

岩石断裂韧度的温度效应^①

张宗贤 喻 勇 赵 清
(北京科技大学, 北京 100083)

摘 要

对经过 100~600 ℃快速热处理的辉长岩和大理岩进行了巴西试验、静态断裂试验和两种温度处理后的冲击断裂试验, 结果表明: 两种岩石的静态拉伸强度和静态断裂韧度均随热处理温度增加而明显下降; 经高温处理后两种岩石的动态断裂韧度随加载率增加而增大, 这与未经热处理的情形相似。并借助扫描电镜对岩石的热开裂等现象进行了分析讨论。

关键词: 热处理温度 岩石断裂韧度 加载率 辉长岩 大理岩

国际岩石力学界近年来已把温度作为影响岩石力学性质的一个重要因素加以考虑^[1]。温度对岩石力学性质的影响因岩石类型、加温方式和加温速度的不同而产生不同的结果。但大量实验结果表明: 各种岩石(如花岗岩、砂岩、安山岩、石灰岩等^[2]经加热、恒温、快速冷却后, 它们的抗拉强度和抗压强度均随热处理温度增加而降低, 说明温度对快速冷却后的岩石强度有相似的影响效果, 即快速冷却弱化了岩石强度。

为进一步探讨快速热处理对岩石力学性质的影响, 研究热处理温度与岩石断裂韧度间的关系极为必要。Atkinson^[3]、寇绍全^[4]等对热处理温度与花岗岩静态断裂韧度的关系进行过实验研究。本文选用辉长岩和大理岩作为研究对象, 从实验角度探讨了热处理温度与两种岩石静态断裂韧度的关系, 并对热处理后岩石断裂韧度与加载率的关系进行了研究。

1 实验方法

1.1 岩石类型

试验用的岩石为辉长岩和大理岩, 均产自

北京房山。两种岩石分别属于岩浆岩和变质岩, 其矿物成分及粒度见表 1。

表 1 辉长岩和大理岩的矿物成分及最大粒度

岩石类型	矿物成分	wt. %	最大粒度/mm
辉长岩	斜长石	48—52	1.9
	辉石	35—38	1.4
	橄榄石	5—7	0.6
	角闪石	5	1.1
	黑云母	3	0.4
	磁铁矿	1	0.4
大理岩	方解石	93—97	1.4
	镁橄榄石	3	0.4
	磁铁矿	1	0.4

辉长岩为等粒结构、致密块状构造, 呈灰白至灰黑色。矿物晶形良好, 斜长石呈自形晶体。辉石与橄榄石的解理发育良好。

大理岩为白色, 其矿物成分有方解石和少量镁橄榄石和磁铁矿。前两者矿物的解理较发育。磁铁矿是一种变质产物, 有等粒结构和致密块状构造。

1.2 试件准备及热处理

从大块岩石上钻取直径为 30 mm 长为 120 mm 左右的岩芯, 选出均质的岩芯进行热处理,

① 国家科委国际合作项目 A17 收稿日期: 1993 年 3 月 20 日; 修回日期: 1993 年 5 月 14 日

然后将其加工成标准的短棒试件和巴西抗拉强度试件。

热处理方法：把岩芯分为5组(大理岩)或6组(辉长岩)，每一组为一个温度，间隔100℃；将炉温升到预定温度，迅速放入该温度组的试件，恒温2h后打开炉门，迅速取出试件并置于室温下冷却。

1.3 试验方法

所有试验都在室温下进行。

(1) 巴西试验

巴西抗拉强度试验在MTS810电液伺服试验机上进行。所有试验在0.01 mm/s的位移速率下进行。

(2) 静态断裂韧性试验

按国际岩石力学学会关于岩石断裂韧性试验建议的短棒试验方法的水平I进行^[6]。试件长约44 mm，切缝宽小于或等于0.5 mm，所有试件几何尺寸控制在建议方法的允许误差内。试验在MTS810上进行，试验机拉伸或压缩位移速率控制在0.001~0.01 mm/s内。各种温度处理后岩石静态断裂韧性试验按直接拉伸法进行；涉及不同加载率下断裂韧度的测定时进行压缩试验，具体方法在下面(3)中介绍。

(3) 动态断裂韧性试验

本试验在霍普金森试验装置上进行。与直接拉伸试验不同，动态试验是用压头对试件施加载荷，压头承受压缩载荷见图1。在短棒试件切缝一端粘两个半圆形钢片，两片之间形成一个“V”形槽，加载时压头头部伸进槽内并使它们保持线接触。这样通过对压头施加压缩载荷而使裂纹两边仍受拉伸载荷，从而可在霍普金森装置上测定动态断裂韧性。详细试验方法可参考[5]。

2 实验结果

除动态断裂韧性每个数据点代表一次试验结果外，其余试验的每个数据点均代表3~6次试验结果的平均值。

2.1 巴西试验

巴西试验的抗拉强度计算公式为

$$\sigma_t = 2P/\pi Dt \quad (1)$$

这里 P 为最大破坏载荷； D 为试件直径； t 为试件厚度，一般为 D 的半值。试验结果见图2。两种岩石的抗拉强度 σ_t 与热处理温度 T 之间存在着指数函数关系：

$$\sigma_t = ae^{-bT} \quad (2)$$

式中 a, b 均为正常数。由图2可知，辉长岩的拉伸强度随温度增加而下降的速度大于大理岩，表明辉长岩抗拉强度对热处理温度的反应比大理岩更为敏感。

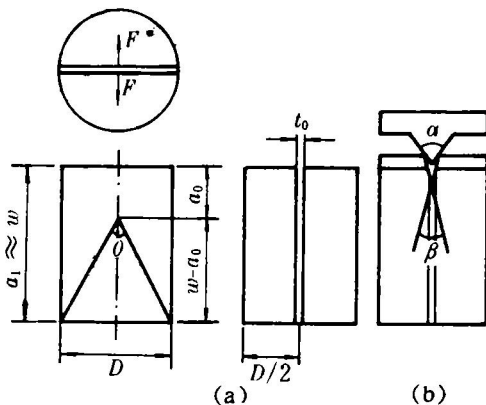


图1 短棒试件及其受载方式

(a)—ISRM 建议的短棒试件及其受载方式；

(b)—动态断裂所采用的短棒试件及其受载方式。

D —试件直径； a_0 —V形切口尖端位置； θ —V形切口顶角；

w —试件长度； a_1 — a_0 —V形切口长度； t_0 —切缝宽度；

F —作用在试件裂缝两边的拉伸载荷；

α —压头顶角； β —两个半圆形钢片间的夹角

2.2 静态断裂韧性

短棒试件的断裂韧性 K_{SR} 计算公式^[6]为

$$K_{SR} = 24C_k F_{max}/D^{1.5} \quad (3)$$

式中 F_{max} 为破坏时拉伸载荷； D 为试件直径； C_k 为修正因子，由下式确定：

$$C_k = 1 - 0.6\Delta w/D + 1.4\Delta a_0/D - 0.01\Delta\theta \quad (4)$$

式中 Δw 、 Δa_0 和 $\Delta\theta$ 表示实测与名义尺寸之差，如 $\Delta w/D = w/D - 1.45$ 等等。试验结果见图3：两种岩石的断裂韧性随热处理温度增加而下降，其变化规律与抗拉强度随温度的变化规律极为相似(这与寇绍全^[4]关于花岗岩的

试验结果一致), 其函数关系为

$$K_{SR} = a_1 e^{-b_1 T} \quad (5)$$

这里 a_1 、 b_1 为正常数。分析表明, 辉长岩的断裂韧度 K_{SR} 随温度增加而下降的速度大于大理岩, 这也与抗拉强度的变化关系一致。

2.3 动态断裂韧度

用于动态断裂试验的辉长岩和大理岩首先经过 600 °C 和 200 °C 快速热处理。试验结果见图 4。两种处理过的岩石的动态断裂韧度均随

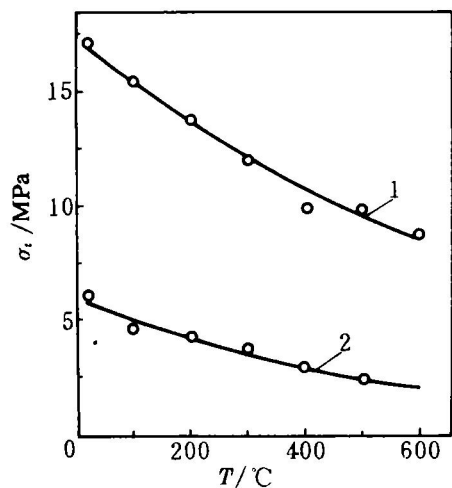


图2 热处理温度与抗拉强度的关系

1—辉长岩, $y_1 = \exp(-0.00117698T) \times 17.3444$;

2—大理岩, $y_2 = \exp(-0.00175592T) \times 6.06587$

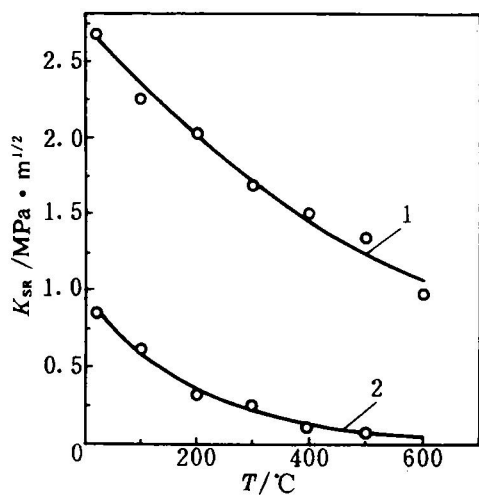


图3 热处理温度与静态断裂韧度的关系

1—辉长岩, $y_1 = \exp(-0.00157897T) \times 2.75078$;

2—大理岩, $y_2 = \exp(-0.00484243T) \times 0.955794$

加载率增加而呈指数函数增加, 具体表达式为

$$K_{SR} = a_2 e^{b_2 \dot{K}} \quad (6)$$

这里 a_2 、 b_2 为正常数, $\dot{K}$ 为加载率。这种变化规律类似于未经处理的岩石^[5], 就是说热处理实际上并未改变断裂韧度与加载率的基本关系。但是由图 3, 4 可看出: 尽管辉长岩和大理岩在同一高加载率下的断裂韧度没有明显差别, 即两者基本相等, 然而在静态加载时两种岩石的断裂韧度(辉长岩经 600 °C 热处理, 大理岩经 200 °C 热处理)有很大差别。如图 3 中辉长岩经 600 °C 处理后 $K_{SR} = 0.99 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 而大理岩经 200 °C 处理后 $K_{SR} = 0.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。这个结果表明, 不仅热处理温度而且加载率也明显影响岩石断裂韧度, 因此, 处理工程问题时必须同时考虑温度和加载率两个因素。

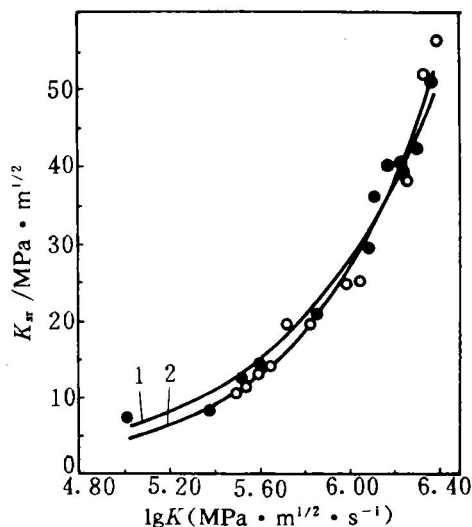


图4 断裂韧度与加载率的关系

1—辉长岩, $y_1 = \exp(1.7924x) \times 5.80 \times 10^{-5}$

2—大理岩, $y_2 = \exp(1.54736x) \times 2.62 \times 10^{-3}$

2.4 断口扫描分析

Alm^[7]和 Homand-etienne 等^[1]曾借助于光学显微镜、扫描电镜观察过经不同温度热处理后花岗岩薄片上的热开裂情况, 结果表明平均热开裂密度随热处理温度上升而增加。后者^[1]还对热开裂情况做了定量统计, 结果表明: 在 500 °C 以下热处理后, Senones 花岗岩和 Remirement 花岗岩中沿晶裂纹多于穿晶裂纹; 超过

500 ℃ 后，两种花岗岩中穿晶裂纹数明显增多，尤其 Senones 花岗岩中穿晶裂纹已多于沿晶裂纹。本文利用扫描电镜分析了辉长岩试件断裂后的自然断口，其中典型照片见图 5。在扫描

观察中我们发现：经过 100 ℃ 处理后的试件断口上几乎看不到任何热开裂产生的裂纹，但在 300 ℃ 和 500 ℃ 处理后的试件断口上发现了许多沿晶和穿晶裂纹，300 ℃ 的断口上沿晶裂纹

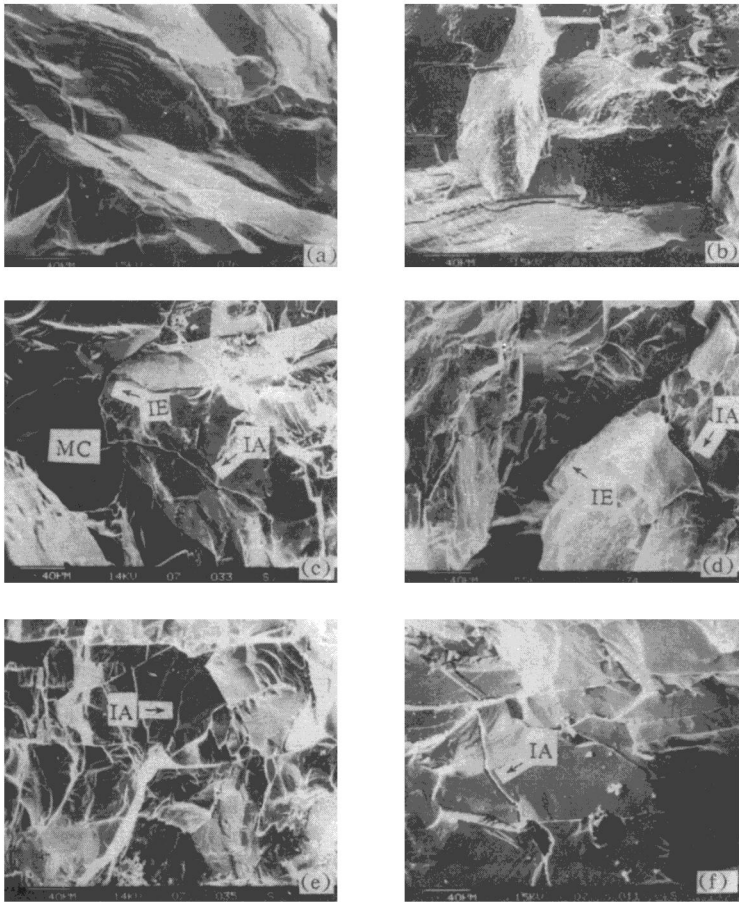


图 5 断口扫描电镜照片
(a)~(b)—100 ℃，(c)~(e)—300 ℃，(f)—500 ℃，IA—穿晶裂纹，IE—沿晶裂纹，MC—微孔洞

占主要位置,而500℃断口上两者都很多。由于实验条件所限本文没有做定量统计。此外,在300℃断口(图5(c))上可以看见一个空洞,一条穿晶裂纹和几条沿晶裂纹由此产生和扩展。类似地,在图5(d)中有一条穿晶裂纹发源于一条大的沿晶裂纹。

根据作者及其他学者关于扫描电镜的观察结果可得出如下结论:当热处理温度不超过一定限度时,沿晶断裂是最主要的热开裂形式,随热处理温度的继续升高,穿晶断裂会明显增多,并有可能多于沿晶开裂。此外,微孔洞和较大的沿晶裂纹可能会成为热开裂的新的损伤源。

3 讨论

岩石是一种复杂的天然材料,由多种矿物成分所组成,这些成分基本上由不同尺寸的晶体颗粒构成。在力学、磁学、热学性质等方面,各种矿物一般都表现为各向异性。另一方面,岩石材料的抗拉、抗剪和抗压强度之间亦存在很大差别。因此,对岩石块体的加热往往会在其内部产生一个三维拉应力状态^[8],这一点是任何机械加载方式所无法实现的。加热产生的拉应力极易在岩石内部形成沿晶和穿晶断裂,因此,热破碎与热粉碎充分地利用了岩石的天然属性,如:岩石内存在大量天然微裂纹、微孔洞及其它缺陷,岩石矿物各种性质的各向异性及岩石强度之间的较大差别等。Thirumalai^[8]等人曾进行过岩石热冲击破碎的实验研究,但这种单一的热破碎方法至今并没有应用于工程实际,原因是多方面的,主要可能是最终的综合经济效益不明显。作者认为,先对矿岩进行适当温度的热冲击处理,可以保证矿岩内部产生大量新裂纹或缺陷等损伤现象,同时

可使矿岩强度显著下降,在此基础上再对矿岩进行机械破碎。这种热冲击处理与机械破碎相结合的破碎方法既有利于选矿回收率的提高,又有可能提高破碎效率与综合经济效益,比单一的热冲击或单一的机械破碎方法有更好的发展前途。但要证实这一点尚需进行更深入的理论和实验研究。

4 结论

(1) 辉长岩与大理岩的静态断裂韧度随热处理温度升高而降低,这与其抗拉强度随温度变化的规律一致。

(2) 经过热处理后,岩石断裂韧度随加载率的变化规律与未经热处理岩石的结果无明显差别。

(3) 为了有效地使岩石断裂破坏,先对其进行热冲击处理,然后在低加载率下进行破坏,这可能是一条更经济、有效的途径。

参考文献

- 1 Homand-etienne F, Houpert R. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1989, 26(2): 125—134.
- 2 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用. 重庆:重庆大学出版社, 1991. 128—174.
- 3 Atkinson B K *et al.* In: Hardy H R, Leighton F W (eds), *Proc 3rd Int Conf on AE/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, 1984.
- 4 寇绍全. 力学学报, 1987, 19(6): 550—556.
- 5 张宗贤, 赵清等. 北京科技大学学报, 1992, 14(2): 123.
- 6 ISRM. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1988, 25(2): 73—96.
- 7 Alm O, Jakeland L L, Kou Shaoquan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1985, 40: 161—179.
- 8 Thirumalai K, Cheung J B. In: *ASCE Proc of the 14th Symp on Rock Mech*, 1973, 527—554.