

某含硫气井螺栓失效原因分析

李 静

中国石油西南油气田分公司, 四川 遂宁

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2025年1月2日; 发布日期: 2025年3月17日

摘 要

某含硫气井站场一法兰螺栓失效, 通过金相分析、基体形貌及成分分析、腐蚀产物成分分析、力学性能测试等检验方法对其失效原因进行分析, 结果表明: 螺栓的腐蚀失效是由于螺母材质和螺杆材质不同、螺杆材质与不锈钢法兰材质不同及缝隙腐蚀造成。针对螺栓腐蚀失效的影响因素提出了具体对策。

关键词

螺栓失效, 腐蚀, 对策

Analysis of Failure Causes of Bolts in a Sulfur-Bearing Gas Well

Jing Li

Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company, Suining Sichuan

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Jan. 2nd, 2025; published: Mar. 17th, 2025

Abstract

The failure of a flange bolt in a sulfur gas well station was analyzed through metallographic analysis, matrix morphology and composition analysis, corrosion product composition analysis, mechanical property testing and other inspection methods. The results show that the corrosion failure of the bolt is caused by the different material of the nut and the screw, the screw and the stainless steel flange and the gap corrosion. Specific countermeasures are put forward according to the influencing factors of bolt corrosion failure.

Keywords

Bolt Failure, Corrosion, Counterplan

Copyright © 2025 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

某含硫气井站场当班员工巡检过程中发现一法兰螺栓失效，对失效件进行收集，见图 1，样品包括表面腐蚀较为严重的螺母，被腐蚀的两个螺母表面无明显腐蚀产物，总体表面呈现银白色，表面凹凸不平，在螺杆表面附着部分腐蚀产物，螺杆中间部分呈现银白色，对样品开展系列实验，分析失效原因，为螺栓的可靠性提供支撑[1][2]。



Figure 1. Sample morphology

图 1. 样品形貌

2. 腐蚀分析

对失效螺栓各部分的夹杂物、晶粒度进行评级，并观察各部分的金相组织。通过 XRD 对腐蚀产物的成分进行分析，辅以 EDS 能谱确定螺栓各部分钢材有无成分上的差异，最后通过显微硬度计测试钢材的硬度是否达到相关要求。

2.1. 金相分析

对螺栓截面进行夹杂物观察并根据 GB/T10561-2005 钢材非金属夹杂物评级方法对夹杂物进行评级，发现母材夹杂类型主要为 D 类环状氧化物夹杂物。

2.2. 基体形貌及成分分析

Table 1. Analysis results of corroded nut elements

表 1. 发生腐蚀的螺母元素分析结果

| 元素 | 线类型 | 表观浓度 | 强度修正 | k 比值 | Wt% | Wt% Sigma | 原子百分比 |
|-----|------|--------|------|---------|--------|-----------|--------|
| C | K 线系 | 7.84 | 0.23 | 0.07844 | 19.50 | 0.66 | 44.07 |
| O | K 线系 | 24.09 | 1.06 | 0.08107 | 13.21 | 0.33 | 22.42 |
| Na | K 线系 | 0.54 | 0.45 | 0.00228 | 0.69 | 0.13 | 0.82 |
| Al | K 线系 | 0.41 | 0.58 | 0.00297 | 0.42 | 0.08 | 0.42 |
| Cl | K 线系 | 0.34 | 0.93 | 0.00295 | 0.21 | 0.06 | 0.16 |
| Ca | K 线系 | 0.49 | 1.11 | 0.00439 | 0.26 | 0.06 | 0.17 |
| Fe | K 线系 | 103.53 | 0.92 | 1.03533 | 65.71 | 0.62 | 31.94 |
| 总量: | | | | | 100.00 | | 100.00 |

发生腐蚀的螺母在不同放大倍数下基体的微观形貌图显示, 因为腐蚀较为严重的缘故, 采用角磨机打磨裸露出一部分基体, 在放大 25 倍下仍可以看到较为严重的腐蚀, 通过对基体的面扫描元素结果进行分析, 结果见表 1, 螺母材质均为碳钢, 螺母表面所含有的 Na 离子、Ca 离子可能源于冶炼过程、加工过程、环境因素和人为添加等, 通过元素对比, 推测来源为环境因素[3] [4]。

螺杆基体不同放大倍数下的形貌图显示外表面银白色包覆层厚度约为 10 微米, 且厚度不均匀, 通过对基体进行面扫描, 结果见表 2, 螺杆基体中 Cr 含量为 0.88%, Mo 含量为 0.68%, 结合给出的螺杆材质为 35 CrMoA, 得出螺杆材质为低合金钢。

Table 2. Results of element analysis of screw

表 2. 螺杆元素分析结果

| 元素 | 线类型 | 表观浓度 | 强度修正 | k 比值 | Wt% | Wt% Sigma | 原子百分比 |
|-----|------|--------|------|---------|--------|-----------|--------|
| C | K 线系 | 5.34 | 0.22 | 0.05339 | 15.84 | 0.79 | 43.55 |
| O | K 线系 | 7.90 | 1.11 | 0.02657 | 4.62 | 0.31 | 9.54 |
| Cr | K 线系 | 1.60 | 1.19 | 0.01602 | 0.88 | 0.11 | 0.56 |
| Fe | K 线系 | 113.08 | 0.95 | 1.13081 | 77.97 | 0.80 | 46.11 |
| Mo | L 线系 | 0.78 | 0.75 | 0.00779 | 0.68 | 0.22 | 0.23 |
| 总量: | | | | | 100.00 | | 100.00 |

螺栓垫片不同放大倍数下的微观形貌图显示在垫片表面也存在较轻微腐蚀, 在放大 200 倍下可以看到轻微的腐蚀痕迹, 腐蚀坑洞约为 80 微米左右, 元素分析结果见表 3, 元素类型相较于腐蚀较为严重的螺母还含有 Al、Zn、Si 元素, 其中 Al 元素含量为 0.49%, Zn 元素含量为 2.48%, Si 元素含量为 0.37%。Na 离子在腐蚀区域处富集, 证明 Na 离子确实为环境因素所导致, 富集于腐蚀区域表面。

Table 3. Analysis results of bolt gasket elements

表 3. 螺栓垫片元素分析结果

| 元素 | 线类型 | 表观浓度 | 强度修正 | k 比值 | Wt% | Wt% Sigma | 原子百分比 |
|-----|------|--------|------|---------|--------|-----------|--------|
| C | K 线系 | 2.05 | 0.20 | 0.02053 | 8.02 | 0.63 | 25.91 |
| O | K 线系 | 8.28 | 1.26 | 0.02786 | 5.03 | 0.26 | 12.20 |
| Na | K 线系 | 0.57 | 0.39 | 0.00243 | 1.14 | 0.32 | 1.93 |
| Al | K 线系 | 0.32 | 0.50 | 0.00231 | 0.49 | 0.11 | 0.71 |
| Si | K 线系 | 0.30 | 0.63 | 0.00237 | 0.37 | 0.08 | 0.50 |
| Fe | K 线系 | 104.02 | 0.97 | 1.04024 | 82.47 | 0.72 | 57.28 |
| Zn | K 线系 | 2.77 | 0.86 | 0.02772 | 2.48 | 0.28 | 1.47 |
| 总量: | | | | | 100.00 | | 100.00 |

2.3. 腐蚀形貌及成分分析

微观形貌表明, 螺杆表面的包覆层凹凸不平, 放大后可观察到表面存在褶皱和突出的小颗粒, 放大 1000 倍下包覆层较为均匀, 无明显裂纹, 放大 4000 倍后可以看到在表面小颗粒间存在微小裂痕, 说明螺杆表面所形成的包覆层较为致密。由元素分析可得, 表面含有 3.57% 的 Al 元素, 8.22% 的 Pb 元素, 其中 Pb 元素分布均匀, Al 元素分布较为集中, 在部分区域内强度较高。

微观形貌表明，螺母表面也形成了较为致密的氧化层，但是在 200 倍下观察，可以看到包覆层表面存在部分孔洞，且包覆层没有包覆住螺母全身，在螺母表面仍有部分区域裸露在大气环境中，在放大 4000 倍下可以观察到表面由类似纱状的第二相产物。通过元素分析可得，在螺母表面含有 7.79% 的 Al 元素，由元素分布图可以看出，Al 元素在螺母表面分布均匀，推测表面氧化层为 Al_2O_3 。

2.4. 腐蚀产物成分分析

螺杆表面腐蚀产物的 XRD 分析数据结果见图 2，所选取样本为螺杆中间部位的腐蚀产物，与标准图谱进行对比后发现，其表面附着物物相为 FeO 和 Fe_3O_4 。螺杆中间部位存在的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 为铁锈的主要成分，螺杆在大气环境中与空气发生了缓慢氧化反应产物。

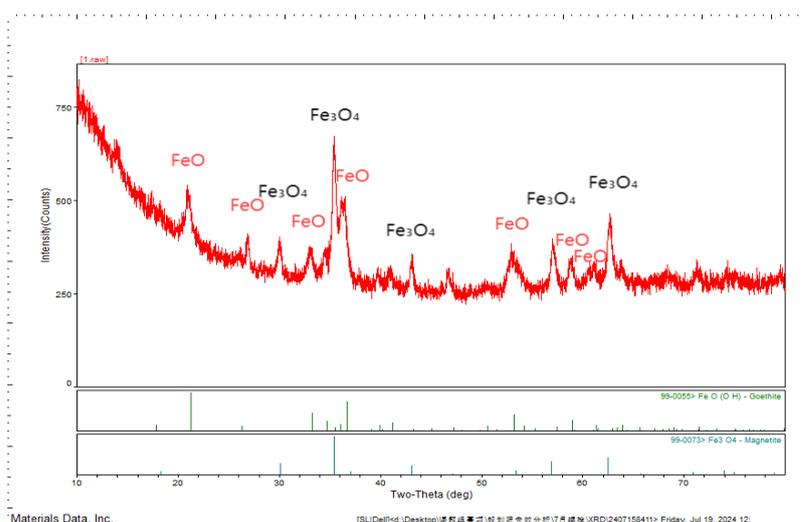


Figure 2. Corrosion product XRD data

图 2. 腐蚀产物 XRD 数据

2.5. 力学性能分析

Table 4. Hardness of each part of bolts

表 4. 螺栓各部位硬度

| 部位 硬度(HV) | 螺杆 | 螺母(较完好) | 螺母(腐蚀) | 垫片 |
|--------------|-------|---------|--------|-------|
| 1 | 374.5 | 194.6 | 203.1 | 184.6 |
| 2 | 368.5 | 205.0 | 213.1 | 177.4 |
| 3 | 352.0 | 207.9 | 205.0 | 178.0 |
| 4 | 336.7 | 210.9 | 201.3 | 184.6 |
| 5 | 333.2 | 207.9 | 208.7 | 178.4 |
| 6 | 342.0 | 206.6 | 202.5 | 179.1 |
| 7 | 347.4 | 212.6 | 207.9 | 172.8 |
| 8 | 324.7 | 209.6 | 204.1 | 184.3 |
| 9 | 351.1 | 213.5 | 214.0 | 180.1 |
| 10 | 356.7 | 215.3 | 205.8 | 169.6 |

对螺栓各部分截面进行硬度测试,采用维氏硬度计进行 1 kg 微观载荷维氏硬度试验,结果见表 4。结果表明:送检样品中,螺杆维氏硬度为 348.7 HV,较完好螺母与腐蚀的螺母硬度差别不大,分别为 208.4 HV 和 206.6 HV,垫片硬度为 178.9 HV,满足标准要求。

3. 失效原因分析

(1) 螺母材质和螺杆材质不同产生电化学腐蚀

根据 EDS 能谱分析可以推断出,螺母材质为碳钢,螺杆材质为低合金钢 35CrMoA,工作环境为大气环境,雨水较多,温度湿热。

由于螺母和螺杆两者材质不同,在湿热环境下易发生电偶腐蚀。螺母和螺杆两种材质之间存在电位差,雨水较多的大气环境中,在螺母与螺杆间易产生冷凝积液从而构成腐蚀原电池,导致电位较负的金属作为阳极,腐蚀过程加速。

(2) 螺杆材质与不锈钢法兰材质不同产生电化学腐蚀

根据给出的工况条件,螺栓为不锈钢法兰的连接件,两者材质不相同,在湿热环境下也有可能发生上述的电偶腐蚀。

(3) 缝隙腐蚀

缝隙腐蚀又称间隙腐蚀,是电解质溶液中,在金属与金属及金属和非金属之间构成狭窄的缝隙内,介质的迁移受到阻滞时而产生的一种局部腐蚀形态。金属表面上由于存在异物或结构上的原因而形成缝隙,使缝隙内的物质迁移困难所引起的缝隙内金属产生的一种局部腐蚀形态,总称为缝隙腐蚀。

螺杆与法兰连接处会形成狭窄的缝隙,当冷凝水流经该缝隙时,由于毛细作用,会导致冷凝水流过该缝隙受到阻碍,从而在连接处产生缝隙腐蚀。而所产生的腐蚀产物与流动的水所带来的污物在缝隙间堆积,也会加剧缝隙腐蚀的速率。

4. 结论与建议

4.1. 结论

(1) 螺母表面附着有 Al_2O_3 氧化层。螺栓中间部位附着有腐蚀产物,其中,氧化层的高度比腐蚀产物低,位于腐蚀产物和基体之间。螺栓腐蚀产物以大气氧腐蚀产物 FeO 、 Fe_2O_3 为主。

(2) 螺杆与螺母材质分别为低合金钢和碳钢,法兰材质为不锈钢,异种金属接触在湿热条件下发生电偶腐蚀。

(3) 螺杆与法兰连接处发生缝隙腐蚀,电化学腐蚀产物和缝隙腐蚀产物堆积加剧缝隙腐蚀。

(4) 螺杆中间部位腐蚀严重是电偶腐蚀、缝隙腐蚀两者共同作用所导致。

4.2. 建议

(1) 螺杆、螺母、垫片、法兰尽量选择相同材质,避免电偶腐蚀的产生。

(2) 在螺栓缝隙处涂抹防锈油,并建立合理的检查机制,防止因防锈油挥发等原因造成防护机制失效。

(3) 对螺栓进行电镀处理,在表面镀上一层耐腐蚀膜,以防止生锈。

(4) 采用遮挡措施,同时采取措施避免冷凝水的产生。

参考文献

- [1] 马红杰,朱新远,薛红艳. 316L 不锈钢螺栓腐蚀断裂分析及防护建议[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2021, 38(1): 42-45.

-
- [2] 李仙娟, 陈幼子. 法兰连接螺栓疲劳循环应力计算[J]. 山西机械, 1996, 25(6): 22-24.
 - [3] 丁伯民, 蔡仁良. 压力容器设计——原理及工程应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.
 - [4] 方晓峰. 压力容器法兰螺栓疲劳强度浅析[J]. 化工设备与管道, 2019, 56(6): 1-4.