

温度和层理对油页岩断裂韧度影响的试验研究*

毕井龙^{1,2}, 梁卫国^{1,2}, 耿毅德^{1,2}, 曹孟涛^{1,2}, 黎力^{1,2}

(1. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 太原 030024;
2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 太原 030024)

摘要: 为了研究油页岩受不同温度影响的正交各向异性力学特征, 以抚顺油页岩为研究对象, 参照 ISRM 提出的半圆形弯曲试件测试脆性岩石 I 型断裂韧度 K_{IC} 的方法, 利用万能材料试验机测试不同温度作用下的 3 种不同层理方向的油页岩试件的载荷和位移, 计算得出 K_{IC} 的变化规律。结果表明: 在 500 °C 以下, 油页岩断裂表现出明显的脆性特征, 在线弹性阶段, 载荷-位移曲线的斜率与温度大致呈负相关; 油页岩正交方向的断裂韧度存在各向异性; 在 150 °C 前, crack-arrester 方位的断裂韧度大于 crack-divider 方位的断裂韧度, 在 200 °C 左右发生逆转, 400 °C 以后二者趋于一致; 常温下 crack-splitter 方位的值只有 crack-arrester 与 crack-divider 方位的 1%~2%; 不同层理方向的断裂韧度存在不同的“门槛”温度 T_c , 断裂韧度在 T_c 前后均呈现先增大后急剧减小的趋势。

关键词: 油页岩; 正交各向异性; 层理; I 型断裂韧度; 门槛温度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1007-09

Experimental Study on the Effect of Temperature and Bedding Planes on the Fracture Toughness of Oil Shale

Bi Jinglong^{1,2}, Liang Weiguo^{1,2}, Geng Yide^{1,2}, Cao Mengtao^{1,2}, Li Li^{1,2}

(1. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P.R.China; 2. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining (Taiyuan University of Technology), Ministry of Education, Taiyuan 030024, P.R.China)

Abstract: To research the orthogonal anisotropic mechanical characteristics of oil shale under the effect of different temperature, we use the method which proposed by ISRM to measure Mode I Static Fracture Toughness (K_{IC}) of semi-circular bend specimen. An experiment was conducted with Fushun oil shale, by using the universal testing machine to test the load and displacement of three different bedding planes under different temperature, and obtain the changing rules of K_{IC} by calculation. The result shows that: when the temperature is below 500 °C, oil shale fractures show brittle fracture characteristics. During linear elasticity stage, it demonstrates a negative correlation between slope of the load-displacement curve and temperature. The K_{IC} of oil shale in the orthogonal directions is anisotropic. When test temperature is lower than 150 °C, the K_{IC} of specimens of crack-arrester direction is greater than the K_{IC} of crack-divider direction. When test temperature is around 200 °C, the crack-arrester direction K_{IC} of specimens is lesser than the crack-divider direction K_{IC} . When test temperature is above 400 °C, the results for these two types tend to be uniform with each other. The K_{IC} of crack-splitter direction is only 1%~2% of crack-arrester

* 收稿日期: 2018-02-27 (修改稿)

作者简介: 毕井龙 (1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事岩石力学和工程力学方面的研究工作。

E-mail: linghulong@126.com

通讯作者: 梁卫国 (1972), 男, 山西孟县人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的研究。

E-mail: liangweiguo@tyut.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51225404); “三晋学者”支持计划资助项目 (2013)

direction and crack-divider direction. The K_{IC} of different bedding direction has different threshold temperature T_c , the value of K_{IC} presents the tendency towards increasing first and then decreasing sharply before and after T_c .

Keywords: oil shale; orthogonal anisotropy; bedding planes; mode I fracture toughness; threshold temperature

0 引言

中国有着丰富的油页岩储量,目前的开发工作主要集中在浅埋油页岩的矿山开采、地面干馏制油及燃烧发电等方面^[1]。对于埋深较深的油页岩,原位开采凭借其较低的成本和较好的环境效益,越来越受到大家的重视^[2]。其中,原位注热-对流加热开采油页岩就是众多原位开采方法中行之有效的一种^[3-4]。其包含压裂油页岩层进行储层改造和持续对流加热岩体开采油气两大阶段,以上阶段均伴随着油页岩基质在固-流-热-传质耦合作用下一系列复杂的物理化学变化。要进行较好的多场耦合分析,就必须对油页岩的热物理特性进行探讨研究。

赵静等^[5]利用显微 CT 对不同温度下的油页岩进行了扫描,随着温度的升高,油页岩从致密状态变为孔裂隙发育的多孔介质。于永军等^[6]测试了平行和垂直于层理的油页岩的热膨胀系数和导热系数,指出随着温度升高,热膨胀系数起伏变化,导热系数呈线性规律降低。为实现油页岩原位开采的多场耦合分析,对其开采过程中的传热学、断裂力学及渗流力学等加以研究是必由之路^[7]。

在研究沉积岩断裂力学问题时,岩石的正交各向异性特征不可忽视^[8]。近年来,能源开发中经常涉及水压致裂、蒸汽压裂、现场爆破等技术,断裂韧度在这些岩土工程中的重要性越发明显,因此,搞清岩石断裂韧度的影响因素越来越重要^[9-10]。裂纹的扩展开裂总是以转折的方式发生 I 型断裂,滑移型(II 型)和撕开型(III 型)裂纹的扩展其实质只是 I 型裂纹起裂扩展过程中产生的次生现象^[11]。因此,探讨 I 型断裂韧度具有重要的意义。

Schmidt^[12]通过三点弯曲试验,得出了油页岩不同层理方向的断裂韧度,并发现断裂韧度不仅受到干酪根的影响,也受到应力腐蚀和含水率的影响;Kataoka 等^[13]对花岗岩进行了水蒸气压力下的三点弯曲试验,发现其断裂韧度受到微观结构与蒸汽压力的影响;Funatsu 等^[14]研究了砂岩受温度和围压影响下混合型断裂韧度和 II 型断裂韧度的变

化规律,发现断裂韧度不仅受温度和围压的影响,而且这两个因素有相互制约的作用。

由于油页岩具有典型的正交各向异性特征,在热-力耦合条件下,不同层理方向上的热力学参数无疑也具有正交各向异性。基于此,本文分别对 20~500 °C 范围内的几个温度下 3 种不同层理方向的油页岩试件进行三点弯曲试验,以试验数据为依据,分析并讨论了温度与层理方向对油页岩 I 型断裂韧度的影响。

1 物理力学试验

1.1 断裂韧度测试原理

岩石的静态断裂韧度测试方法很多^[15],国际岩石力学学会(International Society of Rock Mechanics,以下简称 ISRM)给出了 3 种方法,分别是 1988 年的三点弯曲人字形切槽圆棒试件^[16],1995 年的人字形切槽巴西圆盘试件^[17]和 2014 年推荐的直裂纹三点弯曲半圆盘试件^[18]。此处采用 ISRM 于 2014 年推荐的半圆盘形试件进行三点弯曲试验。

$$\beta = \frac{a}{R} \quad (1)$$

$$Y' = -1.297 + 9.516 \frac{S}{2R} - \left[0.47 + 16.457 \left(\frac{S}{2R} \right) \right] \beta + \left[1.071 + 34.401 \left(\frac{S}{2R} \right) \right] \beta^2 \quad (2)$$

$$K_{IC} = Y' \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (3)$$

式中: a 为预制裂纹长度,mm; R 为试件盘体半径,mm; β 为裂纹长度和试件半径的比值,取 $\beta=0.4$; B 为盘体厚度,mm; S 为两支撑圆锲之间的距离,mm; P_{\max} 为试件破坏峰值载荷,N; Y' 为应力强度因子,无量纲; K_{IC} 为断裂韧度,MPa \cdot m^{0.5}。

如图 1 所示,将半圆盘形试件置于万能材料试验机上进行三点弯曲试验,试验前设置好试验参数,由仪器自动记录实时加载位移与加载力,将各试件试验参数代入式(1)、式(2)和式(3)中进行断裂韧度计算。

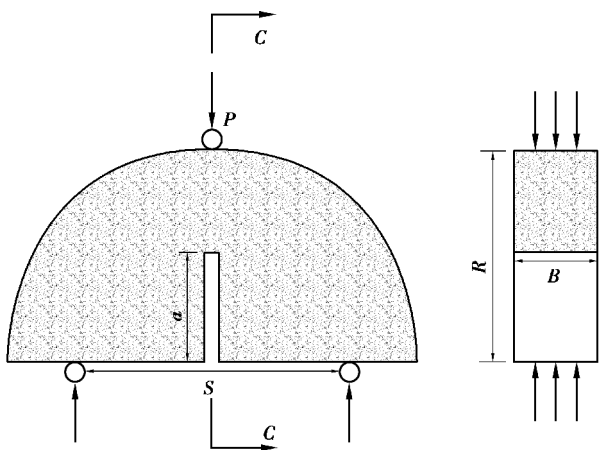


图 1 半圆形试件几何形态与加载布置示意图

Fig. 1 SCB specimen geometry and schematic loading arrangement

1.2 试样采集与分类

本试验用油页岩采集于抚顺西露天矿,采集后及时用石蜡密封以防止其风化。该油页岩岩体致密、坚硬、呈褐色,层理特别发育,组分中 SiO_2 的含量占到了60%以上,其次是 Al_2O_3 占到了20%左右^[19],其他主要矿物质有砂质粘土、碳酸盐岩、硫铁矿及有机质碳、氢和少量的氧、氮、硫等元素。

表1为在山西省煤炭地质研究所做的抚顺油页岩样品工业分析,可以看到该油页岩水分含量不多,而挥发分含量比例近两成,在600℃的热解作用下基本损失殆尽。

表 1 工业分析

Table 1 Proximate analysis			
试件	原始试件	热解试件	热解 24 h 的变化
水分 $M_{\text{ad}}/\%$	2.36	0.74	1.62
灰分 $A_{\text{d}}/\%$	73.34	93.07	-19.73
挥发分 $V_{\text{d}}/\%$	22.88	1.99	20.89
固定碳 $FC_{\text{d}}/\%$	3.78	4.94	-1.16
焦渣特征	2(粘着,即没有粘结性)		

鉴于油页岩为典型的沉积岩,与横观各向同性体类似,垂直和平行于层理两个方向性质均不同,为研究油页岩受不同温度影响下不同层理方向断裂韧度的变化,将试件按照半圆盘轴向、预制裂纹方向和层理面的位置关系,分成 crack-arrester(标

记为 A 型), crack-divider(标记为 B 型)和 crack-splitter(标记为 C 型)3 种类型^[20],如图 2 所示。每种类型再按照不同的温度区间分成若干小组,每个小组加工若干个试件,分别测试各试件在不同温度影响下的断裂韧度。

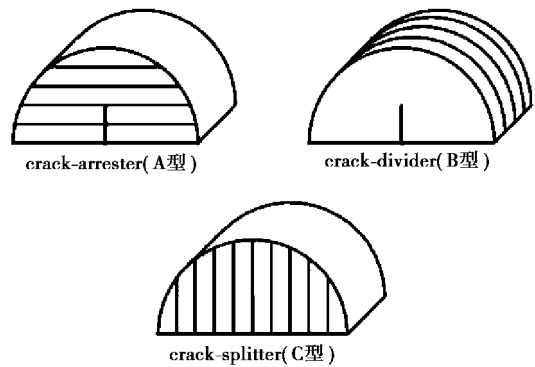


图 2 预制裂纹方向与层理方向关系图

Fig. 2 Relationship between pre-existing cracks and bedding planes

1.3 试样制备与加工

将采集回来的油页岩利用金刚线切割的方法,选择适当的切割速率进行加工成型。相关尺寸参照 ISRM 的建议,并结合实际试验条件选定(见表 2)。

表 2 半圆盘试件的几何尺寸

Table 2 Geometrical dimensions of SCB specimens		
参数	建议值或范围	试验选定值/mm
R	大于晶粒尺寸的 10 倍或者 76 mm	25
B	半径的 0.4 倍或者 30 mm	20
a	$0.4 \leq a/R \leq 0.6$	10
S	$0.5 \leq S/(2R) \leq 0.8$	40

半圆盘加工完毕后,用 0.5 mm 厚的钢锯条在圆盘径向通过圆心垂直向上预制出长度为 10 mm、宽度为 1 mm 的裂纹,然后用 0.08 mm 粗的金刚线对裂纹尖端进行精细加工,最终保证裂纹尖端宽度小于 0.3 mm^[21]。

如图 2 所示,试件外形加工完毕后,在 20 ~ 500℃温度范围内划分成不同的温度段,并进行分组(分组情况详见表 4),考虑到岩石的非均质特性,每一组准备 3~4 个试件(如图 3 所示)。各组分别在高温高压热解反应釜中进行隔绝空气加热处理。为防止试件升温速率较快导致局部温度差

异过大,热应力作用下岩体发生炸裂,升温速率保持在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内;为保证试件的最终温度均一,按照试件的实际尺寸和热物理性质^[6],用有限元法对试件的加热过程进行了数值模拟分析,确定了各组试件必要的恒温时间。600 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,岩体结构崩解,不具有完整的测试块体,因此,加工温度上限设为 500 $^{\circ}\text{C}$ 。



图 3 部分试件

Fig. 3 Parts of the specimens

1.4 试验系统与测试方法

本试验采用由 INSTRON 公司生产的 INTRON5544 万能材料试验机(如图 4 所示),测力范围在 0~2 kN 之间。设定好试验参数,通过微机控制,分别对不同温度下的 3 种层理方向的油页岩试件进行三点弯曲试验,高速采集实时位移及加载载荷。为了防止试件受到动态载荷冲击,试验机加载过程为位移控制,加载速率为 0.002 mm/s 。

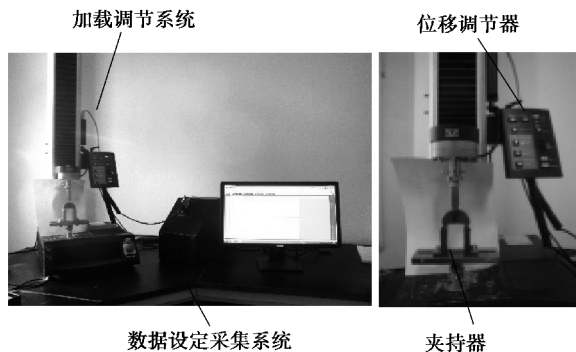


图 4 三点弯曲试验系统

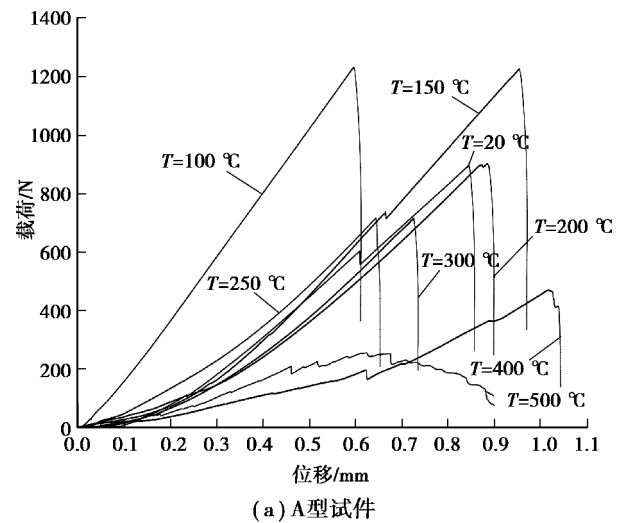
Fig. 4 Three-point bending testing system

2 试验结果与分析

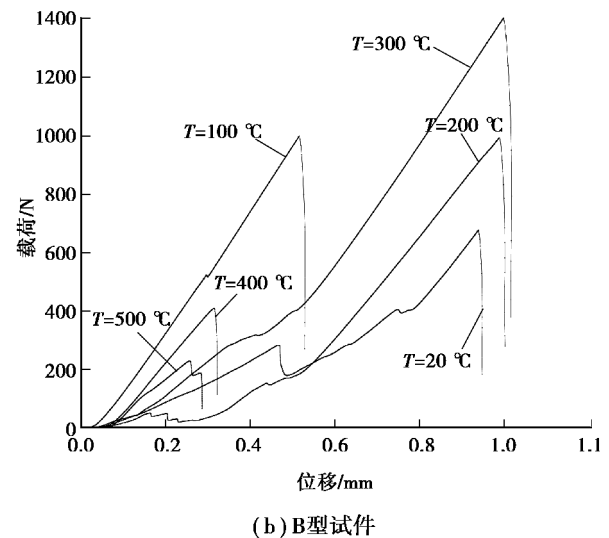
2.1 载荷-位移曲线分析

如图 5 所示,在不同温度和层理方向下,选取部分试件的三点弯曲载荷-位移曲线, T 为试件温度。随着加载位移的逐渐增大,载荷-位移曲线总体经历了压密阶段-线性阶段-峰后跌落阶段的变化过程。但是,总体来看,500 $^{\circ}\text{C}$ 以下的试件的载荷-位移曲线峰前屈服阶段都不明显。纵向载荷在

达到峰值后,试件短时间内就失去了承载能力,呈现出脆性特征。



(a) A型试件



(b) B型试件

图 5 载荷-位移曲线

Fig. 5 Load vs. displacement curve

表 3 为 A、B 型试件在不同温度下的载荷-位移曲线弹性段的斜率,可看出温度对载荷-位移曲线的发展趋势影响较大。A 型试件除了 20 $^{\circ}\text{C}$ 以外,弹性段斜率值与温度呈负相关的关系;B 型试件除了 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 以外,其弹性段的斜率值与温度也大致呈负相关的趋势变化;在 300 $^{\circ}\text{C}$ 以后, A、B 型试件的斜率值均迅速下降。相比较而言, A 型试件受温度影响的载荷-位移曲线,在弹性段的斜率变化率要大于 B 型试件,尤其是 400 $^{\circ}\text{C}$,是其值的 2.77 倍。此外, B 型试件在除 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 以外的各温度段,其弹性段的斜率均大于 A 型的值,且下降速率没有 A 型快,这与试件受热层理进一步发育,加载方向与层理方向的交角有关,以下

小节会进一步讨论。

表 3 不同温度下的弹性段斜率

Table 3 Slopes of elastic region under different temperature

A 试件			B 试件		
温度/℃	斜率	变化速率	温度/℃	斜率	变化速率
20	1 432.57	—	20	1 166.68	—
100	2 213.90	-0.545	100	2 095.68	-0.796
150	1 764.85	0.203	—	—	—
200	1 400.01	0.207	200	2 244.81	-0.071
250	1 378.77	0.015	—	—	—
300	1 388.52	-0.007	300	2 089.60	0.069
400	557.26	0.599	400	1 637.26	0.216
500	444.44	0.202	500	901.73	0.449

2.2 断裂韧度受温度影响变化的分析

根据各试件的直径、厚度和试验采集到的峰值载荷,通过式(1)、式(2)和式(3)计算可分别得到其断裂韧度的值。部分试件热加工和试验过程中被发现存在缺陷而不符合试验标准被剔除。另外,由于油页岩在高温环境中会产生微裂隙,极易导致 crack-splitter 方位的试件离层破坏,因此,C 型试件均未进行热加工。

表 4 所示为 17 个 A 型试件、14 个 B 型试件和 5 个 C 型试件的试验数值。从表 4 中可看出,各个温度段下相同层理方向的试件所测试出的断裂韧度值的离散度不大,可信度较高。根据表 4 绘制出不同温度下不同层理方向的油页岩试件的断裂韧度平均值的变化曲线,如图 6 所示。

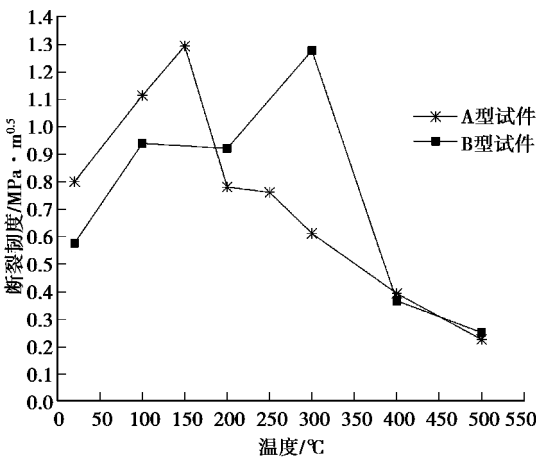


图 6 A、B 型试件的断裂韧度 K_{IC} -温度图

Fig. 6 K_{IC} vs. temperature curves of model A&B

表 4 半圆盘试件三点弯曲试验结果
Table 4 Experimental results of SCB specimens from three-point bending testing

试验温度/℃	试件编号	加载峰值/N	$K_{IC}/MPa \cdot m^{0.5}$	标准差 K_{IC}	均值 K_{IC}
20	A-20b	735.622	0.734 415	0.089 56	0.801 084
	A-20c	896.970	0.902 877		
	A-20d	796.272	0.765 960		
100	A-100a	1 309.313	1.114 720	0.000 99	1.114 022
	A-100c	1192.749	1.113 324		
150	A-150a	1 226.979	1.246 980	0.114 36	1.293 932
	A-150b	1625.414	1.340 883		
200	A-200b	770.232	0.760 832	0.028 85	0.781 232
	A-200c	902.265	0.801 632		
250	A-250a	1 213.722	0.946 380	0.261 70	0.761 328
	A-250b	717.114	0.576 276		
300	A-300a	706.893	0.570 224	0.059 90	0.612 579
	A-300b	715.945	0.654 934		
400	A-400a	358.275	0.340 150	0.076 00	0.393 890
	A-400b	471.148	0.447 630		
500	A-500a	255.934	0.207 494	0.027 20	0.226 768
	A-500b	265.064	0.246 042		
20	B-20a	654.471	0.593 111	0.051 37	0.577 234
	B-20b	679.607	0.618 790		
	B-20c	607.470	0.519 803		
100	B-100a	1 001.740	0.903 811	0.050 57	0.939 572
	B-100b	1031.920	0.975 333		
200	B-200a	996.749	0.931 992	0.015 76	0.921 355
	B-200b	893.136	0.903 252		
	B-200c	979.163	0.928 821		
300	B-300a	1 407.067	1.265 994	0.114 05	1.277 572
	B-300b	1 244.442	1.169 750		
	B-300c	1 451.787	1.396 974		
400	B-400a	450.826	0.399 390	0.045 23	0.367 404
	B-400b	340.473	0.335 417		
500	B-500b	261.543	0.252 010		0.252 01
20	C-1	22.423	0.010 428	0.002 51	0.012 817
	C-3	15.563	0.010 019		
	C-4	22.273	0.013 508		
	C-6	22.515	0.014 305		
	C-7	29.123	0.015 825		

如图6所示,在A、B两种试件的断裂韧性 K_{IC} 的变化过程中,各存在一个明显的温度界线,以此将断裂韧性的变化曲线分为2个阶段。从室温开始,随着温度的升高,断裂韧性都先增大而后急剧减小,这与弹性阶段载荷-位移曲线的斜率变化是一致的。当A型试件的温度低于150℃与B型试件的温度低于300℃时, K_{IC} 随温度升高逐渐增大,这种现象类似花岗岩在200℃以下时和一些低温金属材料的表现^[22],这种现象是由于油页岩受热后矿物组成、微观结构发生变化所引起的。

因此,在油页岩的断裂韧性随温度升高的变化过程中,存在一个“门槛温度” T_c ,在 T_c 之前,断裂韧性小幅升高,在 T_c 之后,断裂韧性急剧降低。A型试件的门槛温度是150℃,B型试件的门槛温度是300℃,在此温度上下,其断裂韧性会发生根本性的变化。

在门槛温度之前,断裂韧性小幅升高,主要由以下原因造成:岩石在常温到300℃温度区间里,主要发生内附水和结合水的逸出^[23-24]。内部水的逸出会导致岩体矿物晶格骨架的破坏,内部缺陷增加,从而导致岩体的承载能力下降;但同时也会使矿物颗粒间的润滑作用下降,粘结力增强,进而使岩体的承载能力增大。在实验室利用压汞法对抚顺油页岩的孔隙率进行了测试,常温和300℃下的孔隙率分别为3.39%和10.44%,随着温度的升高,孔隙率增长较大,通过CT扫描油页岩试件,发现矿物颗粒的排布非常均匀。因此,在一定温度环境下,有限的内部水有着良好的逸出通道,对岩体的矿物晶格骨架破坏不是很严重。综上,低温段的内部水的逸出使矿物颗粒间的粘结力增强,导致该阶段岩体的承载能力变强,使得加载载荷增大,断裂韧性随之增大。

随着温度的升高,在达到门槛温度之后,断裂韧性急剧降低,主要由以下原因造成:油页岩中的油母质热解产生页岩油大致经历低温、中温和高温3个阶段。270℃时有机质开始转化为沥青,400~500℃时产出油气,300~400℃之间会有一个油母质逐渐熔化到气化的过程,这一阶段分解生成的短链烃与 CO_2 开始逸出^[25-27]。有机质的熔化、气化势必会对油页岩岩体的矿物骨架与粘结力造成极大的破坏;另外,由于该油页岩组成矿物种类较多,不同的矿物颗粒的热膨胀率存在一定的差异,升温过程中晶粒的不协调热膨胀,尤其是石英的晶型转化,也会促使油页岩试件的崩裂。综上,在高温阶段,矿物的晶格骨架遭到了破坏,使得油页岩产生

了崩裂,加载载荷峰值随之减小,导致断裂韧性急剧降低。

2.3 断裂韧性受层理影响的分析

如图7所示,为部分A型试件的断面形态图,从图中可以看出,在温度较低时,试件的断面多呈现平滑的裂纹扩展走向,端面较为平整,次生裂隙数量较少;随着温度的升高,断面变得参差不齐,出现大量的沿着层理方向的次生裂纹。

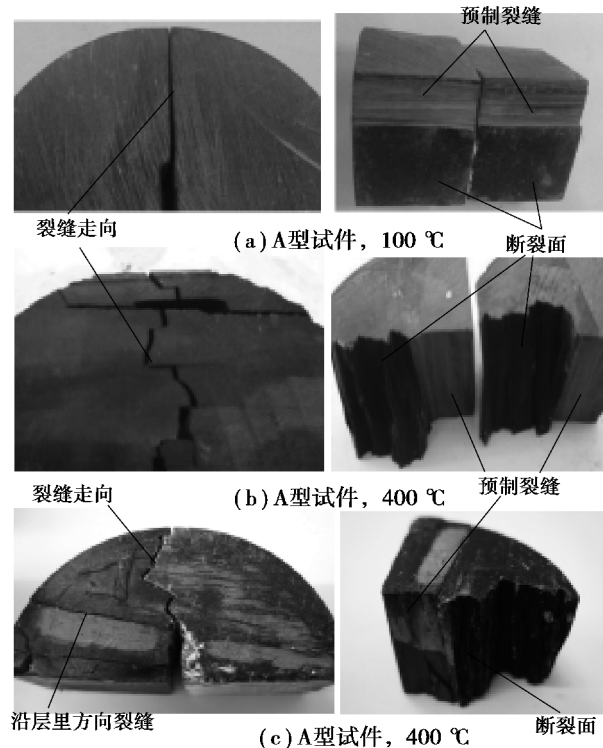


图7 部分A试件断面形态

Fig. 7 Section morphology of some type A specimens

如图7(a)所示,在150℃前,岩体有限的内部水逸出较为容易,对岩体结构的稳定影响不大,该试件的岩体保持完整,基本没有可见的微裂隙,裂纹的扩展方向大致垂直于受拉面向上,呈现为较为平滑的曲线;如图7(b)所示,在200℃时,试件沿层理方向产生了一些可见的微裂隙。在加载过程中,加载方向与层理面方向垂直,产生的微裂隙会被重新压实,从位移-载荷曲线(如图5(a)所示)中可以观察到较长的压密阶段。在层理间裂隙张开-压实的过程中,层理间位距发生变化,层理势必会在热损伤较严重的部位或天然弱面发生更大的损伤,甚至断裂。如图7(c)所示,随着温度的升高,试件将会沿着更多层理产生微裂隙,这就意味着更多的层理将会经历一个张开-压实的过程,这样势必会导致试件岩体承载能力的大大减弱。

图8为部分B型试件的断面形态图,从图中可以看出,B型试件的裂缝走向较A型试件平滑得多,没有尖锐的拐点,开裂方向基本上沿着预制裂缝方向且偏离较小,但是每个试件在脆性断裂后都发生了沿层理面的离层。

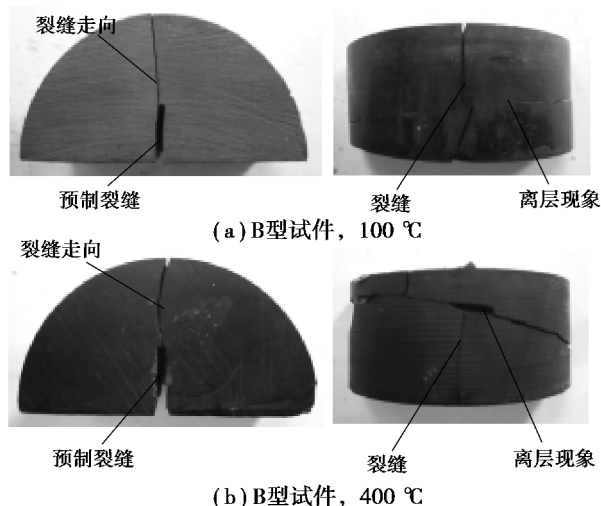


图8 两种B试件断面形态

Fig. 8 Section morphology of two type B specimens

B型试件加工较为平整,加载压头与试件的接触线和试件的受拉面保持严格的平行,排除了由于三点弯曲支座的约束导致试件受力不平衡造成的层理面离层的问题。虽然试件在升温过程中也会经历和A型试件相同的热损伤和沿层理微裂隙的产生,但是加载方向与层理方向平行,各层理面不会受到A型试件遇到的层理间张开后重新被压实的过程,并且众多微裂隙并没有纵贯整个试件,B型试件的主体在300 °C前承载能力并没有下降。但是随着温度的升高,试件的微裂纹将会继续发育,300 °C上下时试件岩体骨架将会随着门槛温度 T_c 的到来进一步破坏,承载能力急剧减小。

图9为一种C型试件的断面形态图,试件开裂时不一定沿着预制裂缝的尖端处起裂,而是与预制裂缝平行,为典型的沿层理弱面断裂。

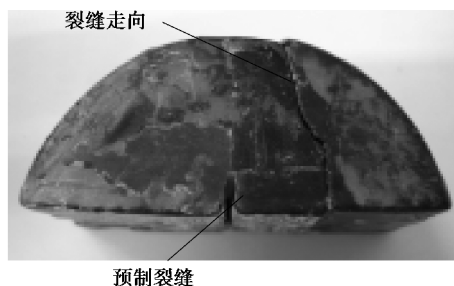


图9 一种C试件断面形态

Fig. 9 Section morphology of one type C specimen

从表4中还可得到,C型试件所测到的 K_{IC} 值较之A、B型试件要小得多,常温下分别只有A型试件 K_{IC} 值的1.6%,B型试件的2.22%。因为层理面本来就是天然的弱面,其内部粘结力较小。如果温度升高至150 °C以上,试件的整体性势必会大打折扣。本试验热加工了两个C型试件,均以破裂宣告失败,加工难度很大,假若成功,所测断裂韧度也会更小。

结合表4和图6,A、B两种试件的断裂韧度在不同的温度段不仅呈现出相同的先升高后降低的变化规律,同时也在同一温度段也表现出了不同的变化特征。A型试件与B型试件断裂韧度的峰值相差只有1.28%,但是却提前到了150 °C;A型试件的断裂韧度在150 °C之前大于B型试件,但是在200 °C左右被B型试件超过,直到400 °C以后两种层理方向的断裂韧度的值趋于一致。造成这种现象的主要原因分析如下:

在常温到150 °C,A型试件的断裂韧度均大于B型试件,这与油页岩所具有的天然层理弱面的存在有关。此温度段,油页岩中的有机质并没有大的物态变化,基质相变不明显,进行三点弯曲加载时会促使每个层理产生新的临界裂纹,由此会消耗大量的能量,起到了增韧效果。A型试件达到150 °C后,由于温度的升高,有机质会发生相变,增韧效果消失,当到达A试件的临界温度后,断裂韧度急剧下降,而B型试件由于未达到门槛温度,其断裂韧度仍会小幅升高,因此,在200 °C左右,A型试件的断裂韧度 K_{IC} 被B型试件超过。

3 结论

通过对20 °C~500 °C之间不同温度作用下不同层理方向的抚顺油页岩进行三点弯曲试验,计算并得出了各试件的断裂韧度值,分析并讨论了温度和层理对断裂韧度的影响,主要结论如下:

(1)油页岩半圆盘试件变形破坏中表现出明显的脆性特征,在线弹性阶段,载荷-位移曲线的斜率变化与温度大致呈负相关关系,在300 °C以后,斜率减小的速率迅速变大。

(2)热劣化是油页岩宏观断裂韧度发生急剧下降的根本原因。高温下,试件会沿着层理方向产生许多并未贯穿岩体的微裂隙,预制裂纹在垂直于层理方向扩张时,岩体呈现出层理及裂隙分层压实、损伤、断裂的现象。而这种现象对岩体的损伤不断累积,到一定的程度会有一个爆发,导致岩体

的承载能力迅速减弱。

(3) 抚顺油页岩的宏观断裂韧度存在各向异性。A型与B型试件断裂韧度的最大值相近,C型试件只有其最大值的1%~2%左右。A、B试件存在不同的“门槛温度” T_c ,在 T_c 之前,断裂韧度小幅升高,在 T_c 之后,断裂韧度急剧降低。A型试件门槛温度是150℃,B型试件的门槛温度300℃,这与岩体的层理方向及热加工后的矿物成分和微观结构的变化有关。

(4) A型试件的断裂韧度在150℃之前大于B型试件,在200℃左右被B型试件超过,直到400℃以后,两种层理方向的断裂韧度的值趋于一致,这与层理结构和垂直应力的夹角有关。

参考文献(References)

- [1] 薛晋霞,刘中华.油页岩电加热法原位干馏温度场分布的数值仿真[J].地下空间与工程学报,2015,11(3):669-672.(Xue Jinxia, Liu Zhonghua. Numerical Simulation of the Temperature Field Distribution of Oil Shale under In-situ Process by the Electricity Heating Method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 669-672. (in Chinese))
- [2] 李隽,汤达祯,薛华庆,等.我国油页岩原位开采可行性初探[J].西南石油大学学报,2014,36(1):59-64.(Li Juan, Tang Dazhen, Xue Huaqing, et al. Discussion of oil shale in-situ conversion process in China[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2014, 36(1): 59-64. (in Chinese))
- [3] 赵阳升,冯增朝,杨栋,等.对流加热油页岩开采油气的方法[P].中国:CN 1676870,2005.(Zhao Yangsheng, Feng Zengchao, Yang Dong, et al. Method for extracting oil and gas from oil shale by convective heating of hydrocarbon gas at high temperature[P], China: CN 1676870, 2005. (in Chinese))
- [4] 赵阳升,杨栋,关克伟,等.高温烃类气体对流加热油页岩开采油气的方法[P].中国:CN101122226,2008.(Zhao Yangsheng, Yang Dong, Guan Kewei, et al. Method for the production of oil and gas by convection heating oil shale[P]. China: CN101122226, 2008. (in Chinese))
- [5] 赵静,冯增朝,杨栋,等.基于三维CT图像的油页岩热解及内部结构变化特征分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):112-117.(Zhao Jing, Feng Zengchao, Yang Dong, et al. Study of pyrolysis and internal structural variation of oil shale based on 3D CT images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 112-117. (in Chinese))
- [6] 于永军,梁卫国,毕井龙,等.油页岩热物理特性试验与高温热破裂数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1106-1115.(Yu Yongjun, Liang Weiguo, Bi Jinglong, et al. Thermophysical experiment and numerical simulation on thermal cracking of oil shale at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1106-1115. (in Chinese))
- [7] 赵阳升,杨栋,冯增朝,等.多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1322-1328.(Zhao Yangsheng, Yang Dong, Feng Zengchao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1322-1328. (in Chinese))
- [8] 师访,高峰,杨玉贵.正交各向异性岩体裂纹扩展的扩展有限元方法研究[J].岩土力学,2014,35(4):1203-1210.(Shi Fang, Gao Feng, Yang Yugui. Application of extended finite element method to study crack propagation problems of orthotropic rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1203-1210. (in Chinese))
- [9] 刘洋,何沛田,赵明阶.基于损伤断裂理论的岩石破坏机理研究[J].地下空间与工程学报,2006(6):1076-1080.(Liu Yang, He Peitian, Zhao Mingjie. Research of Rock Failure Mechanisms Based on Damage and Fracture Theories[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006(6): 1076-1080. (in Chinese))
- [10] 吕涛,赵明阶,王焱.受压岩石断裂准则研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(5):969-974.(Lv Tao, Zhao Mingjie, Wang Yan. Research on Fracture Criterion of Compressed Rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 969-974. (in Chinese))
- [11] 邓华锋,朱敏,李建林,等.砂岩I型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究[J].岩土力学,2012,33(12):3585-3591.(Deng Huafeng, Zhu Min, Li Jianlin, et al. Study of mode I fracture toughness and its correlation with strength parameters of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3585-3591. (in Chinese))
- [12] Schmidt R A. Fracture mechanics of oil shale-unconfined fracture toughness, stress corrosion cracking, and tension test results [A]// The 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS) [C]. Golden, Colorado, 1977, 1-6.

- [13] Kataoka M, Obara Y, Kuruppu M. Estimation of Fracture Toughness of Anisotropic Rocks by Semi-Circular Bend (SCB) Tests Under Water Vapor Pressure[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(4): 1353-1367.
- [14] Funatsu T, Kuruppu M, Matsui K. Effects of temperature and confining pressure on mixed-mode (I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 67(2): 1-8.
- [15] 张盛, 王启智. 用5种圆盘试件的劈裂试验确定岩石断裂韧度[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 12-18. (Zhang Sheng, Wang Qizhi. Determination of rock fracture toughness by split test using five types of disc specimens[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 12-18. (in Chinese))
- [16] Ouchterlony F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1988, 25(2): 71-96.
- [17] ISRM Testing Commission. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(1): 57-64.
- [18] Kuruppu M D, Obara Y, Ayatollahi M R, et al. ISRM suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 267-274.
- [19] 崔洪涛. 抚顺油母页岩的综合利用开发与现状[J]. 露天采矿技术, 2011(3): 76-79. (Cui Hongtao. The comprehensive utilization and development of Fushun oil shale with current situation [J]. Opencast Mining Technology, 2011(3): 76-79. (in Chinese))
- [20] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228-237. (Heng Shuai, Yang Chunhe, Guo Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228-237. (in Chinese))
- [21] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 动力扰动下预静载硬岩断裂的增韧和减韧效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1905-1915. (Gong Fengqiang, Lu Daohui, Li Xibing, et al. Toughness increasing or decreasing effect of hard rock fracture with pre-static loading under dynamic disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1905-1915. (in Chinese))
- [22] 王靖涛, 赵爱国, 黄明昌. 花岗岩断裂韧度的高温效应[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 113-119. (Wang Jingtao, Zhao Aiguo, Huang Changming. High temperature effect of granite fracture toughness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6), 113-119. (in Chinese))
- [23] 孙强, 张志镇, 薛雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 935-942. (Sun Qiang, Zhang Zhizhen, Xue Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 935-942. (in Chinese))
- [24] 邓建华, 黄醒春, 彭结兵, 等. 膏溶角砾岩不同天然含水率情况下力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1203-1207. (Deng Jianhua, Huang Xingchun, Peng Jiebing, et al. Mechanical properties of gypsum breccia with different water contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1203-1207. (in Chinese))
- [25] 钱家麟, 尹亮. 油页岩——石油的补充能源[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008. (Qian Jialin, Yin Liang. Oil shale——The supply resource for petroleum [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008. (in Chinese))
- [26] Sun Y H, Bai F T, Liu B H, et al. Characterization of the oil shale products derived via topochemical method [J]. Fuel, 2014, 115(1): 338-346.
- [27] 康志勤. 油页岩热解特性及原位注热开采油气的模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. (Kang Zhiqin. The pyrolysis characteristics and In-situ hot drive simulation research that exploit oil-gas of oil Shale [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese))