

某增程式新能源汽车发电机花键轴失效分析

喻峰, 李成华, 王小琴, 李政

重庆赛力斯新能源汽车设计院有限公司 重庆 401121

摘要: 国内某增程式新能源汽车发电机花键轴, 材质为SCM440H合金钢, 在汽车运行55000km时发生断裂。为探究其失效原因, 先后通过体视显微镜、扫描电镜 (SEM)、金相显微镜 (OM)、直读光谱仪 (OES) 和硬度计, 对失效件进行了宏观形貌观察、断口形貌分析、金相显微组织分析、化学成分分析及硬度检测等。结果表明: 该发电机花键轴失效主要原因是渐开线处有效硬化层深度低于技术要求, 使其抵抗应力变形能力降低, 同时键槽R角处应力集中, 共同作用下导致键槽R角处开裂并在开裂处形成疲劳源, 最终导致多源疲劳断裂。

关键词: 花键轴; 有效硬化层; 应力集中; 多源疲劳; 疲劳断裂

Failure analysis of generator spline shaft of a booster electric vehicle

YU Feng, LI Chenghua, WANG Xiaoqin, LI Zheng

Chongqing SERES New Energy Vehicle Design Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, China

Abstract: The spline shaft of the generator of a domestic extended-range new energy vehicle is made of SCM440H alloy steel and breaks when the vehicle runs for 55000km. To explore the failure cause, the macro morphology observation of the fracture surface of the failed part, the fracture surface analysis, the metallographic microstructure analysis, the chemical composition analysis and the hardness test are carried out successively by using a stereomicroscope, a scanning electron microscope (SEM), a metallographic microscope (OM), an optical emission spectrometer (OES) and a hardness tester. The results show that the main cause of the failure of the spline shaft of the generator is that the depth of the effective hardened layer at the involute is lower than the technical requirements, which reduces its ability to resist stress deformation. At the same time, there is stress concentration at the R corner of the keyway. Under the combined action, cracking occurs at the R corner of the keyway and a fatigue source is formed at the cracked part, ultimately leading to multi-source fatigue fracture.

Keywords: spline shaft; effective hardening layer; stress concentration; multi-source fatigue; fatigue fracture

1 序言

花键轴可分为矩形花键轴和渐开线花键轴两大类, 是机械传动的一种方式。与平键、半圆键和斜键相同, 均起传递机械扭矩作用。其具有承载能

力高, 对中性、导向性好, 互换性强以及应力集中小等特点, 因而广泛应用于飞机、汽车、机床及农用机械制造等领域^[1]。SCM440H作为一种具备高强度、高韧性、强耐磨性和优异抗疲劳效果的合金

第一作者: 喻峰, 本科, 工程师, 主要研究方向为金属材料失效分析、无损检测, E-mail: 303064958@qq.com。

钢,广泛应用于花键轴的制造。本文通过对断裂花键轴进行外观检查、化学成分分析、金相组织分析及断口分析,以期发现导致花键轴断裂的失效原因。使用蔡司Stemi508体视显微镜进行宏观形貌观察,蔡司EVO 18扫描电镜进行微观形貌观察,蔡司Axio vert A1金相显微镜进行显微组织观察,MAXxLMM05直读光谱分析仪进行成分分析,使用维氏硬度计FALCON 500、洛氏硬度计HR-150A进行硬度检测。花键轴材质为SCM440H合金钢,加工过程:棒料验收→锻造→精车→钻孔、铣槽→滚齿→去毛刺→高频感应淬火、回火→金相、硬度检测→磁粉检测→精磨外圆→尺寸检验→入库。

2 检测过程

2.1 宏观检查

该发电机花键轴为 30° 压力角平齿根渐开线花键轴,断裂位置位于渐开线附近,所有花键齿断裂,断口整体呈“L”形,所有花键齿均朝同一方向扭曲变形;断裂面上可见多组明显的脊状花样,裂纹起源位置近乎位于花键轴的同一平面上,且花样类似,可判定为等效失效形成,且初始裂纹源形成时间大致相同;宏观上看裂纹源区与扩展区所占面积较大,约占整个断面的 $2/3$,剪切区约占 $1/3$,整个断面经过充分的疲劳而形成。单脊上存在肉眼可见的明显贝壳状花样^[2],裂纹源区花样间距细密,随着裂纹的不断扩展因其有效截面逐渐减少,所受应力逐渐增大,花样间距也逐渐增大,断口由疲劳扩展方式转变为疲劳与塑性变形的混合扩展方式。将断口以等效圆弧划分,可以观察到在同一等效圆弧上,裂纹特征较为一致,由此可判断该工件失效模式为多源头的等效失效形式。随着主裂纹的不断扩展,各齿条间逐渐转为独立受力,在花间轴连续工作状态下,因整体强度降低,所以齿牙也开始出现变形开裂,最终也以疲劳的方式断裂,如图1所示。

2.2 断口微观分析

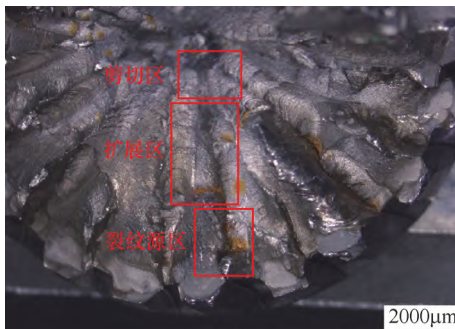
对花键轴断面取样,制样后通过EVO 18扫描电镜对其进行微观形貌观察(见图2),微观形貌上显示断裂源起始于由齿根R角处向内裂开的裂纹内部,源区整体较为平整,低倍下观察源区主要以明显的疲劳贝纹为主,高倍下能观察到明显的疲劳辉



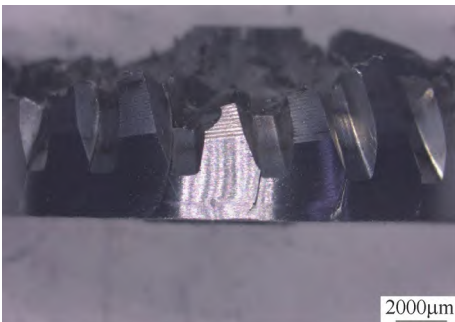
a) 正常花键轴形貌



b) 断裂花键轴宏观形貌



c) 花键轴断面宏观形貌



d) 花键轴周面宏观形貌

图1 花键轴断面宏观形貌

纹,不同区域疲劳扩展方向因受力方式较为复杂而有略微差异,但整体仍由表面向心部扩展,源区部分区域磨损较严重,表面呈现明显的磨损以及挤压变形痕迹;部分区域存在与疲劳辉纹垂直的二次裂

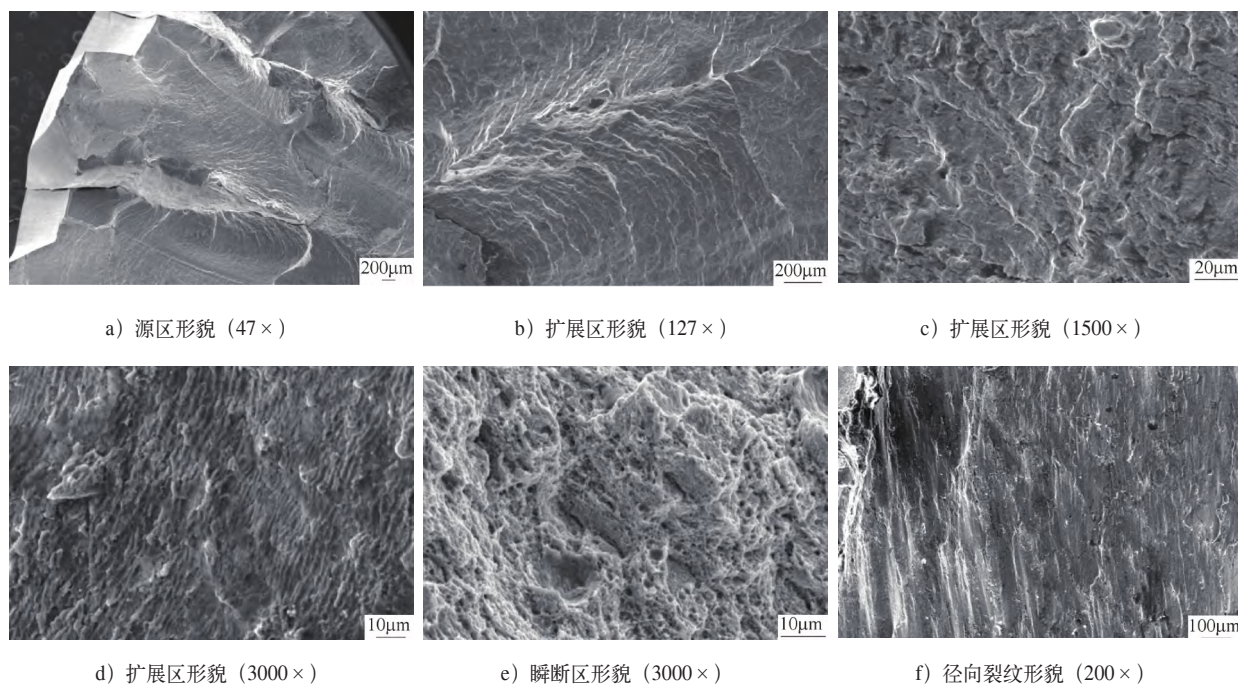


图2 花键轴断面微观形貌

纹；扩展区呈山脊状，沿轴心部扩展；瞬断区有大量韧窝，为韧性断裂^[2]。打开齿根处裂纹，裂纹面较光滑，大量区域被磨损，表明裂纹两侧有交变应力的作用。从花键轴的宏观和微观断口判断，应为疲劳断裂模式。

2.3 成分分析

在花键轴上取样，依据GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法》，进行化学成分分析，结果见表1。从表1可知，花键轴化学成分符合JIS G 4052—2016中

表1 花键轴SCM440H合金钢的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
标准值	0.37~0.44	0.15~0.35	0.55~0.95	≤0.030	≤0.030	≤0.25	0.85~1.25	0.15~0.35
实测值	0.43	0.25	0.76	0.005	0.0178	0.02	1.18	0.29

SCM440H合金钢的要求。

2.4 硬度检测

根据GB/T 230.1—2018《金属材料洛氏硬度试验 第一部分》对残余花键齿根表面高频感应淬火区域、花键轴心部组织进行硬度检测，结果见表2；根据GB/T 5617—2005《钢的感应淬火和火焰淬火后有效硬化层深度的测定》，对花键轴残余键、渐开线处淬火有效硬化层进行检测，结果见表3。从表3可知，花键齿部位硬度及有效硬化层深度符合技术要求；渐开线部位处有效硬化层深度平均值为0.64mm（见图3），低于技术要求0.8~1.5mm要求。

2.5 金相检测

采用线切割方法在断口附近横向和纵向取样进

行显微组织分析，对试样进行磨光和抛光，使用蔡司Axio vert A1金相显微镜观察裂纹形貌和非金属夹

表2 花键齿硬度检测结果（HRC）

检测部位	硬度	平均值	技术要求
花键齿表面高频感应淬火区域	61.5、60.9、61.2	61.2	55.0~65.0
花键轴心部	31.0、31.4、31.5	31.3	26.0~34.0

表3 花键齿有效硬化层检测结果（mm）

检测部位	残齿Ⅰ	残齿Ⅱ	残齿Ⅲ	渐开线	技术要求
层深界限480HV1的硬化层深度	1.08	1.07	1.05	0.64	0.8~1.5

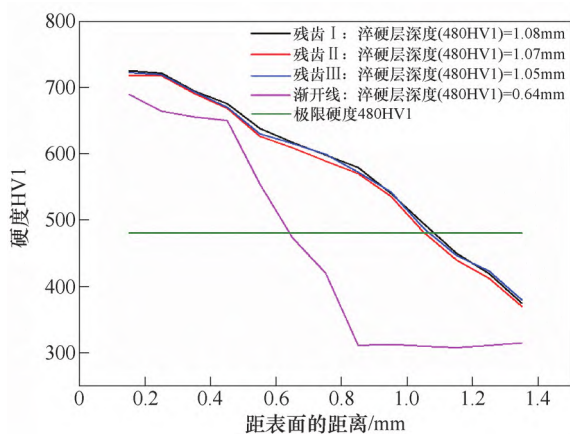


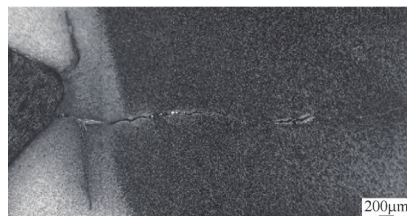
图3 花键轴有效硬化层深度曲线

杂物，并采用4%硝酸酒精溶液对抛光试样表面进行侵蚀，对其组织进行观察。花键轴金相组织如图4所示。

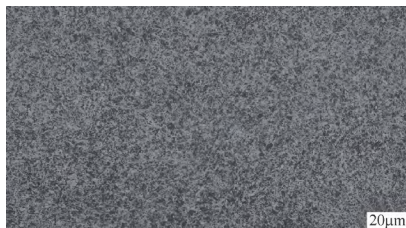
横向试样抛光态下可见裂纹发源于齿根R角处，主裂纹朝轴心部扩展，裂纹形态较笔直，头部开口较大，尾部较小，裂纹两侧耦合性较好；键槽两侧分别有较短裂纹并沿齿根横向扩展；键槽底部有较短裂纹；所有裂纹两侧均未发现大块夹杂物；经腐蚀后，可见整个花键均被淬透；裂纹两侧未见氧化痕迹或脱碳痕迹；表面高频感应淬火区域组织为：细针状马氏体，级别6级；心部组织为：回火索



a) 横向花键齿裂纹抛光态形貌



b) 横向花键齿裂纹抛光态形貌



c) 横向花键齿金相组织



d) 横向花键轴芯部金相组织



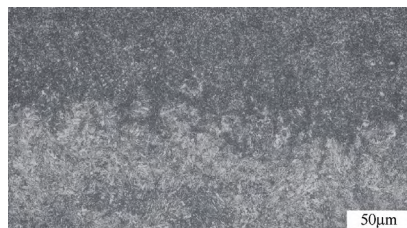
e) 横向花键齿淬硬层金相组织



f) 纵向花键轴非金属夹杂物形貌



g) 纵向花键轴渐开线处硬化层深度



h) 纵向花键轴渐开线硬化层与芯部结合处金相组织

图4 花键轴金相组织

氏体+少量铁素体, 级别3级; 淬硬层组织为: 细针状马氏体, 级别6级。纵向试样断口附近渐开线处金相组织可见硬化层覆盖整个渐开线, 但整体深度较浅, 金相法测量其深度平均值约为0.76mm; 硬化层与基体结合处未发现异常金相组织。花键轴基体非金属夹杂物级别: D类细系1.0级, 其余为0。

3 分析与讨论

1) 该花键轴断口呈现典型的多源疲劳断裂特征, 断裂齿上均存在多个疲劳区, 宏观可见多处明显的疲劳贝壳线, 疲劳裂纹起源于键槽R角处裂纹内部, 打开裂纹后, 整个裂纹面均被磨损, 表明裂纹两侧存在交变应力作用; 疲劳裂纹沿齿横向和心部扩展, 最终导致花键轴断裂。

2) 花键轴键槽内裂纹均产生于同一侧相同位置, 裂纹形态基本相同, 内部无氧化和脱碳现象, 结合制造工艺可排除热处理导致的裂纹。

3) 花键轴化学成分符合JIS G 4052—2016中SCM440H合金钢的技术要求。

4) 花键齿部位表面硬度值、心部硬度和有效硬化层深度符合技术要求; 但渐开线处有效硬化层深度为0.64mm, 低于技术要求0.8~1.5mm下限值。

5) 花键轴经过表面高频感应淬火处理, 整个花键齿及硬化层均被淬透, 其组织为细针状马氏体, 组织级别为6级, 符合硬度下限 $\geq 55\text{HRC}$ 时, 3~7级的规定; 针状马氏体由于其本身的组织特点造成内部存在大量显微裂纹, 增加了组织脆性^[3]; 花键轴断口位于渐开线附近, 其有效硬化层深度为0.64mm, 低于技术要求0.8~1.5mm, 导致该部位抵抗应力变形能力降低, 承载能力下降^[4]。

6) 该花键齿为30°压力角平齿根, 齿根R角较小, 齿根过渡曲线的长度和曲率半径减小, 应力集中系数增大^[5], 花键轴传递扭矩时在齿根R角处承受应力最大^[6]。增程式汽车行驶时, 车辆减速时动能回收系统启动, 汽车惯性产生的动能通过发电机转换为电能, 此时发电机花键轴转动; 车辆加速时动能回收系统停止对电池充电, 发电机花键轴停止运转^[7]; 如此在车辆加减速过程中, 发电机频繁启动和停止, 花键轴齿承受交变应力作用, 在长期的运行中裂纹在花键轴齿根R角处产生, 并在裂纹内部形成疲劳源, 经充分疲劳后, 最终发生整体疲劳断裂。

4 结束语

该发电机花键轴仅运行55000km后断裂属于疲劳断裂。主要原因为花键轴渐开线处有效硬化层深度低于技术要求, 导致该部位抵抗应力变形能力降低; 同时花键齿属于30°压力角平齿根, 在齿根R角处存在应力集中现象, 在两者共同作用下导致运行过程中在该处产生裂纹并在裂纹内形成疲劳源, 最终导致花键轴疲劳断裂。

针对该花键轴失效情况提出如下建议。

1) 生产过程中应将外花键与内花键配合交界处作为质量管控的重要区域, 检测其有效硬化层深度。

2) 将花键轴30°压力角平齿根改为圆齿根, 以降低应力集中带来的开裂风险。

参考文献:

- [1] 刘松. 花键轴断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(1): 30-34.
- [2] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 孙璐, 李建英, 魏焕君, 等. 超高强马氏体钢开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2023, 48(1): 261-266.
- [4] 刘巨保, 丁宇奇. 潜油电泵花键轴键侧圆弧设计与应力分析[J]. 石油矿场机械, 2006(5): 51-54.
- [5] 李文正. 齿轮传动设计中压力角、齿顶高系数及齿根圆角半径的选择[J]. 装备制造技术, 2015(6): 303-304.
- [6] 朱芸怡. 齿轮轴的失效分析[J]. 热处理, 2024, 39(5): 40-42.
- [7] 汪敏强. 电动汽车机电并行制动的稳定性对制动回收的影响研究[J]. 南方农机, 2020, 51(18): 104-105.

(收稿日期: 20241218)