

激光离散淬火钢轨的滚动接触疲劳磨损性能

杨志翔¹, 叶祖福¹, 王爱华², 叶兵¹, 熊大辉¹

(1. 华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223;

2. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 采用激光离散处理对钢轨表面进行了强化,旨在提高钢轨的使用寿命。研究了3种不同分布形式的激光离散淬火工艺,利用滚动接触疲劳磨损试验机测定了钢轨的疲劳磨损性能,并对磨损表面形貌、截面形貌以及磨损机理进行了分析。结果表明:未处理钢轨试样表面发生塑性变形和疲劳剥落,产生严重的波磨,磨损量1.102 g;激光离散淬火强化后,波磨消失,磨损量显著降低,但是在试样边缘和淬火区界面有裂纹产生;当淬火区以间隔1 mm、倾斜60°分布时,试样中心的界面裂纹得到有效控制,磨损量最低,相比未处理试样减少了63%;通过缩小淬火区间隔,增大淬火区倾斜角度,可以有效提高激光离散淬火层的裂纹抗性和磨损性能。

关键词: 钢轨; 激光离散淬火; 滚动接触疲劳; 磨损

中图分类号: TG174.4; TG115.58 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2020)08-0207-09

Rolling contact fatigue property of laser dispersed quenched steel rail

Yang Zhixiang¹, Ye Zufu¹, Wang Aihua², Ye Bing¹, Xiong Dahui¹

(1. Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430223, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Laser dispersed quenched process was carried out on steel rail surface in order to improve the service life of the rail. Three different distribution patterns for the laser dispersed quenched were used, and rolling contact fatigue wear test machine was used to measure the fatigue wear property of the rail, and the wear surface morphology, cross-sectional morphology and wear mechanism were analyzed. The results show that the wear loss of original state specimen is 1.102 g, and fatigue spall and plastic deformation with severe corrugation occur on the surface of the original specimen. After laser dispersed quenched process, the corrugation is eliminated, and the wear loss of rail specimen reduces significantly, but cracks occur at the edge of contact zone and the interface of laser hardened region. The cracks at the center of contact zone can be effectively removed when the hardened regions are distributed with 1 mm spacing and 60° inclination, and the lowest wear loss is acquired at this condition, which decreases by 63% compared with that of the original state specimen. It can effectively improve the cracking resistance and wear property of the laser dispersed hardened layer by combination of reducing the spacing and increasing the tilt angle of laser hardened region.

Keywords: steel rail; laser dispersed quenched; rolling contact fatigue; wear

随着铁路运行速度和轴重的增加,轮轨磨损与疲劳损伤问题变得日益严重,对钢轨的性能提出了越来越高的要求^[1]。在重载铁路和高速铁路上,全长热处理钢轨(俗称淬火轨)已经得到了广泛的使用^[2-3]。但是在实际使用中,淬火轨的表面硬度(32~38 HRC)依然偏低,重载线路的侧磨、压溃、剥离掉块等问题依旧很突出,尤其在重载小半径线路上,钢轨侧磨大大缩短了钢轨的使用寿命,增加了运营成本^[4]。为进一步提高钢轨的磨损性能,许多学者开展了激光硬化钢轨的研究。目前钢轨的激光强化技术主要有两个方向,整

面激光淬火和离散激光淬火。整面激光淬火通过宽光斑将整个钢轨踏面均匀强化,强化面积大,磨损性能提升明显^[5-7]。很多学者认为大片连续分布的马氏体层会影响钢轨的疲劳性能,并开发了激光离散淬火技术^[8-13]。通过点状光斑形成不连续的淬火区,未淬火区域保持韧性,将硬化的淬火区离散分割,即使产生裂纹,裂纹也只在淬火区内部扩展不会相互连接,降低了裂纹的危害^[11]。但是报道显示,离散激光淬火产生的大量强化区和未强化区界面是潜在的裂纹源,在该界面处容易产生裂纹^[11,13]。主要有两方面原因,一方面未强化区域的基材硬度较低,被优先磨损去除,导致硬化区域突出,硬化区边缘在车轮冲击下易产生裂纹;另一方面由于硬化层覆盖率过低或分布不均匀,未强化区域被磨损后,导致车轮和轨道接触不均匀,产生振动和冲击,从而加速了裂纹的产生。

收稿日期: 2020-02-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102700)

作者简介: 杨志翔(1992—),男,工程师,硕士,主要研究方向为激光表面强化及增材制造, E-mail: yangzhixiang0523@qq.com。通讯作者: 叶祖福,高级工程师, E-mail: yezufu@126.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.08.041

目前钢轨表面离散激光淬火试验都是使用的点光斑, 淬火层面积较小, 存在大量的强化区和未强化区界面, 且淬火层之间的界面完全垂直于运动方向^[8, 12], 都会加速界面裂纹的产生。因此, 为了减少离散淬火界面对磨损性能的影响, 考虑制备倾斜的淬火带, 通过让淬火区错位和倾斜扫描, 使车轮在运动过程中下方始终有同等面积的强化区和未强化区, 实现车轮和淬火区的均匀接触, 提高离散激光淬火层的裂纹抗性。本文在钢轨试样表面制备了3种不同倾斜角度和间隔的激光离散淬火层, 并使用滚动接触疲劳磨损试验机对疲劳磨损性能进行了测试, 并对试样表面磨损形貌、截面形貌以及磨损机理进行了分析。研究结果对钢轨踏面磨损性能提升和激光淬火工艺优化可以提供有益的技术指导和参考。

1 试验材料和方法

本文选用钢轨材料 U71Mn 钢, 经过欠速淬火处理后, 其化学成分如表 1 所示。钢轨在工艺试验前用角磨机对表面进行清理。激光光源采用 10 kW IPG 光纤激光器, 激光光斑为 6 mm × 6 mm 的方形光斑, 使用表 2 所示的工艺参数对钢轨试样进行激光淬火, 扫描速率 10 mm/s。淬火层深度 0.7 mm。激光淬火设备使用 6 轴 KUKA 机械手搭配 2 轴变位机作为运动装置, 机械手控制激光光斑运动, 同时使用变位机使试样旋转, 实现倾斜扫描的离散淬火。1 号试样作为对照组, 为未处理的基材。通过控制激光淬火区的倾斜角度和淬火区之间的间隔, 分别制备了 2 号、3 号和 4 号试样。

表 1 U71Mn 和 CL60 钢的名义化学成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal chemical composition of the U71Mn and CL60 steels (mass fraction, %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Cr	Ni
U71Mn	0.65 ~ 0.76	0.15 ~ 0.35	1.10 ~ 1.40	≤0.030	≤0.030	≤0.03	≤0.01	—	—
CL60	0.57 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.035	—	—	≤0.25	≤0.25

表 2 激光离散淬火工艺参数

Table 2 Laser dispersed quenched process parameters

Specimen No.	Method	Laser spot width/mm	Scanning speed/(mm · s ⁻¹)	Laser power/W	Tilt angle/(°)	Spacing width/mm
1	Untreated	—	—	—	—	—
2	Laser dispersed quenched	6	10	1250	45	4
3	Laser dispersed quenched	6	10	1250	45	1
4	Laser dispersed quenched	6	10	1250	60	1

使用线切割机取样, 制备金相试样, 采用 4% 的硝酸酒精腐蚀试样, 用 XJL-03 型立式光学显微镜观察组织, 使用 HVS-4000A 显微硬度计测定强化层的硬度, 加载砝码 200 g, 保压 15 s。

滚动接触疲劳试验采用 MJP-30 接触疲劳模拟试验机, 试验方法参考 YB/T 5345—2006 《金属材料滚动接触疲劳试验方法》。钢轨试样为磨损试样, 对磨试样为 CL60 钢(车轮用钢)。钢轨和对磨试样分别从轨头踏面和车轮边缘接近表面的位置取样, 试样的取样方式和尺寸如图 1 所示。图 2(a) 为加工好的钢轨试样, 图 2(b) 为加工好的车轮试样, 图 2(c~e) 为加工好的离散淬火试样。试样通过伺服电机驱动, 并用液压装置加载压力。试验参数通过赫兹接触理论计算得出, 试验载荷 4116 N, 接触区宽度 10 mm, 模拟接触应力 1000 MPa, 试验转速 500 r/min, 通过控制转速让上下试样产生 2% 的转速差(车轮试样转速 510 r/min), 总循环次

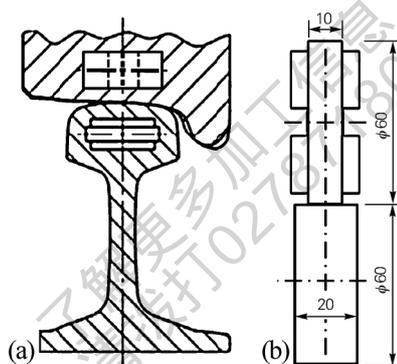


图 1 滚动接触疲劳磨损试样示意图

(a) 磨损试样取样位置; (b) 磨损试样尺寸

Fig. 1 Schematic diagrams of the rolling contact fatigue specimen

(a) sampling location; (b) size of specimen

数为 20 万次。对磨试样采用激光淬火和箱式炉回火处理, 将表面硬度调整到 50 ~ 52 HRC。通过电子天平称量磨损试样质量的变化评估磨损量。

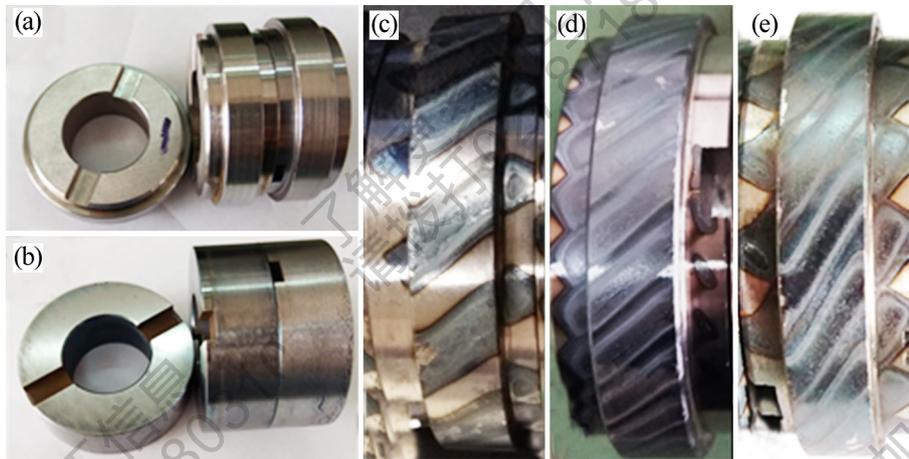


图 2 滚动接触疲劳磨损试样

(a) 钢轨试样; (b) 车轮试样; (c) 2 号试样; (d) 3 号试样; (e) 4 号试样

Fig. 2 Rolling contact fatigue specimens

(a) rail specimen; (b) wheel specimen; (c) No. 2 specimen; (d) No. 3 specimen; (e) No. 4 specimen

2 试验结果

磨损试验结果如表 3 所示, 1 号试样为原始状态, 硬度为 35.7 HRC, 经过 20 万转滚动磨损后, 钢轨试样磨损量 1.102 g, 车轮试样磨损量 1.035 g, 两者磨损量基本相当。2 号至 4 号钢轨试样表面通过激光离散淬火, 硬度提高到 62 HRC 以上, 磨损量相比未处理试样减小了一半。2 号试样的离散淬火区倾斜 45 度, 间隔 4 mm, 淬

火区覆盖面积最小, 磨损量 0.582 g, 是 3 个激光淬火试样中最高的。3 号试样激光离散淬火区间隔减小到 1 mm, 磨损量 0.467 g, 比 2 号试样略有减小。4 号试样激光离散淬火区倾斜角度增加到 60 度, 磨损量最低, 只有 0.408 g, 相比未处理试样减小了 63%。2 号、3 号、4 号车轮试样的磨损量相比未处理试样提高了 1 倍左右, 说明钢轨硬度的提高会增加车轮的磨损。

表 3 磨损试验结果

Table 3 Results of the wear test

Specimen No.	Method	Hardened layer depth/mm	Surface hardness/HRC	Wear loss of rail specimen/g	Wear loss of wheel specimen/g	Wear loss ratio between wheel and rail
1	Untreated	—	35.7	1.102	1.035	0.939
2	Laser dispersed hardened	0.7	62.1	0.582	2.190	3.763
3	Laser dispersed hardened	0.7	63.5	0.467	1.895	4.058
4	Laser dispersed hardened	0.7	62.7	0.408	2.399	5.880

磨损试样的表面形貌如图 3 所示, 1 号试样表面呈现明暗相间的条纹, 产生了严重的波磨。2 号、3 号、4 号试样表面没有波磨产生, 但是在淬火区界面有裂纹产生。2 号试样表面淬火层裂纹最严重, 裂纹主要集中在淬火区前缘的三角形区域, 产生大量网状裂纹。3 号试样淬火层的裂纹沿淬火区界面斜向分布, 裂纹数量有所减少。4 号试样淬火层的裂纹明显减少, 主要集中在淬火区首尾的尖角区域, 靠近试样边缘。

图 4 为 1 号试样的表面形貌, 试样表面产生波磨, 图 4(c) 为波峰和波谷的界面, 波峰比较光滑, 颜色较浅, 波谷被严重挤压, 表面粗糙且有轻微的氧化色, 图 4(d) 为波谷底部产生的裂纹。

图 5 为 2 号试样的表面形貌, 箭头指向试样的旋转方向。可以看到, 淬火区域表面光滑, 而没有淬火的区域表面粗糙, 并产生点状的剥落坑。在淬火区界面产生了严重的裂纹, 尤其是淬火层向前突出的区域, 裂纹已经形成网状互相连接。图 5(c) 显示, 背向旋转方向的淬火层界面只有轻微的裂纹产生, 从图 5(d) 可以看到, 裂纹是从界面向淬火区内部扩展的。

图 6 为 3 号试样表面的形貌, 随着离散淬火区间隔减小, 裂纹数量明显减少, 裂纹主要集中在面向滚动方向的淬火区界面, 最严重的区域淬火层已经开始剥落。由图 6(c) 可以看出, 边缘裂纹向淬火区内部扩展, 并被淬火区界面阻止。淬火层表面只产生浅层的

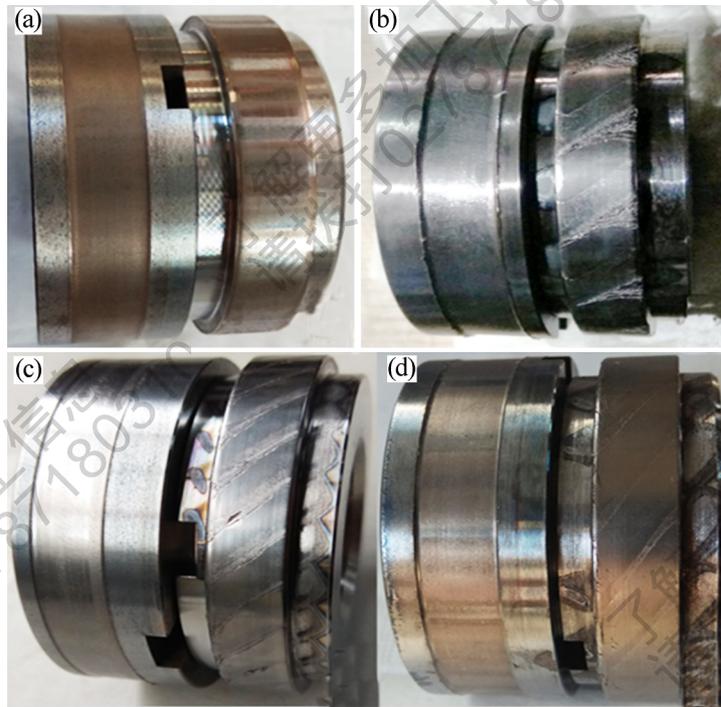


图3 磨损试样的宏观形貌

(a) 1号试样; (b) 2号试样; (c) 3号试样; (d) 4号试样

Fig. 3 Macromorphologies of the wear specimens

(a) No. 1 specimen; (b) No. 2 specimen; (c) No. 3 specimen; (d) No. 4 specimen

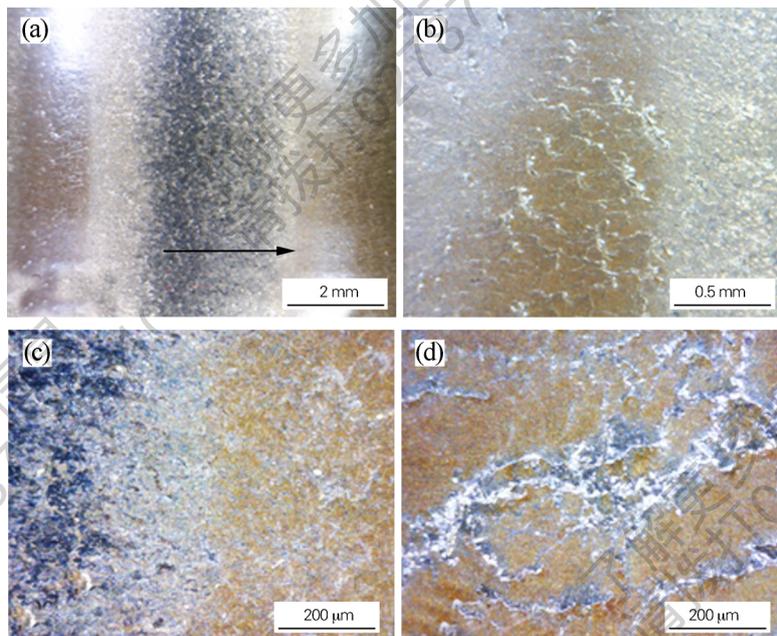


图4 1号试样的表面形貌

(a) 波峰; (b) 波谷; (c) 波峰波谷界面; (d) 波谷裂纹

Fig. 4 Surface morphologies of the No. 1 rail specimen

(a) wave crest; (b) wave trough; (c) interface between trough and crest; (d) cracks at wave trough

疲劳剥落(图6(e)),而淬火区之间的基材区域产生了大片的疲劳剥落(图6(f))。

图7为4号试样的表面形貌,可以看到随着倾斜

角度的增大,淬火区之间的基材得到了更好的保护,试样中心区域裂纹完全消除,只有在试样的边缘和淬火区的尖角位置有少量裂纹产生,且裂纹数量大大减少。

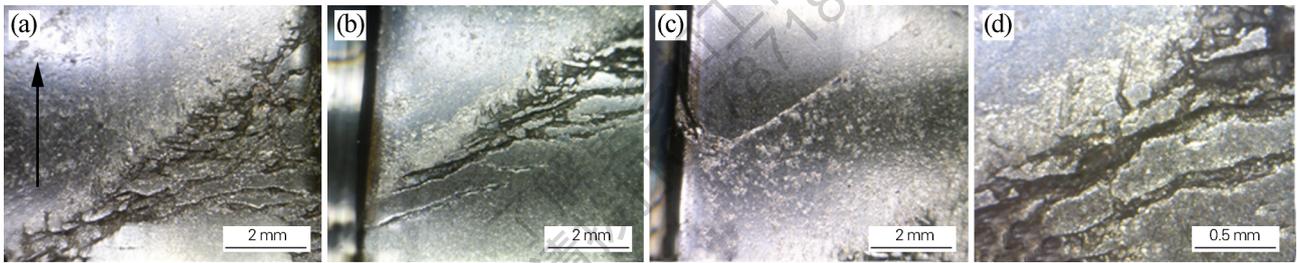


图 5 2 号试样的表面形貌

(a, b) 前缘裂纹; (c) 后缘裂纹; (d) 界面裂纹

Fig. 5 Surface morphologies of No. 2 rail specimen

(a, b) cracks at leading edge; (c) cracks at trailing edge; (d) cracks at interface

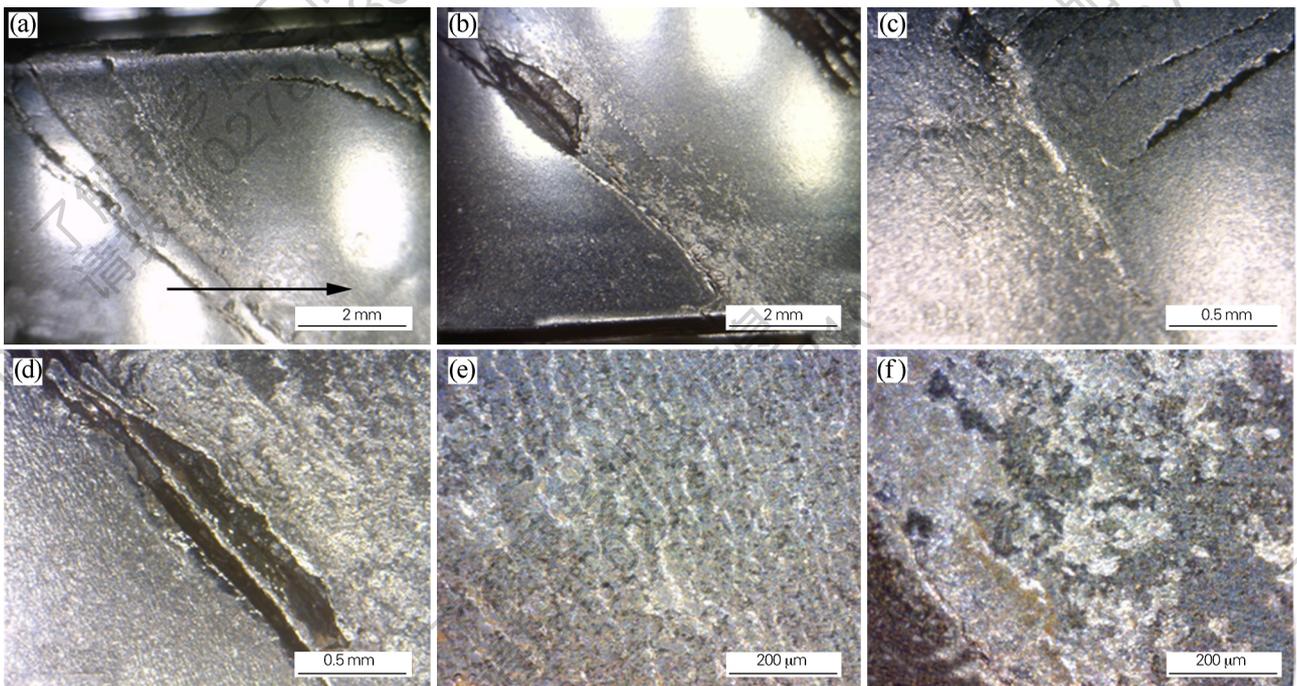


图 6 3 号试样的表面形貌

(a, b) 淬火区裂纹; (c) 后缘裂纹; (d) 前缘裂纹; (e) 淬火区; (f) 未淬火区

Fig. 6 Surface morphologies of No. 3 rail specimen

(a, b) cracks of hardened area; (c) cracks at trailing edge; (d) cracks at leading edge; (e) hardened area; (f) unhardened area

由图 7(c) 可以看出, 裂纹从淬火区界面产生, 并向内部扩展, 图 7(e) 为背向旋转方向的淬火区界面, 产生了微小的裂纹。

钢轨试样的断面和裂纹形貌如图 8 ~ 12 所示。图 8 为 1 号未处理的钢轨试样显微组织, 为细片状珠光体, 表层 0.1 mm 发生明显的塑性变形, 且有裂纹产生, 边缘材料被挤压到两侧形成 0.2 mm 的飞边。图 9 为 2 号、3 号、4 号试样纵截面裂纹形貌, 取样的位置都是靠近接触区边缘裂纹较多的区域, 箭头为试样的滚动方向, 图中白亮的为马氏体层, 3 个试样的裂纹都集中在面向滚动方向一侧。其中 2 号试样淬火层产生裂纹数量最多, 3 号试样裂纹数量减少, 但是出现掉块,

4 号试样裂纹最为细小。需要强调的是 4 号试样的纵截面取自边缘的开裂区域, 接触区中心大部分区域是没有裂纹产生的。

图 10 为 2 号试样纵截面的显微组织, 其淬火层产生了大量的密集裂纹, 在基材界面处裂纹扩展方向发生了偏转, 裂纹沿淬火层的底部扩展并互相连接, 淬火区前缘碎裂的马氏体块被压入基材, 图 10(b) 中可以观察到基材发生的塑性变形。图 10(c, d) 为背向旋转方向的淬火区界面, 由于滑差产生的摩擦力, 基材发生了指向界面的塑性流动(箭头所示)。在淬火区边缘处, 塑性流动被淬火区阻碍并向下偏转, 同时将边缘碎裂的马氏体块压入基材内部。

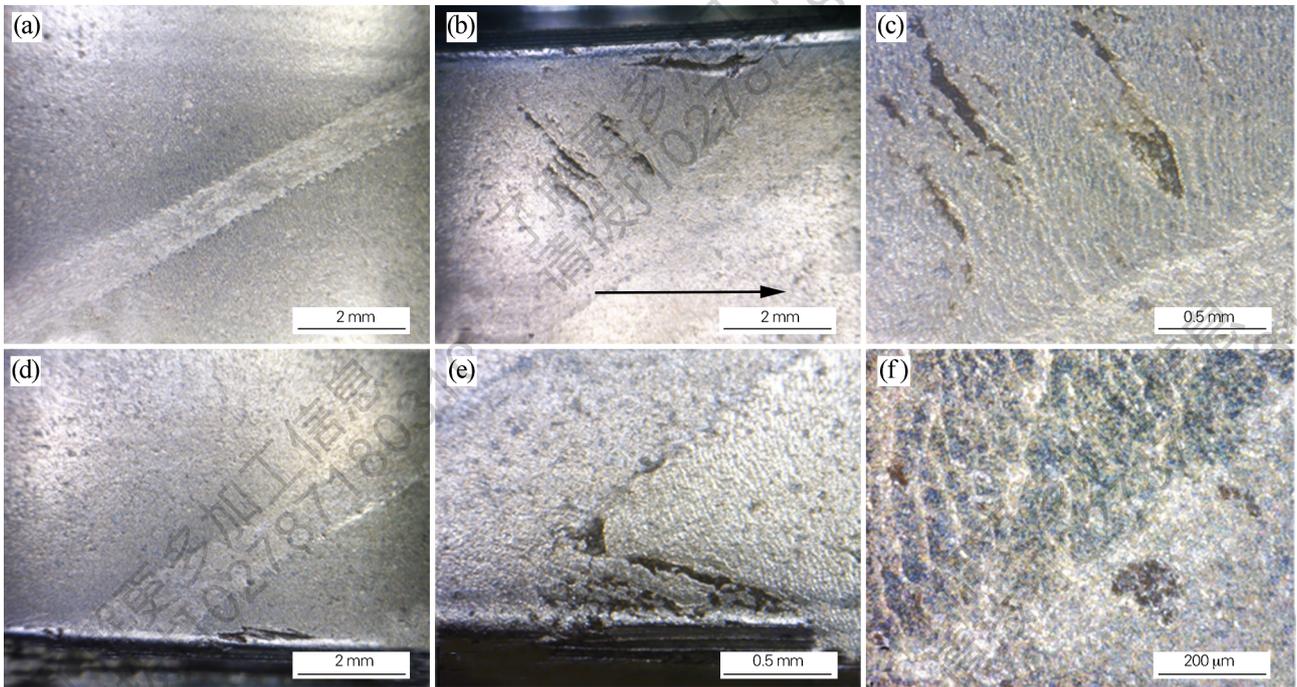


图7 4号试样的表面形貌

(a) 淬火区中部; (b,c) 淬火区前缘裂纹; (d,e) 淬火区后缘裂纹; (f) 淬火区界面

Fig. 7 Surface morphologies of the No. 4 rail specimen

(a) center of hardened area; (b,c) cracks at leading edge; (d,e) cracks at trailing edge; (f) interface of hardened area

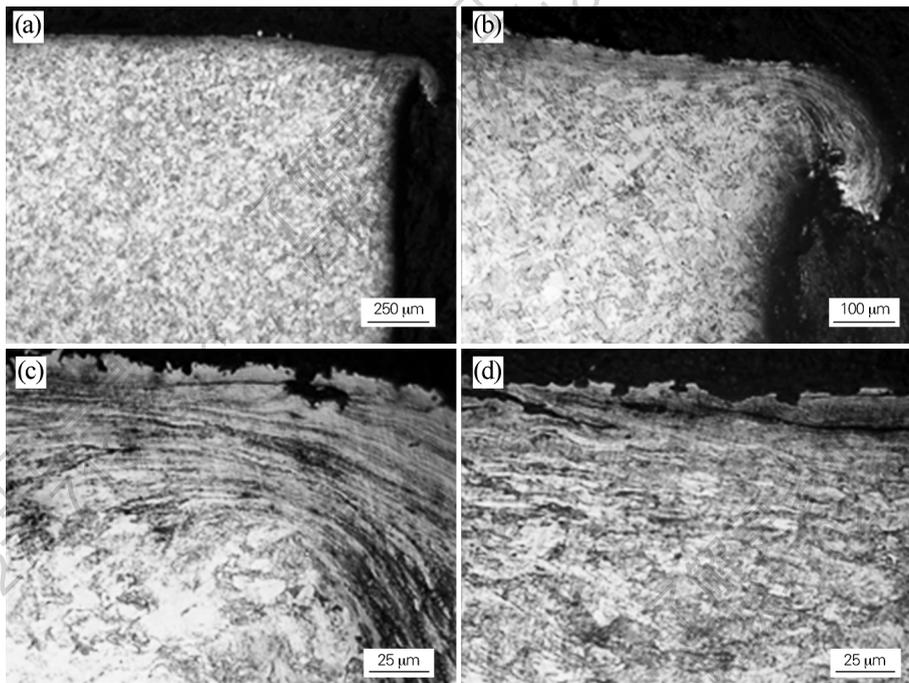


图8 1号试样横截面的显微组织(a,b)和塑性变形形貌(c,d)

Fig. 8 Cross-section microstructure(a,b) and plastic deformation morphologies(c,d) of the No. 1 specimen

图11为3号试样纵截面的显微组织,可以看到裂纹数量明显减少,淬火区前缘马氏体发生碎裂和挤压,基材产生明显的塑性变形(图11(b)),图11(d)显示间隔区域的塑性变形深度变浅了。图12为4号试样

纵截面的显微组织,4号试样的裂纹主要集中在淬火区前缘比较薄的区域,背向旋转方向的淬火区(图12(b))没有明显裂纹产生,只在淬火区最边缘产生了浅层的裂纹(图12(c)),从图12(d)可以看出,未淬火区

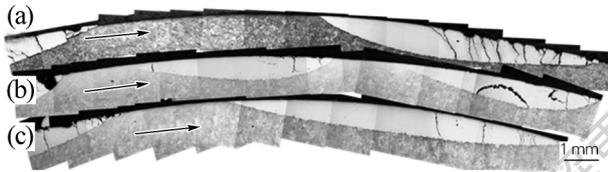


图 9 2 号 (a)、3 号 (b)、4 号 (c) 试样纵截面的裂纹形貌
Fig. 9 Vertical-section crack morphologies of the No. 2 (a), No. 3 (b) and No. 4 (c) specimens

的塑性流动依然存在,但是明显减弱。

为准确反映未淬火区域塑性变形的影响深度,测量了未淬火区域的显微硬度随深度的变化,如图 13 所示。试样未淬火区域由于塑性变形产生加工硬化,表面硬度提高,随着深度增加,硬度逐渐恢复到基材相同的水平。1 号未处理试样表面硬度达到 569.7 HV0.2, 2 号试样 519.8 HV0.2, 3 号试样 492.8 HV0.2, 4 号试样

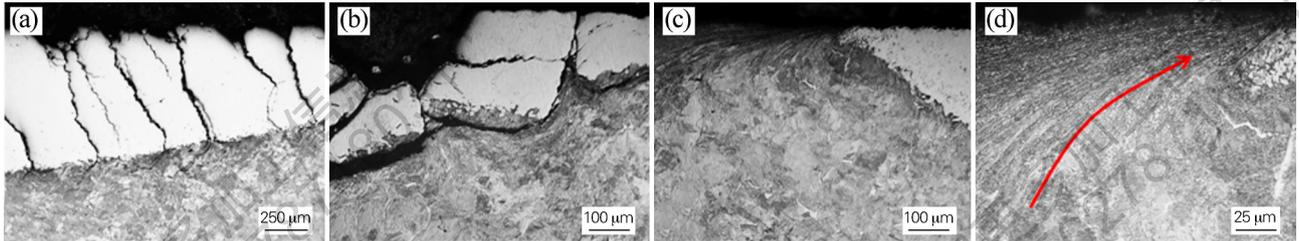


图 10 2 号试样纵截面的显微组织
(a) 淬火区中部裂纹; (b) 前缘裂纹; (c) 后缘界面; (d) 未淬火区
Fig. 10 Vertical-section microstructure of the No. 2 specimen

(a) cracks at central of hardened area; (b) cracks at leading edge; (c) interface of trailing edge; (d) unhardened area

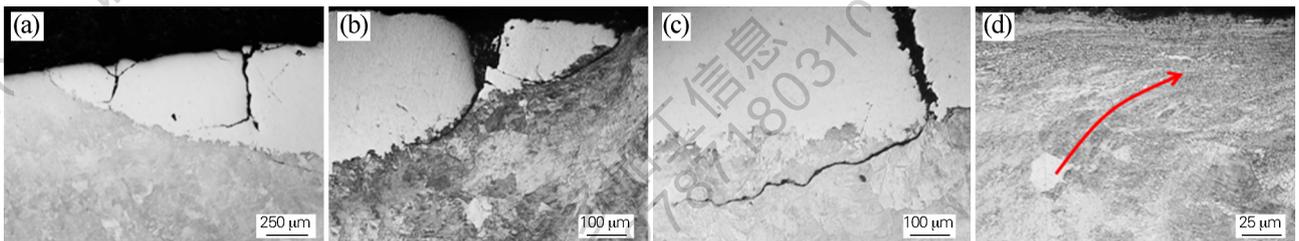


图 11 3 号试样纵截面的显微组织
(a) 后缘裂纹; (b) 前缘裂纹; (c) 底部界面; (d) 未淬火区
Fig. 11 Vertical-section microstructure of the No. 3 specimen

(a) cracks at trailing edge; (b) cracks at leading edge; (c) bottom interface; (d) unhardened area

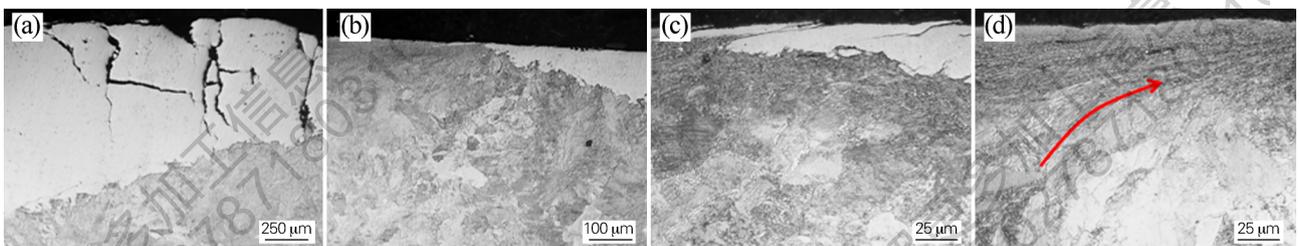


图 12 4 号试样纵截面的显微组织
(a) 前缘裂纹; (b) 界面; (c) 后缘裂纹; (d) 未淬火区
Fig. 12 Vertical-section microstructure of the No. 4 specimen

(a) cracks at leading edge; (b) interface; (c) cracks at trailing edge; (d) unhardened area

459.5 HV0.2, 表面硬度依次降低。1 号试样在距表面 0.25 mm 处硬度恢复到基材相同的水平, 2 号、3 号试样在 0.20 mm 处, 4 号试样在 0.15 mm 处, 说明塑性变形波及的深度也依次降低, 未淬火的区域得到了更好地保护。

3 分析与讨论

激光离散淬火显著降低了试样的磨损量, 提高了抗磨损性能。4 组钢轨磨损试样中只有 1 号试样发生了波磨, 并且磨损量最高, 与之相比, 2 号试样磨损量减少了 47.2%, 3 号试样减少了 57.6%, 4 号试样减少

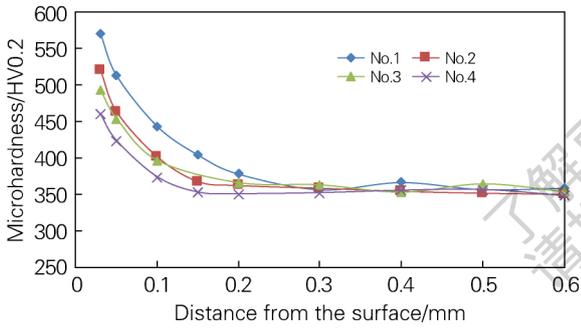


图13 钢轨试样未淬火区域显微硬度随距表面距离的变化
Fig. 13 Change of microhardness versus distance from the surface for unquenched zone of the rail specimens

了63.0%，磨损量减少明显。1号试样为原始状态的钢轨试样，虽然本身经过欠速淬火处理，但是硬度只有35.7 HRC。在滚动磨损过程中，试样表面被挤压发生塑性变形，边缘材料被挤压形成飞边。试样波磨的形成和实际轨道的波磨类似，由于初始微小的振动，表面的塑性变形并不均匀，部分区域被严重压缩逐渐形成波谷，波磨的波长和整个系统振动的固有频率相关。不均匀的塑性变形会导致试样跳动增大，随着磨损试验的进行，试样表面的高低差逐渐增加，最终形成宏观的波磨。激光淬火后，钢轨试样硬度提高到62 HRC以上，显著提高了试样表面的耐磨性和塑性变形抗性。对比图6(e)和(f)可以看到，激光淬火改变了试样表面的磨损机理，没有淬火的表面磨损机理为塑性变形和大片的疲劳剥落，而激光淬火后试样表面没有塑性变形产生，接触疲劳也得到显著改善，只产生浅层的疲劳剥落。

3种离散淬火试样都有裂纹产生，按裂纹产生的区域，主要分两种，一种是试样边缘的裂纹，另一种是淬火区界面的裂纹。3种试样开裂区域的变化如图14所示，箭头指向试样的滚动方向。3个试样都产生了边缘裂纹，在淬火区前缘和后缘的尖角位置。2号和3号试样产生了淬火区界面裂纹，其中2号试样的裂纹最严重，已经形成三角形开裂区域。4号试样只在淬火区前缘尖角界面产生少量裂纹，试样中心的界面裂纹得到有效控制。

试样边缘裂纹是由于边缘淬火层受力不平衡导致的，由于磨损试样尺寸的限制，接触区被加工成10 mm宽的台阶面，边缘淬火层外侧缺少基体材料支撑，受力处于不平衡状态，在压应力作用下容易被压溃而产生微裂纹。而实际钢轨是一个连续过度的平滑曲面，不易出现边缘裂纹情况。

淬火区界面裂纹产生有多种原因：①界面区域车

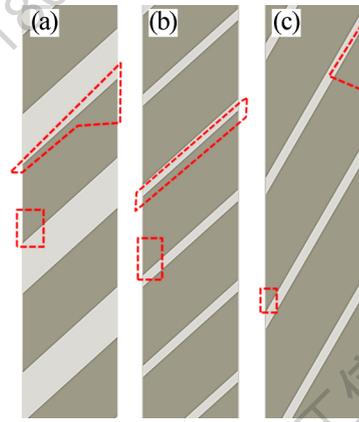


图14 3种激光离散淬火试样裂纹产生位置示意图
(a) 2号试样; (b) 3号试样; (c) 4号试样

Fig. 14 Schematic diagrams of cracking area in the three laser dispersed hardened specimens
(a) No. 2 specimen; (b) No. 3 specimen; (c) No. 4 specimen

轮钢轨接触面积减小，接触应力增大；②淬火层呈圆弧形，边缘界面处比较薄，淬火层不足以支撑车轮碾压产生的压应力；③未淬火区的磨损和塑性变形，未淬火区硬度较低，被优先磨损形成台阶，车轮经过时会对淬火区界面产生冲击。在本试验中，车轮试样转速比钢轨试样快2%，因此钢轨试样表面摩擦力方向和试样旋转方向相同，都沿图9所示箭头方向，并产生如图10(d)所示箭头方向的塑性变形。塑性变形的流动方向指向前一道淬火区，未淬火区的基体材料在摩擦力的驱赶下会向前一道淬火层运动，这将进一步导致未淬火区高度降低，以及削弱淬火层下方基材的支撑，都会促进界面裂纹的形成。

通过减小试样淬火区的间隔，增加淬火区倾斜角度，可以增加激光离散淬火层的疲劳磨损性能。2号试样的淬火区间隔4 mm，覆盖面积最低，前后两道淬火层相隔过远，间隔区域基材表面直接和车轮接触，增加了磨损量。同时，倾斜的淬火层在尖端面积减小，和车轮的接触应力集中在有限的淬火区上，导致接触应力增大，再加上车轮对淬火区界面产生冲击，最终形成了三角形的开裂区域。3号试样淬火区间隔减小到1 mm，一方面减小了未强化区面积，提高了淬火层覆盖率，另一方面在车轮在跨过间隔区域时，前一道淬火带能够对车轮提供支撑，减小淬火区尖端的接触应力，从而增加了车轮通过的平顺性，也减小了对淬火区界面的冲击。4号试样进一步增大了淬火区倾斜角度，淬火区界面和运动方向夹角更小，界面过度更加平缓，使车轮始终和同等面积的淬火区接触，车轮通过淬火区界面时更加平稳，有效控制了淬火区界面裂纹。从试样未淬火区硬度的分布也可以看出，3号和4号试

样未淬火区域的表面硬度更低,且塑性变形深度更浅,说明减小淬火区间隔,增大淬火区倾斜角度可以有效的保护离散淬火间隔区域的基材,减少基材的塑性变形和磨损。

激光离散淬火的间隔区域和基材界面表现出良好的阻碍裂纹扩展的能力,图6(c)中,裂纹扩展到未淬火区界面时被终止了,图10中裂纹扩展到基材界面时方向发生了偏转。这是由于淬火层和基材的性能差异导致的,激光离散淬火只是将表层1 mm范围内进行强化,并且淬火区之间通过未淬火区进行分割,基材和间隔区域依然保持了韧性。当裂纹扩展到淬火层边缘或底部的界面时,由于基材塑性较高,裂纹扩展受到阻碍,并会发生偏转,裂纹会沿淬火层底部水平方向扩展,而不会继续向下扩展。因此激光离散淬火层的裂纹只局限在淬火区域扩展,不会穿过间隔区域互相连接,也不会基材中垂直向下扩展,裂纹只会局限于钢轨的表层,不会导致断轨发生。

4 结论

1) 激光离散淬火可以提高钢轨表面的耐磨损性能。未处理钢轨试样,磨损量1.102 g,表面发生波磨,以塑性变形和疲劳剥落为主。激光离散淬火强化后,波磨消失,磨损机理为表层轻微的疲劳剥落,磨损量显著降低。

2) 当淬火区以间隔4 mm、倾斜45°分布时,磨损量为0.582 g,相比未处理试样减少了47.2%;当淬火区以间隔1 mm、倾斜45°分布时,磨损量为0.467 g,减少了57.6%;当淬火区以间隔1 mm、倾斜60°分布时,磨损量最低,只有0.408 g,减少了63%。

3) 减小淬火区之间的间隔,增大淬火区倾斜角度,可以有效减少淬火区界面裂纹。当激光离散淬火层间隔4 mm、倾斜45°分布时,淬火区前缘会有大面积的裂纹产生;缩小淬火区间隔至1 mm,裂纹只产生于界面前缘,数量明显减少;当淬火区以间隔1 mm、倾斜60°分布时,试样中心的界面裂纹得到消除,可以获得最好的耐磨性能和抗接触疲劳性能。

4) 激光离散淬火的间隔区域和基材界面可以阻碍裂纹扩展。当裂纹扩展到淬火区边缘或底部的界面时,裂纹扩展会受到阻碍使方向发生偏转,裂纹只局限于钢轨表层,不会向下扩展,确保了钢轨的使用安全。

参考文献:

- [1] 邹定强,杨其全,卢观健,等. 钢轨失效分析和伤损图谱[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 周清跃,王树青,詹新伟,等. 钢轨全长淬火工艺及性能的研究

[J]. 金属热处理, 2000, 25(2): 11-14.

Zhou Qingyue, Wang Shuqing, Zhan Xinwei, et al. Study on technology and properties of full-length quenching rail [J]. Heat Treatment of Metals, 2000, 25(2): 11-14.

- [3] 李德虹,王权. U71Mn 钢钢轨端热处理工艺改进[J]. 金属热处理, 2004, 29(12): 65-68.

Li Dehong, Wang Quan. Improvement of the heat treatment process of U71Mn steel rail-head [J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(12): 65-68.

- [4] 王文健,郭俊,刘启跃. 重载钢轨磨损损伤与预防措施研究[C]//宁波: 全国青年表面工程论坛. 2012: 247-251.

Wang Wenjian, Guo Jun, Liu Qiyue. Study on wear damage behavior of preventive measures of heavy-haul rail [C]//Ningbo: National Youth Forum on Surface Engineering. 2012: 247-251.

- [5] 王文健,刘吉华,郭俊,等. 激光淬火对重载轮轨磨损与损伤性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(6): 69-72.

Wang Wenjian, Liu Jihua, Guo Jun, et al. Effect of laser quenching on wear and damage behaviors of heavy-haul wheel/rail [J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(6): 69-72.

- [6] 郭火明,王文健,刘腾飞,等. 激光相变硬化处理对轮轨钢磨损性能影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 165-170.

Guo Huoming, Wang Wenjian, Liu Tengfei, et al. Effect of laser transformation hardening treatment on wear properties of wheel/rail steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(5): 165-170.

- [7] 杨志翔,王爱华,熊大辉,等. 钢轨表面宽带激光淬火工艺及其疲劳磨损性能[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 6-12.

Yang Zhixiang, Wang Aihua, Xiong Dahui, et al. Laser wide-band hardening of steel rail and corresponding rolling contact fatigue property [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 6-12.

- [8] 曹熙,王文健,刘启跃,等. 激光离散淬火对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 72-79.

Cao Xi, Wang Wenjian, Liu Qiyue, et al. Effect of laser dispersed quenching on wear and damage performances of wheel/rail materials [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 72-79.

- [9] 曾东方,鲁连涛,李正阳,等. 激光离散处理车轮钢-钢轨钢摩擦副的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 79-86.

Zeng Dongfang, Lu Liantao, Li Zhengyang, et al. Tribological properties of laser dispersed treated wheel steel-rail steel tribopairs [J]. Tribology, 2014, 34(1): 79-86.

- [10] Li Z Y, Xing X H, Yang M J, et al. Investigation on rolling sliding wear behavior of wheel steel by laser dispersed treatment [J]. Wear, 2014, 314(1/2): 236-240.

- [11] Zheng Y, Hu Q, Li C, et al. A novel laser surface compositing by selective laser quenching to enhance railway service life [J]. Tribology International, 2017, 106: 46-54.

- [12] Cao X, Shi L B, Cai Z B, et al. Investigation on the microstructure and damage characteristics of wheel and rail materials subject to laser dispersed quenching [J]. Applied Surface Science, 2018, 450: 468-483.

- [13] Su C R, Shi L B, Wang W J, et al. Investigation on the rolling wear and damage properties of laser dispersed quenched rail materials treated with different ratios [J]. Tribology International, 2019, 135: 488-499.