

热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特性的影响

寇绍全

(北京钢铁学院矿业研究所)

提要 本文研究了 20℃ 到 600℃ 不同温度热处理对 Stripa 花岗岩变形及破坏特性的影响。结果表明,力学性质特征量随热处理温度升高有些非寻常变化。文章还指出可以用声速比来评价岩石的质量。

关键词 热开裂,花岗岩,损伤,变形,破坏

一、前言

许多工程问题中,完整岩石会受到损伤。矿山及铁路路堑边坡,地下热水库、地下核废料库等围岩的损伤是热引起损伤的例子。铁路路基的损伤,冲击钻作用下离钻头一定距离的岩石损伤是反复冲击造成损伤的例子。因而,研究损伤对岩石力学性质的影响具有实际意义。此外,通过对裂隙的研究,有可能在实验室与现场结果之间搭起桥梁。

为了试验核废料生成的热对其仓库围岩的影响,1977年在瑞典中部 Stripa 地区的一个废铁矿里,用 6kW 的电热器(相当于 330℃ 的恒热源)对岩体加热了 3 个月^[1],在此基础上做了大量研究工作。Atkinson 等^[2]利用声发射来考察过加热时岩石的损伤过程,测量了 Westerly 花岗岩在 20℃—500℃ 时的断裂韧性 K_{Ic} 。此外, Houpert^[3], Swan^[4] 等也考察过花岗岩受不同温度热处理后的某些力学性质。

我们较系统地考察了经过热处理的 Stripa 花岗岩的力学性质,得到了工程中需要的最基本的力学参数。部分结果已发表在[5,6]中。本文总结了这项工作的宏观试验结果,并补充了大量新的内容。

二、实验研究

1. 试件的准备

试件岩芯取自瑞典中部的 Stripa 花岗岩地区,主要成分是石英和斜长石,其体积百分数各占 35%。试件的矿物颗粒尺寸小于 0.7 mm,结构复杂,肉眼未见明显外观缺陷。

直径约 42 mm,长于 250 mm 的岩芯被随机地分成七组。其中六组被分别瞬间放入 100°, 150°, 200°, 300°, 450°, 600℃ 的炉内加热 3 个小时,然后突然移出置于室温(20℃)下。余下一组也经过真空干燥,以去掉水分。

本文于 1986 年 10 月 20 日收到。

加热速率对火成岩的热开裂影响是大的, 由温度梯度和加热速率所产生的微裂纹和仅由高温所产生的不同^[7]. 加热速率超过每分钟几度, 微裂纹可在较低温度下产生. 加热速率更低时, 花岗岩在 300℃ 以下都无明显的微裂纹生成^[8]. 我们选择快速加热来制备裂纹, 一是手续简便, 二是可在不太高的温度下形成较多微裂纹.

试件的微观特征是用透射光显微镜, 反射光显微镜, 荧光反射显微镜及扫描电镜来观察的^[9]. 结果说明, 热处理温度低于 200℃ 时, 样品中包含的裂纹较少, 主要在颗粒边界上. 随热处理温度升高, 颗粒边界更明显, 温度越高, 穿晶裂纹越普遍. 经过 450℃ 和 600℃ 处理的样品的颗粒边界常发现裂纹包围的碎片. 用 DSA 方法得到的描述裂隙多少的量(最大裂隙关闭应变)和温度的关系与微观观察结果是定性吻合的^[9].

2. 试验方法及结果

热处理后岩芯两端都截去 45 mm 以上, 以便裂纹沿轴向分布尽可能均匀. 用这样的岩芯首先做成切口中心深 10 mm, 宽 1 mm 的三点弯曲试件. 用做过三点弯曲试验的试件再加工成长 80.0—84.1 mm 的一维压缩和厚 21.0±0.1 mm 的巴西试验试件. 试件制备和试验遵循 ISRM 建议的方法^[9].

试验在室温及室内空气湿度下进行, 除特殊申明外, 结果皆为 5 个试件结果的平均值.

(1) 断裂韧性试验 三点弯曲试验遵从[10]的方法, 在 100kN Instron 万能试验机上进行. 试件跨度 139 mm, 加载时保持裂纹张开位移恒速 2.5 μm/s, 用精度为 ±0.002 mm/mm 的位移传感器 (LVDT) 来测量加载点的位移, 用声发射来监视开裂过程, 压力传感器输出载荷值. 一般每 3 秒采集一组信息, 由 ABC800 型计算机记存. 试验用多循环的办法, 信息由计算机按下式处理,

$$\lambda ED = 15.6719 \left\{ 1 + 0.1372(1 + \nu) + 11.5073(1 - \nu^2) \left(\frac{a}{D} \right)^{2.5} \right. \\ \left. \times \left[1 + 7.0165 \left(\frac{a}{D} \right)^{4.5} \right] \right\} \quad (1)$$

$$Y' = 12.7527 \left(\frac{a}{D} \right)^{0.5} \left[1 + 19.646 \left(\frac{a}{D} \right)^{4.5} \right]^{0.5} / \left(1 - \frac{a}{D} \right)^{0.25} \quad (2)$$

$$K_I = 0.25 \left(\frac{s}{D} \right) Y' F_{\max} / D^{1.5} \cdot 10^{4.5} \quad (3)$$

式中 λ 为柔度 (mm/kN); a 为裂纹长度 (mm); D 为试件直径 (mm); E 为杨氏模量 (GPa); ν 为泊松比; s 为试件跨度 (mm); $F_{\max}$ 为每循环的峰值载荷 (kN); K_I 为 I 型断裂韧性 ($MN/m^{1.5}$).

为避免人为因素, λ 是通过计算机用直线去逼近实验所得载荷位移曲线中峰值载荷的 12.5% 到 85% 来得到的. ν 是根据一维压缩结果输入.

断裂韧性 K_I 和弯曲杨氏模量 E_b 随温度的变化分别表示在图 1 和图 3 中.

(2) 声速测量 试件被夹在压电陶瓷的声波发生器和接受器之间, 并加上约 2.76 mPa 的预应力. 传感器的频率范围为 2—30 kHz. 带有选择开关的 PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) 被用来激发 P 波和 S 波. 信号由

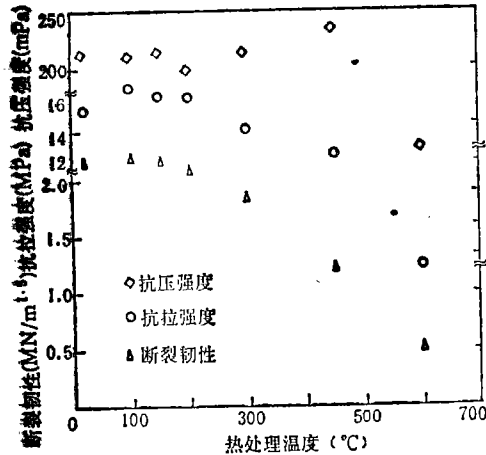


图 1 经过热处理的 Stripa 花岗岩的断裂韧性、抗拉强度和抗压强度

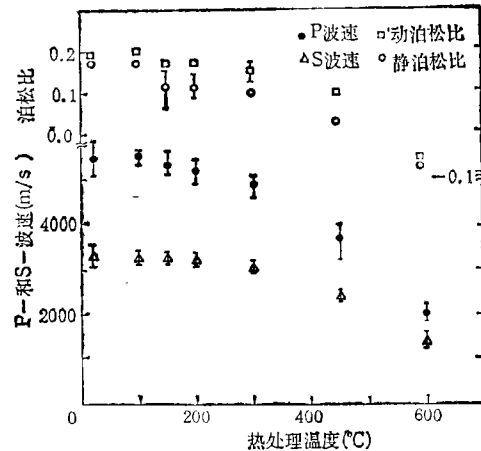


图 2 经过热处理的 Stripa 花岗岩的 P-和 S-波速, 静、动泊松比

频响为 1mHz 的 GOULD ADVANCE OS40000 数字存储示波器寄存, 用 HEWLETT

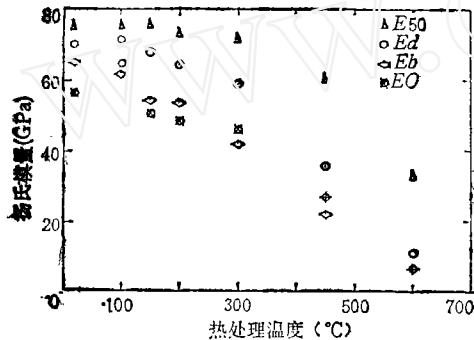


图 3 经过热处理的 Stripa 花岗岩的杨氏模量

PAKARD 7045A X-Y 记录仪画出来, 从而得到声波通过试件的时间. 所得 P 波速 V_p , S 波速 V_s 及其弹性力学关系算得的杨氏模量 E_d , 泊松比 ν_d 分别表示在图 2 及图 3 中.

(3) 一维压缩试验 试件中部表面上贴了两对 HBM6/120 LY11 型应变片, 电阻 $120\Omega \pm 0.2\%$; 灵敏度系数 $2.05 \pm 1\%$, 其温度系数 95 PPM/K. 试验在 Instron 4.5MN 试验机上进行, 保持常变形速率 $1.4\mu\text{m/s}$, 约合应变率 $1.5 \sim 2 \times 10^{-5}/\text{s}$. 应变、载荷、声发射用 HP7046A 型 X-Y 记录仪和 ABC800 计算机同时记录. 计算机采样频率为每个值 2 秒. 用计算机整理出抗压强度 σ_c , 杨氏模量 $E_s(\sigma)$, 泊松比 $\nu_s(\sigma)$, 体模量 $K_s(\sigma)$ 和剪切模量 $G_s(\sigma)$. 模量均为切线模量, σ 为轴向应力. 部分结果绘在图 1、图 2、图 3 及图 5 中.

(4) 抗拉强度试验 巴西试验时, 速率为 $10\mu\text{m/s}$, σ_T 与 T 的关系示于图 1, 对结果的理论分析发表在[6]中.

三、讨 论

由不同尺寸及不同热胀系数的多种矿物组成的 Stripa 花岗岩在热处理中产生了微裂隙. 经过较低温度处理后, 矿物不发生相变, 主要是微裂隙引起力学性质的变化. 占花岗岩 35% 的石英在 573°C 发生相变, 因而经 600°C 处理的试件内不仅有裂隙增殖, 而且有相变.

1. 力学性质的变化对热处理温度的非线性依赖关系

从图 1—图 4 可以看到, 当 $T < 200^{\circ}\text{C}$ 时, 力学量随热处理温度变化较小, 且不单调, 从 450°C 到 600°C 下降很快。

最突出的性质是, 试样的多数力学性质参量, 如模量、断裂韧性、抗拉强度、质量密度及 2.76MPa 下的声速都在 100°C 取弱极值 (图 1—4)。类似现象其他作者也有所报导。Atkinson 等^[2]观察到辉长岩和 Westerly 花岗岩的断裂韧性在 100°C 处理后达最大值。Swan^[4]观察到 Stripa 花岗岩在 100°C 处理后杨氏模量的最大值。我们认为, 这种现象的原因是: 经过中等温度热处理后, 新裂纹增殖很少, 且消除了部分预应力, 裂隙部分关闭。证据是裂隙密度的极小值及质量密度的最大值与力学性质的最大值对应。温度再升高, 热开裂成了控制因素, 从而使材料性质变坏。

σ_c 先随热处理温度升高而下降, 在 200°C 左右达极小值, 以后随温度升高而增加, 在 450°C 左右达最大值 234MPa , 到 600°C 时降到了 128MPa (图 1)。Hogupert 等^[3]对大理石和花岗岩的实验结果与此非常类似。这也说明压破坏的机制与其它参量所反映的材料内部机制是不同的。

2. 从不同试验得到的杨氏模量

图 3 中的杨氏模量 E_0 和 E_{50} 分别为一维压缩下应力为 2.76MPa 和抗压强度 50% 时的切线模量。 E_b 和 E_d 已如前述。由图可见, 对应于同一热处理温度 $E_{50} > E_d > E_0$, 而 E_0 与 E_b 差不多大小。因为 E 在应力较小时随应力增加而增加, 只在接近极限强度时, 随应力增加而减少。因而, (1) $E_{50} > E_0$; (2) 比较模量的大小应该在同一应力水平上进行。从声速算得的模量实质是以预应力值 (2.76MPa) 为中心, 在声波脉冲的应力幅值范围内往复加载和卸载的模量的平均值。由于裂隙面间的摩擦影响, 卸载模量大于加载模量, 其平均值 E_d 也就大于 E_0 。且 $50\% \sigma_c$ 比 2.76MPa 大得较多, 因而 $E_{50} > E_d$ 。如果假定试件的拉压弹性模量相等, 可以估计在三点弯曲试验中与 E_b 对应的应力为 $1.3\text{—}7.4\text{MPa}$, 因而与 2.76MPa 接近, 故 E_0 与 E_b 差不多。

实验结果 E, K, ν, G 表示为应力的函数, 这是有实用意义的。经过高温处理的岩样模量随应力变化很大, 因而从线弹性断裂力学得到的断裂韧性在这种情况下是值得修正的。

3. 负泊松比及泊松比大于 0.5 的现象

图 5 说明经 600°C 处理的试件在低应力下泊松比是负值, 临破坏前泊松比可大于 0.5。图中 ν_{d600} 是指用声速算得的经 600°C 处理的试件的泊松比。我们采用过应变片和位移传感器两种手段, 同时监视过 600°C 处理后的试件在压缩过程中周向应变的变化, 得到了初始阶段压力增加, 直径缩小的一致结果。Avesta 片麻岩经过 600°C 处理后, 也在低压段出现负泊松比^[11]。Kern^[12] 也指出加热石英岩时得到负泊松比的可能性。关于负

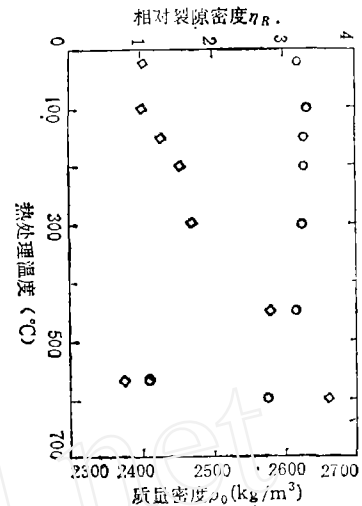


图 4 经过热处理的试件的相对裂隙密度 η_r 与物质密度 ρ_0

泊松比的机制有待进一步研究,但可初步看到两个原因:一是微裂隙使泊松比减少,二是

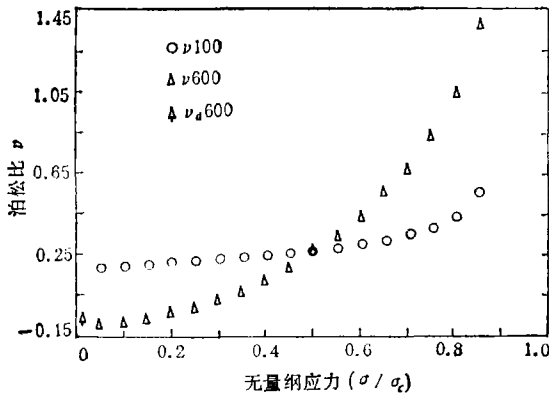


图 5 泊松比随轴应力的变化

石英的相变。由于微裂隙的大量出现在试件中形成了孔洞,且孔洞边缘是破碎的,加压时部分孔洞坍塌,直径收缩,当孔洞部分填实后,材料又表现出正泊松比。

泊松比大于 0.5 是因为试件在加压过程中形成沿最大压应力方向的微裂隙;破坏前夕,裂隙可以增加很快,引起试件直径增加,因而 ν 大于 0.5 实际是用连续介质力学方法来处理不连续问题造成的结果。

4. 岩石的损伤度及岩石质量的

评定

在^[6]中引入了裂隙密度 η 来描述热开裂引起的试件的损伤程度,其定义为

$$\eta(p) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{(\Delta V_r)_i}{\Delta V_i} \quad (4)$$

其中 $(\Delta V_r)_i$ 为 ΔV_i 中裂隙所占的空体积, ΔV_0 为试件中某个适当大小的体积。利用 Budiansky 等所建立的裂隙参数与模量及声速的关系,可以得到裂隙密度与热处理温度的关系(图 4)。图中相对裂隙密度是指在某一温度下的裂隙密度与几个不同温度下最小裂隙密度的比值。经过 100℃ 处理后试件的裂隙密度取极小值,与物质密度的极大值对应。这说明经过中等温度热处理后裂纹要稍稍闭合。

损伤度与岩石的力学性质有很好的线性对应关系^[2]。除抗压强度外,其它力学性质参量与裂隙密度的相关系数都大于 0.95,多数大于 0.97。这说明用裂隙密度来评价岩石的质量是可能的。

Budiansky 等^[13]还建立了声速与裂隙密度的关系。简化他们的关系式,从试验结果我们得到

$$\frac{V_s}{V_p} = 0.575 + 0.039\eta/\eta_0 \quad r = 0.979 \quad (5)$$

其中 η_0 为未经处理的岩样的裂隙密度, r 为相关系数。

裂隙密度是一个难以测量的量,因而我们转向考察声速比与力学性质参量的关系。根据实验结果得到

$$\begin{aligned} \bar{V}_p &= 4.80 - 3.78\bar{S} & r &= -0.993 \\ \bar{V}_s &= 4.41 - 3.38\bar{S} & r &= -0.988 \\ \bar{E}_{90} &= 4.39 - 3.35\bar{S} & r &= -0.979 \\ \bar{K}_c &= 5.87 - 4.84\bar{S} & r &= -0.984 \\ \bar{\sigma}_T &= 5.52 - 4.13\bar{S} & r &= -0.976 \end{aligned} \quad (6)$$

其中文字上面带一横的量表示这个量是用未经过热处理的试件中的量来无量纲化了, S

表示横波与纵波波速比, 因而 $\bar{S} = \left(\frac{V_s}{V_p} \right) / \left(\frac{V_s}{V_p} \right)_0$, Stripa 花岗岩的 $(V_s/V_p)_0 = 0.616$.

低应力下计算的模量, 无论声速测量和静态试验所得结果与 $\bar{S}$ 都有很好的线性对应关系. $\bar{E}_d, \bar{\nu}_d, \bar{K}_d, \bar{G}_d$ 为从声速计算的结果, 它们与 $\bar{S}$ 的关系为

$$\begin{aligned}\bar{E}_d &= 6.26 - 5.25\bar{S} \quad r = -0.988 \\ \bar{\nu}_d &= 8.67 - 7.64\bar{S} \quad r = -0.993 \\ \bar{K}_d &= 6.63 - 5.65\bar{S} \quad r = -0.983 \\ \bar{G}_d &= 6.02 - 4.99\bar{S} \quad r = -0.986\end{aligned}\quad (7)$$

岩石的声速不仅与岩石中所含裂隙、孔隙有关, 而且与试件承受的应力, 矿物成分和排列方向有关. 上述结果说明, 在其它条件都相同的情况下, 可以用较易测量的声速比来估计岩石的力学性质. 这种方法为评价岩石质量, 用实验室结果来估计现场材料参数提供了一条路径, 值得深入研究.

四、结 论

1. 经过中等温度 (100℃ 左右) 热处理后, Stripa 花岗岩的多数力学性质特征量, 如声速、模量、抗拉强度、断裂韧性都出现极大值. 这与裂纹密度及声速比在此温度下取极小值对应. 这说明, 经过中等温度热处理可以改善岩石的质量.

2. 抗压强度随热处理温度的变化规律与抗拉强度和断裂韧性不同, 这说明压破坏受微裂隙的影响与其它破坏形式有不同的机制.

3. Stripa 花岗岩的断裂韧性随拉伸强度的减少而减少.

4. 负泊松比及泊松比大于 0.5 的现象在岩石力学试验中有可能出现, 这是把具有间断特征的岩石连续化处理引起的.

5. 用声速比 V_s/V_p 的值可以较方便地评价岩石质量, 这个参数与一些工程上常用的力学性质参量有较好的对应关系.

致谢 本文的试验工作是作者在中国科学院力学研究所工作期间, 应邀在瑞典 Luleå 大学所做的. 整理本文时又得到力学所领导和同事们的关心和帮助. 作者对力学所的领导及同事们, 对 Luleå 大学力学室 Alm 博士、Stephanson 教授及该室的同事们所给予的关心, 经济上的支持和技术上的帮助表示真诚的谢意.

参 考 文 献

- [1] Witherspoon, P. A. and Degerman, O., Rept. LBL7049, SAC-01(1978).
- [2] Atkinson, B. K., et al., Proc. 3rd. Int. Conf. on AE/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Ed. by H. R. Hardy & F. W. Leighton (1984).
- [3] Houpert, R., Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., Montreux, 3, 1(1979), 104—114.
- [4] Swan, G., Rept. LBL7074, SAC-03 (1983).
- [5] Alm, O., Jaktlund, L.—L. and Kou Shaoquan, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 40(1985), 161—179.
- [6] 寇绍全, Alm, O., 微裂隙和花岗岩的抗拉强度, 力学学报, 4(1987).
- [7] Simmons, G. and Richter, D., Physics and Chemistry of Rocks, Strens, R. G. J. (ed.) Wiley (1976), 105—137.

- [8] Montoto, M. et al., *Rockstore*, 3(1980), 1357—1368.
- [9] Brown, E. T. (editor), *Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press, Oxford (1981), 113—121.
- [10] Sun, Z., Doctoral Thesis, *Lulca University of Technology*, 22D(1983), 1—76.
- [11] Norin, J., Private Communication (1983).
- [12] Kern, H., *High Pressure Researches in Geoscience*, Schkeyer (ed.) (1982), 15—55.
- [13] Budiansky, E., O'Connell, R. J., *Int. J. Solid Structure*, 12(1976), 81—97.

EFFECT OF THERMAL CRACKING DAMAGE ON THE DEFORMATION AND FAILURE OF GRANITE

Kou Shaoquan

(*Institute of Mining Engineering, Beijing University of Iron and Steel Technology*)

Abstract This paper presents a study of the effect of preheated treatment in a temperature range 20°C to 600°C on the deformation and failure of Stripa granite. The experimental results show that the mechanical parameters have an extraordinary variation with an increasing heat treatment temperature. It is also pointed out that it is possible to evaluate rock quality by using sound velocity ratio.

Key words Thermal cracking, Damage, Deformation, Failure, Granite.

3