

失效分析

某 S135 钻杆管体断裂失效分析

乔凌云^{1,2}, 毛浓召², 周 云^{1,2}, 李鸿斌^{1,2,3}, 芦 琳^{1,2},
张 超^{1,2}, 黄小江^{1,2}, 晁利宁^{1,2}

- (1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;
2. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
3. 陕西省高性能连续管重点实验室, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 针对某 S135 钻杆断裂事件, 对失效样品进行了宏观检验、理化性能测试及断口分析。结果显示, 失效样品内外表面均被腐蚀, 腐蚀坑内有较多裂纹, 理化性能符合标准要求。分析表明, 钻杆断裂是交变应力和腐蚀介质共同作用的结果, 腐蚀坑的提前形成大大缩短了钻杆的使用寿命。建议钻杆下井使用后要彻底清洗, 加强存储期间的防护, 并在使用前进行无损检测, 防止失效事故发生。

关键词: 钻杆; 腐蚀疲劳; 断裂

中图分类号: TG115.3

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.04.008

Fracture Failure Analysis of S135 Drill Pipe

QIAO Lingyun^{1,2}, MAO Nongzhao², ZHOU Yun^{1,2}, LI Hongbin^{1,2,3},
LU Lin^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}, HUANG Xiaojiang^{1,2}, CHAO Lining^{1,2}

- (1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Province Key Laboratory of High Performance Coiled Tubing, Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the fracture event of S135 drill pipe, the macro inspection, physical and chemical properties inspection and fracture analysis of the failed sample are carried out. The results show that the physical and chemical properties meet the standard requirements. The internal and external surfaces of the failed sample have been corroded, and many cracks are found in the corrosion pit. The analysis shows that the fracture of the drill pipe is the result of the joint action of alternating stress and corrosion medium. The formation of the corrosion pit in advance greatly shortens the service life of the drill pipe. It is suggested that the drill pipe should be thoroughly cleaned after being used in the well, protected during storage and carried out NDT before use, so as to prevent failure accidents.

Keywords: drill pipe; corrosion fatigue; fracture

钻杆是钻柱的主要组成部分, 其上部连接钻杆, 下部连接钻铤。钻杆主要作用是传递扭矩, 使钻头向下钻进, 加深井眼。钻杆内孔通入高压水, 用以冲洗钻头粉碎的岩屑, 并把岩屑排出井口。钻井过程中, 钻杆受拉、压、扭、弯等复杂静载和动载应力, 工作环境十分恶劣^[1-3]。

腐蚀疲劳失效是钻杆失效的主要形式之一, 它是钻井工程的大敌, 不仅增加钻具的消耗, 还因停工停产给生产带来巨大损失。因此, 加强钻杆失效分析工作, 探究腐蚀疲劳失效的原因和规律, 寻求积极的预防措施, 对油气勘探和开发具有一定的意义^[4-6]。

1 钻杆失效概况

2021 年 10 月，某地热井用 $\Phi 139.7\text{ mm}\times 11.5\text{ mm}$ S135 钻杆，使用两个月，在起钻深度

500~800 m 时发生断裂，断裂位于钻杆公扣端，距管端 0.8~1 m 位置，如图 1 所示 A 点位置。以失效钻杆为研究对象，分别进行宏观检验、理化性能检验及断口分析，认为该钻杆为腐蚀疲劳断裂失效。

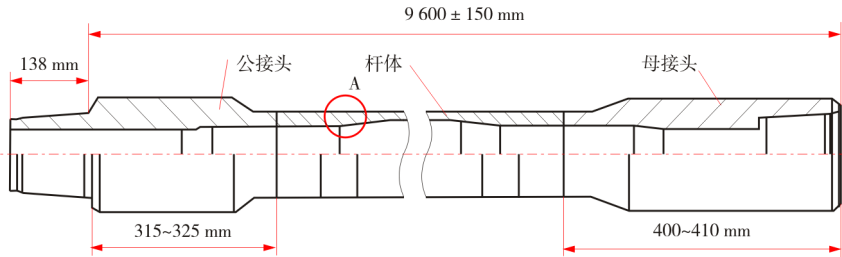


图 1 钻杆及失效部位示意图

2 理化性能测试

2.1 宏观检验

失效钻杆如图 2 所示，钻杆从靠近公扣端的加厚过渡区断裂，表面有一层厚厚的腐蚀产物，外表面更甚，内外表面均没有防腐涂层。除去表

面的腐蚀产物，试样呈铁灰色和棕红色。断口呈台阶状，没有明显的塑性变形。钻杆内外壁均被腐蚀，内壁腐蚀坑小而浅，腐蚀不均匀，残留的腐蚀产物比较轻薄；外壁腐蚀严重，残留的腐蚀产物比较厚重，且腐蚀严重区域沿钻杆轴向呈带状分布。断口上有几处分别从内、外壁起裂的扇形区，部分区域磨损严重。

2.2 化学分析

在失效样品上截取 30 mm×50 mm 的试样，使用 PDA-7000 光谱仪，依据 ASTM A751 《钢产品化学分析用标准试验方法、作法和术语》进行化学成分分析，检验结果见表 1。结果表明，该样品化学成分满足 API SPEC 5DP 对 S135 材料的要求，P、S 含量未超标。



图 2 失效的钻杆

表 1 失效 S135 钻杆化学成分检测结果

项目	化学成分/%								
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Cu)	w(Ni)
检测结果 1	0.25	0.24	0.80	0.012	0.003	1.12	0.37	0.07	0.02
检测结果 2	0.26	0.24	0.81	0.012	0.003	1.12	0.37	0.08	0.02
API SPEC 5DP 要求	—	—	—	≤0.020	≤0.015	—	—	—	—

2.3 金相检验及硬度检测

在失效样品上截取 30 mm×50 mm 金相试样，打磨、抛光后用 4% 硝酸酒精腐蚀，采用 DMI5000M 型光学显微镜进行金相组织分析，检验结果如图 3 所示，试样组织为回火索氏体，组织均匀，未见异常组织。

采用 Durascan-70 全自动显微/维氏硬度试验机，依据 ASTM E92-17 《金属材料维氏及努氏

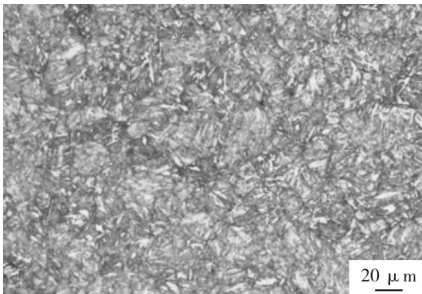


图 3 失效钻杆金相组织形貌

硬度标准试验方法》进行硬度检测,压痕位置如图 4 所示,试验结果见表 2。试样平均硬度为 352HV₁₀,API SPEC 5DP 对钻杆硬度值未做要求,此检验结果仅作参考。

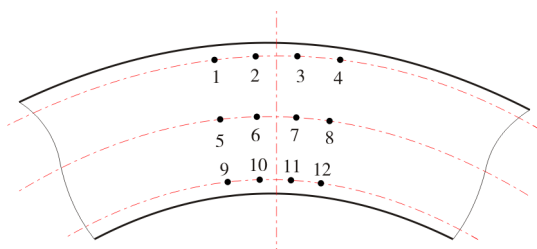


图 4 失效钻杆硬度试验压痕位置示意图

表 2 失效钻杆维氏硬度试验结果

测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀
1	345	5	355	9	360
2	351	6	353	10	345
3	363	7	348	11	347
4	350	8	355	12	350

2.4 拉伸试验

在失效样品上截取 210 mm 长的拉伸试样,使用 CMT5105 电子万能试验机,依据 ASTM A370 《钢制品力学性能试验的标准试验方法和定义》进行拉伸试验,试验结果见表 3,试验结果满足 API SPEC 5DP 《钻杆产品规范》对 S135 材料的要求。

表 3 失效钻杆力学性能试验结果

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
试验结果	960	1 080
API SPEC 5DP 要求	931~1 138	≥1 050

2.5 断口分析

在图 5 所示失效样品上截取断口试样,并使用 5%柠檬酸对试样进行清洗。观察发现,2# 位置的内壁和 4# 位置的外壁分别有明显的起裂特征,为观察方便,将试样截成 5 个小块,主要分析了 2# 试样的断口和内壁,以及 4# 试样的断口和外壁的形貌及成分。

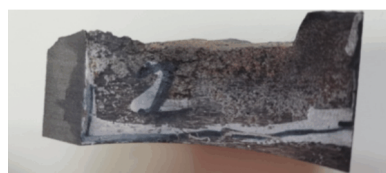


图 5 失效钻杆断口宏观形貌

使用日立 S-3700N 型扫描电镜对试样进行微观观察,结果如图 6、图 7 所示,发现试样从内、外壁腐蚀较严重的区域起裂,呈半圆形径向扩展,断口表面磨损比较严重,起裂区有疲劳台阶,扩展区可观察到疲劳弧线,断口没有明显的塑性变形,判断为疲劳断裂。

试样内壁腐蚀较轻,且不均匀,个别区域腐蚀坑较多,腐蚀坑深宽比<1:2,为吸氧腐蚀;有些腐蚀坑内有针状孔洞深入材料内部,为小孔腐蚀,腐蚀严重区可观察到与轴向垂直的裂纹。

试样外壁腐蚀严重,有大量的腐蚀坑,个别地方腐蚀坑已连成与轴向垂直的线性缺陷(比较



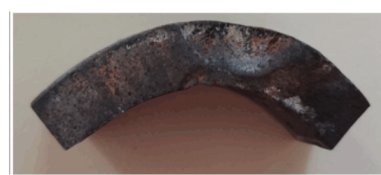
(a) 2# 内壁



(b) 2# 断口



(c) 4# 外壁



(d) 4# 断口

图 6 失效钻杆断口宏观照片

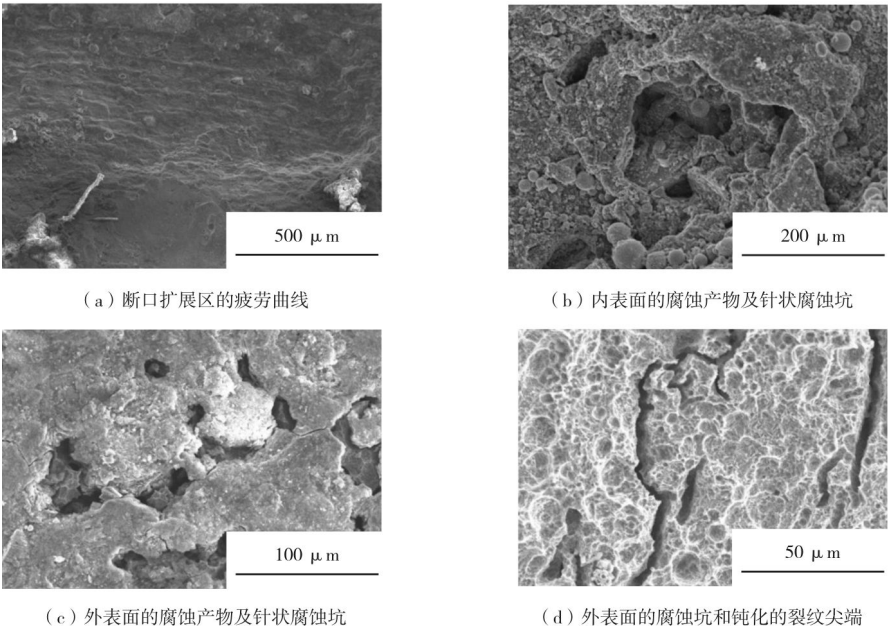


图 7 失效钻杆断口微观形貌

宽的裂纹)。腐蚀坑较内壁大而深，深宽比 $<1:2$ ，为吸氧腐蚀；并有很多针状孔洞向材料内部延伸，为小孔腐蚀。腐蚀坑底部有穿晶或沿晶裂纹，裂纹较宽，有分岔，且尖端钝化，为典型的腐蚀疲劳裂纹。腐蚀产物较厚，微观形貌呈泥状花样。

对内外壁及断口上的腐蚀产物进行能谱分析，分析谱图及分析结果见图 8 和表 4。从表 4 可以看出，腐蚀产物中含有 O、Cl、Ca、Si、Al、Mg 等元素，这些元素与钢铁的电化学腐蚀产物、泥浆及地下矿物质成分基本一致。

分析认为，钻杆内外壁均为吸氧腐蚀、小孔腐蚀和垢下腐蚀，腐蚀坑内有裂纹萌生，钻杆断

裂是交变应力和腐蚀介质共同作用的结果，为腐蚀疲劳断裂。失效过程为：新钻杆→腐蚀坑形成→裂纹萌生→裂纹扩展→断裂失效。

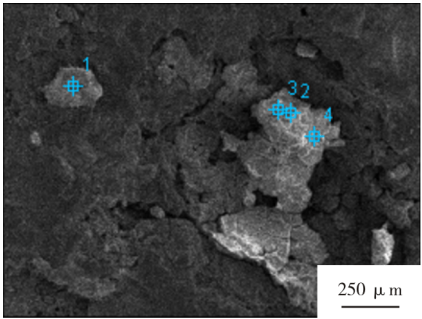


图 8 断口腐蚀产物能谱分析位置

表 4 断口腐蚀产物的能谱分析结果

检测位置	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	Ca-K	Ti-K	Cr-K	Fe-K
Base (20) _pt1	36.15	—	—	—	3.25	—	—	—	60.60
Base (20) _pt2	32.6	—	1.51	5.39	3.52	—	3.63	—	56.98
Base (20) _pt3	45.86	8.03	—	—	—	28.96	—	—	17.15
Base (20) _pt4	31.89	—	—	3.57	—	—	—	5.55	58.99

3 试验结果分析

3.1 环境因素

该钻杆分别从内外壁起裂，沿壁厚方向扩展至断裂，内外壁的腐蚀坑严重影响了钻杆的使用寿命。钻杆外壁较内壁腐蚀严重，且腐蚀严重区

沿钻杆轴向呈带状分布，推断钻杆曾在露天接触地面存放很长时间，接触地面的一侧由于介质的长期作用腐蚀严重。断裂位于靠近公扣端 0.8~1 m 处的加厚过渡区终了段，此处内壁为薄厚过渡区，因结构设计原因，过渡不平缓，井液容易滞留，并形成涡流，也易产生腐蚀。钻杆内外壁腐

蚀坑的形成大大缩短了裂纹的萌生时间,从而使钻杆的使用寿命大幅度降低。

钻杆表面发生如下电化学腐蚀:

阳极: $\text{Fe} - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$

阴极: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

总反应式: $2\text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^-$

Fe^{2+} + 水解: $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 8\text{H}^+$

$\text{FeO}(\text{OH})$ 失水后形成红棕色 Fe_2O_3 , Fe_2O_3 继续氧化生成 Fe_3O_4 (FeFe_2O_4), 这些腐蚀产物附着在钻杆表面, 疏松多孔, 起不到保护作用。溶解的氧、 Fe^{2+} 和 H^+ 富集在腐蚀坑内, 使坑内呈酸性。为维持电荷平衡, 泥浆中的 Cl^- 通过“电泳”作用进入坑内, 由于 Cl^- 半径较小, 穿透力强, 极易穿过腐蚀产物到达金属表面, 破坏钻杆表面腐蚀产物的结构, 阻碍腐蚀产物膜形成, 促进膜下点蚀向材料内部深入, 产生小孔腐蚀。小孔腐蚀对材料的破坏远比普通的氧腐蚀要大得多, 氯的增加, 会使腐蚀速率增加^[11-12]。该钻杆多处腐蚀产物能谱分析结果显示, Cl^- 含量高达 3% 以上, 大大促进了钻杆表面的局部腐蚀的速率。

另外, 试样表面尤其外表面垢层较厚, 能谱分析有大量 Ca 、 Mg 元素存在, 它们以离子的形式存在于工况中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在钢材表面沉积结垢, 构成缝隙腐蚀条件, 进一步诱发并加速腐蚀^[13-14]。

总之, 该钻杆在含 O 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的介质中发生腐蚀, 腐蚀原理为吸氧腐蚀, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 引起垢下缝隙腐蚀, Cl^- 加速钻杆表面的局部腐蚀。

3.2 应力因素

钻杆在井下受拉、压、扭转、弯曲等复杂的交变应力作用, 受重力因素和作业性质的影响, 轴向拉应力和弯曲应力是钻杆承受的主要应力。钻杆管壁腐蚀坑形成之后, 坑内应力集中, 在轴向拉应力或弯曲应力的作用下, 裂纹在腐蚀坑内萌生, 形成多条垂直于钻杆轴向的裂纹。随着应力的增加, 裂纹沿管壁扩展, 当同一平面的两条裂纹相遇时, 裂纹汇合并加速扩展; 当不同平面的两条裂纹相遇时, 裂纹从一个平面跳跃到另一个平面, 形成前面所述的台阶状断口形貌^[15]。

另外, 该钻杆断裂发生在距公扣管端约为 0.8~1 m 位置处, 这里是钻杆的加厚过渡区, 是钻杆的薄弱环节。由于钻杆接头和加厚部分刚性高、不易弯曲, 钻杆的薄厚过渡区就成了最易弯

曲的地方。当钻杆到达“狗腿子”井段时, 加厚过渡区截面突变, 加之过渡区腐蚀严重, 在交变应力和腐蚀介质双重作用下, 腐蚀坑迅速加深, 裂纹萌生并迅速扩展。

综上所述, 该钻杆断裂是交变应力和腐蚀介质共同作用的结果, 在裂纹萌生和扩展初期, 由于应力较低, 腐蚀起主导作用; 随着裂纹扩展, 钻杆受力面减小, 应力增加, 应力和腐蚀共同作用; 直到剩余壁厚不能承受载荷, 应力起主导作用, 钻杆断裂失效。腐蚀坑的提前生成, 大大缩短了钻杆裂纹的萌生寿命, 从而降低了钻杆的使用寿命。

4 结论及建议

(1) 钻杆理化性能检测结果满足 API SPEC 5DP《钻杆产品规范》的要求。

(2) 钻杆失效为交变应力和腐蚀介质共同作用引起的腐蚀疲劳断裂。

(3) 建议钻杆下井使用完后彻底清洗, 并加强钻杆存储期间的防护。

(4) 下井前对钻杆进行无损检测, 避免失效事故的发生。

参考文献:

- [1] 李平全, 宋治. 钻杆腐蚀疲劳失效及其预防[J]. 石油钻采工艺, 1990(2): 39-48.
- [2] 王庆. 富阳一井钻杆刺漏分析及预防措施[J]. 海洋石油, 2004(3): 95-97.
- [3] 毕洪运, 于杰, 赵鹏. G105 钻杆腐蚀失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2005(6): 304-306, 313.
- [4] 高引慧, 李瑞宇, 陈晨, 等. API-5DP 石油钻杆断裂失效分析[J]. 山西冶金, 2020, 43(3): 4-7, 56.
- [5] 李沛轩. $\Phi 127 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ G105 钻杆断裂失效原因分析[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(4): 46-48, 54.
- [6] 陈长青, 刘聪, 钱强. S135 钢级 $\Phi 139.7 \text{ mm}$ 钻杆管体断裂失效分析[J]. 焊管, 2016, 39(10): 42-47.
- [7] 余世杰, 袁鹏斌, 龚丹梅, 等. S135 钻杆刺漏原因分析[J]. 金属热处理, 2011, 36(S1): 173-177.
- [8] 赵金, 杨碧玉, 崔顺贤, 等. 某 S135 钻杆腐蚀穿孔失效分析[J]. 石油工业技术监督, 2011, 27(7): 5-7.
- [9] 王长健. S135 钻杆腐蚀孔洞形成原因分析[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 58-63.
- [10] 吴保玉, 李养池, 张新发, 等. 壳牌长北气田 1 井钻杆腐蚀原因分析[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(1): 54-56, 67.

(下转第 49 页)