

单向冻结条件下裂隙岩体冻胀特性试验

夏才初^{1,2}, 王岳嵩^{1,2}, 吕志涛^{1,2}, 董一鹤¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 单向冻结条件下寒区隧道围岩不均匀冻胀性是产生隧道冻胀力的主要原因之一。为研究寒区隧道含裂隙围岩不均匀冻胀特性,进行了单向冻结条件下裂隙岩体的冻胀试验,分析了裂隙岩体在单向冻结时的冻结过程及变形规律。试验表明,裂隙处冻胀与岩石自身冻胀存在明显差异,裂隙岩体在冻胀过程中表现出明显的不均匀冻胀特性。在裂隙较深的工况下,随裂隙宽度的增加,裂隙法向的线冻胀率增加。对于含裂隙饱和砂岩,岩石自身线冻胀率随冻结温度的降低明显增大,而裂隙法向的线冻胀率明显减小。凝灰岩孔隙率较小,岩体的冻胀变形以裂隙处的冻胀变形为主,岩石自身在低温条件下表现为冷缩。根据试验结果,在岩体不均匀冻胀系数中考虑了裂隙的影响,计算了含裂隙饱和砂岩的不均匀冻胀系数。裂隙平行于温度梯度方向时,随裂隙宽度的增加,含裂隙饱和砂岩的不均匀冻胀系数有所减小。随温度梯度的增加,含裂隙饱和砂岩的不均匀冻胀系数增加,且增幅相比岩石不均匀冻胀系数明显增大。试验初步反映了裂隙岩体的不均匀冻胀特性,为寒区隧道裂隙岩体冻胀变形计算提供了试验依据。

关键词: 裂隙岩体; 单向冻结; 不均匀冻胀系数; 冻胀特性
中图分类号: TU452 **文献标志码:** A

Experimental Study on Frost Heaving Characteristics of Fractured Rock Mass under Unidirectional Freezing Condition

XIA Caichu^{1,2}, WANG Yuesong^{1,2}, LYU Zhitao^{1,2}, DONG Yihe¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Non-uniform frost heave of rock in cold zone tunnel under unidirectional freezing condition is one of the main

reasons for tunnel frost heave force. To study the frost heave characteristics of fractured rock mass in cold regions, laboratory tests of frost deformation in fractured saturated sandstone and tuff under unidirectional freezing condition have been conducted. The freezing process and frost deformation of the fractured rock mass under the unidirectional freezing condition have been analyzed. A significant difference exists between the frost heave at the fracture and the rock itself. The fractured rock mass shows evident non-uniform frost heaving characteristics during the frost heaving process. For saturated sandstone with deep fracture, the normal linear frost heave rate increases with the increase of fracture width. For fractured saturated sandstone, the linear frost heave rate of rock increases and the normal linear frost heave rate of fracture decreases obviously with the decrease of the freezing temperature. The frost deformation of the fractured tuff is mainly contributed by the frost deformation of the fracture, and the rock itself contracts during the freezing process. According to the experiments, the non-uniform frost heaving coefficient of saturated sandstone with fissures is calculated considering the influence of fracture. When the fracture is parallel to the direction of temperature gradient, the non-uniform frost heaving coefficient of saturated sandstone with fracture decreases with the increase of fracture width. The non-uniform frost heaving coefficient of saturated sandstone increases with the increase of temperature gradient. The increment of non-uniform frost heaving coefficient of saturated sandstone with fractures is larger than that of saturated sandstone. The test preliminarily reflects the non-uniform frost heaving characteristics of fractured rock mass, and provides experimental basis for the calculation of frost heave deformation of fractured rock mass in cold region tunnels.

Key words: fractured rock; unidirectional freezing; non-uniform frost heaving coefficient; frost heaving characteristics

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51778475, 41472248); 四川省交通运输厅科技项目(2016B2-4); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201710)

第一作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩石力学、隧道与地下建筑工程。

E-mail: tjxiacbb@126.com

随着我国一带一路倡议的实施,必将建设为数众多的寒区隧道.冻害问题常影响到寒区隧道的结构及运营安全.隧道围岩冻胀导致衬砌开裂是寒区隧道的主要冻害之一^[1].寒区隧道围岩冻胀力的计算是寒区隧道设计的重要组成部分.

Lai等^[2]假设围岩冻结圈各向均匀冻胀,提出了寒区隧道围岩冻融圈整体冻胀模型.黄继辉等^[3]发现,按围岩各向均匀冻胀模型,在冻结围岩弹性模量大于未冻结围岩弹性模量的情况下,寒区隧道衬砌不会受到冻胀力作用.均匀冻胀模型认为,围岩的冻结为均匀冻结,而在寒区隧道洞内冷空气对隧道围岩的冻结过程中,隧道围岩沿隧道径向方向存在一个梯度,沿隧道轴向及环向的温度梯度可以忽略不计,隧道围岩处于单向冻结状态.通过岩石的单向冻结试验可以证明岩石在单向冻结条件下会产生不均匀冻胀现象.黄继辉等^[3]根据岩石在梯度温度场的不均匀冻胀现象,引入岩石不均匀冻胀系数 k ,计算得出的冻胀力与实际工程较为符合.夏才初等^[4]通过饱和砂岩的单向冻结试验证明了饱和岩石的不均匀冻胀系数与温度梯度有关.

岩体具有孔隙介质和裂隙介质的双重属性^[5],其力学性质是非各向同性的,裂隙的存在也会导致岩体在冻胀过程中产生不均匀冻胀的现象.夏才初等^[6]提出了初步的岩体冻胀性分级标准,但该标准中关于岩体冻胀性指标的确定仍有待开展大量试验.

目前对于裂隙岩体的冻胀试验相对较少,且对裂隙岩体的试验大多集中在裂隙岩体的冻融损伤方面^[7-9].Arosio等^[10]测试了含有裂隙的石灰岩在冻融循环作用下的冻胀应力.乔国文等^[11]进行了裂隙岩体冻胀过程的应变试验,观测冻胀过程中岩体裂隙的冻胀变形.裴向军等^[12]采取不同岩性的裂隙岩体进行温度变化下的冻融应变试验,得到了裂隙岩体在饱水及干燥冻融状态下的应变过程.黄诗冰等^[13]通过在类岩石材料中预制不同尺寸的宏观裂隙,测试了冻胀过程中裂隙处的冻胀力,获取其时空演化曲线.Jia等^[14]等对预制裂隙的花岗岩进行了由外而内和由内而外2种方式的冻结,测量了试验过程中裂隙的变形及温度变化.Bost和Pouya^[15]对含有裂隙的石灰岩进行冻融循环试验,根据冻融循环过程中裂隙处的应力变化情况建立了沿裂隙产生的应力演化模型.

以上关于裂隙岩体的冻胀试验均是将试件直接放入低温试验箱中进行冻结,属于均匀冻结试验.裂

隙岩体的单向冻结试验目前还比较少见.

Davidson和Nye^[16]用含裂隙的有机玻璃代替岩体,保持环境温度在 0°C ,对试件进行单向冻结,利用光弹性原理测量裂隙中的水结冰后产生的应力.但实际上,有机玻璃并不能完全反映裂隙岩体的冻胀特性.Matsuoka^[17]用带有裂隙的花岗岩进行了裂隙岩体的冻胀试验,试验中将试件置于低温试验箱,试件四周与底面用泡沫聚苯乙烯包裹,认为热量仅从上表面传递,但这并非是严格意义上的单向冻结,与寒区隧道的实际情况仍有所差距.

本文针对裂隙岩体中裂隙方向平行于梯度温度场梯度方向的情况,采用可以提供梯度温度场的试验设备,设计了裂隙岩体的单向冻结试验.研究了单向冻结条件下裂隙岩体的冻胀特性,分析了裂隙尺寸、冻结温度及其梯度、岩石材料性质对裂隙岩体不均匀冻胀性的影响,并在岩体不均匀冻胀系数中考虑了裂隙的影响,为寒区隧道裂隙岩体冻胀变形计算提供试验基础.

1 试验方案

试验主要分为三部分:第一部分试验主要探究裂隙尺寸对裂隙岩体冻胀率的影响,采用包含不同尺寸裂隙的试件进行单向冻结试验;第二部分试验主要探究冻结温度及其梯度对裂隙岩体冻胀率的影响,采用不同的梯度温度场对裂隙岩体试件进行单向冻结;第三部分试验主要探究岩石材料性质对裂隙岩体冻胀率的影响,采用不同岩性的裂隙岩体试件进行单向冻结试验.

1.1 试验设备

试验过程中采用的单向冻结试验装置其示意图如图1所示.单向冻结试验装置的主体为试件上下两端的控温板.控温板表面为金属铝板,板内设置中空循环管路,管路内充有防冻液,其温度由恒温液浴槽控制.试验过程中,防冻液保持恒定温度,热量通过控温板向试件传递,使试件从上向下单向冻结.试验中设置2种温度工况,工况1为上端板温度保持在 -10°C ,下端板温度保持在 2°C ;工况2为上端板温度保持在 -20°C ,下端板温度保持在 2°C .控温板表面及试件侧面铺设聚氨酯保温材料与外界隔热,试件周围设置保温护壁和盖板以形成封闭稳定的温度环境,使其他2个方向没有温度梯度而不引起传热.

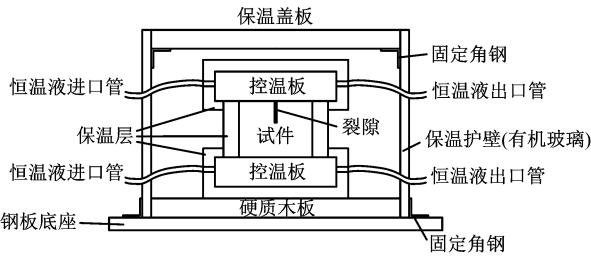


图 1 单向冻结装置示意

Fig.1 Diagram of unidirectional freezing device

1.2 试件制备

试验以饱和砂岩及凝灰岩作为试验对象. 将岩石切割成 100 mm×80 mm×80 mm 的长方体试件, 在试件上切割出不同尺寸的裂隙并在真空泵中进行保水. 裂隙的尺寸如表 1 所示, 岩体的基本物理力学性质如表 2 所示, 为方便观察岩石冻胀现象, 试验中特意选取了孔隙率较大的砂岩试件作为主要试验对象. 为研究岩性对岩体冻胀的影响, 同时采用凝灰岩试件作为对比. 其中岩石材料的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比均为自然状态下的测量结果. 所有试件均在温度工况 1 下进行冻胀试验, 为研究不同冻结温度对岩体冻胀的影响, 试件 C2 还需在温度工况 2 下进行冻胀试验.

表 1 试件及裂隙的尺寸

Tab.1 Size of the fracture in specimens

试件编号	试件岩性	裂隙宽度/mm	裂隙深度/mm
C1	砂岩	2	40
C2		4	40
C3		6	40
C4		2	20
C5		4	20
C6		6	20
N1	凝灰岩	4	40

表 2 试件基本物理力学参数

Tab.2 Physico-mechanical parameters of specimens

试件 岩性	干密度/ (g·cm ⁻³)	饱和密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙率/ %	单轴抗压 强度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松 比
砂岩	2.08	2.27	18.40	8.52	2.30	0.24
凝灰岩	2.62	2.63	0.61	105.20	57.83	0.19

试验中, 用应变片测量裂隙法向线冻胀率以及岩石自身的线冻胀率. 为防止试验中裂隙水的流失, 试件裂隙侧面用硅橡胶密封. 在裂隙侧面选择合适的测点位置粘贴应变片, 应变片测量的是其粘贴范围内的平均线冻胀率, 主要受到裂隙冻胀变形的影响. 同时在试件侧壁与裂隙侧面测点同一高度位置粘贴应变片, 测量岩石自身的线冻胀率, 测点位置见表 3. 在试件裂隙内部 20 mm 和 38 mm 深度处插有 PT-100 热敏电阻, 测量试验过程中裂隙水(冰)的温

度. 试件示意图及实物图如图 2 所示.

表 3 试件测点布置

Tab.3 Layout of test points

编号	距试件顶面距离	备注
测点 1	10 mm(裂隙)	试件 C4、C5、C6 裂隙深度为 20 mm, 故无测点 2、4
测点 2	30 mm(裂隙)	
测点 3	10 mm(侧壁)	
测点 4	30 mm(侧壁)	

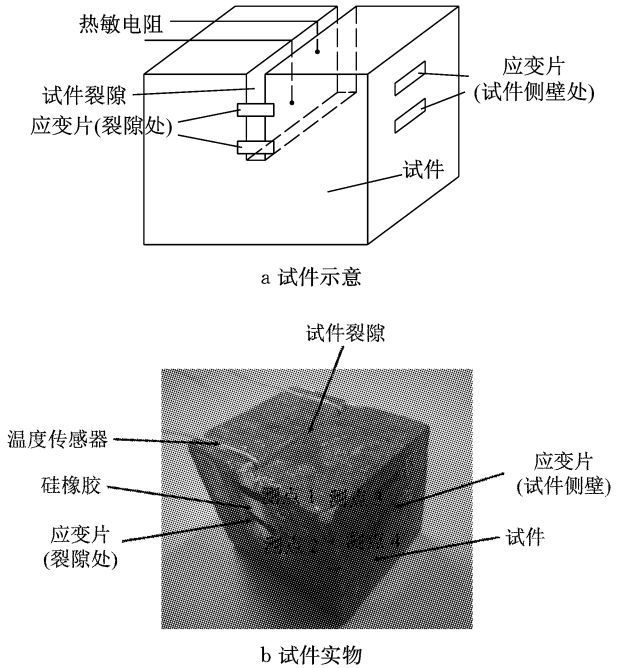


图 2 试验试件

Fig.2 Diagram of experimental specimen

1.3 温度补偿

试验需要在裂隙及试件侧壁粘贴应变片, 因此需要单独的补偿块. 而岩石的热膨胀系数具有较大的离散性, 不宜作为补偿块. 石英玻璃的热膨胀系数极低且十分稳定, 其热膨胀系数一般在 $(5.3 \sim 5.8) \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [18], 可作为本试验的补偿块. 在石英补偿块表面粘贴与工作片相同规格的应变片作为补偿片, 将石英补偿块固定在与试件工作片同一高度的位置, 使工作片与补偿片处于同一温度环境下, 消除试验中由于温度产生的误差.

2 裂隙岩体冻胀特性研究

饱和砂岩试件 C1~C6 在工况 1(上端控温板 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$, 下端控温板 $2 \text{ } ^\circ\text{C}$, 温度梯度为 $1.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$)条件下单向冻结的试验结果如图 3 所示.

观察图 3 中的温度曲线, 在单向冻结过程中, 裂隙水(冰)的温度变化过程主要可以分为 4 个阶段,

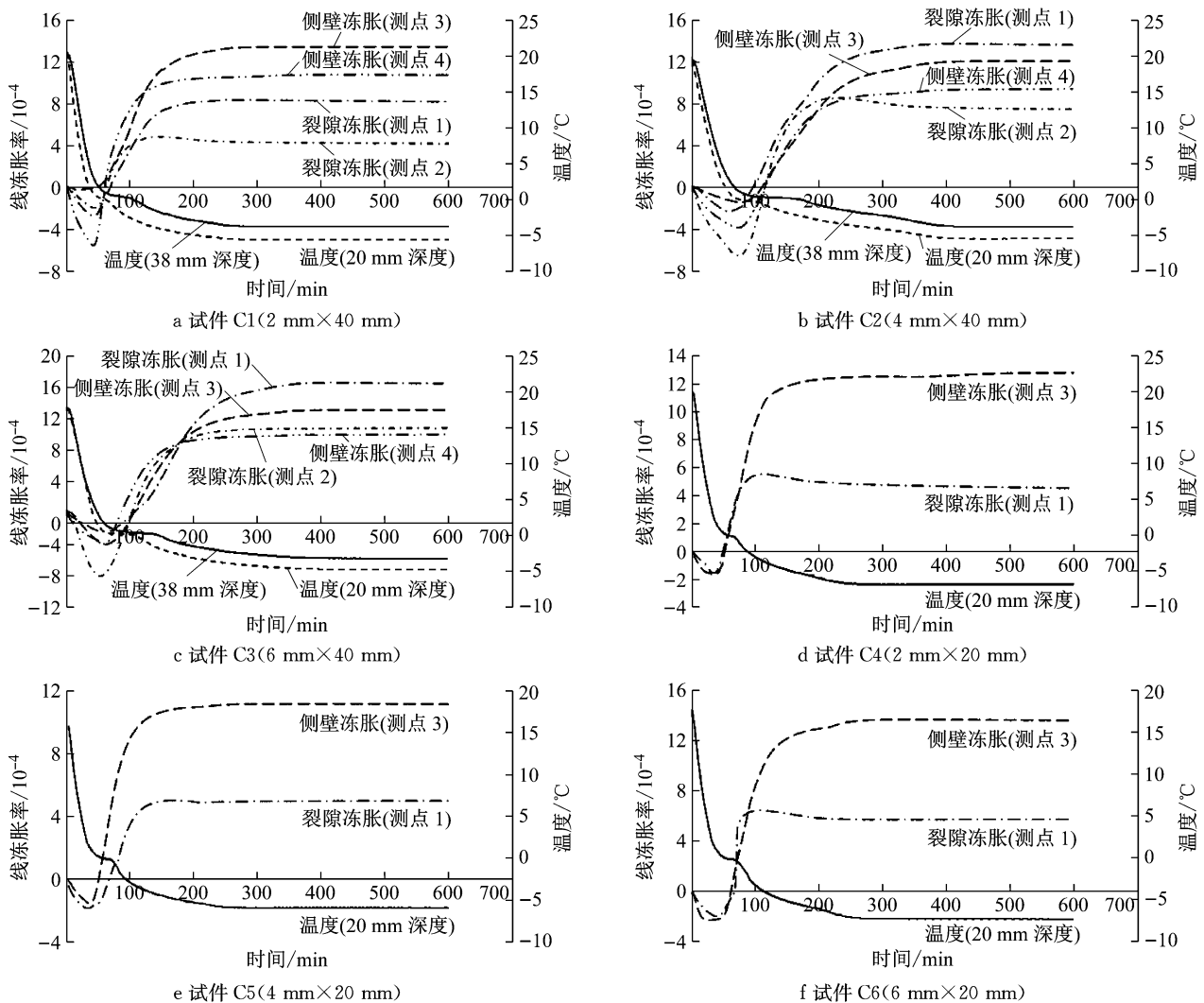


图3 不同裂隙尺寸的试件线冻胀率、温度随时间变化曲线

Fig.3 Line frost heave rate and temperature of specimens with different fracture sizes

分别是快速降温阶段、相变阶段、缓慢降温阶段以及稳定阶段。

(1) 快速降温阶段:在梯度温度场作用下,裂隙内温度由室温快速下降,直至到达 0°C ,此阶段内裂隙水尚未结冰,仍处于液态。

(2) 相变阶段:裂隙水在到达 0°C 后,继续释放热量,由于冰在标准大气压下的溶解热为 $333.5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [19],因此,在相变阶段,冰水混合物的温度稳定在 0°C 左右。

(3) 缓慢降温阶段:裂隙水相变完成后,在梯度温度场作用下继续降温。控温板内循环的防冻液对试件的降温模式可视为对流传热,根据牛顿冷却公式 $q=h\Delta t$ [20] 计算(其中 h 为表面传热系数,在试验中恒定不变; Δt 为裂隙水(冰)与外界环境的温差)。由于冻结过程中,温差逐渐减小,使得热流密度 q 随之降低。因此,此阶段的降温速度相比快速降温阶段有明显下降。

(4) 稳定阶段:随着裂隙冰降温速度的不断降低,最终,热量传递进入稳定状态,裂隙冰的温度稳定在一个定值。

观察图3中裂隙冻胀曲线,对于饱和砂岩试件,裂隙处的冻胀变形过程可以分为3个阶段,分别是冷缩阶段、快速增长阶段和稳定阶段。

(1) 冷缩阶段:裂隙法向线冻胀率从零开始下降,始终处于负值。此时,温度处于快速降温阶段。裂隙水未发生冻结,因此,仅存在岩石自身在低温环境下产生的冷缩。

(2) 快速增长阶段:裂隙法向线冻胀率从最低点迅速回升,达到峰值。此时,温度处于相变阶段。由于表面的裂隙水结冰较快,当表面裂隙水结冰后,未冻结的裂隙水被封闭在裂隙内部,在之后的冻结过程中,裂隙水结冰并对裂隙侧壁造成挤压,导致裂隙扩张,裂隙法向线冻胀率迅速增加。

(3) 稳定阶段:裂隙法向线冻胀率在到达峰值

后稳定在峰值附近. 此时, 温度曲线的相变阶段结束, 开始由缓慢降温阶段过渡到稳定阶段. 由于裂隙水(冰)的相变过程已经结束, 裂隙法向线冻胀率也趋于稳定.

观察图 3 中侧壁冻胀变形曲线, 对于饱和砂岩试件, 侧壁冻胀曲线与裂隙冻胀曲线形状类似, 但稳定阶段, 距离试件顶面相同距离处, 裂隙法向线冻胀率与岩石自身线冻胀率存在一定的差别. 主要原因在于, 裂隙的冻胀主要由裂隙水产生, 而岩石自身的冻胀主要由孔隙水产生. 对于含裂隙饱和砂岩, 岩体冻胀变形包括了裂隙的冻胀以及岩石自身的冻胀.

2.1 裂隙尺寸对裂隙岩体冻胀的影响

由图 3 可以得到饱和砂岩试件 C1~C6 在稳定阶段裂隙法向的线冻胀率以及岩石自身的线冻胀率. 选取试件 C1~C6 距离试件顶面 10 mm 处裂隙法向线冻胀率以及岩石自身的线冻胀率进行比较, 比较结果如图 4 所示.

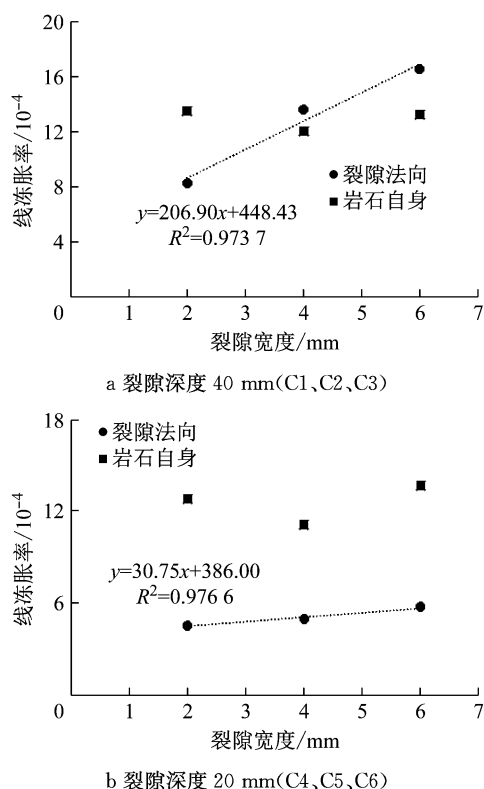


图 4 线冻胀率与裂隙宽度关系

Fig. 4 Relationship between line frost heave rate with fracture width

裂隙深度为 40 mm 的情况下, 试件 C1、C2、C3 (裂隙宽度分别为 2 mm、4 mm、6 mm) 裂隙法向的线冻胀率分别为 0.082 4%、0.135 4%、0.165 1%. 随着裂隙宽度的增加, 裂隙法向线冻胀率呈现逐渐增长的趋势, 裂隙法向线冻胀率与裂隙宽度之间近

似呈线性关系.

裂隙深度为 20 mm 的情况下, 试件 C4、C5、C6 (裂隙宽度分别为 2 mm、4 mm、6 mm) 裂隙法向的线冻胀率分别为 0.045 3%、0.049 8%、0.057 6%. 随着裂隙宽度的增加, 裂隙法向线冻胀率增幅较小, 且明显低于岩石自身的线冻胀率. 主要原因是裂隙深度较浅, 受到裂隙下方完整岩石的约束较大.

2.2 冻结温度对裂隙岩体冻胀的影响

为了研究冻结温度对裂隙岩体冻胀的影响, 将与试件 C2 相同规格的试件置于工况 2 (上端控温板 -20°C , 下端控温板 2°C , 温度梯度 $2.75^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$) 下单向冻结, 饱和砂岩试件在不同工况下冻胀率、温度随时间变化的对比如图 5 所示.

观察图 5a 可知, 上端控温板从 -10°C 降低至 -20°C 后, 20 mm 深度处裂隙冰的稳定温度由 -5°C 降低至 -11°C , 38 mm 深度处裂隙冰的稳定温度由 -4°C 降低至 -9°C , 说明环境温度降低后, 裂隙冰的温度会降低, 且越接近冷源的位置降温程度越大. 此外, 冻结温度降低后, 裂隙水温度在快速降温阶段的降温速率有所增加, 裂隙水(冰)处于相变阶段的时间缩短, 导致裂隙水(冰)温度相变结束的时间明显提前. 裂隙冰温度在缓慢降温阶段的降温速率也随冻结温度的降低而增加. 因此, 随着冻结温度的降低, 裂隙冰的稳定温度降低, 且裂隙岩体的冻结过程有所缩短.

观察图 5b、5c 可知, 上端控温板从 -10°C 降低至 -20°C 后, 裂隙冻胀曲线和侧壁冻胀曲线在冷缩阶段的变化速率基本一致, 裂隙冻胀曲线和侧壁冻胀曲线进入快速增长阶段和稳定阶段的时间皆有所提前, 这一点与温度的变化规律相符. 观察冻胀曲线的稳定阶段, 冻结温度降低后, 裂隙法向线冻胀率有所降低, 而侧壁处的线冻胀率却有所增加, 裂隙法向线冻胀率与岩石自身线冻胀率的差距增加, 裂隙岩体冻胀的不均匀程度增强.

陶履彬^[21]试验证明, 在 $-4 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 左右, 随着温度的降低, 岩样冻胀变形随之增加, 与本试验的试验现象相符. 岩石自身的冻胀变形主要由试件内的孔隙水产生, 温度降低, 孔隙水产生的冻胀增加. 在 $-4 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 左右, 孔隙水的冻胀效应明显大于岩石的冷缩效应, 导致岩石自身的线冻胀率随温度的降低而增加.

裂隙水不同于孔隙水, 其冰点高于孔隙水, 因此裂隙水在相对较高的负温下结冰, 体积膨胀, 导致裂隙冻胀. Matsuoka^[17]利用含裂隙花岗岩进行的冻胀

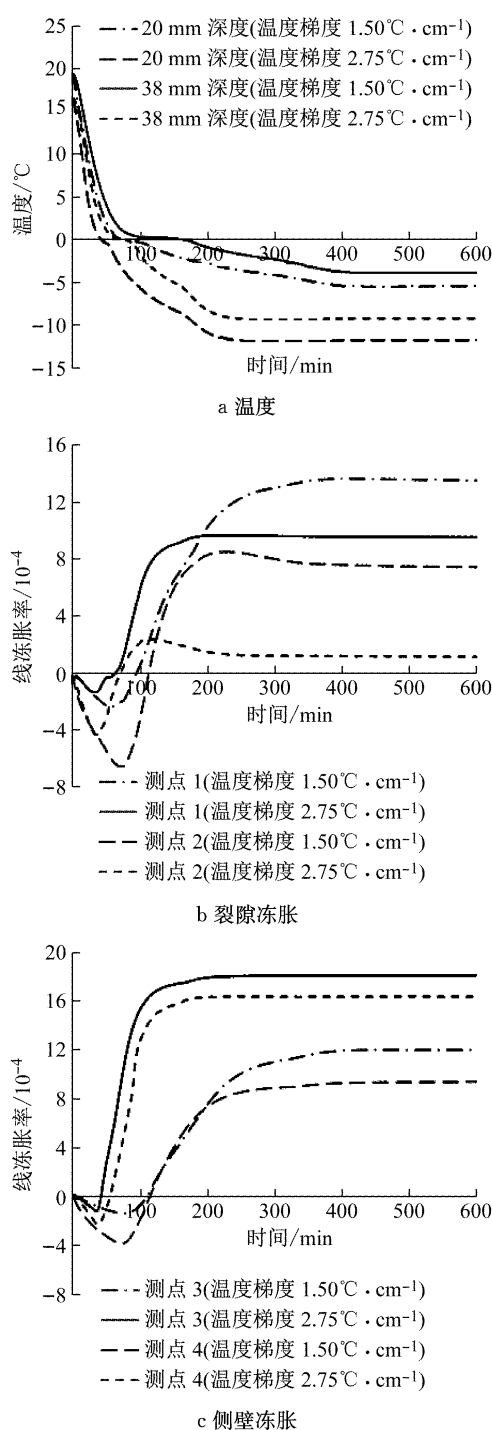


图5 高侧温度 2 °C 时试件 C2 不同工况下温度、线冻胀率的对比

Fig.5 Comparison of temperature and line frost heave rate under different temperature conditions of specimen C2 under high temperature 2 °C

试验表明,裂隙的冻胀主要发生在 0 至 -2 °C,当裂隙温度低于 -2 °C 时,裂隙处的冻胀变形不会有明显的增加.因此,冻结温度降低时,即从工况 1 至工况 2,裂隙冻胀增幅较小,而裂隙侧壁饱和砂岩自身的冻胀却又大幅增加,进一步约束了裂隙的冻胀变

形,最终导致裂隙法向线冻胀率减小.

2.3 岩石材料性质对裂隙岩体冻胀的影响

试件 C2(裂隙尺寸 40 mm × 4 mm)是砂岩冻胀试验的典型工况,为了研究不同岩石材料性质对裂隙岩体冻胀率的影响,将相同裂隙尺寸的凝灰岩试件 N1 置于工况 1(上端控温板 -10 °C,下端控温板 2 °C,温度梯度为 1.5 °C · cm⁻¹)下进行单向冻结,试验结果如图 6 所示,凝灰岩(试件 N1)与砂岩(试件 C2)线冻胀率对比如图 7 所示.

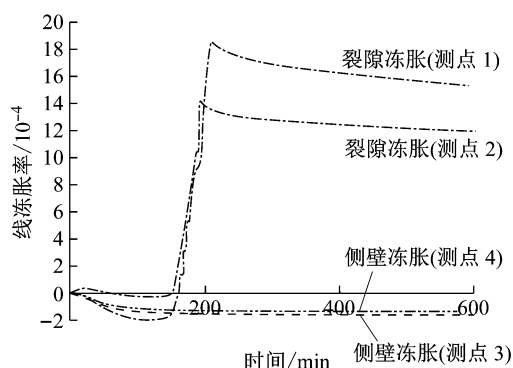


图6 试件 N1 线冻胀率随时间变化曲线

Fig.6 Line frost heave rate of specimen N1

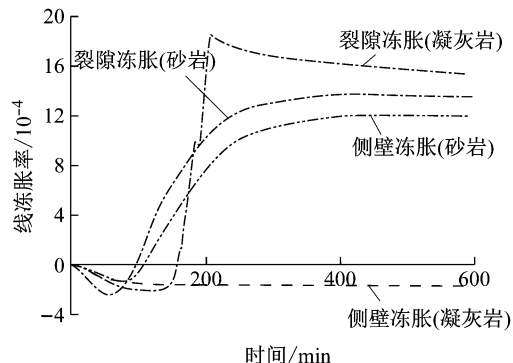


图7 不同岩性岩体线冻胀率对比

Fig.7 Comparison of line frost heave rate under different lithologies

观察图 7 可以发现,对于凝灰岩试件,裂隙冻胀曲线与饱和砂岩试件类似,但试件侧壁线冻胀率始终为负值.说明对于凝灰岩试件,岩石自身在单向冻结过程中以冷缩为主,并未表现出明显的冻胀特性.从表 2 两种岩石的材料性质可以看出,凝灰岩的孔隙率远小于砂岩,导致凝灰岩试件中的孔隙水含量较少.因此凝灰岩在冻结过程中由孔隙水产生的冻胀变形较小,主要以岩石的冷缩变形为主.

根据以上结果可以推论,不含裂隙的凝灰岩试件在低温环境下表现出冷缩的性质.包含裂隙的凝灰岩试件在低温环境下裂隙处表现出明显的冻胀变

形. 裂隙处的冻胀与岩石自身的冷缩存在明显的差异性, 体现出含裂隙凝灰岩的不均匀冻胀性.

3 裂隙岩体的不均匀冻胀系数

黄继辉等^[3]考虑了温度梯度引起的围岩不均匀冻胀, 并定义了岩石在梯度温度场作用下的不均匀冻胀系数, 夏才初等^[4]通过试验证明了岩石不均匀冻胀与温度梯度有关. 以上研究未考虑岩体中的裂隙, 实际上, 岩体中存在的裂隙会对岩体的不均匀冻胀性产生进一步的影响. 因此, 本文在黄继辉等^[3]定义的基础上, 考虑岩体中裂隙对岩体不均匀冻胀的影响. 在裂隙平行于温度梯度的情况下, 其冻胀示意图如图 8 所示, 图中 L 为冻胀前裂隙影响范围, 取 $L=5e$, e 为裂隙宽度; α_p 为裂隙岩体沿温度梯度方向的线冻胀率; α_v 为岩体垂直于温度梯度方向的线冻胀率.

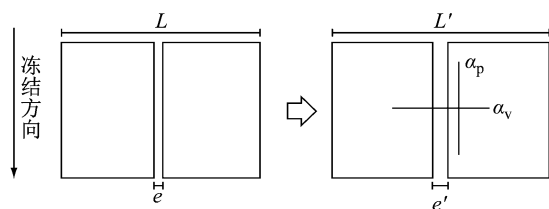


图 8 贯通裂隙岩体冻胀示意

Fig. 8 Diagram of frost heaving through fractured rock mass

岩体在沿温度梯度方向的线冻胀率并不受到裂隙的影响, 根据黄继辉等^[3]的定义, α_p 为

$$\alpha_p = k\alpha_r \quad (1)$$

式中: α_r 为岩石自身在垂直温度梯度方向的线冻胀率; k 为仅考虑温度梯度时岩石的不均匀冻胀系数.

贯通裂隙岩体垂直于温度梯度方向的线冻胀率需要考虑岩体裂隙的影响. 在冻胀变形前, 裂隙的影响范围为 L , 在冻胀变形后, 裂隙影响范围 L' 为

$$L' = (L - e)(1 + \alpha_r) + e(1 + \alpha_i) \quad (2)$$

式中: α_i 为裂隙法向线冻胀率; L' 为冻胀后裂隙影响范围. 因此, α_v 为

$$\alpha_v = \frac{L' - L}{L} = \frac{(L - e)(1 + \alpha_r) + e(1 + \alpha_i) - L}{L} = \alpha_r + (\alpha_i - \alpha_r) \frac{e}{L} \quad (3)$$

非贯通裂隙岩体的冻胀可分为两部分, 上半部分为贯通裂隙岩体冻胀, 下半部分为完整岩石的冻胀. 其冻胀示意图如图 9 所示, 其中 h 为裂隙深度, $H-h$ 为岩桥长度.

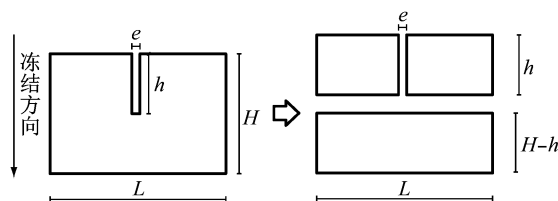


图 9 非贯通裂隙岩体冻胀示意

Fig. 9 Diagram of frost heaving in non penetrating fractured rock mass

非贯通裂隙岩体垂直于温度梯度方向的线冻胀率为

$$\alpha_v = \eta \cdot \left[\alpha_r + (\alpha_i - \alpha_r) \frac{e}{L} \right] + (1 - \eta) \cdot \alpha_r = \alpha_r + \eta \cdot (\alpha_i - \alpha_r) \frac{e}{L} \quad (4)$$

式中: η 为裂隙贯通率, $\eta = \frac{h}{H}$. 因此, 非贯通裂隙岩体在梯度温度场作用下的不均匀冻胀系数 k' 可以定义为

$$k' = \frac{\alpha_p}{\alpha_v} = \frac{k\alpha_r}{\alpha_r + \eta(\alpha_i - \alpha_r) \frac{e}{L}} \quad (5)$$

当 $\eta=0$ 时, 式(5)可化简为: $k'=k$, 表示不含裂隙的岩石的不均匀冻胀系数. 当 $\eta=1$ 时, 式(5)可化简为: $k' = \frac{\alpha_p}{\alpha_v} = \frac{k\alpha_r}{\alpha_r + (\alpha_i - \alpha_r) \frac{e}{L}}$, 表示贯通裂隙岩体在

梯度温度场作用下的不均匀冻胀系数.

不均匀冻胀系数表示岩体在梯度温度场作用下不均匀冻胀的程度, 系数越大, 则说明岩体的不均匀冻胀程度越强.

根据含不同裂隙尺寸饱和砂岩的冻胀试验可以得到裂隙法向线冻胀率以及岩石自身在垂直于温度梯度下的线冻胀率. 试验中平均温度梯度为 $1.5^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$, 根据夏才初等^[4]的试验结果, 取仅考虑温度梯度时岩石的不均匀冻胀系数 $k=2.43$. 在裂隙深度 40 mm 的工况下, 将距离试件顶部 10 mm 处(测点 1、测点 3)的测量结果代入式(5)可以计算出岩体不均匀冻胀系数 k'_1 , 同理将距离试件顶部 30 mm 处(测点 2、测点 4)的测量结果代入式(5)可以计算出岩体不均匀冻胀系数 k'_2 , 计算结果如表 4 所示.

从表 4 中可以看出, 在裂隙深度 40 mm 的工况下, 计算得出的 k'_1 与 k'_2 较为接近, 取 k'_1 与 k'_2 的平均值作为该工况下岩体不均匀冻胀系数, 以此方法计算得出试件 C1、C2、C3 的岩体不均匀冻胀系数分别为 2.56、2.44、2.39.

表4 裂隙岩体不均匀冻胀系数

Tab.4 Non-uniform frost heaving coefficient of fractured rock mass

h/mm	e/mm	测点距离试件 顶面距离/mm	$\alpha_p/10^{-4}$	$\alpha_v/10^{-4}$	k'
40	2	10	32.78	12.96	2.53
		30	26.20	10.12	2.59
	4	10	29.23	12.18	2.40
		30	22.84	9.21	2.48
	6	10	32.03	13.51	2.37
		30	24.28	10.08	2.41
20	2	10	31.13	12.40	2.51
	4	10	27.05	10.82	2.50
	6	10	33.22	13.27	2.50

岩体不均匀冻胀系数与裂隙宽度的关系如图10所示. 裂隙平行于温度梯度方向时, 受裂隙的影响, 使得岩体不均匀冻胀系数有所改变. 当裂隙深度为40 mm时, 随裂隙宽度的增加, 岩体不均匀冻胀系数减小, 且岩体不均匀冻胀系数与裂隙宽度近似呈线性关系. 当裂隙深度为20 mm时, 随裂隙宽度的增加, 不均匀冻胀系数的减小幅度很小.

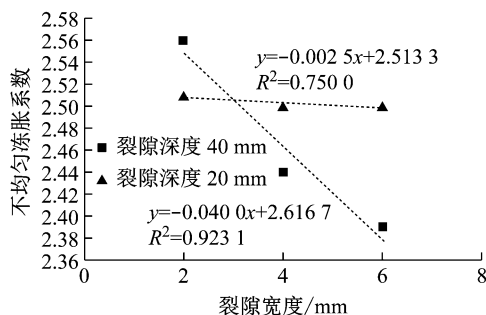


图10 不均匀冻胀系数与裂隙宽度的关系

Fig.10 Relationship between non-uniform frost heaving coefficient and fracture width

根据图5中不同温度工况下饱和砂岩试件的试验结果, 可以计算出不同温度工况下岩体的不均匀冻胀系数, 计算结果如表5所示. 取 k'_1 与 k'_2 的平均值作为该工况下岩体不均匀冻胀系数, 计算得出温度梯度为 $1.50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 工况下岩体不均匀冻胀系数为2.44, 温度梯度为 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 工况下岩体不均匀冻胀系数为3.11.

温度梯度由 $1.50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增加到 $2.75\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, 岩石的不均匀冻胀系数 k 由2.43增加到2.89, 增幅为18.93%, 岩体不均匀冻胀系数 k' 由2.44增加到3.11, 增幅为27.46%, 增幅大于岩石不均匀冻胀系数 k . 说明随着温度梯度的增加, 岩石和岩体的不均匀冻胀系数均增加, 且岩体不均匀冻胀系数的增幅大于岩石不均匀冻胀系数的增幅.

表5 裂隙岩体在不同温度工况下的不均匀冻胀系数

Tab.5 Non-uniform frost heaving coefficient of fractured rock mass under different temperature conditions

温度梯度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$)	k	测点距离试件 顶面距离/mm	$\alpha_p/10^{-4}$	$\alpha_v/10^{-4}$	k'
1.50	2.43	10	29.23	12.18	2.40
		30	22.84	9.21	2.48
2.75	2.89	10	52.57	17.33	3.03
		30	47.48	14.91	3.19

4 结论

为研究寒区隧道含裂隙围岩不均匀冻胀特性, 以更合理地计算寒区隧道冻胀力, 进行了单向冻结条件下含裂隙饱和砂岩和凝灰岩的冻胀试验, 研究了裂隙尺寸、冻结温度及其梯度、岩石材料性质对裂隙岩体不均匀冻胀性影响, 并定义了考虑裂隙影响的不均匀冻胀系数, 得出如下结论:

(1) 在单向冻结过程中, 裂隙水(冰)的温度变化过程可划分为快速降温、相变、缓慢降温和稳定4个阶段. 裂隙处的冻胀变形过程可划分为冷缩、快速增长和稳定3个阶段.

(2) 对于含裂隙饱和砂岩, 随裂隙宽度的增加, 裂隙法向的线冻胀率随之增加. 当裂隙较深时, 裂隙法向线冻胀率的增量较为明显, 当裂隙较浅时, 裂隙法向线冻胀率的增量较小.

(3) 对于含裂隙饱和砂岩, 岩石自身的线冻胀率随冻结温度的降低而增加, 裂隙法向的线冻胀率随冻结温度的降低而减小.

(4) 含裂隙凝灰岩孔隙率较小, 岩体的冻胀变形以裂隙处的冻胀变形为主, 岩石自身在低温条件下表现为冷缩.

(5) 考虑裂隙的影响, 计算了饱和砂岩试件的不均匀冻胀系数, 试验得出的不均匀冻胀系数范围为2.39~3.11. 裂隙平行于温度梯度方向时, 裂隙宽度增加, 岩体不均匀冻胀系数减小.

(6) 对于含裂隙饱和砂岩, 裂隙岩体的不均匀冻胀系数随温度梯度的增加而增加, 且增幅大于岩石不均匀冻胀系数.

参考文献:

- [1] 夏才初, 张国柱, 曹诗定, 等. 寒区公路隧道防冻保暖技术及其发展趋势[C]// 2009年全国公路隧道学术会议. 兰州: [S. n.], 2009: 13-19.
XIA Caichu, ZHANG Guozhu, CAO Shiding, et al. Antifreeze

- and warmth retention technology and developing trend of road tunnel in frigid areas[C]// Proceedings of National Conference on Road Tunnel in 2009. Lanzhou: [S. n.], 2009: 13-19.
- [2] LAI Y, WU H, WU Z, *et al.* Analytical viscoelastic solution for frost force in cold-region tunnels[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 1999, 31(3):227.
- [3] 黄继辉, 夏才初, 韩常领, 等. 考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增2):3766.
- HUANG Jihui, XIA Caichu, HAN Changling, *et al.* The analytical solution of frost heave force acting on cold-region tunnel liner considering the anisotropy frost heaving of the surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Supp. 2):3766.
- [4] 夏才初, 李强, 吕志涛, 等. 各向均匀与单向冻结条件下饱和岩石冻胀变形特性对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 274.
- XIA Caichu, LI Qiang, LYU Zhitao, *et al.* Comparative experimental study on frost deformation characteristics of saturated rock under uniform freezing and uni-directional freezing conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 274.
- [5] 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.
- LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, *et al.* Advance and review on freezing-thaw damage fractured rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3): 452.
- [6] 夏才初, 黄继辉, 韩常领, 等. 寒区隧道岩体冻胀率的取值方法和冻胀敏感性分级[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9):1876.
- XIA Caichu, HUANG Jihui, HAN Changling, *et al.* Methods of frost-heave ratio evaluation and classification of frost-heave susceptibility of tunnel surrounding rock in cold regions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1876.
- [7] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1208.
- LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, *et al.* Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1208.
- [8] 路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1579.
- LU Yani, LI Xinping, WU Xinghong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1579.
- [9] 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(3): 562.
- SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, *et al.* Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 562.
- [10] AROSIO D, LONGONI L, MAZZA F, *et al.* Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring[M]// MARGOTTINI C, CANUTI P, SASSA K. *Landslide Science and Practice*. Berlin: Springer, 2013.
- [11] 乔国文, 王运生, 杨新龙. 高寒山区岩体冻胀冰劈破坏试验[J]. *山地学报*, 2014(5): 579.
- QIAO Guowen, WANG Yunsheng, YANG Xinglong. Experiment on rock frost heaving damage of ice splitting in alpine mountain regions [J]. *Mountain Research*, 2014(5): 579.
- [12] 裴向军, 蒙明辉, 袁进科, 等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(7): 1999.
- PEI Xiangjun, MENG Minghui, YUAN Jinke, *et al.* Research on rock mass fracture freezing-thawing character under wet or dry condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 1999.
- [13] 黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1): 78.
- HUANG Shibing, LIU Quansheng, CHENG Aiping, *et al.* Preliminary experimental study of frost heaving pressure in fracture and frost heaving propagation in rock mass under low temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 78.
- [14] JIA H, LEITH K, KRAUTBLATTER M. Path-dependent frost-wedging experiments in fractured, low permeability granite [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28: 698.
- [15] BOST M, POUYA A. Stress generated by the freeze - thaw process in open fractures of rock walls: Empirical model for tight limestone[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(4): 1491.
- [16] DAVIDSON G P, NYE J F. A photoelastic study of ice pressure in rock fractures[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1985, 11(2):141.
- [17] MATSUOKA N. A laboratory simulation on freezing expansion of a fractured rock: preliminary data[R]. [s. l.]: University of Tsukuba, 1995.
- [18] 康永水, 刘泉声, 赵军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2518.
- KANG Yongshui, LIU Quansheng, ZHAO Jun, *et al.* Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12):2518.
- [19] 秦允豪. 热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- QIN Yunhao. *Heat*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenshuan. *Heat transfer* [M]. 4rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] 陶履彬. 岩石冻胀性与其含水量关系的试验研究[C]// 第一届华东岩土工程学术大会论文集. 无锡: [S. n.], 1990: 387-396.
- TAO Lvbing. Experimental study of the relationship between the first heave ratio and the water content of the rock[C]// Proceedings of the First Session of the East China geotechnical Conference. Wuxi: [S. n.], 1990:387-396.