

# 某输油管道腐蚀泄漏失效原因分析

梁裕如<sup>1</sup>, 姬丙寅<sup>2</sup>

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 西安 710075;

2. 西安三维应力工程技术有限公司, 西安 710061)

**摘要:** 目的 分析输油管道腐蚀泄露失效的主要原因。方法 对输油管道泄漏失效进行了深入调查研究, 分析了输油管道失效样品, 对泄漏孔形貌、几何参数、理化性能、金相组织进行了试验分析, 并在泄漏穿孔处取样进行了电子显微镜扫描、微区能谱分析。结果 经化学分析、力学性能和金相组织等理化检验分析, 该失效输油管道的材料理化性能符合 GB/T 8163—2008 标准的相应要求及用户要求。从穿孔宏观形貌分析来看, 腐蚀区域面积较大, 管道内壁存在大量腐蚀产物, 穿孔位于输送管道的下部, 最大腐蚀深度达 3.5 mm, 且管道中存在大量临界腐蚀坑电子显微镜下放大观测, 能看到表层覆盖有疏松的腐蚀产物, 微区能谱分析显示腐蚀产物中含有大量的 Cl、C、O 和 Fe 等元素。结论 材料性能并不是造成输油管道失效事故的主要原因, 输油管道泄漏主要是由管体内壁点腐蚀穿孔造成的, 引起腐蚀穿孔的主要因素为输送流体介质中的 Cl<sup>-</sup>, 当管材基体中的 Fe 不断被 Cl<sup>-</sup> 腐蚀溶解后随流体介质迁移, 点蚀坑迅速扩展, 最终导致腐蚀穿孔。

**关键词:** 输油管道; 腐蚀; 穿孔; 泄漏; 失效; 氯离子; 腐蚀产物

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)08-0068-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.08.012

## Failure Analysis of Corrosion Leakage for Oil Pipeline

LIANG Yu-ru<sup>1</sup>, JI Bing-yin<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd, Xi'an 710075, China;

2. Xi'an Serv Stress Engineering Technology Service Co., Ltd, Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To analyze the main causes of oil pipeline corrosion leakage. **Methods** An investigation research on the accident was developed and the samples of perforation leakage were analyzed. Perforation morphology, geometric parameters, physical and chemical properties and microstructure were analyzed. Samples taken at the leakage and perforation point were analyzed by electron microscope scanning and EDAX. **Results** Chemical analysis and physical and chemical inspection for mechanical property and microstructure showed that the physicochemical properties of oil pipeline met GB/T 8163—2008 requirements and user requirements. According to the macroscopic pattern of perforation point, the pipeline with large corrosion area contains a lot of corrosion products on macroscopical analysis. A lot of critical corrosion pits are located in the lower part of the pipe and the maximum corrosion depth reaches 3.5 mm. The pipeline surface was covered with loose corrosion products un-

收稿日期: 2016-04-14; 修订日期: 2016-05-24

Received: 2016-04-14; Revised: 2016-05-24

作者简介: 梁裕如(1984—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事油气田地面工程相关研究工作。

**Biography:** LIANG Yu-ru (1984—), Female, Master, Engineer, Research focus: oil & gas field ground engineering related research work.

der the electron microscope. They contained lots of Cl, C, O and Fe elements by EDAX analysis. **Conclusion** Material performance is not the main cause of failure accidents. The main cause of oil pipeline leakage is corrosion perforation. The main factor of corrosion perforation lies in the high  $\text{Cl}^-$  fluid. When Fe from matrix is constantly dissolved and migrated by  $\text{Cl}^-$  fluid, the corrosion pits will develop rapidly and lead to corrosion perforation eventually.

**KEY WORDS:** oil pipeline; corrosion; perforation; leakage; failure; chlorine ions; corrosion products

某输油管道巡查时发现液体从地面喷出，周围地面上伴有油污，经确认是某  $\phi 114\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$  输油管道发生泄漏。经围堵完成并现场清理后，进行第一次输油管道试压，当压力达到 1.0 MPa 时，又发生了泄漏，经两次检验后，共发现 20 余处泄漏。第二次试压和第三次试压，均是压力  $\leq 2\text{ MPa}$  时发生泄漏。由于漏点较多且多次试压不成功，考虑到安全和环保问题，暂停输油管道的使用。同时现场检查发现，输油管道漏点均在底部，输送介质为油水混合物，介质中氯离子质量浓度约为 21 000 mg/L，水质质量分数约为 50%。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌分析

在穿孔泄漏区域取 300 mm 长短节对剖后，可看到管道内壁存在一层约 0.2 mm 厚的均匀腐蚀垢层，腐蚀产物层局部成片剥落。清除部分垢层后，发现 3 处明显的坑状腐蚀点：如图 1b 所示，腐蚀点 1 处，观察到一处腐蚀穿孔（即为管外壁可见的穿孔处），除有一个最宽约 11 mm、长 76 mm 的条形腐蚀孔外，沿管内壁纵向还有一条较严重而未穿孔的点腐蚀坑带；腐蚀点 2 处位于腐蚀点 1 处附近，观察到一处较严重未穿孔的点腐蚀坑，尺寸约为宽 9 mm，长 23 mm，最深 3.5 mm；腐蚀点 3 也位于腐蚀点 1 附近，观察到未穿透条形腐蚀带，尺寸约宽 3 mm，长 12 mm，最深 1.5 mm。

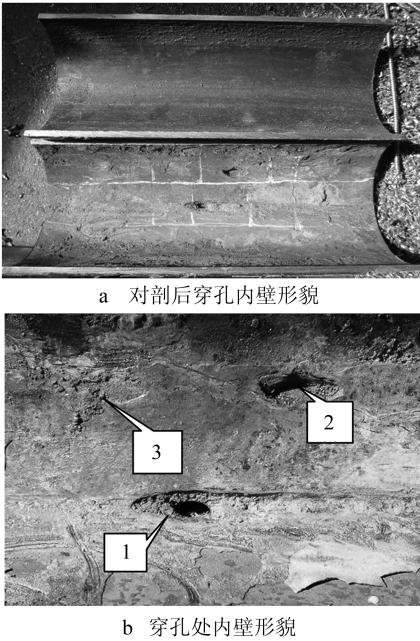


图 1 输油管道穿孔内壁形貌  
Fig.1 Morphology of inner wall of the oil pipeline: a) morphology of inner wall after sectioning, b) morphology of inner wall perforation

1.2 无损探伤

用游标卡尺测量截面壁厚，壁厚约 4.4 mm。对失效样品部分进行超声探伤，未检测到其他缺陷。

1.3 化学成分分析

从失效输油管道上取 30 mm×30 mm 块状样品，用直读光谱仪进行化学成分分析，结果见表 1，分析结果表明，输油管道化学成分符合 GB/T 8163—2008 标准<sup>[10]</sup>要求。

表 1 化学成分检测结果  
Table 1 Test results of chemical composition wt%

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
输油管道	0.17	0.26	0.47	0.05	0.04	0.04	0.011	0.011
国标要求	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤0.25	≤0.30	≤0.25	≤0.035	≤0.035

## 1.4 力学性能

在失效输油管道上分别从纵向取拉伸和压扁试样, 试样宽度 20 mm, 标距 50 mm, 按照 GB/T 8163—2008 标准进行拉伸试验和压扁试验, 结果见表 2。分析结果表明, 输油管道力学性能符合 GB/T 8163—2008 标准的要求。

表 2 力学性能检测结果  
Table 2 Test results of mechanical properties

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	压扁
输油管道	362	496	38	合格
国标要求	≥245	410~530	≥20	两平行板距离为 $H$ 时, 试样上不允许存在裂缝或裂口。

## 1.5 金相分析

从失效输油管道上取金相试样, 依据 GB/T 13298、GB/T 6394 和 GB/T 10561 标准进行金相组织及非金属夹杂物评定。失效输油管道材料组织为铁素体+珠光体, 组织均匀, 晶粒度等级为 8.0 级, 如图 2 所示。非金属夹杂物分别为硫化物(A)1.0, 氧化铝(B)1.0, 硅酸盐(C)0.5, 球状氧化物(D)1.0, 如图 3 所示。经化学分析、力学性能和金相

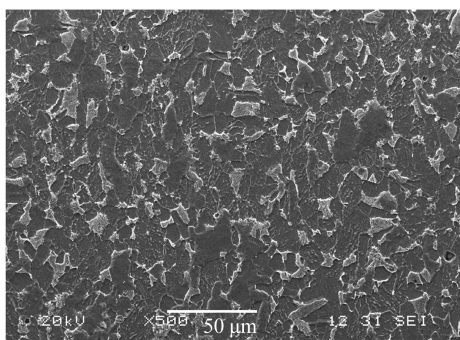


图 2 显微组织  
Fig.2 Microstructure

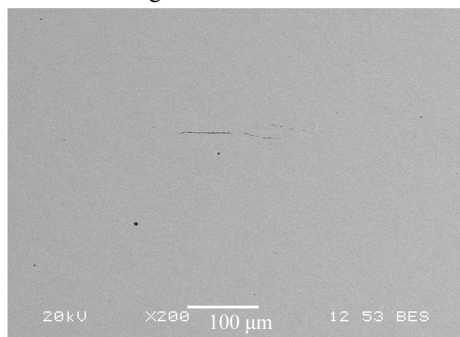


图 3 非金属夹杂物  
Fig.3 Non metallic inclusion

组织等理化检验分析, 失效输油管道的材料理化性能符合 GB/T 8163—2008 标准的相应要求。

## 2 微观分析

在泄漏穿孔处取样进行电子显微镜扫描、微区能谱分析。在显微镜下放大观测, 能看到表层覆盖有疏松的腐蚀产物, 微观形貌如图 4 和图 5 所示。对腐蚀表面进行了微区能谱分析, 谱图如图 6 所示。在能谱分析中, 选取了不同形态的位置进行微区点分析, 发现腐蚀物中含有大量的 Cl、C、O 和 Fe 等元素。

对输油管道内壁靠近泄漏孔处片状的腐蚀产物进行截面微观形貌和能谱元素分析。腐蚀产物片层厚度为 0.3~0.4 mm, 如图 7 所示。图 7 左侧与管体内壁相连, 右侧为水油介质接触面。对腐蚀产物截面不同区域进行点能谱检测分析, 分析结果如图 8 所示, 图中靠近管体内壁侧的 1、2 点和中心部位的 3 点主要成分是 O、Cl 和 Fe 元素, 靠近介质侧有 C、O、Al、Si、S、Cl、Ba、Fe 等元素。



图 4 穿孔显微形貌 (10×)  
Fig.4 Morphology of perforation

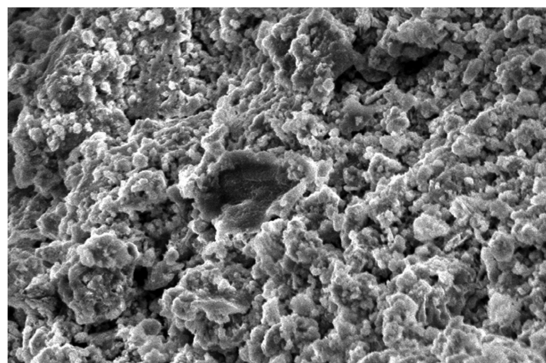


图 5 泄漏孔表面微观形貌 (1000×)  
Fig.5 Microstructure of leak surface

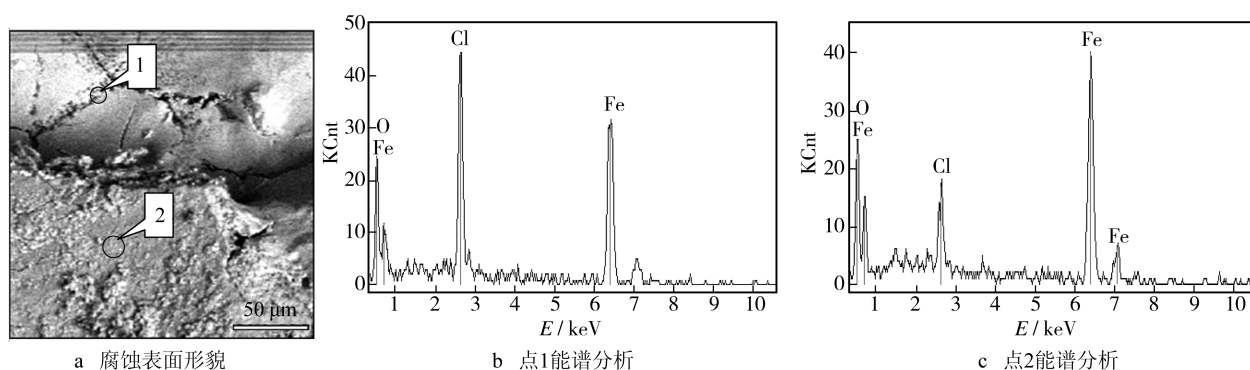


图 6 穿孔表面腐蚀产物能谱分析

Fig.6 Analysis of corrosion products on the perforated surface: a) morphology of corrosion surface, b) energy spectrum analysis of point 1, c) energy spectrum analysis of point 2

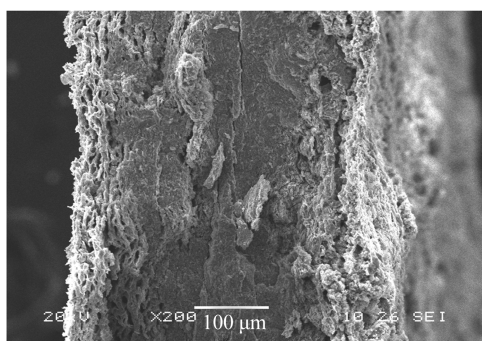


图 7 腐蚀产物截面微观形貌 200×

Fig.7 Microstructure of corrosion products 200×

### 3 分析与讨论

#### 3.1 材料理化性能分析

经化学分析、力学性能和金相组织等理化检验分析，失效输油管道的材料理化性能符合 GB/T 8163—2008 标准的相应要求，所以材料性能不是造成此次失效事故的主要原因。

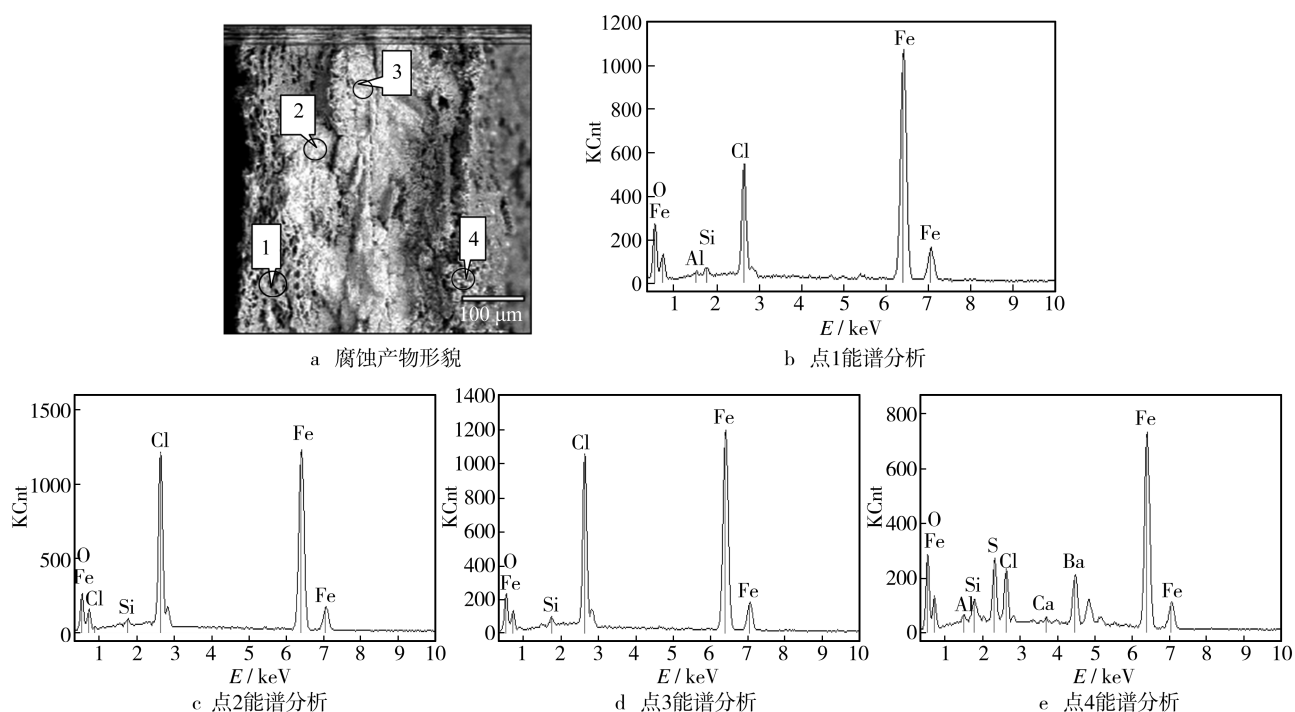


图 8 腐蚀产物能谱分析

Fig.8 Energy spectrum analysis of corrosion products: a) morphology of corrosion products, b) energy spectrum analysis of point 1, c) energy spectrum analysis of point 2, d) energy spectrum analysis of point 3, e) energy spectrum analysis of point 4



### 3.2 管体穿孔原因分析

从失效试样外观形貌和穿孔的宏观形貌分析来看,管体内壁存在大量腐蚀产物,腐蚀区域较大,穿孔位于输送管道的下部,由内部向外腐蚀扩展,并最终穿孔,孔内壁沿纵向形成条形冲刷状腐蚀坑,可以断定穿孔主要由内壁腐蚀引起。从腐蚀形貌来看,腐蚀具有典型的点腐蚀特征,而且与内壁输送的流动介质有关。在穿孔附近存在两处未穿孔腐蚀坑,其中最大腐蚀坑深度达到了 3.5 mm,说明在输油管道底部区域可能存在多处严重点腐蚀。后期输油管道现场检查发现 20 多处漏点,也说明输油管道存在大量腐蚀坑。

从腐蚀产物分析来看,在微区能谱分析谱线中显示,失效样品表面腐蚀产物中含有大量的 Cl、C、O 和 Fe 元素,其中 Cl 元素含量较高,所以推断腐蚀与 Cl<sup>-</sup>有关。至于有无其他腐蚀类型(如 CO<sub>2</sub>、O 腐蚀等),目前无法确认或排除,如果输送介质中含有这些腐蚀介质,不排除多种腐蚀方式综合作用诱发点腐蚀的快速扩展。

从腐蚀机理<sup>[11-15]</sup>分析来看,腐蚀最初由点腐蚀引起,逐渐扩展形成穿孔。Cl<sup>-</sup>可破坏金属氧化膜保护层,形成点蚀或坑蚀。在有腐蚀产物膜存在时,较高的 Cl<sup>-</sup>含量易导致产生点蚀现象,因为 Cl<sup>-</sup>会明显破坏腐蚀产物膜,降低腐蚀产物膜对基体的保护能力。输油管道内壁由于接触高含 Cl<sup>-</sup>或其他腐蚀介质,在材料微区缺陷处首先发生局部选择性点腐蚀,在点蚀区域,材料表面形成疏松的腐蚀形貌区域,腐蚀性介质在该区域更容易集聚。随着输送介质内的 Cl<sup>-</sup>不断向蚀坑内迁移,坑内 Cl<sup>-</sup>浓度远远高于金属平坦表面区域,管材基体中的 Fe 不断被 Cl<sup>-</sup>腐蚀溶解,后被流体介质迁移,使点蚀坑迅速扩展,最终导致腐蚀穿孔。

### 3.3 管道内腐蚀的主要因素讨论

腐蚀是引起管道破坏和失效的主要原因之一。长输管道的内腐蚀情况不能直接观察到,发生泄漏等情况时不便维修,所以如何防止管道的腐蚀破坏一直是管道工程中的重要环节。长输管道输送的介质不同,而管道内腐蚀是由管道输送的介质含有腐蚀性成分引起的,输送的介质不同,腐蚀的因素也就不同。

1) 流态对腐蚀有很大影响。流态与许多因素有关,如流速、流体黏度、介质组成及含量、管子倾角等。对于油田的油、气、水多相流,按流态可分为分层流、波状流、段塞流、环状流和环雾流等类型。在低的气、液(相)速度下,常出现平滑或波状的层状流,特别是在水平和稍微倾斜的管流中,由于重力作用,相态趋于分层,水层常出现在管底,油层在其上<sup>[16-17]</sup>。现场核实管线漏点均在管体底部(靠近地面部分),且腐蚀坑呈带状分布,可以推测输油管道内腐蚀和输送介质分层有关,管道底部和水接触,而上部和油接触,腐蚀介质与管道下部接触较多,在一定条件下,内壁局部率先形成腐蚀,最终导致底部形成腐蚀穿孔。

2) 输油管道在现场施工过程中接触了腐蚀介质。从现场得到的信息,管道施工完成半年后再进行投产,且管道漏点均在管体底部(靠近地面部分)和深埋段,因此推测腐蚀坑可能是在输油管道试压后管内液体未排彻底造成的。

3) 其他因素对腐蚀也有很大的影响<sup>[18]</sup>。随着流速的增加,管道与腐蚀介质接触的机会增大,导致腐蚀速率增加。同时,流动的介质与管道之间会出现相互作用力,导致管材在一定程度上发生冲刷腐蚀。失效输油管含有条形腐蚀带也证实存在冲刷腐蚀。温度和压力对管道的腐蚀也有很大的影响,通常随着温度和压力的升高,腐蚀速率会相应增加。此外,油污和污泥等有机杂质滋生的微生物也可能对管道腐蚀产生影响。

4) 多重因素共同作用的结果。试压后管内含有的腐蚀介质残液很难完全排净,之后管道暂处于空置状态,残液汇集于管材底部导致输油管道在投产前已发生局部点腐蚀。输油管道投产后,输送介质中含 Cl<sup>-</sup>等腐蚀介质,且水、油分层流动,在输送过程中不断腐蚀金属,促使小蚀坑迅速扩展,最终导致漏失事故发生。

## 4 结论

1) 输油管道的理化性能均满足 GB/T 8163—2008 标准的要求,材料质量不是造成事故发生的主要原因。

2) 输油管道泄漏的主要是由管体内壁点腐蚀引起穿孔造成的。

3) 腐蚀穿孔的主要因素为输送流体介质中的高含  $\text{Cl}^-$ , 也不能排除试压残液导致输油管线底部在投产前已发生局部点腐蚀。

## 参考文献

- [1] 邓民宪, 张永凯, 袁玉柱, 等. 埋地输油管道失效原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999(6): 373—375.  
DENG Min-xian, ZHANG Yong-kai, YUAN Yu-zhu, et al. Failure Analysis of an Underground Oil Pipeline[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 1999(6): 373—375.
- [2] 张绪平, 康学勤, 孙智, 等. 滕州站输油管道失效分析[J]. 矿山机械, 2003(12): 62—63.  
ZHANG Xu-ping, KANG Xue-qin, SUN Zhi, et al. Failure Analysis of Tengzhou State Oil Pipeline[J]. Mining & Processing Equipment, 2003(12): 62—63.
- [3] 吕拴录, 康延军, 乐法国, 等. 某输油管道刺漏调查分析[J]. 管道技术与设备, 2010(1): 48—49.  
LYU Shuan-lu, KANG Yan-jun, YUE Fa-guo, et al. Investigation and Analysis of the Washing out of a Crude Oil Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2010(1): 48—49.
- [4] 吕拴录, 赵新伟, 罗金恒, 等. ERW 输油管道试压爆裂原因分析及安全评价[J]. 管道技术与设备, 2005(4): 19—21.  
LYU Shuan-lu, ZHAO Xin-wei, LUO Jin-heng, et al. Crack Analysis and Fitness-for-service Assessment for ERW Crude Oil Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2005(4): 19—21.
- [5] 刘国志, 彭英伟, 伍东, 等. 天然气管道失效分析与防范对策[J]. 安全与环境工程, 2012(3): 100—104.  
LIU Guo-zhi, PENG Ying-wei, WU Dong, et al. Natural Gas Pipeline Failure Analysis and Precautions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012(3): 100—104.
- [6] 张春峰. 天然气管道失效分析与控制对策探讨[J]. 石油化工安全环保技术, 2012(2): 33—36.  
ZHANG Chun-feng. Failure Analysis on the Gas Pipeline and Discussion on the Control Countermeasures[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2012(2): 33—36.
- [7] 王婷, 玄文博, 周利剑, 等. 油气管道失效分析研究及展望[C]//全国失效分析学术会议. 北京: 中国机械工程学会理化检验分会, 2013.  
WANG Ting, XUAN Wen-bo, ZHOU Li-jian, et al. Research and Prospect of Failure Analysis of Oil and Gas Pipeline[C]//National Conference on Failure Analysis. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society of Physical Testing Branch, 2013.
- [8] 宋志强, 李著信, 傅在善. 埋地油气管道失效分析及风险评估[J]. 中国储运, 2010(4): 106—108.  
SONG Zhi-qiang, LI Zhu-xin, FU Zai-shan. Failure Analysis and Risk Assessment on the Underground Gas Pipeline[J]. China Storage & Transport, 2010(4): 106—108.
- [9] 刘骄阳, 吴明, 胡志勇, 等. 油气管道失效原因分析[J]. 当代化工, 2015(2): 315—317.  
LIU Jiao-yang, WU Ming, HU Zhi-yong, et al. Reason Analysis of Oil and Gas Pipeline Failure[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015(2): 315—317.
- [10] GB/T 8163—2008, 输送流体用无缝钢管[S].  
GB/T 8163—2008, Seamless Steel Pipe for Fluid Transport[S].
- [11] 赵帅, 兰伟. 管道内防腐技术现状与研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 112—118.  
ZHAO Shuai, LAN Wei. Present Status and Research Progress of Anti-corrosion Technology in Pipeline [J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 112—118.
- [12] 杨双春, 吴芳芳, 张金辉, 等. 管道内防腐技术研究进展[J]. 当代化工, 2012(11): 1242—1245.  
YANG Shuang-chun, WU Fang-fang, ZHANG Jin-hui, et al. Research Progress in the Anti-corrosion Technology of Pipeline Internal Wall[J]. Contemporary Chemical Industry, 2012(11): 1242—1245.
- [13] 陈洪玉, 刘兴, 教立新. 埋地煤气管道局部腐蚀原因分析[J]. 表面技术, 2006, 35(4): 80—81.  
CHEN Hong-yu, LIU Xing, JIAO Li-xin. Analysis for the Reason of Local Corrosion of Gas Pipes Buried in the Earth[J]. Surface Technology, 2006, 35(4): 80—81.
- [14] 熊娟, 郑兴文, 张文艳, 等. 西南地区某输油管道外腐蚀分析[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 59—63.  
XIONG Juan, ZHENG Xing-wen, ZHANG Wen-yan, et al. Analysis on the External Corrosion for an Oil Pipeline in Southwest China[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 59—63.
- [15] 刘存贵, 剧慧斌, 张英杰. 煤气管道局部腐蚀原因及应对措施[J]. 腐蚀与防护, 2004(2): 69—70.  
LIU Cun-gui, JU Hui-bin, ZHANG Ying-jie. Causes and Protection Measures of Localized Corrosion of Gas Pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2004(2): 69—70.
- [16] 刘凯, 马丽敏, 陈志东, 等. 埋地管道的腐蚀与防护综述[J]. 管道技术与设备, 2007(4): 36—38.  
LIU Kai, MA Li-min, CHEN Zhi-dong, et al. Corrosion of Buried Pipeline and Its Anticorrosion[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2007(4): 36—38.
- [17] 崔斌, 臧国军, 赵锐. 油气集输管道内腐蚀及内防腐技术[J]. 石油化工设计, 2007(1): 51—54.  
CUI Bin, ZANG Guo-jun, ZHAO Rui. Corrosion and Anti-corrosion Techniques for the Inner Wall of Oil and Gas Transportation Pipelines [J]. Petrochemical Design, 2007(1): 51—54.
- [18] 方晓君, 彭伟华, 李建东, 等. 温度、流速及压力对原油腐蚀性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014(5): 431—435.  
FANG Xiao-jun, PENG Wei-hua, LI Jian-dong, et al. Influence of Temperature, Flow Velocity and Pressure on Corrosion of Crude Oil[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2014(5): 431—435.