

花岗岩断裂韧度的高温效应^{*}

王靖涛 赵爱国 黄明昌

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

提 要

本文对作为核废料贮存母岩的花岗岩断裂韧度的高温效应进行了比较系统的研究。在室温至300℃范围内,获得了直接测定的花岗岩临界应力强度因子 K_{Ic} 随温度变化的规律性试验结果。发现了一个门槛温度。高于这个门槛温度,花岗岩断裂韧度迅速下降。结合电镜观察,对该现象的机理进行了分析。本文指出,门槛温度应作为选择核废料贮存母岩的重要指标之一。

一、前 言

处理高温环境下的岩石工程问题是对岩石力学一个新的挑战。在煤与油页岩的现场气化、三次采油、地热能开发、液体的地下储存和高放射性核废料地下处置等工程中,以及对地壳的演变过程的研究和模拟中,都需要考虑岩石在高温下的物理力学性质。

Heuze^[1]总结了1983年以前获得的、高温条件下花岗岩的力学和物理性质等方面的研究成果。据笔者所知,目前研究高温下岩石断裂力学性质的工作还较少,特别是至今尚未见到在高温下直接测定岩石断裂韧度的报导。

由于上述的许多岩石工程问题,特别是高放核废料地下贮存问题,都与岩石的渗透性密切相关。而岩石中原生裂纹的扩展和新裂纹的生成是岩石输运性变化的最主要根源,所以研究高温条件下岩石断裂力学性质是十分必要的。

由于高放核废料(high-level radioactive wastes)地下处置研究的需要,我们对作为高放核废料贮存母岩的花岗岩断裂韧度的高温效应进行了比较系统地研究。在室温至300℃范围内,共进行了七种不同均匀温度场中的三点弯曲断裂试验。获得了直接测定的花岗岩(取自湖北省随县)临界应力强度因子 K_{Ic} 随温度变化的规律性结果。发现在这一变化过程中,存在一个200℃的门槛温度。低于这个门槛温度时, K_{Ic} 随温度升高而增加;高于它时, K_{Ic} 迅速下降。

试验后,对试样断面进行了扫描电镜观察并拍照。分析了随温度的升高,断口断裂形貌的变化及相应的微观断裂特性的改变。结合电镜观察,对花岗岩断裂韧度随温度的变化,特别是对门槛温度出现的机理进行了分析。认为热裂化(thermal cracking)是引起花岗岩断裂韧度发生显著变化的最根本的原因。

到稿日期:1989年3月14日

• 该研究课题系国家基金项目。

应该指出, 门槛温度是花岗岩断裂韧度随温度变化中的一个转折点。它反映了花岗岩微观断裂性质的根本转变。该门槛温度是高温条件下, 花岗岩宏观断裂性质变化的重要标志, 应作为选择高放核废料贮存母岩的重要指标之一。

二、花岗岩物理力学性质和实验方法

三点弯曲试验所用的花岗岩采自湖北省随县, 是燕山中期产物, 断裂不发育, 不含水, 灰白色。矿物颗粒较大, 其成份以更长石和微斜条纹长石为主, 占80%—85%; 其次为石英, 10%—15%; 黑云母小于2%; 角闪石1%左右; 另有其他微量矿物。其中部分长石和部分石英含有微裂纹。室温下测得的花岗岩平均弹性模量为37.2GPa, 泊桑比为0.304, 容重为26.1 kN/m³, 平均孔隙率为1.88%, 单轴抗压强度和单轴抗拉强度分别为123.5MPa和3.0MPa。

由室温, 100, 200和300℃四种温度下的圆柱体试样的单轴压缩试验, 获得了花岗岩弹性模量和单轴抗压强度随温度升高的变化曲线^[2]。如图1(a)和(b)所示, 无论弹性模量或单

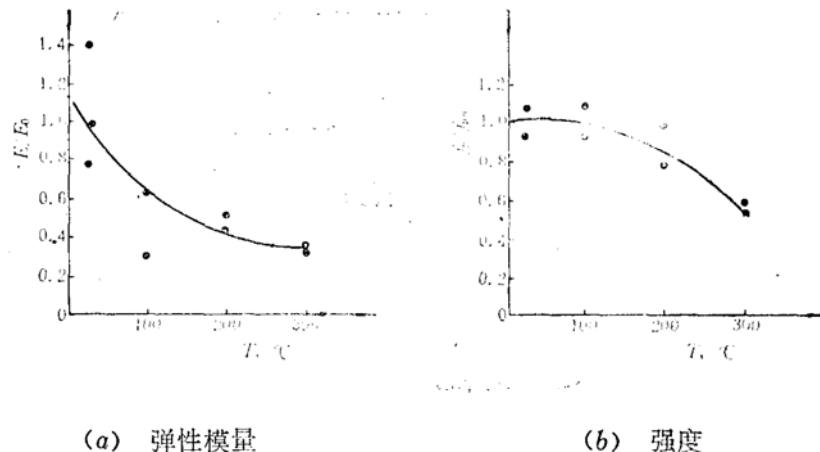


图1 花岗岩弹性模量和强度随温度的变化(文献[2])

轴抗压强度均随温度升高而单调下降。在200℃以下, 弹性模量下降较快, 随后趋于缓慢。而单轴抗压强度的变化恰恰相反, 大约在200℃以下, 变化不大, 其后迅速降低。详细情况见文献[2]。

该断裂试验的基本试验方法与室温下的常规三点弯曲试验是一样的(图2)。所不同的是试样加热、恒温以及加载和位移等测量都是在加热室中进行的。整个试验过程包括两个阶

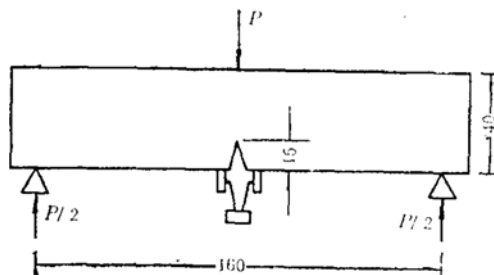


图2 三点弯曲试验简图(单位: mm)

段:第一阶段,试样加热和恒温过程。将试样缓慢地(依照一定的加热速率)加热到试验规定的温度,然后保持恒温一定时间;第二阶段,在均匀温度场中进行加载,用装在加热室中的LVDT位移传感器测量位移。全部试验都在Instron 1195试验机的加热室中进行,保证了试验温度的准确性和试样中温度的均匀性。

为了保证试样确实处在一均匀温度状态,确定既充分又合理的试样恒温时间是非常必要的。为此,按照试样的实际尺寸和物理性质,用有限元法对试样的加热和恒温的热传导过程进行了数值模拟分析,确定出了必要的恒温时间。为了更可靠起见,试验中又适当增加了一些恒温时间。计算所得的恒温时间和实际采用的恒温时间均列于表1。

表1 试样在加热室中预恒温的时间

加热速率(°C/min)	恒温时间(min)	
	有限元模拟	实际采用
2	81	90
5	94	120

在试验中采用了两种试样加热速率,比较快的,5°C/min,比较慢的,2°C/min。以便考察加热速率对花岗岩断裂韧度的影响程度。

为了确保在不同温度(室温至300°C)下测定花岗岩的断裂韧度时,试样应力状态始终保持接近平面应变条件,及考虑到岩石颗粒较粗,采用了比较厚的三点弯曲试样。其试样横截面尺寸为40×40mm²(厚度B=40mm,高度W=40mm),跨度s=4W。裂纹深度a与试样高度之比 $\frac{a}{W} \approx 0.375$ 。预裂纹是用金刚石锯片精心加工而成,裂纹尖端宽度小于0.4mm,顶端比较平直。

为尽量减少各试样之间的质量差异和各向异性对试验结果的影响,试验前对每个试样都进行了声波检验。测得的平均纵波速度为3611m/s,平均横波速度为2387m/s。测得的波速离散率大多仅百分之几,且没有发现试样有明显的各向异性。然而,考虑到岩石不是均匀介质,一般力学试验结果的离散度较大,故对每一试验温度都作了3—4个试样。Instron1195是带有伺服控制系统的刚性试验机。加热、温度控制、加载率控制、位移测量和记录绘图等都是自动进行的,保证了试验结果的精度。试验的加荷方式采用一次加荷至开裂,部分试样是反复加荷至破裂。荷载值下降至20—60N时停机。加载速率为0.05mm/min。

试验后,用扫描电镜观察了试样断口的微观形貌,然后拍摄了典型照片。首先用金刚石切片机将试样断口割成两部分:伸张区和快速断裂区。伸张区约占整个断口长度的1/3。然后在断口上喷金,以获得丰富的二次电子发射,并消除可能存在的表面污染所造成的假象。选择适当的放大倍数,观察二次电子像,并拍摄照片。

三、试验结果及分析

在七种不同的均匀温度场(室温,60,100,150,200,250和300°C)中,图3中显示了不同温度下测得的花岗岩临界应力强度因子 K_{Ic} 值。图3中纵坐标表示 K_{Ic} 相对于室温时的 K_{Ic} ,即 K_{Ic0} 的比值。这里, K_{Ic0} 值为21.38N·(mm)^{-3/2}。一个典型的三点弯曲试样的荷载-挠度曲线示于图4中。其挠度指图2中荷载P作用点处的垂直位移。

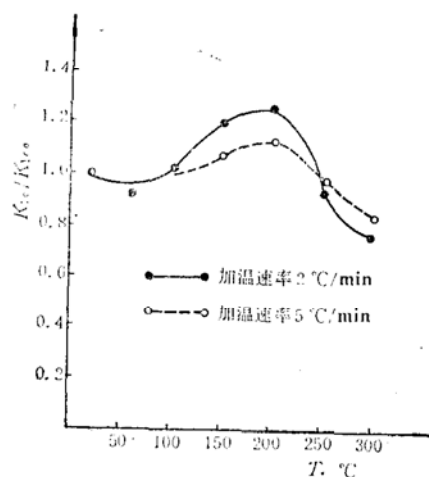


图3 花岗岩断裂韧度随温度的变化

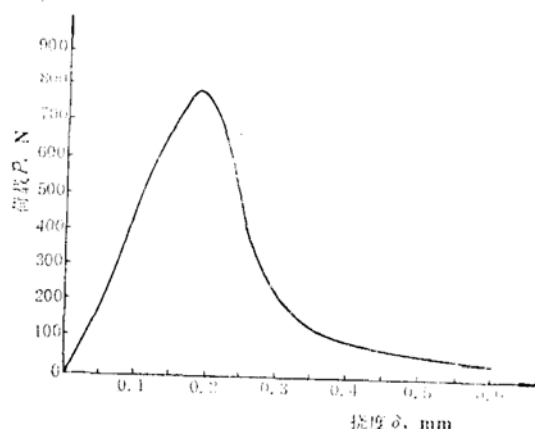


图4 三点弯曲试验的荷载-挠度曲线

从图3看出,花岗岩临界应力强度因子 K_{Ic} 随温度的变化过程,以200°C为界,明显地分为两个主要阶段:从室温至200°C范围内, K_{Ic} 随温度升高而增大,在200°C时达到最大值;在200—300°C范围内,随温度升高, K_{Ic} 值迅速单调下降。加上节所述,试样厚度取的比较大,基本上保障了在不同温度下的试验过程中,试样始终处在平面应变条件下。因此,图3中给出的 K_{Ic} 随温度升高而增加的变化中,排除了由于约束的减轻而引起的平面应力特性的转变。

在200°C以下,花岗岩断裂韧度随温度升高逐渐增大的温度转变(平面应变温度转变)现象与在低温下金属材料中发生的情况类似^[3]。该试验结果表明,花岗岩也确实存在一个随温度增加的平面应变转变。这个转变是由花岗岩本身微观断裂性质的变化所引起的,而与约束损失等因素无关。

高于200°C时,与金属情况就完全不同了, K_{Ic} 值不是继续单调上升而是迅速降低。由此看出,在花岗岩断裂韧度随温度升高的变化过程中,存在一门槛温度 $T_c = 200^\circ\text{C}$ 。这意味着,在200°C上下,花岗岩的断裂韧性发生了根本性变化。

这里还应当指出,如图3所示,在室温至60°C范围内, K_{Ic} 有下降趋势,但下降的绝对值很小。这一现象是否具有普遍性,还有待更多的试验验证。

为了深入了解随温度升高,花岗岩宏观断裂韧度变化与微观断裂特性改变之间的关系,用扫描电子显微镜观察了所有不同试验温度的试样断口的微观形貌,并拍摄了相应的断裂面照片(图5)。这些照片都取自断口伸张区。

在金属材料中,金相电镜分析表明,断裂韧性转变温度是与裂纹顶端显微断裂形貌开始变化有关。在转变温度范围的下端,断裂起始形貌是解理断裂,而在上端断裂起始形貌是延性撕裂断面^[3],花岗岩断口的宏观分析表明,断口较为粗糙,四周无明显的剪切唇,为脆性的结晶状断口。无论在高温(300°C)或室温(15°C)下都表现为脆性断裂特征。从图5中花岗岩试样断口的显微照片可以看出,在15°C和60°C时,微观特征主要表现为解理断裂,微观断口相对来讲显得较平整而光滑,未发现明显的二次裂纹。在250°C和300°C时,表现出严重的破碎形貌,还可见到断口上有长而深的二次裂纹。显示了颗粒间(晶间)断裂为主的特征。二次裂纹的出现也表明,在主裂纹形成的过程中,断裂可能是沿着几个方向同时发展的。

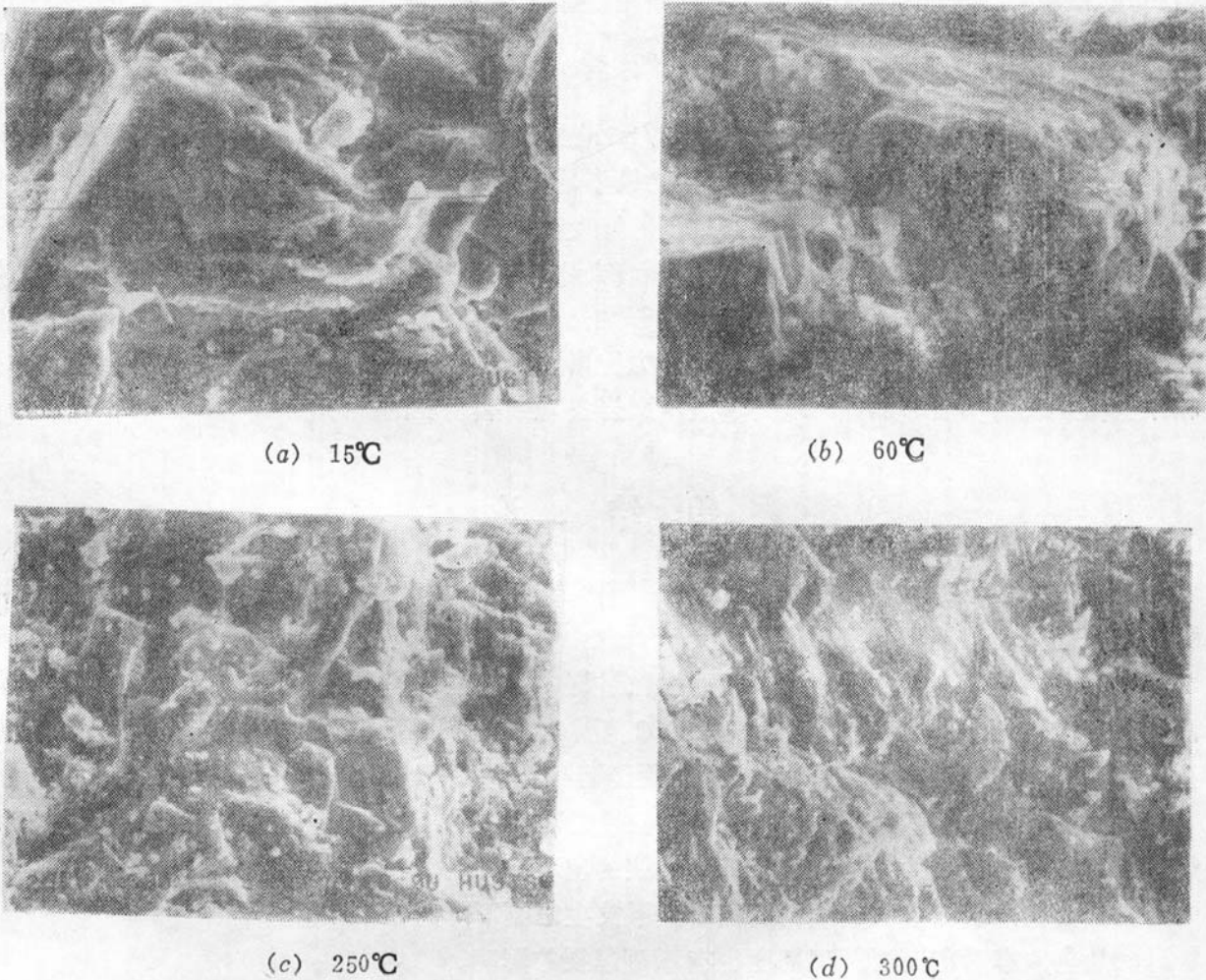


图5 花岗岩试件断口的电镜照片

花岗岩与金属材料不同,是非均匀的混合结晶体。它既包含多种矿物成份,又存在微小原生裂纹。当温度升高时,由于各种矿物颗粒的不同热膨胀率以及各向异性颗粒的不同结晶方位的不同的热弹性性质,引起跨颗粒边界的热膨胀不协调,从而造成颗粒间或颗粒内部的拉或压应力。当温度不太高时,例如200°C以下,这些粒间或粒内应力还不够大,仅仅引起可恢复的弹性变形,而不能造成微小断裂,即不产生微小裂纹。这时,这种内应力还可以使花岗岩中原生微裂发生闭合。同时颗粒粘结强度也可能增大,所以在室温至200°C范围内,花岗岩的宏观断裂韧度表现为随温度升高而增大的趋势。当温度继续增加,例如高于200°C,粒间或粒内应力进一步增大,大到足以产生微小裂纹或致使原生微小裂纹扩展和加宽。这一现象就是所谓的热裂化。这就是在门槛温度以上,花岗岩断裂韧度迅速减小的根本原因。如上所述,在250°C和300°C时,断口的微观断裂形貌显示了颗粒间(晶间)断裂为主的特征及长而深的二次裂纹出现。这是与热裂化造成的后果相关联的。

值得注意的是,花岗岩宏观断裂韧度随温度变化与热断裂的声发射监测结果显示出了相关性。Johnson等人^[4]用高灵敏度的声发射仪监测石英岩和花岗岩的热裂化现象。声发射资料揭示,热裂化仅仅发生在一门槛温度之后,测得的石英岩和花岗岩的热裂化门槛温度分别

为200°C和75°C。这一试验结果表明,前面用热裂化现象解释花岗岩断裂韧度随温度变化过程中出现的温度门槛值是合理的。当然,这两个(热裂化的和断裂韧度的)门槛温度之间的相关性如何,还有待进一步的试验研究。

在图3中,实线代表加温速率为2°C/min的断裂韧度测定结果,而虚线表示加热速率为5°C/min的情况。两条曲线的基本变化趋势是一致的。峰值均发生在200°C处。两条曲线的差别反映了加热速率对花岗岩断裂韧度随温度变化的影响还是较大的,有不可忽视的作用。在门槛温度200°C处附近影响最大。两者大约相差13%。在大约250°C以下,加热速率为5°C/min时测定的 K_{IC} 值均小于前者。由于加热速率的增加,引起温度梯度增高,从而产生较大的非均匀热应力场。这种非均匀热应力值增加到一定程度时,也将会引起微裂纹的生成和原生微裂纹的扩展与加宽,最终导致花岗岩宏观断裂韧度的减小。

四、结 论

根据在高温下(室温至300°C)花岗岩断裂韧度的直接测定结果,试样断口的电镜观察和试验结果的分析,可以得到以下几点结论:

- 1.在花岗岩断裂韧度随温度升高的变化过程中,存在一门槛温度 T_c 。就湖北随县花岗岩而言,门槛温度 $T_c=200^\circ\text{C}$ 。在100—200°C范围内,花岗岩断裂韧度随温度升高而增大,发生了平面应变温度转变。高于200°C时,断裂韧度迅速单调减小。
- 2.在门槛温度上下,花岗岩宏观断裂韧性的质的变化,也表现在微观断裂形貌由主要为解理断裂向晶间断裂为主的转变和二次裂纹的出现。但两者均属脆性断裂。
- 3.热裂化是岩石宏观断裂韧度在高温下发生急剧下降的根本原因。
- 4.加热速率对花岗岩断裂韧度也有不可忽视的影响。
- 5.花岗岩断裂韧度随温度变化的门槛温度 T_c ,是花岗岩断裂韧性发生根本性变化的标志。因此,它应作为选择核废料贮存母岩的重要指标之一。

三点弯曲试验是在中科院北京力学所材料实验室中完成的。作者感谢该实验室的同志们,特别是谢长春,卢锡年和绳刚等同志的热情协作。李炼同志做了电镜观察,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Heuze, F. E., High-temperature Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks, A Review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 1, 1983, pp. 3—10.
- [2] 张静华,王靖涛,赵爱国,高温下花岗岩断裂特性的研究,岩土力学, Vol.8, No. 4, 1987年, pp. 11—16.
- [3] Rolfe, S. T., Barsom, J. M., Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, Prentice Hall, Inc., 1977.
- [4] Johnson, B., Gangi, A. F., Handin, J., Thermal Cracking of Rocks Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes, Proc. 19th U. S. Symp. Rock Mechanics, Univ. Nevada, Reno, 1978, pp. 259—267.

Effect of High Temperature on the Fracture Toughness of Granite

Wang Jingtao

Zhao Aiguo, Huang Mingchang

(The Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The effect of high temperature on the fracture toughness of the granite (Sui county, Hubei province) which is selected as the candidate of the parentrock for storing nuclear wastes was systematically studied. In the range of room temperature to 300°C, the test result of the variation of the critical stress intensity factors, K_{IC} , of the granite with increasing temperature has been obtained. A threshold temperature, 200°C, was found, above which the fracture toughness of the granite decreases quickly. The fracture surfaces created after tests were reviewed by using an electronmicroscope. The mechanism of the variation of K_{IC} for the granite with increasing temperature has been explained. It is suggested that the threshold temperature be used as one of the important criteria for selecting the granite as a parentrock for storing the nuclear wastes.