寒区冻结岩体台阶爆破破岩特性研究*

刘博[1,2,3],余宇星[4],熊伟[4],唐宇[4],沈文博[3],曹江山[3],邱贤阳[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.中南大学, 湖南 长沙 410083;
4.萝北县云山龙兴石墨开发有限公司, 黑龙江 鹤岗市 154200)

摘要:寒区冻结岩体由于物理力学性质发生变化,对爆破破岩会产生重要影响。为探究岩石冻结温度对台阶爆破破碎特性的影响规律,以某寒区露天矿山为工程背景,采用ANSYS/LS-DYNA软件开展爆破数值模拟研究。以常温岩体工况为对比,重点分析了不同冻结温度对爆破应力波传播、爆破裂纹分布范围及岩体损伤破坏的影响。研究结果表明:在应力波传播方面,冻结温度对岩石动力响应具有显著影响,随着岩石冻结温度由20 ℃(常温)降低至-30 ℃,岩体弹性模量增大,应力波波速和应力幅值分别提高27%、20%,而衰减系数无显著变化。在爆破裂纹分布范围及岩体损伤破坏方面,寒区台阶冻结岩体的抗压强度、弹性模量等力学参数更高,会对爆破破岩产生不利影响,特别是台阶上部-30 ℃冻结岩体,相较于常温岩体,其裂隙区范围降低约29%,损伤破坏体积降幅达22%。研究结果可为寒区露天矿冻结岩体台阶爆破参数优化提供理论依据。

关键词:寒区冻结岩体;台阶爆破;爆破应力场;岩石破碎;数值模拟

中图分类号:TD854.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0107-10

Study on Rock Fragmentation Characteristics of Bench Blasting of Frozen Rock Mass in Cold Regions

Liu Bo[1,2,3], *Yu Yuxing*[4], *Xiong Wei*[4], *Tang Yu*[4], *Shen Wenbo*[3], *Cao Jiangshan*[3], *Qiu Xianyang*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
4.Luobei Yunshan Longxing Graphite Development Co., Ltd., Hegang, Heilongjiang 154200, China)

Abstract: Due to changes in physical and mechanical properties, the frozen rock mass in cold regions has a significant impact on rock fragmentation by blasting. To investigate the influence law of rock freezing temperature on the fragmentation characteristics of bench blasting, taking an open-pit mine in a cold region as the engineering background, a numerical simulation study on blasting was conducted using ANSYS/LS-DYNA software. Taking the normal temperature rock mass condition as a comparison, the influences of different freezing temperatures on blasting stress wave propagation, blasting crack distribution range, and rock mass damage and failure were mainly analyzed. The research results show that in terms of stress wave propagation, freezing temperature has a significant impact on the dynamic response of rock. As the rock freezing temperature decreases from 20℃ (normal temperature) to -30 ℃, the elastic modulus of the rock mass increases, and the stress wave velocity and stress amplitude increase by 27% and 20%, respectively, while the attenuation coefficient shows no significant change. In terms of blasting crack distribution range and rock mass damage and failure, the mechanical parameters of bench frozen rock mass in cold regions, such as compressive strength and elastic modulus, are higher, which has an adverse effect on rock fragmentation by blasting. In particular, for the frozen rock mass at -30 ℃ in the upper part of the bench, compared with the normal-temperature rock mass, its fracture zone range decreases by about 29%, and the reduction in damage and failure volume reaches 22%. The research results can provide a theoretical basis for the optimization of bench blasting parameters of frozen rock mass in cold region open-pit mines.

Key words: Frozen rock mass in cold regions, Bench blasting, Blasting stress field, Rock fragmentation, Numerical simulation

* **收稿日期**:2026-05-21
基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ05)
作者简介:刘博(1989—)男,河南泌阳人,博士,高级工程师,主要从事采矿技术与安全管理方面的研究。E-mail:csu_dliubo@163.com

0 引言

寒区露天矿山开挖工程中,岩体长期受低温、冻融循环及水冰相变作用影响,其物理力学性质与常温岩体存在明显差异。冻结作用会改变孔隙水赋存状态、颗粒胶结形式及裂隙发育特征,使岩石强度、弹性模量、波速和能量耗散特性发生变化,进而影响爆破应力波传播、裂纹扩展及破碎效果。因此,开展寒区冻结岩体台阶爆破破岩特性研究,对提高爆破效率和优化参数具有重要意义。

针对冻结岩体力学性质与爆破破岩问题,国内外学者已开展了大量研究工作。张新河等[1]指出低温条件下,岩石强度提高,破碎难度增大;杨阳等[2]通过 SHPB 试验发现,负温会影响岩石能量耗散、破碎块度及裂纹发育形态;蒋楠等[3]认为在冻结状态下,岩石破碎所需能量增加,炸药单耗相应提高;Xu J C 等[4]发现冻结条件会显著影响岩石动态强度、弹性模量及微观损伤演化。在岩石爆破数值模拟方面,ANSYS/LS-DYNA 能够较好地模拟炸药爆轰、应力波传播及岩体损伤破坏过程。Wang J X 等[5]基于 JH-2 损伤模型与 ALE 方法模拟了爆破损伤演化过程,验证了该模拟方法在裂纹扩展和损伤区分析中的适用性;Wang Z L 等[6]比较了 RHT 模型和 HJC 模型的适用性,指出合理选取动态本构模型是准确表征爆破损伤的关键;黄佑鹏等[7]基于 LS-DYNA 和 HJC 模型分析了岩石爆破损伤范围及分布规律,表明损伤变量可用于描述岩石破坏区扩展特征;Wei X 等[8]建立了动态损伤分布与爆破块度级配的映射关系,说明损伤变量可用于评价爆破破碎效果。综上所述,基于数值模拟结果提取损伤变量、裂纹分布及破碎形态,并进一步开展损伤分区统计,是评价爆破破岩效果的有效方法。近年来,低温冻结岩体爆破方面的研究逐渐增多。Zhou Z L 等[9]结合低温爆破试验与数值模拟,分析了不同低温条件下岩石损伤和块度分布规律;Cai X 等[10]针对寒区台阶爆破,建立了考虑温度效应的单孔爆破模型,并结合垂向温度梯度提出了异质冻结岩体爆破参数优化方法。已有研究为冻结岩体爆破机理研究提供了基础,但多集中于单孔爆破、小尺度岩样或单一低温工况,对实际台阶岩体中多梯度冻结结构考虑不足,冻结层对应力波传播、裂纹扩展及损伤体积的影响仍需进一步研究。

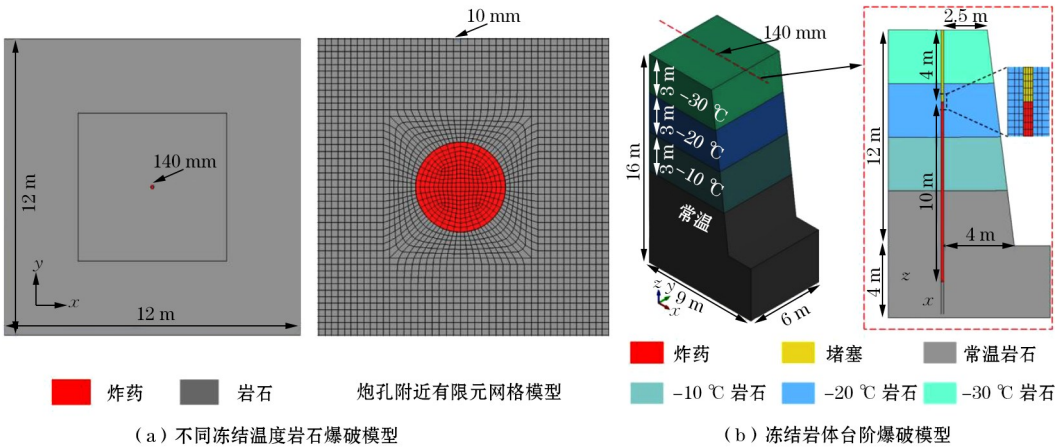
基于此,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 建立多梯度冻结岩体台阶爆破数值模型,以常温岩体作对比,分析不同冻结温度条件下爆破应力波传播、裂纹分布及损伤体积变化规律;并通过设置典型观测截面,提取损伤变量和统计损伤区间占比,揭示冻结层对台阶爆破破岩效果的影响机制。研究结果可为寒区露天矿山爆破参数优化提供依据。

1 台阶深孔爆破数值模型

1.1 模型建立

根据某寒区露天矿山常用的台阶深孔凿岩爆破参数,设定本文数值模型的炮孔直径为 140 mm,采用耦合装药结构,炸药类型为乳化炸药。考虑到 LS-DYNA 中无反射边界条件,无法完全消除反射应力波的影响,通过计算反射应力波的时间(反射波到达时间大于最终模拟结果分析时刻),将模型边界适当加大。最终,建立了工程尺度单孔爆破平面数值模型,模型尺寸为 12 m×12 m×0.01 m(长×宽×高),如图 1(a)所示。根据不同冻结温度下岩石物理力学参数,对模拟过程中岩石本构模型动态力学参数进行修改,实现不同冻结温度下的岩石爆破模拟。为避免近区高频应力波的波形畸变,单元尺寸必须足够小,因此,数值模型采用尺寸为 10 mm 的六面体单元进行网格划分,网格单元总数为 76 万,模型单位制采用 kg-m-s。

根据现场凿岩爆破参数建立冻结岩体台阶爆破模型(见图 1(b)),炮孔到坡顶眉线距离为 2.5 m,底盘抵抗线为 4 m,台阶高度为 12 m,钻孔超深为 2 m,装药长度为 10 m,堵塞长度为 4 m,模型整体尺寸为 16 m×9 m×6 m(长×宽×高),采用 *BOUNDARY_NON_REFLECTING关键字在模型周边(除台阶顶部和坡面)设置无反射边界,以降低边界反射对数值模拟试验的影响。现场台阶岩石冻结层通常呈现多梯度低温特征,即表层冻结层温度较低,深部冻结层温度较高,且随着深度增大,温度逐渐趋近于常温状态。根据现场冻结层分布情况,在台阶顶部 0~3 m、3~6 m、6~9 m 厚度范围内,分别设置冻结层岩石温度为-30 ℃、-20 ℃、-10 ℃。数值模型采用尺寸为 10 mm 的六面体单元进行网格划分,网格单元总数为 64.227 6 万,模型单位制采用 kg-m-s。



(a) 不同冻结温度岩石爆破模型　　(b) 冻结岩体台阶爆破模型

图 1　冻结岩石爆破模型

Fig.1　Blast model of frozen rock

岩石单元采用 Lagrange 算法,炸药、堵塞和流固耦合空间单元采用 ALE 算法,流体部分之间的连接采用共节点法实现能量、力的传递,岩石部分与流体部分通过 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字进行流固耦合。设置单孔爆破平面数值模型计算时间为 3 ms,以减少计算时间。在三维台阶爆破模型中,考虑到炸药沿炮孔轴向传爆时间(约 3 ms)以及爆轰波的自由面反射时间(约 4 ms),将求解时间设置为 15 ms。

1.2　材料参数选取

炸药采用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料本构模型和 JWL 状态方程进行爆轰能量描述[10]。JWL 状态方程数学表达式见式(1)。

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \tag{1}$$

式中:P 为爆轰压力;V 为爆轰产物相对体积;E_0 为炸药单位体积内能;A、B、R_1、R_2、ω 为炸药材料常数。

该矿采用常规乳化炸药,炸药的基本性能参数和 JWL 状态方程参数见表 1。

表 1　炸药材料及状态方程的参数取值

Table 1　Parameter values of explosive material and state equation

炸药装药密度 ρ_z/(kg·m^{-3})	爆速 D/(m·s^{-1})	爆轰压力 P_{CJ}/GPa	A	B	R_1	R_2	ω
1 100	4 200	15	214	0.182	4.2	0.9	0.15

相较于 HJC、TCK 等材料模型,RHT 材料本构模型综合考虑了岩石在破坏过程中的应变硬化、压力依赖性、应变敏感性、压缩损伤软化,以及偏应力对破坏面形状的影响,在混凝土、岩石等材料的冲击荷载、弹体侵彻研究中更能描述冲击荷载下的脆性破坏[11]。RHT 模型通过材料等效塑性应变的累积定义损伤变量,且拉伸损伤和压缩损伤均被考虑,可以通过累积损伤指标来模拟岩石爆破破碎效果和裂缝扩展状态。RHT 材料模型的损伤程度定义为:

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon^{p}}{\varepsilon^{f}} \tag{2}$$

式中:$\Delta\varepsilon^{p}$ 为累积塑性应变;ε^{f} 为破坏应变。

根据矿山现场采集到的岩石密度、弹性模量、抗压强度、抗拉强度等基本物理力学参数,对石墨黑云石英片岩的 RHT 本构参数进行计算取值。根据室内物理力学试验结果,该石墨黑云石英片岩的物理力学参数见表 2。

表 2　不同冻结温度下石墨黑云石英片岩的基本力学参数

Table 2　Basic mechanical parameters of graphite-biotite quartz schist at different freezing temperatures

岩石温度/℃	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
20	8.2	36.6	3.7
−10	9.8	42.6	4.0
−20	11.8	46.0	4.5
−30	13.4	47.3	4.8

1.2.1　应变率参数

岩石强度对应变率具有显著敏感性,因此在 RHT 模型中引入了应变率强度因子 F_r[12]:

$$F_r(\dot{\varepsilon}_p)=\begin{cases}(\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0^c)^{\beta_c} & P\geqslant f_c/3\\ \dfrac{P+f_t/3}{f_c/3+f_t/3}(\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0^c)^{\beta_c}-\dfrac{P-f_c/3}{f_c/3+f_t/3}(\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0^c)^{\beta_t} & -f_t/3<P<f_c/3\\ (\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0^t)^{\beta_t} & P\leqslant -f_t/3\end{cases} \tag{3}$$

式中:$\dot{\varepsilon}_p$ 为应变率;$\dot{\varepsilon}_0^c$ 和 $\dot{\varepsilon}_0^t$ 分别为参考压缩应变率和参考拉伸应变率,分别取 3×10^{-5} s^{-1} 和 3×10^{-6} s^{-1};P 为静水压强;f_c 和 f_t 分别为单轴抗压强度、单轴抗拉强度;β_c 为压缩应变率;β_t 为拉伸应变率。β_c 和 β_t 可根据式(4)和式(5)求得[13]:

$$\beta_c=\frac{4}{20+3f_c} \tag{4}$$

$$\beta_t=\frac{2}{20+f_c} \tag{5}$$

将 $f_c=36.6$ MPa 代入式(4)和式(5)可得 β_c 和 β_t 分别为 0.030 8 和 0.035 3。

1.2.2 失效面参数

两个失效面常数分别计为 M 和 N,可通过式(6)计算得出[14]:

$$\sigma_f^*(P^*,F_r)=M(P^*-F_r/3+(M/F_r)^{-1/N})^N,\quad 3P^*\geqslant F_r \tag{6}$$

式中:$\sigma_f^*(P^*,F_r)$表示归一化失效强度,$\sigma_f^*=\dfrac{\sigma_f}{f_c}$,$\sigma_f$ 表示岩石实际失效强度;P^* 表示归一化静水压强,$P^*=\dfrac{P}{f_c}$。

当岩石处于准静态压缩或拉伸时,$\dot{\varepsilon}_p=3.0\times10^{-5}$ s^{-1},根据式(3)至式(5)可求得 $F_r=1$。通过 Hoek-Brown 经验方程得出不同围压下的岩石强度,则岩石类材料的拟合方程为[14]:

$$\sigma_1=\sigma_3+f_c\left(24\frac{\sigma_3}{f_c}+1\right)^{1/2} \tag{7}$$

不同围压($\sigma_2=\sigma_3$)下失效强度 σ_1 可根据式(7)求出,静水压强 P 为:

$$P=\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \tag{8}$$

失效时的等效压力 σ_f 为:

$$\sigma_f=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]} \tag{9}$$

基于以上公式计算得出不同围压下石英片岩的力学参数值见表 3。将不同条件下的 P^* 值和 σ_f^* 值代入式(10)中进行拟合,可以得到 $M=1.923$,$N=0.472$,p^* 与 σ_f^* 的拟合曲线如图 2 所示。

$$\sigma_f^*=M(P^*-1/3+M^{(-1/N)})^N \tag{10}$$

表 3 不同围压下石英片岩的力学参数值

Table 3 Mechanical parameter values of quartz schist under different confining pressures

$\sigma_2=\sigma_3$/MPa	σ_1/MPa	P/MPa	σ_f/MPa	P^*	σ_f^*
0	48.3	16.1	48.3	0.1	0.3
5	95.2	35.1	90.2	0.2	0.5
10	128.0	49.3	118.0	0.3	0.7
20	295.5	131.8	245.5	0.7	1.4
30	443.9	214.6	343.9	1.2	1.9
50	683.9	361.3	483.9	2.0	2.7

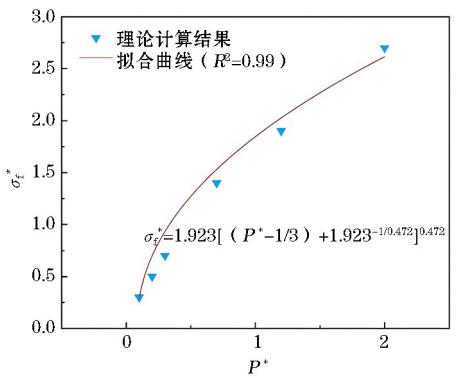


图 2 p^* 与 σ_f^* 的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of p^* and σ_f^*

1.2.3 P-α 状态方程参数

RHT 材料的 P-α 状态方程为[14]:

$$P(\rho,e)=\frac{1}{\alpha}((B_0+B_1\mu_0)\alpha\rho e_0+A_1\mu_0+A_2\mu_0^2+A_3\mu_0^3),\quad \mu_0>0 \tag{11}$$

式中:B_0 和 B_1 为材料常数;α 和 ρ 为材料初始孔隙率和密度;e_0 为初始内能;μ_0 为体积应变;A_1、A_2 和 A_3 为多项式系数。

A_1、A_2 和 A_3 可以通过式(12)至式(14)求得[14-16]:

$$A_1=\alpha\rho c^2 \tag{12}$$

$$A_2=\alpha\rho c^2(2k-1) \tag{13}$$

$$A_3=\alpha\rho c^2[(3k-1)(k-1)] \tag{14}$$

式中:c 为材料波速;k 为材料常数。

经计算,得到 A_1、A_2 和 A_3 分别为 16.3 GPa,19.8 GPa 和 4.17 GPa。

其他材料参数对模拟结果影响较小,可参考相

关研究中石英片岩的材料参数[17]。采用上述计算方法,可以得到常温 20 ℃及冻结温度分别为-10 ℃、-20 ℃、-30 ℃条件下石英片岩的 RHT 参数,以常温 20 ℃石英片岩为例,其 RHT 材料的关键参数见表 4。

孔口堵塞选用 * MAT_SOIL_AND_FOAM 材料进行描述,相关材料物理力学参数及状态方程参数见表 5[18-20]。

表 4 常温 20 ℃下石英片岩 RHT 关键材料参数

Table 4 Key RHT material parameters of quartz schist under ambient temperature of 20 ℃

ρ_0/(kg/m^3)	G/GPa	T_1/GPa	M	N	f_c/MPa	f_s^*	β_c	β_t	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	f_t^*
2 720	8.2	16.3	1.923	0.472	36.6	0.234	0.030 8	0.035 3	16.3	19.8	4.17	0.1

表 5 堵塞材料的物理及状态方程参数

Table 5 Physical and state equation parameters of stemming material

材料类型	ρ_d/(kg·m^{-3})	G/MPa	A_0	A_1	A_2	E_1	E_2	E_3
堵塞材料	1 800	2.54	0.003	1.31E-7	0.123	0	0.05	0.09

注:ρ_d 表示材料干密度;G 为剪切模量;A_0、A_1、A_2 分别为压力多项式常数项、一次项、二次项系数;E_1、E_2、E_3 为内能耦合系数。

2 不同冻结温度下岩石爆破模拟结果分析

2.1 爆破应力波传播特征

冻结岩石与常温岩石应力波传播与爆破致裂过程相似,本节以常温岩石为例,展示了装药爆破后应力波传播与爆破致裂过程。各关键时刻常温(20 ℃)岩石爆破应力云图如图 3 所示。

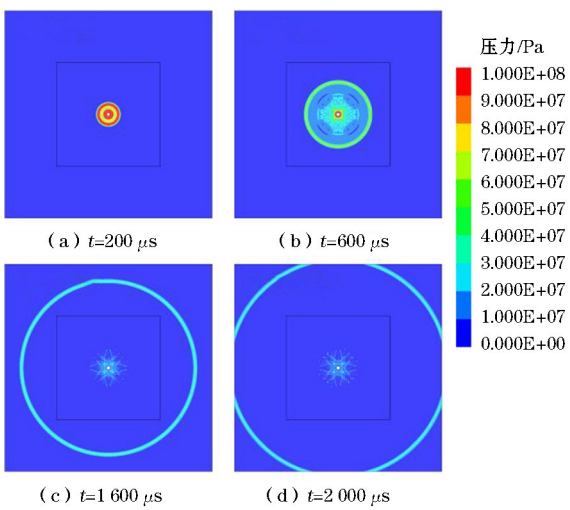
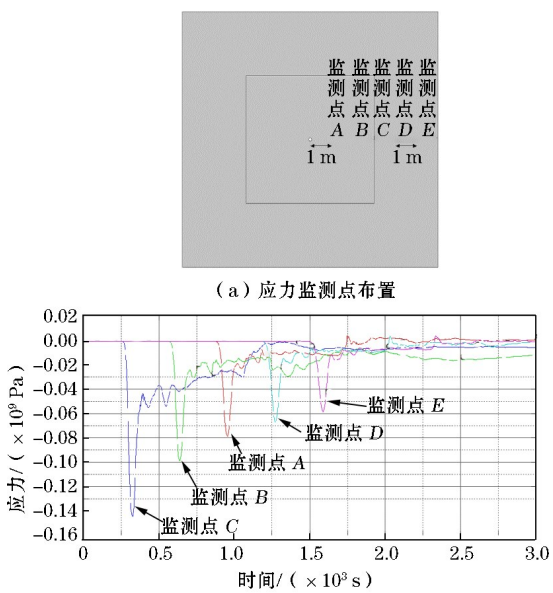


图 3 岩石爆破应力云图(以常温 20 ℃岩石为例)

Fig.3 Blasting stress cloud diagrams in rock (rock at ambient temperature of 20 ℃ as example)

从图 3 可以看出,在 200 μs 时刻炸药起爆后,炮孔周边在冲击波的强压缩作用下形成了小范围的高压力覆盖区域;600 μs 时刻,爆破应力波以柱面波形式向外传播至 2 m 左右处,受爆生气体准静态压力作用,炮孔附近仍维持上百兆帕的压力水平,而应力波波前压力降低至 40 MPa 左右;1 600 μs 时刻,应力波传播至 5 m 左右处,应力波波前压力降低至 20 MPa 左右;2 000 μs 时刻,应力波传播至模型边界,由于在数值模型边界处设置了无反射边界条件,应力波在模型边界处无明显反射现象。

为了进一步定量分析岩体内应力波传播规律,在距离炮孔中心 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 处共布置 5 个应力监测点,如图 4(a)所示。以常温 20 ℃岩石为例,各监测点的应力曲线如图 4(b)所示。在 1 m 监测点处,应力波峰值可达 144 MPa,随着传播距离增大,应力波峰值逐渐降低,当传播到 5 m 位置时,应力波峰值降低至 58 MPa。



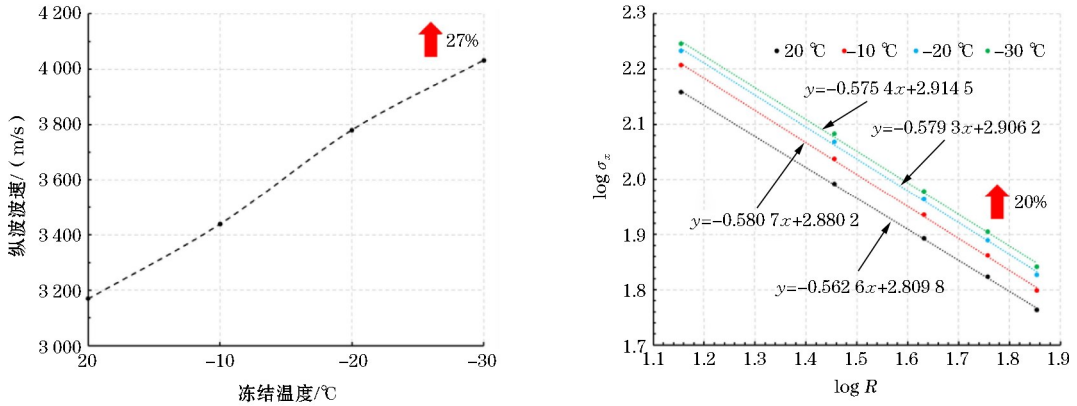
(a) 应力监测点布置

(b) 监测点应力-时间曲线(以常温 20 ℃岩石为例)

图 4 监测点布置及应力曲线

Fig.4 Layout of monitoring points and stress curves

通过各监测点应力波到达时间及监测点间距,可计算得到应力波传播速度,不同温度岩石的纵波波速结果如图 5(a)所示。随着岩石冻结温度降低至－30 ℃,由于弹性模量增大,应力波波速逐渐增大,增幅可达 27%。此外,提取各监测点应力峰值,对应力峰值和应力波传播距离分别取对数,绘制应力峰值随距离的衰减曲线,如图 5(b)所示,其中,σ_x 表示应力波峰值,R 表示应力波传播距离,拟合方程式中的 x、y 表示横、纵坐标。由图 5(b)可知,20 ℃(常温)、－10 ℃、－20 ℃、－30 ℃冻结岩石的应力衰减系数分别为 0.562 6,0.580 7,0.579 3,0.575 4,变化并不显著。同时,随着温度的降低,由于弹性模量增大,相同测点处应力幅值逐渐增大,增幅可达 20%。



(a) 应力波波速变化规律　　(b) 应力幅值衰减规律

图 5　冻结岩石爆破应力波传播规律

Fig.5　Propagation law of blasting stress wave in frozen rock

2.2　爆生裂纹扩展过程

为更直观地观察岩石爆破损伤发育及裂纹扩展过程,图 6 给出了常温岩石及 3 种冻结温度下各关键时刻岩石爆破损伤发育及裂纹萌生状态。

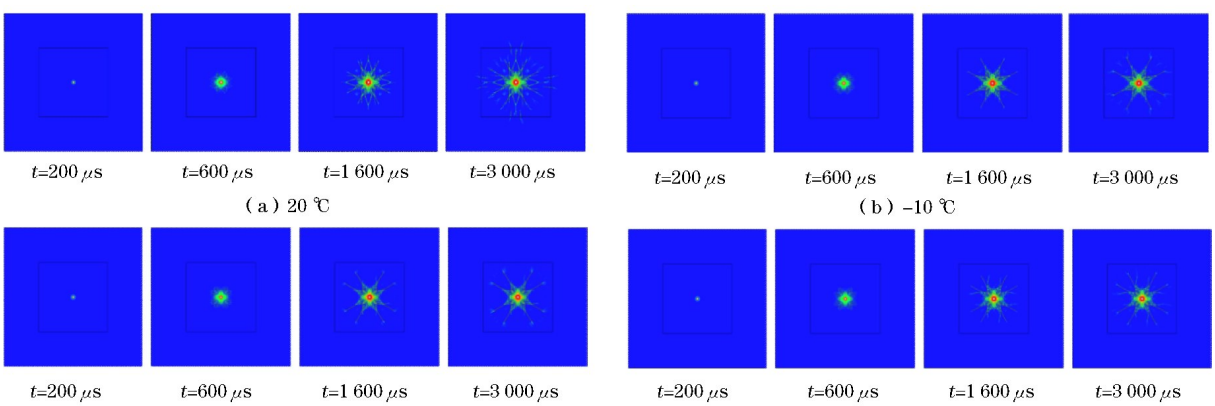
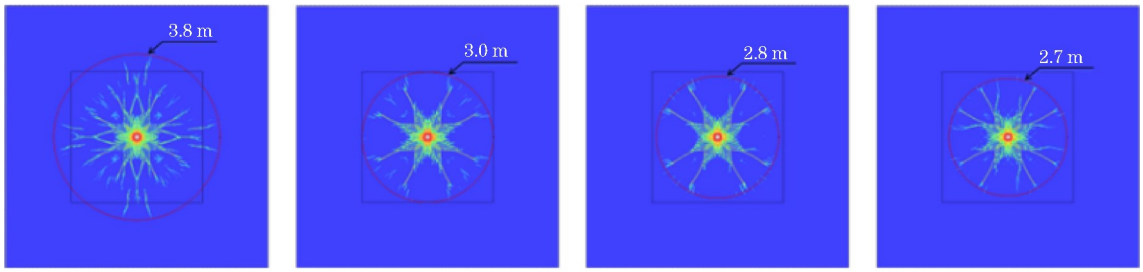


图 6　不同冻结温度下岩石爆破损伤发育过程

Fig.6　Development process of rock blasting damage under different freezing temperatures

从图 6 可以看出,4 种温度下,前 600 μs 岩石损伤发育几乎相同,粉碎区范围均较小且彼此相差不大。在 1 600 μs 时,不同冻结温度下的裂纹分布存在随机性且发育差异较大,和 20 ℃(常温状态)相比,－10 ℃、－20 ℃和－30 ℃三种冻结温度下岩石损伤发育明显减弱,且随着温度的降低,损伤区域呈减小趋势。在 3 000 μs 时刻,岩石损伤基本发育完成。

不同冻结温度下岩石的爆破裂隙区范围如图 7 所示。由图 7 可知,20 ℃工况下裂隙区半径为 3.8 m,－10 ℃工况下裂隙区半径为 3.0 m,－20 ℃工况下裂隙区半径为 2.8 m,－30 ℃工况下裂隙区半径为 2.7 m。由此可见,低温冻结状态对岩石爆破裂纹扩展的抑制作用十分明显,－30 ℃工况下的裂隙区半径仅为 20 ℃工况下的 71%。



(a) 20 ℃ (b) -10 ℃ (c) -20 ℃ (d) -30 ℃

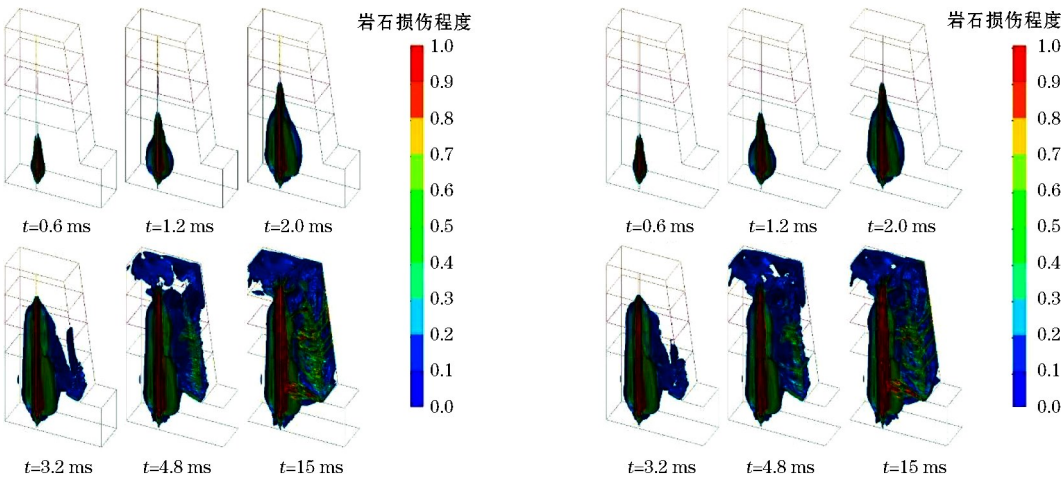
图 7 不同冻结温度下岩石的爆破裂隙区范围

Fig.7 Range of blasting fracture zones in rock under different freezing temperatures

3 冻结岩体台阶爆破模拟结果分析

开展基于 LS-DYNA 的多梯度冻结岩石爆破数值模拟,分析冻结层对岩石破碎效果的影响。

图 8 为常温岩石与多梯度冻结岩石爆破损伤发育过程。多梯度冻结岩石模型沿高度方向依次划分为常温岩石、-10 ℃岩石、-20 ℃岩石和-30 ℃岩石,形成由下部常温区向上部低温冻结区逐渐过渡的分层结构。爆破损伤首先在炮孔附近产生,随后沿炮孔轴向和台阶自由面方向逐渐扩展。与常温岩石相比,多梯度冻结岩石的损伤扩展范围有所减小,且不同温度岩层之间的损伤程度存在明显差异。



(a) 常温岩石 (b) 多梯度冻结岩石

图 8 常温岩石与梯度冻结岩石爆破损伤发育过程

Fig.8 Development process of blasting damage of normal temperature rock and multi-gradient frozen rock

从分层损伤变化来看,常温岩石区和-10 ℃岩层中岩石损伤发育相对明显,裂纹扩展范围较大;随着温度进一步降低,-20 ℃岩层中的岩石损伤范围有所减弱,裂纹扩展连续性降低;在-30 ℃岩层中,损伤主要集中于炮孔附近,向外扩展范围最小,表明低温冻结层对爆生裂纹扩展具有较强抑制作用。总体上,岩层温度越低,爆破损伤范围越小,损伤分布越集中。其原因在于低温冻结会使岩石内部孔隙水结冰,增强颗粒间胶结作用,提高岩体强度、刚度和抗裂能力,从而增加裂纹起裂和扩展所需能量。因此,在相同爆破荷载作用下,多梯度冻结岩石中不同温度层的破坏程度呈现由下至上逐渐减弱的变化趋势,说明温度梯度会显著影响冻结岩体台阶爆破损伤分布和破碎效果。

为进一步揭示爆破损伤在岩体内部的空间分布特征,本文在数值模型中设置了两个典型观测截面(见图 9),对爆破后截面损伤分布进行提取与统计分析。截面 a 为垂直于台阶自由面的竖向截面,主要用于分析损伤由炮孔向岩体内部及坡面方向的传播特征;截面 b 为平行于台阶自由面的竖向截面,主要用于分析爆破损伤沿自由面方向的扩展规律。通过对两个截面损伤云图及不同损伤程度占比进行统计分析,可直观地评价冻结层及结构面条件对爆破破岩效果的影响。

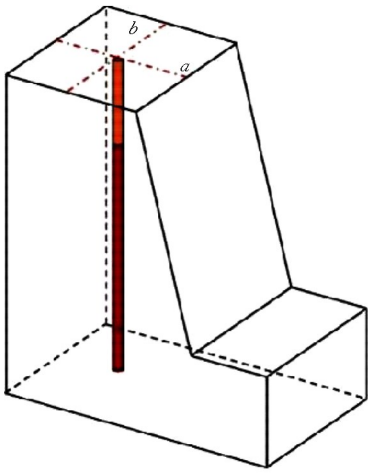
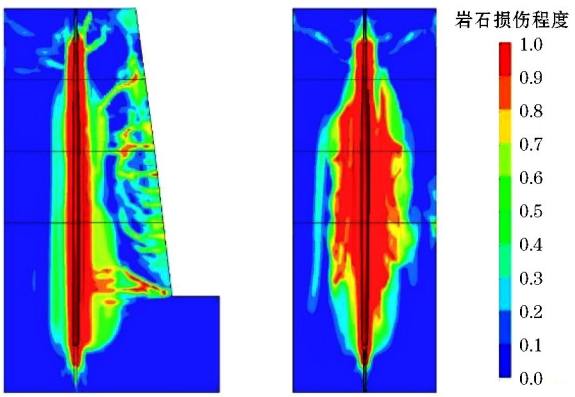


图 9 损伤观测统计方案

Fig.9 Damage observation statistical scheme

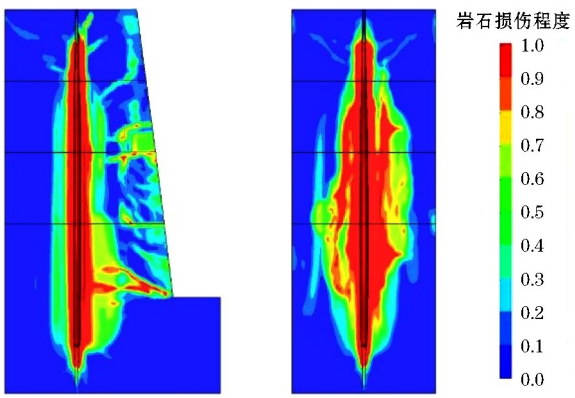
图 10 和图 11 分别为常温岩石台阶和多梯度冻结岩石台阶不同观测截面的损伤分布云图。



(a) a 截面 (b) b 截面

图 10 常温岩石台阶截面损伤云图

Fig.10 Damage cloud diagrams of bench section of rock at normal temperature



(a) a 截面 (b) b 截面

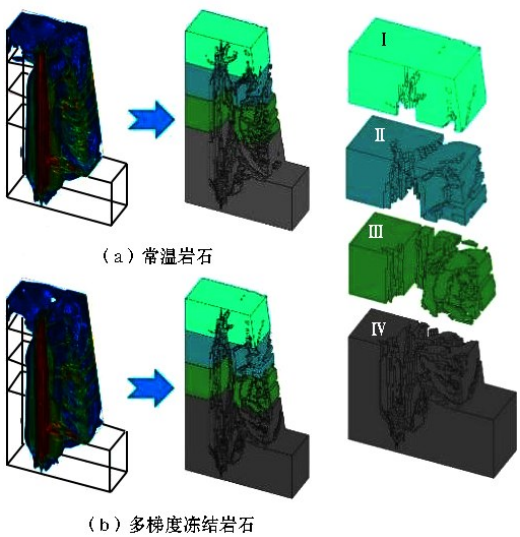
图 11 多梯度冻结岩石台阶截面损伤云图

Fig.11 Damage cloud diagrams of bench section for frozen rock with multi-gradient

由图 10 和图 11 可知,两种工况下的损伤均主要集中在炮孔周围,强损伤区沿炮孔轴向分布,说明炮孔爆源控制了初始破坏位置。与常温岩石相比,多梯度冻结岩石的损伤分布呈现出明显的分层差异,表明温度变化对岩石爆破损伤扩展具有重要影响。

从 a 截面来看,常温岩石中的损伤向台阶自由面方向扩展较为充分,坡面附近裂纹发育明显;多梯度冻结岩石中,损伤主要集中于炮孔附近,向自由面方向的扩展范围有所减小。结合温度分层分析可知,−30 ℃和−20 ℃低温冻结层中岩石的损伤范围较小,裂纹连续性较弱;而−10 ℃岩层及常温岩石区损伤相对发育。从 b 截面看,常温岩石损伤区围绕炮孔向两侧扩展较连续;多梯度冻结岩石中高损伤区更集中,外围损伤扩展受到限制。这表明温度越低,冻结作用越强,岩体的强度和抗裂能力越高,裂纹扩展越困难,损伤范围也越小。

将台阶爆破损伤程度划分为 5 个等级,对应的损伤变量大小分别为 0～0.2、0.2～0.4、0.4～0.6、0.6～0.8 和 0.8～1.0,并将台阶从上到下划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四个部分(见图 12),统计各损伤区间所占比例,结果见表 6。其中,损伤变量 0.4～1.0 可视为有效损伤区,该区间对应图 12 中的损伤体积统计范围。



(a) 常温岩石

(b) 多梯度冻结岩石

图 12 岩石台阶分区示意

Fig.12 Schematic of rock bench zoning

由表 6 可知,两种工况下各分区均以低损伤区(0～0.2)占比最大,说明台阶爆破损伤主要集中在炮孔附近及裂纹扩展区域,大部分岩体仍处于低损伤状态。

表 6 常温岩体台阶和多梯度冻结岩体台阶损伤统计

Table 6 Damage statistical of normal temperature rock bench and multi-gradient frozen rock bench

工况	分区	不同损伤区间所占比例/%				
		0～0.2	0.2～0.4	0.4～0.6	0.6～0.8	0.8～1.0
常温岩石台阶	Ⅰ	59.75	12.55	10.76	8.20	8.74
	Ⅱ	64.87	11.21	9.56	8.29	6.08
	Ⅲ	54.96	12.31	11.82	10.29	10.62
	Ⅳ	53.45	13.01	12.84	8.93	11.77
多梯度冻结岩石台阶	Ⅰ	64.65	13.74	8.74	6.74	6.13
	Ⅱ	68.88	11.02	7.89	6.96	5.25
	Ⅲ	56.54	11.39	11.06	9.59	11.42
	Ⅳ	53.76	12.70	12.26	8.82	12.46

从分区变化来看,Ⅰ区和Ⅱ区位于台阶上部及冻结影响较强区域,多梯度冻结岩石的有效损伤区占比明显低于常温岩石,说明低温冻结作用对爆生裂纹扩展及损伤体积增长具有明显抑制作用。Ⅲ区中两种工况的有效损伤区占比较为接近,表明随着岩层温度升高,冻结效应逐渐减弱。Ⅳ区两种工况有效损伤区占比基本一致,说明该区域受冻结层影响较弱,损伤主要受炮孔位置、自由面条件及台阶结构控制。

就强损伤区(0.8～1.0)的体积而言,常温岩石台阶Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区占比分别为 8.74%、6.08%、10.62%和11.77%,多梯度冻结岩石台阶Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区占比分别为 6.13%、5.25%、11.42%和 12.46%。可以看出,与常温岩石台阶相比,多梯度冻结岩石上部区域强损伤区的体积占比降低,而中下部区域强损伤区的体积占比相对接近或略有增加,表明冻结层并非使损伤均匀减弱,而是改变了爆破损伤的空间分布,使损伤更多向中下部分区集中。

综上所述,多梯度冻结岩石台阶爆破破坏具有明显的分区差异,整体表现为上部低温冻结层损伤受抑、中下部损伤相对发育的特征,说明温度梯度会改变岩体爆破损伤区的空间分布和裂纹扩展规律。在损伤比例统计结果的基础上,提取常温岩石台阶和多梯度冻结岩石台阶的有效损伤区体积,并对其进行对比分析,结果如图 13 所示。

由图 13 可知,常温岩石与多梯度冻结岩石的损伤体积均由Ⅰ区向Ⅳ区逐渐增大,说明台阶中下部区域损伤扩展更为充分,爆破破坏范围更大。此外,多梯度冻结岩石在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的损伤体积均小于常温岩石,分别降低约 22%、16%和 2%,表明冻结层对爆破损伤的扩展具有抑制作用。其中,Ⅰ、Ⅱ区差异较为明显,说明上部低温冻结层对裂纹扩展和损伤发育的抑制作用更强;Ⅲ区差异较小,表明随着岩层温度升高,冻结效应逐渐减弱。Ⅳ区两种工况的损伤体积基本接近,说明该区域受冻结层影响较弱,损伤主要受炮孔位置、自由面条件及台阶结构控制。结合损伤比例统计可知,多梯度冻结岩石并非整体破坏增强,而是表现为总体损伤范围减小、局部损伤相对集中。这表明温度梯度会改变岩体爆破损伤扩展方式,使寒区冻结岩体台阶爆破呈现明显的分区差异化特征。对此,在寒区台阶爆破时,应根据炮孔冻结层深度确定装药结构及装药能量,以保证爆破能不均匀作用于孔壁,实现精准爆破,减少爆破振动,降低坡顶大块率。

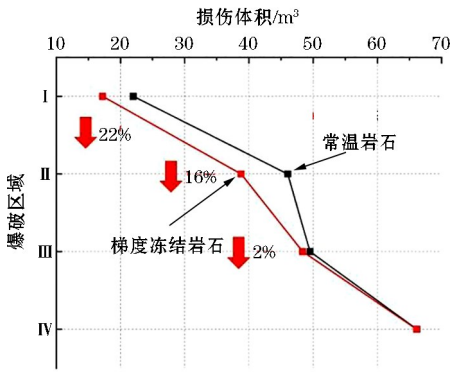


图 13 各个爆破区域岩石损伤体积对比

Fig.13 Comparison of rock damage volume in each blasting zone

4 结论

本文基于 LS-DYNA 开展了冻结岩石单孔爆破裂纹扩展过程及多梯度冻结岩石台阶爆破数值模拟,研究了冻结温度对爆破过程中应力波传播规律及台阶爆破破岩的影响,得到以下主要结论。

(1) 随着岩石冻结温度由 20 ℃(常温)降低至 −30 ℃,岩石抗压强度、弹性模量等力学参数逐渐增大,爆破应力波波速增幅 27%,相同测点处应力增幅为 20%,衰减系数无显著变化,而岩体的爆破损伤和破碎范围逐渐减小,−30 ℃冻结岩石裂隙区范围相比常温区降低约 29%。

(2) 分析了冻结层对台阶爆破损伤分布及破碎范围的影响。结果表明,多梯度冻结岩石爆破损伤呈现明显的分区差异,上部低温冻结区损伤发育受到抑制,中下部损伤逐渐接近常温工况。与常温岩石相比,多梯度冻结岩石台阶Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区损伤体积分别降低约 22%、16% 和 2%,Ⅳ区损伤体积与常温岩石基本一致,说明随着岩层温度升高,冻结作用对爆破损伤扩展的抑制作用逐渐减弱。总体来看,上覆冻结层不利于台阶岩体爆破损伤和裂纹扩展,在寒区台阶爆破参数设计中应重点考虑低温冻结层的影响。

参考文献(References):

[1] 张新河,贾世杰,赵国强.高寒区冻岩爆破机理分析及力学特性试验研究[J].现代矿业,2022,38(7):72-76.
Zhang Xinhe, Jia Shijie, Zhao Guoqiang. Analysis of blasting mechanism and experimental study on mechanical properties of frozen rock in alpine region [J]. Modern Mining,2022,38(7):72-76.

[2] 杨阳,李祥龙,杨仁树,等.低温岩石冲击破碎分形特征与断口形貌分析[J].北京理工大学学报,2020,40(6):632-639+682.
Yang Yang, Li Xianglong, Yang Renshu, et al. Study on fractal characteristics and fracture mechanism of frozen rocks[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020,40(6):632-639+682.

[3] 蒋楠,张硕彦,姚颖康,等.冻结砂岩爆破破岩的能量耗散特性[J].爆炸与冲击,2024,44(5):142-157.
Jiang Nan, Zhang Shuoyan, Yao Yingkang, et al. Energy dissipation characteristics of fragmentation of frozen sandstone[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(5): 142-157.

[4] Xu J C, Pu H, Sha Z H. Dynamic mechanical behavior of the frozen red sandstone under coupling of saturation and impact loading[J]. Applied Sciences,2022,12(15):7767.

[5] Wang J X, Yin Y, Esmaieli K. Numerical simulations of rock blasting damage based on laboratory-scale experiments [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(6): 2399-2417.

[6] Wang Z L, Wang H C, Wang J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics,2021,135:104172.

[7] 黄佑鹏,王志亮,毕程程.岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J].水利水运工程学报,2018(5):95-102.
Huang Youpeng, Wang Zhiliang, Bi Chengcheng. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks[J]. Hydro-Science and Engineering,2018(5):95-102.

[8] Wei X, Shen Z, Song K W, et al. Statistical prediction method of inclined shaft blasting fragmentation based on dynamic damage distribution in excavated rock mass [J]. Scientific Reports,2025,15(1):34985.

[9] Zhou Z L, Wang Z, Cheng R S, et al. Experimental and numerical study on blast-induced rock damage and fragmentation under low temperatures [J]. Engineering Failure Analysis,2025,174:109497.

[10] Cai X, Wang C, Zhou Z L, et al. Dynamic optimization of powder factor in extreme-cold region bench blasting considering temperature effects on single-hole blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2025,59:7915-7940.

[11] 南星,陈小磊,张如波,等.硬岩隧道深孔掏槽爆破数值模拟研究[J].爆破,2025,42(4):79-88.
Nan Xing, Chen Xiaolei, Zhang Rubo, et al. Numerical simulation and application of deep-cut-hole blasting technique in hard rock tunnels[J]. Blasting, 2025, 42(4): 79-88.

[12] 李洪超,陈勇,刘殿书,等.岩石RHT模型主要参数敏感性及确定方法研究[J].北京理工大学学报,2018,38(8):779-785.
Li Hongchao, Chen Yong, Liu Dianshu, et al. Sensitivity analysis determination and optimization of rock RHT parameters [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2018,38(8):779-785.

[13] 费鸿禄,郭纪委,任国林,等.紧邻大型空区的两阶段矿柱回采爆破参数优化与应用[J].工程爆破,2024,30(5):125-142.
Fei Honglu, Guo Jiwei, Ren Guolin, et al. Optimization and application of blasting parameters for two-stage pillar recovery adjacent to large goafs[J]. Engineering Blasting, 2024,30(5):125-142.

[14] Ma S Z, Liu K W, Yang J C. Investigation of blast-induced rock fragmentation and fracture characteristics with different decoupled charge structures [J]. International Journal of Impact Engineering,2024,185:104855.

[15] 李洪超,陈德训,王樨尧,等.基于岩体RHT本构模型的盲天井分层爆破参数优化[J].北京理工大学学报,2026,46(6):569-581.
Li Hongchao, Chen Dexun, Wang Xiyao, et al. Parameter optimization of layered blasting for blind raise based on rock mass RHT constitutive model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2026,46(6):569-581.

[16] 邓鹏,胡世君,李霖炜,等.基于OpenRadioss的RHT模型改进及地下自由场爆炸分析[J].兵器装备工程学报,2026,47(1):15-23.
Deng Peng,Hu Shijun,Li Linwei, et al.Improvement of the RHT model and underground free-field explosion analysis based on OpenRadioss[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2026,47(1):15-23.

[17] Huo X F, Shi X Z, Qiu X Y, et al. A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 123:104407.

[18] 楼晓明,陶益,曾华恒,等.筒形直眼掏槽超深系数与孔深关系研究[J].振动与冲击,2025,44(17):161-169.
Lou Xiaoming, Tao Yi, Zeng Huaheng, et al. Relation between ultra-deep coefficient of cylindrical straight eye digging and hole depth[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025,44(17):161-169.

[19] 李昂,刘建国,付毅,等.高寒露天金属矿压水填塞增效爆破技术研究[J].矿业研究与发,2026,46(5):40-52.
Li Ang, Liu Jianguo, Fu Yi, et al. Research on efficiency-enhanced blasting technology with water pressure stemming in alpine open-pit metal mines[J]. Mining Research and Development,2026,46(5):40-52.

[20] 唐鸣东,符洲云,陈学松,等. Las Bambas露天矿矿岩分离控制爆破技术与块度预测研究[J].矿业研究与开发,2026,46(6):62-70.
Tang Mingdong, Fu Zhouyun, Chen Xuesong, et al. Study on controlled blasting technology for ore-rock separation and fragmentation prediction in Las Bambas open-pit mine[J]. Mining Research and Development,2026,46(6):62-70.