

# 在线热处理 U20MnH 钢轨耐磨性能试验研究

李培德, 梁正伟, 何建中, 贾鹏霞, 李 静, 杨 静

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 通过对在线热处理 U20MnH 钢轨进行磨损试验研究, 并结合显微镜和扫描电镜观测到的试样磨损表面和剖面的形貌特征, 分析了不同载荷条件下钢轨的磨损行为特征和变化规律。结果表明: 分别在 1 200 N、1 500 N、1 800 N 载荷的条件下, 在线热处理 U20MnH 钢轨磨损量随载荷的增大而显著减小。

**关键词:** 磨损; 钢轨; 塑性流变; 接触应力; 轴重

中图分类号: U270.33

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)02-0063-06

## Experimental Study on Wear Resistance of On Line Heat Treated U20MnH Rail

Li Pei-de, Liang Zheng-wei, He Jian-zhong, Jia Peng-xia, Li Jing, Yang Jing

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The characteristics and change rules of wear behavior for rail with different load conditions are analyzed through experimental study on wear of on line heat treated U20MnH rail combining with the morphology features of wear surface and profile for samples observed by microscope and scanning electron microscope. The results showed that the wear loss of on line heat treated U20MnH rail was significantly reduced with increase of load under load conditions of 1 200 N, 1 500 N and 1 800 N respectively.

**Key words:** wear; rail; plastic flow; contact stress; axle load

目前, 国内外广泛应用的钢轨大多数是珠光体钢轨, 随着我国高速重载铁路的发展, 轴重增加, 行车密度和速度提高, 现有珠光体钢轨面临的磨耗、滚动接触疲劳、钢轨核伤与断裂等伤损问题越来越严重, 影响了行车安全。近年来贝氏体钢轨因其强韧性高、抗滚动接触疲劳性能优良<sup>[1]</sup>, 以及优越的耐磨损性能倍受青睐, 世界很多国家致力于贝氏体钢轨的研究探索, 力求实现钢轨材料的升级换代。本文对 U20MnH 钢轨的耐磨性能进行了深入研究, 揭

示了 U20MnH 钢轨磨损行为特征和变化规律, 对提高在线热处理 U20MnH 钢轨的耐磨性能和使用寿命有十分重要的意义。

### 1 试验内容

#### 1.1 试验材料

##### 1.1.1 化学成分和力学性能

本试验采用在线热处理工艺生产的 75 kg/m U20MnHCrNiMo(简称 U20MnH) 钢轨, 其化学成分

如表 1 所示,常规力学性能如表 2 所示。

表 1 U20MnH 钢轨化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr + Ni + Mo	%
0.1 ~ 0.25	0.5 ~ 1.5	1.4 ~ 2.5	0.007	0.003	0.006	0.8 ~ 2.6	

表 2 U20MnH 钢轨力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	冲击功 /J	踏面硬度 (HB)
1 395	1 250	14.5	116	431

### 1.1.2 U20MnH 钢轨金相组织

U20MnH 钢轨显微组织以板条状、针叶状贝氏体和板条马氏体为主,其间分布着薄膜状残余奥氏体,如图 1 所示。

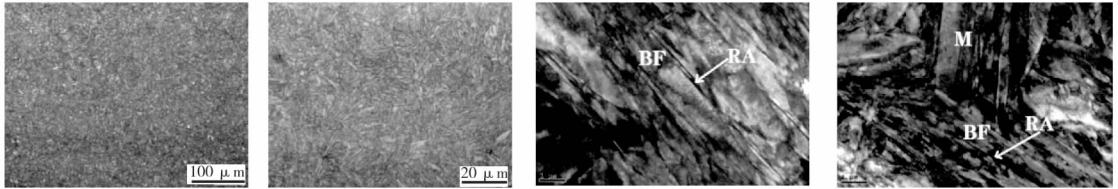


图 1 U20MnH 钢轨显微组织和 SEM 形貌

## 1.2 试验方案

### 1.2.1 取样位置及试样参数

车轮和钢轨试件分别取自车轮踏面和钢轨轨头<sup>[2]</sup>,磨损主样取自 75 kg/m U20MnH 钢轨,取样位置如图 2 所示。磨损主样厚度为 5 mm,半径为 20 mm,配样取自 CL60 车轮,磨损配样厚度为 10 mm,半径为 20 mm,主样与配样成品如图 3 所示。

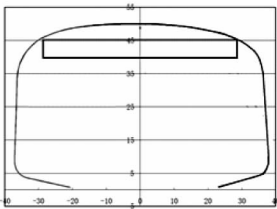


图 2 取样位置示意图

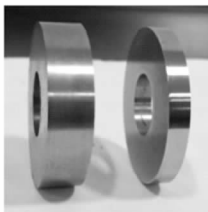


图 3 磨损试样成品

### 1.2.2 试验方法及磨损试验数据

磨损量是钢轨磨损性能的直观反映,磨损试验在 MMS-2A 磨损试验机上进行,采用滚滑复合摩擦磨损方式,滑差率为 10%,试验原理见图 4。载荷分别为 1 200 N、1 500 N、1 800 N,分别折合轴重约为 20 t、25 t、30 t,配样转速 200 r/min,主样转速 180 r/min。每组试样经磨合后进行磨损试验,每两万转,清洗一次,采用精度为 100 μg 的电子分析天平测量试验前后钢轨磨损主样的质量并计算其磨损量,至 10 万转终止,取三对试样试验结果的平均值作为一个试验数据,磨损试验数据见表 3。

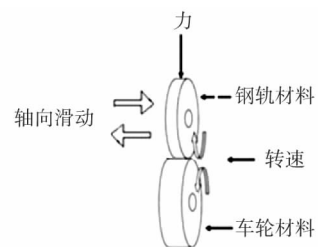


图 4 滚滑复合摩擦磨损试验原理

表3 不同载荷下 U20MnH 钢轨的磨损量 g

磨损周次	1 200 N	1 500 N	1 800 N
0~2 万	0.057	0.038	0.020
2 万~4 万	0.055	0.035	0.019
4 万~6 万	0.056	0.036	0.021
6 万~8 万	0.058	0.037	0.017
8 万~10 万	0.054	0.035	0.021
总磨损量	0.280	0.181	0.098

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试样磨损后的宏观形貌

钢轨主样在不同载荷条件下磨损的宏观形貌光滑,如同线路上的钢轨踏面上的光亮带,配样磨损严重,磨损的宏观形貌粗糙,侧视有明显塑性变形,如同线路钢轨服役后的肥边。在不同载荷条件下,主样和配样宏观磨损形貌如图5所示。

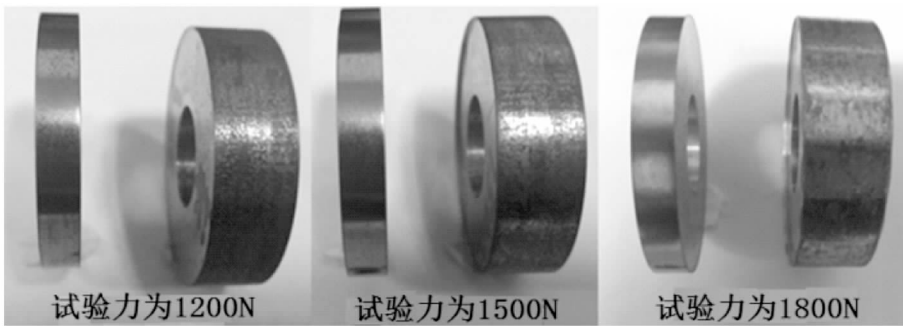


图5 不同载荷条件下主样和配样的宏观磨损形貌

### 2.2 试样磨损后的微观形貌与变化

#### 2.2.1 微观变化

如图6所示,磨损试样在滚滑复合摩擦时,表面和次表面在交变接触应力的作用下反复塑性变形,随着应变不断累积,内部晶粒发生滑移,滑移面和其附近的晶格扭曲,使晶粒拉长、破碎,产生晶粒细化和塑性流变,诱发试样摩擦面表层组织结构的变化。如图7所示,将磨损试样沿垂直滚动方向剖开,在扫描电镜下观察剖面与磨痕表面形貌,可以发现磨损表面层晶粒细化<sup>[3]</sup>,形成微米级的细晶,次表面晶粒发生塑性流变,形成与滚滑动方向和载荷相应的

类织物的结构,随着塑性流变程度逐渐减弱,最后过渡到基体组织。

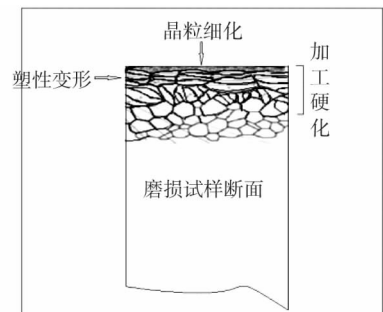


图6 磨损试样断面微观形貌示意图

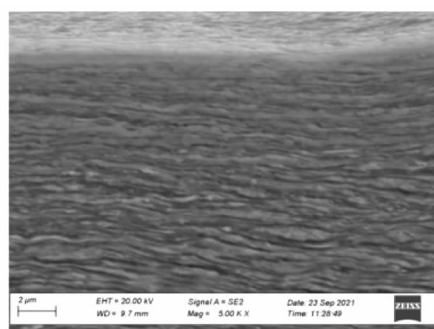
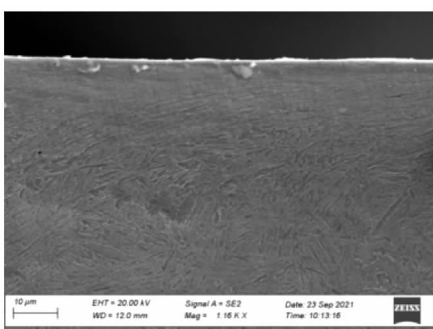


图7 磨损试样断面微观形貌

塑性流变大部分取向基本平行于表面,局部也出现弯曲的变形流变线,如图 8 所示。从图 8 中可以观察到表层的细晶和次表层的塑性流变,次表层

流变取向几乎完全平行于表面,随着深度的增加,局部出现弯曲的流变线,这与磨损过程中试样受到的复杂外载荷状态相关。

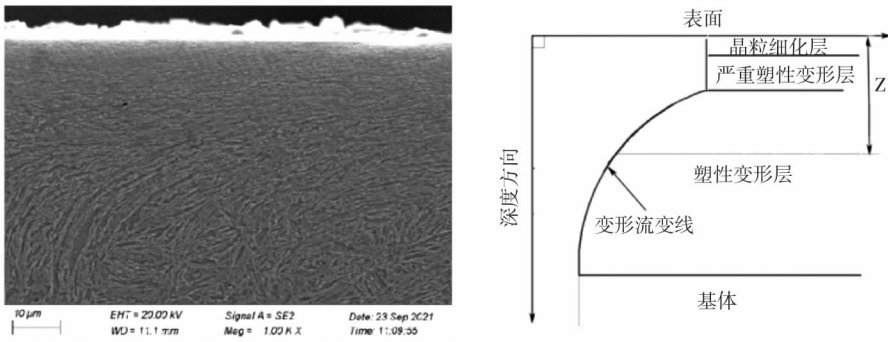


图 8 磨损试样断面 SEM 形貌及示意图

同时,不均匀变形在内部产生了残余应力,引起加工硬化,细晶层和流变层构成加工硬化层,U20MnH 钢轨试样经 10 万次磨损后,磨损断面组织变化的形貌如图 9 所示,可见加工硬化的变化。载荷为 1 200 N 时,磨损主样断面加工硬化层深度平均为 41  $\mu\text{m}$ ,载荷为 1 500 N 时,磨损主样断面加

工硬化层深度平均为 112  $\mu\text{m}$ ,载荷为 1 800 N 时,磨损主样断面加工硬化层深度平均为 198  $\mu\text{m}$ 。加工硬化层强度和硬度的增加,提高了钢轨耐磨性,但由于其应力集中,应变协调性不一致,易形成微裂纹并扩展,形成磨屑,加速磨损,这两种机制互为竞争关系。

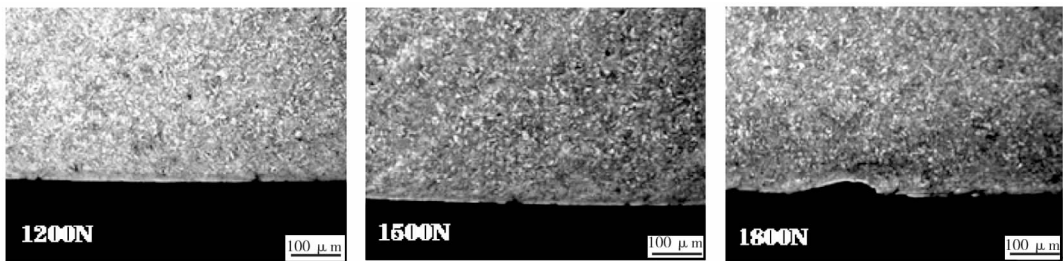


图 9 磨损试样断面组织形貌

### 2.2.2 裂纹形成与扩展

由于磨损试样表层、次表层累积承受复杂应力作用不断发生塑性变形,当塑性应变累积到金属塑性变形极限后,裂纹萌生,并不断扩展,同时,试样表层的细晶层和次表层的流变层相对于基体组织硬度高,内应力大,应变协调性不一致,更易萌生裂纹,并在外接触应力累积作用下不断扩展,最终折向表面,产生麻点或浅层剥落等磨屑。图 10(a)可以观察到流变层之间的微裂纹,图 10(b)可以观察到裂纹扩展路径,图 10(c)可以观察到裂纹扩展到表面,形成麻点剥离,造成磨损失重。

### 2.3 U20MnH 钢轨磨损规律分析

通过对 U20MnH 钢轨磨损试验数据分析,发现与珠光体钢轨不同的规律,随着载荷(轴重)的增加,U20MnH 钢轨磨损量反而减小,原因有二:

(1) 试样磨损表面的硬度随着载荷的增加而增加。表 4 为不同载荷下主样与配样摩擦面显微维氏硬度变化数据,由表 4 可以看出,随着载荷的增加,不论是配样,还是主样,磨损表面的硬度都逐渐增加。硬度的增加,主样与配样之间的摩擦系数减小,磨损减小。

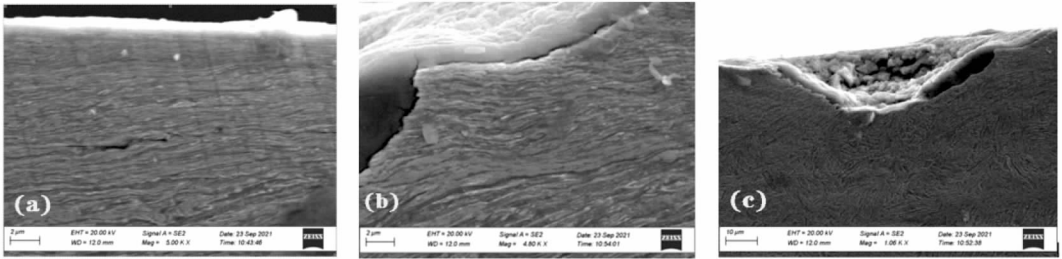


图 10 U20MnH 钢轨流变层微裂纹及扩展 SEM 图片

表 4 不同载荷下主样与配样摩擦面显微维氏硬度 (HV0.1) 变化

试样	母材	1 200 N	1 500 N	1 800 N
配样 (CL60 车轮)	264	406	472	501
主样 (U20MnH 钢轨)	431	527	559	586

图 11 为 U20MnH 钢轨磨损量与硬度关系,随着摩擦面硬度提高,磨损量明显减小。赵雪芹等指出<sup>[4]</sup>,对于同种材料的钢轨钢,硬度越高,耐磨性越强,这与本试验结果一致。

(2)麻点剥落(点蚀)失重小于浅层剥落失重。如图 12、图 13、图 14 所示,U20MnH 钢轨的磨损主要有麻点剥落(点蚀)和浅层剥落两种,这是在反复的滚滑作用下,接触表面出现疲劳所致<sup>[5]</sup>,麻点剥落(点蚀)的宏观特征为小痘状、贝壳状或其他不规则状凹坑,浅层剥落宏观特征为一定厚度的片状剥落层。

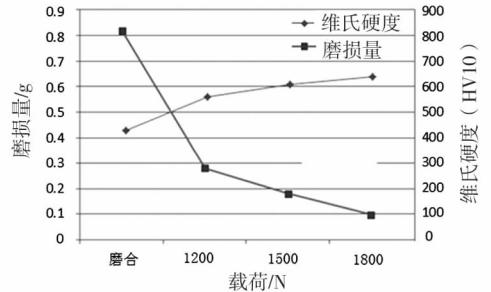


图 11 磨损量与硬度关系

如图 12 所示,载荷为 1 200 N 的磨损试样,其磨损机制主要为浅层剥落。如图 13 所示,载荷为 1 500 N 的试样,其磨损机制主要为浅层剥落和麻点剥落(点蚀)。如图 14 所示,载荷为 1 800 N 的试样,其磨损机制主要为麻点剥落(点蚀)。通过对 U20MnH 钢轨磨损数据分析,以及 SEM 观察结果,U20MnH 钢轨麻点剥落(点蚀)失重小于片状剥落失重。

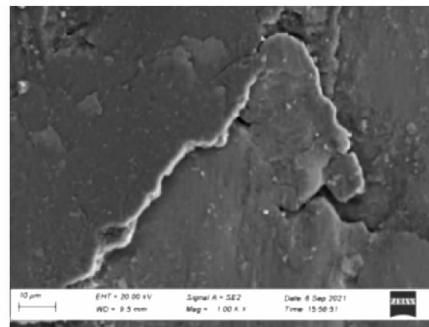
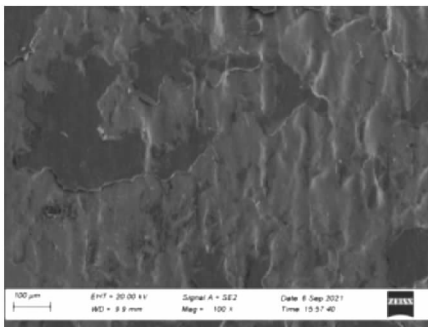


图 12 载荷为 1 200 N 试样摩擦面微观形貌

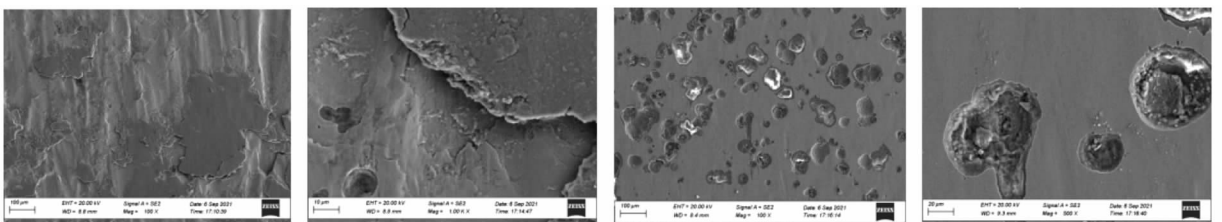


图 13 载荷为 1 500 N 试样摩擦面微观形貌

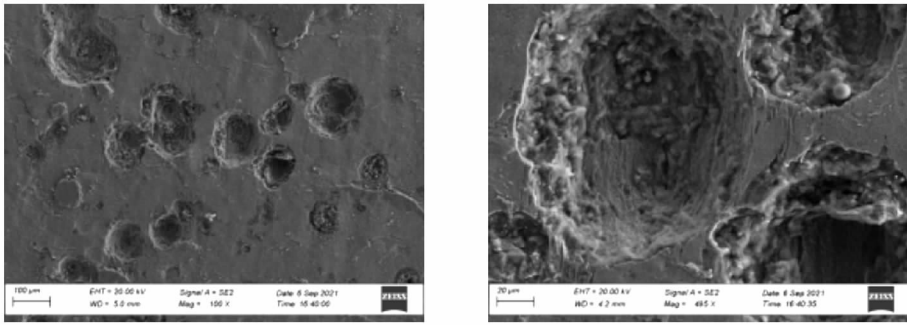


图14 载荷为1 800 N 试样摩擦面微观形貌

### 3 结论

(1)通过对贝氏体钢轨磨损试验数据分析,U20MnH 钢轨磨损性能与珠光体钢轨不同,随着载荷从1 200 N、1 500 N 到1 800 N 递增,磨损量减小。

(2)U20MnH 钢轨组织为贝/马复相组织,耐磨性能优越,特别是应用到重载铁路,更能表现出其耐磨性能的优越性。

#### 参 考 文 献

[1] 张银花,李闯,俞品,等. 30 t 轴重重载铁路钢轨轨型和材质对比试验[J]. 中国铁道科学,

2018,39(2):10-17.

[2] 李英奇,刘佳朋,张银花,等. 滑差对贝氏体钢轨材料磨损行为的影响[J]. 铁道建筑,2020,60(5):112-114,118.

[3] 郭火明,王文健,刘腾飞,等. 重载铁路钢轨损伤行为分析[J]. 中国机械工程,2014,25(2):267-272.

[4] 赵雪芹,王文健,钟雯,等. 钢轨滚动疲劳裂纹与磨损耦合关系研究[J]. 铁道学报,2009,31(2):84-87.

[5] 布尚 R 摩擦学导论[M]. 北京:机械工业出版社,2007.