

拉剪应力下单裂隙岩体受温差影响的强度研究

张岩,赖乾隆*,任翔

(西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:为研究温度差对拉剪应力状态下裂隙岩体力学特性的影响规律,从高岩温隧洞、边坡等工程实际中出现的岩体拉剪破坏现象出发,基于能量及线弹性断裂力学理论,推导出单裂隙岩体在温差下裂隙强度的表达式;并使用数值方法将裂隙倾角、水平压力等因素与温度应力相结合,系统研究了拉剪应力条件下裂隙岩石的强度、裂纹扩展演化机制等。结果表明:在拉剪应力状态下,随着温差由5℃增大到15℃,岩石产生热膨胀,导致裂隙岩体内应力增加。当裂隙倾角从155°接近最大剪切应力180°方向时,主要剪应力更容易作用于裂隙面,使得抵抗剪切的阻力减小,初裂强度降低,从而推动裂隙剪切并发生扩展。本研究揭示了拉剪应力状态下单裂隙岩体在温差条件下受多因素影响的强度特性规律,有助于工程师在设计阶段对岩体的稳定性进行初步评估,从而制定相应的施工方案和预防措施。

关键词:单裂隙岩体;温差;裂隙倾角;拉剪应力;初裂强度

中图分类号:TU452

文献标志码:A

引用格式:张岩,赖乾隆,任翔.拉剪应力下单裂隙岩体受温差影响的强度研究[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):143-155.

ZHANG Yan, LAI Qianlong, REN Xiang. Study on the strength of single fracture rock mass affected by temperature differences under tensile-shear stress[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):143-155.

Study on the strength of single fracture rock mass affected by temperature differences under tensile-shear stress

ZHANG Yan, LAI Qianlong*, REN Xiang

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effect of temperature difference on the mechanical properties of fractured rock mass under tensile-shear stress, the expression of fracture strength of single fractured rock mass under temperature difference was derived based on energy and linear elastic fracture mechanics theory from the phenomenon of rock mass tensile-shear failure in high rock temperature tunnels and slopes. The strength of fractured rock and the mechanism of crack growth and evolution under tensile and shear stress were systematically studied by combining the factors of fracture inclination, horizontal pressure and temperature stress with numerical method. The results showed that under tensile-shear stress conditions, as the temperature difference increasing from 5℃ to 15℃, the rock thermal expansion occurred and the internal stress of fractured rock mass increased. When the fracture inclination angle was from 155° to the direction of the maximum shear stress of 180°, the main shear stress was easier to act on the fracture surface, which reduced the resistance to shear and the initial crack strength, thus promoted the fracture shear and spreaded. This study revealed the strength characteristics of single fissure rock mass under the condition of temperature difference influenced by many factors, which was helpful for engineers to make preliminary assessment of the stability of rock mass in the design stage, so as to formulate corresponding construction plans and preventive measures.

Keywords: single fracture rock mass; temperature difference; fracture inclination angle; tensile-shear stress; initial crack strength

0 引言

与均质岩体相比,裂隙岩体具有更大的不均匀

性和不连续性特征,是岩体中常见的岩石类型之一。裂隙作为岩体中的弱面,会导致应力集中、岩石破碎和失稳等问题,并可能引发严重的地质灾害。对此,国内外学者在裂隙岩体的裂隙尺寸、数

收稿日期:2024-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509200);陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-375)

第一作者简介:张岩(1982—),女,河南泌阳人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为岩体力学及岩土工程。E-mail:ylzy@126.com

*通信作者简介:赖乾隆(1997—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为岩体力学与地下工程。E-mail:yydskk923@163.com

量及分布位置等自身参数方面做了大量的研究^[1-6],却往往容易忽略应力状态和环境条件对岩体强度的影响。以水电站高边坡工程为例,其开挖规模庞大,在卸荷过程中极易受到应力重分布的影响,使得应力状态可能由压剪应力逐渐转变为拉剪应力状态^[7]。这种转变会导致不连续面受拉后张开,黏聚力丧失并无法传递拉应力,进而对工程岩体的稳定性和安全运营构成严重威胁。此外,随着隧道和地下空间的开发不断向深部发展,很多深埋隧道出现以拉剪破坏为主的硬岩弹脆性破坏^[8]。因此,有必要研究裂隙岩体在拉剪应力状态下的力学特性。

直至今日,诸多专家和学者在受拉剪应力状态下的裂隙岩体强度方面取得了一定的研究成果^[9-12]。文献[13]和文献[14]通过非对称切口试件模拟岩体的拉剪作用,研究了岩石的拉剪力学特性,包括拉剪联合强度、应力-应变关系、破坏形式等。文献[15]开展了单裂隙砂岩拉剪试验,考虑了其裂隙倾角的影响,研究表明,试验破坏以翼裂纹的拉伸破坏为主,随裂隙倾角的增大,强度总体上呈现先增大后减小的规律。文献[16]利用自主设计的拉伸-剪切辅助装置并结合声发射技术发现,与压剪试验峰后残余阶段相比,拉剪破坏具有更多的脆性破坏特征。文献[17-18]通过直剪试验深入研究裂隙与剪切方向夹角对岩石在法向卸荷条件下的剪切力学行为的影响。文献[19]则对天然灰岩层进行拉剪力学试验研究,考虑多种因素对岩石力学性质的影响,探讨岩石的断裂规律和强度特性。文献[20]为研究节理岩体的拉剪力学特性,针对共面断续节理岩体开展了系列数值模拟研究。从上述分析可知,在常温条件下受拉剪应力的岩体力学特性、变形破坏等方面,已经取得了丰富的成果。

裂隙岩体的力学特性不仅与裂隙状态有关,还依赖于岩体所处环境的温度。对于高岩温隧洞,一旦开挖,其周围大气环境通过与岩体发生对流换热,引起岩体内部温度的时间和空间分布变化。这种由于大气环境与岩体形成的温差所产生的热应力,当超过岩石的抗拉强度时,可能导致岩石发生热劈裂或破裂,使其失去强度和抗变形能力^[21]。文献[22]研究热力湿多场耦合作用下岩石的力学行为,得出岩石的各种力学特性与室温相比都有很大的结论。文献[23-24]利用 PFC (particle flow code) 模拟裂纹的演化过程,对高温后预制裂纹岩石损伤特性进行了研究。

综上所述,以往的研究主要集中在常温条件下不同因素对岩体强度的影响,而针对温差对裂隙岩体强度的影响研究相对有限,尤其是在核废料处理、地热开发和煤炭地下气化等开挖工程中均涉及高温和热应力的作用,高温易使脆性岩体产生热损伤从而导致岩体破坏^[25-26]。鉴于此,本研究在前人研究的基础上进行假设^[27-28]:(1)作用在裂隙面上的拉应力(σ_β)和剪应力(τ_β)均匀分布,岩石和裂隙均为线弹性介质;(2)裂隙岩体取为横观各向同性体;(3)裂隙面间的填充物不承载力的作用;(4)变化的温度场对岩体介质产生一定的温差。为了能够在经典力学的基础上提供一种更加简洁、可行且具有普适性的方法来解释和预测单裂隙岩体强度受拉剪应力与温差影响的情况,本研究以新疆某高岩温隧洞内裂隙岩体为研究对象,考虑裂隙参数和温差等因素,建立倾角($155^\circ \sim 180^\circ$)范围内非闭合裂缝的拉剪起裂准则。同时结合扩展有限元 (extended finite element method, XFEM) 方法模拟裂纹的扩展对该准则进行验证并建立 BP 神经网络模型对岩体初裂强度进行预测分析,共同为相关工程提供理论指导和参考。

1 裂隙岩体中的温度应力

高岩温隧洞开挖后,洞内低温环境会导致围岩温度变化,影响裂隙岩体的强度。温度升高时,岩体中矿物质的热膨胀会增加岩体内部单元之间的相互作用力,使得岩体整体应力状态收敛,提高抗拉和抗剪能力。相反,温度下降时,岩体内部单元之间的相互作用力减小,使得岩体整体应力状态松散,抗拉和抗剪能力降低。

在考虑温度应力时,暂不考虑荷载或边界位移对应力的影响。对于既有荷载、边界位移和温度改变等多个因素共同作用的弹性力学问题,可以分别计算每个因素下的应力结果,然后使用叠加原理来得到实际问题的解答。

为确定弹性体内的温度应力,需进行两方面的计算:(1)按照热传导理论,根据弹性体的热学性质、内部热源、初始条件和边界条件,计算弹性体内各点在各瞬时的温度,即确定温度场,前后两个时刻的温度场之差就是弹性体的温度改变;(2)按照热弹性力学,根据弹性体的温度改变来求出体内各点的温度应力,即确定应力场。

1.1 平面温度应力问题的平衡方程

1.1.1 基于薄板假设理论

裂隙岩体中存在着各种尺度和几何形状的裂

隙,这些裂隙对岩石固体的力学性质和稳定性产生重大影响。其中一个关键问题是理解裂隙岩体在温度变化条件下的平面应力分布规律。

现假设一厚度相对于其他尺寸来说非常小的等厚度薄板,此时有^[29]:

(1)直法线假设:变形前垂直于中面的直线,变形后仍为直线且垂直于变形后的中面。

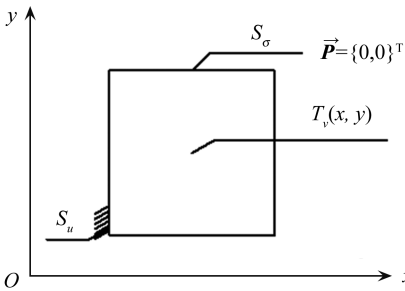
(2)变形前后,板的厚度不变即应力分量 ε_z 极其微小可以忽略不计,表示为 $w(x,y,z)=w(x,y,0)=w(x,y)$ 。

(3)薄板中面内的各点,没有平行于中面的位移,表示为 $u(x,y,0)=v(x,y,0)=0$ 。

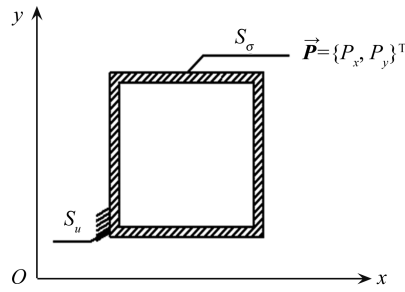
(4)略去应力 σ_z 及应变 ε_z 不计,即 $\sigma_z=0, \varepsilon_z=0$,式中 u,v,w 为直角坐标系中的位移分量。

1.1.2 温度应力的等效荷载法

假定在如图 1 所示的等厚度薄板及坐标系中,没有体力和面力的作用,但是有变温 T_v 的作用,而这个变温 T_v 是平行于 xy 面的、前后两个瞬时的平面温度场之差,因而只是 x 和 y 的函数,不随 z 变化。



(a) 等厚度薄板的平面温度应力问题



(b) 一般平面应力问题

图 1 温度平面应力问题和平面应力问题

Fig.1 Temperature and plane stress problems

空间应力问题的平衡方程简化为

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

式中,正应力分量(σ_x, σ_y),切应力($\tau_{yx}=\tau_{xy}$)。

在温度场中弹性体内任意一点的应变是由两部分组成的,一部分是应力引起的,另一部分是

温度场引起的,则用应力分量和变温 T_v 表示形变分量的物理方程,即所谓热弹性力学的物理方程

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) + \alpha T_v \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) + \alpha T_v, \\ \gamma_{xy} = \frac{2}{E}(1 + \mu)\tau_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

式中:($\varepsilon_x, \varepsilon_y$)为正应变分量; α 为岩体的热膨胀系数(量纲是 $^{\circ}\text{C}^{-1}$); T_v 为温度变化量(后一瞬时的温度减去前一瞬时的温度,正值为升温,负值为降温); E 为弹性模量; μ 为泊松比; $\alpha \cdot T_v$ 为温度场引起的线应变,简称温度应变。

由式(2)求解应力分量,可以得出用形变分量和变温 T_v 表示应力分量的物理方程

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\gamma_{xy} \end{cases} \quad (3)$$

几何方程与等温问题的相同,可写为

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4)$$

因为形变与位移之间的纯粹几何关系,不会因为引起形变和位移的不同而有所改变。将式(4)代入式(3),得出用位移分量和变温 T_v 表示应力分量的公式为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (5)$$

为了得到按位移求解时的应力边界条件,将式(5)代入式(1)得

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - (1+\mu) \cdot \alpha \frac{\partial T_v}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - (1+\mu) \cdot \alpha \frac{\partial T_v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

按位移解法,边界条件为

(a) 应力边界条件:由 $\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} l \\ m \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow$

$$S_\sigma: \begin{cases} l\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + m \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) = l(1+\mu)\alpha T_v \\ m\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + l \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) = m(1+\mu)\alpha T_v \end{cases}, \quad (7)$$

式中, l, m 分别代表等厚度薄板的边界外法线和 x, y 坐标轴之间的方向余弦。

(b) 位移边界条件

$$S_u: \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中, \bar{u}, \bar{v} 为直角坐标系中的边界约束分量。

由式(6)、(7)可知,图1(a)的温度平面应力问题可以等效为图1(b)的平面应力问题,图1(b)中等效后的体力分量(X, Y)为

$$\begin{cases} X = -\frac{E\alpha}{1-\mu} \frac{\partial T_v}{\partial x} \\ Y = -\frac{E\alpha}{1-\mu} \frac{\partial T_v}{\partial y} \end{cases} \quad (9)$$

等效后的面力(P_x, P_y)为

$$\begin{cases} P_x = \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} l \\ P_y = \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} m \end{cases} \quad (10)$$

或法向面力 P 为

$$P = \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \quad (11)$$

因此,在一定的位移边界条件下,弹性体内由于温变而引起的位移,等于仅考虑受等效体力式(9)与等效法向面力式(11)作用下的位移。而应力分量包含两部分,一部分是根据位移分量求得的,另一部分是与各点的变温 T_v 成正比的、各向相同的正应力 $\frac{E\alpha T_v}{1-\mu}$ 。

其中温变产生的应力分量的计算式为

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma'_x - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \sigma_y = \sigma'_y - \frac{E\alpha T_v}{1-\mu} \\ \tau_{xy} = \tau'_{xy} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $(\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'_{xy})$ 为等效体力和等效面力产生的应力。则在温度应力的平面应力问题中,温度应力就等于假想体力和假想面力所引起的应力,叠加以各向相同的正应力 $\frac{E\alpha T_v}{1-\mu}$ 。此时,温度应力的平面问题转换成已知体力和面力的平面问题。

1.2 平面温度应力问题的位移函数解法

引用位移势函数 $\psi(x, y)$, 将位移特解 (u', v') 取为

$$\begin{cases} u' = \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ v' = \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{cases} \quad (13)$$

以 u' 及 v' 分别作为 u 及 v 代入式(6), 简化后得到

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) = (1+\mu) \cdot \alpha \cdot \frac{\partial T_v}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) = (1+\mu) \cdot \alpha \cdot \frac{\partial T_v}{\partial y} \end{cases} \quad (14)$$

显然,满足微分方程 $\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = (1+\mu) \cdot$

αT_v 的位移势函数^[30] $\psi(x, y) = (1+\mu) \cdot \frac{x^2 + y^2}{4} \cdot \alpha T_v$,

也满足式(6)或式(14), 则位移势函数为

$$\begin{cases} u' = \frac{\partial \psi}{\partial x} = (1+\mu) \cdot \frac{x}{2} \cdot \alpha T_v \\ v' = \frac{\partial \psi}{\partial y} = (1+\mu) \cdot \frac{y}{2} \cdot \alpha T_v \end{cases} \quad (15)$$

应力函数为

$$\begin{cases} \sigma'_x = -\frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{E\alpha T_v}{2} \\ \sigma'_y = -\frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{E\alpha T_v}{2} \\ \tau'_{xy} = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial xy} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

2 温度作用下的单裂隙岩体强度推导

岩体内裂纹的分布通常是随机的,并呈现三维分布。为简化研究,在考虑岩体应力分布特征下,以图2所示的平面单裂隙为研究对象,探求温差环境下不同裂隙倾角对裂隙岩体的力学特性及变形破坏模式的影响。

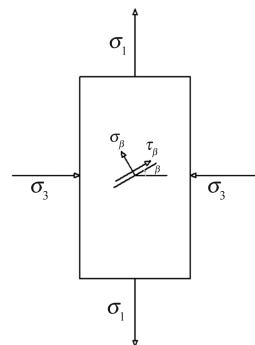


图2 裂隙应力
Fig.2 Cleavage stress

图2所示一弹脆性岩体中的裂纹同时受到远场地应力 σ_1 和 σ_3 作用(设定拉应力为正,压应力为负),任一平面裂隙与水平方向应力成 β 夹角。根据弹性力学基础知识可得裂隙面上的正应力 σ_β 和剪应力 τ_β 分别为

$$\begin{cases} \sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \cos(2\beta) \\ \tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin(2\beta) \end{cases} \quad (17)$$

若式(17)中 $\sigma_\beta > 0$,则裂隙面受拉剪应力共同作用,导致裂隙面产生法向位移,滑动抗剪摩擦力消失或可忽略^[31],使得裂纹扩展失稳变成I-II复合型裂纹问题。

当岩体的裂隙周围存在温度差时,将式(12)代入平面应力状态公式中得出与 x 轴成 β 角的平面裂隙处的温度应力为

$$\begin{cases} \sigma_\beta^T = \frac{1}{2}(\sigma'_x + \sigma'_y - \frac{2E\alpha T_v}{1-\mu}) + \\ \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_x - \sigma'_y) \cos(2\beta) - \\ \tau'_{xy} \sin(2\beta) \\ \tau_\beta^T = \frac{1}{2}(\sigma'_x - \sigma'_y) \sin(2\beta) + \\ \tau'_{xy} \cos(2\beta) \end{cases} \quad (18)$$

当裂隙岩体受温度应力作用,而不考虑裂隙水压力时,根据土力学有效应力原理,可知作用在岩体上的总应力 σ 为裂隙面间的有效应力 σ' 与温度应力 f_T ($\sigma_\beta^T, \tau_\beta^T$)之差,即 $\sigma = \sigma' - f_T$ 。岩体的变形强度由有效应力控制,故裂隙变形采用有效应力,即

$$\sigma' = \sigma + f_T \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)可得在温差影响下没有裂隙水压力的情况为

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \cos(2\beta) + \sigma_\beta^T \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin(2\beta) + \tau_\beta^T \end{cases} \quad (20)$$

整理式(20)得

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3 + \sigma'_x + \sigma'_y - \frac{2E\alpha T_v}{1-\mu}) + \\ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma'_x - \sigma'_y) \cos(2\beta) - \tau'_{xy} \sin(2\beta) \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma'_x - \sigma'_y) \sin(2\beta) + \tau'_{xy} \cos(2\beta) \end{cases} \quad (21)$$

根据岩石断裂力学理论,裂隙尖端的应力强度因子^[32]为

$$\begin{cases} K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = \tau \cdot \sqrt{\pi a} \end{cases} \quad (22)$$

式中, K_I 和 K_{II} 分别为I型和II型应力强度因子, a 为裂隙半长度。

将式(21)代入(22)得

$$\begin{aligned} K_{II} &= \tau \cdot \sqrt{\pi a} = \\ & \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma'_x - \sigma'_y) \sin(2\beta) + \tau'_{xy} \cos(2\beta) \right] \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (23)$$

由于存在着对剪切断裂起遏制作用的沿裂隙垂直方向的法向应力,又从式(21)、(22)可知裂隙周围的温度应力抵消了一部分法向应力。代入得

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \cdot \sqrt{\pi a} = \\ & \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3 + \sigma'_x + \sigma'_y - \frac{2E\alpha T_v}{1-\mu}) + \right. \\ & \left. \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma'_x - \sigma'_y) \cos(2\beta) - \tau'_{xy} \sin(2\beta) \right] \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (24)$$

采用近似断裂准则,I-II拉剪复合型裂纹失稳准则可表示为^[33-34]

$$K_I + K_{II} = K_{IC} \quad (25)$$

式中 K_{IC} 为I型断裂韧性。

将式(23)、(24)代入式(25)可得单裂隙岩体在拉剪应力状态下受温差和裂隙倾角因素影响的初裂强度表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1 - \cos(2\beta) - \sin(2\beta)}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \sigma_3 - \\ & \frac{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \sigma'_x - \\ & \frac{1 - \cos(2\beta) - \sin(2\beta)}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \sigma'_y - \\ & \frac{2 \cdot [\cos(2\beta) - \sin(2\beta)]}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \tau'_{xy} + \\ & \frac{1}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \frac{2E\alpha T_v}{1-\mu} + \\ & \frac{1}{1 + \cos(2\beta) + \sin(2\beta)} \cdot \frac{2K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \end{aligned} \quad (26)$$

3 基于温差作用下的单裂纹扩展模拟

3.1 数值模拟流程

鉴于岩体温度场和裂缝扩展分析所采用的单

元结构不同,本研究将有限元分析分为两部分进行。首先使用热传递过程分析生成岩体在不同温度变化条件下的温度场。在扩展有限元裂缝分析中,通过加载预定义温度场来实现温度场下的裂缝扩展有限元分析,考虑热力效应对裂缝扩展的影响。

采用 ABAQUS 中的顺序耦合热-应力分析方法。通过施加边界条件,以 20 °C 作为初始温度,将之前计算得到的温度场结果文件以预定义场的方式导入含有预制裂缝的模型中。在瞬态温度应力分析中,对试件表面施加温度荷载,形成不同的温差条件。考虑周围大气环境与岩体四个面之间的对流换热作用,裂隙壁面则按绝热处理。

在裂缝扩展分析中,采用 XFEM 方法模拟温差作用下岩石内不同裂隙倾角情况时裂纹的萌生、扩展、贯通以致试样的破坏模式。采用最大主应力牵引开裂准则,即一点的最大主应力超过临界值时产

表1 岩体热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of the rock mass

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	比热容/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	绝对零度/ $^{\circ}\text{C}$	玻尔兹曼 常数/ $\text{W}(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1}$
40	0.3	2 800	2.8	8×10^{-6}	802	-273.15	5.67×10^{-8}

表2 不同工况下的模拟方案

Table 2 Simulation schemes under different working conditions

编号	裂隙倾角 $\beta/(^{\circ})$	水平应力 σ_3/MPa	温差 $T_v/^{\circ}\text{C}$
J-1	155~180	0	5
N-1	155~180	0、-1、-2	5
W-1	155~180	-2	5、10、15

XFEM 模拟时,采用静力通用分析步,并设置分析时长为 120 s。在接触特性模块中,定义预制裂缝为初始裂纹,岩石整体为允许裂纹可扩展的区域,并定义裂纹之间的接触属性,法向为硬接触,切向无摩擦。

对于岩体中的 XFEM 计算网格,采用四边形形状的 CPS4R 有限单元。预制裂缝作为初始裂纹被直接定义。在裂缝扩展过程中,需对裂纹尖端或者裂纹路径附近的区域进行网格细化处理,以更好地捕捉裂纹的形态和扩展行为,如图 3 所示。

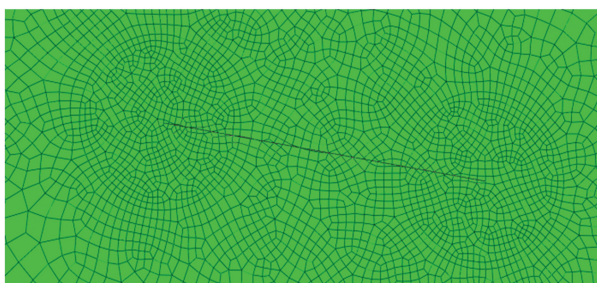


图3 预制单裂纹有限元网格划分

Fig.3 Precast single-crack finite-element grid division

生初始裂纹。

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\}, \quad (27)$$

式中, σ_{\max}^0 为临界最大主应力,符号 $\langle \rangle$ 表示纯压缩不会产生初始损伤,当式中比例值达到某一特定临界值时,开始产生初始损伤。最大主应力失效准则认为当扩展准则的比值 f 达到 1 时,预先设定好的裂纹便会开始扩展,并选取基于能量、线性软化、混合模式的模态独立损伤演化规律来决定裂纹的后续扩展。同时,为了确保模型求解的收敛性和解的稳定性,设置损伤稳定系数为 5×10^{-5} 。

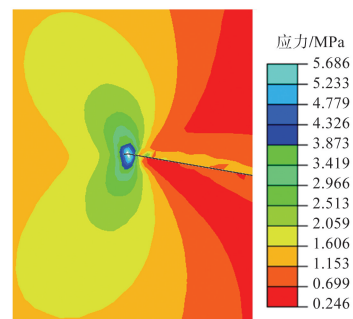
3.2 模型构建及模拟方案

运用 ABAQUS 软件,对长度 $2a=12\text{ mm}$,初始裂纹角度分别为 155° 、 160° 、 165° 、 170° 、 175° 、 180° 的 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 平板施加不同应力,赋予相应材料属性(见表 1)。数值模拟方案如表 2 所示。

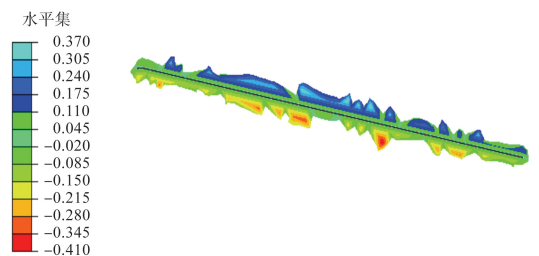
3.3 模拟结果与分析

3.3.1 裂隙岩体扩展演化过程

ABAQUS 后处理获取加载过程中岩体表面的全局应力云图如图 4(a)、图 5(a)、图 6(a)所示,水平集云图如图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)所示。由图 4~6 可知,各倾角试样表面裂纹产生、扩展、破坏的变化特点基本一致。限于篇幅,本研究以 $\beta=170^{\circ}$ 时的云图为例。



(a) Mises应力云图



(b) 裂纹扩展走向图

图4 增量步为 45 时的云图

Fig.4 The cloud map at the incremental step of 45

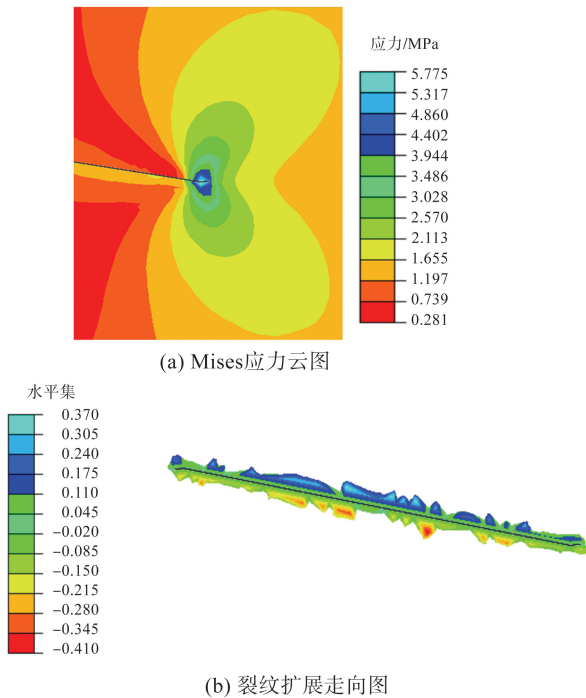


图 5 增量步为 47 时的云图

Fig.5 The cloud map at the incremental step of 47

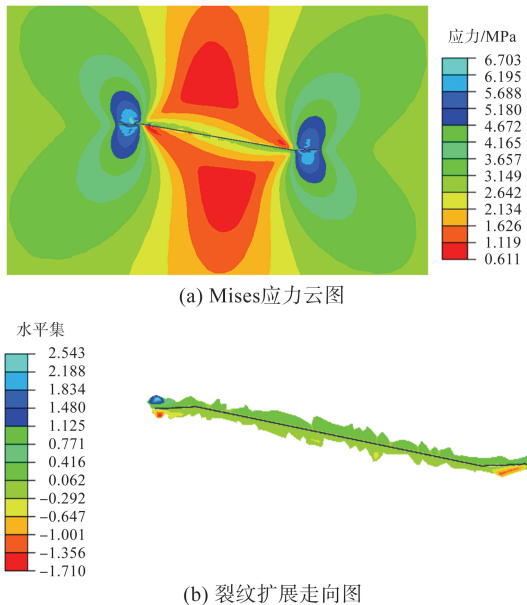


图 6 增量步为 104 时的云图

Fig.6 The cloud map at the incremental step of 104

高岩温隧洞伴随高地温、高热作用,其各项力学行为较常温下表现出更加复杂的性质(见图 4~6)。在拉剪应力状态下,裂隙岩体从初始阶段开始积累应力。当达到临界应力值时,岩石发生断裂并初步扩展裂隙。这些裂隙可能源自岩石内的微小缺陷或已存在的裂纹。随着拉剪应力的持续作用,裂隙不断扩张形成复杂的裂隙网络。岩体在裂隙扩展过程中发生应力释放和再分布,从而产生新的裂隙,并进一步扩大原有的裂隙。

由图 4、5 可知,在增量步达到 45 步和 47 步时,

裂隙的两端形成应力集中效应,并开始出现次生翼裂纹。值得注意的是,该区域内的应力远高于裂纹尖端周围的应力水平,导致应力场的不均匀分布。这种不均匀性在试样的破裂面上呈现出起伏的形态,而非平整。同时,由于拉伸和剪切应力的作用,裂隙尖端受到来自不同方向的应力影响,导致裂纹在延伸过程中形成一定的夹角,并且可能与水平方向发生偏移。

裂纹进一步扩展,由图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)可知,在拉剪应力状态下,原裂隙面可能同时出现法向松动和切向剪切变形,并在尖端形成分支裂纹。裂隙将沿着拉应力方向扩展,并最终沿与拉应力方向垂直的方向发展,只有局部存在微小的角度变化。这与文献[35]中的试验结果相吻合,进一步证明了该数值模型的可靠性。

3.3.2 岩体初裂强度影响因素分析

目前,常温条件下裂隙岩体受力规律已开展了诸多研究,但对于高岩温隧洞中不同条件下裂隙岩体的力学特性的研究还不够全面。本研究分析了高岩温隧洞中裂隙岩体拉剪状态的影响因素,包括裂隙本身相关参数、水平压应力和环境温度。裂隙倾角决定了岩体的断裂特性,水平应力影响其破坏模式,温差会导致岩石的热膨胀和收缩,进而影响岩体的强度和稳定性。因此,在岩体工程设计和地质灾害预测时,通过对各种影响因素进行单因素变化影响分析,得出不同工况下裂隙岩体的受力特点,以作为高温隧洞结构设计优化与施工技术方面的参考方向。

(1) 裂隙倾角 β

取温差 $T_v = 5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_3 = 0\text{ MPa}$,研究裂隙倾角 β 对拉剪应力状态下岩石裂纹扩展行为的影响,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,裂隙倾角对初裂强度影响显著。当裂隙角度增大时,裂隙与最小主应力方向更接近于水平,这使得在拉剪应力加载下的裂隙沿着最小主应力方向更容易张开或扩展,使得岩石的初裂强度有所降低。 β 从 155° 增大至 175° ,强度由 8.927 MPa 降低至 4.915 MPa ,强度降低比例达 44.9% ; β 为 $175^\circ\sim 180^\circ$ 时,强度略微下降,只减少了 1.2% 。倾角为 180° 的裂隙岩体的强度为最小值。究其原因,较大的裂隙角度使得裂隙形态更加开放,导致岩石内部应力集中更为严重,由此产生的不均匀应力分布会促使裂隙的扩展,并可能引发岩石的破坏。同时,较大的裂隙角度也会减少岩石中有效支撑区域的存在,削弱了岩石的整体强度。

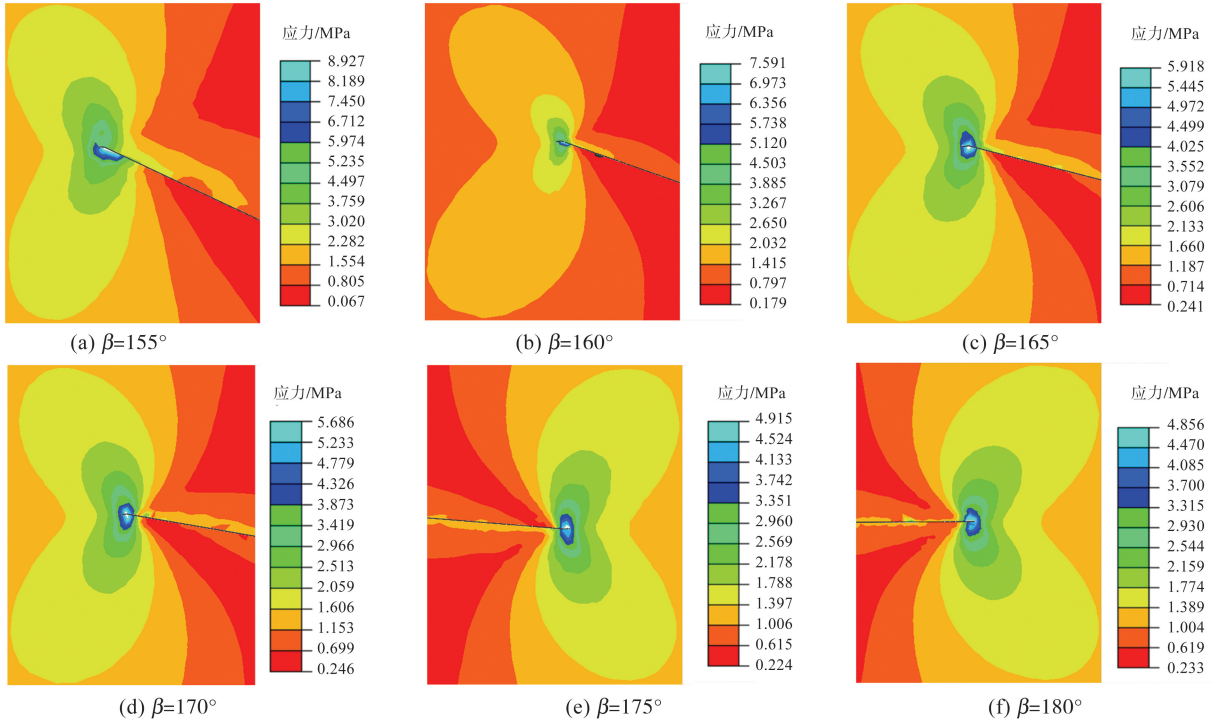


图 7 裂隙倾角对初裂强度的影响

Fig.7 Effect of fissure inclination on primary crack strength

(2) 水平应力 σ_3

相同温差条件下 ($T_v = 5\text{ }^\circ\text{C}$), 不同水平应力对岩体强度的影响如图 8 所示。水平方向的应力 σ_3 增大会导致裂隙的初裂强度进一步降低。当 σ_3 由 0 MPa 增加至 2 MPa 时, 初裂强度减少了 0.685 MPa。主要原因, 一是应力状态的改变。水平方向的压力逐渐增大, 使得岩体中的应力状态改变。原本在竖直方向上的拉应力被水平方向的压应力所抵消, 从而减小了裂隙岩体薄板的竖直方向上的应力。这意味着原本需要更大拉应力才能引发初裂的裂隙, 现在由于竖直方向上的应力减小而

变得更容易断裂。此外, 增加水平方向的压应力还会改变裂隙岩体薄板的应力分布。当水平方向的应力增大时, 应力会在裂隙周围集中。由于矩形裂隙岩体薄板的几何形状特征, 应力集中在裂隙尖端部分, 使得该部分承受较高的应力。这样的应力集中会导致裂隙尖端区域的应力超过岩石的强度极限, 从而引发裂隙的初裂。二是裂隙的扩展。高水平压应力使得岩体中的微裂纹或细小裂隙开始扩展, 并最终形成明显的裂缝。这种扩展过程可能通过剪切破坏、断裂延伸或者滑移等方式发生, 使得岩体的完整性遭到破坏, 进一步降低了裂隙的初裂强度。

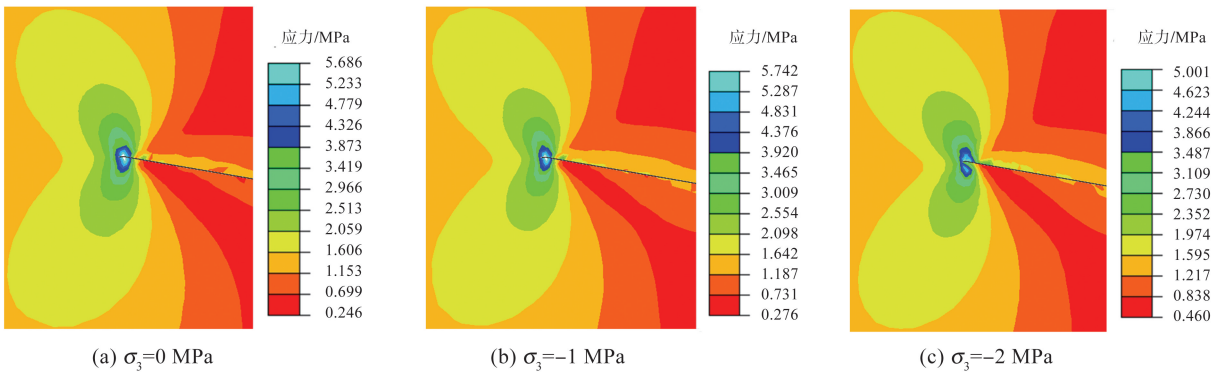


图 8 水平应力对初裂强度的影响

Fig.8 Effect of horizontal stress on primary fissure strength

(3) 温差变化 T_v

热应力是由于岩体各部分在温度变化下的不同热膨胀程度所引起的。当温差增大时, 岩体中处于低

温区域的部分与高温区域的部分之间存在温度差异, 从而导致不同程度的热膨胀。水平应力 $\sigma_3 = -2\text{ MPa}$ 时岩体强度随 T_v 变化的情况, 如图 9 所示。

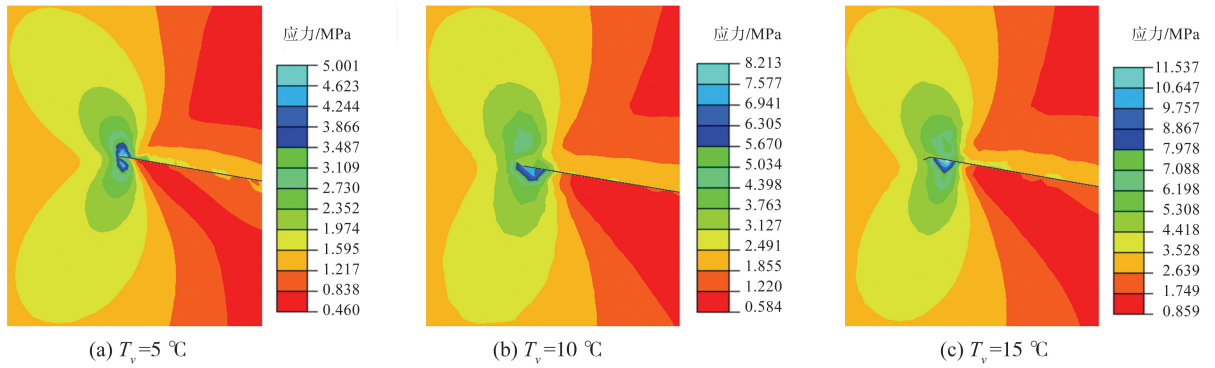


图9 温差对初裂强度的影响

Fig.9 Effect of temperature difference on the primary crack strength

高岩温隧洞中裂隙岩体所受应力与其温度场息息相关,由图9可以看出,裂隙岩体的强度随温度的升高而逐渐增大。在初始状态下,当温差 T_v 为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,岩体已经存在一定的内部应力,且初裂强度为 5.001 MPa 。说明即使在较小的温差下,岩体内部仍然存在着热应力,并可能出现微小的裂隙。这是由于岩石具有一定的弹性性质,当受到外界约束时,体积增大将引起岩体内部产生压应力。这种压应力的增加有助于提高裂隙岩体的抗拉强度。

然而,当 T_v 由 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $15\text{ }^\circ\text{C}$,初裂强度的增幅显著提高,增幅为 64% 和 131% ,表明随着温差的增大,岩体各部位的热膨胀程度也会增加,从而进一步增加了热应力。额外的热应力与原有的拉剪

应力相互作用,导致裂隙周围的应力场增加,从而提高了岩体的抗拉强度。热应力的引入增加了岩体内部的有效应力,使得岩石更难被拉伸到初裂状态,初裂强度也随之增加。

4 模型对比验证与预测

4.1 理论与模拟计算对比

拉剪应力状态下单裂隙岩体的理论强度值、数值解以及两者之间的误差如图10所示。理论值与数值模拟结果吻合良好,相对误差范围在 15% 以内。总体而言,随着倾角 β 的增大,在不同水平压应力 σ_3 及温差 T_v 条件下,裂隙岩体的初裂强度呈现下降趋势。

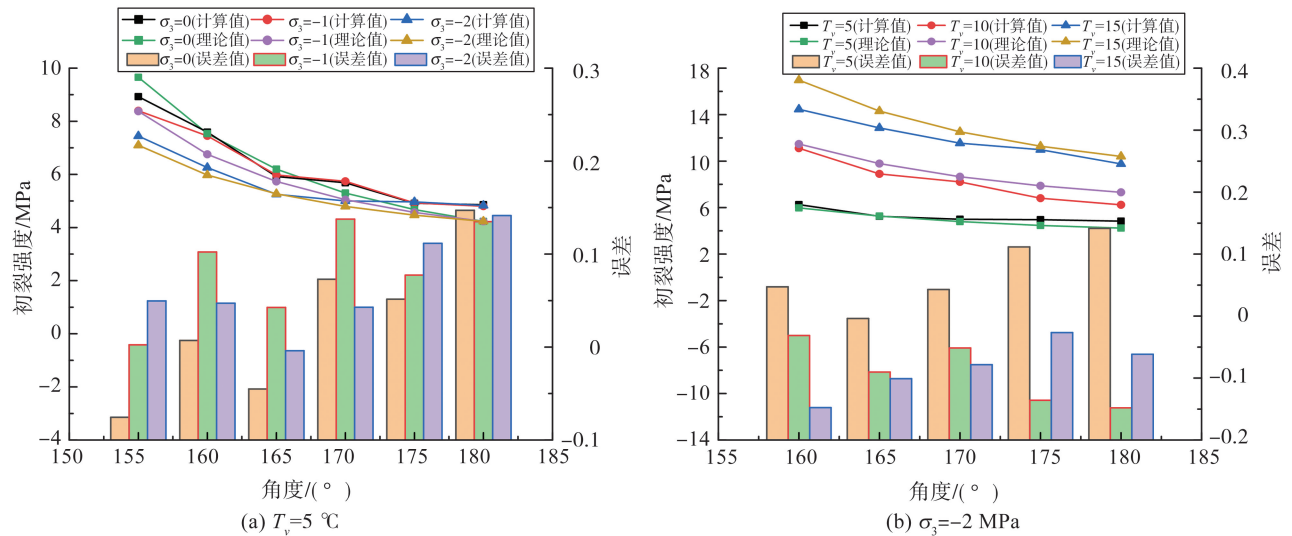


图10 拉剪状态下岩体初裂强度对比图

Fig.10 Comparison of primary crack intensity under different working conditions

产生误差的主要原因是:(1)模型离散化过程中选择网格的精度和元素类型等因素会对模拟结果产生影响;(2)材料在裂纹尖端处可能表现出非线性行为,例如塑性变形或断裂过程中的损伤累积。理论公式通常是基于线性弹性假设得出的,而

实际情况中裂纹扩展过程中的非线性行为可能会对初裂强度产生影响。

由图10(a)可知,当 $T_v = 5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,数值模拟结果略高于理论值,在 $\beta = 155^\circ \sim 165^\circ$ 范围内的计算值与理论值吻合程度较高。当 β 不变, σ_3 由 0 MPa 增加

到-2 MPa 时,岩体初裂强度均降低。以 $\beta=165^\circ$ 为例,相对于水平压应力 $\sigma_3=0$ MPa 时的试样(初裂强度为 6.20 MPa), $\sigma_3=-1$ MPa 和 $\sigma_3=-2$ MPa 压力下的试样强度分别降低了 7.5% 和 15%,模型的相对误差为 0.39%~4.52%。结果表明,增加水平方向的压应力既改变了裂隙岩体薄板的应力状态,又促使裂隙的扩展,从而降低初裂强度。通过调整剪切力的大小,可以预测出不同条件下岩体的强度变化。这有助于更好地理解岩体的力学行为,为工程设计和施工提供科学依据。

由图 10(b) 可知,温度对初裂强度的影响更加显著。 β 不变时,随着温差由 5°C 升高到 15°C ,裂隙岩体初裂强度出现大幅度提升。以 $\beta=170^\circ$ 为例, $T_v=10^\circ\text{C}$ 时的理论值较 $T_v=5^\circ\text{C}$ (初裂强度为 5.001 MPa) 时增长了 80%,而 $T_v=15^\circ\text{C}$ 时初裂强度增长了将近 2.5 倍。这表明随着温度升高,岩石内部发生热膨胀。岩石体积的扩大会导致部分裂隙闭合,从而提高初裂强度。

整体来看,对于隧洞围岩的初裂强度,不同水平压力与温度差条件下的有限元试验计算值与理论推导值在大小变化的趋势基本上一致。推导出的公式理论值和有限元计算值之间存在着较高的一致性。

4.2 基于 BP 神经网络的初裂强度预测分析

4.2.1 BP 神经网络预测模型

为进一步验证上述高岩温隧洞中不同条件下裂隙岩体强度结果的准确性,本研究依托新疆境内某发电站高温引水隧洞工程(其洞内围岩岩温较高,平均温度 25°C 以上,最高处达到 100°C),如图 11 所示,拟采用由理论值、模拟值和基于室内试验(见图 12)所得到的计算值分别生成的 28 组数据建立预测模型。

将温差 T_v 、裂隙倾角 β 、水平压力 σ_3 这 3 个因素作为 BP 神经网络的输入参数,对初裂强度进行预测。随机选取其中 20 组数据作为训练样本,8 组数据作为测试样本。模型输入输出参数区间如表 3 所示。

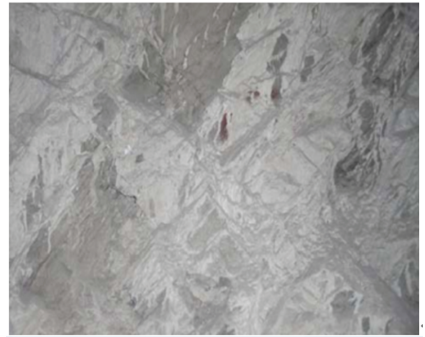


图 11 高温下的隧洞岩体

Fig.11 Tunnel rock mass at high temperature

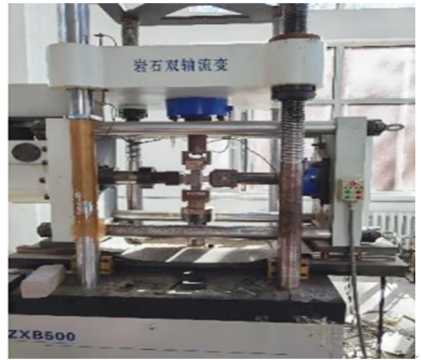


图 12 试验加载系统

Fig.12 Test with the loading system

表 3 输入和输出参数的范围

Table 3 Range of the input and output parameters

温差 $T_v/^\circ\text{C}$	裂隙倾角 $\beta/^\circ$	水平压力 σ_3/MPa	初裂强度/ MPa
[5, 15]	[155, 180]	[-2, 0]	[4.23, 16.96]

输入层选取 3 个节点,分别代表与裂隙岩体强度相关的 3 个因素:温差、裂隙倾角、水平压力。中间隐层单元取 10 个,输出层单元取 1 个,代表裂隙岩体初裂强度,上述网络结构即为 3-10-1,如图 13 所示。采用 Levenberg-Marquardt 算法对神经网络进行训练,并结合自适应学习速率的梯度下降法来优化网络。此外,采用动量梯度下降方法来调整权值和阈值。在网络训练过程中,采用均方差(mean-square error, MSE)作为网络误差的衡量指标。

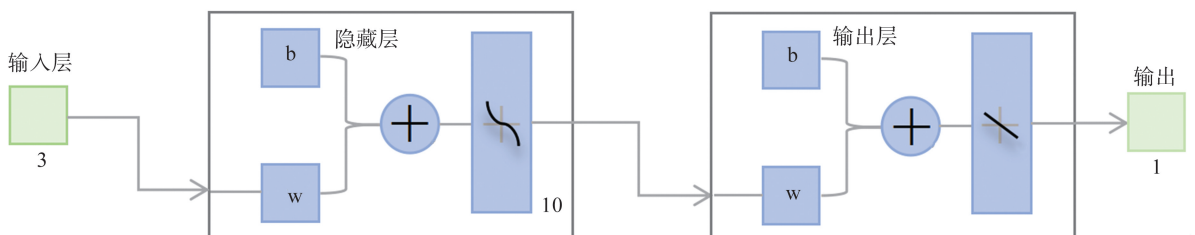


图 13 人工神经网络结构图

Fig.13 Structural diagram of the artificial neural network

4.2.2 BP神经网络预测模型结果分析

(1)相关性系数 R

相关系数 R 是用来衡量预测结果与实际观测值之间的线性相关程度的一种统计指标,当 R 趋近于 1 时,表示预测结果与实际观测值之间存在较强的正线性相关关系。本研究中的训练样本、验证样本和测试样本,经神经网络训练后的预测值和试验实测值的分布和相关关系如图 14~16 所示。

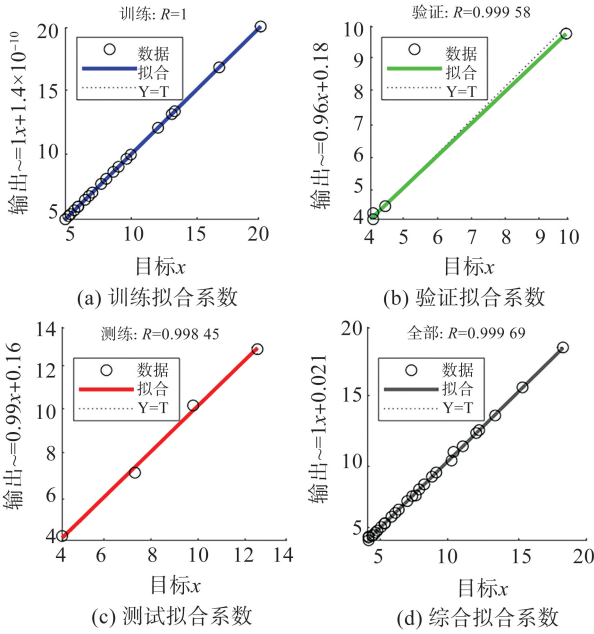


图 14 基于理论值的相关系数值

Fig.14 Correlation coefficient value based on theoretical value

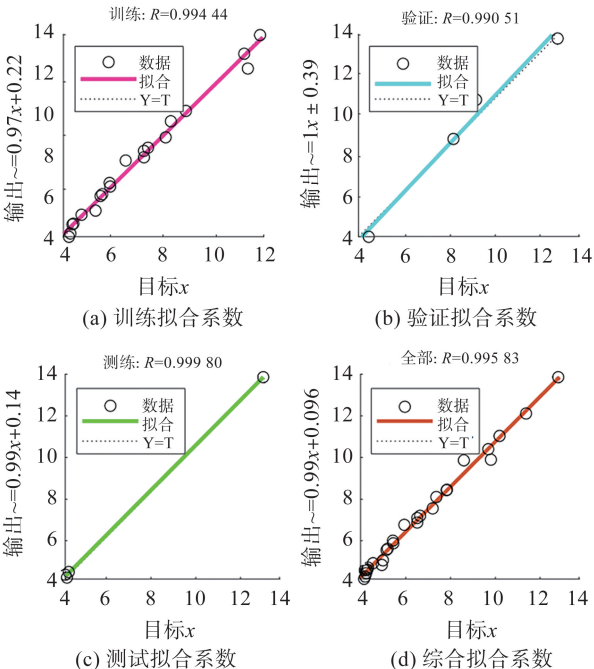


图 15 基于模拟值的相关系数值

Fig.15 Correlation coefficient value based on simulated value

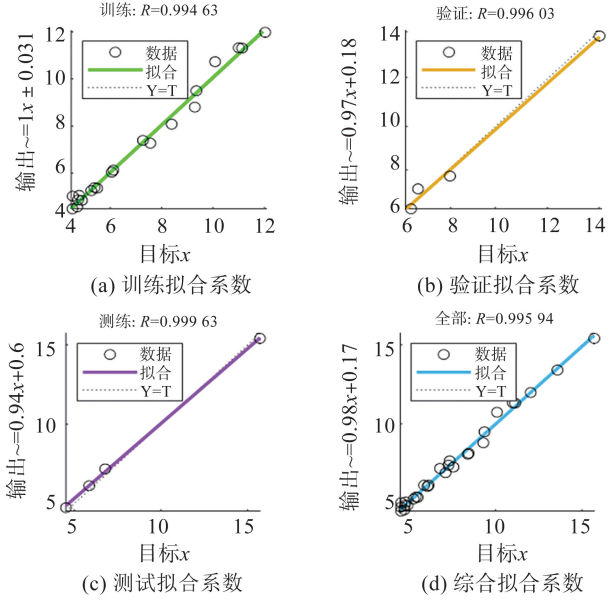


图 16 基于试验值的相关系数值

Fig.16 Correlation coefficient value based on experimental value

由图 14~16 可知,基于理论值、模拟值和试验值的神经网络相关性系数 R 接近于 1,且误差均在 0.01 以内,说明所建立的 BP 神经网络训练后得到的数据与试验数据相关程度较高,可信度较高。

(2)均方误差

在预测模型中,利用 MSE 评估模型拟合数据的程度,即模型预测结果与实际观测值的平均差异程度如表 4 所示。

表 4 均方误差

Table 4 Mean-square error

观测值	基于理论值的 MSE	基于模拟值的 MSE	基于试验值的 MSE
训练	20	0	0.050 1
验证	4	0.014 8	0.155 6
测试	4	0.031 8	0.017 2

由表 4 可知,基于理论值和模拟值所建立的 BP 神经网络 MSE 均在 0.16 以内,说明训练模型精度较高,建立的 BP 神经网络模型具有优异的预测性能,能够很好地择出全局最优解,可用于裂隙岩体初裂强度预测。

5 结论

本研究以高岩温隧洞为研究背景,以单裂隙岩体为研究对象,考虑拉剪应力状态下裂隙倾角、水平压应力与温差 3 个因素对裂隙岩体力学特性的影响,得到了如下结论。

(1)拉剪应力状态下,裂纹通常以翼裂纹的形

式从裂隙尖端开始起裂,以一定的夹角延伸至后端,逐渐趋于水平,并最终延伸至试样边缘。裂纹初期的延伸方向与水平方向的夹角是由裂隙尖端同时受到拉伸和剪切共同作用所致。裂纹延伸的后期阶段,以拉应力为主,导致裂纹延伸方向逐渐转变为垂直于拉应力的方向。

(2)通过对比分析,裂隙倾角和水平压应力对初裂强度的影响较小。尽管裂隙倾角会引起局部应力集中,但其对岩体整体强度的影响并不显著。水平压应力主要影响岩石的剪切强度。因此,裂隙倾角和水平压应力对裂纹的起裂和扩展过程的影响有限。

(3)XFEM 结果显示,温度升高会引起裂缝尖端附近产生应力集中现象。岩体的初裂强度随着裂隙周围温差的增大而增加,导致裂缝继续扩展。因此,对于高温隧洞,控制温度变化是改善裂纹扩展控制的手段之一。

(4)通过输入相关的岩体参数和温度条件,利用理论表达式以及结合 BP 神经网络以较高的精度预测单裂隙岩体在特定温差下的裂隙强度。

参考文献:

- [1] 王磊, 商瑞豪, 刘怀谦, 等. 含多裂隙煤体裂纹细观演化规律与相互作用机制[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 300-313.
WANG Lei, SHANG Ruihao, LIU Huaiqian, et al. Microcrack evolution law and interaction mechanism of coal with multiple cracks[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 300-313.
- [2] 罗丹旎, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面临空岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 75-87.
LUO Danni, LU Sihang, SU Guoshao, et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 75-87.
- [3] WANG Y Y, DENG H C, DENG Y, et al. Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 201: 108420.
- [4] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 98-106.
YI Ting, TANG Jianxin, WANG Yanlei. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 98-106.
- [5] 王娟, 王星, 袁超, 等. 不同裂隙数量砂岩体力学性状演变规律试验研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 56-64.
WANG Juan, WANG Xing, YUAN Chao, et al. Experimental study on evolution law of mechanical properties of sandstone with different fracture numbers[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 44(5): 56-64.
- [6] 梁东旭, 张农, 荣浩宇. 交叉裂隙岩体裂纹扩展试验及混合有限-离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1217-1229.
LIANG Dongxu, ZHANG Nong, RONG Haoyu. Experiment and hybrid finite-discrete element modelling of crack propagation in cross-fissured rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1217-1229.
- [7] 赵志宏, 郭铁成, 林涛, 等. 考虑粗糙度影响的裂隙岩体开挖损伤区分布规律[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(3): 77-86.
ZHAO Zhihong, GUO Tiecheng, LIN Tao, et al. Characteristics of excavation damaged zone in fractured rock mass[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(3): 77-86.
- [8] 黄笑, 肖培伟, 董林鹭, 等. 高地应力地下洞室群开挖过程岩体力学响应及破坏机制[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(3): 85-93.
HUANG Xiao, XIAO Peiwei, DONG Linlu, et al. Mechanical response and failure mechanism of rock mass during excavation of underground caverns under high geostress[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(3): 85-93.
- [9] 唐红梅, 张金浩, 陈洪凯. 含裂隙岩石的受压破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(3): 363-368.
TANG Hongmei, ZHANG Jinhao, CHEN Hongkai. Laboratory tests on failure mechanism of fractured rock under compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(3): 363-368.
- [10] 范景伟, 何江达. 含定向闭合断续节理岩体的强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(2): 190-199.
FAN Jingwei, HE Jiangda. The strength behavior of rockmasses containing oriented and closed intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(2): 190-199.
- [11] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64-67.
ZHU Zhende, HU Ding. The effect of interstitial water

- pressure on rock mass strength [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 64-67.
- [12] 李建林, 哈秋. 节理岩体拉剪断裂与强度研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3): 259-266.
LI Jianlin, HA Qiu. A study of tensile-shear crack and strength related to jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 259-266.
- [13] 李建林. 三峡工程岩石拉剪断裂特性的试验研究[J]. *地下空间*, 2002, 22(2): 149-152.
LI Jianlin. A study on tension-shear crack property of rock related to the Three Gorges Project [J]. *Underground Space*, 2002, 22(2): 149-152.
- [14] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture [J]. *Nature*, 2004, 428: 63-66.
- [15] 岑夺丰, 刘超, 黄达. 拉剪应力作用下单裂隙砂岩裂纹扩展规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(增刊2): 731-739.
CEN Duofeng, LIU Chao, HUANG Da. Experimental study on crack propagation law of single fracture sandstone under tensile shear stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(Suppl.2): 731-739.
- [16] 周超彪, 刘东, 姜清辉. 拉剪作用下类岩石试样的力学特性与损伤破坏机制[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3335-3344.
ZHOU Chaobiao, LIU Dong, JIANG Qinghui. Mechanical properties and failure mechanisms of the rocklike specimens under tension shear effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3335-3344.
- [17] 黄达, 郭颖泉, 朱谭谭, 等. 法向卸荷条件下含单裂隙砂岩剪切强度与破坏特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(7): 1297-1306.
HUANG Da, GUO Yingquan, ZHU Tantan, et al. Experimental investigation on shear strength and failure characteristics of sandstone with a single preexisting flaw under unloading normal stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1297-1306.
- [18] CEN D F, HUANG D. Direct shear tests of sandstone under constant normal tensile stress condition using a simple auxiliary device[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(6): 1425-1438.
- [19] 岑夺丰, 刘畅, 黄达. 灰岩层面拉剪力学特性及层面起伏效应研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊1): 77-87.
CEN Duofeng, LIU Chang, HUANG Da. Study on tensile-shear mechanical characteristics of limestone bedding plane and bedding plane fluctuation effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Suppl.1): 77-87.
- [20] 王志文, 赵海军, 马凤山, 等. 非均质共面断续节理岩体拉伸剪切破裂机制研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(5): 989-999.
WANG Zhiwen, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Numerical study on tension-shear failure mechanism of heterogeneous coplanar intermittent jointed rock mass [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(5): 989-999.
- [21] 陈镜丞. 湿热作用下粉砂质泥岩的渗流、力学特性及裂隙演化规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
CHEN Jingcheng. Study on seepage, mechanical properties and fracture evolution of silty mudstone under hygrothermal action[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [22] RUTQVIST J, BARR D, DATTA R, et al. Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the Yucca Mountain drift scale test-comparison of field measurements to predictions of four different numerical models[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(5/6): 680-697.
- [23] ZHAO Z H. Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 747-762.
- [24] 王伏春, 黄守国, 黄聪. 高温后预制裂纹花岗岩损伤特性研究[J]. *岩土工程技术*, 2023, 37(4): 415-421.
WANG Fuchun, HUANG Shouguo, HUANG Cong. Damage characteristics of prefabricated fractured granite after high temperature [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2023, 37(4): 415-421.
- [25] 孙浩, 苏楠, 金爱兵, 等. 温度对不同尺寸砂岩巴西劈裂特性影响[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(1): 26-38.
SUN Hao, SU Nan, JIN Aibing, et al. Effects of temperature on Brazilian splitting characteristics of sandstone with different sizes [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(1): 26-38.
- [26] 陈斌. 高温高压隧道节理围岩卸荷效应与变形破坏机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
CHEN Bin. Study on unloading effect and deformation failure mechanism of jointed surrounding rock in high temperature and high pressure tunnels [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [27] 张岩, 李宁, 于海鸣, 等. 温度应力对裂隙岩体强度的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊1): 2660-2668.