

货车减振器销轴早期断裂原因分析

李梅花, 何利, 朱丽静

吉利汽车集团有限公司 浙江宁波 315336

摘要: 货车减振器销轴在研发阶段路试试验, 出现早期断裂失效, 通过对销轴材料的理化、力学性能测试及断口宏观、微观形貌观察, 分析了减振器销轴断裂主要原因。结果表明: 断裂形式为双向弯曲疲劳断裂, 断口呈现低应力高轴疲劳特征, 销轴材料为45钢, 基体硬度未达到设计要求, 心部金相组织为珠光体+铁素体, 非回火索氏体, 说明材料调质处理过程中心部并未淬透, 致使销轴基体硬度偏低, 疲劳强度下降, 加之焊接时焊渣溅落销轴表面, 导致表面二次加热组织转变硬度降低, 形成软点, 疲劳源在此形成。后结合45钢与40Cr淬透性及焊接性的对比, 确定销轴选材不合适, 销轴材料更换为40Cr后, 未出现断裂故障。

关键词: 双向弯曲疲劳; 45钢; 淬透性; 40Cr; 疲劳强度; 二次加热

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.11.004

某纯电厢式货车试验阶段, 在石块路况进行车辆强化路循环试验时, 左后减振器上固定点发生撕裂, 拆解发现减振器上端固定销轴发生断裂, 导致固定点撕裂, 车辆累计行驶里程4480km。此车减振器销轴为新开发零部件, 研发人员急需确认销轴断裂模式及销轴质量状况。

断裂件检测及失效原因分析

1. 设计技术要求

减振销轴材料为45钢, 调质处理, 硬度32~39HRC, 表面无涂层及特殊处理, 综合性能及显微组织符合国标要求。另外, 销轴装配时与材质为10钢的

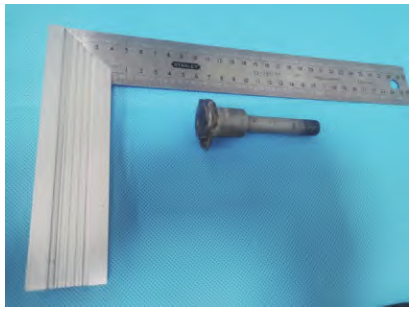
其他部件焊接。

2. 宏观断口

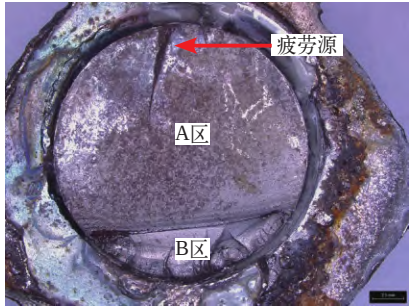
图1a所示为断裂销轴一部分, 图1b所示为断口宏观形貌, 图1c所示为完整销轴示意图, 断裂位置在 $\phi 20\text{mm}$ 杆部上靠近焊接部位。断口上分两个区域, A区平坦光滑占整个断口的绝大部分, 有一处明显的台阶; B区台阶较多, 表面存在较多应力集中点。两个区域内均可以清晰看到贝纹线, 疲劳源位于表面, 开裂始于A区, 后B区疲劳开裂。

3. 微观断口

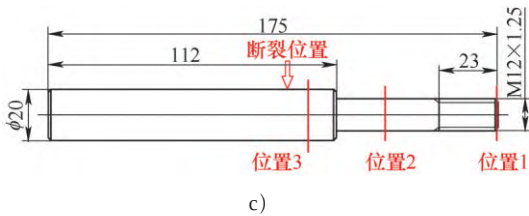
图2所示分别为A区疲劳源形貌、疲劳源高倍形



a) 部分断裂销轴



b) 断口宏观形貌



c)

图1 销轴断裂位置及宏观断口形貌

貌、A区扩展区形貌及B区扩展区形貌，疲劳源未见材料缺陷，A、B区扩展区微观形貌均可见疲劳辉纹。结合宏观形貌分析，A区表面先开裂向内部扩展，随着开裂面积增大，销轴承受外力的面积减小，导致B区外圆表面承受应力增大，B区表面开始开裂，最后两侧裂纹汇合销轴完全断裂。

4.材料化学成分分析

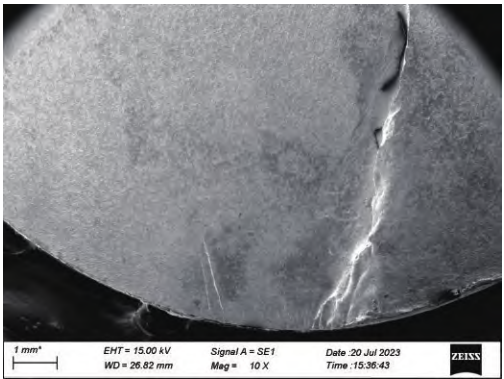
在销轴无螺纹杆部取样，采用直读光谱仪进行化学成分分析，材料为45钢，符合设计材料规定（见表1）。

表1 销轴无螺纹杆部化学成分（质量分数w）

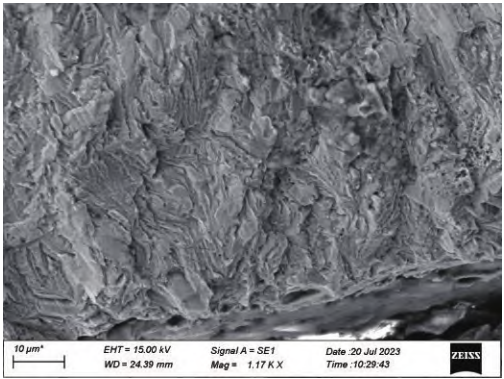
元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
含量	0.44	0.22	0.57	0.021	0.010	0.070	0.012	0.029

5.硬度测试

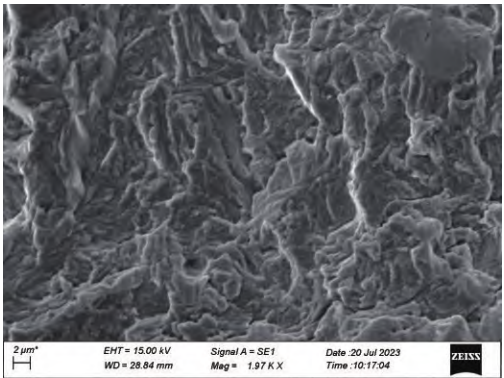
在销轴三处部位取样，如图1c位置1、位置2、位



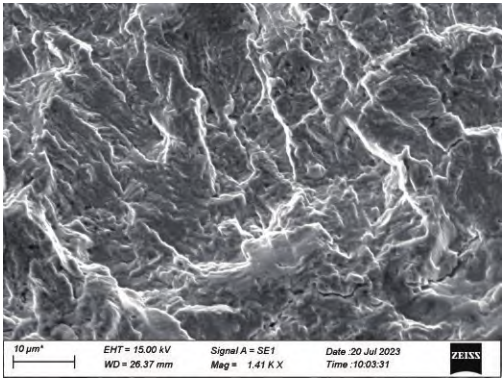
a) A区疲劳源形貌



b) A区疲劳源高倍形貌



c) A区扩展区形貌



d) B区扩展区形貌

图2 断口SEM

置3处分别为M12mm×1.25mm螺纹处端面、 ϕ 12mm光杆处横截面及 ϕ 20mm光杆处横截面，用洛氏硬度计在圆柱形试样横截面的1/4直径位置测试洛氏硬度，结果见表2。设计硬度要求32~39HRC，螺纹处端面硬度符合，其余部位硬度均低于设计要求。

表2 销轴各部位硬度

检测位置	心部硬度/HRC			
	1	2	3	平均值
位置1	37.0	37.2	37.8	37.4
位置2	28.6	29.0	28.4	28.7
位置3	22.5	22.8	22.8	22.7

6.金相分析

金相组织检测位置与洛氏硬度检测位置相同，图3a所示为螺纹端面（位置1）横截面金相组织，图3b为 ϕ 12mm光杆处（位置2）横截面金相组织，图3c为 ϕ 20mm断裂处纵截面金相组织，图3d为断口A区疲劳源处纵截面金相组织。螺纹端面金相组织从表面到芯部均为回火索氏体，是调质处理正常组织。 ϕ 12mm光杆处靠近表面金相组织为回火索氏体+铁素体，芯部金相组织为珠光体+铁素体+回火索氏体，为调质不良组织。A区断裂源处存在约0.2mm深度二次加热区，二次加热区组织从表及里为珠光体+铁素体 铁素体+回火

索氏体。A区其它部位距表面2mm 范围内为回火索氏体+少量铁素体，距表面大于2mm的金相组织为珠光体+铁素体。说明整个销轴在调质热处理过程中均未完全淬透，且直径越大淬透深度越小。

7.总结及结论

1) 减振销轴断裂类型为低应力高周双向弯曲疲劳断裂，受力状态符合正常服役受力状态。疲劳源于销轴表面焊渣溅落处，焊渣温度较高，溅落销轴表面造成表面局部区域二次加热，局部组织再次奥氏体化，自然冷却形成珠光体+铁素体组织，而非原来的回火索氏体组织，致使此区域硬度降低，形成表面软垫，疲劳源在此形成。

2) 减振销轴材料符合设计要求，而断裂部位心部硬度远低于设计要求。断裂部位横截面从表面往芯部金相组织依次是：回火索氏体→珠光体+铁素体+回火索氏体→珠光体+铁素体，说明材料在调质处理过程中心部并未淬透，导致硬度低。根据ISO18265—2013标准，抗拉强度与硬度呈线性关系，硬度下降，材料强度随之下降，珠光体与铁素体组织相比回火索氏体组织粗大，组织越细疲劳强度越高，因此销轴珠光体+铁素体的组织形态导致销轴疲劳强度下降。且已有研究表明，在一定范围内材料的硬度、抗拉强度和疲劳强

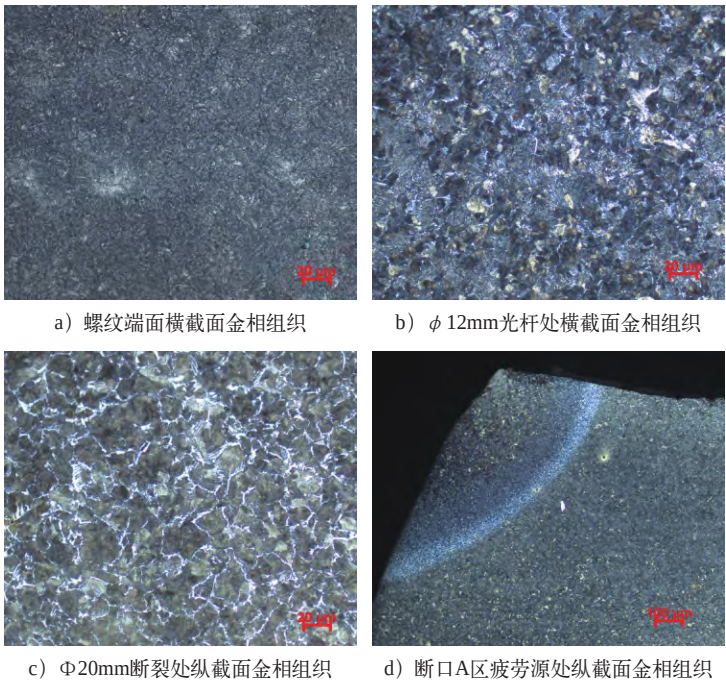


图3 销轴个部位截面金相组织

度几乎呈线性关系，硬度低则疲劳强度下降。

结论：焊接时焊渣溅落点造成销轴表面组织转变硬度下降，形成局部软点，疲劳开裂源在此形成；销轴热处理组织异常、基体硬度低导致疲劳强度降低，两方面原因造成销轴早期断裂失效。

改进措施

疲劳起源于焊渣溅落处，因此焊接过程对销轴表面做防护措施，避免焊渣溅落到销轴表面造成表面软点。另一方面，45钢是中碳结构钢，冷热加工性能都不错，机械性能较好，但它的最大弱点是淬透性低，货车减振销轴断裂处直径达20mm，使用45钢，做调质处理，零件硬度无法达到设计要求。

对比40Cr与45钢淬透性（见表3），直径20mm的零件，用40Cr做调质处理，其硬度、金相完全可以满足设计要求。因销轴需要与其他零件做焊接处理，需考虑材料焊接性能，材料碳当量越高，焊接开裂风险越大，40Cr与45钢碳当量接近，更换材料对焊接质量

（上接第54页）

参考文献：

[1] 邓忠伟, 刘富佳, 聂文豪, 等. 锂离子电池安全性能评估及过充电实例分析[J]. 电源技术, 2024, 48 (6) : 1083-1087.

[2] Jo S , Seo S , Kang K S , etc. Thermal Runaway Mechanism in Ni-Rich Cathode full-cells of Lithium-ion Batteries: The role of Multidirectional Crosstalk.[J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2024, e2402024-e2402024.

[3] 刘静如. 软包型高能量密度三元锂离子电池热失控特性研究[J]. 安全、健康和环境, 2024, 24 (5) : 7-12.

[4] Goswami D R B , Abdisobbouhi Y , Du H , et al. Advancing battery safety: Integrating multiphysics and machine learning for thermal runaway prediction in lithium-ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2024, 614235015-235015.

[5] 李致远, 鲁锐华, 余庆华, 等. 动力电池热失控特征及防控技术研究分析[J]. 汽车工程, 2024, 46 (1) : 139-150. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.01.015.

几乎无影响。设计更换材料至今（近一年时间），未发生销轴断裂故障。

表3 40Cr与45钢淬透性对比

材料	淬透性		碳当量/%
	水淬临界直径/mm	油淬临界直径/mm	
45钢	8	5	0.72
40Cr	24	28	0.79

参考文献：

[1] 蒋小松, 杨川, 高国庆, 等. 金属材料零部件失效分析基础与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.

[2] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[3] 聂德福. 40钢和40Cr钢压缩机曲轴表面感应淬火后的梯度组织与性能[J]. 金属热处理, 2023, 48 (12) : 222-229

[4] 沈明, 李少雨, 钱航, 等. 淬火介质浓度对45钢淬硬层深度及组织性能的影响[J]. 大型锻铸件, 2022 (2) : 41-43, 50. **AUTO1950**

[6] 徐振恒, 周晓燕, 付佳龙, 等. 锂离子电池热失控及其预警方法[J]. 科学通报, 2023, 68 (33) : 4501-4516.

[7] 张赛, 汪振毅, 胡世旺. 基于电化学-热-力耦合模型的锂离子电池热失控研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (2) : 551-559. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0191.

[8] 王功全, 孔得朋, 平平, 等. 锂离子电池热失控模型综述[J]. 电气工程学报, 2022, 17 (4) : 61-71.

[9] 孙聪, 邵庆, 王致富, 等. 锂离子电池热失控机理及安全提升策略研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2023, 29 (1) : 22-27. DOI:10.20027/j.gncq.2023.0008.

[10] 郭斌, 刘新华, 何蓉, 等. 锂离子电池性能衰减与热失控机制研究进展[J]. 稀有金属, 2024, 48 (2) : 225-239. DOI:10.13373/j.cnki.cjrm.XY21050007.

[11] 赵璐璐, 张玉魁, 王荣, 等. 锂离子电池失控机理模拟[J]. 有色金属工程, 2024, 14 (1) : 23-31.

[12] 王宁, 杨启亮, 邢建春, 等. 基于混合模型的锂离子电池热失控预判方法[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1 (5) : 45-51. **AUTO1950**