

# 钨合金镀层在油田井下环境中的腐蚀行为

马清杰<sup>1</sup>, 梁根生<sup>1</sup>, 郭玉洁<sup>1</sup>, 孙海礁<sup>1</sup>, 陈长风<sup>2a,2b</sup>

(1.中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011; 2.中国石油大学(北京)  
a.理学院 b.油气装备材料失效与腐蚀防护北京市重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** **目的** 研究钨合金在塔河油田井下(高温、高酸性及注氮气环境)的腐蚀行为规律。**方法** 在高温高压釜中模拟塔河注气井下工况, 结合腐蚀失重、镀层厚度测试、显微硬度测试以及扫描电镜、EDS、SRD等分析手段, 对钨合金镀层的腐蚀行为进行研究。**结果** 未腐蚀镀层的维氏硬度为 825HV, 但经过腐蚀后, 镀层的显微硬度值因压痕边角塌陷而无法读取。在 H<sub>2</sub>S 主控环境中, 镀层试样明显增重, 当温度为 130 °C 时, 镀层未观察到分层现象, 但镀层表面有腐蚀产物; 200 °C 时镀层出现明显分层和鼓泡, 并且鼓泡有破裂现象, 微观观察镀层表面有局部腐蚀, 局部腐蚀处检测到硫元素, 说明硫元素渗入镀层内部, 生成硫化物。在 160 °C 的 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 共存和 CO<sub>2</sub> 主控环境中, 试样增重不明显, 也未发生失重, 镀层有轻微的分层现象。在注氮气环境中, 试样发生明显失重, 镀层厚度减薄, 镀层的腐蚀以均匀腐蚀为主, 同时镀层出现分层现象。镀层在注气井井下环境中腐蚀后变脆。**结论** 钨合金镀层在高含 H<sub>2</sub>S 环境中及注氮气环境中会发生明显分层, 并会出现局部腐蚀, 耐蚀性较差, 而在其他环境中出现轻微分层现象。

**关键词:** 钨合金镀层; 注气井; H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>; 氧气; 腐蚀; 分层

**中图分类号:** TG172.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0078-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.012

## Corrosion Behavior of Tungsten Alloy Coating in the Underground Environment of Oil Field

MA Qing-jie<sup>1</sup>, LIANG Gen-sheng<sup>1</sup>, GUO Yu-jie<sup>1</sup>, SUN Hai-jiao<sup>1</sup>, CHEN Chang-feng<sup>2a,2b</sup>

(1.Northwest Oil Field Branch Company, Sinopec, Urumqi 830011, China; 2.a.School of Science, b.Beijing Key Laboratory of Material's Failure, Corrosion and Protection of Oil/gas Facilities, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the corrosion behavior of Tungsten alloy coating in the underground environment of Tahe oilfield (high temperature, peracidity and N<sub>2</sub> injection). The underground environment of Tahe oilfield was simulated in high temperature and high pressure autoclave and the corrosion behavior of Tungsten alloy coating under simulated conditions was studied by weight loss measurement, coating thickness test, microhardness test, SEM, EDS and XRD. Hardness of sample before corrosion was 825HV, while the hardness of all samples after corrosion could not be measured because of the collapse of indentation corners. In H<sub>2</sub>S dominated environment, the weight of samples increased obviously. When temperature reached 130 °C, there was no stratified phenomenon on the coating, but the surface had corrosion products. Stratified phenomenon and bubbling obviously appeared on the coating at 200 °C and the bubbles broke out. Local corrosion was also observed on the

收稿日期: 2018-10-24; 修订日期: 2019-02-26

Received: 2018-10-24; Revised: 2019-02-26

作者简介: 马清杰(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为油气田开发与开采。

**Biography:** MA Qing-jie (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: development and exploitation of oil and gas fields.

通讯作者: 陈长风(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油气田腐蚀与防护。邮箱: chen\_c\_f@163.com

**Corresponding author:** CHEN Chang-feng (1974—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of oil and gas fields.  
E-mail: chen\_c\_f@163.com

surface and element S was detected in the local corrosion position by EDS test, indicating that S reacted with Fe to form iron sulfides. The weight of samples did not change significantly after corrosion at 160 °C in the H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> dominated environment and there was no weight loss, either, but light stratified phenomenon appeared on the surface. The weight and thickness of samples decreased significantly in the environment of N<sub>2</sub> injection. The coating corrosion was mostly uniform and stratified phenomenon appeared in the coating as well. The coating became brittle after corrosion in all simulated environments. In the environment with high H<sub>2</sub>S and N<sub>2</sub>, Tungsten alloy coating has obvious stratified phenomenon, local corrosion and poor corrosion resistance, but shows slight stratified phenomenon in other environment.

**KEY WORDS:** Tungsten alloy coating; steam injection well; H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>; oxygen; corrosion; stratified phenomenon

塔河油田油藏属碳酸盐岩缝洞型油藏<sup>[1-3]</sup>，原油重质成分多，并富含酸性气体<sup>[4-5]</sup>。近年来，油田逐步进入开发中后期，需采用增产措施以提高原油采收率。目前，油田主要采用注水<sup>[6]</sup>、注氮气和盐水混注方式驱油<sup>[7]</sup>。由于塔河油田采用比较经济的膜制氮技术，注氮气过程会引入 2.5%~5%的氧气<sup>[7-8]</sup>，加之井下环境本身富含 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 酸性气体（H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 平均含量（质量分数）分别为 2.5%、5568 mg/L），同时地层水矿化度高（平均为 220 g/L），且富含 Cl<sup>-</sup>（平均为 130 g/L）<sup>[9-10]</sup>，使得油田井下工况异常苛刻，极易造成井下管柱发生严重腐蚀。腐蚀监测结果显示，P110 材质油井管均匀腐蚀速率为 1.0 mm/a，点蚀速率高达 8 mm/a<sup>[9]</sup>，部分注气井油套管甚至会发生腐蚀穿孔断裂<sup>[10]</sup>。

为保证油田的安全运行，需要对井下管柱的腐蚀进行控制，比较经济的方式是对现有低合金钢管管进行表面处理，提高其耐蚀性，如使用非金属内衬层、涂镀层等。其中钨合金镀层以其优异的耐磨性和耐腐蚀性能，近年来开始被广泛用于石油钻采设备<sup>[11-12]</sup>。此外，针对其耐蚀性能的研究<sup>[13-17]</sup>表明，钨合金镀层在高含硫环境中不发生氢致开裂、应力腐蚀开裂，并且腐蚀速率较低<sup>[11-13,15-17]</sup>。

综上，本文进一步对钨合金镀层在塔河油田井下环境中的腐蚀行为进行研究，为钨合金镀层在油田的现场应用提供依据和指导。

1 试验

在 50 mm×25 mm×2 mm 的 P110 钢级试片上电镀钨合金镀层，其电镀工艺流程如下：清洗剂清洗→去离子水清洗→电解除油→电化学刻蚀→电镀 1 h→去离子水清洗→干燥。电镀后用游标卡尺测量试样尺寸，用电子天平记录试样质量。之后放入哈氏合金高温高压反应釜（美国 Cortest 公司生产）中进行腐蚀模拟试验。具体试验条件见表 1，试验所用介质见表 2，每组试验取 3 个平行试样。试验时将试样放入高温高压釜后，用螺栓将釜盖密闭。非注气环境需通入高纯氮气除氧 6 h 以上，之后升温至试验温度，然后依次通入高纯 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 或 N<sub>2</sub> 至指定压力。注氮气环

境则直接加入指定压力的氧气，之后加入高纯氮气至指定压力，待压力稳定后开始计时。试验结束后，取出试样，用清水及无水乙醇清洗，干燥后进行宏观、微观形貌观察。观察后，去除试样表面腐蚀产物并称重，计算腐蚀速率。

表 1 试验条件  
Tab.1 Experimental conditions

Environment	t/°C	H <sub>2</sub> S/MPa	CO <sub>2</sub> /MPa	O <sub>2</sub> /%	Period/d
H <sub>2</sub> S dominated	130	1.85	3.5		15
H <sub>2</sub> S dominated	200	1.85	3.5		15
CO <sub>2</sub> dominated	160	0.026	12.5		15
H <sub>2</sub> S/CO <sub>2</sub> coexisted	160	0.016	3		15
Nitrogen injection	160			3	15

表 2 试验介质组成  
Tab.2 Composition of testing media

Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Sulfides	Total Fe
135 080	11 467	1169	46.9	65 928	38.9	49.8

微观形貌观察采用 Quanta 200F 场发射电子扫描显微镜，并借助 EDAX Genesis 2000 X-射线能谱仪（EDS）测定元素组成。

2 实验结果及讨论

2.1 基本性能

图 1 为钨合金镀层在不同工况环境下腐蚀后的质量变化。可以看出，钨合金镀层除了在注氮气环境中出现失重外，在其他四个工况环境下都出现质量增大的现象。其中，200 °C H<sub>2</sub>S 主控环境的增量最大，达到 0.304 g；而在 160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 共存环境和 160 °C CO<sub>2</sub> 主控环境中，增量很小，仅为 0.007 g 和 0.0033 g。

图 2 给出了钨合金镀层在不同工况环境下腐蚀后的厚度变化情况。从中可以看出，与未腐蚀试样相比，钨合金镀层在 130 °C H<sub>2</sub>S 主控环境中腐蚀后，厚度变化不大；在 160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 共存环境、160 °C

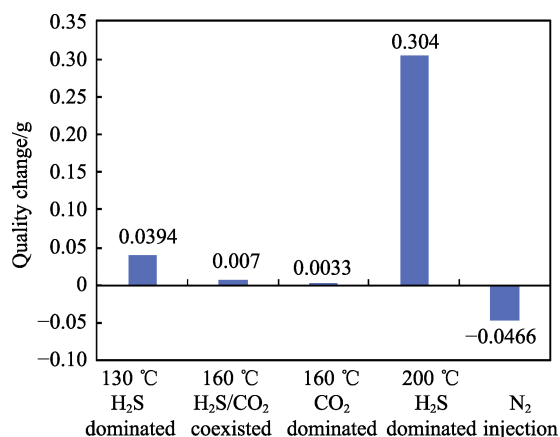


图 1 钨合金镀层在不同工况环境腐蚀后的质量变化  
Fig.1 Variation of weight of Tungsten alloy coatings after corrosion in different environments

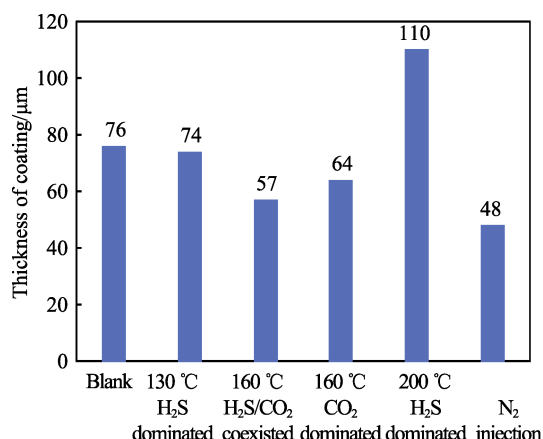


图 2 钨合金镀层在不同工况环境腐蚀后的厚度变化  
Fig.2 Variation of thickness of Tungsten alloy coatings after corrosion in different environments

CO<sub>2</sub> 主控环境以及注氮气环境中腐蚀, 镀层厚度都出现明显下降, 其中注氮气环境中下降最为明显, 镀层厚度减少到 48 μm, 这与质量变化结果较为吻合。钨合金镀层在 160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 共存环境和 160 °C CO<sub>2</sub> 主控环境中质量变化较小, 在注氮气环境中出现失重, 相反在 200 °C H<sub>2</sub>S 主控环境中, 镀层厚度出现显著增大, 在此工况下试样的质量增加也很明显, 显然镀层因发生腐蚀形成了稳定的腐蚀产物, 导致镀层增重增厚。

图 3 给出了镀层在不同工况条件下腐蚀后, 测试显微硬度时留下的表面压痕形貌。从中可以看出, 未腐蚀试样测试硬度时能够留下清晰的四边形压痕, 并且压痕棱角分明, 镀层的硬度值为 825HV; 而经腐蚀后, 镀层明显变脆, 压痕边角容易破碎, 导致硬度值无法读取。

## 2.2 宏观形貌

图 4 给出了钨合金镀层试样在不同工况腐蚀后,

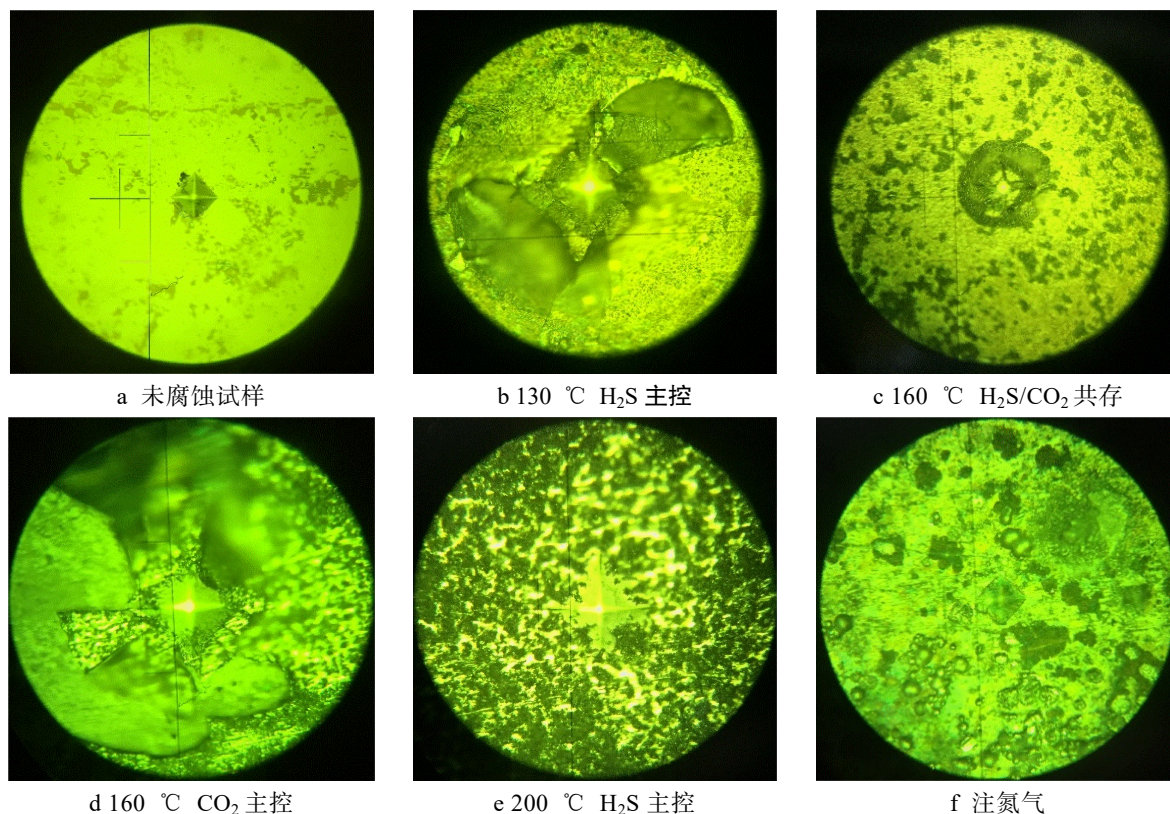


图 3 钨合金镀层试样在不同条件下腐蚀后的硬度测试压痕形貌

Fig.3 Morphology for indentation of specimens through hardness testing after corrosion in different environments:  
a) specimens without corrosion; b) 130 °C H<sub>2</sub>S dominated; c) 160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> coexisted;  
d) 160 °C CO<sub>2</sub> dominated; e) 200 °C H<sub>2</sub>S dominated; f) nitrogen injection



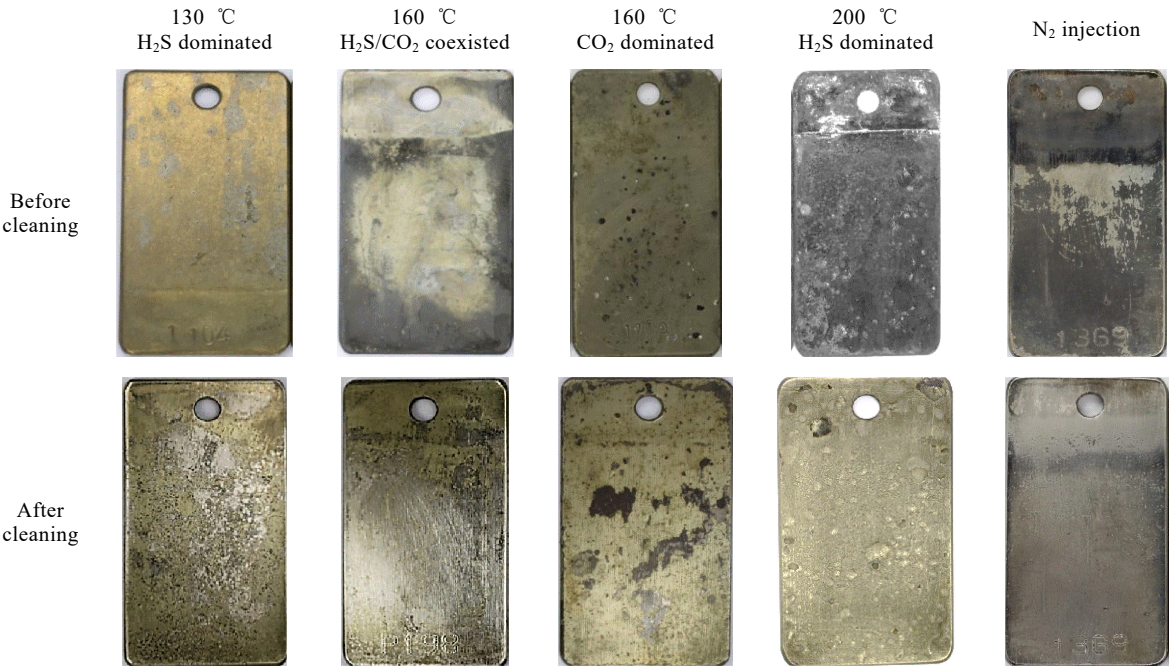


图 4 钨合金镀层在不同工况环境腐蚀后的表面宏观形貌  
Fig.4 Surface macroscopic morphology of Tungsten alloy coatings after corrosion in different environments

未经酸洗和酸洗后的形貌。从中可以看出，钨合金镀层试样在 130 °C H<sub>2</sub>S 主控和 160 °C CO<sub>2</sub> 主控环境中，表面颜色发生了变化，由未腐蚀的亮银色变为银灰色，但没有明显的腐蚀产物附着；而在其他工况下，表面观察到有明显的黑色腐蚀产物。观察经酸洗后的试样表面，160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 共存环境和 160 °C CO<sub>2</sub> 主控环境中，镀层只是出现轻微脱皮现象，未观察到其他缺陷。这与镀层在这两种工况下的质量变化情况吻合。在 130 °C H<sub>2</sub>S 主控环境中，镀层出现点状腐

蚀；在 200 °C H<sub>2</sub>S 主控环境中，镀层出现鼓泡，甚至有鼓泡发生破裂。在注氮气环境中的镀层经清洗后，试样表面未观察到明显的局部点蚀或破坏，整个试样表面发生均匀腐蚀，导致试样厚度变薄，质量变轻。

2.3 微观形貌

图 5 显示了钨合金镀层在不同工况环境下的表面微观形貌。在 130 °C H<sub>2</sub>S 主控环境中，试样表面

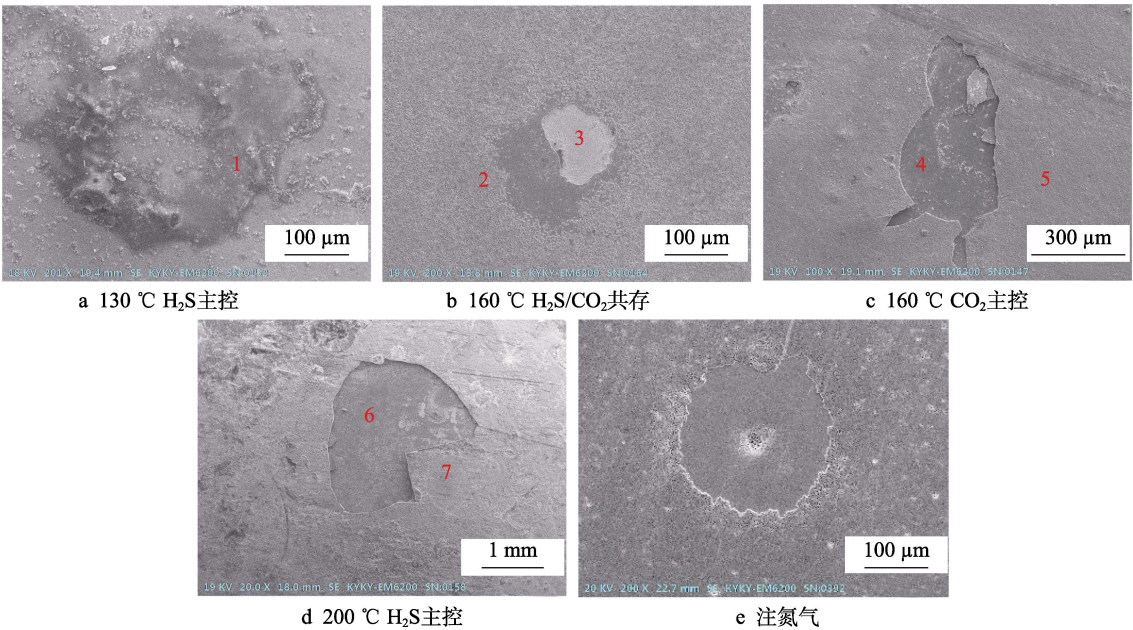


图 5 不同腐蚀条件下钨合金镀层的表面微观形貌

Fig.5 Surface micrograph of Tungsten alloy coatings after corrosion in different environments: a) 130 °C H<sub>2</sub>S dominated; b) 160 °C H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> coexisted; c) 160 °C CO<sub>2</sub> dominated; d) 200 °C H<sub>2</sub>S dominated; e) nitrogen injection

出现黑色环状腐蚀产物,从表 3 的能谱测试结果可以看出,此处的 S 含量很高,说明形成了硫化物腐蚀产物。而随温度升高,在其他工况环境下都观察到了镀层的局部腐蚀,除注氮工况外,其他环境下都在点蚀坑内检测到很高的硫含量,而在点蚀坑外,硫含量较低或没有。这说明硫化氢容易侵入到镀层内部,造成镀层的局部破坏,同时在局部破坏处形成稳定的腐蚀产物,酸洗较难将其完全去除,因而腐蚀后试样反而增重。

钨合金镀层在不同工况环境下腐蚀后的截面形貌如图 6 所示。可以看出,对于未腐蚀试样(图 6a),镀层/基材界面处以及镀层本身没有明显缺陷,镀层

和基材结合完好。130 ℃  $\text{H}_2\text{S}$  主控环境中,镀层也未观察到明显缺陷,镀层和基材结合仍然完好。在 160 ℃  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  共存环境和 160 ℃  $\text{CO}_2$  主控环境下,镀层表面出现约 5  $\mu\text{m}$  的颜色较深的薄层,说明镀层出现分层现象,但该薄层与镀层结合较好,没有出现缝隙、鼓泡等缺陷。而在 200 ℃  $\text{H}_2\text{S}$  主控环境中腐蚀后,镀层明显增厚,镀层内部出现明显的分层现象,并且层与层之间出现约 5  $\mu\text{m}$  的缝隙,缝隙处距镀层和基材的界面较近。在注氮气环境中,镀层也出现明显的分层现象,层与层之间也出现较宽的缝隙,但缝隙距镀层表面较近,镀层和基材的界面未受明显影响。

表 3 图 4 中各点的能谱测试结果  
Tab.3 EDS results of different points in Fig.4

Points	O/		Ni		P		Ca		Fe		W		S	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
1	11.98	28.53	58.9	38.24	—	—	—	—	2.73	1.86	—	—	26.4	31.37
2	29.2	61.63	16.81	9.67	9.32	10.16	13.41	11.3	3.57	2.16	27.68	5.08	—	—
3	8.97	24.18	55.17	40.53	—	—	—	—	—	—	11.67	2.74	24.19	32.55
4	29.99	69.67	24.12	15.27	—	—	6.76	6.27	—	—	37.27	7.53	—	—
5	17.93	39.72	46.26	27.93	—	—	—	—	15.37	9.76	—	—	20.44	22.59
6	—	—	72.46	62.51	—	—	—	—	—	—	4.13	1.14	22.47	35.49
7	21.49	38.99	34.51	17.06	—	—	—	—	8.11	4.21	—	—	12.88	11.66

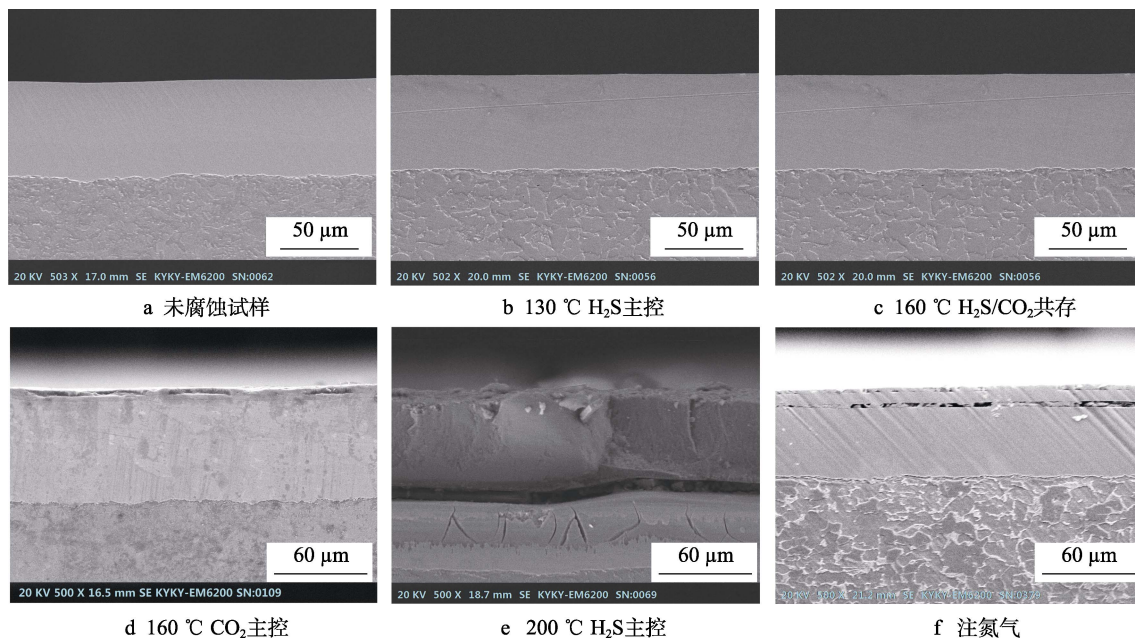


图 6 钨合金镀层试样在不同条件下腐蚀后的截面微观形貌

Fig.6 Micro morphology of cross-section of specimens after corrosion in different environments:  
a) specimens without corrosion; b) 130 ℃  $\text{H}_2\text{S}$  dominated; c) 160 ℃  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  coexisted;  
d) 160 ℃  $\text{CO}_2$  dominated; e) 200 ℃  $\text{H}_2\text{S}$  dominated; f) nitrogen injection

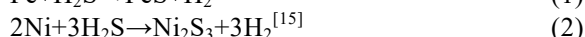
## 2.4 镀层损伤机理探讨

由 X 射线衍射图谱(图 7)可见,200 ℃  $\text{H}_2\text{S}$  主控环境下的腐蚀产物中主要包含  $\text{FeS}$ 、 $\text{FeS}_2$  等硫化

物,还有  $\text{WO}_3$  等腐蚀产物。说明在  $\text{H}_2\text{S}$  环境下主要发生  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀,S 元素会渗入镀层内部发生反应。

镀层的组成为: Ni 79%, Fe 3%, P 4%, W 14%。在含  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  的环境中将分别发生(1) — (6)

反应:



反应首先从镀层表面开始, 表面部分金属原子发生溶解, 镀层致密度下降, 因而镀层变脆。而维氏硬度测量时, 压痕深度约为  $5\text{ }\mu\text{m}$  左右, 从截面形貌看, 镀层在  $5\text{ }\mu\text{m}$  深度时, 已经发生腐蚀, 因而导致维氏硬度无法测量。同时反应生成的氢气在镀层内聚集, 导致镀层发生鼓泡或局部破损。升高温度、增加  $\text{H}_2\text{S}$  分压会促使金属离子溶解加快, S 进一步渗入镀层, 使镀层内形成腐蚀产物, 生成的氢气体积更多, 导致镀层内应力增加, 因而产生分层。在含氧气环境中, 钨元素也参与反应, 形成  $\text{WO}_3$ , 与  $\text{NiO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等腐蚀产物一起在镀层内部聚集, 导致产生分层。因此在  $200\text{ }^\circ\text{C}$   $\text{H}_2\text{S}$  主控环境以及注氮气环境中, 镀层内部发生比较严重的分层, 从而影响镀层的使用。但在  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  共存环境和  $\text{CO}_2$  主控环境中, 由于  $\text{H}_2\text{S}$  含量低, 上述反应 (1) 和 (2) 较弱, S 元素渗入镀层深度较小, 生成的腐蚀产物量少, 因而试样质量未发生明显变化, 同时产生的氢气体积较少, 镀层未产生严重的局部腐蚀和鼓泡、破裂等缺陷。

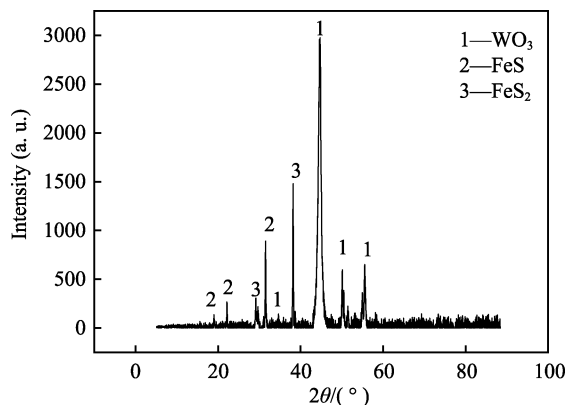


图 7  $200\text{ }^\circ\text{C}$   $\text{H}_2\text{S}$  主控环境下钨合金镀层的 XRD 分析  
Fig.7 XRD analysis of specimens after corrosion in  $200\text{ }^\circ\text{C}$   $\text{H}_2\text{S}$  dominated environment

### 3 结论

1) 钨合金镀层在  $\text{H}_2\text{S}$  主控环境中出现增重, 在  $200\text{ }^\circ\text{C}$  时镀层明显增厚, 并且出现明显的分层现象; 而在  $130\text{ }^\circ\text{C}$  时, 镀层未出现分层, 但有轻微的局部腐蚀。

2) 钨合金镀层在腐蚀环境中腐蚀后均变脆, 导致无法读取硬度值。

3) 在  $160\text{ }^\circ\text{C}$  的  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  共存环境和  $\text{CO}_2$  主控环境中, 镀层试样增重不明显, 也未发生失重, 镀层厚

度有所减小, 镀层表面有轻微的分层现象。

4) 在注氮气环境中, 镀层发生明显的失重, 主要以均匀腐蚀为主, 微观观察能发现轻微的局部腐蚀, 镀层也出现明显的分层现象, 层与层之间有明显的缝隙, 但缝隙距镀层/基材界面较远。

### 参考文献:

- [1] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
DOU Zhi-lin. Development technology of carbonate fractured vuggy reservoir in Tahe oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 林涛. 碳酸盐岩缝洞型油藏开发工程工艺技术[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2017.  
LIN Tao. Development engineering technology of carbonate fractured vuggy reservoir[M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2017.
- [3] 陈国鑫. 缝洞型碳酸盐岩油藏典型缝洞组合注采规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.  
CHEN Guo-xin. Injection-production laws research on typical fracture-vugcombination in fractured-vuggy carbonate reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [4] 赵文娜, 王宇宾, 张烨. 高温地面交联酸体系研究及其现场应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2191-2193.  
ZHAO Wen-na, WANG Yu-bin, ZHANG Ye. Study and application of the ground cross-linked acid with high-temperature resistance[J]. Science technology and engineering, 2013, 13(8): 2191-2193.
- [5] 唐世春, 张志宏, 张江江. 塔河油田点蚀测试及评价技术应用[J]. 科技导报, 2013, 31(32): 42-48.  
TANG Shi-chun, ZHANG Zhi-hong, ZHANG Jiang-jiang. Application of test and evaluation technology of pitting corrosion in Tahe oilfield[J]. Science & technology review, 2013, 31(32): 42-48.
- [6] 詹俊阳, 马旭杰, 何长江. 塔河油田缝洞型油藏开发模式及提高采收率[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 655-660.  
ZHAN Jun-yang, MA Xu-jie, HE Chang-jiang. Development scheme and EOR technique of fracture-vugreservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & gas geology, 2012, 33(4): 655-660.
- [7] 张江江. 气液环境下注氮气井管道腐蚀因素和机理研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(29): 9-14.  
ZHANG Jiang-jiang. Study on nitrogen gas pipeline and mechanism of corrosion factors on gas-liquid environment[J]. Science technology and engineering, 2014, 14(29): 9-14.
- [8] 任增泉. 塔河油田注气开发地面配套技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
REN Zeng-quan. The studies on ground supporting technology for gas flooding of Tahe oil field[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [9] 张江江. 塔河油田注气井管道腐蚀特征及规律[J]. 科技导报, 2014, 32(31): 65-70.  
ZHANG Jiang-jiang. Tahe oilfield gas pipeline corrosion characteristics and rules[J]. Science & technology review,



- 2014, 32(31): 65-70.
- [10] 祁丽莎, 陈明贵, 王小玮, 等. 塔河油田注气井井筒氧腐蚀机理研究[J]. 石油工程建设, 2016, 42(6): 70-72.  
QI Li-sha, CHEN Ming-gui, WANG Xiao-wei, et al. Study of oxygen corrosion mechanism in wellbore tube for gas injection in Tahe oilfield[J]. Petroleum engineering construction, 2016, 42(6): 70-72.
- [11] 胡松阳, 毕琳琳, 张艳敏, 等. 电镀钨基合金抽油杆耐蚀性能试验研究[J]. 石油机械, 2011, 39(10): 12-15.  
HU Song-yang, BI Lin-lin, ZHANG Yan-min, et al. Experimental study on corrosion resistance of electroplated tungsten alloy sucker rod[J]. China petroleum machinery, 2011, 39(10): 12-15.
- [12] 李春茂, 郭庆荣, 韩民强. 镀钨合金防腐抽油杆[J]. 石油科技论坛, 2017(S1): 128-131.  
LI Chun-mao, GUO Qing-rong, HAN Min-qiang. Tungsten alloy plated sucker rod[J]. Petroleum technology forum, 2017(S1): 128-131.
- [13] 侯铎, 施太和, 曾德智, 等. 电镀钨合金镀层组织及其耐腐蚀性能研究[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 12-15.  
HOU Duo, SHI Tai-he, ZENG De-zhi, et al. Coating microstructure characteristics and corrosion resistance of electroplating W alloy[J]. Material review, 2012, 26(5): 12-15.
- [14] 孙福洋, 赵国仙, 郭清超, 等. 镍钨合金镀层对 QT-900 油管耐 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 6-15.  
SUN Fu-yang, ZHAO Guo-xian, GUO Qing-chao, et al. Effect of Ni-W alloy coating on the corrosion resistance of QT-900 coiled tubing[J]. Surface technology, 2014, 43(6): 6-15.
- [15] 裴智超, 熊春明, 叶正荣, 等. 镍钨合金镀层在高含 CO<sub>2</sub> 及低含 H<sub>2</sub>S 环境下腐蚀行为[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(4): 47-51.  
QIU Zhi-chao, XIONG Chun-ming, YE Zheng-rong, et al. Corrosion behavior of nickel and tungsten alloy plating in high CO<sub>2</sub> and low H<sub>2</sub>S corrosive environment[J]. Oil field equipment, 2017, 46(4): 47-51.
- [16] 宋中华, 张士诚, 周理志, 等. 钨镍合金镀层油管适用性[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(12): 1256-1259.  
SONG Zhong-hua, ZHANG Shi-Cheng, ZHOU Li-zhi, et al. Applicability of tungsten nickel alloy coated tubing[J]. Corrosion & protection, 2014, 35(12): 1256-1259.
- [17] 雷丹. 钨合金镀层油管在高含 H<sub>2</sub>S 环境下的腐蚀行为研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.  
LEI Dan. Research on corrosion behavior of tungsten-based alloy coating under high H<sub>2</sub>S environment[D]. Xian: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [18] 钱进森, 燕铸, 刘建彬, 等. 微量 H<sub>2</sub>S 对油管钢 CO<sub>2</sub> 腐蚀行为的影响[J]. 焊管, 2014, 35(12): 39-45.  
QIAN Jin-sen, YAN Zhu, LIU Jian-bin, et al. Effect of small amount H<sub>2</sub>S on CO<sub>2</sub> corrosion behavior of oil tube steel[J]. Welded pipe and tube, 2014, 35(12): 39-45.

(上接第 20 页)

- [6] 于海成, 严与辉, 梁向荣, 等. 新型 Ni-Cr 耐蚀合金换热器管板焊接工艺评定及组织研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(7): 43-47.  
YU Hai-cheng, YAN Yu-hui, LIANG Xiang-rong, et al. Study on welding process assessment and microstructure of new Ni-Cr corrosion resistant alloy heat exchanger tube-sheet[J]. Welding technology, 2018, 47(7): 43-47.
- [7] JIN B J, LEE J P, PARK M H, et al. A study on forming for plate-type heat exchangers of the Ti material[J]. Procedia engineering, 2017, 174: 171-178.
- [8] 李辉, 刘希武, 蒋兴家, 等. 表面涂层技术在石油炼制领域的应用[J]. 焊接技术, 2018, 47(10): 1-5.  
LI Hui, LIU Xi-wu, JIANG Xing-jia, et al. Application of surface coating technology in petroleum refining[J]. Welding technology, 2018, 47(10): 1-5.
- [9] 王帅. 防腐镀(涂)层管束表面对流凝结换热特性实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
WANG Shuai. Experimental study on convection-condensation heat transfer characteristics of different antiseptic tube surfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] XU X Q, MIAO J, BAI Z Q, et al. The corrosion behavior of electroless Ni-P coating in Cl<sup>-</sup>/H<sub>2</sub>S environment[J]. Applied surface science, 2012(22): 8802-8806.
- [11] 朱新亮. 镍磷化学镀技术在换热器管束防腐中的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(11): 32.  
ZHU Xin-liang. Application of electroless nickel-phosphorus plating technology in anticorrosion of heat exchanger tube[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2013(11): 32.
- [12] 师红旗, 丁毅, 马立群. 化学镀镍换热器管束腐蚀破裂失效分析[J]. 表面技术, 2009, 38(5): 93-95.  
SHI Hong-qi, DING Yi, MA Li-qun. Failure analysis of corrosion cracking of heat exchanger tubes packing with electroless nickel[J]. Surface technology, 2009, 38(5): 93-95.
- [13] 黄卫东, 张良玉, 曲谦, 等. 热浸铝材料表面电化学氧化工艺研究[J]. 有色矿冶, 2018, 34(1): 37-41.  
HUANG Wei-dong, ZHANG Liang-yu, QU Qian, et al. Study on electrochemical oxidation process of hot dip aluminum material[J]. Non-ferrous mining and metallurgy, 2018, 34(1): 37-41.
- [14] 张桂凯, 李炬, 陈长安. 不锈钢异型件表面阻氚层制备技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2010, 34(4): 5-10.  
ZHANG Gui-kai, LI Ju, CHEN Chang-an. Research progress on preparation technology of tritium penetration barrier on special-shaped pieces of stainless steel[J]. Materials for mechanical engineering, 2010, 34(4): 5-10.
- [15] 夏谦, 伍林伟, 陈俊帆. 渗铝钢与镀锌钢应用于输电线路铁塔的比较研究[J]. 电工技术, 2018(3): 115-117.  
XIA Qian, WU Lin-wei, CHEN Jun-fan. The comparative research on aluminized and galvanized steel in tower of transmission line[J]. Electric engineering, 2018(3): 115-117.
- [16] SUN X F, HUANG Y L, SONG W, et al. Study on thermal-shock-resistance of the composite coating of 20 steel substrate by hot dip aluminum and micro-arc oxidation[J]. Key engineering materials, 2016, 723: 450-453.