

汽车轮毂疲劳裂纹的原因分析

熊维亮^{1,2}, 顾佳亮¹, 谢光辉², 隋亚飞², 袁 玟¹, 靳 宾¹, 吴 腾^{1*}

¹武汉科技大学材料学部, 湖北 武汉

²涟源钢铁有限公司技术中心, 湖南 娄底

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月21日

摘 要

针对汽车轮毂在台架试验后产生疲劳裂纹的问题, 采用体视显微镜、金相显微镜、扫描电镜和硬度测试设备等, 对失效的汽车轮毂的成分、组织和性能进行分析。结果表明: 失效的主要原因是热影响区与焊接区附近有脆性氧化夹杂物形成裂纹源; 焊接热影响区的马氏体板条粗化, 承受疲劳载荷的能力弱导致疲劳开裂。

关键词

疲劳裂纹, 汽车轮毂, 显微组织, 硬度

Fatigue Cracks Analysis of Automotive Wheel Hubs

Weiliang Xiong^{1,2}, Jialiang Gu¹, Guanghui Xie², Yafei Sui², Wen Yuan¹, Bin Jin¹, Teng Wu^{1*}

¹Department of Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²Technology Center, Lianyuan Iron and Steel Group, Loudi Hunan

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

In view of fatigue cracks in automotive wheel hubs after bench testing, the composition, microstructure, and mechanical properties of the failed automotive wheel hubs are analyzed by using stereomicroscopes, optical microscopes, scanning electron microscopes, and hardness testing equipment. The results show that the main causes of the failure are the formation of brittle oxide inclusions near the heat affected zone and welding zone, which form crack sources. The martensite flat noodles in the welding heat affected zone are coarsened, and the ability to bear fatigue load is weak,

*通讯作者。

文章引用: 熊维亮, 顾佳亮, 谢光辉, 隋亚飞, 袁玟, 靳宾, 吴腾. 汽车轮毂疲劳裂纹的原因分析[J]. 材料科学, 2025, 15(5): 972-979. DOI: 10.12677/ms.2025.155102

leading to fatigue cracking.

Keywords

Fatigue Cracks, Automotive Wheel Hubs, Microstructure, Hardness

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

自中国加入世界贸易组织后，中国汽车市场大举对外开放，带动了国内汽车产业的迅速发展，其产
量现已占据全球三分之一，特别是 2024 年中国新能源汽车产销量首次突破 1000 万辆，中国在全球汽车
生产中的地位举足轻重。汽车用钢是汽车制造的基石，随着汽车行业对钢材需求的提高，汽车用钢的质
量、品种及规格等取得长足进步，应用领域不断拓展[1] [2]。各汽车用钢生产企业在此方面应势创新，积
极投入市场需求的新品研发，并与汽车零部件生产商合作开发新一代车轮用钢。该类钢的性能优劣直接
影响汽车行驶舒适度和安全性，尤其制造的轮毂在服役过程中受到疲劳载荷影响，要求有较高的力学性
能，其失效会导致交通事故发生，严重时甚至造成人员伤亡和重大经济损失[3]-[5]。

本文失效分析针对某钢厂生产的钢板，制成轮毂进行台架试验，将台架试验后钢样的裂纹部位进行
取样，采用体视显微镜、金相显微镜、扫描电镜和显微硬度计对汽车轮毂的显微组织和力学性能进行研
究，为提高构件质量提供参考依据。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

Table 1. Chemical composition of tested steel (mass fraction,%)
表 1. 试验钢的化学成分(质量分数，%)

编号	C	Si	Mn	P	S	Al	N	B	Fe
1#	0.22	0.12	1.2	≤ 0.008	≤ 0.006	0.04	0.004	0.0024	余量
2#	0.10	0.02	5.0	≤ 0.006	≤ 0.006	0.03	0.005	0.0003	余量

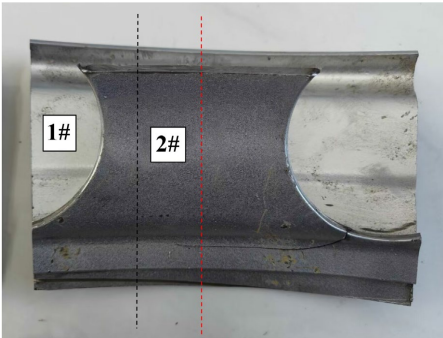


Figure 1. Diagram of failed samples taken from the hub of the test bench
图 1. 台架轮毂上取的失效试样图

试验钢为 22MnB5 钢(1#试样)和中锰钢(2#试样)经激光焊接而成, 其具体成分见表 1。焊接部位处于图 1 两试样下方弯折线下部。台架试验中裂纹首先从 2#钢的焊接处产生, 向上疲劳扩展到风口(圆弧处), 向下扩展到焊接区域。

2.2. 测试过程及方法

首先用锡纸封闭裂纹的开口, 用酒精洗涤试块浮尘, 撕掉锡纸后将两试块分别在酒精中用超声波清洗微浮尘以提高成像质量; 分析试样取在垂直图 1 底边近裂纹开裂地方并使用线切割进行切割, 如图 1 红线所示, 切开后的 1#试样和 2#试样可以分开, 接着采用体视显微镜和扫描电镜(SEM)及其能谱仪(EDS)对裂纹表面及扩展进行观察分析。裂纹扩展形貌先采用体视显微镜对其观察和拍照, 照片放大倍数用试样旁边放置钢尺来确定, 每格为 1 mm, 并拼接照片以展示失效试样开裂的宏观全貌; 再使用 FEI Nova 400SEM 型场发射扫描电镜对失效试样裂纹源及裂纹中心部位进行观察。

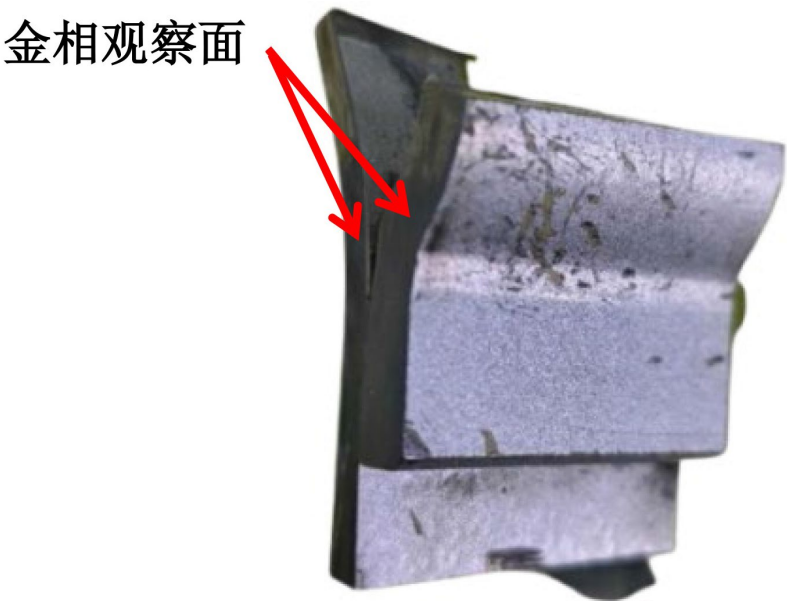


Figure 2. Microstructure observation area diagram of the tested steel
图 2. 试验钢的金相观察部位图

图 2 为金相观察面取垂直裂纹截面, 如图 1 黑线所示, 其经过手动研磨和抛光后再用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶侵蚀 15 s, 侵蚀完成后用清水冲洗去除侵蚀液, 再用酒精冲洗去水, 之后使用吹风机吹干进行组织分析(HAL 100 型金相显微镜), 对未失效各部位金相组织进行对比研究。最后, 使用显微硬度计(HV-1000B)对各部位硬度进行测试分析, 加载力为 500 gf。

3. 试验结果与分析

3.1. 疲劳裂纹的宏观形貌

图 3 为试验钢裂纹断口形貌, 如图 3(a)所示为其裂纹的拼接形貌, 裂纹源为红色字体所标识。底部边缘存在着多条裂纹源, 将裂纹源处放大(图 3(b)), 其表层较为光滑, 没有氧化层覆盖, 白色应该是小尺寸氧化物。从图 3(b)裂纹源局部放大图和图 3(c)、图 3(d)裂纹源倾斜 15°和 45°形貌上看, 裂纹最宽处在钢的焊接热影响区的亚表面层, 裂纹应该起源于其扩展面的次表面层。

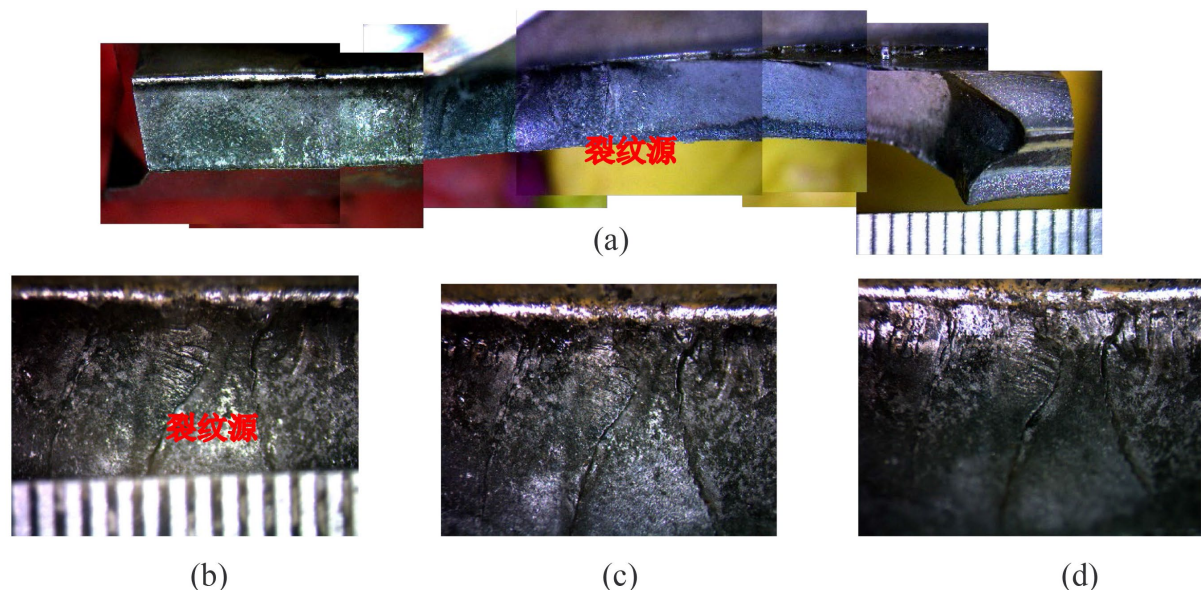


Figure 3. Fracture morphology of fatigue cracks of the tested steel. (a) Splicing morphology; (b) Flat magnification; (c) Tilt at 15°; (d) Tilt 45°

图 3. 试验钢疲劳裂纹断口形貌图。(a) 拼接形貌图；(b) 平放放大图；(c) 倾斜 15°图；(d) 倾斜 45°图

3.2. 疲劳裂纹的微观形貌

图 4 为采用 SEM 对失效试样裂纹源观察结果，试验钢裂纹源断口干净，呈现河滩花样，只有少量氧化物。样品河滩花样处裂纹向四周扩展，且裂纹源处存在片状脆性氧化物。

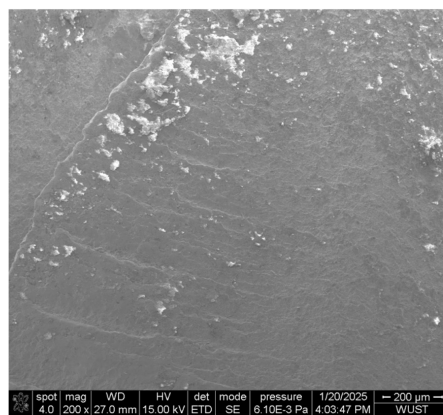


Figure 4. Crack source morphology of the tested steel

图 4. 试验钢裂纹源形貌

采用 EDS 对试验钢中白色区和灰黑色区的氧化物进行观察，图谱中(图 5)出现 Fe、O、C 元素，表明白色产物为氧化铁。图 6 为裂纹源附近分析结果，出现 Al、O 元素谱线，表明此处存在 Al_2O_3 复合夹杂物。这些氧化物夹杂硬度高，与汽车轮毂材料的变形协调能力差，随着疲劳循环加载次数增加，塑性变形区有大量位错产生，变形愈发困难，夹杂物附近易造成应力集中，持续加载就会成为裂纹源。该夹杂物可能是工件焊接时对焊接表面清洗后的残留氧化物，应该尽可能避免和清除。裂纹扩展面的次表面层中有深坑，应该是裂纹起源地，这验证了宏观分析结果。

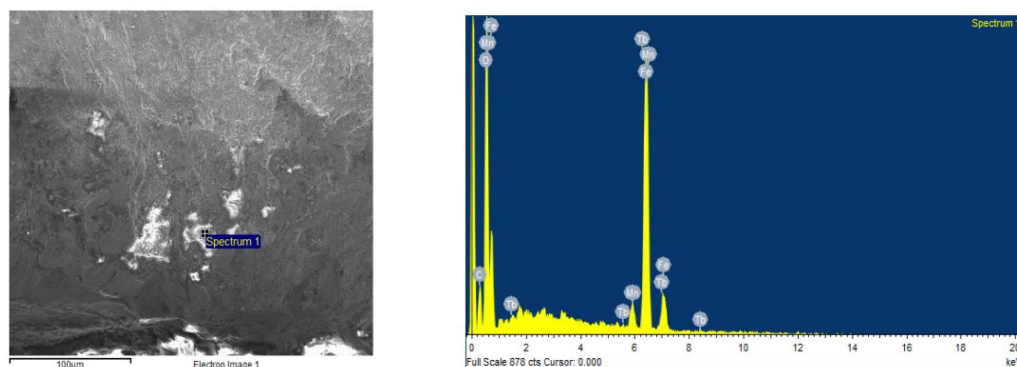


Figure 5. EDS analysis results of white area crack source of the tested steel

图 5. 试验钢裂纹源白色部位 EDS 分析结果

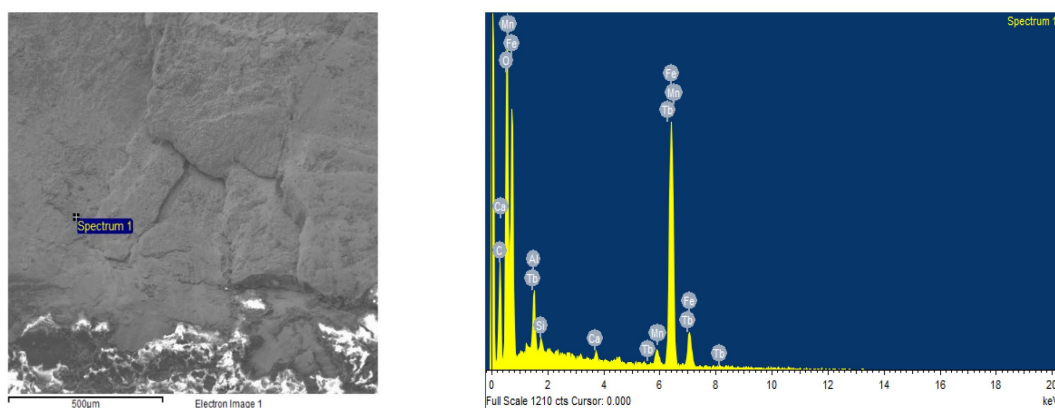


Figure 6. EDS analysis results of black area crack source of the tested steel

图 6. 试验钢裂纹源黑色部位 EDS 分析结果

3.3. 试验钢的显微组织

图 7 为试验钢焊接处不同区域显微组织。由组织观察可知, 1#试样为 22 MnB5, 微量的 B 较大的提高了钢的淬透性, 其基体为马氏体组织(如图 7(a)), 1#试样的热影响区 1 也为马氏体组织(如图 7(b)), 马氏体板条粗化; 焊接区组织(如图 7(c))出现少量贝氏体组织, 是由于中锰钢的淬透性较 22 MnB5 的要弱, 得到马氏体和贝氏体的混合组织; 2#试样为中锰钢, 其碳含量较低为 0.1%, 会析出少量铁素体, 但锰含量较高为 5.0%, 可以扩大奥氏体相区, 淬火后得到较多的马氏体和部分残余奥氏体, 因此, 2#试样的组织为马氏体、残余奥氏体和少量铁素体(如图 7(e)); 2#试样的热影响区 2 的组织为贝氏体和马氏体复合组织, 应该是 1#试样中的碳扩散进入 2#试样中有利于提高淬透性得到了部分贝氏体组织。

试验钢各区域组织均以马氏体为主, 通过扫描电镜进一步放大观察其内部结构, 如图 8 所示。1#试样中马氏体以纤维状为主, 还有部分块状马氏体(图 8(a))。1#试样的热影响区中马氏体板条明显粗化(图 8(b)), 应该是受热后的奥氏体在热影响区靠近融合线附近的过热区, 在强烈的焊接热量作用下, 该区内晶粒相互吞并和迁移导致晶粒粗化, 而晶粒越粗, 脆性转变温度会越高使脆性增加, 粗化的奥氏体晶粒在冷却过程中相变易形成粗化的马氏体板条, 使得热影响区存在韧性很低的局部脆化区, 其承受疲劳载荷的能力弱, 易造成开裂失效。焊缝区组织比较均匀(图 8(c)), 均是纤维状马氏体, 也有少量贝氏体混合其中。2#试样的热影响区(图 8(d))中马氏体以岛状和小块状为主, 也有部分贝氏体。2#试样中马氏体也是以纤维状为主, 还有部分呈块状, 块的体积比 1#试样的小, 也有少量针状铁素体从过冷奥氏体中析出。

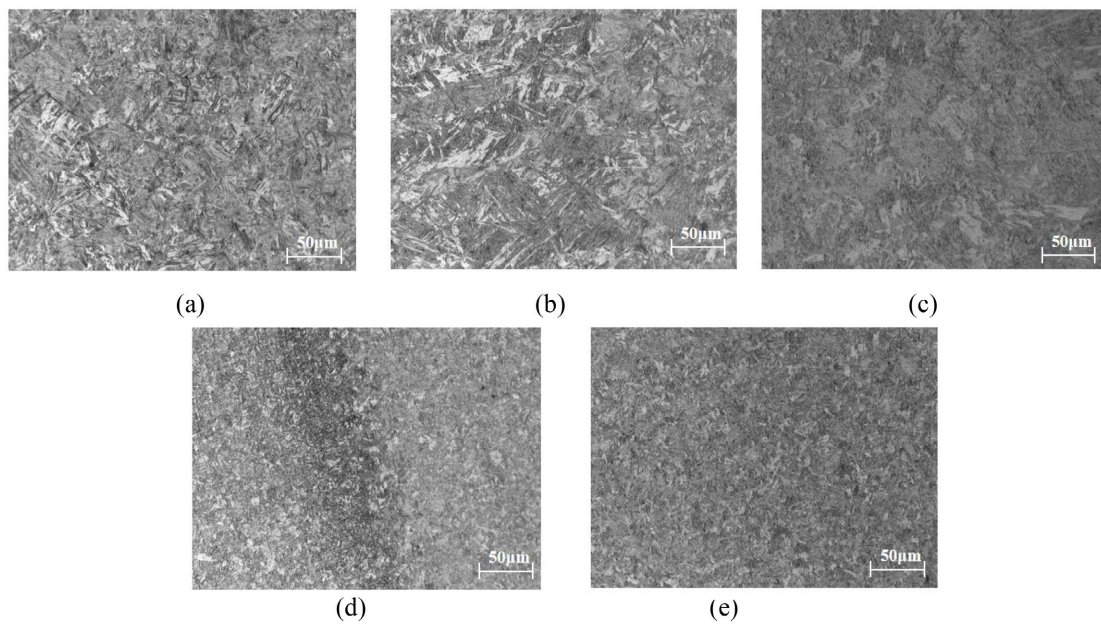


Figure 7. Microstructures of the tested steel with various regions. (a) Microstructures of 1# sample; (b) Heat affected zone microstructures of 1# sample; (c) Microstructures of weld seam; (d) Heat affected zone microstructures of 2# sample; (e) Microstructures of 2# sample

图 7. 试验钢各区域金相组织。(a)1#试样组织; (b)1#试样热影响区组织; (c)焊缝组织; (d)2#试样热影响区组织; (e)2#试样组织

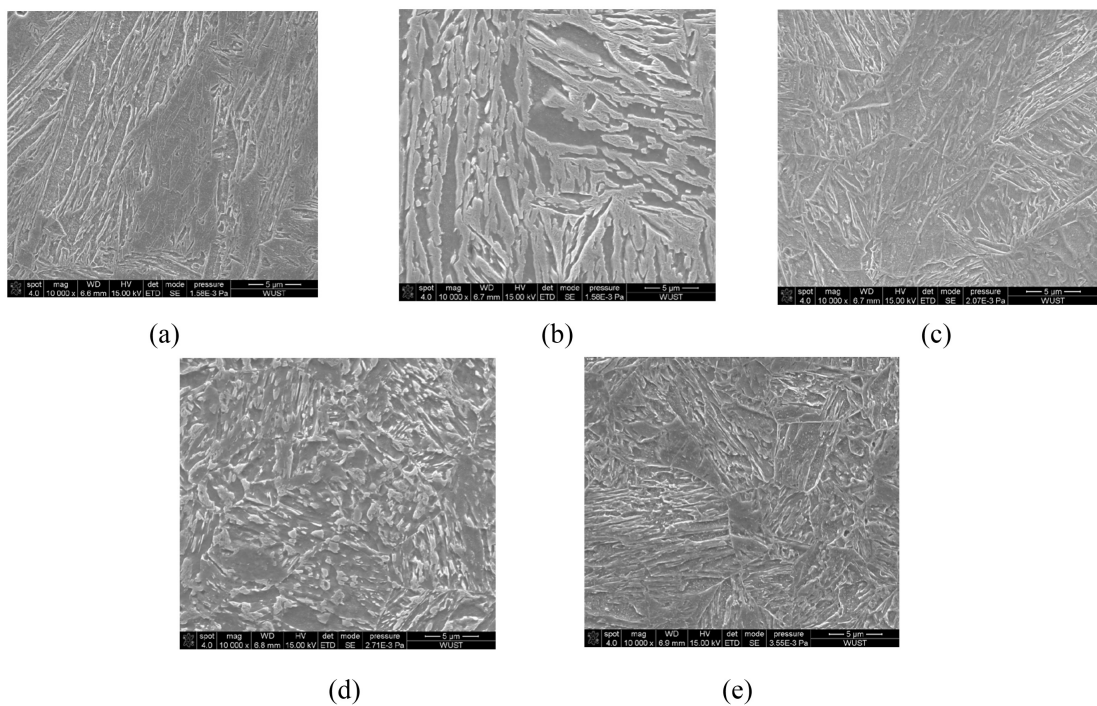


Figure 8. SEM micrographs of the tested steel with various regions. (a) Microstructures of 1# sample; (b) Heat affected Zone microstructures of 1# sample; (c) Microstructures of weld seam; (d) Heat affected zone microstructures of 2# sample; (e) Microstructures of 2# sample

图 8. 试验钢各区域扫描组织图(a)1#试样组织; (b)1#试样热影响区组织; (c)焊缝组织; (d)2#试样热影响区组织; (e)2#试样组织

3.4. 硬度测试

试验钢不同区域的硬度值如图9所示, 1#试样基体的平均硬度为 476.8 HV, 其热影响区的平均硬度为 462.8 HV, 比基体硬度要低, 是由于粗化的马氏体板条受载时容易形成微裂纹, 最终发展成疲劳开裂失效。因此, 应该调整激光焊接参数使该区域组织细小。焊接区组织是熔化后激冷组织, 其冷却速度低于 1#试样的热影响区, 有贝氏体出现, 该区域组织比较均匀, 硬度值波动比较小, 其平均硬度为 448.1 HV。2#试样为马氏体、残余奥氏体和铁素体的复合组织, 其平均硬度为 410.5 HV, 较 1#试样基体低, 其热影响区出现较多的贝氏体, 与 2#试样基体硬度相比有所降低为 387.2 HV。

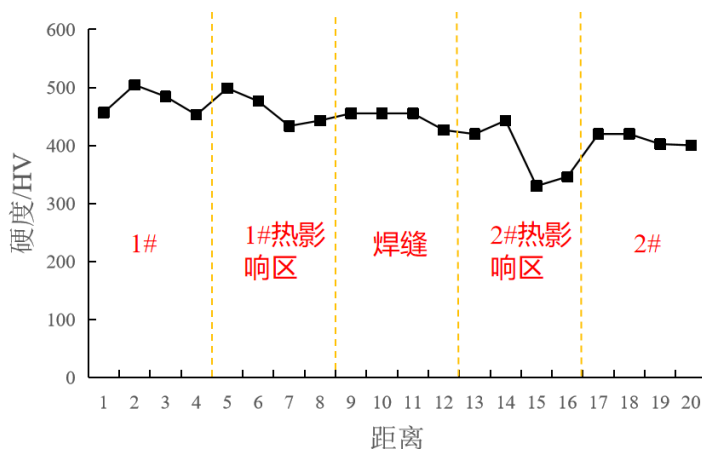


Figure 9. Hardness of the tested steel in different regions

图9. 试验钢不同区域的硬度

根据疲劳裂纹的形貌观察和组织分析, 裂纹扩展在次表面层, 其扩展速度受内应力影响。焊接时热影响区加热形成奥氏体, 在基体激冷下冷却到 M_s 点以下发生马氏体相变, 其膨胀受基体室温马氏体组织抑制, 基体马氏体强度高和压制这部分相变, 形成很大组织应力, 所以导致裂纹在次表面层内扩展。热影响区组织对裂纹形成极为关键, 而激光焊接工艺参数对热影响区组织有重要影响, 应尽可能调整焊接工艺参数使各区域组织细小。

4. 结论

从形貌分析、显微组织观察和硬度测试可发现, 引起汽车轮毂失效的原因为以下两点。

1) 焊接热影响区的马氏体板条明显粗化, 承受疲劳载荷的能力弱, 受载时容易形成微裂纹, 最终发展成疲劳开裂。

2) 疲劳裂纹多发源于热影响区与焊接区边界, 附近有氧化夹杂物脆性大, 是裂纹形成源头。

因此, 要调节焊接工艺, 焊后利用余热使焊缝回火降低残余组织应力。此外, 使热影响区形成更多性能较好的针状铁素体以提高钢的强韧性。

基金项目

湖北省教育厅指导性项目“低碳热轧超高强双相钢的强韧化机理研究”(项目编号: B2023004)。

参考文献

- [1] 谭莹, 莫明珍, 李小敏, 等. 铝合金轮毂失效分析[J]. 铸造, 2017, 66(9): 983-986.

-
- [2] 刘天平, 蔡梅芹, 李泽同, 等. 新型球墨铸铁汽车轮毂的研制开发[J]. 现代铸铁, 2022, 42(4): 1-4+9.
 - [3] 何胜豪, 朱京妃, 叶枫, 等. 汽车制动器内轮毂裂纹失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2023(4): 59-63.
 - [4] 程鹏, 李安敏, 夏静静, 等. 铸造耐热铝合金耐热相的研究进展[J]. 材料科学, 2024, 14(4): 433-442.
 - [5] 侯沛云, 杜晓钟. 车轮轧制用斜辊径向通裂失效分析[J]. 太原科技大学学报, 2022, 43(1): 29-33.