

# -35 °C 低温下珠光体/贝氏体钢轨磨损与滚动接触疲劳行为研究

王泓豪<sup>1</sup>, 丁昊昊<sup>1\*</sup>, 汪 渊<sup>1,2</sup>, 陈崇木<sup>2</sup>, 王文健<sup>1</sup>, 周仲荣<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学摩擦学研究所, 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000)

**摘 要:** 高寒地区铁路钢轨面临着低温服役环境, 低温下钢轨的滚动磨损与损伤行为是影响其服役安全的重要因素。通过轮轨滚动接触模拟试验研究了-35 °C 温度下珠光体(亚共析钢和共析钢)和贝氏体钢轨磨损与滚动接触疲劳(RCF)损伤行为。结果表明, 贝氏体钢轨在-35 °C 试验温度下硬化程度较低, 导致磨损程度高于珠光体钢轨, 珠光体钢轨中亚共析钢轨磨损程度低于共析钢轨; 三种钢轨存在不同程度的 RCF 损伤, 疲劳裂纹主要以小角度(<10°)扩展。磨损和 RCF 存在竞争关系, 磨损较小的亚共析钢轨 RCF 损伤严重, 共析钢轨次之, 磨损最严重的贝氏体钢轨 RCF 损伤最轻微。

**关键词:** 珠光体钢轨; 贝氏体钢轨; 低温环境; 磨损; 滚动接触疲劳

中图分类号: TF76, U213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0171-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Study on rolling wear and rolling contact fatigue behavior of pearlite/bainite rail steels at the low temperature of -35 °C

Wang Honghao<sup>1</sup>, Ding Haohao<sup>1\*</sup>, Wang Yuan<sup>1,2</sup>, Chen Chongmu<sup>2</sup>,  
Wang Wenjian<sup>1</sup>, Zhou Zhongrong<sup>1</sup>

(1. Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** The rail in the high altitude and high latitude regions faces the low temperature service environment. The rolling wear and damage behaviors under low temperature are the significant factors influencing the rail service safety. The wear and rolling contact fatigue (RCF) damage laws of pearlite rail steels (hypoeutectoid and eutectoid) and bainite rail steel were explored at the low temperature of -35 °C using wheel/rail rolling contact simulation experiments. The results showed that the hardening degree of bainite rail was lower at -35 °C, and the wear degree was higher than those of pearlite rails. The wear degree of hypoeutectoid rail steel was lower than that of eutectoid rail steel. Different RCF damage levels occurred on the explored three kinds of rail steels. Cracks mainly propagated with small angles (< 10°). There was a competitive relationship between the wear and RCF. The RCF damage of hypoeutectoid rail steel with less wear was serious, followed by eutectoid rail, and the RCF damage of bainite rail steel with the most severe wear was the mildest.

**Key words:** pearlite rail steel, bainite rail steel, low temperature environment, wear, RCF

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(52202510, U21A20167)。

作者简介: 王泓豪, 1998 年出生, 男, 博士研究生, 主要从事轮轨材料服役损伤评价技术研究, E-mail: whh@my.swjtu.edu.cn;

\* 通讯作者: 丁昊昊, 1988 年出生, 男, 助理研究员、硕导, E-mail: haohao.ding@swjtu.edu.cn。

## 0 引言

铁路作为交通运输的重要组成部分,为国民经济的发展做出了重要贡献。随着我国铁路的快速发展,钢轨服役损伤成为日益突出的问题。磨损和滚动接触疲劳(RCF)损伤是引起钢轨失效的主要诱因,严重的磨损和 RCF 会导致钢轨产生侧磨、波磨、剥离甚至断裂<sup>[1-4]</sup>。

许多学者研究了轴重、速度、滑差和第三介质对钢轨磨损和疲劳的影响<sup>[5-9]</sup>。然而我国北方地区冬季环境气温较低,如哈尔滨至大连高速铁路冬季温度低至 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下<sup>[10]</sup>。钢轨在极寒环境下服役损伤更加严峻,国内外学者对此进行了大量研究。冯宝锐和王元清等<sup>[10-12]</sup>对低温下钢轨材料的断口、弹塑性断裂韧性以及抗脆断进行了研究,认为在低温下钢轨发生脆性破坏的可能性大大增加,U71Mn在低温下的断裂韧性整体强于U75V,并提出了一种钢轨钢材低温下防断设计方法。Kati Valtonen等人<sup>[13]</sup>研究了低温下冲击试验,发现大量的次表面绝热剪切带的形成促进了裂纹的萌生。马蕾等人<sup>[14-16]</sup>通过拉伸试验和双盘对滚试验研究了低温下钢轨的磨损和裂纹扩展行为,发现室温环境下轮轨材料磨损表面犁沟及剥离现象严重,以磨粒磨损为主,低温环境下轮轨材料磨损以黏着磨损为主;当温度降低到一定值时,裂纹扩展速率急剧增加;微观结构发生变化,脆性和热应力增强,导致裂纹长度和亚表面裂纹损伤增加。然而,贝氏体钢轨在低温下的磨损和滚动接触疲劳损伤尚未深入系统研究,不同钢轨材质(亚共析钢、共析钢、贝氏体钢)在低温下的性能对比研究也需进一步研究揭示。

笔者利用轮轨滚动接触模拟试验机与低温环境模拟系统,开展了珠光体钢轨(亚共析钢轨和共析钢轨)和贝氏体钢轨在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验温度下的滚动磨损试验,分析了不同组织的钢轨材料在低温下的磨损和 RCF 损伤规律,研究结果可为高寒地区钢轨设计与服役提供理论指导。

## 1 材料与试验方法

试验材料选用了 CL60 车轮与亚共析钢轨、共析钢轨以及贝氏体钢轨进行对滚。三种钢轨材料性能如表 1 所示。其中,亚共析钢轨由大量珠光体钢轨和少量的先共析铁素体组成,见图 1(a),由于其含碳量接近共析钢,因此先共析铁素体含量较少。共

析钢轨完全由珠光体钢轨组成,见图 1(b)。亚共析钢轨经过了一定的热处理,珠光体片层间距更小,强度更高<sup>[17]</sup>。贝氏体钢轨不仅由贝氏体铁素体(BF)和残余奥氏体(RA)组成,原本的奥氏体晶界(GB)附近存在粗壮的马氏体-奥氏体岛<sup>[18]</sup>(M/A),见图 1(c)。

表 1 钢轨材料性能  
Table 1 Properties of rail steels

钢轨材料	微观组织	含碳量/%	硬度(HV <sub>0.2</sub> )
亚共析钢	珠光体+先共析铁素体	0.64 ~ 0.7	377±11
共析钢	珠光体	0.65 ~ 0.77	300±9
贝氏体钢	贝氏体铁素体+残余奥氏体+马氏体/奥氏体岛	0.20 ~ 0.50	368±20

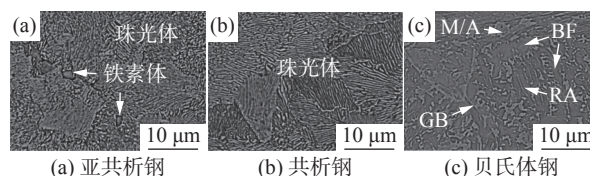


图 1 钢轨材料微观组织形貌  
Fig. 1 Microstructure of rail steels

轮轨滚动模拟试验是在装备有低温环境模拟系统<sup>[14]</sup>的MJP-30A滚动磨损与接触疲劳试验机上进行的,如图 2 所示。试验机由两个伺服电机驱动,减速之后连接试样轴。垂向力使用液压加载系统通过上试样轴施加,同时利用传感器检测垂向载荷。采用扭矩传感器(测量误差:±5%)测量切向扭矩,同时在计算机上自动记录切向力和黏着系数。固定在轮轨试样周围的铜腔提供低温环境。轮轨试样安装在铜腔内部。包含双级压缩机组的低温设备为试样提供低温环境。压缩机推动制冷剂在铜管中循环,从而在低温腔中提供低温环境。温度传感器固定在低温腔中,实时监测温度。试验期间,低温腔温度将保持稳定,波动小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

轮轨试样直径为 60 mm,接触宽度为 5 mm。在试验中,车轮试样的转速为 500 r/min,蠕滑率为 1%,循环次数为 $1\times 10^5$ 。轮轨试样法向力为 2 750 N,模拟轮轨接触压力约 1 161 MPa。试验在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验温度下进行。

测试前后需要对试样进行处理,包括酒精清洗、干燥和称重。通过电子天平(JA4103,精度:0.000 1 g)测量试样重量损失以计算磨损率,磨损率定义为质量损失与滚动距离的比值。使用维氏硬度计测量试样试验前后以及剖面的硬度,使用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)观测试样试验后的磨损表

面。然后,使用线切割技术切割试样截面,镶嵌后进行抛光,再用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,之后使用 OM 和 SEM 观察试样剖面损伤。

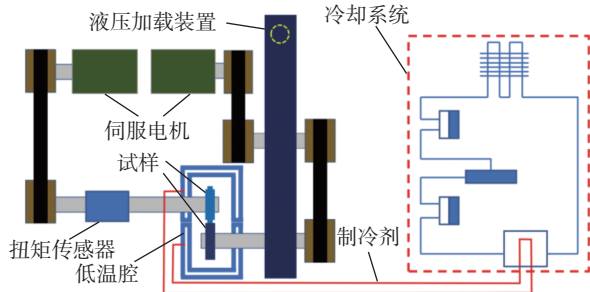
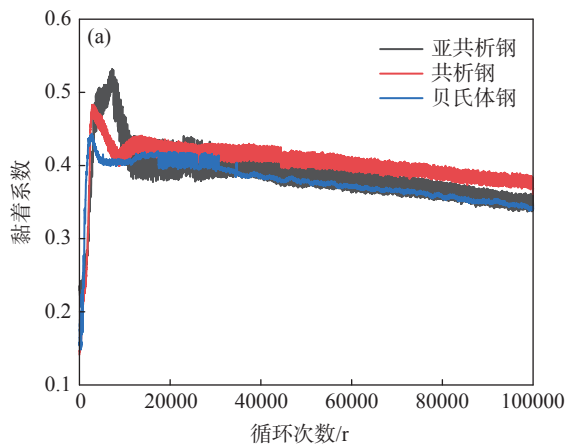


图 2 轮轨滚动接触模拟试验机与低温环境模拟系统示意  
Fig. 2 Schematic diagram of wheel-rail rolling contact simulation testing machine and low temperature environment simulation system



## 2 结果与讨论

### 2.1 轮轨黏着系数和钢轨磨损率

亚共析钢、共析钢与贝氏体钢三种钢轨材料在 -35 °C 下的黏着系数曲线如图 3(a) 所示。可以看到,三种钢轨的黏着系数均先快速上升,到达峰值之后轻微下降,在 0.4 左右达到稳定,轮轨之间的磨损进入稳定阶段。贝氏体钢轨最先到达稳定阶段,三者均在 1 万次循环前达到稳定磨损,稳定磨损时间超过 90%,总的磨损量能够很好的反应三种钢轨的磨损性能。黏着系数稳定后随着循环次数的增加,三种钢轨的黏着系数均缓慢降低。此外,三种钢轨的黏着系数无明显区别。

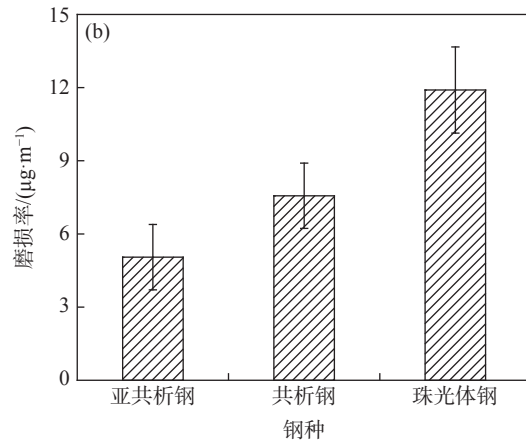


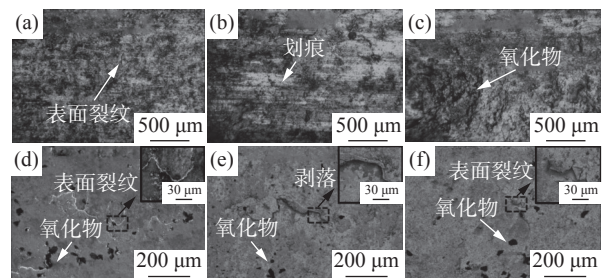
图 3 -35 °C 温度下轮轨黏着系数和钢轨磨损率  
Fig. 3 (a) Wheel/rail adhesion coefficient and (b) rail wear rate under the temperature of -35 °C

三种钢轨磨损率如图 3(b) 所示。钢轨在低温下磨损率均小于 50 μg/m, 属于轻度磨损范围,磨损率从小到大分别为亚共析钢轨、共析钢轨、贝氏体钢轨。经过热处理的亚共析钢轨具有优于共析钢轨的硬度,因此获得了较高的耐磨性<sup>[19]</sup>,但硬度较高的贝氏体钢轨磨损率反而更大,需要进一步分析。

### 2.2 钢轨表面损伤

图 4 为 -35 °C 试验温度下钢轨表面损伤 OM 和 SEM 形貌。OM 形貌中钢轨表面存在较多区域为黑色,同时 SEM 形貌中发现较多颗粒附着在试样的表面。文献 [20] 认为低温下(-40 °C)轮轨界面处的氧化物为 Fe 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合物,周亮<sup>[21]</sup> 通过 EDS 进行了证明。OM 形貌中发现三种钢轨沿着滚动方向存在明显的划痕,但 SEM 中并没有发现钢轨表面有沿着滚动方向连续的损伤。因此推断划痕仅因钢轨表层物质分布不均匀导致,并非沿着试样轴向磨损不均匀导致,未产生犁沟。氧化物在试

样表面形成摩擦膜,但在磨损的过程中,部分摩擦膜被去除,且还未形成新的氧化物,因此产生了划痕。三种钢轨试样表面存在表面 RCF 裂纹,且表面疲劳裂纹有剥离的趋势,说明三种钢轨均存在疲劳磨损。但贝氏体钢轨表面的裂纹宽度明显小于其他两种钢轨。



(a)亚共析钢, OM; (b)共析钢, OM; (c)贝氏体钢, OM; (d)亚共析钢, SEM; (e)共析钢, SEM; (f)贝氏体钢, SEM  
图 4 -35 °C 试验温度下钢轨表面损伤形貌  
Fig. 4 Surface damage morphology of rail steels at low temperature

### 2.3 钢轨次表面损伤

图5为-35℃试验温度下塑性变形层OM形貌。将塑性流变线与水平方向呈45°夹角处到表面的距离作为塑性变形层的厚度。由于共析钢硬度较低,其塑性变形层更厚,亚共析钢轨和贝氏体钢塑性变形层厚度接近。

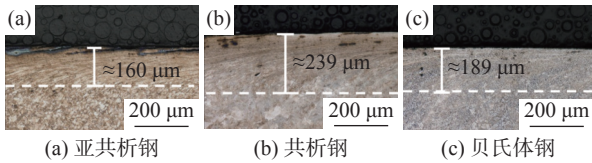


图5 -35℃试验温度下钢轨塑性变形层

Fig. 5 Plastic deformation layer of rail steels at low temperature

为分析磨损后钢轨材料在深度方向上的硬化情况,从试样表面开始,每隔40μm测量一次硬度,得到钢轨剖面硬度曲线,如图6所示。靠近钢轨表面的硬度较高,随深度增加硬度逐渐降低到基体硬度水平,此深度即为硬化层。贝氏体钢轨靠近表面的硬化层深度远低于其余两种钢轨,亚共析钢轨硬化层厚度低于共析钢。将深度40μm时的硬度与基体硬度对比,见表2,发现贝氏体钢轨在40μm时的硬化程度较低,硬化率仅为1.24,这导致贝氏体钢轨表面材料更容易被去除。亚共析钢轨硬化程度小于共析钢,但磨损程度低于共析钢,可见硬化程度不能完全主导钢轨的磨损行为。

图7为三种钢轨在-35℃试验温度下的剖面损伤SEM形貌。由图7可知,材料塑性变形严重,越接近钢轨材料表面,材料破碎程度越严重,根据塑性变形程度不同分为严重塑性变形区、过渡区和基体区<sup>[22]</sup>。通过分析三种钢轨材料在不同塑性变形区

域的微观组织形貌可以发现,亚共析钢轨和共析钢轨随着塑性变形程度的加剧,珠光体破碎程度不断加剧,而亚共析钢轨中先共析铁素体组织沿着切应力方向变形且细化为线状<sup>[22]</sup>。铁素体晶粒将比珠光体累积更高的塑性应变并率先耗尽<sup>[23]</sup>。铁素体内晶粒内部位错的运动与缠结会导致局部材料形成空腔<sup>[24]</sup>,空腔的扩展和相互汇合使铁素体颗粒内部萌生出微裂纹。贝氏体钢轨塑性变形过程中,残余奥氏体和马氏体-奥氏体岛沿着塑性流动方向变形,具有一定的方向性,随后逐渐产生破碎,在接近材料表面处破碎为较小颗粒。

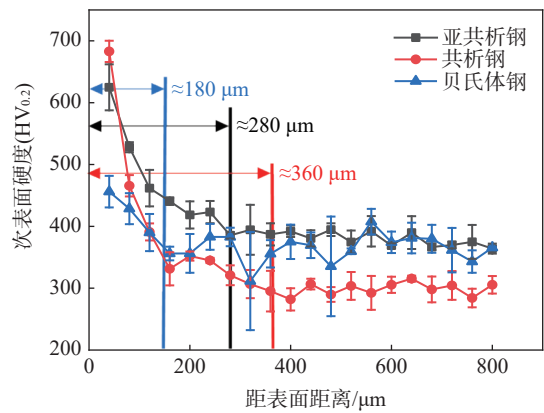


图6 -35℃试验温度下钢轨次表面硬化情况

Fig. 6 Hardening of rail steels of sub-surface at low temperature

表2 钢轨近表层硬度

Table 2 The hardness at near surface of rail steel

钢轨材料	40 μm深度处硬度 (HV <sub>0.2</sub> )	硬化率
亚共析钢	624	1.66
共析钢	682	2.27
贝氏体钢	456	1.24

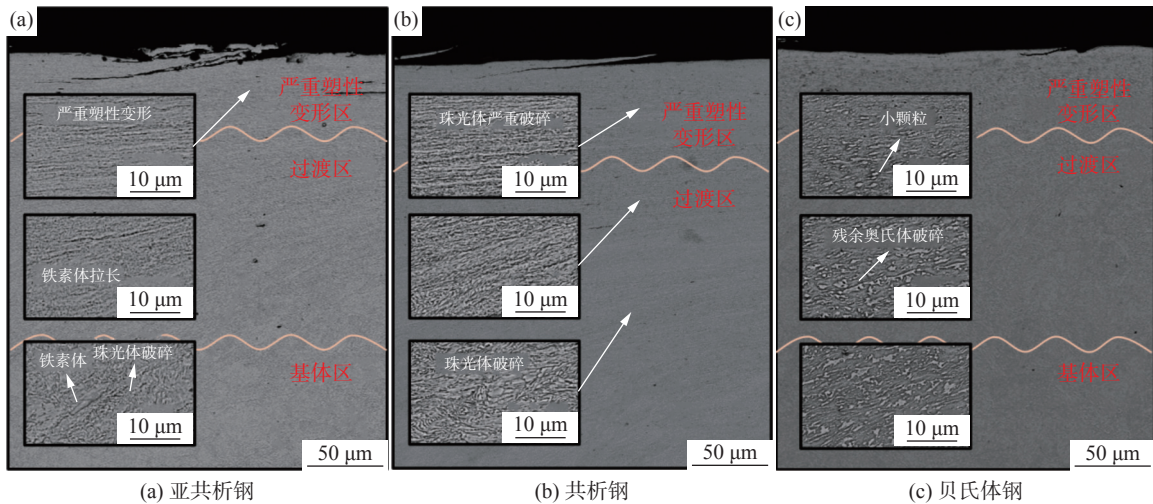


图7 -35℃试验温度下的钢轨次表面SEM形貌

Fig. 7 SEM morphology of subsurface of rail steels at low temperature

三种钢轨在低温下裂纹基本是呈小角度扩展。裂纹萌生之后,材料以较小角度向材料内部扩展,随后转向近乎水平于材料表面扩展,扩展到一定程度时,裂纹继续向着材料内部扩展,或者折向材料表面,形成疲劳损伤。图 8 对裂纹的深度、长度、角度以及单位剖面长度的裂纹数量(裂纹密度)进行了对比。可以看到,亚共析钢轨、共析钢轨和贝氏体三者的裂纹密度和裂纹长度依次降低,共析钢轨裂纹深度最大,亚共析钢轨次之,贝氏体钢轨最小。由于统计的裂纹基本都是小于  $10^{\circ}$  扩展,裂纹深度基本在  $10\text{ }\mu\text{m}$  左右,在较大的塑性变形下,裂纹很难向着材料内部继续扩展,当裂纹扩展到一定长度时,容易发生剥落,或者在磨损的过程中被去除。因此,裂纹长度能更好地反应 RCF 损伤程度,同时也反应了裂纹发生剥落的概率。裂纹深度差异不大时,裂纹长度越长,越容易发生剥落。结合裂纹密度结果,能反应

钢轨疲劳损伤的程度。亚共析钢轨的裂纹密度最大,达到  $3.5\text{ 条}/\text{mm}$ , 裂纹长度也最大,因此疲劳损伤最严重。而贝氏体钢轨的裂纹密度远小于其余两种钢轨,且裂纹长度较小,疲劳损伤较为轻微。由于钢轨在试验过程中磨损和 RCF 竞争,磨损率的提升会将裂纹扩展速率较低的裂纹清除,仅留下扩展速率较高的裂纹。对比钢轨磨损率,可以发现磨损率小的亚共析钢疲劳损伤更加严重,而磨损最严重的贝氏体钢轨 RCF 损伤轻微。

对比珠光体钢轨的裂纹长度和裂纹深度发现:亚共析钢轨的裂纹长度大于共析钢轨,但裂纹深度却小于共析钢轨。亚共析钢轨和共析钢轨均为珠光体钢轨,亚共析钢轨中含有少量的先共析铁素体,铁素体容易形成裂纹核,导致裂纹密度更大,但先共析铁素体在变形的过程中变形为线状,可充当晶界,可抑制裂纹向材料内部扩展。

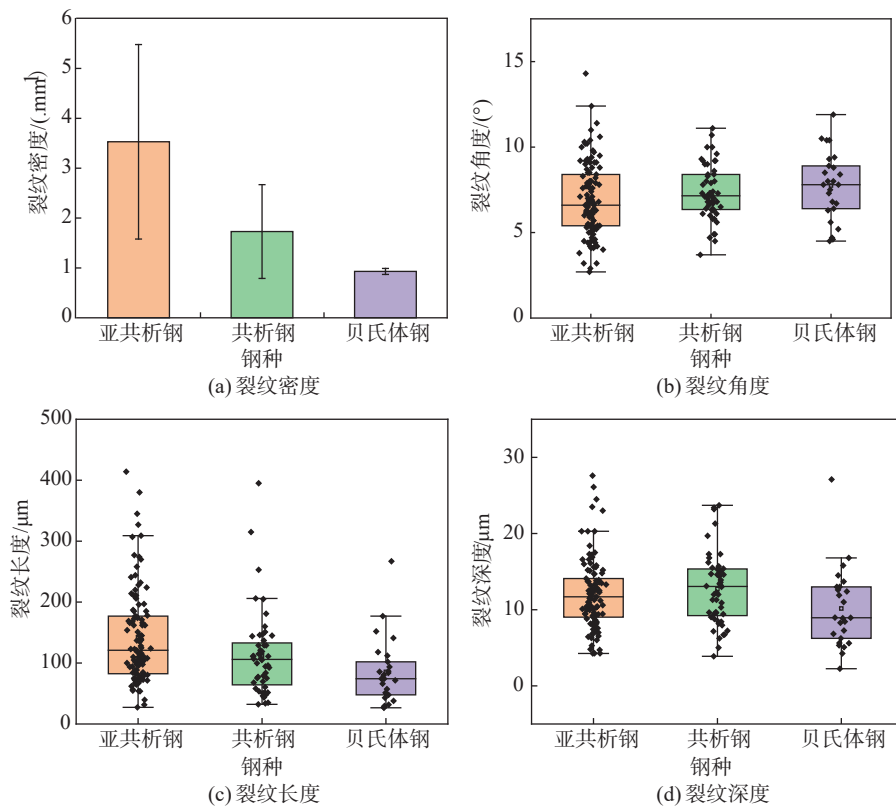


图 8  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  试验温度下的钢轨裂纹统计  
Fig. 8 Statistics of cracks on rail steels at low temperature

### 3 结论

1) 贝氏体钢轨在  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下硬化程度较低,导致磨损程度高于珠光体钢轨。珠光体钢轨中,亚共析钢轨磨损程度低于共析钢轨。

2) 三种钢轨表面均存在氧化物形成的摩擦膜,

摩擦膜的不断形成和磨损形成划痕。

3)  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下,三种钢轨材料均存在疲劳磨损。钢轨疲劳裂纹以小角度细长裂纹为主。磨损和 RCF 存在竞争关系,磨损较小的亚共析钢轨 RCF 损伤严重,共析钢轨次之,磨损最严重的贝氏体钢轨 RCF 损伤最轻微。

## 参考文献

- [1] Stock R, Pippin R. Rail grade dependent damage behaviour - Characteristics and damage formation hypothesis[J]. *Wear*, 2014, 314: 44-50.
- [2] Zerbst U, Beretta S, Köhler G, *et al.* Safe life and damage tolerance aspects of railway axles - A review[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 98: 214-271.
- [3] Wang W J, Guo H M, Du X, *et al.* Investigation on the damage mechanism and prevention of heavy-haul railway rail[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 35: 206-218.
- [4] Wang Y P, Ding H H, Zou Q, *et al.* Research progress on rolling contact fatigue of railway wheel treads[J]. *Surface Technology*, 2020, 49: 120-128.
- [5] Ding H H, Fu Z K, Wang W J, *et al.* Investigation on the effect of rotational speed on rolling wear and damage behaviors of wheel/rail materials[J]. *Wear*, 2015, 330: 563-570.
- [6] Ding H H, He C G, Ma L, *et al.* Wear mapping and transitions in wheel and rail materials under different contact pressure and sliding velocity conditions[J]. *Wear*, 2016, 352-353: 1-8.
- [7] Wang W J, Jiang W J, Wang H Y, *et al.* Experimental study on the wear and damage behavior of different wheel/rail materials[J]. *Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230: 3-14.
- [8] Zhang S Y, Spiriyagin M, Ding H H, *et al.* Rail rolling contact fatigue formation and evolution with surface defects[J]. *International Journal Fatigue*, 2022, 158: 106762.
- [9] Zhang S Y, Spiriyagin M, Lin Q, *et al.* Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions[J]. *Tribology International*, 2022, 169: 107491.
- [10] Feng Baorui, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu. Analysis on CTOD and J integral of rail steel under low temperature[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2007, 3(3): 29-32.  
(冯宝锐, 王元清, 石永久. 低温下铁路钢轨钢材的断口与弹塑性断裂韧性分析[J]. *低温建筑技术*, 2007, 3(3): 29-32.)
- [11] Feng Baorui, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu. Analysis and discussion on the design method for rail fracture-resisting under low temperature[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 26(3): 15-19.  
(冯宝锐, 王元清, 石永久. 低温下铁路钢轨抗脆断设计方法分析[J]. *铁道工程学报*, 2009, 26(3): 15-19.)
- [12] Wang Yuanqing, Feng Baorui, Shi Yongjiu. Analysis of fracture toughness properties of rails steel under low temperature conditions[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2007, 4(4): 1-5.  
(王元清, 冯宝锐, 石永久. 低温下铁路钢轨断裂韧性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2007, 4(4): 1-5.)
- [13] Valtonen K, Ratia V, Ramakrishnan K R, *et al.* Impact wear and mechanical behavior of steels at subzero temperatures[J]. *Tribology International*, 2019, 129: 476-493.
- [14] Ma Lei, He Chenggang, Zhao Xiangji, *et al.* Simulation experiment for rolling wear of wheel/rail materials under low temperature environment[J]. *Tribology*, 2016, 36(1): 92-97.  
(马蕾, 何成刚, 赵相吉, 等. 低温环境下轮轨材料滚动磨损模拟试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(1): 92-97.)
- [15] Ma L, Guo J, Liu Q Y, *et al.* Fatigue crack growth and damage characteristics of high-speed rail at low ambient temperature[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 82: 802-815.
- [16] Ma L, Shi L B, Guo J, *et al.* On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition[J]. *Wear*, 2018, 394-395: 149-158.
- [17] Mo Wenfeng. Thermodynamic control of pearlite lamellar sheet spacing and its effect on mechanical properties of steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 175-179.  
(莫文锋. 珠光体片间距的热力学控制及其对钢力学性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 175-179.)
- [18] Tang Jianwei. Effect of bainite isothermal time on microstructure and mechanical properties of ultra-high strength cold-rolled transformation induced plasticity steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37(6): 133-136.  
(唐建伟. 贝氏体等温时间对超高强冷轧相变诱导塑性钢组织性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37(6): 133-136.)
- [19] Steele R, Reiff R. Rail: it's behaviour and relationship to total system wear [C]//Pro 2nd Conf on Heavy Haul. Colorado Springs, USA, 1982.
- [20] Shi L B, Ma L, Guo J, *et al.* Influence of low temperature environment on the adhesion characteristics of wheel-rail contact[J]. *Tribology International*, 2018, 127: 59-68.
- [21] Zhou Liang, Guo Lichang, Ding Haohao, *et al.* Wear and damage evolution behaviours of railway wheel steel in the low temperature environment[J]. *Tribology*, 2022, 42(4): 844-853.  
(周亮, 郭立昌, 丁昊昊, 等. 低温环境下列车车轮材料磨损与损伤演变行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(4): 844-853.)
- [22] Hu Y, Zhou L, Ding H H, *et al.* Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading[J]. *Tribology International*, 2021, 154: 106685.
- [23] Hu Y, Zhou L, Ding H H, *et al.* Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions[J]. *Tribology International*, 2020, 143: 106091.
- [24] Suh N P. The delamination theory of wear[J]. *Wear*, 1973, 25(1): 111-124.