

# 某气井采气管线穿孔失效原因分析及对策研究

李 静<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(北京), 石油工程学院, 北京

<sup>2</sup>中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川 遂宁

收稿日期: 2023年9月25日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月25日

## 摘要

某气井采气管线发生穿孔失效, 对站场正常生产造成影响, 通过化学成分分析、XRD分析、XPS分析、扫描电镜分析、冶金质量分析、金相组织分析等方法对其失效原因进行分析, 结果表明: 高含量的Cl离子气田水沉积导致点蚀, 最后引起焊缝处穿孔; 夹杂物聚集 + 高含量的Cl离子气田水沉积导致点蚀, 从而引起基体腐蚀坑洞。根据造成腐蚀穿孔的原因, 提出了具体对策。

## 关键词

采气管线, 穿孔失效, 点蚀

# Analysis and Countermeasures of Perforation Failure of Gas Production Pipeline in a Gas Well

Jing Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing

<sup>2</sup>Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company Chuazhong Oil and Gas Mine, Suining Sichuan

Received: Sep. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The perforation failure of a gas production pipeline in a gas well affected the normal production of the station. The failure causes were analyzed by chemical composition analysis, XRD analysis, XPS

文章引用: 李静. 某气井采气管线穿孔失效原因分析及对策研究[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(4): 343-349.

DOI: 10.12677/jogt.2023.454042

analysis, scanning electron microscope analysis, metallurgical quality analysis, metallographic structure analysis and other methods. The results showed that high content of Cl-gas field water deposition led to pitting, and finally caused weld perforation. The accumulation of inclusions + deposition of high content of Cl-gas field water leads to pitting corrosion, which causes matrix corrosion. According to the causes of corrosion perforation, specific countermeasures are put forward.

## Keywords

Gas Production Pipeline, Perforation Failure, Pitting

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

某气井采气管线气液混输，输送介质包括未经处理的原料气和气田水，日输水量 50~60 方，气田水为弱酸性，pH 值为 6~8，矿化度 120 g/L，Ca<sup>2+</sup>浓度 4000~4500 mg/L，Cl<sup>-</sup>浓度 20,000~70,000 mg/L，水型为氯化钙水型。管线为 L360QS 无缝钢管，管线腐蚀穿孔形貌如图 1、图 2 所示，发生失效的部位为底部焊缝和管材基体，均位于 6 点方向。

针对采气管线失效，目前最常采用的方式为对失效样品进行理化检测等，以明确失效原因并制定针对性预防措施。本次对失效管段进行了一系列分析及检验，以找出管线腐蚀穿孔的原因，防止此类事故再次发生[1]。



Figure 1. Macroscopic morphology of perforation in weld  
图 1. 焊缝处穿孔宏观形貌图



Figure 2. Macroscopic topography of pipe body cavity  
图 2. 管体坑洞宏观形貌图

## 2. 样品制备

### 2.1. 金相样品和扫描电镜样品

用锯弓用手工锯断取样，在此附近取样，样品分成 2 类：腐蚀物表面形貌样品和室温冷镶嵌样品。为了避免加热温度对腐蚀产物的影响，采用冷镶嵌。用金相砂纸磨样，金刚石抛光膏进行机械抛光，然后进行金相和扫描电镜分析。最后采用 2% 硝酸酒精腐蚀抛光面金相组织分析。

### 2.2. XRD 样品

在管段腐蚀情况较多的位置附近刮取粉末样，用研磨器研磨后过筛进行 XRD 物相分析。

### 2.3. XPS 样品

取腐蚀坑洞深度较深的位置用锯弓手工锯断取样，样品大小为  $5 \times 5 \times 3$  mm。

### 2.4. 化学成分样品

将锯下的管段外侧未受腐蚀的表面截取  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  规格样品，采用直读光谱仪进行化学成分测试。

样品编号及详细信息如表 1 所示。

**Table 1.** Experimental sampling information

**表 1.** 实验取样信息

	编号	取样点	备注
化学成分分析	1-1#	管体	
	3-1#	靠近焊缝的管体	制样后检测
	3-2#	焊缝处	
夹杂物及金相分析	1-2#	管体	观察夹杂物后腐蚀观察金相组织
	3-3#	焊缝处	
扫描电镜分析	1-3#	管体坑洞表面	1-3#、3-4#观察表面形貌特征， 1-4#、3-5#和 3-6#观察截面
	1-4#	管体坑洞截面	
	3-4#	焊缝表面(穿孔)	
	3-5#	焊缝截面(靠近穿孔端)	
	3-6#	焊缝截面(远离穿孔端)	
XRD	1-5#	管体坑洞表面	粉末样品
	3-7#	焊缝穿孔处附近	
XPS	1-6#	管体坑洞附近	块状样品
	3-8#	焊缝穿孔处附近	
	3-9#	焊缝穿孔处附近	

## 3. 理化检测

### 3.1. 化学成分分析

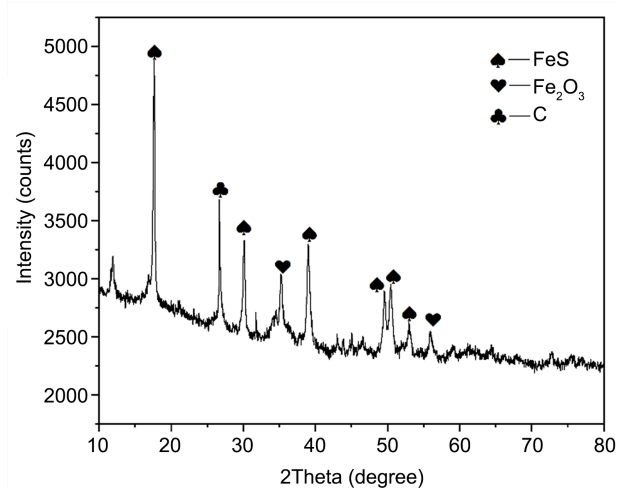
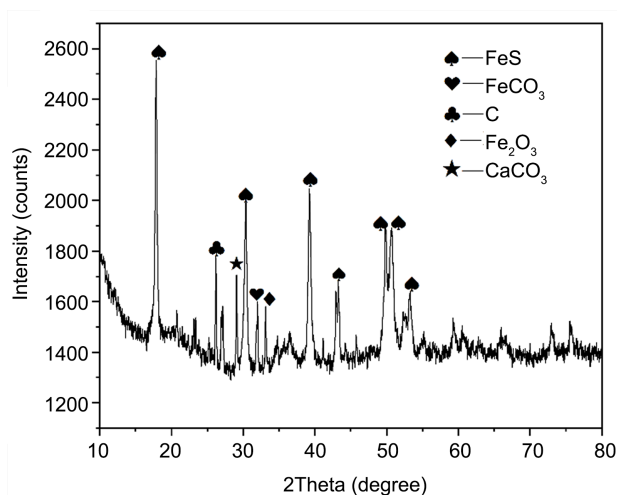
使用直读光谱仪对取样管段进行化学成分分析，结果如表 2 所示。结果表明：3 个取样位置即管体、焊缝附近以及焊缝的化学成分均小于标准 GB/T9711.3 所要求值，满足该标准，而且 P 的含量远低于标准，C 的含量也低于标准，材质比较好。

**Table 2.** Chemical composition analysis of corroded pipe**表 2.** 腐蚀管线化学成分分析结果

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb	Al
GB/T 9711.3-2005	0.16	0.45	1.65	0.020	0.003	--	--	--	--	0.04	0.07	0.05	--
1-1#	0.12	0.26	1.17	0.007	0.003	0.09	0.03	0.08	0.06	0.010	0.036	0.003	0.01
3-1#	0.11	0.28	1.14	0.009	0.003	0.07	0.04	0.04	0.07	0.013	0.040	0.003	0.01
3-2#	0.09	0.30	1.17	0.007	0.003	0.05	0.03	0.02	0.06	0.015	0.018	0.005	0.01

### 3.2. XRD 分析

在管体腐蚀坑表面(编号 1-5#)、焊缝穿孔位置附近(编号 3-7#)刮取粉末, 经过干燥并用玛瑙研磨器研磨后过筛制取粉末进行 XRD 分析, 结果如图 3、图 4 所示。结果表明: 二者均含有 FeS、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、C, 焊缝穿孔位置附近还含有部分 FeCO<sub>3</sub> 和 CaCO<sub>3</sub>。

**Figure 3.** XRD results of pitting pit surface (1-5#)**图 3.** 管体点蚀坑表面(1-5#) XRD 结果**Figure 4.** XRD results near the perforation of the weld (3-7#)**图 4.** 焊缝穿孔位置附近(3-7#) XRD 结果

### 3.3. XPS 分析

在管体腐蚀坑附近(编号 1-6#)、焊缝穿孔位置两侧(编号 3-8#、3-9#)各取一个  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的块状样品表面进行 XPS 分析, 其结果如图 5、图 6、图 7 所示。结果表明: 这些样品表面的主要成分均为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeS}$ 、 $\text{FeCO}_3$ , 与 XRD 结果相符; 同时含有少量  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{S}$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , 这可能是管道介质中的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  引起腐蚀的结果。

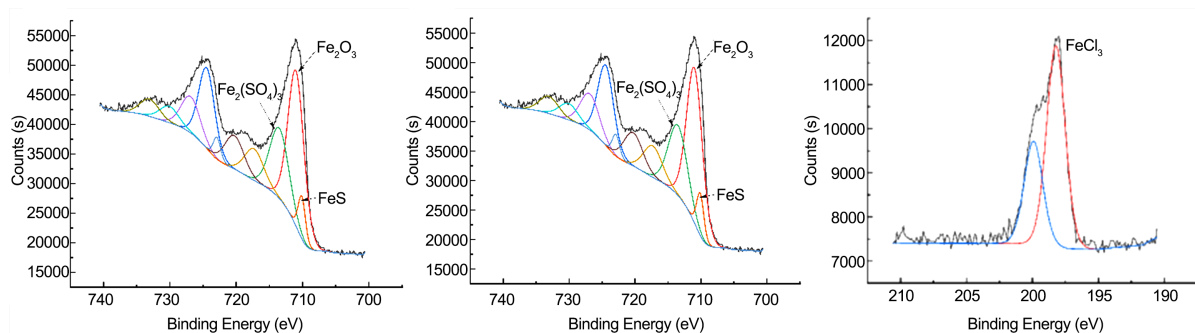


Figure 5. Tube body corrosion pit near (1-6#) XPS results

图 5. 管体腐蚀坑附近(1-6#) XPS 结果

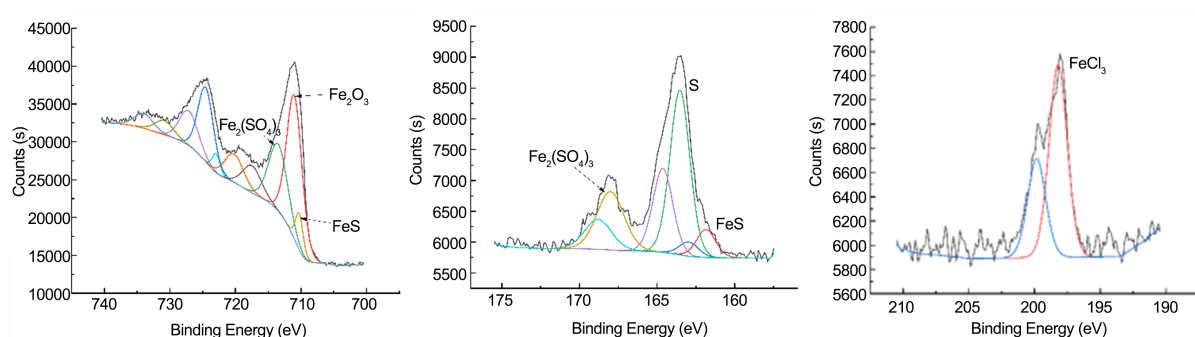


Figure 6. Weld hole location near (3-8#) XPS results

图 6. 焊缝穿孔位置附近(3-8#) XPS 结果

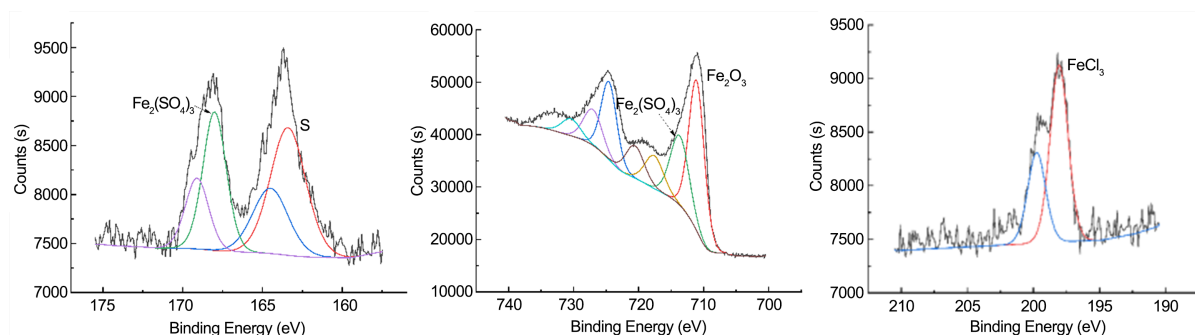


Figure 7. Weld hole location near (3-9#) XPS results

图 7. 焊缝穿孔位置附近(3-9#) XPS 结果

### 3.4. 扫描电镜分析

焊缝穿孔附近坑洞中腐蚀层表面有片状、不规则形状和晶体状, 不均匀腐蚀严重。EDS 点扫检测到不规则的腐蚀物含有 C、O、Cl 和 S, 面扫发现晶体状主要含硫, 结合其形貌可以推测为单质 S。检测到

穿孔处腐蚀产物有很高的 S (3.63%)和 Cl (22.25%)。这说明 Cl 造成的点蚀非常严重。而管体坑洞处含量低, 低于焊缝坑洞附近的含量, 分别是 Cl 为 3.04%, S 为 1.65%。这也说明在焊缝处容易导致点蚀, 点蚀坑洞发生后大量 Cl<sup>-</sup> 富集, 进一步加剧不均匀腐蚀。

### 3.5. 冶金质量分析

对焊缝处抛光观察夹杂物, 夹杂物都是点状硅酸盐类, 焊缝中夹杂物尺寸约为 30 μm, 偏大, 说明焊接过程中排渣不是很好。对基体中夹杂物进行分析发现夹杂物也是球状硅酸盐类, 但是偏聚严重, 一些地方尺寸较小 10 μm 左右, 一些地方 35 μm 左右, 说明冶金质量不是太好, 尽管 S、P 含量低, 除渣效果不理想。

### 3.6. 金相组织分析

采用硝酸酒精对抛光后样品腐蚀, 焊缝组织为针状铁素体 + 晶界铁素体 + 魏氏组织, 热影响区组织为铁素体 + 针状铁素体, 基体为珠光体 + 铁素体。这 3 个区域的组织都属于正常组织。

## 4. 分析

对于湿气管线而言, 内腐蚀是导致管线失效的主要形式[2], 而焊缝是整条管线的薄弱环节, 由于焊接操作和自身性能特点等原因, 在服役过程常常会先于管体发生腐蚀破坏, 影响生产[3] [4]。

基于以上分析及检测结果, 该管线腐蚀穿孔原因总结为以下几个方面。

(1) 焊缝穿孔位置和管体坑洞位置为管线 6 点方向, 说明此处聚集较多气田水, 为腐蚀发生提供了较好的介质环境。水中 Cl<sup>-</sup> 含量高达 20,000~70,000 mg/L, pH4~6 属于弱酸性, 同时伴有酸性 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 气体, 腐蚀环境较为苛刻。高的 Cl<sup>-</sup> 在 6 点位导致了点蚀, 而焊缝组织不如基体组织耐蚀性好, 所以在焊缝处优先发生点蚀, 由于 6 点位沉积气田水, 这加剧了腐蚀速度。

(2) EDS 检测到穿孔处腐蚀产物有很高的 S (3.63%)和 Cl (22.25%)。这说明 Cl 造成的点蚀非常严重。而管体坑洞处含量低, 低于焊缝坑洞附近的含量, 分别是 Cl 为 3.04%, S 为 1.65%。这也说明在焊缝处容易导致点蚀, 点蚀坑洞发生后大量 Cl<sup>-</sup> 富集, 进一步加剧不均匀腐蚀。

(3) 管体冶金质量不是很好, 夹杂物为点状(球状), 但是不均匀, 有的尺寸达到 35 μm 左右。在 6 点位处如果有聚集的大夹杂物, 会产生 Cl<sup>-</sup> 引起的点蚀。

总结说来, 6 点位的高含量的 Cl<sup>-</sup> 气田水沉积导致点蚀, 最后引起焊缝处穿孔。基体腐蚀坑洞是因为夹杂物聚集+高含量的 Cl<sup>-</sup> 气田水沉积导致点蚀最后失效。

## 5. 结论与建议

### 5.1. 结论

(1) 该管线焊缝和管体基体组织正常, 管体、焊缝附近以及焊缝的化学成分均小于标准 GB/T9711.3 对 L360QS 材质的要求值, 满足该标准, 而且 P 的含量远低于标准, C 的含量也低于标准, 管体材质比较好, 焊接所用的焊条(丝)选择合理, 但冶金质量不是很好, 夹杂物为点状(球状), 但是不均匀, 有的尺寸达到 35 μm 左右。在 6 点位处如果有聚集的大夹杂物, 会产生 Cl<sup>-</sup> 引起的点蚀。

(2) 6 点位的高含量的 Cl<sup>-</sup> 气田水沉积导致点蚀, 最后引起焊缝处穿孔。基体腐蚀坑洞是因为夹杂物聚集 + 高含量的 Cl<sup>-</sup> 气田水沉积导致点蚀最后失效。

### 5.2. 建议

针对该类似采气工艺管线, 一是控制管线气田水沉积; 二是完善管线缓蚀剂防腐工艺, 如: 增加清

管预膜装置, 定期开展缓蚀剂预膜; 或者使用具有优良耐磨性能的内腐蚀控制技术[5], 如: 内涂层管线或内衬陶瓷等。

## 参考文献

- [1] 黄佳建, 马树春, 李红菊, 等. 某中温过热器管道的腐蚀原因[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(4): 74-77.
- [2] 钟源, 吴永春, 高美尧, 等. 20 钢湿天然气集输管线焊缝泄漏失效分析[C]//第 32 届全国天然气学术年会(2020)论文集. 北京: 中国石油学会, 2020.
- [3] 赖春晓. 焊缝腐蚀的原因和解决方法[J]. 全面腐蚀控制, 2004, 18(6): 10-12.
- [4] 杨壮春, 蔡伊扬, 朱焯森, 等. 介质条件对 X65 管线钢其焊缝接头 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(10): 717-722.
- [5] 李永强, 张晔, 岑媛媛, 等. 混输管线失效原因简析[J]. 现代制造技术与装备, 2019(3): 184-186.