

岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究

梁冰¹, 高红梅^{1,2}, 兰永伟^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000; 2. 黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 在高温作用下岩石内部物理化学特性和结构特性将发生变化, 这将导致裂隙延伸、矿物脱水及汽化, 改变了岩石孔隙率, 从而使得岩石的渗透率发生明显的变化。基于热弹性理论, 结合室内试验测试结果, 导出岩石渗透率和温度之间存在正指数关系, 并从理论上验证了温度阈值的存在。理论分析和试验研究均表明: 在温度开始升高时, 渗透率增加缓慢, 当升高到某一温度之后, 渗透率升高的速度迅速增大, 其温度对应的值为阈值。经过阈值温度之后岩石的渗透率随温度升高而迅速增加。岩石渗透率-温度关系的研究为研究高温下的多场耦合问题提供理论基础, 同时为石油热开采提高渗透率和核废料地下安全性处理提供了技术支持。

关键词: 岩石力学; 高温; 渗透率; 最小二乘法; 温度阈值

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2009-04

THEORETICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY ON RELATION BETWEEN ROCK PERMEABILITY AND TEMPERATURE

LIANG Bing¹, GAO Hong-mei^{1,2}, LAN Yong-wei^{1,2}

(1. Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: The physicochemical and structure properties of rock will change obviously under high temperature, which causes extending of fracture, dehydrating and vaporizing of mineral and changes of rock porosity and permeability. Based on thermo-elastic theory and column test results, the positive index relationship between rock permeability and temperature was deduced, and temperature threshold value was validated theoretically. When temperature begins to increase, the rock permeability increases slowly. When the temperature increases to a certain value, the speed of permeability rising increases rapidly; and this temperature is called initiation threshold value. After the temperature initiation threshold, the permeability of the rock rises quickly. The study of the relationship between rock permeability and temperature offers the theoretical foundation for the studying of multi-field coupling question under the high temperature. It gives theoretical support for permeability of petroleum thermal exploitation and for nuclear waste safety disposal.

Key words: rock mechanics; high temperature; permeability; least square method; temperature threshold value

1 引言

岩石在成岩过程中^[1], 其内部结构^[2]、应力分布均处于一个相对稳定的状态。在温度作用下, 岩石

内部结构会发生变形破坏及各种物理、化学变化。高温降低了岩石强度, 导致裂隙延伸、矿物脱水及汽化, 改变了岩石孔隙率^[3], 使岩石渗透率以及渗流规律发生了极大改变^[4]。

文[5]在大气压力和模拟油藏压力及 400 ~

收稿日期: 2004-06-01; **修回日期:** 2004-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374041); 国家“十五”科技攻关项目(2001BA803B0404)

作者简介: 梁冰(1962-), 女, 博士, 1985年毕业于辽宁工程技术大学工程力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事环境流体力学和地下渗流力学方面的教学与研究工作。E-mail: lbwqx@163.com。

800 条件下对大量砂岩岩芯进行了加热试验，发现岩芯渗透率至少增加了 50%，声速和破坏强度下降了 50%。Heard 在不同围压下将石英二长石加热到 300 ，使岩石的裂隙孔隙度增加，其渗透率也增加了数倍。还有一些学者通过试验，得出在温度作用下岩样的渗透率有增加的趋势^[6]。

目前，国内外学者关于岩石在高温下的渗透率的研究相对比较薄弱。

为此，本文在理论分析的基础上，推导出岩石在高温下渗透率和温度的数学表达式，并结合室内试验数据对方程进行拟合分析得出：在温度开始升高时，渗透率增加缓慢，当升高到某一温度之后，渗透率升高的速度迅速增大，这一温度即为门槛值温度。经过门槛温度之后岩石的渗透率随温度升高而迅速增加。由试验得出岩样不同，其门槛值温度也不同。这对于深部的岩体开采、地热开采的数值模拟及处理过程中的渗透率问题分析具有重要的参考价值。

2 温度对岩石渗透率影响的机制

在温度作用下，岩石颗粒将发生膨胀而引起体积增加。由于体积变化和热膨胀的各向异性，在岩石颗粒内部以及颗粒之间将产生热应力效应。当加热到一定温度使得岩石内部产生的热应力超过岩石颗粒之间的拉应力屈服强度时，岩石内部结构就会发生破坏，从而产生新的微小裂隙，使得岩石渗透率、孔隙度等物性参数发生突变。此时的温度称为岩石热开裂的门槛值温度。

当加热温度低于门槛值温度时，岩石的主要变化是吸附水和层间水的变化。这些水赋存于微小孔隙中，因而岩石渗透率和孔隙度的变化较小。当温度高于门槛值温度后，组成矿物出现脱水和相变，羟基、羟基或水产生晶内扩散，微裂纹端部水发生聚集和水解作用以及其他物理、化学反应，这些因素使得微裂缝迅速扩展，导致岩石孔隙结构发生变化，从而增加和改善了流体流动通道。

由热应力理论^[7]可知，当物体的温度发生变化时，岩石内部会产生热应力。根据 Duhamel-Neumann 的结论，这个应力应该由两部分叠加而成，即由温度变化产生的、与温度成比例的、在所有方向上大小相同的压力 σ_T ，以及温度不变时由压应变产生的应力 σ_p 。设压应力为正，则有

$$\sigma' = \sigma_p - \delta\sigma_T \tag{1}$$

式中： $\sigma_T = \beta T$ ， $\beta = \alpha_T E / (1 - 2\nu)$ 均为热应力系数， α_T 为含水层平均线胀系数， E 为含水层的平均弹性模量， ν 为泊松比； σ' 为裂隙岩体总应力。

当单个固体微粒的压缩性与流体压缩性比较可完全忽略时，即假定固体微粒的体积 $V_s = A\Delta z(1 - \phi)$ 为常数，其中 A 取微元体的底面积， Δz 为微元体的高度，可得关于孔隙度变化与有效应力变化^[8]关系式为

$$d\phi = -C_m(1 - \phi)d\sigma' \tag{2}$$

式中： ϕ 为岩石的孔隙度； C_m 为综合岩石压缩系数，其与流体压缩系数的关系式为

$$C_m = \phi C_p \tag{3}$$

式中： C_p 为流体压缩系数。

在式(2)中，假定所有的应力变化归因于有效的相互连接的孔隙空间，联立式(2)，(3)可得

$$d\phi = -\phi(1 - \phi)C_p d\sigma' \tag{4}$$

对式(4)积分，可得孔隙率与有效应力的关系式为

$$\varepsilon = \frac{\phi}{1 - \phi} = \frac{\phi_0}{1 - \phi_0} \exp\left(-\int_{\sigma_0}^{\sigma} C_p d\sigma'\right) \tag{5}$$

式中： ε 为一个比值。

Somerton, Scorer 和 Miller 观察到岩块和孔隙介质的压缩系数是与有效应力相关的。因此，引进的平均孔隙压缩系数 \bar{C}_p 为

$$\bar{C}_p = \frac{1}{\sigma' - \sigma_0} \int_{\sigma_0}^{\sigma'} C_p d\sigma' \tag{6}$$

则式(6)变为

$$\varepsilon = \frac{\phi}{1 - \phi} = \frac{\phi_0}{1 - \phi_0} e^{-\bar{C}_p \Delta\sigma} \tag{7}$$

式中： $\Delta\sigma$ 为有效应力的改变，且 $\Delta\sigma = \sigma' - \sigma_0$ 。

由式(7)可知，如果孔隙压缩系数是恒定的，则比值 ε 与有效应力的对数曲线应该为一条直线，求解孔隙率，得

$$\phi = \frac{\phi_0 e^{-\bar{C}_p \Delta\sigma}}{1 - \phi_0 (1 - e^{-\bar{C}_p \Delta\sigma})} \tag{8}$$

基于 Carman-Kozeny 公式，可得渗透率与孔隙率的关系式为

$$k \propto \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \tag{9}$$

式中： k 为岩石的渗透率。

结合式(8), (9)得

$$k = \frac{\phi_0^3}{(1-\phi_0)^2} \frac{e^{-3\bar{c}_p\Delta\sigma}}{1-\phi_0(1-e^{-\bar{c}_p\Delta\sigma})} \quad (10)$$

令 $\frac{\phi_0^3}{(1-\phi_0)^2} = k_0$, 式(10)可写为

$$k = k_0 \frac{e^{-3\bar{c}_p\Delta\sigma}}{1-\phi_0(1-e^{-\bar{c}_p\Delta\sigma})} \quad (11)$$

对于大多数的深层裂缝介质, 由于其孔隙率接近于 1%, 则分母近似等于 1^[9, 10], 因此式(11)变为

$$k = k_0 e^{-3\bar{c}_p\Delta\sigma} \quad (12)$$

由式(1), (2)和(12)得出渗透率和温度间的关系式为

$$k = k_0 e^{3\bar{c}_p\delta\beta[T-(\sigma_p-\delta_0)/(\delta\beta)]} \quad (13)$$

式中: β 为热应力系数。

令 $k_0 = a$, $3\bar{c}_p\delta\beta = b$, $(\sigma_p - \delta_0)/(\delta\beta) = c$, 则式(13)变为

$$k = ae^{b(T-c)} \quad (14)$$

由式(14)可知在开始温度升高时, 渗透率增加缓慢, 当升高到某一温度(即 $T - (\sigma_p - \delta_0)/(\delta\beta) = 0$)之后, 渗透率升高的速度迅速增大, 这一温度即为门槛值。

3 试验研究

选用阜新地层岩芯, 将其加工成直径为 25 mm 的标准岩样, 在烘箱中(80)烘干, 在室温下测量岩样的基础渗透率。将岩样共 4 块依次放入高温炉中, 在常压下进行升温加热处理。当达到某一设定温度时保温均热 3 h, 然后关闭电源使岩芯在炉中自然冷却到室温, 再测量其渗透率。重复上述过程, 从 100 开始以升温间隔为 50 , 最终加热温度为 700 。采用气体法测量岩样渗透率。试验数据如表 1 所示。

图 1~4 中 $k-T$ 图像用指数函数 $k = ae^{b(T-c)}$ 表示。其中 a, c 为线性参数, b 为非线性参数。应用 Matlab 软件, 线性参数 a, c 可应用最小二乘法求得, 非线性参数 b 可应用“单纯形下山式搜寻法”求得。所求的 c 即为门槛值温度。

渗透率随温度变化的曲线见图 1~4。从图中可以看出, 各种岩样的渗透率均在开始时随温度升高缓慢增大, 而后出现随温度升高而增大趋势, 并且

表 1 试验数据

Table 1 Experimental data

温度 <i>T</i> /	渗透率 $k/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$			
	岩样 A	岩样 B	岩样 C	岩样 D
100	0.006	0.005	0.007	0.004
150	0.008	0.007	0.012	0.010
200	0.019	0.022	0.025	0.026
250	0.020	0.035	0.035	0.037
300	0.024	0.049	0.045	0.052
350	0.034	0.057	0.078	0.068
400	0.065	0.111	0.101	0.096
450	0.090	0.152	0.135	0.161
500	0.161	0.200	0.242	0.205
550	0.240	0.311	0.309	0.308
600	0.351	0.428	0.499	0.459
650	0.642	0.627	0.803	0.666
700	0.913	0.907	1.144	0.893

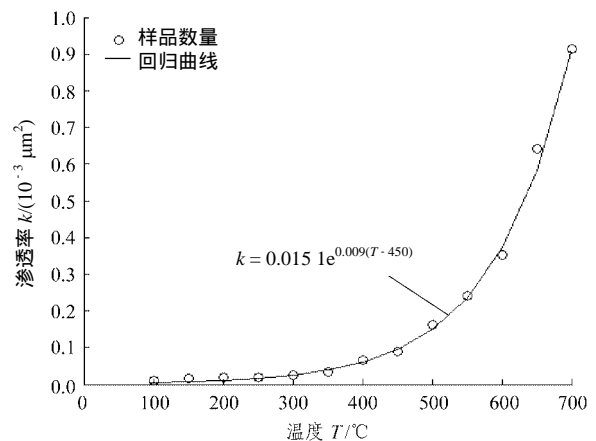


图 1 岩样 A 温度和渗透率的关系

Fig.1 Relationship between temperature and permeability of rock specimen A

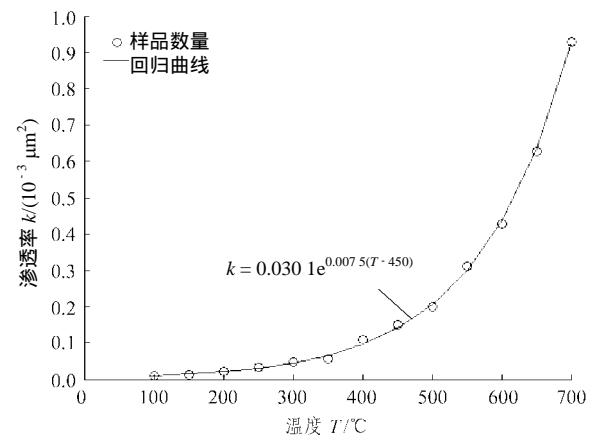


图 2 岩样 B 温度和渗透率的关系

Fig.2 Relationship between temperature and permeability of rock specimen B

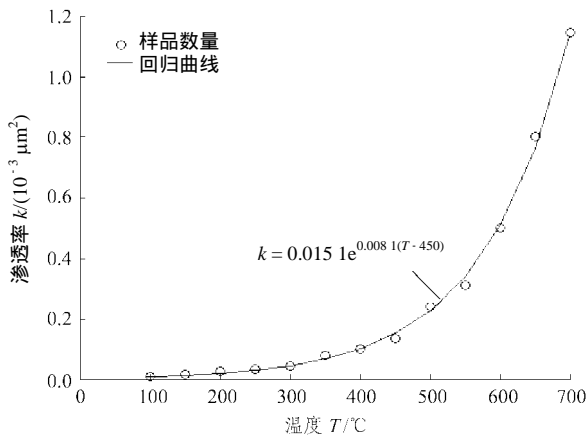


图 3 岩样 C 温度和渗透率的关系

Fig.3 Relationship between temperature and permeability of rock specimen C

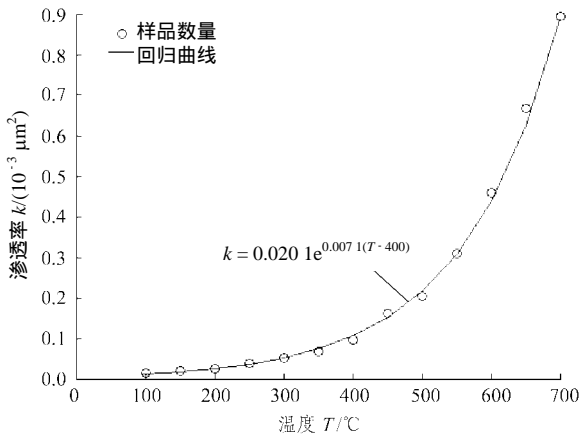


图 4 岩样 D 温度和渗透率的关系

Fig.4 Relationship between temperature and permeability of rock specimen D

渗透率的变化存在一个突变过程，也即存在一个门槛值温度(岩石物性参数发生突变的温度)范围。当加热温度低于门槛值温度时，渗透率变化幅度较小，曲线比较平缓；当加热温度高于门槛值温度时其变化幅度增大，渗透率急剧增大。由此可以根据曲线的斜率来判断岩石温度门槛值，曲线岩石成分不同，其门槛值温度范围也不相同。这与理论推导的公式中温度和渗透率的规律相吻合。

4 结 论

本文在理论分析的基础上，研究了温度对岩石渗透率变化的影响，得出如下结论：

(1) 通过定性研究高温下的岩石结构变化，用热应力作为桥梁，得出岩石渗透率和温度之间的数学关系式，和岩石在高温下渗透率和温度关系试验数据相互符合。

(2) 由岩石渗透率和温度之间的数学关系式以

及试验研究结果可知，在开始温度升高时，渗透率增加缓慢，当升高到某一温度之后，渗透率升高的速度迅速增大，这一温度即为门槛值。经过门槛温度之后岩石的渗透率随温度升高而迅速增加。由试验得出岩样不同，其门槛温度也不同。

参考文献(References)：

- [1] Xu J, Zhang Y, Hu W H, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, pyrophyllite and kimberlitic up to 1 400 and 5.5 GPa[J]. High-temperature High-pressure, 1994, 26 : 375 – 384.
- [2] 张晶瑶,马万昌,张凤鹏,等. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. 东北大学学报, 1996, 17(1) : 5 – 9.(Zhang Jingyao, Ma Wanchang, Zhang Fengpeng, et al. On rock structure character under high temperature[J]. Journal of Northeastern University, 1996, 17(1) : 5 – 9.(in Chinese))
- [3] 徐燕萍. 温度作用下的岩石热弹性本构方程的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4) : 527 – 529.(Xu Yanping. The research on the thermo-elasto-plastic equation of the rock under the temperature effect[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(4) : 527 – 529.(in Chinese))
- [4] 张开洪. 高温高压岩石气体孔隙率自动测试系统[J]. 石油仪器, 1995, 9(2) : 79 – 85.(Zhang Kaihong. The high-pressure rock gas hole degree of high temperature tests system automatically[J]. Petroleum Instrument, 1995, 9(2) : 79 – 85.(in Chinese))
- [5] Somerton W H, Mehta M M, Dean G W. Thermal alteration of sandstones[J]. JPT, 1965, 17(5) : 589 – 593.
- [6] 刘均荣. 温度对岩石渗透率影响的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4) : 51 – 53.(Liu Junrong. Experimental study on relation between temperature and rock permeability[J]. Journal of the University of Petroleum(Natural Science), 2001, 25(4) : 51 – 53.(in Chinese))
- [7] 郝振良. 热应力作用下的有效压力对多孔介质渗透系数的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(6) : 792 – 796.(Hao Zhenliang. Influence of effective stress on the coefficient of permeability of porous medium under thermal stress[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(6) : 792 – 796.(in Chinese))
- [8] 任冬梅. 煤层甲烷气运输的数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 成都 : 西南石油学院, 2002.(Ren Dongmei. Numerical simulation study of the coal seam transportation[M. S. Thesis][D]. Chengdu : Southwest Petroleum Institute, 2002.(in Chinese))
- [9] 赵阳升. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12) : 1 751 – 1 755.(Zhao Yangsheng. 3D numerical simulation for coupled THM of rock matrix-fractured media in heat extraction in HDR[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12) : 1 751 – 1 755.(in Chinese))
- [10] 王瑞凤. 高温岩体地热开发的固流热耦合三维数值模拟[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(3) : 276 – 289.(Wang Ruifeng. 3D numerical simulation for coupled THM in heat extraction in HDR[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(3) : 276 – 289.(in Chinese))