

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1752-07

高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究

徐小丽¹, 高峰^{2,3}, 沈晓明³, 金春花¹

(1. 南通大学 建筑工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 采用 MTS815 液压伺服试验系统及 9310 型微孔结构分析仪对花岗岩在温度作用下 (常温~1 300 °C) 的宏观力学性质及微孔隙结构特征进行了较为系统的研究。结果表明: ①在 800 °C 之前, 岩样力学性质变化规律不明显; 超过 800 °C, 岩样强度迅速劣化; 达到 1 200 °C, 岩样基本失去了承载能力。②岩样孔隙率随温度升高而增大, 孔隙率的阈值温度在 800 °C 左右, 与岩样在该温度点强度突然降低相一致。③岩样孔隙率较小, 但连通性好, 在阶段进汞曲线上显示为不同宽度微裂隙并存特征, 累计进汞曲线呈台阶状, 温度超过 800 °C, 超微孔逐渐向微孔隙转化, 岩样连通性增强。④岩样孔隙分布分形维数随温度的升高反而降低。在高温作用下, 岩样中的热损伤由初始非规则的裂隙结构逐渐向均匀化的孔穴结构转化, 非均匀性弱化是导致岩样孔隙分布分形维数降低的根本原因。

关 键 词: 花岗岩; 温度载荷; 力学性质; 孔隙率; 分形维数

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature

XU Xiao-li¹, GAO Feng^{2,3}, SHEN Xiao-ming³, JIN Chun-hua¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature (from normal to 1 300 °C) have been researched with hydraulic servo system MTS 815 and micropore structure analyzer 9310. The results are as follows: ① Mechanical characteristics do not show obvious variations below 800 °C; strength decreases suddenly above 800 °C and bearing capacity is almost lost at 1 200 °C. ② Rock porosity increases with rising temperatures; the threshold temperature is about 800 °C; at this temperature its effect is basically uniform with strength decreasing rapidly. ③ The connectivity is good although rock porosity is small. The coexistence of the characteristics of different widths of micro-fissures is displayed in phase pressure-mercury test curves. The accumulated pressure-mercury test curves show a stepwise shape. Ultramicropores gradually convert to micropores and connectivity increases when temperatures are over 800 °C. ④ Rock fractal dimension of pore distribution decreases with rise of temperature. Thermal damage of rock transforms from irregular crack structure to homogeneous pore structure gradually at high temperature. The weakening of rock heterogeneity is the basic reason for the decrease of fractal dimension of pore distribution.

Key words: granite; temperature load; mechanical characteristics; porosity; fractal dimension

1 引 言

放射性核废料深层地质处置、矿山资源深部开采、煤与油页岩的地下气化、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等重大工程问题, 促使

高温作用下的岩石物理力学性能研究成为目前岩石力学领域非常活跃的研究方向^[1-3]。在温度作用下, 由温度引起的热应力造成岩石结构的热破裂, 使其由原有的完整结构变成破裂结构, 进而影响岩石宏观力学参数的变化, 这就迫使人们思考与研究岩石

收稿日期: 2009-02-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2002CB412705); 国家创新群体项目 (No. 50221402); 国家自然科学基金项目 (No. 50579042); 江苏省高校自然科学基金 (No. 09KJB130001); 南通大学引进人才科研启动基金 (No. 09R10)。

第一作者简介: 徐小丽, 女, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石热力学、岩石热损伤等方面的研究。E-mail: xuxiaoli2002_ren@163.com

在温度作用下的热破裂问题。20 世纪 70 年代以来, 人们从理论和试验上, 对岩石在温度作用下的力学性质及热破裂问题做了大量的研究, 并取得了丰硕成果^[4-8]。适合核废料、石油、天然气贮存的花岗岩具有渗透性小、致密、强度高等特点, 因而其热破裂点以及脆塑性转换点温度较高, 但国内外研究的加载温度大多在 800 °C 以内, 因而不能得到有效的热开裂门槛温度, 影响了岩石在温度作用下力学性质变化的机制研究。

已有较多的研究表明^[9-10], 岩石结构中细观缺陷(如孔洞、裂隙等)的尺度分布、空间分布和岩石宏观破碎后的块度分布均具有较强的分形特征, 分形维数恰当地表征了岩石的损伤程度和破碎程度, 且以往研究表明: 随着机械损伤增大, 分形维数也相应增加。但温度的影响对岩样孔隙分形维数的变化却很少有人探讨。研究发现^[11], 岩样孔隙分布分形维数随温度的升高反而降低。在高温作用下, 岩样中的热损伤由初始非规则的裂隙结构逐渐向均匀化的孔穴结构转化, 非均匀性弱化是导致岩样孔隙分布分形维数降低的根本原因。

针对上述问题, 本文采用 MTS 液压伺服系统及压汞仪对花岗岩在温度作用下(常温~1 300 °C)的宏观力学行为及孔隙结构特征进行了较为系统的研究, 并探讨了温度对岩样孔隙分布分形维数的影响, 这对于深部岩体的开采、地热开采的数值模拟以及渗透率问题分析提供了有益的研究资料。

2 压汞试验原理与试验过程

2.1 压汞试验原理

压汞法基本原理是基于汞具有很大的表面张力, 一般情况下不润湿岩石, 把汞作为非润湿相, 在一定压力下注入岩石孔隙中, 求出与之平衡的毛管力和注入汞量, 便可获得毛管力与浸汞饱和度的关系曲线, 即毛管压力曲线。从普通物理学可知, 由于表面张力作用的结果, 任何弯曲液面都存在一附加压强(图 1), 对形状简单的弯曲液面, 该压强的方向与液面的凹向一致, 其大小由拉普拉斯方程确定^[12]:

$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中: R_1 、 R_2 为弯曲液面在互相垂直的两交切面内的曲率半径。

对于图 2 所示半径为 r 的毛细管, 弯曲液面在互相垂直的两交切面内的曲率半径可视为相等, 即有 $R_1 = R_2 = r/\cos\theta$, 式(1)可变为

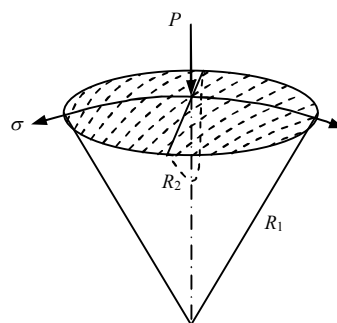


图 1 任意弯曲液面的附加压强

Fig.1 Attached pressure of arbitrary bending liquid surface

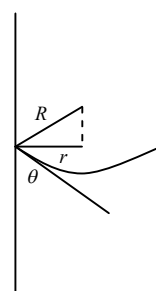


图 2 毛细管压力

Fig.2 Capillary pressure

$$p = 2\sigma \cos\theta/r \quad (2)$$

式中: r 为毛细管半径(μm); p 为毛管压力(MPa)。一般 σ 取 0.48 N/m, θ 取 140°; 式(2)可简化为

$$p = 0.735 \text{ 4}/r \quad (3)$$

由式(3)可以方便求得任意毛管压力下岩石的毛细管半径, 若再测出每个压力下的进汞量, 便可获得多孔介质中孔隙喉道的分布规律。

2.2 试验过程

2.2.1 高温作用下花岗岩单轴压缩试验

试验前, 按照国际岩石试验试样尺寸的标准, 首先将岩样加工成 25 mm×50 mm 的圆柱体标准岩样。本次试验共有 45 块岩样, 每 3 块为一组。对于温度的施加, 采用高温炉 MTS652.02 来实现, 以 2 °C/s 的升温速率由常温 25 °C 分别升温至 50、100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300 °C, 恒温 20 min 后自然冷却至常温。试验采用位移控制方式, 以 0.001 5 mm/s 的加载速率一次加载至破坏, 采用 MTS815 电液伺服材料试验系统测量岩石在变形破坏全过程中的载荷、变形及时间等参数。

2.2.2 高温作用下压汞试验

试验仪器采用美国佐治亚州 Micromeritics 仪器公司生产的 9310 型微孔结构分析仪, 温度点的选取依据花岗岩力学试验结果的分析, 分别选取了 25、50、100、200、300、500、800、1 000、1 200 °C 共

9 个温度点, 每个温度点有 3 块岩样, 共 27 块岩样。试验过程中, 首先将岩样置于 70~80 °C 的烘箱内烘干 10 h, 然后装入膨胀计中抽真空, 当真空度达到 50 μm 汞柱以下时, 将汞液注入膨胀计中。通过逐步加压, 使汞液进入所测样品的孔隙中, 压入孔隙中汞的体积由露出汞液面的铂电阻丝的变化求出。根据不同压力下汞液进入岩样中的数量, 可求出岩样的孔隙度及各种直径的孔隙在总孔隙所占的比例。

3 温度作用下花岗岩力学性质试验结果

由于每组岩样的应力-应变具有相近的分布形式, 大致经历了压密阶段、弹性阶段、弹塑性变形阶段、破坏阶段 4 个区段^[13]。本文列出若干具有代表性试样的应力-应变曲线, 如图 3 所示^[14]。

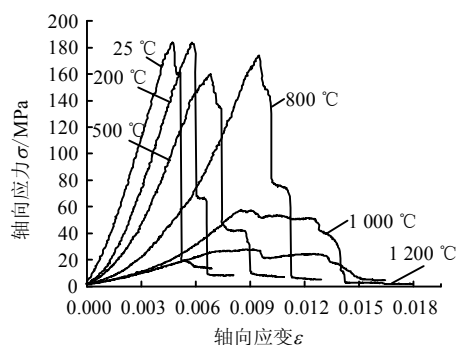


图 3 高温作用下花岗岩轴向应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of granite after high-temperature

随着温度的升高, 花岗岩的脆性减弱, 延性增强, 在 800 °C 之前, 尽管岩石脆性降低, 强度变小, 但是变化不大; 温度超过 800 °C, 应力-应变曲线趋于平缓, 岩样强度突然降低, 呈现出明显的塑性行为和峰后行为; 1200 °C 岩样基本失去承载能力。高温后花岗岩强度随温度的变化规律如图 4 所示。由于本文讨论的是降温后再加载的岩样, 因而在 800 °C 之前岩样强度没有明显下降, 因为降温又恢复了花岗岩的脆性, 只有当岩样中出现脆塑性转变后强度才突然下降, 加温后降温其力学行为呈突变状态, 与结构中相变密切相关。

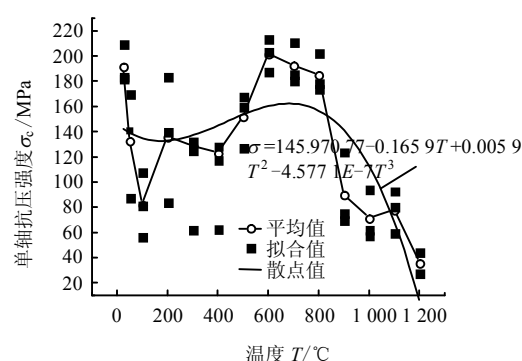


图 4 高温作用下花岗岩强度与温度的关系
Fig.4 Relationship between strength and temperature

岩样单轴压缩的破坏形式复杂多变, 通常认为最终的破坏多数是与轴向近乎平行的劈裂破坏。本文给出各个温度点岩样破坏形式如图 5 所示。

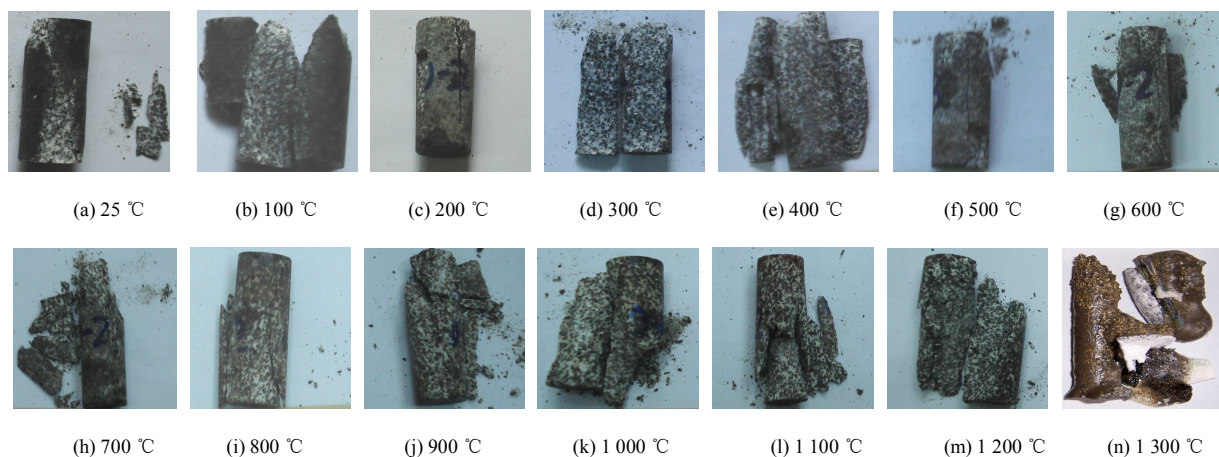


图 5 不同温度作用下花岗岩破裂形式
Fig.5 Different macro-fracture after different temperatures

温度对于岩样的破坏形式有着明显的影响。在 800 °C 之前, 岩样主要表现为拉裂破坏, 宏观裂纹从

岩样的顶部到底部劈裂, 同时随温度的升高, 也出现局部的剪切破坏。温度超过 800 °C, 破坏形式主

要是破坏面与轴向成一定夹角的剪切破坏, 同时伴随局部的拉伸破裂。随着温度的升高, 岩样脆性特性减弱, 塑性特性增强, 破坏形式由常温下拉裂脆性破坏转变成高温下拉剪半脆性、塑性破坏。当温度达到 1 300 ℃, 岩样基本处于熔融状态。

4 温度作用下花岗岩孔隙结构特征

研究孔隙结构必然涉及到孔隙大小的分级, 而目前国内外尚没有统一的分类标准, 本文沿用文献[15]对孔隙大小的分级标准, 即考虑孔隙成因及其对渗流的意义, 将孔隙划分为: 超微孔, 孔径 <1 μm, 液体一般无法在其中渗流; 微孔隙, 孔径在 1~10 μm 之间, 在较高压力下液体可渗流, 但渗透率较低; 小孔隙, 孔径在 10~100 μm 之间, 在自然状态下, 有一定的水头压力时, 水可以通过其渗流; 大孔隙, 孔径 >100 μm, 地下水可以在其较顺畅地渗流。试验过程测得花岗岩在不同温度下的孔隙率如表 1 所示^[16]。

表 1 岩样在不同温度下的孔隙率

Table1 Rock porosity under different temperatures

岩样	不同温度 (℃) 下的孔隙率/%									
	25	50	100	200	300	500	800	1 000	1 200	
1	0.953	0.729	0.866	0.912	1.49	1.044	2.619	3.554	3.973	
2	0.945	0.805	0.681	1.064	1.369	1.114	2.417	4.191	4.631	
3	0.721	0.703	0.66	1.048	1.373	1.823	2.678	3.708	4.766	
平均值	0.873	0.746	0.736	1.008	1.411	1.327	2.571	3.818	4.457	

绘制岩样孔隙率与温度变化曲线如图 6 所示。

由试验数据拟合得到岩样孔隙率与温度成指数关系, 拟合函数为 $y = 1.114 24e^{(x/796.869)} - 0.418 7$ 。

由表 1 分析, 岩样孔隙率随温度升高总体呈增大趋势, 岩样在 100 ℃前平均孔隙率有所下降。与 25 ℃时孔隙率相比, 200 ℃平均孔隙率增长了 1.155 倍, 300 ℃平均增长了 1.616 倍, 500 ℃平均增长了 1.520 倍, 800 ℃平均增长了 2.945 倍, 1 000 ℃平均增长了 4.373 倍, 1 200 ℃平均增长了 5.105 倍。孔隙率的变化存在一个突变过程, 从表中可以看出, 花岗岩的阈值温度在 800 ℃左右, 此时孔隙率增长幅度突然变大, 比常温增长了 2.945 倍。这是由花岗岩热开裂引起, 这也与花岗岩在 800 ℃左右强度突然降低相一致。

当加热温度低于阈值温度时, 岩样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, 因而岩样孔隙率变化较小, 岩样宏观力学性质在 800 ℃之前没有明显变化。随着温度的升高, 岩

样介质活化和塑性成分增加, 从而促进岩样由脆性向延性转化, 使得矿物结构和成分发生变化。当温度高于阈值温度后, 组成矿物出现脱水和相变, 氢基、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, 导致岩样孔隙结构发生变化, 从而增加和改善了流体流动通道, 使岩样孔隙率变化幅度增加, 这也是导致岩样在 800 ℃后强度突然降低的主要原因。

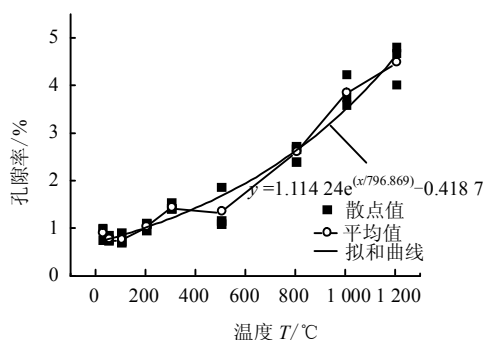


图 6 岩样孔隙率与温度变化曲线

Fig.6 Relationship between rock porosity and temperature

绘制花岗岩在不同温度下的阶段进汞曲线和累计进汞曲线如图 7 所示。

花岗岩在不同温度下各种孔径含量百分比如表 2 所示。

表 2 花岗岩在不同温度下各种孔径含量百分比

Table 2 Percent of different apertures of granite at different temperatures

温度 T/℃	超微孔含量 /%	微孔隙含量 /%	小孔隙含量 /%	大孔隙含量 /%
25	48.387	16.129	32.258	3.226
50	52.174	13.043	34.783	0
100	50.000	17.857	25.000	7.143
200	52.941	14.706	20.588	11.765
300	38.776	16.327	18.367	26.531
500	47.059	14.706	23.529	14.706
800	38.824	28.235	24.706	8.235
1 000	36.667	40.833	18.333	4.167
1 200	23.704	47.407	23.704	5.185

由图 7 可知, 虽然岩样孔隙率较小, 但连通性好, 在阶段进汞曲线上显示为不同宽度微裂隙并存的特征, 累计进汞曲线呈台阶状。由表 2 可知, 常温下, 超微孔占 48.387%, 微孔隙占 16.129%; 温度达到 800 ℃时, 超微孔占 38.824%, 微孔隙占 28.235%; 1 200 ℃时, 超微孔占 23.704%, 微孔隙

占¹⁷⁵⁶407%。当温度超过 800 °C 后,超微孔逐渐向微孔隙转化,岩样微裂隙的连通性增强。

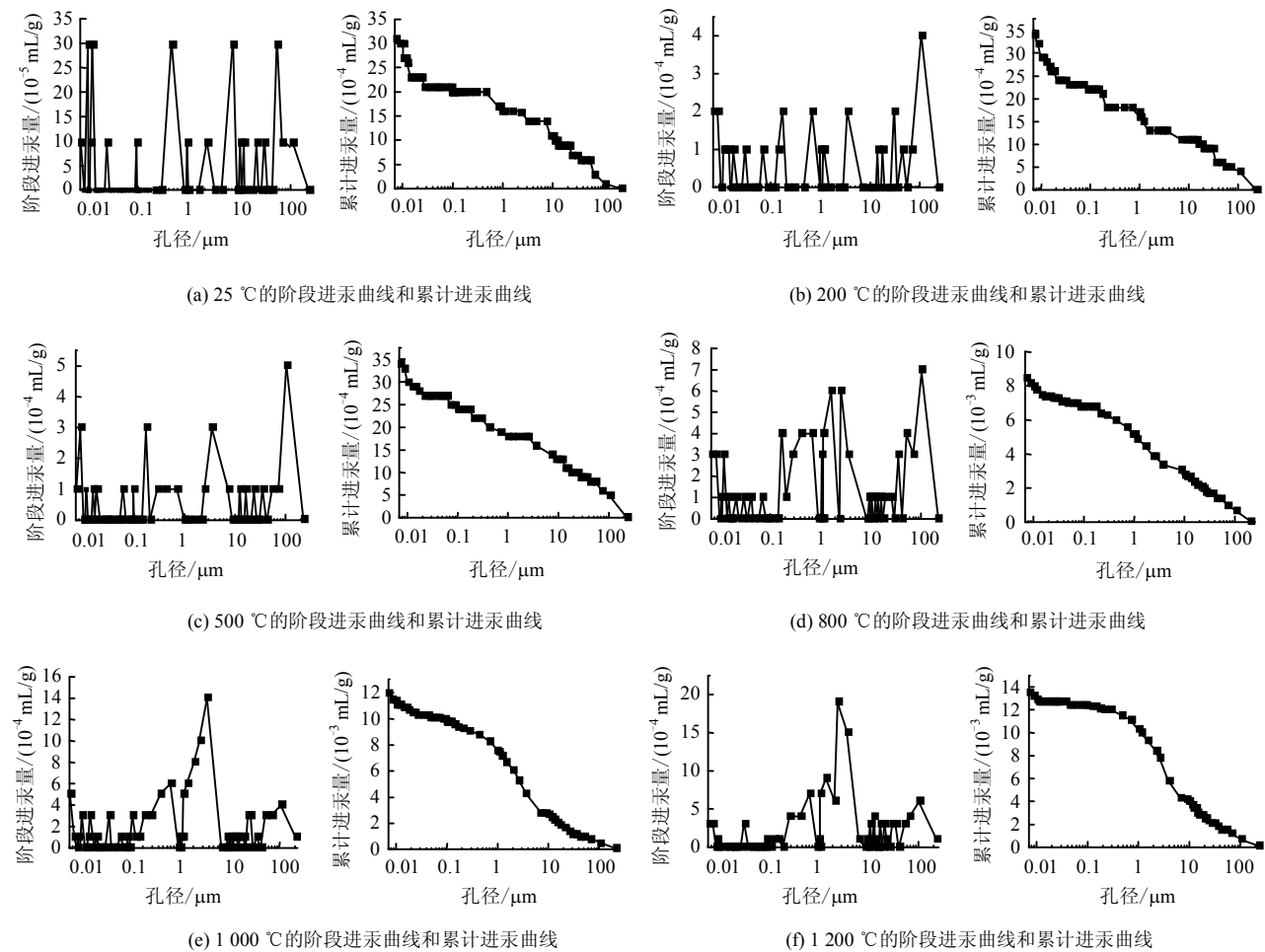


图 7 花岗岩在不同温度下的阶段进汞曲线和累计进汞曲线
Fig.7 Phase and accumulative pressure-mercury test curves of granite at different temperatures

5 不同温度作用下花岗岩的孔隙体积分形维数

5.1 孔隙分维计算

由分形定义: $V(r) \propto r^{3-D}$, $V(r)$ 为用尺度为 r 的体积元量测出的岩石介质的体积, 则孔隙体积为

$$V_p(r) = V_0 - V(r) \quad (4)$$

式中: V_0 为岩样的总体积 (包括介质与孔隙)。

由此可得

$$\lg(-dV_p/dr) \propto (2-D)\lg r \quad (5)$$

对于圆柱形孔隙, 水银充填到尺度为 r 的孔隙所需压力为 $P(r)$, 则 $P(r)$ 与 r 满足 Washburn 方程:

$$P(r) = 2F \cos \theta / r \quad (6)$$

式中: F 为水银表面张力; θ 为水银与固体的接触角。

由此可得

$$\lg(dV_p/dP) \propto (D-4)\lg P \quad (7)$$

式中: P 为注入压力; D 为体积分维; V_p 为水银注入到孔隙内的体积。

5.2 试验计算结果

根据压汞试验中孔隙体积增量与压力增量数据, 分别计算不同温度下的三块岩样各自的孔隙体积分形维数如表 3 所示。

表 3 不同温度下岩样孔隙分形维数
Table 3 Fractal dimensions of crack size distribution at different temperatures

岩样	不同温度下 (°C) 的分形维数								
	25	50	100	200	300	500	800	1 000	1 200

1	3.059	3.135	3.177	3.130	3.063	3.060	3.050	3.021	2.949
2	3.048	3.091	3.163	3.081	3.036	3.041	2.99	2.951	2.932
3	3.028	3.079	3.161	3.043	3.033	3.025	2.958	2.902	2.890
平均值	3.045	3.102	3.167	3.085	3.044	3.042	2.999	2.958	2.924

岩样孔隙体积分形维数随温度变化如图 8 所示。

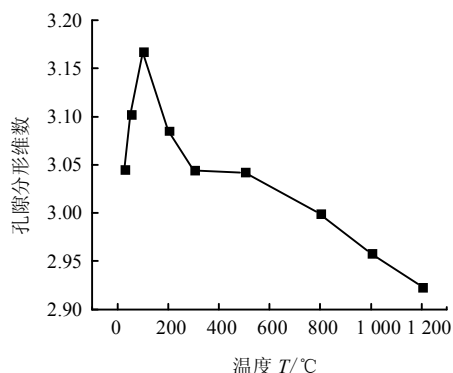


图 8 岩样孔隙分形维数随温度的变化

Fig.8 Relationship between the fractal dimensions of crack size distribution and temperature

岩样初始孔隙分布具有不规则性, 可用分形维数来表征, 以往研究表明, 随着机械损伤增大, 分形维数也相应增加。这是由于应力造成的损伤加剧了岩样的破坏程度, 加大了岩样孔隙结构的非均匀性, 因而其分形维数增大。

但本文研究结果表明, 岩样孔隙分形维数在 100 °C 时比常温下有所增大, 此后, 随着温度的增加, 岩样孔隙分布分维却逐渐降低。这是因为在 100 °C 前, 由于热膨胀作用, 产生一些微小裂纹, 由于岩石在常温时, 其内部也有原生裂纹存在, 因而加大了岩石裂纹的不均匀性, 导致分形维数有所增大; 随着温度的升高, 岩石塑性成分增加, 单一破裂面被分散剪切面所代替, 逐渐向塑性流动过渡, 岩样中原非规则的裂隙结构逐渐向均匀化的孔穴结构转化, 非均匀性弱化是导致岩样孔隙分布分形维数降低的根本原因。

6 结 论

(1) 在 800 °C 之前, 花岗岩力学性质变化规律不明显; 超过 800 °C, 岩样强度迅速劣化; 达到 1200 °C 时, 岩样基本失去了承载能力。随温度的升高, 岩样脆性减弱, 塑性增强, 破坏形式由强烈脆性拉裂向拉剪半脆性破坏形式转变, 并形成较为破碎的剪切面。

(2) 岩样孔隙率随温度升高总体呈增大趋势, 孔隙率的变化存在一个突变过程, 花岗岩的阈值温度在 800 °C 左右, 这也与花岗岩在 800 °C 左右强度突然降低相一致。

(3) 花岗岩属于致密岩样, 孔隙率较小, 但连通性较好, 在阶段进汞曲线上显示为不同宽度微裂隙并存的特征, 累计进汞曲线呈台阶状。温度超过 800 °C 后, 超微孔逐渐向微孔隙转化, 岩样连通性增强。原因在于高温作用过程中岩石矿物脱水、晶格重组、矿物收缩和分解作用增加了裂缝的连通性, 同时岩石颗粒间热膨胀系数差异和非均质性产生新的裂缝, 而裂缝延伸则形成了连通网络结构。

(4) 岩样孔隙分布分形维数随温度的升高反而降低。在高温作用下, 岩样中的热损伤由初始非规则的裂隙结构逐渐向均匀化的孔穴结构转化, 非均匀性弱化是导致岩样孔隙分布分形维数降低的根本原因。

参 考 文 献

- [1] HEUZE F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks — a review[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(1): 3—10.
- [2] 王绳祖. 高温高压岩石力学——历史、现状、展望[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(4): 1—31.
WANG Sheng-zu. High-temperature/high-pressure rock mechanics: history, state-of-art and prospect[J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(4): 1—31.
- [3] 井兰如, 冯夏庭. 放射性废物地质处置中主要岩石力学问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(4): 833—841.
JING Lan-ru, FENG Xia-ting. Main rock mechanics issues in geological disposal of radioactive wastes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(4): 833—841.
- [4] 白冰. 核废料储库周边介质热力耦合数值分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(12): 1989—1993.
BAI Bing. Thermo mechanical coupling analysis of nuclear waste repository[J]. *Rock and Soil Mechanics*,

2004, 25(12): 1989—1993.

- [5] 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等. 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1477—1482.

ZUO Jian-ping, ZHOU Hong-wei, XIE He-ping, et al. Meso-experimental research on sandstone failure behavior under thermal-mechanical coupling effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1477—1482.

- [6] 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东. 温度对岩石渗透率影响的实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 51—53.

LIU Jun-rong, QIN Ji-shun, WU Xiao-dong. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability[J]. **Journal of the University of Petroleum(Natural Science)**, 2001, 25(4): 51—53.

- [7] 张渊, 曲方, 赵阳升. 岩石热破裂的声发射现象[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 73—75.

ZHANG Yuan, QU Fang, ZHAO Yang-sheng. Acoustic emission phenomena of thermal cracking of sandstone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(1): 73—75.

- [8] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1150—1155.

ZUO Jian-ping, XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, et al. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperatures[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2007, 50(4): 1150—1155.

- [9] XIE HEPING, PARISEAU W G. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(4): 343—350.

- [10] 高峰, 谢和平, 巫静波. 岩石损伤和破碎相关性的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497—502.

GAO Feng, XIE He-ping, WU Jing-bo. Fractal analysis of the relation between rock damage and rock fragmentation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics**

and Engineering, 1999, 18(5): 497—502.

- [11] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.

- [12] 邵创国, 荆文峰, 秦兴岭. Autopore II 9220 型毛管压力曲线测定仪[J]. 石油仪器, 1998, 12(5): 33—35.

SHAO Chuang-guo, JING Wen-feng, QIN Xing-ling. Autopore II 9220 capillary pressure curve determinative instrument[J]. **Petroleum Instrument**, 1998, 12(5): 33—35.

- [13] 王颖轶, 张宏君, 黄醒春, 等. 高温作用下大理岩应力-应变全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 2): 2345—2349.

WANG Ying-yi, ZHANG Hong-jun, HUANG Xing-chun, et al. Experimental study on whole stress-strain course of marble under the action of high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.2): 2345—2349.

- [14] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 402—406.

XU Xiao-li, GAO Feng, GAO Ya-nan, et al. Research on mechanical characteristics and structure effect of granite under temperature loads[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 37(3): 402—406.

- [15] 吴恩江, 韩宝平, 王桂梁, 等. 山东兖州煤矿区侏罗纪红层孔隙测试及其影响因素分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 442—452.

WU En-jiang, HAN Bao-ping, WANG Gui-liang, et al. Pore structure test of Jurassic red-bed in Yanzhou mining area, Shandong province, and its affecting factors[J]. **Geological Journal of China Universities**, 2005, 11(3): 442—452.

- [16] XU XIAOLI, GAO FENG, SHEN XIAOMING, et al. Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 3(18): 413—417.