

压裂双头螺栓脆断原因探究

李安民¹, 冯玲², 罗恩扬¹, 何大量¹, 杨春卫¹

1. 荆州市世纪派创石油机械检测有限公司 湖北荆州 434024

2. 中石化石油工程机械有限公司第四机械厂 湖北荆州 434024

摘要: 采用宏观断口分析、化学成分分析、力学性能试验、能谱及断口微观形貌分析、金相组织检测等方法, 对早期脆断的压裂双头螺栓进行了分析。结果表明: 压裂双头螺栓氢脆的主要原因是电镀工艺执行不到位。与此同时, 从减少螺栓中渗氢量和减少应力两方面提出改进措施, 以提高压裂双头螺栓的使用寿命。

关键词: 压裂; 螺栓; 脆断; 氢脆

Exploring the causes of brittle fracture of hydraulic fracturing double headed bolts

LI Anmin¹, FENG Ling², LUO Enyang¹, HE Daliang¹, YANG Chunwei¹

1. Jingzhou Century Paichuang Petroleum Machinery Testing Co., Ltd., Jingzhou 434024, Hubei, China

2. Sinopec Petroleum Engineering Machinery Co., Ltd., Fourth Machinery Factory, Jingzhou 434024, Hubei, China

Abstract: Macroscopic fracture analysis, chemical composition analysis, mechanical property testing, energy spectrum and fracture microstructure analysis, metallographic structure detection and other methods were used to analyze the early brittle fracture of fracturing double headed bolts. The results indicate that the main reason for hydrogen embrittlement in hydraulic fracturing double headed bolts is inadequate execution of the electroplating process. At the same time, improvement measures are proposed from two aspects: Reducing hydrogen leakage in bolts and reducing stress, in order to improve the service life of fracturing double headed bolts.

Keywords: fracturing; bolt; brittle fracture; hydrogen embrittlement

1 序言

在页岩油和致密油气等非常规资源开发中, 高压管汇作为超大功率成套压裂装备的重要配套件, 其承受着压裂泵排出的超高压、大排量的压裂液带来的不规则、多方向的巨大脉冲力, 加上恶劣的作业工况, 无论是泵排出端螺栓还是压裂头用螺栓, 使用过程中失效现象时有发生, 导致生产中断停机、停产, 严重制约压裂作业的生产效率, 造成了巨大的经济损失, 成为压裂作业的短板。为此, 近年来, 我们不断地进行分析和探究, 分析产品失效

机理, 查找失效原因, 探究改进措施, 以提高螺栓的使用寿命, 从而提升压裂作业的整体效率。

2 基本情况及试验方案

2.1 基本情况

通过现场调研, 用于压裂头八通法兰联接的双头螺栓, 最容易出现断裂失效, 在现场使用过程中, 发现批量螺栓从螺纹位置开裂, 有的甚至在用扳手紧固时断裂。

为了分析双头螺栓早期断裂的原因, 选择的试验对象规格尺寸为M39mm×3mm×300mm的双头

螺栓，服役约20h，服役条件非致氢环境。其材料为中碳合金钢。双头螺栓采用电炉熔炼，高强度螺栓要求采用真空电弧重熔或电渣重熔。螺栓材料经轧制或锻造，其缩减比至少是4：1。螺栓工艺要求为调质+电镀处理。淬火加热温度（ 860 ± 20 ）℃，回火温度（ 600 ± 10 ）℃。螺栓加工完毕后表面进行镀锌处理，电镀后2h之内在（ 200 ± 10 ）℃下至少烘烤8h去氢处理。

2.2 试验方案

压裂双头螺栓取样位置如图1所示。试样加工及试验方案如下：1#试样用于进行宏观断口观察、金相组织检测、能谱及断口形貌分析样品；2#试样用于进行拉伸试验，测试材料的强度和塑性指标；3#试样用于进行冲击试验，测试材料的低温冲击性能；4#试样用于光谱分析及硬度检测。

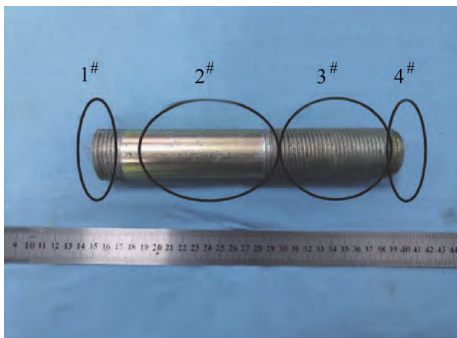


图1 双头螺栓取样位置

3 分析与探究

3.1 宏观断口分析

螺栓1#试样断口经超声波清洗后的宏观断口形貌如图2所示。断口位于靠近螺柱的第六丝扣处。宏观断口分为3个区域：A区为沿着螺栓外圆面的裂纹起始区，周边没有宏观塑性变形；B区为断面中间的放射区，放射状条纹从断面周边指向断面中

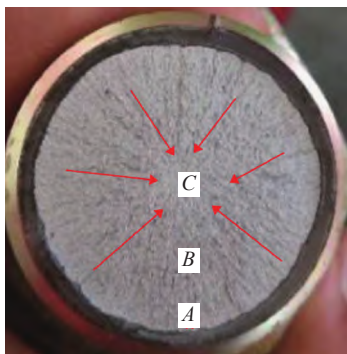


图2 双头螺栓断口宏观形貌

心；C区为心部的纤维区，呈结晶颗粒状，色泽较明亮，且比较粗糙。整个断口平齐，断面干净、新鲜，有银灰色金属光泽，无宏观塑性变形，有明显放射状花样，呈典型的脆性断裂特征。

3.2 化学成分分析

在4#位置端面上采用ASTM E415—2021《碳素钢和低合金钢火花源原子发射光谱分析标准试验方法》进行化学成分分析，结果见表1。由表1可见，双头螺栓的化学成分满足设计要求。

表1 双头螺栓的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
测试值	0.40	0.23	0.84	0.011	0.007	0.90	0.19
设计值	0.37~0.48	0.15~0.35	0.75~1.00	≤0.035	≤0.035	0.8~1.1	0.15~0.25

3.3 力学性能测试

依据试验方案，采用ASTM A370—2022《钢制品力学性能试验的标准 试验方法和定义》规定对2#试样进行力学性能试验，结果见表2。由表2可见，螺栓的力学性能指标符合设计要求。

表2 双头螺栓力学性能

项目	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	$KV(-29^{\circ}C)$ /J	硬度 HBW
设计值	≥860	≥725	≥16	≥50	≥27	≤321
测试值	970	870	18	70	114	310

3.4 能谱及断口微观形貌分析

螺栓1#试样断口A位置的断口形貌及能谱测试位置如图3所示，能谱成分分析结果见表3。分析结果表明：断口上A处附近有少量夹杂物，含有O、Si、S、Ca、Zn和Ba等夹杂元素，其中Zn元素是表面镀层元素，说明双头螺栓按要求进行了镀锌处理。

放射区形貌特征如图4所示。从图4可看出，放射区为准解理断口，可以观察到大量明显的人

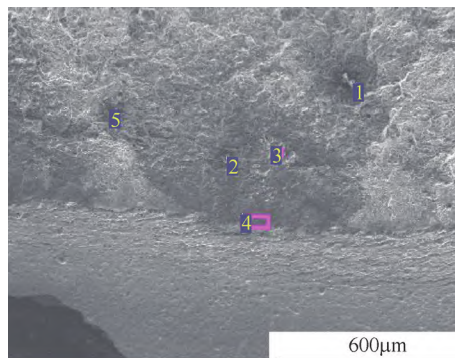


图3 1#试样A位置断口形貌

表3 1#试样A位置断口能谱测试结果(质量分数)(%)

点 位	C	O	Si	S	Ca	Fe	Zn	Ba	总计
1	10.63	17.72	—	6.08	14.85	8.63	—	42.09	100.0
2	—	5.74	1.66	2.50	6.06	66.00	8.07	9.98	100.0
3	8.78	26.44	—	—	—	57.79	7.00	—	100.0
4	7.98	14.55	1.09	2.14	1.12	43.41	29.70	—	100.0
5	18.40	42.86	1.10	1.25	1.10	35.29	—	—	100.0

字纹,呈脆性断裂特征,从下往上走向的裂纹最为粗壮,此为主裂纹;人字纹尖端指向螺栓放射区外部,说明裂纹源起始于螺栓表面的线源。1#试样A位置放射区断口沿晶断裂形貌如图5所示。从图5可看出,螺栓断口为脆性断口,沿晶断裂,在晶界面上有一些撕裂棱的形貌特征。

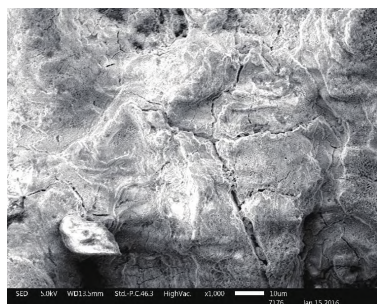


图4 1#试样A位置放射区形貌特征

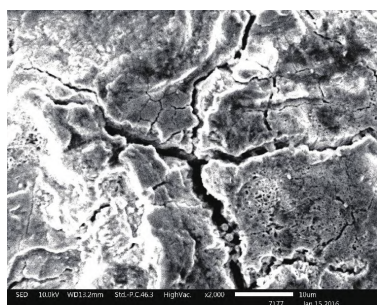


图5 1#试样A位置放射区断口沿晶断裂形貌

3.5 金相组织分析

在1#试样A位置沿螺栓长度方向切取金相试样,裂纹处及相邻丝扣处未发现冶金和加工缺陷,基体组织为均匀的回火索氏体+少量铁素体,如图6所示。

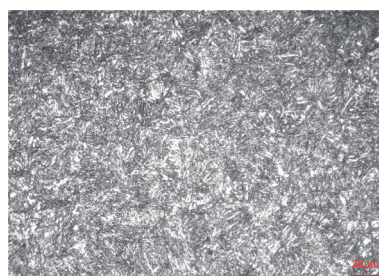


图6 1#试样A位置基体金相组织

4 结果与讨论

通过上述分析可见,压裂双头螺栓的化学成分、力学性能满足技术要求。金相组织为正常的调质组织。氢脆组织在显微镜下的特征也是正常组织,且氢脆断口上一般没有腐蚀产物或极微量^[1]。螺栓断口平整,有金属光泽,其边缘未发现冶金缺陷和加工缺陷,无塑性变形,呈脆性断口。断口微观形貌表明螺栓的断裂方式为沿晶断裂,晶面上有撕裂棱。由此可见,螺栓断面呈氢脆断裂特征。

4.1 断裂过程

从螺栓制造工艺可知,螺栓成形后进行了电镀处理,且在电镀前需酸洗,以去除螺栓表面的氧化皮。酸洗时,螺栓表层的氧化物及部分金属会与酸发生化学反应,并产生氢气。电镀溶液中,水分子的离解,总会或多或少地存在一定数量的氢离子。电镀过程中,在阴极析出金属的同时,伴有氢气的析出^[2, 3]。

金属材料本身存在晶界、位错、夹杂物及内部空洞等,半径仅为0.046nm的氢原子^[4],很容易进入到金属材料中,以原子或氢分子态溶于晶格间隙或金属缺陷如空洞、微裂纹等处。进入晶格间隙的氢会引起晶格畸变,弱化了金属原子间的结合力,进入缺陷处的氢,不断聚集,提高了金属材料的内应力。当材料中氢含量达到一定程度时,在低于屈服强度的应力持续作用下,经过一段孕育期后,在应力特别是在三向拉应力区形成裂纹,并逐步扩展,最后突然发生断裂^[5]。

综上所述,在电镀前酸洗工艺中析出的氢进入了双头螺栓,随着氢在螺栓的次表层不断聚集,增加了双头螺栓的内应力。当螺栓中的氢含量聚集到一定程度时,若镀锌后的去氢处理不及时或时间不足,则会导致螺栓中存在一定程度的残余氢,在残余内应力、安装紧固应力和工作应力叠加作用下,在双头螺栓的丝扣部位萌生裂纹,发生氢脆断裂。

4.2 控制措施

氢脆是在氢和应力共同作用下形成和扩展的,因此,预防双头螺栓早期氢脆失效,提高其使用寿命,就要从减少内应力和残余氢含量两方面考虑,在降低螺栓内应力、改进工艺、扩氢处理等方面采取措施,加以控制。

(1) 去应力处理 对于强度较高、内应力较大的螺栓，镀前应按工艺要求进行充分回火处理，以减少螺栓的残余内应力，为后续镀锌做好准备。

(2) 改进工艺 双头螺栓酸洗和电镀工艺尤为重要，应加强对螺栓酸洗、电镀的控制，防止螺栓吸入过多的氢，减少渗氢量。在除锈和氧化皮时，尽量采用喷砂；若采用酸洗，需在酸洗液中添加缓蚀剂；在除油时，采用化学除油、清洗剂或溶剂除油，渗氢量较少；若采用电化学除油，则应先阴极后阳极；在电镀时，碱性镀液或高电流效率的镀液渗氢量较小^[3, 6]。

采用低氢扩散性和低氢溶解度的镀涂层替代酸洗镀锌工艺，以减少螺栓中渗氢量。在满足产品技术条件要求的情况下，可采用不会造成渗氢的涂层，如机械镀锌或采用达克罗涂覆层代替镀锌^[3, 6]。通过双头螺栓工艺改进，采用无渗氢涂层工艺，可从根本上避免氢脆的发生。

(3) 去氢处理 对于强度较高的螺栓，酸洗电镀后必须尽快进行去氢处理。

美国相关标准中对于石油和天然气工业用螺栓的要求：应在电镀后2h内在191~218℃（375~425°F）下至少烘烤8h。对于高强度螺栓，去氢保温时间还应加长。因此，在实际生产中，应该严格执行去氢处理工艺，必须在电镀后2h内执行去氢处理，时间至少8h。

（上接第88页）

糙度值 $Ra < 0.4\mu m$ ，以保证压制件美观大方、接缝密合、尺寸精度高，并易于脱模。

(5) 化学热处理 为了提高模具的耐磨性、耐腐蚀性等特殊性能，可施以必要的化学热处理，如渗氮、氮碳共渗、氧氮共渗及QPQ处理等。

6 结束语

1) 塑料模具对材料要求比较严苛，除对硬度、强度、切削性能有要求外，还对镜面抛光性能、耐腐蚀性、光刻性能也有较高要求。

2) 塑料模具的热处理应根据用材种类及模具服役情况，制定个性化的热处理工艺，将材料的潜能发挥到极致。

5 结束语

综合分析，得出如下结论，并提出相关建议。

1) 压裂双头螺栓为氢脆导致的沿晶脆断失效。

2) 压裂双头螺栓发生氢脆的主要原因是电镀工艺执行不到位。

3) 压裂双头螺栓涂层可采用低氢扩散性和低氢溶解度的镀涂层，以减少螺栓中渗氢量。

4) 压裂双头螺栓也可采用不会渗氢的涂层，如机械镀锌或达克罗涂覆层，避免螺栓发生氢脆。

5) 对于强度高、内应力大的压裂双头螺栓，镀前应进行充分回火处理，电镀后2h内必须进行去氢处理，时间至少8h。

参考文献：

- [1] 张栋. 机械失效分析实用分析[M]. 北京：国防工业出版社，1997.
- [2] 武扬. 氢损伤和滞后断裂[M]. 北京：冶金工业出版社，1998.
- [3] 黄平，周本金，陈端杰. 电镀过程中氢脆的控制[J]. 电镀与环保，2003，23（1）：10-11.
- [4] 钟群鹏，赵子华. 断口学[M]. 北京：高等教育出版社，2005.
- [5] 高宝奎，高德利. 钻柱使用寿命的不确定性分析[J]. 石油钻探技术，2003，31（5）：64-67.
- [6] 张忠诚. 电镀实用技术500问[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

MW 20240321

3) 模具失效有多种形式，但都是首先从表面开始的，因此要做好“表面文章”，如渗碳、渗氮和QPQ热处理等。

4) 材料是基础，要提高模具寿命，选材用材是关键。

参考文献：

- [1] 王之泰. 非金属产品学[M]. 北京：中国物资出版社，1988.
- [2] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例[M]. 北京：机械工业出版社，2004.
- [3] 任冬云. 模具制造手册[M]. 3版. 北京：化学工业出版社，2016.

MW 20240508