文章编号: 1000-4750(2008)05-0124-07

不同温度影响下砂岩的断裂特性研究

*左建平^{1,2},周宏伟^{1,2},谢和平^{1,3}

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院岩石力学与分形研究所,北京 100083;2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 3. 四川大学,成都 610065)

摘 要:针对深部开采和核废料处置等重大工程的需求,对温度-应力共同作用下岩石的力学行为研究具有十分重要的意义。该文通过试验研究了不同温度影响下小尺寸双边缺口砂岩试件的断裂特性,发现温度与断裂韧性存在 非线性指数关系,具体表现为温度从 25℃升到 150℃时,断裂韧性随温度指数升高;而温度由 150℃升高到 300℃, 断裂韧性随温度指数下降,150℃是断裂韧性变化的临界温度。研究认为小尺寸、粘土矿物及热开裂是造成断裂 韧性变化的主要原因,并解释了与多数宏观试验结果不同的可能原因。 关键词:砂岩;温度;断裂韧性;试验研究;指数关系

中图分类号: O346.1⁺2 文献标识码: A

FRACTURE CHARACTERISTICS OF SANDSTONE UNDER THERMAL EFFECTS

^{*}ZUO Jian-ping^{1,2}, ZHOU Hong-wei^{1,2}, XIE He-ping^{1,3}

Institute of Rock Mechanics and Fractals, School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
 State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is important to study the mechanical characteristics of rocks to meet the increasing demands of deep mining and nuclear waste disposal. This paper mainly studies the temperature effects on fracture toughness of sandstone sample with double notches through meso-experiments. The experiments indicate that the fracture toughness increases exponentially with the temperature increment from 25° C to 150° C while decreases exponentially with the temperature from 150° C to 300° C, and therefore 150° C is the critical temperature. This result differs from most macroscopic experimental results. The possible reasons, such as meso-scale, clay mineral and thermal cracking, are analyzed in detail.

Key words: sandstone; temperature; fracture toughness; experimental research; exponential relationship

自 20 世纪 70 年代以来,岩石断裂力学的研究 得到了长足的发展^[1-2]。随着煤炭资源开采逐渐向 深部发展和核废料深埋地质处置的实施,研究不同 温度下岩石的断裂特性及强度特性就显得十分重 要。在热力(TM)耦合下岩石的行为异常复杂^[3-8], 如断裂特性、强度特性与室温相比都有很大不同。 文献[8]的细观试验研究表明,平顶山砂岩的强度随 着温度在一定范围内先升高后降低。文献[9-11]

收稿日期: 2006-10-17; 修改日期: 2007-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(50674092, 50221402, 50579042, 50490272); 973 项目(2002CB412705, 2002CB412707); 教育部高等学校博士点 学科点专项科研基金(新教师基金课题)(20070290020)

作者简介: *左建平(1978-), 男, 江西省高安人, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学、损伤、断裂及数值计算等工作(E-mail: zjp@cumtb.edu.cn); 周宏伟(1965-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩石力学、渗流力学及分形岩石力学研究等工作 (E-mail: zhw@cumtb.edu.cn); 谢和平(1956-), 男, 湖南省双峰人, 教授, 博士, 博导, 中国工程院院士, 主要从事分形岩石力学和岩石损伤力学研究等工作 (E-mail: xiehp@scu.edu.cn).

的研究表明多数宏观尺度岩石的强度随温度的升 高而有所下降,而下降的趋势又与岩石的种类相 关。其他因素,如湿度、试件厚度、尺寸和围压等 也对脆性材料的变形破坏与断裂特性有影响[12-16]。 近几年来有关温度对岩石的断裂韧性的影响也有 研究[17-18]。文献[17]通过巴西圆盘试验研究了高温 高围压情况的石灰岩的断裂韧性,发现其试验最高 温度在 116℃下纯 I 型裂纹断裂韧性比室温情况下 的断裂韧性高出 0.25 倍,并且石灰岩在高温和高围 压情况下展现出延性行为。文献[18]通过单边缺口 圆棒弯曲试验(SENRBB)和半圆棒弯曲(SCB)试验 研究了室温到 200℃的 Kimachi 砂岩的断裂韧性, 试验表明 Kimachi 砂岩的断裂韧性从室温到 125℃ 变化不大,但高于125℃温度后,断裂韧性随着温 度而升高,而 200℃时 I 型断裂韧性较之室温的断 裂韧性高出 40%。在温度和围压的综合影响下断裂 韧性也发生了相似的变化,如围压 7MPa 时,砂岩 的断裂韧性随着温度升到 75℃时有所减少, 而在 75℃到100℃之间又有所提高。

以上很多研究是通过三点弯曲试验或者巴西 圆盘试验来讨论宏观尺寸下岩石的断裂韧性,而对 双边缺口的岩石断裂特性研究较少。另外最近的研 究如文献[17-18]的研究仅局限于温度低于 200℃ 的研究,得到的断裂韧性在该温度范围多呈单调增 加的趋势,而更高温度下岩石的断裂韧性又会如 何?为了加深对不同温度下岩石断裂特性的认识, 本文通过试验研究了室温到 300℃的情况下细观尺 度砂岩双边缺口拉伸试件的断裂特性,并获得了一 些新的认识。

1 试验介绍

砂岩试样取自平顶山煤业集团公司十矿,工作 面标高-850m,地面标高+300m,岩样为细粉砂岩。 经 XRD 分析,该岩样主要包含石英、钾长石、方 解石、白云石、菱铁矿和粘土矿物等成分,其中石 英约占 55%,粘土矿物约占 20%,其他成分约 占 25%。颗粒粒径多在 0.01mm-0.3mm 之间。试 样由岩块切磨而成,规格为厚 *B*=1.4mm、宽 *W*= 2.5mm、中间有效长 *L*=20mm,如图 1。双边缺口 开在试件中间,用厚约为 0.1mm 的薄锯片锯其尖 端,使裂纹长度控制在 0.2mm 左右。加工试件 33 块,预制裂纹长度在 0.118mm-0.314mm 之间,多 在 0.2mm 左右,全部试件预制裂纹长度的分布情况 如图 2。

本文试验是在中国矿业大学煤炭资源与安全 开采国家重点实验室岛津 SEM 高温疲劳试验系统 完成,该装置将全数字电液伺服加载系统和高精度 升温系统结合起来,能实时在线研究温度和载荷作 用下材料的变形破坏及表面微结构的变化。试验采 取了先升温到预期温度,然后恒温加载,直至试件 拉伸断裂。试验温度分别为:室温(25℃)、30℃、 35℃、40℃、45℃、50℃、100℃、150℃、200℃、 250℃和 300℃,升温速率为 5℃/min。由于岩石通 常表现出脆性,因此加载过程采用位移加载模式, 加载速率为试验设备所能控制的最小加载速率 10⁻⁴mm/s。试验系统可自动记录加载过程的载荷及 座动器位移数据并实时绘制载荷-位移曲线,数据采 样间隔为每 4s 记录一次数据。每个温度点做了三个 成功的试验。



2 试验结果

2.1 不同温度影响下裂纹的扩展模式

通过扫描电镜(SEM)观察发现,在温度低于 100℃的试验中试件表面的脆性裂纹或者主裂纹附 近的支裂纹被大量观察到,如图 3;而在温度大于 150℃的试验过程中,主裂纹附近很少出现支裂纹。 从全部 33 个试件的试验情况看,共有 17 个试件在 预制缺口处断裂;其中在 150℃、200℃、250℃和 300℃的 12 个试件的试验中 11 个从预制断口处断 裂,而在低于 100℃的 21 个试件的试验中只有 6 个 从预制缺口处断裂,断口位置具有很大的随机性。 这说明随着温度的升高,砂岩破坏机制有由脆性断 裂向延性断裂转变的趋势。在低温(小于 100℃)的试 验中,由于温度较低,脆性机制占主导地位,因而 导致裂纹在扩展时具有很大的离散性;而在较高温 度(150℃-300℃)的试验中,砂岩试件的局部区域 受到温度的强烈影响,断裂主要发生在受热部位附 近的中间区域,说明此时砂岩内部的局部区域塑性 变形能力有所提高,并且矿物颗粒之间协调变形的



能力得到增强,此时延性断裂机制在起一定作用。

2.2 不同温度影响下典型的载荷-位移曲线

图 4 是不同温度下砂岩的载荷-位移曲线。从 图 4(a)-图 4(c)看出,温度低于 100℃时,载荷-位移 曲线离散性很大,切线弹性模量也有很大不同。而 当温度达到 150℃或者更高温度时,从图 4(d)-图 4(f)看出载荷-位移曲线具有一定的规律性。所有试 件破坏之前,载荷和位移之间几乎表现为线性关 系。







图 3 低温试验砂岩表面的脆性裂纹



Fig.4 Load-displacement curves of sandstone under different temperature

3 温度影响下砂岩的断裂韧性研究

从试验过程中 SEM 的观察表明,试件在破坏

前预制缺口附近几乎看不出明显的塑性变形,而从 载荷-位移曲线来看,砂岩试件在破坏之前的线性关 系也表明此时的砂岩依然可近似为弹性材料,因此

可用线弹性断裂力学来研究砂岩的断裂行为。由于 双边缺口试件受到轴向拉伸载荷的作用,可把预制 缺口当 I 型裂纹来处理。最大预制裂纹长 0.314mm, 且最大2a/W=0.23<0.7,由应力强度因子手册^[19] 得到双边切口拉伸试件的断裂韧性的计算公式: $K_{Ic} =$

$$\frac{Pa^{1/2}}{BW} \left[1.98 + 0.36 \left(\frac{2a}{W} \right) - 2.12 \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 3.42 \left(\frac{2a}{W} \right)^3 \right]$$

(适用于 2a/W ≤ 0.7) (1)

(适用于2a/W≤0.7)

式中: a 是砂岩试件预制裂纹长度: B 为试件厚度; W为试件宽度; P为断裂载荷。计算结果如表 1。

表1 实验数据汇总表

Table I Experimental data	Table 1	Experimental	data
---------------------------	---------	--------------	------

试件	裂纹长度	试件宽度	试件厚度	断裂载荷	断裂韧性/
	a/mm	W/mm	<i>B</i> /mm	P/N	(MPa·mm ^{1/2})
25℃-1	0.1805	2.461	1.35	13.3	3.39811
25℃-2	0.214	2.718	1.4	15.2	3.69109
25℃-3	0.17	2.7	1.45	13.3	2.79936
30℃-1	0.2945	2.739	1.4	18.3	5.16257
30℃-2	0.203	2.536	1.36	12.8	3.3398
30℃-3	0.1455	2.381	1.38	19.2	4.45466
35℃-1	0.164	2.448	1.45	12.8	2.91834
35℃-2	0.208	2.516	1.46	20.1	4.98365
35℃-3	0.22	2.61	1.42	12	3.03252
40℃-1	0.214	2.458	1.45	16.2	4.19791
40℃-2	0.214	2.508	1.4	11.5	3.02524
40℃-3	0.118	2.456	1.37	16	3.26377
45℃-1	0.2365	2.563	1.39	13.2	3.59607
45℃-2	0.1645	2.719	1.43	16.6	3.46073
45℃-3	0.136	2.522	1.39	25.6	5.38201
50℃-1	0.206	2.999	1.45	18.8	3.92112
50℃-2	0.1495	2.699	1.37	14.2	2.96751
50℃-3	0.1805	2.641	1.45	9	1.99532
100°C-1	0.314	2.728	1.389	19.6	5.77454
100°C-2	0.2085	2.811	1.4	12.5	2.89769
100°C-3	0.165	2.74	1.4	22.8	4.82525
150°C-1	0.2085	2.387	1.4	47.6	12.98472
150°C-2	0.244	2.688	1.4	47.6	12.47078
150°C-3	0.2805	2.651	1.4	27.6	7.85213
200°C-1	0.208	2.506	1.36	21.5	5.74546
200°C-2	0.2165	2.553	1.43	36.1	9.18703
200°C-3	0.176	2.492	1.37	50.8	12.4735
250°C-1	0.2025	2.475	1.35	27.5	7.39677
250℃-2	0.184	2.408	1.39	45.6	11.67441
250℃-3	0.184	2.388	1.45	38.4	9.50291
300℃-1	0.214	2.538	1.35	36.4	9.81346
300℃-2	0.203	2.516	1.472	38.9	9.45178
300℃-3	0.2305	2.594	1.3935	29.6	7.84798

可以看出,在温度为 150℃、200℃、250℃和 300℃的试验中,即便最小的断裂韧性值(试件 200℃-1 的断裂韧性值为 5.74546 MPa · mm^{1/2})与低 于 100℃试验中最大的断裂韧性值(试件 100℃-1 的 断裂韧性值为 $5.77454 \, \text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)是几乎相同的; 而高温试验中最大的断裂韧性(试件150℃-1的断裂 韧性值为 12.98472 MPa · mm^{1/2})是后者最小的断裂 韧性(试件 50℃-3 的断裂韧性值为 1.99532 MPa·mm^{1/2})的 6.51 倍。图 5 是不同温度下砂岩的 平均断裂韧性,清晰显示出温度 150℃、200℃、 250℃和300℃的断裂韧性都远高于温度低于100℃ 试验的断裂韧性, 也表现出温度对断裂韧性的非线 性影响关系。





考虑到岩石的非均质性, 岩石的力学试验结果 会有很大的离散性,但以上的结果还是充分说明, 受到温度影响后,平顶山砂岩的断裂韧性有明显的 变化。可以得出 150℃左右是砂岩断裂韧性变化的 临界温度,即在温度低于 100℃的试验中,砂岩的 断裂韧性随温度的变化不大;而当温度达到 150℃ 时,断裂韧性达到峰值;当温度进一步升高到 300℃ 时,断裂韧性又有所下降。

由于本文试验的砂岩试件是小尺寸试件,其边 界效应影响很大。随着温度的升高,试件表面会自 由膨胀,从而会在表面引起部分矿物应力释放;而 在试件内部会产生应力聚集,这会大大影响预制缺 口附近的裂纹尖端应力场,裂纹尖端应力场的变化 又会诱发新裂纹产生。同一温度对大试件的影响区 域与对小试件的影响区域大小可近似认为相同,但 这个区域对于整个试件的影响效果却是不同的。由 于温度的变化导致力学行为的变化很小,但对于小 试件而言,这种变化可能得到充分的体现;而对于 大尺度试件,这种影响没完全体现出来,被岩石自 身的非均质性或者试验机的特性给屏蔽掉。这是温 度影响边界所引起的尺寸效应。作者认为,这是本文 试验与一些宏观试验结果有所差别的主要原因。另外 由于砂岩是一种沉积岩,且其矿物颗粒粒径大小不 一,在温度的影响下,一些颗粒和粘土胶结物会产生 脱粘,从而对测试的断裂韧性造成影响,这是颗粒大 小所引起的尺寸效应。由于有关双边缺口岩石断裂 韧性的研究少见报道,将来还有待进一步证实。

砂岩矿物颗粒及粘土物质在加热过程中都或 多或少受到热影响。一些资料研究表明,在 573℃ 六方晶系的 α 石英转变为三角晶系的 β 石英;菱铁 矿在 400℃左右发生分解;白云石在 500℃左右发 生降解;方解石在大约 855℃发生分解。而粘土矿 物中通常含有少量水分,其中吸附水和层间水与粘 土矿物的结合比较松弛,通常在 100℃-200℃即可 脱出,而脱出晶格的结构水的温度则更高。可见, 试验中低于 300℃的温度很难对矿物颗粒产生大的影 响,而对粘土矿物的影响是很大的。平顶山砂岩中粘 土矿物占了很大比重(约 20%),试验中也发现当温度 升到 150℃左右时,电镜腔中有雾气,可以判断是温 度升高后导致了水分蒸发。因此我们推测断裂韧性 在 150℃左右发生变化也受到粘土物质的影响。

由于试件上有两个预制缺口,在外部载荷作用 下预制缺口附近会产生应力集中,这容易在缺口附 近产生微裂纹,由于矿物颗粒通常强度较高,而粘 土胶结物的强度较低,从统计意义上讲这些微裂纹 易在粘土胶结物或者粘土胶结物与矿物颗粒的交 界处产生。当矿物颗粒的强度远远大于粘土胶结物 的强度时,岩石的断裂很大程度上受到较弱物质的 影响,此时岩石的破坏取决于粘土胶结物的破坏, 这也是众所周知的最弱环理论;而当矿物颗粒的强 度与粘土胶结物的强度相差无几时,此时砂岩的断 裂更多的是受到矿物颗粒和粘土胶结物共同的影 响,或者说,此时岩石的断裂更多意义上是矿物颗 粒和粘土胶结物组成的整体结构的断裂。

因此,温度较低时(如低于 100℃),由于粘土胶 结物的强度较低,导致了砂岩的断裂韧性较低;而 当温度进一步升高到 150℃时,温度的升高改变了 粘土矿物内部物质的组成结构,部分原因还可能是 由于内部吸附水或层间水分的蒸发导致了粘土胶 结物物质结构发生变化,此时是由矿物颗粒和粘土 胶结物组成的整体结构在承载,从而导致砂岩整体 断裂韧性提高。而 150℃之后断裂韧性又有所下降, 这部分原因是由于热开裂造成的。 试验过程中发现,在低于 150℃的试验试件表 面不出现热开裂;而在 200℃、250℃和 300℃的试验 试件表面或多或少都出现了热开裂,典型情况如图 6。 这也说明,随着温度升高到 150℃,砂岩试件抵抗裂 纹扩展和变形破坏的能力在升高;而在更高温度 200℃、250℃和 300℃时,由于局部的粘土胶结物 表面出现了热干裂及矿物颗粒表面的热开裂现象, 而这些热开裂又会导致砂岩的断裂韧性有所下降。



Fig.6 Thermal cracking SEM image at 300℃ (×100) 以上分析表明,150℃是断裂韧性变化的临界 温度。

通常来讲,砂岩双边缺口试件在受到轴向载荷 时,预制 I 型裂纹的扩展受到矿物颗粒和粘土物质 共同的影响,根据线弹性断裂力学分析,对于岩石 类脆性材料,由于裂纹尖端塑性区的尺寸相对较 小,那么在描述裂纹尖端应力场和位移场只需要应 力强度因子一个参量即可,因此失稳断裂的判据可 表示为:

$$K_I \ge K_{Ic} \tag{2}$$

式中: *K_I* 是应力强度因子,与外部载荷和试件的 几何形状相关; *K_{Ic}* 是断裂韧性,如果针对于某一 特定几何形状及外部条件,断裂韧性是个常数。但 当外部条件,如温度发生变化时,断裂韧性也会发 生变化,因此,此时的断裂韧性还与温度条件是相 关的。为此,我们分段对断裂韧性与温度的关系进 行了非线性拟合,如图 5:

$$\begin{cases} K_{Ic} = 3.65763 + 0.00152e^{T/17.09453}, \\ 25 ^{\circ}C \leq T \leq 150 ^{\circ}C \\ K_{Ic} = 9.88676 + 2868.21623e^{-T/22.43219}, \\ 150 ^{\circ}C \leq T \leq 300 ^{\circ}C \end{cases}$$
(3)

式(3)中两式的相关系数分别为 0.97329 和 0.96934。可见断裂韧性 K_{lc} 与温度 T 近似存在指数对应关系。

在温度低于 150℃时,存在指数升的关系;当温度大 于 150℃时,存在指数降的关系。把室温 25℃代入 式(3),可近似预测室温的断裂韧性 *K*_{lc}=3.664 MPa·mm^{1/2},与试验得到的室温 25℃的平均断裂韧 性值 3.52378 MPa·mm^{1/2} 很近似。由此,同样可预 测其他未实验温度点的断裂韧性,这对工程实践有 一定指导意义,也可节省大量的实验费用。

综合考虑各种因素,把细观尺度上岩石断裂韧 性与温度的关系概况为:

 $\begin{cases} K_{lc}(T) = K_{lc}(A_{1} + B_{1}e^{C_{1}T}), & 25 °C \leq T \leq 150 °C \\ K_{lc}(T) = K_{lc}(A_{2} + B_{2}e^{C_{2}T}), 150 °C \leq T \leq 300 °C \end{cases}$ 式中: $K_{lc}(T)$ 是不同温度下的断裂韧性; K_{lc} 是室 温下测试的断裂韧性,可由试验测定; T是温度; $A_{1}, A_{2}, B_{1}, B_{2}, C_{1}$ 和 C_{2} 是拟合常数,与岩石的物 理性质、几何形状及外部载荷条件、温度相关。在 临界温度之前,表现为指数升的关系,即 C_{1} 为正值; 在临界温度后,由于出现了热开裂,又表现为指数 降的关系,即 C_{2} 为负值。

4 结论

本文通过试验研究了不同温度影响下平顶山 砂岩的变形破坏及断裂行为,根据不同温度(25℃-300℃)砂岩断裂韧性的测试结果、SEM 在线观察及 分析得到以下结论。

(1) 温度升高会引起砂岩的断裂机制有由脆性 断裂向延性断裂转变的趋势。

(2) 对于细观尺度双边缺口拉伸试件,温度从
25℃升到 150℃时,砂岩的断裂韧性会有所升高;
而从 150℃升到 300℃,断裂韧性又有所下降,其
中 150℃是断裂韧性变化的临界温度。

(3) 温度引起断裂韧性发生变化的主要原因是 受细观尺寸、粘土胶结物和热开裂的共同影响。

(4)得出了温度与平顶山砂岩断裂韧性存在指数非线性关系式(4),该式可近似预测其他温度条件下的断裂韧性,为工程实践提供了设计依据。

(5)本文的试验结果与多数宏观试验结果有所 不同的根本原因是:本文采用的试件是细观尺度试 件,其抵抗变形破坏的能力较弱,因此温度的影响 效应能明显体现出来;而对于宏观尺度的试件,由 于其抵抗变形破坏的能力较强,并且由于试验机自 身的特点,温度的影响可能被岩石的非均质性及试 验机所屏蔽,没能完全体现出来。

参考文献:

- 李贺, 尹光志, 许江. 岩石断裂力学[M]. 重庆: 重庆大 学出版社, 1988.
 Li He, Yin Guangzhi, Xu Jiang. Fracture mechanics of rock [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1988. (in Chinese)
- [2] Atkinson B K. Fracture mechanics of rock [M]. London: Academic Press, 1987.
- [3] 吴忠,秦本东,谌论建.煤层顶板砂岩高温状态下力学 特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1863-1867.

Wu Zhong, Qin Bendong, Chen Lunjian. Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1863–1867. (in Chinese)

- [4] Hudson J A, Stephansson O, Andersson J. Guidance on numerical modeling of thermo-hydro-mechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(5/6): 850-870.
- [5] Rutqvist J, Barr D, Datta R. Coupled thermalhydrological-mechanical analyses of the Yucca mountain drift scale test-comparison of field measurements to predictions of four different numerical models [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(5/6): 680-697.
- [6] 周宏伟,谢和平,左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99.
 Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the confining of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91-99. (in Chinese)
- [7] 左建平,谢和平,周宏伟.温度压力耦合作用下的岩石 屈服破坏研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16): 2917-2921.

Zuo Jianping, Xie Heping, Zhou Hongwei. Study on failure behavior of rock under coupling effects of temperature and confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2917–2921. (in Chinese)

- [8] 左建平. 温度-应力共同作用下砂岩破坏的细观机制与 强度特征[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2006.
 Zuo Jianping. Sandstone failure mechanism at the meso-scale and its strength characteristics under the thermal-mechanical action [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2006. (in Chinese)
- [9] 孟召平,李明生,陆鹏庆. 深部温度、压力条件及其对 砂岩力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2006, 25(6):1177-1181.

Meng Zhaoping, Li Mingsheng, Lu Pengqing. Temperature and pressure under deep conditions and their influences on mechanical properties of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1177-1181. (in Chinese)

- [10] Wong T F. Effects of temperature and pressure on failure and post-failure behavior of westerley granite [J]. Mechanics of Materials, 1982, 1: 3-17.
- [11] 许锡昌,刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性能初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332-335.
 Xu Xichang, Liu Quansheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332-335. (in Chinese)
- [12] Wang X S, Wu B S, Wang Q Y. Online SEM investigation of microcrack characteristics of concretes at various temperatures [J]. Cement and Concrete Researcn, 2005, 35(7): 1385-1390.
- [13] 寇绍全. 热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特征的影响
 [J]. 力学学报, 1987, 19(6): 550-556.
 Kou Shaoquan. Effect of thermal cracking damage on the deformation and failure of granite [J]. Acta Mechanica Sinica, 1987, 19(6): 550-556. (in Chinese)
- [14] 张静华,王靖涛,赵爱国.高温下花岗岩断裂特性的研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(4): 11-16.
 Zhang Jinghua, Wang Jingtao, Zhao Aiguo. Fracture properies of granite at high temperature [J]. Rock and Soil

Mechanics, 1987, 8(4): 11-16. (in Chinese)

- [15] 黄有爱,夏熙伦. 岩石断裂韧度的物理性状效应[J]. 岩 土工程学报, 1987, 9(4): 91-96.
 Huang Youai, Xia Xilun. The effects of physical properties on rock fracture toughness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(4): 91-96. (in Chinese)
- [16] Schmidt R A, Lutz T J. K_{IC} and J_{IC} of westerly graniteeffects of thickness and in-plane dimensions in fracture mechanics applied to brittle materials [C]. ASTM Special Technical Publication, 1979, 678: 166–182.
- [17] Al-Shayea N A, Khan K, Abduljauwad S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 629-643.
- [18] Funatsu T, Seto M, Shimada H. Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness of clay bearing rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 927–938.
- [19] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学 出版社, 1981.

China Academy of Aerospace. Handbook of stress intensity factor [M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)

(上接第 123 页)

- [7] Kim S E, Boysan F. Application of CFD to environmental flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 145-158.
- [8] 日本建築学会. ISBN4-8189-0459-7C3052 P4450E-1996, 建築物荷重指針[S]. 日本,東京: 1996.
 AIJ. ISBN4-8189-0459-7C3052 P4450E-1996, Recommendations for loads on building [S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1996. (in Japanese)
- [9] 中华人民共和国国家标准. GB50009-2001, 建筑结构 荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
 National standard of PRC. GB50009-2001, Load code for the design of the building structures [S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [10] Fluent Inc. FLUENT user's guide [Z]. USA: Fluent Inc., 2003.