

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.08.026

冻融循环条件下岩石弹性模量变化规律研究

阎锡东¹, 刘红岩¹, 邢闯锋², 李 超¹

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2.中铁七局集团有限公司勘测设计院, 河南 郑州 450016)

摘 要: 岩体冻融损伤机制为温度降低使岩体中的水发生相变、体积膨胀、产生冻胀力的作用, 岩体中的微裂隙在冻胀力的作用下扩展延伸, 温度升高时, 融化的水进入新的裂隙, 冻结成冰再次产生冻胀作用, 反复循环使裂隙网络扩展, 最终造成岩体的损伤。基于此, 从弹塑性力学、断裂力学的角度出发, 研究了在冻胀力的作用下单裂隙扩展特性, 推导了冻胀力与裂纹扩展长度之间的关系, 利用Mori-Tanaka方法建立了岩体宏观损伤量与冻胀力及冻融次数之间的关系式, 讨论了岩体弹性模量与冻融次数、冻胀应力以及渗透系数的变化规律, 并与试验结果进行了比较分析。结果表明, 岩体在冻融循环条件下的弹性模量随冻融次数的增加呈非线性减小; 冻胀应力越大, 岩体弹性模量衰减越快; 岩体的渗透系数越大, 弹性模量衰减越慢。

关 键 词: 冻胀应力; 渗透系数; 裂纹扩展; 弹性模量; 冻融循环

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 08-2315-08

Variability of elastic modulus in rock under freezing-thawing cycles

YAN Xi-dong¹, LIU Hong-yan¹, XING Chuang-feng², LI Chao¹

(1.College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Engineering Survey & Design Company of China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

Abstract: Brittle material such as rock deteriorates subjected to freezing and thawing. It is generally observed that the primary reason of rock deterioration is the water phase transition caused by the change of temperature. Hydraulic pressure is generated by 9% volumetric increase of freezing water in a closed crack, which expands crack, meanwhile water flows into new cracks as the temperature is raised. Therefore, the repeated cycles generate the new damage of rock. The freezing and thawing process of rock is also affected by a number of factors such as the length of cracks, permeability, and heaving stress. Considering the extension length of one single crack subjected to frost heave forces, a formula of the relationship between the macroscopic damage and freezing-thawing cycles is established on the basis of elastoplastic mechanics and fracture mechanics. An analytical model is developed to predict the deterioration degree. The validity of the model is examined by comparing its predictions with the experimental results. The effect of elastic modulus on freezing-thaw cycles, heaving stress and permeability coefficient is also discussed. In addition, the theoretical solutions are compared with the existing experimental results. The conclusions are drawn as follows. Firstly, the crack extension length is dominated by heaving stress and the permeability of rock which increases nonlinearly with the decrease of temperature and the coefficient of permeability. On the other hand, the connectivity increases with increasing crack length, and the permeability of fractured rock mass increases. Secondly, elastic modulus decreases nonlinearly due to freezing-thawing cycles. Thirdly, the initial crack length has great effect on the variability of elastic modulus, according to stress intensity factor theory, the heaving stress decreases as the initial crack length increases, which reduces the elastic modulus to some extent. Finally, by comparing the theoretical results with the experiment data of sandstone under uniaxial compression, it is interesting to note that the results are in good agreement. Although the number of cracks is not affected by the freeze-thaw cycles due to the limitation of the initial assumption, the assumption needs to be improved with the measured data.

Keywords: heaving stress; permeability coefficient; crack expansion; elastic modulus; freezing-thawing cycles

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41162009)。

第一作者简介: 阎锡东, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的科研工作。Email:yanxidong1331@126.com

通讯作者: 刘红岩, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。Email:lhyan1204@126.com

1 引言

耐久性和实用性是寒区工程建设的重要指标,在寒区建设和资源开采过程中,会遇到很多岩体工程冻融损伤问题,如:岩质边坡的冻融剥蚀、滑塌、隧道围岩的冻胀失稳等,严重威胁着岩体工程的安全稳定。

岩体由不连续面如裂隙、节理与岩块组成;不连续面互相连通形成裂隙网络,成为水分储存和流动的主要通道,由于季节交替以及昼夜温度变化的作用,在低温条件下水分发生相变,形成冰体,冰体在体积膨胀受到约束时会产生较大的冻胀力,从而使裂隙端部产生应力集中,进而使裂隙扩张,导致裂隙体积增加;在温度升高时,水分又会发生迁移,这种周而复始的循环严重加剧了岩体的损伤。在低温冻胀过程中,由于水冰相变、体积膨胀对岩体的温度场、渗流场以及应力场的分布都产生明显的作用。

Muneco 等^[1]利用断裂力学理论,通过分析单个裂隙在水冰相变过程中的扩展机制,利用应力强度因子判据推导裂纹扩展长度表达式,然后利用损伤因子与裂隙密度的关系推导出非均质裂隙岩体冻融损伤本构模型。但该模型基于概率统计分析结果,在微观条件下不符合能量守恒定律。

徐光苗等^[2]通过对红砂岩和页岩饱和岩样的单轴试验结果进行拟合分析,得出岩体宏观弹性模量和抗压强度随冻融次数的演化规律。杨更社等^[3]利用 CT 试验对岩体在冻融循环条件下的损伤演化进行了分析,认为最初的几次冻融循环对损伤的扩展起着主导作用,损伤变量先迅速增大,而后逐渐趋于恒值。而对于强度较低,裂隙贯通度较高,离散型较大的软砂岩,随着冻融循环次数的增加,损伤变量平缓增加。张慧梅等^[4]则是从统计损伤模型出发,认为冻融损伤因子服从与冻融次数有关的 Weibull 分布,考虑岩石细观的非均匀性,推导了冻融受荷损伤本构模型;刘泉声等^[5]利用断裂力学方法对冻胀荷载作用下岩体中的单个裂纹周边应力场进行了分析,计算了冻胀作用下裂纹尖端的应力强度因子,得出裂纹失稳扩展的条件,并且进行了单裂隙的数值模拟,并未对裂纹扩展长度与冻胀应力之间的关系进行具体分析;陈卫忠等^[6]通过对饱和岩样单轴压缩试验和三轴压缩试验分析认为,单次冻融循环产生的损伤是由 4 个不同阶段的损伤叠加而成,并且依据试验结果提出了多次冻融循环条件下的岩体损伤演化方程;李新平等^[7]认为,岩体在

冻融条件下内应力随着外部温度的变化交变地作用于岩体骨架上,岩体中大量微裂纹萌生扩展,最终形成贯通裂缝,导致岩石力学特性衰减,并且据此提出了岩石微观缺陷的统计分布条件下的冻融受荷损伤演化方程;刘红岩等^[8]通过试验研究认为,完整岩石的弹性模量随着冻融循环次数的增加而减小,并与相应的节理岩体冻融损伤变化规律进行了对比分析。

但上述研究主要是通过试验研究的方法对冻融次数与岩体宏观损伤量之间的关系得出拟合公式,并未对其冻融循环损伤的内在机制进行深入分析,因此,得出的公式不便推广应用,而且试验公式中的参数意义不明确,一定程度上也阻碍公式的应用。

为此,本文首先基于断裂力学理论对裂纹在冻胀作用下的扩展长度计算公式进行了推导,然后建立了岩体宏观损伤变量与冻胀力及冻融循环次数的关系,并对其进行了修正,最后,利用该公式讨论了不同变量对岩体弹性模量的影响规律。

2 张开型裂纹的起裂判据及扩展方向

在冻胀力作用下的张开型裂纹如图 1 所示。

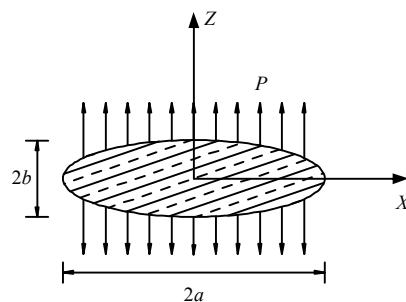


图 1 冻胀作用下的张开型裂纹
Fig.1 Schematic of an open-mode crack under frost heaving

将不规则裂纹等效为平面状态下扁平状椭圆裂隙,裂纹内壁受到均匀的法向冻胀应力 p 的作用,裂隙半长为 a ,张开度为 $2b$,经过 n 次冻融循环之后,裂隙的半长变为 a_n ,裂纹沿着应变能密度因子最小的方向发展,裂纹的失稳扩展是由于最小应变能密度因子 $S_{\min}$ 达到材料相应的临界值 S_c 时发生的,在平面应变条件下,对于纯 I 型裂纹尖端区域应变能密度场强度形式如下:

$$S = a_{11} K_I^2 \quad (1)$$

式中: $a_{11} = \frac{1}{16\pi G} [(3-4\mu - \cos\theta)(1 + \cos\theta)]$, G 为剪切模量 (GPa), μ 为泊松比, θ 为裂纹开裂角;

K_I 为裂纹尖端的应力强度因子。

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial^2 \theta} \geq 0 \quad (2)$$

根据式 (2) 可以确定开裂角 $\theta = 0$ 。

$$S_{\min} = S_c \quad (3)$$

$$S_c = \frac{1-2\mu}{4\pi G} K_{IC}^2 \quad (4)$$

式中: K_{IC} 为断裂韧度值。

式 (3)、(4) 为裂纹起裂判据, 即最小应变能密度因子达到临界应变能密度时裂纹扩展。

3 单裂纹扩展长度与冻胀应力关系

假设在宽为 W , 长为 $2h$ 的有限几何体中存在一个长为 $2a$, 张开度为 $2b$ 的扁平状椭圆裂纹。如图 2 所示, 当发生冻胀作用时, 微裂纹内壁作用有均匀分布的冻胀力, 在研究裂纹扩展长度时作出以下假设: ①裂纹为平面状态下的扁平状椭圆形裂纹; ②裂隙封闭; ③忽略水分迁移与岩石骨架变形; ④裂隙始终饱和状态, 采用线弹性断裂力学理论假设进行分析, 对裂纹端部形成的塑性区进行适当修正; ⑤裂纹稳定扩展。

根据 Griffith 能量释放率理论, 在裂纹扩展过程中, 需要经历两个阶段, 第 1 个阶段是温度降低过程中, 水冰相变, 体积膨胀, 但由于裂纹面的束缚, 冰体对其产生膨胀力的作用, 在裂纹周围介质中储存弹性应变能, 当裂纹尖端的应力强度因子 K_I 大于断裂韧度值 K_{IC} 时, 裂纹开始扩展, 即第 2 个阶段, 在这个阶段裂纹周边的弹性应变能释放, 为扩展提供能量。则得出如下关系:

$$W = E - U \quad (5)$$

式中: W 为冻胀应力做的功; E 为裂纹周边储存的弹性应变能; U 为整个系统下降的总的势能, 假设裂纹扩展过程中弹性应变能全部释放, 则

$$W = -U \quad (6)$$

扩展后的裂纹形态如图 2 虚线所示。

根据应力场的叠加原理, 单个裂纹壁面受到均匀压应力的作用, 裂纹尖端的应力强度因子等于在有限宽板边界施加相同拉应力而内壁面自由的裂纹尖端的应力强度因子, 查阅航空研究院的应力强度因子手册^[9], 设有限宽板长为 $2h$, 宽为 W_1 , 得出有限宽板条件下, 受到均匀拉力, 其应力强度因子表达式为

$$K_I = Fp\sqrt{\pi a} \quad (7)$$

式中: F 为修正值, 其表达式为

$$F = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W_1}}$$

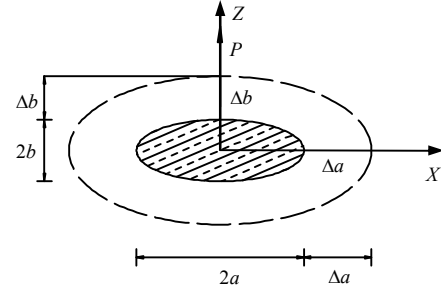


图 2 裂纹冻胀扩展示意图

Fig.2 Schematic of a crack extension under frost heaving

该修正值为近似值, 当 $\frac{2a}{W_1} \leq 0.7$ 时, 误差在 0.03

以内。

当 $K_I > K_{IC}$ 时, 裂纹开始扩展。

冻胀应力沿着内壁面法向做功, 故式 (6) 左边的表达式可以表示为

$$W = 2pa \cdot \Delta b \quad (8)$$

式 (6) 右边的系统势能的下限值可用扩展力做功表示:

$$U = -2G \cdot \Delta a \quad (9)$$

若不考虑裂隙面的束缚, 在冰体自由膨胀的条件下, 假设冰体单宽膨胀体积为 ΔS_i 。但在实际情况下, 裂隙面将对冰体施加一大小为 P 的反作用力, 冰体产生弹性应变, 根据弹性理论, 在平面应变条件下, 法向应变大小为

$$\varepsilon = \frac{(1-\nu_i)(1+2\nu_i)}{E} p \quad (10)$$

式中: ν_i 为泊松比; E 为弹性模量。

因此, 冰的单位宽度上体积的实际增加量为

$$\Delta S'_i = \Delta S - S_i \varepsilon \quad (11)$$

式中: S_i 为未冻胀前水的总的体积。根据式 (10) 就可得出裂隙水在发生相变前后体积增量的关系表达式为

$$\pi ab + \Delta S'_i = \pi(a + \Delta a)(b + \Delta b) \quad (12)$$

式中: Δa 为裂纹扩展长度 (m); Δb 为裂纹法向位移增量 (m); 结合 (7)、(8) 就可以得出关于裂纹扩展长度的方程为

$$A(\Delta a)^2 + B(\Delta a) + C = 0 \quad (13)$$

式中: $A = \pi G$; $B = \pi(pab + aG)$; $C = \Delta S'_i pa$ 。

对式(13)进行求解就可得出平面应变条件下裂纹扩展长度与冻胀应力之间的关系式为

$$\Delta a = \frac{-(abp + aG)\pi + \sqrt{(abp + aG)^2 \pi^2 + 4Gpa\Delta S'_i}}{2G\pi} \quad (14)$$

4 岩体弹性模量与冻融次数之间的关系

本文拟采用细观损伤力学的方法,忽略微观空洞、微裂隙的微观力学效应,采用一种平均化的方法,把细观损伤力学研究的结果反映到材料的宏观力学性能中去,典型的方法有 Mori-Tanaka 方法^[10],考虑微裂纹之间的弱相互作用,计算微裂纹损伤材料的有效弹性模量。具体的推导过程这里不再赘述,根据 Mori-Tanaka 方法^[10],在二维条件下,考虑微裂纹之间的互相作用,得到的有效弹性模量的表达式为

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + \pi\alpha} \quad (15)$$

式中: E 为岩体初始弹性模量 (MPa); E' 为冻融数次之后的等效弹性模量 (MPa); α 为裂纹密度参数,表示为 $\alpha = Na^2$, N 为单位面积上平均半长为 a 的裂纹的数量 (条/ m^2)。

根据前面的假设裂纹始终饱和,因此,冻胀应力只与温度有关,即每次冻融循环之后裂纹扩展长度都相等,经过 n 次冻融循环之后,裂纹密度参数表示为

$$\alpha = N(a + n(\Delta a))^2 \quad (16)$$

结合式(14)与式(15)就可以得出多次冻融条件下岩体弹性模量的变化关系。

根据 Walder 等^[11]的研究成果,裂隙中的冻胀应力 p_i 是与低温持续时间、温度值、水冰相对体积含量以及流阻相关的量,其计算公式为

$$p_i(t) = \frac{L(-T_c)}{v_s T_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + p_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (17)$$

式中: 时间常数 $\tau = \left(\frac{8}{3\pi} \right) \left(\frac{1-\nu}{\mu} \right) \left(\frac{gav_L}{v_s^2} \right) R_f$; $L(-T_c)$

代表温度 T_c 对应相变潜热 (kJ/mol); v_s 为冰的相对体积含量; v_L 为水的相对体积含量; ν 为泊松比; μ

为剪切模量; R_f 为流阻; g 为重力加速度; a 为裂隙半长。 T_a 为绝对温度, $T_a = 273.15 \text{ K}$; p_0 为冻胀初期初始冻胀应力,根据试验,为 2 MPa。

通过上述公式可以得出,温度一定时,冻胀应力与裂隙中的水冰的相对体积含量是一一对应的,当冻胀应力确定时,相对体积含量惟一确定,因此,冻胀应力取裂隙开始稳定扩展时的初始冻胀应力时,代入公式就可以求出水冰的相对体积含量。

以红砂岩为例,其中,裂纹半长取平均值: $a = 9 \times 10^{-6} \text{ m}$, 隙宽半长 $b = 1.2 \times 10^{-7} \text{ m}$, 格里菲斯能量释放率由下面公式计: $G = \frac{\pi a' p^2}{E}$, a' 为裂纹扩展后的长度,裂纹初始冻胀力根据修正应力强度因子计算,为 22 MPa, $\Delta S'_i$ 经过计算为裂隙中水的总体积的 5%,断裂韧度由文献[12]提供砂岩的断裂韧度为 $K_{IC} = 0.304 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $N = 4.67 \times 10^7$ 条/ m^2 ,将这些参数带入式(7)、(14)中,得出冻融次数与弹性模量之间的关系,如图3所示。

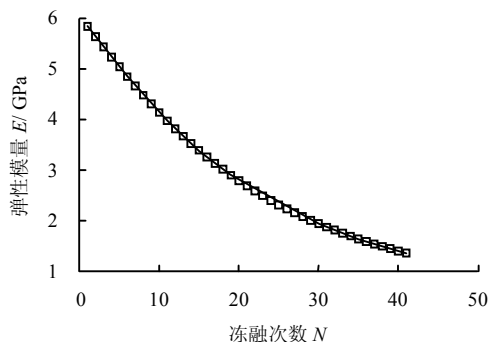


图3 弹性模量与冻融次数之间的关系
Fig.3 The relationship between elastic modulus and the number of freezing and thawing

5 对公式的讨论与修正

5.1 塑性区对裂纹扩展长度的修正

在实际岩体特别是软岩中,当裂纹面作用有冻胀应力时,裂纹前端一定范围内会形成塑性区,而不是处在弹性条件下,因此,为了便于在线弹性断裂力学的条件下求解问题,需要将前端的塑性区进行等效处理, Irwin 等^[13]在 20 世纪 60 年代提出用等效裂纹尺寸的方法,这是由于裂纹尖端的塑性变形使物体的刚度降低,这与实际裂纹尺寸稍长一些的裂纹是相当的,即

$$a' = a + r_y \quad (18)$$

式中: a' 为等效裂纹长度; a 为原始裂纹长度; r_y 为塑性区等效长度增量,平面应变表达式为

$$r_y = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad (19)$$

式中: σ_s 为岩体屈服强度。

每次冻胀过程都会形成相应的塑性区, 故经过修正之后, 裂纹密度参数变为

$$\alpha = N \left[a + n(\Delta a + r_y) \right]^2 \quad (20)$$

5.2 水冰相变体积增量的修正

依据第二冻胀理论, 当岩体中裂隙水饱和时, 在冻胀过程中, 随着冻结缘向前推进, 冰体会对未冻水产生压力, 进而形成水压梯度, 使一部分水在未冻结前迁出裂隙, 从而导致参与水冰相变的水的体积减少, 相变体积膨胀量也会相应地减小, 单裂隙中, 根据立方定律, 流体单位宽度流量 q 的大小为

$$q = 2kbJ \quad (21)$$

式中: k 为岩体裂隙等效渗透系数; J 为水头差, $J = \frac{p_w - p_m}{l}$, l 为渗流路径, p_w 为冻结缘前端孔隙

水压力 (MPa), p_m 为岩石中外界孔隙水压力, 为一个大气压, $p_m = 101 \text{ kPa}$; b 为裂隙隙宽的一半。

刘泉声等^[5]认为, 裂隙水主要沿着裂隙的轴向迁移, 因此, 在一定时间内迁出的水分的总量表示为

$$Q = \int_{t_1} q dt = \int_{t_1} 2bkJ dt \quad (23)$$

式中: t_1 为冻结周期, 与文献[2]试验时间一致为 12 h, 从上述分析中可以看出, 冰体的实际体积增加量会随着渗透性的改变而减小, 因此, 实际水冰相变的体积的增加量为

$$\Delta S'_i = \Delta S_i - S_i \varepsilon - Q \quad (24)$$

5.3 尺寸效应对岩石弹性模量的修正

岩石的各项物理力学性质与岩石的尺寸存在密切的关系, 因为不同尺寸条件下, 内部的微观裂隙和缺陷分布的形式和数量就不同, 试验结果也就会不同, 基于此, 本文引入尺寸效应影响系数 $A(D)$ ^[14], 得出任意尺寸与标准尺寸岩石试样之间弹性模量的关系形式为

$$E' = A(D)E^* \quad (25)$$

式中: E' 为任意尺寸的弹性模量; E^* 为标准尺寸试件的弹性模量。

刘宝琛等^[15]通过对国内外的 7 种岩石样品的单轴压缩试验研究发现, 岩石单轴抗压强度随尺寸增加而单调减小, 基于此提出一种指数形式的单轴抗压强度随尺寸的衰减函数, 徐高巍等^[16]等通过研究发现, 砂岩的弹性模量随着尺寸的增加同样呈单调减小, 对试验数据进行拟合处理, 发现弹性模量与尺寸的关系符合对数曲线关系。形式如下:

$$E' = a + b \ln(D - c) \quad (26)$$

式中: a 、 b 、 c 为相关系数; D 为岩石边长或直径, 对于标准岩石样品, 边长为 D_0 , 标准尺寸下的岩石的弹性模量 $E^* = a + b \ln(D_0 - c)$, 则尺寸效应影响系数 $A(D)$ 的形式为

$$A(D) = \frac{a + b \ln(D - c)}{a + b \ln(D_0 - c)} \quad (27)$$

因此, 考虑尺寸效应, 标准试件在冻融条件下弹性模量的衰减方程修正为

$$\frac{E^*}{E} = \frac{1}{A(D)} \frac{1}{(1 + \pi \alpha)} \quad (28)$$

6 参数敏感性分析

6.1 单次冻胀对裂纹扩展长度的影响

式 (14) 反映了冰体冻胀应力与裂纹扩展长度之间的关系, 以红砂岩为例进行说明, 其中, 裂纹半长取平均值: $a = 9 \times 10^{-6} \text{ m}$, 隙宽半长, 格里菲斯能量释放率由下面公式计: 为 $G = \frac{\pi a' p^2}{E}$, $\Delta S'_i$ 经

计算为裂隙中水的总体积的 5%, 断裂韧度由邓华锋等^[12]提供砂岩的断裂韧度, $K_{IC} = 0.304 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $N = 4.67 \times 10^7 \text{ 条/m}^2$, 将上述参数代入公式中, 得出冻胀应力与裂纹扩展长度之间的变化关系, 如图 4 所示。

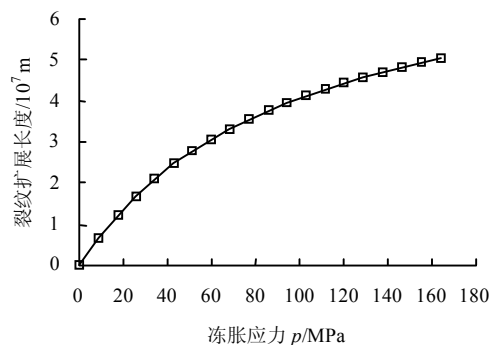


图4 裂纹扩展长度与冻胀应力之间的关系
Fig.4 Relationship between crack extension length and frost stress

由图可以看出,随着冻胀应力的增加,裂纹扩展长度逐渐增加,但两者并不是线性相关的,冻胀应力增加到一定程度之后,裂纹扩展长度逐渐变缓。

不同的冻胀应力条件下,岩体弹性模量随着冻融次数变化的曲线如图 5 所示,可以看出,随着冻胀应力的增加,弹性模量衰减速率明显增加。而且从图上也可以看出,冻胀应力越大,随着冻胀应力增加弹性模量变化幅度越小,冻胀应力分别为 120 MPa 和 154 MPa 时的弹性模量变化曲线比较接近。

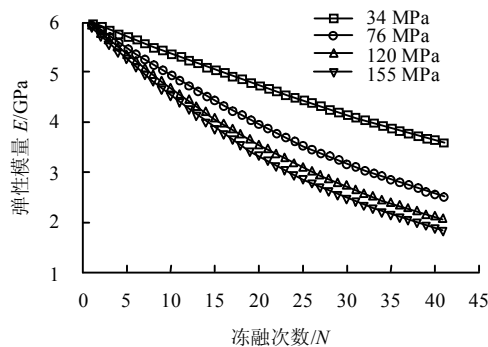


图 5 不同冻胀应力下弹性模量与冻融次数之间的关系

Fig.5 Relationships between elastic modulus and the number of freezing and thawing under different frost stresses

6.2 裂纹初始长度对弹性模量的影响

取不同的裂纹初始长度研究其对弹性模量衰减曲线的影响,根据裂纹的起裂判据分析可知,当砂岩的断裂韧度一定时,裂纹长度与裂纹壁面受到的冻胀应力成反比,即初始长度越长,裂纹开始扩展需要的冻胀应力越小,裂纹扩展长度越短。在相同的冻融循环次数条件下,岩石弹性模量衰减越慢。

从图 6 可以看出,随着裂隙初始长度的增加,岩石的弹性模量衰减逐渐变缓。主要原因是裂纹初

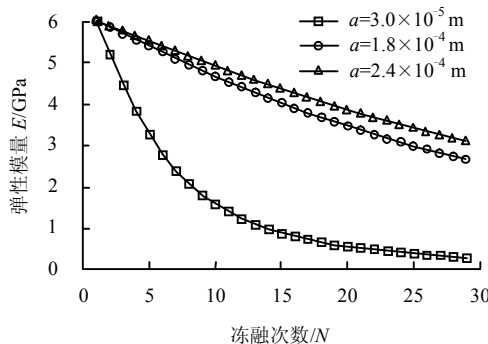


图 6 不同裂纹初始长度下弹性模量与冻融次数之间关系

Fig.6 Relationships between elastic modulus and the number of freezing-thawing cycles of different crack initial lengths

始长度越长,冻胀应力越小,因此,提供给裂隙扩展的能量越少,裂隙扩展越短,弹性模量衰减越趋于平缓。

6.3 岩体渗透系数对弹性模量变化影响

在单个微裂隙中,根据第二冻胀理论,当温度降低时,裂隙中的水是逐渐冻结的,即随着冻结缘逐步向前推进的,若裂隙饱和,则在这个过程中,裂隙内产生水压梯度,造成水分向远离冻结缘方向移动,即迁出裂隙,裂隙水的体积减少,冻胀效应减弱。假设在一定时间内,裂隙迁出的水的体积为 Q ,裂隙在整个冻胀过程中始终饱和,根据 Loch 等^[17]的研究结果,可以假定冻结水压符合热力学平衡条件,在裂隙冻胀过程中,冻胀应力与冻结缘前端的水压力保持平衡,忽略岩石基质的变形,基于 Clapeyron 方程得出水-冰热力学平衡公式为

$$p_i = \rho_i \left[\frac{p_w - p_\pi}{\rho_w} - L \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (29)$$

式中: $p_\pi = C_w RT$, π 为溶质渗透压力; C_w 为溶液中溶质的物质的量浓度 (mol/L), 若为纯水, 则为 0, R 为常数; T 为溶液温度; ρ_i 为冰的密度; T 为冻结温度; T_0 为标准温度。

通过公式进一步变形就可以得出一定冻胀应力条件下, 冻结缘前端的裂隙水压力为

$$p_w = \rho_w \left[\frac{p_i}{\rho_i} + L \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + p_\pi \quad (30)$$

式 (21) 结合式 (30) 对时间进行积分就可以得出冻胀周期内迁移出去的水的总体积, 由于迁出体积改变了水冰相变体积增量, 进而改变了裂纹扩张长度, 影响弹性模量的变化。

从图 7 可以看出, 不同的渗透系数条件下, 弹性模量变化曲线明显不同, 随着渗透系数的增加, 弹性模量衰减变慢, 这是因为渗透系数增加表示在相等的冻结周期内迁出去的水分就会更多, 这样就导致参与水冰相变的水的含量降低, 因此, 体积膨胀量减小, 弹性应变能降低, 裂纹扩展长度就会相应减小, 弹性模量衰减幅度减小, 冻胀造成的损伤逐渐降低, 这与文献[18]得出的结论相一致。通过上述的计算可以得出, 在岩体受到交替冻融应力的初始阶段, 由于裂隙较少, 互相之间连通率较小, 因此, 渗透系数较小, 弹性模量的损伤衰减速率较快, 而随着多次冻融过程, 由于裂隙长度增加, 连通度和张开度增加, 渗透系数加大, 因此, 在冻融

条件下, 岩体的弹性模量衰减变缓。

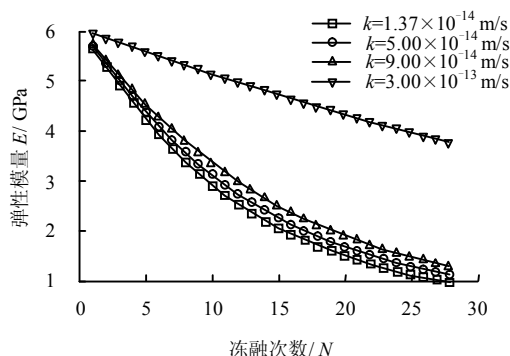


图7 不同渗透系数条件下弹性模量与冻融次数之间的关系

Fig.7 Relationships between elastic modulus and the number of freezing-thawing cycles under different permeability coefficients

6.4 理论值与试验值比较

本文利用文献[2]中的砂岩单轴压缩岩体弹性模量随冻融次数变化的试验拟合曲线进行对比, 其中, 理论计算通过对塑性区进行等效修正, 结果如图8所示。

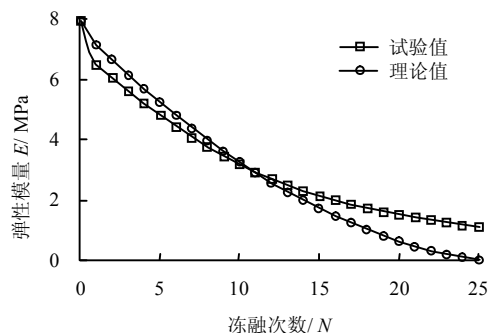


图8 砂岩弹性模量衰减规律的理论值与试验值的比较曲线

Fig.8 Comparisons between theoretical and experimental results of changes of elastic modulus of shale

从图可以看出, 理论值变化比较平缓, 而试验得出的砂岩的单轴压缩条件下弹性模量随冻融次数的变化则有很明显的拐点, 即当超过某一临界冻融次数时, 弹性模量逐渐趋于定值, 造成这样的误差的原因主要是由于在之前的理论推导过程中, 假设每次冻融循环裂隙中的冻胀应力不变, 这样就会随着冻融次数的增加, 岩体的损伤模量逐步均匀递减, 与实际情况不相符合, 其次认为, 岩体在冻融损伤的过程中, 裂纹的总的数量没有增加, 因此, 单位面积上裂纹的条数不变, 密度参数只与裂纹长度增

加有关, 这是本文有待进一步研究的问题。

7 结 论

(1) 基于线弹性断裂力学的方法推导了单裂隙中冻胀应力与裂纹扩展长度之间的关系, 结果表明, 冻胀应力越大, 裂纹扩展长度越长, 而且随着冻胀应力的增加, 裂纹扩展长度增幅逐渐变小。

(2) 基于 Mori-Tanaka 方法, 建立岩体弹性模量与冻融循环次数之间的关系, 并且对公式中的冻胀应力、裂纹初始长度及渗透系数对弹性模量的影响进行了讨论分析, 结果表明, 裂纹的冻胀应力对弹性模量的衰减影响较大, 冻胀应力越大, 弹性模量衰减越快; 渗透系数同样对弹性模量的衰减规律产生较大影响, 随着裂纹扩展长度增加, 连通度增加, 裂隙岩体的渗透系数增加, 导致了水冰相变体积膨胀量减小, 弹性模量衰减变缓。

(3) 裂纹初始长度对弹性模量影响较大, 根据断裂强度因子公式, 初始长度越大, 起始冻胀应力越小, 裂纹扩展长度越小, 则弹性模量衰减越缓。

(4) 通过对砂岩单轴压缩条件下的弹性模量的变化情况的试验数据与本文的理论结果对比分析, 发现二者趋势一致, 但由于考虑假设冻融循环过程中裂纹的数量没有增加, 因此, 与实际曲线存在误差, 有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] MUNEO HORI, HIDENORI MORINIRO. Micro-mechanical analysis of deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1998, 36(4): 511—522.
- [2] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机制分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3077—3082.
XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3077—3082.
- [3] 杨更社, 张全胜. 冻融环境下岩体细观损伤及水热迁移机制分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [4] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 472—476.

- ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 472—476.
- [5] 刘泉声, 康永水, 刘小燕. 冻结岩体单裂隙应力场分析及热力耦合模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 218—223.
- LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, LIU Xiao-yan. Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture freezed rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 218—223.
- [6] 陈卫忠, 谭贤君, 郭小红, 等. 特殊地质与环境地下工程稳定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2308—2315.
- LI Xin-ping, LU Ya-ni, WANG Yang-jun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(11): 2308—2315.
- [8] 刘红岩, 刘冶, 邢闯锋, 等. 循环冻融条件下节理岩体损伤破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1547—1554.
- LIU Hong-yan, LIU Ye, XING Chuang-feng, et al. Test study of damage failure of jointed rock mass under freezing-thawing cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1547—1554.
- [9] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [10] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [11] WALDER JOSEPH, BERNARD HALLET. A theoretical-model of the fracture of rock during freezing[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1985, 96(3): 336—346.
- [12] 邓华锋, 朱敏, 李建林, 等. 砂岩 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3586—3591.
- DENG Hua-feng, ZHU Min, LI Jian-lin. Study of fracture toughness mode-I and its correlation with strength parameters of sand stone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3586—3591.
- [13] IRWIN G R, SPRAWLEY J E. Progress in the development of crack toughness fracture tests[J]. **Wear**, 1962, 5(3): 1—11.
- [14] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东, 等. 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4485—4490.
- YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong, et al. Study on statistical damage constitutive model of rock considering scale effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4485—4490.
- [15] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611—614.
- LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng, DU Qi-zhong, et al. Study on compressive strength of rock scale effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 611—614.
- [16] 徐高巍, 白世伟. 岩体弹性模量尺寸效应的拟和研究[J]. 铜业工程, 2006, 3: 17—20.
- XU Gao-wei, BAI Shi-wei. Study on fitting of the elastic modulus of rock mass scale effect[J]. **Copper Engineering**, 2006, 3: 17—20.
- [17] LOCH J P G, KAY B D. Water redistribution in partially frozen saturated silt under several gradients and overburden loads[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1978, 42(3): 400—406.
- [18] VLAHOU LOANNA, WORSTER M GRAE. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. **Journal of Glaciology**, 2010, 56(196): 271—277.