

文章编号: 1000-8241(2017)07-0769-06

盐穴储气库气卤界面光纤式检测

付亚平 陈加松 李建君

中国石油西气东输管道公司储气库项目部

摘要: 盐穴储气库从建成到投产运行需要经历注气排卤阶段,气卤界面检测与控制是注气排卤的关键技术,现有检测方法检测成本高、不能连续检测,为此提出光纤式界面检测技术。该技术利用分布式光纤测试技术,通过井下光纤测量温度变化,根据温度曲线拐点判断气卤界面的位置,操作简单、探测范围广、监测成本低、能连续测量井下气卤界面位置。将该方法应用于工程实际,并与现有检测方法进行对比和评估,效果良好,其不仅可应用于盐穴储气库注气排卤阶段,还可在氮气阻溶、天然气阻溶造腔过程中使用,具有广阔的应用前景。(图6,表1,参22)

关键词: 盐穴储气库; 注气排卤; 光纤; 气卤界面; 连续检测

中图分类号: TE972

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.07.004

网络出版时间: 2017-3-7 9:26:15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170307.0926.002.html>

Optical fiber measurement on gas-brine interface in salt-cavern gas storage

FU Yaping, CHEN Jiasong, LI Jianjun

Gas Storage Project Department, PetroChina West-East Gas Pipeline Company.

Abstract: Gas injection and brine discharge is an indispensable stage for the construction and operation of salt-cavern gas storage, and the measurement and control of gas-brine interface is the key technology of gas injection and brine discharge. The existing measurement methods cannot do the measurement continuously and their cost is high. To solve these problems, an optical fiber interface measurement technique was developed in this paper. The distributed optical fiber measurement technique is adopted in this technology. The temperature is measured with the downhole optical fiber, and the location of the gas-brine interface is judged according to the inflection point of the temperature curve. This method is advantageous with simple operation, wide detection range, low monitoring cost and continuous measurement. In the practical engineering application, this optical fiber interface measurement technique is proved reliable when compared and evaluated with the existing measurement methods. It can be used not only in the gas injection and brine discharge of salt-cavern gas storage, but also in the process of solution mining under nitrogen and gas, so it has wide application prospect. (6 Figures, 1 Table, 22 References)

Key words: salt-cavern gas storage, gas injection and brine discharge, optical fiber, gas-brine interface, continuous measurement

储气库具有实现常规调峰、应急调峰及能源战略储备等功能,是保障国家能源安全的重要工程。储气库建造完成后,腔体内充满着卤水,需要进行注气排卤,即通过注入天然气替换腔体内卤水。在这一过程中,气卤界面的检测是关键环节,如果气卤界面失控,注气过多,天然气会进入排水管道,一旦发生泄漏,不仅造成资源浪费,污染环境,甚至发生爆炸;注气过少,

腔体底部储集较多卤水,则会造成体积浪费^[1-3]。

目前无可靠的连续气卤界面检测技术和方法,计算得出的气卤界面深度往往与真实气卤界面相差较大,容易导致气卤界面失控,存在井喷风险。针对现有技术的不足,提出了一种新的气卤界面光纤式检测技术。该技术在工程现场进行了实际应用,效果良好,测量精度可达 1~2 m。

1 气卤界面检测方法

1.1 计算法

根据排出卤水的体积计算气卤界面的深度:

$$h = h_0 + \frac{V_b}{\sum V_i} \quad (1)$$

式中: h 为气卤界面的深度, m; h_0 为腔顶的深度, m; V_b 为排出卤水的体积, m^3 ; V_i 为腔体在每米深度处的体积, m^3 。

该计算方法操作简单, 可用于估算气卤界面深度, 但实际生产中由于数据误差较大, 计算出来的深度不够准确。

1.2 测井法

在注气排卤进行一段时间后, 在井口加设防喷设备, 从排卤管柱中下入测井仪器, 通过中子伽马测井的方法, 检测气卤界面的深度。

中子伽马测井采用同位素中子源发射的快中子连续照射井剖面, 快中子被地层减速变成热中子, 热中子继续在地层中扩散, 并不断被吸收, 有些核素能够俘获热中子, 并放出伽马射线, 在离中子源一定距离处有一个伽马射线探测器, 连续记录伽马射线。中子伽马测井值主要反映地层的含氢量, 同时又与含氯量有关^[4-5]。根据测量结果(图1), 判断曲线的半幅点处为气卤界面的深度位置。

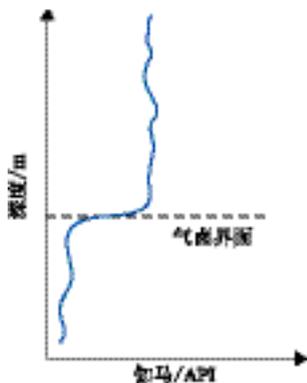


图1 中子测井法判断气卤界面深度示意图

该方法测量结果相对准确, 但是存在以下缺点: 使用同位素中子源, 存在辐射污染, 会对人体和环境造成严重危害; 施工较为复杂, 一次测量耗时一天左右, 且测量时需要停止生产; 检测成本高, 整个注气排卤阶段需要多次测井, 且无法实时检测。

1.3 光纤法

光纤法是利用光纤检测技术进行检测, 其利用光

的喇曼散射记录与温度相关的信号, 再通过光时域反射技术(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)确定温度信息对应的位置, 得到温度与深度的剖面, 从而判断气卤界面的深度位置。根据测量结果(图2), 判断曲线的拐点处为气卤界面的深度位置。

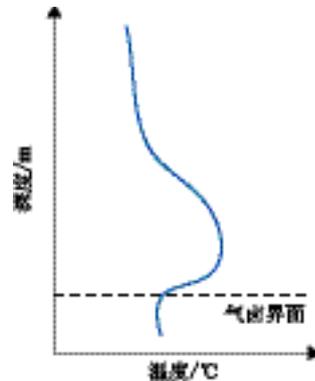


图2 光纤检测法判断气卤界面深度示意图

目前主要利用光纤检测盐穴储气库造腔阶段油水界面, 该方法测量前需要将光缆固定在造腔外管的外壁, 在管柱的最底端缠绕光缆或接箍保护器固定住光缆, 在管柱中部利用钢带固定光缆, 并用接箍保护器加以保护。井下安装完毕后, 从井口四通穿出光缆, 将光纤连接好地面仪器, 通电加热 3 000 W 左右, 由于柴油和卤水比热容不同, 通过温度变化的快慢差异判断油水界面位置^[6-9]。

由于腔体内有易燃易爆的天然气, 采用电阻加热可能出现电火花, 也可能绝缘失效, 存在较严重的安全隐患, 因此测量油水界面的方法并不适用于注气排卤阶段气卤界面的检测。针对此情况, 提出了无需加热的光纤式气卤界面检测技术, 可实现气卤界面的连续测量。该方法测量精度为 1~2 m, 符合工程实际要求, 具有广阔的应用前景^[10-12]。

2 光纤检测原理

分布式光纤温度传感器系统, 能够在整个连续的光纤上, 以距离的连续函数形式, 测量出光纤各点的温度值。分布式光纤温度传感器的工作机理是: 基于光纤内部光的散射现象的温度特性, 利用光时域反射测试技术, 在同步控制单元触发下, 将较高功率的激光脉冲输入光纤, 在高压脉冲向前传播的同时产生后向散射, 然后将返回的散射光强随时间的变化探测出来。分布式光纤温度传感器基于背向散射或前向散射机

理,其中背向散射具有温度测量的实际意义^[13-14]。

从光纤返回的散射光有3种成分:瑞利散射、布利渊散射及喇曼散射(图3,其中 I 为光强度)。喇曼散射光的强度与温度相关,其中反斯托克斯光信号的强度与温度有关,斯托克斯光信号与温度无关。在测得散射光的光强后,由反斯托克斯光信号的强度与斯托克斯光信号强度的比值可以推知相应的温度信息,再通过光时域反射技术,确定温度信息对应的位置,从而得到沿整条光纤的温度分布情况^[15-17]。

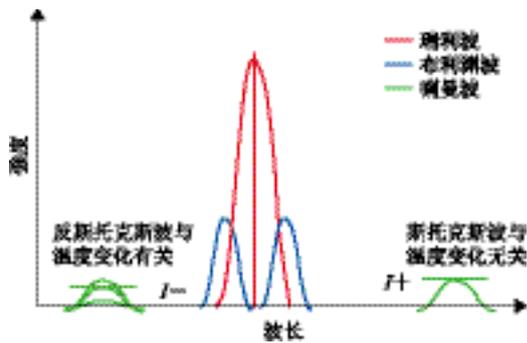


图3 光纤返回散射光分布示意图

2.1 光纤喇曼背向散射测温原理

光纤测温的原理是依据后向喇曼散射效应,激光脉冲与光纤分子相互作用发生能量交换产生散射。光子被光纤分子吸收后会再次发射出来。如果有一部分光能转换为热能,那么将发出一个波长比原来波长 λ 更长的斯托克斯光,即 $1/\lambda_s=1/(\lambda-\Delta\nu)$ (其中, λ_s 为斯托克斯光的波长; $\Delta\nu$ 为喇曼的偏移)。相反,如果有一部分热能转换为光能,那么将发出一个波长比原来波长短的反斯托克斯光, $1/\lambda_a=1/(\lambda+\Delta\nu)$ (其中, λ_a 为反斯托克斯光的波长)。喇曼散射光即由这两种不同波长的斯托克斯光和反斯托克斯光组成,其波长的偏移是由光纤组成元素的固有属性决定的。

斯托克斯、反斯托克斯光强度计算式分别为:

$$I_s \propto \left[\frac{1}{\exp \frac{hc\Delta\gamma}{kT} - 1} + 1 \right] \lambda_s^{-4} \quad (2)$$

$$I_a \propto \left[\frac{1}{\exp \frac{hc\Delta\gamma}{kT} - 1} \right] \lambda_a^{-4} \quad (3)$$

式中: I_s 为斯托克斯光强度,cd; I_a 为反斯托克斯光强度,cd; h 为普朗克常数, $J \cdot s$; c 为真空中光速,m/s; k 为玻尔兹曼常数,J/K; $\Delta\gamma$ 为偏移波数, m^{-1} ; T 为绝对温度,K。

为消除激光管输出不稳定、光纤弯曲、接头损耗等影响,提高测温准确度,温度信息的解调采用双通道双波长比较的方法,即对反斯托克斯光和斯托克斯光分别进行采集,利用两者强度的比值解调温度信号。从光波导内任何一点的反斯托克斯光信号强度和斯托克斯光信号强度的比例中,可以得到该点的温度^[18-19]。由于反斯托克斯光对温度更为灵敏,因此将反斯托克斯光作为信号通道,斯托克斯光作为比较通道,则两者之间的强度比为:

$$R(T) = \frac{I_a}{I_s} = \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right)^{-4} \exp \left(-\frac{hc\Delta\gamma}{kT} \right) \quad (4)$$

由此得到温度的理论公式:

$$T = \frac{hc\Delta\gamma}{k} \left[\ln \left(\frac{I_s}{I_a} \right) + 4 \ln \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

在实际测量过程中,为了准确测量温度,需要进行温度标定,即在温度解调仪内设置恒温槽,根据恒温槽的温度确定其他位置的温度值。因此,将温度变换为以下形式:

$$\frac{1}{T} = -\frac{k}{hc\Delta\gamma} \left[\ln R(T) + 4 \ln \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right) \right] \quad (6)$$

对于固定的温度 T_0 (恒温槽标定温度),有:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{k}{hc\Delta\gamma} \left[\ln R(T_0) + 4 \ln \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right) \right] \quad (7)$$

由此得到温度值的测量公式:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\Delta\gamma} [\ln R(T) - \ln R(T_0)] \quad (8)$$

在系统标定之后,通过上式测定 $R(T)$ 即可以确定沿光纤各点的温度值。

2.2 光纤光时域反射定位原理

对测量点的空间定位是通过光时域反射技术实现的,当激光脉冲在光纤中传输时,与光纤中的分子、杂质等相互作用,发生散射(图4)。



图4 光时域反射工作原理图

光在光纤中走过的距离为:

$$L = Vt \quad (9)$$

式中: L 为光在光纤中走过的距离,m; V 为光在光纤中的传输速度,m/s; t 为光在光纤中走过的时间,s。

光在光纤中的传输速度为:

$$V=C/n_g \quad (10)$$

式中: C 为真空中的光速, m/s ; n_g 为光纤实际折射率。

结合式(9)和式(10)得到散射光与测量位置的距离:

$$l = \frac{Ct}{2n_g} \quad (11)$$

式中: l 为散射光到测量处的距离, m 。

因此,利用光时域反射技术可以确定沿光纤温度场中每个温度采集点的距离,以及异常温度点、光纤断裂点的距离定位信息。

3 现场应用

将光纤检测技术应用于盐穴储气库的气卤界面检测,需要先将光纤设备安装于井下,安装方法有两种:①管柱外安装法,即将光缆安装于注采气管柱外壁,用扎带固定,通过地面加热的方法,判断出界面的深度;②管柱内安装法,即将光缆下端加一配重,类似于测井的方法下入排卤管柱中,不需要加热,利用光纤检测腔体内自身的热力场变化来判断界面的深度。

K井是一口需要进行注气排卤的盐穴储气库井,由于管外安装法需要将注采气管柱提到地面,将光缆缓缓固定在外壁后再通过修井机下入井下,工艺复杂,且检测完成后无法回收井下设备,因此选取管柱内的安装方法(图5)^[20-22]。

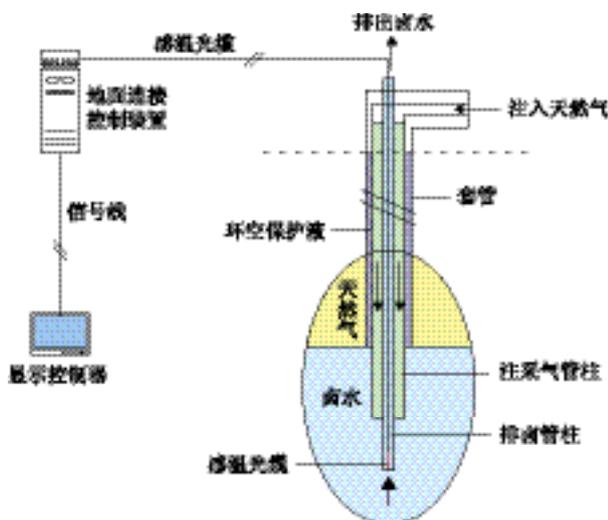
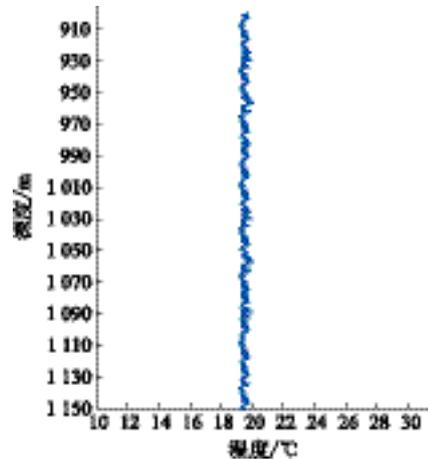


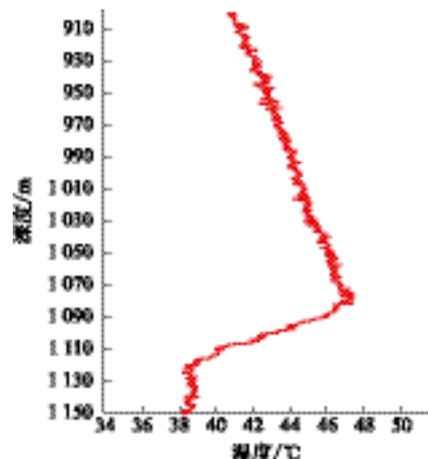
图5 注气排卤现场光纤式检测示意图

在K井注气排卤阶段,连续记录排出的卤水体积,根据声呐测得的腔体体积估算气卤界面的大致位置。

同时利用光纤检测方法实时记录排卤管柱内的温度,并判断气卤界面深度,根据光纤测量的排卤管柱内温度变化情况(图6),靠近底端温度的拐点1116 m处为气卤界面的深度位置。



(a)刚排完卤的温度



(b)注气排卤静置1h的温度

图6 光纤测量温度变化图

选取该井某一个月內采用两种方法计算得到的气卤界面深度值,并将二者结果进行对比(表1)。其中第一次的气卤界面深度1034 m是利用中子测井方法测得的,作为参考深度。

由表1可知:二者总体差距较小,但在注气排卤初期,二者结果相差较小,随着注气排卤量增大,二者差别逐渐加大,这是由于随着注气排卤量的增大,计量误差增大,进而造成算法估算的气卤界面深度误差越来越大。根据K井最终测量结果,光纤检测气卤界面技术得到成功应用,气卤界面得到很好的控制。

利用光纤检测的方法大大简化了注气排卤阶段气卤界面的控制,可以直观显示气卤界面深度。该方法的应用能够加快注气排卤速度,通过设定一个深度报

表1 3种方法得出的K井气卤界面深度对比

光纤测量深度	计算深度	中子测井深度
1 034.0	1 034	1 034
1 036.5	1 036	—
1 038.5	1 039	—
1 041.0	1 041	—
1 042.5	1 045	—
1 045.0	1 047	—
1 046.5	1 049	—
1 049.0	1 051	—
1 051.5	1 053	1 052

警值,在未达到此深度时,用于注气排卤的排量可以适当加大,接近或达到此深度时,放慢注气排卤速度。该方法能够减少中子测井次数,降低检测成本。

4 结论

采用光纤式气卤界面检测方法检测盐穴储气库注气排卤阶段的气卤界面,具有以下优势:测量深度范围大,操作简单,可实时连续检测气卤界面;缩短作业时间,减少中子测井次数,节约作业成本;经过简单改造后可以同时测得井下温度分布和井下压力,有利于辅助判断井下管柱脱落、泄漏等故障;具有广阔的应用前景,可应用于注气排卤、天然气或氮气阻溶造腔等阶段。该技术填补了国内外盐穴储气库气卤界面连续检测方法的空白,为进一步提高国内盐穴储气库储气能力奠定了基础,对国家天然气能源战略发展具有深远意义。

参考文献:

[1] 袁进平,李根生,庄晓谦,等.地下盐穴储气库注气排卤及注采完井技术[J].天然气工业,2009,29(2):76-78.
YUAN J P, LI G S, ZHUANG X Q, et al. Gas-injection production technology using underground gas-storage salt cavern to displace brine solution and contain injected gas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(2): 76-78.

[2] 李龙,杨海军,刘玉刚,等.金坛盐穴储气库新溶腔井注气排卤情况分析[C].银川:第七届宁夏青年科学家论坛,2011:452-454.

LI L, YANG H J, LIU Y G, et al. Analysis of gas injection and brine removal in new dissolved cavity wells in Jintan Salt Cavern Gas Storage[C]. Yinchuan: The Seventh Session of the Ningxia Forum for Young Scientists, 2011: 452-454.

[3] 庄清泉.注气排卤技术在盐穴造腔中的应用[J].油气田地面工程,2010,29(12):65-66.
ZHUANG Q Q. Application of gas injection and debrining technology in salt cavern solution mining[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(12): 65-66.

[4] 黄隆基.核测井原理[M].青岛:中国石油大学出版社,2008:108-119.
HUANG L J. Principle of nuclear logging[M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2008: 108-119.

[5] 孙林平,范宜仁,孙跃武,等.中子测井在储气库井腔体试压密封检测中的应用[J].测井技术,2007,31(1):35-38.
SUN L P, FAN Y R, SUN Y W, et al. Application of neutron logging in sealing property test of gas storage well[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(1): 35-38.

[6] 张建华,杨海军,李龙,等.井下介质界面监测装置:201220371077.6[P].2013-02-27.
ZHANG J H, YANG H J, LI L, et al. Downhole medium interface monitoring device: 201220371077.6[P]. 2013-02-27.

[7] 张建华,巴金红,李建君,等.光纤式储油罐多相介质厚度测量装置:201520122874.4[P].2015-08-05.
ZHANG J H, BA J H, LI J J, et al. Optical fiber type oil tank multiphase medium thickness measuring device: 201520122874.4[P]. 2015-08-05.

[8] 彭勇,张映辉.光纤油水界面监控仪研制与应用[J].仪器仪表学报,2005,26(8):857-859.
PENG Y, ZHANG Y H. Applying and designing the controller of optical fiber oil interface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 857-859.

[9] GROSSWIG S, VOGEL B. Permanent blanket-brine interface monitoring by temperature monitoring in salt Caverns[C]. Porto: SMRI Spring 2008 Technical Conference, 2008: 2-6.

[10] 张晓威,刘锦昆,陈同彦,等.基于分布式光纤传感器的管道泄漏监测试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):1-6.
ZHANG X W, LIU J K, CHEN T Y, et al. Experimental research on pipeline leakage monitoring based on distributed fiber optic sensors[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 1-6.

- [11] 史晓锋, 蔡志权, 李铮. 分布式光纤测温系统及其在石油测井中的应用[J]. 石油仪器, 2002, 16(2): 20-23.
SHI X F, CAI Z Q, LI Z. The optical fiber distributed temperature measurement system and its application in petroleum well logging[J]. Petroleum Instruments, 2002, 16(2): 20-23.
- [12] 阎家光. 光纤传感器在煤矿井筒监测系统中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(12): 63-64.
YAN J G. Application of optical fiber sensor in coal well casing monitoring system[J]. Automation & Instrumentation, 2016(12): 63-64.
- [13] BRENTLE J O, MÖBIUS C. Fibre optic measurement system for the automatic and continues blanket level interface monitoring during the solution-mining process of salt caverns[C]. New York: SMRI Spring 2015 Technical Conference, 2015: 1-5.
- [14] GROSSWIG S, VOGEL B. Optic measurement system for temperature, automatic and continuous blanket interface monitoring in caverns[C]. Santander: SMRI Fall 2015 Technical Conference, 2015: 2-10.
- [15] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009(1): 29-33.
LIU D M, SUN Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009(1): 29-33.
- [16] 刘建霞. ϕ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 199-204.
LIU J X. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on ϕ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 199-204.
- [17] 赵业卫, 姜汉桥. 油井高温光纤监测新技术及应用[J]. 钻采工艺, 2007(4): 158-160.
ZHAO Y W, JIANG H Q. New technology and application of high temperature fiber monitoring in oil well[J]. Drilling & Production Technology, 2007(4): 158-160.
- [18] 王玉田. 光电子学与光纤传感器技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 106-109.
WANG Y T. Optical electronics and optical fiber sensing techniques[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 106-109.
- [19] 王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 865-868.
WANG J F, LIU H L, ZHANG S Q, et al. New type distributed optical temperature sensor (DTS) based on Raman scattering and its application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 865-868.
- [20] JOSÉ C. Pereira, common practices - gas cavern site characterization, design, construction, maintenance, and operation[C]. Houston: SMRI Spring 2012 Technical Conference, 2012: 18-19.
- [21] BSI Standards Publication. Gas supply systems - Underground gas storage Part 3: Functional recommendations for storage in solution-mined salt cavities[S]. Brussels: BSI, 2016: 30-31.
- [22] CSA Group. Storage of Hydrocarbons in Underground Formations, Salt Cavern Storage[S]. Mississauga: CSA, 2014: 77.
- (收稿日期: 2016-12-21; 修回日期: 2017-05-02; 编辑: 杜娟)
-
- 基金项目:** 中国石油储气库重大专项“地下储气库关键技术研究与应用”子课题“盐穴储气库加快建产工程试验研究”, 2015E-4008。
- 作者简介:** 付亚平, 男, 1985年生, 工程师, 2013年硕士毕业于中国石油大学(北京)地球探测与信息技术专业, 现主要从事盐穴地下储气库建设与运行相关技术的研究工作。地址: 江苏省镇江市南徐大道60号商务A区D座1801室, 212000。电话: 15152909577, Email: fu_angle@163.com