

激光离散处理车轮钢-钢轨钢摩擦副的 摩擦学性能研究

曾东方¹, 鲁连涛^{1*}, 李正阳², 张继旺¹, 朱旻昊¹, 金学松¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 四川 成都 610031;

2. 中国科学院 力学研究所 北京 100190)

摘要: 将激光离散处理前后的车轮试样分别与钢轨试样匹配, 利用滚动接触摩擦磨损试验机测试各摩擦副的摩擦系数和磨损率, 研究激光离散处理对轮轨摩擦副滚动接触摩擦磨损性能的影响。结果表明: 车轮试样经过激光离散处理后, 其抗磨损性能大幅增加, 对应的轮轨试样摩擦副的摩擦系数小幅增加, 其对钢轨试样的磨损加剧。未处理车轮试样主要发生剥层磨损并伴随轻微的疲劳磨损; 处理后的车轮试样主要发生疲劳磨损并伴随轻微的剥层磨损。这是由于激光离散处理提高了车轮试样表层材料的抗塑性变形能力, 从而抑制了材料的剥层磨损。各钢轨试样均发生剥层磨损, 但是车轮试样经激光离散处理后, 对应钢轨试样的剥层磨损加剧。

关键词: 激光离散处理; 摩擦磨损; 车轮钢; 钢轨钢; 剥层磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)01-0079-08

Tribological Properties of Laser Dispersed Treated Wheel Steel - Rail Steel Tribopairs

ZENG Dong-fang¹, LU Lian-tao^{1*}, LI Zheng-yang², ZHANG Ji-wang¹,
ZHU Min-hao¹, JIN Xue-song¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Laser dispersed treatment (LDT) was performed on wheel steel. The treated and untreated wheel steels were mated with rail steel and the friction coefficient and wear rate of these frictional pairs were measured on a rolling sliding test machine. The effect of LDT on the rolling contact friction and wear behavior of these frictional pairs was investigated. The results show that the wear resistance of treated wheel steel was improved obviously, while the friction coefficient of the frictional pair was increased and the wear of the corresponding rail steel is deteriorated. The dominant wear mechanism in the untreated wheel steel was delamination wear accompanied by mild fatigue wear. The dominant wear mechanism in the treated wheel steel was fatigue wear accompanied by mild delamination wear. LDT improved the plastic deformation resistance of wheel steel and inhibited the treated wheel steel from delamination wear. The delamination was the dominant wear mechanism for both rail steels against treated and untreated wheel steels. However, the delamination wear of rail steel

Received 9 May 2013, revised 12 July 2013, accepted 15 August 2013, available online 28 January 2014.

* Corresponding author. E-mail: lulantao@swjtu.cn, Tel: +86-28-86466025.

The project was supported by the National Key Technology R&D Program (2009BAG12A01-B10-1), Research and Development Program of the Ministry of Railway of China (2009J015), Basic Research Association Foundation of High-speed Rail (U1134202), the 2014 Doctoral Innovation Funds of Southwest Jiaotong University and the Fundamental Research Funds for the Central Universities. 国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01-B10-1)、铁道部科技研究开发计划项目(2009J015)、高速铁路基础研究联合基金(U1134202)、2014年西南交通大学博士研究生创新基金和中央高校基本科研业务专项资金资助。

was deteriorated after LDT was performed on the corresponding wheel steel.

Key words: laser dispersed treatment, friction and wear, wheel steel, rail steel, delamination wear

在山区铁路,列车经过曲线时,轮轨间摩擦力和相对滑差增加,使轮缘磨损加剧.由于轮缘磨损严重,有时车轮仅经过三次镟修后就报废.为了延长车轮使用寿命和提高列车运行安全性,必须提高车轮轮缘的耐磨性.

铁素体-珠光体钢是使用最广泛的车轮材料,其中铁素体组织的塑韧性好,但强度较低,珠光体组织的强度较高但塑韧性差.通过调整组织中珠光体和铁素体各自的体积分数、形态和分布状况,可以获得强韧匹配性能优良的车轮钢^[1].但是在山区铁路,该类型车轮钢出现了耐磨性不足的问题.在接触载荷作用下,车轮表面易发生累积塑性变形,当塑性变形超过材料的变形极限时,表面材料将与基体分离并以磨屑的形式剥落^[2-4].因此,车轮表面材料抗塑性变形能力差是导致其发生严重磨损的根本原因.一般可通过改变材料成分或热处理工艺提高车轮的整体强度^[5-7],但这些方法可能会导致车轮塑性和韧性下降^[1,8-9].近年来,研究者采用激光淬火、激光熔凝和激光合金化等全表面处理的激光强化技术提高轮轨材料耐磨性^[10-12].但是由于光斑尺寸的限制,激光表面强化只能以逐道扫描的方式进行,因此不可避免地会形成搭接区^[13-14].搭接区存在回火

软化和残余应力累积的现象,这将加速疲劳裂纹的萌生与扩展^[13].

激光离散处理是解决上述问题的一种可行方法.该工艺可在材料表面加工出按一定规则排列的硬化点^[15].硬化点可抑制材料的塑性变形,同时硬度点之间的未处理区域和基体材料保持原有材料的塑韧性.与全表面处理的激光强化技术相比,使用该工艺处理后的表面材料不存在搭接区,这将延缓疲劳裂纹的萌生和扩展^[16].目前,激光离散处理对轮轨摩擦副摩擦磨损性能的影响机理尚不清楚.

鉴于此,本研究中对车轮试样进行激光离散处理,将处理前后的车轮试样分别与钢轨试样匹配,测试各摩擦副的摩擦系数和磨损率.结合硬度测试、金相组织观察、磨痕观察和剖面观察等结果,分析了激光离散处理对轮轨摩擦副摩擦磨损性能的影响.

1 实验部分

1.1 材料与样品制备

本研究中使用的车轮和钢轨材料分别为 ER9 合金车轮钢和 U71Mn 热轧钢轨钢,其化学成分和显微硬度如表 1 所示.使用线切割机分别从接近车轮踏面和轨头表面的位置获取车轮和钢轨坯料.轮轨

表 1 实验材料的化学成分和显微硬度

Table 1 Chemical compositions and microhardness of the test materials

Material	Chemical composition / %						Microhardness ,HV _{0.3}
	C	Si	Mn	P	S	Cr	
Wheel steel	0.57	0.26	0.73	0.007	0.002	0.26	281
Rail steel	0.71	0.25	1.41	≤0.03	≤0.03		285

坯料经车削加工和砂轮研磨获得本试验所用的车轮和钢轨试样.使用 YAG (Yttrium - Aluminum Garnet) 激光器对上述车轮试样表面进行激光离散处理,工艺参数如下:激光光斑直径 1 mm,作用时间 10 ms,脉冲能量 9 J.处理后车轮试样的表面全貌和局部放大图分别如图 1(a~b)所示.试样表面由处理区域和未处理区域组成,其中处理区域为直径约为 1 mm 的硬化点.硬化点均匀分布在试样表面,其中心距离约为直径的 1.1 倍.相邻硬化点之间没有出现搭接现象.试验前,对图 1 所示的激光毛化处理车轮试样表面进行研磨.未激光处理的车轮试样,简称 Untreated;激光处理的车轮试样,简称 Treated.与

未激光处理车轮试样组成摩擦副的钢轨试样,简称 Untreated - rail,与激光处理车轮试样组成摩擦副的钢轨试样,简称 Treated - rail.经砂轮研磨后,使用 Marsurf PS1 粗糙度仪测量各轮轨试样接触面的算术平均粗糙度,结果如表 2 所示.

1.2 试验方法

滚动接触磨损试验在 MMS-2A 型微机控制摩擦磨损试验机上进行,试验示意图如图 2 所示.上试样为钢轨试样,下试样为车轮试样.处理和未处理的车轮试样与钢轨试样组成的摩擦副分别表示为 Treated/U71Mn 和 Untreated/U71Mn.轮轨试样间的转动滑差率设定为 5.4%,最大接触应力设定为

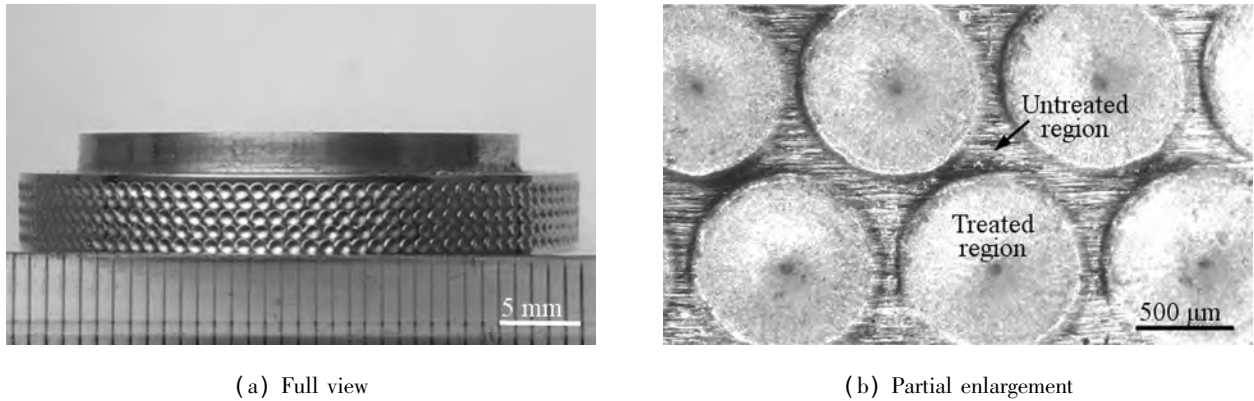


Fig. 1 Photograph of the treated wheel disc before grinding

图 1 抛光前处理车轮试样的表面形貌

800 MPa. 列车行进时产生的气流会对轮轨接触面形成风冷作用,因此为了使试验条件尽可能接近于轮轨接触条件,试验时向轮轨试样接触面喷射干燥压缩空气. 试验过程中,每 10 000 次循环,取下试样进行称重,计算轮轨试样磨损率. 出现稳定磨损阶段后,停止试验. 磨损率定义如下:在稳定磨损阶段下

表 2 轮轨试样的表面平均粗糙度
Table 2 Mean roughness of specimens

Specimen	Mean Roughness $R_a / \mu\text{m}$
Untreated	0.162
Treated	0.146
Untreated - rail	0.169
Treated - rail	0.167

用激光共聚焦显微镜 (CLSM) 和 SEM 观察接触面以下一定深度内材料的显微组织.

2 试验结果

2.1 显微组织及硬度

图 3 为处理后车轮试样的显微组织. 处理后的试样表层由熔凝区和基体组成,如图 3(a) 所示. 图 3(b) 是图 3(a) 中区域 A 的放大图,从图中可见熔凝区与基体的结合紧密,结合面无裂纹、气孔等缺陷. 基体组织为铁素体和珠光体,熔凝区主要由细马氏体组成,分别如图 3(c) 和 3(d) 所示. 熔凝区和基体的平均硬度分别为 $HV_{0.3}762$ 和 $HV_{0.3}281$. 图 4 为激光离散处理前后,车轮试样表面的 XRD 图谱. 从图 4 中可看出,处理后的车轮试样表面除了含有马氏体外,还存在少量残余奥氏体.

2.2 摩擦磨损行为

图 5 为两个摩擦副在干态磨损条件下的摩擦系数曲线. 在 0 ~ 10 000 次循环,摩擦过程分为三个阶段:第一阶段为“跑合”阶段,摩擦系数随循环次数的增加而迅速增加;第二阶段为过渡阶段,随着循环次数的增加摩擦系数呈现下降趋势;第三阶段为稳定磨损阶段,摩擦系数趋于稳定. Unlaser/U71Mn 和 Laser/U71Mn 摩擦副的稳定摩擦系数分别为 0.51 和 0.56. 从 10 000 次循环至试验终止,两摩擦副的稳定摩擦系数与 0 ~ 10 000 次循环的稳定摩擦系数相近,如图 5 中的嵌入图所示. 可见,车轮试样经过激光处理后,其所在摩擦副的摩擦系数小幅增加. 激光离散处理后,车轮试样表层的熔凝区和基体的抗磨损性能不同,基体材料首先被磨损,使熔凝区材料凸起[见图 7(b)]. 这将造成接触区域不平顺,从而导致试样间的滑动阻力增加,轮轨试样摩擦副的摩擦系数增加.

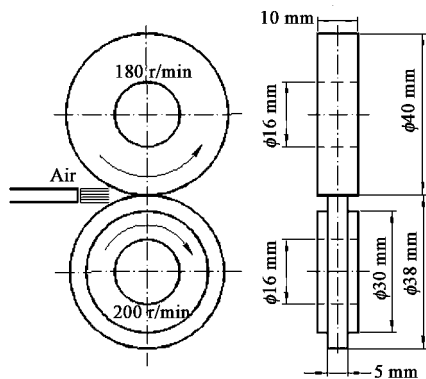


Fig. 2 Schematic illustration of friction and wear tests

图 2 摩擦磨损试验示意图

试样滚过单位长度 (1 m) 后试样产生的质量损失. 试验前,使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察车轮试样的显微组织,使用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析车轮试样的物相组成,使用维氏硬度仪测试轮轨试样的显微硬度. 试验后,沿着磨痕中心线切开轮轨试样,使

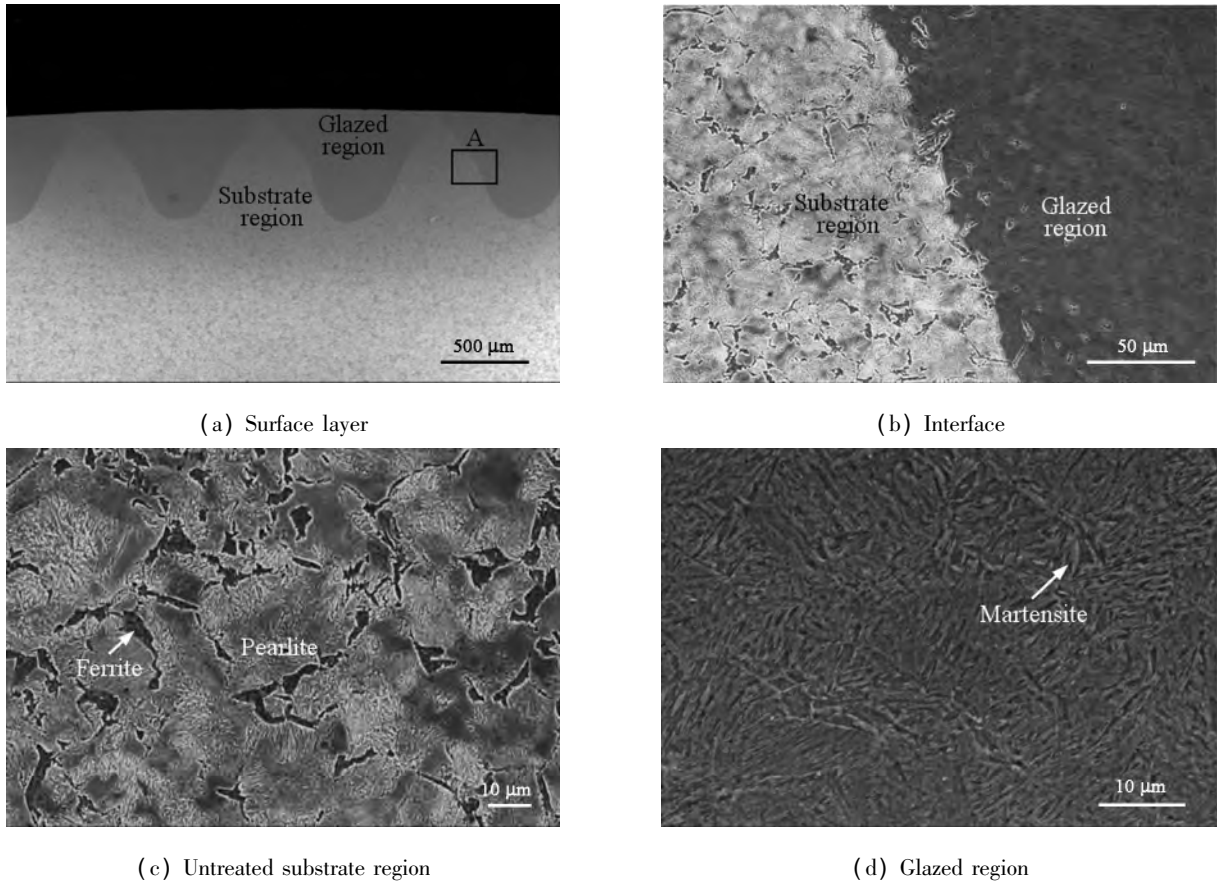


Fig. 3 SEM micrographs of treated wheel disc

图3 处理后车轮试样的显微组织

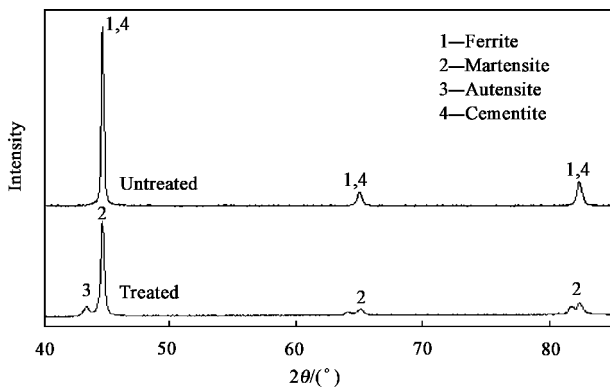


Fig. 4 XRD patterns of wheel disc

图4 车轮试样的XRD谱图

图6 是两个摩擦副的磨损率曲线. 除激光离散处理车轮试样外, 在0~40 000次循环, 其余试样的磨损率随循环次数的增加呈增大的趋势; 40 000次循环~试验终止, 试样的磨损率基本保持稳定. 激光离散处理后, 车轮试样表层由低硬度的基体材料和高硬度的熔凝区组成. 试验初期基体材料首先被磨损, 因此在0~10 000次循环, 试样的磨损率最高.

随着试验的进行, 熔凝区材料凸起, 其承受载荷逐渐增加; 接触区基体材料逐渐减少, 其承受载荷逐渐减少, 这将导致10 000~20 000次循环试样的磨损率下降. 当高硬度的熔凝区承受大部分载荷时, 试样达到稳定磨损阶段(20 000~100 000次循环). 在稳定磨损阶段, 未处理车轮试样的磨损率为 $8.6 \mu\text{g}/\text{m}$, 与其对磨的钢轨试样的磨损率为 $10.7 \mu\text{g}/\text{m}$; 处理后车轮试样的磨损率为 $3.6 \mu\text{g}/\text{m}$, 与其对磨的钢轨

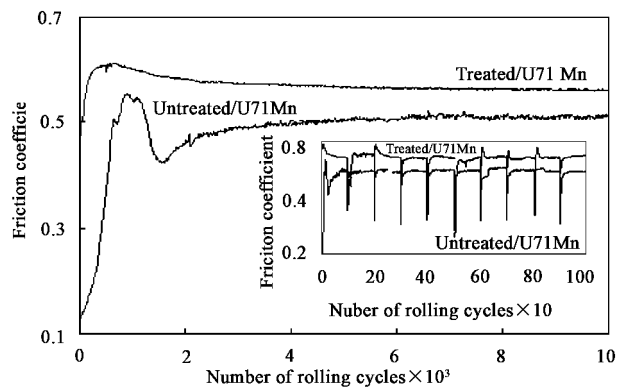


Fig. 5 Frictional trace of frictional pairs

图5 各摩擦副的摩擦系数曲线

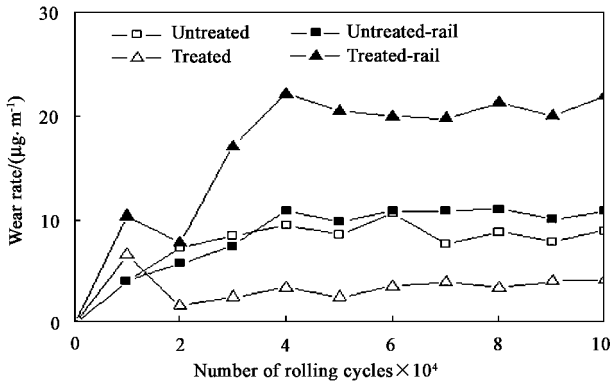


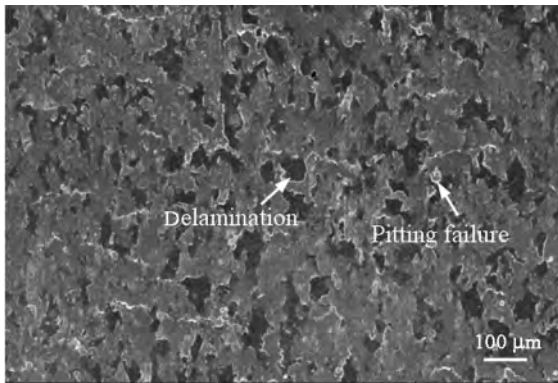
Fig. 6 Relationship between the wear rate and number of rolling cycles
图 6 各摩擦副磨损率曲线

试样的磨损率为 21.0 μg/m. 可见激光处理后的车轮试样的磨损率大幅降低, 与之对磨的钢轨试样的磨损率大幅增加.

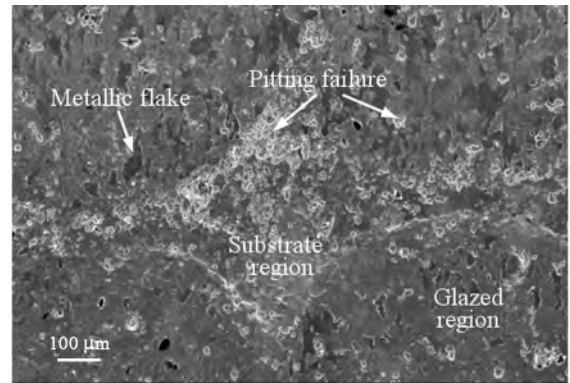
2.3 磨损机理

图 7 是车轮试样的磨痕形貌照片, 从中可见处理和未处理的车轮试样表面均出现剥层与剥落坑,

其中未处理车轮试样剥层较为明显, 剥落坑尺寸较小, 如图 7(a) 所示, 其磨损机制以剥层磨损为主并伴随轻微的疲劳磨损. 图 8 是试验后车轮试样的剖面组织, 从图 8(a) 可看出, 未处理车轮试样的表层发生明显的塑性变形, 变形层的深度约为 100 μm. 表面裂纹萌生于发生高度变形的表面铁素体组织, 并沿着材料塑性流动的方向发展, 进而形成图示的舌状形貌. 经过处理后的车轮试样的剥层磨损较轻, 剥落坑尺寸较大且在整个磨损区域的分布不均匀, 如图 7(b) 所示. 在熔凝区表面, 剥落坑分布稀疏且剥落坑尺寸较小, 在熔凝区之间的基体材料, 剥落坑分布密集且剥落坑尺寸较大. 可见, 经激光处理的车轮试样的磨损机制以疲劳磨损为主并伴随轻微的剥层磨损, 且熔凝区之间的基体材料磨损比较严重. 试验后激光处理试样的基体和熔凝区的纵向剖面组织分别如图 8(b) 和(c) 所示, 基体表层发生轻微塑性变形, 变形层的厚度约为 10 μm, 其塑性变形程度明显小于未处理车轮试样的塑性变形程度. 熔凝区表层未观察到塑性变形现象.

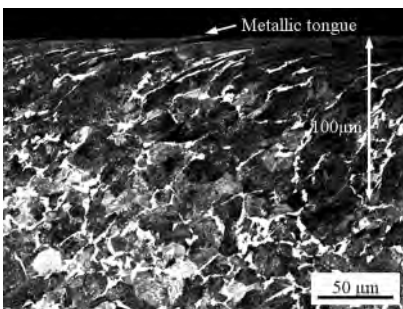


(a) Untreated wheel disc

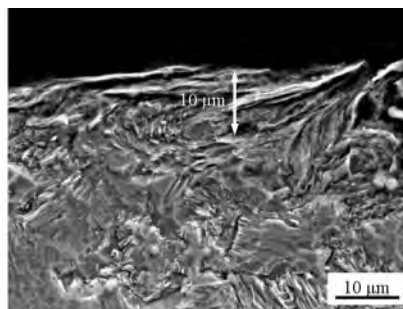


(b) Treated wheel disc

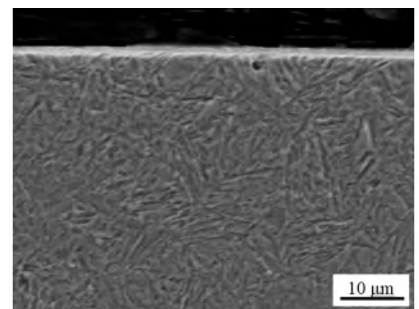
Fig. 7 SEM micrographs of worn surface of wheel discs
图 7 车轮试样的磨损形貌电镜照片



(a) Untreated wheel disc



(b) Substrate region of treated wheel disc



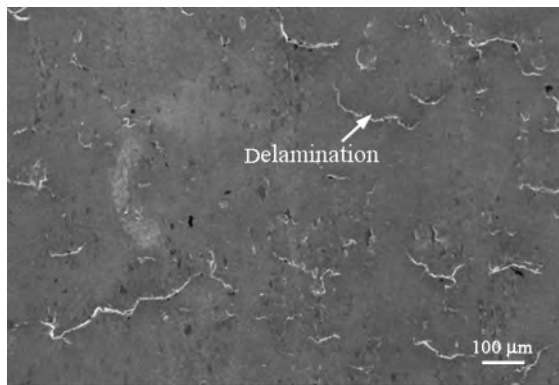
(c) Glazed region of treated wheel disc

Fig. 8 Cross-section microstructures of wheel discs after testing
图 8 试验后车轮试样的剖面组织

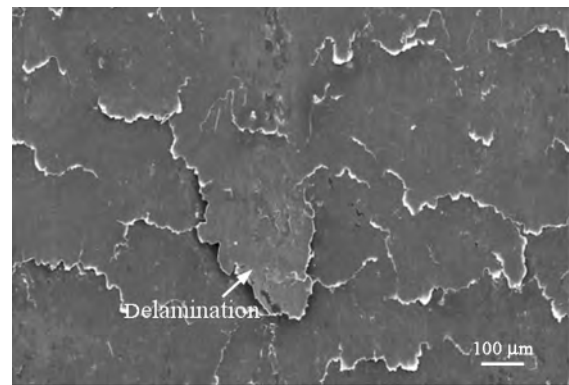
根据剥层磨损理论,摩擦副相互滑动时,车轮试样受到钢轨试样表面粗糙峰的作用,其表层产生剪切塑性变形并不断累积,这将在表层内引起位错的增殖和运动.随着剪切变形不断累积,表面下一定深度出现位错堆积,进而导致裂纹萌生.随着塑性变形的加剧,裂纹在一定深度沿平行于表面的方向扩展.当裂纹扩展到临界长度后,在裂纹与表面之间的材料将以片状磨屑的形式剥落,形成剥层磨损^[17].未处理车轮试样的表面硬度较低,其抗塑性变形能力低,因此材料剥层磨损严重.激光离散处理后,熔凝

区的抗塑性变形能力随硬度的增加而大幅提高,因此熔凝区的剥层磨损明显减轻.此外,硬度较高的熔凝区约束了表面基体材料的塑性变形,从而抑制了基体材料的剥层磨损.

图9是钢轨试样的磨损形貌照片,从图9中可看出,两种钢轨试样表面均出现明显剥层,Untreated/U71Mn摩擦副中的钢轨试样表面的剥层较小且在试样表面稀疏分布;Treated/U71Mn摩擦副中的钢轨试样表面的剥层较大且在试样表面密集分布.图10是试验后钢轨试样的剖面组织,钢轨试



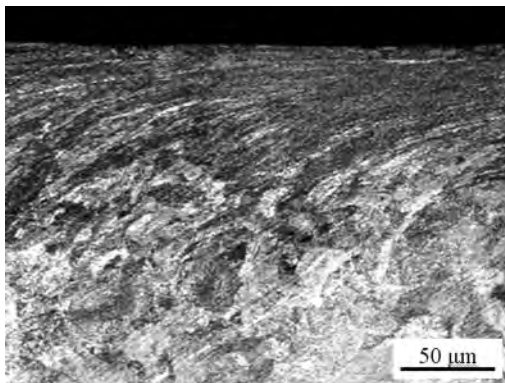
(a) Untreated/U71Mn



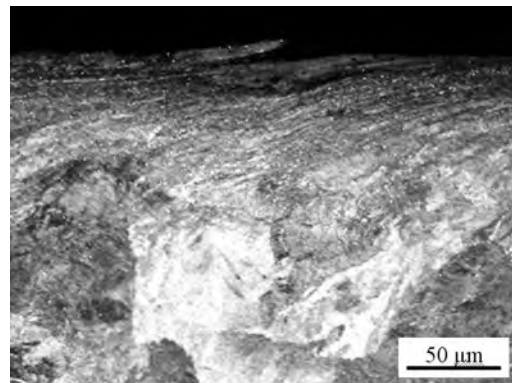
(b) Treated/U71Mn

Fig. 9 SEM micrographs of worn surface of rail discs

图9 钢轨试样的磨损形貌电镜照片



(a) Untreated/U71Mn



(b) Treated/U71Mn

Fig. 10 Cross-section microstructures of worn rail discs

图10 试验后钢轨试样的剖面组织

样表层材料的塑性变形特征均与图8(a)相似,但是Treated/U71Mn摩擦副中的钢轨试样表层材料的剥层现象比Untreated/U71Mn摩擦副明显.可见两摩擦副中钢轨试样的磨损机制均为剥层磨损,但是车轮试样经过激光离散处理后,与其对摩的钢轨试样的磨损加剧.以下几点原因可能导致Treated/

U71Mn摩擦副中的钢轨试样磨损加剧:①处理车轮试样的局部硬度大幅增加,导致对摩钢轨试样磨损率增加;②处理后,轮轨试样摩擦副的摩擦系数增加;③由于熔凝区材料凸起[见图7(b)],磨损过程中轮轨间接触面积减少,导致轮轨试样间的局部接触应力增加.

在某些山区铁路 轮缘磨耗严重,有时车轮仅经过三次镟修后就报废。轮缘磨耗是造成列车运营成本上升和运行安全性下降的主要原因。在此情况下,通过表面处理提高轮缘耐磨性的方法虽然增加了钢轨的磨损,但该方法能大幅延长车轮使用寿命,降低列车运营成本并提高列车运行安全性。通过强化轮缘延长车轮寿命的思路与文献[18-19]报道的方法相似。此外,国内外的运行经验发现在某些轴重轻、行车速度较快的线路上,车轮材料磨损速率偏高,导致车轮不圆度增加,车辆动力学性能下降的问题^[20-21];与之匹配的钢轨磨损速率很低,钢轨表面裂纹难以通过磨损消除,轮轨难以通过自然磨耗达到共形接触从而降低接触应力,导致钢轨容易出现滚动接触疲劳损伤^[20-22]。通过上述表面处理提高车轮的耐磨性既能减少车轮的不圆度,提高车辆动力学性能,又能通过增加钢轨磨损减少其滚动接触疲劳损伤。因此尽管车轮钢进行激光离散处理后,与其匹配的钢轨钢的磨损增加,但是这种车轮表面处理技术可以满足实际工程需要。

3 结论

a. 车轮试样经过激光离散处理后,其磨损率大幅降低,对应的轮轨试样摩擦副的摩擦系数小幅增加,与其对磨的钢轨试样的磨损率大幅增加。

b. 未处理车轮试样主要发生剥层磨损并伴随轻微的疲劳磨损;处理后的车轮试样主要发生疲劳磨损并伴随轻微的剥层磨损;各钢轨试样均发生剥层磨损,但是车轮试样经激光离散处理后,其对磨钢轨试样的剥层磨损加剧。

c. 激光离散处理提高了车轮试样表层材料的抗塑性变形能力,从而抑制了材料的剥层磨损,增加车轮试样的抗磨损性能。

参考文献:

- [1] Cui Y H, Fan Y, Pan T, *et al.* Effect of chromium on microstructure and mechanical properties of high-speed wheel steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18 (8): 39-42 (in Chinese) [崔银会, 范映, 潘涛等. 铬对高速车轮钢显微组织和力学性能的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18 (8): 39-42].
- [2] Zeng D F, Lu L T, Zhang Y B, *et al.* Effect of alloy content on rolling contact wear of high-speed wheel material [J]. *Tribology*, 2012, 06: 599-605 (in Chinese) [曾东方, 鲁连涛, 张远彬, 等. 合金含量对高速车轮材料滚动接触磨损性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2012, (6): 599-605].
- [3] Fletcher D I, Franklin F J, Kapoor A. Image analysis to reveal

crack development using a computer simulation of wear and rolling contact fatigue [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26 (10): 957-967.

- [4] Franklin F J, Widiyarta I, Kapoor A. Computer simulation of wear and rolling contact fatigue [J]. *Wear*, 2001, 251: 949-955.
- [5] Lonsdale C, Stone D. Some possible alternatives for longer-life locomotive wheels [C]. *Proceedings of 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana, November 17-22, 2002: 239-244.
- [6] Taleff E M, Syn C K, Lesuer D R, *et al.* Pearlite in ultrahigh carbon steels: Heat treatments and mechanical properties [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27(1): 111-118.
- [7] Wang W J, Liu Q Y, Zhu M H. Hardness matching behavior of wheel/rail materials [J]. *Tribology*, 2013, 33(1): 65-69 (in Chinese) [王文健, 刘启跃, 朱旻昊. 轮轨材料硬度匹配性能试验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(1): 65-69].
- [8] Ji H Z, Cui Y H, Su H, *et al.* Effect of carbon content on comprehensive properties of wheel steel for high speed train [J]. *Iron and Steel*, 2005, 40 (02): 62-65 (in Chinese) [季怀忠, 崔银会, 苏航等. 碳含量对高速车轮用钢综合性能的影响 [J]. *钢铁*, 2005, 40 (2): 62-65].
- [9] Singh U, Popli A, Jain D, *et al.* Influence of microalloying on mechanical and metallurgical properties of wear resistant coach and wagon wheel steel [J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2003, 12(5): 573-580.
- [10] Franklin F, Weeda G J, Kapoor A, *et al.* Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastraw two-material rail [J]. *Wear*, 2005, 258(7): 1048-1054.
- [11] DiMelfi R, Sanders P, Hunter B, *et al.* Mitigation of subsurface crack propagation in railroad rails by laser surface modification [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 106(1): 30-43.
- [12] Aldajah S, Ajayi O O, Fenske G R, *et al.* Investigation of top of rail lubrication and laser glazing for improved railroad energy efficiency [J]. *Journal of tribology*, 2003, 125(3): 643-648.
- [13] Wang H, Bergmann H. Rapid graphitization of a pulsed laser remelted ductile cast iron during multipass overlap melting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26(4): 793-800.
- [14] Iino Y, Shimoda K. Effect of overlap pass tempering on hardness and fatigue behaviour in laser heat treatment of carbon steel [J]. *Journal of materials science letters*, 1987, 6(10): 1193-1194.
- [15] Jiang J, Xue L, Wang S. Discrete laser spot transformation hardening of AISI O1 tool steel using pulsed Nd: YAG laser [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205 (21): 5156-5164.
- [16] Li Z Y, Zhong M L, Zhang H J, *et al.* Effect of laser spot alloying 42CrMo steel on the fatigue crack growth rate [J]. *Applied laser*, 2007, 27(1): 1-4 (in Chinese) [李正阳, 钟敏霖, 张红军, 等. 激光点状合金化对42CrMo钢疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. *应用激光*, 2007, 27(1): 1-4].

- [17] P Suh N. The delamination theory of wear [J]. *Wear*, 1973, 25 (1): 111 - 124.
- [18] Л А Чкалов, Zhang X R, Song Z M. Laser - strengthening for wheel and rail [J]. *Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology* 2000, (2): 7 - 12 (in Chinese) [Л. А. Чкалов, 张孝仁, 宋忠明. 车轮与钢轨的激光强化[J]. *国外机车车辆工艺* 2000 (02): 7 - 12].
- [19] Chen Y Z, Ma J. Study of wear - reducing technology for locomotive wheel flange [J]. *Diesel Locomotives*, 1995, (8): 4 - 7 (in Chinese) [陈扬枝, 马骥. 机车车轮缘减磨研究[J]. *内燃机车*, 1995, (8): 4 - 7].
- [20] Zhou Q Y, Zhang Y H, Chen Z Y *et al.* Intensity selection of rail grade and material for passenger - dedicated line [J]. *Chinese Railways* 2007 (7): 41 - 45 (in Chinese) [周清跃, 张银花, 陈朝阳 等. 客运专线钢轨的强度等级和材质选择[J]. *中国铁路* 2007 (7): 41 - 45].
- [21] Katrin M, Henri B, Detlev G *et al.* Material solution for wheels in high - speed trains to solve un - roundness problems [C]. In: 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Chengdu, China, August 27 - 30, 2012: 188 - 189.
- [22] Zhong W, Dong L, Wang Y *et al.* A comparative Investigation between rolling contact fatigue and wear of high - speed and heavy - haul railway [J]. *Tribology* 2012, 32(1): 96 - 101 (in Chinese) [钟雯, 董霖, 王宇 等. 高速与重载铁路的疲劳磨损对比研究[J]. *摩擦学学报* 2012, 32(1): 96 - 101].

订 阅 指 南

本刊为中国科学院兰州化学物理研究所主办、科学出版社出版并向国内外公开发行的覆盖摩擦学各分支学科的综合性学术期刊(双月刊)。本刊为中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》和科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》,已连续五版列入《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《金属文摘》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及《日本科技文献速报(JST)》等国际知名检索系统收录。

本刊主要报道摩擦学设计、摩擦力学、摩擦化学、摩擦学材料、摩擦学表面工程、特殊工况下的摩擦学、摩擦学测试技术与设备及摩擦学系统工程与应用等重要的基础研究和应用研究新成果。设有研究简报、研究论文、工程应用、专家论坛、评述与进展、回顾等栏目。

读者对象主要是从事摩擦学研究和新材料研制的科研技术人员及高等院校相关专业的教师和研究生以及工业领域的技术人员等。

订 阅 方 式

1 邮局订阅

全国各地邮局均可订阅 邮发代号:54 - 42 2014 年定价:30.0 元/期,180.0 元/年(全年 6 期)

2 直接汇款至编辑部订阅(可随时订阅)

方式一:邮局寄汇

地 址:兰州市天水中路 18 号中国科学院兰州化学物理研究所《摩擦学学报》编辑部收。

邮 编:730000

方式二:银行汇款

开 户 行:中国工商银行兰州市开发区支行

户 名:中国科学院兰州化学物理研究所

帐 号:2703000909026405762(银行汇款请注明“《摩擦学学报》编辑部”)