

# 天然气管路导气球阀失效分析

付安庆<sup>1</sup>, 任越飞<sup>2</sup>, 来维亚<sup>1</sup>, 徐秀清<sup>1</sup>

(1. 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 西安 710077;  
2. 长庆油田分公司第三采气厂, 西安 710018)

**摘要:** 目的 分析西部某气田天然气管路球阀发生开裂泄漏事故的原因。方法 对球阀的化学成分、断口、金相组织等进行检测分析。结果 球阀裂纹起源于阀体内表面, 裂纹沿晶界扩展, 晶界未发现贫铬现象, 不存在晶间腐蚀; 阀体材料存在沿晶铸造缺陷和枝晶露头, 水淬激冷过程中形成沿晶微裂纹, 承压状态下裂纹沿晶扩展; 球阀螺纹根部最薄且应力集中, 裂纹由内向外扩展, 最终沿螺纹根部环向断裂, 断口形貌为沿晶断裂。结论 导气球阀失效原因是螺纹根部存在应力集中和铸造阀体存在缺陷。在两者共同作用下, 导致阀体承压状态下沿晶脆性断裂。

**关键词:** 天然气; 球阀; 开裂; 失效分析

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.12.002

**中图分类号:** TJ07

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)12-0008-12

## Failure Analysis on Deflated Ball Valve of Natural Gas Pipeline

FU An-qing<sup>1</sup>, REN Yue-fei<sup>2</sup>, LAI Wei-ya<sup>1</sup>, XU Xiu-qing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Xi'an 710077, China; 2. The Third Gas Recovery Plant of Chang-qing Oilfield Branch, Xi'an 710018, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze causes of the leakage for rupture on ball valve of gas pipeline at a western natural gas field. **Methods** Chemical composition, fracture and microstructure of the ball valve were analyzed. **Results** The ball valve cracks originated from the body surface. The cracks extended along the grain boundary. Poor chromium phenomena were not detected in grain boundary and there was no intergranular corrosion. Dendrite and casting defects along grain boundary were found in the material. Micro-cracks formed along grain boundary in the process of water quenching. Cracks propagation was along the grain boundary under pressure. Thread root was the thinnest part and could produce stress concentration. Cracks extended outward and eventually ruptured along the thread root. The fracture morphology was the intergranular brittle fracture. **Conclusion** The reasons for ball valve failure are the stress concentration in thread root and defects in casting body. Under the effect of both, the intergranular brittle fracture occurs to the valve body under pressure condition.

**KEY WORDS:** natural gas; ball valve; rupture; failure analysis

某采气厂送检事故管路开裂球阀 1 件, 规格为 DN15-6.4 MPa, 材质为 316 不锈钢。失效球阀是采气厂天然气管道不锈钢导气阀, 工作温度是 20~50 °C,

工作压力为 5.7 MPa。中国石油天然气集团公司管材研究所对送检断裂球阀进行了失效分析。图 1—图 4 为失效球阀阀体的宏观照片, 其中图 1—图 3 显示球

阀阀体断裂面沿环向分布, 图 4 显示阀体鼓包并有径向裂纹分布。



图 1 阀体宏观照片



图 2 阀体环向断裂



图 3 阀体环向断口



图 4 阀体鼓包及微裂纹

## 1 理化检验与结果

### 1.1 化学成分分析

对失效球阀阀体材质进行了化学分析, 取样位置为非螺纹连接端面, 分析结果见表 1。

表 1 球阀材质化学成分分析结果 %

元素	失效球阀	标准球阀
碳(C)	0.12	≤0.08
硅(Si)	1.21	≤1.00
锰(Mn)	8.96	≤2.00
磷(P)	0.030	≤0.45
硫(S)	0.0058	≤0.03
铬(Cr)	13.18	18~20
钼(Mo)	0.026	2~3
镍(Ni)	1.40	8~11
铌(Nb)	/	/
钒(V)	/	/
钛(Ti)	0.0016	/

由表 1 检测结果可以看出: 失效球阀中镍的质量分数不到 8.00%, 铬不到 18.00%, 钼不到 2.00%, 但稳定奥氏体相元素 Mn 含量较高, 失效球阀选材并非 316 不锈钢。经显微硬度检测, 阀体材料与 316 不锈钢材料抗拉强度相近。

### 1.2 电镜与能谱分析

对失效球阀断口进行扫描电镜观察, 其断口形貌为沿晶断裂, 裂纹从阀体内表面起裂, 并从里向外扩展, 沿内螺纹根部断裂。断裂面呈多元台阶, 自由表面较多, 从断面可见材料内部沿晶裂纹和枝晶露头现象, 阀体内外表面微裂纹沿晶网状分布, 内表面微裂纹数量多于外边面, 如图 5—13 所示。在失效球阀断口附近区域观察到纵向裂纹与沿晶裂纹, 在非失效区内壁通过扫描电镜观察到细微沿晶裂纹。表 2 与表 3

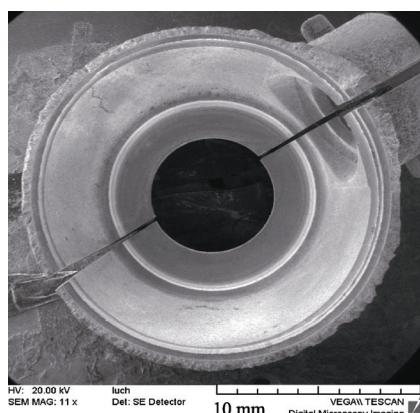


图 5 断口低倍形貌

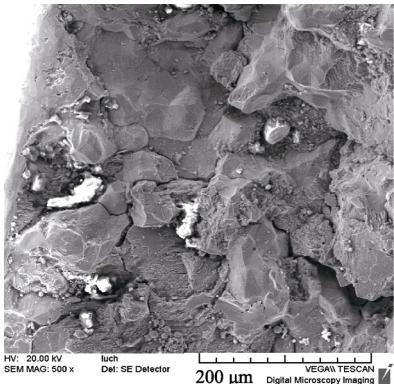


图 6 沿晶断口形貌

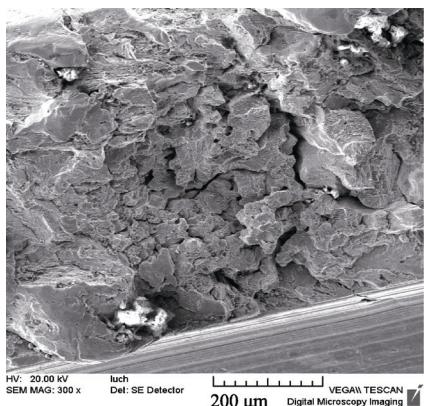


图 7 含缺陷断口形貌

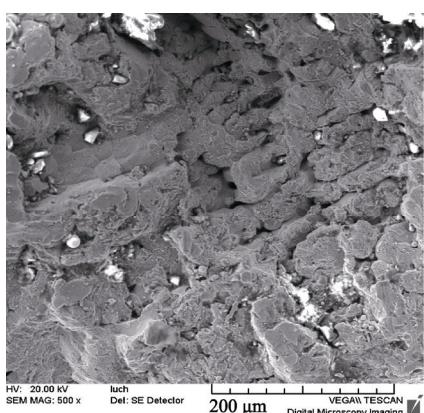
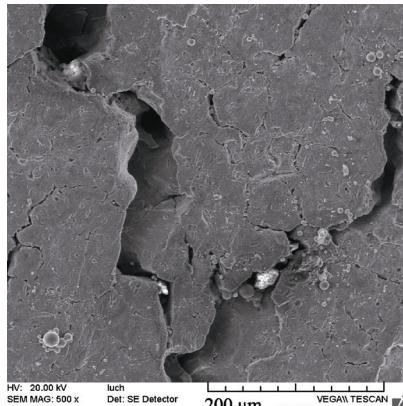


图 8 含枝晶断口形貌

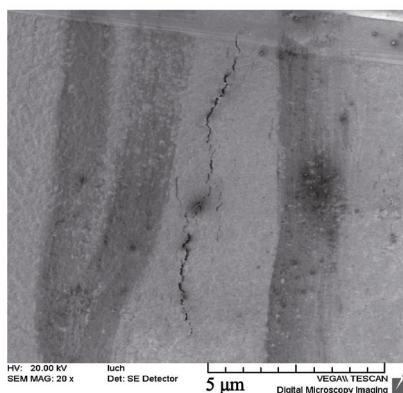
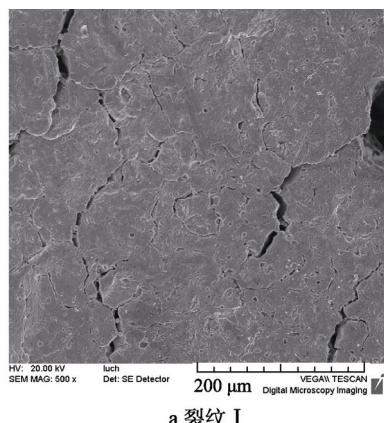
分别是图 7 与图 8 断口元素能谱分析结果。能谱分析结果表明，断口铬元素、锰元素含量高，而镍元素含量低，其结果与化学分析结果元素比例相吻合。

### 1.3 金相分析

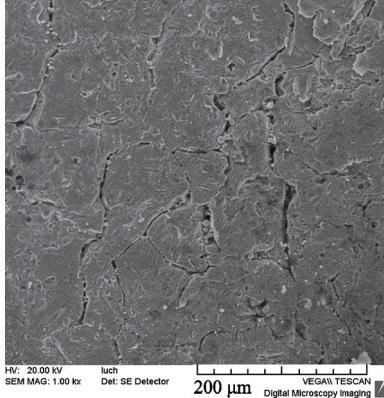
依据 GB/T 13298—1991, 利用 MEF4M 金相显微镜及图像分析系统对失效球阀不同部位试样进行金相分析。失效球阀内表面有裂纹，内表面有明显凹陷，该区较光滑，没有加工痕迹。图 14 为凹陷处样品金相分析结果，样品内外表面均有裂纹，裂纹沿晶扩展，有的裂纹几乎穿透阀体，且裂纹开口相对较大，裂纹特征如图 15 和图 16 所示。失效区附近样品与失效区



a 裂纹 I

b 裂纹 II  
图 9 断口附近内壁纵向裂纹

a 裂纹 I



b 裂纹 II

图 10 断口附近内壁沿晶裂纹

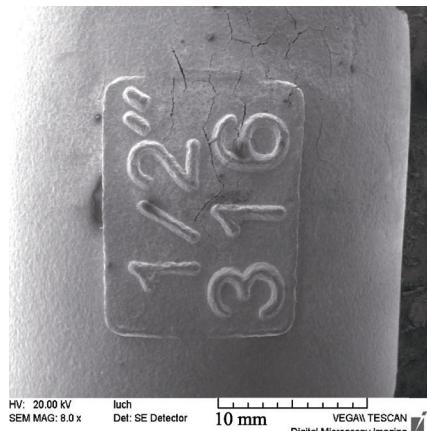


图 11 阀体外壁鼓包区低倍形貌

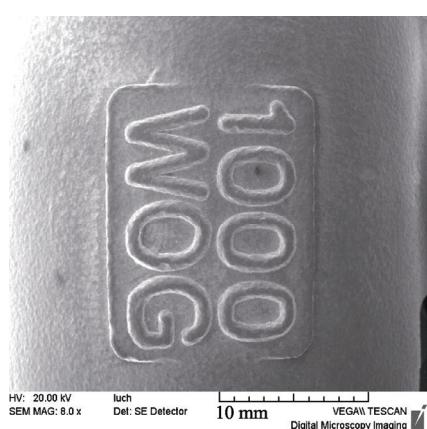
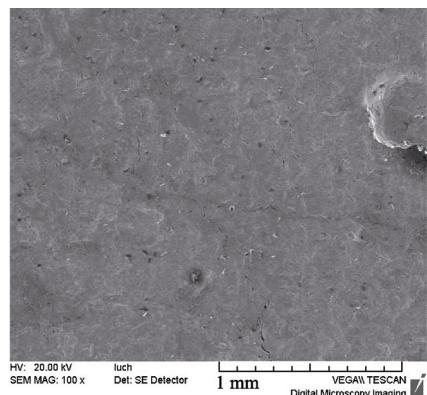
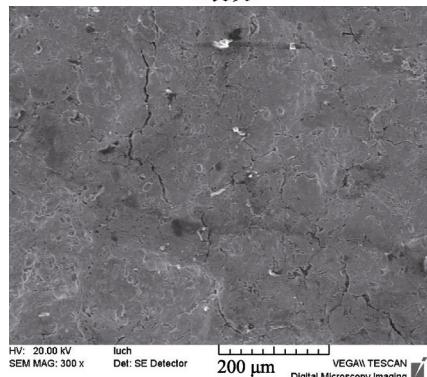


图 12 阀体外壁非失效区低倍形貌



a 裂纹1



b 裂纹2

图 13 阀体内壁非失效区微裂纹

表 2 断口能谱分析结果 I

	质量分数/%	原子数分数/%	Spectrum 3
C K	5.42	19.37	/
O K	3.32	8.91	/
Si K	1.04	1.58	/
Cr K	13.53	11.18	/
Mn K	9.20	7.19	/
Fe K	65.17	50.12	/
Ni K	1.36	0.99	/
Cu K	0.98	0.66	/
Totals	100.00	/	/

表 3 断口能谱分析结果 II

	质量分数/%	原子数分数/%	Spectrum1
C K	4.02	15.96	/
Si K	1.22	2.06	/
S K	0.28	0.42	/
Cr K	13.63	12.49	/
Mn K	8.99	7.80	/
Fe K	70.70	60.33	/
Ni K	1.15	0.93	/
Cu	/	/	/
Totals	100.00	/	/

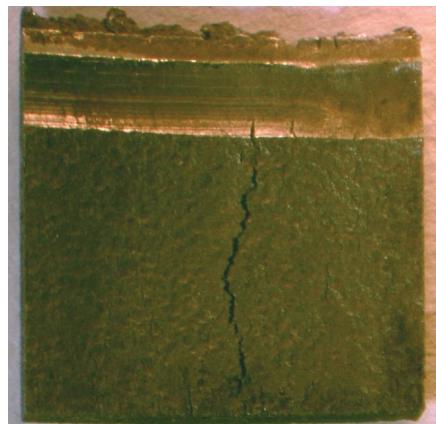


图 14 内表面裂纹和凹陷



图 15 样品内外表面裂纹

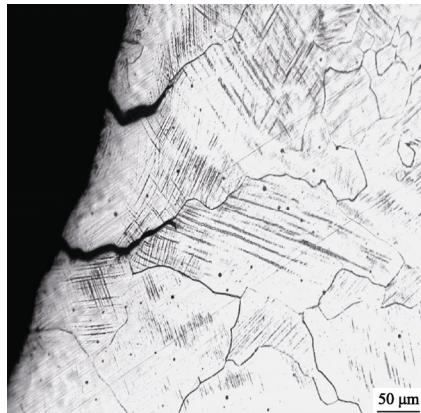
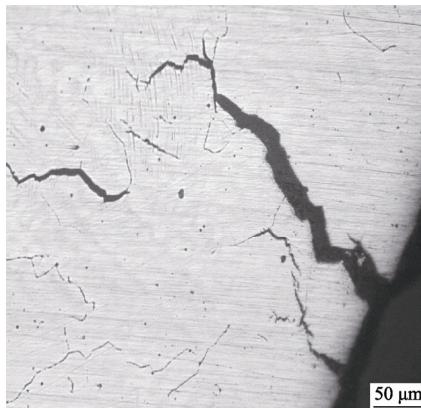


图 16 失效区内表面裂纹

样品相比,失效区附近内外表面也均有裂纹,内表面裂纹数量多于外表面,裂纹横向与纵向基本特征相同,均沿晶扩展,裂纹特征如图 17 所示。非失效区样品与失效区样品比较,非失效区裂纹数量相对较少,开口较小,但裂纹基本特征相同,即内外表面均有裂纹,但内表面裂纹数量多于外表面,裂纹沿晶扩展,裂纹特征如图 18 所示。球阀所有样品,金相分析发现材料内有铸造疏松孔洞,如图 19 所示。经对失效球阀金相分析,其组织为奥氏体+铁素体,并非单一奥氏体组织,如图 20 所示。



a 裂纹1

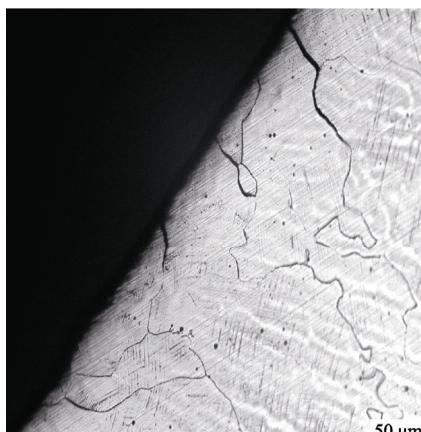


图 17 失效区附近内表面裂纹

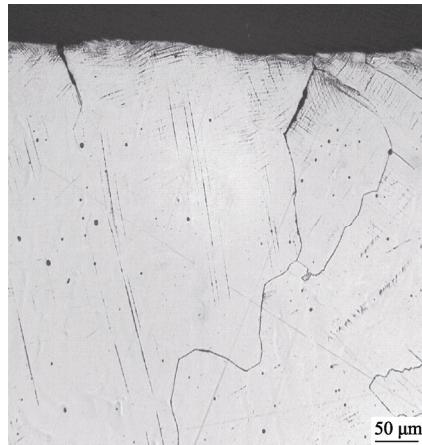


图 18 非失效区内表面裂纹

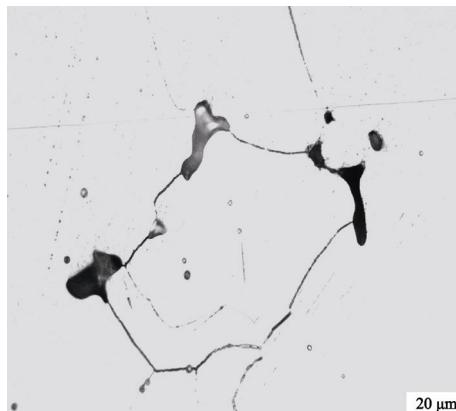


图 19 球阀材料内疏松孔洞

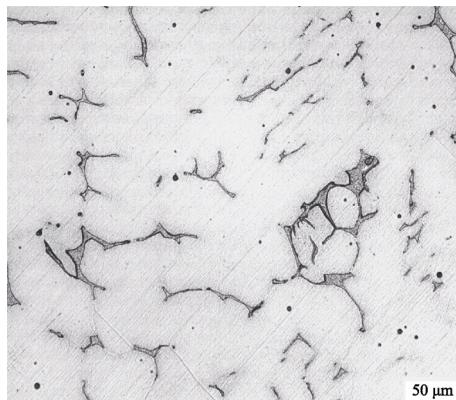


图 20 奥氏体+铁素体组织

#### 1.4 裂纹线扫描分析

为了检验失效球阀是否因沿晶贫铬而发生了晶间腐蚀,对失效阀体内表面裂纹进行了线扫描分析,裂纹附近主要元素能谱分析如图 21 所示。从裂纹线扫描区域 1 和区域 2 可看出,在晶界边沿并未发现贫铬现象,裂纹内部也未发现铬元素富集,所以微裂纹不是由于晶间腐蚀引起的。至于区域 2 氧元素富集是由于该裂纹较宽,氧元素易扩散形成金属氧化物所致。

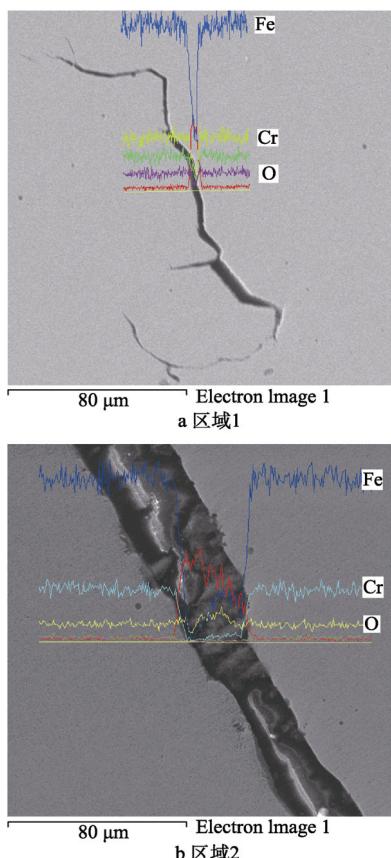


图 21 裂纹线扫描区域

## 2 分析与讨论<sup>[1-11]</sup>

经对送检样品材质进行分析, 失效球阀镍的质量分数不到 8.00%, 铬不到 18.00%, 钼不到 2.00%, 但稳定奥氏体相元素 Mn 含量较高, 失效球阀选材并非 316 不锈钢。经显微硬度检测, 阀体材料与 316 不锈钢材料抗拉强度相近。

扫描电镜观察表明, 裂纹从阀体内表面起裂并从里向外扩展, 沿内螺纹根部环向断裂, 其断口形貌为沿晶断裂。断裂面呈多元台阶, 自由表面较多, 断面可见材料内部沿晶裂纹和枝晶露头, 阀体失效区内外表面微裂纹沿晶网状分布, 内表面微裂纹数量多于外边面。非失效区内壁扫描电镜观察到沿晶裂纹, 其基本特征与断口附近裂纹特征相同。

金相分析表明, 样品组织为奥氏体+铁素体, 失效区与非失效区内外表面均有裂纹, 且内表面裂纹数量多于外表面。裂纹横向与纵向基本特征相同, 均沿晶扩展, 区别在于非失效区裂纹数量相对较少, 开口较小, 但裂纹基本特征相同。通过对失效球阀进行金相分析发现, 材料内均有铸造疏松孔洞沿晶分布。对失效阀体内表面裂纹进行了线扫描分析, 从裂纹线扫描区域 1 和区域 2 可看出, 晶界边沿并未发现贫铬现象, 裂纹内部也未发现铬元素富集。经与采气厂现场技术人员交流, 与失效球阀接触的介质属于脱水天然气,

虽含有硫化氢气体, 但属于干硫化氢, 也不会诱发晶间腐蚀。因此, 微裂纹不是由于晶间腐蚀引起的。

对于奥氏体阀门, 因铸造过程冷却慢, 在敏化温度范围停留时间较长, 不进行热处理易诱发晶间腐蚀, 一般要进行固溶处理, 水淬激冷得到粗大奥氏体组织。固溶处理时间合理枝晶偏析也可完全消除, 但固溶处理不能消除铸造过程形成的沿晶缺陷。扫描电镜观察到断口存在枝晶露头, 说明固溶处理没有完全消除枝晶偏析。在水淬激冷过程中, 由于存在沿晶缺陷和枝晶露头, 阀体材料沿晶产生微裂纹。

综上所述, 失效球阀阀体材料存在沿晶铸造缺陷和枝晶露头, 在水淬激冷过程中形成沿晶微裂纹, 在承压状态下微裂纹沿晶界扩展。因内螺纹根部应力集中, 裂纹由内向外扩展, 最终沿螺纹根部环向断裂。

## 3 结论

通过上述分析可得到以下结论。

- 1) 球阀选材并非 316 不锈钢, 但阀体材料与 316 不锈钢材料抗拉强度相近。
- 2) 阀体开裂处金属晶界未发现贫铬现象, 阀体材料不存在晶间腐蚀。
- 3) 球阀阀体材料存在沿晶铸造缺陷和枝晶, 水淬激冷过程中形成沿晶微裂纹, 承压状态下微裂纹沿晶扩展。
- 4) 因内螺纹根部存在应力集中, 裂纹扩展并最终沿螺纹根部环向断裂, 断口形貌属于沿晶脆性断裂。

## 参考文献:

- [1] 王凤平, 李晓刚. 316L 不锈钢法兰腐蚀失效分析与对策[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(3): 180-183.
- [2] 张振杰. 奥氏体不锈钢应力腐蚀破裂探讨[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2006, 23(2): 48-50.
- [3] 邱宏斌. 奥氏体不锈钢输油管道焊缝的应力腐蚀失效分析[J]. 化工设备与管道, 2011, 48(4): 68-72.
- [4] 张国华. 奥氏体不锈钢应力腐蚀分析研究[J]. 焊接技术, 2002, 31(6): 54-58.
- [5] 雷阿利. 奥氏体不锈钢焊接接头在含硫介质中的腐蚀性[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 89-92.
- [6] 廖景娱. 金属构件失效分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 熊金平, 左禹. 波纹不锈钢换热板腐蚀开裂失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(6): 435-438.
- [8] 肖雯雯, 宋成立, 白真权, 等. 油田地面集输管道腐蚀穿孔风险分析[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(4): 81-85.
- [9] 刘智勇, 董超芳, 李晓刚, 等. 硫化氢环境下两种不锈钢的应力腐蚀开裂行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(3): 318-323.
- [10] 王维宗, 贾鹏林. 湿硫化氢环境中腐蚀失效实例及对策[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2001, 18(2): 7-10.
- [11] 孙秀峰. 中原油田区块全面腐蚀控制技术[J]. 全面腐蚀控制, 2010, 24(10): 12-14.