

某 20# 钢腐蚀穿孔失效原因分析

王鑫¹, 刘峰¹, 全宏韬¹, 白双锋¹, 宋卿源¹, 刘攀², 隋永强¹, 侯健¹

(1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237;

2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 目的 某船 20#钢管投运不久后管段出现严重的腐蚀穿孔, 通过对失效管段进行研究, 以分析其失效原因。**方法** 通过电感耦合等离子体发射光谱仪、碳硫分析仪、金相显微镜等对材料材质进行材质符合性分析及金相组织分析。通过场发射扫描电子显微镜观察蚀坑微观形貌, 并结合 X 射线衍射仪及显微拉曼光谱仪, 对失效部位周围的腐蚀产物进行成分分析。通过电化学测试及微生物鉴别培养, 进一步确定腐蚀的发生原因及机理。**结果** 材料符合性分析说明, 此 20#钢管束成分符合标准要求。通过形貌观察发现, 20#钢蚀坑边缘呈阶梯状, 具有明显的攀爬现象, 蚀坑周围呈黑色。X 射线能谱仪分析结果表明, 20#钢腐蚀穿孔处内表面异常存在大量硫元素。通过拉曼分析及 XRD 分析发现, 硫元素主要以硫酸盐及硫化物的形式存在。电化学测试结果表明, 在含硫化物的溶液中, 20#钢的腐蚀速率明显提升。进一步对腐蚀产物进行微生物培养, 发现了硫酸盐还原菌的存在。**结论** 微生物腐蚀是引起 20#钢管束穿孔的主要原因。

关键词: 20#钢; 腐蚀失效; 硫酸盐还原菌 (SRB); 电化学分析; 微生物腐蚀; 拉曼光谱仪

中图分类号: TG172.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)11-0091-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.11.012

Failure Cause of Corrosion Perforation of a Certain type 20# Steel

WANG Xin¹, LIU Feng¹, TONG Hong-tao¹, BAI Shuang-feng¹, SONG Qing-yuan¹,
LIU Pan², SUI Yong-qiang¹, HOU Jian¹

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong
Qingdao 266237, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Henan Luoyang 471000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the cause of the failure by studying the failure section of the 20# steel pipe of a certain vessel after it is put into operation. The compliance and metallographic structure of materials were analyzed with an inductively coupled plasma emission spectrometer, a carbon and sulfur analyzer and a metallographic microscope. A field emission scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the microscopic morphology of the corrosion pits, and the composition analysis of the corrosion products around the failure sites was carried out by X-ray diffraction and microscopic Raman spectroscopy. The causes and mechanism of corrosion were further determined by electrochemical test and microbial identification culture. The analysis of material compliance showed that the composition of the 20# steel pipe beam met the requirements of the standard. It was found in morphological observation that the edge of the 20# steel pit was stepped, with obvious climbing phenomenon, and the pit was black around. The results of X-ray energy spectrometer showed that there was a large amount of sulfur on the inner surface of 20# steel, and it was found by Raman analysis and XRD analysis that sulfur elements mainly existed in the form of

收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-06-15

Received: 2023-04-06; Revised: 2023-06-15

引文格式: 王鑫, 刘峰, 全宏韬, 等. 某 20# 钢腐蚀穿孔失效原因分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 91-97.

WANG Xin, LIU Feng, TONG Hong-tao, et al. Failure Cause of Corrosion Perforation of a Certain type 20# Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 91-97.

sulfate and sulfide. The electrochemical test results showed that the corrosion rate of 20# steel was increased obviously in the solution containing sulfide. Further microbial culture of the corrosion products revealed the presence of sulfate reducing bacteria. Therefore, microbial corrosion is the main cause of perforation of 20# steel pipe.

KEY WORDS: 20# steel; corrosion failure; sulfate reducing bacteria (SRB); electrochemical analysis; microbial corrosion; Raman spectrometer

20#钢是一种优质的碳素结构钢，它的强度很低，但是它的塑性、韧性、易加工性和焊接性能都很好，所以它在低载荷高韧性的零件上得到了广泛的应用^[1-3]。但在实际使用过程中，由于工况较为复杂，环境影响因素较多，20#钢也常受到不同因素的影响，从而引发腐蚀泄露事故^[4-9]。

姚懿容等^[10]对某石化公司材质为20#钢的锅炉水管外壁泄露原因进行了分析，研究发现，弯管外圆侧位置的应力和腐蚀的协同作用是水管断裂失效的主要原因。王文涛等^[11]对某热电厂锅炉内省煤器20#钢的泄漏原因进行了分析，发现泄露的发生与鳍片焊接不规范有关。徐学旭等^[12]对某站场含CO₂低压天然气管道内部腐蚀失效问题进行了研究，结果表明，CO₂薄液膜环境和介质流速两者相互作用促进了该天然气管道局部腐蚀失效的发生。马丁等^[13]对某20#钢输氢管道在大庆地区沼泽环境服役过程中的管道外表面开裂问题进行了分析，发现管道发生腐蚀失效主要与应力和腐蚀介质协同作用有关。李俊俊等^[14]研究了某化肥厂循环水换热器管束钢20#钢的失效管束，发现垢下腐蚀是引起管束穿孔的主要原因。

某船20#钢管服役时发生腐蚀穿孔，该钢管的工况状态为保压的高温蒸汽状态。管段长122 cm，穿孔处壁厚3 mm，钢管原始形貌及穿孔位置如图1所示。本研究主要对穿孔处腐蚀严重部位进行了取样，并通过形貌观察、腐蚀产物分析、电化学测试及微生物分析等方法研究其失效机理，以期为预防同类微生物腐蚀失效事故的发生提供理论依据和相关数据支撑。

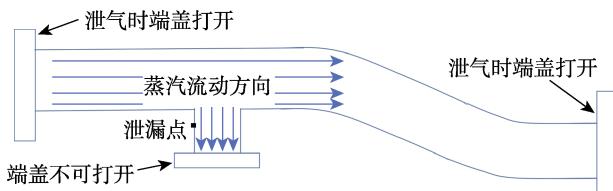


图1 管段形貌
Fig.1 Pipe segment morphology

表1 20#钢化学成分分析结果
Tab.1 Results of chemical component analysis of # 20 steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
测试值%	0.210	0.240	0.450	0.014	0.018	0.02	0.010	0.020
标准值%	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.3	≤0.25

1 试验

为了判断管段是否达到标准使用要求，采用5110SVDV电感耦合等离子体发射光谱仪、CS800碳硫分析仪对失效管段部位进行材质化学成分分析。按照GB/T 13298—91的要求，对管段不同部位在OLYMPUS GX71金相显微镜下进行金相组织观察。

对于管段内部带锈层的试样，通过ULTRA55场发射扫描电子显微镜(SEM)观察其微观形貌，采用X射线衍射仪(Bruker D8 ADVANCE A25X)及显微拉曼光谱仪(HORIBA, JY Lab RAM HR)对失效部位周围的腐蚀产物进行成分分析。切取部分管段进行电化学测试及微生物分析，以确定导致腐蚀穿孔的主要原因。电化学测试采用多通道电化学工作站(Bio-Logic VMP3)进行，工作电极为失效20#钢管段(试验前将管段内表面腐蚀产物去除，并用砂纸打磨至光亮)，所选用参比电极为饱和甘汞电极(SCE)，辅助电极为铂片。待开路电位(OCP)稳定后进行电位扫描，扫描速率为10 mV/min，扫描范围为-250~250 mV(相对OCP)。

2 结果与讨论

2.1 符合性分析

失效管段检测试样所含元素及含量结果见表1。结果表明，试样中的主要成分和各成分含量均达到了国家标准。试样金相组织分析结果如图2所示，可以发现，在穿孔处及轻微腐蚀处，钢管的微观结构都是珠光体及铁素体。试验结果显示，此管在使用期间，其材质未发生任何变化。

2.2 腐蚀形貌分析

由图3可见，20#钢管穿孔处及周围蚀坑边缘均呈阶梯状，具有明显的攀爬现象，穿孔处及其边缘腐蚀产物呈堆积状态，外缘区域及未腐蚀区域被疏松的黄棕色腐蚀产物所覆盖。管段穿孔处微观形貌如图4

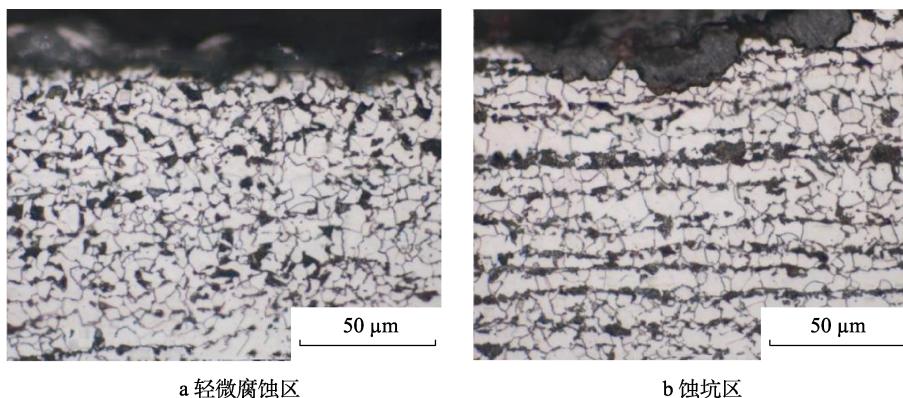


图 2 20#钢管段金相组织

Fig.2 Metallographic structure of 20# steel pipe section: a) mild corrosion zone; b) erosion pit area

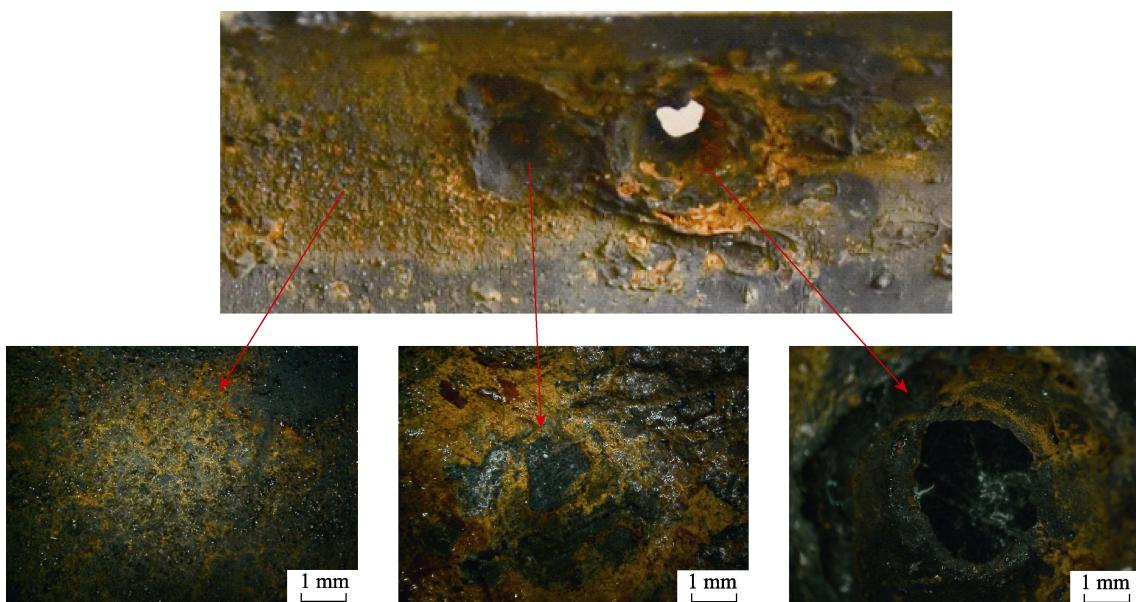


图 3 管段内壁宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of inner wall of pipe section

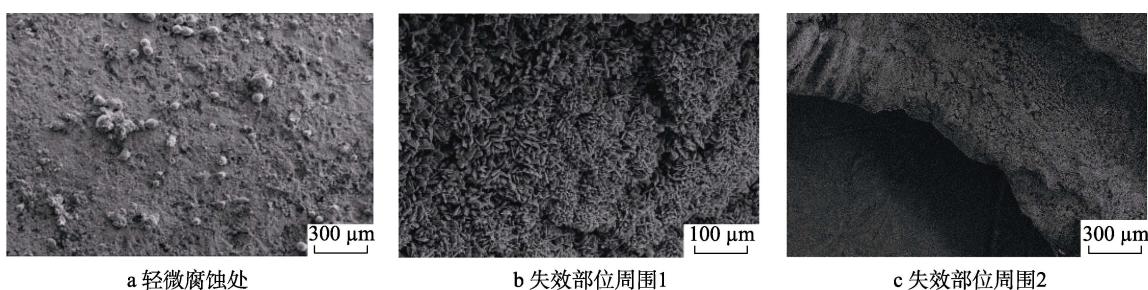


图 4 管段内壁表面微观形貌

Fig.4 Surface morphology of inner wall of pipe section: a) slight corrosion; b) around the failure site 1; c) around the failure site 2

所示。管段轻微腐蚀处微观形貌如图 4a 所示, 可以看到其表面腐蚀产物呈球状, 较疏松地分布于基体表面。从图 4b、c 中可以看出, 失效部位周围腐蚀产物均呈疏松片状。

2.3 内壁腐蚀产物成分分析

图 4 各处能谱分析仪成分分析结果见表 2。由表 2 可以看出, 轻微腐蚀处主要存在元素为 Fe、O、

C, 说明此处腐蚀产物主要是铁的氧化物。失效部位周围腐蚀产物中主要存在元素为 Fe、O、C, 除此之外, 在穿孔区有 S、Cu、P、Mn、Mg 等元素存在, 且 S 元素在穿孔处及附近凹坑处大量异常存在, 其质量分数达到了 1.1%~1.3%, 远超过 20#钢基体 S 元素的含量。结合管路运行状态, 推测 Cu 元素来源于上游 B30 管段, P 元素来源于上游管段内介质水, 而大量 S 元素的存在一般与微生物腐蚀的代谢产物有关。

失效部位周围腐蚀产物X射线衍射分析结果如图5a所示，在腐蚀产物中发现了 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 FeS 的物相^[15-17]。失效部位周围腐蚀产物的拉曼光谱分析结果如图5b所示，在 221 、 290 cm^{-1} 处发现了 Fe_2O_3 的特征峰，在 385 cm^{-1} 发现了 FeS 的特征峰， 460 cm^{-1} 处发现了 SO_4^{2-} 的特征峰，在 660 cm^{-1} 处发现了与 Fe_3O_4 的特征峰，在 1300 cm^{-1} 处出现了 FeOOH 的特征峰^[18-21]。从拉曼光谱可以看出，腐蚀坑内存在硫酸盐还原菌的代谢产物 FeS ，且蚀坑内主要腐蚀产物为 Fe_2O_3 与 FeOOH ，同时含有少量 Fe_3O_4 。 Fe_2O_3 与 FeOOH 结构较为疏松，无法对基体形成有效保护。

表2 图4中相应区域的能谱分析结果(质量分数)
Tab.2 Energy spectrum analysis results (mass fraction) of corresponding regions in Fig.4

元素	C	O	Fe	Cu	S	P	Mn
a	1.03	33.5	65.47	—	—	—	—
b	0.78	31.47	49.89	4.77	1.10	8.10	3.89
c	0.78	32.39	52.06	3.03	1.34	7.72	2.68

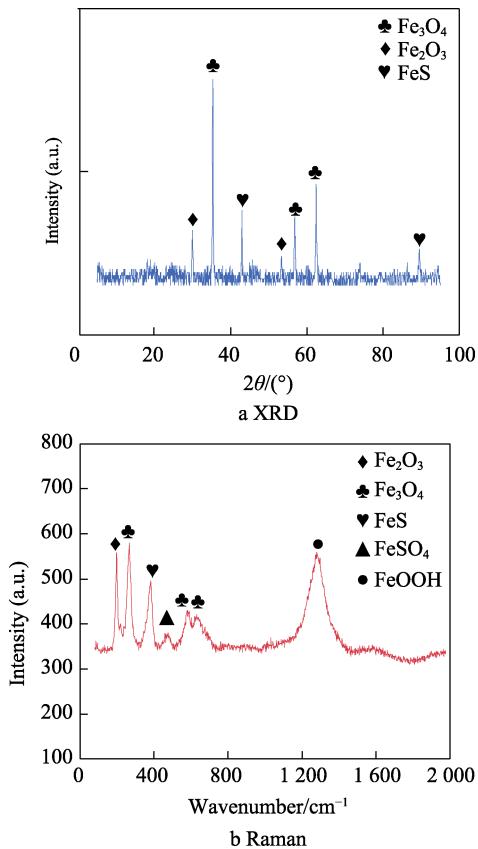


图5 管段失效部位周围腐蚀产物分析

Fig.5 Analysis of corrosion products around the failure site of pipe section

2.4 电化学测试

硫化物是微生物腐蚀的主要产物^[22]，为了判断硫化物对20#钢的影响，对失效20#钢管切割后进行不同浓度下硫离子动电位极化曲线测试。20#钢在 Na_2S 质

量分数为0%、0.5%、1%、2%、3%水溶液中的极化曲线如图6所示。为了与实船水溶液情况相近，向蒸馏水中加入适量磷酸盐，使得溶液电导率在 $2.1\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右。由图6可以看出，随着水溶液中硫离子浓度含量的增加，20#钢的自腐蚀电位先降低、后升高，自腐蚀电流先增大、后减小。在 Na_2S 质量分数为2%的蒸馏水中，20#钢的腐蚀速率达到最大。将20#钢在添加不同浓度 Na_2S 的溶液中的极化曲线进行拟合后，结果见表3。由表3可以看出，20#钢在含2% Na_2S 的蒸馏水溶液中的腐蚀速率是在纯蒸馏水腐蚀速率的5倍左右。因此，硫化物的存在可加速实船20#碳钢管的腐蚀，最终导致20#碳钢管的穿孔。

表3 20#钢在不同质量浓度的 Na_2S 水溶液中的动电位极化曲线拟合结果

Tab.3 Fitting results of potentiodynamic polarization curves of 20# steel in aqueous solution of Na_2S with different mass concentrations

Na_2S 质量分数/%	$J_0/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_0/V	Corrosion rate/ $(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$
0	0.374	-0.435	0.002
0.5	0.535	-0.561	0.006
1	0.859	-0.616	0.008
2	1.196	-0.808	0.011
3	0.949	-0.797	0.010

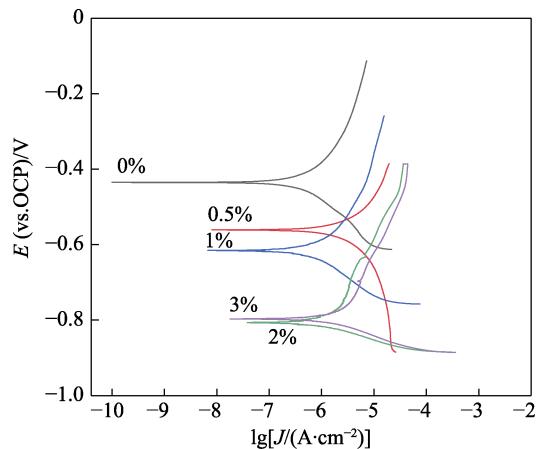


图6 20#钢在不同质量浓度的 Na_2S 水溶液中的动电位极化曲线

Fig.6 Potentiodynamic polarization curves of 20# steel in aqueous solution of Na_2S with different mass concentrations

2.5 微生物分析

通过对管段轻微腐蚀处、失效部位周围腐蚀产物进行微生物鉴别培养，定性分析管段中是否含有微生物。细菌生长鉴别方法见表4。微生物分析试验过程及结果如图7、图8所示。可以看出，失效部位周围腐蚀产物的硫酸盐还原菌(SRB)细菌测试瓶瓶内液体由黄变黑，铁细菌(FEB)细菌测试瓶瓶内液体棕

色褪去生成黑色沉淀腐蚀, 腐生菌 (TGB) 细菌培养瓶中液体由红变黄, 说明穿孔处腐蚀产物中存在硫酸盐还原菌 (SRB)、铁细菌 (FEB) 及腐生菌 (TGB)。在轻微腐蚀处细菌测试瓶内, 液体颜色无明显变化, 未检测到相关微生物的存在。结合下部支管存在的空间密闭环境易于形成无氧环境, 有利于硫酸盐还原菌生存, 以及穿孔处周围腐蚀产物中存在大量硫化物的现象, 考虑微生物腐蚀 (SRB) 是造成腐蚀穿孔的主要原因, 腐蚀机理如下^[23]。

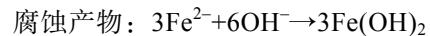
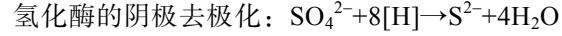
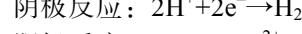
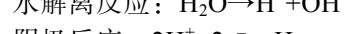


表 4 细菌生长鉴别方法
Tab.4 Bacterial growth identification method

细菌瓶种类	规格型号	培养温度	培养时间	阳性反应特征
腐生菌测试瓶	KBC-TGB		(24±2) h	瓶中液体由红变黄
铁细菌测试瓶	KBC-FEB	(33±2) °C	7 d	瓶中液体棕色褪去生成棕色或黑色沉淀
硫酸盐还原菌测试瓶	KBC-SRB		7 d	瓶中微黄色液体变黑或生成黑色沉淀

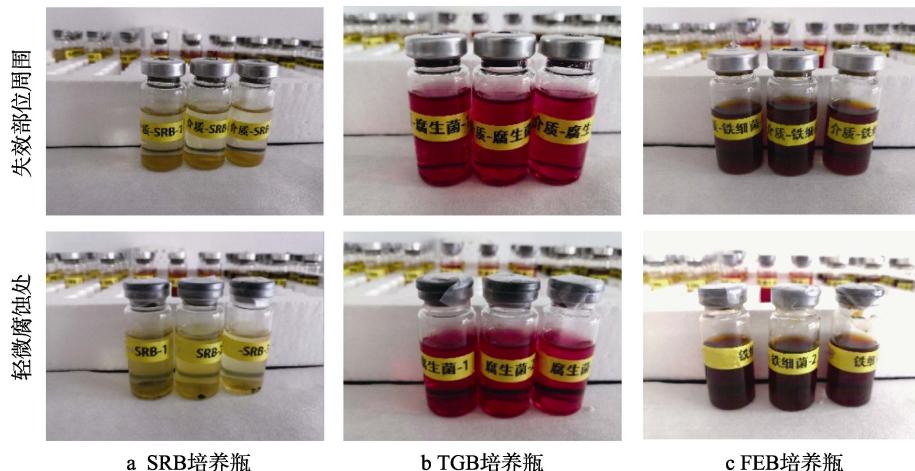


图 7 微生物定性分析试验试验前

Fig.7 Microbial qualitative analysis test before the test: a) SRB culture bottle; b) TGB culture bottle; c) FEB culture bottle

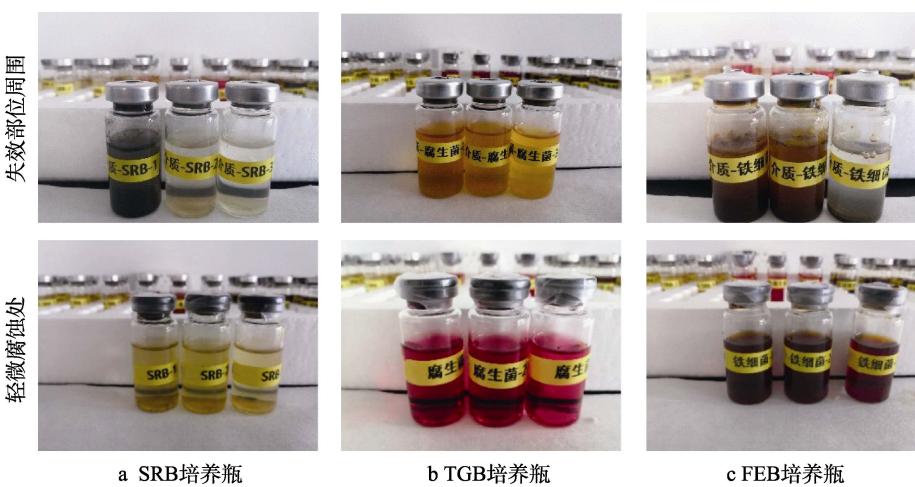


图 8 微生物定性分析试验试验后

Fig.8 Microbial qualitative analysis test after the test: a) SRB culture bottle; b) TGB culture bottle; c) FEB culture bottle

SRB 在金属表面附着后, 通过氢化酶的阴极去极化作用促进阴极反应。同时, 溶液中的 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} , 与铁离子结合生成 FeS 。文献[24-27]表明, SRB 排放的 H_2S 以及产酸菌(APB)产生的有机酸等,

都可以加快腐蚀的发展, 并且在细菌的作用下, 其代谢物黏附在金属的表面, 可以形成一种酸性的局部微环境。另外, 非均质的微生物被膜所产生的胞外聚合物 (EPS) 起到了扩散阻挡作用, 阻碍了环境中的氧

在金属表面的转移，导致了腐蚀产物的聚集，形成了氧浓差电池，进而加速了局部腐蚀的发展，直到发生穿孔^[28]。

3 结论

1) 失效 20#碳钢管穿孔处腐蚀产物呈阶梯状具有明显攀爬现象，通过能谱仪分析发现，穿孔处异常存在大量 S 元素，进一步的拉曼光谱分析及 X 射线衍射分析证明了腐蚀产物中存在硫化物。

2) 微生物分析试验表明，20#碳钢管中存在硫酸盐还原菌，硫化物是微生物腐蚀的主要产物。模拟工况电化学试验结果的分析表明，硫化物的存在可以明显加速 20#钢管的腐蚀速率。

3) 20#碳钢管在实船工况下发生快速腐蚀穿孔的原因很可能是由于下部支管由于空间密闭环境为硫酸盐还原菌的生存提供了良好的生长条件，导致支管内壁局部发生微生物腐蚀造成的。在微生物腐蚀造成局部腐蚀后，微生物代谢产物等在金属表面附着，局部微环境发生酸化，且腐蚀产物硫化物在局部堆积，进一步促进局部腐蚀的发展，直至穿孔。

4) 为避免此种腐蚀失效的发生，建议在设备运行期间及时对支管内存积的废液进行排空或对支管设计进行相应修改，避免有利于硫酸盐还原菌生存的密闭无氧空间的生成。

参考文献：

- [1] 李梦丽. 管用 20 钢应变时效的演化规律及无损检测方法[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LI Meng-li. Evolution Law and Nondestructive Testing Method of Strain Aging of 20 Steel for Pipe[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [2] 张美丽. 20 钢螺钉断裂失效分析[J]. 商洛学院学报, 2016, 30(6): 23-26.
ZHANG Mei-li. Analysis of 20 Steel Screw Fracture Failure[J]. Journal of Shangluo University, 2016, 30(6): 23-26.
- [3] 王建奇, 李海霞, 王梅英, 等. 20 钢吊环螺钉断裂分析[J]. 大型铸锻件, 2016(4): 34-36.
WANG Jian-qi, LI Hai-xia, WANG Mei-ying, et al. Fracture Analysis of 20 Steel Lifting Eye Bolt[J]. Heavy Castings and Forgings, 2016(4): 34-36.
- [4] 陈琼陶, 于天奇, 全美荣, 等. 20 钢埋地管道外腐蚀失效行为分析研究[J]. 石油工程建设, 2020, 46(6): 67-72.
CHEN Qiong-tao, YU Tian-qi, QUAN Mei-rong, et al. Analysis of Corrosion Failure Behavior of Buried Pipeline of Steel 20[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(6): 67-72.
- [5] 刘智勇, 王福明, 程学群, 等. 20 钢热水管焊缝爆裂的失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(1): 30-34.
LIU Zhi-yong, WANG Fu-ming, CHENG Xue-qun, et al. Stress Corrosion Cracking Failure of 20 Steel Used for Hot Water Pipe[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(1): 30-34.
- [6] 李博文, 赵林, 台闯. 20 号钢管状电感探针在模拟某气田环境下的腐蚀失效分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2012, 29(6): 58-61.
LI Bo-wen, ZHAO Lin, TAI Chuang. Analysis of Corrosion Failure of 20# Steel Tubular Induction Probe in Simulated Environment of a Gas Field[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2012, 29(6): 58-61.
- [7] 任呈强, 曹然伟, 郑云萍, 等. 20G 钢输气管线腐蚀失效研究[J]. 压力容器, 2011, 28(3): 6-11.
REN Cheng-qiang, CAO Ran-wei, ZHENG Yun-ping, et al. Investigation on the Corrosion Failure of 20G Gas Pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(3): 6-11.
- [8] 王国凡, 马中全, 周英勤. 20G 钢锅炉弯管蚀孔的失效分析[J]. 机械工程材料, 2003, 27(9): 46-47.
WANG Guo-fan, MA Zhong-quan, ZHOU Ying-qin. Failure Analysis for Corrosion of 20G Steel Boiler Bend[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(9): 46-47.
- [9] 李伟, 程建华. 油气线 20 钢弯头腐蚀失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2006, 42(4): 205-206.
LI Wei, CHENG Jian-hua. Failure Analysis of 20 Steel Bend Corrosion in oil-Gas Line[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2006, 42(4): 205-206.
- [10] 姚懿容, 李明, 蒋蓉蓉, 等. 20 钢锅炉水管的泄漏失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(11): 237-240.
YAO Yi-rong, LI Ming, JIANG Rong-rong, et al. Leakage Failure Analysis of 20 Steel Boiler Pipe[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(11): 237-240.
- [11] 王文涛, 梁志刚. 某电厂省煤器泄漏原因分析及处理[J]. 东北电力技术, 2022, 43(1): 20-22.
WANG Wen-tao, LIANG Zhi-gang. Cause Analysis and Treatment of Economizer Leakage in a Power Plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(1): 20-22.
- [12] 徐学旭, 刘智勇, 李建宽, 等. 20 钢和 16Mn 钢天然气管道失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(2): 195-201.
XU Xue-xu, LIU Zhi-yong, LI Jian-kuan, et al. Failure Analysis on Natural Gas Pipeline of 20 Steel and 16Mn Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(2): 195-201.
- [13] 马丁, 刘智勇, 杜翠薇, 等. 沼泽环境下 20 钢输氢气管道失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(4): 431-436.
MA Ding, LIU Zhi-yong, DU Cui-wei, et al. Corrosion Failure Analyses of 20 Steel Pipeline for Hydrogen Transportation in Swampland[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(4): 431-436.
- [14] 李俊俊, 刘峰. 换热器管束腐蚀穿孔失效原因分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2012, 32(3): 54-57.
LI Jun-jun, LIU Feng. Failure Analysis on Corrosion

- Failure of Heat Exchanger and Proposal[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2012, 32(3): 54-57.
- [15] 梁成浩, 李淑英. 海水冷却装置 20# 碳钢管腐蚀破損分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(3): 170-172.
LIANG Cheng-hao, LI Shu-ying. Failure Analysis of Seawater Cooling Chiller on 20# Carbon Steel Pipe[J]. Corrsion Science and Technology Protection, 2000, 12(3): 170-172.
- [16] 白鹏鹏. H₂S 环境下碳钢腐蚀产物的晶型演化及其对腐蚀行为的影响机制研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
BAI Peng-peng. Study on Crystal Evolution of Corrosion Products of Carbon Steel in H₂S Environment and Its Influence Mechanism on Corrosion Behavior[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [17] 孙成, 韩恩厚, 王旭. 海泥中硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(2): 104-106.
SUN Cheng, HAN En-hou, WANG Xu. Effects of Srb on Corrosion of Carbon Steel in Seamud[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2003, 15(2): 104-106.
- [18] 韩迎春, 常志禄, 李文静, 等. 拉曼光谱法检测过渡金属硫化物氧化过程中硫形态转化[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 50-53.
HAN Ying-chun, CHANG Zhi-lu, LI Wen-jing, et al. In-Situ Raman Monitoring the Transformation of Sulfur Species in Transition Metal Sulphides during Its Oxidation[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(5): 50-53.
- [19] 张文涛, 周丽, 邹晓兰, 等. 饮用水中硫化物的表面增强拉曼光谱检测方法[J]. 生物加工过程, 2020, 18(4): 532-535.
ZHANG Wen-tao, ZHOU Li, ZOU Xiao-lan, et al. Detection of Sulfide in Drinking Water by Surface Enhanced Raman Spectroscopy[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2020, 18(4): 532-535.
- [20] GENCHEV G, ERBE A. Raman Spectroscopy of Mackinawite FeS in Anodic Iron Sulfide Corrosion Products[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016, 163(6): C333-C338.
- [21] 张慧霞, 戚霞, 邓春龙, 等. 不同腐蚀体系中低合金钢锈层的拉曼光谱研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 30-34.
ZHANG Hui-xia, QI Xia, DENG Chun-long, et al. Study on Corrosion Rust Layers of Low Alloy Steel in Different Simulated Seawater Environment Using Raman Spec-
- troscopy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 30-34.
- [22] 董续成, 管方, 徐利婷, 等. 海洋环境硫酸盐还原菌对金属材料腐蚀机理的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(1): 1-12.
DONG Xu-cheng, GUAN Fang, XU Li-ting, et al. Progress on the Corrosion Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria in Marine Environment on Metal Materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(1): 1-12.
- [23] 刘宏伟, 徐大可, 吴亚楠, 等. 微生物生物膜下的钢铁材料腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 409-418.
LIU Hong-wei, XU Da-ke, WU Ya-nan, et al. Research Progress in Corrosion of Steels Induced by Sulfate Reducing Bacteria[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 409-418.
- [24] 吕美英, 李振欣, 杜敏, 等. 微生物腐蚀中生物膜的生成、作用与演变[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 59-68.
LYU Mei-ying, LI Zhen-xin, DU Min, et al. Formation, Function and Evolution of Biofilm in Microbiologically Influenced Corrosion[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 59-68.
- [25] 黄烨, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699-1713.
HUANG Ye, LIU Shuang-jiang, JIANG Cheng-ying. Microbiologically Influenced Corrosion and Mechanisms[J]. Microbiology China, 2017, 44(7): 1699-1713.
- [26] 田丰, 白秀琴, 贺小燕, 等. 海洋环境下金属材料微生物腐蚀研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 182-196.
TIAN Feng, BAI Xiu-qin, HE Xiao-yan, et al. Research Progress on Microbiological Induced Corrosion of Metallic Materials under Ocean Environment[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 182-196.
- [27] 杨家东, 许凤玲, 侯健, 等. 金属材料的微生物腐蚀与防护研究进展[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 59-65.
YANG Jia-dong, XU Feng-ling, HOU Jian, et al. Research Progress in Microbial Corrosion of Metal Materials and Its Prevention[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 59-65.
- [28] 刘丹. 海洋用耐蚀金属材料微生物腐蚀行为及机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
LIU Dan. Study on Microbial Corrosion Behavior and Mechanism of Marine Corrosion-Resistant Metal Materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.

责任编辑: 刘世忠