

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.006

冰岩耦合体爆炸应力波传播特性分析*

李萍丰¹,王婷婷²,唐春安³,张兵兵¹

(1. 宏大爆破工程集团有限责任公司,广州 510623;2. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819;

3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,大连 116024)

摘要: 寒区矿产资源露天爆破开采设计及其致灾防治已成为我国西部能源安全开采领域的关键性问题。为研究高寒地区露天矿山爆破开采工程中应力波在饱冰裂隙岩体中传播机制,先给出冰岩耦合体的一般定义,界定冰岩耦合体基本特征及其与冻结土体的差异性;其次,采用 RFPA^{2D}-Dynamic 数值试验方法揭示了爆炸应力波在冰岩耦合体中传播过程,实现波峰运移可视化,发现并分析了应力波在裂隙冰与基岩交界处透、反射现象;进一步,讨论了裂隙冰数量、间距、厚度对应力波在冰岩耦合体中传播规律的影响,研究结果表明:爆炸应力波在完整基岩中传播效果最好,在冰岩耦合体传播效果次之,在含空气裂隙岩体中传播效果最差;与完整基岩相比,裂隙冰的存在削减应力波幅度,应力波在岩棒模型中衰减程度从 6.1% 变成 7.1%;应力波在冰岩耦合体中传播效果受裂隙冰厚度、数量影响较为明显;而间距对其影响较小,透射系数维持在 0.925;透射应力波幅值随裂隙冰厚度、数量增加而逐步降低;应力波衰减程度随裂隙冰厚度变化满足: $y=0.6527+0.03687x$,随裂隙冰数量变化满足: $y=0.0715+0.0026x$ 。研究结果为高寒地区露天矿山开采爆破参数设计以及灾害的预防提供理论研究基础。

关键词: 高原寒区;冰岩耦合体;爆炸应力波;波传播;数值模拟

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0044-09

Propagation Characteristics of Explosion Stress Wave in Ice-filled Rock Mass

LI Ping-feng¹, WANG Ting-ting², TANG Chun-an³, ZHANG Bing-bing¹

(1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The design and disaster prevention of open-pit mining of mineral resources by bench blasting in cold regions have become key issues in the safe extraction of energy in Western China. In order to study the propagation mechanism of stress waves in the blasting process of a surface mine in plateau cold regions, the definition of ice-filled rock mass is given first, and the basic characteristics of ice-filled rock mass and its difference with frozen soil are defined. Secondly, the propagation process of stress waves in ice-filled rock mass is reproduced by RFPA^{2D}-dynamic and wave peak migration visualization is achieved. At the same time, the reflection and transmission of stress waves at the

收稿日期:2022-06-14

作者简介:李萍丰(1966-),男,2007年博士毕业于中国地质大学(北京)地下建筑工程专业,现任宏大爆破工程集团有限责任公司副总经理,主要从事工程爆破技术和管理方面研究,(E-mail) hdbplpf@163.com。

通讯作者:唐春安(1958-),男,1988年博士毕业于东北大学采矿工程专业,1991—1992年赴英国帝国理工学院做博士后研究,现任大连理工大学岩土工程学科教授,主要从事岩石破裂与失稳方面研究,(E-mail) tca@mail.neu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.42050201);冻土工程国家重点实验室开放基金课题(No. SKLFS202013)

interface between the cracked ice and the bedrock are analyzed. Furthermore, the influence of the quantity, spacing, and thickness of the cracked ice on the propagation process of stress waves is discussed. The numerical simulation results show that the propagation effect of the explosion stress waves is the best in intact bedrock, second in ice-filled rock mass, and the worst in air-filled cracked rock mass. Compared with the intact bedrock, the cracked ice existing in cracks reduces the stress wave amplitudes, and the attenuation of the stress waves in the rock rod model changes from 6.1% to 7.1%. The propagation of stress waves in the ice-filled rock mass is affected by the thickness and quantity of the cracked ice more than the, with a transmission coefficient of 0.925. When, the thickness and quantity of the cracked ice increases, the amplitude of the transmitted stress waves decreases. Take the attenuation degree of stress wave as y , it follows $y = 0.6527 + 0.03687x$ with the thickness of the cracked ice, and $y = 0.0715 + 0.0026x$ with the quantity of the cracked ice. The research results provide a theoretical research basis for blasting parameter design and disaster prevention of surface mine in plateau cold region.

Key words: plateau cold region; ice-filled rock mass; blasting wave; wave propagation; numerical simulation

随着西部能源建设兴起,矿产资源开发已逐步延伸至西北地区。岩体中存在着节理、裂隙等缺陷,岩体强度受其影响十分显著^[1-3]。在降雨和地下水作用下,裂隙中将会聚集水分,高原寒区特殊地质环境条件诱使裂隙水结冰形成冻结岩体。高寒地区矿产资源开发以及基础设施施工过程中经常会遇到冻结岩体,由于冻结岩体结构的复杂性,其物理力学特性与常规岩石有差异性。而爆破是高寒地区工程项目中较为有效的一种方法。随传播距离扩增,炸药爆炸后所产生的冲击波迅速衰减为应力波,节理、裂隙的存在造成炸药与岩体之间复杂的耦合作用,既削弱了应力波作用,又对岩体破坏模式产生影响,同时爆破效果也发生变化。因此爆破施工过程中应力波在冻结岩体中的传播机制需要深入研究^[4-7]。

目前国内外学者针对应力波在节理裂隙中的传播规律从理论^[8,9]、试验^[10-13]、模拟方面展开研究^[14-18]。理论和实验分析不能重现爆炸应力波在节理裂隙中传播全过程,而数值模拟却很好地解决此问题,目前针对应力波传播过程研究主要采用离散元方法 UDEC、不连续变形分析方法 DDA、连续—非连续单元方法 CDEM 等。赵坚等将 UDEC 和 Auto-dyna-2D 结合^[14],分析了爆炸波在非充填节理岩体中传播规律;Zhao 等研究了应力波垂直入射线性与非线性节理的传播^[15],并与理论解验证 UDEC 模拟应力波垂直入射节理处传播的可行性。基于 UDEC,杨风威等通过计算应力波在含倾斜节理岩体中的传播^[16],得出透射、反射系数及波型转换规律。刘婷婷等利用 UDEC^[17],分析了应力波在平行充填节理岩体中的传播规律,得出节理特性与透射系数之间存在联系;结合 DDA 程序,张秀丽等计算了应力波在节理裂隙岩体中传播模型^[18],得出应力波透射强度随节理数量增加而削弱,反射强度与其相反;运用 CDEM,赵安平等研究了节理强度、节理刚度、

节理刚度/强度、节理间距、节理倾角等因素扰动爆破效果的规律^[1]。

以上相关研究工作主要针对应力波在节理、裂隙岩体中传播特性分析较多,而低温下爆炸应力波在饱冰裂隙岩体传播规律研究略有涉及。鉴于此,笔者针对高寒地区露天矿山爆破开采过程中爆炸应力波传播机制这一科学问题,先界定了冰岩耦合体的定义,探究了应力波在冰岩耦合体中透、反射机制,借助数值实验方式重现了应力波在冰岩耦合体中传播过程,分析了饱冰裂隙及空气裂隙对爆炸应力波传播的影响,并且讨论了爆炸应力波幅值与裂隙冰数量、间距和厚度之间关系,为指导高寒地区露天矿山开采爆破参数设计以及灾害的预防提供理论研究基础。

1 冰岩耦合体定义

广义的冻土泛指温度低于零度且含有冰的岩土体,为冻结土体和冻结岩体的总称。通常所说的冻土是狭义的冻土,仅指冻结土体。而冻结岩体随着寒区基础设施及矿产资源逐步发展,引起人们广泛关注。经过长期地质构造作用,岩体内部孕育了如裂纹、孔洞、节理、弱面以及夹层等缺陷,受低温影响裂隙水将会发生相变成为冰。冻结土体和冻结岩体特性对比如表 1 所示,二者最大区别是冻结岩体具有各向异性特性,造成外部作用下的响应行为即本构关系有所不同,所以不能将冻土的相关理论直接应用于冻结岩体工程,若仍采用广义冻土的概念易混淆视听。为了更直观体现冻结裂隙岩体的特性,给出了冰岩耦合体的定义。冰岩耦合体意指天然存在或人工形成的岩体、未冻水和裂隙冰的共存体,如图 1。

受高原寒区气候及地质条件影响,露天矿山爆破开采常遇冰岩耦合体区域,爆炸应力波在冰岩耦

合体中传播特性与常规岩石存在差异性,因此需要深入探究。

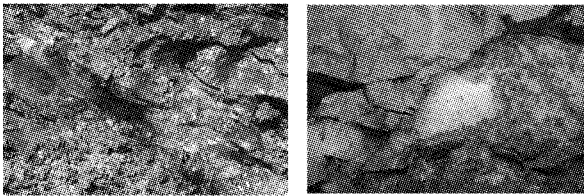


图1 现场冻结岩体^[19]

Fig. 1 In-situ frozen rock mass

表1 冻结土体和冻结岩体特性对比
Table 1 Comparison of characteristics of frozen soil and frozen rock mass

	冻结土体	冻结岩体
结构特性	连续、均匀、各向同性	各向异性、非均质性、非连续性和复杂性
影响因素	孔隙水(冰)	孔隙水(冰)和裂隙水(冰)共同作用

2 冰岩耦合体应力波传播数值模拟

2.1 计算模型建立

为探究应力波在冰岩耦合体中透、反射机制,结合数值模拟手段来重现应力波传播过程。采用 RF-PA^{2D}-Dynamic 建立岩棒模型来讨论应力波在完整基岩、冰岩耦合体、含空气裂隙基岩中传播特性^[20],不

考虑损伤破坏的影响,因主要研究爆炸应力波在冰岩耦合体中的传播规律,将基岩和裂隙冰假设为均质材料,便于分析。

模型长 5 m, 高为 0.5 m (图 2), 网格尺寸为 1 cm, 共计 5 万单元, 节理裂隙厚度为 0.05 m, 模型右侧为无反射边界, 左侧、上下两侧为反射边界, 将入射波简化为三角波, 在模型左侧施加载荷, 幅值为 2 MPa (图 3), 持续时间为 1000 μ s, 单步加载时间为 $1e-5$ s。基岩、冰及空气裂隙参数如表 2 所示^[21]。

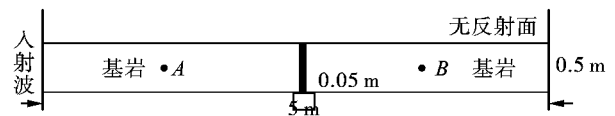


图2 应力波传播数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of stress wave propagation

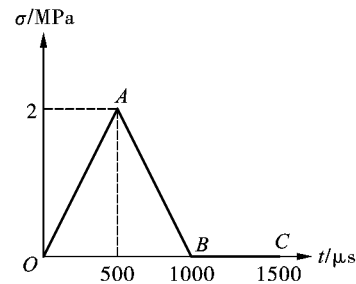


图3 输入的应力波

Fig. 3 Input stress wave

表2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of the model

	弹性模量/MPa	均质度	强度/MPa	均质度	密度/($kg \cdot m^3$)	泊松比	摩擦角/ $^\circ$
基岩	50000	50	100	50	2500	0.25	30
裂隙冰	12000	100	6	100	900	0.3	16.5
节理	10	~	1e8	~	1e-6	0.49	~

2.2 不同裂隙材料应力波传播特性分析

2.2.1 应力波传播形态分析

由图 4 的应力波传播形态可知:在完整基岩中,应力波在水平方向(X 方向)不断向前推进,直至最右端无反射边界逐渐衰减。

在含有空气裂隙的基岩中,应力波在近加载端不断推进,在 $4e-4$ s 到达空气裂隙处停止向前传播,出现了完全反射,与迎面而来的入射波相撞,应力波符号逐渐发生变化,反向传播至入射端。在含有饱冰裂隙的基岩中,应力波到达裂隙冰处,有部分应力波穿过裂隙冰中继续向前蔓延,形成透射波;另一部分应力波发生在界面处反射,形成反射波,与迎面而来的入射波相撞,应力波符号逐渐发生变化。

数值模拟结果可准确定位应力波传播的具体位置,波峰运移过程可视化,可为工程爆破实施提供一种新的预测方法。

2.2.2 不同测点应力波幅值变化情况

在所建立的模型中取测点 A 和 B 来分析应力波幅值随加载时间变化情况。 A 测点坐标为 (1.25, 0.25), B 测点 (3.75, 0.25), A 测点与 B 测点之间的距离为 2.5 m, 计算总时间取 $2e-3$ s。

图 5(a) 是完整基岩应力波传播情况 (X 方向), A 测点靠近加载端, 自 $3e-4$ s 受到应力波的影响, $5.2e-4$ s 达到波峰, $9.6e-4$ s 应力波扰动接近尾声; 而 B 测点较加载端远, 自 $8.2e-4$ s 受到应力波的影响, $1.08e-3$ s 达到波峰, $1.32e-3$ s 结束。 A 测点应力

波幅值为 1.946 MPa, B 测点应力波幅值为 1.828 MPa, 衰减系数为 0.0472 MPa/m, 衰减程度 6.1%。右端为无反射边界, 应力波在右端逐渐消散殆尽。

图 5(b) 是含有空气裂隙模型应力波传播情况 (X 方向), A 测点位于空气裂隙左侧, 在计算时间 $2e-3$ s 内 (总计算为 200 步), X 方向应力波变化呈先上升后下降再上升的循环变化趋势。自 $1.8e-4$ s 到 $7.5e-4$ s 应力波逐步穿过 A 测点, 因为输入的加载波形为三角波, 应力波呈先上升后下降的趋势, 此过程中峰值为 1.946 MPa; 自 $7.5e-4$ s 至 $1.3e-3$ s, 入射波逐渐到达空气界面, A 测点受到空气裂隙界面反射波作用, 应力波幅值逐渐变为 -1.816 MPa; 自 $1.3e-3$ s 至 $1.83e-3$ s, 空气裂隙界面反射波到达入射端发生二次反射, 二次反射波继续作用于 A 测点, 应力波幅值逐渐变为 1.906 MPa。上述过程在后续计算中持续循环, 这里不做过多阐述。 B 测点在空气裂隙右侧, 应力波没

有通过空气裂隙, 计算全过程没有受到应力波扰动。

图 5(c) 是冰岩耦合体内应力波传播情况 (X 方向), A 测点位于裂隙冰左侧, 在计算时间 $2e-3$ s 内 (总计算为 200 步), X 方向应力波变化呈先上升后下降再小幅度波动的变化趋势, 与空气裂隙不同之处在于 A 测点应力波幅值在第二个循环中大幅下降。自 $1.8e-4$ s 到 $7.5e-4$ s 应力波逐步穿过 A 测点, 峰值为 1.946 MPa; 自 $7.5e-4$ s 至 $1.08e-3$ s, 入射波逐渐到达裂隙冰界面, 一部分形成折射波通过裂隙冰, 另一部分形成反射波又重新到达 A 测点, 削减了正向应力波的能量, 应力波幅值为 -0.232 MPa; 自 $1.17e-3$ s 至 $1.72e-3$ s, 裂隙冰界面的反射波到达入射端发生二次反射, 二次反射波继续作用于 A 测点, 应力波幅值为 0.261 MPa, 后续循环此过程。 B 测点在裂隙冰右侧, 主要受到透射波的影响, 峰值为 1.808 MPa, 随着计算过程, 右端为无反射边界, 应力波在右端逐渐消散殆尽。

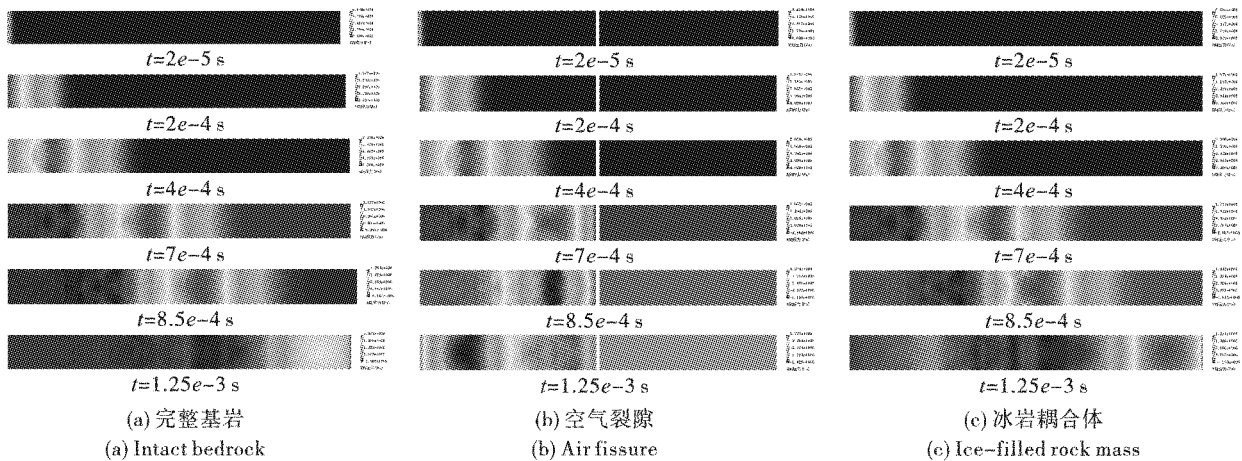


图 4 X 方向应力波传播形态

Fig. 4 Propagation pattern of stress wave in X direction

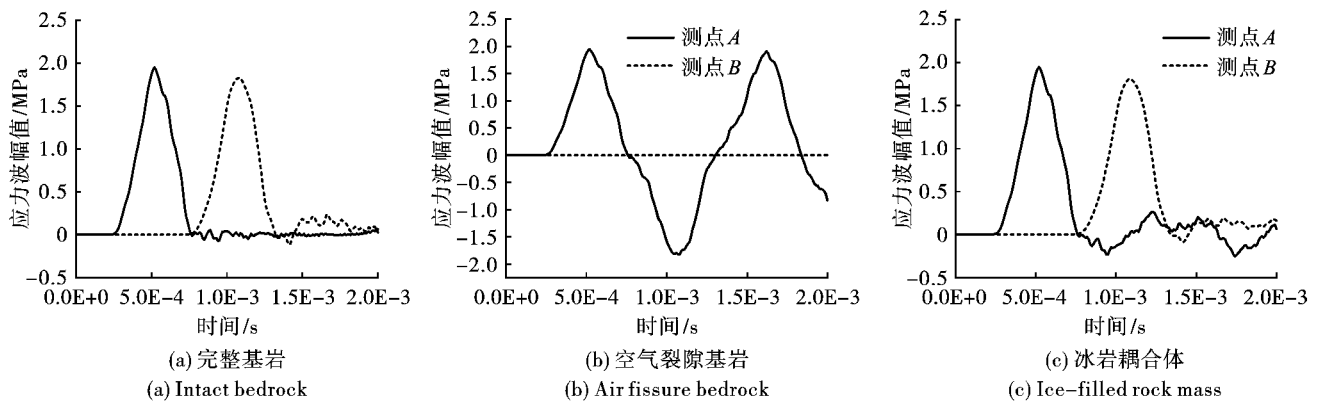


图 5 A 测点和 B 测点应力波变化情况

Fig. 5 The variation of stress wave at Point A and B

通过上述分析, 可得出与空气裂隙相比, 裂隙冰的存在促进了应力波在裂隙岩体中传播, 此现象解

释了高原岩体爆破施工过程中应力波在冰岩耦合体中传播效果更好, 但与完整基岩相比, 应力波幅值会

有小幅衰减。

2.3 冰岩耦合体内应力波传播特性影响因素

为了深入探究裂隙冰数量、间距、厚度对应力波传播特性的影响,同样采用图2的岩棒模型来进行影响因素讨论研究,边界条件与加载条件相同,取裂隙冰数量 N 为 1, 2, 3, 4, 裂隙冰间距为 0.2, 0.5, 0.8, 1.1 m, 裂隙冰厚度为 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 m, 同时取应力波衰减程度 = (入射波幅值 - 透射波幅值) / 入射波幅值 $\times 100\%$, 取应力波透射系数 = 透射波幅值 / 入射波幅值。

2.3.1 裂隙冰间距对应力波幅值影响

以裂隙冰厚度为 0.05 m, 数量为 2 条为例来分析裂隙冰间距影响, 从图 6 可以看出, 应力波在冰岩耦合体中传播, 透射应力波幅值都出现了不同程度的衰减, 衰减程度维持在 7.5%, 透射系数维持在 0.925。当裂隙冰间距为 0.2 m 时, A 测点于 $5.2e-4$ s 达到峰值 1.946 MPa, 于 $7.6e-4$ s 应力波幅值出现负值, 其主因受裂隙冰反射波的干扰, 后续裂隙

冰产生的反射波到达入射端发生二次反射, 二次反射波继续作用于 A 测点, 应力值逐渐变为正值, 应力波幅值为 0.312 MPa, 与单裂隙冰作用效果类似; B 测点于 $1.09e-3$ s 达到峰值 1.801 MPa, 衰减程度 7.5%, 透射系数 0.925。当裂隙冰间距为 0.5 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值 1.946 MPa, 应力波在后续传播过程中也出现上下波动状态; B 测点于 $1.09e-3$ s 达到峰值 1.802 MPa, 衰减程度 7.4%, 透射系数 0.926。当裂隙冰间距为 0.8 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值 1.946 MPa; B 测点于 $1.09e-3$ s 达到峰值 1.792 MPa, 衰减程度 7.9%, 透射系数 0.921。当裂隙冰间距为 1.1 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值 1.939 MPa; B 测点于 $1.09e-3$ s 达到峰值 1.791 MPa, 衰减程度 7.6%, 透射系数 0.924。

从图 7 不同裂隙冰间距 B 测点应力波幅值变化情况可以看出, 裂隙冰间距对应力波透射性质影响较小, 应力波幅值变化区别不大。

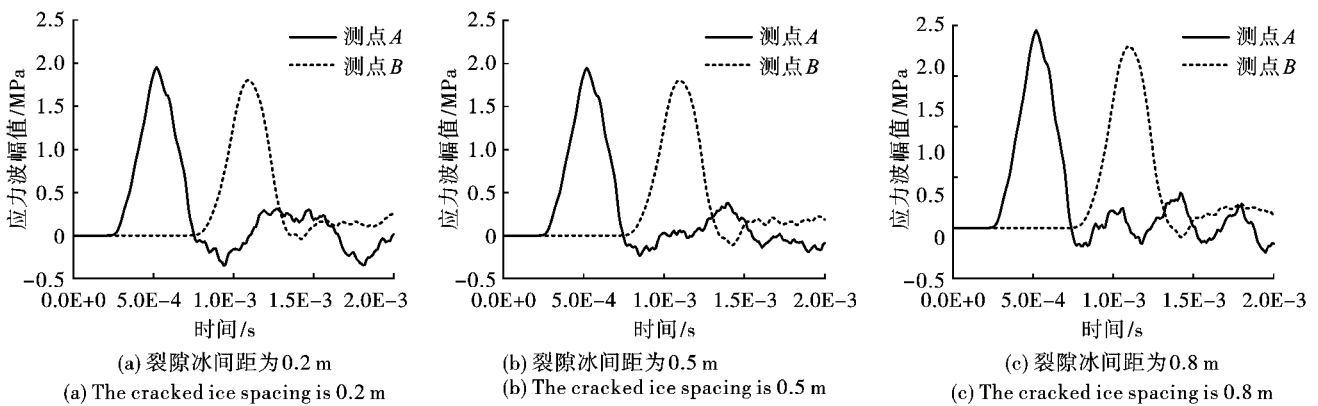


图 6 不同裂隙冰间距 A、B 测点应力波对比

Fig. 6 Comparison of stress wave at Point A and B with different cracked ice spacing

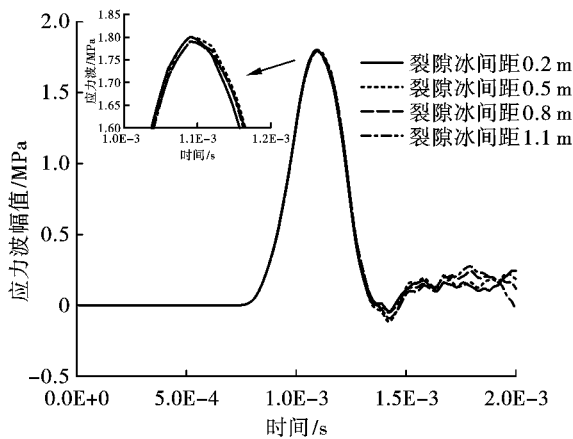


图 7 不同裂隙冰间距 B 测点应力波幅值

Fig. 7 Stress wave amplitude at Point B with different cracked ice spacing

2.3.2 裂隙冰厚度对应力波幅值影响

以裂隙冰数量为 1 条为例来分析裂隙冰厚度影响, 从图 5 (c) 和图 8 可得出: 当裂隙冰厚度为 0.05 m 时, 入射波幅值为 1.946 MPa, B 测点于 $1.11e-3$ s 达到峰值, 透射波幅值为 1.808 MPa, 衰减程度 7.1%, 透射系数 0.929; 当裂隙冰厚度为 0.1 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值, 入射波幅值为 1.946 MPa, B 测点于 $1.1e-3$ s 达到峰值, 透射波幅值为 1.755 MPa, 衰减程度 9.8%, 透射系数 0.902; 当裂隙冰厚度为 0.2 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值, 入射波幅值为 1.946 MPa, B 测点于 $1.11e-3$ s 达到峰值, 透射波幅值为 1.613 MPa, 衰减程度 17.1%, 透射系数 0.829; 当裂隙冰厚度为 0.4 m 时, A 测点于 $5.20e-4$ s 达到峰值 1.946 MPa, B 测点

于 1.12×10^{-3} s 达到峰值 1.369 MPa, 衰减程度 29.7%, 透射系数 0.703。

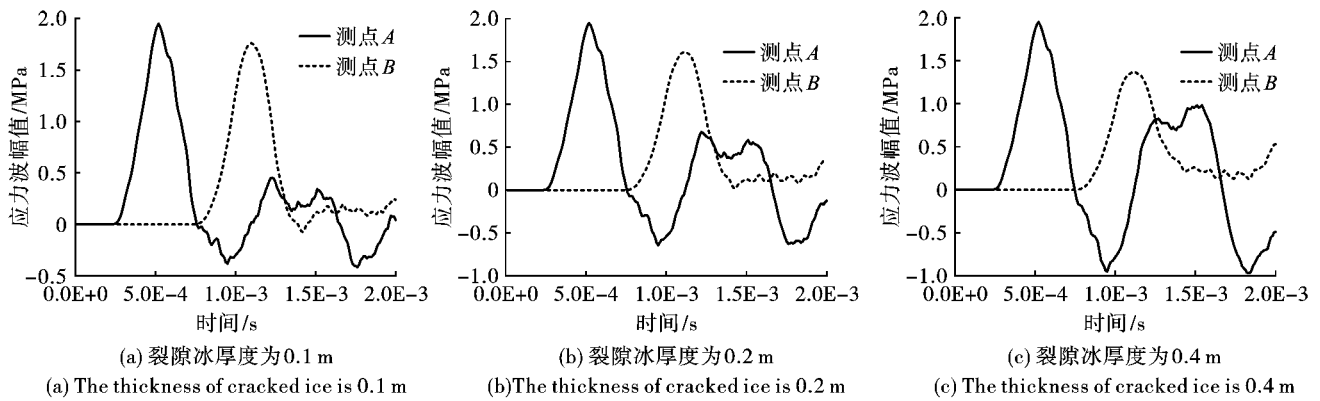


图 8 不同裂隙冰厚度 A、B 测点应力波对比

Fig. 8 Comparison of stress wave at Point A and B with different cracked ice thickness

从图 9 可得出应力波在不同裂隙冰厚度的冰岩耦合体中传播时,透射应力波幅值出现了大幅度衰减,衰减程度随裂隙冰厚度增加而升高,而透射应力波幅值随裂隙冰数量增加而降低,透射系数也逐渐降低,裂隙冰厚度对应应力波透射性质影响较为明显。

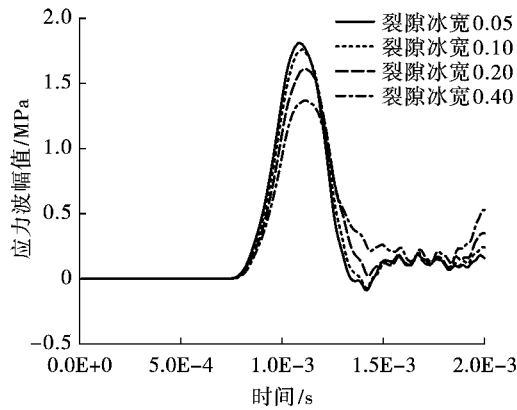


图 9 不同裂隙冰厚度 B 测点应力波幅值

Fig. 9 Stress wave amplitude at Point B with different cracked ice thickness

将应力波衰减程度和裂隙冰厚度进行拟合处理,如图 10 所示,可得出衰减程度 y 和裂隙冰厚度 x 满足: $y = 0.6527 + 0.03687x$ (x 取正数)。

2.3.3 裂隙冰数量对应应力波幅值影响

由于考虑裂隙冰数量对应应力波幅值影响,分析数据时 A 测点的选取要避免受到裂隙冰反射波的影响。主要考虑裂隙冰数量为 1, 2, 3, 4 时透射应力波变化情况,以裂隙冰厚度为 0.05 m, 间距为 0.5 m 为例来分析, A 测点取值坐标为 (0.75, 0.25), B 测点取值坐标为 (4.25, 0.25)。

从图 11 可以看出,当裂隙冰数量为 1 时, A 测点于 4.2×10^{-4} s 达到峰值,入射波幅值为 1.950 MPa; B 测点

于 1.2×10^{-3} s 达到峰值,透射波幅值为 1.806 MPa, 衰减 7.4%, 透射系数 0.926。当裂隙冰数量为 2 时, A 测点于 4.2×10^{-4} s 达到峰值,入射波幅值为 1.950 MPa, B 测点于 1.21×10^{-3} s 透射波幅值为 1.800 MPa, 衰减 7.7%, 透射系数 0.923。当裂隙冰数量为 3 时, A 测点于 5.2×10^{-4} s 达到峰值,入射波幅值为 1.950 MPa; B 测点于 1.22×10^{-3} s 达到峰值,透射波幅值为 1.795 MPa, 衰减 7.9%, 透射系数 0.921。当裂隙冰数量为 4 时, A 测点于 4.2×10^{-4} s 达到峰值,入射波幅值为 1.950 MPa, B 测点于 1.24×10^{-3} s 达到峰值,透射波幅值为 1.791 MPa, 衰减 8.2%, 透射系数 0.918。

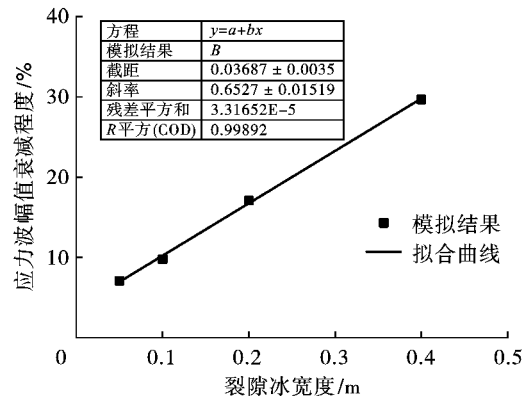


图 10 裂隙冰厚度与应力波衰减程度拟合结果

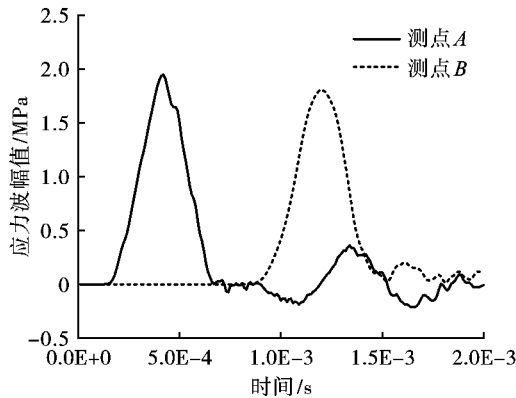
Fig. 10 Fitting results of cracked ice thickness and attenuation degree of stress wave

从图 12 可以看出,应力波在不同裂隙冰数量的冰岩耦合体中传播时,透射应力波幅值都出现不同程度的衰减,应力波衰减程度随裂隙冰数量增加逐渐升高,透射应力波幅值和透射系数随裂隙冰数量增加而逐步降低。

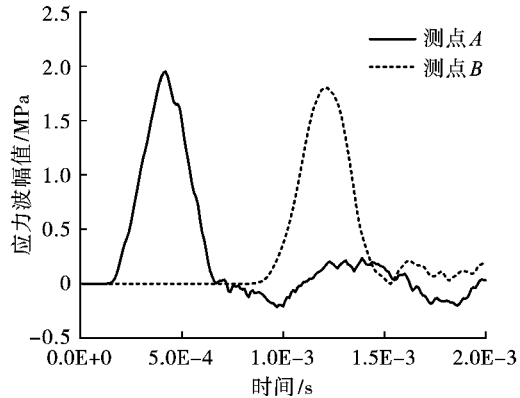
将应力波衰减程度和裂隙冰数量进行拟合处

理,如图13所示,可得出衰减程度 y 和裂隙冰数量 x

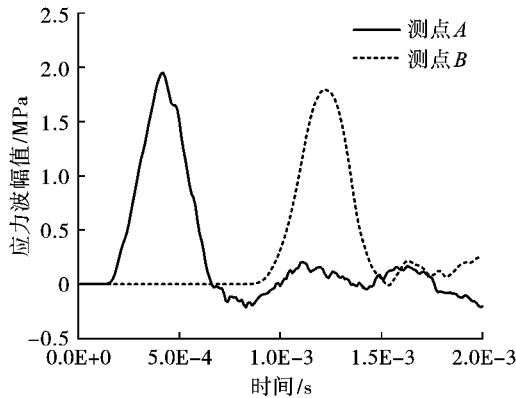
满足: $y=0.0715+0.0026x(x$ 取正数)。



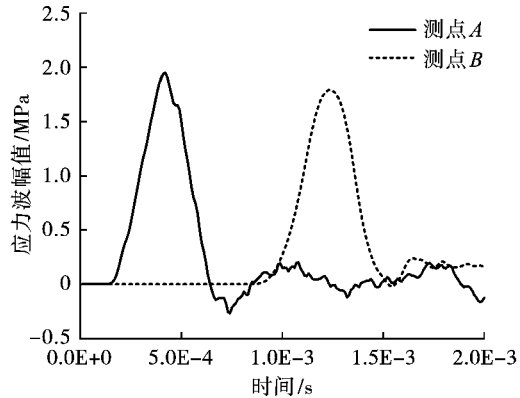
(a) 裂隙冰数量为1
(a) The quantity of cracked ice is 1



(b) 裂隙冰数量为2
(b) The quantity of cracked ice is 2



(c) 裂隙冰数量为3
(c) The quantity of cracked ice is 3



(d) 裂隙冰数量为4
(d) The quantity of cracked ice is 4

图11 不同裂隙冰数量A、B测点应力波对比

Fig. 11 Comparison of stress wave at Point A and B with different cracked ice quantity

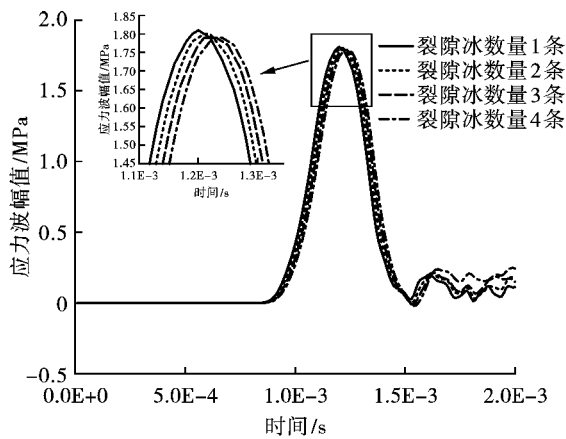


图12 不同裂隙冰数量B测点应力波幅值

Fig. 12 Stress wave amplitude at Point B with different cracked ice quantity

在削减应力波幅值,应力波衰减程度从6.1%变成7.1%。

(2)若裂隙冰数量、厚度相同,裂隙冰间距对应力波透射效果影响较小,应力波衰减程度稳定在7.5%,透射系数稳定在0.925。

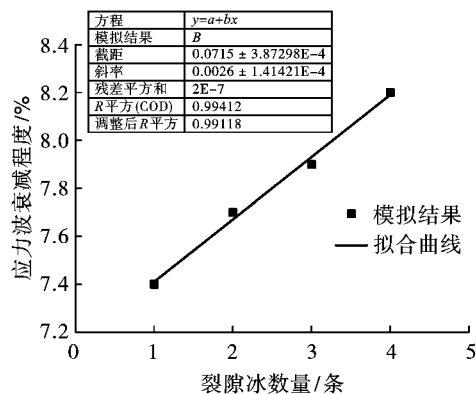


图13 裂隙冰数量与应力波衰减程度拟合结果
Fig. 13 Fitting results of cracked ice quantity and attenuation degree of stress wave

3 结论

(1)与空气裂隙相比,裂隙冰的存在促进应力波在裂隙岩体中传播;与完整基岩相比,裂隙冰的存

(3)若裂隙冰数量、间距相同,透射应力波幅值及透射系数随裂隙冰厚度增加而逐步降低,而衰减程度逐步升高;应力波衰减程度 y 与裂隙冰厚度 x 之间可用函数表示为: $y = 0.6527 + 0.03687x$ (x 取正数)。

(4)当裂隙冰间距、厚度相同,透射应力波幅值及衰减程度随裂隙冰数量增加而逐步降低,透射系数也逐步降低;应力波衰减程度 y 与裂隙冰数量 x 之间可用函数表示为: $y = 0.0715 + 0.0026x$ (x 取正数)。

参考文献(References)

- [1] 赵安平,冯春,郭汝坤,等. 节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(9):2027-2036.
- [1] ZHAO An-ping, FENG Chun, GUO Ru-kun, et al. Effect of joints on blasting and stress wave propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9):2027-2036. (in Chinese)
- [2] 杨立云,刘振坤,周莹莹,等. 爆炸应力波在含层理介质中传播规律的实验研究[J]. 爆破,2018,35(2):1-5,11.
- [2] YANG Li-yun, LIU Zhen-kun, ZHOU Ying-ying, et al. Study on propagation law of explosive stress wave in layered media[J]. Blasting, 2018, 35(2):1-5, 11. (in Chinese)
- [3] 徐拴海,李 宁,王晓东,等. 露天煤矿冻岩边坡饱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.
- [3] XU Shuan-hai, LI Ning, WANG Xiao-dong, et al. Damage test and degradation model of saturated sandstone due to cyclic freezing and thawing of rock slopes of open-pit coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12):2561-2571. (in Chinese)
- [4] 柴少波,赵均海,王 昊. 柱面波在含节理岩体中传播的 UDEC 模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2848-2856.
- [4] CHAI Shao-bo, ZHAO Jun-hai, WANG Hao. UDEC simulation on cylindrical wave propagation through jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1):2848-2856. (in Chinese)
- [5] 李允忠,王志亮,黄佑鹏,等. 循环爆破载荷下岩石累积损伤效应研究[J]. 爆破,2019,36(2):47-53.
- [5] LI Yun-zhong, WANG Zhi-liang, HUANG You-peng, et al. Numerical study of cumulative damage effect of rock under cyclic blast loading[J]. Blasting, 2019, 36(2):47-53. (in Chinese)
- [6] WANG T T, TANG C A, LI P F, et al. Frost-heaving cracking sensitivity of single-flaw rock mass based on a numerical experimental method[J]. Geofluids, 2021:1-13.
- [7] 董 平,刘婷婷,李新平,等. 冲击荷载作用下非贯通节理岩体细观破坏模式研究[J]. 爆破,2021,38(4):17-25.
- [7] DONG Ping, LIU Ting-ting, LI Xin-ping, et al. Study on wave propagation and meso-failure of rock with non-persistent joints[J]. Blasting, 2021, 38(4):17-25. (in Chinese)
- [8] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, Cook N. Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1990, 95(B7):11345-1135.
- [9] 王 梦,范立峰. 岩体内应力波传播的研究进展与展望[J]. 北京工业大学学报,2021,47(7):802-814.
- [9] WANG Meng, FAN Li-feng. Research progress and prospect of stress wave propagation through rock mass[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7):802-814. (in Chinese)
- [10] CHEN X, LI J C, CAI M F, et al. Experimental study on wave propagation across a rock joint with rough surface[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6):2225-2234.
- [11] 刘 鑫,许宏发,范鹏贤,等. 围压下岩石填充裂隙对应力波衰减规律的试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2021(8):1-11.
- [11] LIU Xin, XU Hong-fa, FAN Peng-xian, et al. Experimental study on the stress wave attenuation effect of filled cracks in rocks under confining pressure[J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2021(8):1-11. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2021.0076>. (in Chinese)
- [12] 李新平,董 千,刘婷婷,等. 不同地应力下爆炸应力波在节理岩体中传播规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2188-2196.
- [12] LI Xin-ping, DONG Qian, LIU Ting-ting, et al. Model test on propagation law of blast stress wave in jointed rock mass under different in-situ stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11):2188-2196. (in Chinese)
- [13] 陈雪峰,赵孝学,汪海波,等. 节理充填岩体爆炸应力波传播规律模型试验与应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(12):132-136.
- [13] CHEN Xue-feng, ZHAO Xiao-xue, WANG Hai-bo, et al. Model tests and application research on propagation laws of blasting stress wave in jointed and filled rock mass[J]. China Safety Science and Technology, 2018, 14(12):132-136. (in Chinese)
- [14] 赵 坚,陈寿根,蔡军刚. 用 UDEC 模拟爆炸波在节

- 理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2):111-115.
- [14] ZHAO Jian, CHEN Shou-gen, CAI Jun-gang. The propagation of explosion wave in jointed rock mass is simulated by UDEC[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2):111-115. (in Chinese)
- [15] ZHAO X B, ZHAO J, CAI J G, et al. UDEC modeling on wave propagation across fractured rock masses[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(1):97-104.
- [16] 杨风威, 李海波, 李建春, 等. 斜入射线弹性节理应力波传播特征的数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(3):901-907.
- [16] YANG Feng-wei, LI Hai-bo, LI Jian-chun, et al. Numerical simulation of transmission characteristics of oblique incidence of stress waves across linear elastic joints[J]. Rock and Soil Mechanic, 2013, 34(3):901-907. (in Chinese)
- [17] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 非线性节理模型对应力波传播影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):953-959.
- [17] LIU Ting-ting, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. Numerical analysis on effect of nonlinear joints on propagation of stress wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5):953-959. (in Chinese)
- [18] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008(3):717-721.
- [18] ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3):717-721. (in Chinese)
- [19] LIU N F, LI N, XU C, et al. Mechanism of secondary lining cracking and its simulation for the Dugongling Tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(10):4539-4558.
- [20] 廖志毅, 唐春安. 爆炸应力波作用下岩体破碎特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3):98-102.
- [20] LIAO Zhi-yi, TANG Chun-an. Numerical simulation on the rock fragmentation characteristic under explosion stress wave disturbance[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(3):98-102. (in Chinese)
- [21] 单仁亮, 白瑶, 隋顺猛, 等. 淡水冰三轴压缩力学特性试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4):901-917.
- [21] SHAN Ren-liang, BAI Yao, SUI Shun-meng, et al. Experimental research on mechanical characteristics of freshwater ice under triaxial compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4):901-917. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第31页)

- [12] 平琦, 苏海鹏, 马冬冬, 等. 不同高温作用后石灰岩物理与动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4):932-942, 953. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1170.
- [12] PING Qi, SU Hai-peng, MA Dong-dong, et al. After high temperature limestone physical and dynamic characteristics test study[J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(4):932-942, 953. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1170. (in Chinese)
- [13] YANG RS, FANG SZ, LI WY, et al. Experimental study on the dynamic properties of three types of rock at negative temperature[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(1):455-464.
- [14] WANG JG, YANG Y, GUO YH, et al. Low temperature effect of saturated granite on dynamic characteristics at high strain rates[J]. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics, 2017, 38:163-169.
- [15] 常森, 许金余, 郑广辉. 冻融循环层理砂岩冲击荷载下应变率特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1):53-61.
- [15] CHANG Sen, XU Jin-yu, ZHENG Guang-hui. Strain rate characteristics of freezing-thawing cyclically bedded sandstone under impact load[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2017(1):53-61. (in Chinese)
- [16] 刘冰. 动荷载下矿岩体与胶结充填体力学特性及工程应用研究[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- [16] LIU Bing. Research on mechanical characteristics and engineering application of cemented backfill under Dynamic Load[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)
- [17] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [17] HONG Liang. Research on size effect of rock strength and crushing energy consumption characteristics under impact load[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)

英文编辑:陈东方