

50CrVA钢弹簧断裂原因分析

郑媛, 刘荣, 管鹏, 刘磊, 张爽, 廉铁江, 刘国良

中国航发动力股份有限公司 陕西西安 710021

摘要: 航空发动机放气机构的内弹簧在使用过程中发生断裂。通过宏观观察、断口分析、金相检查、氢含量检测及硬度检测等手段, 分析了弹簧断裂的失效模式。结果表明: 弹簧断裂属氢脆断裂, 多次腐蚀工序引入过多氢是导致氢脆的主要原因。

关键词: 弹簧; 氢脆; 镀镉; 多次腐蚀

Fracture failure analysis of 50CrVA steel spring

ZHENG Yuan, LIU Rong, GUAN Peng, LIU Lei, ZHANG Shuang, LIAN Tiejia, LIU Guoliang

AECC Xi'an Aero-Engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract: The spring of the discharge valve mechanism on an aero-engine were failure during servicing. The failure mode of cracks parts were investigated by using macro-observation, fracture analysis, metallographic analysis, hydrogen content, hardness test. The results show that the failure mode of the springs is hydrogen embrittlement fracture. And the main reason of spring fracture is inhale too much hydrogen during cadmium plating process multiple corrosions.

Keywords: spring; hydrogen embrittlement; cadmium plating; multiple corrosions

1 序言

弹簧是一种机械零件, 它利用材料的弹性和结构特点, 在工作时产生变形, 将机械功或动能转变为变形能(位能), 或将变形能(位能)转变为机械功或动能。它是保证各种机器、仪器等正常工作不可或缺的重要零件^[1], 一般经由绕制、热处理、表面处理等工艺过程^[2]。50CrVA 弹簧钢具有淬透性好、不易脱碳、表面质量好等优点, 广泛用于各种机械^[3]。为了防止弹簧基体金属锈蚀, 同时装饰零件外观光泽度, 通常会对弹簧进行表面电镀处理, 但弹簧表面在处理过程中存在吸氢现象, 易发生氢脆开裂失效^[4]。

弹簧装配试车约2h后分解发动机, 发现弹簧断裂。材料牌号为50CrVA, 尺寸: $\phi 2.5\text{mm}$ 钢丝。该零件主要工艺流程: 缠绕→退火→钳加工→淬火→

低温回火→钳加工→定形回火→打磨→检验→钳加工→回火→检验→打磨→全压缩→检验→镀镉→终检。

本文通过宏观观察、断口分析、硬度及氢含量检测等方法, 对弹簧的失效行为进行了研究, 分析了本次发动机弹簧断裂的原因, 并进行了验证试验。

2 试验过程与结果

2.1 宏观观察

经宏观观察, 断裂位于弹簧一端, 有两处断裂。断口颜色均为灰色, 断面较平齐, 断口形貌基本一致。在体视显微镜下观察, 整个断面呈细颗粒状, 断口上可观察到均匀分布的小刻面; 断口未见夹杂、疏松等冶金缺陷。为了便于分析, 将断口分

为断口1、断口2。断裂弹簧宏观形貌如图1所示。

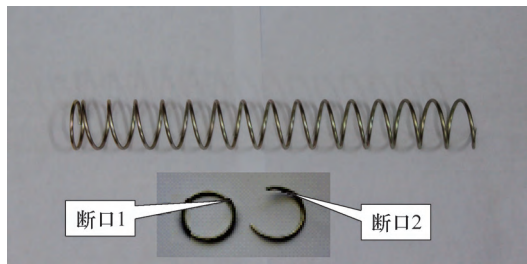


图1 弹簧及断口宏观形貌

2.2 断口观察

将断口1、断口2、人为断口清洗后进行扫描电镜分析。

断口1、断口2形貌相似，低倍形貌如图2、图3所示。断口显微形貌如图4所示。

裂纹由弹簧一侧表面起始，起裂处呈冰糖状的沿晶形貌，沿晶区约占断口的1/3，晶面干净，晶面上可见“鸡爪纹”特征（见图4a），断口未见腐蚀产物，未见夹杂、气孔等材料冶金缺陷；裂纹扩展区域呈较平坦，断口1呈沿晶+韧窝（见图4b）。断口2呈解理+韧窝形貌（见图4c）；最后断裂区低倍形貌与弹簧轴向呈约45°的剪切唇，高倍呈韧窝形貌（见图4d）。

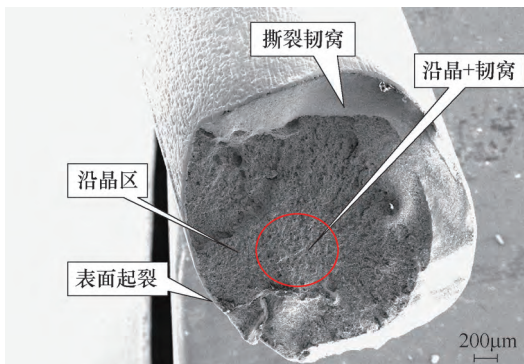


图2 断口1低倍形貌

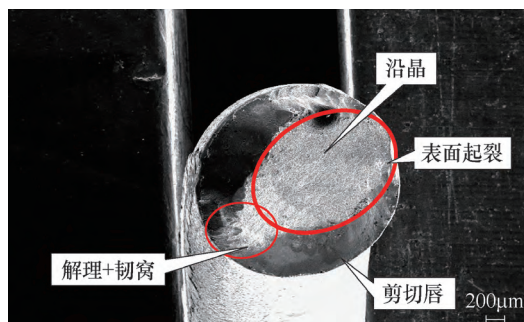
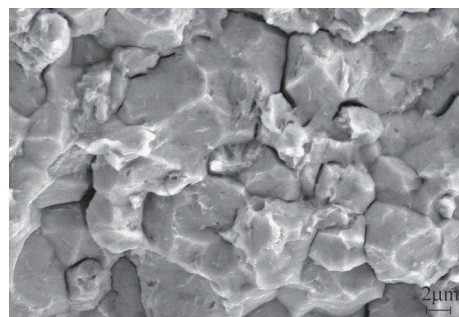
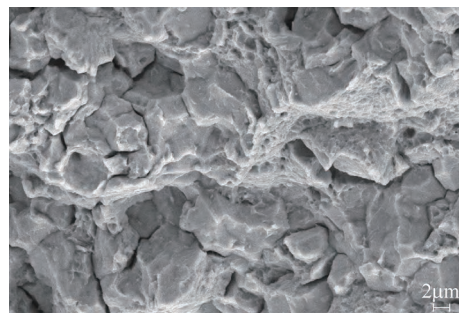


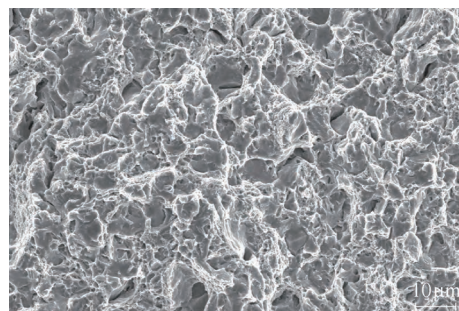
图3 断口2低倍形貌



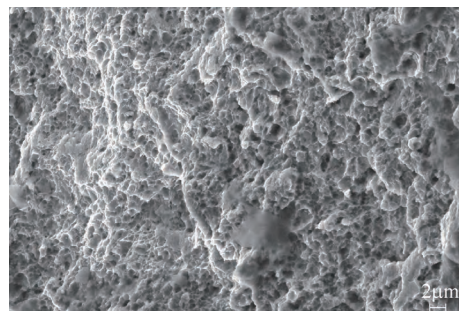
a) 沿晶区鸡爪纹形貌



b) 断口沿晶+韧窝形貌



c) 断口解理+韧窝形貌



d) 断口撕裂韧窝形貌

图4 断口显微形貌

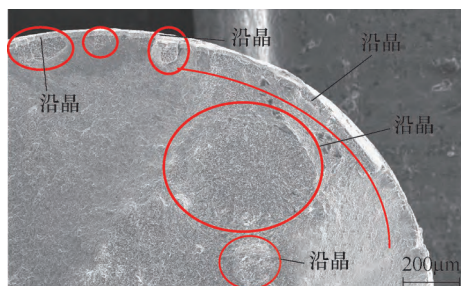
2.3 人为断口

人为打开断口进行观察：人为断口低倍形貌如图5a所示；人为断口大部分呈韧窝+解理形貌，如图5b所示；人为断口约1/10面积呈沿晶形貌，晶面干净，无腐蚀产物，如图5c所示。

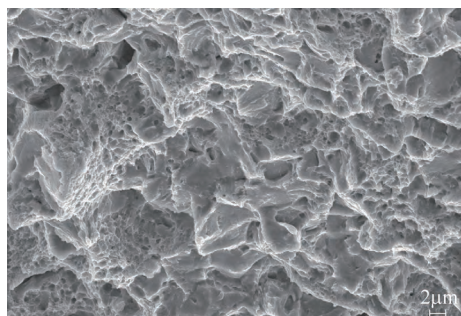
2.4 显微组织观察

在送检弹簧上切取试样，进行显微组织观察，

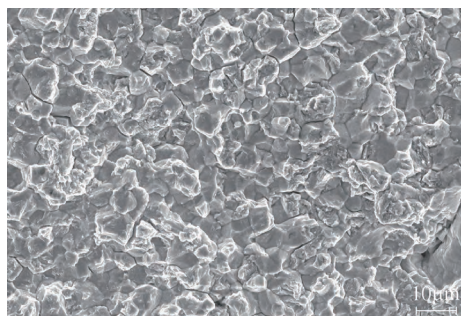
显示显微组织为回火屈氏体，组织均匀，未见异常，如图6所示。



a) 人为断口低倍形貌



b) 人为断口韧窝+解理形貌



c) 人为断口沿晶形貌

图5 人为断口形貌



图6 弹簧显微组织

2.5 硬度检测

在送检弹簧上取样，进行硬度检测（15N），实测值为84.5HR、84.5HR、84.6HR、84.6HR、84.3HR，图样要求值为82.5~86.5HR，测定结果符合图样要求。

2.6 氢含量检测

在送检弹簧上取样，进行基体氢含量检测，检测结果为5.24ppm、5.56ppm（1ppm=10⁻⁶）。

3 模拟验证试验

复查该批内外弹簧加工过程，首次加工中部分零件进行了3次腐蚀，腐蚀过程中零件会吸氢，多次腐蚀会增加基体的氢含量，因此展开弹簧件腐蚀吸氢验证试验。

选取1件电镀工序前的弹簧进行腐蚀吸氢试验，分别从该件上切取试样进行腐蚀处理，装袋标记后送理化室分析试样氢含量。试样状态、数量及检测结果见表1。

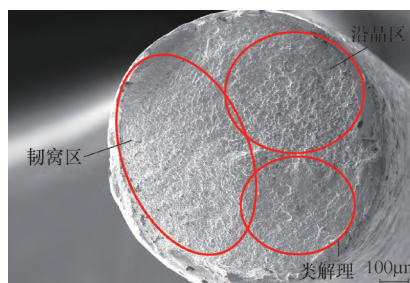
表1 氢含量检测结果

序号	试样状态	试样数量/个	氢含量/ppm			平均氢含量/ppm
1	未腐蚀	3	2.2	1.8	1.5	1.8
2	一次腐蚀	3	2.0	1.0	0.5	1.2
3	三次腐蚀	3	5.1	4.0	3.9	4.3

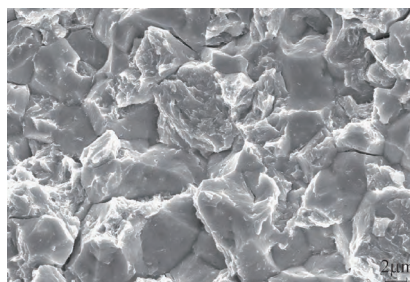
注：1ppm=10⁻⁶。

由表1可见，一次腐蚀后氢含量无明显变化，3次腐蚀后氢含量有明显的上升趋势。

将模拟验证试验的零件人为打开断口，并进行断口观察：断面约1/4区域呈沿晶特征，且晶面存在“鸡爪纹”形貌，与故障件断口形貌相似，如图7所示。



a) 断口低倍形貌



b) 断口沿晶形貌

图7 验证试验零件断口形貌

4 分析与讨论

4.1 断裂性质

根据以上试验结果可知：弹簧断裂断口未见腐蚀形貌，未见材料及冶金缺陷，断口呈沿晶断裂形貌，晶面干净，可见“鸡爪纹”特征，显示出氢致脆性断裂特征。弹簧断裂断口沿晶区约占整个断口面积1/3，其余区域均为过载断裂特征。分析表明，该弹簧断裂系氢脆导致的过载断裂。

4.2 断裂原因分析

氢离子在阴极还原后，一部分形成氢气逸出，另一部分以原子氢的状态渗入基体金属（尤其是高强度金属材料）及镀层中，使基体金属及镀层的韧性下降而变脆，这种现象叫作“氢脆”。氢脆断裂现象的产生是由于零件内部的氢向应力集中的部位扩散、聚集，应力集中部位的金属缺陷多（原子点阵错位、空穴等），氢扩散到这些缺陷处，氢原子变为氢分子，会产生巨大的压力，这个压力与材料内部的残留应力及材料受的外加应力组成一个合力，当这一合力超过材料的屈服强度时，就会导致断裂发生^[5]。

材料强度越高，内部积蓄的应力越大，且有效应力集中因素越多，也越容易发生应力集中现象，氢原子扩散到应力集中部位形成氢分子，氢分子与应力形成合力，就更容易造成脆断。

在镀镉过程中，容易在零件表面产生氢的风险点包括电解除油、酸腐蚀、镀镉、除氢的间隔时间4个工步。对于电解除油工步，当零件作为阴极时，除了零件表面的油污被去除，还伴随着水分子的离解，氢离子的还原析出（ $2H^+ + 2e^- = H_2$ ），规程要求弹簧类零件不允许阴极除油。腐蚀是在酸中进行（ $2HCl + Fe = FeCl_2 + H_2$ ），在零件表面也析出了氢，规程要求腐蚀时间较短。镀镉是将零件作为阴极，除溶液中的镉析出到基体外，也发生了氢原子的析出，其原理与阴极电解除油相同。电解除油、腐蚀、镀镉过程会造成零件表面产生氢原子，并向内部扩散。强度>1390MPa的钢镀镉后如不及时除氢，基体内渗入的氢则较难排出，电镀与除氢时间间隔应尽可能短，规程中要求弹簧类零件在镀后4h内进行除氢。

故障件腐蚀次数过多，零件在酸溶液中停留

的时间延长，增氢明显。弹簧材料为50CrVA合金钢，淬火、回火后使用，1次腐蚀试样氢含量约为1.2ppm、3次腐蚀后试样氢含量约为4.3ppm，氢含量的升高增加了脆性断裂的风险。

综合以上分析结果，表明弹簧断裂为氢脆断裂，系镀镉过程中因多次腐蚀而增加氢含量所致。

5 改进与预防措施

1) 镀镉前加强验收，若发现零件表面存在黑点等现象，则应明确抛修去除要求。

2) 明确腐蚀工步控制要求，按照规程要求仅允许腐蚀一次，并做警示要求。

6 结束语

根据发动机分解检查、机理分析、生产过程复查、验证试验等结果，弹簧断裂故障结论如下。

1) 弹簧断口呈沿晶断裂形貌，晶面干净，可见“鸡爪纹”特征，属氢致脆性断裂特征，区域均为过载断裂特征，该弹簧断裂系氢脆导致的过载断裂。

2) 弹簧属于高强度钢，具有较高的氢脆敏感性，故障件进行了3次腐蚀，造成基体氢含量升高，从而导致氢脆断裂发生。

参考文献：

- [1] 冶金工业部《合金钢钢种手册》编写组. 合金钢钢种手册（第二册）：弹簧钢 易切削钢 滚动轴承钢[M]. 北京：冶金工业出版社，1983.
- [2] 李波，徐伟，陈雷波，等. 50CrVA 钢弹簧断裂分析[J]. 失效分析与预防，2014，9（3）：158-161.
- [3] 姜英禹. 50CrVA 弹簧钢的研制开发[J]. 新疆钢铁，2003（3）：1-4.
- [4] 王大为，胡成江. 扭簧断裂分析[J]. 失效分析与预防，2006，1（3）：57-59.
- [5] 孙智，江利，应鹏展. 失效分析-基础与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2010：128-130.

MW 20240105