

汽车用钢板弹簧失效分析

张艳霞¹, 王长朋^{1,2}, 高立强³, 王茂川^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039;
3.陆军装备部驻重庆地区第六军代室, 重庆 400042)

摘要: **目的** 研究汽车用钢板弹簧断裂失效原因。**方法** 通过宏观分析、金相检验、力学性能分析、材质分析、断口电镜扫描及能谱分析等测试手段, 对汽车用钢板弹簧的断裂失效原因进行分析。**结果** 汽车用钢板弹簧的失效模式为疲劳裂纹源于表面腐蚀坑处的高周腐蚀疲劳断裂。首先, 板簧表面存在异常磨损, 导致防护漆层局部脱落, 裸露的金属基体在腐蚀环境下出现表面腐蚀坑, 外界拉应力作用及腐蚀坑底部应力集中叠加导致早期疲劳裂纹在腐蚀坑底部萌生并扩展。其次, 板簧表面存在脱碳现象, 导致板簧表面硬度及强度降低, 表面耐腐蚀性能下降, 为早期疲劳裂纹的萌生创造了条件。**结论** 控制热处理质量, 避免表面脱碳; 做好定期维护保养, 在簧片间加石墨润滑剂, 防止长时间干磨或挤压碰撞导致漆层早期脱落; 及时清理附着的泥水, 减小腐蚀几率; 对存在隐患的在用板簧及时更换。

关键词: 钢板弹簧; 失效分析; 腐蚀; 疲劳断裂

中图分类号: TH172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)11-0129-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.018

Failure Analysis on Fracture of Automobile Leaf Spring

ZHANG Yan-xia¹, WANG Chang-peng^{1,2}, GAO Li-qiang³, WANG Mao-chuan^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China; 3. 6th Military Agency Office of Army Armament Department, Chongqing, P.R.China, Chongqing 400042, China)

ABSTRACT: This paper aims to investigate the fracture failure reasons of leaf spring for automobile. The fracture causes of automobile leaf spring were analysed by means of macroscopic analysis, metallographic examination, mechanical performance analysis, materials analysis, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. The results showed that the failure mode of the leaf springs for automobiles is fatigue cracking originating from high circumferential corrosion fatigue fracture at surface corrosion pits. First of all, the abnormal wear on the surface of the leaf spring lead to the partial peeling of the protective paint layer, the exposed metal substrate produced surface corrosion pits in the corrosive environment, the stress superposition of the external tensile stress and the stress at the bottom of the corrosion pit resulted in early fatigue cracks initiated at the bottom of the corrosion pits. Secondly, there is decarburization on the surface of the plate spring, which leads to the reduction of the surface hardness and strength of the plate spring and the reduction of the surface corrosion resistance, creating the conditions for the sprouting of early fatigue cracks. The conclusions are as follows: The quality of heat treatment can be controlled to avoid

收稿日期: 2021-03-15; 修订日期: 2021-05-12

Received: 2021-03-15; Revised: 2021-05-12

作者简介: 张艳霞(1985—), 女, 工程师, 主要研究方向为材料环境腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Yan-xia (1985—), Female, Engineer, Research focus: corrosion and protection of material environment.

引文格式: 张艳霞, 王长朋, 高立强, 等. 汽车用钢板弹簧失效分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 129-136.

ZHANG Yan-xia, WANG Chang-peng, GAO Li-qing, et al. Failure analysis on fracture of automobile leaf spring[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 129-136.

surface decarburization; regular maintenance should be carried out, and graphite lubricant should be added between the reeds to prevent the paint layer from falling off early due to long-term dry grinding or extrusion collision; The attached mud and water should be cleaned in time to reduce the corrosion probability; The leaf spring in use with hidden dangers should be replaced in time.

KEY WORDS: leaf spring; failure analysis; corrosion; fatigue fracture

汽车钢板弹簧是一种常见的弹性元件,广泛应用于汽车悬架。钢板弹簧是由许多具有弹性、宽度一致、长短不一的钢片组成的弹性梁。钢板弹簧的中部通过U型螺栓(又称骑马螺栓)固定在车桥上,其作用是通过悬挂的方式连接车架和车桥。钢板弹簧裸露在车架与车桥之间,承受车轮对车架的冲击、弯曲和振动载荷,通过吸收车辆动能,将动能转化为弹性势能,从而起到缓冲作用,保证车辆的平稳性和安全性^[1-3]。疲劳断裂是钢板弹簧的主要断裂形式,其疲劳性能主要取决于材料本身的强度、表面质量及内部缺陷,其失效断裂模式主要有弯曲疲劳、接触疲劳、腐蚀疲劳、过载断裂等^[4-6]。

某汽车用钢板弹簧在路试过程中行使4.8万千米后发生断裂。钢板弹簧选用材料为60Si2Mn,热处理工艺为:850℃保温45 min,油淬30 s后450℃回火,回火时间为70~90 min,水冷。60Si2Mn钢是一种弹簧专用钢,属中碳合金钢,热处理工艺操作简单,淬火后组织为板条马氏体与片状马氏体的混合组织,回火后得到回火屈氏体组织,具有高的屈服强度和疲劳极限,是我国应用最普遍的合金弹簧钢之一。其适用于铁道车辆、汽车工业上承受较大负荷的扁形弹簧或螺旋弹簧;也适用于制作工作温度在250℃以下、非腐蚀介质中的耐热弹簧;还适用于在高应力下交变负荷工作的大型和重要的卷制弹簧及汽车减震系统等。文中对断裂失效后的钢板弹簧进行分析,找出其失效断裂的原因,并提出相应的改进措施。

1 试验内容

1) 洛氏硬度测试。所用设备为HR-150A型洛氏硬度计,参照标准为GB/T 230.1—2018《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法》。

2) 化学分析测试。所用设备为KDC-5B型碳硫仪和ICP分析仪,参照标准为GB/T 20123—2006《钢铁总碳硫含量的测定高频感应炉燃烧后红外吸收法(常规方法)》和GB/T 20125—2006《低合金钢多元素含量的测定电感耦合等离子体原子发射光谱法》。

3) 显微组织分析及非金属夹杂物评定。所用设备为Observer.A1m型显微镜,参照标准为GB/T 1222—2016《弹簧钢》和GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》。

4) 断口形貌及能谱分析。所用设备为Quanta 200型环境扫描电镜及INCA OXFORD能谱仪,对断口形貌及微区成分进行分析。

5) 拉伸性能测试。所用设备为MTS电液伺服材料试验系统,参照标准为GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》。

2 试验结果

2.1 宏观分析

钢板弹簧裂纹起始面及断裂面的宏观形貌如图1所示。靠近断口外表面的防护漆层完全剥落,表面锈蚀严重,呈黑褐色,表面存在较多平行于断面的微裂纹,其中,有些位置的微裂纹较密集。断口锈蚀严重,呈黑褐色,多源起裂,存在较多裂纹扩展形成的疲劳台阶纹,疲劳扩展区约占断面的80%,快速断裂区占20%。

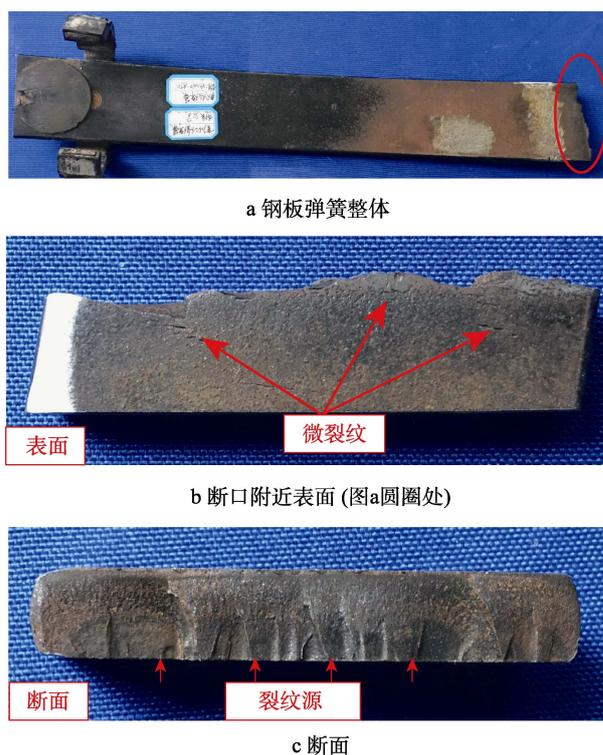


图1 样品及断口宏观形貌

Fig.1 Macro-appearance of fracture sample: a) overall of leaf spring (the circle in figure a); b) surface near the fracture; c) fracture

2.2 材质分析

将样品表面的腐蚀产物层打磨后,钻取铁屑对基体材质进行分析。检测结果可知,基体的化学成分符合GB/T 1222—2016《弹簧钢》的要求,结果见表1。

表 1 化学成分分析结果
Tab.1 Chemical composition test results

元素	质量分数/%				
	C	S	Si	Mn	P
标准要求值	0.56~0.64	≤0.020	1.50~2.00	0.70~1.00	≤0.025
实测值	0.56	0.0042	1.89	0.90	0.014

2.3 力学性能分析

根据 GB/T 228.1—2010 要求，从基体中取标准拉伸试样进行拉伸试验，拉伸试样分别标记为拉伸件 1#、拉伸件 2#、拉伸件 3#。由表 2 的检测结果可知，试样的拉伸性能满足 GB/T 1222—2016《弹簧钢》的要求。

表 2 拉伸试验检测结果
Tab.2 Mechanical performance testing results

样品编号	抗拉强度/MPa	规定塑性延伸强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
拉伸件 1#	1623	1410	7.4	23.6
拉伸件 2#	1602	1420	7.0	25.1
拉伸件 3#	≥1570	≥1375	≥5	≥20

从基体中取标准硬度试样进行洛氏硬度测试，硬度试样分别标记为硬度样 1#、硬度样 2#，每件硬度样测试三个硬度点。由表 3 的测试结果可知，试样硬度值满足产品的技术要求。

表 3 硬度测试结果
Tab.3 Hardness test results

样品编号	硬度(HRC)		
硬度样 1#	40.6	41.3	40.5
硬度样 2#	41.2	42.0	41.5
技术要求值	39~44		

2.4 断口分析

断口形貌记录了金属断裂的全过程，包括裂纹萌生、扩展直至断裂过程中的各种信息。裂纹源形貌如图 2 所示，断口裂纹存在多点起裂，裂纹源处有多个台阶纹，说明存在应力集中。裂纹源处存在表面圆滑的腐蚀坑缺陷，疲劳裂纹在腐蚀坑底部萌生并扩展，导致裂纹源处腐蚀严重，表面被腐蚀产物层覆盖。疲劳裂纹扩展区如图 3 所示，为准解理特征，疲劳裂纹扩展区占断面面积 80%以上，为高周疲劳开裂。瞬断

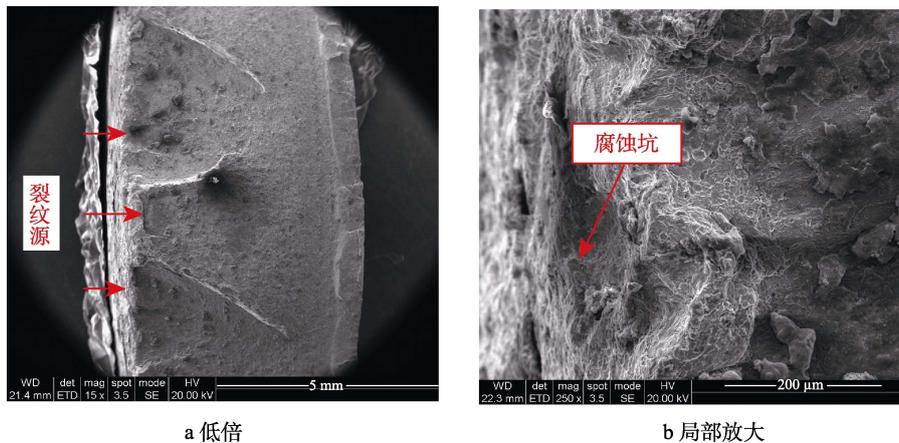


图 2 样品断口裂纹源微观形貌

Fig.2 Fracture micro topography of crack source area: a) low magnification; b) partially enlarged

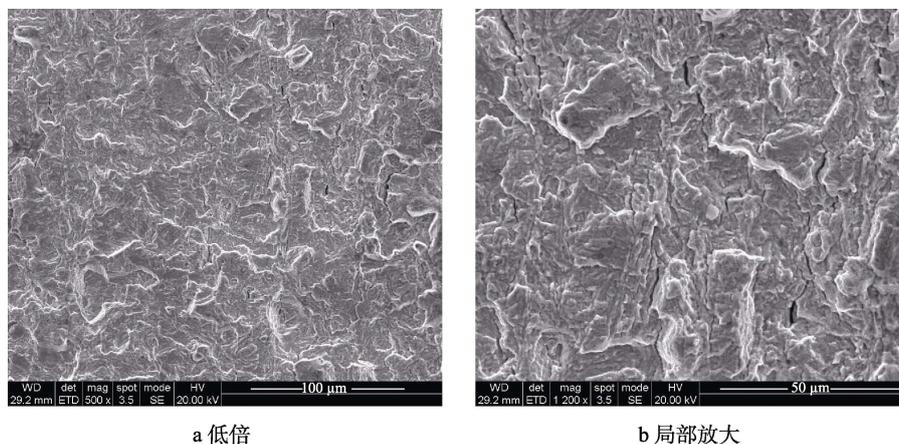


图 3 样品断口疲劳裂纹扩展区微观形貌

Fig.3 Fracture micro topography of fatigue crack expansion area: a) low magnification; b) partially enlarged

区如图4所示,为韧窝和撕裂的韧性断裂。断口外表面形貌如图5所示,表面被厚厚的腐蚀产物层覆盖,

局部存在腐蚀坑及微裂纹,微裂纹纵深扩展,裂纹开口处存在明显的基体腐蚀剥落现象。

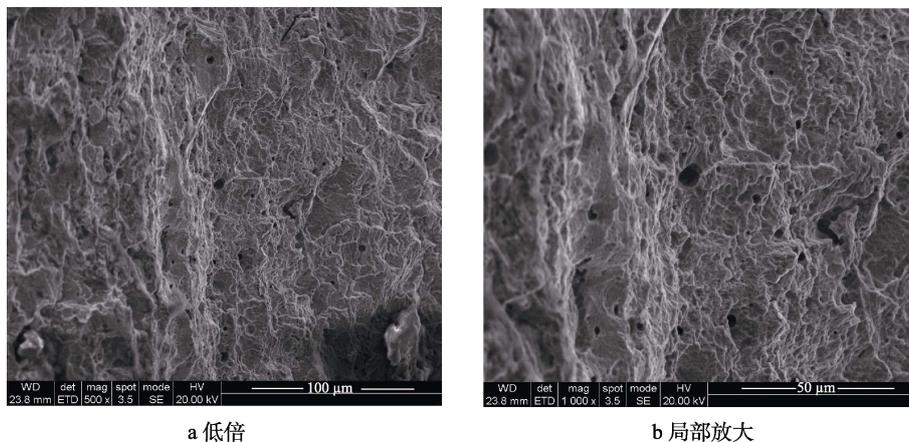


图4 样品断口瞬断区微观形貌

Fig.4 Fracture micro topography of instantaneous fracture area: a) low magnification; b) partially enlarged

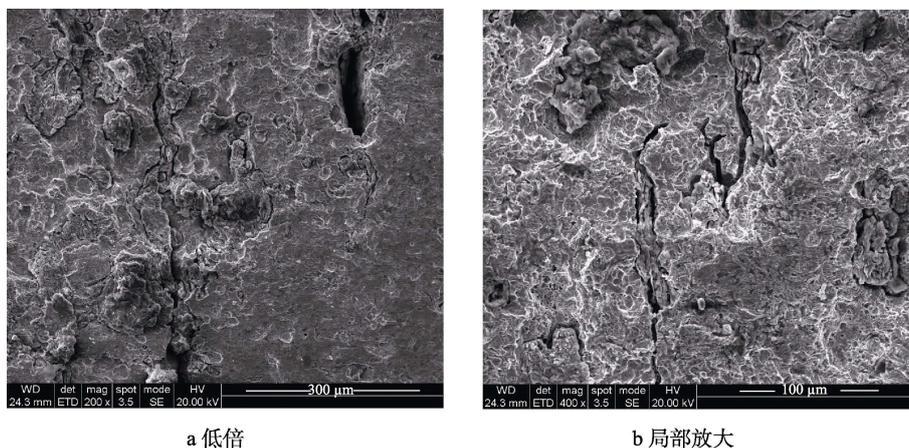


图5 样品断口外表面微裂纹形貌

Fig.5 Micro-crack morphology on the outer surface of sample fracture: a) low magnification; b) partially enlarged

2.5 非金属夹杂物评定

基体中非金属夹杂物是炼钢过程中,少量炉渣、耐火材料及冶炼反应物进入钢液中形成的,非金属夹杂物的存在一定程度破坏了材料的连续性和完整性,是有害物质。根据非金属夹杂物的不同形状及颜色差异,分为A类(硫化物类)、B类(氧化铝类)、C类(硅酸盐类)、D类(球状氧化物类)、Ds类(单颗粒球状类);根据不同种类非金属夹杂物的宽度,分为细系、粗系。非金属夹杂物评定级别为0~3级,级别控制越低,说明材料中非金属夹杂物控制越好。对非金属夹杂物进行评定,取样位置符合GB/T 10561—2005,检测结果见表4。由表4可知,钢板弹簧中非金属夹杂物的含量符合60Si2Mn材料的技术要求。

2.6 金相分析

对垂直表面微裂纹取样进行观察。如图6所示,在2个位置存在深浅不一的腐蚀坑。腐蚀坑表面粗

糙,存在腐蚀产物层,深度约为180 μm;内壁凹凸不平,腐蚀坑内填充灰色腐蚀产物;靠近壁部的腐蚀产物相对致密;在外层的腐蚀产物相对疏松,呈层片状并存在脱离剥落现象。在腐蚀坑底部,裂纹萌生并向纵深扩展,裂纹开口宽、尾部窄,裂纹内部填充灰色致密腐蚀产物,表明裂纹在扩展过程中两侧基体同步发生腐蚀。

表4 非金属夹杂物评定结果
Tab.4 Non-metallic inclusion test results

非金属夹杂物类型	检测结果	夹杂物技术要求	
		细系	粗系
A类(硫化物)	细系, 0.5级	2.0级	1.5级
B类(氧化铝)	细系, 0.5级	2.0级	1.5级
C类(硅酸盐)	细系, 0.5级	1.5级	1.0级
D类(球状氧化物)	细系, 1.0级	1.5级	1.0级
DS类(球状氧化物)	细系, 1.0级	2.0级	2.0级

在裂纹源处取样并进行观察。结果如图 7 所示，裂纹源附近表面存在类似图 6 中的腐蚀坑，在腐蚀坑底部存在腐蚀裂纹，裂纹长度约为 1.3 mm，裂纹扩展方向平行于断口方向。

图 8、图 9 显示了样品经 4%硝酸酒精溶液侵蚀后的金相组织形貌。可以看到，基体表面存在半脱

碳现象，腐蚀坑处存在部分基体腐蚀剥落，表现为轻微脱碳。裂纹两侧未发现脱碳现象，说明裂纹为后期出现，裂纹无沿晶或分叉现象，排除淬火裂纹可能，其腐蚀形态如图 7 所示。样品基体的金相组织为：回火托氏体+少量铁素体，是弹簧钢中温回火后的正常组织。

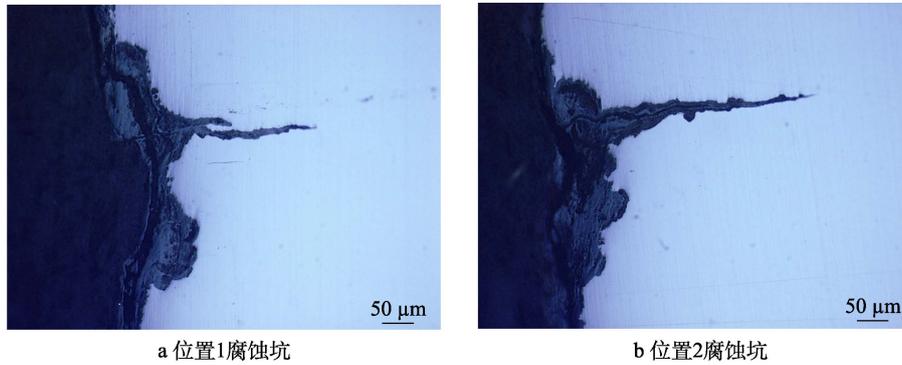


图 6 表面微裂纹处腐蚀形态

Fig.6 Corrosion form at surface microcracks: a) corrosion pit at location 1; b) corrosion pit at location 2

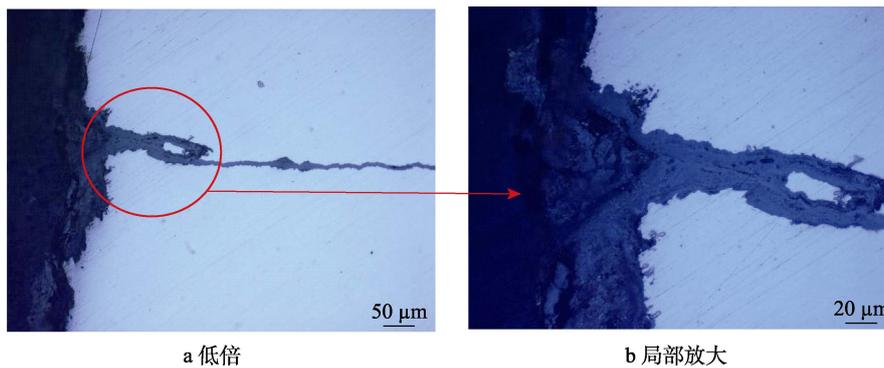


图 7 裂纹源处腐蚀形态

Fig.7 Corrosion form at crack source: a) low magnification; b) partially enlarged

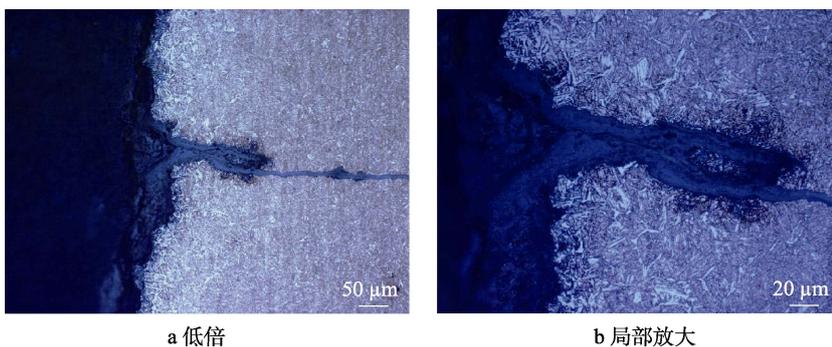


图 8 裂纹源处金相组织

Fig.8 Metallographic structure of crack source: a) low magnification; b) partially enlarged

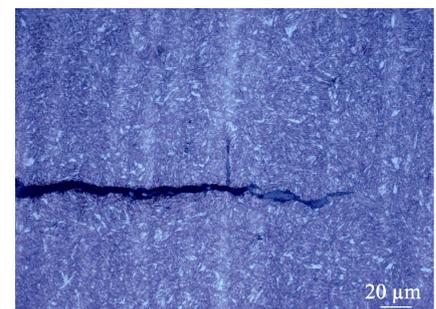


图 9 基体金相组织

Fig.9 Metallographic structure of matrix

2.7 能谱分析

对板簧表面的腐蚀坑进行能谱分析（如图 10、图 11 所示），腐蚀产物成分主要为 O、Fe、Si、Ca 等元素，说明腐蚀产物主要为铁的氧化物，无 S、Cl 等高活性元素。

3 分析与讨论

构件在波动应变或交变载荷作用下，构件表面应力集中处组织结构容易产生不均匀滑移，形成早期疲劳裂纹^[7-9]。材料的疲劳寿命取决于疲劳裂纹萌生之

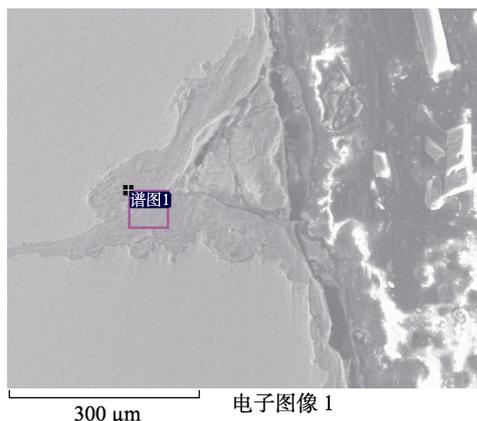


图10 腐蚀产物成分能谱分析图片

Fig.10 Energy spectrum analysis picture of corrosion product composition

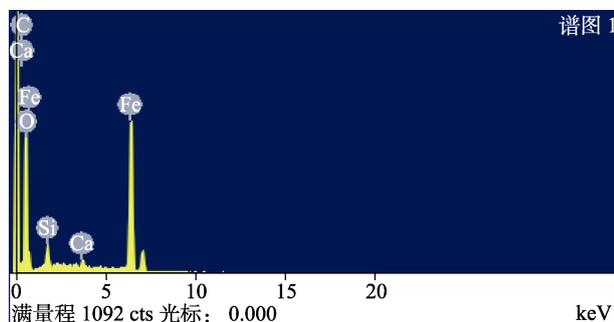


图11 腐蚀产物成分能谱分析谱图

Fig.11 Energy spectrum analysis spectrogram of corrosion product components

前的使用周期,而零件表面的应力集中点或者表面缺陷(表面凹坑、表面机加刀痕、表面划伤、表面折叠裂纹等)是疲劳裂纹萌生的最大诱因,尤其是对于高强度材料,表面缺陷更容易诱发早期疲劳裂纹的萌生^[10-12]。疲劳断裂分为三个阶段,一是微观裂纹阶段,即早期疲劳裂纹萌生阶段;二是宏观疲劳裂纹扩展阶段;三是瞬时断裂阶段。其中,微观裂纹阶段是疲劳断裂最重要的环节。影响疲劳裂纹萌生的主要因素有材料本身特性和零件使用工况^[13-15]。

上文对失效后的钢板弹簧进行了一系列分析,材料本身的特性分析表明,材料成分符合60Si2Mn标准要求,基体的金相组织为弹簧钢正常回火组织,材料力学性能满足标准要求,表面存在半脱碳现象。零件工况分析表明,零件长期暴露在恶劣的路试环境下工作,表面容易吸附外界泥水及环境中的腐蚀性介质。同时在板簧工作过程中,簧片间产生不同方向的运动摩擦,造成簧片间的温度升高。在摩擦和高温的共同作用下,局部接触面的防护漆层剥落。在腐蚀介质的作用下,局部表面产生腐蚀现象,表面出现腐蚀坑及腐蚀微裂纹。因此,腐蚀的前提是簧片间的相互摩擦导致表面漆层脱落。表面出现腐蚀坑及腐蚀裂纹后,形成早期疲劳源,在受到的外力超过材料在疲劳源处的疲劳极限后,疲劳裂纹在疲劳源处萌生,并

发生高周疲劳断裂。综合以上分析可知,本次断裂失效与两个因素都相关,最主要原因是簧片的异常摩擦为后期腐蚀提供了条件,另外表面存在半脱碳现象,表面脱碳层的硬度及强度达不到规定要求,导致表面疲劳抗力及耐腐蚀性能降低^[16-18]。

本失效板簧片断裂位置表面布满黑褐色腐蚀产物层,此区域漆层完脱落,基体裸露在外,说明簧片在运行过程中摩擦严重。裸露的基体在恶劣环境下,表面容易吸附泥浆或者水膜,尤其是上表面吸附的泥浆或水膜不容易掉落,在潮湿环境下形成腐蚀原电池,先发生表面点蚀,进而形成均匀腐蚀现象。表面点蚀坑出现后,在点蚀坑底部导致应力集中效应,同时板簧在工作过程中受弯曲应力,下表面受拉应力,当点蚀坑底部的拉应力超过材料的疲劳极限后,疲劳微裂纹在此处萌生。因此,早期微裂纹是表面拉应力和点蚀坑底部应力叠加的结果^[19]。

板簧片间的磨损是腐蚀发生的前提条件,而腐蚀环境中存在腐蚀介质是发生电化学腐蚀的必要条件。根据腐蚀产物能谱分析结果可知,腐蚀产物成分主要为O、Fe、Si、Ca等元素,腐蚀产物主要为铁的氧化物。因此推断材料的腐蚀机理为:板簧基体表面附着泥水,泥水中溶有大气中的O₂、CO₂等气体,板簧基体中的Fe作为阳极,发生电化学腐蚀,生成铁的氧化物^[20]。

本失效板簧样品表面微裂纹主要分布在断裂区域,分布相对较集中,主要受到表面应力分布的影响,在早期疲劳裂纹形成后,其扩展速率受应力的影响较大。在应力较大区域,裂纹较密集且扩展速率较快,板簧断面疲劳裂纹扩展区占断面面积的80%以上,说明疲劳裂纹扩展时间较长。在疲劳裂纹扩展过程中,名义应力水平较低,处于材料的疲劳极限范围内,是典型的高周疲劳断裂。

4 结论

1) 钢板弹簧的断裂主要是在以下因素的共同作用下发生的。第一,钢板弹簧表面出现腐蚀坑及腐蚀微裂纹缺陷,表面缺陷的出现加剧了板簧表面的应力集中现象,加速了早期疲劳裂纹的萌生;第二,表面存在脱碳现象,导致表面硬度及强度降低,表面耐腐蚀性能下降,为早期疲劳裂纹的萌生创造了条件。

2) 钢板弹簧表面出现腐蚀坑及腐蚀裂纹的原因是由于使用过程中板簧表面存在异常磨损,导致局部防护漆层脱落,裸露的金属基体在泥水环境下出现腐蚀坑,并在腐蚀坑处萌生腐蚀裂纹。

5 改进措施及效果

1) 改善钢板弹簧热处理质量,避免簧片表面出现脱碳现象,保证表面的耐腐蚀性能及抗疲劳断裂能力。

2) 严格控制钢板弹簧的安装精度及装载方式, 避免簧片间异常接触导致漆层脱落; 做好定期维护保养, 在簧片间加石墨润滑剂, 防止长时间在工作中干磨或挤压碰撞导致漆层过早脱落; 定期对钢板弹簧进行清洗、去污、去泥, 防止腐蚀介质长期附着在基体表面导致腐蚀; 定期检查钢板弹簧外观, 及时发现腐蚀或开裂的簧片, 并进行更换。

3) 通过改进热处理工艺, 有效控制了表面的脱碳现象; 通过改善安装加载方式, 定期保养、清理泥水等, 有效杜绝了表面漆层脱落。在后期路试过程中, 未出现钢板弹簧腐蚀疲劳断裂情况。

参考文献:

- [1] 颜婧, 冯继军, 张鑫明, 等. 52CrMnBA 钢板弹簧断裂失效分析[J]. 失效分析与预防, 2016, 11(4): 250-255.
YAN Jing, FENG Ji-jun, ZHANG Xin-ming, et al. Fracture analysis of 52CrMnBA leaf springs[J]. Failure analysis and prevention, 2016, 11(4): 250-255.
- [2] 丁礼权, 董水要, 刘祥军, 等. 60Si₂Mn 钢板弹簧失效分析[J]. 武钢技术, 2016, 54(4): 36-39.
DING Li-quan, DONG Shui-yao, LIU Xiang-jun, et al. Failure analysis of 60Si₂Mn leaf spring[J]. WISCO technology, 2016, 54(4): 36-39.
- [3] 褚武扬. 断裂与环境断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
CHU Wu-yang. Fracture and environmental fracture[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [4] 白培谦, 泮战侠, 慕松, 等. 重卡钢板弹簧断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2012, 48(8): 532-534.
BAI Pei-qian, PAN Zhan-xia, MU Song, et al. Failure analysis on fracture of heavy truck leaf spring[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: Physical testing), 2012, 48(8): 532-534.
- [5] 舒畅, 张帷, 苏艳, 等. 海洋大气环境对钛合金 TA15 断裂韧度的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 54-57.
SHU Chang, ZHANG Wei, SU Yan, et al. Effect of marine atmosphere environment on fracture toughness for TA15 titanium alloy[J]. Surface technology, 2012, 41(6): 54-57.
- [6] 秦会常, 贾波, 王传政, 等. 某药模底座失效分析[J]. 精密成形工程, 2013, 5(1): 54-57, 70.
QIN Hui-chang, JIA Bo, WANG Chuan-zheng, et al. Failure analysis of punch for pressing powder block[J]. Journal of netshape forming engineering, 2013, 5(1): 54-57, 70.
- [7] 丁礼权, 丁文胜, 董水要, 等. SUP10 汽车钢板弹簧早期断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(12): 924-927.
DING Li-quan, DING Wen-sheng, DONG Shui-yao, et al. Failure analysis on early fracture of SUP10 automobile leaf spring[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: physical testing), 2018, 54(12): 924-927.
- [8] 熊春英, 罗学泉, 钟球, 等. 钢板弹簧的失效分析[J]. 热处理技术与装备, 2014, 35(6): 46-51.
XIONG Chun-ying, LUO Xue-quan, ZHONG Qiu, et al. Failure analysis on the leaf spring[J]. Heat treatment technology and equipment, 2014, 35(6): 46-51.
- [9] 秦会常, 杨守杰, 彭颀, 等. 某型火炮击针失效分析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(2): 45-50.
QIN Hui-chang, YANG Shou-jie, PENG Ting, et al. Failure analysis for the artillery pin[J]. Journal of netshape forming engineering, 2014, 6(2): 45-50.
- [10] 付扬帆, 王长朋, 陈大军, 等. 钢板弹簧断裂失效行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 75-79.
FU Yang-fan, WANG Chang-peng, CHEN Da-jun, et al. Rupture failure behavior of leaf spring[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(4): 75-79.
- [11] 夏彪, 王磊. 某汽车前桥横置板簧断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(7): 512-514.
XIA Biao, WANG Lei. Cause analysis on fracture of transverse leaf spring of front axle for an automobile[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: physical testing), 2019, 55(7): 512-514.
- [12] 付建朝, 旷彪, 姚美旺, 等. 少片簧悬架异响分析及改进[J]. 客车技术与研究, 2017, 39(4): 22-24.
FU Jian-chao, KUANG Biao, YAO Mei-wang, et al. Abnormal sound analysis and improvement of less leaf spring suspension[J]. Bus & coach technology and research, 2017, 39(4): 22-24.
- [13] 赵兵兵, 张慧霞, 贾瑞灵, 等. 低合金钢焊接接头腐蚀性能研究进展[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 60-64, 103.
ZHAO Bing-bing, ZHANG Hui-xia, JIA Rui-ling, et al. Research progress on the corrosion behavior of low alloy steel weldments[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(6): 60-64, 103.
- [14] 吴林. 某轻卡板簧卷耳断裂的分析及改进[J]. 汽车实用技术, 2018(20): 91-92.
WU Lin. Analysis and improvement on leaf spring rolling fracture of A Light Truck[J]. Automobile applied technology, 2018(20): 91-92.
- [15] 王森. 前钢板弹簧中心断裂分析[J]. 汽车实用技术, 2016(6): 167-170.
WANG Sen. Analysis of front leaf spring break at central position[J]. Automobile applied technology, 2016(6): 167-170.
- [16] 徐袁, 祝小冬, 陈明, 等. 50CrVA 钢板弹簧应力喷丸断裂分析[J]. 江西冶金, 2018, 38(4): 29-32.
XU Yuan, ZHU Xiao-dong, CHEN Ming, et al. Failure

- analysis on stress shot peening for leaf spring of 50CrVA[J]. Jiangxi metallurgy, 2018, 38(4): 29-32.
- [17] 王兆君, 张玉芳, 魏修亭. 汽车板弹簧卷耳的断裂研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 259-261.
WANG Zhao-jun, ZHANG Yu-fang, WEI Xiu-ting. Study on fracture of automobile plate spring grasswort[J]. Hot working technology, 2017, 46(4): 259-261.
- [18] 余祖新, 许文清, 王长朋, 等. 60Si₂Mn 板簧疲劳断裂失效分析[J]. 环境技术, 2019, 37(S2): 123-126, 131.
SHE Zu-xin, XU Wen-qing, WANG Chang-peng, et al. Fatigue fracture failure analysis of 60Si₂Mn plate spring[J]. Environmental technology, 2019, 37(S2): 123-126, 131.
- [19] 潘恒沛, 袁晓冬, 陈洁明, 等. 0Cr₁₇Ni₇Al 钢弹簧断裂原因分析[J]. 热处理, 2020, 35(3): 38-41.
PAN Heng-pei, YUAN Xiao-dong, CHEN Jie-ming, et al. Analysis on cause for 0Cr₁₇Ni₇Al steel spring breaking[J]. Heat treatment, 2020, 35(3): 38-41.
- [20] 蒋松蔚, 马鸣图, 王建斌, 等. 重型汽车钢板弹簧早期断裂原因[J]. 机械工程材料, 2020, 44(8): 93-96, 102.
JIANG Song-wei, MA Ming-tu, WANG Jian-bin, et al. Early fracture reason of leaf spring of heavy duty truck[J]. Materials for mechanical engineering, 2020, 44(8): 93-96, 102.