

65Mn 钢弹簧断裂原因分析

潘恒沛¹, 李雪峰¹, 王珂¹, 王世宁¹, 张佳旗¹, 张欣耀^{1,2}

(1. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471023

2. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 洛阳 471023)

摘要: 某 65Mn 钢减振弹簧在使用一年后发生断裂。通过宏观分析、化学成分分析、硬度测试、金相分析以及断口微观分析等方法对弹簧的断裂原因进行了分析。结果表明: 坯料表面的氧化皮没有清除干净, 拔丝时形成折叠和微小裂纹, 在交变载荷的作用下, 裂纹不断扩展, 最终发生了疲劳断裂。

关键词: 弹簧; 断裂; 折叠; 裂纹; 疲劳断裂

Feature Reason Analysis of 65Mn spring

Pan Hengpei¹, LI Xuefeng¹, Wang Ke¹, Wang Shining¹, Zhang Jiaqi¹, Yang xiao^{1,2}

(1 Luoyang ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China

2 National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang 471023, China)

Abstract: The vibration damping spring of 65Mn Steel broke after one year of use. The fracture causes of spring were analyzed by means of macro analysis, chemical composition analysis, hardness test, metallographic analysis and fracture micro analysis. The results show that the oxide skin on the surface of the billet is not cleaned, and the folding and micro cracks are formed in the drawing process. Under the action of alternating load, the cracks continue to expand, and finally the spring has fatigue fracture.

Key words: spring; fracture; fold; crack; fatigue fracture

65Mn 弹簧钢具有较高的淬透性、强度、硬度和弹性, 较好的韧性、塑性和加工性, 表面脱碳倾向相对较小, 综合力学性能优于碳素弹簧钢, 热处理后疲劳极限可与合金弹簧钢相媲美, 是广泛使用的弹簧钢种之一, 常用来制作各种小尺寸弹簧^[1]。某设备减振底座弹簧材料为 65Mn 弹簧钢, 弹簧钢丝公称直径为 3.0mm, 外径为 30mm, 为冷拔钢丝卷制弹簧, 生产工艺为 65Mn 弹簧钢冷拔钢丝下料→矫直→卷制→端面成形→去应力退火 (280°C/35min) →检查→表面喷漆→检查入库, 弹簧硬度要求 42~48HRC。某设备在使用一年后, 减振底座的一个弹簧发生断裂, 为了分析弹簧的断裂原因, 在之后的生产中提高产品质量, 笔者对断裂的弹簧取样进行了检测和分析。

1 理化检验

1.1 宏观分析

断口宏观观察, 弹簧断裂的位置位于弹簧第一圈弹簧内径处, 断口方向大约与弹簧线径方向呈 45° 角, 整个断口可以分成 3 个区域, I 和 II 区形成一个近似椭圆形的区

收稿日期: 2024-XX-XX;

作者简介: 潘恒沛 (1991-), 男, 高级工程师, 硕士

域，约占整个断口面积的 1/3，断口平坦、光滑，其中 I 区断口在弹簧内径边缘处，呈黑色，面积大约为 1mm×1.5mm，II 区断口呈银灰色，可观察到贝纹线特征。III 区断口约占整个断口面积的 2/3，呈银灰色，断口较粗糙，见图 1。整个断口未发现塑性变形和夹渣、分层等材料冶金缺陷。从以上宏观特征初步分析，弹簧的裂纹源区为 I 区，有较明显的氧化特征，II 区为疲劳裂纹扩展区，III 区为瞬断区^[2]。



图 1 断口宏观形貌

Fig.1 Macroscopic morphology of the spring (a) and fracture (b)

1.2 化学成分分析

采用 Agilent 5110SVDV 电感耦合等离子体发射光谱仪和 CS800 碳硫分析仪，对断裂的弹簧进行化学成分分析，测定结果见表 1，弹簧的化学成分符合 GB/T 1222-2016 《弹簧钢》的要求。

表 1 65Mn 钢弹簧化学成分 (Wt%)

Tab. 1 Chemical composition of the 65Mn spring (mass fraction, %)

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
分析结果	0.65	0.22	0.77	0.015	0.025	0.09	0.05	0.05
GB/T 1222-2016	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.030	≤0.030	≤0.25	≤0.35	≤0.25

1.3 硬度测试

由于弹簧钢丝较细，无法直接进行 HRC 硬度测试，故采用 Wilson VH3300 显微硬度计对其进行显微维氏硬度检测，试验力为 9.8N，加载时间为 10s，参考标准 GB/T 1172 《黑色金属硬度及强度换算值》，将维氏硬度 (HV) 换算成洛氏硬度 (HRC)，结果见表 2。弹簧的硬度平均值约在 43.5~44.0HRC 之间，符合 42~48HRC 的设计要求。

表 2 65Mn 弹簧硬度测试结果

Tab. 2 Hardness results of the 65Mn spring

硬度	HV1
----	-----

	1	2	3	平均值	换算成 HRC
分析结果	428	421	426	425	43.5~44.0

1.4 金相检验

弹簧的断口试样沿纵向剖开，将弹簧的裂纹源区从中心分成两半，制成金相试样后采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜观察，裂沿与弹簧丝表面约呈 60° 角向心部扩展，裂纹附近未发现大块夹杂物和疏松等缺陷，弹簧表面凹凸不平，有氧化现象，在断口附近还有折叠和小裂纹，扩展方向与断口平行，较深的裂纹深度约 0.12mm。裂纹内有氧化物，形貌见图 2。弹簧夹杂物级别 A0, B0, C0, D0.5, DS0 级，心部夹杂物含量较少，夹杂物形貌见图 3。

经 MIAPS 金相软件分析，弹簧近表面显微组织为索氏体（约 80%）+珠光体（约 20%），未发现脱碳现象，裂纹周围也未发现脱碳现象；弹簧心部显微组织为索氏体（约 80%）+珠光体（约 20%），弹簧表面与心部显微组织相同，弹簧显微组织未发现异常现象^[2]，显微组织形貌见图 4。

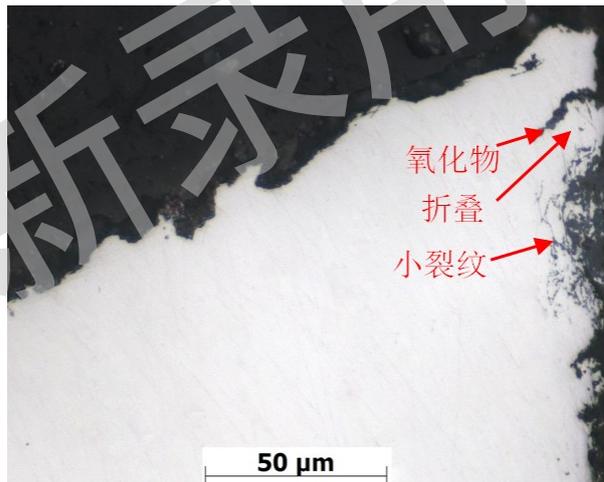
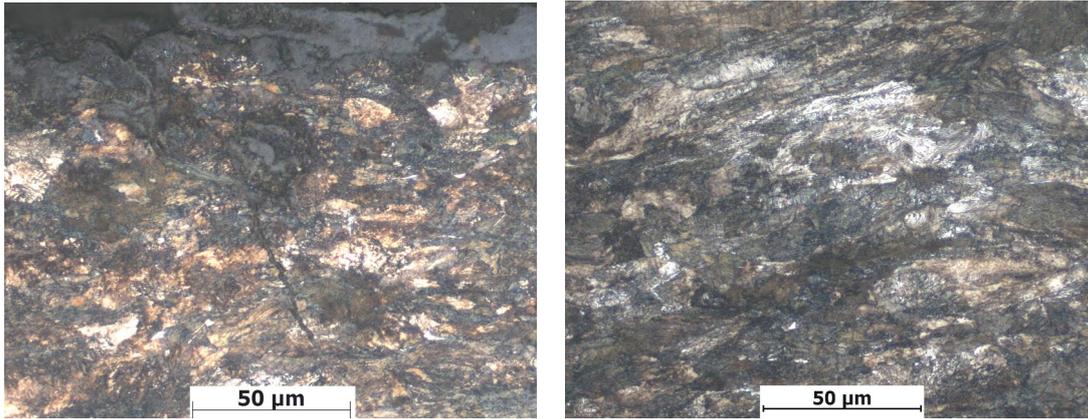


图 2 裂纹源区形貌

Fig.2 Section morphology of the crack source area



(a) 表面 (b) 心部

图4 弹簧显微组织

Fig.1 Microscopic morphology of the spring (a) surface; (b)core

1.5 微观断口观察

断口试样采用 FEI Quanta 650FEG 场发射扫描电子显微镜观察，断口整体形貌见图 5，断口分为 3 个区域，如图中所示。断口 I 区在弹簧丝的边缘，覆盖有黑色物质，形貌见图 6，采用 Genesis X-射线能谱仪对裂纹源区的物质进行能谱检测，主要为铁的氧化物，能谱图见图 7，该区域为裂纹源区。断口 II 区可观察到典型的疲劳辉纹特征，为疲劳扩展区，见图 8。断口 III 区呈韧窝断裂特征，是弹簧的瞬断区，见图 9。通过断口观察可以判定弹簧的断裂为疲劳断裂。

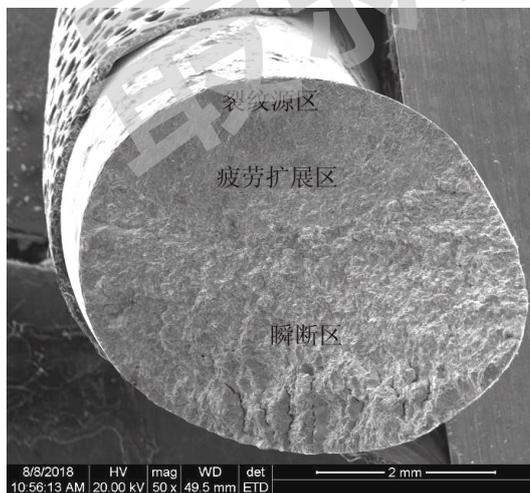


图5 弹簧断口形貌

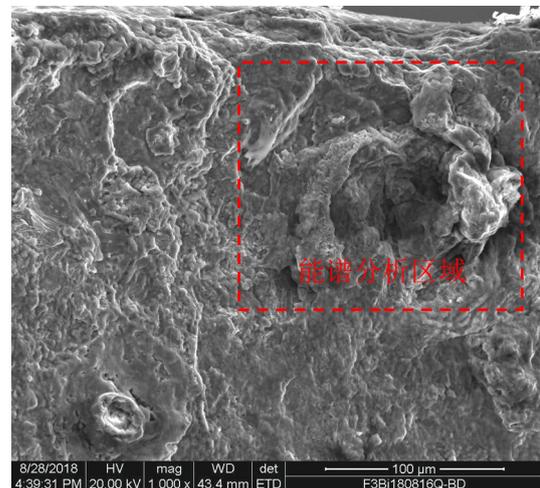


图6 裂纹源区形貌

Fig.5 Macro morphology of the spring fracture Fig.6 Macro morphology of the crack source region

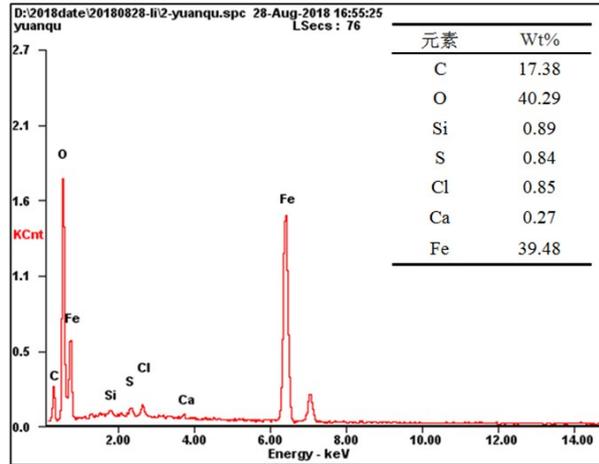


图7 裂纹源区氧化物能谱图

Fig. 7 EDS of inclusions in the spring crack source region

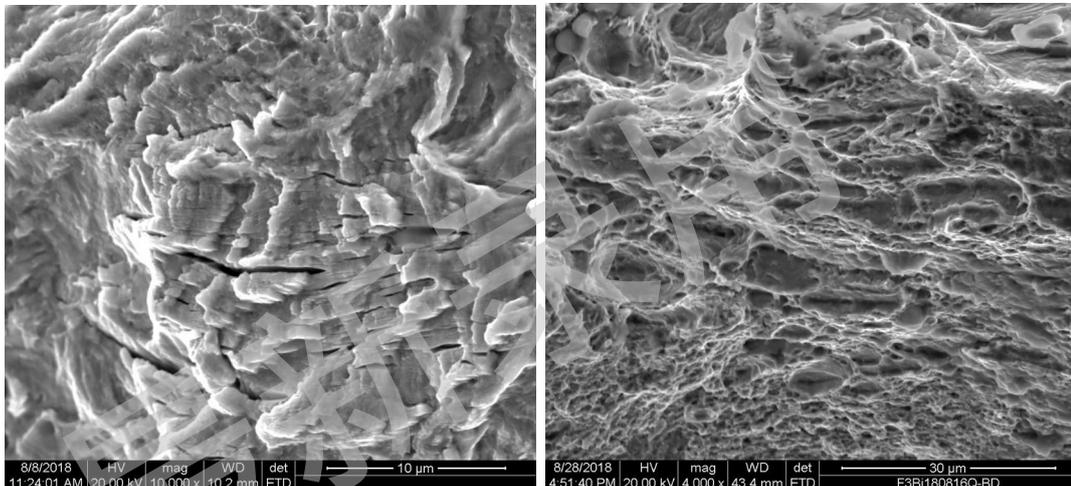


图8 疲劳扩展区的疲劳辉纹 图9 瞬断区的韧窝

Fig. 8 Fatigue striations in propagation zone

Fig. 9 Dimples in the instantaneous fracture zone

2 分析与讨论

弹簧的化学成分和硬度符合标准要求，显微组织正常，夹杂物含量较少，弹簧的材料和热处理符合标准和技术要求。

弹簧的断裂位置位于第一圈，断口与线径呈 45° 角，断口明显分为3个区域，从断口宏观、微观特征形貌观察，断口的第一个区域为裂纹源区，位于弹簧内径的表面，弹簧断裂的裂纹源区不在最大应力位置，因此弹簧的裂纹源区必定存在较大的缺陷。裂纹源区呈黑色，表面覆盖有较致密的铁的氧化物和少量含有硫和氯的腐蚀产物，未发现夹渣、疏松等缺陷，裂纹源区附近显微组织未发现脱碳现象。在断口位置附近还发现有较深的裂纹，同样裂纹内有氧化，氧化物部分有形变特征，无脱碳现象，裂纹内周围

未发现明显的变形现象。由此现象可以推断，弹簧断口的裂纹源区和其它区域的表面缺陷是原材料中表面的氧化物皮未清除干净在后续的拔丝过程中形成折叠，进而在后续加工过程中扩展形成小裂纹。断口第二个区域宏观可见贝纹线特征，微观可观察到典型的疲劳辉纹，此区域为疲劳扩展区。断口的第三个区域较粗糙，呈韧窝型特征，是弹簧的瞬断区^[3-5]。弹簧断口上疲劳源区和扩展区大约占整个断口面积的 1/3，而瞬断区大约占 2/3，瞬断区面积占比较大。弹簧在疲劳裂纹扩展到一定程度时，受到较大外力作用，使裂纹迅速扩展直至断裂^[6]。

综上所述，坯料中表面的氧化皮未清除干净，拔丝时形成折叠进而扩展成小裂纹，产生较大的应力集中，从而在使用过程中以此为疲劳源发生了疲劳裂纹的扩展，当疲劳裂纹扩展到断口面积的 1/3 时，弹簧受到了较大的应力作用，裂纹迅速扩展并最终发生断裂。

3 结论

弹簧的断裂为疲劳断裂，疲劳源区位于弹簧内径弹簧丝的表面。坯料中表面的氧化皮未清除干净，拔丝时形成折叠进而扩展成小裂纹，服役过程以此为疲劳源在交变载荷的作用下产生疲劳裂纹是弹簧发生断裂的主要原因。

参考文献

- [1] 李炯辉,林德成,丁惠麟等.金属材料金相图谱[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 刘金源,李祥龙.65Mn 弹簧钢盘条相变组织分析[J].物理测试,2019,37(1):18-23.
- [3] 杨晓,张明生.8.8 级紧固螺栓断裂原因分析[J].材料开发与应用,2016,31(6):17-21.
- [4] 李明,李金红,马宇等.减振器螺旋弹簧断裂分析[J].金属加工（热加工）,2023,(3):99-102.
- [5] 李莹,侯学勤,陶春虎等.65Mn 钢弹簧的表面缺陷分析[J].金属热处理,2011,36(10):95-97.
- [6] 周斌斌,廖建,彭凯等.65Mn 弹簧疲劳断裂失效分析[J].金属制品,2019,45(5):40-42,47.