

# 激光淬火深度对钢轨疲劳磨损性能的影响研究

杨志翔<sup>1</sup>, 王爱华<sup>2</sup>, 吴文迪<sup>1</sup>, 吕威<sup>1</sup>, 叶兵<sup>1</sup>, 熊大辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华工激光工程有限责任公司,湖北 武汉 430223; <sup>2</sup>华中科技大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要** 目前全长热处理钢轨在使用过程中存在侧磨、压溃、剥离掉块等问题,为了提高钢轨的使用寿命,在钢轨表面制备了 4 种不同深度激光的淬火层,利用滚动接触疲劳磨损试验机对疲劳磨损性能进行了测试,并对表面磨损形貌、断面显微组织以及磨损机理进行了分析。结果显示:原始钢轨试样的硬度只有 35 HRC,磨损以塑性变形和疲劳剥落为主,表面产生严重的波磨。激光淬火后表面硬度提高到 62 HRC 以上,磨损机理只有表层轻微的疲劳剥落。0.7 mm 淬火层试样磨损失重减少了 50%,1 mm 淬火层试样磨损失重减少了 71.5%,随着淬火层深度增加,磨损失重减少。当淬火层深度低于 0.7 mm 时,淬火层边缘产生严重的接触疲劳裂纹,只有当淬火层深度达到 1 mm 时,才能完全消除宏观裂纹产生。钢轨表面的接触疲劳抗性随着淬火层深度增加而增加。

**关键词** 钢轨; 激光淬火; 深度; 滚动接触疲劳; 磨损

**中图分类号**: TG174.4;TG115.58

**文献标识码**: A

**doi**: 10.14128/j.cnki.al.20204004.

## Effect of LASER HARDENING DEPTH on Rolling Contact Fatigue Property of Steel Rail

Yang Zhixiang<sup>1</sup>, Wang Aihua<sup>2</sup>, Wu Wendi<sup>1</sup>, Lu Wei<sup>1</sup>, Ye Bing<sup>1</sup>, Xiong Dahui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Wuhan Huagong Laser Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Nowadays, online slack quenched rail has been widely used, but some troubles still exist such as side attrition, collapse and spalling. In order to further improve the service life of rail, hardened layers with four different depths were prepared on U71Mn rail surface by using laser hardening process. Wear and rolling contact fatigue property were investigated, and corresponding surface morphology, cross-sectional microstructure and wear mechanism were also analyzed. Results show that the hardness of original steel rail is about 35 HRC, fatigue spall and plastic deformation with severe surface corrugation are primary wear mechanisms; After laser hardening process, the hardness increases to 62 HRC, and slight fatigue wear is dominated; The weight loss decreases with the increasing of hardened layer depth, the weight loss decreases about 50% for 0.7 mm depth specimen, and decreases about 71.5% for 1 mm depth specimen; Severe cracks generate at the edge of contact zone when hardened layer depth less than 0.7 mm, and these cracks can only be eliminated when hardened layer depth larger than 1 mm depth; The rolling contact fatigue resistance of rail surface increases with the increasing of hardened layer depth.

**Key words** steel rail; laser hardening; depth; rolling contact fatigue (RCF); wear

## 0 引言

随着铁路运力的高速发展,我国铁路建设对钢轨的性能提出了越来越高的要求。在重载铁路和高速铁路上,全长热处理钢轨已经得到了广泛的使用<sup>[1]</sup>。目前,全长热处理钢轨(俗称淬火轨)是通过

控制淬火冷却速度,使冷速低于马氏体形成的临界冷速,在轨头踏面形成细片珠光体的欠速淬火组织。相比于传统的热轧轨,淬火轨的踏面硬度从 26~30 HRC 提高到 32~38 HRC,提高了钢轨的耐磨性能和抗接触疲劳性能<sup>[2]</sup>。但是在实际使用中,淬火

收稿日期:2019-10-16

基金项目:国家重点研发计划(十三五计划)(项目编号:2016YFB1102700)

作者简介:杨志翔(1992-),男,硕士,研究方向为激光表面强化及增材制造。E-mail:yangzhixiang0523@qq.com

轨的表面硬度依然偏低,高速铁路的波磨问题<sup>[3]</sup>,以及重载铁路,尤其是小半径线路的侧磨、压溃、剥离掉块等问题依旧很突出<sup>[4]</sup>。

为了进一步提高钢轨的使用寿命,目前一个重要研究方向是使用激光淬火技术对钢轨踏面进行强化。美国从2003年起就开展了激光熔凝钢轨的应用研究<sup>[5-6]</sup>,但在在线测试过程中发现,熔凝过程导致的表面不平整以及表面裂纹会降低硬化层的疲劳性能,甚至硬化层在磨损试验早期就发生剥落。王文健等人<sup>[7]</sup>通过激光淬火在轮轨试样表面制备了一层马氏体层,硬度相比基材提高33%,磨损试验结果显示,激光淬火强化后轮轨试样磨损量分别降低62.9%和66.0%。郭火明等人<sup>[8]</sup>利用激光相变硬化对轮轨表面进行了强化,轮轨试样硬度分别提高44.39%和43.06%,显著提高了表面抗磨损和变形能力,车轮试样磨损率减少约44.02%,钢轨试样减少约13.6%。在之前的研究中<sup>[9]</sup>,对比了激光淬火钢轨和热轧轨在5%滑差率下的疲劳磨损性能,发现通过激光淬火可以减小试样的磨损量约75%,且淬火试样只有表面轻微的疲劳层,没有裂纹产生。

目前针对钢轨激光淬火层磨损性能的研究,由于设备的限制,使用的滑差率都在5%以上。使用大滑差率会导致表面磨损速率较高,疲劳裂纹来不及向下扩展<sup>[10-11]</sup>。而实际钢轨使用过程中的滑差率一般在2%以内,使用小滑差率进行试验更能反映钢轨淬火层的实际性能。激光淬火的工艺对淬火层的性能有很大的影响,而目前的报道中只是选定某个固定的工艺参数进行试验,激光淬火层的关键性能,如淬火层的硬度、厚度对磨损性能的影响,都还缺少清晰的报道。且目前对失效的试样的报道也比较少,试验结果缺少对比,说服力不强。

本文在钢轨试样表面制备了4种不同深度激光淬火层,利用滚动接触疲劳磨损试验机研究了2%滑差率下淬火深度对钢轨疲劳磨损性能的影响,并对表面磨损形貌、断面显微组织以及磨损机理进行了分析。研究结果对钢轨踏面激光淬火强化的工艺优化提供有益的技术指导和参考意义。

## 1 试验材料和方法

研究选用钢轨材料为U71Mn,经过在欠速淬火处理,原始组织为细片珠光体,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。

激光淬火设备如图1所示,采用8 kW 半导体光纤传输激光器,配备温度闭环控制系统,可以精确控制激光照射区的加热温度。为获得不同厚度的激光淬火层,使用表2所示的工艺参数对钢轨试样进行激光淬火。激光光斑宽度20 mm,扫描速度10 mm/s,设定不同的加热温度,温度闭环系统自动调节激光功率,获得不同厚度的淬火层。淬火层厚度0.3~1 mm,完全覆盖试样接触区。

滚动接触疲劳试验方法参考国标YB/T 5345-2006。试验采用MJP-30接触疲劳模拟试验机,试样安装如图1(a)所示。钢轨试样为磨损试样,对磨试样为CL60钢(车轮用钢),成分见表1所示。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(b)所示。图1(c)为加工好的钢轨试样,图1(d)为加工好的车轮试样。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4 116 N,接触区宽度10 mm,模拟接触应力1 000 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,总循环次数为5~40万次。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重量的变化评估磨损量。

使用线切割机取样,制备金相样品,采用4%的硝酸酒精腐蚀样品,用XJL-03型立式金相显微镜观察组织,使用HVS-1000A显微硬度计测定强化层的硬度,测试载荷200 g,保压15 s。



图1 钢轨激光强化设备  
Fig. 1 Laser hardening device of rail

表 1 U71Mn 和 CL60 的化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical composition of U71Mn and CL60(mass fraction/%)

Material	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Cr	Ni
U71Mn	0.65-0.76	0.15-0.35	1.10-1.40	≤0.03	≤0.03	≤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 激光淬火工艺参数

Tab. 2 Laser hardening process parameters

Specimen No.	Method	Scan speed / (mm/s)	Average laser power/W	Surface temperature/°C	Laser beam width/mm	Hardening depth/mm
1	Untreated	—	—	—	—	—
2	Laser-hardened	10	1 640	850	20	0.3
3	Laser-hardened	10	2 020	1 050	20	0.5
4	Laser-hardened	10	2 300	1 200	20	0.7
5	Laser-hardened	10	2 750	1 450	20	1

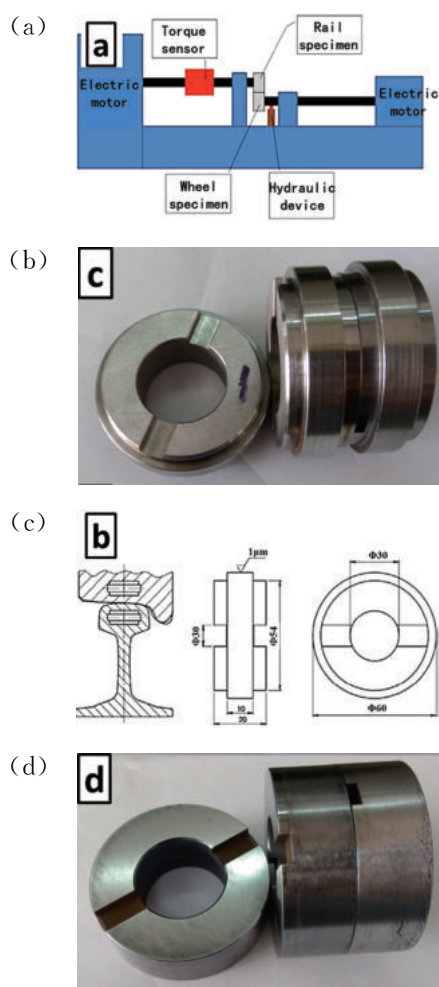


图 2 滚动接触疲劳试验机及试样示意图  
(a)滚动接触疲劳磨损试验机 (b)磨损试样示意图  
(c)钢轨试样 (d)车轮试样

Fig. 2 Illustration of rolling contact fatigue device and specimen

## 2 试验结果

表 2 为钢轨试样激光淬火强化的工艺参数,其中 1 号试样为原始基材,2 号至 5 号试样表面使用激光淬火制备了不同厚度的淬火层。激光淬火时试样表面加热温度从 850 °C 到 1 450 °C 依次增加,表面加热温度越高,淬火层的深度越深。表面加热温度为 850 °C 时,淬火深度为 0.3 mm。当表面加热温度增加到 1 450 °C 时,淬火深度可达到 1 mm,此时试样表面已处于接近熔点的临界状态。

磨损试验结果如表 3 所示,1 号试样为原始状态,硬度 35.7 HRC,经过 20 万转滚动磨损后,钢轨试样失重 1.102 g,车轮试样失重 1.035 g,两者失重基本相当。2 号至 5 号钢轨试样表面通过激光淬火,硬度提高到 62 HRC 以上,磨损失重大幅减小。2 号试样淬火层厚度最薄,只有 0.3 mm,在磨损试验早期就产生了大量的裂纹,在 5 万转时磨损试验就提前终止,失重 0.144 g。3 号和 4 号试样硬化层厚度分别为 0.5 mm 和 0.7 mm,经过 20 万次磨损

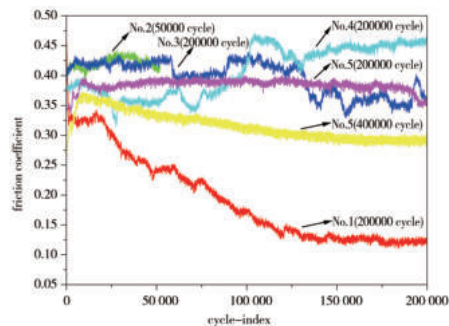


图 3 摩擦系数曲线

Fig. 3 Evolution of friction coefficient against cycle-index

试验,磨损失重分别为 0.648 g 和 0.553 g,相比未处理试样减少了一半,但是车轮试样磨损量增加了一倍。5 号试样硬化层厚度 1 mm,磨损试验进行至

40 万次试样都没有破坏。钢轨试样在 20 万次失重 0.314 g,只有未处理试样的三分之一,40 万次失重 0.827 g(相比初始状态),失重略有增加。

表 3 磨损试验结果  
Tab.3 Result of wear test

Specimen No.	Method	Hardened layer depth/mm	Surface hardness/HRC	Cycle /(10 thousand)	Weight loss of rail specimen/g	Weight loss of wheel specimen/g	Weight loss ratio between wheel and rail
1	Untreated	—	35.7	20	1.102	1.035	0.939
2	Laser-hardened	0.3	63.5	5	0.144	0.545	3.785
3	Laser-hardened	0.5	64.1	20	0.648	2.457	3.792
4	Laser-hardened	0.7	62.7	20	0.553	3.163	5.720
5	Laser-hardened	1	63.2	20	0.314	2.433	7.748
				40	0.827	4.167	5.039

摩擦系数曲线如图 3 所示,1 号试样在试验过程中振动明显,一开始摩擦系数在 0.33 左右,随后摩擦系数逐渐减小,最后稳定在 0.14 左右。2 号到 5 号激光淬火试样的摩擦系数都在 0.3 到 0.45 之间波动,2 号、3 号、4 号试样在磨损试验中、后段振动明显增加,摩擦系数波动也较为剧烈,而 5 号试样整个磨损试验过程都非常平稳,摩擦系数也很稳定。

图 4 为磨损试样的宏观形貌,1 号试样表面呈现波浪形,产生了严重的波磨。2 号试样淬火层最薄,只经过了 5 万转就产生了大量的裂纹,裂纹集中在试样一侧,且边缘和中心裂纹的扩展方向不同。3 号和 4 号试样裂纹从一侧边缘萌生并向中心扩展,3 号试样产生的裂纹数量更多。5 号试样经过 20 万次和 40 万次磨损试验后,都没有观察到裂纹产生。

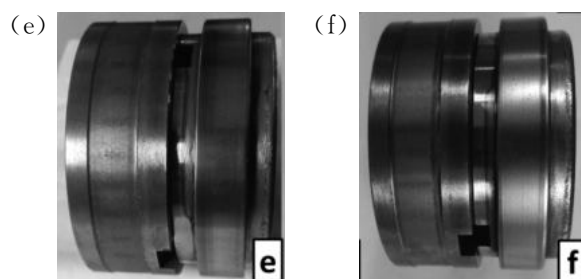
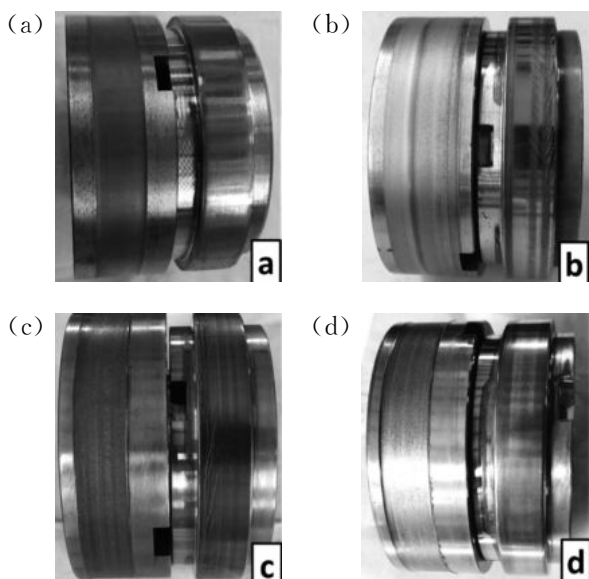


图 4 摩擦副宏观形貌  
(a)1 号试样 (b)2 号试样 (c)3 号试样 (d)4 号试样  
(e)5 号试样(20 万次) (f)5 号试样(40 万次)  
Fig.4 Macro morphology of friction pairs



1 号和 2 号磨损试样的表面微观形貌如图 5 所示。1 号试样表面产生波磨,波峰比较光滑且颜色较浅,波谷比较粗糙且颜色较深,有明显裂纹产生。2 号试样有两个裂纹源,边缘产生裂纹向中心扩展,中心产生的裂纹向两侧扩展,并和边缘裂纹形成一定的夹角。图 6 为 3 号和 4 号磨损试样的表面微观形貌,这两个试样的裂纹也是从边缘产生,并向内部扩展的,且裂纹密度明显较 2 号试样低,其中 4 号试样的裂纹数量较 3 号试样更少。2 号至 4 号试样表面的裂纹导致磨损失重略有增加。图 7 为 5 号磨损试样的表面微观形貌,20 万次磨损试验后,试样表面依然非常光滑,没有观察到宏观裂纹产生,只有少量的浅层剥落。经过 40 万磨损后,表层的剥落坑增加,只在边缘产生了细小的裂纹。

钢轨试样的横断面裂纹形貌如图 8 至图 12 所示。图 8 显示 1 号未处理的钢轨试样显微组织为细片状珠光体,表层材料发生塑性流变,产生 0.1 mm 的塑性变形层,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 显示 2 号试样表面淬火层在磨损试验早期(5 万次)边缘就产生了大量的裂纹。裂纹从表面产生并向下扩展,贯穿淬火层直到底部基材界面。裂纹到达界面后,扩展方向发生偏转,开始沿淬火层和基材的界面水平方向扩展。图 10 显示 3 号试样淬火层在 20 万次磨损后边缘也产生了大量的裂纹,裂纹从表面产生,部分裂纹只扩展了一半,部分裂纹贯穿了整个淬火层,在基材的界面处裂纹扩展方向也发生了偏转。图 11 显示 4 号试样结果和 3 号试样类似,淬火层厚度增

加,裂纹数量有减少,部分裂纹只扩展了一半,没有贯穿淬火层,而贯穿的裂纹扩展方向在界面处发生了偏转。3 号和 4 号试样的裂纹形貌和 2 号试样有明显区别,2 号试样裂纹较平直,而 3 号和 4 号试样的裂纹较为曲折,显示这些裂纹是在磨损试验过程中逐渐向下扩展的,而不是在试验早期迅速产生的。图 12 为 5 号试验经过 40 万次磨损后的断面裂纹形貌,可以看到当淬火层厚度增加到 1 mm 以后,没有贯穿的裂纹产生,表层有少量很浅的裂纹,深度小于 0.03 mm。

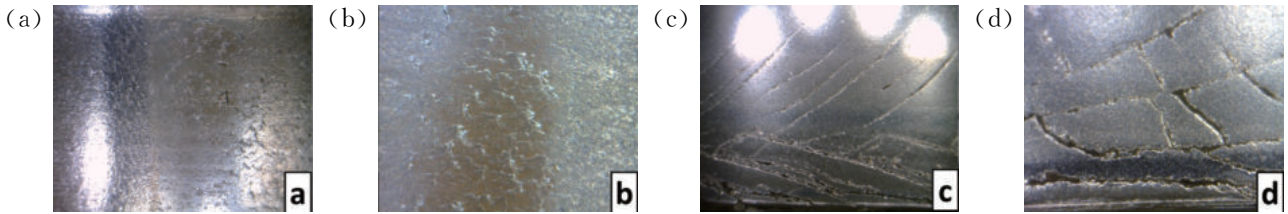


图 5 钢轨磨损试样表面微观形貌  
(a) 1 号试样低倍 (b) 1 号试样高倍 (c) 2 号试样低倍 (d) 2 号试样高倍  
Fig. 5 Surface micromorphology of rail specimen

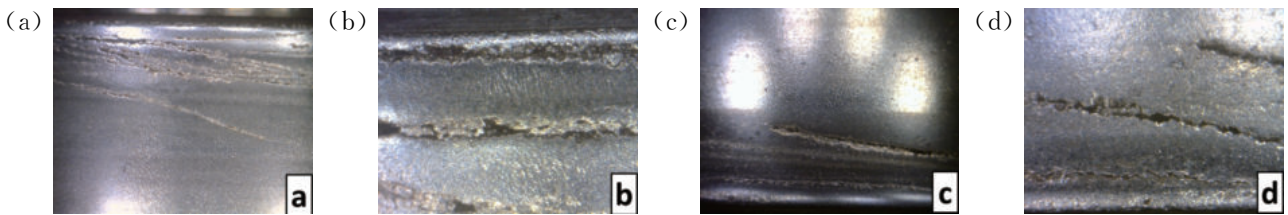


图 6 钢轨磨损试样表面微观形貌  
(a) 3 号试样低倍 (b) 3 号试样高倍 (c) 4 号试样低倍 (d) 4 号试样高倍  
Fig. 6 Surface micromorphology of rail specimen

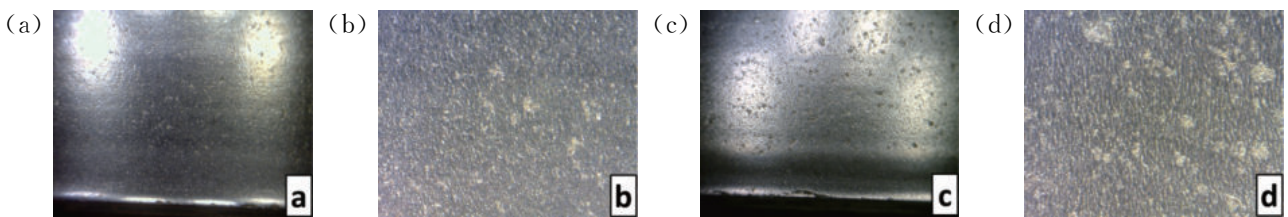


图 7 钢轨磨损试样表面微观形貌  
(a) 5 号试样低倍(20 万转) (b) 5 号试样高倍(20 万转) (c) 5 号试样低倍(40 万转) (d) 5 号试样高倍(40 万转)  
Fig. 7 Surface micromorphology of rail specimen

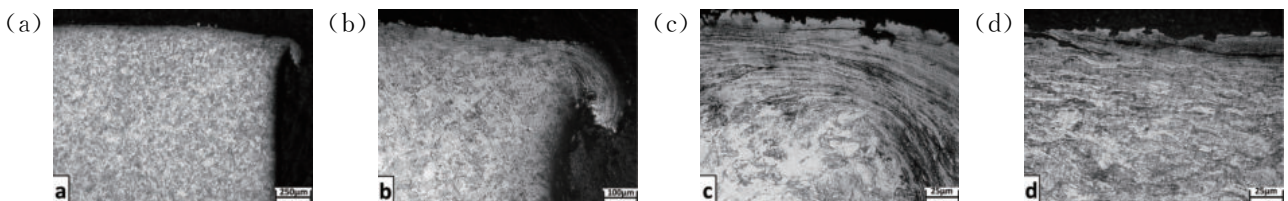


图 8 1 号钢轨试样塑性形变带  
Fig. 8 Cross-sectional microstructure and plastic deformation morphology of No. 1 Specimen

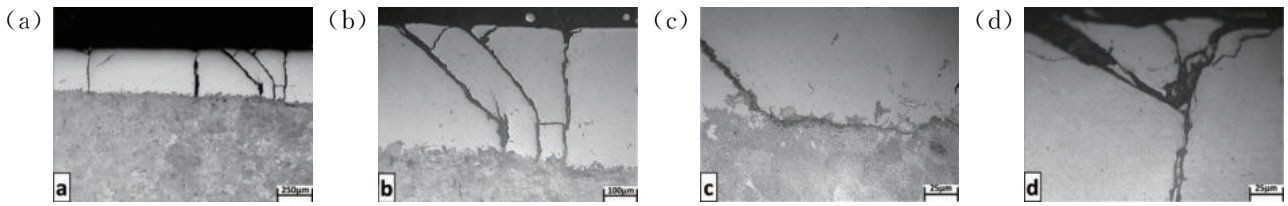


图 9 2号钢轨试样横断面裂纹形貌  
Fig. 9 Cross-sectional crack morphology of No. 2 Specimen

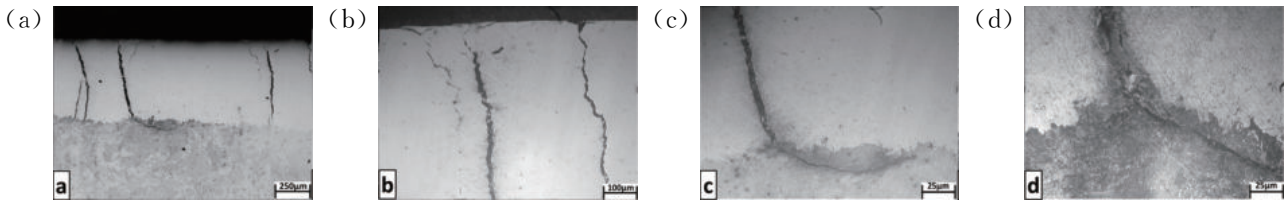


图 10 3号钢轨试样横断面裂纹形貌  
Fig. 10 Cross-sectional crack morphology of No. 3 Specimen

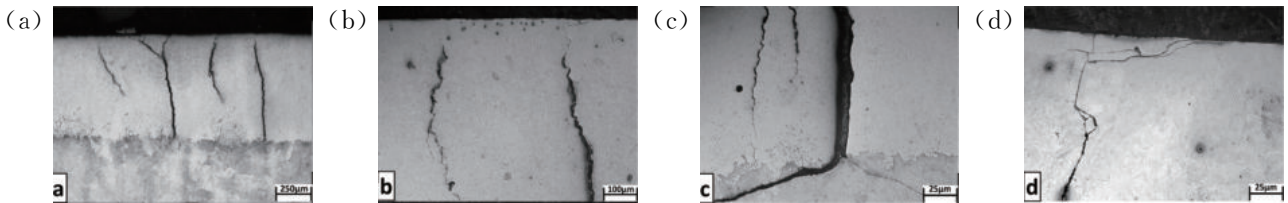


图 11 4号钢轨试样横断面裂纹形貌  
Fig. 11 Cross-sectional crack morphology of No. 4 Specimen

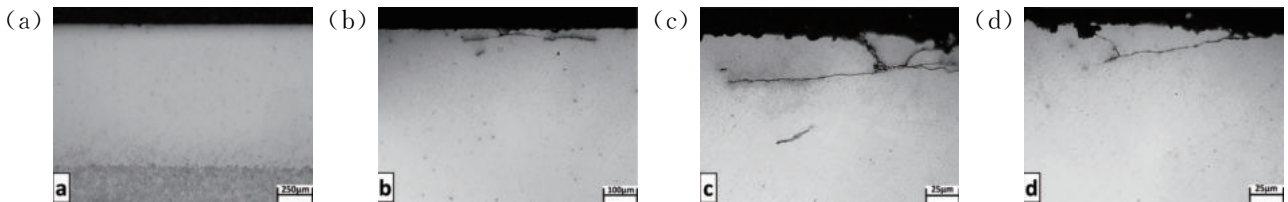


图 12 5号钢轨试样横断面裂纹形貌(40万次)  
Fig. 12 Cross-sectional crack morphology of No. 5 Specimen (400 000 cycle)

### 3 讨论

5组钢轨磨损试样中,只有1号试样发生了波磨,并且失重最高。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 HRC。在滚动磨损过程中,表面被挤压发生塑性流变,生成0.1 mm的塑性变形层,并在试样两侧形成飞边。且由于初始微小的振动,塑性变形并不均匀,部分区域被严重压缩逐渐形成波谷。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。表层塑性变形也会导致加工硬化使表层硬度提升,相应的疲劳抗性下降。在车轮的循环应力作用下,当累积应变超过材料的裂纹萌生阈值后,开始萌生

微小裂纹<sup>[12]</sup>。初始裂纹和表面形成10~20度夹角向内部扩展,并在扩展过程中转向水平方向扩展,最终形成剥离掉块。

表面高硬度的激光淬火层显著提高了钢轨试样的耐磨性。和原始状态的钢轨试样相比,3号和4号试样的磨损失重分别减少了41%和50%,5号试样减少了71.5%。2号试样5万转时失重0.144 g,换算成20万转失重约0.576 g,也和3号4号试样处于相同水平。激光淬火也提高了表面的塑性变形抗性,2号至5号钢轨试样都没有波磨产生,淬火层中也观察不到塑性变形存在。这是由于激光淬火改变了钢轨表面的磨损机理。激光淬火后钢轨表面硬度达到62 HRC,表面抗压强度大于轮轨的接触应

力,可以有效抵御磨损过程中的塑性变形,淬火层的磨损机理以浅层的疲劳剥落为主。图7可见,激光淬火试样表面非常光滑,只有表层点状的疲劳剥落,随着磨损试验进行,剥落层面积有所增加。金相断面图12显示,剥落层的深度在0.03 mm以内,裂纹向水平方向扩展,最终造成表层材料的剥落,没有形成贯穿的裂纹。

当淬火层厚度比较薄时,2号至4号试样都出现了不同程度的裂纹。这是由于高硬度的淬火层覆盖在柔软的基材表面,形成鸡蛋壳结构,受压时淬火层内部会产生较大的切应力。当淬火层较薄时,最大切应力作用在基材上,导致基材塑性变形,不足以支撑淬火层,如2号试样在试验早期仅5万转就产生了大量的裂纹。随着硬化层厚度增加,硬化层内的最大切应力值下降,且当硬化层深度超过一定值后,最大切应力作用点会从基材转移到硬化层内部<sup>[13]</sup>。因此随着淬火层的厚度增加,如3号和4号试样,裂纹数量依次减少。且裂纹的形貌也出现了一定的变化,2号试样的裂纹比较平直,说明是在短时间产生的,并迅速扩展到基材界面。3号和4号试样中的裂纹比较曲折,说明裂纹是随着循环应力作用逐渐向下扩展的。当淬火层厚度增加到1 mm以后,5号试样40万次磨损后都没有产生宏观的裂纹。

需要注意到,磨损试样的裂纹都是首先从淬火区边缘产生的,说明淬火区边缘界面是整个强化层的薄弱环节。边缘淬火层外侧缺少基材材料支撑,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,并沿滚动方向逐渐向接触区中心扩展。而随着激光淬火层厚度增加,内部最大切应力值下降<sup>[13]</sup>,下方的淬火层也可以提供更好的支撑,使边缘的淬火层不容易被压溃形成裂纹。

激光淬火层的裂纹表现出独特的裂纹扩展机制,在淬火层和基材界面处,裂纹的扩展方向发生了偏转。当激光淬火层产生裂纹时,裂纹首先会垂直向下扩展,当裂纹在扩展到基材界面的时,裂纹扩展方向会发生偏转,沿淬火层底部水平方向扩展,而不会继续向下扩展。这是由于淬火层和基材的性能差异导致的,钢轨激光淬火只是将表层1 mm左右的范围强化,基材依然保持了韧性,当裂纹扩展到基材界面的时,由于基材塑性较高,阻碍裂纹继续向下扩展。同时界面两侧材料性能的差异导致应变不协调,为裂纹扩展提供了驱动力,最终导致了裂纹扩展

方向发生偏转。因此激光淬火层即使产生裂纹,也不会再在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。

和之前的研究<sup>[9]</sup>相比,本次试验使用的滑差率较小只有2%。在滚动接触过程中,表面的疲劳和磨损是一对竞争关系<sup>[10]</sup>。当磨损率低时,表面的疲劳裂纹源有足够的时间向下扩展形成宏观的裂纹,而当磨损率较高时,表面的疲劳裂纹还来不及向下扩展就会被磨损去除。本次试验使用的滑差率较小,降低了激光淬火层的磨损速率,使得接触疲劳的影响更加显著。同样0.7 mm厚的淬火层在5%滑差率下没有裂纹产生,但是在2%的滑差率下,试样边缘产生了裂纹。说明淬火层厚度增加,提高了在小滑差率下的接触疲劳抗性。

#### 4 结论

(1)未处理钢轨试样的硬度只有35 HRC,磨损以塑性变形和疲劳剥落为主,表面产生严重的波磨。激光淬火后表面硬度提高到62 HRC以上,磨损机理为表层轻微的疲劳剥落,随着淬火层深度增加磨损失重减少,0.5 mm淬火层试样磨损失重减少了41%,0.7 mm淬火层试样磨损失重减少了50%,1 mm淬火层试样磨损失重减少了71.5%。

(2)随着淬火层的深度增加,试样表面的疲劳裂纹数量减少,接触疲劳抗性显著提高。当淬火层深度不足0.3 mm时,淬火层不足以支撑磨损过程中的接触应力,在试验早期就产生了大量的裂纹。当淬火层深度在0.5~0.7 mm之间时,磨损试样的边缘会产生疲劳裂纹。只有当淬火层深度达到1 mm时,才能完全消除宏观裂纹的产生。

(3)激光淬火层中的裂纹在扩展到基材界面时会发生偏转,沿界面水平方向扩展,只会导致淬火层剥落,不会损伤钢轨基材。

#### 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(2):11-14.
- [3] 孙锐. 基于车辆动态响应的高速铁路钢轨波磨仿真与分析[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
- [4] 王文健,郭俊,刘启跃. 重载钢轨磨耗损伤与预防措施研究[C]. 全国青年表面工程论坛,2012:247.
- [5] ALDAJAH S. Effect of laser glazing process on rail contact fatigue life[J]. Emirates Journal for Engineering Re-

- search, 2009, 14(1):1-8.
- [6] REIFF R. In-track demonstration of laser-treated rail to reduce friction and wear [R]. U. S. Department of Transportation, 2007.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] DONZELLA G, FACCOLI M, GHIDINI A, et al. The competitive role of wear and RCF in a rail steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(2): 287-308.
- [11] MA L, HE C G, ZHAO X J, et al. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions [J]. Wear, 2016 (366): 13-26.
- [12] 周剑华, 任安超, 吉玉, 等. U71Mn 钢轨踏面剥离掉块缺陷分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 1-6.
- [13] 韩庆礼, 刘国权, 王亮, 等. 钛合金表面扩散焊接轴承钢硬化层厚度的优化设计[J]. 工程科学学报, 2007, 29(4): 398-401.