



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

李林林,朱俊福,靖洪文,等.高温处理后花岗岩应力作用下渗透特性演化研究[J].煤炭科学技术,2021,49(7):45-50.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.006

LI Linlin,ZHU Junfu,JING Hongwen,*et al.* Study on evolution of granite permeability under stress after high temperature exposure[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 45-50. doi: 10. 13199/ j. cnki. cst. 2021. 07. 006

## 高温处理后花岗岩应力作用下渗透特性演化研究

李林林,朱俊福,靖洪文,贺立新,陈 颖

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**随着核废料处置、地下煤层气开发、地热资源的开采利用等领域的蓬勃发展,高温处理后岩石物理力学性质和渗透特征演化规律备受关注。为了对不同高温处理后花岗岩试样渗透特性进行研究,采用实验室试验的方法,设定围压 10~30 MPa,进水口压力低于相应围压区间并逐渐增大,选用 GWD-02A 型高温炉对加工好的花岗岩试样进行高温加热,将花岗岩试样分别加温至 200、300、400、500、600、800 ℃,采用全自动岩石渗透率测试系统对高温处理后花岗岩试样开展一系列渗透试验。通过测量不同温度作用后花岗岩试样直径、高度以及质量,得到不同温度花岗岩的密度;采用 PDS-SW 声波检测仪对不同高温处理后花岗岩纵波波速进行测试,得到波速与密度随温度变化情况;分析高温对花岗岩密度和波速的影响,得出高温处理后花岗岩试样体积流速与压力梯度的关系,分析得出渗透系数和导水系数与围压和温度的关系。研究表明:①随着温度的升高,花岗岩内部微裂纹逐渐发育,纵波波速与密度逐渐减小。②压力梯度与体积流速呈现线性关系,可用线性达西定律进行描述,随着温度的升高,等效渗透系数表现为逐渐增加的趋势,且温度越高,增大幅度越显著,试验结果可以用指数函数很好地拟合。③对于同一种高温处理后的试样,随着围压的升高,导水系数表现为减小的趋势。

**关键词:**渗透系数;高温;达西定律;围压;花岗岩

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)07-0045-06

### Study on evolution of granite permeability under stress after high temperature exposure

LI Linlin, ZHU Junfu, JING Hongwen, HE Lixin, CHEN Ying

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** With the vigorous development of nuclear waste disposal, underground coal-bed methane, the exploitation and utilization of geothermal resources, the evolution of physical and mechanical properties and permeability characteristics of rocks after high temperatures has attracted much attention. In order to test the permeability characteristics of granite samples after different high temperatures, the laboratory test method was used to set the confining pressure of 10~30 MPa, and the inlet hydraulic pressure is lower than the corresponding confining pressure interval and gradually increases. The GWD-02A high-temperature furnace is used to heat the processed granite samples at high temperature at 200, 300, 400, 500, 600 and 800 ℃, respectively. A series of penetration tests were carried out on the granite samples after high temperature using the fully automatic rock permeability test system. By measuring the diameter, height and mass of the granite samples after different temperatures, the density of the granite at different temperatures was obtained. The PDS-SW acoustic wave detector was used to test the longitudinal wave velocity of granite after different high temperatures, and finally the change of the wave velocity and density with temperature was obtained. On this basis, the influence of high temperature on granite density and wave velocity was analyzed, and the relationship between volume flow velocity and pressure gradient of granite sample after high temperature was obtained. Finally, the relationship between permeability coefficient and water conductivity coefficient and confining pressure and temperature was ob-

收稿日期:2020-12-12;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51734009)

作者简介:李林林(1994—),男,江苏徐州人,硕士。E-mail:852184051@qq.com

通讯作者:靖洪文(1963—),男,山东聊城人,教授,博士生导师。E-mail:hongwenjingcumt@126.com

tained. The results show that with the increase of temperature, micro-cracks in the granite gradually develop, and the longitudinal wave velocity and density gradually decrease, the relationship between volume flow rate and pressure gradient demonstrates to be linear and fits very well with the Darcy's law. As the temperature increases, the equivalent permeability coefficient shows a gradual increasing trend, and the higher the temperature, the more significant the increase is. The test results can fit well with exponential function. For the same kind of samples after high temperature, as the confining pressure increases, the water conductivity shows a decreasing trend, and the rate of its decrease diminishes gradually.

**Key words:** permeability coefficient; high temperature; Darcy's law; confining pressure; granite

## 0 引言

近年来,随着核废料处置、地下煤层气开发、地热资源的开采利用等领域的蓬勃发展,高温处理后岩石物理力学性质和渗透特征演化规律备受关注<sup>[1-3]</sup>。国内外众多学者对高温处理后岩石物理力学特性进行了一系列的试验研究和探索。KILIC<sup>[4]</sup>对 600 ~1 050 °C 高温处理后石灰岩的物理性质进行了试验研究,发现石灰岩质量和波速随着温度的升高逐渐减小。SUN 等<sup>[5]</sup>研究了高温处理后砂岩物理力学性质变化特征,发现当温度由 25 °C 增加至 900 °C,砂岩平均质量损失率提高了 2.97%。文献[7-9]也通过试验及模拟手段研究了不同高温处理后花岗岩的物理力学性质。上述研究成果对揭示岩石材料的热损伤作用机理有着重要意义。岩石渗透特性是岩石水力学研究中的基本参量,高温热应力作用会导致岩石内部结构发生变化,诱发微裂纹的萌生、扩展,进而直接影响岩石的渗透特性。针对这一问题,CHAKI 等<sup>[10]</sup>研究了高温处理后岩体微观特征,发现热损伤会导致岩体内部微观特征比如孔隙率,空隙连通率的变化,进而直接影响岩石的渗透特性。文献[11-13]均采用了不同的手段对高温处理后花岗岩微裂纹发育情况进行了监测和量化。文献<sup>[14-15]</sup>研究了高温处理后砂岩的渗透特征,CHEN 等<sup>[15]</sup>研究了花岗岩渗透率随温度的变化,结论均为温度升高渗透率增大。研究高温处理后岩石渗透特征对完善水力学理论和指导工程实践意义重大,然而纵观国内外文献,关于考虑围压作用下岩石渗透特性及其高温热损伤响应特征尚未完全揭示。鉴于此,通过对 200~800 °C 中 6 种高温作用后花岗岩进行围压 10、15、20、25、30 MPa 下的渗透试验研究,以揭示高温处理后花岗岩渗透特性与温度及围压之间的相关性。

## 1 岩石渗透率测试试验过程

### 1.1 试样准备

试验所用细粒花岗岩岩块采自河南春水矿区,主要矿物成分为石英、长石和方解石,平均密度 2.61

g/cm<sup>3</sup>。采用 MTS815.02 获得了自然状态下的花岗岩试样单轴抗压强度为 120 MPa,根据 ISRM 标准<sup>[16]</sup>,将 12 块试样加工成直径 50 mm,高度 100 mm 的标准圆柱体试样,并将试样上下表面打磨光滑。

选用 GWD-02A 型高温炉对加工好的花岗岩试样进行高温加热,温度分别为 200、300、400、500、600 和 800 °C,升温速率 10 °C/min,达到指定温度后保持 120 min 以保证试样内部受热均匀,最后自然冷却至室温。高温处理后花岗岩试样如图 1 所示,可以看出,试样表面颜色会随温度的升高发生变化。



图 1 高温处理后花岗岩试样

Fig.1 Tested granite samples after high temperature exposure

### 1.2 试验方案

采用全自动岩石渗透率测试系统对高温处理后花岗岩试样开展一系列渗透试验,如图 2 所示。

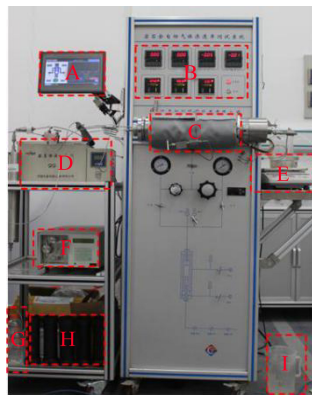


图 2 岩石渗透率测试系统

Fig.2 Rock permeability test system

该设备可施加的最大围压为 60 MPa,主要由以下 3 个单元组成:①进水系统,由水源 G、恒流泵 F 以及恒温水浴箱 D 组成;②三轴渗流试验系统,由三轴试样容器 C、用于施加围压和轴压的箱体内部压力泵、泵压水源 I、操作面板 A 以及显示面板 B 组成;③液体称重系统,包括智能电子天平 E 及收集液体装置的烧杯。试验所用参数以及天平读数,可采用计算机同步读取并保存。

试验前,将试样放进厚度 3 mm 的橡皮套 H 内,然后将试样连同橡皮套沿着轴向水平放入三轴试样容器 C 中,试样两端各放置 1 个多孔金属垫片以保证水压均匀分布。

试验过程中,首先施加较低的压力差,直至出水口流速稳定后开始设置试验工况并读取保存数据。对任意 1 个试样,围压  $\sigma_3$  分别设置为 10、15、20、25 和 30 MPa。当围压恒定时,通过恒流泵控制进水口压力在低于相应围压下逐渐增大,进出水口压力可通过压力表实时记录在计算机上,精度为 0.01 MPa。当通过试样的流速稳定后,可以通过实时采集的流速等数据计算渗透系数,进而定量评价围压和温度对岩石试样渗透特性的影响。

## 2 高温处理后花岗岩密度和波速的变化

分别对不同温度作用后花岗岩试样进行直径、高度以及质量的测量,由此计算得到花岗岩的密度。同时采用 PDS-SW 声波检测仪对不同高温处理后花岗岩纵波波速进行测试,最后得到波速与密度随温度变化情况,如图 3 所示。

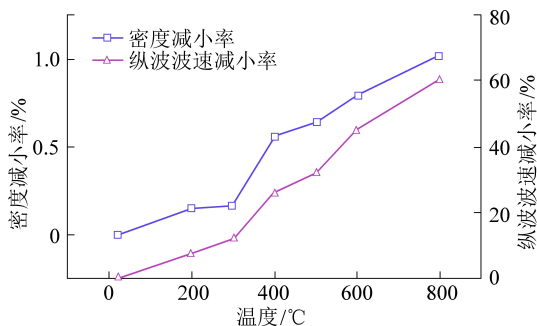


图3 高温对花岗岩密度和波速的影响

Fig.3 Effect of temperature on decrement ratio of density and P-wave velocity of tested granites

密度减小率  $\Delta\rho$  和纵波波速减小率  $\Delta v$  可以采用以下公式计算:

$$\Delta\rho = \frac{\rho - \rho'}{\rho} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta v = \frac{v - v'}{v} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\rho$  和  $\rho'$  分别为自然状态下 25 °C 以及高温作用后花岗岩试样的密度; $v$  和  $v'$  为相应纵波波速。

由图 3 可知,温度从 25 °C 增加到 300 °C,花岗岩试样密度和波速降低幅度相对较小,主要原因是该阶段花岗岩内部矿物颗粒发生自由水和结合水的脱离,但自然冷却后部分过程是可逆的,所以该阶段密度和波速变化幅度不大。当温度从 300 °C 增加到 800 °C,密度和波速变化幅度较大,其中  $\Delta\rho$  从 0.16% 增加到 1.02%, $\Delta v$  从 12.0% 增加到 60.0%。其原因是随着温度的升高,结合水和自由水损失,组成花岗岩的矿物成分也发生了变化<sup>[17-18]</sup>。XI<sup>[19]</sup> 发现热应力会使得高温处理后花岗岩内部产生大量的穿晶裂纹和沿晶裂纹,内部各向异性的扩张与石英的  $\alpha/\beta$  相变,导致石英体积增长 5%。张卫强<sup>[20]</sup> 采用压汞试验对高温处理后花岗岩孔隙率进行了研究,结果表明,试样内部孔隙率随温度升高而升高,当温度从 25 °C 升高到 800 °C 时,孔隙率增加了 2.83 倍。

## 3 高温处理后花岗岩渗透特性

试验结果显示,通过花岗岩试样轴向的压力梯度  $dP_s/dL$  与出口处体积流速  $Q$  之间的相关性可以用零截距线性方程进行较好地描述,如图 4 所示。其中: $P_s$  为进水口压力与出水口压力的差,MPa; $L$  为试样的轴向长度, m。对于每一温度热处理后花岗岩试样,随着压力梯度  $dP_s/dL$  增加,通过试样内部的流体体积流速  $Q$  呈现线性增长趋势,且随着围压的增大,增长的幅度越小。

由图 4 可知,线性方程对试验结果进行拟合,得到的相关系数  $R^2$  均大于 0.99,可以认为,高温处理后花岗岩试样的渗透特性可以用线性达西定律进行描述。此外,围压  $\sigma_3$  的变化并没有改变流体通过试样的线性流动行为,但随着围压  $\sigma_3$  的增大, $dP_s/dL-Q$  拟合曲线的斜率逐渐增大,这主要是由于岩石试样内部缺陷闭合导致的。

在岩石水力学中,渗透系数常用来定量描述岩石的渗透特性,通过线性达西定律,可以得到高温  $T$  处理后花岗岩试样等效渗透系数  $K_0$ ,见表 1。

$$-\frac{dP_s}{dL} = \frac{\mu}{K_0 A_0} Q \quad (3)$$

式中: $\mu$  为水力粘滞系数, mPa · S,假设水为不可压缩流体; $A_0$  为试样横截面面积, m<sup>2</sup>。

花岗岩不同围压作用下等效渗透系数  $K_0$  随温度  $T$  的变化特征如图 5 所示。



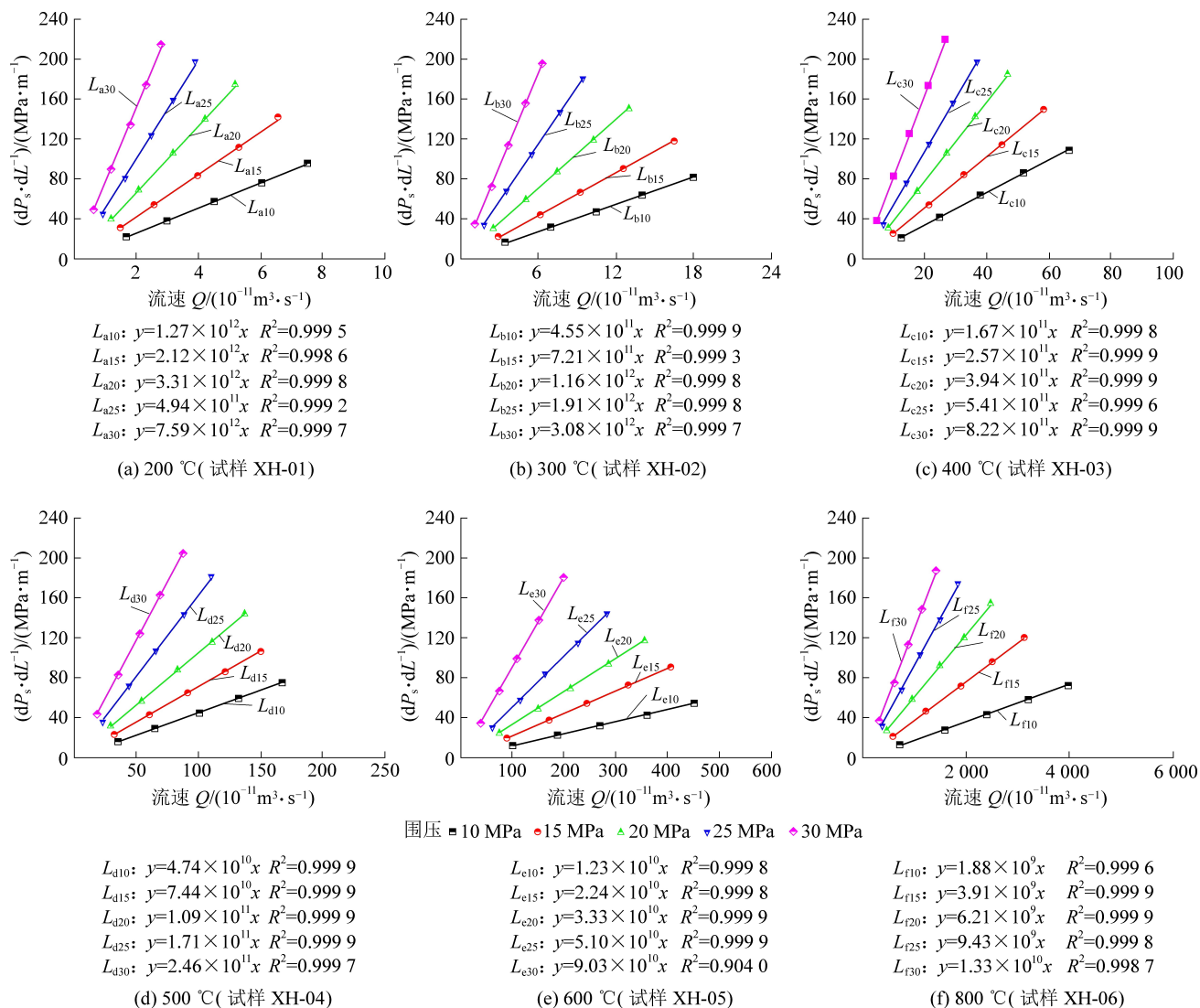


图 4 高温处理后花岗岩试样体积流速与压力梯度的关系

Fig.4 Volume flow rate  $Q$  as function of pressure gradient  $dP_s/dL$  of granite samples after high temperature exposure

表 1 不同围压花岗岩等效渗透系数

Table 1 Effective permeability coefficient of granite with different confining pressure

$T/^\circ\text{C}$	不同围压等效渗透系数/ $(10^{-19}\text{m}^2)$				
	10 MPa	15 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
100	1.38	0.74	0.51	0.31	0.16
200	4.05	2.49	1.55	1.06	0.68
300	11.20	6.85	4.35	2.68	1.70
400	30.27	19.90	12.91	9.23	6.17
500	108.24	68.32	46.38	29.61	20.52
600	408.47	230.70	152.98	99.66	56.65
800	2 638.76	1 303.82	816.62	532.46	398.13

由图 5 知,当围压一定时,随着温度的增加,等效渗透系数呈现非线性增长的趋势,其变化过程可分为 2 个阶段。温度由 100 °C 增加到 400 °C,等效渗透系数增长较缓,当温度为 100 °C 时,等效渗透系数分别为  $1.37 \times 10^{-19}$  ( $\sigma_3 = 10$  MPa),  $7.43 \times 10^{-20}$

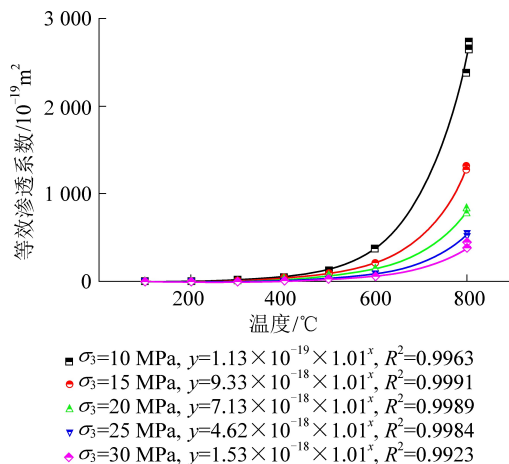


图 5 花岗岩等效渗透系数随温度变化规律

Fig.5 Variations in equivalent permeability coefficient of granite samples with increase of temperature

( $\sigma_3 = 15$  MPa),  $5.08 \times 10^{-20}$  ( $\sigma_3 = 20$  MPa),  $3.09 \times 10^{-20}$  ( $\sigma_3 = 25$  MPa) 和  $1.64 \times 10^{-20}$  ( $\sigma_3 = 30$  MPa),

当温度 400 ℃ 时,等效渗透系数分别增加至  $3.03 \times 10^{-18}$  ( $\sigma_3 = 10$  MPa),  $1.99 \times 10^{-18}$  ( $\sigma_3 = 15$  MPa),  $1.29 \times 10^{-18}$  ( $\sigma_3 = 20$  MPa),  $9.23 \times 10^{-19}$  ( $\sigma_3 = 25$  MPa) 和  $6.17 \times 10^{-19}$  ( $\sigma_3 = 30$  MPa), 与温度 100 ℃ 相比,分别增加了 20.62, 26.06, 24.89, 29.55 和 37.41 倍。

当温度从 400 ℃ 增加到 800 ℃, 等效渗透系数增长幅度逐渐增大, 当温度 800 ℃ 时, 花岗岩试样等效渗透系数分别为  $2.64 \times 10^{-16}$  ( $\sigma_3 = 10$  MPa),  $1.30 \times 10^{-16}$  ( $\sigma_3 = 15$  MPa),  $8.17 \times 10^{-17}$  ( $\sigma_3 = 20$  MPa),  $5.32 \times 10^{-17}$  ( $\sigma_3 = 25$  MPa) 和  $3.98 \times 10^{-17}$  ( $\sigma_3 = 30$  MPa), 与温度 400 ℃ 相比分别增大了 87.16, 65.52, 63.26, 57.70 和 64.55 倍。其原因是当温度从 400 ℃ 增加到 800 ℃ 时, 花岗岩试样内部热破裂显著, 微裂纹发育并扩展贯通形成宏观裂隙, 导致试样渗透特性大幅度增强。

根据上述讨论结果, 随着温度从 200 ℃ 增加到 800 ℃, 等效渗透系数  $K_0$  随温度  $T$  的关系可以用式 (4) 表示。

$$K_0 = A1.01^T \quad (4)$$

式中:  $A$  为拟合系数,  $m^2$ 。

CHEN 等<sup>[21]</sup> 对北山花岗岩进行了热破裂演化及渗透特性的研究, 发现在围压 5 MPa 下花岗岩等效渗透系数随温度的关系 (图 6), 该结果与本研究结果相近。

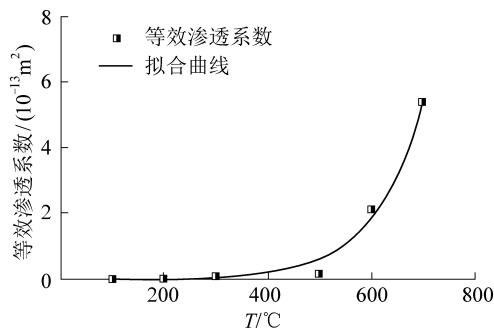


图 6 渗透系数与温度的关系<sup>[21]</sup>

Fig.6 Evolution of permeability versus heat treatment temperature<sup>[21]</sup>

$K_0$ - $T$  拟合函数中拟合系数  $A$  随围压的变化特征如图 7 所示。由图 7 可得, 在围压从 10 MPa 增加到 30 MPa 的过程中, 拟合系数  $A$  从  $1.13 \times 10^{-17}$  减小到  $1.53 \times 10^{-18}$ , 减小了 86.40%, 可见  $A$  可表示为围压对花岗岩渗透系数的敏感程度, 这与其他学者的研究结果一致<sup>[22-23]</sup>。

为进一步评价流体在裂隙孔隙介质中的运移规律, ZHANG 等<sup>[24]</sup> 还提出了导水系数  $T_a$ ,  $m^4$ 。

$$-\frac{dP_s}{dL} = \frac{\mu}{T_a} Q \quad (5)$$

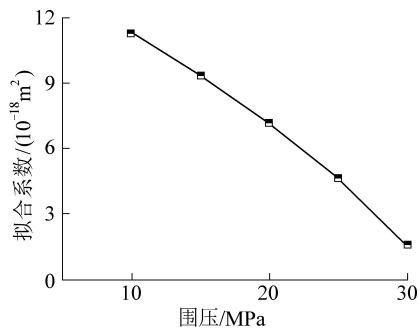


图 7 拟合系数随围压变化

Fig.7 Variations in coefficients with confining pressure

综合式 (3) 和式 (5) 可以得到式 (6):

$$T_a = K_0 A_0 \quad (6)$$

图 8 表示不同温度热处理后花岗岩试样导水系数随围压的变化特征, 由图 8 知, 导水系数  $T_a$  随围压的增加逐渐减小, 且减小幅度的逐渐降低, 这主要是由于应力作用下试样内部孔隙/裂隙逐渐闭合引起的。

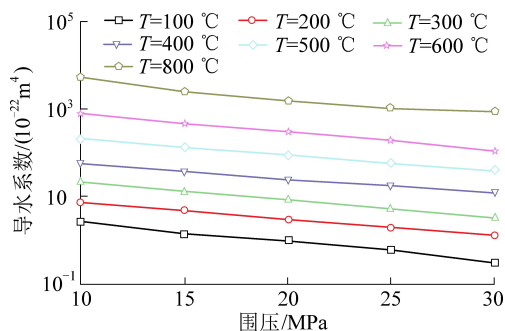


图 8 导水系数与围压的关系

Fig.8 Relationship between conductivity and confining pressure

## 4 结 论

1) 高温处理后不同围压作用下的花岗岩渗透特性试验发现, 随着压力梯度增加, 体积流速线性增大, 高温处理后花岗岩渗透特性可以用达西定律进行评价, 当围压升高时, 压力梯度与体积流速之间的比值逐渐增大, 即试样的过流能力逐渐减弱。

2) 当温度小于 400 ℃ 时, 花岗岩渗透系数缓慢增大, 而 400 ℃ 以后, 渗透系数变化显著。

3) 等效渗透系数随温度的增长规律可以用指数函数进行描述。随着围压的增加, 热破裂产生的孔隙裂隙逐渐闭合, 花岗岩导水系数逐渐降低。

## 参考文献 (References):

- [1] WANG J S Y, MANGOLD D C, TSANG C F. Thermal impact of waste emplacement and surface cooling associated with geologic disposal of high-level nuclear waste [J]. Environmental Geology & Water Sciences, 1988, 11(2): 183-239.

- [2] NICHOLSON K. Environmental protection and the development of geothermal energy resources [J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 1994, 16(2): 86–87.
- [3] LUO J A, WANG L G, TANG F R, *et al.* Variation in the temperature field of rocks overlying a high-temperature cavity during underground coal gasification [J]. *Mining Science & Technology*, 2011, 21(5): 709–713.
- [4] KILIC. The influence of high temperatures on limestone p-wave velocity and schmidt hammer strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2006, 43(6): 980–986.
- [5] SUN H, SUN Q, DENG W, *et al.* Temperature effect on micro-structure and p-wave propagation in Linyi sandstone [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 913–922.
- [6] 黄彦华, 杨圣奇. 高温后含孔花岗岩拉伸力学特性试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 783–791.  
HUANG YanHua, YANG Shengqi. The tensile mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 783–791.
- [7] YIN T B, LI X B, CAO W Z, *et al.* Effects of thermal treatment on tensile strength of Laurentian granite using brazilian test [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2213–2223.
- [8] 尹 乾, 靖洪文, 苏海健, 等. 高温后花岗岩断裂特性的加载速率效应研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(4): 597–603.  
YIN Qian, JING Hongwen, SU Haijian, *et al.* Loading rate effect on fracture properties of granite after high temperature [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(4): 597–603.
- [9] ZHANG L Y, MAO X B & LU A H. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature [J]. *Science in China*, 2009, 52(3): 641–646.
- [10] CHAKI S, TAKARLI M, AGBODJAN W P. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions [J]. *Construction & Building Materials*, 2008, 22(7): 1456–1464.
- [11] GRIFFITHS L, LENGLINE O, HEAP M J. Thermal cracking in westerly granite monitored using direct wave velocity, coda wave interferometry and acoustic emissions [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2018.
- [12] FREIRE-LISTA D M, FORT R, VARAS-MURIEL M J. Thermal stress-induced microcracking in building granite [J]. *Engineering Geology*, 2016, 206: 83–93.
- [13] WANG H F, BONNER B P, CARLSON S R. Thermal stress cracking in granite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B2): 1745–1758.
- [14] DING Q L, JU F, MAO X B, *et al.* Experimental investigation of the mechanical behavior in unloading conditions of sandstone after high-temperature treatment [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2641–2653.
- [15] CHEN S W, YANG C H, WANG G B. Evolution of thermal damage and permeability of beishan granite [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1533–1542.
- [16] VERMA A K, JHA M K, MAHESHWAR S, *et al.* Temperature-dependent thermophysical properties of ganurgarh shales from Bhandar group, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 1–11.
- [17] YIN Q, MA G W, JING H W. Experimental study on mechanical properties of sandstone specimens containing a single hole after high-temperature exposure [J]. *Géotechnique Letters*, 2015: 43–48.
- [18] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA M S A, *et al.* Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments [J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31–44.
- [19] XI D Y. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1994, 14(3): 223–227.
- [20] 张卫强. 岩石热损伤微观机制与宏观物理力学性质演变特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [21] CHEN S W, YANG C H, WANG G B. Evolution of thermal damage and permeability of Beishan granite [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1533–1542.
- [22] BADRULA, A A K M, NIIOKA M, *et al.* Effect of temperature and confining pressure on permeability during deformation and failure of shikotsu welded tuff [J]. *Proceedings of Asian Rock Mechanics Symposium*, 2012(7): 563–572.
- [23] TAKADA M, FUJII Y, JUN-LCHI K. Study on the effect of confining pressure on permeability of rock in triaxial compression failure process [J]. *Shigen-to-Sozai*, 2012, 127(3): 151–157.
- [24] ZHANG Z, NEMCIK J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477(1): 139–151.