

岩体裂隙结构面的温度-应力-水力耦合本构关系 Thermal- hydraulic- mechanical coupling constitutive relation of rock mass fracture interconnectivity

刘亚晨^{1,2}, 蔡永庆², 刘泉声¹, 吴玉山¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 福建省漳州市建设工程质量监督站, 福建 漳州 363000)

摘要: 进行了单、正交裂隙岩体的渗透实验, 并针对单、正交裂隙岩样在不同温度及应力下的渗流试验特点, 分析了裂隙结构面变形规律, 并以此实验成果为基础, 给出了岩样裂隙结构面温度-应力-水力的耦合本构关系式。

关键词: 岩体裂隙; 高温; 高压; 水力; 耦合本构关系; 渗透率

中图分类号: TU 452, TL 942 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2001)02-0196-05

作者简介: 刘亚晨, 男, 1965 年生, 2000 年 6 月在中国科学院武汉岩土力学所获工学博士学位, 现就职于福建省漳州市建设工程质量监督站, 主要从事岩石的热物理特性、岩土渗流特性和基础工程中的力学问题研究。

LIU Ya-chen^{1,2}, CAI Yong-qing², LIU Quan-sheng¹, WU Yu-shan¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Centre of Constructional Engineering Quality Supervision, Zhangzhou, 363000, China)

Abstract: The permeability experiment was made in this paper, and the general regularities of fracture structure face deformation is analyzed for the permeability test under the coupling action between temperature and stress. Based on the test result, a thermal- hydraulic- mechanical coupling constitutive model of the fracture structure face of the rock sample is suggested.

Key words: fracture rock mass; high temperature; high pressure; hydraulic pressure; coupling constitutive relationship; permeability rate

1 引言^y

人们从工程实践和经验认识到存在于岩体中的渗透水流对岩体具有力学的、物理的和化学的等各方面作用, 特别是在温度下的这些作用不但影响和改变了岩体的强度和变形特征, 而且在岩体内形成了一个由温度、渗透和应力组成的 THM 耦合场。岩体在这三场耦合作用下的强度和变形性能随之而变化。近年来国内外不少学者研究耦合作用问题, 并取得了丰硕的成果。但对裂隙岩体渗流与耦合作用的研究较多, 对裂隙岩体渗流与应力相互作用受温度影响的研究较少; 定性的描述较多, 定量的规律总结较少。为深入研究, 本文针对上述薄弱环节选取单、正交裂隙花岗岩进行试验, 然后根据试验成果, 从温度效应改变裂隙岩体的应力和水力特性出发, 获得定量的试验规律。

隙面, 并配水冲刷; 其后用 502 胶将 2 块或 4 块光滑裂隙面粘上, 并将其岩块切成 $\phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的圆柱体且磨光表面; 最后经丙酮浸泡处理, 将 502 胶溶解。从而制成沿长度光滑的单、正交裂隙, 其典型剖面如图 1 所示。

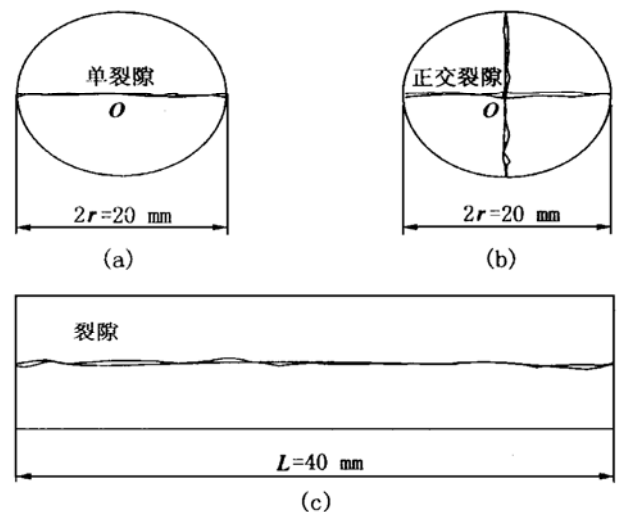


图 1 单、正交裂隙典型剖面示意图

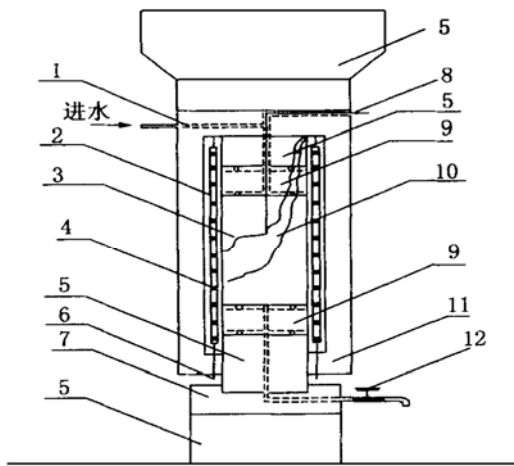
Fig. 1 Single and orthogonal joints

整个实验是在国家地震局地质研究所地球构造实验室的带孔隙水的高温高压三轴试验机上进行。裂隙

2 试验装置及含裂隙试件的制备

试件取材于长江三峡坝区开挖的新鲜细粒(0.4~3.0 mm)花岗岩, 主要矿物成分包含了 46% 的斜长石、39% 的透闪石、12% 的黑云母和 3% 的石英。岩石裂隙试件是委托北京大学制作的, 它的加工工艺是由岩石被劈裂打磨而制成: 首先通过水钻法钻取岩芯并切割; 然后在两端沿径向从中劈裂, 用金刚砂磨头磨光裂

^y 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49772163)
收稿日期: 2000-04-30



1. 进水口; 2. 硅油缸; 3. 岩样; 4. 电热炉加热线圈;
5. 不锈钢柱垫; 6. 导线; 7. 不锈钢底座; 8. 电热偶器;
9. 底部有“⊖”字槽的不锈钢柱垫; 10. 紫铜外套;
11. 绝热密封外套; 12. 止水阀

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Set-up of test

试样用铜管密封, 在两端与端部刻有“⊖”字槽的不锈钢柱垫相接, 两不锈钢柱垫之间用“O”形橡胶圈相隔密封。在紫铜两端口用胶粘密封后, 置入装有电热炉的三轴压力室内, 其三轴压力是由三轴压力室内的油加压而产生。图 2 为试验装置示意图。在实验中, 先将围压加至预定值, 随之进行设备调零。岩样的加温是通过三轴压力室内的硅油的加温而实现, 加温采用逐渐逼近的升温方式 (即以 5 °C/min 的升温速度加温), 在加热过程中, 手动调节围压保持预定值, 同时注入孔隙水 (为蒸馏水), 并使孔隙水压保持在一预定值, 到预定温度后, 恒温 45 min 开始加载, 其速率为 0.022 mm/s, 待加载到某一定值, 保持应

变变形不变, 打开水流通道中的阀门 T, 这时水流在岩样两端产生水压差, 在岩样裂隙中形成渗流, 为了使水压差保持不变, 须手动推进增压器活塞, 并将推进位移与时间记录下来, 完成渗流流量测试后, 关闭阀门 T, 结束一次实验。另外, 为了保证试件侧壁与紫铜外套之间不漏水, 应选取围压 $\sigma_3 \geq 30$ MPa, 水压差 $\Delta p < \sigma_3$ 。

在实验数据分析中, 岩石本身渗透性被忽略。研究共使用了 16 个裂隙岩样, 其中 12 个单裂隙岩样和 4 个正交裂隙岩样, 在 7 个温度水平、5 个围压水平和各种水流压差条件下, 进行了 8 组系列实验, 总共取得了 72 个实验数据。尽管实验温度接近 300 °C, 但由于具有较高的围压和水压, 实验过程中没有出现气化现象。

3 试验结果

针对裂隙岩样渗流测试特点, 按照上述实验方法, 依据裂隙水流立方定律进行裂隙试件渗透率 k_f 的计算, 对单裂隙岩样:

$$k_f = \left| \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{12\mu}{\rho g} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta p} \right|^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

式中 d 为增压器活塞的直径 (9.5 mm); μ 为水的动力粘性系数; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; L 为岩样的长度; D 为岩样的直径; Δx 为增压器活塞推进位移; Δt 为推进位移 Δx 所消耗的时间; Δp 为岩样两端水压差。

应用式 (1), 用试验分别测得每块岩样在不同温度-应力组合状态下的渗透率 k_f , 结果见表 1~ 3。其中水压差 Δp 为 8 MPa, 轴压 σ_1 为 125 MPa。

表 1 单裂隙岩样渗透率 k_f 实验结果

Table 1 The test results of permeability in a single fracture rock sample

温 度 $T / ^\circ\text{C}$	$k_f / (10^{-13} \text{ m}^2)$					
	$\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 50 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 80 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$
70	2.2448	2.2180	2.1035	1.9574	1.9692	1.8844
100	1.9574	1.8471	1.8825	1.7291	1.7729	1.6415
200	1.3588	1.2822	1.3453	1.2977	1.1614	1.1766
290	0.9996	0.9926	0.9367	0.8522	0.9358	0.8612

表 2 正交裂隙岩样渗透率 k_f 实验结果

Table 2 The test results of permeability in an orthogonal fracture rock sample

温 度 $T / ^\circ\text{C}$	$k_f / (10^{-13} \text{ m}^2)$					
	$\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 50 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 60 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 80 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$
100	3.6899	3.4336	3.7382	3.4890	3.1412	3.1728
200	2.5335	2.4148	2.3247	2.4172	2.1981	2.1697

表3 单裂隙岩样渗透率 k_f 实验结果

Table 3 The test results of permeability in a single fracture rock sample

温度 $T / ^\circ\text{C}$	$k_f / (10^{-13} \text{ m}^2)$						
	$\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 50 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 150 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 200 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 240 \text{ MPa}$	$\sigma_3 = 290 \text{ MPa}$
60	2.4586	2.1077	1.8957	1.4735	1.1498	1.1429	0.9145
100	2.2696	2.0688	1.5930	1.4987	1.2221	0.9701	0.8527

4 试验结果分析与讨论

4.1 定轴压水压下的裂隙渗流规律

(1) 试件裂隙结构面受力分析

三轴应力作用下试件裂隙结构面受力如图3所示。对该受力情况,由弹性力学理论,很容易计算出裂隙结构面的法向应力 σ_n 和切向应力 τ_n , 即 $\sigma_n = \sigma_3$, $\tau_n = 0$ 。由此可见,裂隙结构面应力为 σ_3 , 裂隙结构面在此应力作用下,产生的压缩位移为 Δb_{σ_3} 。

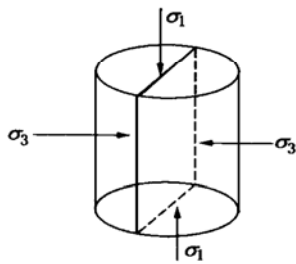
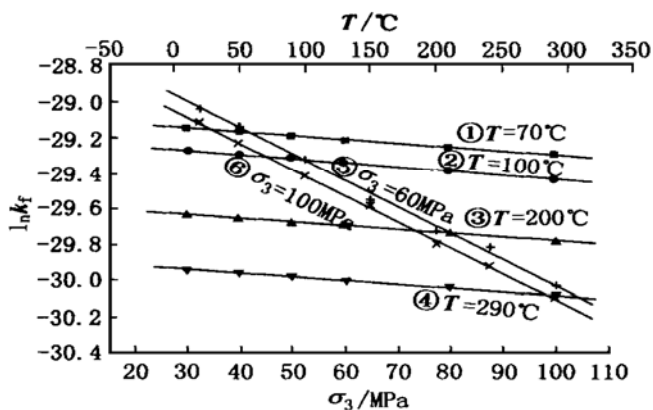


图3 试件裂隙结构面受力图

Fig. 3 The fracture of sample under stress



- ① $k_f = 2.35 \exp(-2.21 \sigma_3 \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$
- ② $k_f = 2.09 \exp(-2.42 \sigma_3 \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$
- ③ $k_f = 1.45 \exp(-2.11 \sigma_3 \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$
- ④ $k_f = 1.06 \exp(-2.13 \sigma_3 \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$
- ⑤ $k_f = 2.65 \exp(-3.69 T \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$
- ⑥ $k_f = 2.43 \exp(-3.63 T \times 10^{-3}) \times 10^{-13}$

图4 单裂隙渗透对数与正压应力-温度关系图

Fig. 4 The relation of $\ln k_f$ with normal stress and temperature

(2) 高温高压作用下裂隙渗透规律

从温度和裂隙结构面应力的改变影响裂隙水力特性出发,研究了一定水压力差、轴压条件下渗透率与温

度、围压的关系。单裂隙岩样试验 k_f 与应力、温度的关系见图4, 图中 k_f 为根据裂隙水流立方定律算出的渗透率, 图下给出试验数据拟合方程式。

a) 轴压、水压差一定时, 裂隙渗透率 k_f 与法向应力和温度的关系可用幂函数表示:

$$k_f = A \exp(-\alpha \sigma_3 - \beta T)$$

根据本试验结果, 其渗透率 k_f 的综合拟合式为

$$k_f = 3.03 \exp[-(2.20 \sigma_3 + 3.66 T) \times 10^{-3}] \times 10^{-13} \quad (2)$$

b) 在高压下裂隙渗透率 k_f 受法向压应力 σ_3 的影响较小, 如 σ_3 从30 MPa增至100 MPa, 其渗透率 k_f 仅下降不到15%, 显然这是光滑裂隙面在高应力下压密的结果。本高压试验的法向应力系数 α 值小于其他研究者在较小应力状态下的 α 值几个量级, 它反映了 α 与压应力大小有密切关系。

c) 对正交裂隙(即由两条单裂隙组成)岩样, 采用与单裂隙同样的数据处理方法, 由表2拟合温度 T 为100 $^\circ\text{C}$, 200 $^\circ\text{C}$ 时的渗透率 k_f 表达式为

$T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$$k_f = 3.93 \exp[-2.14 \sigma_3 \times 10^{-3}] \times 10^{-13} \quad (3)$$

$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

$$k_f = 2.71 \exp[-2.19 \sigma_3 \times 10^{-3}] \times 10^{-13} \quad (4)$$

从结果看, 约为同温度下的单裂隙渗透率的1.86倍。这表明, 多条裂隙渗透率满足单条裂隙渗透率的线性叠加。

4.2 高温高压裂隙结构面变形分析

根据任何光滑连续曲线均可用台阶线来逼近的原理, 裂隙结构面在温度-载荷全过程变形中, 可用表示恒温下的变应力和定应力下的变温度而产生的变形之和; 此外还应考虑恒温下的三维应力及水压引起的变形。若在研究对象中存在温度、水压梯度, 还应考虑在上述恒定变量条件下的抽象性变形, 即岩石中的矿物成份在高温高压区溶解度增加, 遇低温低压区溶解度下降, 从而相对使隙宽变窄。以上过程的裂隙面变形可分别研究。

(1) 岩块变形引起的裂隙结构面变形

a) 三维应力作用下的岩块变形及自由热膨胀造成的裂隙结构面变形

单裂隙岩样渗流试验受力问题是一个轴对称问题。依据弹性力学理论及 Hooke 定律, 有

$$\left. \begin{aligned} q_r &= q_\theta = \Delta \sigma_3 \\ q_z &= \Delta \sigma_1 \\ \tau_{rz} &= 0 \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_3 - \nu (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这样在裂隙面沿径向产生的平均位移(应考虑两面)为

$$\Delta \bar{b}_\sigma = \frac{\pi D}{4E} \left| \Delta \sigma_3 - \nu (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3) \right| \quad (6)$$

计算结果见图 5, 图中裂隙间有较高程度的夸大。

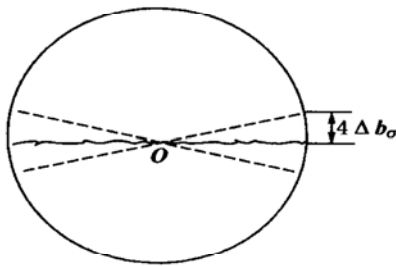


图 5 三维应力及自由热膨胀作用下结构面变形示意图

Fig. 5 The fracture strain under 3D stress and free expansion with heat

式(6)中 E 为岩石弹性模量, 其值是温度的函数, 文献[1]通过实验给出了 E (单位: MPa) 与温度 T 的拟合式, 即:

$$E(T) = 83.71 + (0.15 - 9.08T \times 10^{-4} + 7.48T^2 \times 10^{-7})T \quad (7)$$

式中 ν 为泊松比, 计算时取 0.23; D 为岩样直径。

岩样自由热膨胀造成的裂隙结构及变形, 同样依据热弹性力学理论, 求得由此引起的平均位移为

$$\Delta b_{q_r} = \frac{\pi D}{4} \alpha_r \Delta T \quad (8)$$

式中 α_r 为岩石的热膨胀系数, 计算时取值为 $\alpha_r = 0.7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

b) 动水压力、水压梯度及温度梯度引起的裂隙结构面的变形

文献[2]应用弹性力学理论, 导出了动水压力引起的裂隙结构变形, 其变形量表达式为

$$\Delta b_p = 3.28(1 - \nu^2) \frac{1}{E(T)} \sqrt{\frac{DL}{\pi}} \Delta p \quad (9)$$

式中 L 为岩样长度。

文献[3]给出了裂隙结构面因水压梯度、温度梯度引起的抽象变形, 表达式为

$$\Delta b_t = \frac{2q}{\rho_{qtz}} \left| \frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial T} \right| \Delta t \quad (10)$$

式中 q 为质量流量, 计算时取本文试验的平均值为

$4.19 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$; c_{SiO_2} 为 SiO_2 的浓度; ρ_{qtz} 为石英密度, 计算时取 2500 kg/m^3 ; Δt 为所耗时间。

(2) 定压下的岩石温度变形及恒温下的裂隙结构面变形

在升温的瞬时, 存在的应力对温度变形的影响, 即称瞬态热变形 Δb_T ; 裂隙结构面本身在恒温下所具有一定的抗压变形 Δb_{σ_3} , 即裂隙结构面恒温下的应力应变。

大量研究表明, 裂隙渗透率与裂隙隙宽有密切关系。这里定义满足裂隙隙宽平方的渗透率为名义裂隙隙宽 \bar{b} , 即 $k_f = \bar{b}^2$, 并认为裂隙实际隙宽 $b \approx \bar{b}$, 因此有

$$b = \sqrt{k_f} = 5.5 \exp[-(1.10\sigma_3 + 1.83T) \times 10^{-3}] \times 10^{-7} \quad (11)$$

a) 裂隙结构面的抗压变形

根据光滑曲线的台线逼近原理, 在本试验条件下, 裂隙隙宽可写成

$$b = b_0 - \Delta b_{\sigma_3} + \Delta b_\sigma \quad (12)$$

对式(11), (12)就 σ_3 微分, 有

$$\left. \begin{aligned} db &= -6.05 \times 10^{-10} (1.0 - 1.83 \times 10^{-3} T) \\ db &= -k_{\sigma_3} d\sigma_3 + \frac{\pi D}{4E(T)} (1 - \nu) d\sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)整理得

$$k_{\sigma_3} = \frac{\pi D(1 - \nu)}{4E(T)} + 6.05 \times 10^{-10} (1.0 - 1.83 \times 10^{-3} T) \quad (14)$$

b) 瞬态热变形

同 a) 方法一样, 裂隙宽度可写成

$$b = b_0 + \Delta b_T - \Delta b_{\sigma} \quad (15)$$

对式(11), (15)就 T 微分, 有

$$db = -1.01 \times 10^{-11} (1.0 - 1.1 \times 10^{-3} \sigma_3) dT \quad (16)$$

$$db = k_T dT - \frac{\pi D}{4} \alpha_r dT \quad (17)$$

比较式(16), (17)可得

$$k_T = \frac{\pi D}{4} \alpha_r - 1.01 \times 10^{-11} (1.0 - 1.1 \times 10^{-3} \sigma_3) \quad (18)$$

综合上述, 裂隙结构面抗压变形和岩石瞬态热变形可写成如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta b_{\sigma_3} &= k_{\sigma_3} \Delta \sigma_3 \\ \Delta b_T &= k_T \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

4.3 岩体裂隙的温度- 应力- 水力耦合本构关系

根据上述结果, 可建立裂隙结构面受压状态下的温度- 应力- 水力耦合本构关系。裂隙宽度增量的计算式为

$$\Delta b = -\Delta b_{\sigma_3} + \Delta b_T + \Delta b_p + \Delta b_\sigma - \Delta b_{\sigma} + \Delta b_t \quad (20)$$

对式(20)两边除以裂隙初始宽度 b_0 (b_0 近似取 $T = 0, \sigma_3 = 0$ 时的值, 即 $b_0 \approx 5.5 \times 10^{-7} \text{m}$), 则可得裂隙结构面的总应变增量形式为

$$d\varepsilon = -d\varepsilon_{\sigma_3}(T) + d\varepsilon_T(\sigma_3, T) + d\varepsilon_p(T) + d\varepsilon_{\sigma_3}(T) - d\varepsilon_{\sigma} - d\varepsilon_i\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\left[\frac{1}{\alpha_1(T)} + \frac{1}{\alpha_2(T)}\right]d\sigma_3 + [\alpha_3(\sigma_3) - \alpha_4]dT + \alpha_5(T)dp - \frac{1}{\alpha_6(T)}d\Theta - \alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right)dt \quad (21)$$

式中 $\alpha_1(T)$ 为温度 T 时裂隙结构面应力为 σ_3 处的切线模量(Pa), 由式(6)及 b_0 经拟合出的表达式为

$$\alpha_1(T) = 896.37 + 2.194T - 0.0028T^2 + 2.622 \times 10^{-5}T^3 \quad (22)$$

$\alpha_2(T)$ 为 T 温度时由岩石在 σ_3 作用下引起的裂隙结构面变形的虚拟切线模量(MPa), 其值由 Δb_{σ} 的分解式给出, 即

$$\Delta b_{\sigma} = \frac{\pi D(1+\nu)}{4E(T)}d\sigma_3 - \frac{\pi D\nu}{4E(T)}d\Theta \quad (23)$$

其中 $\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 。这样 $\alpha_2(T)$ 的表达式为

$$\alpha_2(T) = 5.02 + 8.99 \times 10^{-3}T - 5.44 \times 10^{-5}T^2 + 4.40 \times 10^{-9}T^3 \quad (24)$$

$\alpha_3(\sigma_3)$ 为由岩石瞬态热应变, 由式(18)及 b_0 经拟合出的表达式为

$$\alpha_3(\sigma_3) = 0.9496 + 2.10 \times 10^{-8}\sigma_3 \quad (25)$$

α_4 为自由状态下 ($\sigma = 0$), 岩石的热膨胀引起的裂隙结构面在温度 T 时的虚拟切线膨胀系数, 即

$$\alpha_4 = \frac{\pi D\alpha_t}{4b_0} = 0.9496 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (26)$$

$\alpha_5(T)$ 为岩石在动水压力作用下变形引起的裂隙结构面变形的温度 T 时的水压虚拟影响系数(Pa^{-1}), 由 Δb_p 及 b_0 经拟合得

$$\alpha_5(T) = (2.32 - 2.87 \times 10^{-3}T - 1.33 \times 10^{-5}T^2 + 9.53 \times 10^{-9}T^3) \times 10^{-7} \quad (27)$$

$\alpha_6(T)$ 为岩石在体力 Θ 作用下变形引起的裂隙结构面变形的虚拟体积模量(MPa), 其值确定如下:

$$\alpha_6(T) = 26.83 + 0.048T - 2.91 \times 10^{-4}T^2 + 2.40 \times 10^{-7}T^3 \quad (28)$$

$\alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right)$ 为裂隙结构面因水压梯度、温度梯度引起的抽象变形速率(m/s), 其值由 Δb_t 确定。文献[3]给出

$$\frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial T} = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial p} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \text{ 则有} \\ \alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right) = 3.66 \times 10^{-8} \frac{\partial T}{\partial z} + 6.09 \times 10^{-15} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (29)$$

从上述讨论可知, 裂隙结构面本身的抗压变形起着决定作用, 在本文的流量条件下, 抽象变形影响最小。

5 结 语

通过单、正交裂隙花岗岩的试验, 研究了高温、高压下的裂隙岩体渗透特性, 给出了岩体裂隙的温度-应力-水力耦合本构关系式。本构关系可以为裂隙岩体的 THM 耦合分析提供合理的依据。

本项课题的实验研究部分得到国家地震局地质研究所地球构造实验室赵树清等同志的大力协助, 特此表示感谢!

参考文献:

- [1] 许锡昌. 温度作用下三峡花岗岩力学性质及损伤特性初步研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [2] 作彦卿. 岩体水力学基础(二)[J]. 水文地质工程地质, 1997(1): 24~18.
- [3] Martin J T, et al. On thermoelasticity and silica precipitation in hydrothermal systems: numerical modeling of laboratory experiments [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B6): 12095~12107.
- [4] 刘亚晨. 核废料贮存裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.

润扬大桥 12000 t 试桩顺利结束

润扬大桥南汊桥为单孔双铰钢箱梁悬索桥, 主跨 1490 m, 为目前中国第一、世界第三。主塔桩基采用 2.8 m 深 60~79 m 钻孔灌注桩, 其单桩极限承载力高

达 12000 t, 采用东南大学土木工程学院专利技术“桩承载力自平衡测试法”进行。测试成果为大桥桩基的设计提供了科学依据。

(龚维明 供稿)