

电动机主轴裂纹失效分析

韩立威¹, 公令赛¹, 王瑞宁¹, 沈喜堂²

1. 山东微谱技术有限公司 山东济南 250000

2. 苏州联正测试技术服务有限公司 江苏苏州 215000

摘要: 对失效电动机主轴化学成分、力学性能、断口低倍形貌、断口扫描数据及使用状况等进行分析。结果表明: 断口为疲劳断裂形貌, 断口有明显的裂纹源、扩展区有明显的疲劳辉纹; 电动机主轴表面有X形状裂纹, 裂纹扩展方向与电动机主轴轴向呈45°, 断口具有扭转断裂特征。失效原因为电动机主轴在谐振的作用下, 产生扭振疲劳裂纹。

关键词: 电动机主轴; 扭转振动; 谐振; 裂纹

Failure analysis of cracks on the motor spindle

HAN Liwei¹, GONG Lingsai¹, WANG Ruining¹, SHEN Xitang²

1. Shandong Weipu Technology Co., Ltd., Jinan 250000, Shandong, China

2. Suzhou Lianzheng Testing Technology Service Co., Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China

Abstract: Analyze the chemical composition, mechanical properties, macroscopic morphology of the fracture, scanning data of the fracture and usage conditions of the failed motor spindle. The results show that the fracture exhibits a fatigue fracture morphology. There are obvious crack sources on the fracture, and obvious fatigue striations in the propagation area. There are X-shaped cracks on the surface of the motor spindle, and the crack propagation direction forms an angle of 45° with the axial direction of the motor spindle. The fracture has the characteristics of torsional fracture. The cause of failure is that the motor spindle generates torsional vibration fatigue cracks under the influence of resonance.

Keywords: motor spindle; torsional vibration; resonance; crack

1 问题的提出

某除尘用增压鼓风机的电动机在运行仅2.5个月时, 监控人员发现电动机主轴轴瓦温度突然升高, 停机检查后发现电动机主轴有X形裂纹, 用PDXUC-320C型超声探伤仪对其进行检测, 发现裂纹最深约53mm, 上下轴瓦均有损伤, 将电动机主轴拆下后, 发现电动机主轴和筋板上均出现裂纹(见图

1), 其中电动机主轴的轴承支撑处产生与轴向呈45°裂纹(见图2), 轴肩处产生X形交叉裂纹(见图3)。

电动机主轴技术要求: 电动机主轴选用的材料为16Mn钢, 轴长度为4275mm, 各区位(不包含肩档)直径225~250mm; 工艺过程为锻造→正火+回火→焊后消除应力处理。

第一作者: 韩立威, 本科, 机械电气中级工程师, 主要从事机械产品和金属材料产品质量鉴定工作, E-mail: 240972315@qq.com。



图1 电动机主轴筋板处的裂纹



图2 呈45° 裂纹和轴肩处X形裂纹

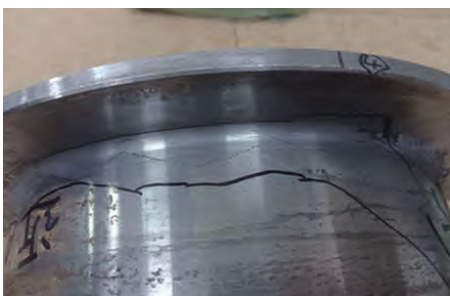


图3 轴肩处X形裂纹

2 试验分析

2.1 对电动机主轴进行分区超声波检测

(1) 电动机主轴分段检测 电动机主轴左侧为A端，右侧为B端（见图4、图5），将其分为001~006检测段（见图6）。

(2) 电动机主轴的超声波检测结果 001段未检测出缺陷；002段存在连续性超标缺陷，缺陷位



图4 现场超声波检测及分段区域（A端）



图5 现场超声波检测记录分段区域（B端）



图6 检测部位及缺陷位置示意

置为002段与003段交界台阶左侧80mm处3~8点方向，深度为43~48mm；003段存在连续性超标缺陷，缺陷位置为002段与003段交界台阶右120mm处整个圆周，深度为45~53mm；004段、005段、006段均未检测出缺陷。

2.2 理化试验

对材料进行化学成分分析及力学性能试验。

(1) 化学成分分析 取样部位在轴的两端，A端和B端，检测结果见表1。

(2) 力学性能试验 根据标准JB/T 1271—2014

《交、直流电动机主轴锻件 技术条件》的规定，在电动机主轴的A、B端取样试验，冲击性能试验结果见表2，拉伸性能试验结果见表3。

(3) 微观组织检测 样品001~003段低倍组织检测结果见表4；电动机主轴非金属夹杂物微观形貌如图7所示，其检测结果见表5。电动机主轴裂纹处金相组织如图8、图9所示；电动机主轴心部A、B端金相组织分别如图10、图11所示。

2.3 断口形貌

(1) 断口低倍形貌 通过断口宏观观察及金相

表1 电动机主轴化学成分（质量分数）（%）

样品编号	元素	标准要求	检测结果	结论	检测判定依据
23090017-001	C	0.12~0.20	0.18	符合	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）》、 JB/T 1271—2014《交、直流电动机主轴锻件 技术条件》
	Si	0.20~0.60	0.53	符合	
	Mn	1.20~1.60	1.45	符合	
	P	≤0.020	0.015	符合	
	S	≤0.015	0.003	符合	
23090017-003	C	0.12~0.20	0.20	符合	
	Si	0.20~0.60	0.54	符合	
	Mn	1.20~1.60	1.47	符合	
	P	≤0.020	0.017	符合	
	S	≤0.015	0.003	符合	

表2 电动机主轴冲击性能试验结果（J）

样品编号		标准要求KV	试验值KV	结论	试验判定依据
23090017-001	试件1	≥32.0	195.0	符合	GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》、 JB/T 1271—2014《交、直流电动机主轴锻件 技术条件》
23090017-001	试件2	≥32.0	181.5	符合	
23090017-003	试件1	≥32.0	145.5	符合	
23090017-003	试件2	≥32.0	159.5	符合	

表3 电动机主轴拉伸性能试验结果

样品编号	试验项目	标准要求	试验值	结论	试验判定依据
23090017-001 (试件1)	抗拉强度 R_m /MPa	≥500	528	符合	GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》、 JB/T 1271—2014《交、直流电动机主轴锻件 技术条件》
	上屈服强度 R_{eH} /MPa	≥295	342	符合	
	断后伸长率A（%）	≥16	34.0	符合	
	断面收缩率Z（%）	≥32	74	符合	
23090017-001 (试件2)	抗拉强度 R_m /MPa	≥500	523	符合	
	上屈服强度 R_{eH} /MPa	≥295	318	符合	
	断后伸长率A（%）	≥16	32.5	符合	
	断面收缩率Z（%）	≥32	73	符合	

表4 样品001~003检测处低倍组织检测结果

样品编号	试验项目	试验结果/级	试验依据
23090017-001	一般疏松	0	GB/T 226—2015《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》
	中心疏松	4	
	锭型偏析	0	
	一般偏析	4	
	其他	—	
23090017-002	一般疏松	0	
	中心疏松	4	
	锭型偏析	0	
	一般偏析	4	
	其他	—	
23090017-003	一般疏松	0	
	中心疏松	3	
	锭型偏析	0	
	一般偏析	2	
	其他	—	



图7 非金属夹杂物微观形貌

表5 电动机主轴非金属夹杂物检测结果 (级)

样品编号	试验结果								试验依据 试验方法
	A		B		C		D		
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
23090017-001	0	0	0	0	0	0	1.5	0	GB/T 10561—2005 《钢中非金属夹杂物含量的测定》 试验方法：A法
23090017-002	0	0	0	0	0	0	1	0	
23090017-003	0	0	0	0	0	0	1	0	

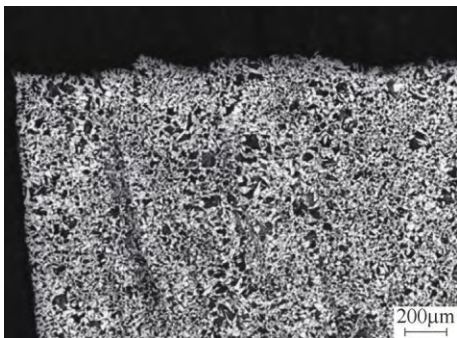


图8 电动机主轴裂纹处金相组织 (50×)



图9 电动机主轴裂纹处金相组织 (500×)

显微镜 (型号为Axio Lab.A1) 检测, 断口有明显的裂纹源、裂纹扩展区, 裂纹扩展区有疲劳辉纹, 如图12、图13所示。



图10 A端心部金相组织 (500×)

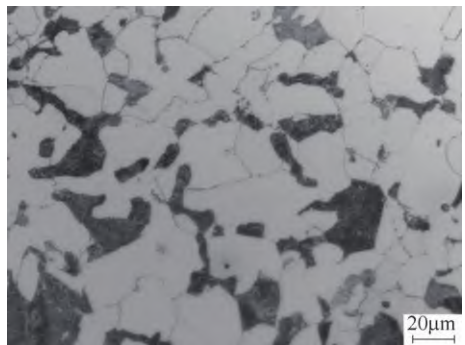


图11 B端心部金相组织 (500×)

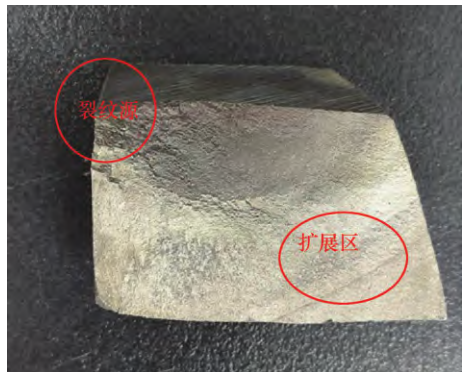


图12 断口宏观形貌

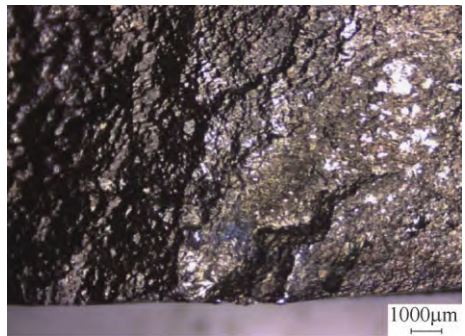


图13 断口微观形貌

(2) 断口扫描 通过Apreo2扫描电镜观察断口裂纹源微观形貌, 裂纹源位于轴的表面, 裂纹由表

及里开裂,部分原始裂纹形貌已被磨损,如图14、图15所示;同时,可以看到裂纹扩展区形貌(见图16)和裂纹扩展区进一步放大次生裂纹(见图17)。

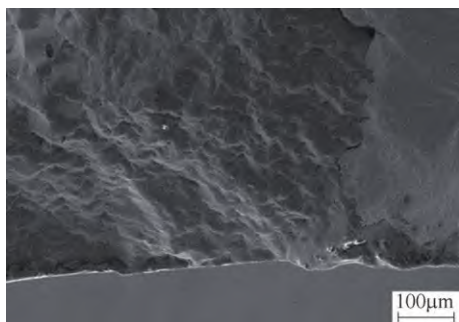


图14 断口裂纹源形貌

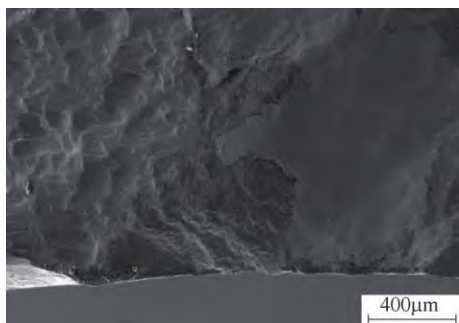


图15 断口裂纹源形貌

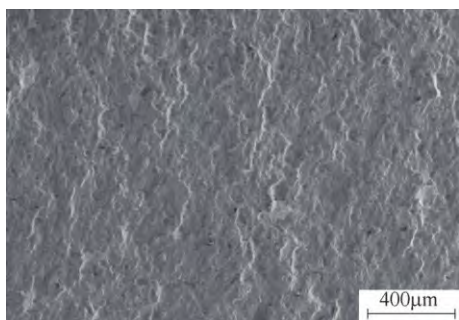


图16 断口A端裂纹扩展区SEM形貌

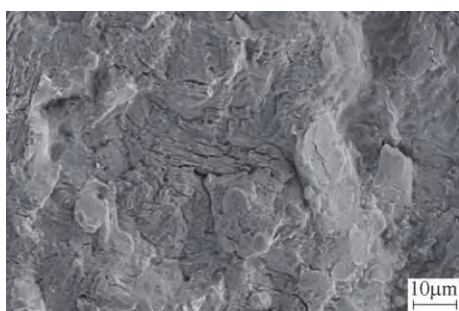


图17 断口A端裂纹扩展区扫描电镜形貌

3 使用工况与数据

3.1 使用场景

电动机用于脱硫除尘增压鼓风机上,扭矩较大,增压鼓风机外观如图18所示,鼓风机运行监控记录如图19所示。



图18 增压鼓风机外观

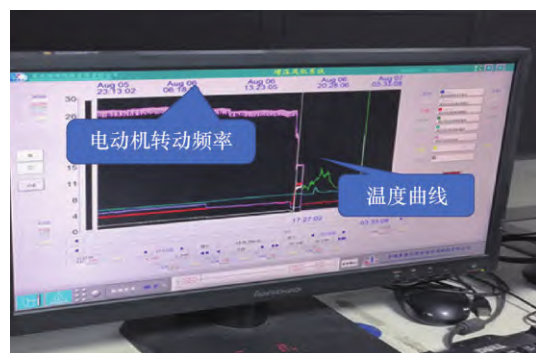


图19 增压鼓风机运行监控记录

3.2 电动机运行记录数据

从图19可看出,发生故障时,电动机主轴轴瓦温度迅速升高,出现峰值,然后下降;在某一时刻,电动机转动频率急速下降,下降途中出现台阶,然后降到零。

4 分析讨论

1) 根据电动机对主轴的超声波检测可知,在002段检测出连续性裂纹缺陷,位置在002段与003段交界台阶左侧80mm处3~8点方向,裂纹深度为43~48mm;在003段存在连续性裂纹缺陷,位置在002段与003段交界台阶右侧120mm处整个圆周,裂纹深度为45~53mm;其他部位均未检测出缺陷。

2) 样品23090017-001、23090017-003的化学成

分和力学性能检测结果符合JB/T 1271—2014《交、直流电动机主轴锻件技术条件》的规定。

3) 样品23090017-001~003的低倍组织、金相分析结果表明,其显微组织为16Mn钢大锻件正火后的正常组织,且与力学性能检测结果相匹配。

4) 疲劳断裂具有扭振破坏特征,根据样品23090017-002的断口宏观及扫描电镜分析表明,裂纹源自轴的表面,裂纹由表面向中心扩展,其断口形貌可见明显的疲劳扩展辉纹及二次裂纹,断裂形式为疲劳断裂,符合周期性往复作用力导致裂纹产生的特征^[1];电动机主轴是一个旋转体,运行中发生扭转振动,多处轴表面裂纹形貌呈X形,裂纹走向与轴向呈45°,因此该轴裂纹失效,具有扭振破坏的特征^[2, 3]。

5) 谐振加速了电动机主轴开裂,当电动机转动频率下降、中途出现频率台阶时,轴瓦温度急剧升高,说明此时电动机主轴已经产生裂纹,而这个裂纹的产生与谐振有关,此时电动机主轴振动幅度最大,承受的应力也最大。电动机主轴在交变作用力下往复运动,发生疲劳断裂,裂纹扩展区域内部产生次生裂纹。

综上所述,电动机主轴非裂纹失效部分经化学成分分析、金相组织检测、力学性能试验,以及超

声波、扫描电镜检测,均符合低倍组织和显微组织为16Mn钢大锻件的正常正火组织及其力学性能。

5 结束语

综上所述,可得出如下结论。

1) 电动机主轴非裂纹失效部分经化学成分分析、金相组织检测、力学性能试验、超声波及扫描电镜检测,符合低倍组织和显微组织为16Mn钢大锻件的正常正火组织与其力学性能。

2) 样品23090017-002断口分析结果表明,其裂纹源自轴表面,断裂机制为疲劳断裂,裂纹走向具有扭振破坏的特征。

3) 该电动机主轴的疲劳裂纹与电动机主轴产生谐振有关。

参考文献:

- [1] 清华大学工程力学系固体力学教研组振动组. 机械振动: 上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [2] 王泽基, 王瑞庭, 张祥军. 冷连轧机主传动系统扭振分析[J]. 冶金设备, 2010, 12 (6): 17-23.
- [3] 胡子正, 杨小波, 邵成. 汽车传动系统扭振特征辨识[J]. 汽车工程, 1992, 14 (1): 32-37.

MW 20241120

(上接第160页)

整磁通量,改善加热区域磁场分布,提高加热部位温度分布的均匀性,避免局部加热温度过高。将马氏体组织细化至5级左右(见图9b),进一步增强链轨节的使用强度。

4 结束语

针对挖掘机履带链轨节裂纹掉块等失效情况进行调查,通过断口宏观及微观分析,确认其裂纹为疲劳裂纹,有限元分析结果也证实了结构上存在应力集中区域。剖检分析发现,其调质晶粒度及硬化区马氏体组织较为粗大。根据分析结果,通过设计优化、改善热处理工艺等手段进行改善。优化设计减少应力集中区域,通过改善调质工艺来提高基体晶粒度,优化踏面硬化工艺,细化马氏体组织。改善措施实施以后,经一年的市场验证,无不良反

馈,挖掘机履带链轨节裂纹掉块失效问题得到有效解决。

参考文献:

- [1] 李庆芬, 胡胜海, 朱世范. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008.
- [2] 路君, 曾小勤, 丁文江. 晶粒度与合金强度关系[J]. 轻金属, 2008 (8): 59-64.
- [3] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 刘宗晶, 赵莉萍. 热处理工程师必备理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 彭天成, 张开华. 链轨节的选材及热处理工艺[J]. 金属加工(热加工), 2018 (11): 64-66.

MW 20241220