

螺旋弹簧断裂失效分析

胡孝昀

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:采用扫描电子显微镜、金相显微组织观察分析、硬度测试、喷丸覆盖率检测和材质的化学成分分析等,对断裂失效的弹簧进行分析。检测结果表明:弹簧在试验前已经裂开,如控制好回火条件,可减少缺陷产生的可能。

关键词:弹簧;断裂;失效分析;疲劳损伤

中图分类号:TG306; TG135⁺.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0057-04

Fracture Failure Analysis on Spiral Spring

HU Xiaoyun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:The reasons for the fracture of spiral spring were analyzed through observing the fracture morphology by means of scanning electron microscope, detecting metallographical microstructure, measuring the hardness, examining the quality of shot blasting and analyzing the chemical compositions of the material. The result shows that the spring has cracked before the test, and that a well controlled tempering condition can reduce the possibility of defects.

Keywords: spiral spring; fracture; failure analysis; fatigue damage

0 引言

圆柱螺旋弹簧是机械工业中常用的基础零件,在减震缓冲等应用场合发挥着重要作用^[1]。螺旋压缩弹簧号称“簧中王”,在整个工业领域应用十分广泛^[2-3]。但在实际的工作过程中,螺旋弹簧长期处于反复压缩的高频交变载荷作用下,通常会出断裂失效现象^[4]。螺旋弹簧的性能和使用寿命对其工作的可靠性有很大的影响。对断裂弹簧失效的原因进行分析,可为弹簧的设计和热处理工艺提供相关参考依据。

1 样件描述

某公司送检件为弹簧试样,试件在同一总成盘中试验后失效。其中2套弹簧断裂,分别标识为1#和2#。1#外簧断裂成2截,2#外簧断裂成3截。原材料牌号为SWOSC-VHV(具体工艺详见图样)。从断口宏观形态观察为疲劳起裂后剪切扭转断面特征。为进一步判定其断裂原因,需求对送检样品开展断口分析、材质分析、显微组织分析等检测分析,以判断弹簧断裂原因。

试样的检测方法如下:

宏观形貌观察:目眼及体视显微镜;

微观形貌观察及能谱EDS分析:扫描电子显微镜及能谱仪;

硬度测试:显微硬度计;

金相分析:蔡司金相显微镜等。

2 数据结果分析

2.1 宏观形貌检测

被检1#和2#弹簧的宏观形貌如图1-图6所示。从图1-图3可看出,1#弹簧从第2.5环外侧表面位置起裂,底部和压并处位置有挤压磨损痕迹(1#压并处痕迹比2#明显,挤压更严重),断面扭转撕裂特征明显,整体断面呈现疲劳半月痕迹,扩展、瞬断区有明显扭转特征。1#试件疲劳从心部向四周螺旋状扩散。2#弹簧从两端断裂,由图可知其从内壁位置起裂,底部和压并处有挤压磨损痕迹,断面剪切撕裂特征明显,整体断面呈现疲劳半月痕迹,扩展、瞬断区有明显扭转特征。由图可见,两弹簧表面和挤压面各位置,未见明显缺陷,1#弹簧外壁裂纹扩张至心部。



图1 1#弹簧失效整体特征



图2 2#弹簧失效整体特征



图3 1#弹簧断口宏观形貌

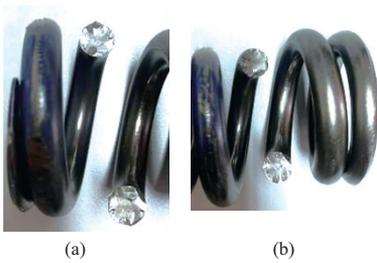


图4 2#弹簧断口宏观形貌



图5 弹簧失效件侧面形貌



图6 弹簧失效件底面形貌

2.2 微观形貌及能谱分析

将1#外簧失断口进行清洗、除油和除锈处理。图7-图11为1#失效弹簧扫描电子显微图。由扫描电子显微图像可知,弹簧断口局部对磨严重,在扫描电子显微镜下观察断口宏观形貌,由宏观低倍扫描形貌可知,该弹簧断裂起始位置为如图7所示的弹簧外壁处,并向心部扩张,在弹簧心部扩展撕裂,随后向四周扩张,疲劳源以裂纹为中心(如图7中标示)。根据工件加工工艺及使用过程可知,试验过程中外壁微裂纹扩展,随后逐渐向心部延伸,最终疲劳扩展扭转撕裂失效。以准解理及解理特征为主,局部可见少量撕裂切窝。

图12-图17为2#失效弹簧左侧扫描电子图像。由图可知,弹簧表面喷丸痕迹明显,内壁未见明显缺陷,内壁源区(内外簧接触点)挤压痕迹明显,局部微裂纹贯穿弹簧表面。

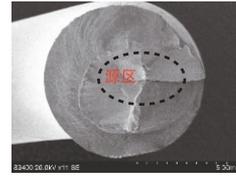


图7 弹簧断口宏观扫描形貌

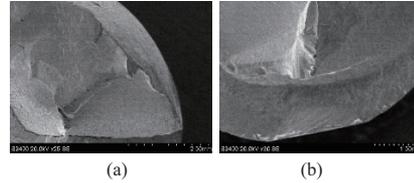


图8 弹簧裂纹扫描形貌

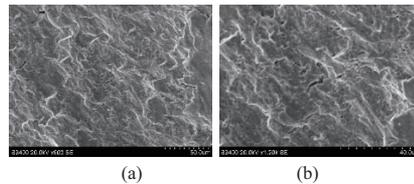


图9 弹簧断口源区扫描形貌

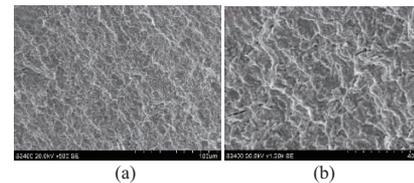


图10 弹簧扩展区扫描形貌1

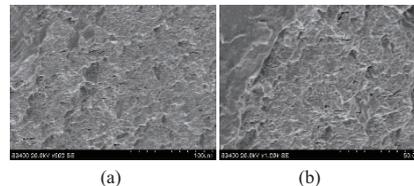


图11 弹簧扩展区扫描形貌2

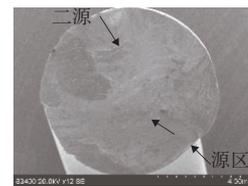


图12 弹簧断口宏观扫描形貌(左侧)

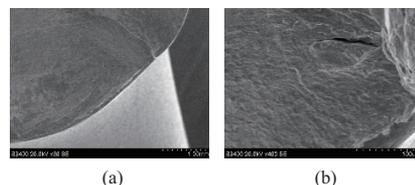


图13 弹簧源区扫描形貌(左侧)

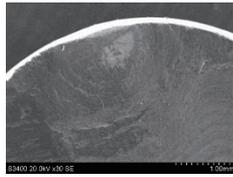


图 14 弹簧第二源区低倍扫描形貌(左侧)

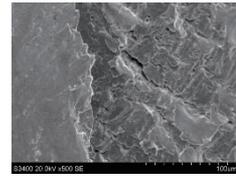


图 21 弹簧第二源区高倍扫描形貌(右侧)

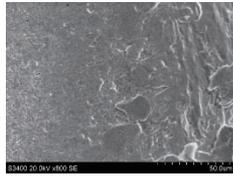


图 15 弹簧第二源区高倍扫描形貌(左侧)

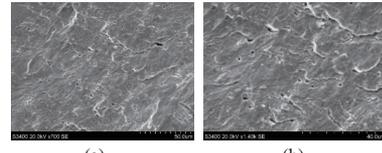


图 22 弹簧扩展初期扫描形貌(右侧)

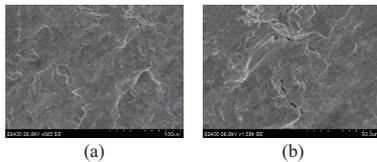


图 16 弹簧扩展扫描形貌(左侧)

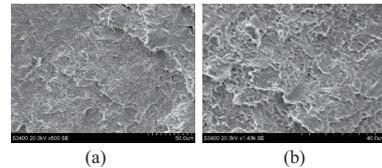


图 23 弹簧瞬断区扫描形貌(右侧)

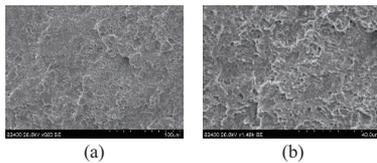


图 17 弹簧瞬断区扫描形貌(左侧)

随着 1#弹簧起裂,2#弹簧受力异常,内外簧挤压磨损加剧。在 2#弹簧内壁处挤压起源,源区未见明显氧化产物及夹杂,局部裂纹扩张,疲劳特征明显,以准解理及解理特征为主,局部可见少量撕裂韧窝。在往复拉压应力作用下,外壁挤压形成第二源区,然后在横向的往复剪切力及扭转作用下,最终剪切扭转至心部附近撕拉断裂。扩展区初期主要表现为明显准解理及脆性疲劳条带复合特征,随着断裂的进行,弹簧扭转撕裂剪切过载,扩展末期疲劳特征逐渐明显,并伴随着大量二次裂纹出现。最终断裂区由于剪切扭转力的存在,试件完全失稳撕裂并伴随振动,断面呈混合特征,为拉拔韧窝和解理台阶特征。

图 18-图 23 为 2#失效弹簧右侧扫描电子图像。

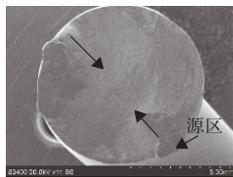


图 18 弹簧断口宏观扫描形貌(右侧)

1#和 2#弹簧断裂处的 EDS 结果如图 24-图 27 所示。从图中各位置的分析结果中可以看出,起始区域图谱中未见明显异常元素的峰存在,裂纹处氧化严重,表面覆盖较厚氧化膜。

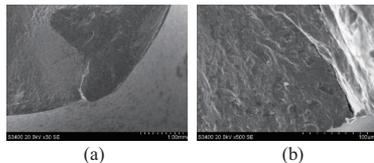


图 19 弹簧源区扫描形貌(右侧)

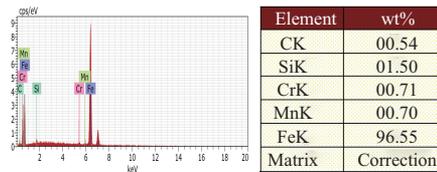


图 24 弹簧 1#源区 EDS 化学成分分析图谱

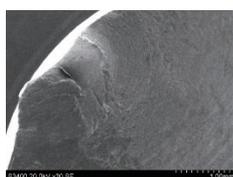


图 20 弹簧第二源区低倍扫描形貌(右侧)

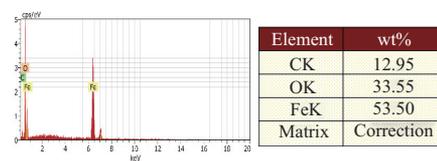


图 25 弹簧 1#裂纹 EDS 分析图谱

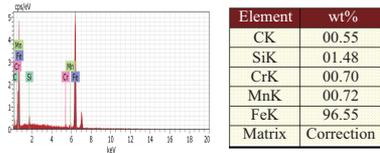


图 26 弹簧 2#源区 EDS 化学成分分析图谱

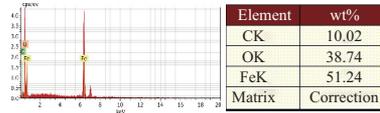


图 27 弹簧 1#裂纹 EDS 分析谱图

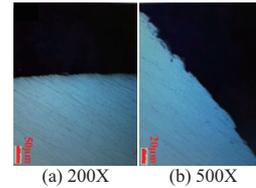


图 30 2#弹簧金相显微组织照片

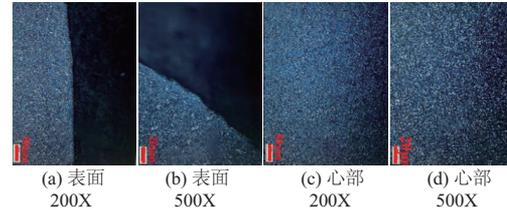


图 31 2#弹簧金相显微组织照片

2.3 显微组织观察分析

为进一步判定该试件热处理状态问题,对断口试件取样做金相观察。经 4% 硝酸酒精腐蚀后得以下金相组织照片。图 28 和图 29 分别为 1#弹簧表面抛光图和金相显微组织照片。图 30 和图 31 分别为 2#弹簧表面抛光图和金相显微组织照片。由图可知,源区裂纹明显,局部裂纹附近可见明显氧化物夹杂(具体成分可见图 26、图 27)。结合图观察后可知,该缺陷为高温处理后的陈旧型缺陷,氧化严重。

弹簧横端面显微组织为回火屈氏体+细小碳化物颗粒组织特征。表层未见脱碳,组织未见异常^[5-7]。

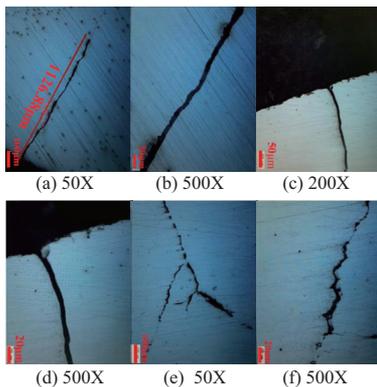


图 28 1#弹簧表面源区抛光图

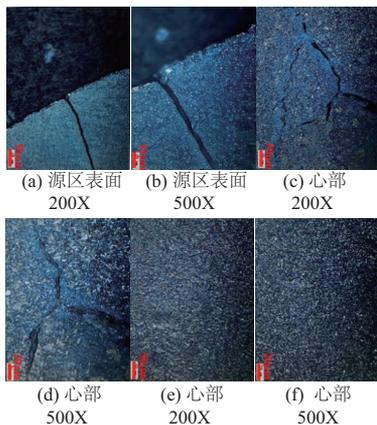


图 29 1#弹簧表面源区侵蚀图

2.4 硬度、喷丸覆盖率和材质质量分数分析

分别在断裂试件上断裂处采集多点硬度,硬度值如表 1 所示(钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定)^[8]。对照该工件热处理工艺要求可知断件硬度达标,表层和心部硬度未见明显差异。

表 1 弹簧显微硬度测试结果 单位:HV

硬度测试项目	硬度值	结果
1#弹簧(表面硬度)	548.1/543.3/542.2/541.7	合格
1#弹簧(芯部硬度)	548.4/551.6/549.7/548.2	合格
2#弹簧(表面硬度)	545.4/548.0/548.7/549.2	合格
2#弹簧(芯部硬度)	546.5/547.3/550.2/541.8	合格
2#弹簧(表面硬度)	545.8/548.5/543.1/540.4	合格
2#弹簧(芯部硬度)	541.1/541.9/551.3/547.3	合格

弹簧断口附件喷丸覆盖率检测结果如表 2 所示。由表 2 可知,弹簧失效断口附件附近喷丸覆盖率完整,未见异常(除挤压破损位置无法观测)。

表 2 喷丸覆盖率 单位:%

编号	外圆弧面	内圆弧面	侧面
1#弹簧	100	100	100
2#弹簧	100	100	100

弹簧的化学成分检测结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出其质量分数符合《SWOSC-VHV》规定钢材标准要求;材料质量分数符合标准要求。

表 3 弹簧化学成分直读光谱分析结果 单位:wt%

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	V	Cu
SWOSC-VHV	0.63~0.68	1.20~1.60	0.50~0.80	≤0.025	≤0.025	0.50~0.80	0.10~0.20	≤0.20
弹簧	0.64	1.99	0.65	0.005	0.008	0.66	0.10	0.02

(下转第 88 页)

长度与4倍地脚螺栓直径之和,补强实施时应保证于缺陷部位两端各外延 ≥ 2 倍地脚螺栓直径长度。

2) 碳纤维补强管直径不小于地脚螺栓直径与碳纤维补强管壁厚的1.15倍之和。

3) 碳纤维补强管壁厚不小于地脚螺栓直径的15%。

3 结语

1) 通过综合分析现场实施适用性、补强体强度性能、抗腐蚀性和耐久性等各种因素,提出通过粘贴碳纤维管对输电线路地脚螺栓腐蚀缺陷进行现场补强的方法。

2) 通过对厚度分别为2 mm、3 mm、4 mm的碳纤维树脂胶泥增强体试样进行拉伸试验,验证和比较了不同厚度碳纤维树脂胶泥增强体的补强效果。结果表明,通过灌注碳纤维树脂胶泥粘贴碳纤维管的方法补强腐蚀受损地脚螺栓能够满足安全使用的强度要求,且碳纤维树脂胶泥增强体厚度 ≥ 3 mm时可以达到良好效果。

3) 针对灌注碳纤维树脂胶泥粘贴碳纤维管补强方法具体工程应用时碳纤维补强管长度、厚度、直径等关键参数的选取问题,结合试验结果提出了推荐性的选取原则,有利于指导工程实践。

参考文献:

- [1] 邓小康. 铁塔地脚螺栓及塔脚锈蚀严重的修复加固[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 165-166.
- [2] 李志明, 梁美玉, 付天孟. 相控阵超声检测预埋螺栓腐蚀的可行性研究[J]. 机电信息, 2019(29): 65-66.
- [3] 余倩倩, 顾祥林, 陈涛, 等. 碳纤维增强复合材料板补强平面向外纵向焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 406-410.
- [4] 刘方, 张桐欢, 郑鑫超, 等. T700碳纤维增强复合材料螺栓连接的渐进损伤分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 5983-5989.
- [5] 高佳佳, 楚珑晟, 马天阳, 等. 纤维增强树脂基复合材料连接结构强度与失效分析[J]. 航空制造技术, 2020, 63(11): 94-101.
- [6] 陈健, 鲁成云. 碳纤维复合材料补强技术在输油管道维修中的应用[J]. 石油知识, 2010(2): 40-41.
- [7] 吴德山, 王建生, 张瑞祥, 等. 一种耐高压聚氨酯包碳纤维复合管及其制造方法.
- [8] 林志明. 钢构件应力强度因子的有限元分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.

收稿日期: 2020-08-17

(上接第60页)

从弹簧断口形貌判定为典型的缺口应力疲劳失效特征,综合以上检测结果,结合该试件的工艺及试验工况分析判断可知,断裂诱因可考虑为1#表面裂纹扩展后疲劳断裂,从而导致2#弹簧失稳挤压磨损疲劳断裂。

1) 弹簧材料化学成分、非金属夹杂物,热处理后各部位硬度及组织等均符合标准要求。

2) 1#弹簧表面裂纹缺陷位置呈现陈旧性氧化断面,即该弹簧在试验前已经裂开。

3) 从金相组织检查及EDS分析结果可知,裂纹缺陷表面氧化严重,说明该区域是受到了较长时间的高温过程(材料临界点以上加热)。根据弹簧生产工艺流程,其中有一步骤为440℃、50 min回火。因为该过程加热温度高、保温时间长,具备产生高温氧化的条件,所以初步判定该缺陷应该在回火前即产生。

3 结语

本文通过对失效弹簧断口形貌检测、金相显微组织检测及硬度和质量分数分析,得出弹簧在回火前已经氧化严重,缺陷在实验前已经产生。根据弹簧生产工艺,回火阶段最有可能产生高温氧化,在此阶段须控制好回火条件可以减少缺陷产生的可能。希望通过分析此次弹簧断裂的案例,为弹簧的设计和热处理工艺提供相关参考依据。

参考文献:

- [1] 陆峰峰, 杨国来. 考虑本身质量的圆柱螺旋弹簧动态特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(4): 27-29, 46.
- [2] 钱国强, 陈昕, 张韶佳. 螺旋压缩弹簧断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(4): 238-242.
- [3] 曾祥璞. 圆柱螺旋弹簧的可靠性优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(5): 15-18.
- [4] 陈磊, 庞院, 高朝乾. 后螺旋弹簧断裂失效分析[J]. 汽车零部件, 2018(1): 74-77.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属平均晶粒度测定方法: GB/T 6394—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 国家技术监督局. 钢的显微组织评定方法: GB/T 13299—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢中非金属夹杂物含量的测定—标准评级图显微检验法: GB/T 10561—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定: GB/T 9451—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

收稿日期: 2019-10-14