低温作用下岩体裂隙冻结渗流规律可视化试验研究*

杨晓亮[1,2],汪云峰[3],盛建龙[1,2],周新[1,2],王楠[4],周文[5]

(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2.冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081;
3.平湖市水利局, 浙江 平湖市 314200;
4.国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077;
5.国网湖北省电力有限公司黄龙滩水力发电厂, 湖北 十堰市 442000)

摘要:寒区岩质边坡失稳和隧道坍塌灾害均涉及岩体裂隙冻结渗流问题。为探究岩体裂隙低温冻结渗流演化规律,研发了岩体裂隙低温冻结渗流可视化试验平台,开展了不同流量条件下岩体裂隙低温冻结渗流试验。采用图像处理技术量化液-冰相变的动态发展过程,并分析了液-冰相变与冻结渗流特性的关系。结果表明:在冻结渗流过程中,由于液相与裂隙壁面之间热交换强度存在差异,液相在裂隙出口上、下两侧区域最先冻结;随着冻结渗流时间推移,冰相面积逐渐增加,渗流通道减小,导致恒定流量条件下液相流速加剧、热对流强度增强,因此在裂隙两侧冰相外凸处出现冰相消融现象;当冻结渗流达到稳态时,液相流动雷诺数显著大于初始值,压力梯度与流量大致成线性关系,较大流量对冰相冻结速率有明显的抑制作用。

关键词:冻结渗流;可视化试验;液-冰相变;消融现象;寒区工程

中图分类号:TD804;TU45 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0218-09

Visualized Experimental Study on the Frozen Seepage Flow Law Through Rock Fractures Under Low Temperature

YANG Xiaoliang[1,2], *WANG Yunfeng*[3], *SHENG Jianlong*[1,2], *ZHOU Xin*[1,2], *WANG Nan*[4], *ZHOU Wen*[5]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.Hubei Key Laboratory of Efficient Utilization and Blocking of Metallurgical Mineral Resources, Wuhan, Hubei 430081, China;
3.Pinghu Municipal Bureau of Water Resources, Pinghu, Zhejiang 314200, China;
4.Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430077, China;
5.Huanglongtan Hydropower Plant, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Shiyan, Hubei 442000, China)

Abstract: Both rock slope instability and tunnel collapse disasters in cold regions are related to the frozen seepage flow in rock fractures. In order to explore the evolution mechanism of the frozen seepage flow in rock fractures at low temperature, a visualized experiment platform for frozen seepage flow in rock fractures under low temperature conditions was developed, and experiments of low temperature frozen seepage flow in rock fractures under different flow conditions were carried out. Based on the image-processing technology, the dynamic development process of liquid-ice phase transition was quantified, then the relationships between the liquid-ice phase transition and the frozen seepage flow properties were analyzed. The results show that due to the difference in heat exchange intensity between liquid phase and fracture surfaces, the liquid phase is frozen firstly in the upper and lower regions of fracture outlet in the frozen seepage flow process. With the development of frozen seepage flow, the areas of ice phase increase gradually, and the seepage channel decreases accordingly, which results in the increase of liquid phase velocity and an intensification of thermal convection intensity under constant flow conditions, so that the ablation phenomenon occurs at the convex places of the ice phase on both sides of the fracture. When the frozen seepage flow reaches a

* **收稿日期**:2024-09-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(42077243)
作者简介:杨晓亮(1999—),男,山西孝义人,硕士研究生,主要研究方向为岩体裂隙低温冻结渗流。E-mail:xlwustyang@163.com
通信作者:盛建龙(1964—),男,湖南湘阴人,博士,二级教授,博士生导师,主要从事岩土工程和采矿工程研究工作。E-mail:wkdsjl@163.com

steady state, the Reynolds number of liquid phase flow is obviously greater than its initial value, and the pressure gradient is roughly linear with the flow. Furthermore, the larger flow has an obvious inhibitory effect on the freezing rate of the ice phase.
Key words: Frozen seepage flow, Visualized experiment, Liquid-ice phase transition, Ablation phenomenon, Cold region engineering

0 引言

寒区隧道工程、边坡工程、高山岩体开裂崩塌灾害等均涉及裂隙低温冻结渗流问题[1-3]。岩体裂隙构成了地下水的主要渗流通道，而低温作用会引起部分裂隙水结冰，导致裂隙渗流通道减小，进而影响裂隙渗流过程，改变岩体应力平衡状态[4]。因此，开展低温作用下岩体裂隙冻结渗流演化规律研究对寒区岩体稳定性和灾害控制具有重要意义。

目前，学者们对常温下岩体裂隙渗流规律进行了大量的研究，并取得了相当丰硕的成果[5-8]。然而，不同于常温渗流，岩体裂隙低温冻结渗流过程中存在液-冰相变现象，诸多学者通过可视化技术，研究了液-冰相变作用下岩体内部微观结构损伤演化规律[9-10]。液相冻结不仅会损伤岩体结构，还会阻塞渗流通道，造成岩体渗透率降低[11]。刘泉声等[12]结合液-冰相变、能量守恒理论，基于双重孔隙介质模型，提出了裂隙岩体低温热-水-力(T-H-M)耦合模型，并对寒区隧道围岩进行冻结模拟，结果表明，受液-冰相变作用的影响，围岩渗透性明显下降；HAN 等[13]同样考虑液-冰相变建立低温 T-H-M 耦合模型，通过模拟低温液氮注入页岩气储层过程，指出孔隙液-冰相变会降低其有效渗透率。目前关于液-冰相变过程对岩体渗透性影响的研究，大多数学者主要关注岩体孔隙中水分迁移问题。然而，由于裂隙几何结构特征与孔隙介质有着本质的区别，这些结果并不完全适用于宏观的裂隙冻结渗流过程。

部分学者对岩体裂隙冻结渗流进行了研究，高娟等[14]提出考虑渗流条件的裂隙冻结模型，采用 COMSOL 软件研究岩体裂隙低温冻结渗流特性，发现随着液-冰相变程度的积累，液相渗流速度峰值点逐渐向出口推移；VITEL 等[15]建立了岩体水-热耦合模型，研究液-冰相变对上、下游流速的影响，结果表明，随着压力水头的增加，液-冰相变速率减缓，因此上游液相流速变化幅度降低；黄诗冰等[16]综合考虑液-冰相变过程与裂隙渗流条件，提出岩体裂隙低温水-热(T-H)耦合模型，指出增加压力水头会显著降低液相冻结程度；宋雷等[17]基于类似模型研究恒压条件下岩体裂隙低温冻结渗流，发现液-冰相变会导致岩体裂隙渗透性降低；SEMIN 等[18]建立了考虑裂隙渗流的岩体传热-传质耦合模型，研究了地下水渗流对裂隙液-冰相变的影响。目前，数值模拟已成为研究岩体裂隙低温渗流特性的主要方法，而模型试验难以直接观测到液-冰相变过程，导致基于试验手段分析液-冰相变过程对岩体裂隙冻结渗流特性影响的研究较少。

因此，本研究针对寒区岩体裂隙冻结渗流问题，研发了一种新型的岩体裂隙低温冻结渗流可视化试验装置，结合高清成像方法与图像处理技术，探究了冻结渗流过程中液-冰相变与裂隙渗流特性的演化规律，以期为寒区岩质边坡灾害防治提供一定的试验参考与数据支撑。本文的研究目的在于：探究岩体裂隙模型在不同流量条件下液-冰相变动态演化规律；分析液-冰相变动态演化对裂隙模型冻结渗流特性的影响。

1 岩体裂隙低温冻结渗流试验

1.1 试验装置

为研究岩体裂隙低温冻结渗流演化规律，自主研发了“岩体裂隙低温冻结渗流可视化试验装置”，如图 1(a)所示。该试验装置由制冷系统、观测系统、输水系统和数据采集系统组成。

(1) 制冷系统。试样仓设有循环制冷装置，最低可将试样仓温度降低至 -25 ℃，控制精度为 ±0.5 ℃。

(2) 观测系统。在试样仓顶部布设高清摄像头，可实时观测裂隙试样的冻结渗流情况；为便于调焦以及增强可视化效果，试样仓底部设有自动伸缩架和平行板灯。

(3) 输水系统。采用兰格 WT600-2J 蠕动泵，泵送流量为 $9.45\times10^{-7}\sim8.36\times10^{-6}$ m^3/s，流量控制精度为 ±1%。

(4) 数据采集系统。控制面板采用 4 通道 PLC

一体机,试验过程中压力传感器实时记录进出口水压,温度传感器实时记录储液箱内液相温度。试验装置实物如图 1(b)所示。

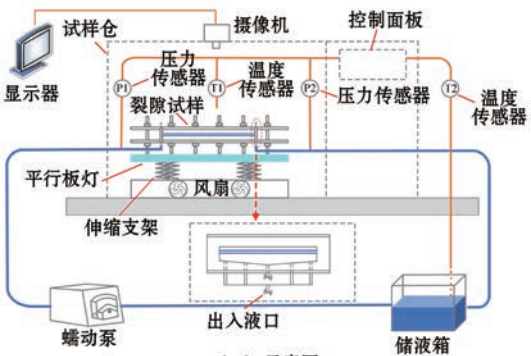


图 1 试验装置

Fig.1 Test equipment

1.2 透明裂隙试样制备

在两块透明亚克力板(300 mm×150 mm×30 mm)中央雕刻近似光滑的裂隙空间(200 mm×100 mm×1 mm)。为使液相均匀流入和流出裂隙,裂隙面短边端设有蓄液槽,下板每个蓄液槽内各设有 5 个出入液孔。亚克力板四周设有 16 个螺丝孔,通过螺栓锚固将两块亚克力板合并形成开度为 2 mm 的透明光滑裂隙试样,如图 2 所示。

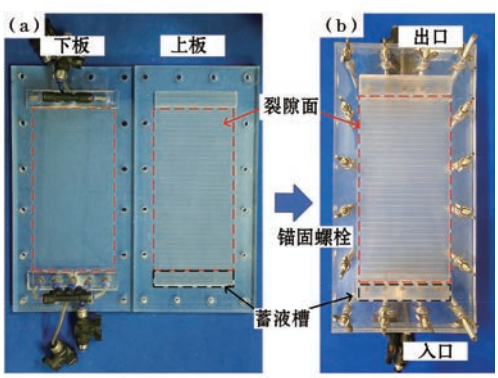


图 2 裂隙试样

Fig.2 Fracture sample

1.3 试验步骤

(1) 配制泥沙悬浊液作为液相。地下河流中泥沙颗粒的存在使得裂隙渗流规律复杂多变[19],渗流泥沙含量约为 1.0～7.7 kg/m^3[20],本研究液相的泥沙含量取 5.0 kg/m^3。将原始泥沙通过空气干燥至恒重,并经打磨和筛选后,配制 5 L 泥沙悬浊液。每次试验泥沙悬浊液重新配制,减少泥沙损耗对试验的影响;试验过程中每隔 30 min 使用搅拌棒搅拌悬浊液,降低泥沙颗粒沉淀。

(2) 将裂隙试样装入试样仓,通过水平仪调平裂隙试样,削弱重力对试验的干扰,连接进出液口、蠕动泵和储液箱,形成循环输水系统。每次试验结束后清理管道和裂隙面,减少泥沙附着造成的误差。

(3) 盖上试样仓盖,在试样仓盖中部安装高清摄像头,连接显示屏,调节观测系统,保证图像清晰。

(4) 启动制冷系统,岩体冻结温度集中于－40～－10 ℃,因此设置环境温度为－25 ℃[21-23]。试样仓底部设有用于扩散冷气的风扇,使试样仓内温度分布均匀。控制面板会实时记录储液箱温度,每隔 3 s 记录一次渗流压力数据。

(5) 启动蠕动泵,每组试验蠕动泵流量分别为 9.45×10^{-7} m^3/s、1.10×10^{-6} m^3/s、1.26×10^{-6} m^3/s 和 1.41×10^{-6} m^3/s[24],通过水浴装置将泥沙悬浊液的初始温度控制为 12 ℃。通过试验观察可知,裂隙冰相在 9 h 左右相继出现消融现象,且在 11 h 时液相温度趋于稳定,所以每组裂隙试样进行 11 h 低温冻结渗流试验,重复 3 次以保证数据可靠性。

2 试验结果分析

2.1 液－冰两相可视化分析

如图 3 所示,采用图像处理技术,可视化分析裂隙模型低温冻结渗流(渗流方向由左至右)的液－冰相变演化过程,具体流程如下:

(1) 通过高清摄像头实时记录冻结渗流试验过程,每隔 1 h 截取一次试验原图,如图 3(a)所示;

(2) 采用 MATLAB 软件对试验原图进行裁剪和灰度化处理,得到裂隙中液－冰两相分布灰度图,如图 3(b)所示。

(3) 使用 Photoshop 调整灰度图的色彩与饱和度,其中液相和冰相分别由深蓝色和浅蓝色表示,如图 3(c)所示(颜色标识见电子版)。

（4）利用 ImageJ 分别测量液相与冰相区域面积，得到冰相区域面积占比动态演化数据。

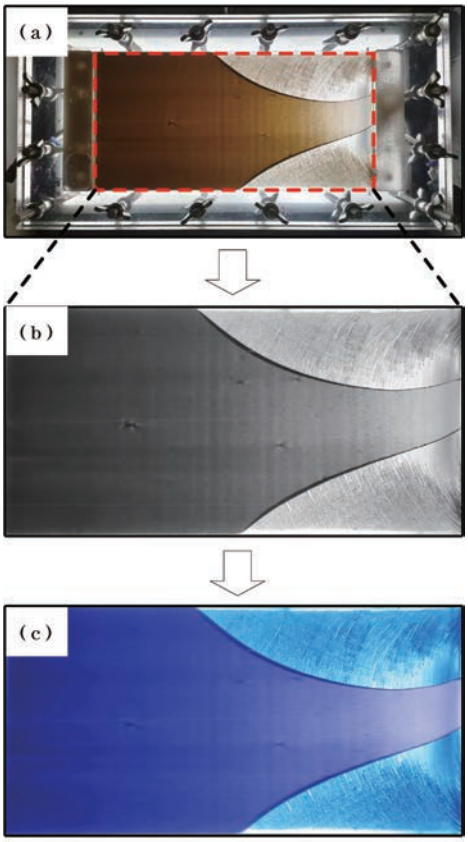


图 3　可视化图像处理过程

Fig.3　Visualized image-processing process

图 4 为不同流量条件下裂隙在不同时刻的液－冰两相分布图。由图 4 可以看出，随着冻结渗流时间的推移，裂隙冰相区域面积持续增加，该现象印证了高海拔冰山基岩（海拔约 3 500 m）中存在大量裂隙冰的事实[4]。由于液相在渗流过程中与温度较低的裂隙存在冷量交换，裂隙出口的液相温度更低，更利于液－冰发生相变。然而，与裂隙中间区域的液相相比，裂隙两侧边缘的液相除了与裂隙上、下面进行热传导，还与裂隙两侧壁面存在一定程度的热传导，因此冻结渗流初期，裂隙出口处的上、下两侧最先出现冻结现象（由图 4 中红色实线方框标出，颜色标识见电子版）。

此外，在冻结渗流初期，裂隙内液相流速较为稳定，因此上、下面冰相增长速率大致相同，呈现为对称发展趋势。然而，当冻结渗流过程达到 3 h 时，裂隙上、下面冰相的增长程度开始出现不对称的发展趋势，该趋势在大多数流量条件下随冰相面积逐渐增大而变得更加显著。例如，当渗流时间为 11 h 时，在流量为 1.410×10^{-6} m^3/s 条件下，冻结的冰相基本只分布于裂隙上侧区域。值得注意的是，在流量为 1.260×10^{-6} m^3/s 条件下，裂隙上、下面的冰相分布的非对称特征不太明显，这可能是流体流动的复杂性和流场分布的随机性导致的，与 ALZOUBI 等[25]和 YANG 等[26]的双孔人工冻结渗流试验或模拟现象推论类似。

为进一步定量表征冻结渗流过程中的液－冰相变特征，图 5 给出了冰相区域面积占比随时间推移的变化。由图 5 可以看出，冰相在冻结渗流时间为 2 h 时开始萌生，随后冰相区域面积占比不断增大；在相同冻结渗流时间条件下，冰相区域面积占比随渗流流量的增加而减小，说明较大流量会降低裂隙内冰相的冻结速率。这是由于液相在较大流量条件下流速增大，其热对流程度增强，抑制了冰相的发展程度。值得注意的是，在冻结渗流初期，不同流量条件下裂隙冰相冻结前缘的位置相对较近，这是因为液相存在较高的初始温度，致使其在渗流过程中难以到达相变冻结温度，流量对裂隙渗流初期的冻结速率影响相对较小。

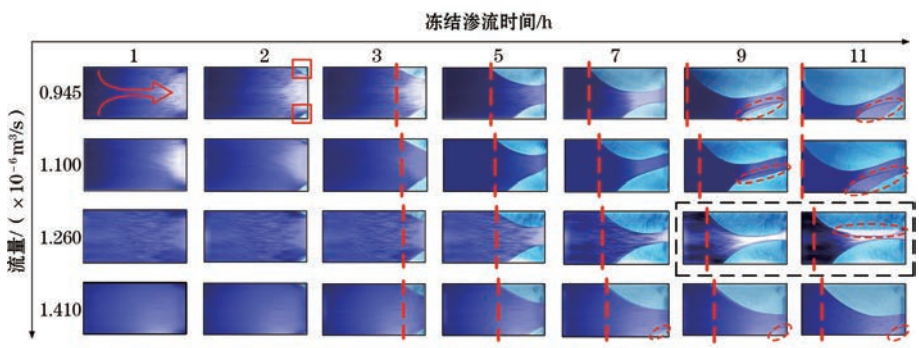


图 4　不同时刻裂隙液－冰两相分布

Fig.4　Distribution of liquid-ice phase in fracture at different moments

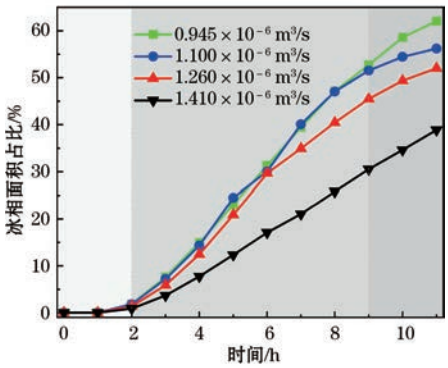


图 5 冰相占比随时间变化关系

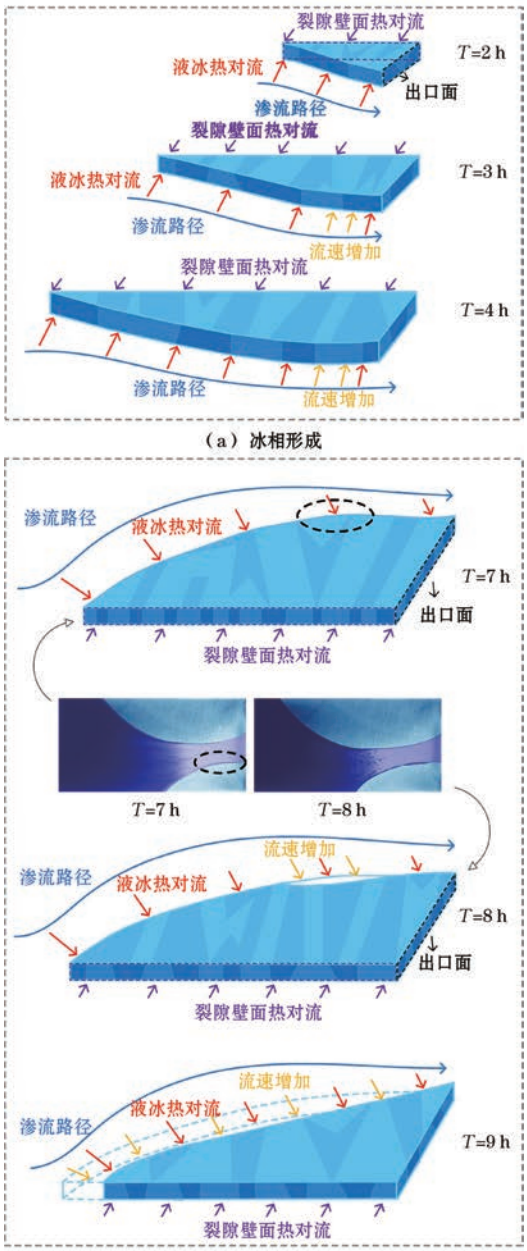
Fig.5 Variation of ice phase ratio over time

需要注意的是,渗流后期各冻结渗流流量条件下裂隙冰相均发生消融现象(图 4 红色虚线圈出),其中流量为 1.410×10^{-6} m³/s 时最为突出,由于其渗流速度较大,在 7 h 时冰相消融现象已较为明显,相对于其他流量条件提前约 2 h。

2.2 冰相消融机理

为探究冰相消融现象演化机理,以流量条件 0.945×10^{-6} m³/s 为例,绘制了冰相形成和消融的演化过程,如图 6 所示。由于在冰相形成阶段,下侧冰相的演化特征与上侧冰相大致相同,仅对上侧冰相的形成过程进行分析。此外,冰相形成过程中的形态演化特征为冰相消融现象的基础,所以首先对冰相形成的机理进行分析。

如图 6(a)所示,冰相区域面积在渗流冻结时间 $T=2$ h 时较小,裂隙壁与冰相各区域之间的热传导值相对均匀,同时,液相热对流沿渗流路径也较为均衡[25],因此冰相邻近渗流通道的边缘形态大致为直线型。然而,随着冰相区域面积持续扩大,裂隙壁施加于冰相区域的冷量沿传热路径逐渐降低、不再呈均匀分布,致使出口处的冰相发展程度在 $T=3$ h 时减缓。此外,在渗流通道减小的影响下,出口处的液相流速逐渐增加,导致此处液相的热对流速率提高,进一步抑制了出口处冰相的发展程度,冰相边缘形态转化为折线型。当 $T=4$ h 时,冰相边缘的渗流路径明显增加,沿该渗流路径液相热对流逐渐衰弱,冰相冻结前缘发展程度也随之减缓,因此相较于冻结前缘和出口区域,冰相中部区域发展程度较为突出,冰相边缘形态由此转化为外凸的曲线型。需要注意的是,随着冻结渗流过程的进行,在大多数流量条件下,冰相边缘的外凸处逐渐由出口端向入口端推移。



(a) 冰相形成

(b) 冰相消融

图 6 冰相形态演化示意

Fig.6 Schematic of the evolution of the ice phase morphological

由图 6(b)可以看出,$T=7$ h 时,下侧冰相边缘形态为外凸的曲线型,且其外凸处邻近出口(图中黑色虚线圈出,颜色标识见电子版),在恒定流量条件下,此处液相流速的加剧程度更为突显,进而导致此处液相热对流速率明显增大,因此 $T=8$ h 时此处裂隙冰相最先出现消融现象。然而,与下侧冰相的消融程度相比,上侧冰相的发展程度更为突出,致使裂隙渗流通道愈发狭窄,引起下侧冰相外凸处持续消融。$T=9$ h 时,由于上侧冰相冻结前缘逐渐接近

入口，因此液相流速在进入裂隙时就开始逐步提高，直至下侧冰相外凸处明显增加，进一步促进消融发生，冰相边缘形态演化为直线型。$T=11$ h 时，冰相的消融面积占下侧冰相原始面积的 63.92%。GAO 等[27]和 LONG 等[28]通过人工地面冻结渗流试验和模拟指出，在冻结渗流过程中液相热对流以及液相与裂隙之间的热传导作用会显著影响裂隙温度场，其中液相的热对流过程将严重削弱冰相冻结前缘的发展程度；LI 等[29]开展了冻土冻结渗流试验，发现在冻结渗流后期，冻土温度场逐渐趋于稳定，同时液相冻结速率减缓；LI 等[30]实施了人工地面冻结渗流试验，结果表明，在较大流量条件下，裂隙温度场可能会达到热平衡状态，从而导致液相停止冻结。以上研究结果充分说明，随着冻结渗流时间的推移，在液相热对流和裂隙热传导的作用下，裂隙内温度场将趋于稳定，液－冰相变演化速率随之降低直至不再演化，在本文试验条件下则出现消融现象。

2.3　渗流演化规律

图 7 和图 8 分别为液相温度与进出口压力差随冻结渗流时间推移的演变关系。

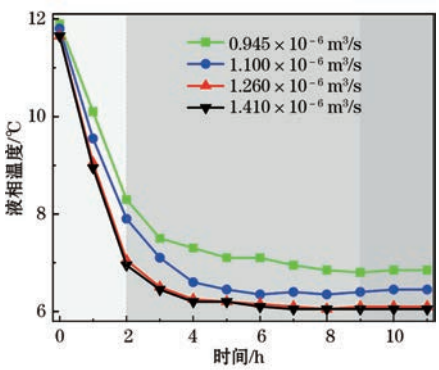


图 7　液相温度随时间变化关系

Fig.7　Variation of liquid phase temperature over time

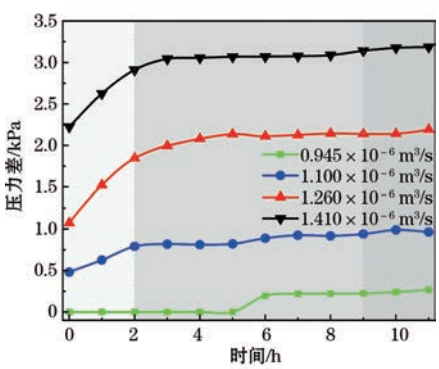


图 8　压力差随时间变化关系

Fig.8　Variation of pressure difference over time

如图 7 所示，在冻结渗流初期，由于液相与裂隙之间存在较大的温差，两者之间的热传导效应突出，裂隙冷量主要用于降低液相温度，因此液相温度迅速下降；然而，在冻结渗流中期，液相温度的下降速率已明显降低，结合图 5 分析可知，裂隙内冰相区域面积已开始逐渐发展，这说明液相温度已经邻近相变冻结点，因此液相与裂隙之间的热传导效应明显减弱；在冻结渗流后期，液相温度降低程度有明显的稳定趋势，但仍为正温，表明在渗流作用下液相仍会保持液态。此外，随着流量的增加，液相温度整体呈现降低倾向，且由图 5 可知，冰相发展程度同样随着流量的增加而降低。这是因为在较大流量下，液相的热对流程度增强，单位时间内液相可以摄取更多的冷量，然而由于流速加快，液相在裂隙内停留的时间减少，难以吸取足够的冷量以冻结为冰相。

如图 8 所示，在冻结渗流初期，进出口压力差明显增加，这可能是因为液相存在一定程度的泥沙颗粒，从而对液相的流动形态造成了干扰。同时，随着液相温度的迅速降低以及泥沙颗粒的不断沉淀，液相在冻结渗流过程中的阻力提升，因此裂隙渗透压力明显增加，与 DOU 等[31]在单裂隙渗流试验中的现象类似。在冻结渗流中后期，由于冰相区域面积的持续增加，裂隙渗流通道不断减小，所以压力差保持一定程度的增长趋势。此外，在各冻结渗流时刻下，压力差均随流量的增加而逐渐提高。

为量化分析在液－冰相变影响下流量对冻结渗流进出口压力差的影响，以渗流稳定时刻 $T=11$ h 为例，绘制了冰相区域面积占比、压力梯度随流量增加的演化特征，并对压力梯度进行线性拟合，如图 9 所示。可以看出，裂隙冻结渗流的压力梯度与流量条件大致成线性关系。然而，压力梯度与冰相区域面积占比成明显的负相关性。这是因为流量与冰相区域增加均会提高裂隙压力梯度，然而，较大流量还会抑制冰相区域发展程度，从而减小压力梯度的增长速率。

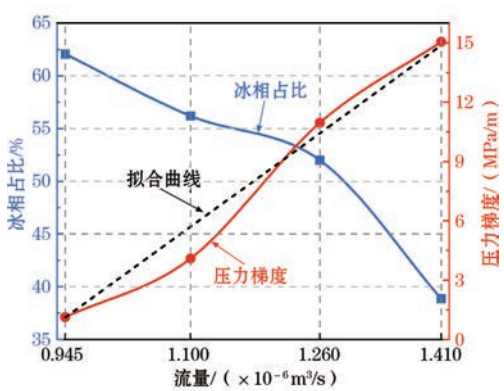


图 9　稳态期冰相占比和压力梯度随流量变化

Fig.9　Variation of ice phase ratio and pressure gradient with flow rate during steady state period

雷诺数是表征裂隙内流体流动状态的关键参数,对于理解裂隙内液相的渗流特性具有重要意义。因此,本研究通过引入雷诺数 Re,对比分析了试验初始阶段与达到稳定状态时裂隙内液相的流动特性[32],见式(1)。

$$Re=\rho Q/\mu\omega \tag{1}$$

式中:ρ 为液相的密度;Q 为液相的流量;ω 为裂隙宽度,其值随着实际渗流通道减小而下降;μ 为液相的动力黏滞系数,本研究采用绝对温度计算液相的动力黏滞系数,见式(2)。

$$\mu=0.661\ 2\lambda(T-299)^{-1.561\ 2} \tag{2}$$

式中,λ 为液相与纯水的动力黏滞系数换算系数,此处取 $\lambda=1.292\ 23$[33-34]。

如图 10 所示,在冻结渗流初期,雷诺数与流量之间呈线性关系,且斜率较缓。然而,当 $T=11$ h 时,雷诺数随流量的增加明显升高,同时两者之间偏离线性关系,这说明裂隙内流态随着流量的增加而明显变化,且流量越大变化越明显,致使裂隙内液相流速加快,从而减缓冰相区域发展。

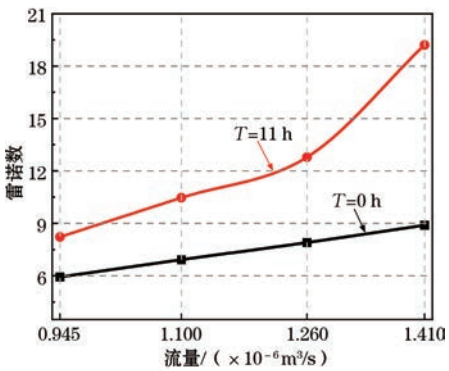


图 10 液相雷诺数随时间变化

Fig.10 Variation of Reynolds number of liquid phase over time

3 结论

通过岩体裂隙低温冻结渗流可视化试验平台开展了不同流量条件下的岩体裂隙冻结渗流试验,分析裂隙液-冰相变的动态演化过程,探求液-冰相变过程中裂隙渗流特性的发展规律,得出以下主要结论。

(1) 渗流演化规律揭示了液相温度与裂隙内冰相区域面积之间的动态关系。在冻结渗流初期,液相温度迅速下降,表明热传导效应显著,裂隙出口上、下两侧邻近区域最先冻结;随着冰相区域的逐渐扩展,液相温度下降速率减缓,裂隙内温度场达到热平衡状态,表现为冰相消融现象;在渗流冻结时间为 11 h 时,冰相的消融面积占下侧冰相原始面积的 63.92%。

(2) 在冻结渗流初期,进出口压力差明显增加,这与液相中泥沙颗粒的干扰及液相温度的迅速降低有关;随着冰相区域面积的增加,裂隙渗流通道减小,导致压力差持续增长,并逐渐趋于稳定;压力梯度与流量成正比,与冰相区域面积成反比,这是因为较大流量会抑制冰相区域发展程度,从而减小增长速率。

(3) 雷诺数分析进一步证实了流量增加导致裂隙内流态的显著变化,且流量越大流态变化越明显,致使裂隙内液相流速加快,减缓冰相区域发展。

参考文献(References):

[1] 杨更社,周春华,田应国.寒区软岩隧道的水热耦合数值模拟与分析[J].岩土力学,2006,27(8):1258-1262.
YANG Gengshe, ZHOU Chunhua, TIAN Yingguo. Numerical simulation and analysis of moisture-heat coupling for soft rock tunnel in cold regions[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(8):1258-1262.

[2] 陈辉,殷浩杰,张军辉,等.寒区矿山边坡冻融岩石细观结构及分形维数研究[J].矿业研究与开发,2022,42(4):50-54.
CHEN Hui, YIN Haojie, ZHANG Junhui, et al. Study on meso-structure and fractal dimension of freezing-thawing rock in mining slope in cold region[J]. Mining Research and Development,2022,42(4):50-54.

[3] ZHOU Y S, LI X, ZHENG D H, et al. The joint driving effects of climate and weather changes caused the Chamoli glacier-rock avalanche in the high altitudes of the India Himalaya[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64: 1909-1921.

[4] GRUBER S, HAEBERLI W. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2007,112(F2):F02S18.

[5] 樊鑫成,叶祖洋,黄诗冰,等.岩体三维裂隙网络地质熵与渗透特性关系研究[J].力学学报,2023,55(3):792-804.
FAN Xincheng, YE Zuyang, HUANG Shibing, et al. Study on connectivity and entropy scale of three-dimensional fracture network[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2023,55(3):792-804.

[6] 田霄,叶祖洋,罗旺.岩体裂隙几何结构对其渗流传热特性的影响[J].岩土力学,2023,42(12):3512-3521.
TIAN Xiao, YE Zuyang, LUO Wang. Effect of rock fracture geometry on its seepage and heat transfer characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,42(12):3512-3521.

[7] ZHOU X, SHENG J L, YE Z Y, et al. Two-phase flow visualization experiments in variable-aperture fractures: the correlation between flow structure, displacement efficiency and relative permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 176: 105693.

[8] 周新，盛建龙，叶祖洋.基于LBM的粗糙裂隙内两相驱替渗流特性模拟研究[J].力学学报，2024，56(5)：1475-1487.
ZHOU Xin, SHENG Jianlong, YE Zuyang. Study on two-phase displacement flow behavior through rough-walled fractures using LBM simulation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(5): 1475-1487.

[9] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 74(2): 555-565.

[10] 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(增刊1)：521-529.
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, 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(Suppl. 1): 521-529.

[11] LIU N F, YANG Y L, LI N, et al. The stability issue of fractured rock mass slope under the influences of freeze-thaw cycle[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 5674.

[12] 刘泉声，康永水，刘滨，等.岩体裂隙水-冰相变及低温温度场-渗流场-应力场耦合研究[J].岩石力学与工程学报，2011，30(11)：2181-2188.
LIU Quansheng, KANG Yongshui, LIU Bin, et al. Water-ice phase transition and thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2181-2188.

[13] HAN S C, CHENG Y F, GAO Q, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model with ice-water phase change for liquid nitrogen injection simulation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108676.

[14] 高娟，冯梅梅，杨维好.渗流作用下裂隙岩体冻结温度场分布规律研究[J].采矿与安全工程学报，2013，30(1)：68-73.
GAO Juan, FENG Meimei, YANG Weihao. Research on distribution law of frozen temperature field of fractured rock mass with groundwater seepage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 68-73.

[15] VITEL M, ROUABHI A, TIJANI M. Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 73: 1-15.

[16] 黄诗冰，刘泉声，程爱平，等.低温裂隙岩体水-热耦合模型研究及数值分析[J].岩土力学，2018，39(2)：735-744.
HUANG Shibing, LIU Quansheng, CHENG Aiping, et al. A coupled hydro-thermal model of fractured rock mass under low temperature and its numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 735-744.

[17] 宋雷，王国柱，杨成立，等.渗流岩体裂隙冻结温度场模型试验研究[J].采矿与安全工程学报，2019，36(6)：1256-1263.
SONG Lei, WANG Guozhu, YANG Chengli, et al. Model test study on freeing temperature field of seepage fissure rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1256-1263.

[18] SEMIN M A, LEVIN L Y, PARSHAKOV O S. Influence of groundwater seepage on artificial freezing of rock mass[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2021, 94(1): 45-55.

[19] SONG W H, WANG Z, LIU X X, et al. Flow and heat transfer characteristics of seepage-channel wall to injected suspended particles in a groundwater heat pump system[J]. Geothermics, 2022, 103: 102411.

[20] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(2023)[M].北京：中国水利水电出版社，2024.
Ministry of Water Resources of the People's Repuldic of China. China river sediment bulleton (2023)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2024.

[21] JACOBSEN S, SELLEVOLD E J, MATALA S. Frost durability of high strength concrete: effect of internal cracking on ice formation[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(6): 919-931.

[22] PENTTALA V. Freezing-induced strains and pressures in wet porous materials and especially in concrete mortars[J]. Advanced Cement Based Materials, 1998, 7(1): 8-19.

[23] KAUFMANN J P. Experimental identification of ice formation in small concrete pores[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1421-1427.

[24] 那通兴，张国柱，陈俊栋.寒区隧道含相变围岩传热渗流耦合数值分析[J].隧道建设(中英文)，2018，38(增刊2)：144-150.
NA Tongxing, ZHANG Guozhu, CHEN Jundong. Coupling numerical analysis of heat transfer and seepage flow of surrounding rocks with phase transition in cold region tunnels[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(Suppl. 2): 144-150.

[25] ALZOUBI M A, MADISEH A, HASSANI F P, et al. Heat transfer analysis in artificial ground freezing under high seepage: validation and heatlines visualization[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 139: 232-245.

[26] YANG X, JI Z Q, ZHANG P, et al. Model test and numerical simulation on the development of artificially freezing wall in sandy layers considering water seepage[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100293.

[27] GAO G Y, GUO W, REN Y X. Coupled modelling of artificial freezing along clay-sand interface under seepage flow conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 211: 103865.

[28] LONG W, RONG C X, SHI H, et al. Temporal and spatial evolution law of the freezing temperature field of water-rich sandy soil under groundwater seepage: a case study[J]. Processes, 2022, 10(11): 2307.

[29] LI X K, LI X, LIU S A, et al. Thermal-seepage coupled numerical simulation methodology for the artificial ground freezing process[J].Computers and Geotechnics,2023,156:105246.

[30] LI Z M, CHEN J, SUGIMOTO M, et al. Numerical simulation model of artificial ground freezing for tunneling under seepage flow conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2019,92:103035.

[31] DOU Z, CHEN Z, ZHOU Z F, et al. Influence of eddies on conservative solute transport through a 2D single self-affine fracture [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,121:597-606.

[32] ZHOU J Q, WANG M, WANG L C, et al. Emergence of nonlinear laminar flow in fractures during shear[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51:3635-3643.

[33] THOMAS H R, SANSOM M R. Fully coupled analysis of heat, moisture, and air transfer in unsaturated soil [J]. Journal of Engineering Mechanics,1995,121(3):392-405.

[34] 费祥俊.高浓度浑水的粘滞系数(刚度系数)[J].水利学报,1982(3):57-63.
FEI Xiangjun. Viscosity coefficient (stiffness coefficient) of highly concentrated turbid water[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1982(3):57-63.