

低温岩体裂隙中水分迁移机理试验研究^{*}

王莉平¹, 李宁¹, 刘乃飞¹, 徐栓海²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048;
2. 中煤科工集团 西安研究院有限公司工程地质研究所, 西安 710077)

摘要: 含有冰夹层的节理及裂隙广泛存在于寒冷潮湿地区的基岩中, 这些冰夹层的存在一方面会改变地形地貌, 另一方面会对工程建设造成潜在的安全隐患。要探究含冰节理及裂隙的成因, 最关键的问题之一为包含冰水相变的岩体裂隙中的水分迁移机理。本文采用类岩石材料为研究对象, 在其中预制裂隙以模拟垂直节理岩体。试样底部具有补水条件, 同时利用控温板对顶部进行降温, 以此来模拟低温岩体中垂直开放裂隙中的水分迁移情况。试验结果证实: 岩体裂隙中的确发生了水分迁移, 迁移形态可分为气态与液态, 且两种状态的迁移水量相当, 同时利用毛细理论对液态迁移进行了分析, 证实了在迁移过程中温度梯度间接起到了驱动力的作用。这些研究成果可以帮助明晰裂隙中的冰水相变过程, 最终可用于构建低温下多场耦合理论, 为寒区工程的修建、运营及维护提供依据, 并可进一步了解寒区地形地貌的形成过程。

关键词: 低温裂隙岩体; 低温多场耦合; 水分迁移; 冰水相变

中图分类号: P583

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-0999-08

Experimental Research on Mechanism of Water Migration in Rock Fracture at Low Temperature

Wang Liping¹, Li Ning¹, Liu Naifei¹, Xu Shuanhai²

(1. Department of Civil and Architecture Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China;
2. Institute of Engineering Geology, CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, P.R. China)

Abstract: Joints and fractures containing ice interlayer are widely exist in cold and wet areas of bedrock, the presence of these ice interlayer on the one hand will change landform, on the other hand can cause potential safety hazard to the engineering construction. To explore the causes of ice joints and fractures, one of the most critical problems is the moisture migration mechanism of rock fractures which contain ice-water phase change. Based on the type of rock similar material as the research object, in which the prefabricated crack to simulate a vertical joint rock mass. At the bottom of the specimen with a water inlet conditions, temperature controlled plate is used on the top surface, to simulate the moisture migration in open vertical fracture under low temperature. The results confirm that moisture migration has indeed happened in the fracture, migration form can be divided into the gaseous and liquid, and the amounts are equal. At the same time, we analyze the water migration by using capillary theory, and confirm that the temperature gradient playing a driving force. The results of this study can help clarify the ice-water phase change process in fracture, and finally can be used to build multi-field coupling theory, which can provide the basis for the construction, operation and maintenance of engineering in cold regions, and can further understand the formation process of topography.

Keywords: freezing fractured rock mass; multi-field coupling; water migration; ice-water phase change

^{*} 收稿日期: 2017-12-01(修改稿)

作者简介: 王莉平(1978-), 女, 甘肃兰州人, 博士生, 讲师, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: emmaw1006@126.com

基金项目: 陕西省百人计划项目(No.302-253051601); 中铁资源集团有限公司科技开发计划项目(2012-重点-61)

0 引言

含有冰夹层的节理及裂隙广泛存在于寒冷潮湿地区的基岩中^[1-2]。这些冰夹层的存在,一方面在不断改变地形地貌;另一方面会对当地的工程建设造成潜在的安全隐患,如边坡的崩塌或落石、隧道围岩的冻胀开裂等^[3]。要解决以上问题,需探究含冰节理及裂隙的成因,其中最关键的因素之一为冰水相变对岩体裂隙网络的影响^[4-5]。既有研究也证实了岩体中冰水相变及其逆过程在降低岩石强度及最终导致崩解方面至关重要^[6-7],而岩体中的水热迁移则是影响冰水相变的重要环节^[4]。

冰水相变在岩体中的作用机理一直以来有两方面的观点。其中一种观点为原位冻胀学说:岩石中裂隙的产生及既有裂隙的扩展开裂是由于其中的水在变成冰时产生的9%的体积膨胀所导致,如果水完全充满岩石中的空隙且就地冻结,当温度降至-22℃时,冰的增长可以在空隙中产生高达207 MPa的压力,这个值远大于各种岩石的抗拉强度,即便冻结温度再高一些,仍然会产生很大的压力^[8]。产生原位冻胀的条件有:岩石完全或接近饱和状态;从岩石的所有边界迅速向内冻结。而这两个条件在自然界中很难完全满足。于是,在借鉴冻土中的水分迁移及冰分凝理论的基础上,Walder和Hallet认为孔隙型岩石的开裂也可能是由于水分迁移引起冰分凝的增长和聚集而导致,并建立了由于裂缝中冰的增长而导致的孔隙型岩石分解破坏的理论模型^[9-10]。以此模型为基础,Murton等^[11-13]自2000年起至2006年设计相应试验设备并进行了验证,证明了W&H模型在软岩、多孔隙型岩石中(凝灰岩、石灰岩)的正确性。同时,杨更社等^[14]研究了寒区冻融环境条件下软岩的水热迁移规律,对两种不同类型的软岩材料进行了开放系统下具有温度梯度的水热迁移试验研究,试验显示软岩中的水热迁移与冻土中有相似之处。目前,尚未有试验证实坚硬、低孔隙型岩石中是否会因冰分凝现象而导致开裂。

以上研究表明,在软弱、多孔隙型均质完整岩石中,冰分凝现象广泛存在。但自然界中的岩体更多是以岩石-裂隙的二相系统存在;相比裂隙而言,岩石本身由于孔隙度较小、渗透系数很低,可视为不透水,水分主要在裂隙中运动。对于此种系统,问题的重点在于考察低温环境下裂隙中水分的迁移及运动规律。鉴于此,本文以青海木里煤矿边坡

工程为背景,采用在类岩石材料中制作裂隙的方法模拟节理岩体,通过试验的手段来研究低温条件下裂隙中的水分迁移机理,并利用相关理论对结果进行了初步的分析及探讨。

相应的研究成果可以帮助我们明晰裂隙中的冰水相变过程,最终可用于构建低温下多场耦合理论,为寒区工程的修建、运营及维护提供依据,同时可有助于了解当地地形、地貌的演变过程。

1 试验方案

1.1 设计思路

为研究低温岩体裂隙中水分迁移机理,最为直观的方式是利用真实裂隙岩样,在实际的冻融环境下来进行观测。但真实岩样中裂隙的分布密度、宽度、走向及表面粗糙度等等因素难以控制,且实际冻融环境模拟下需要较长时间才能观测到结果。因此,从可实现性及试验效率考虑,选用与岩石性质较为接近的水泥砂浆来预制带垂直裂隙的试样。借鉴冻土中水分迁移试验方法,设计可以形成一维温度场且带有补水装置的设备进行试验研究。

1.2 模型材料及试样制作

利用水泥砂浆来预制带垂直裂隙的试样。考虑到仪器的形状及尺寸,预制直径为15 cm、高为80 cm的圆柱试样,利用内径为15 cm的PVC管作为模具。浇筑水泥砂浆时,在模具内预置直径方向的薄铁片(厚度约为1 mm),用来预制既有贯通裂隙(浇筑后24 h,将铁片抽出)。自距模具底部5 cm处起向上每间隔8 cm预留测温孔,共10处。浇筑砂浆完成后,在预留测温孔内埋设测温元件,测温元件埋设位置尽量接近裂隙。制成试样如图1所示。

1.3 试验装置

本试验的目的是了解在低温条件下岩体裂隙中水分迁移的状况及影响因素。由此出发,同时借鉴冻土中水分迁移试验的装置结构设计,本试验的装置由以下几部分构成:

(1)顶部控温系统:包括控温顶板及冷浴机,用来提供恒定的负温,以模拟自然状况下地表低温环境。冷浴机为美国产NESLAB,型号为LT-50DD,可降温至-80℃,精度为 ± 0.1 ℃。

(2)温度测量及采集系统:以预埋在试样中的测温元件来测量试样温度的变化,并通过数据传输及采集系统进行记录。为便于埋设,并降低造价,测温元件采用热电偶型,精度为 ± 2.0 ℃。

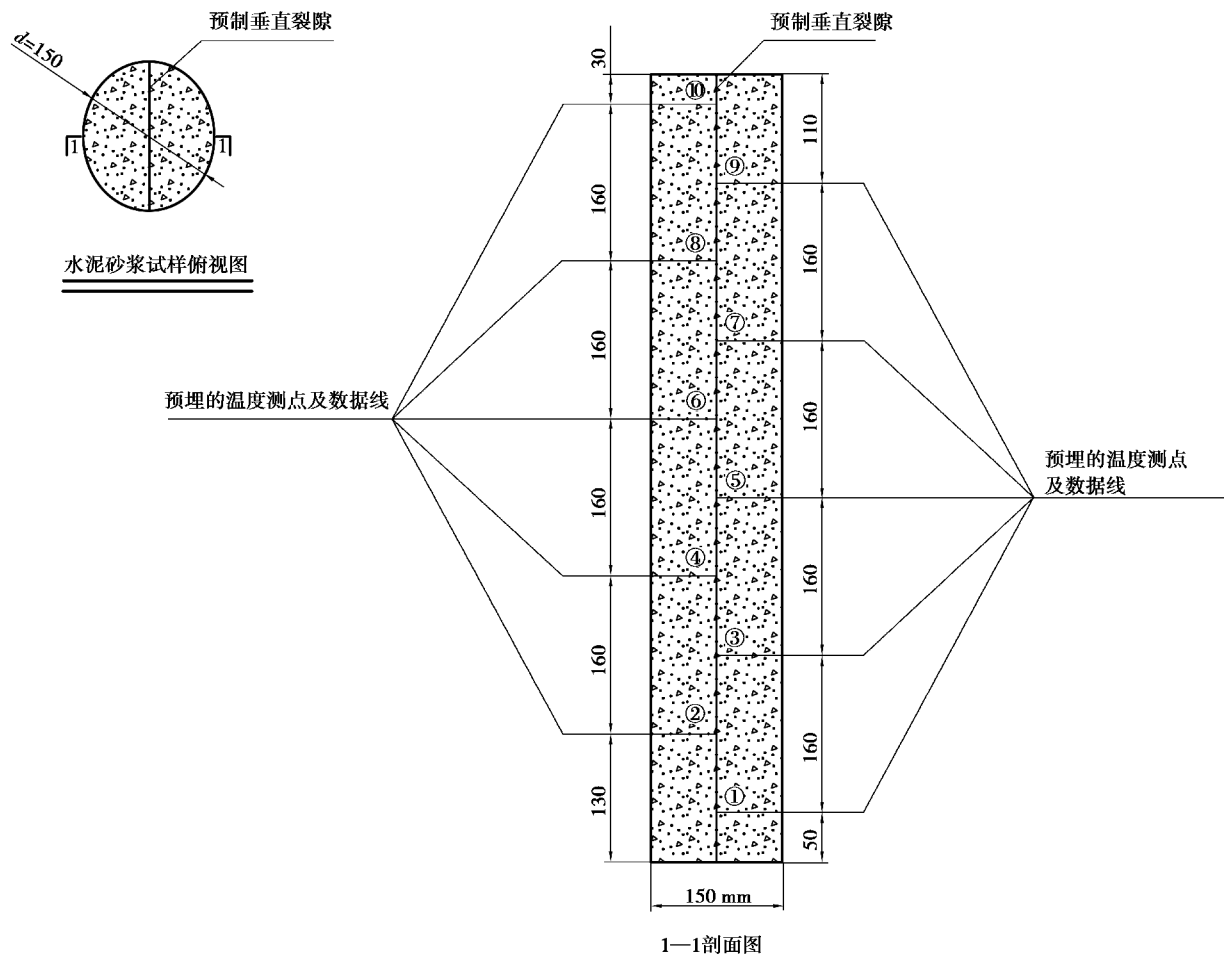


图 1 水泥砂浆试样及温度测点布置图(单位:mm)

Fig.1 Diagram of cement mortar specimen and layout of temperature sensors (unit:mm)

(3) 补水及水分测量系统:利用带橡皮塞的窄口瓶(橡皮塞上有与大气连通的细玻璃管)作为补水容器,与试样补水底板以橡皮管连接。窄口瓶位于电子秤上,可通过读取数据得知水分的变化情况,电子称读数精度到 5 g。

(4) 补水底板及围挡:承托试样,提供试样底部的补水通道,同时围挡可保持试样底部液面的稳定。

(5) 保温层:包括控温顶板及试样外围保温,主要采用橡塑海绵作为保温材料。以减少试样与周围环境之间的热交换,尽量在垂直方向上保持为一维传热状态。

具体的试验装置如图 2 所示。

1.4 试验步骤

(1) 预制好的试样在养护室养护 10 d 后,将其浸水饱和 7 d。

(2) 将浸水饱和好的试样安装在试验装置内。

(3) 通过调整补水瓶内液面的高度,使得补水利液面距离试样底部约 14 cm,将顶部控温顶板设为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,正式开始试验。

(4) 每小时采集一次试样各测点温度、环境温度及补水瓶中水分重量。

(5) 当观察到试样内各测点的温度基本保持稳定,水分不再变化时,终止试验。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

试验延续 90 h 时,试样内各测点的温度基本保持稳定,水分亦连续 30 h 无变化,故终止试验。

(1) 裂隙处迁移水量及温度梯度曲线变化图:试样裂隙中温度梯度与迁移水量对应变化如图 3 所示,迁移水量变化曲线如图 4 所示。

(2) 试验结束后裂隙表面现象观察: 试验结束后, 将试样打开, 暴露出裂隙面, 如图 5 所示, 裂隙面比较湿润, 顶部向下约 13 ~ 14 cm 处为冻结锋

面, 即零度线所在位置。在负温区, 可见裂隙表面有类似霜的凝结形式。

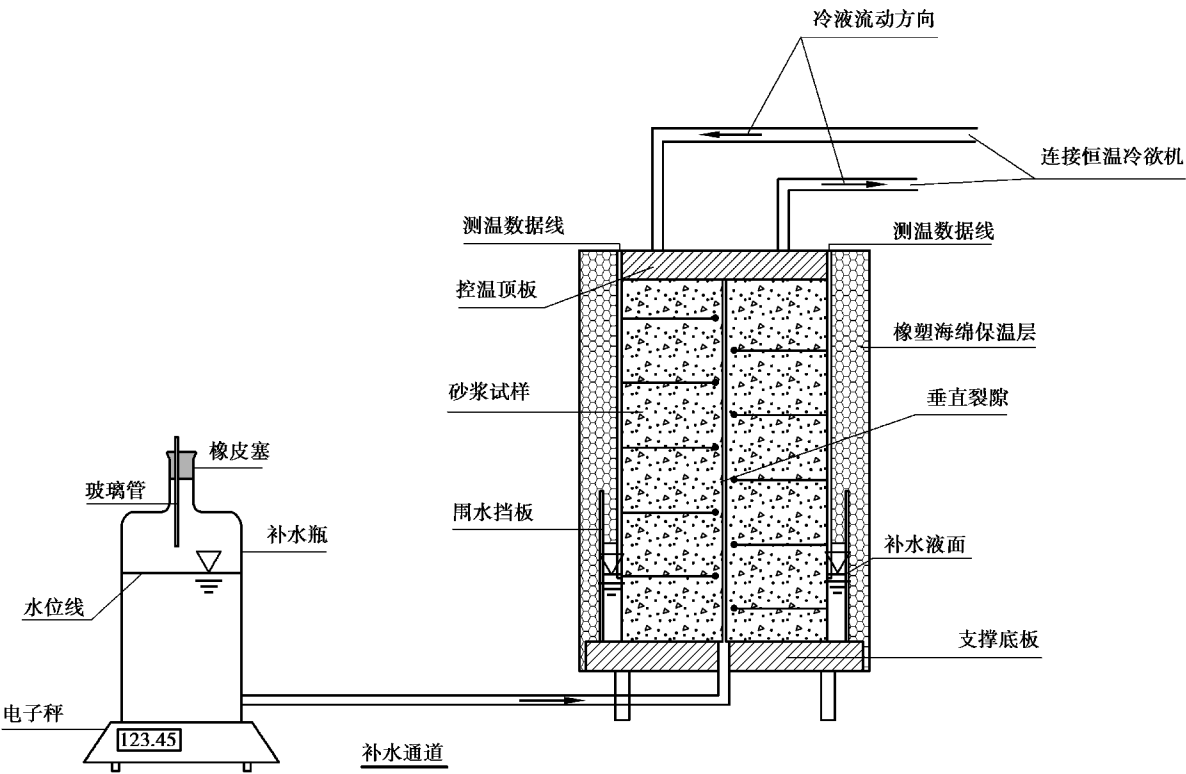
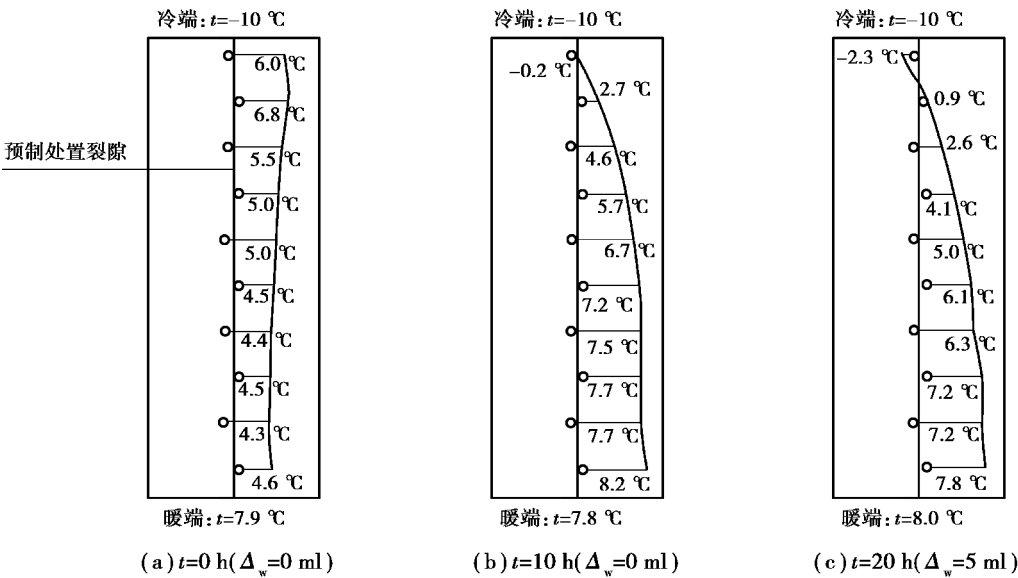


图 2 试验装置

Fig. 2 Diagram of test equipment



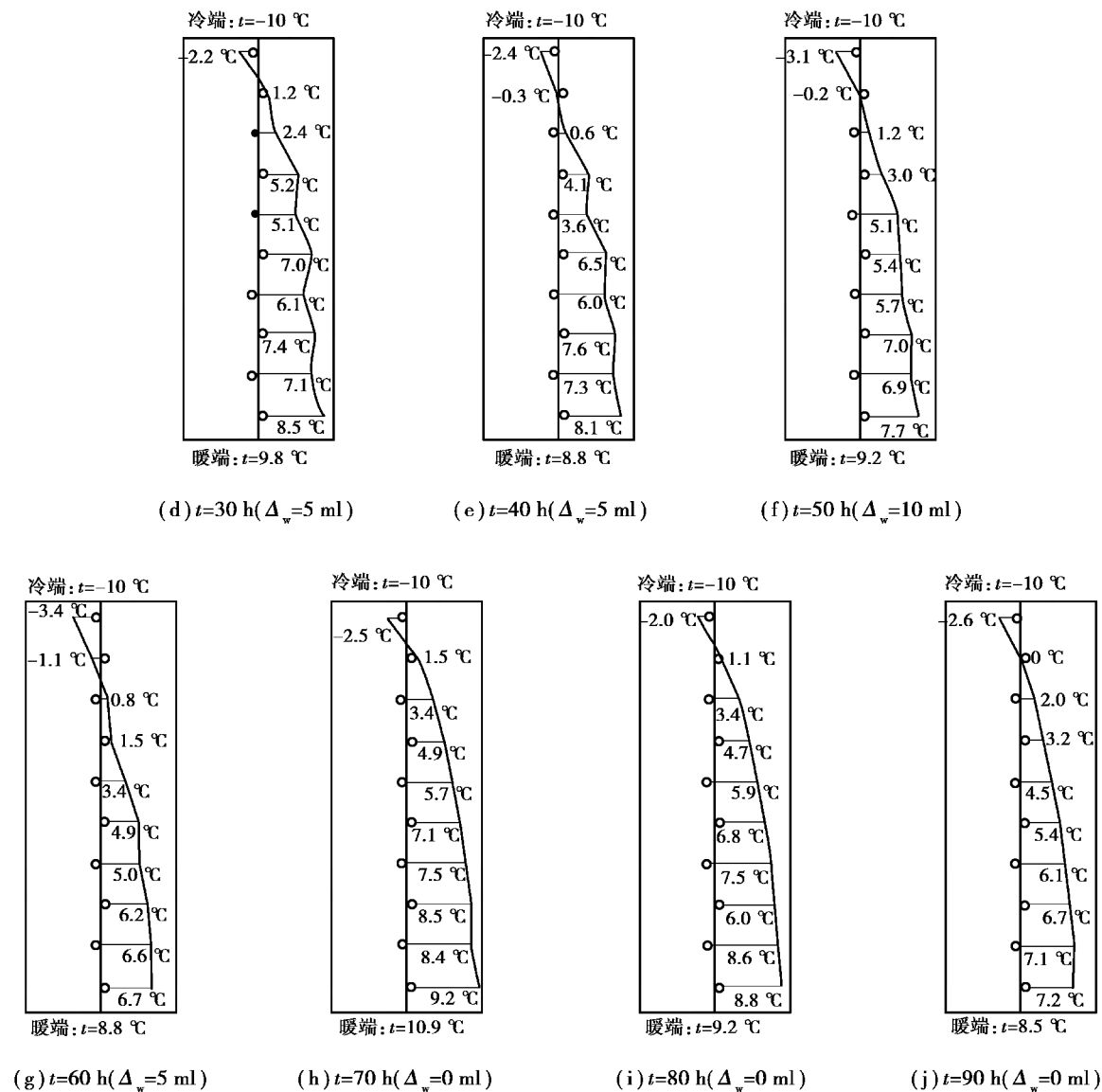


图 3 裂隙内温度梯度与水分变化图

Fig. 3 Variation of moisture migration vs. temperature gradient of fracture

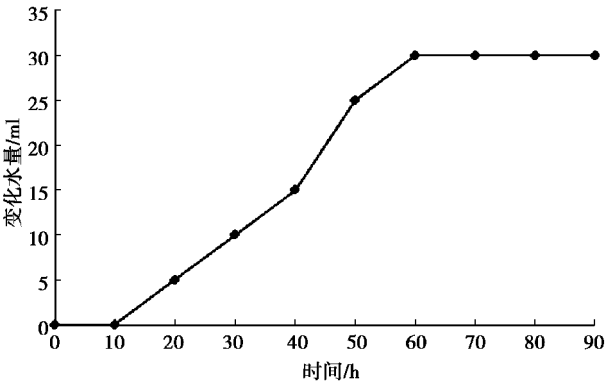


图 4 裂隙内水分迁移变化量图

Fig. 4 Variation of moisture migration of fracture

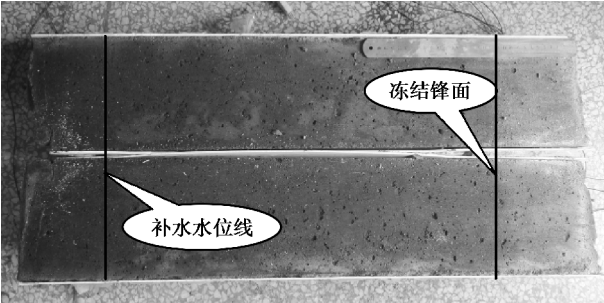


图 5 试验结束后裂隙表面图

Fig. 5 Fracture surface after experiment

2.2 试验结果分析

(1) 试样内温度场的形成: 在开始试验前, 试样浸泡在水中, 故初始各处温度与水温接近, 约为

4~6℃;试样安装完成后,在顶板温度为-10℃(底部为环境温度)的作用下,试样内部温度不断发生变化;在第10h时,试样内形成初步的温度梯度;约在20h左右,试样内各点的温度基本达到稳定,0℃线的位置约距离顶部9cm左右。之后,由于底部为环境温度,整个试样温度随着环境温度的变化而有小幅的波动,0℃线的位置距离顶部9~14cm之间小幅波动。

(2)根据裂隙内水分迁移变化量图,从第10h开始,容器内的水分开始逐渐减少,10~40h之间,水分以5ml/10h的速度逐渐减少;在40~50h之间,水分减少了10ml,之后又以5ml/10h的速度减少;自60h开始,水分不再发生变化。

(3)根据裂隙内温度梯度与水分变化图,当 $t=20$ h时,裂隙内形成较为稳定的温度梯度,相应的水分开始发生迁移,基本以5ml/10h的速度进行,在 $t=40\sim 50$ h的范围内,速度增大至10ml/10h,从 $t=70$ h起,水分不再发生变化。

(4)观察试验结束后的裂隙表面:裂隙表面湿润,有水分痕迹,在顶部负温区观察到霜的存在形式。可以作出这样的初步判断:裂隙当中的水分迁移以两种形态进行,气态水到达负温区时遇冷凝结成霜,液态水沿着裂隙面向上攀升,但因其迁移驱动力不足,未能到达冻结锋面(液态水冻结时一般呈现冰的形态,但在负温区只观察到霜的形态)。

3 初步的机理分析及探讨

3.1 水分迁移发生的位置分析

试验过程中总共减少了30ml的水量,对于此种开放裂隙系统而言,如果此水量是蒸发损失的话,则应在试验全程中以均匀的速率减少,而不是如试验结果所示; $t=20$ h时水量开始发生变化, $t=70$ h起,水量不再发生变化。所以,变化的水量应为迁移水量而不是蒸发水量。

Murton等^[11-13]的研究证实,在岩石中存在着水分迁移及分凝冰,但以上的试验是针对孔隙型的软岩(类似白垩岩)而言,且在比较长的时间范围内(试验总共进行了约一年),而对于由水泥砂浆形成的裂隙试样而言,水泥砂浆本体相对结构致密,水分迁移即便有,在短时间内相对裂隙而言也要小得多。此外,对于饱和的水泥砂浆试样而言,当一端因位于负温带而导致孔隙中的水分冻结时,更有可能由于原位冻胀,而使一些水分排出。因此,笔者认为水分迁移主要发生在裂隙。

3.2 水分迁移形态

在具备补水条件的低温岩体裂隙中,存在有两种形式的水分迁移,一种为气态迁移,一种为液态迁移,如图6所示。随着试样顶部温度降低,逐渐在附近的裂隙中形成负温区,周围的水蒸气在此遇冷,以霜的形式凝结在裂隙壁面上。此时,周围空气中水蒸气的饱和度降低,打破了之前建立的液态水与气态水之间的平衡,于是又会有由液态蒸发为气态的水分补充过来,如此循环往复,直至负温区裂隙内被霜填满为止。另有一部分水分迁移是以液态的形式进行,在毛细力、界面力及温度梯度的驱动下,自补水液面起向上迁移,若驱动力足够,则可迁移至负温区逐渐冻结成冰的形式赋存,若驱动力不足,则会迁移至一定高度终止。

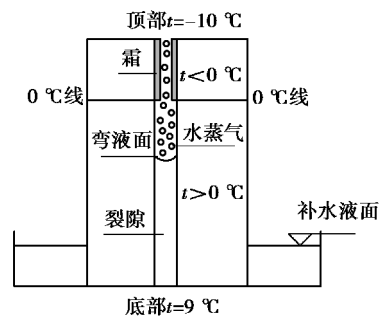


图6 裂隙中的两种水分迁移形态

Fig. 6 Two kinds of moisture migration pattern in fracture

3.3 气态迁移

预制试样中的裂隙时,以厚度为1mm的铁片插入水泥砂浆样,24h即抽出,之后试样继续养护14d后开始试验。预制的1mm宽的裂隙在后期养护过程中,由于水泥砂浆自身的收缩,继续变窄,实际缝隙为0.8mm左右,负温区的高度为13cm。试验结束时,负温区缝隙已完全被霜充填。因此,可按此部分霜所占体积(高为13cm,宽为15cm,厚为0.8mm)来估算气态迁移的水分总量:

$$V_a = \left(\frac{0.13 \times 0.15 \times 0.8 \times 10^{-3}}{10^{-6}} \right) \times 0.9 = 14(\text{ml})$$

3.4 液态迁移

3.4.1 裂隙中水分向上迁移的高度

以 $t=60$ h时为例,此时总的迁移水量 $V=30$ ml,扣除掉气态迁移的水量 $V_a=14$ ml,液态迁移水量 $V_l=16$ ml,则在初始水位的基础上,上升高度为(假设这些水量满布裂隙):

$$h = \frac{V_l}{d \times l} = \frac{16 \times 10^{-6}}{0.8 \times 10^{-3} \times 15 \times 10^{-2}} = 13.3(\text{cm})$$

式中: d 为裂隙的隙宽,取为0.8mm; l 为裂隙在直

径方向的长度,取 15 cm。

3.4.2 液态迁移的驱动力

裂隙中的水分若发生液态迁移,则需相应的驱动力。对于本试验中的开放裂隙系统,可以将平面裂隙假设由 n 个毛细管组成,取出单个毛细管作为研究对象,毛细管的直径为 0.8 mm,根据 Young-Laplace 方程^[15],气-液-固交界面上的压降为:

$$u_a - u_w = \frac{4T_s \cos\alpha}{d} \quad (1)$$

当受重力影响的水柱的质量与沿着水-固交界面上的表面张力达到平衡时:

$$h_c = \frac{4T_s \cos\alpha}{d\rho_w \theta} \quad (2)$$

将水的密度 $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ 、重力加速度 $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 、表面张力 $T_s = 74.6 \text{ mN/m}$ (7°C)、接触 $\alpha = 0^\circ$ 代入式 (2), 即可得到此种情况下毛细上升高度 $h_c = 3.75 \text{ cm}$ 。

实际的液态水上升高度为 13.3 cm, 由此可见, 在此种条件的裂隙中液态水向上迁移时, 驱动力不仅仅为毛细力, 还有温度梯度带来的驱动力, 且为主要动力。

表面张力 T_s 会随着温度的降低而增大, 相关研究表明, 表面张力与温度之间存在线性关系, 其中最著名的是 EOTVOS 准则^[15], 表示为:

$$T_s V^{\frac{2}{3}} = k(t_c - t) \quad (3)$$

式中: k 为 EOTVOS 常数, 它对于所有液体都是一个常数, 其数值为 $2.1 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-2/3}$; V 为摩尔体积; t_c 为临界温度。由式 (3) 可见, 当温度 t 降低时, 表面张力随之增大。在此试验中, 由于试样顶部控温板的作用, 平行板间缝隙沿程保有温度梯度, 即缝隙壁面温度由下向上逐渐降低, 水分在逐渐向上迁移时, 不断与壁面进行热量交换, 水分的温度也在不断降低, 由此导致弯液面中的表面张力逐渐增大, 继而引起液面上方空气与液面内部之间压力的不平衡, 水位继续上升, 如此循环往复, 直到最终达到平衡为止。

3.5 讨论

由以上分析可以看出, 在此种具有补水条件的开放低温岩体裂隙中, 水分迁移由两部分形态构成, 分别为气体迁移和液态迁移, 气态迁移是由于裂隙壁面存在负温区, 在此区域内的水蒸汽遇冷凝结成霜, 打破了之前建立的液态水与气态水之间的平衡, 于是又会有由液态蒸发为气态的水分补充过

来, 如此循环往复, 直至负温区裂隙内被霜填满; 另一部分为液态水迁移, 在表面张力及温度梯度的间接作用下, 水分沿着裂隙不断向上攀升, 但在此试验条件下, 驱动力有限, 使得液态迁移未到达负温区, 未形成薄冰。由试验可初步得出液态迁移为 16 ml, 气态迁移为 14 ml, 二者迁移量大致相等。因此, 在考虑低温岩体裂隙中的水分迁移时, 不同于孔隙介质中的水分迁移, 不仅要考虑液态形式的迁移, 同时也需要考虑气态的水分迁移。

低温岩体裂隙中水分迁移过程大致可划分为 3 个阶段: 夏季地层融化时的渗流阶段 I、秋末冬初降温时分凝冰形成及在温度梯度下的水分迁移阶段 II 和冬季低温下冰表面预融水膜的存在及迁移阶段 III。以上 3 个阶段的交替作用, 构成了寒区基岩裂隙中的水冰相变及水分迁移全景。所以, 要想了解清楚低温岩体裂隙中的水冰相变及水分迁移, 需分别研究清楚这 3 个阶段的相应机理: 其中阶段 I 可直接引用目前岩体渗流研究中的成果, 以饱和渗流为主; 阶段 II 为笔者目前研究的重点, 以上的试验设计也是基于此目的出发; 阶段 III 可见到部分国外研究成果, 但目前也处于起步阶段, 冰体表面未冻水膜的形成机制至今没有统一的解释。目前主要有三大理论: 压力融化、摩擦热融化和冰体自身具有的预融特性^[16-18], 在温度梯度作用下未冻水膜存在厚度差, 从而引起未冻水向低温冻区迁移。在清楚 3 个阶段的机理之上, 可构建寒区岩体中低温多场耦合平台, 为理解和帮助寒区工程建设提供坚实支撑。

4 结论

(1) 低温岩体裂隙中的水热迁移是理解并构建低温多场耦合理论的关键问题, 本文首次模拟了低温岩体裂隙中水分迁移状况, 证实了开放裂隙中一定的温度梯度下, 裂隙中的水分确实发生了迁移。

(2) 经过初步的理论分析, 认为在具有补水条件的开放裂隙系统中, 水分迁移由气态迁移和液态迁移两种形式构成, 前者是因为水蒸汽在负温附近遇冷凝结造成, 后者是由于表面张力及温度梯度间接导致。在此试验条件下, 气态迁移与液态迁移量相当, 因此, 当考虑相应计算时, 两种迁移形态均应考虑。

(3) 本次试验为定性试验, 即通过试验证实了低温裂隙中水分迁移的存在并初步确定了迁移驱

动力。若需进一步研究裂隙中的水分迁移规律,则需更为精准的试验设计及装备。

(4)低温裂隙中的水分迁移过程可分为3个阶段:夏季地层融化时的渗流阶段Ⅰ、秋末冬初降温时分凝冰形成及在温度梯度下的水分迁移阶段Ⅱ和冬季低温下冰表面预融水膜的存在及迁移阶段Ⅲ。以上3个阶段的交替作用,构成了寒区基岩裂隙中的水冰相变及水分迁移全景。其中,阶段Ⅰ融化时的饱和渗流可以借鉴现有的岩体渗流研究成果,而关于阶段Ⅱ和阶段Ⅲ的研究目前基本处于起步阶段,是今后研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Harris C, Arenson L U, Christiansen H H, et al. Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(3-4):117-171.
- [2] Matsuoka N, Murton J. Frost weathering: recent advances and future directions[J]. *Permafrost & Periglacial Processes*, 2008, 19(2):195-210.
- [3] 马晓良,董新平.寒冷及严寒地区隧道冻害发生机理及防治[J].*地下空间与工程学报*, 2014, 10(S2):1996-1999. (Ma Xiaoliang, Dong Xinping. The Frost Damage Mechanism and Countermeasures for Tunnels in Cold Regions [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(S2):1996-1999. (in Chinese))
- [4] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等.裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J].*岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3):452-471. (Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fracture rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3):452-471. (in Chinese))
- [5] 路亚妮,李新平,肖家双.单裂隙岩体冻融力学特性试验分析[J].*地下空间与工程学报*, 2014, 10(3):593-598, 649. (Lu Yani, Li Xinping, Xiao Jiashuang. Experimental Analysis on Mechanical Characteristic of Single Cracked Rock Mass under Freeze-Thaw Condition [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(3):593-598, 649. (in Chinese))
- [6] Sass O. Spatial patterns of rockfall intensity in the northern Alps[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie Supp.* 2005, 138:51-65.
- [7] Stoffel M, Lièvre I, Conus D, et al. 400 years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland[J]. *Arctic Antarctic & Alpine Research*, 2005, 37(3):387-395.
- [8] Tsytoich N A, Swinzow E, Tschebotarioff G. The mechanics of frozen ground[M]. Scripta Book Co., 1975.
- [9] Walder J, Hallet B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96(3):336-346.
- [10] Walder J S, Hallet B. The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective[J]. *Arctic & Alpine Research*, 1986, 18(1):27-32.
- [11] Murton J B, Coutard J P, Lautridou J P, et al. Experimental design for a pilot study on bedrock weathering near the permafrost table[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2000, 25(12):1281-1294.
- [12] Murton J B, Coutard J P, Lautridou J P, et al. Physical modelling of bedrock brecciation by ice segregation in permafrost[J]. *Permafrost & Periglacial Processes*, 2001, 12(3):255-266.
- [13] Murton J B, Peterson R, Ozouf J C. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions[J]. *Science*, 2006, 314:1127-1129.
- [14] 杨更社,周春华,田应国,等.软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探[J].*岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9):1765-1770. (Yang Gengshe, Zhou Chunhua, Tian Yingguo, et al. Primary experimental study on moisture and heat transfer of soft rock material during freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9):1765-1770. (in Chinese))
- [15] 高世桥,刘海鹏.毛细力学[M].科学出版社, 2010. (Gao Shiqiao, Liu Haipeng. *Capillary mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [16] Dash J G, Fu H, Wettlaufer J S. The premelting of ice and its environmental consequences[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1995, 58(1):115-167.
- [17] Rosenberg R. Why ice is slippery[J]. *Physics Today*, 2005, 58(12):50-54.
- [18] Dash J G, Rempel A W, Wettlaufer J S. The physics of premelted ice and its geophysical consequences[J]. *Review of Modern Physics*, 2006, 78(3):695-741.