

汽车后扭力梁开裂问题分析

秦兴祖, 于洋, 张雯, 尹小文, 蒯振

北京汽车研究总院有限公司 北京 101300

摘要: 使用直读光谱仪、硬度计、扫描电镜和金相显微镜对某车型疲劳耐久试验开裂的后扭力梁进行失效分析。其化学成分和硬度符合材料标准和图样技术要求。断口和金相检测结果表明: 后扭力梁失效模式为起源于内壁的应力腐蚀开裂, 主要原因是后扭力梁内壁防腐处理不良引起腐蚀, 导致高强度组织敏感的后扭力梁在疲劳强度试验拉应力的作用下发生应力腐蚀开裂并扩展。使用内壁无腐蚀现象的后扭力梁总成进行疲劳耐久试验, 结果无开裂问题。

关键词: 后扭力梁; 疲劳耐久试验; 腐蚀凹坑; 应力腐蚀开裂

Fracture failure analysis of vehicle rear torsion beam

QIN Xingzu, YU Yang, ZHANG Wen, YIN Xiaowen, KUAI Zhen

Beijing Automobile Technology Center Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract: The failure analysis was conducted on the cracked rear torsion beam of a certain vehicle model after fatigue durability test by using direct-reading spectrometer, hardness tester, scanning electron microscope and metallographic microscope. The chemical composition and hardness meet the material standards and technical requirements of the drawings. The results of fracture and metallographic inspection show that the failure mode of the rear torsion beam is stress corrosion cracking originating from the inner wall. The main reason is that the poor anti-corrosion treatment of the inner wall of the rear torsion beam causes corrosion, resulting in stress corrosion cracking and expansion of the rear torsion beam with high-strength tissue sensitivity under the tensile stress of the fatigue strength test. The fatigue durability test was carried out with the rear torsion beam assembly without corrosion on the inner wall, and no cracking problem was found.

Keywords: rear torsion beam; fatigue endurance test; corrosion pit; stress corrosion cracking

1 序言

扭力梁式后悬架系统, 具有结构简单、占用空间小、成本较低, 以及装配维修便利等优点, 在A/A0级乘用车上广泛应用^[1, 2]。后扭力梁总成作为扭力梁式后悬架系统中重要的零部件, 具有连接车身和车轮传递力和力矩, 承受车辆行驶过程中产生的冲击和振动, 以及通过自身扭转刚度来提高车辆侧倾稳定性等作用^[3, 4]。后扭力梁总成如果出现断裂

等失效问题, 则可能丧失支撑功能, 导致车辆不能正常行驶, 甚至危及行车安全^[5]。

某车型的后扭力梁总成在设计开发阶段进行的疲劳耐久试验中开裂失效, 试验开始至发现开裂时, 按试验次数计算完成率为40%, 试验在两侧轮心处加载垂直方向上大小相同、方向相反的位移, 加载方式如图1所示。试验过程中扭力梁开裂位置受交替拉-压应力作用^[6], 为确定开裂失效原因, 避

免该问题再次发生,使用直读光谱仪、扫描电镜、金相显微镜和硬度计对开裂的后扭力梁进行化学成分、断口形貌、金相组织和硬度测试分析。



图1 加载方式

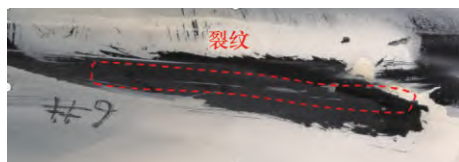
2 断口检测分析

后扭力梁总成及其裂纹如图2所示。从图2可看出,裂纹长度约95.6mm,裂纹处无明显塑性变形,裂纹两侧电泳黑漆无磕碰损伤。除后扭力梁的开裂位置外,总成其他零件的本体、零件之间的焊缝以及疲劳耐久试验安装点的外观无失效现象。后扭力梁设计材料为BR1500HS,执行Q/BQB 315—2023《热冲压用热连轧钢板及钢带》标准,厚度为3.0mm,主要生产工艺流程为:原材料→制管→预成形→液压成形→淬火→回火→抛丸→激光切割→涂油→检测包装。后扭力梁生产完成后运输至总成厂家进行焊接和电泳处理,后扭力梁淬火+回火后的硬度要求为28~37HRC。

切割后扭力梁打开裂纹进行观察,断口及内壁外观如图3所示,可见因腐蚀产生的红锈。断口宏观形貌呈多段形式,每两段之间有棱线分布。使用扫描电镜对断口微观形貌进行检测分析,后扭力梁内壁处的断口微观形貌如图4a所示,内壁处存在因腐蚀产生的凹坑,以凹坑为中心靠近内壁侧的区域断面磨损严重,已不易分辨形貌,未磨损的区域主要



a) 后扭力梁总成及开裂位置



b) 裂纹位置局部放大

图2 后扭力梁总成和裂纹

呈沿晶形貌,并有较严重的腐蚀现象。后扭力梁内壁和外壁之间的断口,由内向外依次出现沿晶形貌并有二次裂纹、沿晶形貌与疲劳辉纹的混合形式、疲劳辉纹形貌,分别如图4b~d所示。

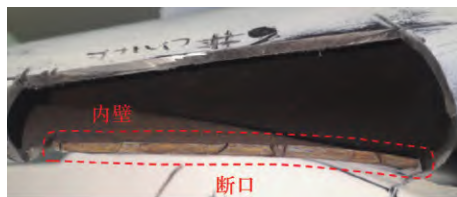
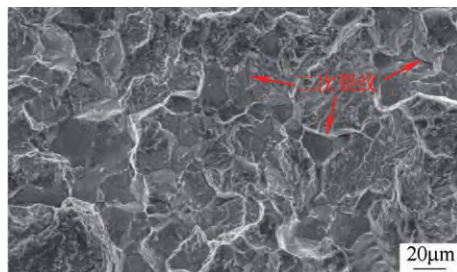


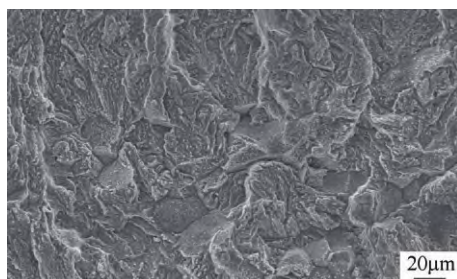
图3 后扭力梁断口和内壁



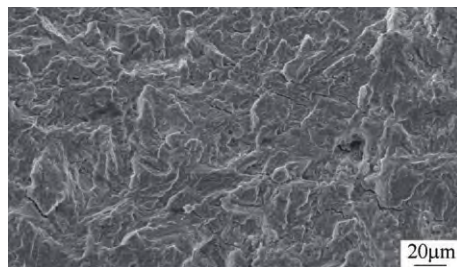
a) 内壁处断口形貌及腐蚀凹坑



b) 沿晶形貌和二次裂纹



c) 沿晶形貌和疲劳辉纹

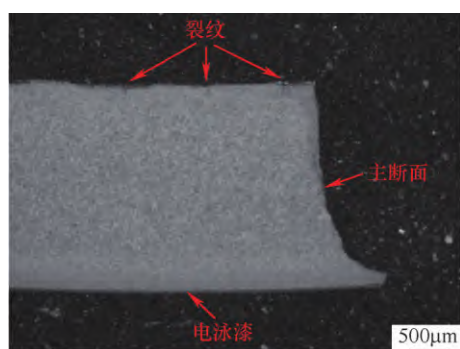


d) 疲劳辉纹

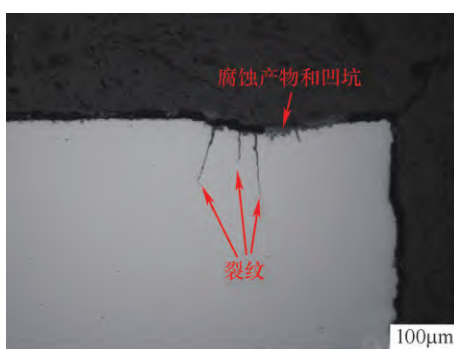
图4 断口微观形貌

3 金相组织检测分析

沿垂直于后扭力梁断口主断面的方向线切割进行金相制样，打磨抛光后使用体视显微镜和金相显微镜进行检测分析。后扭力梁内壁侧除主断面外还有多条裂纹，裂纹尚未扩展至后扭力梁外壁侧，后扭力梁外壁侧电泳漆完整无破损，如图5a所示。对图5a中存在裂纹的区域放大后（见图5b），发现后扭力梁内壁侧表面存在腐蚀产物和凹坑，裂纹起始于后扭力梁内壁侧的腐蚀凹坑并向外壁侧扩展。使用4%的硝酸酒精腐蚀后观察后扭力梁的金相组织，



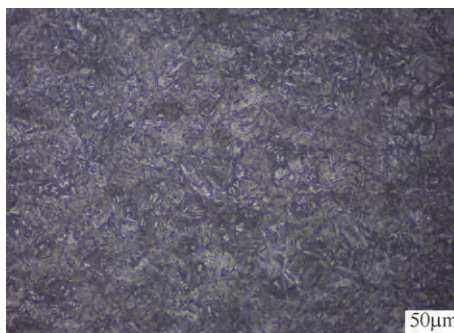
a) 宏观金相组织



b) 腐蚀凹坑和裂纹



c) 表面金相组织



d) 心部金相组织

图5 宏观和微观金相组织

表1 扭力梁材料化学成分（质量分数）

(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Ti
要求值	0.20~0.25	≤0.40	1.00~1.40	≤0.025	≤0.010	0.01~0.06	≤0.005	≤0.35	0.02~0.05
实测值	0.21	0.23	1.27	0.019	0.004	0.03	0.002	0.14	0.03

表2 硬度检测结果 (HRC)

测试点	要求值	实测值
1	28~37	36.5
2		36.9
3		36.2

5 结果分析和讨论

开裂的后扭力梁化学成分分析和硬度检测结果符合材料标准和图样技术要求，后扭力梁金相组织为保持马氏体位向的回火索氏体，开裂位置表面组

织显示其表面和心部组织均为保持马氏体位向的回火索氏体，分别如图5c、d所示。观察结果显示，后扭力梁表面组织无脱碳现象，主断面及主断面附近的裂纹两侧无脱碳或夹杂等缺陷。

4 化学成分分析

使用直读光谱仪对后扭力梁材料化学成分进行分析，结果符合标准Q/BQB 315—2023《热冲压用热连轧钢板及钢带》要求，见表1。使用硬度计对后扭力梁进行硬度检测，结果符合图样技术要求，见表2。

织无脱碳现象，断面及其附近的裂纹两侧无脱碳或夹杂等缺陷，据此可以排除材料或热处理工艺不当导致开裂。后扭力梁裂纹两侧电泳黑漆无磕碰或其他损伤，宏观断口呈有棱线分布的多段式，断口及后扭力梁内壁存在腐蚀红锈，断口微观形貌显示后扭力梁内壁侧存在腐蚀凹坑，以腐蚀凹坑为中心的断口形貌除磨损区域外，主要呈沿晶形貌并有较严重的腐蚀现象，后扭力梁内壁与外壁之间的断口，

由内向外依次出现沿晶形貌并有二次裂纹、沿晶形貌与疲劳辉纹混合形式、疲劳辉纹形貌,说明后扭力梁开裂由内到外依次经历腐蚀、沿晶和疲劳。金相检测显示除主断面外,后扭力梁内壁侧存在多处腐蚀凹坑和以腐蚀凹坑为起点的裂纹,这些裂纹尚未扩展到后扭力梁外壁。应力腐蚀开裂是指高强度组织敏感的零件在拉应力和腐蚀介质的作用下产生的低应力脆性断裂现象^[7],断裂特征表现为沿晶形貌并有腐蚀及二次裂纹分布^[8]。开裂的后扭力梁材料硬度超过33HRC,组织为保持马氏体位向的回火索氏体,试验过程中有拉应力存在,内壁存在腐蚀红锈和腐蚀凹坑,同时满足应力腐蚀开裂三要素条件,且断口和金相检测结果也符合应力腐蚀开裂的断裂特征。综上可知,后扭力梁开裂模式首先为应力腐蚀开裂,防腐处理不良导致后扭力梁内部存在腐蚀环境,在腐蚀介质和试验拉应力的共同作用下,高强度组织敏感的后扭力梁首先从内壁处发生应力腐蚀开裂并向外壁处扩展,裂纹扩展过程中腐蚀介质的作用逐渐减弱,后扭力梁开裂模式由应力腐蚀开裂转变为疲劳开裂。由于应力腐蚀开裂的源头有多处,因此导致后扭力梁断口宏观形貌呈多段式,相邻源头的裂纹扩展交汇处形成棱线。

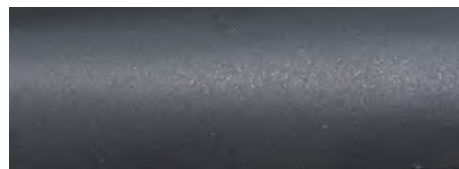
6 整改和验证

针对后扭力梁开裂问题,采取改进措施如下:后扭力梁生产工艺流程增加各工序后扭力梁内壁状态检测;原材料制管完成包装前、下料工序打开包装后,检查管材内外表面是否有明显油迹;后扭力梁制作完成后对内部进行目视检测并喷涂防锈油;总成焊接密封前目视检测确认后扭力梁内壁无腐蚀现象。采用改进措施后对后扭力梁总成进行疲劳强度试验,试验完成率为100%,无开裂现象。试验后对试样进行剖切检测,后扭力梁内壁无腐蚀和开裂现象,如图6a所示。取试样进行截面金相检测,无腐蚀或裂纹存在,如图6b所示。

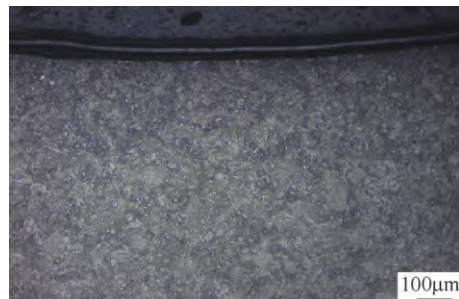
7 结束语

1) 后扭力梁内壁防腐处理不良引起腐蚀,致使其在疲劳强度试验中发生应力腐蚀开裂,随试验的进行,腐蚀介质作用减弱,后扭力梁开裂模式转变为疲劳开裂。

2) 通过后扭力梁生产全过程管控并验证后扭力



a) 内壁外观



b) 内壁金相组织

图6 试验样件内壁外观和金相组织

梁内壁防腐处理效果,可以避免后扭力梁内壁出现腐蚀,从而消除零件的应力腐蚀开裂风险。

3) 后扭力梁属于高强度组织敏感的零件,如服役环境存在拉应力或零件自身有残余内应力,则应通过表面防护处理来隔离腐蚀环境。

参考文献:

- [1] 张岩红, 许东辉, 冯海龙, 等. 支撑内压对某型高强度钢扭力梁液压成形的影响[J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 118-126.
- [2] 李青, 王岩松, 赵礼辉, 等. 扭转梁后桥焊接残余应力与变形研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (19): 192-196.
- [3] 李欢, 刘宁, 余振龙. 某电动出租车扭力梁开裂失效分析与改进研究[J]. 现代制造工程, 2023 (5): 45-50.
- [4] 周兵, 曾凡沂, 吴晓建, 等. 扭力梁疲劳寿命与减振器阻尼关系的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49 (10): 2472-2479.
- [5] 余小华. 含硼钢管状扭力梁热处理脱碳层对疲劳性能的影响[J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 235-240.
- [6] 王韬, 杨旭静, 李茂君, 等. 扭力梁式后悬架扭转工况下横梁疲劳特性研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (1): 231-239.
- [7] 沈蓬. 机械工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 李兴超, 范瑞君, 顾国荣. 汽车前稳定杆断裂失效分析[J]. 汽车工艺与材料, 2016 (12): 39-42.

(收稿日期: 20241225)