

黔西松河井田煤层气注入/压降测试

唐代学¹, 娄毅², 冯运富¹, 邵林杰², 阳富芹²

1. 贵州省地质矿产勘查开发局 117 地质大队 贵州贵阳 550018

2. 贵州盘江煤层气开发利用有限责任公司 贵州贵阳 550081

通讯作者: Email: 282639485@qq.com

项目支持: 贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(黔地矿科合[2020]24号)

引用: 唐代学, 娄毅, 冯运富, 等. 黔西松河井田煤层气注入/压降测试[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 74-78.

Cite: TANG Daixue, LOU Yi, FENG Yunfu, et al. Coalbed methane injection/pressure drop test in Songhe mine field, western Guizhou [J]. Well Testing, 2022, 31(1): 74-78.

摘要 黔西松河井田主采煤层注入/压降测试时, 施工设计、现场操作不规范等因素导致测试分析结果与真实值存在偏差, 影响煤层气储层评价的客观性。以 12[#]煤层为例, 介绍了松河井田注入/压降测试、原地应力测试设备、解释方法及施工过程, 对注入/压降、原地应力测试结果进行分析, 获取了储层物性特征及地应力参数。结果表明, 黔西松河井田 12[#]煤层储层压力、破裂压力及闭合压力梯度均为正常压力系统, 拟合计算渗透率 0.072 5 mD, 为低渗储层; 通过分析井筒储集系数认为, 封隔器失效或井下关井失败是造成该煤层测试曲线失真的主要原因, 同时封隔段内的围岩也可能对测试结果造成偏差。该分析方法为后续煤层气勘探开发工作提供了思路。

关键词 松河井田; 煤层气; 注入/压降测试; 原地应力测试; 储层物性; 效果评价; 封隔器; 围岩

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.013

Coalbed methane injection/pressure drop test in Songhe mine field, western Guizhou

TANG Daixue¹, LOU Yi², FENG Yunfu¹, SHAO Linjie², YANG Fuqin²

1. 117 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang, Guizhou 550018, China

2. Guizhou Panjiang Coalbed Methane Development and Utilization Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China

Abstract: In order to obtain the physical property characteristics and in-situ stress parameters of the main coal seam in Songhe minefield, West Guizhou, and provide the basis for the subsequent exploration and development of coalbed methane, taking 12[#] coal seam as an example, the equipment, interpretation method and construction process of injection/pressure drop test and in-situ stress test adopted in Songhe mine field are introduced. The test results are analyzed, and the coal seam permeability, reservoir pressure, skin factor and investigation radius are obtained and reservoir temperature, fracture pressure and closure pressure. The reservoir pressure, fracture pressure and closure pressure gradient of 12[#] coal seam are normal pressure system strata in this area, and the permeability of 12[#] coal seam is 0.072 5 mD is a low-permeability reservoir; through the analysis of wellbore storage coefficient, the test results of 12[#] coal seam of the test target coal seam may be distorted due to packer failure or downhole shut in failure, human factors, engineering factors, coal seam thickness, coal structure, surrounding rock and other reasons, which need to be further identified to eliminate interference for subsequent CBM exploration and development work.

Keywords: Songhe coalfield; injection/pressure drop test; in situ stress testing; impact assessment; permeability; wellbore storage coefficient

煤作为储层, 具有低压、低渗的特征; 经过多年的实践, 注入/压降试井是一种单井压力瞬变测试^[1-2], 适用于高、低压储层, 是我国煤层气井测试中最常用的一种试井方法, 也是认识煤储层, 进行储层评价和生产动态监测, 以及评估完井效率的重要手段^[3-4]。在目的煤层注入/压降测试中, 地层压

力高于气体解吸压力, 煤层割理孔隙始终被水饱和, 呈单相流状态; 由于煤层基质渗透率远远小于煤层割理渗透率, 流体只在割理中流动, 测试所反映的渗透率为以割理渗透为主的综合渗透率^[5-6]。

但由于施工及设计、现场操作不规范等人为因素的影响^[7-9], 使测试分析结果与真实值有一定

差距。试井成果质量参差不齐,影响了煤层气储层评价的客观性。为此,需对测试资料及结果进行分析判断,判断获取的渗透率等煤储层参数是否正确,为矿区的煤层气勘探开发提供可靠的参数依据。

1 注入/压降测试

采用自下而上的裸眼井双封隔器测试技术开展注入/压降测试。主要试井设备包括:注入泵、裸眼封隔器、井下关井工具,以及 Golden Canada Ltd. 生产的 DDI-T-150 存储式电子压力计等。其中压力计采用美国 OMEGA WELL 高温电子压力计,容量可存储 100 万组数据(时间、压力、温度),采样速度最小 1 s,最大 1 h,可任意编程,标准压力范围 0~69 MPa,系统压力精度小于 0.025%,作业温度范围 -25~150 ℃,压力分辨率为全量程的 0.000 3%,温度分辨率 0.5 ℃。主要性能有:封隔器坐封、解封灵活方便;采用井下关井方式,可以有效降低井筒储集效应对测试数据分析的影响^[10-11];采用钢丝绞车起下压力计,现场录取采集数据灵活、方便。

1.1 参数选择

在进行资料分析时,有一些基本参数如煤的割理孔隙度、流体压缩系数、流体黏度、流体体积系数及综合压缩系数等高压物性参数,通过产量历史匹配及实验室测定得到^[12]。由于松河井田以往的储层参数比较少,本文所涉及的这些高压物性参数参考六盘水地区以往使用经验及相邻矿区煤矿勘探数据给出。

注入、关井时间,最大注入压力及注入排量的确定依据《煤层气注入/压降试井分析方法》(GB/T 24504-2009)执行;对渗透性好的煤层注入时间和关井可是适当缩短,反之则需延长注入和关井时间;最大注入压力以不压破煤层为前提;注入排量依据地层具体情况选择,最小排量时使地层中具有足够的压力变化值,最大排量使最大注入压力在设计注入时间内低于煤层破裂压力^[13-14];

按照规范要求,现场测试要求注入时的影响半径不小于 10 m,注入时间大于井筒储集时间,关井时间不小于注入时间的 2 倍。

1.2 数据处理与解释

测试解释采用法国 KAPPA 石油服务公司 Saphir 3.20 试井解析软件;煤层测试的压力数据采用主要采用半对数(霍纳)曲线、双对数(诊断)曲线

拟合分析方法,并用压降压力曲线拟合进行检验;最小原地应力即裂缝的闭合压力采用破裂、闭合效果好的循环(破裂迹象不明显),通过时间平方根法分析,并用双对数法进行验证,以确保分析的储层参数结果真实可靠。

2 测试结果分析

松河井田位于贵州省西部盘州市境内,构造上位于土城向斜北翼;2018-2020 年,在该区施工多口煤层气参数井及排采试验井,并对其中参数井共进行 8 层次的注入/压降及原地应力测试。本文以矿区东部某参数井 12#煤层为例,分析其测试结果;该井深 713.15 m,根据测井资料,测试煤层埋深为 440.80~443.85 m,煤层有效厚度为 2.4 m,煤层顶板岩性为粉砂质泥岩,底板岩性为粉砂质泥岩。上封隔器胶筒底部位置为 437.15 m,下封隔器胶筒顶部位置为 445.15 m,压力点深度为 434.35 m;注入、压降测试过程中,累计注入时间达到 720 min,关井压降恢复时间达到 1 520 min,总注水量 16.1 L,平均注入速率 0.032 2 m³/d,地面最大注入压力 3.0 MPa;原地应力测试注入四个循环,用时 160 min,四个循环的关井时间分别为 20 min、30 min、30 min、40 min,地面最大注入压力分别为 6.0 MPa、7.2 MPa、7.8 MPa、8.0 MPa。

2.1 注入/压降测试结果分析

松河井田 12#煤层注入/压降测试分析选用参数如下:煤层有效厚度 2.40 m,孔隙度 0.02,流体黏度 1.00 mPa·s,流体地层体积系数 1.00,综合压缩系数 3.67×10^{-2} MPa⁻¹,井筒半径 48 mm,注入时间 720 min,关井 1 520 min,关井瞬时压力 3.0 MPa,总注水量 16.1 L,平均注水速率 0.032 2 m³/d;注入/压降测试及分析结果如图 1~3 所示。

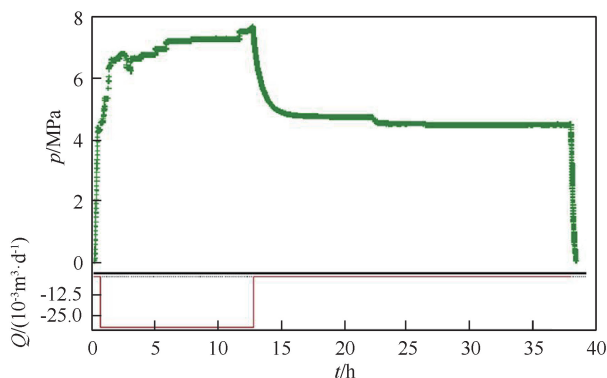


图1 注入/压降压力与流量图

Fig. 1 Diagram of the injection/pressure drop and flow

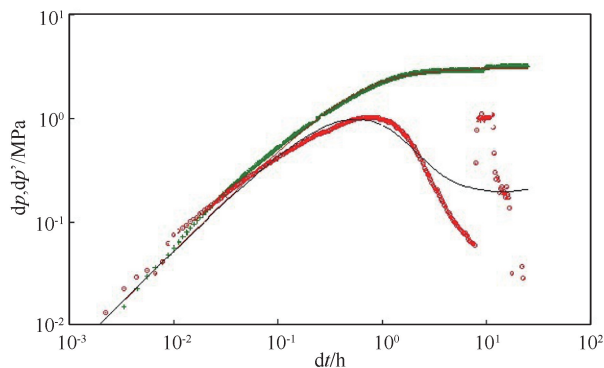


图2 注入/压降双对数(诊断)曲线拟合分析图
Fig.2 Fitting analysis diagram of injection/pressure drop double logarithmic (diagnostic) curve

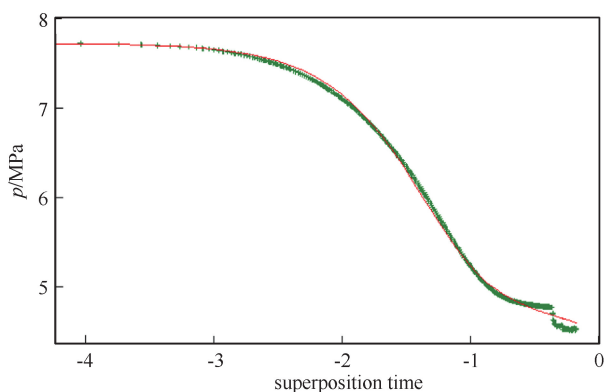


图3 注入/压降半对数(霍纳)曲线拟合分析图
Fig.3 Fitting analysis diagram of injection/pressure drop semi-logarithm (Horner) curve

由图1可见,注入阶段前期为调整排量阶段,其他阶段较为稳定。由于采用了平均注入速率,只有一个数值与注入阶段压力的变化趋势不符,显示测试计量精度不足;关井恢复前期,阶段压力恢复正常,曲线光滑,压力变化平稳,受注入期排量变化的干扰较小,压降曲线的分析最具代表性^[15],测试过程中井下关井工具和封隔器都正常工作;关井恢复约600 min后,压力降落存在一个明显的台阶,进而导致图2、图3曲线异常。由于注入总量少、测试影响半径有限,600 min以后的数据已非煤层渗流特征反映,不能用于储层参数定量解释。初步推测,该台阶为测试工艺方法的问题,比如裸眼封隔层不严引起的层间窜流,或井筒中液面下降所致。

图2可以看出,初始续流段数据少,过渡阶段峰值不高,说明其表皮系数不大;在井筒储集过后,曲线下掉,波动较大,说明煤储层非均质性强;后期导数曲线保持上升趋势,未与双对数曲线交叉,分析是由于煤层储层煤质较硬,构造简单,井筒附近裂缝不发育所致。分析测试结果,储层压力4.61

MPa,储层压力梯度1.04 MPa/100 m;渗透率0.072 5 mD,表皮系数-5.11,调查半径7.73 m,储层温度29.44 ℃;图3中实测曲线与理论曲线拟合较好,说明测试结果是可靠的。

2.2 原地应力测试结果分析

12#煤原地应力测试共进行了4个循环,注入时间分别为20 min、30 min、30 min、40 min,图4原地应力测试压力曲线完整可靠,选取其中破裂、闭合效果好的第一循环(破裂迹象不明显)(图5),通过时间平方根法分析,12#煤储层破裂压力10.35 MPa,破裂压力梯度2.34 MPa/100 m;闭合压力8.45 MPa,闭合压力梯度1.91 MPa/100 m。

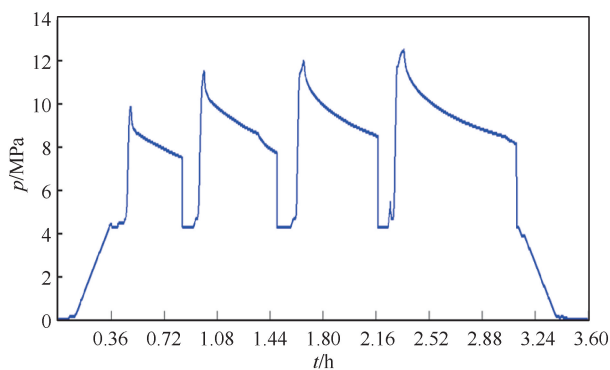


图4 原地应力测试压力曲线图
Fig.4 In-suit stress test pressure curve

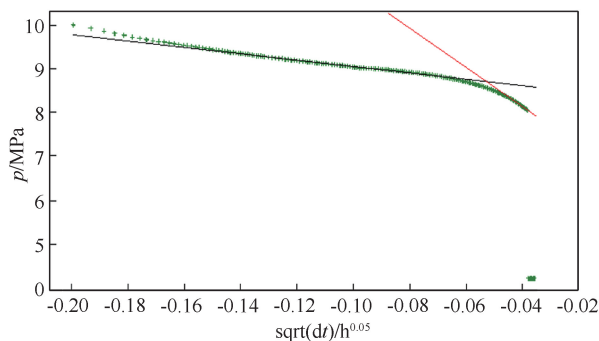


图5 原地应力测试第一循环分析图
Fig.5 First cycle analysis diagram of in-situ stress test

2.3 参数结果评价

通过目的煤层进行注入/压降试井及原地应力测试,获取了渗透率、储层压力、表皮系数、调查半径、储层温度、破裂压力、闭合压力等煤储层参数。

(1) 12#煤储层经注入/压降测试分析,测试点压力4.53 MPa,压力梯度值为1.04 MPa/100 m,换算成煤层中部(441.96 m)储层压力为4.61 MPa。储层压力在该区处于正常状态,在关井时间足够长的情况下,测试得到的地层压力将越接近真实煤储层压力。

(2)对关井压降数据进行处理分析,选用径向复合地质模型进行典型曲线拟合,拟合计算得到12#煤层渗透率为0.072 5 mD,为低渗透储层;表皮系数为-5.11,储层未受到污染,地层已打开完善;测试采用井底关井技术,井筒储集效应较弱,降低了地层关井压力的影响,井筒储集系数为 $4.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{MPa}$;在井筒储集过后,曲线下掉,波动较大,煤储层非均质性强。

(3)12#煤层现场进行了4个循环的原地应力测试,应用时间平方根法对12#煤层第一循环的原地应力计算,其闭合压力梯度为1.91 MPa/100 m;破裂压力梯度为2.34 MPa/100 m,其破裂压力及闭合压力梯度都为正常范围内。

3 坐封及关井效果评价

该井采用自下而上的裸眼井双封隔器及井底关井测试技术,封隔器成功坐封是试井成功的关键;一方面坐封失败会导致目的煤层与上、下部地层连通,测试结果失真;另一方面判断封隔器是否成功坐封,可以使用井筒储集系数。在测试时,井筒充满了水,为充满单相流体的井,根据井筒储集系数可用流体压缩系数来表示^[16-17],即

$$C_1 = \Delta V / \Delta p = C_0 V_w \quad (1)$$

式中: C_1 为流体压缩系数, m^3/MPa ; V_w 为井筒体积, m^3 。

(1)式中, C 代表井筒的体积,在采用井下关井测试时,井筒储集系数小于 C 值,若封隔器坐封失败,井筒储集系数大于 C 值。

12#煤层测试时,只考虑油管影响,上、下封隔器间井筒体积 $0.259 3 \text{ m}^3$,水压缩系数为 $0.000 444 \text{ MPa}^{-1}$, (1)式计算井储系数应为 $0.000 115 1 \text{ m}^3/\text{MPa}$,测试得到井储系数为 $0.000 443 \text{ m}^3/\text{MPa}$,说明12#煤层在测试时可能封隔器失效或井下关井失败。

由于工程因素和煤层厚度、煤体结构较差等原因,使得井壁坍塌,井筒体积增大,井筒体积估算困难,这就需要综合其他方法判断封隔器密封及井下关井是否成功。

同时煤层顶底板可能因工程因素造成井壁不完整会损坏封隔器,封隔器不得不距离目的煤层有一定距离,测试结果则受地层影响较大。测试结果为封隔器坐封段内的综合反映,而不是目的煤层自身的测试结果。在12#煤层实际测试过程中,因煤

层直接顶底板不具备坐封条件,坐封段内有3.65 m、1.30 m的顶底板围岩,测试结果与真实值有一定差距。当然,围岩越致密,孔隙度、渗透率越小,裂隙不发育,则对测试结果影响越小。

煤层结构(夹矸层数、岩性)及围岩对测试结果的影响也较大,如12#煤含有约50 cm的泥岩夹矸;同时因钻井施工原因,测试煤层上下段有部分井壁不完整,有垮塌及缩径现象,造成封隔器不能尽可能的靠近煤层,故其测试结果反映的是煤层和泥岩夹矸、围岩的综合结果,而非净煤层测试结果。

此外如煤体结构、构造、解释模型的选择、井孔稳定性、钻井液性能、设备注入能力、人员操作素质等都对测试结果造成较大的影响。

4 结论

(1)通过注入/降压测试,获取了12#煤层渗透率、储层压力、表皮系数、调查半径、储层温度、破裂压力、闭合压力等煤储层参数。储层压力、破裂压力及闭合压力梯度在该区都为正常压力系统地层,拟合计算得到渗透率为0.072 5 mD,为低渗透储层。

(2)通过分析井筒储集系数,12#煤层可能在测试时封隔器失效或井下关井失败;同时封隔段内的围岩也对测试结果造成偏差,还需进一步分析查明原因,为矿区今后煤层气勘探开发工作排除干扰。

致谢:感谢贵州省地质矿产勘查开发局117地质大队及贵州盘江煤层气开发利用有限责任公司同意本文公开发表;感谢重庆一三六地质队现场测试及解释人员提供的必要帮助。

参考文献

- [1] 李鑫,景兴鹏. 基于注入压降法的煤层气井裸眼和套管射孔后测试试验研究[J]. 煤炭工程,2014,46(11):89-91,95.
LI Xin, JING Xingpeng. Experiment study on test of coal bed met hane open wel land post perforated casing based on injection pressure drop met hod [J]. Coal Engineering, 2014,46(11):89-91,95.
- [2] 房国平,杨松. 煤层气测试工艺技术优化及应用[J]. 油气藏评价与开发,2013,3(5):90-93.
FANG Guoping, YANG Song. Optimization and application of CBM testing technology [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013,3(5):90-93.
- [3] 安小平,李相方,程时清,等. 不同方法获取渗透率的对比分析[J]. 油气井测试,2005,14(5):14-17.
AN Xiaoping, LI Xiangfang, Cheng Shiqing, et al. Comparative analysis of permeability obtained by different methods [J]. Well Testing, 2005,14(5):14-17.
- [4] 杨新辉. 煤层气试井 DST 法与注入压降法对比分析

- [J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(2): 17-20.
- YANG Xinhui. Comparative analysis of DST method and injection pressure drop method for coalbed methane well testing [J]. Coal Geology Of China, 2015, 27(2): 17-20.
- [5] 王衍, 马俯波. 哈参一井煤层气测试技术[J]. 油气井测试, 2003, 12(2): 17-20.
- WANG Yan, MA Fubo. Coalbed methane testing technology in Hasan No.1 Well [J]. Well Testing, 2003, 12(2): 17-20.
- [6] 孟召平, 田永东, 李国富. 沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理[J]. 自然科学进展, 2009, 19(10): 1142-1148.
- MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu. Relationship and control mechanism between permeability and geostress of coal reservoirs in southern Qinshui basin [J]. Advances in Natural Science, 2009, 19(10): 1142-1148.
- [7] 方师跃, 许哲, 何建琴, 等. 煤层气井注入/压降试井研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 49(6): 227-232.
- FANG Shiyue, XU Zhe, HE Jianqin, et al. Study progress of injection/pressure drop test well for coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology, 2018, 49(6): 227-232.
- [8] 赵福平. 贵州省煤层气试井质量影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 126-129.
- ZHAO Fuping. Analysis on factors affected to quality of coalbed methane trial well in Guizhou province [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 126-129.
- [9] 罗政. 贵州煤层气试井解释基础参数优选[J]. 油气井测试, 2018, 2(1): 68-72.
- LUO Zheng. Optimization of basic parameters for Guizhou coalbed gas well test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 2(1): 68-72.
- [10] 贾自力, 周红燕, 满林. 试井分析中的井筒效应问题研究[J]. 油气井测试, 2010, 19(2): 12-14, 18.
- JIA Zili, ZHOU Hongyan, MAN Lin. Study on wellbore effect in well test analysis [J]. Well Testing, 2010, 19(2): 12-14, 18.
- [11] 付建民, 冯卫华, 马长亮, 等. 渤海油田井下关井测压工艺技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 61-65.
- FU Jianmin, FENG Weihua, MA Changliang, et al. Downhole shutin pressure measuring technology in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 61-65.
- [12] 代志旭, 吕有厂. 煤层气参数井地应力测试及其分布规律研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(12): 58-60.
- DAI Zhixu, LYU Youchang. Study on in-situ stress measurement and distribution law of CBM parameter wells [J]. Coal Engineering, 2013, 45(12): 58-60.
- [13] 杨新辉, 王晨, 贺娟. 控制注入/压降试井测试时间因素分析[J]. 油气井测试, 2012, 21(5): 29-31.
- YANG Xinhui, WANG Chen, HE Juan. Time factor analysis of controlled injection/pressure drop test [J]. Well Testing, 2012, 21(5): 29-31.
- [14] 张理丽, 庄维礼, 黄中会, 等. 基于APR测试工具的注入/压降测试技术[J]. 油气井测试, 2010, 19(5): 27-29, 32.
- ZHANG Lili, ZHUANG Weili, HUANG Zhonghui, et al. Injection/pressure drop testing technology based on APR testing tool [J]. Well Testing, 2010, 19(5): 27-29, 32.
- [15] 靳黎明, 郭海英, 曹翠. 煤层气注入/压降测试方法及其在煤储层评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 282-284.
- JIN Liming, GUO Haiying, CAO Cui. Coalbed methane injection/pressure drop testing method and its use in coal reservoir evaluation [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 282-284.
- [16] 张裕虎, 曲鹏程. 注入/压降试井方法在煤层气井中的应用及其结果分析[J]. 中国煤层气, 2013, 10(5): 34-39.
- ZHANG Yuhu, QU Pengcheng. Injection/pressure drop testing technology based on APR testing tool [J]. China Coalbed Methane, 2013, 10(5): 34-39.
- [17] 安杰, 柳光伟. 煤层气储层注入/压降试井可靠性判别方法探讨[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(2): 24-26, 70.
- AN Jie, LIU Guangwei. Probe into CBM reservoir injection/pressure drop test identification method [J]. Coal Geology of China, 2013, 25(2): 24-26, 70.

编辑 穆立婷

第一作者简介:唐代学,男,1986年出生,硕士,工程师,2010年毕业于中国地质大学(北京)石油工程专业,2020年获贵州大学地质工程硕士学位,现主要从事煤与煤层气勘探开发工作。电话:15599125057;Email:282639485@qq.com。通信地址:贵州省贵阳市乌当区新添大道北段165号贵州地矿117地质大队,邮政编码:550018。