

原位应力下饱水冻结砂岩的爆破损伤致裂特征

张文涛¹, 徐颖^{1,2}, 汪海波¹, 李成杰^{1,3}, 郑强强^{1,2}, 杨子仪¹, 邓天祥¹

(1.安徽理工大学土木建筑学院, 安徽淮南 232001

2.安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽淮南 232001

3.安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽淮南 232001)

摘要: 为揭示原位应力下饱水冻结砂岩爆破损伤致裂特征, 首先从理论上分析了温度对爆破动应力场的影响及原位应力下炮孔周围静应力场分布特征。其次使用标定验证后的 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 本构参数建立单孔爆破数值模型, 探究了原位应力及温度对饱水冻结砂岩爆破损伤致裂特征的影响。最后, 建立深部冻结立井全断面爆破开挖模型, 分析了原位应力下岩体爆破损伤破碎行为。结果表明: 径向动应力受温度变化影响较小, 环向动应力则较为敏感。温度越低, 炮孔近区环向拉应力峰值越高, 环向压应力峰值越低。静水原位应力下孔周应力场呈各向同性。非静水原位应力下径向、环向应力场方向性显著。原位应力增大或温度降低均会减缓爆破损伤体积增长速率, 抑制损伤发展, 且二者对爆破损伤的影响存在交互作用。静水原位应力可抑制自由面裂纹整体扩展范围, 并使主裂纹优势减小。非静水原位应力诱导裂纹沿最大主应力方向定向扩展, 并抑制最小主应力方向裂纹发育。低温可减小裂纹扩展长度, 并削弱原位应力对裂纹扩展的定向作用及主次裂纹权重比例的差距。原位应力对爆破能量输入具有阻抗效应, 致使冻结立井爆破开挖块度的不均匀程度增大, 大块率升高。研究结果对优化爆破参数, 提高深部冻结立井爆破施工的效率和安全具有重要理论和工程意义。

关键词: 饱水冻结砂岩; 爆破; 损伤致裂特征; 原位应力; 数值模拟

中图分类号: TD235

国标学科代码: 13015

文献标识码: A

Study on blasting damage and fracturing characteristics of water-saturated frozen sandstone under in-situ stress

ZHANG Wentao¹, XU Ying^{1,2}, WANG Haibo¹, LI Chengjie^{1,3}, ZHENG Qiangqiang^{1,2}, YANG

Ziyi¹, DENG Tianxiang¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2.State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

3. Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: To reveal the blasting-induced damage and cracking characteristics of water-saturated frozen sandstone under in-situ stress, the radial and circumferential dynamic stress histories induced by explosive loading in the rock mass at different

*收稿日期: 2026-05-25; 修回日期: 2026-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(52574133, 52274071); 矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金(JYBGCZX2022107); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金(SKLMRDPC23KF10);

第一作者: 张文涛(1998-), 男, 博士研究生. E-mail: zhangwent1998@163.com;

通信作者: 徐颖(1965-), 男, 博士, 教授. E-mail: yxu@aust.edu.cn.

temperatures were first calculated based on elastodynamic theory, Laplace transformation, and the Stehfest numerical inversion method. The effect of temperature on the blasting-induced dynamic stress field was then discussed. Meanwhile, the static stress distribution around the blasthole under in-situ stress and its influence on blasting-induced rock breakage were analyzed. Subsequently, the parameters of the Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) damage constitutive model for water-saturated frozen sandstone at different temperatures were calculated and calibrated, and the calibrated parameters were validated against blasting tests on water-saturated frozen sandstone. On this basis, a single-hole blasting model incorporating in-situ stress loading was established to analyze the distribution and evolution of blasting-induced damage in water-saturated frozen sandstone under in-situ stress. The Hough transform was further used to quantitatively investigate the effect of in-situ stress on free-face crack propagation and orientation distribution. Finally, a full-face numerical model of blasting excavation for a deep freezing shaft was established. Smooth blasting and pre-splitting blasting were compared in terms of damage to the rock mass to be excavated, blasting-energy input, fragment-size distribution, and frozen-wall response. The results show that temperature has little effect on radial dynamic stress but significantly affects circumferential dynamic stress. As temperature decreases, the peak circumferential tensile stress in the near-blasthole region increases, whereas the peak circumferential compressive stress decreases. Under hydrostatic in-situ stress, the stress field surrounding the blasthole exhibits isotropy. Under nonhydrostatic in-situ stress, both radial and circumferential stress fields exhibit pronounced directional dependence. Increasing in-situ stress or decreasing temperature slows the growth of the damage volume and inhibits damage development, with an interaction effect between the two factors. Hydrostatic in-situ stress restricts overall crack propagation and reduces the dominance of the primary crack. Nonhydrostatic in-situ stress promotes crack propagation along the maximum principal stress direction while suppressing crack growth along the minimum principal stress direction. Low temperature reduces the crack propagation range and weakens both the directional effect of in-situ stress and the disparity between primary and secondary cracks. In-situ stress impedes blasting-energy input, thereby increasing fragmentation nonuniformity and the proportion of oversized blocks during freeze-shaft blasting excavation. These findings provide theoretical and engineering support for optimizing blasting parameters and improving the efficiency and safety of deep freeze-shaft construction.

Keywords: water-saturated frozen sandstone; blasting; damage-induced cracking characteristics; in-situ stress; numerical simulation

煤炭是我国重要的基础能源及工业原料^[1]。西部地区煤炭储量占全国的 70%以上^[2]。西部地区煤田上覆侏罗纪、白垩纪砂岩地层具有富水、强度低、弱胶结等特点^[3]，新建井筒穿越这些深部富水基岩层面临挑战。冻结法爆破凿井因封水效果可靠，且工期和成本的可控性好，被广泛采用^[4-5]。然而，深部富水砂岩冻结后强度提高且处于复杂应力状态，常导致爆破效率低下、轮廓控制不佳，甚至损坏冻结结构引发突水淹井事故^[6]，究其原因是对高应力下饱水冻结砂岩爆破损伤与致裂特征认识不足。

低温下饱水岩石孔隙水结冰会显著改变其力学特性。静态力学性能方面，宋勇军等^[7]对不同温度饱水红砂岩进行单轴加载，发现低温较常温增强了岩石强度和抗变形能力。杨更社等^[8]对煤岩和砂岩进行常温及不同冻结温度下的三轴压缩试验，发现二者强度随温度降低而增大。Qu^[9]研究了砂岩在不同温度条件下由单轴压缩引起的能量演化。结果显示，随着砂岩试样温度降低，其应变能和弹性能有所增加。随着温度的下降，岩石应变能的增长速率增加。动态力学性能方面，学者们基于分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验系统^[10]开展了相关研究。蒋楠等^[11]通过冻结砂岩的 SHPB 试验，发现冻结状态较常温状态显著提高了动态强度与弹性模量、降低了应变峰值。翁磊等^[12]对饱水粉砂岩进行不同负温下的 SHPB 冲击试验，发现动态弹性模量和压缩强度随温度下降先增后减，建立了考虑应变率和低温效应的 Z-W-T 型动态本构模型。王建国等^[13]利用 SHPB 装置对饱水冻结花岗岩进行等应变率冲击试验，发现冻结后峰值强度和抗剪切强度提高、动态弹性模量呈近似直线增长，破坏所需应变率升高而峰值应变减小。上述研究为饱水岩石在冻结状态的动静态力学表现提供了宝贵见解。

初始应力对爆破引起的岩石损伤致裂特征具有显著影响。Fan 等^[14]开展了花岗岩掏槽孔、崩落孔及周边孔爆破试验,量化了原位应力对爆破破碎行为的影响。结果表明,随围压增大,爆破块度提升,自由面破坏区域扩大,裂纹网络复杂度受抑制。Zhen 等^[15]通过室内不同围压条件下的爆破模型试,揭示了高地应力与爆炸应力耦合下裂纹扩展机制。结果表明,单向围压下,与围压同向的拉应力促进裂纹扩展,垂直向压应力抑制扩展;双向等围压下各向均受抑制。杨帅等^[16]通过相似模拟爆破试验,揭示了地应力下煤体爆破裂纹扩展规律,结果表明,地应力抑制裂纹扩展,裂纹朝最大主应力方向扩展;双向等压时裂纹沿偏离主应力 45° 方向,双向异压时沿主应力比确定的方向;平行最大主应力方向裂纹受促进,垂直方向受抑制。上述研究揭示初始应力对岩石爆破损伤致裂特征具有显著的抑制与导向作用。然而,这些试验多基于常温干燥或未冻结岩石,并未涉及饱水冻结砂岩这一特殊赋存状态。深部冻结立井穿越富水砂岩地层时,低温与原位应力共同作用,其爆破损伤致裂特征必然与常温条件下存在差异,目前尚缺乏深入研究。

数值模拟是分析爆破过程的重要方法。陈鹏辉等^[17]通过 LS-DYNA 模拟不同地应力下大断面隧道爆破,发现拱顶为最危险位置,无地应力时底板中部损伤深度最大。马泗洲等^[18]通过数值模拟、理论分析与试验相结合,研究了围压与爆破耦合下节理岩体的动力响应与损伤机制,发现节理面与非静水压力共同导向裂纹扩展,应力波透射系数随水平压力增大而减小、反射系数增大,剪切应力主导翼裂纹扩展。黄永辉等^[19]采用 LS-DYNA 模拟双向等值地应力下深埋隧道光面爆破围岩损伤,发现损伤度随爆心距呈“水平直线-反 S 型曲线”两阶段变化,地应力对边帮损伤影响大于顶板,围岩损伤深度随地应力增加先减小后增大。

综上所述,本文以砂岩为研究对象,综合考虑原位应力与饱水冻结双重条件,首先从理论上分析温度对爆破动应力场的影响以及静载作用下炮孔周围的应力场分布特征与破岩机理。其次,采用标定验证后的岩石 RHT 本构参数建立单孔爆破数值模型,探究原位应力及温度对饱水冻结砂岩爆破损伤及致裂特征的影响。最后,建立深部冻结立井全断面爆破开挖模型,分析原位应力下掘进爆破岩体损伤破碎行为,研究结果可为深部冻结立井穿越富水砂岩地层的爆破参数优化设计提供参考。

1 原位应力下爆破动静态应力场与破岩机理

图 1 为远场原位应力作用下单孔爆破平面应变分析模型。岩体同时受到孔内爆炸荷载 $P(t)$ 和水平方向静荷载 P_x 以及竖直方向静荷载 P_y 作用,应力场可视为动静态应力场的耦合。

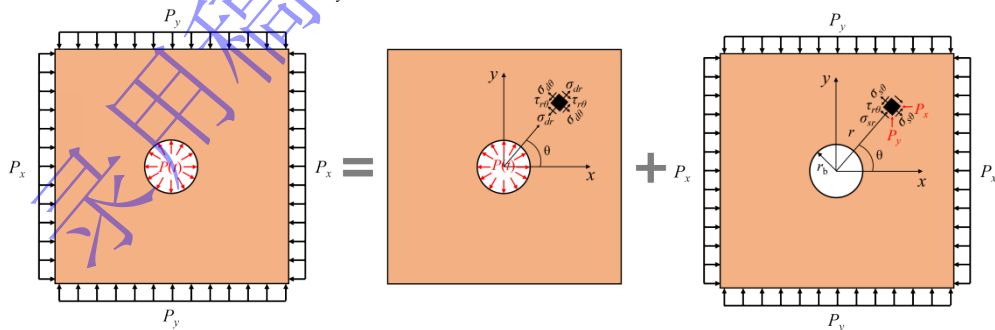


图 1 原位应力下单孔爆破理论分析模型

Fig.1 Theoretical analysis model of single-hole blasting under in-situ stress

1.1 爆破动态应力场分析

假设岩石介质为无限范围弹性、均质和各向同性材料,爆炸荷载在岩体中产生的径向和环向动应力的 Laplace 域解可以表示为^[20]。

$$\bar{\sigma}_{dr}(r,s) = f(s) \frac{(2G/r)K_1(sr/c_p) + (\lambda + 2G)(s/c_p)K_0(sr/c_p)}{(2G/r_b)K_1(sr_b/c_p) + (\lambda + 2G)(s/c_p)K_0(sr_b/c_p)} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_{d\theta}(r,s) = f(s) \frac{(2G/r)K_1(sr/c_p) - \lambda(s/c_p)K_0(sr/c_p)}{(2G/r_b)K_1(sr_b/c_p) + (\lambda + 2G)(s/c_p)K_0(sr_b/c_p)} \quad (2)$$

式中, r_b 为炮孔半径, r 和 θ 分别为分别表示距爆源的距离与方向角, c_p 为岩体纵波波速, λ 和 G 为弹性介质的 Lamé 常数, $\lambda = E\nu/[(1+\nu)(1-2\nu)]$ 及 $G = E/[2(1+\nu)]$, ν 为泊松比。 s 为 Laplace 变换参数, K_0 和 K_1 分别表示第 0 阶和 1 的第二类修正 Bessel 函数, $f(s)$ 为爆炸荷载 $F(t)$ Laplace 变换后的形式。

炮孔孔壁爆炸压力时程曲线 $P(t)$ 简化为三角波荷载:

$$P(t) = \begin{cases} P_0 t/t_r, & (0 \leq t < t_r) \\ P_0(t_d - t)/(t_d - t_r), & (t_r \leq t \leq t_d) \\ 0, & (t > t_d) \end{cases} \quad (3)$$

式中, t_r 和 t_d 为爆炸动载上升段时长和总的作用时长, P_0 为作用在孔壁上的峰值压力。根据凝聚炸药爆轰波的 Chapman-Jouguet 模型, 作用于爆孔壁的峰值压力可通过以下公式计算^[21]:

$$P_0 = \frac{\rho_e V_D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\varphi} \quad (4)$$

式中, ρ_e 为炸药密度, d_c 为装药直径, d_b 为炮孔直径, γ 为等熵指数, 对于爆轰产物。近似取 3.0, φ 为炸药绝热膨胀系数, 一般取值为 1.5^[22]。

本节基于数值反演将拉普拉斯空间解转换为时间域解。常用反演算法包括 Dubner-Abate、Crump 与 Stehfest 等, 其中 Stehfest 算法基于^[23]递推计算, 反演精度较高, 且适用于爆炸荷载导致的瞬态、快速变化应力波响应, 可获得岩体应力场随时间的演化过程。

文献[24]测定了砂岩的基本力学参数, 同时开展了饱水状态砂岩在不同温度条件的力学特性试验, 如表 1 所示。表中岩石波速通过 wyllie 时间平均公式计算得到^[25]:

$$\frac{1}{c_p} = \frac{\phi}{c_{pf}} + \frac{1-\phi}{c_{pm}} \quad (5)$$

式中, c_{pf} 为流体波速, c_{pm} 为骨架波速, ϕ 为孔隙度。

计算时, 水和冰的波速分别取 1482m/s 和 3900m/s。砂岩孔隙度为 0.133。波速参考典型砂岩取 2347m/s^[26]。对于常温饱水砂岩, 可直接代入式(5)求解。当温度降至零度以下时, 岩体孔隙中的水结冰, 孔隙相由单一水相转变为“冰-未冻水”两相混合。为表征该过程对波速的影响, 采用慢度线性加权得到等效孔隙相波速 $c_{pf}^*(T)$, 将 $c_{pf}^*(T)$ 代入式(5)即可得到冻结温度 T 下的砂岩波速。

$$\frac{1}{c_{pf}^*(T)} = \frac{S_u(T)}{c_{pf}} + \frac{1-S_u(T)}{c_{pi}} \quad (6)$$

式中, $S_u(T)$ 为未冻水饱和度, c_{pi} 为冰的纵波波速。不同温度下砂岩未冻水饱和度参考文献[27]。

表 1 不同温度条件下岩石参数

Table 1 Rock parameters at different temperatures

温度/°C	参数				
	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	波速/(m·s ⁻¹)
20	2.75	26.1	3.2	0.36	2177.6
-5	2.75	42.1	5.8	0.31	2425.7

-10	2.75	51.2	7.6	0.23	2441.7
-20	2.75	61.8	12.3	0.21	2452.4

取炮孔直径为 55mm，装药直径为 45mm，使用 MATLAB 编程求解式(1)、(2)反演得到爆炸荷载激发的动态应力场。图 2 为 $T=-10^{\circ}\text{C}$ 时不同爆心距对应的径向和环向动态应力时程曲线，图中拉应力取正，压应力取负。图 2 表明，爆炸荷载作用下，围岩径向动应力首先在短时间内升至压应力峰值，随后随应力波衰减逐渐卸载，并因岩体回弹转化为拉应力，但其幅值远小于压应力，且主要出现在距炮孔一定范围外。环向应力初期表现为较小压应力，随后受径向压缩作用转化为较大的环向拉应力，其幅值明显高于径向拉应力。由于岩体抗拉强度较低，环向拉应力及卸载过程中产生的径向拉应力均可能诱发拉伸破坏。

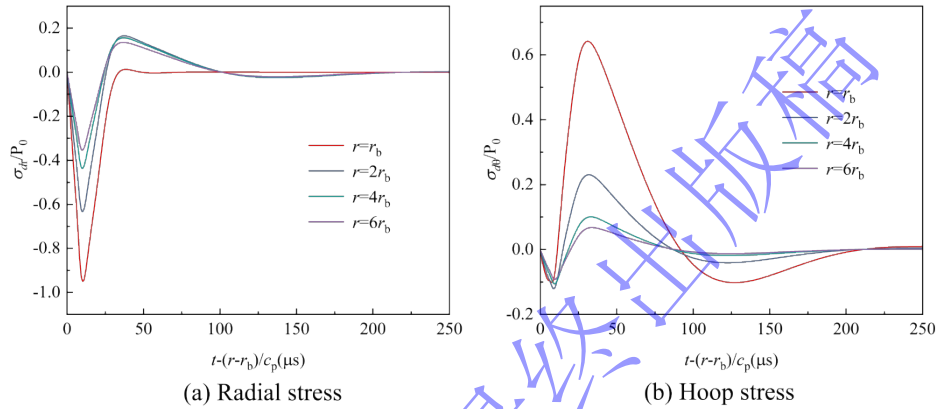


图 2 爆炸荷载激发的不同爆心距处动应力时程曲线 ($T = -10^{\circ}\text{C}$)

Fig.2 Dynamic stress time-history curves at different distances from the blast center excited by blast loading. ($T = -10^{\circ}\text{C}$)

图 3 为给定爆心距不同温度下爆破动态应力时程曲线，显示温度变化对爆破应力波传播具有显著影响。图 4 为不同温度条件下爆炸荷载激发的动应力峰值随爆心距的变化情况。径向压应力与环向拉应力在炮孔近区较大，随爆心距增大持续减小。径向拉应力在靠近炮孔处幅值较小，随爆心距增大呈先升高后降低的变化规律。环向压应力的变化受温度影响较为明显： 20°C 和 -5°C 时，其近区峰值较大，并随爆心距增大逐渐减小。当温度降至 -10°C 和 -20°C 时，近区环向压应力峰值明显降低，且随距离增加表现为先小幅增大后逐渐衰减。

进一步比较不同温度下的动应力峰值可知，温度变化对径向应力的影响较小。相比之下，环向应力对温度更敏感。随着温度降低，炮孔近区环向拉应力峰值明显跃升，但其衰减的速度加快，远区峰值反而更小。环向压应力峰值则随温度降低整体减小，说明低温削弱了爆炸荷载产生的环向压缩作用。从爆破破岩机制看，径向压应力主要控制孔周粉碎区的形成与发展，环向拉应力主要控制裂隙区的起裂与扩展。低温条件下，炮孔近区径向压应力变化很小，而环向压应力降低、环向拉应力升高，这种环向应力变化可能促进炮孔近区局部损伤发展，但对粉碎区形成的影响相对有限。对于炮孔远区，低温下环向拉应力更小，裂隙扩展能力减弱。结合低温下岩体强度和刚度提高的影响，粉碎区和裂隙区范围将总体趋于缩小。

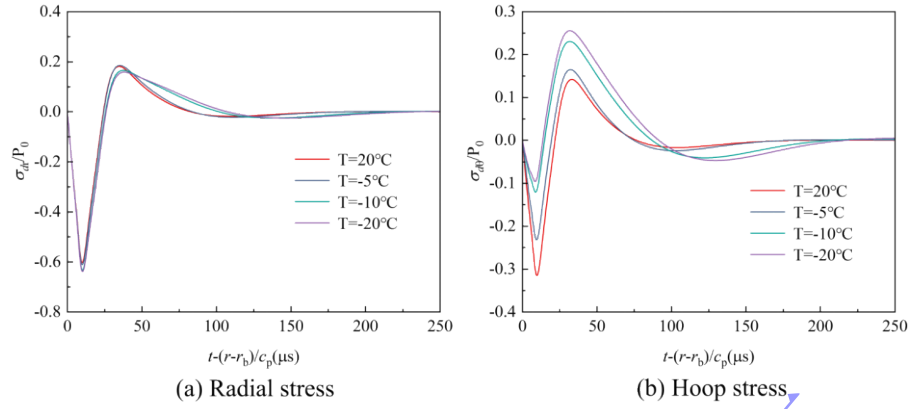


图 3 不同温度下爆炸荷载激发的动应力时程曲线($r=2r_b$)

Fig.3 Dynamic stress time-history curves excited by blast loading at different temperatures ($r=2r_b$)

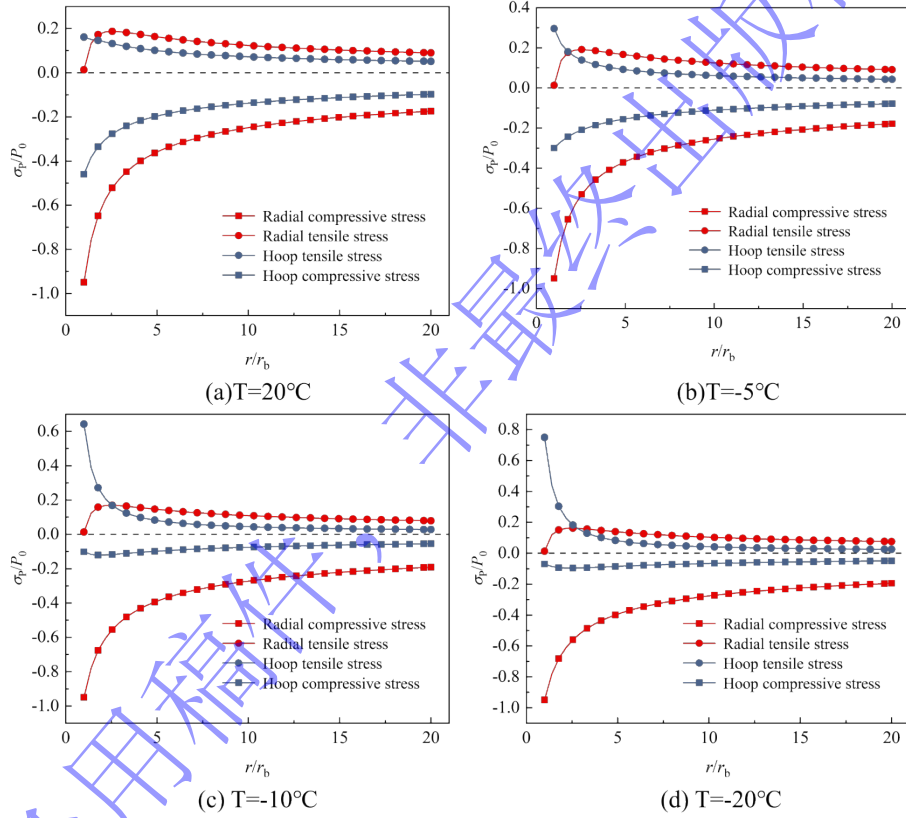


图 4 爆炸荷载激发的动应力峰值随爆心距衰减曲线

Fig.4 Attenuation curves of peak dynamic stress with distance from the blast center excited by blast loading

1.2 原位应力下静应力场分布

根据弹性力学理论，远场原位应力作用下炮孔周围岩体的应力分布情况如下^[28]：

$$\begin{cases} \sigma_{sr} = \frac{1}{2} \left[(P_x + P_y) \left(1 - \left(\frac{r_b}{r} \right)^2 \right) + (P_x - P_y) \left(1 - 4 \left(\frac{r_b}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{r_b}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{s\theta} = \frac{1}{2} \left[(P_x + P_y) \left(1 + \left(\frac{r_b}{r} \right)^2 \right) - (P_x - P_y) \left(1 + 3 \left(\frac{r_b}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right] \end{cases} \quad (7)$$

图 5 显示了在不同应力状态下的岩体应力分布特征。静水原位应力下，径向应力与环向应力呈各向同性分布，远场应力水平均匀并逼近原位应力水平。而在炮孔近区，应力梯度显著增大，径向应力

趋近于 0，环向应力水平急剧提升。随着静水围压幅值提高，径向与环向应力的整体水平随之提升，但分布形态不变。非静水原位应力条件下，孔周应力场呈明显的方向性差异，尤其是环向应力在孔壁重分布较为剧烈。

爆破动载作用下，炮孔近区岩体首先承受高幅值、短持续时间的爆破峰值压力，产生压剪粉碎破坏。由于原位应力远小于炮孔近区冲击波的压力，因此其对粉碎区的影响相对较小，随着冲击波向外传播并衰减为应力波，岩体破坏形式由近区压剪破碎转为以张拉开裂为主，原位应力对裂隙区扩展的影响较显著。静水原位应力下，环向应力呈现压缩性质，抑制裂隙的起裂扩展，随着原位应力的增大，抑制效应将愈发明显。在非静水围压下，孔周不同方位的径向、环向应力有所差异。由于环向应力场较强且为裂隙扩展的主导因素，对环向应力进行分析。由图 5(d)可知，整体上环向应力在 x 方向更高，因此沿该方向的径向裂隙扩展受到更强的抑制。同时，随着距炮孔距离的增加，环向应力逐渐趋近于：在 x 轴方向上接近 10MPa，在 y 轴方向上接近 5MPa。因此，在远场，沿 y 轴方向的径向裂隙扩展受原位应力影响较小，而沿 x 轴方向的裂隙扩展则受到相当于 10MPa 环向压应力的抑制。

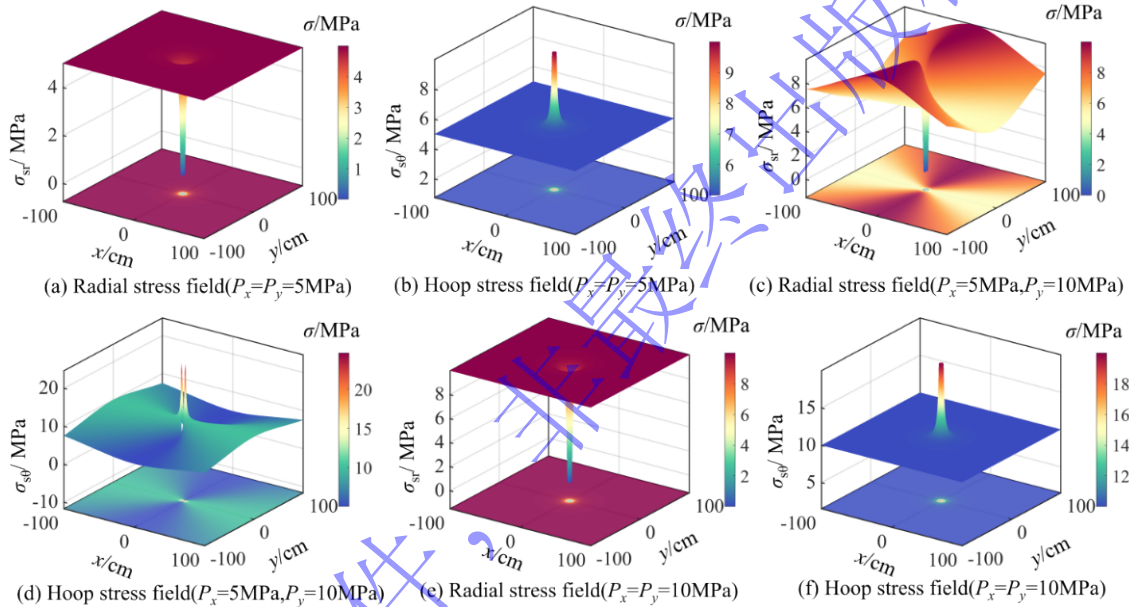


图 5 原位应力下岩体内静应力场

Fig.5 Static stress field in rock mass under in-situ stress

2 RHT 本构模型与参数验证

2.1 RHT 本构参数确定

选用 RHT 本构模型对岩石材料进行模拟。为确保 RHT 模型在模拟不同温度下岩石爆破行为的准确性，对四种不同温度（20℃、-5℃、-10℃、-20℃）下岩石的 RHT 模型参数进行计算标定，具体标定流程参见文献[29]。通过静态力学试验以及理论公式计算可得到部分 RHT 本构参数。剩余部分参数来自相关研究^[30-31]的整合调整。汇总得到不同温度下岩石 RHT 模型参数如表 2 所示。

表 2 不同温度下 RHT 模型参数

Table 2 RHT model parameters at different temperatures

参数	温度/℃				来源
	20℃	-5℃	-10℃	-20℃	
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.75	2.75	2.75	2.75	试验测定
抗压强度 f_c/MPa	26.1	42.1	51.2	61.8	
剪切模量 G/GPa	1.18	2.21	3.09	5.08	理论计算

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

应变率相关指数 β_c	0.041	0.027	0.023	0.019
应变率相关指数 β_t	0.043	0.032	0.028	0.024
多项式系数 A_1/GPa	13.04	16.18	16.40	16.54
多项式系数 A_2/GPa	15.23	18.90	19.15	19.32
多项式系数 A_3/GPa	2.47	3.06	3.10	3.13
多项式系数 T_1/GPa	13.04	16.18	16.40	16.54
压碎压力 $P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	17.4	28.1	34.1	41.2
相对抗拉强度 F_t^*	0.065	0.074	0.076	0.081
相对剪切强度 F_s^*	0.206	0.193	0.198	0.228
失效面参数 A	2.014	1.943	1.639	1.106
失效面参数 N	0.676	0.680	0.629	0.655
罗德角相关系数 Q_0	0.68	0.68	0.68	0.68
罗德角相关因子 B	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
屈服面参数 G_c^*	0.3	0.3	0.3	0.3
屈服面参数 G_t^*	0.7	0.7	0.7	0.7
残余面参数 A_f	1.62	1.62	1.62	1.62
残余面参数 N_f	0.6	0.6	0.6	0.6
初始孔隙率 α_0	1.0	1.0	1.0	1.0
孔隙压实压力 $P_{\text{comp}}/\text{GPa}$	6.0	6.0	6.0	6.0
孔隙率指数 N_p	3.0	3.0	3.0	3.0
损伤常数 D_1	0.04	0.04	0.04	0.04
损伤常数 D_2	1.0	1.0	1.0	1.0
状态方程参数 T_2/GPa	0.0	0.0	0.0	0.0
侵蚀塑性应变 ϵ_s^f	2.0	2.0	2.0	2.0
拉伸体积塑性应变分数 p_s^f	0.001	0.001	0.001	0.001

文献整合^[30-31]

默认取值

2.2 参数验证

基于文献[32]开展的饱水冻结砂岩爆破试验验证模型参数。试样尺寸为 $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的长方体试件，如图 6(a)所示。试件背面中心处留设炮孔，深度为 4.5 cm ，炮孔直径为 0.8cm 。试验时对试件施加了小幅双向等值围压。试件侧向与加载垫块之间放置泡沫垫以减少应力波反射影响。为尽可能与试验条件保持一致，建立了相同尺寸的三维数值模型，图 6(b)。对水平方向施加小幅双向等值围压，模型上下表面为自由面，四周为无反射边界，爆破荷载通过等效荷载的形式施加到炮孔壁上。

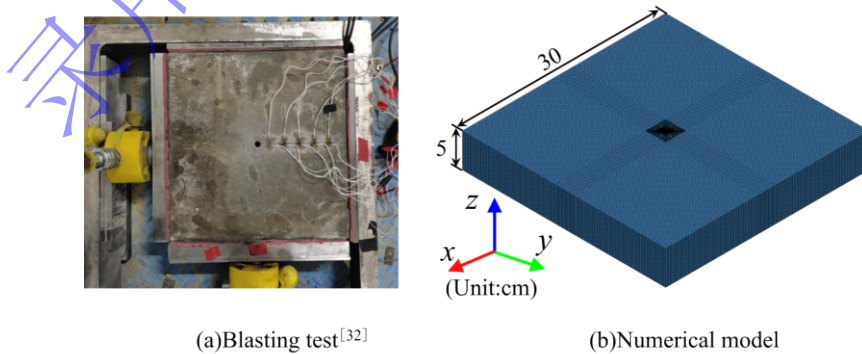


图 6 爆破试验及对应数值模型

Fig.6 Blasting test and corresponding numerical model

图 7 展示了爆破后试件的损伤情况。可以看出，爆破后试件出现十字形断裂缝，正面自由面出现漏斗形爆坑。同时观察到，随着温度降低，爆破漏斗的直径有所减小，次级裂纹发育被抑制。图 8 为

数值模拟结果,对比图 7 分析可知,数值结果与试验结果较吻合。模拟结果同样出现了十字形主裂缝和爆破漏斗,且随着温度下降漏斗直径逐渐减小,裂隙的发育程度也有所减弱。此外注意到,模拟结果爆破漏斗直径随温度下降的变化情况相较于爆破试验更为显著,这是因为实际爆破试验中炸药爆炸除了激发爆破应力波还产生了爆生气体,共同促进了爆破漏斗的形成,爆破破坏方式更复杂。总体而言,模拟结果较好的对应了理论分析的结果,能够有效反映温度变化对爆破损伤致裂特征的影响,因此该模型参数适用于本文的研究工作。

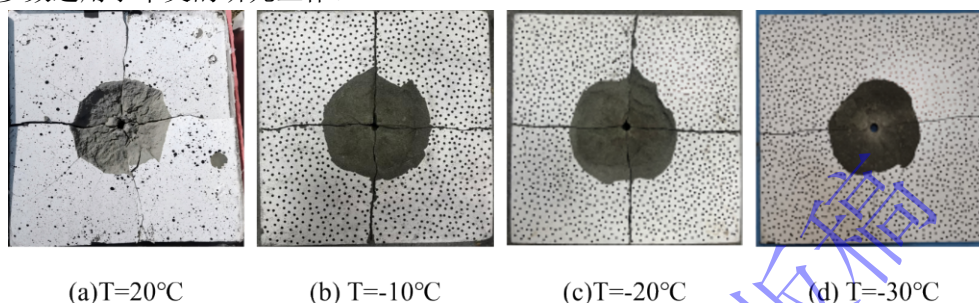


图 7 爆破试验结果^[32]
Fig. 7 Blasting test results

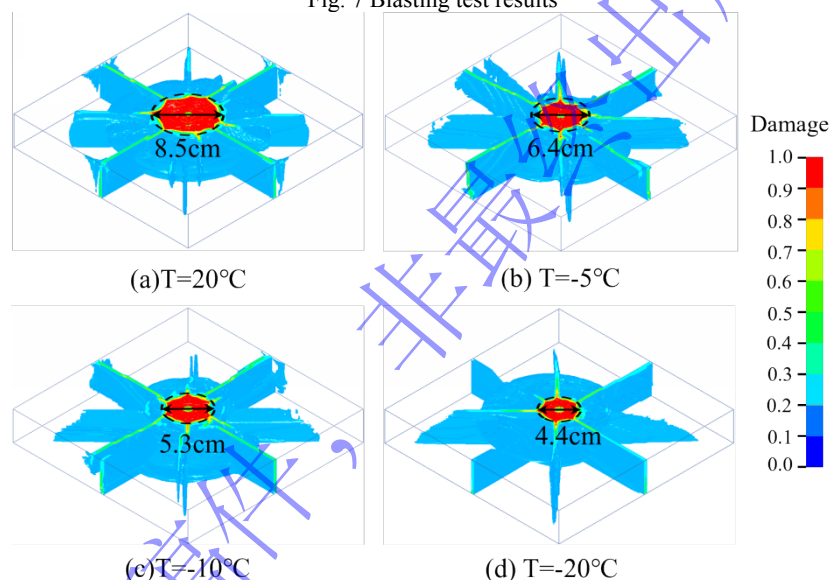


图 8 数值模拟结果
Fig. 8 Numerical simulation results

3 原位应力下饱水冻结砂岩爆破损伤数值模拟

3.1 数值模型

3.1.1 模型尺寸与网格划分

采用 LS-DYNA 有限元软件开展饱水冻结砂岩爆破数值模拟。考虑到模型的对称性,建立 1/4 实体单元模型,模型几何尺寸与网格划分情况如图 9 所示。模型长×宽×高为 150cm×150cm×150cm,中心留有半径为 2.75cm,深为 50cm 的炮孔。炸药采用不耦合装药,装药半径为 2.25cm,装药高度为 20cm。堵塞长度为 30cm。模型内部切割面施加对称边界条件。在模型侧面和底部施加无反射边界条件,顶部设置为自由边界,以模拟半无限岩体中的爆破工况。采用准静态方法^[33]对数值模型施加预设原位应力。

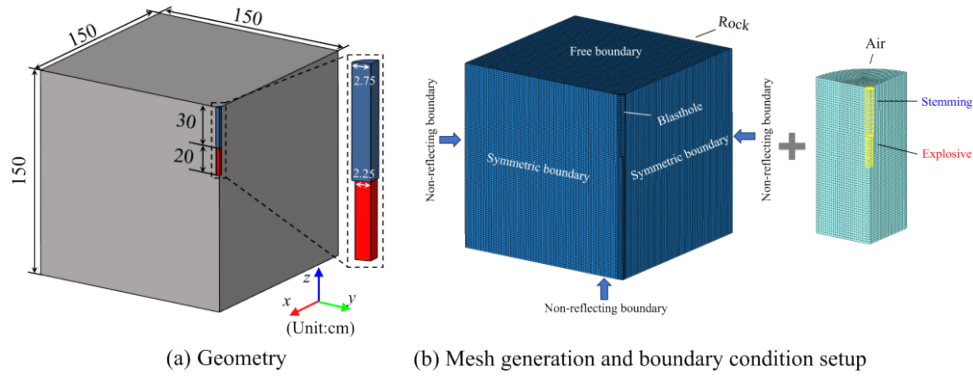


图9 数值计算模型

Fig.9 Numerical calculation model

3.1.2 材料参数

炸药材料使用关键字***MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN** 定义, 并采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程(EOS)^[34]描述爆轰过程中压力与体积之间的关系。JWL 方程可表示为:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (8)$$

式中, P 为爆炸产生的爆轰压力, V 为相对于初始状态的相对体积, E_0 为初始内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数。这些参数由文献[35]确定, 并汇总于表 3。

表 3 炸药材料与状态方程参数

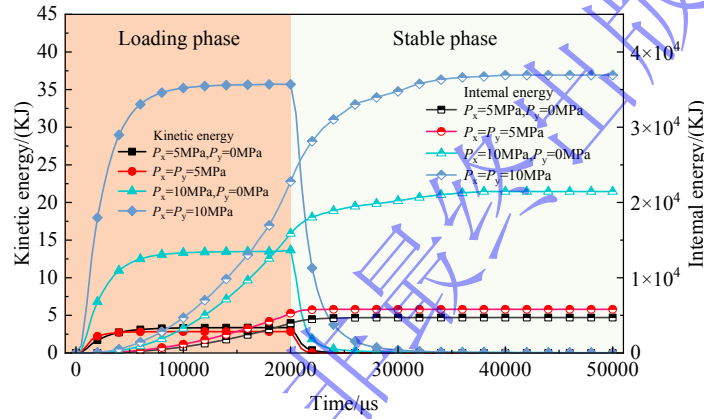
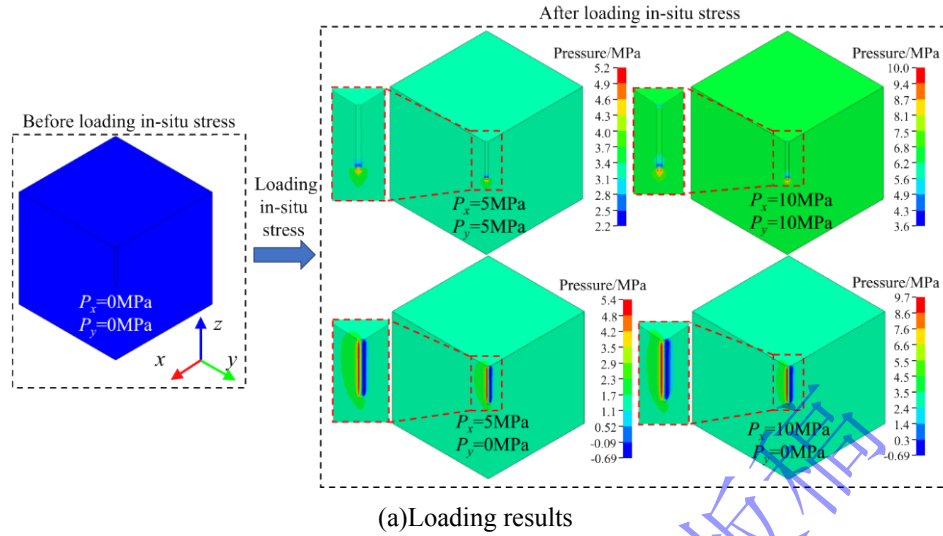
Table 3 Parameters of water gel explosive material and equation of state

密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	JWL 状态方程参数					
		A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	E_0/GPa	ω
1100	3600	102.11	12.76	5.48	1.88	1.72	0.13

模型中空气采用关键字***MAT_NULL** 定义, 状态方程采用关键字***EOS_LINEAR_POLYNOMIAL** 定义。堵塞材料的行为通过***MAT_SOIL_AND_FOAM** 材料模型进行定义。相关参数均引自文献[36]。

3.2 原位应力加载结果

设置 5 种原位应力加载组合: 工况 1: $P_x=P_y=0\text{MPa}$; 工况 2: $P_x=P_y=5\text{MPa}$; 工况 3: $P_x=P_y=10\text{MPa}$; 工况 4: $P_x=5\text{MPa}$, $P_y=0\text{MPa}$; 工况 5: $P_x=10\text{MPa}$, $P_y=0\text{MPa}$ 。加载总时长为 50ms, 0~20ms 为加载阶段, 20~50ms 为稳定维持阶段。图 10 展示了原位应力加载结果及能量演化曲线。由图可知, 在 40ms 之后应力加载均已经平衡, 岩体积蓄了一定的应变能, 且加载应力越大能量积蓄越多。在静水原位应力条件下, 孔壁周围出现规律性的应力重分布, 同时孔底存在局部压应力集中。随着原位应力值由 5 MPa 增加至 10 MPa, 岩体整体压应力水平提高, 但其空间分布形态基本一致。单向原位应力作用下, 岩体应力场呈明显各向异性分布, 炮孔壁在最大主应力方向(x 向)存在拉应力集中, 而最小主应力方向(y 向)存在压应力集中。



(b) Energy evolution time-history curve
图 10 原位应力加载过程
Fig.10 In-situ stress loading process

3.3 原位应力对爆破损伤特征的影响

图 11 展示了饱水冻结砂岩爆破损伤形态特征。温度一定时, Case1 中粉碎区和裂隙区范围最大, 损伤分布较为均匀。施加静水原位应力后 (Case2、Case3), 损伤区域明显收缩, 同时孔底部区域由于压应力集中损伤范围急剧减小。单向原位应力 (Case4、Case5) 条件下爆破损伤分布呈现明显方向性特征。由于孔壁在最大主应力方向 (x 向) 产生拉应力集中, 爆破损伤优先沿该方向发展。而在最小主应力方向 (y 向) 产生压应力集中, 损伤扩展受到限制。随着单向原位应力由 5MPa 增加至 10MPa, y 向损伤抑制程度加大, 损伤的定向发展特征更加突出。原位应力一定时, 温度下降对爆破损伤范围和形态也产生明显影响。随着温度由 20℃ 下降至 -20℃, 各工况下粉碎区和裂隙区范围减小, 这主要与饱水冻结砂岩强度提高有关, 从而削弱了爆破应力波引起的岩体压剪破坏和张拉破坏。

对不同工况下 (Case1~Case3) 的损伤体积随时间演化情况进行了统计, 如图 12 所示。依图可知, 损伤体积的演化可分为缓慢增长、快速扩张和逐步稳定三个阶段。温度和原位应力对损伤演化特征均具有显著影响, 随着原位应力增大和温度下降, 损伤体积增长速率整体减小, 损伤演化过程明显放缓。

提取各工况下的累积损伤体积, 建立损伤体积与温度、原位应力之间的响应关系, 如图 13 所示。由图可见, 损伤体积随温度下降和原位应力的增大整体呈降低趋势。从等高线分布密度来看, 温度与原位应力对爆破损伤的抑制存在交互作用。原位应力较小时, 温度下降引起的损伤体积等值线变化较为密集, 随着原位应力增大, 响应面沿温度方向的梯度逐渐稀疏, 表明高原位应力下, 温度变化对爆破损伤的影响较弱。同样的, 低温也会削弱原位应力的抑制作用效果。此外, 常温条件下岩体爆破损伤体积随原位应力增大表现出较明显的分段特征, 即 0~5 MPa 阶段降幅较小, 而 5~10 MPa 阶段降

幅明显增大, 反映出常温状态下原位应力对饱水砂岩爆破损伤抑制作用存在一定阈值效应。

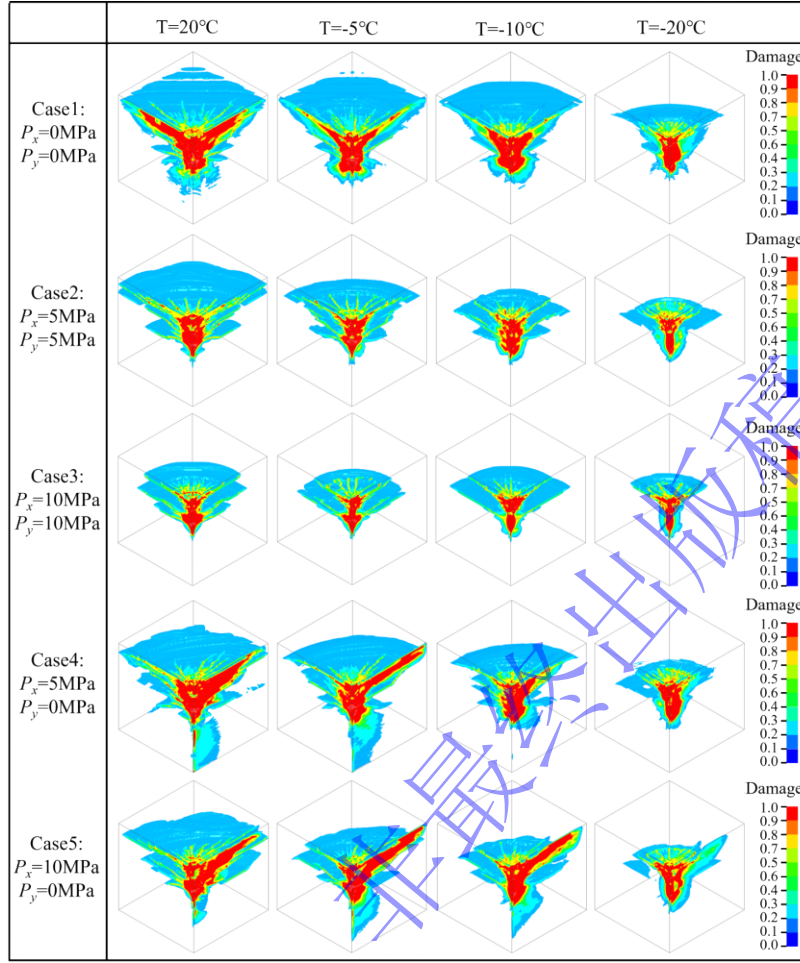


图 11 饱水冻结砂岩爆破损伤情况

Fig.11 Blasting damage condition of water-saturated frozen sandstone

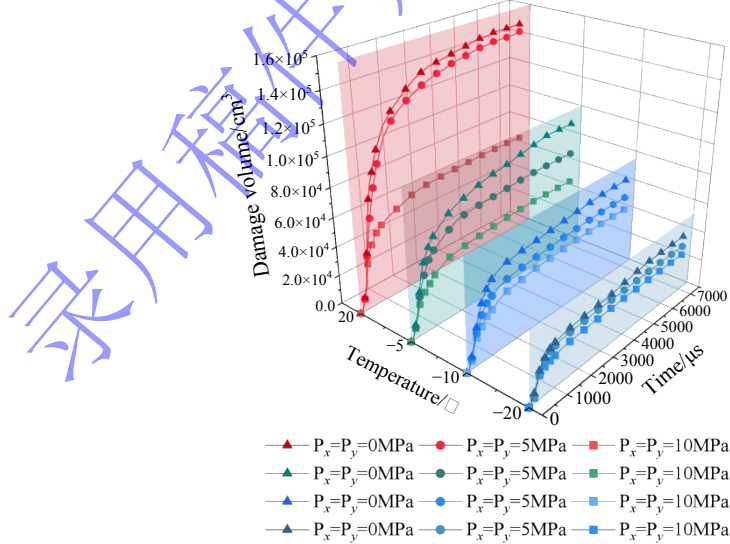


图 12 爆破损伤体积随时间的演化

Fig.12 Evolution of blasting-induced damage volume in rock mass over time

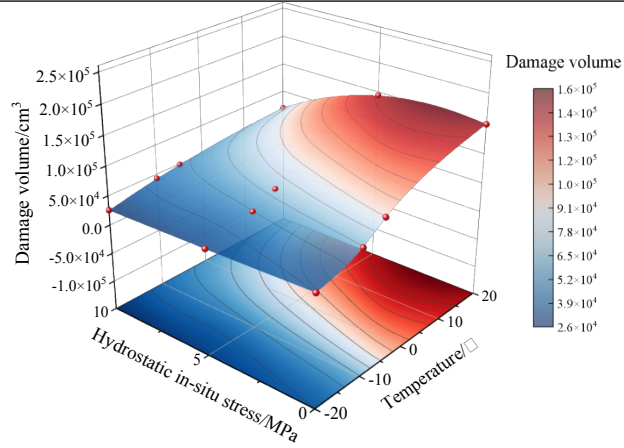


图 13 损伤体积响应曲面
Fig.13 Damage volume response surface

3.4 原位应力对爆破裂纹扩展的影响

炸药爆炸后产生的应力波在顶部自由面反射拉伸,促使自由面裂纹起裂扩展。图 14 反映了不同温度和原位应力下顶部自由面爆破裂纹的扩展特征。采用 Hough 变换^[37]对爆破裂纹在不同方位分布的权重比例进行定量表征,如图 15 所示。裂纹方位分布权重比例为某一角度区间内裂纹长度之和与全部识别裂纹总长度的比值,统计角度区间间隔为 5°。同时测量不同条件下横轴和竖轴裂纹扩展范围 L_x 和 L_y 如图 16 所示。

综合图 14~16 可知,原位应力和温度对裂纹扩展特征具有显著影响。无原位应力作用时, L_x 和 L_y 基本相等。静水原位应力下,裂纹扩展范围减小,主裂纹权重比例下降。单向原位应力下,裂纹扩展表现出明显方向性,次级裂纹向最大主应力方向偏转,最小主应力方向裂纹扩展则受到抑制。温度对裂纹扩展及原位应力作用效果同样具有显著影响。原位应力一定时,随着温度降低,裂纹扩展范围缩小。同时,温度降低后非静水原位应力导致的两方向裂纹扩展范围差距减小,次级裂纹偏转程度降低,水平方向裂纹分布权重比例的集中性下降,主次裂纹分布比例的差异减小,说明低温削弱了原位应力诱导裂纹定向扩展的能力使裂纹扩展更为均匀。但需要指出的是,低温并未改变原位应力控制裂纹扩展方向的基本规律,而是通过限制裂纹发育程度,使其定向扩展特征不如常温下充分。此外注意到,相较于常温状态, -5℃时主裂纹长度更长更突出,分析原因可知,饱水冻结砂岩表现出一定的脆性特征,有利于裂纹的集中发展。

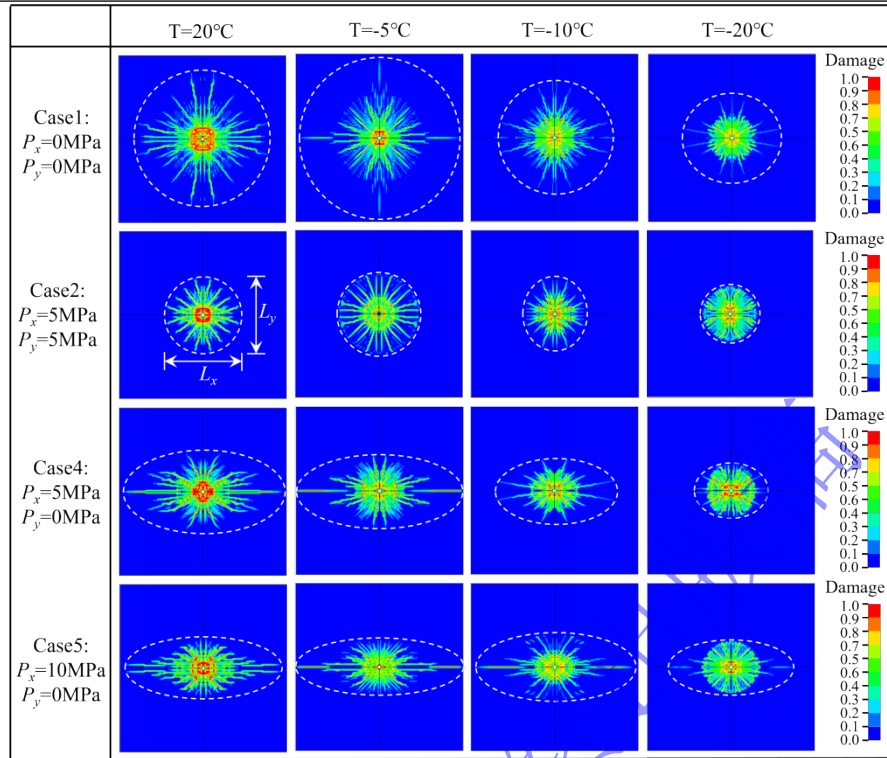


图 14 自由面裂纹发育情况
Fig.14 Crack development on the free face

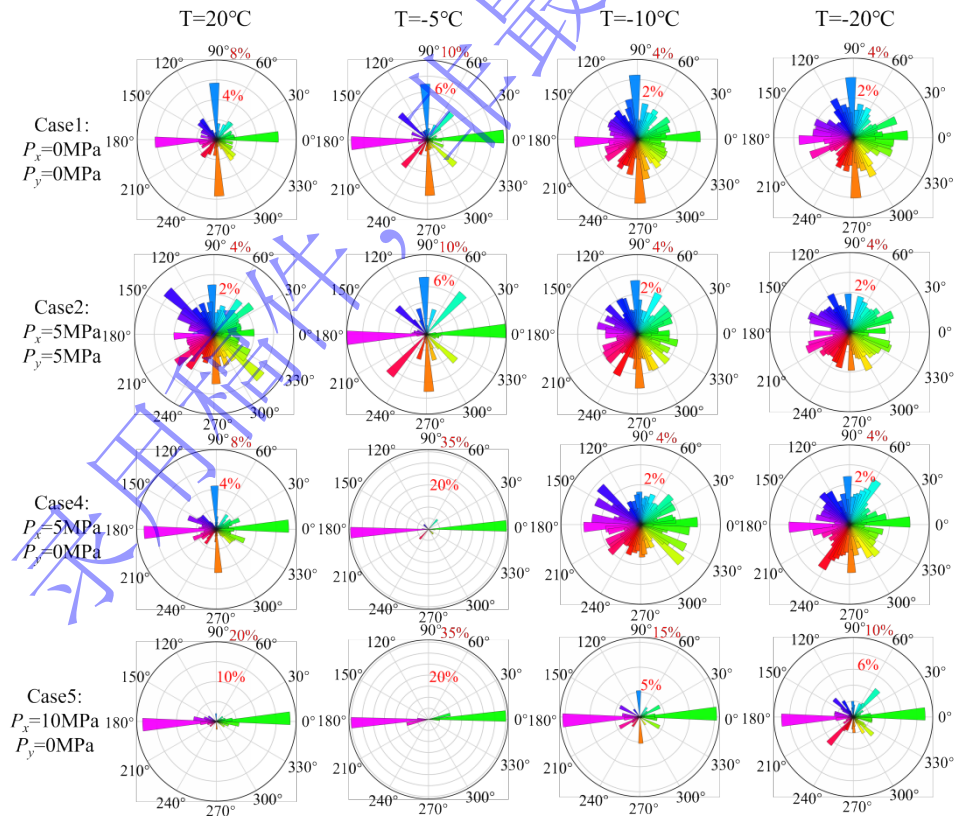


图 15 爆破裂纹分布的极坐标玫瑰图
Fig.15 Polar rose diagrams of blasting crack distribution

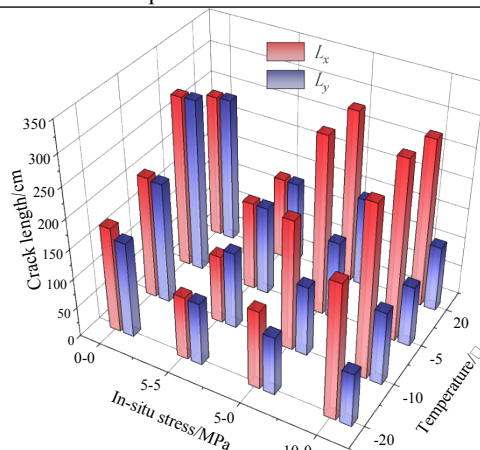


图 16 不同工况下横轴、竖轴两方向裂纹扩展范围
Fig.16 Crack propagation extents along the horizontal and vertical directions under different conditions

4 深部冻结立井爆破开挖损伤破碎分析

4.1 工程背景及数值模型构建

为研究原位应力下冻结立井爆破开挖岩体损伤破碎情况，以西部某新建矿井深部富水砂岩地层段爆破施工为背景，构建三维全断面数值模型。模型的几何尺寸及网格信息如图 17 所示。布置 5 圈共 108 个炮孔，炮孔直径均为 5.5cm，炮孔深度为 400cm，装药结构为连续装药。掏槽孔、辅助孔和周边孔的装药系数分别为 0.79、0.67、0.49，不耦合系数分别为 1.22、1.22、1.57。井筒外围距离井帮 2m 布设有冻结孔，冻结孔的直径为 14cm，孔间距为 161.26cm。段间微差延期时间取 2ms，总计算时长为 10ms。模型四周和上下表面设置为无反射边界以模拟无限岩体。现场深度 600m 地层的地压约为 9.1MPa。冻结壁温度为-11.6℃，待爆岩体温度有所上升，因此模型中围岩和待爆岩体参数分别取表 2 中-10℃和-5℃对应的饱水冻结砂岩 RHT 参数。

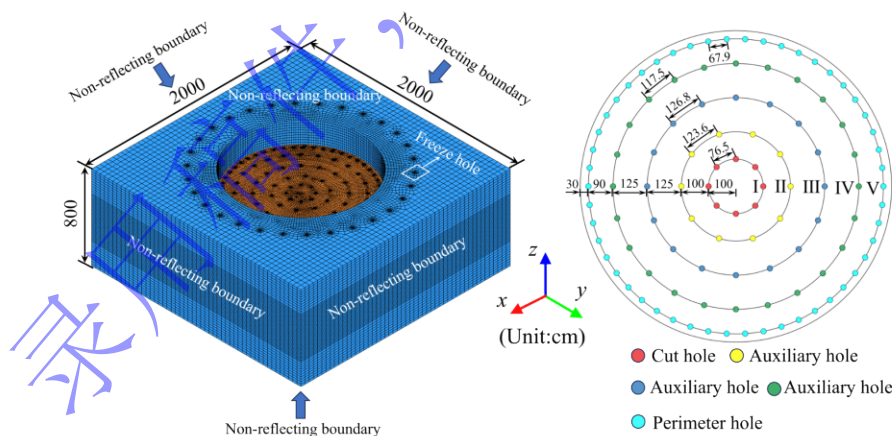


图 17 深部冻结立井爆破开挖全断面数值模型

Fig.17 Full-face numerical model of blasting excavation for deep frozen shaft

4.2 数值结果分析

起爆顺序对爆破损伤特征有较大的影响，设置光面爆破和预裂爆破两种起爆模式。图 18(a)为无原位应力下光面爆破在距离井底爆破工作面下方 2.2m 处损伤切片。中间掏槽孔最先起爆，炮孔间由于应力波的叠加，促使裂隙沿两孔之间的连线传播和发展。随后在 2ms、4ms、6ms 时三圈辅助孔依次起爆。在 8ms 时，周边孔最后起爆，沿着周边孔轮廓区域形成光滑的定向裂隙。此时，所有炮孔

都被引爆，在应力波叠加作用下，开挖区域爆破损伤较大。图 18(b)为无原位应力下预裂爆破过程，周边孔最先起爆，随后掏槽孔、辅助孔依次起爆。整体来看光面爆破与预裂爆破岩体损伤情况有较大差别。对于光面爆破，掏槽区域完全损伤破碎，周边孔裂缝贯通，冻结壁损伤范围较大。而对于预裂爆破，掏槽段未完全损伤破碎，周边孔贯通裂缝更宽，冻结壁损伤范围相对缩小。此外，继续分析图 18 可知，后起爆炸孔和冻结孔对前一段炮孔和周边孔起爆导致的岩体损伤具有导向和促进作用，这种现象可以归因于空孔效应^[38]。后起爆炸孔和冻结孔相对于前一段炮孔及周边孔可视为空孔，如图 19 所示，当爆炸应力波传至空孔时，空孔附近发生应力重分布，空孔与装药孔连线方向产生了拉应力集中，同时空孔背侧因应力波绕射形成环向拉伸，进而共同促进孔周岩体损伤。

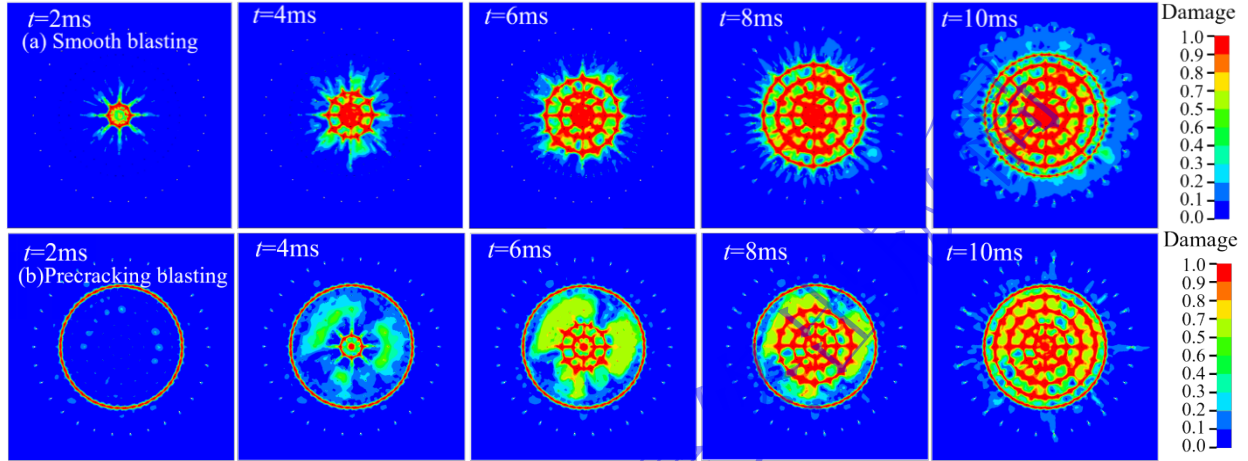


图 18 无原位应力下爆破损伤演化过程

Fig.18 Damage evolution process of blasting without in-situ stress

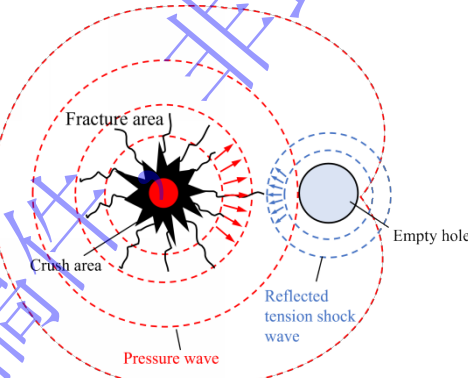


图 19 空孔对应应力波传播影响示意

Fig.19 Schematic diagram of the influence of an empty hole on stress wave propagation

为分析光面爆破与预裂爆破冻结壁损伤演化差异，在切片平面的冻结孔与井帮中间区域选取测点提取爆破压力与损伤时程曲线求其平均值，测点布置情况如图 20 所示。结果如图 21 所示。依图可知，对于光面爆破，掏槽孔起爆后爆炸应力波约在 $2000\mu\text{s}$ 时到达，造成冻结壁出现损伤，随后第 II、III、IV 段辅助孔相继起爆，由于距离测点越来越近，压力峰值逐渐升高，损伤也呈阶梯状逐渐累积增长。周边孔起爆引起的压力峰值为 26.03MPa ，损伤累积值稳定在 0.195。预裂爆破的压力时程和损伤累积时程曲线相较于光面爆破具有明显差异。周边孔首先起爆，其距离测点较近，爆炸应力波在 $400\mu\text{s}$ 时即首次到达，峰值为 25.79Mpa ，冻结壁损伤值达到 0.051，最终在最外圈辅助孔起爆后损伤达到最大值 0.098。掏槽孔和辅助孔起爆引起的压力峰值相较于光面爆破分别下降了 39.4%、48.9%、66.7%、39.3%。分析原因可知，周边孔率先起爆形成了预裂缝，有效屏蔽了爆炸应力波向冻结壁的传播，减少了冻结壁的损伤。

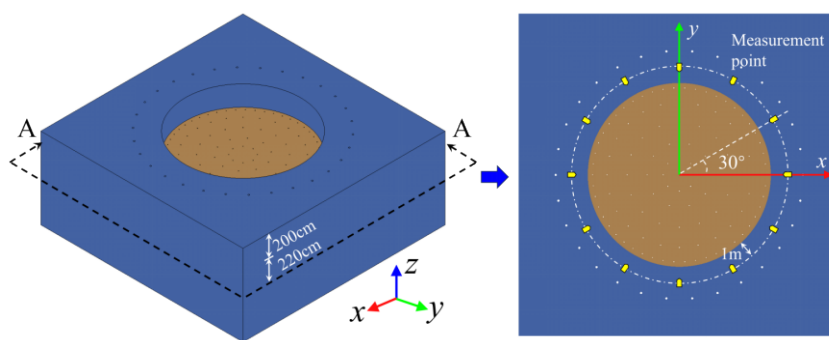


图 20 测点布置示意

Fig.20 Measurement point layout schematic

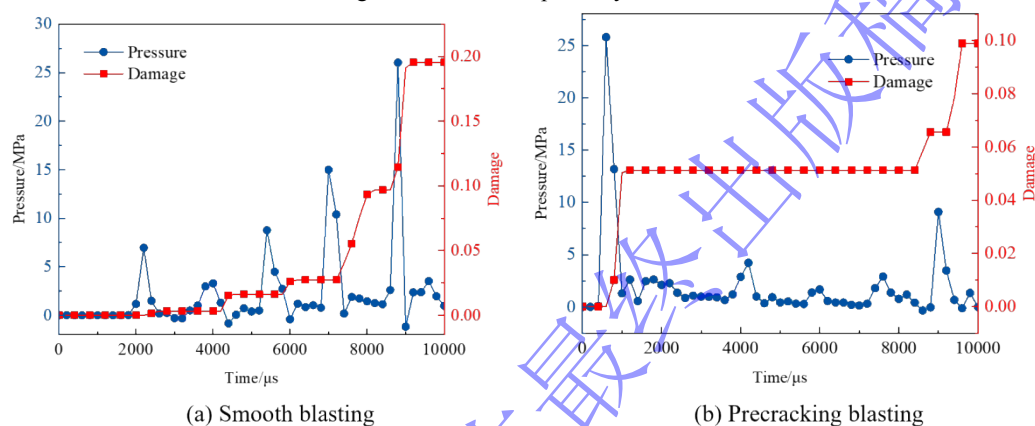


图 21 无原位应力下冻结壁爆破压力与损伤时程曲线

Fig.21 Time-history curves of blasting pressure and damage in the frozen wall under no in-situ stress

在深部立井爆破过程中，原位应力不能忽视，参考工程背景，在竖直和水平方向施加 10MPa 的三向原位应力。图 22 显示了待开挖部分岩体的应力重分布情况。可以看出，施加原位应力后，模型发生了压应力重分布。总体上压应力由内而外逐渐增大，由下而上逐渐逐渐减小，而在周边孔上部区域产生了压应力集中，压应力值较大。

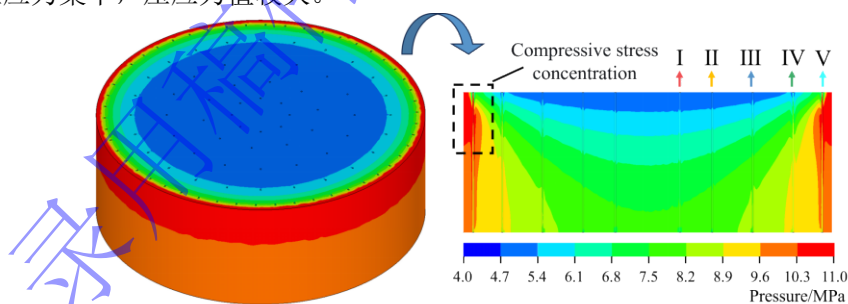


图 22 待开挖部分岩体应力分布

Fig.22 Stress distribution in the rock mass to be excavated

图 23 为原位应力下爆破损伤情况。对比分析图 23 和图 18 可知，原位应力造成的径向和环向压应力产生了一定的阻抑效应，阻止了开挖区的爆破损伤的扩张和完全穿透，同时抑制了冻结壁的损伤。掏槽段相邻炮孔之间完全贯通，但中心区域未完全破碎，掏槽效果有所下降。同段辅助孔相邻炮孔连线区域没有完全贯通，相邻段别之间区域径向贯通裂隙未形成。相较于无原位应力，施加原位应力后预裂爆破未形成完全贯通的的预裂缝。

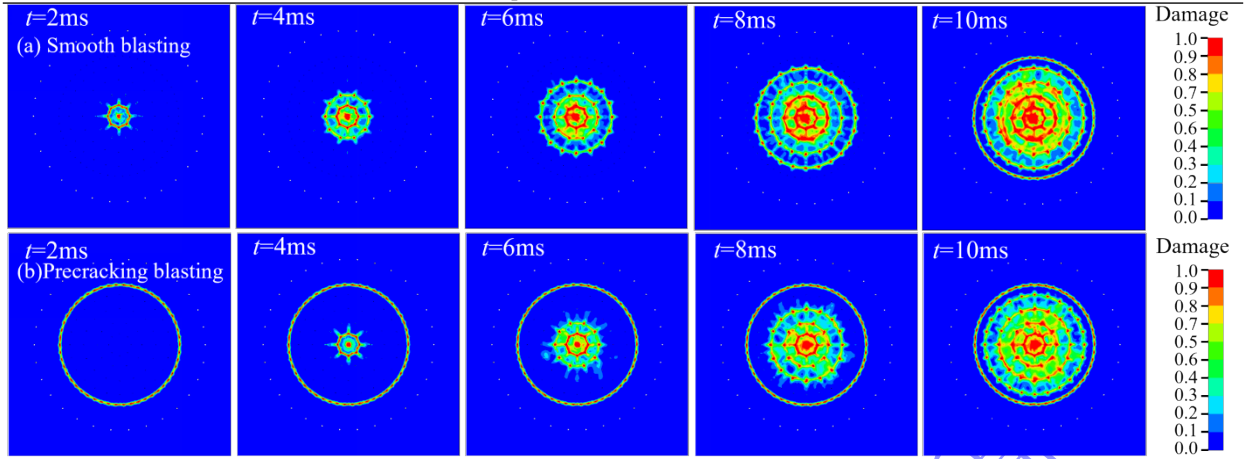


图 23 原位应力下爆破损伤演化过程

Fig.23 Damage evolution process of blasting under in-situ stress

原位应力下光面爆破与预裂爆破冻结壁测点应力和损伤时程曲线如图 24 所示。原位应力下测点单元存在 10.33MPa 的初始压应力，整体上测点爆破应力波峰值相较于无原位应力有所增大，但爆破损伤均程度极小，且都出现在爆破时程的后期。分析原因可知，原位应力作用下岩体处于预压状态，爆炸产生的压缩应力波与初始压应力叠加，导致测点的压力峰值升高。然而，初始压应力同时显著抑制了爆炸应力波诱发的压剪和拉伸损伤。此外，预裂爆破产生的预裂缝对应力波向冻结壁的传播同样具有屏蔽作用，但由于预裂缝贯通不充分导致屏蔽效果减弱且对于冻结壁损伤的抑制效果不显著。

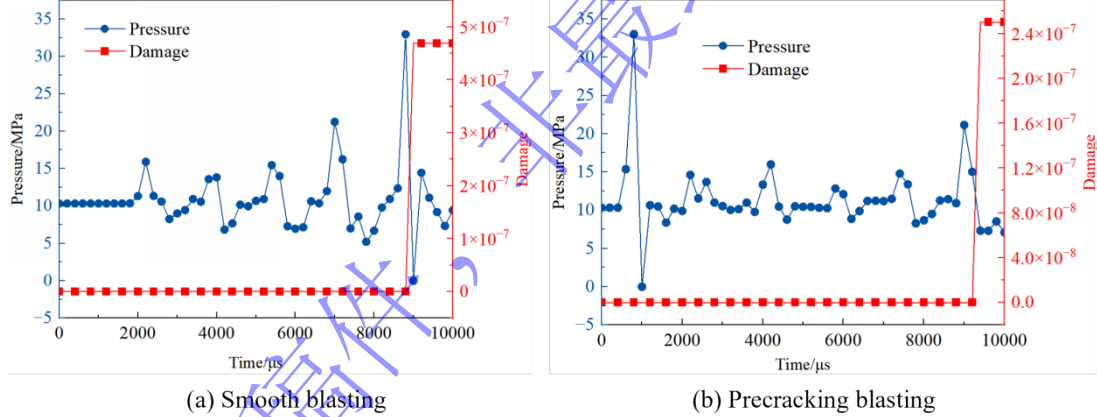


图 24 原位应力下冻结壁爆破压力与损伤时程曲线

Fig.24 Time-history curves of blasting pressure and damage in the frozen wall under in-situ stress

待开挖部分岩体的损伤破碎程度对后续出渣效率具有显著影响。图 25 显示了待开挖部分岩体整体爆破损伤情况。可以看出施加原位应力后，宏观上爆破损伤被显著抑制，尤其是上部边缘区域抑制程度最高，原因可以归结为两个方面：首先孔底集中装药造成爆炸能量分布不均匀，主要集中在炮孔下部而上部的爆炸能量不足。其次，原位应力的作用下立井开挖部分岩体上部边缘区域产生了压应力集中，导致上部岩体更难损伤破碎。图 26 为开挖岩体总能量(动能+内能)演化情况，随着各段炮孔起爆，待开挖岩体的能量分段输入并不断累积增长。对于光面爆破，原位应力对爆破能量输入具有阻抗效应，且阻抗效应随着不同段别炮孔起爆逐渐增大，结合图 22 应力分布结果分析可知这种能量演化特征与应力重分布形式密切相关。相较于无原位应力，施加原位应力后光面爆破和预裂爆破累积爆破能量分别下降了 7.54% 和 9.77%，原位应力对预裂爆破能量输入的阻抗作用更大。

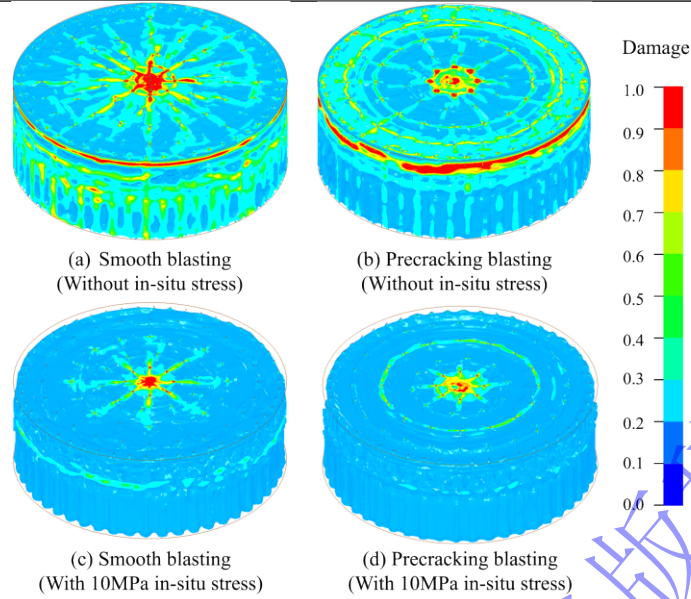


图 25 待开挖部分岩体爆破损伤

Fig.25 Blasting damage of the rock mass to be excavated

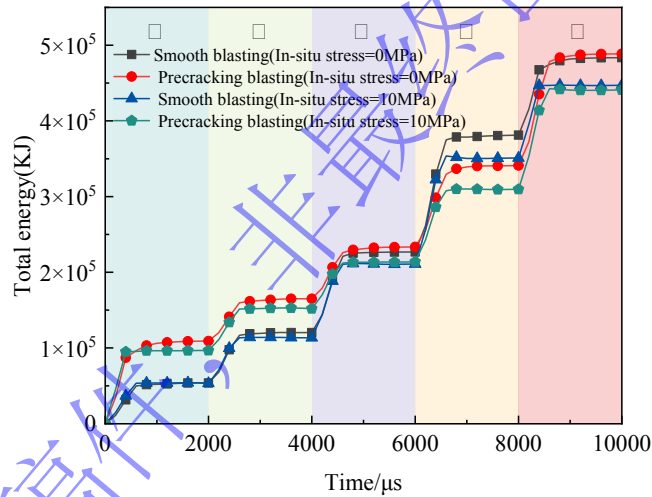


图 26 待开挖部分岩体微差爆破能量演化

Fig.26 Energy evolution of millisecond blasting in the rock mass to be excavated

基于图 25 模拟结果采用 ImageJ 图像处理法统计爆破块度获得块度尺寸分布 (FSD) 曲线的方法如图 27 所示。以底面为起点向上每隔 80cm 取一个切片, 选定损伤值 $D \geq 0.6$ 为宏观裂纹判据^[39], 随后, 生成切片的损伤数据导入 ImageJ 软件, 首先将图像转换成 8bit 深度灰度图, 经阈值分割生成二值图。之后利用颗粒分析功能对二值图进行边缘检测, 得到所有岩块对应图像。最后导出所有岩块图像的几何尺寸, 统计所有岩块的块度分布, 并使用 Logistic 函数进行拟合。结果如图 28 所示。

依图 28 可知, 无原位应力条件下, 光面爆破和预裂爆破整体块度较小, 且碎块数量较多, 岩体破碎较为充分。其中, 光面爆破的平均块度尺寸 x_{50} 为 45.62 cm, 预裂爆破为 56.96 cm。施加原位应力后, 碎块数量整体减少, 大块比例升高, 破碎均匀性降低。光面爆破和预裂爆破的 x_{50} 分别增至 64.05 cm 和 73.96 cm。说明原位应力会抑制爆破裂隙扩展与贯通, 降低岩体破碎程度, 使爆破块度增大。进一步对比两种起爆方式可知, 无论是否施加原位应力, 光面爆破的平均块度尺寸 x_{50} 均小于预裂爆破, 表明光面爆破模式更有利于待开挖岩体的爆破破碎。

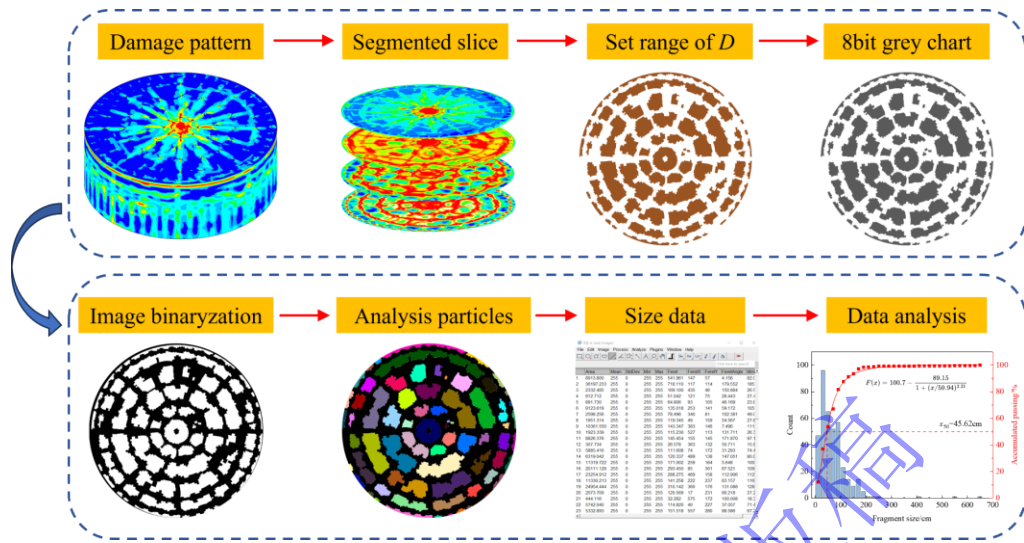


图 27 爆破块度统计分析流程示意

Fig.27 Process for statistical analysis of blasting fragment size distribution

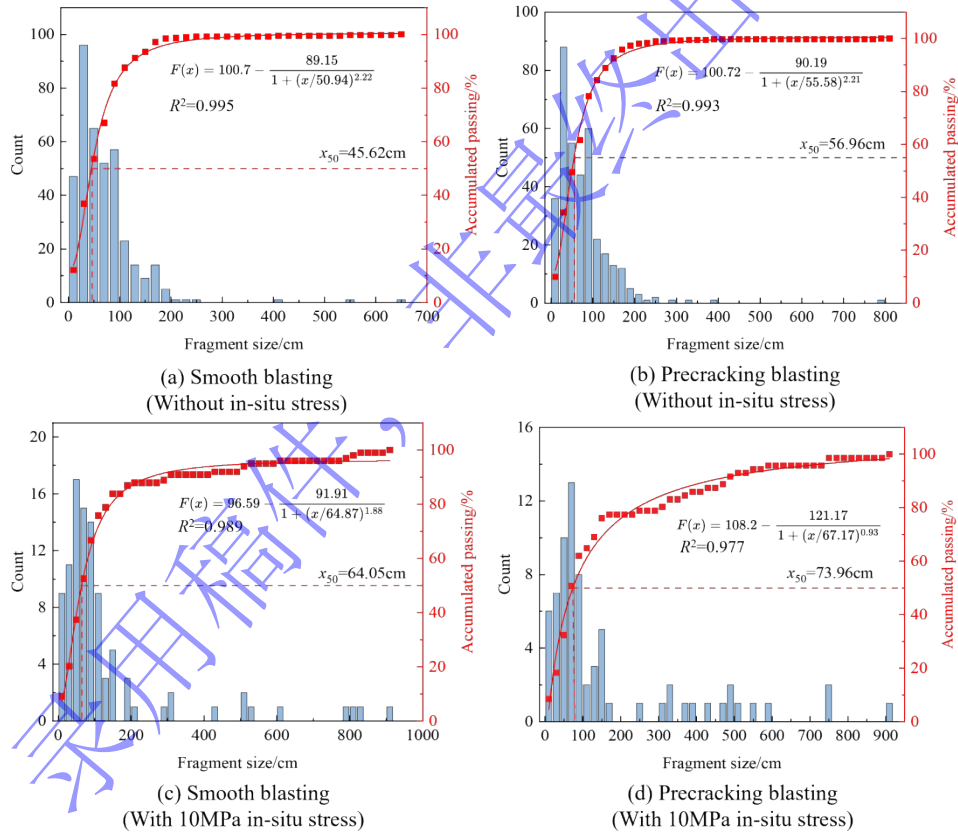


图 28 爆破块度分布情况

Fig.28 Fragment size distribution of blasted rock mass

5 数值结果的工程意义探讨

前述结果表明，低温和原位应力均会抑制饱水冻结砂岩爆破损伤发展，且二者对爆破损伤的影响具有交互作用。实际冻结立井施工中，待开挖岩体的温度场和应力场都不均匀，其主控作用将随井筒深度变化而改变。埋深较小时，原位应力水平较低，此时，靠近井帮区域温度较低、冻结岩体强度较

高,而待开挖岩体中心区域温度较高,岩体强度相对较弱,温度对爆破损伤致裂的影响较为突出。随着埋深增大,原位应力水平升高,高应力对爆破损伤和裂纹扩展的抑制作用增强,温度梯度变化的影响相对减弱。此时,爆破破岩难易程度主要受应力分布控制。

对于爆破设计优化,从起爆方式看,预裂爆破可一定程度上阻挡主爆区爆炸应力波向冻结壁传播,有利于减小轮廓外损伤,但也会降低主爆区破碎效果。尤其在高原位应力条件下,预裂缝不易充分贯通进而导致屏蔽效果下降,且主爆区破碎不足更加明显。因此,深部冻结立井爆破施工宜优先采用光面爆破模式。中心掏槽区可布置大直径空孔,为破碎岩石提供补偿空间,以形成有效槽腔。由于辅助孔、周边孔区域岩石强度和应力水平相对较强,宜采取提高辅助孔和周边孔的轴向装药系数、减小周边孔不耦合系数、减小辅助孔孔间距和排间距等措施增强孔间裂纹贯通能力。必要时,可采用聚能管或切缝装药控制能量释放方向,提高裂纹定向贯通效果。针对上部岩体能量不足、易欠挖和产生大块的问题,可采用顶部空气间隔装药或孔内分段装药,以提高上部岩体破碎效果。值得注意的是,上述措施的实施均应以冻结壁损伤不超过允许范围的前提下尽可能的保证爆破破碎效果为目标。

6 结论

本文结合理论分析和数值模拟,研究了原位应力下饱水冻结砂岩的爆破损伤致裂特征,揭示了原位应力和温度对爆破动静态应力场、损伤演化、裂纹扩展的影响规律及深部冻结立井爆破开挖损伤破碎行为。主要结论如下:

(1) 温度变化对环向动应力影响较大,对径向动应力影响较小,随着温度降低,炮孔近区环向拉应力峰值升高、环向压应力峰值降低,但远区环向拉应力减弱,不利于裂隙扩展。静水原位应力下,孔周静应力场呈各向同性。非静水原位应力下,孔周应力场表现出各向异性。

(2) 静水原位应力使爆破损伤区域整体收缩,单向原位应力使损伤分布呈明显方向性。随着原位应力增大或温度降低,损伤体积增长速率降低,损伤演化过程放缓。温度和原位应力对爆破损伤影响存在交互作用,高原位应力下温度变化对损伤的影响减弱,低温条件下原位应力的抑制作用也有所降低。

(3) 无原位应力时,自由面裂纹呈较均匀的放射状扩展。静水原位应力下,裂纹整体扩展范围减小,主裂纹权重比例下降。单向原位应力下,裂纹主要沿最大主应力方向扩展,最小主应力方向裂纹发育受到抑制。温度降低后,裂纹扩展范围缩小,原位应力引起的裂纹定向扩展特征减弱。

(4) 原位应力会抑制深部冻结立井爆破能量输入,降低待开挖岩体爆破破碎效果。光面爆破对主爆区岩体的破碎效果优于预裂爆破。预裂爆破可一定程度上减小冻结壁损伤,但在高原位应力条件下预裂缝不易充分贯通,应力波屏蔽效果下降,主爆区破碎不足更明显。深部冻结立井爆破设计应兼顾开挖区破碎效果和冻结壁安全。

参考文献

- [1] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0585.
XIE H P, WU L X, ZHENG D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0585.
- [2] 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 11-16.
WANG S M. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China[J]. China Coal, 2020, 46(2): 11-16.
- [3] 刘波, 刘念, 李东阳, 等. 鄂尔多斯深部富水砂岩冻结强度的试验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(1): 25-32. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2017.01.004.
LIU B, LIU N, LI D Y, et al. Frozen strength test on deep water-rich sandstone in Ordos[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(1): 25-32. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2017.01.004.

- [4] 杨维好, 黄书翔, 王衍森, 等. 中国立井冻结井壁技术的发展与展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 92-114. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1522.
YANG W H, HUANG S X, WANG Y S, et al. Development and prospect of freezing shaft lining technology for vertical mine shafts in China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 92-114. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2024.1522.
- [5] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 煤矿矿井建设技术与装备 70 余年创新发展及推广实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 65-83. DOI:10.12438/cst.2024-0122.
LIU Z Q, SONG C Y, CHENG S Y, et al. Seventy years innovation development and popularization practice of coal mine construction technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 65-83. DOI: 10.12438/cst.2024-0122.
- [6] 陈湘生, 王恒, 宋朝阳, 等. 冻结立井井筒机械化掘进现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 1-17. DOI: 10.12438/cst.2024-0327.
CHEN X S, WANG H, SONG C Y, et al. Current situation and development trend of mechanized shaft driving in frozen shaft[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 1-17. DOI:10.12438/cst.2024-0327.
- [7] 宋勇军, 杨慧敏, 张磊涛, 等. 冻结红砂岩单轴损伤破坏 CT 实时试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 152-160. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2371.
SONG Y J, YANG H M, ZHANG L T, et al. CT real-time monitoring on uniaxial damage of frozen red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 152-160. DOI:10.16285/j.rsm.2018.2371.
- [8] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459-464.
YANG G S, XI J M, LI H J, et al. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459-464.
- [9] QU Y, YANG G S, XI J M, et al. Mechanical properties and energy-dissipation mechanism of frozen coarse-grained and medium-grained sandstones[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(6): 2018-2034. DOI: 10.1007/s11771-023-5344-2.
- [10] WU D, Zhou L, Nie F, et al. Experimental and numerical investigation on the failure behavior of far-field-crack-tunnel rock mass under dynamic loads[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106225. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106225.
- [11] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0258.
JIANG N, ZHANG S Y, YAO Y K, et al. Energy dissipation characteristics of fragmentation of frozen sandstone[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(5): 142-157. DOI:10.11883/bzycj-2023-0258.
- [12] 翁磊, 张皓量, 张勇, 等. 低温下饱水粉砂岩的动态力学特性及本构模型研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(6): 1096-1107, 1134. DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.010.
WENG L, ZHANG H L, ZHANG Y, et al. Dynamic mechanical properties and the constitutive models of the water-saturated siltstones under frozen conditions[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(6): 1096-1107, 1134. DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.010.
- [13] 王建国, 雷振, 杨阳, 等. 饱水冻结花岗岩动态力学性状的应变率效应[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1292-1297.
WANG J G, LEI Z, YANG Y, et al. Strain rate effect of dynamic mechanical characteristics of saturated freezing granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1292-1297.
- [14] FAN Y, WU J G, YANG G D, et al. Influence of in-situ stress on granite fractures by blasting: insight from circular tunnel experiment and simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2026, 59(1): 703-731. DOI:10.1007/s00603-025-04869-y.

- [15] LIU Z, YANG R S, ZUO J J, et al. Mechanism of explosive crack propagation under the coupling of high crustal stress field and explosion stress field[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2026, 208: 105549. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105549.
- [16] 杨帅, 刘泽功, 张健玉, 等. 爆炸荷载作用下深部煤体损伤特征试验研究[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(19): 276-286. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.19.031
YANG S, LIU Z G, ZHANG J Y, et al. Test study on damage features of deep coal body under explosive load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(19): 276-286. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.19.031
- [17] 陈鹏辉, 蓝秋华, 祁芳霞, 等. 有/无地应力条件下大断面隧道爆破数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(27): 11533-11541. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2500054.
CHEN P H, LAN Q H, QI F X, et al. Numerical simulation of blasting in large-section tunnels with or without ground stress conditions[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(27): 11533-11541. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2500054.
- [18] 马泗洲, 蒋海明, 周朝兰, 等. 围压与爆破耦合作用下节理岩体裂纹的扩展行为与影响因素[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(6): 6-23. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0424.
MA S Z, JIANG H M, ZHOU C L, et al. Investigation on cracking behavior and influencing factors of jointed rock masses under the coupling effect of confining pressure and blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(6): 6-23. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0424.
- [19] 黄永辉, 占宇飞, 张洪波, 等. 极高地应力条件下光面爆破围岩损伤规律研究[J]. *振动与冲击*, 2025, 44(6): 104-112. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.06.011.
HUANG Y H, ZHAN Y F, ZHANG H B, et al. Damage patterns of surrounding rock under high-stress conditions in smooth blasting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(6): 104-112. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.06.011.
- [20] MIKLOWITZ A J. The theory of elastic waves and waveguides[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1978.
- [21] HAO X J, FENG X T, YANG C X, et al. Analysis of EDZ development of columnar jointed rock mass in the Baihetan diversion tunnel[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(4): 1289-1312. DOI: 10.1007/s00603-015-0829-4.
- [22] PERSSON P A, HOLMBERG R, LEE J. Rock blasting and explosives engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993. DOI: 10.1201/9780203740514.
- [23] JACQUOT R G, STEADMAN J W, RHODINE C N. The Gaver-Stehfest algorithm for approximate inversion of Laplace transforms[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 1983, 5(1): 4-8. DOI: 10.1109/MCAS.1983.6323897.
- [24] 奚家米. 深厚富水软岩井筒冻结壁力学特性及应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
XI J M. Mechanical properties and its application of thick frozen shaft wall with water-abundant soft rock[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [25] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[J]. *Geophysics*, 1958, 23(3): 459-493. DOI: 10.1190/1.1438493.
- [26] 魏尧. 西部白垩系饱和冻结砂岩蠕变损伤力学特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
WEI Y. Study on creep damage mechanical properties of Cretaceous saturated frozen sandstone in western China[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [27] 刘志洲, 李万涛, 田益琳, 等. 冻结砂岩未冻水/冰含量演化规律和损伤机理研究[J]. *冰川冻土*, 2025, 47(6): 1690-1699. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2025.0133.
LIU Z Z, LI W T, TIAN Y L, et al. Study on evolution patterns of unfrozen water/ice content and damage mechanisms in frozen sandstone[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2025, 47(6): 1690-1699. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2025.0133.
- [28] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. 3rd ed. Dordrecht: Springer Dordrecht, 2004.

DOI:10.1007/978-1-4020-2116-9.

- [29] 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, 2016.
LI H C. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.
- [30] 桂玮, 宗琦, 汪海波, 等. 基于 RHT 模型的立井掏槽爆破空孔布置方式对破岩效果影响[J]. 工程爆破, 2025, 31(6): 47-58. DOI:10.19931/j.EB.20240309.
GUI W, ZONG Q, WANG H B, et al. Research on influence of vertical shaft grooving and blasting hole arrangement on rock breaking effect based on RHT model[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(6): 47-58. DOI:10.19931/j.EB.20240309.
- [31] Zhou Z, Wang Z, Cheng R, et al. Experimental and numerical study on blast-induced rock damage and fragmentation under low temperatures[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109497. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109497.
- [32] 谢守冬. 高原寒区冻结岩石动态力学响应及爆破破碎特性[D]. 安徽理工大学, 2024. DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000005.
XIE S D. Study on dynamic mechanical response and blasting rock blasting crushing characteristics in plateau cold region[D]. Anhui University of Science and Technology, 2024. DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000005.
- [33] YANG J C, LIU K W, LI X D, et al. Stress initialization methods for dynamic numerical simulation of rock mass with high in-situ stress[J]. Journal of Central South University, 2020, 27: 3149-3162. DOI: 10.1007/s11771-020-4535-3.
- [34] WANG H C, WANG Z L, WANG J G, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103961. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2021.103961.
- [35] 刘伟. 高效消焰剂型安全高威力水胶炸药爆炸性能及破岩机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
LIU W. Explosion performance and rock breaking mechanism of safe and high-power water gel explosive containing high effective flame inhibitors[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [36] ZHOU Z L, WANG P Y, CHENG R S, et al. Blast-induced damage and fracture of rock mass in cutting blasting with a large empty hole under high in-situ stress[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 166: 106942. DOI:10.1016/j.tust.2025.106942.
- [37] HEALY D, RIZZO R E, CORNWELL D G, et al. FracPaQ: a MATLAB toolbox for the quantification of fracture patterns[J]. Journal of Structural Geology, 2017, 95: 1-16. DOI:10.1016/j.jsg.2016.12.003.
- [38] 傅师贵, 刘泽功, 张健玉, 等. 高地应力下岩体控制爆破机理与损伤演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 867-878. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2023.0268.
FU S G, LIU Z G, ZHANG J Y, et al. Study on mechanism of controlled blasting and damage evolution of rock mass under high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4): 867-878. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2023.0268.
- [39] XU X, CHI L Y, ZHANG Z X, et al. Insight into rock fragmentation and damage affected by temporal characteristics of blast loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58: 5405-5427. DOI:10.1007/s00603-025-04389-9.