

连续油管水力振荡器断裂失效分析*

乔凌云^{1,2}, 王 亮^{1,2,3}, 芦 琳^{1,2}, 李鸿斌^{1,2,3},
张 超^{1,2}, 周 云^{1,2}, 马姣姣^{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: 为了探究连续油管水力振荡器断裂失效原因, 通过无损检测、理化性能检验及断口分析等方法, 对失效样管进行了研究与分析。结果显示, 失效样管的理化性能满足设计要求, 样品表面存在缺陷。研究表明, 失效的主要原因是连续油管水力振荡器定子 in 交变应力和含砂流体冲蚀的共同作用下产生疲劳和冲蚀缺陷, 最终导致断裂失效。建议重视水力振荡器零部件在交变应力作用下的疲劳断裂失效行为, 适当选材, 并通过热处理方式提高材料的抗疲劳强度; 提高工件表面光洁度, 以减少应力集中; 工具使用完后应加强无损检测, 避免工具突然断裂造成的损失。

关键词: 连续油管; 水力振荡器; 定子; 冲蚀; 疲劳断裂

中图分类号: TG115

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.07.006

Fracture Failure Analysis of Coiled Tubing Hydraulic Oscillator

QIAO Lingyun^{1,2}, WANG Liang^{1,2,3}, LU Lin^{1,2}, LI Hongbin^{1,2,3},
ZHANG Chao^{1,2}, ZHOU Yun^{1,2}, MA Jiaojiao^{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: In order to explore the fracture failure causes of coiled tubing hydraulic oscillator, the failure sample tube was studied and analyzed by means of nondestructive testing, physical and chemical property inspection and fracture analysis. The results show that the physical and chemical properties of the failed sample tube meet the design requirements, and the surface of the stator is defective. The research shows that the main reason for the failure is that the stator of coiled tubing hydraulic oscillator produces fatigue and erosion defects under the combined action of alternating stress and sand-bearing fluid erosion, which eventually leads to fracture failure. It is suggested that attention should be paid to the fatigue fracture failure behavior of hydraulic oscillator parts under alternating stress, select appropriate materials, and improve the fatigue strength of materials by heat treatment and the surface finish of the workpiece to reduce stress concentration. After the tools are used, the nondestructive testing shall be strengthened to avoid the loss caused by the sudden fracture of the tools.

Key words: coiled tubing; hydraulic oscillator; stator; erosion; fatigue fracture

* 基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“煤炭地下气化关键技术研究及先导试验”(项目编号 GF 2019E-25)。

1 概 述

连续油管由于外径小、柔性大，且在钻井下入过程中摩擦力过大，易产生屈曲和螺旋形变，从而影响管子下入深度。水力振荡器是一种新型的井下工具，通过自身产生的轴向振动提高下入过程中钻压传递的有效性，提高工具下入深度及钻磨效率^[1-5]。水力振荡器由动力部分、阀门和轴承系统、振荡短节组成，其上部连接钻杆，下部连接钻柱或钻头。工作时，动力部分由液体驱动内在螺杆做旋转运动，带动其下端阀片做往复运动；阀门和轴承系统，通过一对阀门做周期性相对运动，将流经动力部分的部分液体能量转化为压力脉冲；振荡短节有一个对外密封的芯轴，芯轴在压力脉冲作用下往复运动，从而带动工具产生轴向振动^[6-10]。工作中，水力振荡器常发生断裂失效现象，不但影响正常作业，还增加了工具的更换成本和打捞成本，缩短了连续油管使用寿命。

某油田连续油管水力振荡器在工作到第三口井钻磨结束后，起钻发生断裂，该水力振荡器结构如图 1 所示。断裂位于水力振荡器定子下端内螺纹处，工作时长 90 h，工作井为水平井。使用时，工具振动频率 10~15 次/s，油管内排量 400~500 L/min，内部水压 2 MPa，工况温度 90~100 ℃。定子材质为 40CrNiMoA，设计材料热处理后硬度为 36HRC~40HRC，其他理化性能执行企业标准。

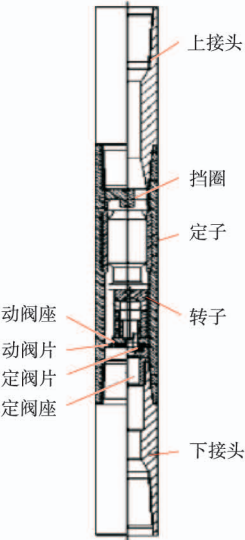


图 1 水力振荡器结构及断裂位置示意图

本研究以失效水力振荡器定子为研究对象，通过无损检测、理化性能检验及断口分析等方法，寻找失效原因，预防和减少此类事故发生。

2 失效样品检测

2.1 宏观检验

水力振荡器定子失效样品如图 2 所示，失效样管干净，壁厚均匀，未发生明显塑性变形，为脆性断裂。断口沿螺纹呈台阶状断裂，台阶上断面及台阶下断面均比较平齐。下断面位于定子内螺纹第 1 扣处，断口表面光亮，磨损严重，为最先起裂区。上断面位于螺纹第 6 扣处，断口磨损较轻，并可见起裂源，为第二起裂区；两边台阶为最后断裂区。也就是说，样品分别沿管内壁第 1、第 6 个内螺纹的根部起裂，向外壁及两边扩展至断裂。另外，样品有些部位的内螺纹变薄甚至缺损，螺纹根部有磨损和轻微腐蚀现象。



图 2 水力振荡器定子失效样品形貌

2.2 无损检测

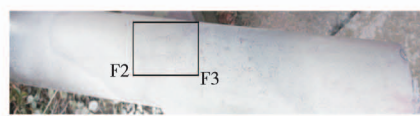
依据 NB/T 47013.5 《承压设备无损检测 第 5 部分：渗透检验》对失效样管进行渗透检验，发现试样表面有数条疲劳裂纹，同时有长度>6 mm 的线性缺陷和直径>6 mm 的圆形缺陷，均为不合格缺陷。分析认为，作业中样管受交变应力作用，表面易产生疲劳损伤，因此这些缺陷大部分是在使用过程中形成的。缺陷检测结果见表 1 和图 3。

表 1 失效样管缺陷评定表

缺陷编号	缺陷类型	缺陷尺寸/mm	质量分级	结论
F1	圆形缺陷	6.38(直径)	IV 级	不合格
F2	线性缺陷	20(长度)		
F3	疲劳裂纹	10(长度)	不允许	



(a) 缺陷F1



(b) 缺陷F2、F3

图 3 渗透检测缺陷显示图

2.3 化学成分

在失效样品上取样进行化学成分分析, 检测结果见表 2。通过表 2 可以看出, 失效样管

化学成分满足 GB/T 3077—2015《合金结构钢》对 40CrNiMoA 的要求, 且 S、P 含量未超过设计要求。

表 2 失效样管化学成分检测结果

项目	化学成分/%						
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(S)	w(P)	w(Cr)	w(Ni)
实测值	0.39	0.22	0.56	0.003	0.015	0.70	1.32
标准要求	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.03	≤0.03	0.60~0.90	1.25~1.65

2.4 拉伸性能

在失效样品上截取长度 210 mm 的拉伸试样, 使用 CMT5105 电子万能试验机, 依据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行拉伸试验, 试验结果见表 3。由表 3 可知, 失效样管拉伸性能满足标准要求。

表 3 失效样管力学性能试验结果

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
试验结果	980	1 220	13.5
标准要求	≥827	≥965	≥13

2.5 冲击性能

在失效样品上截取一组 2.5 mm×10 mm×55 mm 规格的冲击试样, 开 V 形缺口, 使用示波冲击试验机依据 ASTM A370—20《钢产品机械性能测试的方法和定义》进行冲击试验, 试验结果见表 4。试验结果满足标准要求。

表 4 失效样管夏比冲击试验结果 (20 ℃)

项目	冲击功/J	
	单值	均值
试验结果	60、72、68	66.7
标准要求	≥47	≥54

2.6 金相及硬度检验

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, 分析结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 试样组织为回火索氏体, 组织细小均匀, 未见异常组织。

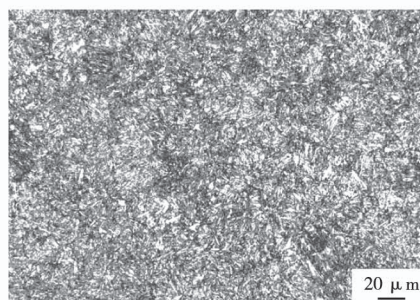


图 4 失效样管金相组织形貌

采用 Durascan-70 全自动显微硬度试验机, 依据 ASTM E92-17《金属材料维氏及努氏硬度标准试验方法》对失效样管进行硬度检测, 测试位置如图 5 所示, 测试结果见表 5。结果显示, 试样最高硬度 390HV₁₀, 最低硬度 377HV₁₀, 平均硬度 385HV₁₀, 满足标准要求 (360HV₁₀~390HV₁₀)。

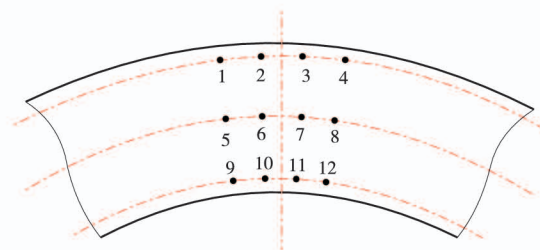


图 5 失效样管硬度试验位置示意图

表 5 失效样管硬度试验结果

测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀	测试点	HV ₁₀
1	387	5	390	9	390
2	388	6	380	10	380
3	389	7	385	11	385
4	386	8	377	12	383

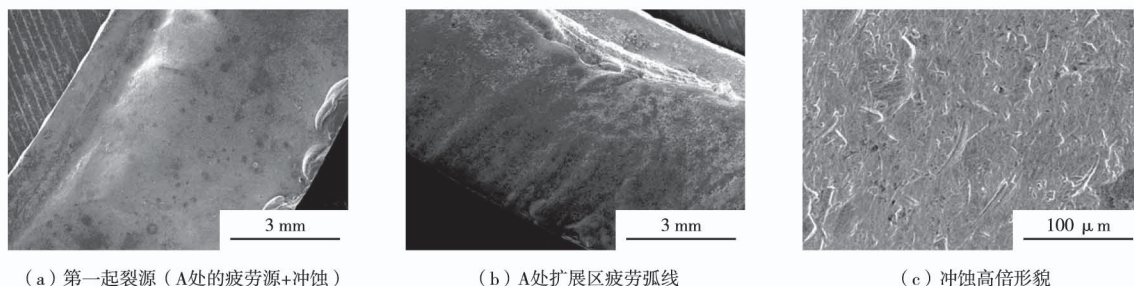
2.7 断口及能谱分析

在失效样品上取断口试样，如图6所示，经5%柠檬酸清洗，使用日立S-3700N型扫描电镜观察，发现断口下断面A处光滑圆润，磨损比较严重，但仍然可见裂纹在起裂及扩展时形成的疲劳台阶，高倍观察也可见磨损形貌，为含砂流体冲蚀形成，如图7所示。上断面B处起裂区冲蚀较轻，断面被挤压明显，说明这个区域的裂纹源较A处形成的晚，也为疲劳裂纹；C、D处有明显的疲劳台阶、撕裂棱以及冲蚀形貌，为断口终断区，如图8所示。另外，定子内壁有些部位的螺纹变薄甚至缺损，螺纹底部有沿轴向分布的流体冲刷形貌，如图9所示。对螺纹根部的残留物进行能谱分析，分析位置如图10所示，分

析结果见表6。从分析结果可以看出，螺纹根部的残留物主要有O、Al、Si等元素，与井液中的泥沙成分一致。



图6 清洗后的断口样品

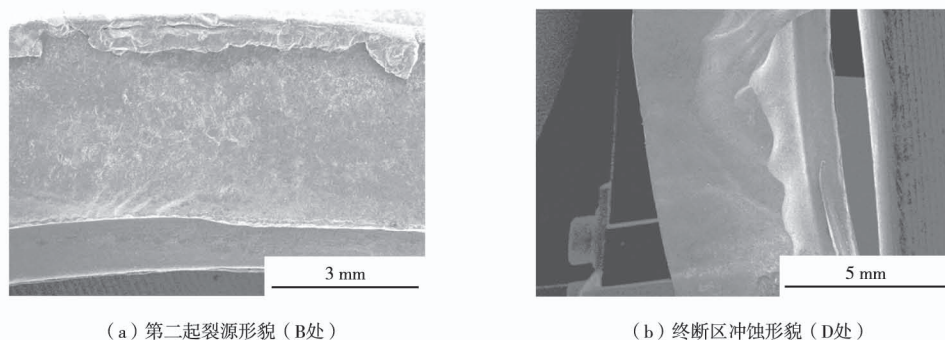


(a) 第一起裂源 (A处的疲劳源+冲蚀)

(b) A处扩展区疲劳弧线

(c) 冲蚀高倍形貌

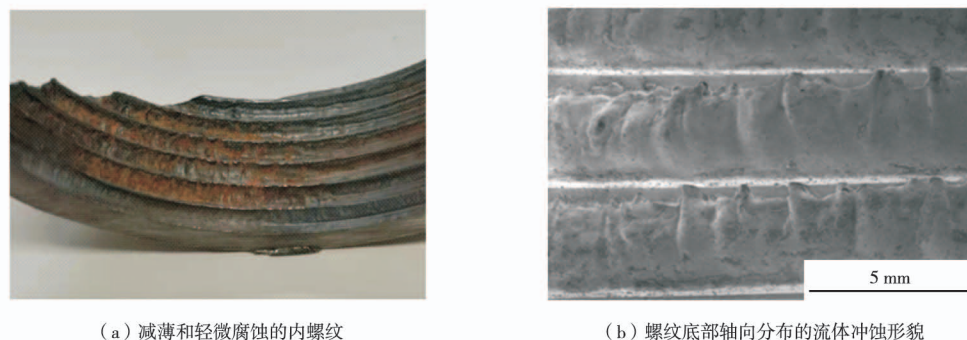
图7 第一起裂源处疲劳及冲蚀形貌



(a) 第二起裂源形貌 (B处)

(b) 终断区冲蚀形貌 (D处)

图8 第二起裂源及终断区形貌



(a) 减薄和轻微腐蚀的内螺纹

(b) 螺纹底部轴向分布的流体冲刷形貌

图9 断口内螺纹及其底部冲刷形貌

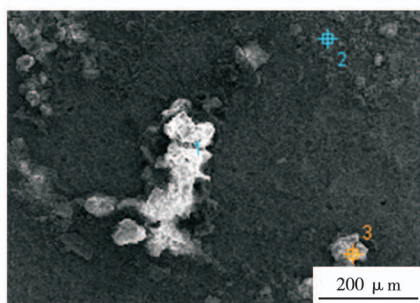


图10 断口内螺纹底部残留物能谱分析位置

表6 断口内螺纹底部残留物能谱分析结果 %

检测位置	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K
Base(3)_pt1	52.38	1.22	6.71	20.42	2.39	16.88
Base(3)_pt2	9.41	-	-	3.62	-	86.97
Base(3)_pt3	52.12	8.47	8.18	26.62	-	4.61

分析认为,定子受交变应力作用,在断口A处第1扣螺纹根部的应力集中处产生疲劳损伤,裂纹萌生并扩展。与此同时,管内含砂流体沿裂纹扩展方向对断口进行冲蚀,加速其破坏。当壁厚减薄到一定程度,定子受拉伸载荷作用发生断裂失效。

3 综合分析

经外观检验、无损检验、理化检验及断口分析,定子材料的理化性能符合设计要求;样品表面存在圆形、线形及疲劳裂纹等缺陷;断口是疲劳断口,断口上有大量冲蚀现象。

3.1 受力因素的影响

定子下部连接马达,马达产生动力,使整个水力振荡器产生轴向往复振动,定子受交变应力作用。螺纹啮合时,主要是前7个螺纹受力,且第1扣受力最大,约占整个螺纹受力的30%,以后每扣受力呈非线性递减^[11-12]。螺纹根部相当于自加工缺陷,此处有较大的应力集中,因而第1扣螺纹根部所受的实际应力远大于其他部位。另外,失效样品断口分析结果显示,螺纹底部有大量的轴向分布的冲蚀痕迹,这些冲蚀坑也容易产生应力集中,促使裂纹源形成。因此,定子断裂发生在内螺纹根部,且第1扣根部为第一起裂源。

3.2 材料及加载过程的影响

定子是水力振荡器的动力组成部分,工作时受交变应力及拉压、扭转、弯曲等复杂作用力,

表面很容易产生缺陷,促使裂纹萌生。失效试样渗透检验结果显示,定子表面存在较多圆形、线性及疲劳裂纹等缺陷,这些缺陷大部分是作业过程中形成的。工作时,水力振荡器一边振荡一边随钻具向前钻入,当前方钻头遇阻时,工具会向外提拉,再遇阻,再提拉,加载方式的不断变换会对材料疲劳性能造成影响,从而产生表面损伤或缺陷,且材料的强度越高,对表面缺陷越敏感^[13-15]。定子为40CrNiMoA高强度合金钢,对表面的缺陷比较敏感,缺陷部位易成为裂纹源,引发断裂失效。

3.3 流体冲蚀的影响

水力振荡器的振荡作用是在内外管之间的空腔内发生,腔内有含砂流体。作业时,水力振荡器受交变应力及拉压、扭转、弯曲等作用力,裂纹在形成及扩展过程中,含砂流体对断口不断冲蚀,加速其破坏。

综上,水力振荡器定子受交变应力和含砂流体冲蚀共同作用下产生疲劳+冲蚀缺陷,最终断裂失效。

4 结论及建议

(1) 水力振荡器定子为疲劳断裂失效,失效原因是交变应力和含砂流体冲蚀作用。

(2) 应重视水力振荡器零部件在交变应力作用下的疲劳断裂失效。建议适当选材,并通过热处理方式提高材料的抗疲劳强度;提高工件表面光洁度,以减少应力集中;避免突然加载产生的过载损伤;工具使用完后应加强无损检测,提前发现裂纹,以避免工具突然断裂造成的不必要损失。

参考文献:

- [1] 陈清正,聂光辉,侯得景,等. 水力振荡器在渤海某油田钻井中的应用[J]. 化工管理, 2021(12): 183-184.
- [2] 王建龙,祝钰明,柳鹤,等. 典型振动减阻工具研究进展及展望[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(1): 68-70, 75.
- [3] 刘研言,尹俊禄,慕鑫,等. 超长水平井连续管下入深度优化及验证[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(1): 80-86.
- [4] 李建亭,胡金建,罗恒荣. 低压耗增强型水力振荡器的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 71-75.
- [5] 罗伟,韩东东,陈建宏,等. 径向振动工具在渤海油田的应用[J]. 石化技术, 2022, 29(1): 105-106, 235.

(下转第41页)