

挡座圈焊缝开裂失效分析

全勇智

柳州瑞东机械制造有限公司 广西柳州 545000

摘要: 针对起重机挡座圈在正常行驶中突然开裂失效,采用化学成分分析、维氏硬度检测、断口分析、金相组织分析及断面能谱分析等手段,对挡座圈开裂的原因进行了分析。结果表明:化学成分、维氏硬度、裂纹附近金属中的夹杂物、金相组织等检测结果均符合标准要求,但焊缝凸起处表面发现存在较多的折叠缺陷,表面处发现氧化物、硫化物等。根据裂纹的特点判断焊缝产生的裂纹属于脆性断裂,产生原因为焊接不良导致焊缝处存在大量O、S、P等元素,导致焊缝裂纹的产生。

关键词: 挡座圈开裂;失效分析;脆性断裂;焊接缺陷

Failure analysis of weld cracking of retaining ring

QUAN Yongzhi

Liuzhou Ruidong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi, China

Abstract: In addressing the issue of sudden cracking in the crane block ring during normal operation. This study employs a comprehensive array of analytical techniques including chemical composition testing, Vickers hardness testing, fracture analysis, metallurgical organization analysis, and cross-section energy spectrum analysis. The objective is to ascertain the root causes behind the cracking phenomenon. Analysis of the results reveals that while the chemical composition, Vickers hardness, and presence of inclusions near the crack conform to standard requirements. Significant folding defects are observed on the surface of the weld bulge, along with the presence of oxides and sulfides. Based on the crack characteristics, it is determined that the weld fracture is of brittle nature. That attributed to subpar welding quality resulting in an abundance of oxygen (O), sulfur (S), phosphorus (P), and other elements at the weld site, consequently facilitating the formation of weld cracks.

Keywords: retaining ring cracking; failure analysis; brittle fracture; welding defect

1 序言

在工程机械领域中,挡座圈作为关键的零部件,在各种机械设备中得到广泛应用,并承担着重要的功能。焊接作为连接挡座圈的主要工艺之一,在实际应用中经常面临因焊缝产生缺陷而失效的问题。挡座圈常见的焊接缺陷包括气孔、裂纹、夹渣、未熔合及未焊透等^[1],其中焊接裂纹对其结构影响尤为显著。焊接裂纹容易导致挡座圈整体开裂,从而增加了机械运行中发生安全事故的风险,同时也大幅降低了轮辋的使用寿命,对设备的安全

性和可靠性构成了严重威胁^[2]。因此,对挡座圈焊缝开裂失效进行深入分析与研究具有重要意义。尽管企业评定了相应的焊接工艺并对员工操作进行了进一步的规范要求,但仍然无法完全避免焊接裂纹的产生^[3]。本研究旨在分析起重机在正常行驶过程中挡座圈开裂的原因。

2 试验材料与方法

挡座圈开裂失效件和对比件如图1所示。该挡座圈尺寸为 $\phi 25\text{in}$ ($1\text{in}=25.4\text{mm}$),型号为FL25207PA2,由LG370G (Q235) 钢板经卷圆、

埋弧焊、红压等工艺加工而成。焊接材料采用大西洋H08MnA焊丝和CHF301焊剂，焊接电流为480~520A，电弧电压为32~38V，焊接速度为480~520mm/min。为进一步探究挡座圈开裂的原因，对挡座圈开裂断面处进行理化检验与分析。



a) 挡座圈失效件



b) 挡座圈对比件

图1 挡座圈失效件和对比件样品形貌

2.1 化学成分分析

利用FOUNDRY-MASTER直读光谱仪，根据GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法（常规法）》对失效件和对比件任取一点进行化学成分分析。

失效件和对比件化学成分见表1，焊丝的化学成分见表2。由表1可知，失效件和对比件的化学成分均满足GB/T 700—2006《碳素结构钢》要求^[4]。由表2可知，焊丝H08MnA的化学成分满足GB/T 5293—2018《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》规定要求^[5]。

表1 失效件和对比件化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
失效件	0.07	0.03	0.82	0.018	0.008	0.03	0.02	0.04
对比件	0.07	0.03	0.80	0.014	0.007	0.03	<0.01	<0.01
GB/T 700—2006	≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045	≤0.30	≤0.30	≤0.30

表2 焊丝H08MnA化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Cu
实测值	0.054	0.98	0.006	0.014	0.035	0.02	0.03	0.01
GB/T 5293—2018	≤0.10	0.80~1.10	≤0.03	≤0.03	≤0.07	≤0.20	≤0.30	≤0.20

2.2 硬度检测

分别在挡座圈失效件和对比件的焊缝区和母材区各取3点测量维氏硬度，选用型号为VH1102的显微维氏硬度计，加载力为0.98N，保压时间为15s。依据GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第一部分：试验方法》对挡座圈上各点进行维氏硬度检测^[6]，结果见表3。

表3 维氏硬度检测结果（HV1）

测试区域		维氏硬度			
		第1点	第2点	第3点	均值
失效件	焊缝区	215	218	216	216
	母材区	198	198	200	199
对比件	焊缝区	185	175	183	181
	母材区	175	174	174	174

由表3可知，失效件母材硬度约为199HV1，焊缝处硬度约为216HV1；对比件母材硬度约为174HV1，焊缝处硬度约为181HV1。失效件和对比件相比，硬度差异不大，失效件硬度稍高于对比件，焊缝处硬度均高于母材硬度，说明焊缝处强度比母材高，符合一般碳素钢及低合金钢的规律。

2.3 断口分析

选用型号为Axia ChemiSEM LoVac的电子显微镜，依据JY/T 0584—2020《扫描电子显微镜分析方法通则》对挡座圈断裂位置进行断口分析，断裂起始位置如图2所示。

由图2可知，挡座圈断裂位置为挡圈成形凹槽角

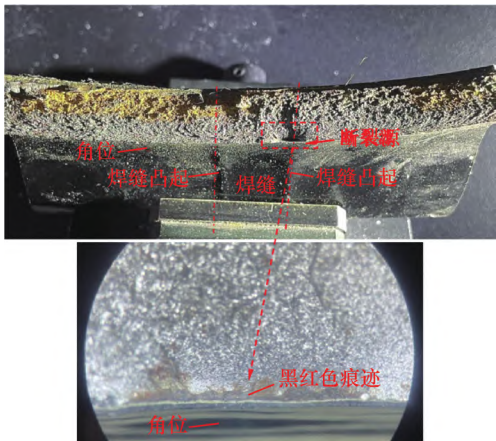
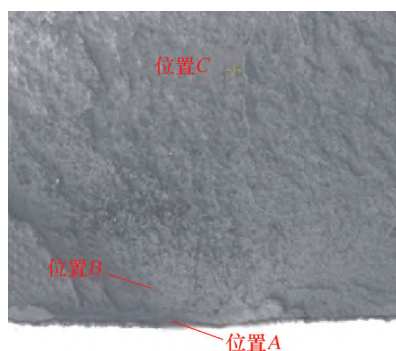
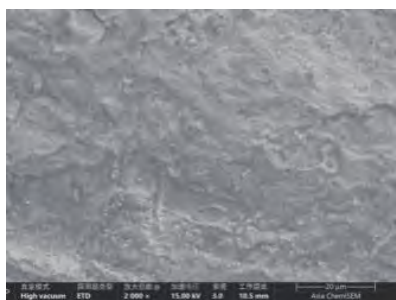


图2 宏观断口形貌

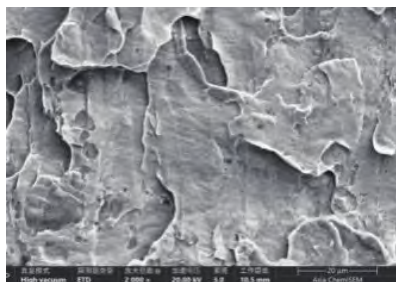
部位,断裂起始位置为挡圈焊缝处,此处焊缝经喷漆后依然能观察到存在凸起,断裂源处为焊缝处一侧凸起,采用放大细致观察,可发现此处断裂起始位置存在黑红色痕迹。对断面形貌分别取检测位置*A*、*B*、*C*做SEM分析,如图3a所示。图3b所示为焊缝处的氧化物覆盖形貌,图3c、d所示分别为位置*B*和*C*处的解理形貌。由此可判断:此开裂挡座圈的断口为脆性断口,源于焊缝。



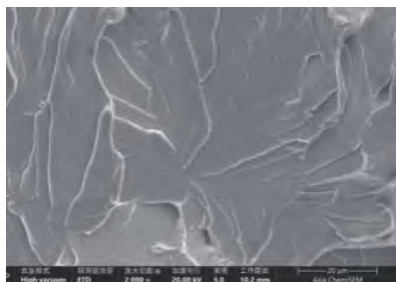
a) 断面形貌检测点分布



b) 位置A断面形貌



c) 位置B断面形貌



d) 位置C断面形貌

图3 SEM断面形貌分析

3 分析与讨论

3.1 裂纹显微组织分析

选用型号为BX53M的金相显微镜,依据GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》分别对失效件和对比件的焊缝和母材区域的非金属夹杂物、显微组织进行分析。图4所示为非金属夹杂物分析结果。

由图4可知,挡座圈失效件和对比件非金属夹杂物均为A类0.5级和D类0.5级,夹杂物较细且数量较少,符合一般轧制钢的质量要求。



a) 对比件非金属夹杂物

b) 失效件非金属夹杂物

图4 非金属夹杂分析结果(抛光态 100×)

分别对挡座圈失效件和对比件的母材和焊缝制备金相试样, 对各试样采用4%硝酸酒精溶液侵蚀, 放大500倍的显微组织如图5所示。由图5可知, 失效件和对比件的母材区显微组织均由铁素体和珠光体组成, 符合一般Q235热轧钢显微组织组成。失效件和对比件的焊缝区显微组织均由铁素体和贝氏体组成, 其组织转变过程如下: Q235热轧钢在焊接热输入和高压热输入作用下, 珠光体中的渗碳体发生分解, 铁素体转变成奥氏体。空冷过程中, 奥氏体在 A_1 温度以下开始转变为贝氏体, 在 A_1 温度以下全部转变为贝氏体。说明母材和焊缝显微组织均正常,

与Q235热轧钢工艺流程相符合。



a) 失效件母材显微组织



b) 失效件焊缝显微组织



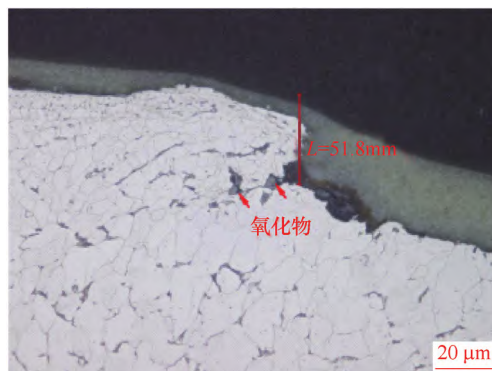
c) 对比件母材显微组织



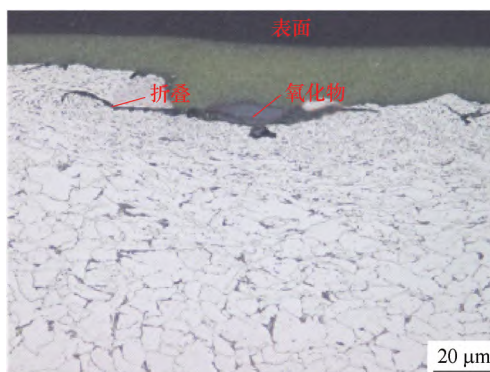
d) 对比件焊缝显微组织

图5 失效件和对比件母材、焊缝的显微组织 (500×)

针对宏观断口形貌中发现的焊缝存在凸起现象,采用4%硝酸酒精溶液侵蚀并放大500倍观察,其结果如图6所示。由图6可以清楚地观察到,失效件和对比件焊缝凸起处都存在折叠缺陷,且内部充斥着氧化物,距离表面深度为51.8μm。说明该折叠缺陷和氧化物的形成是因焊接过程操作不良而导致的。



a) 失效件



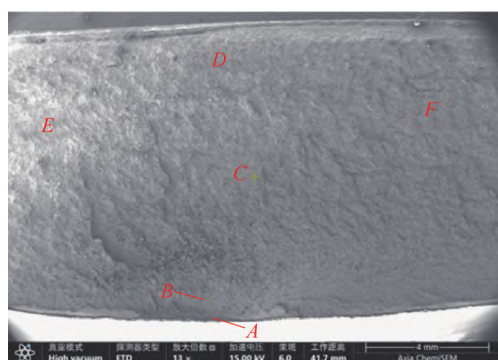
b) 对比件

图6 失效件和对比件焊缝凸起处显微组织

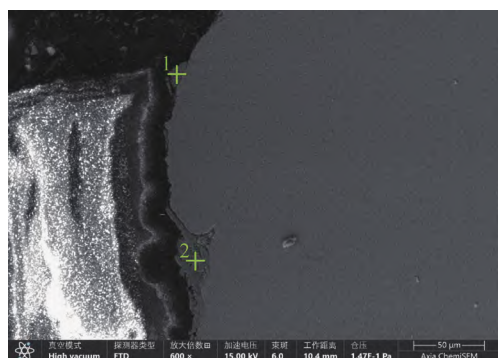
3.2 断面能谱分析

为进一步分析断面裂纹的产生原因,对断面整体和断裂源处氧化物取点进行能谱分析。选用型号为Axia ChemiSEM LoVac的电子显微镜及能谱仪,依据GB/T 17359—2023《微束分析 原子序数不小于11的元素能谱法定量分析》对各点进行能谱分析。检测点位置分布如图7所示。各检测点的元素成分见表4。

经能谱分析,断裂起始位置O、Ca、S元素含量高,表面发现黑色氧化物O、P、Ti、Zn元素含量高。氧化物的存在会引起脆性,并促使裂纹的形成;硫化物、磷化物等属于脆性相,会降低焊接区域的韧性,从而增加焊缝裂纹的风险。



a) 断面整体检测点位置分布



b) 断裂源处氧化物检测点位置分布

图7 断面整体和断裂源处氧化物检测点位置分布

表4 各检测点元素成分 (质量分数) (%)

检测位置	C	N	O	Mn	Fe	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Zn
A	3.8	—	10.6	0.6	84.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	—	—
B	9.6	—	2.0	0.8	87.3	—	0.3	—	—	—	—	—
C	7.6	—	—	0.7	91.4	—	0.2	—	—	—	—	—
D	7.2	—	—	0.8	91.7	—	0.2	—	—	—	—	—
E	7.0	—	—	0.9	92.0	—	0.2	—	—	—	—	—
F	6.2	—	—	0.9	92.7	—	0.2	—	—	—	—	—
氧化物1	18.1	2.3	29.0	0.5	43.1	1.2	1.2	1.0	—	0.2	1.4	2.0
氧化物2	5.0	—	27.0	0.9	64.9	0.1	0.1	0.9	—	—	0.3	0.8

4 结束语

1) 对挡座圈焊缝开裂部位进行了理化检验和金相组织检测,并将结果与对比件进行比较。结果显示,焊缝的化学成分和维氏硬度等参数均符合标准要求。失效件和对比件的母材显微组织均为铁素体+珠光体,而焊缝区的显微组织则为铁素体+贝氏体。

2) 挡座圈出现开裂现象为脆性断裂,源于焊缝区。经检查发现,焊缝处凸起部位存在折叠缺陷,并含有大量O、S、P等元素,这些因素促使焊缝裂纹的形成。挡座圈的断裂是由于焊接不良造成的,所以在焊接过程中,必须采取适当的措施来减少O的影响,并控制S、P等元素含量,以降低裂纹形成的风险。

3) 为预防类似问题的再次发生,提出以下预防措施:控制焊接过程中的温度和热输入在合理范围内,避免过高的温度和热应力引起O、P、S等元素的异常反应;选择适当的焊接材料,尽量减少焊接材料中O、P、S等元素的含量,以减少氧化物、磷化物、硫化物等脆性相的生成风险;严格按照焊接参数和标准进行操作,确保焊接质量符合要求,避免因焊接缺陷和质量问题而导致焊缝开裂的情况发生。

参考文献:

- [1] 全国焊接标准化技术委员会. 金属熔化焊接头缺陷分类及说明: GB/T 6417.1—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [2] 王雪娇. 风电齿轮箱太阳轮断齿研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(4): 56-60.
- [3] 陈昌华, 王延运, 刘洪德, 等. 浅谈阀门焊接裂纹原因分析及防治方法[J]. 阀门, 2024(2): 232-235, 257.
- [4] 全国钢标准化技术委员会. 碳素结构钢: GB/T 700—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [5] 全国焊接标准化技术委员会. 埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求: GB/T 5293—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [6] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 维氏硬度试验 第1部分: 试验方法: GB/T 4340.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

MW 20240609