

# Influence of Elemental Sulfur on Corrosion Behavior of X52 Steel in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S Environment

Bin Yao<sup>1\*</sup>, Yong Zhou<sup>1</sup>, Zhanxiang Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Surface Engineering Department of Northwest Oil Field Branch, China Petrochemical Corporation, Wulumuqi Xinjiang

<sup>2</sup>Faculty of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei  
Email: \*yaob.xbsj@sinopec.com

Received: June 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: July 4<sup>th</sup>, 2019; published: July 11<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The effect of elemental sulfur on the corrosion behavior of X52 steel in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> medium was studied by means of autoclave dynamic corrosion test, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The corrosion acceleration mechanism of X52 steel in the presence of elemental sulfur was analyzed and discussed. The results could provide reference for predicting corrosion hazards in environment with high content of H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S and implementing specific protective measures.

## Keywords

Elemental Sulfur, X52 Steel, H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> Environment, Corrosion Behavior

---

# 单质硫对X52钢在H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S环境中的腐蚀行为的影响

姚彬<sup>1\*</sup>, 周勇<sup>1</sup>, 刘战祥<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石化股份有限公司西北油田分公司地面工程处, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>湖北大学材料学院, 湖北 武汉  
Email: \*yaob.xbsj@sinopec.com

收稿日期: 2019年6月19日; 录用日期: 2019年7月4日; 发布日期: 2019年7月11日

---

## 摘要

采用高压釜动态腐蚀实验方法、扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射(XRD)等表面分析技术对比研究了单质硫对X52钢在H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S环境中的腐蚀行为的影响。结果表明, 单质硫的存在显著加速了X52钢的腐蚀速率, 且腐蚀产物中含有单质硫。该研究为预测高H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S环境中的腐蚀危害及实施具体防护措施提供了参考。

质硫对集输管材X52钢在H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>介质中的腐蚀行为的影响, 并分析探讨了单质硫存在条件下X52钢的腐蚀加速机理, 研究结果可为预测高含H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S环境中的腐蚀危害并实施针对性的防护措施提供依据。

## 关键词

单质硫, X52钢, H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>介质, 腐蚀行为

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 前言

含硫天然气有时导致硫元素沿着生产管柱沉积, 并且在一个很宽的 H<sub>2</sub>S 浓度范围内, 硫沉积现象均可发生[1] [2] [3]。由于温度和压力条件的改变, 发生元素硫或者硫以及固体的高级多硫化物析出, 沉积在井筒及集输管线表面, 进而导致气井或集输管线的堵塞, 加速管材的局部腐蚀, 导致管道穿孔、开裂等失效, 并影响气田生产安全, 甚至造成人员伤亡等事故。

X52 钢系列材质是目前国内含硫天然气集输管线常用的管材, 在单质硫腐蚀与 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 电化学腐蚀的联合作用下的腐蚀行为特征是管道天然气输送中关心的问题[4] [5] [6] [7] [8]。另外, 流速在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 介质中本身对钢的腐蚀有重要影响, 还可以通过对腐蚀产物膜或沉积膜结构的影响而间接对腐蚀反应产生作用。本文采用高压釜实验模拟研究了 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S/模拟产出水环境中, X52 钢在气相环境以及液相环境中的腐蚀行为特征, 并探讨了液体流速的影响规律, 研究结果可为预测高含 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 气井开采和集输过程中的腐蚀危害并实施针对性的防护措施提供一定的参考依据。

## 2. 实验部分

### 2.1. 材料和仪器

实验材料为 X52 钢。腐蚀介质的组成如下: NaCl 69346.06 mg/L; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 670.25 mg/L; NaHCO<sub>3</sub> 3308.07 mg/L; MgCl<sub>2</sub> 682.98 mg/L; CaCl<sub>2</sub> 5116.64 mg/L; 单质硫(1/10/100) g/L。实验过程中介质温度为 60℃, 并通 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 气体, 气体分压: H<sub>2</sub>S 1.5 MPa, CO<sub>2</sub> 0.8 MPa。

所有试剂均采用分析纯化学试剂, 并用去离子水配制溶液。

### 2.2. 实验方法

在 CORTEST 高压釜内进行腐蚀挂片失重实验, 实验过程中保持介质温度 60℃, 并通 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 气体, 气体分压分别为 H<sub>2</sub>S 1.5 MPa, CO<sub>2</sub> 0.8 MPa。将一部分试片悬挂于溶液中, 另一部分试片悬挂于釜内液面之上的气相环境中, 挂片 72 小时后, 取出试片, 称取失重数据, 取三片平行试样的平均值进行比较, 并观察和记录试样表面腐蚀特征。并采用(JSM-7500F)和 X 射线光电子能谱(Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi)对部分试样进行腐蚀形貌观察和元素分析。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 单质硫对 X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 体系中腐蚀行为的影响

表 1 为 X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 模拟水体系的液相和气相环境中测得的腐蚀数据。图 1 为腐蚀试片去除腐

**Table 1.** Corrosion data of X52 steel measured in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> simulated water system at 60 degrees Celsius  
**表 1.** X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 模拟水体系中 60°C 条件下的腐蚀数据

试片安装位置	平均腐蚀速/(mm/a)	腐蚀形貌
气相	0.9919	无金属光泽, 局部腐蚀
液相	0.1523	有金属光泽, 均匀腐蚀

蚀产物后拍摄的腐蚀特征照片。由表 1 和图 1 可知, 液相、气相中 X52 钢试片的腐行为差别较大, 液相中 X52 的腐蚀试片表现为均匀腐蚀形貌, 腐蚀 72 小时后, 表面尚有光泽; 而气相中试片的腐蚀速率远高于液相中的试片, 局部腐蚀现象较为显著, 表面有肉眼可见的点蚀坑存在。



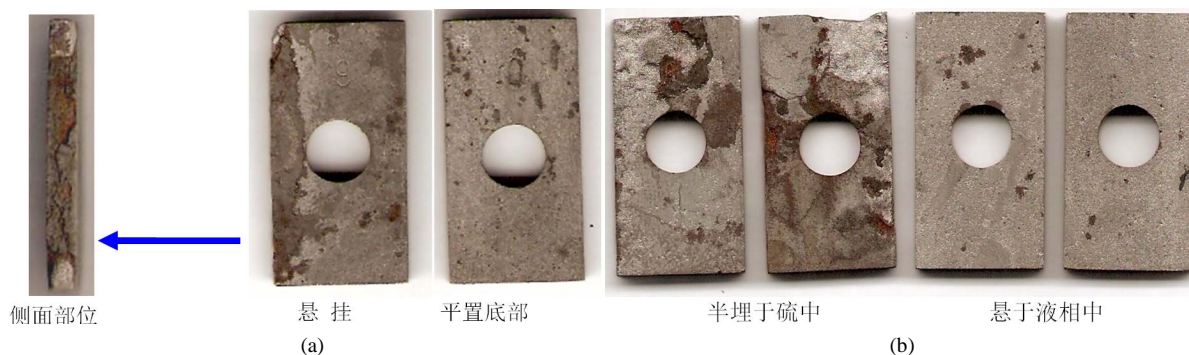
**Figure 1.** Corrosion morphology of X52 steel in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> simulated water system: (a) gas phase; (b) liquid phase  
**图 1.** X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 模拟水体系中的腐蚀形貌: (a) 气相; (b) 液相

**Table 2.** Corrosion data of X52 Steel measured at 60 degrees Celsius in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S Simulated Water System  
**表 2.** X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 模拟水体系中 60°C 条件下的腐蚀数据

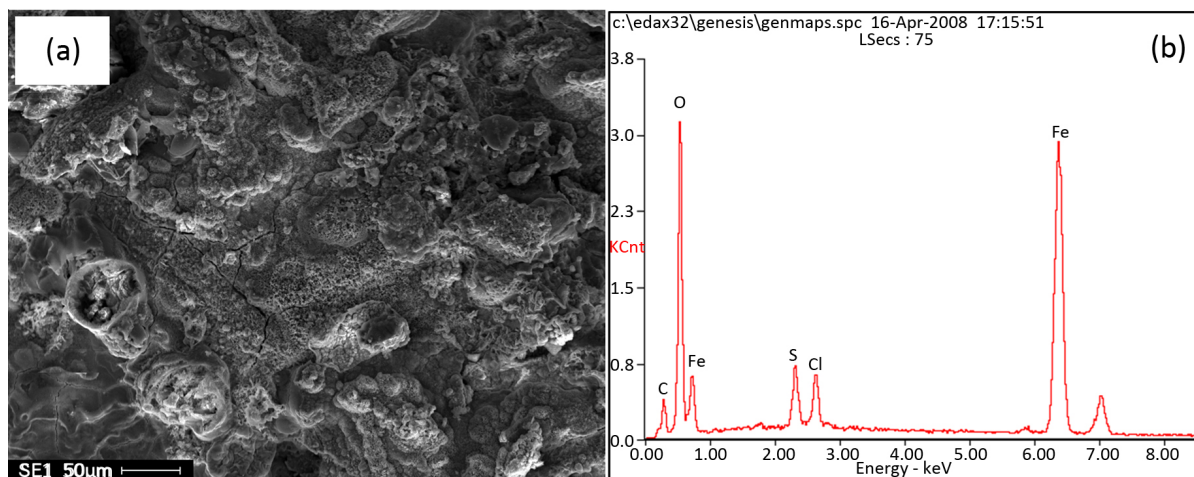
介质	试样安装位置	腐蚀速率 mm/a
模拟水 + 1 g/L S (元素硫)	平置于底部	8.2325
	悬挂于液相中	1.9015
模拟水 + 100 g/L S (元素硫)	悬挂于液相中	2.2846
	平置, 试件半埋于硫中	22.7416

表 2 和图 2 为 X52 钢在含有 S 的 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 模拟水体系中测得的腐蚀数据以及试片去除腐蚀产物后拍摄的腐蚀特征照片。和表 1 中液相腐蚀失重数据相比, 有 S 单质存在的所有挂片方式下的失重都远远大于没有 S 单质时候的失重数据。且 S 的含量越高, 腐蚀速率越大, 尤其是置于高压釜底部的试片腐蚀速率增加更为显著。试片的腐蚀特征照片显示: 单质硫存在条件下, X52 试片都出现局部腐蚀现象, 而置于底部的试片局部腐蚀则更为严重。

图 3 为模拟水 + 100g/L S 条件下腐蚀试样表面测的 SEM 形貌和表面测得的元素能谱图, 表面元素的定量分析结果见表 3。可见表面除了局部腐蚀还有基体的均匀溶解, 能谱图中检测到表面有硫元素存在, 其元素百分比达到重量比 wt.3% 以及原子比 At. 2.44%。证实硫元素参与了腐蚀过程, 其腐蚀产物主要为金属硫化物[9]。



**Figure 2.** Corrosion morphology of X52 steel under conditions of 60 degrees Celsius with sulfur of 1 g/L (a) and of 100 g/L (b)  
**图 2.** (a) X52 钢在 60°C, 1 g/L 硫(a)和 100 g/L 硫(b)条件下的腐蚀形貌



**Figure 3.** SEM (a) and EDS (b) of corrosion morphology of X52 steel in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S (S: 100 g/L) simulated water  
**图 3.** X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S (S: 100g/L)模拟水中腐蚀形貌 SEM 图(a)和 EDS 能谱分析图(b)

**Table 3.** EDS Energy spectrum data of corroded surface of steel X52 in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S (100 g/L) simulated water at 60 degrees Celsius

**表 3.** X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S (100 g/L)模拟水中 60°C下腐蚀表面测得的 EDS 能谱数据

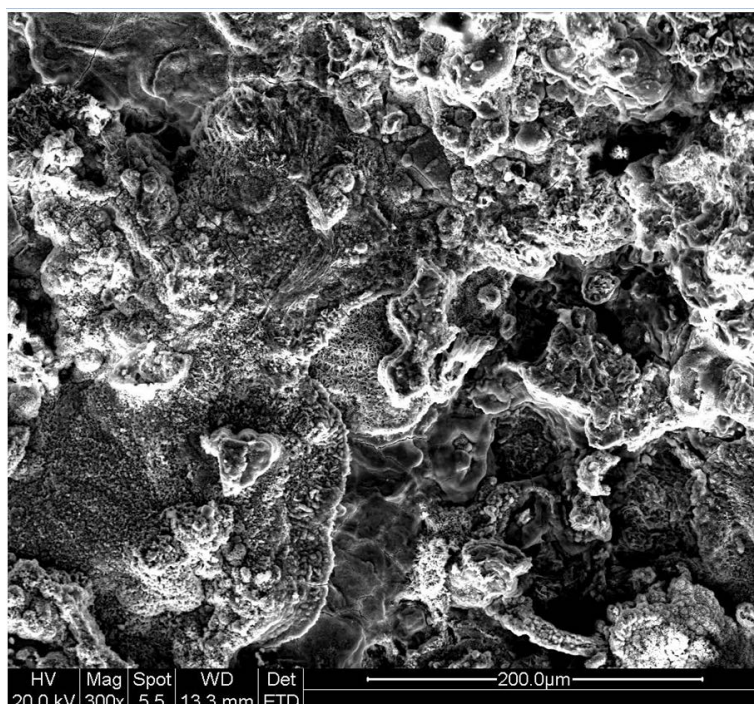
Element	Wt. %	At. %
C	13.28	28.85
O	24.76	40.39
S	3.00	2.44
Cl	2.82	2.08
Fe	56.15	26.24

### 3.2. 流速(转数模拟)对 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 介质中 X52 钢腐蚀行为的影响

表 4 为不同流速下的腐蚀挂片实验数据, 由数据可知, 流速对 X52 钢腐蚀的影响作用明显, 随着流速增大, 腐蚀失重增加。如图 4 所示, 在腐蚀介质动态流速为 5 m/s 条件下, 测得的腐蚀形貌显示 X52 钢表面腐蚀较为严重, 为均匀腐蚀和点蚀的混合腐蚀形式。这是因为流(转)动的气、液流体对管壁构成冲刷作用, 除了钢材承受一定的冲刷应力, 促使腐蚀反应的物质交换外, 还对形成于管壁的膜(具有一定保护作用的腐蚀产物膜或者缓蚀剂吸附膜)施加剪切应力, 降低了膜的寿命及保护性能, 加剧了腐蚀。

**Table 4.** Effect of liquid flow rate on corrosion weight loss of X52 steel in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S medium  
**表 4.** 液体流速对 X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 介质中腐蚀失重的影响

介质条件	流速/(m/s)	腐蚀速率/(mm/a)
H <sub>2</sub> S: 1.5 Mpa; CO <sub>2</sub> : 0.8 Mpa 单质 S: 1.0 g/L	0	1.674
	2	1.735
	5	1.923



**Figure 4.** Corrosion morphology of X52 steel at 5 m/s dynamic flow rate  
**图 4.** X52 钢在动态流速为 5 m/s 条件下的腐蚀形貌

#### 4. 结论

- 1) X52 钢在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 介质中的腐蚀较为严重，在气相中存在局部腐蚀；元素硫在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/S 环境中对 X52 钢腐蚀过程中作为阴极去极化剂参与腐蚀反应的阴极反应，对 X52 钢的腐蚀过程有明显的促进作用。
- 2) 沉积硫对 X52 腐蚀的促进作用较溶解分散于液相中的单质硫更为显著，且随着单质硫加量的增加而促进作用增大。
- 3) 流速对 X52 钢腐蚀的影响作用明显，易引发局部腐蚀、蚀坑严重。

#### 参考文献

- [1] Xue, J.P., Zhang, L., Wen, Z.B., *et al.* (2011) Elemental Sulfur Corrosion of Steel under Different Environmental Characteristics. *NACE Corrosion 2011 International*, Houston, Tx, 13-17 March 2011, 51.
- [2] Fartash, R., Navab Zadeh, S., Amirkhizi, H., *et al.* (2010) A Systematic Approach Towards Election of Cost-Effective and Corrosion Resistant Material Sand Corrosion Inhibition and Protection Methods by Using Corrosion Prediction Models. *NACE Corrosion 2010 International*, San Antonio, Tx, 15-18 March 2010, 368.
- [3] 刘志德, 路民旭, 谷坛, 等. 高酸性气田集输系统元素硫存在条件下腐蚀影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(S2):

85-91.

- [4] 魏辉荣, 熊金平, 赵景茂, 等.  $H_2S/CO_2$  环境中元素硫对 L360 钢腐蚀行为的影响[J]. 油田化学, 2011, 28(3): 342-345.
- [5] 蔡晓文, 戈磊, 陈长风, 等. 油套管用 P110 钢在元素硫环境中腐蚀规律的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 161-165.
- [6] 吕彬. 高含硫气田集输系统腐蚀和腐蚀控制[J]. 石油规划设计, 2002, 13(6): 34-43.
- [7] 李金灵, 朱世东, 屈撑囤, 等. 元素硫腐蚀研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(2): 20-24.
- [8] 杨波, 田松柏, 赵杉林. 不同形态硫化物腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 385-388.
- [9] 赵留阳. 大港南部油田除硫技术的研究与应用[J]. 中国石油石化, 2016(z2): 225.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)