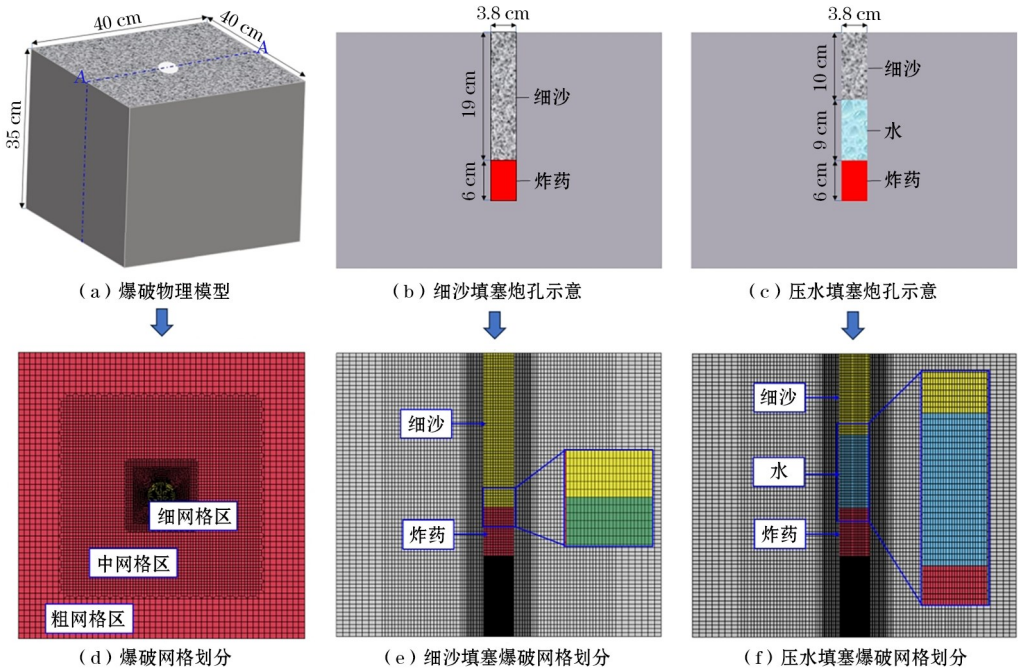
本文首先采用数值模拟方法,研究了细沙填塞与压水填塞两种爆破工况下的岩体爆破过程,分析了爆后 500 μs 内岩体内的等效应力与损伤的分布特征与变化规律,为揭示压水填塞增效爆破机制提供了理论依据;随后,在西藏巨龙铜矿开展了爆破漏斗试验,以验证数值模拟结果的准确性。

1.1 压水填塞数值模拟方法

1.1.1 物理模型构建与网格划分

使用 LS-DYNA 软件进行建模与网格划分,如图 1(a)所示,建立长、宽、高分别为 40 cm、40 cm 和 35 cm 的岩体模型,炮孔位于岩体中心位置,孔深 25 cm、直径 3.8 cm,装药高度 6 cm,炸药单耗 0.68 kg/t。

数值模拟了两种爆破工况,分别为细沙填塞爆破与压水填塞爆破,两种工况炮孔内部装填结构分别如图 1(b)、图 1(c)所示。其中,细沙填塞爆破为底部装乳化炸药,炸药上方采用细沙进行填塞;压水填塞爆破于底部装乳化炸药,炸药上方依次填塞 9 cm 水溶液和 10 cm 细沙。



(a) 爆破物理模型 (b) 细沙填塞炮孔示意 (c) 压水填塞炮孔示意

(d) 爆破网格划分 (e) 细沙填塞爆破网格划分 (f) 压水填塞爆破网格划分

图 1 爆破岩体物理模型构建与网格划分

Fig.1 Physical model construction and mesh generation of blasted rock mass

爆破岩体的计算网格划分结果如图 1(d)至图 1(f)所示。爆破岩体模型采用 Lagrange 算法,考虑到靠近炸药的部分网格变形较大,为兼顾计算质量与网格数量,爆破岩体采用三级加密网格,即由炮孔向外横向网格尺寸分为 0.2 cm(细网格)、0.4 cm(中网格)和 0.8 cm(粗网格),纵向网格尺寸均为 0.5 cm。炮孔内物质及空气耦合域采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrange-Euler, ALE)算法,ALE 全局网格尺寸为 0.34 cm,整个模型的总网格数为 2 384 800个。

1.1.2 岩石 RHT 本构模型与参数设置

本文采用 LS-DYNA 软件进行爆破数值模拟。大量研究表明,LS-DYNA 软件中的 Riedel-Hiermaier-Thoma(RHT)本构模型因参数可调性强、模拟结果准确性高等优势,已被广泛用于爆炸冲击等问题的数值模拟[19]。因此,本文采用该模型进行数值模拟。RHT 模型的变形过程分为弹性阶段、线性强化阶段和损伤软化阶段。弹性阶段中,弹性极限面是塑性变形的起点,其等效应力值由失效面等效应力推导得出,见式(1)。

$$\sigma_e(p,\theta,\varepsilon)=f_c\cdot\sigma^*_{TXC}(p_{s,el})\cdot R_3(\theta)\cdot F_r(\varepsilon)\cdot F_e\cdot F_c \quad (1)$$

式中:f_c为单轴抗压强度,MPa;$\sigma^*_{TXC}(p_{s,el})$为准静态弹性极限面压缩子午线等效应力强度,MPa;$p_{s,el}$为准静态硬弹性极限压力,MPa;$R_3(\theta)$为罗德角因子;$F_r(\varepsilon)$为应变率动态增强因子;F_e为弹性缩放函数;F_c为“帽盖”函数。

线性强化阶段用于表征材料的应变硬化,在等效应力未超出线性强化弹性极限应力时,变形为弹性变形,之后发生塑性变形并累积塑性应变,该阶段屈服应力服从公式(2):

$$\sigma_Y=\sigma_{elastic}+3G\xi\varepsilon_p \quad (2)$$

式中:G为剪切模量,MPa;ξ为剪切模量缩减系数;ε_p为线性强化阶段累计等效塑性应变;σ_Y为当前屈服应力,MPa;$\sigma_{elastic}$为初始屈服应力,MPa。

当材料失效面上的应力状态达到极限强度时,持续的塑性应变会引发损伤积累,进入损伤软化阶段,破坏时的塑性应变见式(3)[20]。

$$\varepsilon_p^f=\begin{cases}D_1[P_0^*-(1-D_r)P_t^*] & P_0^*\geqslant(1-D_r)P_t^*+(\varepsilon_p^m/D_1)^{1/D_2}\\ \varepsilon_p^m & P_0^*<(1-D_r)P_t^*+(\varepsilon_p^m/D_1)^{1/D_2}\end{cases} \quad (3)$$

式中:ε_p^f 为破坏时的塑性应变;ε_p^m 为破坏时的最小等效塑性应变;P_t^* 为失效截止压力,MPa;P_0^* 为当前等效静水压力,MPa;D_r 为 RHT 模型的损伤变量;D_1、D_2 为损伤参数。

本研究采用花岗岩材料作为爆破岩体,参考文献[21],对模型 34 个参数进行了设置,具体参数值见表 1。

表 1 爆破岩体 RHT 模型参数设置

Table 1 Parameter setting of RHT model for blasted rock mass

$\rho_0/(kg/m^3)$	f_c	α_0	A'_1/GPa	A'_2/GPa	A'_3/GPa	β_c	β_t	B_0
2 660	167.8	1	35.27	39.58	9.04	0.032	0.036	1.22
T_1/GPa	T_2/GPa	G/GPa	p_{el}	$\varepsilon_0^c/\mu s^{-1}$	$\varepsilon_0^t/\mu s^{-1}$	$\varepsilon_c/\mu s^{-1}$	$\varepsilon_t/\mu s^{-1}$	D_2
35.27	0	21.9	125	3×10^{-11}	3×10^{-12}	3×10^{-19}	3×10^{-19}	1
g_t^*	N	Q_0	f_c^*	A_f	n_f	f_t^*	g_c^*	ξ
0.7	3	0.68	0.18	1.6	0.61	0.04	0.53	0.5
A	n	ε_p^m	D_1	p_{comp}/GPa	B	B_1		
2.44	0.76	0.01	0.04	6	0.01	1.22		

表 1 中:ρ_0 为岩石初始密度,kg/m³;α_0 为初始孔隙度;p_{el} 为孔隙开始压碎时压力,MPa;p_{comp} 为孔隙完全压实时的压力,GPa;N 为孔隙度指数;A'_1、A'_2、A'_3 为 Hugoniot 系数,GPa;B_0、B_1 为状态方程参数;T_1、T_2 为状态方程参数,GPa;f_t^* 为拉压强度比;f_s^* 为剪切强度比;A 为失效面参数;n 为失效面指数;Q_0 为拉压子午比参数;B 为罗德角相关系数;β_c 为压缩应变率指数;β_t 为拉伸应变率指数;ε_0^c 为参考压缩应变率,μs^{-1};ε_0^t 为参考拉伸应变率,μs^{-1};ε_c 为失效压缩应变率,μs^{-1};ε_t 为失效压缩应变率,μs^{-1};g_c^* 为压缩屈服面参数;g_t^* 为拉伸屈服面参数;A_f 为残余应力强度参数;n_f 为残余应力强度指数;D_1 为初始损伤参数;D_2 为损伤参数;ε_p^m 为破坏时的最小等效塑性应变。

1.1.3 其他材料参数设置

炸药爆炸过程通常采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程进行模拟,其表达见下式[22],炸药参数参考文献[23]。

$$p = A(1-\omega/R_1V_0)e^{-R_1V} + B(1-\omega/R_2V_0)e^{-R_2V} + \omega E_0/V_0 \tag{4}$$

式中:p 为爆轰产物的压力,Pa;V_0 为相对体积,m³;E_0 为单位体积内能,J;A、B、R_1、R_2、ω 为材料参数。

爆轰波在水中的传递过程选择 GRUNEISEN 状态方程,其表达见下式[24]:

$$p = \frac{\rho_0 C^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu-\alpha/2\mu^2]}{[1-(S_1-1)\mu-S_2\mu^2/(\mu+1)-S_3\mu^3/(\mu+1)^2]^2} + (\gamma_0+\alpha\mu)E \tag{5}$$

式中:C 为冲击波速度-粒子速度($\mu_s-\mu_p$)曲线的截距;S_1、S_2、S_3 为($\mu_s-\mu_p$)曲线的系数,为方程系数;α 为 γ_0 的一阶修正;$\mu=\rho/\rho_0-1$,ρ 为岩石当前密度,kg/m³;E 为初始比内能,J/kg。

此外,空气采用 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程。水、空气和细沙 3 种材料的有关参数参考文献[25]进行设置。

1.1.4 数值模拟结果分析方法

本研究选取等效应力与损伤两个参数对爆破结果进行分析。等效应力是指能够引起材料发生变形与破坏、产生力学响应的等效单轴应力,其计算方法见下式。

$$\sigma_v = \sqrt{[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/2} \tag{6}$$

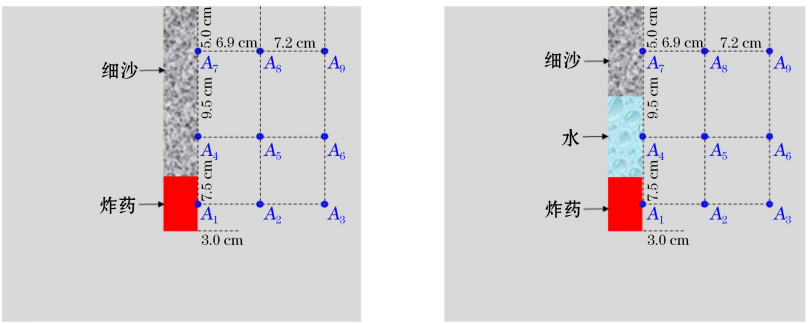
式中,σ_1、σ_2、σ_3 为第一、第二、第三主应力,MPa。

损伤为累计等效塑性应变与最终失效等效塑性应变的比值,为无量纲参数,其大小在 0 至 1 之间,0 表示岩石完整无破坏,1 表示岩石粉碎完全破坏,计算公式如下:

$$D = \sum \frac{\triangle\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_p^{failure}} \tag{7}$$

式中:$\Delta\varepsilon_{pl}$ 为等效塑性应变增量;$\varepsilon_p^{failure}$ 最终失效等效塑性应变。

为了定量比较分析细沙填塞与压水填塞的爆破效果,在炮孔中心切面上布置 9 个(A_1 至 A_9)监测点,用于统计等效应力与损伤值,如图 2 所示。其中 A_1、A_4、A_7 位于爆破压碎区,A_2、A_5、A_8 位于爆破裂隙区,A_3、A_6、A_9 位于爆破弹性振动区[26]。



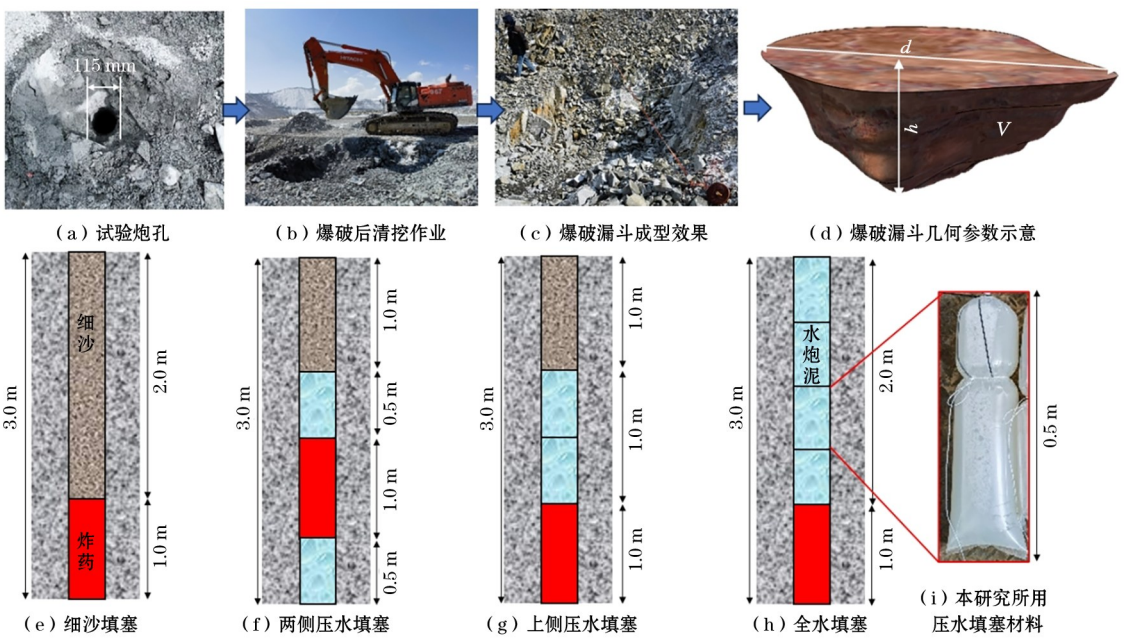
(a) 细沙充填 (b) 压水充填

图 2 爆破参数监测点布置

Fig.2 Layout of blasting parameter monitoring points

1.2 压水填塞爆破漏斗试验方法

爆破漏斗试验在西藏巨龙铜矿 5 305 m 平台开展。现场试验包含钻孔、爆破、清挖与测量 4 个环节,如图 3(a)至图 3(d)所示。随后对爆破漏斗表面最大长度(d)、漏斗深度(h)与漏斗体积(V)进行测量。试验炮孔孔径为 115 mm,孔深为 3 m,炸药装填高度为 96 cm,采用双发电子雷管起爆。为系统探究压水填塞对爆破效果的影响,共开展了4 组爆破漏斗试验,4 组试验炮孔填塞工况分别如图3(e)至图 3(h)所示。本研究所用压水填塞材料如图 3(i)所示,单个水袋直径 114 mm、高度 0.5 m。



(a) 试验炮孔 (b) 爆破后清挖作业 (c) 爆破漏斗成型效果 (d) 爆破漏斗几何参数示意

(e) 细沙填塞 (f) 两侧压水填塞 (g) 上侧压水填塞 (h) 全水填塞 (i) 本研究所用压水填塞材料

图 3 爆破漏斗现场试验与试验工况

Fig.3 Blasting crater field tests and test conditions

2 结果与讨论

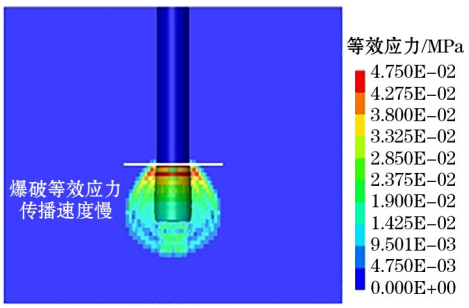
2.1 压水填塞爆破效果数值模拟结果分析

2.1.1 爆破后岩体内等效应力与损伤时空分布特征分析

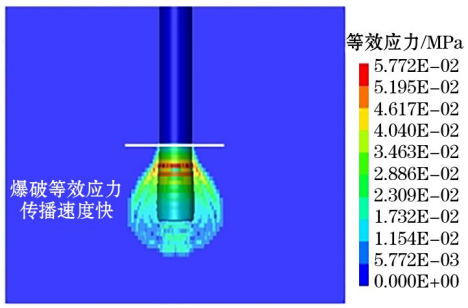
为探究爆破后岩体内等效应力与损伤的时空分布特征,截取爆破后 10、22、50、100、500 μs 时刻,炮孔中心垂直截面的等效应力与损伤分布云图进行分析,如图 4 和图 5 所示。观察可知,爆破后 10 μs 和 22 μs 时,压水填塞工况下的等效应力分布高度显著高于细沙填塞工况,且压水填塞的等效应力向上传播更加均匀(见图 4(d)),而细沙填塞则出现了应力间隔传播现象(见图 4(c)),这表明炸药爆炸产生的应力在水中的传播速度和传播效率均高于细沙。爆破应力在水中的快速传播,使得岩体损伤亦快速扩展,由图 5(c)、图 5(d)可知,在爆破后 22 μs 时,压水填塞工况最大损伤已扩展至水炮泥与细沙交接处,而细沙填塞工况的最大损伤仍聚集在孔底炸药位置。该结果表明,由于水

对应力的快速传播作用，爆破应力在岩体内的损伤范围快速扩大，减少爆炸应力在孔底作用时间，提升了爆炸应力破岩均匀性。这对露天矿高台阶爆破时减少表面大块率具有重要应用价值。

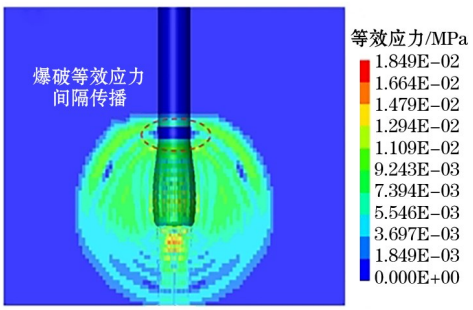
在爆破后 50 μs 时，如图 4(e)、图 4(f)所示，细沙填塞与压水填塞两种工况下爆破产生的应力以波的形式向岩体四周传播，但细沙填塞的损伤主要集中在岩体中下部(见图 5(e))，而压水填塞已对岩体上表面部分产生显著损伤(见图 5(f))。在爆破后 100 μs 时，压水填塞工况对岩体的损伤已贯穿整体炮孔(见图 5(h))，而细沙填塞工况在炮孔中上部仍有部分区域未实现有效损伤(见图 5(g))，这再次表明，压水填塞可显著提升爆炸破岩速度与效率，尤其对上部岩体的破碎具有良好改善作用。在爆破后 500 μs 时，如图 4(i)、图 4(j)所示，爆炸等效应力传播基本结束，压水填塞工况下岩体表面炮孔处的变形量远大于细沙填塞(见图 4(j)、图 5(j))，且压水填塞时岩体整体损伤分布均匀，而细沙填塞工况下岩体的左上部仍存在未损伤区域(见图 5(i))。由此可知，压水填塞对爆炸上部岩体破碎具有显著改善作用。



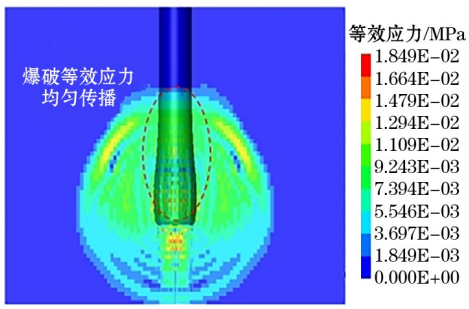
(a) 细沙填塞 (10 μs)



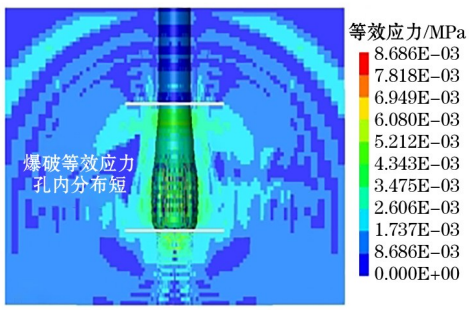
(b) 压水填塞 (10 μs)



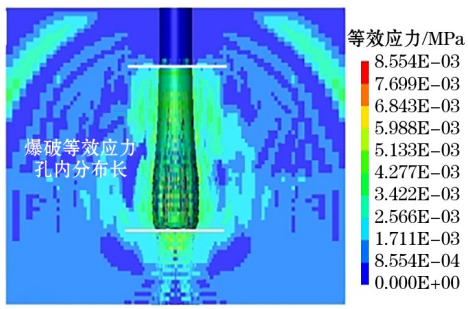
(c) 细沙填塞 (22 μs)



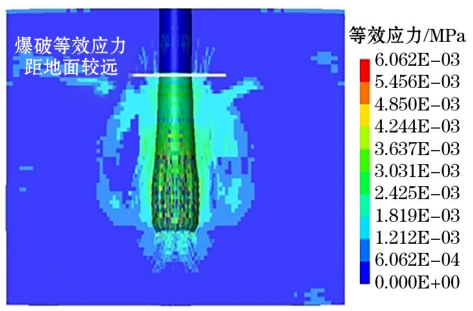
(d) 压水填塞 (22 μs)



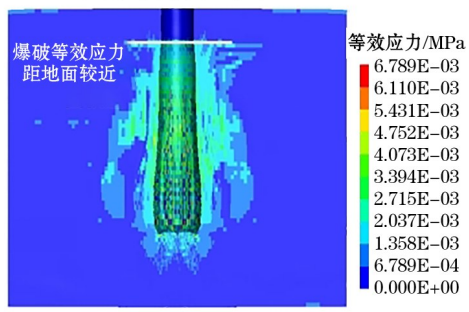
(e) 细沙填塞 (50 μs)



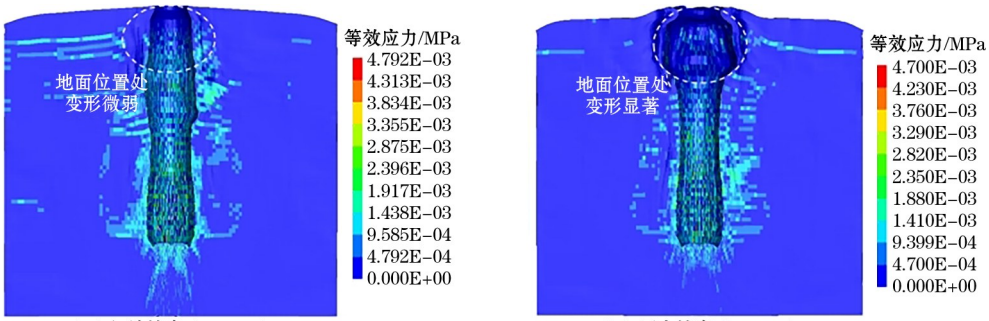
(f) 压水填塞 (50 μs)



(g) 细沙填塞 (100 μs)



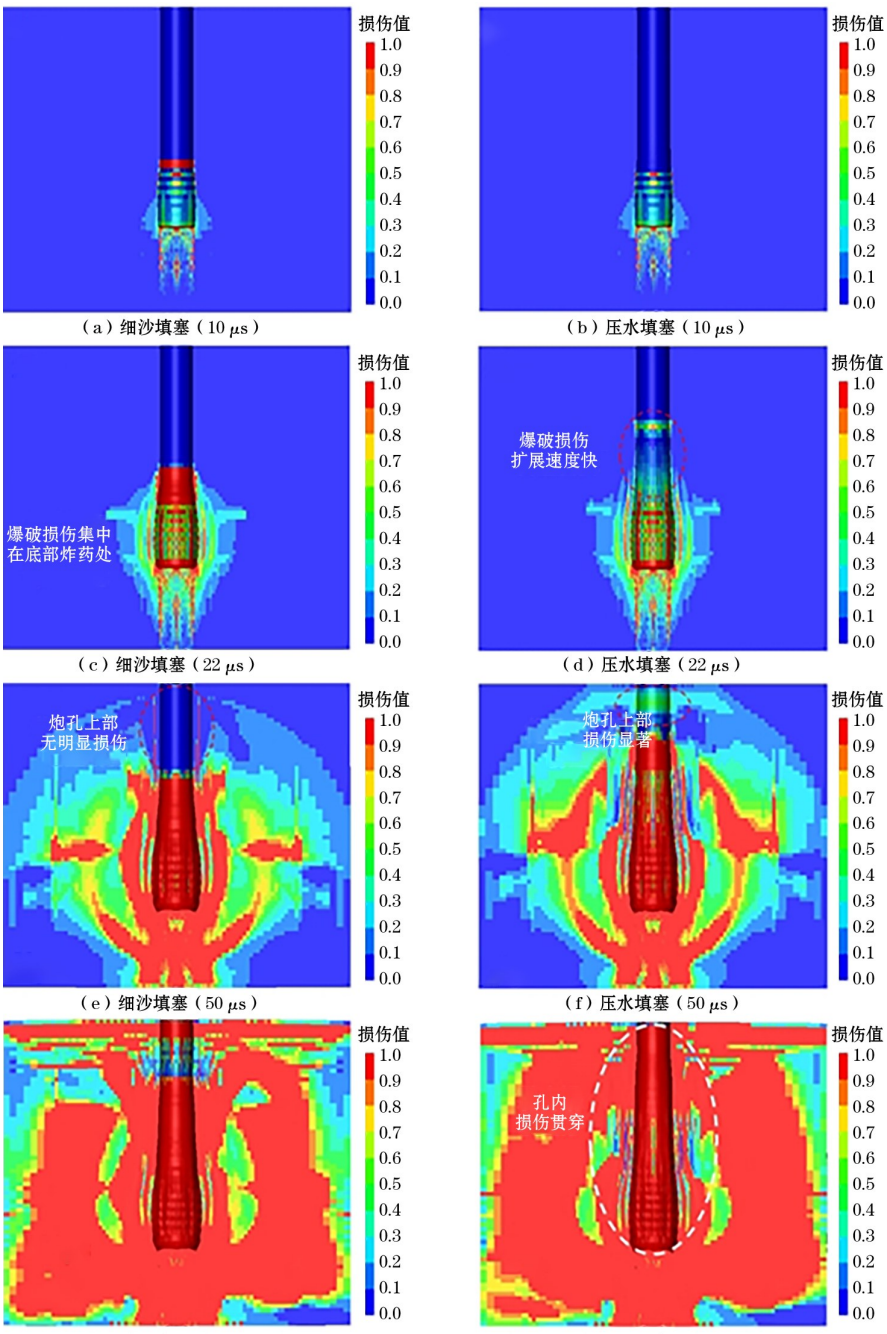
(h) 压水填塞 (100 μs)



(i) 细沙填塞 (500 μs)　　(j) 压水填塞 (500 μs)

图 4　细沙填塞与压水填塞爆破后等效应力云图

Fig.4　Cloud maps of effective stress after blasting with fine sand stemming and water stemming



(a) 细沙填塞 (10 μs)　　(b) 压水填塞 (10 μs)

(c) 细沙填塞 (22 μs)　　(d) 压水填塞 (22 μs)

(e) 细沙填塞 (50 μs)　　(f) 压水填塞 (50 μs)

(g) 细沙填塞 (100 μs)　　(h) 压水填塞 (100 μs)

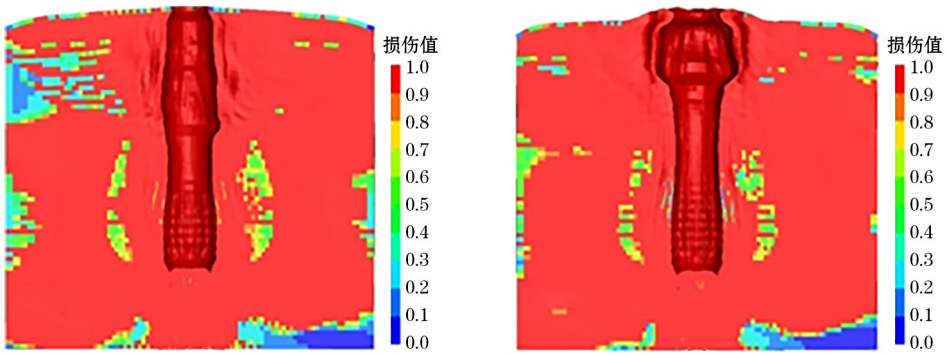


图 5 细沙填塞与压水填塞爆破后损伤分布云图

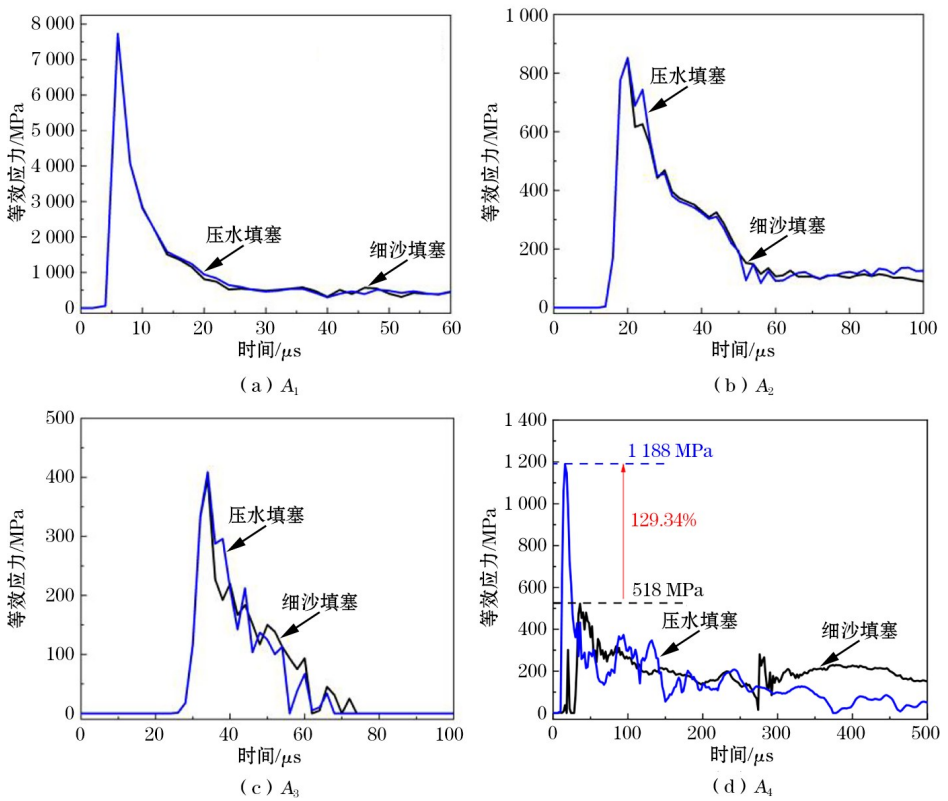
Fig.5 Cloud maps of damage distribution after blasting with fine sand stemming and water stemming

综上所述,爆炸后应力在水中的传播速度与传播效率均高于细沙,使得压水填塞工况下,岩体内爆炸等效应力与损伤的分布更均匀,进而获得比细沙填塞更佳的破岩效果。

2.1.2 爆破后岩体内等效应力与损伤传导过程量化分析

为定量分析细沙填塞与压水填塞对爆破等效应力与损伤演化规律的影响,基于图 2 所示的监测点,统计岩体内 9 个监测点的等效应力随时间的变化规律,结果如图 6 所示。观察可知,炮孔底部 3 个监测点(A_1、A_2、A_3)的等效应力随时间的变化均呈现先增加、后降低的变化规律,且距炸药位置越远,等效应力下降阶段呈现的波动越明显;此外,细沙填塞与压水填塞对 A_1、A_2、A_3 三个点的等效应力无明显影响。

A_4、A_5、A_6 监测点的等效应力呈现先增加、后降低、再波动趋缓的三阶段变化规律;相比于细沙填塞,压水填塞的最大等效应力显著增加,A_4、A_5、A_6 监测点的最大等效应力分别增加了 129.34%、52.80%、31.14%,这表明压水填塞可显著增加炸药上方的等效应力,对改善炮孔上部岩体破碎程度具有显著意义。



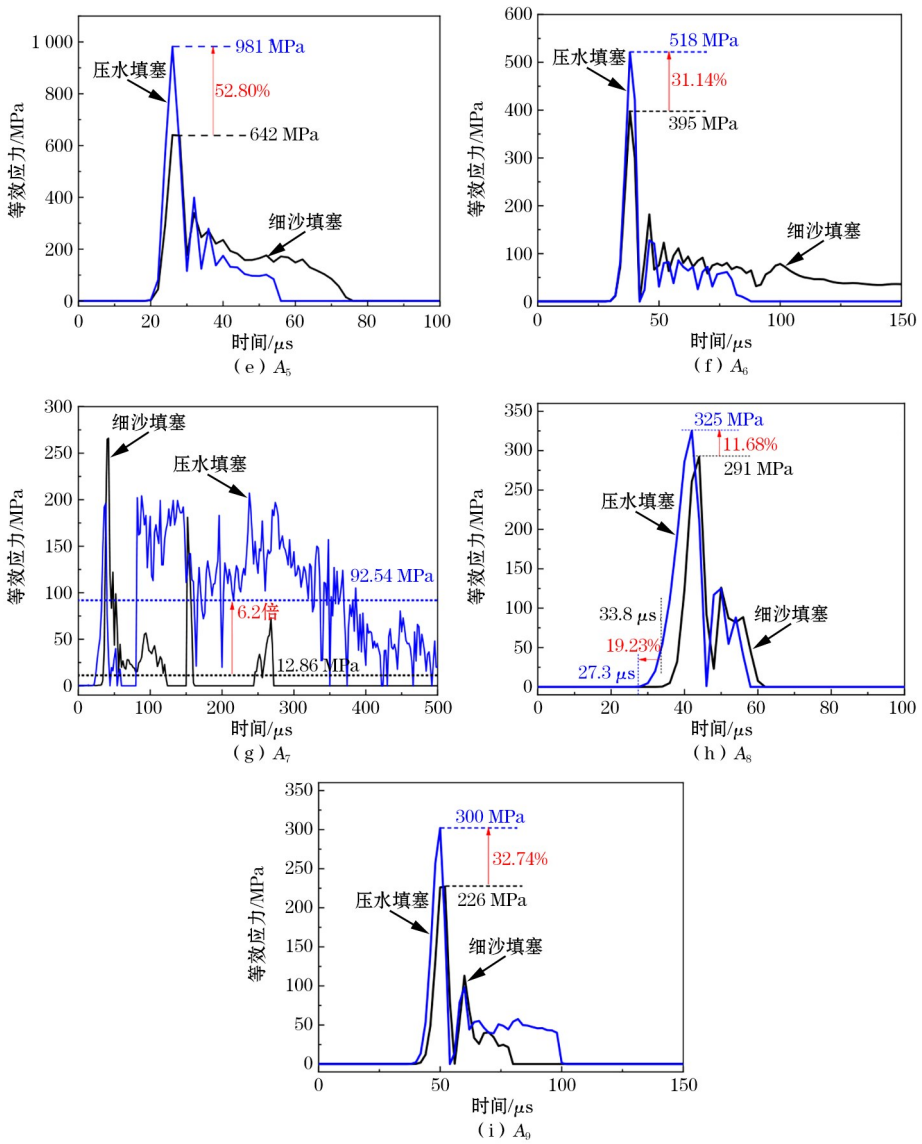


图 6 细沙填塞与压水填塞爆破后等效应力随时间的变化曲线

Fig.6 Variation curves of effective stress with time after blasting with fine sand stemming and water stemming

A_7、A_8、A_9 监测点的等效应力变化规律与 A_4、A_5、A_6 监测点相似,呈现先增加、后降低、再波动趋缓的变化规律。A_7 监测点位于炸药的正上方,且靠近岩体上表面,爆破应力在岩体上表面经多次垂直反射,导致该监测点的等效应力出现长时间大幅波动,且压水填塞对应的等效应力远高于细沙填塞,前者 500 μs 内的平均等效应力较后者增加了 6.2 倍;这再次表明,压水填塞可显著促进炸药能量向上传播。在 A_8 监测点,压水填塞的等效应力开始上升时间较细沙填塞提前了 19.23%,最大等效应力提升了 11.68%;在 A_9 监测点,压水填塞的最大等效应力较细沙填塞增加了 32.74%。该结果表明,压水填塞不仅可提高爆破应力在岩体内的传播速度,还可提升其传播效率,降低应力损失。

为进一步分析压水填塞对爆破效果的增效机制,基于图 2 所示的 9 个监测点,统计爆破岩体损伤随时间的变化规律,结果如图 7 所示。观察可知,在炸药底部,即 A_1、A_2、A_3 监测点,压水填塞与细沙填塞对岩体损伤影响不大,这与图 6 中的等效应力变化规律相似,这是由于应力导致岩体损伤。

由图 7 可知,在 A_4 监测点,压水填塞达到最大损伤的时间长于细沙填塞,结合图 6(e)与图 6(f)可知,由于水对应力具有高效传播性能,爆破应力经过该点时首先被向上传播,到达水与细沙交接面后发

生反射,反射应力对该点产生损伤,因此该点达到最大损伤的时间更长。在 A_5、A_6 监测点,压水填塞达到最大损伤的时间较细沙填塞均有一定缩短,分别缩短了 31.4%、8.2%;且在 A_6 监测点,细沙填塞对应的最大损伤值仅为 0.52,损伤效果明显弱于压水填塞。由此可知,压水填塞不仅可以增加应力传导速率,还可降低应力传播过程中造成的损失,即增加爆破能量传导效率。在 A_7、A_8、A_9 监测点,压水填塞达到最大损伤的时间均较细沙填塞大幅缩短,分别缩短了 51.1%、23.9%、12.4%,该结果表明,距离炸药位置越远,压水填塞对爆炸应力传播速度影响越大。

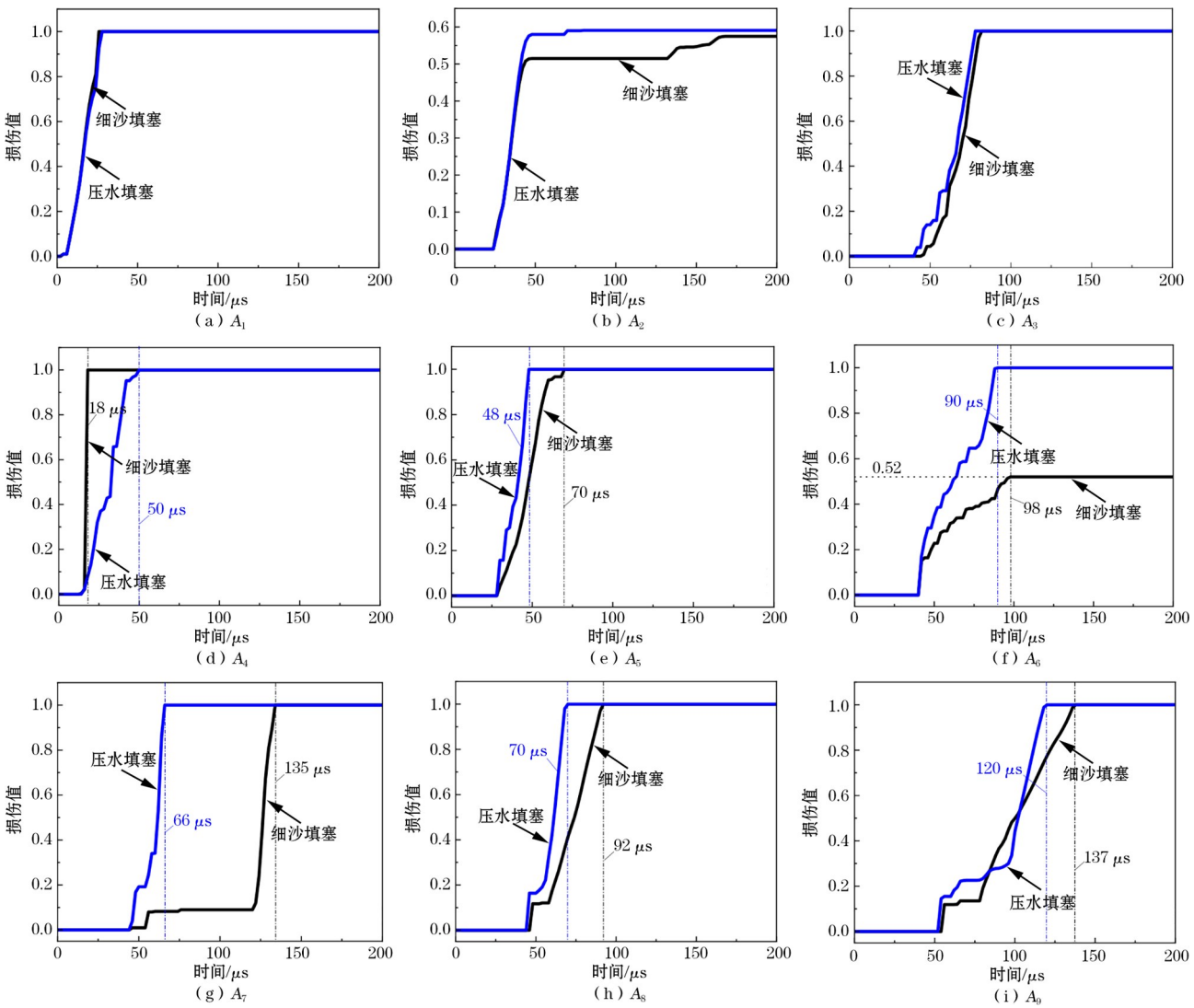


图 7　细沙填塞与压水填塞爆破后岩体损伤随时间的变化曲线

Fig.7　Variation curves of rock mass damage with time after blasting with fine sand stemming and water stemming

综上所述,水的不可压缩性及对爆炸应力的良好传播性能,使得爆炸能力在水中快速传播的同时,大幅降低了爆炸能量在传播过程中的损失,因此压水填塞可显著提升爆破效果。

2.2　压水填塞爆破漏斗试验结果分析

为验证数值模拟研究结果的准确性,本研究在西藏巨龙铜矿 5 305 m 平台开展了 4 组爆破漏斗试验,结果如图 8 所示。由图 8 可知,压水填塞对爆破效果具有显著影响。与细沙填塞爆破(见图 8(a))相比,两侧压水填塞(见图 8(b))和上侧压水填塞(见图 8(c))均具对爆破效果具有提升作用,二者对应的爆破漏斗表面最大长度分别增加了 16.67%、13.33%,漏斗深度分别增加了 3.88%、12.07%,漏斗体积分别增加了 13.10%、90.88%。由此可知,上侧压水填塞的爆破增效效果最佳,这与本研究中的数值模拟结果吻合。

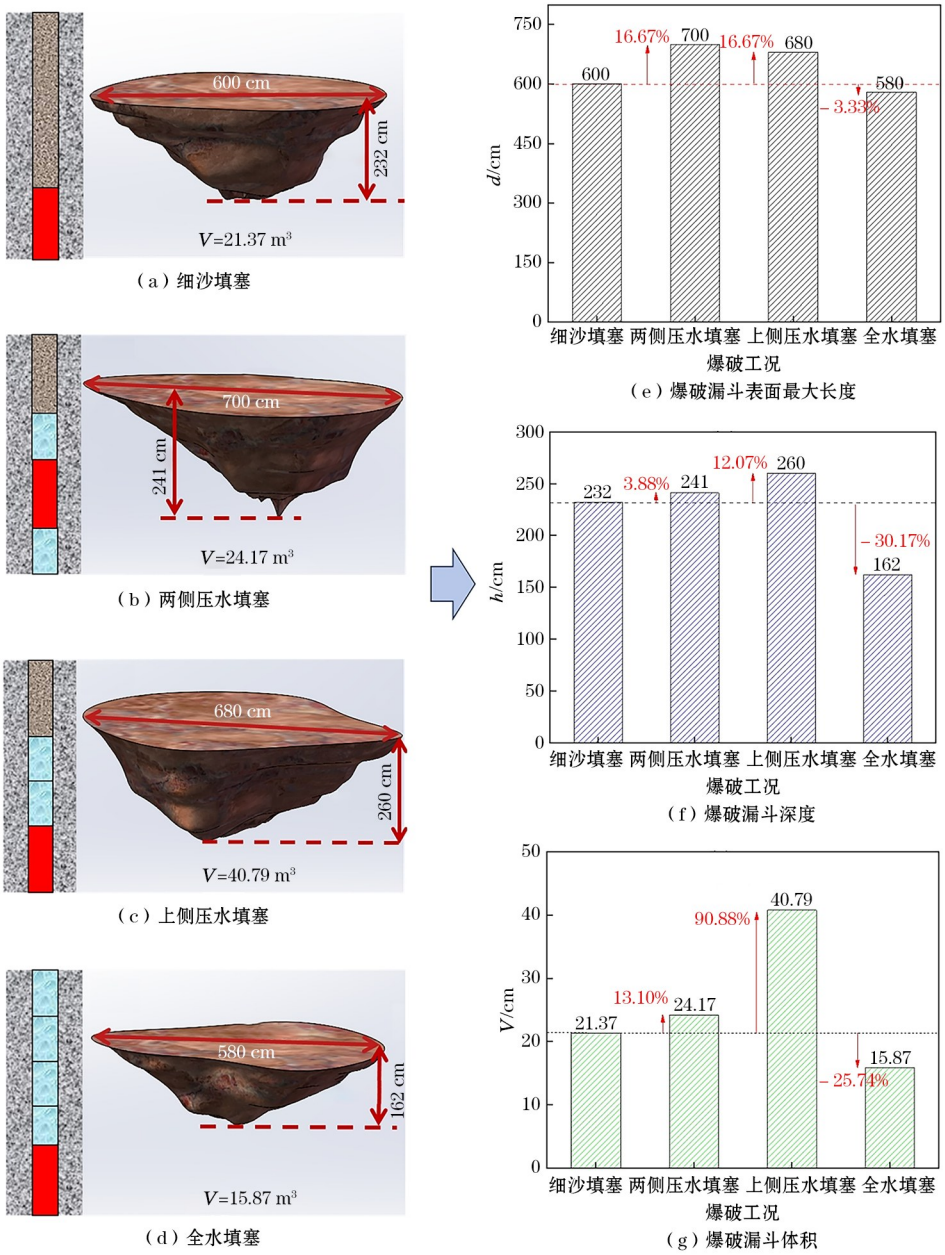


图 8 不同填塞工况爆破漏斗试验结果

Fig.8 Results of blasting crater tests under different stemming conditions

然而,与细沙填塞相比,全水填塞对爆破效果具有减弱作用,爆破漏斗表面最大长度、漏斗深度与漏斗体积分别降低了 3.33%、30.17%、25.74%。结合现场观察可知,全水填塞时发生了冲孔现象,即由于水对爆破应力的高效传播作用,应力直接传播到炮孔表面,进而发生冲孔。由此可知,结合使用压水填塞须与细沙填塞,可在最大程度减少爆破能量损失的同时,实现对炮孔的有效封堵,进而提升爆破效果。受篇幅限制,本文尚未对细沙填塞与压水填塞的最佳长度比进行研究,后续将进一步开展该方面的研究工作,以期实现对压水填塞增效爆破技术的改进与完善。

3 结论

本文基于巷道爆破水炮泥封孔技术,提出了一种露天矿压水填塞增效爆破新技术,并采用数值模拟与现场爆破漏斗试验,对该技术应用效果与机制进行了研究,得出以下主要结论。

(1) 传统细沙填塞爆破时,爆破等效应力向上传播速度慢且不均匀,导致爆破能量主要聚集在炮

孔底部,对上部岩体破碎程度不足,这是当前露天矿深孔爆破上部大块率高的主要原因。

(2) 压水填塞爆破时,由于水的不可压缩性及对爆炸应力的良好传播性能,爆破应力在水柱中快速、均匀传播至炮孔中上部,且在传播过程中能量损失少,可实现上下部岩体的均匀破碎,这是压水填塞增效爆破的核心机制。

(3) 与细沙填塞爆破相比,上侧压水填塞对爆破效果的提升作用最佳,爆破漏斗表面最大长度、漏斗深度与漏斗体积分别增加了 13.33%、12.07%、90.88%;但炸药上方全水填塞时会发生冲孔现象,减弱爆破效果。因此,结合使用压水填塞须与细沙填塞,可在最大程度减少爆破能量损失的同时,实现对炮孔的有效封堵,进而提升爆破效果。

参考文献(References):

[1] 王连成,邵安林,曲福明,等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
Wang Liancheng, Shao Anlin, Qu Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines [J].Chinese Journal of Engineering,2025,47(5):971-983.

[2] 王安建,袁小晶.大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1550-1559.
Wang Anjian, Yuan Xiaojing. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022,37(11):1550-1559.

[3] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等.战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J].中国科学基金,2019,33(2):106-111.
Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, et al. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2019,33(2):106-111.

[4] 高峰,周科平,熊信.我国高海拔寒区金属矿产资源开采现状及关键问题[J].矿业研究与开发,2022,42(10):1-5.
Gao Feng, Zhou Keping, Xiong Xin. Present situation and key problems of metal mineral resources exploitation in high altitude cold region of China [J]. Mining Research and Development,2022,42(10):1-5.

[5] 李祥,姚忠勋,陈进,等.基于不同物探方法的高寒高海拔地区隧道地质信号特征分析[J/OL].吉林大学学报(地球科学版):1-9[2025-06-22].https://link.cnki.net/urlid/22.1343.P.20241203.1601.003.
Li Xiang, Yao Zhongshao, Chen Jin, et al. Analysis of geological signal characteristics of tunnels in alpine and high-altitude areas based on different geophysical prospecting methods[J/OL].Journal of Jilin University (Earth Science Edition):1-9[2025-06-22].https://link.cnki.net/urlid/22.1343.P.20241203.1601.003.

[6] 赵文奎,夏飞,陈旭.西藏玉龙铜矿露天爆破表层大块成因与解决措施[J].矿业研究与开发,2021,41(6):21-25.
Zhao Wenkui, Xia Fei, Chen Xu. Causes and solutions of surface block rate in open-pit blasting in Xizang Yulong Copper Mine[J].Mining Research and Development,2021, 41(6):21-25.

[7] 郝亚飞,黄雄,冷振东,等.高寒高海拔地区爆破技术综述及展望[J].爆破,2022,39(2):1-8.
Hao Yafei, Huang Xiong, Leng Zhendong, et al. Summary and prospect of blasting technology in alpine and high-altitude areas[J].Blasting,2022,39(2):1-8.

[8] 常治国,李克民,丁小华,等.严寒气候对露天矿山安全爆破影响的分析[J].工程爆破,2011,17(4):100-102.
Chang Zhiguo, Li Kemin, Ding Xiaohua, et al. Analysis on influence of cold climate on blasting safety of surface mine [J].Engineering Blasting,2011,17(4):100-102.

[9] 刘菊平,范才兵,李占科.露天矿爆破参数优化试验[J].现代矿业,2013,29(8):69-71.
Liu Juping, Fan Caibing, Li Zhanke. Optimization test on blasting parameters in open-pit mines[J]. Modern Mining, 2013,29(8):69-71.

[10] 张衍昊,刘少光,楼晓明.露天矿深孔台阶爆破逐孔起爆参数的优化研究与应用[J].爆破,2024,41(2):104-111.
Zhang Yanhao, Liu Shaoguang, Lou Xiaoming. Optimization and application of blasting parameters of deep hole bench blasting in open pit mine[J]. Blasting, 2024, 41 (2):104-111.

[11] Jiang Anjun, Fei Honglu, Yan Yu, et al. Study on the charge structure optimization for coal-rock mixed blasting and separate mining in open-pit mine with high benches[J]. Applied Sciences,2025,15(8):4521.

[12] Ding Xiaohua, Ao Zhongchen, Li Xiaoshuang, et al. The mechanism of plugging open-pit mine cannon holes and the modification of plugging materials[J]. Sustainability, 2023, 15(5):4257.

[13] 恽寿榕,赵衡阳.爆炸力学[M].北京:国防工业出版社,2005.
Yun Shourong, Zhao Hengyang. Explosion mechanics[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2005.

[14] 李翼祺.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992.
Li Yiqi. Explosion mechanics [M]. Beijing: Science Press,1992.

[15] Zhu Zheming, Xie Heping, Mohanty Bibhu. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2007,45(2):111-121.

[16] Chi Liyuan, Wang Cheng, Zhang Zongxian, et al. Experimental investigation of decoupled charge effect on rock fragmentation by blasting[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2022,55(7):3791-3806.

[17] 王天暘,金龙哲,郭敬中,等.铁矿采场多组份水炮泥抑制爆破烟尘试验研究[J].金属矿山,2020(4):194-199.

Wang Tianyang, Jin Longzhe, Guo Jingzhong, et al. Experimental study on suppression of blasting dust and smoke by multi-component water stemming in iron mine stope[J]. Metal Mine, 2020(4): 194-199.

[18] 乔力伟,蒋葛夫,桑琮辉.水炮泥降尘施工隧道粉尘粒度分布演化的非稳态分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2272-2280.
Qiao Liwei, Jiang Gefu, Sang Conghui. Unsteady analysis of dust particle size evolution in construction tunnel based on water stemming [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2272-2280.

[19] 李洪超.岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
Li Hongchao. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2016.

[20] Wang Zhiliang, Wang Haochen, Wang Jianguo, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.

[21] Li Xiaohan, Zhu Zheming, Wang Meng, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 113: 103968.

[22] Alia A, Souli M. High explosive simulation using multi-material formulations [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(10): 1032-1042.

[23] Tawadrous A. Hard rocks under high strain-rate loading. [D]. Kingston: Queen's University (Canada), 2011.

[24] Livermore Sofware Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livermore Softwave Technology Corporation, 2012.

[25] 辛春亮,薛再清,涂建.有限元分析常用材料参数手册[M].北京:机械工业出版社,2020.
Xin Chunliang, Xue Zaiqing, Tu Jian. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. China Machine Press, 2020.

[26] 王玉杰.爆破工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2007.
Wang Yujie. Blasting engineering [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007.