太阳能集热器弹簧板断裂原因分析

安洪亮，王雨萱，郝龙宇，马一鸣，靳彤，韩维超
哈尔滨焊接研究院有限公司　黑龙江哈尔滨　150028

摘要：某厂太阳能集热器65Mn钢弹簧板安装期间发生大量断裂失效，为查明失效原因，通过化学成分、金相组织特征分析，力学性能检测，断口形貌观察等方式，结合其制备工艺及安装条件，分析了弹簧板的断裂失效原因。结果表明：65Mn钢弹簧板失效性质为氢脆断裂，原因为在酸洗及电镀工序中，材料表面发生吸氢，以及消氢处理工艺和操作不及时，导致弹簧板中氢含量较高，安装期间相继发生延迟脆断现象。根据弹簧板断裂失效原因，提出了减小酸洗时间、增加电镀速度、及时消氢等建议，为弹簧板的生产工艺改进和工程质量提高提供重要依据和参考。

关键词：弹簧板；酸洗电镀；65Mn钢；氢脆

1　序言

弹簧板作为一种具有减振功能的弹性元件，在机械制造行业应用广泛，例如：火车、汽车等交通工具的悬挂系统和太阳能集热器相关部件等。65Mn钢是一种常用的弹簧钢，成本低廉，性能优良，作为高碳合金钢，具有优良的热处理工艺性[1]。65Mn钢具有较高的弹性极限和屈强比，具有承受大的静载荷、交变应力和冲击载荷的能力。

目前，工业应用中对弹簧钢工件表面要求较高，生产中常用电镀工艺来增加弹簧钢的耐磨性等性能[2]。酸洗和电镀是决定镀层质量的关键步骤，由于酸和电镀液的使用会产生严重的渗氢现象，易使材料发声氢脆[3]，所以电镀后应该及时有效除氢，保证材料的可靠性。

在某工程安装期间，65Mn钢弹簧板在固定安装后1~2天内发生大量断裂，其末端区域弯曲角度约20°，小于设计安全弯曲角度30°。本文通过检验测试结果，结合弹簧板生产及安装现场情况，分析了65Mn钢弹簧板断裂失效原因，并提出了相应的改进措施。

2　试验材料及方法

2.1　试验材料

试验材料为65Mn钢弹簧板，规格为270mm×185mm×2mm，化学成分见表1，符合GB/T 1222—2007《弹簧钢》中对65Mn的化学成分要求。弹簧板的主要制造工序为：淬火（840℃×1h，油淬）→回火（400℃×2~2.5h，空冷）→酸洗+电镀锌→消氢处理，电镀锌流程如图1所示。选用5件弹簧板进行试验分析，编号为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ，其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ发生断裂，Ⅳ、Ⅴ为酸洗+电镀锌前的状态。

表1　弹簧板化学成分（质量分数）　（%）

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Ⅰ实测值	0.64	0.23	1.00	0.0024	0.017	0.060	0.024	0.062
Ⅳ实测值	0.61	0.23	1.00	0.0024	0.018	0.067	0.031	0.058
标准值	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	≤0.25

2.2　试验方法

利用光学显微镜进行金相组织分析、非金属夹杂物的评级；利用扫描电子显微镜观察断口形貌；利用万能拉伸试验机进行拉伸性能试

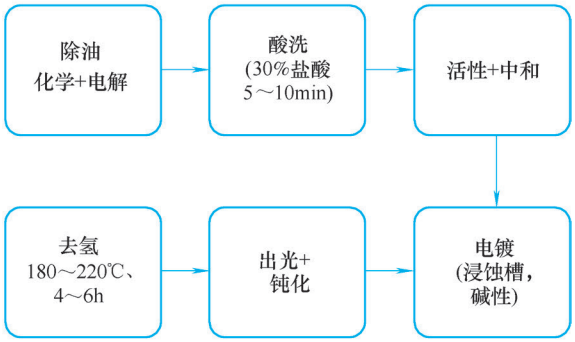


图1　电镀锌工艺主要流程

验；利用洛氏硬度计进行硬度测试；利用摆锤试验机进行夏比缺口冲击试验（非标试样尺寸为2mm × 10mm × 55mm）。

3　试验结果

3.1　氢含量测定

弹簧板中氢含量测定结果如图2所示，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ中氢含量显著高于Ⅳ、Ⅴ（电镀锌前），证明弹簧板在酸洗电镀工序中发生了明显的吸氢现象，并在后续的消氢工序中未有效释放。

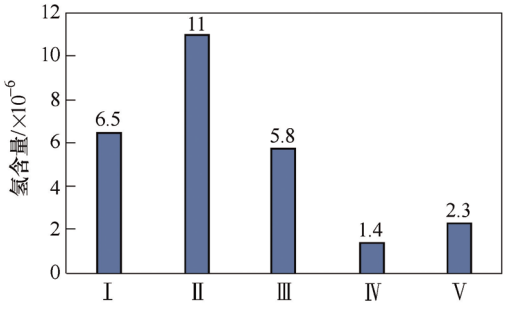
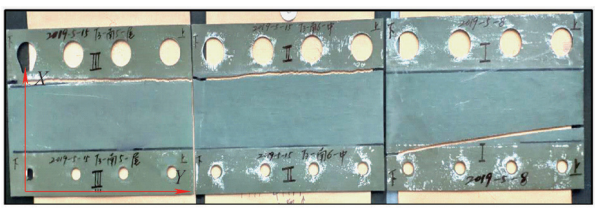


图2　弹簧板中氢含量测试结果

3.2　宏观检验

对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ断裂弹簧板进行宏观检查，宏观形貌如图3所示。Ⅰ弹簧板断裂发生于集热管支架侧夹头附近，呈斜向走势；Ⅱ、Ⅲ弹簧板断裂发生于底座侧，基本沿底座夹头边缘断裂。弹簧板表面呈墨绿色，未见裂纹、折叠等表面缺陷。整板及断口附近区域均未见明显的塑性变形、机械损伤以及腐蚀痕迹，具有瞬间脆断的宏观断裂特征。



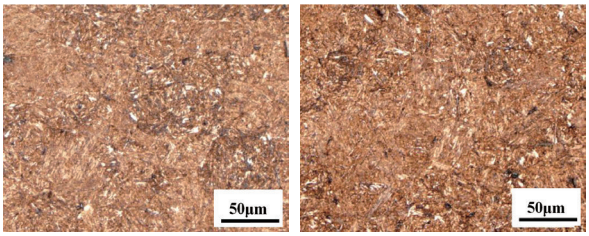
a）Ⅲ弹簧板　　b）Ⅱ弹簧板　　c）Ⅰ弹簧板

图3　弹簧板外观形貌

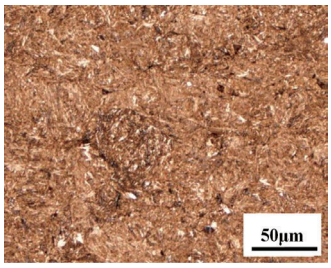
3.3　微观金相检验

按照GB/T 10561—2005对弹簧板进行非金属夹杂物评级：Ⅰ号弹簧板评级结果为A1、D1、DS2.5；Ⅱ号弹簧板结果为A2、D1；Ⅲ号弹簧板结果为A0.5、D1。均符合GB/T 1222—2016要求。

按照GB/T 13298—2015对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ断裂弹簧板进行金相组织检验，如图4所示。金相组织均为中温回火马氏体，属淬火+中温回火状态的正常组织，未见显微裂纹等缺陷。



a）Ⅰ弹簧板金相组织　　b）Ⅱ弹簧板金相组织



c）Ⅲ弹簧板金相组织

图4　弹簧板金相组织形貌（OM）

3.4　力学性能测试

对弹簧板进行拉伸、表面硬度和夏比缺口冲击试验，结果见表2。5件弹簧板的抗拉强度、屈服强度均可满足技术要求，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ强度测试指标明显高于Ⅳ、Ⅴ，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ断后伸长率不符合技术要求，约为Ⅳ、Ⅴ的50%。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ非标试样冲击性能均较低，折算为标准冲击样，冲击吸收能量均<8J，电镀处理后的弹簧板韧性差、脆性大、硬度高，其力学性能特征为氢脆的发生提供了基础条件。

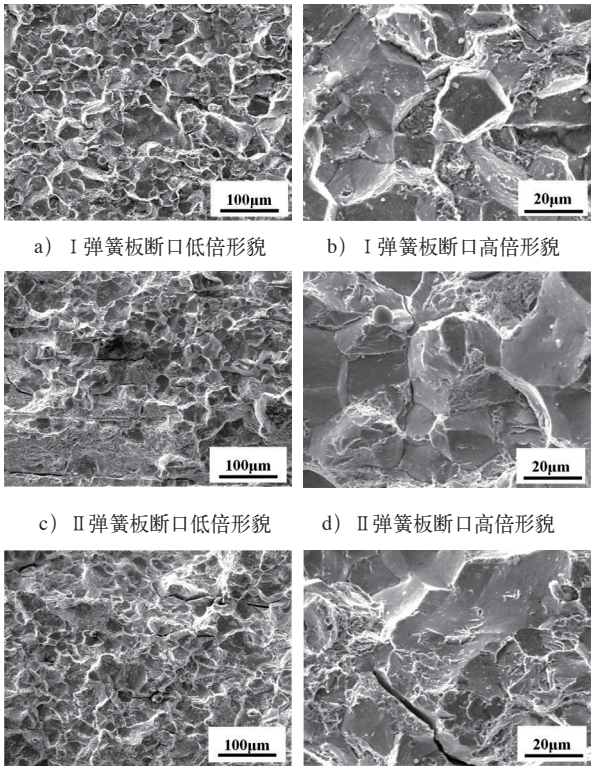
3.5　断口观察和分析

利用扫描电子显微镜，对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ弹簧板断口形貌进行了观察分析。三件弹簧板的断口形貌未见明显差异，断口上未见原始缺陷存在，整体表现

表2　弹簧板力学性能指标测试结果

编号	抗拉强度R_m/MPa	屈服强度R_{eL}/MPa	断后伸长率A（%）	冲击吸收能量KV_2/J	表面硬度HRC
Ⅰ	1525	1350	3.5	1.1	48.5
Ⅱ	1598	1427	4.0	1.3	48.5
Ⅲ	1510	1358	2.5	1.1	48.0
Ⅳ	1430	1281	8.0	21.0	43.0
Ⅴ	1422	1277	8.5	24.0	43.0
技术要求	≥1400	≥1275	≥5	无要求	无要求

为较大脆性，断口上无明显的裂纹扩展路径痕迹，均为沿晶+穿晶的混合型脆性断口形貌，穿晶断口为准解理，沿晶断口呈岩石状，局部可见二次裂纹和“鸡爪纹”特征，为氢脆断裂。断口形貌如图5所示。



a）Ⅰ弹簧板断口低倍形貌　b）Ⅰ弹簧板断口高倍形貌

c）Ⅱ弹簧板断口低倍形貌　d）Ⅱ弹簧板断口高倍形貌

e）Ⅲ弹簧板断口低倍形貌　f）Ⅲ弹簧板断口高倍形貌

图5　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ弹簧板断口形貌（SEM）

4　讨论分析

在常温常压、无腐蚀介质的条件下，65Mn钢弹簧板受力后出现沿晶断口，存在两种可能：一是热处理工艺不当产生回火脆性；二是酸洗电镀+消氢处理工艺不当产生氢脆。三件弹簧板的断裂发生于固定安装后的1~2天，并未发生立即断裂，存在时间上的延迟性，没有明显的塑性变形，符合氢脆的受力断裂特点[4]。

热处理后、电镀锌前的弹簧板能够实现90°弯曲而不发生断裂，而成品弹簧板在安装现场仅弯曲约20°，便相继发生断裂，断裂弹簧板中的氢含量显著高于电镀前弹簧板，证实了电镀过程中的弹簧板吸氢现象，且消氢处理并未完全消除氢的危害隐患。断裂弹簧板强度余量较大、塑韧性储备不足，具有一定的硬脆化特征，为氢脆的发生提供了基础性能条件，因此应优化热处理工艺，以获得合适的强韧匹配。

65Mn弹簧钢属于高强钢，其氢脆敏感度相对较高，在酸洗和电镀过程中，金属表面极易吸附氢，小直径氢原子渗入并滞留在钢中[5]，电镀锌层对氢原子外逸起到一定的阻碍[6]，氢原子将逐渐从工件表面向内部扩散，在缺陷密度较高的晶界位置聚集[7]，氢原子合成变为氢分子，产生巨大内应力，在外加拉伸或弯曲载荷作用下，致使材料氢脆断裂。因此可见，合理的酸洗电镀和消氢热处理是降低氢脆风险的重要途径。

5　结论与建议

1）三件断裂弹簧板的化学成分和非金属夹杂物检测结果符合GB/T 1222—2007的要求，金相组织类型与热处理工艺基本吻合。力学性能检验结果显示，弹簧板的抗拉强度、屈服强度均可满足技术要求，但断后伸长率显著低于技术要求。电镀处理后的弹簧板韧性较差、脆性较大、硬度较高，易于发生氢脆。

2）三件弹簧板的断裂性质均为氢脆。酸洗、电镀等工序致使钢件吸收了过量氢，电镀锌层阻止氢向外扩散以及消氢处理工艺不当或不及时致使材料吸氢脆化，在非过载安装的外力作用下，弹簧板相继发生延时性氢脆断裂。

GH4169合金叶片叶身表面白条纹分析

汤浩，李永斌，张新强，陈犇，刘依依
中国航发贵州黎阳航空动力有限公司　贵州贵阳　550000

摘要：某批GH4169合金转子叶片，在腐蚀检查工序时发现叶身表面存在白条纹。经试验分析，叶身表面的白条纹是沿锻造流线分布的粗晶带。GH4169合金中δ相主要通过晶界的胞状反应，在晶界及孪晶界上非均匀析出，而δ相钉扎晶界会抑制晶粒长大。Nb元素偏析会引起GH4169合金δ相分布不均，最终将影响其晶粒的大小及分布状态。

关键词：GH4169合金；粗晶；δ相；Nb偏析

1　序言

GH4169合金（相当于Inconel 718)是一种沉淀强化型Ni-Fe基高温合金，以γ奥氏体为基体，BCC结构的亚稳相γ″为主要强化相，正交晶系的δ相为稳定相。由于其在－253~650℃时具有优良的耐腐蚀、抗疲劳性能，以及良好的塑性、焊接性能，因此广泛用于航天转动部件[1，2]。某型机压气机转子叶片即为GH4169合金制造。该类叶片经腐蚀检查工序时，发现多批叶片叶身表面存在白条纹，为此我们系统地研究了叶片叶身表面白条纹形成的原因，并分析了白条纹对叶片疲劳寿命的影响。

2　检测

2.1　宏观及显微镜检查

该叶片叶身表面的白条纹均沿叶身纵向呈线性分布，与灰褐色基体分界明显。在三维视频显微镜下将白条纹放大观察，白条纹区域晶粒相对基体较

基金项目：中国航发自主创新项目（ZZCX-2020-025），面向智能制造的航空发动机零部件数字化检测技术研究-压气机叶片外观缺陷数字化检测技术研究。

3）建议采取减小酸洗时间、增加电镀速度等措施改进电镀工艺；批量生产时，应做抽样检验，电镀前进行拉伸和表面硬度检验、电镀+消氢处理后进行弯曲检验，有效评价和控制批量产品的质量。另外，应特别注意电镀工艺和消氢工艺的适用性，以及对工序衔接间隔时间的控制。

参考文献：

[1] 刘其斌，李宾.65Mn弹簧钢的激光焊接组织及性能[J].焊接学报，2009，30（9）：105-108.
[2] 杨建桥，梁博.弹簧钢表面Cr-SiC复合电镀工艺及镀层性能[J].腐蚀与防护，2008，29（3）：147-148.
[3] 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，2008，12（5）：4-7.
[4] 郭春秋.65Mn钢弹簧垫圈开裂原因分析[J].理化检验（物理分册），2010，46（11）：719-722.
[5] KITTEL J，SMANIO V，FREGONESE M，et al. Hydrogen induced cracking（HIC）testing of low alloy steel in sour environment：Impact of time of exposure on the extent of damage[J].Corrosion Science，2010，52（4）：1386-1392.
[6] BOIADJIEVA T，MIRKOVA L，KRONBERGER H，et al.Hydrogen permeation through steel electroplated with Zn or Zn-Cr coatings[J].Electrochimica Acta，2013，114：790-798.
[7] GOMMLICH T.Atomic hydrogen from electroplating of high strength steels-how much is trapped in the coating[C].NACE International Corrosion Conference Proceedings，2016：1-10.

MW 20210814