

油页岩试样在循环冻融条件下破裂实验研究

龙翔, 陈晨, 彭炜, 张佳明, 张云峰, 孙莹莹

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 由于油页岩原位破碎研究对于油页岩传热效率的提高具有重要的意义, 提出了一种油页岩原位破碎室内研究方法, 即循环冻融法。本文主要论述了其实验机理、实验台的设计、实验岩样的制备, 实验数据的采集与分析等。此次循环冻融实验主要由工程模拟单孔时循环冻融法研究油页岩试样裂缝扩展情况, 根据设计要求完成 2 组试样的制备以及相关实验台的设计, 并采用了超声波检测的手段对完成每一实验阶段油页岩试样进行检测, 为油页岩原位破碎研究提供一种可行的实验方案, 对油页岩传热效率的研究具有一定的参考意义。

关键词: 油页岩; 原位破碎; 循环冻融; 超声波; 传热效率

中图分类号: P618.12; TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)03-0019-04

Experimental Study on Oil Shale Samples Fragmentation under Freezing-thawing Cycle/LONG Xiang, CHEN Chen, PENG Wei, ZHANG Jia-ming, ZHANG Yun-feng, SUN Ying-ying (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: In view of the important significance of the study on oil shale in-situ fragmentation for improving the heat transfer efficiency, an indoor research method of oil shale fragmentation was put forward, namely freezing-thawing cycle method. The experimental mechanism, experiment table design, sample preparation, experimental data acquisition and analysis etc. were discussed in this paper. The freezing-thawing cycle experiment was carried out on oil shale crack propagation in single hole mainly by engineering simulation. According to the design requirements, 2 groups of specimen were prepared and the experiment table was established. Simultaneously, the used oil shale samples in each experiment stage were detected by ultrasonic detection method, which provides a feasible experiment scheme for oil shale in-situ fragmentation research and can be taken as reference to the heat transfer efficiency of oil shale research.

Key words: oil shale; in-situ fragmentation; freezing-thawing cycle; ultrasonic; heat transfer efficiency

0 引言

随着全球经济发展, 对能源需求日益增加, 作为非常规油气资源的油页岩, 由于其储藏量极为丰富以及具有较高的开发的可行性, 已被列为 21 世纪非常重要的能源接替品, 它与煤、石油、天然气一样都为不可再生化石能源^[1]。在近 200 年的开发利用中, 其资源状况、主要性质、开采技术及应用研究方面都积累了不少经验。

油页岩以前主要的采取方式为露天以及地下巷道开采, 露天开采需要占用大量耕地, 对环境破坏大; 地下巷道开采遇到薄矿层时, 开采成本高。20 世纪 80 年代以来, 世界各国都在研究先进的开采技术, 油页岩原位开采技术就是其中之一^[2-4]。其原理为: 通过加热地下油页岩层, 使其直接在地下原位裂解, 并产生页岩气, 最后再由生产井将页岩气开采

出来。因为油页岩本身是热的不良导体, 且在自然状态下, 天然的油页岩渗透性和孔隙率都极低, 所以在目前试验中, 无论是电加热还是流体加热的加热工艺, 其传热效率都不高, 因此开采率受到限制。鉴于此, 吉林大学的油页岩创新基地团队提出在油页岩加热之前增加一个油页岩原位破碎的过程, 增加油页岩层的微裂隙, 将大体积的油页岩破碎成小体积, 以增加油页岩的传热效率。我们团队旨在研究油页岩试样在循环冻融条件下损伤破碎特性。首先研制油页岩冻融试验台, 以循环流体为介质, 与油页岩试样进行热量传递, 利用超声波检测等手段对油页岩试样进行及时监测, 分析其在冻结与融解过程中内部裂隙的发育情况。

收稿日期: 2015-05-07; 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新项目“油页岩钻孔水力开采关键技术研究”(编号: OSP-04-01)

作者简介: 龙翔, 男, 苗族, 1991 年生, 吉林大学在读硕士研究生, 地质工程专业, 从事地质工程钻探方向的研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, 1005243639@qq.com。

1 实验理论原理

1.1 循环冻融法

岩土界对于岩石的循环冻融法损伤扩展机理已经进行了深入研究,赖远明^[5]等通过CT手段研究了大坂山隧道岩石的冻融循环条件下的物理力学特征,得出了冻融使用试样的强度、密度和CT均值下降的结论,说明冻融循环使岩石试样的内外形成了裂缝的扩展,产生了损伤。岩土界对页岩的冻融损伤研究表明^[6],页岩的冻融损伤劣化过程为:局部原生缺陷存在→水分向这些缺陷渗透→裂隙冰的冻胀→冻胀作用于缺陷表面→裂缝不断扩展、贯通。

迄今为止,循环冻融法还没有对油页岩进行实验研究,但对循环冻融机理研究表明^[7-9],在低温冻结过程中,试样内部孔隙水逐渐冻结,造成大约9%的岩石体积膨胀率,因而对试样内部颗粒产生一定的冻胀力,此时产生的冻胀力对一些胶结强度比较弱的岩石颗粒具有破坏作用,因此会使岩石的内部出现局部损伤;在加热融解过程中,岩石内部在冻结过程中被冻结水发生融解,这一过程伴随的是冻结应力释放和水分转移;随着冻融循环次数的逐渐增加,一系列局部损伤区域逐渐联通成为岩石内部裂缝,岩石的强度与刚度不断降低,最终使岩石块体产生断裂、剥落。此外,在循环冻融转换时,强烈的辐射直接作用于岩石表面,可使岩石表面的温度快速升高或降低,在较短时间内使岩石的内部产生较大的温差,产生相应的热应力,从而辅助对岩石结构的破坏。所以,从机理上以及岩土界对循环冻融的实验研究表明,循环冻融法破碎油页岩是可行的。

2 冻融实验设计

本实验设计主要是工程模拟实验,工程模拟实验主要是模拟单孔时循环冻融法研究油页岩试样裂缝扩展情况,为实际开采作出模拟。

2.1 实验设备选择

本实验采用气冻水融,设计实验温度为 ± 40 ℃,经过对比分析,苏州东华试验仪器有限公司TSD-300型冻融试验机程序自动化控制符合要求。

2.2 制样

本实验主要是为了模拟实际开采情况,同时方便进行声波测试、温度测试等,要求具有一块完整、平整的大的岩样。初始设计大小为250 mm × 250

mm × 250 mm,但在实际加工过程中,由于油页岩风化影响较为严重,且加工难度较大,最后岩样尺寸为370 mm × 120 mm × 100 mm,如图1所示,经过模拟钻孔,该岩样尚能满足实验要求,本实验油页岩试样均产于吉林省农安县。



图1 油页岩试样

2.3 实验台设计

本实验主要模拟单孔时循环冻融法的油页岩裂纹扩展情况,整个实验台如图2所示。

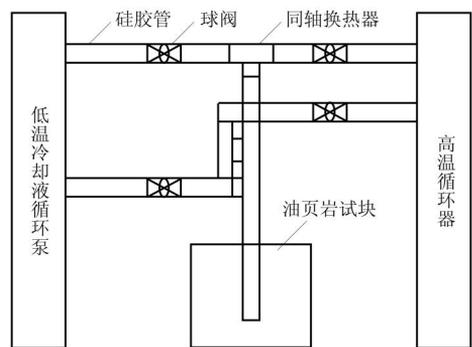


图2 冻融实验台示意图

该实验台主要包括设备仪器的选择和换热器的设计。实验设计要求正常冷热交替循环温度达到40℃,可持续制冷,恒温,最后确定低温冷却循环装置为BILON-T-505型低温冷却循环泵,高温循环器为GX-2012型高温循环器。换热器是由38 mm × 2.5 mm 无缝钢管的外管和25 mm × 2 mm HOPE管的内管组成,如图3所示。



图3 换热器

3 冻融实验过程及结果分析

3.1 实验步骤

(1) 在岩样几何中心位置钻凿出一个直径略大于换热器的孔洞,再以此孔为中心,左右各钻凿出 8 个间距为 1 cm 大小与传感器大小相仿的小孔。

(2) 将此岩样放入真空箱体(非直接接触箱底,放置在一块塑料垫块上以减少温度传递到外界)连接换热器以及传感器,关闭箱体尽量保证真空箱处于真空状态。

(3) 在低温冷却泵内加入 98% 浓度酒精设置最低温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温循环器内装加清水设置最高温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,打开各仪器开始冻融循环。

(4) 循环周期设定为 9 h,其中加热冷却各 4 h(经实验发现温度转换到达稳定需要大约 1 h),总共进行 20 个循环,实验全程由温度传感器监测试样各孔洞温度,如图 4(a)所示,并记录温度变换时(由高温切换为低温循环或由低温切换为高温循环)的稳定情况,如图 4(b)所示,以便对温度进行即时的调整和控制。



(a) 温度传感器监测试样温度



(b) 试样在高温循环稳定曲线

图 4 实验过程温度监测

(5) 在每次循环中利用传感器传输的数据记录每个小孔的温度,并建立温度与时间的变换关系坐标。

(6) 每完成 4 次循环利用 ZBL-U520 型非金属超声检测仪进行声波检测并记录数据,如图 5 所示,每次检测选择 3 个不同的测点,每个测点都选择在试样较宽的一侧,每个测点相距 5 cm。

3.2 实验结果



图 5 进行超声波检测

图 6 为经历冻融循环前后岩样的对比照片,声波检测结果见表 1。



(a) 实验前试样



(b) 实验后试样



(c) 实验后试样局部放大

图 6 实验前后岩样对比照片

3.3 实验结果分析

(1) 经过 10 次循环冻融后,岩样表面出现明显裂纹,且有细小岩块掉落。

(2) 经过 20 次循环冻融后,岩样表面出现的裂纹扩大明显,有大体积岩体掉落,且出现变形的情况。

(3) 声波检测数据显示,随着冻融次数的增加,不同测点的声波传播时长都有所增加,而其传播速度都有所降低,由岩石的完整性系数 $K = (V_{pm}/V_{pr})^2$ (其中 V_{pm} 为声波在经循环冻融后的岩体中的传播速度, V_{pr} 为声波在冻融前的完整岩样中的传播速度^[10]),

表1 油页岩5次声波测试结果

测点号	距/cm	第一次测试			第二次测试			第三次测试			第四次测试			第五次测试		
		声时/ μs	波速/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	完整性系数K												
1	12.5	7.8	1.6	0.25	12.9	1.0	0.25	12.9	0.7	0.19	22.3	0.6	0.14	26.0	0.5	0.10
2	12.5	8.3	1.5	0.22	16.8	0.7	0.22	20.8	0.6	0.16	26.3	0.5	0.11	30.3	0.4	0.07
3	12.5	7.6	1.6	0.25	16.6	0.8	0.25	26.8	0.5	0.10	30.0	0.4	0.06	44.2	0.3	0.04

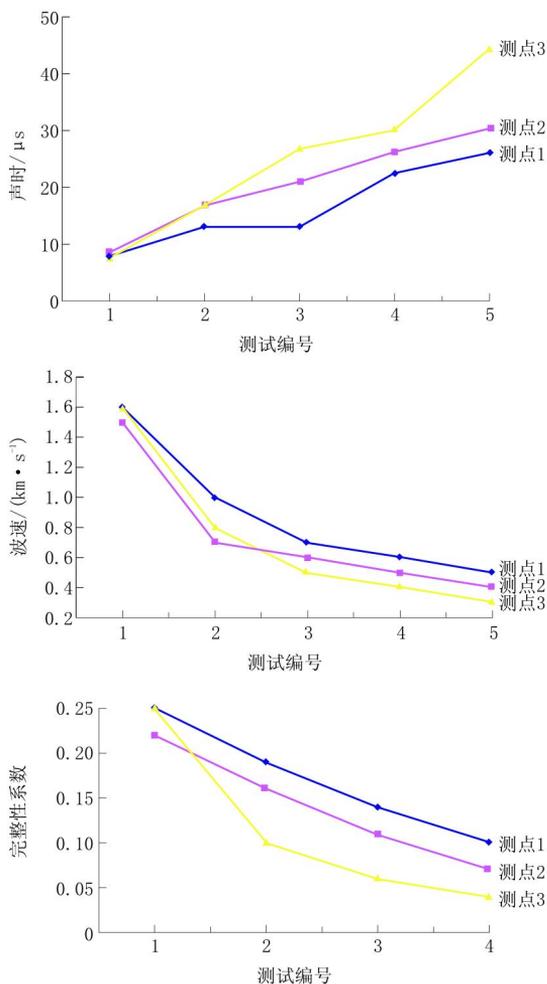


图7 5次实验结果的数据分析

通过5组实验得4组完整性系数数据,可知试样的完整性系数逐渐降低,如图7(c)所示,故其内部受到明显破坏,且出现大量裂隙。

(4)随着循环次数的增加裂纹逐渐增大,且有沿层理方向发展的趋势,并且经测定发现,油页岩试样的总质量有所增加,但增加量很小。

4 结语

(1)此次油页岩破碎实验,其关键在于通过循环冻融等方法研究其内部微小裂缝的产生、扩展机理,直至其破碎。循环冻融油页岩原位破碎研究对

于增加传热效率具有重要意义。

(2)根据实验要求制好了油页岩试样,并根据温度要求选择了适合的循环机。

(3)循环冻融油页岩原位破碎研究,从机理上是可行的,从而完成了实验台的实验,并对实验数据进行分析。

(4)循环冻融实验目前根据其机理完成了对实验台的调试、运行和数据的采集以及分析。

(5)油页岩在冻融循环条件下,破碎效果明显,说明这种方法是可行的。

目前实验所采用的循环温度、时长等参数对试样的冻融效果较为良好,但由于实验设备的限制,未能进行多组实验进行比较,下一步将在此基础上,通过设置多组实验,在温度与时长上进行变化,更好地分析研究通过循环冻融法的油页岩微观裂缝扩展情况,找到满足实际开采中所需的具体参数,为油页岩原位破碎提供实验数据支持,为油页岩的原位开采提供新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 王红岩,刘振文,宁宁. 油页岩资源及开发技术[M]. 北京:石油工业出版社,2010.
- [2] 牛继辉,陈殿义. 国外油页岩的地下转化开采方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):1027-1030.
- [3] 柳蓉,刘招君. 国内外油页岩资源现状及综合开发潜力分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(6):892-898.
- [4] 冉峰,冉书明,王福杰. 内蒙古中部油页岩资源特征及发展前景——以乌拉特后旗为例[J]. 中国国土资源经济,2012,25(8):31-32,46,55.
- [5] 赖远明,吴紫汪,朱元林,等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的CT分析[J]. 冰川冻土,2000,22(3):206-210.
- [6] 张慧梅,杨更社. 岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):140-145,151.
- [7] 蒋立浩,陈有亮,刘明亮. 高低温冻融循环条件下花岗岩力学性能试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(S2):319-323.
- [8] 王慎余,许家朋,王振海. 我国油页岩资源开发利用状况及发展对策[J]. 中国地质经济,1992,(5):18-21.
- [9] 陈晨,张祖培,王森. 吉林油页岩开采的新模式[J]. 中国矿业,2007,16(5):55-57.
- [10] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.