

65Mn钢波形弹簧断裂原因分析

高辉, 李增利, 来江波

陕西航空电气有限责任公司 陕西兴平 713100

摘要: 材料牌号为65Mn钢的发电机用波形弹簧在工作中发生断裂。采用宏观观察、电镜能谱检测、化学成分分析、硬度检测和金相组织分析等理化手段对波形弹簧的断裂原因进行分析。结果表明: 该波形弹簧为氢致延迟脆性断裂。电镜能谱检测其断口为脆性断口, 可见鸡爪纹, 基体化学成分符合材料65Mn钢要求, 但硬度为工艺要求的上限值, 导致材料脆性偏大; 镀镉工艺除氢不及时、不彻底, 导致氢扩散到基体, 材料发生氢脆断裂。因此, 建议调整波形弹簧热处理工艺, 使硬度值为技术要求的中下限值, 并控制表面镀镉后的除氢间隔时间并延长除氢时间。

关键词: 波形弹簧; 氢脆; 热处理; 表面镀镉

Fracture analysis on 65Mn steel wave spring

GAO Hui, LI Zengli, LAI Jiangbo

Aviation Industry Shaanxi Aviation Electric Co., Ltd., Xingping 713100, Shaanxi, China

Abstract: Wave - shaped springs for motors, made of 65Mn steel, fractured during operation. Physical and chemical methods such as macroscopic observation, electron microscope energy - spectrum examination, chemical composition analysis, hardness inspection and metallographic structure analysis were used to analyze the fracture causes of the wave - shaped springs. The results show that the wave - shaped springs suffered from hydrogen - induced delayed brittle fracture. The fracture surface examined by electron microscope energy - spectrum is a brittle one, with chicken - claw - like patterns visible. The chemical composition of the matrix meets the requirements of 65Mn steel, but the hardness is at the upper limit of the process requirements, resulting in relatively high brittleness of the material; the hydrogen removal in the cadmium - plating process is not timely and thorough, causing hydrogen to diffuse into the matrix and the material to have hydrogen - embrittlement fracture. Therefore, it is recommended to adjust the heat - treatment process of the wave - shaped springs so that the hardness value is at the middle - lower level of the technical requirements, and to control the hydrogen - removal interval time after surface cadmium - plating and extend the hydrogen - removal time.

Keywords: wave spring; hydrogen embrittlement; heat treatment; surface cadmium plating

1 序言

65Mn弹簧钢具有较高强度、弹性与良好的淬透性等优异的综合力学性能, 广泛应用于机械、交通及航空航天等领域^[1]。波形弹簧在中小型发电

机中得到大量应用, 可调节轴承的预压力和工作游隙, 使轴承能够在最佳润滑和滚动状态下运行, 从而有效抑制发电机运行过程中所产生的振动和噪

第一作者: 高辉, 硕士研究生, 主要从事热处理与表面处理等方面的研究, E-mail: 554566026@qq.com。

声, 延长轴承及发电机的使用寿命^[2, 3]。

在实际生产中, 为了满足弹簧较高的弹性要求, 需保证一定的硬度。然而, 较高的材料硬度会造成其脆性倾向增大, 当工作强度超过材料强度极限时会出现断裂现象。目前, 对弹簧类失效模式的研究比较多, 包括疲劳腐蚀断裂、回火脆断裂、氢脆断裂等^[4-8], 这些断裂模式均与热处理、电镀、酸洗有直接关系。某发电机用波形弹簧工作一段时间后, 出现断裂现象。该波形弹簧的主要加工工序为下料→真空退火→冲孔、弯形→淬火、回火(44~50HRC)→镀镉钝化。

通过对波形弹簧进行宏观观察、化学成分分析、硬度检测和金相组织分析及电镜能谱检测等, 以确定断裂性质, 并查找其产生断裂的直接原因, 为弹簧类零件断裂的研究和预防提供借鉴, 对弹簧产品的质量提升具有重要意义。

2 试验过程与结果

2.1 宏观观察

波形弹簧断裂为 I、II 两部分, 断裂位置如图 1 所示。两处断裂位置均在波谷位置且相互对称, 形成相匹配的两处断口(A-1和A-2)。

将波形弹簧的断口A-1置于Leica MZ75体视显微镜下进行观察, 其断裂部位无明显塑性变形, 断口较平齐, 可见结晶颗粒状银灰色, 断面干净, 无肉眼可见的冶金缺陷, 未见疲劳断口特征。断口宏观形貌如图2所示。

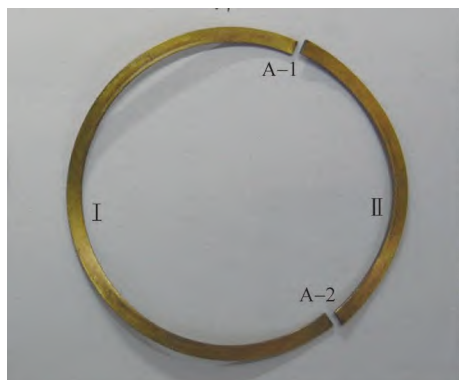


图1 波形弹簧断裂位置

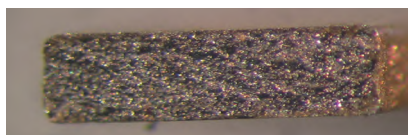


图2 断口宏观形貌

2.2 化学成分分析

用直读光谱仪检测该波形弹簧化学成分, 结果见表1。符合GB/T 1222—2016《弹簧钢》中65Mn钢的要求。

表1 波形弹簧化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Mn
检测值	0.68	0.99
标准值	0.62~0.70	0.90~1.20

2.3 硬度检测

用MH-5显微硬度计对波形弹簧基体硬度进行检测, 结果见表2。断裂件基体硬度HV1.0比较均匀, 将硬度换算成HRC, 基体硬度值均在技术要求44~50HRC的上限值。由于脆性断裂倾向随着材料的硬度提高而增大, 当弹簧工作载荷超过材料的极限强度时, 则会发生脆性断裂, 硬度提高可能为脆性断裂的主要原因之一。

表2 断裂波形弹簧硬度检测结果

取样位置	1	2	3
检测硬度值HV	512.6	521.2	514.5
检测硬度平均值HV	516.1		
换算硬度值HRC	50		
要求硬度值HRC	44~50		

注: 硬度值换算采用GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》规定。

2.4 金相组织检测

从断裂件制取金相试样, 经打磨、抛光、4%硝酸酒精浸蚀后置于500倍Leica DMR金相显微镜下观察(见图3), 基体组织为回火屈氏体, 表面无脱碳、增碳现象, 也未见明显的其他缺陷。

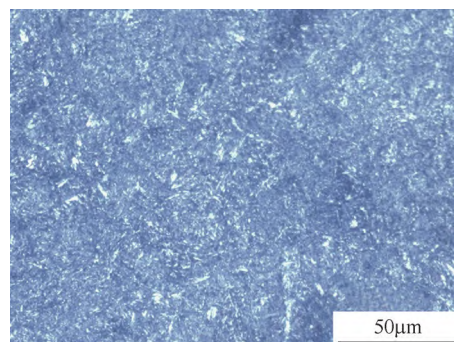


图3 波形弹簧金相组织(500×)

2.5 微观分析

将波形弹簧断口A-1置于丙酮溶液中进行超声波清洗，清洗完成后在VEGA II LMH扫描电镜下观察断口微观形貌（见图4），为沿晶+韧窝混合特征，局部可见晶界二次裂纹，沿晶呈冰糖块状，晶粒轮廓清晰，没有附着物，晶面上有明显的撕裂棱，呈鸡爪痕形貌，属脆性沿晶断口（见图5、图6）。断口整体为典型的氢脆断裂形貌。

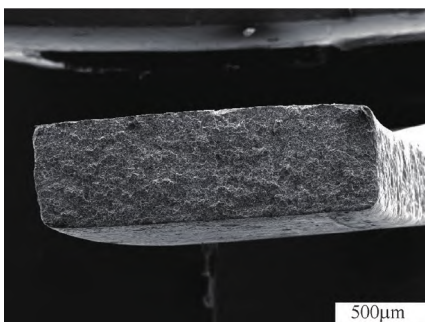


图4 断口微观形貌

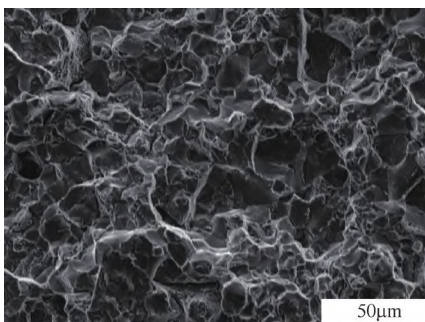


图5 断口沿晶冰糖块状形貌

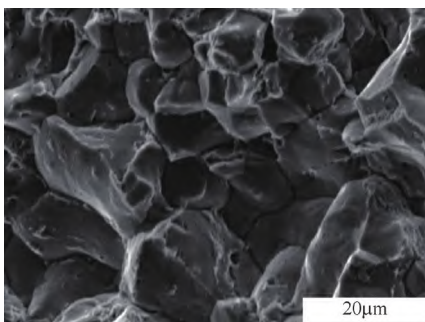


图6 断口鸡爪痕形貌

用INCA Energy 250 X射线能谱仪对波形弹簧断口A-1进行能谱分析，除含有65Mn钢规定的主要元素Fe、C、Mn外，未检测到其他元素，且断口未见腐蚀产物。断口的微观形貌分析结果表明，其微观断裂特征均属脆性断裂，断口处有明显的沿晶+韧窝混合形貌特征。结合能谱分析结果可见，该脆性断裂不是由疲劳或腐蚀引起的。

取出同批次一件检测硬度，基体硬度为519.2HV1.0，将其换算成洛氏硬度，为50.5HRC，与断裂件基体硬度基本相同，均为技术要求的上限值。将该试样打断，断口置于VEGA II LMH扫描电镜下观察，整个断口有轻微宏观塑性变形倾向，微观形貌为沿晶+韧窝混合特征，如图7所示。由此可知，材料基体硬度越高，其脆性断裂倾向越大。

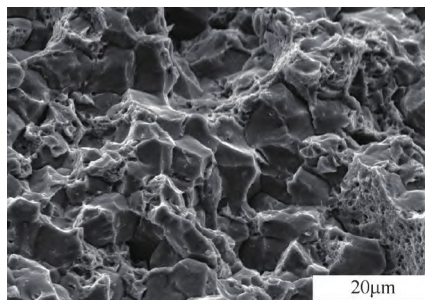


图7 微观断口形貌

2.6 氢含量检测

对断裂波形弹簧进行氢含量检测，波形弹簧中的氢含量为8ppm（1ppm=10⁻⁶），高于材料规定值，可见氢含量较高对氢脆断裂更加敏感。波形弹簧电镀处理后进行除氢处理，除氢不完全或不及时都可能让基体内部的氢原子无法扩散，而是聚集在基体应力集中部位，当受到较大载荷时则会发生断裂。

3 分析与讨论

通过上述分析可见，波形弹簧断口未见冶金缺陷，化学成分符合要求，由此，可排除因材料缺陷而导致的断裂。通过微观观察可知，断口较干净且无腐蚀产物，呈沿晶+韧窝混合特征，可见鸡爪痕，结合能谱分析结果，可断定该脆性断裂不是由疲劳或腐蚀引起的，而是典型的氢脆断裂。

发电机用波形弹簧在工作中承受较大的振动和冲击，对其弹性和硬度的要求也比较高，同时还需要良好的耐冲击性能。该波形弹簧基体硬度为工艺要求的上限值，保证零件的高弹性要求，但在多次交变、冲击等载荷作用下，其断裂脆性倾向增大。为了确保波形弹簧的弹性能够承受较复杂的交变冲击和振动的工作环境，必须对波形弹簧进行特殊的热处理和表面处理。

65Mn钢综合力学性能较好，存在回火脆性。经查阅相关资料可知^[9, 10]，65Mn钢回火脆性区间为300~350℃，在实际热处理过程中，该失效零件回

火温度为260℃，虽然不在回火脆性区间，但并不能排除回火脆性导致的脆性断裂。该材料基体硬度较高，裂纹的应力强度提高，晶界发生弱化，材料脆性沿晶断裂倾向较大。

后续对该失效零件进行镀镉钝化处理，钝化处理前对零件进行酸洗处理，以除去零件表面的氧化物等，镀镉钝化槽液中质量分子较小的氢原子容易扩散到波形弹簧的波峰应力集中部位，氢原子停留在镀层底部，一段时间后，则会扩散到金属内部，主要位置为金属内部缺陷处或应力集中部位，氢原子很难扩散出来。波形弹簧工作一段时间后出现断裂现象，这不仅影响产品的质量，还直接影响其使用寿命^[11, 12]。失效波形弹簧上人为打断的断口宏观形貌有塑性变形，微观形貌为韧窝+沿晶的混合断口，晶面平坦，没有附着物，有明显的撕裂棱，具有氢致延迟脆性断裂的特征，说明该批波形弹簧存在脆性断裂倾向。

综上所述，该失效零件基体硬度较高，零件对氢的敏感性增加，在镀镉钝化处理时，未及时除氢或除氢不彻底，导致较多氢原子渗入了金属内部，扩散、聚集在零件应力集中的位置，在外加载荷等应力作用下，最终导致波形弹簧发生氢致延迟脆性断裂。

4 结束语

1) 波形弹簧断裂性质为氢致延迟脆性断裂。

2) 波形弹簧硬度偏高，脆性倾向较大。建议调整热处理工艺，降低硬度至技术要求的下限值（44~45.5HRC）。

3) 波形弹簧镀镉工艺除氢不及时和不彻底，氢原子扩散诱发断裂。建议控制该零件的除氢间隔时

间（≤2h），延长除氢时间（200℃×24h），降低氢原子的扩散。

参考文献：

- [1] 李宾. 65Mn弹簧钢激光焊接研究[D]. 贵州：贵州大学，2008.
- [2] 曹扬. 波形弹簧力学性能研究及其在电动机中的应用[J]. 机械制造，2018，56（12）：52-55.
- [3] WANG B, LIU D D, DONG Z Q, et al. Controlled rolling and cooling process of spring steel 65Mn[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 713-715: 2624-2626.
- [5] 赵志江，杨宝利. 弹簧的氢脆断裂特征与原因分析[J]. 国防技术基础，2006（8）：41-43.
- [6] 闫敬明，张骏，郑准备. 350MW超临界直流锅炉高旁阀阀杆断裂原因分析[J]. 金属加工（热加工），2023（6）：65-68.
- [7] 林文钦，郑洪，朱丽，等. 50CrVA弹簧断裂原因分析[J]. 失效分析与预防，2016，11（1）：56-59.
- [8] 商红武，安茂忠，杨培霞. 电镀过程中氢脆的产生及其抑制措施[J]. 电镀与涂饰，2008，27（12）：4-7.
- [9] 张长英. 65Mn钢波形弹簧的热处理工艺[J]. 金属热处理，2009，34（2）：95-98.
- [10] 夏恭忱，石玉珍. 中国航空材料手册[M]. 北京：中国标准出版社，1988.
- [11] YING L I, HOU X Q, TAO C H. Surface defect analysis of 65Mn steel spring[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36（10）：95-97.
- [12] 刘春燕，吉卫，李敬民，等. 65Mn钢波形弹簧的热处理工艺研究[J]. 热加工工艺，2016，45（22）：242-244.

MW 20240702

（上接第87页）

164.

- [6] 唐泽浩，张群莉，黄华，等. 42CrMo钢激光-感应复合淬火淬硬层几何特征及组织[J]. 稀有金属材料与工程，2022（7）：51.
- [7] 郑业方，姜影，谢小军，等. 热处理对铬钼钢环形刀榫畸变的影响[J]. 金属热处理，2021，46（3）：113-115.
- [8] 张群莉，李国昌，董浩，等. 42CrMo钢激光-电磁感应复合淬火过程应力与变形研究[J]. 表面技术，

2024（4）：1-16.

- [9] 姜影，杜水明，黄俏梅，等. 淬火工艺对42CrMo钢刀榫淬硬层深度及力学性能的影响[J]. 金属热处理，2023，48（9）：88-91.
- [10] 卢金鹏. 42CrMo钢表面的非稳态氮扩散行为及摩擦学研究[D]. 烟台：烟台大学，2024.
- [11] 何闯，刘德涛，孔德军. 高频淬火加热时间对35CrMo钢的摩擦磨损性能影响[J]. 材料科学与工艺，2024（11）：1-11.

MW 20241101