

冲击荷载作用下贯通冰节理岩体的应力波衰减规律

王磊¹、李文峰¹、邱培勇¹、贾海宾²、张慧梅²、陈世官¹

(1.西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

2.山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274300;

3.西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 西部矿井建设中, 井筒穿越含水裂隙岩体会采用冻结法施工进而会形成冰-岩组合体, 而施工期间的爆破冲击波会对这类岩体造成损伤, 对工程安全构成威胁。本文利用分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 试验装置, 系统分析了应力波在冻结岩石裂隙结构面内的传播与衰减规律, 主要结论如下: (1) 当冲击气压达到试件破坏阈值时, 0° 与 15° 试件的反射系数 (R) 值随冲击气压的增大先减小后增大, 而透射系数 (T) 值先上升后下降, 30° 与 45° 试件的 R 与 T 值均随冲击气压的增大而递减。(2) 当透射波强度大于冰的动态抗压强度但小于岩石的动态抗压强度时, 冰岩组合体的破坏模式随结构面角度与加载应变率的变化呈现压缩破坏、剪切破坏和压剪复合破坏三种形式。(3) 结构面产生的整体弱化效应显著强于应变率带来的强化作用, 当结构面倾角为 45° 时, R 值的下降趋势逐渐减缓, T 值的降幅依然显著, 即大倾角结构面对应力波反射能力的敏感性较低, 而对透射作用的敏感性则较高。研究可为寒区工程及立井施工下裂隙岩体抗扰动作用提供理论参考。

关键词: 冻结立井; SHPB; 应力波传播; 冲击荷载

中图分类号: TD 353 **文献标识码:** A

Stress Wave Attenuation Law of Penetrating Ice Jointed Rock Mass under Impact Load

WANG Lei¹, LI Wen Feng¹, QIU Pei Yong¹, JIA Hai Bin², ZHANG Hui Mei², CHEN Shi Guan¹

(1. XI'AN University of Science and Technology, XI'AN 710054; 2. Shandong Xinjulong Energy Co., Ltd., HE'ZE, Shandong, China 274300; 3. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, XI'AN 710054)

Abstract: During western mine construction, the freezing method is adopted for shaft construction when crossing water-bearing fractured rock masses, resulting in the formation of ice-rock composites. Blasting shock waves generated during construction cause damage to such rock masses and pose threats to engineering safety. Using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test device, the propagation and attenuation laws of stress waves in the fracture structural planes of frozen rocks were systematically analyzed. The main conclusions are as follows: (1) When the impact air pressure reaches the failure threshold of specimens, for specimens with structural plane angles of 0° and 15° , the reflection coefficient (R) first decreases and then increases with the rise of impact air pressure, while the transmission coefficient (T) first rises and then decreases. For specimens with angles of 30° and 45° , both R and T values decrease continuously with the increase of impact air pressure. (2) When the transmission wave intensity is higher than the dynamic compressive strength of ice but lower than that of rock, the failure modes of ice-rock composites present three forms with the variation of structural plane angle and loading strain rate:

compression failure, shear failure and compression-shear composite failure. (3) The overall weakening effect induced by structural planes is significantly stronger than the strengthening effect caused by strain rate. When the structural plane dip angle is 45° , the downward trend of R value gradually slows down, while the decrease amplitude of T value remains significant. That is, structural planes with large dip angles have low sensitivity to the stress wave reflection capacity, but high sensitivity to the transmission effect. The research provides theoretical reference for the anti-disturbance performance of fractured rock masses in cold region engineering and shaft construction scenarios.

Keywords: Frozen Shaft; SHPB; Stress Wave Propagation; Impact Load

内蒙、陕西、宁夏、甘肃、新疆等煤炭储量丰富地区，在矿井建设中多次因冻结法施工中冻结壁失稳而引起渗水等事故，造成严重的经济损失。西部矿区主要为发育侏罗纪煤层，其井筒需要穿过位于浅表土层之下的厚层白垩系含水砂岩。因其独特的成岩环境和地质构造运动作用，导致西部矿区岩体呈现强度低、胶结差以及不连续节理裂隙发育等特性，如图 1 所示，冻结作用下易形成含冰裂隙岩体复合结构。

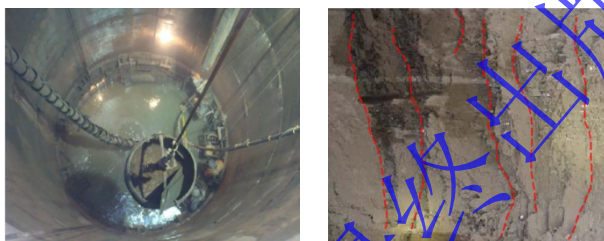


图 1 冻结凿井围岩节理发育

Fig 1 Joints in frozen borehole surrounding rock

在人工冻结条件下，这类含水裂隙演化为裂隙冰，结冰过程中引起冻胀损伤^[1]。由于冰和冻结砂岩不同的动力学特征，在爆破引起的冲击荷载作用下，裂隙冰的破碎将引起裂隙水贯通导致冻结壁出水，进而影响冻结壁强度骤降，引发坍塌事故。因此，揭示节理裂隙冰结构在应力波作用下的破坏特征是研究冻结凿井安全控制的关键。在爆破掘进过程中，含节理裂隙的夹冰岩体一方面会出现冰体的压缩破坏与反射拉伸脱粘现象，另一方面还会导致结构面产生损伤破坏。有关上述内容，汪洋^[2]、张永康^[3]研究了冰在冲击作用下的应变率效应，并分析了不同应变率、冻结温度对破坏模式和动态强度的影响；李尚昆^[4]、Wu^[5]、Zhang 等^{Error! Reference source not found.}分别借助 SHPB 系统研究了蒸馏水冰、河冰等不同杂质含量的冰动态力学性质的差异，表明杂质的含量显著提高了冰的强度；在冰微裂纹的萌生、扩展及成核等微观机制方面，邓宇等^{[6]-[8]}构建了含随机缺陷的界面弹簧元模型，用于模拟河冰的单轴压缩强度，在微观尺度下，探讨了初始缺陷含量及晶粒尺寸差异对河冰破坏模式与力学性能的影响；Song 等^[9]运用无网格 ALE 多材料数值方法，通过模拟霍普金森压杆试验研究了冰中气泡的数量和团聚对动态力学性能的影响。Zhou^[10]、李宏强^[11]、吕思清^[12]分别结合青藏地区川藏、青藏公路铁路工程建设中遇到的岩质边坡冻融灾害问题，系统研究了温度、倾角等对结构面破坏的影响。刘慧^{[13][14]}、申艳军^{[15]-[17]}等对裂隙岩石进行冻融循环，发现岩体损伤效应与裂隙充水反复冻胀作用关系密切。范新宇等^{[18][19]}通过室内冻融试验和现场爆破振动测试对寒区环境下边坡稳定性展开研究，引入冻融系数和爆破损伤因子分析冻融循环作用及爆破振动效应的影响。徐拴海等^{[20][21]}提出影响寒区边坡稳定性的冻融因子，总结归纳边坡稳定性影响因素及权重，运用模糊综合评判法分析了寒区边坡稳定性等级。李祥龙^[22]、高维延^[23]等利用 SHPB 试验系统以应变率为主线探究不同应变率下岩石的裂

收稿日期：2025-12-24； 修回日期：2026-04-21

基金项目：国家自然科学基金项目（12172280）

作者简介：王磊（1982—），男，博士，现任副教授，E-mail:w12013@xust.edu.cn

通讯作者：李文峰（1999—），男，硕士生，E-mail:18296454319@163.com

纹起裂、扩展与破坏演化规律。牛雷雷等^[23]探讨了 SHPB 试验中黏弹性波的传播及波阻抗匹配问题，得到了岩石杆件-充填体的波阻抗匹配系数与透反射衰减系数的关系。廖铭顺等^[23]利用 LS-DYNA 软件建立数值模型，分析了应力波在含裂隙岩杆中的传播特性，得出裂隙几何参数之间的交互作用是决定应力波衰减的主导因素。李继业等^[23]分析了不同节理条件下爆破振动的强度与衰减率的变化情况，表明爆破振速衰减随着节理倾角的增大而减小且变化幅度显著。

现有研究从多维度对冰的抗压、抗拉及动力学特征进行了分析，且针对含裂隙冰岩结构的力学行为展开了探讨，但对岩石含冰充填体在冲击荷载作用下应力波传递与衰减规律研究不够充分，而冰的胶结强度显著高于泥质胶结的软弱夹层，冰岩结构面的力学行为主要由冰体主导，因而探究应力波对冻结法施工中冰岩组合体的影响具有重要价值。因此，本文从应力波产生的冰岩节理面剪切效应入手，探究冰岩的界面力学特性和应力波在冰岩结构面的传递与衰减规律。

1 试验方案

1.1 试件尺寸与贯通冰节理倾角设计

为最大限度降低端面摩擦与惯性效应对 SHPB 试验结果的负面影响，试样的长径比合理取值范围为 0.4~0.6。然而，为深入分析不同角度结构面试件的裂纹扩展特性，参照岩石试样的长径比效应研究^[23]，将长径比设定为 1.0 至 1.2。将岩石设计为 $\Phi 46 \times 50\text{mm}$ ，按 4 种设计角度 (0° 、 15° 、 30° 、 45°) 将试件精确切割成两部分。所有结构面均沿试件径向贯穿且通过冰层 (5mm) 将两部分试件在低温环境下粘合为完整试样，如图 2 所示。

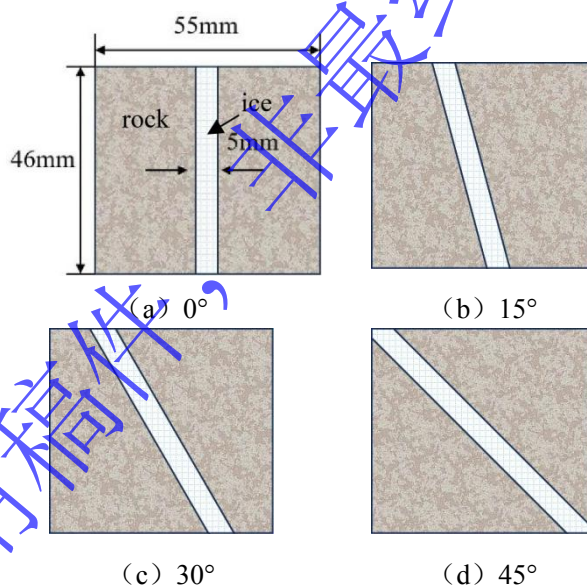


图 2 不同角度示意图

Fig 2 Schematic diagram of different angles

1.2 相似材料设计

由于天然岩石的节理特征难以精准控制，且试件制备过程中易造成损伤，因此以水泥砂浆^[28]代替冰岩结构体中的岩石，进行相似材料模拟。选用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，按照水泥：砂：水=1：4.26：0.79 的配合比配制水泥砂浆，充分搅拌后注入模具，轻敲模具壁以去除内部气泡，待试件凝固后拆模，并于标准养护环境中养护 28 天，如图 3 所示。



图3 试件养护与制备过程

Fig 3 Specimen curing and preparation process

1.3 试验方案与设备

考虑西部厚基岩立井施工多运用双圈冻结法，依据现场实测冻结盐水温度参数，对-10℃与-20℃两种温度环境中的含冰岩结构面冻结岩石分别进行 0.06、0.08、0.10 和 0.12MPa 四种冲击气压的动态压缩试验，探究冲击荷载下冰岩组合体的应力波传递衰减规律。所用试验设备为 $\Phi 50\text{mm}$ 的 SHPB 试验系统，如图 4 所示，主要参数如表 1 所示，运用“三波法”计算得出试件的应力、应变以及应变率：

$$\sigma_s = \frac{A_0 E_0}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_t(t) = \frac{C_0}{L} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (1.2)$$

$$\dot{\varepsilon}_t(t) = \frac{C_0}{L} \int_0^t [\dot{\varepsilon}_i(t) + \dot{\varepsilon}_r(t) - \dot{\varepsilon}_t(t)] dt \quad (1.3)$$

式中： A_0 、 E_0 、 C_0 分别是杆件的横截面积、弹性模量与波速； A_s 、 L 为试件的横截面积和长度； ε_i 、 ε_r 、 ε_t 依次为入射、反射与透射应变。

表 1 SHPB 基本参数

Table 1 SHPB Basic Parameters

弹性模量/GPa	纵波波速/m·s ⁻¹	端面直径/mm	子弹长度/mm	入射杆长度/mm	透射杆长度/mm
210	5450	50	300	3100	2500

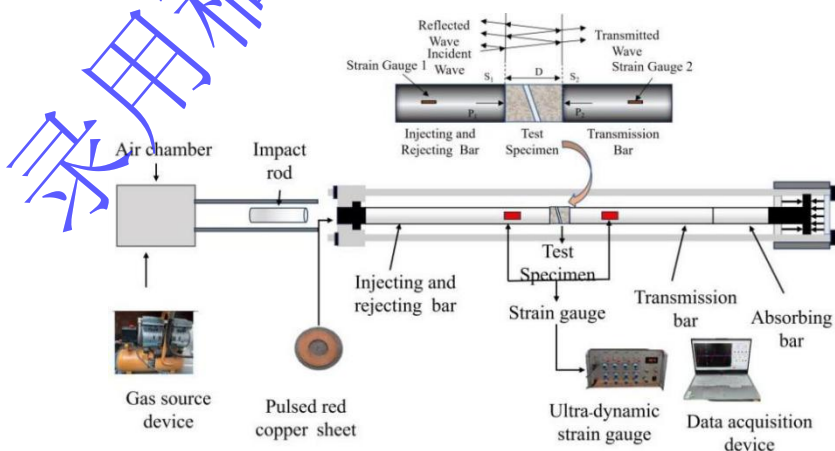


图 4 SHPB 试验系统

Fig 4 SHPB test system

2 冰岩节理面应力波剪切效应解析

2.1 应力波在岩-冰界面处传递

在含冰岩结构面的冻结岩体中，应力波传播路径含“岩-冰”（I界面）与“冰-岩”（II界面）两个界面。应力波在I、II界面发生透射与反射现象，其传递过程具体分为三个阶段：由岩石至冰层、冰层内部的传播以及从冰层至岩石。

应力波在冰岩结构面中的传播受两侧岩体与中间夹层力学特性的影响，若这两部分确定，当应力波至I界面时，鉴于两侧波阻抗的不同，入射波会在此处发生透、反射现象，如图5所示。其中， σ_I 为入射波， σ_R 为反射波， σ_T 为透射波， θ 为入射角， β 为反射角，且 $\theta=\beta$ ， α 为透射角。

其入射角、反射角以及透射角的确定方法为：I界面由岩石侧入射波（P波）的传播方向与岩-冰界面法线的夹角，记为 θ 。II界面透射波进入冰介质后，传播到冰-岩界面时，该透射波的传播方向与冰-岩界面法线的夹角，而岩-冰、冰-岩界面为平行的冰夹层结构则无需额外计算。而反射角为同波型反射：遵循反射定律，即入射纵波产生的反射纵波，其反射角等于入射角。透射角则遵循式（2.4）。

由波阵面动量守恒条件^[29]可知 σ_I 在界面I处发生透反射行为后， σ_R 和 σ_T 可由式（2.1）确定。

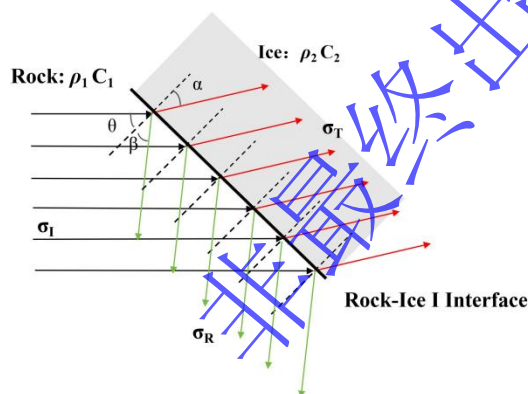


图5 应力波由岩石传递至冰层

Fig.5 Stress wave propagating from rock to ice

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \sigma_I \cos(\beta + \theta) \\ \sigma_T &= \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \sigma_I \cos(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

应力波持续传播， σ_I 在经I界面透射进入冰层之后，进而传播至界面II，详见图6。

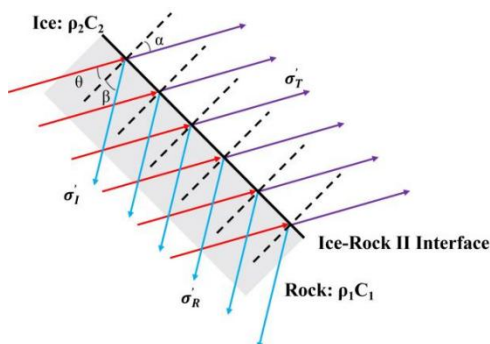


图6 应力波由冰层传递至岩石

Fig.6 Stress wave transmitted from ice to rock

同理，依据波阵面守恒条件，确定由冰层传递至岩石的过程中 σ'_R 和 σ'_T 可由式 (2.2) 求解得到：

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_R &= \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \sigma_I \cos(\beta + \theta) \\ \sigma'_T &= \frac{2\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \sigma_I \cos(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

式中： σ'_R 、 σ'_T 分别为界面 II 处应力波由冰到岩石的反射波与透射波。

鉴于岩石波阻抗大于冰 ($\rho_1 C_1 > \rho_2 C_2$)，界面 I、II 处的透射应力波 σ_T 和 σ'_T 总为正值，而反射应力波 σ_R 和 σ'_R 的正负取决于两侧波阻抗的相对大小，分为以下三种情况：

①界面 I 处，因 $\rho_1 C_1 > \rho_2 C_2$ ，则 $\sigma_R < 0$ ，可认为应力波从岩石传播至冰层时，反射与入射应力波异号。而当 $\rho_2 C_2 \rightarrow 0$ 时，可视为应力波在自由端面发生透反射现象。

②界面 II 处，因 $\rho_1 C_1 > \rho_2 C_2$ ，则 $\sigma'_R > 0$ ，可理解为应力波由冰层传递至岩石时，反射和入射应力波同号。而当 $\rho_2 C_2 \rightarrow \infty$ 时，可视为应力波在刚性端发生透反射行为。

③分析极限情况，当 $\rho_1 C_1 = \rho_2 C_2$ ，则应力波在通过界面时，不产生透反射现象。

2.2 透射波作用下冰体内压剪荷载

当应力波的强度未达到冰岩复合结构整体破坏的阈值时，应力波将在节理面内经历多次反射与透射过程。然而，由于冰的力学强度显著低于岩石（或砂浆结构），应力波在传播至入射段界面时，往往会因冰层的低强度特性而在界面处产生瞬时的局部破坏效应。为便于分析，将界面 I 处的透射波分解为两个分量：一是沿节理面方向传播的剪切波，二是垂直于节理面方向传播的压缩波，如图 7 所示。

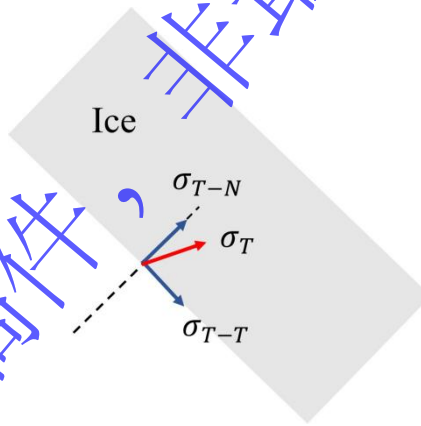


图7 透射波在冰层内的分解

Fig.7 Decomposition of transmitted waves in the ice layer

根据图 7 和式 (2.1)，由力的分解可得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{T-N} &= \sigma_T \cos \alpha = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \sigma_I \cos(\theta - \alpha) \cos \alpha \\ \sigma_{T-T} &= \sigma_T \sin \alpha = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \sigma_I \cos(\theta - \alpha) \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

根据波的透反射定律，入射角、透射角满足：

$$\frac{\sin \theta}{C_1} = \frac{\sin \alpha}{C_2} \quad (2.4)$$

根据式 (2.3) 与 (2.4) 可求得冰-岩界面 II 处产生的应力在界面处的法向分量和切向分量, 为分析应力波在冰-岩结构面内的传播与衰减规律提供了理论依据, 揭示了冰-岩界面在动载下的力学特性。

2.3 应力波压剪力学效应分析

冰层的存在必然会减弱弹性应力波的传播, 致使 σ_R 与 σ_T 均存在不同的衰减量, 在冰层内的衰减过程如图 8 所示。基于应力波在冰岩结构面内部的衰减特性, 以应力形式表征应力波, 并结合透反射波的变化规律, 量化其在结构面内的传播及衰减过程。

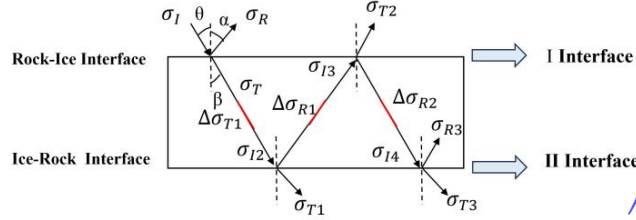


图 8 应力波在冰岩结构面内的衰减过程

Fig.8 Attenuation process of stress wave in ice-rock structure

当 σ_T 在冰层中传递至界面 II 时, 其携带的能量不可避免的产生耗散, 此时, σ_T 为 $\sigma_T + \Delta\sigma_1$, 其中 $\Delta\sigma_1$ 为首次透过冰层的衰减量。而 $\sigma_T + \Delta\sigma_1$ 在界面 II 处首次产生透反射现象, 其反射波 σ_{R1} 与透射波 σ_{T1} 计算得:

$$\sigma_{R1} = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} (\Delta\sigma_{T1} + \sigma_T) \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) \quad (2.5)$$

$$\sigma_{T1} = \frac{2\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} (\Delta\sigma_1 + \sigma_T) \cos(\alpha_{T1} - \alpha_T) \quad (2.6)$$

式中: β_{R1} 、 α_{T1} 为界面 II 首次产生透反射现象时的反射角与透射角。

σ_{R1} 于冰层内部反向传播至界面 I 时的衰减值为 $\sigma_{R1} + \Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_2$ 为应力波第二次穿越冰层后的衰减量, 其在界面 I 处透反射后的反射与透射应力波为:

$$\sigma_{R2} = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \right)^2 \cos(\beta_{R1} + \beta_{R2}) [\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_1 \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) + \sigma_T \cos(\beta_{R1} + \alpha_T)] \quad (2.7)$$

$$\sigma_{T2} = \frac{2\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \right) \cos(\alpha_{T2} - \beta_{R1}) [\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_1 \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) + \sigma_T \cos(\beta_{R1} + \alpha_T)] \quad (2.8)$$

同理, 应力波在冰层内完成第三次透反射行为后反射应力波 σ_{R3} 与透射应力波 σ_{T3} 为:

$$\sigma_{R3} = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \right)^3 \cos(\beta_{R2} + \beta_{R3}) \quad (2.9)$$

$$[\Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_2 \cos(\beta_{R1} + \beta_{R2}) + \Delta\sigma_1 \cos(\beta_{R1} + \beta_{R2}) \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) + \sigma_T \cos(\beta_{R1} + \beta_{R2}) \cos(\beta_{R1} + \alpha_T)]$$

$$\sigma_{T3} = \frac{2\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \right)^2 \cos(\alpha_{T3} - \beta_{R2}) \quad (2.10)$$

$$\left[\begin{array}{l} \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_2 \cos(\alpha_{T2} - \beta_{R1}) + \Delta\sigma_1 \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) \\ + \sigma_T \cos(\beta_{R1} + \alpha_T) \end{array} \right] \cos(\alpha_{T2} - \beta_{R1})$$

在界面 I 处，应力波由岩石传播至冰层时，依据波阻抗差异发生透射与反射。透射波强度 σ_T 可由式 (2.1) 计算得出，其大小决定了冰层是否发生破坏。若 σ_T 超过冰的动态抗压强度，则冰层在透射波作用下发生压坏或剪坏；反之，则冰层保持完整，应力波将继续在冰层内传播并经历多次透反射。此外，透射波在冰层内可分解为法向压应力 σ_{T-N} 与切向应力 σ_{T-T} ，如式 (2.3)；根据冰的动态抗压与抗剪强度，可进一步判断冰层的破坏模式（压缩破坏、剪切破坏或压剪复合破坏）。

3 应力波传递与衰减因素分析

应力波在类岩石内部衰减过程遵循 $\sigma \propto 1/r^\nu$ [30]，其中 r 为应力等于 σ 的某点与爆破或振动源之间的间隔长度， ν 为衰减指数，将应力波在结构面内部的衰减程度以应力形式量化表征，在单次透反射过程中，选其幅值以计算应力波的透反射系数。

3.1 冲击作用下应力波波动特性试验分析

应力波在冰岩结构面发生透反射行为时，其幅值会出现变化。同时，应力波波形的演化规律因实验条件的不同而表现出差异，如图 9 所示。

由图 9 可知，随着应变率升高，应力波峰值显著增大，表明材料存在显著的应变率强化效应；不同温度与结构面角度的岩样中，入射、反射及透射波的幅值均呈上升趋势，应力波自起始位置至下降区域所围面积呈逐渐增大趋势；透射波从起始到峰值的时间缩短，上升速率增大。部分反射波出现两个相近的峰值，是由于应力波穿过冰岩界面时，在引起应力波衰减的同时会发生部分反射，反射波可能与后续入射波在界面处产生叠加现象，从而形成二次峰值。随着结构面倾角的增大，透射波幅值显著增大，在结构面刚度与抗压缩性能的共同作用下，试件的透反射性能得到大幅提升。

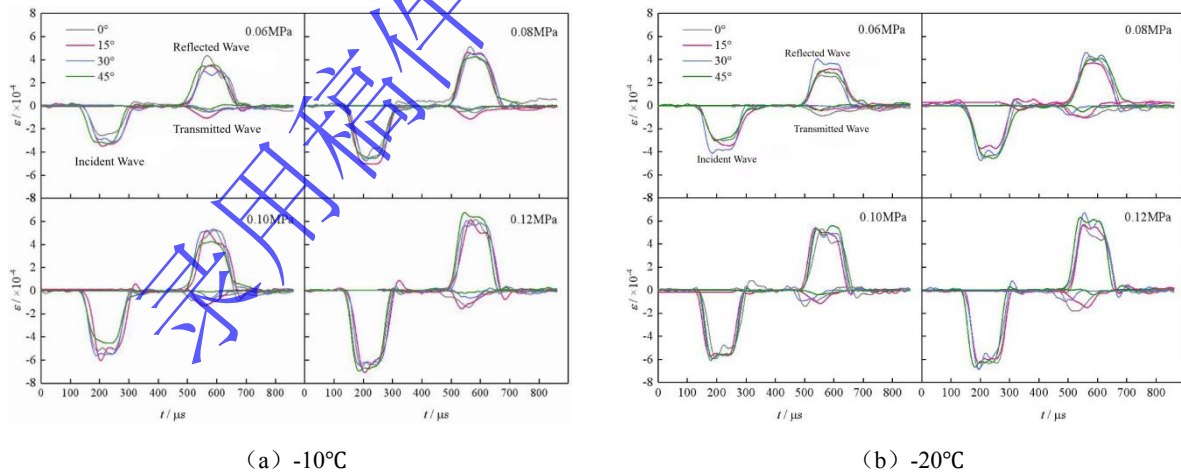


图 9 不同加载应变率下应力波应变时程曲线

Fig.9 Time history of stress wave strain under different loading strain rates

3.2 应变率对应力波传递与衰减影响分析

应力波以微小振动形式释放能量，基于动量守恒原理，沿波面 dA 的波在 dt 时间内的扰动范围为：

$$M_0 = \rho \cdot dA \cdot C_i \cdot dt \quad (3.1)$$

式中： ρ 为介质密度， C_i 为在基质内传播的波速。

介质以速度 V_I 振动时的动量为：

$$M_0 V_I = \rho \cdot dA \cdot C_i \cdot V_I \cdot dt \quad (3.2)$$

将冲量定义为 $F(t) \cdot dt = \sigma_I \cdot dA \cdot dt$ ，此时应力与波速之间的关系如式 (3.3) 所示，

$$\sigma_I = \rho \cdot C_i \cdot V_I \quad (3.3)$$

由位移不连续理论^[31]可知，为定量表征应力波传播过程中，分别求取反射波和透射波的应力峰值与入射波峰值的比值，如式 (3.1)：

$$R = \frac{|\sigma_{R,\max}|}{|\sigma_{I,\max}|}, \quad T = \frac{|\sigma_{T,\max}|}{|\sigma_{I,\max}|} \quad (3.4)$$

式中： R 为反射应力系数， T 为透射应力系数。

依据式 (3.4) 绘制出不同温度条件下的 R 值与 T 值随应变率的变化曲线，如图 10 所示。

由图 10 可知，同一应变率下，45°试件的反射及透射系数均为最小，0°试件则最大；不同倾角试件的 R 与 T 值变化趋势大致可分为两种。其中，0°与 15°试件在两种低温情况下， R 值均随应变率的增加先下降后上升，而 T 值则呈现先上升后下降的变化趋势。其原因是，当倾角较小时，结构面受到进一步压缩，致使其闭合度与刚度提升，从而造成 R 值降低而 T 值提高。

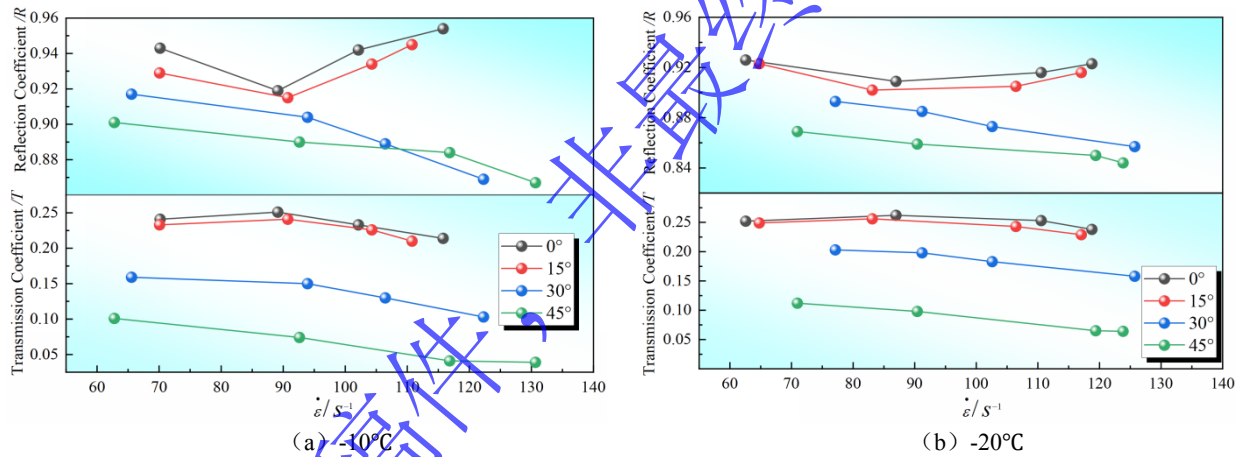


图 10 透反射系数随应变率的变化情况

Fig 10 Variation of transmittance and reflectance coefficients with strain rate

对于 30°与 45°试件其 R 与 T 值均随应变率的增加而减小，其中，当温度为 -10°C 时，应变率由 64.75s⁻¹ 增大到 121.62s⁻¹ 时，30°岩样 R 值与 T 值下降速率均逐渐增加，与前次相比，变化幅度依次为 -0.89%、-1.35%、-1.80% 及 -2.44%、-7.58%、-13.65%；而 45°试件的降幅则逐步趋于平稳，相较于前次，降幅依次为 -1.15%、-1.05%、-0.71% 及 -12.50%、-33.67%、-1.54%。这表明，当结构面倾角大于 30°时，试件的 R 值与 T 值均随应变率增加而持续下降，且 45°试件的衰减特征最为明显，其对应力波的衰减效应会呈现出不同的效果，而 45°试件由于内部冰晶体占比最高，且对应力波的反射特性表现得更为突出。

在相同倾角和加载应变率下，-20°C 试件的透射系数普遍高于 -10°C 试件，而反射系数则略有下降或保持相对稳定；对于大倾角试件（如 45°），透射系数随温度升高而下降的幅度更为显著，表现出对温度变化的高度敏感性。这一现象表明温度与结构面倾角之间存在明显的耦合效应，二者共同控制着应力波在冰岩组合体中的传播路径。此外，温度降低会使冰的弹性模量、纵波波速及波阻抗显著增大，冰层脆性增强，界面刚度随之提升。当应力波由岩石传入冰层时，波阻抗差异减小，因此反射系数降低而透射系数升高。

3.3 结构面对应力波传递与衰减影响分析

在岩石形成过程中，构造运动会使其不可避免地产生节理与裂隙，而结构面倾角是影响应力波传递及衰减特性的关键因素之一。为探究结构面对应力波传播及衰减的作用，图 11 为不同冲击气压下， R 值与 T 值随倾角变化的情况。

由下图 11 分析可得，在加载气压恒定的条件下，反射系数 R 与透射系数 T 均随结构面倾角的增大呈现降低趋势；不同应变率下，降幅存在显著差异，而温度变化时其变化规律则较为接近。以 -10°C 试件为研究对象，可进一步分析结构面倾角差异对应力波传播与衰减特性的影响机制。

当冲击气压为 0.06MPa ， 0° 试件的反射系数 R 与透射系数 T 依次为 0.943 和 0.240 ； 15° 试件与 0° 试件相比， R 值与 T 值的下降幅度依次为 -1.50% 和 -3.31% ； 30° 与 15° 试件相比， R 值下降幅度为 -1.29% 、 T 值降幅为 -36.48% ； 45° 试件于 30° 试件而言， R 值、 T 值降幅则为 -1.74% 和 -36.48% 。结果表明，低冲击气压下结构面的闭合效应较弱且刚度提升有限，但随着结构面倾角的增大，其对波传播的降幅呈现逐渐增大的趋势。

当冲击气压为 0.08MPa 时，随着结构面倾角从 0° 至 45° ， R 值降幅依次为 -0.44% 、 -1.20% 、 -1.55% ， T 值降幅依次为 -3.98% 、 -37.76% 、 -50.67% ；当冲击气压为 0.12MPa 时，倾角从 0° 增至 45° 时， R 值降幅依次为 -0.94% 、 -8.04% 、 -0.23% ， T 值降幅依次为 -1.87% 、 -50.95% 、 -62.14% 。无论加载应变如何变化，透反射系数的下降幅度始终为负值，这表明结构面产生的整体弱化效应显著强于应变率带来的强化作用。

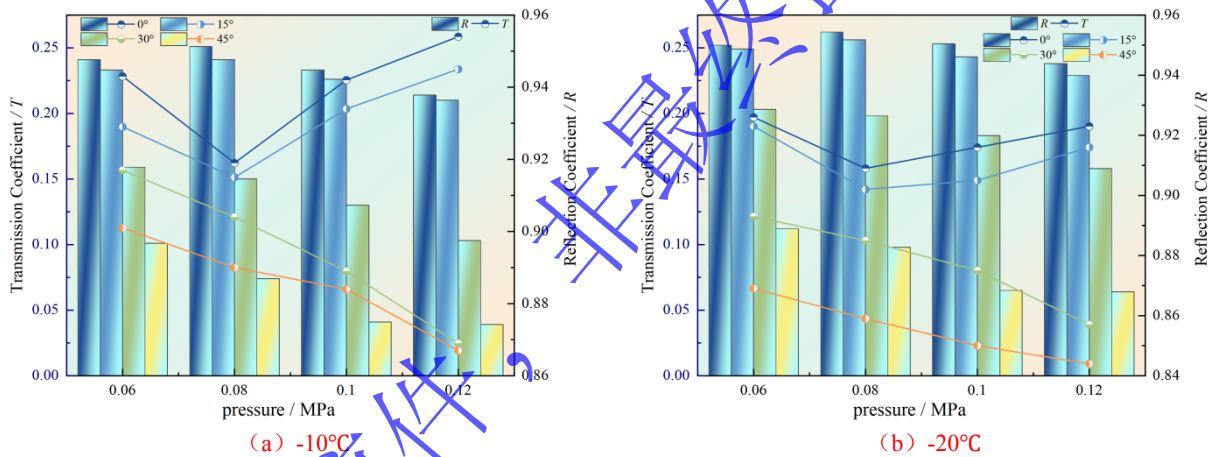
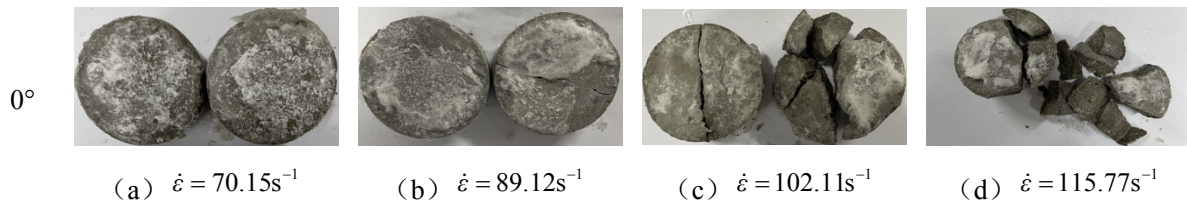


图 11 透反射系数随结构面倾角的变化情况

Fig.11 Variation of transmittance and reflectance coefficients with structural surface inclination

3.4 冲击作用下岩石破坏特征分析

由于冰的抗拉强度明显低于岩石的单轴抗压强度与抗拉强度^[32]，若入射应力波强度超过岩石的动态抗压强度，冰必然发生破坏，岩石也会出现部分破坏。考虑一般情况，即入射应力波幅值低于岩石的动态压缩强度，却高于冰的动态抗压强度，因入射角度的改变，试件的破坏形态也随之改变，最终破坏模式如图 12 所示。



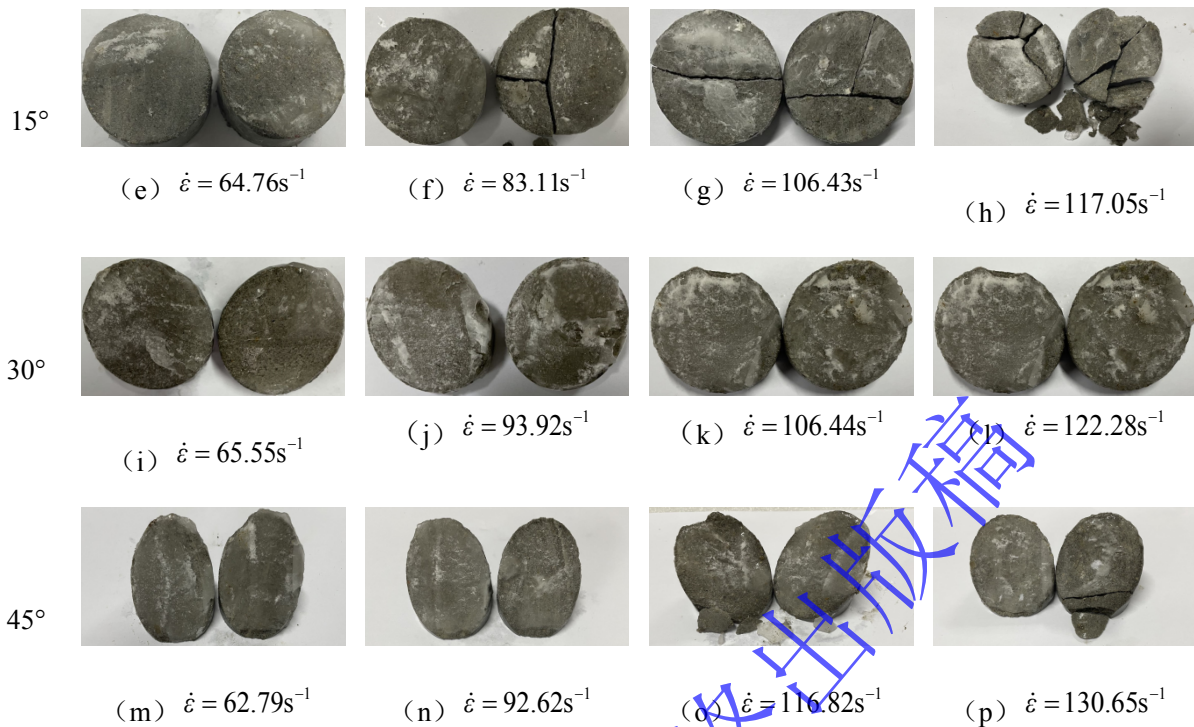


图 12 最终破坏形态

Fig.12 Final Failure Mode

(1) 0°试件在不同冲击应变率条件下具有显著的应变率效应：当应变率低于 $89.12s^{-1}$ 时，试件仅为冰晶体的受压破坏，且岩石两端保持较好的完整性（如图 a、b 所示）；当应变率继续增大时，透射杆端的岩石一侧出现张拉破坏现象，破碎程度显著增强，碎块尺寸相应缩小。

(2) 15°试件在梯度冲击条件下同样表现出显著的应变率效应。当 $\dot{\epsilon} \leq 64.76s^{-1}$ 时，试件两端未出现明显的破坏，仅沿冰层发生滑移错动；当 $\dot{\epsilon} \geq 83.11s^{-1}$ 时，冲击作用下，试件的破坏以结构面剪切破坏为主，且破碎程度随应变率升高而逐步加剧。

(3) 30°试件的破坏模式与 0°、15°试件不同。当 $\dot{\epsilon} \leq 93.92s^{-1}$ 时，试件仅沿结构面发生滑移破坏，这表明低应变率下试件破坏主要由冰层剪切引起。当 $\dot{\epsilon} \geq 106.44s^{-1}$ 时，试件仍以剪切破坏为主，同时透射杆端岩石产生贯通裂隙。

(4) 45°试件的破坏形式均为沿结构面的剪切滑移，岩石整体仍保持较好的完整性；当应变率较高时，仅岩石尖端区域出现局部崩坏。这表明应变率变化对试件破坏的影响程度相对有限，结构面的弱化作用才是导致其破坏的主导因素。

4 结论

通过 SHPB 试验模拟研究了冻结立井施工中裂隙岩石在爆破冲击荷载作用下的动态响应，并系统分析了爆破产生的应力波在冻结岩石裂隙结构面内的传播与衰减规律。主要结论如下：

(1) 当冲击气压较小时，结构面倾角较小的试件将会引起冰层的闭合以及整体刚度的增加，当冲击气压达到试件破坏阈值时，0°与 15°试件的反射系数 (R) 值随冲击气压的增大先减小后增大，而透射系数 (T) 值先上升后下降；30°与 45°试件的 R 与 T 值均随冲击气压的增加而递减。其中，试件的透射行为的率敏感性更强，冰岩结构面将显著影响应力波的透射行为。

(2) 在不同加载应变率条件中，透射系数 (T) 与反射系数 (R) 的降幅均呈现负值，结构面所引起整体的弱化效应显著强于应变率带来的强化作用。当结构面倾角达到特定角度时，其对应力波的衰减作用会表现出不同的效果，而 45°试件由于内部冰晶体占比最高，且对应力波的透反射特性表现得更为突出。

(3) 由于入射应力波幅值小于岩石的动态压缩强度但大于冰的动态抗压强度，且随结构面角度与加

载应变率的改变,冰岩组合体破坏模式呈现出压缩破坏、剪切破坏和压剪复合破坏三种不同形式,而在不同条件下二者的主导地位不同。其中,0°试件主要表现为压缩破坏,15°试件为压剪复合破坏,而30°与45°试件均以剪切破坏为主。

参考文献:

- [1] 贾海梁, 赵思琪, 丁顺, 等. 含水裂隙冻融过程中冻胀力演化及影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(09): 1832-1845. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1147.
JIA H L, ZHAO S Q, DING S, et al. Study on the Evolution of Frost Heave Force and Influencing Factors in Water-Cracked Fractures During Freeze-Thaw Cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(09): 1832-1845. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1147.
- [2] 汪洋, 李玉龙, 刘传雄. 利用 SHPB 测定高应变率下冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(02): 215-219.
WANG Y, LI Y L, LIU C X. Dynamic mechanical behavior of ice under high strain rate measured by SHPB [J]. Explosion and Shock, 2011, 31(02): 215-219.
- [3] 张永康, 李玉龙, 汤忠斌, 等. 冰在低温下的单轴压缩力学行为和破坏机制[J]. 固体力学学报, 2018, 39(05): 530-538. DOI: 10.19636/j.cnki.cjrm42-1250/o3.2018.026.
ZHANG Y K, LI Y L, TANG Z B, et al. Mechanical Behavior and Failure Mechanism of Ice under Low-Temperature Uniaxial Compression [J]. Journal of Solid Mechanics, 2018,39(05): 530-538. DOI: 10.19636/j.cnki.cjrm42-1250/o3.2018.026.
- [4] 李尚昆, 冯晓伟, 谢若泽, 等. 高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(09): 76-83. DOI:10.11883/bzycj-2018-0270.
LI S K, FENG X W, XIE R Z, et al. Dynamic mechanical behavior of pure water ice and impurity ice under high strain rate [J]. Explosion and Shock, 2019, 39(09): 76-83. DOI:10.11883/bzycj-2018-0270.
- [5] Wu X, Prakash V. Dynamic strength of distilled water and lake water ice at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76(1): 55-165. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.013.
- [6] Zhang Y, Wang Q, Han D, et al. Dynamic splitting tensile behaviours of distilled-water and river-water ice using a modified SHPB setup[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 145. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103686.
- [7] 邓宇, 王娟, 肖赞. 河冰细观模型构建中细观参数的选取[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 27-31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.10.006.
DENG Y, WANG J, XIAO Z. Selection of mesoscale parameters in constructing mesoscale observation models [J]. People's Yellow River, 2017, 39(10): 27-31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.10.006. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.10.006.
- [8] 邓宇, 王娟, 李志军. 河冰单轴压缩破坏过程细观数值仿真[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1339-1345. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20180150.
DENG Y, WANG J, LI Z J. Numerical Simulation of Unidirectional Compression Failure Process in Riverbed [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 49(11): 1339-1345. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20180150.
- [9] Song Z, Hou L, Whisler D, et al. Mesoscopic numerical investigation of dynamic mechanical properties of ice with entrapped air bubbles based on a stochastic sparse distribution mechanism[J]. Composite Structures, 2020, 236(2020): 1-7. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111834.
- [10] Zhou S, Lei Y, Zhang X Z, et al. Estimating dynamic compressive strength of rock subjected to freeze-thaw weathering by data-driven models and non-destructive rock properties[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025, 40(1): 116-139. DOI: 10.1080/10589759.2024.2313569.
- [11] 李宏强, 姚忠劭, 曾志杭, 等. 冻融循环单轴压缩下不等长交叉裂隙砂岩变形破坏特征研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(06): 65-72. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2024.06.009.
LI H Q, YAO Z S, ZENG Z H, et al. Study on Deformation and Failure Characteristics of Unequal-Length Crossed Fractured Sands under Freeze-Thaw Cycle Uniaxial Compression [J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2024, 46(06): 65-72. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2024.06.009.
- [12] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏观损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(05): 1124-1135. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0672.
LU S Q, ZHU J B, WANG B, et al. Study on Macro-Microscopic Damage Models of Open-Cracked Sandstone Under Coupled Freeze-Thaw Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(05): 1124-1135. DOI: 10.13722/j.

- cnki. jrme. 2022. 0672.
- [13] 刘慧, 杨更社, 申艳军, 等. 冻融-受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(05): 1136-1149. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2022.0574.
Liu H, Yang G S, SHEN Y J, et al. CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(05): 1136-1149. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2022.0574.
- [14] 刘慧, 杨更社, 贾海梁, 等. 裂隙(孔隙)水冻结过程中岩石细观结构变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2516-2524. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016 .0906.
Liu H, Yang G S, JIA H L, et al. Experimental study on meso-structure of rock in the process of crack(pore) water freezing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2516-2524. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016 .0906.
- [15] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(03): 562-570. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016. 0122.
SHEN Y J, YANG G S, RONG T L, et al. Analysis of Localized Damage Effects and Fracture Characteristics at Fracture Ends in Monocrystalline Sandstone under Freeze-Thaw Cycling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(03): 562-570. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016. 0122.
- [16] 申艳军, 杨更社, 王铭, 等. 冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(03): 709-717. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2017. 1296.
SHEN Y J, YANG G S, WANG M, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(03): 709-717. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2017. 1296.
- [17] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 521-529. DOI: 10.16285/j. rsm. 2016. S1. 068.
SHEN Y J, YANG G S, RONG T L, et al. Analysis of evolution of temperature field and frost heaving in hard rock with surface cracks under low temperature environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 521-529. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. S1. 068.
- [18] 范新宇, 罗学东, 李津玮, 等. 寒区矿山高陡边坡稳定性影响因素的敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(09): 58-62. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20140263.
FAN X Y, LUO X D, LI J W, et al. Sensitivity Analysis of Factors Affecting Stability of High and Steep Slopes in Cold Region Mines [J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2015, 32(09): 58-62. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20140263.
- [19] 范新宇, 张争, 陈国将, 等. 爆破振动作用下节理岩体边坡变形破坏因素敏感性分析[J]. 西北水电, 2021, (06): 61-64+74. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20140263.
FAN X Y, ZHANG Z, CHEN G J, et al. Sensitivity Analysis of Fracture Rock Mass Slope Deformation and Failure Factors under Bursting Vibration[J]. Northwest Hydropower, 2021, (06):61-64+74. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20140263.
- [20] 徐拴海, 李宁, 王晓东, 等. 露天煤矿冻岩边坡饱和和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2561-2571. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016. 0945.
XU S H, LI N, WANG X D, et al. Study on Freeze-Thaw Damage and Degradation Model of Saturated Sandstone Slopes in Open-Pit Coal Mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2561-2571. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2016. 0945.
- [21] 沈浩, 徐拴海, 张宏刚, 等. 冻融循环对露天矿不同类型边坡的影响研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(05): 111-114. DOI: 10. 13301/j. cnki. ct. 2022. 05. 027.
SHEN H, XU S H, ZHANG H G, et al. Impact of freeze-thaw cycles on different types of slopes in open-pit mines. Journal of Coal Technology, 2022, 41(05): 111-114. DOI: 10. 13301/j. cnki. ct. 2022. 05. 027.
- [22] 李祥龙, 王建国, 张智宇, 等. 应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(04): 483-490. DOI: 10. 11883 /1001-1455(2016)04- 0483- 08.
LI X L, WANG J G, ZHANG Z Y. et al. Effect of Strain Rate and Joint Dip Angle on Dynamic Properties of Simulated Rock

- Material. [J]. Explosion and Shock, 2016, 36(04): 483-490. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0483-08.
- [23] 高维廷, 朱哲明, 朱伟, 等. 动荷载下岩石裂纹动态扩展行为实验研究综述[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(08): 3-29. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0526.
- GAO W Y, ZHU Z M, ZHU W, et al. Experimental studies on crack propagation behaviors of rock materials under dynamic loads: a review [J]. Explosion and Shock, 2023, 43(08): 3-29. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0526.
- [24] 牛雷雷, 王聪, 朱万成, 等. 基于摆锤加载岩杆 SHPB 装置的充填体动态力学特性测试方法[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(09): 144-155. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0433.
- NIU L L, WANG C, ZHU W C, et al. Test method of dynamic mechanical properties of filling body based on pendulum-loaded rock bar SHPB device [J]. Explosion and Shock, 2024, 44(09): 144-155. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0433.
- [25] 廖铭顺, 许青雅, 孟俊宇, 等. 爆破应力波在岩体中传播的裂隙效应[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(S2): 596-605. DOI: 10.20174/j.juse.2025.S2.08.
- LIAO M S, XU Q Y, MENG J Y, et al. Fracture Effects of Blasting Stress Waves Propagation in Rock Mass [J]. Journal of Underground Space and Engineering. 2025, 21(S2): 596-605. DOI: 10.20174/j.juse.2025.S2.08.
- [26] 李继业, 康强, 赵明生, 等. 节理岩体爆破振动传播衰减规律相似模型试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(02): 30-35+74. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.005.
- LI J Y, KANG Q, ZHAO M S, et al. Study on Propagation Attenuation Law of Blasting Vibration in Jointed Rock Mass by Similarity Model Test [J]. BLASTING, 2022, 39(02): 30-35+74. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.005.
- [27] 李地元, 肖鹏, 谢涛, 等. 动静态压缩下岩石试样的长径比效应研究[J]. 实验力学, 2018, 33(01): 93-100. DOI: 1001-4888(2018)01-0093-08.
- LI D Y, XIAO P, XIE T, et al. Study on the Effect of Longitudinal-Diameter Ratio on Rock Samples under Dynamic and Static Compression [J]. Experimental Mechanics, 2018, 33(01): 93-100. DOI: 1001-4888(2018)01-0093-08.
- [28] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004(11): 1805-1808. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.11.028.
- ZUO B C, CHEN C X, LIU C H, et al. Experimental Study on Similar Materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(11): 1805-1808. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.11.028.
- [29] 郭媛. 子波穿过岩体结构面的波形变化规律及其应用研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2014.
- GUO Y. Study on the variation patterns of seismic waves penetrating rock mass structures and their applications [D]. NanChang: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [30] 王观石, 李长洪, 胡世丽, 等. 岩体中应力波幅值随时空衰减的关系[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3487-3492. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.11.023.
- WANG G S, LI C H, HU S L, et al. The relationship between the attenuation of stress wave amplitude in rock mass over time and space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3487-3492. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.11.023.
- [31] 闫相祯, 董卫, 樊恒, 等. 基于位移不连续模型的多裂缝应力干扰极限距离计算[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(06): 140-146. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2017.06.017.
- YAN X Z, DONG W, FAN H, et al. Calculation of the ultimate distance of multi-fracture stress interference based on the displacement discontinuity model [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2017, 41(06): 140-146. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2017.06.017.
- [32] 胡峰, 李志清, 孙凯, 等. 冻土石混合体、冰石混合物和冻土在压、拉作用下的破坏特征对比[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2923-2934. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.1181.
- HU F, LI Z Q, SUN K, et al. Comparative Study on Failure Characteristics of Permafrost-Rock Mixtures, Ice-Rock Mixtures, and Permafrost Under Compression and Tension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2923-2934. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.1181.