

# 国外套管腐蚀检测技术研究进展

王丽忱<sup>1</sup>,甄鉴<sup>2</sup>,朱桂清<sup>1</sup>

1. 中国石油集团经济技术研究院,北京 100724
2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司第二钻井分公司,廊坊 065007

**摘要** 油气勘探生产过程中普遍存在腐蚀现象,为防止套管、油管、井口等设施的利用价值受到影响,保障经济效益、生产效率,需要开展腐蚀防控工作。腐蚀检测技术具有分辨率高、连续性强等特点,是应对腐蚀问题的重要手段。本文主要针对套管腐蚀问题,介绍国外套管腐蚀检测技术现状,并分析其未来发展趋势。

**关键词** 套管腐蚀;电磁;超声波;井下电视;机械井径测量

**中图分类号** TE925

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.011

## Review on Casing Corrosion Testing Techniques outside China

WANG Lichen<sup>1</sup>, ZHEN Jian<sup>2</sup>, ZHU Guiqing<sup>1</sup>

1. CNPC Economics & Technology Research Institute, Beijing 100724, China
2. No.2 Drilling Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang 065007, China

**Abstract** Corrosion phenomena are widespread during the process of oil and gas exploration and production. Corrosion prevention and control are necessary in protection of oil-gas exploitation facilities, such as the casing, tubing and wellhead, to guarantee economic and production efficiency. Corrosion testing techniques are important means to deal with corrosion problems with high resolution and good continuity. This paper mainly addresses the casing corrosion problems by introducing the current status and development trend of casing corrosion testing techniques outside China.

**Keywords** casing corrosion; electromagnetics; ultrasonic; downhole camera; mechanical caliper

在油气勘探生产行业中,腐蚀现象普遍存在,由腐蚀带来的技术挑战也由来已久,这不仅严重降低了套管、油管、井口等设施的利用价值,对经济效益、生产效率等方面也造成极大影响。据统计,美国勘探生产行业每年的腐蚀成本花费约为14亿美元,其中地面管道设施5.89亿美元,井下管柱4.63亿美元,资本性支出3.2亿美元,这些数字还不包括因管材腐蚀而造成的产量损失、费用支出及收益减少等情况<sup>[1-5]</sup>。

套管腐蚀问题难以避免,形式复杂多变,包括化学腐蚀、电腐蚀及机械腐蚀等,随着油气勘探开发向更深更复杂的储层发展,腐蚀防控工作显得更加刻不容缓。作为应对腐蚀问题的关键手段,腐蚀检测技术不仅能够大幅降低直接成本,

还可通过提前发现薄弱环节来有效降低安全及环境风险<sup>[6-9]</sup>。对于地面管道设施,通常可通过肉眼直接观测、探伤仪器等途径来实现腐蚀检测;针对井下油套管柱检测,主要利用测井仪器。目前应用较多的套管腐蚀检测手段包括电磁、超声波、井下成像、机械井径测量等<sup>[10-13]</sup>。

近年来,斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿及威德福等公司均对套管腐蚀检测技术开展深入研究,并推出一系列新方法、新仪器,但受高温高压,含H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>及O<sub>2</sub>等气体,高矿化度和高含水率等因素影响,使得套管腐蚀问题仍较为严重<sup>[14-17]</sup>。本文介绍国外套管腐蚀检测技术现状,对其发展趋势进行分析。

收稿日期:2014-02-07;修回日期:2014-03-21

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05043-003)

作者简介:王丽忱,工程师,研究方向为石油科技信息监测,电子邮箱:wlcwayne@126.com

引用格式:王丽忱,甄鉴,朱桂清. 国外套管腐蚀检测技术研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 67-72.

## 1 国外套管检测技术现状

目前,耐腐蚀材料层出不穷,补救措施多种多样,但均未从根本上起到防控作用,而套管腐蚀检测技术不仅可有效预测潜在腐蚀位置,还能为套管维护、保养及更替提供指导参考,因此该类技术在勘探生产一线有较大的应用规模和较好的应用效果。当前常见的腐蚀监测技术主要有电磁检测、超声波检测、井下成像、机械式井径测量等。

### 1.1 电磁检测技术

电磁检测技术主要基于漏磁和电磁感应等原理,漏磁仪器采用永久性磁铁或电磁铁使管柱磁化,在腐蚀点、斑、孔、片、块附近检测其漏出磁通量,进而对套管内外部缺陷进行整体检测,但由于磁体需尽可能贴近管柱,测量时必须将油管移除才能更好地进行套管检测,且漏磁仪器对连续、平缓腐蚀等情况检测效果不佳,因此在应用上有所限制。电磁感应仪器可以探测套管内外部及多层管柱情况下外部套管柱的金属损伤情况,在任何流体中均可通过单芯电缆进行操作,可以适应较小的井眼尺寸,更可以对管材斑点、穿孔等损伤情况进行测量,实现对套管完整性的综合评价,大幅降低作业时间和成本。电磁检测方面比较有代表性的技术包括以下几种。

#### 1) EM Pipe Scanner套管电磁扫描仪。

斯伦贝谢公司的EM Pipe Scanner套管电磁扫描仪长约6 m,重约50 kg,仪器外径约5.4 cm,适用套管尺寸约为7.30~33.97 cm,可耐150℃高温和103 MPa的压力。该仪器主要利用远场涡流原理,具体工作原理与带损耗的变压器原理相似,仪器发射器线圈产生一个随时间变化的磁场,该磁场的磁通量受套管控制,磁通量在次级线圈或接收器线圈中产生感应电压。由于套管金属会产生感应电流,套管所提供的磁导在介质中发生能量损耗,通过仪器配备的18个电磁传感器,利用趋肤效应和远近区域信号差异来检测这些损耗,确定套管的几何特征、电磁属性及套管腐蚀或点蚀情况。此外,EM Pipe Scanner还能同时运用低频和高频感应电流对套管进行检测,实现平均电磁厚度测量,以及2D厚度成像和2D分辨成像,有效识别套管裂纹、腐蚀、损伤及金属损失量<sup>[18-22]</sup>。EM Pipe Scanner套管电磁扫描仪结构如图1所示。

#### 2) Vertilog套管检测服务。

贝克休斯公司的Vertilog套管检测服务主要通过漏磁测量来识别和量化套管内外部的腐蚀损伤情况,仪器配备了重叠阵列型漏磁传感器和鉴别传感器,以便进行油套管柱全

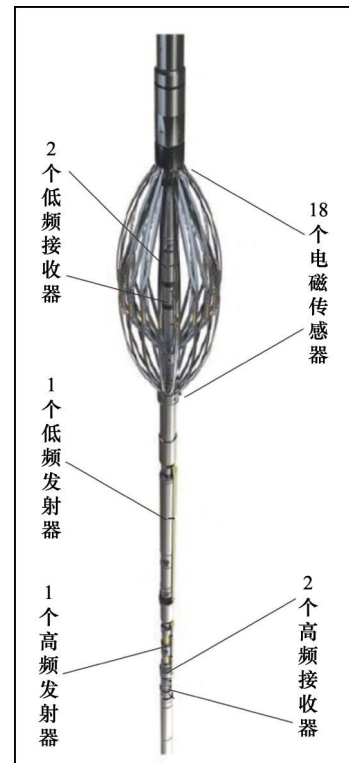
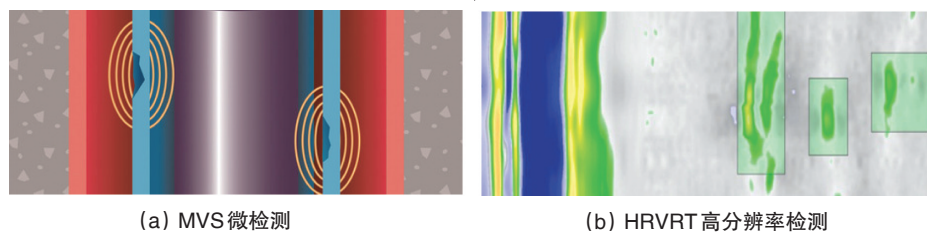


图1 斯伦贝谢公司EM Pipe Scanner套管电磁扫描仪结构

Fig. 1 Structure of EM Pipe Scanner from Schlumberge

周检测。该技术还可对金属损失和金属聚积、普通腐蚀和孤立点蚀等情况进行有效区分,对腐蚀程度进行级别评定<sup>[23]</sup>。

Vertilog套管检测服务主要包括数字检测服务(digital verilog service, DVS)、微检测服务(micro verilog service, MVS)及高分辨率检测(high-resolution verilog service, HRVRT)等。DVS数字检测利用漏磁测量原理对套管内外壁进行检测,可实现腐蚀情况的精确指示,可适用的套管尺寸为24.45~55.88 cm; MVS微检测技术采用多重极板设计,可实现套管360°全覆盖检测,适用套管尺寸为7.30~24.45 cm,该项技术不受井眼流体限制,避免了不必要的生产损失,仪器支持存储-读取模式,便于地面分析。HRVRT高分辨率检测可提供分辨率极高的套管360°腐蚀图谱,准确找到套管内外壁腐蚀的位置、大小及形状,通过先进的处理系统可节省高昂的修井费用,降低生产损失,甚至延长油气井使用寿命。Vertilog套管检测服务测量效果如图2所示。



(a) MVS微检测

(b) HRVRT高分辨率检测

图2 贝克休斯公司Vertilog套管检测服务测量效果

Fig. 2 Measurement results of Verilog casing testing services

此外,贝克休斯公司还推出了基于电磁原理的数字电磁检测仪(digital magnelog service, DMAG)。它是一种多频、多通道的电磁套管检测技术,通过测量磁场偏移量,可获取单根或多重套管柱中的管壁厚度变化,根据管壁异常的检测数据绘制出曲线,整体评价套管内壁上的细小损伤<sup>[23]</sup>。

### 3) Xaminer™电磁腐蚀测量仪。

哈里伯顿公司推出的Xaminer™电磁腐蚀测量仪长度约5.24 m,重约125 kg,仪器外径约9.84 cm,适用套管尺寸约为12.07~50.80 cm,能耐149℃高温和137.9 MPa的压力。该仪器主要利用瞬变涡流电流穿透套管层,无需移除油管柱即可同时检测油管和外面的套管,定量评价油管和最内层套管厚度,并定性表征第三层套管,实现针对生产套管的腐蚀监测。该仪器的工作原理是法拉第电磁感应定律,当向仪器的发射线圈施加随时间变化的电流时,会在周围的油管和套管中产生瞬态电磁通量,进而在这些同心管柱中感生涡流。涡流产生随时间变化的磁场,磁场又在仪器的接收线圈中产生电动势。当油管和套管的厚度发生变化时,对应的瞬态涡流在时域衰减谱上会出现变化。脉冲涡流检测仪器的测量精度很高,足以探测到同心管柱厚度的微小变化,能够从时间上分离来自不同圆柱壳体的信号,可有效测量油层套管上的金属损失量、裂缝和漏孔等损伤信息,确定油管和套管的厚度,非常有助于施工作业方对井眼完整性进行综合评价,并大大降低作业时间和成本<sup>[24-27]</sup>。Xaminer™电磁腐蚀测量仪结构如图3所示。

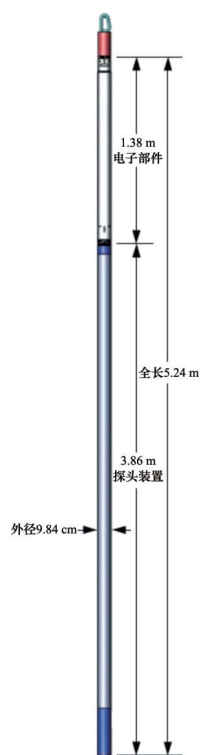


图3 哈里伯顿公司Xaminer™电磁腐蚀测量仪结构  
Fig. 3 Structure of Xaminer™ electromagnetic corrosion measuring instrument

### 4) MFL套管漏磁检测仪。

威德福公司推出的套管漏磁检测仪(magnetic flux leakage, MFL)采用磁性更强的钐-钴永久磁体,利用重叠高分辨率霍尔效应传感器提供最优的磁场强度,实现更完整的井眼覆盖,进而对由内外套管损伤引发的磁通量变化进行探测,有效区分内外部损坏。另外,MFL仪器对测速没有要求,提高了仪器应用灵活性,且具有较高的适用性,适用套管尺寸为15.24~142.24 cm,在液体、气体井眼中都能正常使用<sup>[28-31]</sup>。不同外径尺寸的MFL套管漏磁检测仪如图4所示。



图4 威德福公司不同外径尺寸的MFL套管漏磁检测仪  
Fig. 4 MFL casing leakage detecting instrument with different outer diameter

## 1.2 超声波检测技术及井下成像

超声波检测技术主要根据脉冲回波理论,利用仪器探头中的旋转传感器,对井周进行扫描探测,进而较准确地获取单一套管柱的壁厚信息,该类仪器获取资料的方位分辨率较高,利于实现固井评价、裸眼井成像及腐蚀成像等工作。井下成像技术主要是通过井下摄像机对井壁或管壁进行扫描成像,获取高分辨率的直观图像资料,进而实现套管腐蚀检测。

### 1) USI超声成像测量仪 & UCI超声套管成像仪。

斯伦贝谢公司推出的超声成像测量仪(ultrasonic imager, USI)可发射和传播200~700 kHz频率范围的超声信号,对套管进行回波探测,然后根据回波幅度差异可有效评价水泥胶结质量和套管腐蚀程度。另一方面,由回波传播时间、响应频率等信息还可获取2D内径成像和2D套管厚度等数据。

为更好地进行套管腐蚀超声参数监测,斯伦贝谢公司还推出了升级版超声探测仪器——超声套管成像仪(ultrasonic casing imager, UCI),它可在管径为114.3~339.7 mm的套管内进行测量,测量精度达到±1 mm,采用频率为2 MHz的旋转聚焦换能器,进行高度聚焦测量,分辨率更高。通过记录套管内外壁回波,可计算得到套管半径及厚度,回波幅度可以定性判断套管状况。但需要注意,UCI仪器的应用条件有限制,主要应用于盐水泥浆、油基、轻质油基泥浆、水基泥浆中。加

重泥浆产生的声波衰减会使测量失真,影响监测结果,效果不佳<sup>[20-22]</sup>。UCI 超声套管成像仪工作原理如图 5 所示。

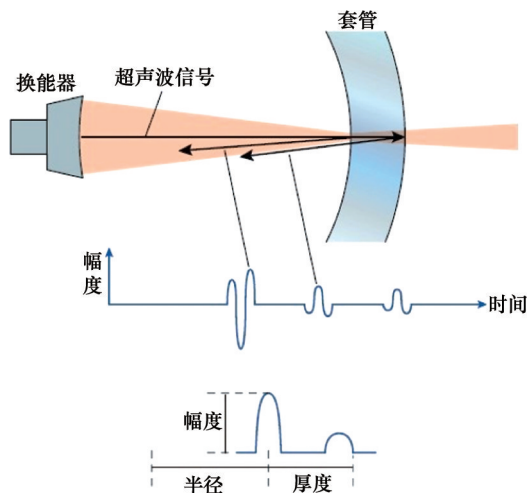


图 5 斯伦贝谢公司 UCI 超声套管成像仪工作原理  
Fig. 5 Working principle of UCI ultrasonic casing imager

## 2) CAST 井周声波扫描仪。

哈里伯顿公司的井周声波扫描仪 (circumferential acoustic scanning tool, CAST) 配有超声换能器, 可对套管内部进行 360° 全方位高分辨率测量, 并可实时评价固井质量。CAST 井周声波扫描仪还具有良好的适用性, 可适应多种井眼尺寸和类型<sup>[28]</sup>。

## 3) 井下成像系统。

目前应用较多的井下成像系统主要包括哈里伯顿公司的 Hawkeye™、Fiber-Optic 及 EyeDeal™ 等, 将井下摄像系统置于井筒中, 对管壁进行扫描成像, 获取连续的高质量图像, 完成套管腐蚀检测和穿孔检查。除此之外, 该类技术还可应用于井下掉落物探测、油气产出测试等方面<sup>[24]</sup>。

## 1.3 机械井径测量技术

机械井径测量技术已发展多年, 通过与管壁直接接触, 可获取套管内壁数据, 有效识别套管细小腐蚀, 对管柱弯曲、错断也有较好的分辨能力, 但无法提供外部腐蚀信息。由于受套管内壁结垢影响, 测量结果的精度会有所降低。

### 1) PMIT 多臂成像井径仪。

斯伦贝谢公司的多臂成像井径仪 (platform multi-finger imaging tool, PMIT) 采用阵列型触点与套管内壁直接接触, 有效获取套管内壁成像等资料, 实现套管腐蚀、变形或金属损失等测量, 通过等距等方位排列触点, 还可降低偏心效应的影响 (图 6)。该仪器分为 PMIT-24、PMIT-40、PMIT-60 等型号, 分别配有 24、40 和 60 个触点, 适用井径范围为 4.45~35.56 cm, 同时支持实时输出和记忆储存等模式<sup>[16]</sup>。PMIT 多臂成像井径仪如图 6 所示。

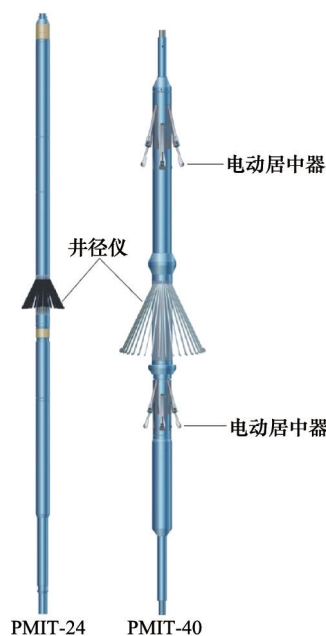


图 6 斯伦贝谢公司 PMIT 多臂成像井径仪  
Fig. 6 PMIT multi-arm imaging tool

### 2) ICL 成像井径仪。

贝克休斯公司的成像井径仪 (imaging caliper log, ICL) 可提供高分辨率的套管检测能力, 识别潜在损伤, 确定套管腐蚀磨损情况, 进而判断套管强度是否可满足油气井安全生产需求。通过贴壁触点测量套管内部微小变化, 检测数据传输至地面并显示为高分辨率测井图。ICL 仪器触臂的贴壁压力在 4.45~6.67 N 范围内, 可保证仪器对管柱表层 (铬合金或塑料) 的伤害最小化<sup>[20]</sup>。ICL 成像井径仪如图 7 所示。



图 7 贝克休斯公司 ICL 成像井径仪  
Fig. 7 ICL imaging caliper log instrument

### 3) MFC多臂井径仪。

哈里伯顿公司的多臂井径仪(multi-finger caliper, MFC)利用独立部件对套管内壁进行测量,可提供套管内部构造及腐蚀状况的高精度3D视图。该仪器分为40触点和60触点2种型号,MFC-40型和MFC-60型的参数对比如表1所示。

MFC还可实现时间推移监测,通过周期性测量,可获取4D测井数据,实现套管腐蚀状况探测和趋势预测,利于更好地进行维护保养工作。MFC还提供有关套管损伤的数据统计报告,包括直方图、深度—损伤剖面及层状分析结果等内容,有助于技术人员对井下套管数据进行综合处理与分析<sup>[25]</sup>。

表1 MFC-40型和MFC-60型的参数对比

Table 1 Parameter comparison between MFC-40 and MFC-60

型号	长度/m	重量/kg	仪器外径/cm	最小套管内径/cm	最大套管内径/cm	最大承载压力/MPa	最大承受温度/°C
MFC-40	1.68	31.8	6.98	6.98	17.8~25.4	138	177
MFC-60	1.55	43.6	9.90~11.20	10.20~11.40	25.4~35.6	138	177

## 2 发展趋势

近年来,电磁、超声波、井下成像及机械井径测量等腐蚀检测技术已在内陆、海上等众多油气田得到广泛应用,整体发展较快,从当前腐蚀检测评价需求和技术应用效果来看,其发展趋势主要体现在以下几个方面。

### 2.1 检测技术应用范围更广、限制更少

目前的套管腐蚀检测技术已取得了一定进展,对套管内外壁均具有较高的灵敏性,人为干扰较少,对外在环境和施工人员基本无害。但具体到各项技术仍存在较多限制,如:超声波检测技术无法在气井中操作,在内径受限或采用单芯电缆时无法测量,测量有可能因管壁粗糙或过度腐蚀而中断;在非均质材料、不规则形状或薄层套管中,检测结果会出现失真等。受井下流体、泥浆类型、套管材质及内外部特性差异等因素影响,当前的套管腐蚀检测技术应用范围还有待扩大。

### 2.2 仪器集成化、一体化,形成腐蚀检测系统

不同检测技术各具优劣势,但单一的检测方法很难应对当前的腐蚀挑战,例如:在井下射孔层段中,若腐蚀性流体是从套管外部对金属产生腐蚀,并径测井数据通常只显示出射孔区域,无法识别金属损耗,而电磁检测仪器测得的2D厚度成像可明显显示出金属损耗的存在;另一方面,同一口井中若在套管内壁出现结垢,受结垢组分、厚度等因素影响,电磁检测仪器不够敏感,很容易忽视腐蚀情况,并径仪贴靠在结垢上时,测得的内径结果会明显偏小,如结合超声波和井下电视等检测手段,可准确定位套管结垢位置。

目前套管腐蚀检测大多是通过重复测量来提升检测结果的准确性和可靠性,但这种方法不仅费时费力,在下入仪器的过程中也易造成不必要的误差和影响。因此,推进仪器集成化、一体化,形成腐蚀检测系统成为必然趋势,通过挂接、捆绑不同类型的检测仪器,获取多方面数据资料,进而对测量目标进行综合解释分析,既可满足不同的腐蚀检测需求,还能有效降低作业时间,提高工作效率。

### 2.3 检测技术更高精度、更高分辨率

随着油气勘探开发方向进一步趋于更深更复杂储层,油

气井管柱服役环境越来越复杂,管柱受不同腐蚀介质、pH值、温度、流速等耦合条件下影响,腐蚀机理及规律难以分辨,套管腐蚀问题也就日趋严峻。

在套管腐蚀检测技术中,电磁检测具有很好的纵向分辨率和厚度分辨率,而超声波检测在方位分辨率上很高,机械井径测量在物理精度方面有明显优势,将以上技术的特征和优点进行汇总,结合井口流体动力参数、泵出流体性质等地面数据,可有效提升检测质量,保证数据结果的可靠性。因此,检测技术必然会向更高精度、更高分辨率发展。

## 3 结论

通过对国外套管腐蚀检测技术现状及其发展趋势进行总结分析,得到以下几点结论:

1) 在完全抗腐蚀材料问世之前,腐蚀现象无法避免,但通过选择合理的检测技术可有效评价腐蚀情况,进而为作业者提供维护、保养或更替等决策支持,以确保勘探生产工作有序进行,降低作业成本,最大程度降低对环境的负面影响;

2) 作为应对套管腐蚀问题的重要手段,未来的检测技术主要向着应用范围更广、限制更少、精度和分辨率更高、仪器集成一体化等方面发展;

3) 国内针对套管腐蚀检测技术的研究相对较少,在检测质量、分析能力等方面还有待提高,建议密切跟踪国外主要公司的先进技术和产品,加大自主研发力度。

### 参考文献(References)

- [1] Koch G H, Brongers M P H, Thompson N G, et al. Corrosion cost and preventive strategies in the united states[R/OL]. [2010-02-03]. <http://www.corrosioncost.com/home.html>.
- [2] NACE. Monitoring corrosion in oil and gas production with iron counts [R/OL]. [2011-04-05]. <http://www.setlaboratories.com/NACE/tabid/61/Default.aspx>.
- [3] Brill T M, Calvez J L L, Demichel C, et al. Electromagnetic casing inspection tool for corrosion evaluation[C]. International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand, February 7-9, 2012.
- [4] Brondel D, Edwards R, Hayman A, et al. Corrosion in the oil industry [J]. Oilfield Review, 1994, 6(2), 4-18.

- [5] Lord W, Sun Y S, Udpa S S, et al. A finite element study of the remote field eddy current phenomenon[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1988, 24(1): 435-438.
- [6] Kermani M B, Morshed A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production—A compendium[J]. *Corrosion*, 2003, 59(8): 659-683.
- [7] Li S, Liu C, Shen L. A New 3-D electrode-type logging tool[C]. 2006 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, New Orleans, USA, October 1-6, 2006.
- [8] 孙喜寿. 井下套管腐蚀监测及评定多层套管柱腐蚀的解释技术[J]. *国外石油工程*, 1993(1): 58-64.  
Sun Xishou. Downhole casing corrosion monitoring and evaluation of the interpretation of the multilayer casing corrosion technology[J]. *Foreign oil engineering*, 1993(1): 58-64.
- [9] 杨旭, 刘书海, 李丰, 等. 套管检测技术研究进展[J]. *石油机械*, 2013, 41(8): 17-22.  
Yang Xu, Liu Shuhai, Li Feng, et al. Research progress in casing detection technology[J]. *China Petroleum machinery*, 2013, 41(8): 17-22.
- [10] 唐宇. 套管井分析技术 ABC (Analysis Behind Casing)[J]. *测井技术*, 2011, 35(1): 88.  
Tang Yu. Analysis behind casing[J]. *Well logging technology*, 2011, 35(1): 88.
- [11] 林俊明. 电磁无损检测技术的现状与发展趋势[C]//中英无损检测技术研讨会论文集. 上海: 中国机械工程学会, 2005: 42-50.  
Lin Junming. The current situation and trend of development of electromagnetic nondestructive testing technology[C]//Nondestructive Testing Technology Symposium. Shanghai: Chinese Mechanical Engineering Society, 2005: 42-50.
- [12] 关松. 油水井套管检测技术分析 with 评价[J]. *石油仪器*, 2010, 24(2): 64-66.  
Guan Song. Oil and water wells casing damage detection technology analysis and evaluation[J]. *Oil Instrument*, 2010, 24(2): 64-66.
- [13] 李福军, 陈月勋, 李晓川, 等. 油水井套管的腐蚀及防护理论、实验与应用—油水井套管的腐蚀与防护[J]. *大庆石油学院学报*, 2004, 28(2): 57-62.  
Li Fujun, Chen Yuexun, Li Xiaochuan, et al. Corrosion and anticorrosion of casing in oil and water wells[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(2): 57-62.
- [14] Zhu G Y, Zhang S C, Liang Y B, et al. Origins of high H<sub>2</sub>S-bearing natural gas in China[J]. *Acta Geol Sinica*, 2005, 79(5): 697-708.
- [15] Yin Z F, Zhao W Z, Bai Z Q, et al. Corrosion behavior of SM80SS tube steel in stimulant solution containing H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(10): 3690-3700.
- [16] 王军, 毕宗岳, 张劲楠, 等. 油套管腐蚀与防护技术发展现状[J]. *焊管*, 2013, 36(7): 17-22.  
Wang jun, Bi Zongyue, Zhang Jinnan, et al. Current status of casing/tubing corrosion and protection technology[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2013, 36(7): 17-22.
- [17] Brill T M, Calvez J L L, Demichel C, et al. Quantitative corrosion assessment with an EM casing inspection tool[C]. SPE 149069, New Orleans, USA, May 15-18, 2011.
- [18] Schlumberger Limited. Casing corrosion measurement to extend asset life[EB/OL]. [2013-10-03]. [http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield\\_review/ors13/aut13/2\\_casing\\_corr.pdf](http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield_review/ors13/aut13/2_casing_corr.pdf).
- [19] Schlumberger Limited. Scanning for downhole corrosion[EB/OL]. [2013-10-25]. [http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield\\_review/ors10/spr10/04\\_downholecorrosion.pdf](http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield_review/ors10/spr10/04_downholecorrosion.pdf).
- [20] Schlumberger Limited. EM pipe scanner brochure[EB/OL]. [2013-07-13]. [http://www.slb.com/-/media/Files/evaluation/brochures/scanner\\_rock-fluid\\_character/em\\_pipe\\_scanner\\_br.pdf](http://www.slb.com/-/media/Files/evaluation/brochures/scanner_rock-fluid_character/em_pipe_scanner_br.pdf).
- [21] Schlumberger Limited. METT multi-frequency electromagnetic thickness tool[EB/OL]. [2013-06-09]. [http://www.slb.com/services/characterization/wireline\\_cased\\_hole/corrosion\\_evaluationmultifrequency\\_electromagnetic.aspx](http://www.slb.com/services/characterization/wireline_cased_hole/corrosion_evaluationmultifrequency_electromagnetic.aspx).
- [22] Schlumberger Limited. UCI ultrasonic casing imager[EB/OL]. [2013-11-23]. [http://www.slb.com/services/characterization/wireline\\_cased\\_hole/corrosion\\_evaluation/ultrasonic\\_casing\\_imager.aspx](http://www.slb.com/services/characterization/wireline_cased_hole/corrosion_evaluation/ultrasonic_casing_imager.aspx).
- [23] 谢荣华, 刘继生, 张月秋, 等. 检查套管损坏的电磁探伤测井方法及应用[J]. *测井技术*, 2003(3): 69-72.  
Xie Ronghua, Liu Jisheng, Zhang Yueqiu, et al. Detecting casing damages with electromagnetic defect detection log and its applications [J]. *Well logging technology*, 2003(3): 69-72.
- [24] Baker Hughes Limited. Well integrity service[EB/OL]. [2013-09-14]. <http://www.bakerhughes.com/products-and-services/evaluation/cased-hole-wireline-systems/well-integrity>.
- [25] Halliburton Limited. Casing integrity monitoring for mature fields [EB/OL]. [2013-12-11]. <http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Brochures/web/H010381.pdf>.
- [26] Halliburton Limited. Xaminer™ multicomponent induction (MCI) tool [EB/OL]. [2013-02-08]. [http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data\\_Sheets/web/H/H09310.pdf](http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data_Sheets/web/H/H09310.pdf).
- [27] Halliburton Limited. Downhole video services[EB/OL]. [2013-12-21]. [http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data\\_Sheets/web/WPS\\_Chapter\\_6.pdf](http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data_Sheets/web/WPS_Chapter_6.pdf).
- [28] Halliburton Limited. CAST-M™/CBL-M/MFC[EB/OL]. [2012-10-05]. [http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data\\_Sheets/web/H/H09924.pdf](http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data_Sheets/web/H/H09924.pdf).
- [29] Weatherford Limited. Magnetic-flux leakage and transverse field inspection technologies [EB/OL]. [2013-11-13]. <http://www.weatherford.com/weatherford/groups/web/documents/weatherfordcorp/wft089757.pdf>.
- [30] Weatherford Limited. Casing imaging tool (CIT)[EB/OL]. [2013-04-07]. <http://www.weatherford.com/weatherford/groups/web/documents/weatherfordcorp/wft031949.pdf>.
- [31] Weatherford Limited. Casing imaging tool finds corroded casing section where other methods fail[EB/OL]. [2013-05-03]. <http://www.weatherford.com/weatherford/groups/web/documents/weatherfordcorp/wft065486.pdf>.

(编辑 田恬)