

轮轨材料/硬度匹配研究进展与展望

胡月¹, 谭德强¹, 丁昊昊², 周韶博³, 刘佳朋³,
王文健², 张银花³, 刘启跃²

(1.中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307; 2.西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031; 3.中国铁道科学研究院集团有限公司 金属及化学研究所, 北京 100081)

摘要: 车轮与钢轨硬度是影响轮轨磨损的主要因素之一, 合理的轮轨材料与硬度匹配对于减轻轮轨磨损、延长服役寿命具有十分关键的作用。当前我国铁路运营过程中存在 2 种硬度钢轨匹配 4 种硬度车轮的现象, 材料匹配行为复杂。针对铁路轮轨材料和硬度的选用与匹配, 至今尚无统一合理的规定与标准。从轮轨材料硬度出发, 首先分析了国内外轮轨材料发展与硬度匹配的使用现状, 发现不同国家和地区轮轨材料硬度的选用存在较大差异。具体表现为: 日本新干线使用的车轮硬度远高于钢轨 ($H_R/H_W < 1$), 欧洲高速铁路上 H_R/H_W 值接近 1, 而中国高速铁路系统中, 轮轨种类多, 硬度区间大。其次, 总结了轮轨硬度匹配研究进展, 明确材料硬度和轨轮硬度比 (H_R/H_W) 对磨损与滚动接触疲劳损伤都具有显著影响, 但并没有形成统一的结论, 且以往的材料选用经验并不完全适用于当前的铁路系统。然后, 针对现阶段轮轨材料与硬度匹配研究, 探讨了材料加工硬化、合金钢微观组织、表面热处理工艺、复杂服役环境与车轮运行参数等因素的潜在影响。最后, 提出了以建立统一合理的实验标准与评价体系为前提, 开展复杂服役工况下高速和重载轮轨材料损伤行为与失效机制研究, 轮轨材料硬度/韧性最佳匹配行为与选配原则研究, 以及轮轨磨损规律与服役寿命预测方法研究等未来研究趋势的展望。

关键词: 轮轨; 硬度匹配; 磨损; 微观组织

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)02-0107-15

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.02.010

Research Progress and Prospect of Materials/Hardness Matching Behaviors of Wheel and Rail

HU Yue¹, TAN De-qiang¹, DING Hao-hao², ZHOU Shao-bo³, LIU Jia-peng³,
WANG Wen-jian², ZHANG Yin-hua³, LIU Qi-yue²

(1. Aviation Engineering College, Civil Aviation Flight University of China, Sichuan Guanghan 618307, China;

2. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2022-01-05

Received: 2021-10-18; Revised: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975489); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题 (2022TPL-T04); 四川省国际科技创新合作项目 (2023YFH0023); 四川省重点研发项目 (2023YFG0213)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975489); Autonomous Research Project of State Key Laboratory (2022TPL-T04); International Science and Technology Innovation Cooperation Project of Sichuan Province (2023YFH0023); Key Research and Development Project of Sichuan Province (2023YFG0213)

作者简介: 胡月 (1993—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为轮轨磨损与滚动接触疲劳损伤。

Biography: HU Yue (1993-), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: wear and RCF damage of wheel and rail.

通讯作者: 刘启跃 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轮轨摩擦学。

Corresponding author: LIU Qi-yue (1964-), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology of wheel and rail.

引文格式: 胡月, 谭德强, 丁昊昊, 等. 轮轨材料/硬度匹配研究进展与展望[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 107-121.

HU Yue, TAN De-qiang, DING Hao-hao, et al. Research Progress and Prospect of Materials/Hardness Matching Behaviors of Wheel and Rail[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 107-121.

3. Institute of Metals and Chemistry, China Railway Science Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The hardness of wheel and rail is one of the main factors that affect the wear of wheel/rail friction pairs. An optimal hardness matching of wheel and rail could play a vital role in reducing the wear and prolonging the service life of wheel and rail. However, at present, there are two kinds of rails matching four kinds of wheels with various hardness in Chinese railway operation, and the material matching behavior becomes complicated. However, regarding the selection and matching of materials and hardness of railway wheel and rail, no uniform and reasonable regulations and standards have been established so far. Besides, with the development of high-speed and heavy-haul railway in China, new damage response has occurred on wheel and rail, which has greatly increased the frequency of wheel repairs, while rail damage behaves slight. Therefore, it is necessary to carry out research on hardness matching of wheel and rail systematically.

First, the application situation of wheel and rail materials and their hardness matching across various countries were compared and analyzed in the present work. Through increasing the carbon content, alloying, and heat treatment etc. to refine the pearlite structure, rail materials with good mechanical properties have been developed. The hardness of the R400HT rail can be increased to 400-440HB. Comparing the microstructure of Chinese standard and heat-treated wheel/rail materials, it was found that the hardness and strength increase with the decrease of the ferrite content of wheel and the decrease of the pearlitic lamella spacing of rail. In addition, it is totally different in the selection of wheel and rail materials and hardness in different countries and regions. Specifically, the wheel hardness used in Japan is much higher than rail hardness ($H_R/H_W < 1$), and the H_R/H_W value on high-speed railways in Europe is close to 1, while in Chinese high-speed railway, there are many types of wheels and rails with a large hardness range.

Secondly, the research progress of hardness matching behaviors of wheel and rail was summarized. Hardness and rail/wheel hardness ratio (H_R/H_W) definitely have significant effects on wear and rolling contact fatigue damage. Increasing the hardness of the wheels/rails can effectively reduce their wear loss, however, no unified theory has been formed for the impact on the matched rails/wheels. Meanwhile, the results of the optimal wheel/rail hardness matching behavior cannot be intuitively compared, and the previous experience of material selection has not fully applicable to the current railway system, neither.

Next, in view of the current hardness matching research of wheel and rail, the potential effects of factors such as work hardening, material microstructure, surface heat treatment process, complex service environment, operating parameters, and other factors (the frequency of wheel/rail, rolling direction, driving and braking conditions, etc.) were discussed. The influence of these factors on the damage and hardness matching behavior of wheel/rail is to affect the work hardening and microstructure by changing the plastic deformation. However, the mechanism of work hardening and microstructure evolution of wheel/rail materials during rolling contact is still unclear.

Finally, some prospects for further research were proposed, including establishing a unified and reasonable experimental standard and evaluation system, carrying out the damage behaviors and failure mechanism of high-speed and heavy-haul wheel/rail materials under complex service conditions, research on optimal hardness/toughness matching behaviors and principles and study in high-speed wheel/rail wear law and service life prediction method.

KEY WORDS: wheel and rail; hardness matching; wear; microstructure

我国铁路系统迅猛发展, 2020 年全国铁路固定资产投资完成 7 819 亿元, 铁路营业里程达到 14.63 万公里, 其中高速铁路 3.8 万公里, 高居世界第一^[1]。快捷舒适的高速铁路为市场资源配置和国民经济发展注入了强大的动力, 同时也对列车性能、铁路安全与运营提出了更高要求。

车轮与钢轨通过滚动接触实现列车的支撑、导向、牵引和制动, 是保障列车安全运行的关键部件。轮轨作为一对摩擦副, 其材料的合理匹配对提高轮轨的综合使用寿命与铁路运营经济效益具有十分关键的作用^[2]。近年来, 我国铁路轮轨材料得到了较大的

发展, 钢轨和车轮材料都已经完成国产化并通过 CRCC 认证。但当前我国铁路运营过程中存在 2 种硬度钢轨匹配 4 种硬度车轮的现象, 材料匹配行为复杂。针对铁路轮轨材料的选择, 目前尚无统一合理的规定和标准。

此外, 随着我国铁路运输向高速化、重载化发展, 轮轨接触过程中高速振动特性等使得轮轨损伤表现出新的现象和规律。例如, 目前我国高速车轮主要表现为严重的多边形磨损、车轮踏面凹磨、踏面剥离等, 镟修养护频次大幅增加, 服役寿命急剧下降^[3], 而高速钢轨磨损轻微 (京沪高铁在运行 11 个月通过总质

量 39.4 Mt 时最大磨耗仅有 0.07 mm), 磨损寿命预期可达 50 年之久。这说明以往的轮轨材料选用经验并不完全适用于当前的国内铁路系统。

综上所述, 深入开展轮轨硬度匹配与失效机制研究, 将为我国标准动车组轮轨材料的优化选用及统型提供重要的理论支撑和技术指导。本文针对轮轨硬度匹配问题, 归纳分析了国内外轮轨材料发展与使用现状, 总结了轮轨硬度匹配实验室研究进展, 阐明了轮轨硬度匹配在使用中的影响因素, 提出了轮轨硬度匹配研究展望。

1 国内外轮轨材料发展与使用现状

为了减少磨损和滚动接触疲劳损伤, 延长轮轨材料使用寿命, 国内外研究人员致力于开发和使用高耐磨性和高抗疲劳性能的优质轮轨材料。由于更换钢轨维护成本高、难度大, 而车轮可以通过镟修来消除损伤、恢复廓面。因此, 各国主要致力于开发优质钢轨材料, 而车轮材料几乎没有变化。如, 已有 9 种珠光体钢轨和 4 种贝氏体钢轨被纳入欧洲铁路标准 EN 13674-1: +A1 2017, 见表 1^[4]; 而同时期车轮标准并没有更新, 如表 2 所示^[5]。

目前国内外最常用的轮轨材料是珠光体钢, 由片层铁素体和渗碳体交叉组成。研究人员通过增大碳含

量、合金化、热处理等方法细化珠光体层状结构, 已开发出高硬度、高机械性能的优质钢轨材料^[6]。从表 1 可以看出, 欧洲珠光体钢轨材料的碳含量(质量分数)已从 R200 钢的 0.40%~0.60% 增加到 R400HT 中的 0.90%~1.05%, 硬度也从 200~240HB 增加到近 400HB。同时, 钢轨材料的机械性能也得到了极大的改善。例如, R400HT 钢的抗拉强度提高到了 1 280 MPa。

为了减少轮轨磨损、延长服役寿命, 我国主要采用热处理方法提高轮轨材料硬度。例如, 我国铁路线路曲线段铺设了热处理珠光体钢轨 U78CrVH 和 U75VH, 轨面硬度可达 390HB 和 360HB; 重载铁路货车还使用热处理 C 级和 D 级车轮, 轮辋表面硬度可达 360HB。轮轨材料化学成分与热处理方式的差异必将导致材料微观组织形貌的变化, 主要表现在珠光体片层间距、珠光体团尺寸和先奥氏体晶粒度等。图 1 显示了标准热轧钢轨 U75V 和热处理钢轨 U75VH 的微观组织形貌, 2 种钢轨材料碳含量(质量分数)为 0.71%~0.80%, 硬度分别为(303±14)HV0.5 和(357±19)HV0.5。从图 1 可以看出, 热处理后钢轨珠光体片层间距显著减小。采用圆周法测量了平均珠光体片层间距($S_p=0.5L/N$)^[7], 对于 U75V 和 U75VH 钢轨材料, S_p 平均值分别为(202.4±49) nm 和(117.8±10) nm。可见, 热处理后珠光体片层间距的减小是材料硬度增大的主要原因。

表 1 欧洲铁路标准中的钢轨材料^[4]
Tab.1 Rail materials in European railway standards^[4]

Rail classification	Grade	Chemical composition/wt. %					Mechanical property		
		C	Si	Mn	Max P	Max S	R_m /MPa	A/%	Hardness(HB)
Soft pearlite	R200	0.40-0.60	0.15-0.58	0.70-1.20	0.035	0.035	680	14	200-240
Standard pearlite	R220	0.50-0.60	0.20-0.60	1.00-1.25	0.025	0.025	770	12	220-260
	R260	0.62-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	0.025	0.025	880	10	260-300
Alloying pearlite	R260Mn	0.55-0.75	0.15-0.60	1.30-1.70	0.025	0.025	880	10	260-300
	R320Cr	0.60-0.80	0.50-1.10	0.80-1.20	0.02	0.025	1 080	9	320-360
Heat treatment perlite	R350HT	0.72-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	0.02	0.025	1 175	9	350-390
	R350LHT	0.72-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	0.02	0.025	1 175	9	350-390
	R370CrHT	0.70-0.82	0.40-1.00	0.70-1.10	0.02	0.02	1 280	9	370-410
	R400HT	0.90-1.05	0.20-0.60	1.00-1.30	0.02	0.02	1 280	9	400-440
Bainite	HP335	0.87-0.97	0.75-1.00	0.75-1.00	0.02	0.008	1 150	7	≥335
	B320	0.15-0.25	1.00-1.50	1.40-1.70			1 100	13	≥320
	B360	0.25-0.35	1.00-1.50	1.40-1.70			1 200	12	≥360
	DOBAIN	0.76-0.84	0.20-0.35	0.80-0.90			1 400	9	≥430

表 2 欧洲铁路标准中的车轮材料^[5]
Tab.2 Wheel materials in European railway standards^[5]

Wheel grade	Chemical composition/wt. %					Mechanical property		
	C	Si	Mn	Max P	Max S	R_m /MPa	A/%	Hardness(HB)
ER6	≤0.48	≤0.40	≤0.80	0.02	0.015	780-900	15	≥245
ER7	≤0.52	≤0.40	≤0.80	0.02	0.015	820-940	14	≥245
ER8	≤0.56	≤0.40	≤0.80	0.02	0.015	860-980	13	≥245
ER9	≤0.60	≤0.40	≤0.80	0.02	0.015	900-1 050	12	≥245

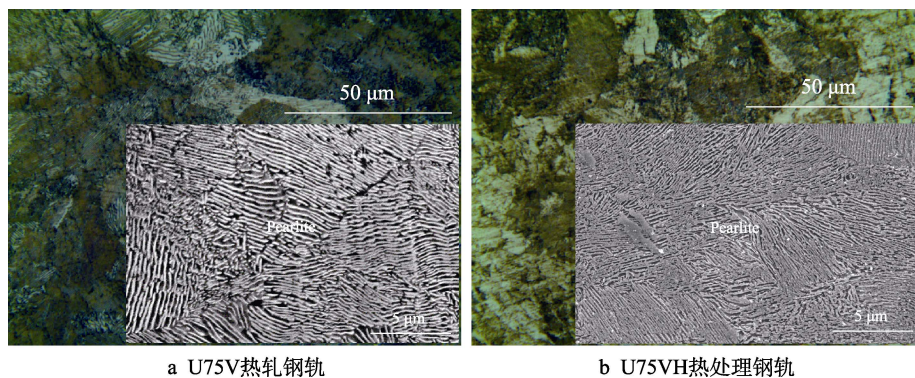


图 1 U75V 热轧与 U75VH 热处理钢轨微观组织形貌 (0.71%~0.80% C)
Fig.1 Microstructure of U75V hot-rolled and U75VH heat-treated rail steels (0.71wt.~-0.80wt.% C): a) U75V rail; b) U75VH rail

图 2 对比了我国部分标准轮轨材料与高硬度轮轨材料的微观组织形貌,材料分别取自现场车轮踏面和钢轨轨顶。从图 2a 和图 2b 可以看出,车轮材料由片层珠光体和先共析铁素体组成,其中,高硬度的 C 级车轮碳含量明显高于标准等级 ER7 车轮,先共析铁素体含量明显低于 ER7 车轮。从图 2c 和图 2d 可以看出,钢轨材料以交叉排列的片状渗碳体和铁素体组成,过共析钢轨含碳量明显高于标准等级 U71Mn,珠光体片层间距明显低于 U71Mn, S_p 值分别为 (238.4 ± 51) nm 和 (98.9 ± 28) nm。因此,形貌差异对材料性能的影响机制主要表现为:材料硬度和强度随车轮铁素体含量的减少及钢轨珠光体片层间距的减小

而增大。

国内外高速铁路普遍使用的轮轨材料如表 3 所示^[8]。日本 60 kg 钢轨的硬度和强度要求较低(新干线上铺设的热轧钢轨顶面硬度约 270HB),而匹配的 SSW-Q3R 车轮硬度要求明显较高,所以轨/轮硬度比 (H_R/H_W) 较低,小于 1。欧洲广泛铺设的钢轨材料为 R260 钢轨,轨面硬度为 260~300HB;运行速度在 200 km/h 以上时,选用 ER8 车轮,车轮踏面下 35 mm 处最小硬度要求为 245HB,轮辋表面硬度在 260~302HB 之间, H_R/H_W 值接近 1。我国钢轨材料基本实现了国产化,通常情况下,高速铁路客运专线以铺设 U71Mn 系列钢轨为主,客货共运线路及重载铁路以

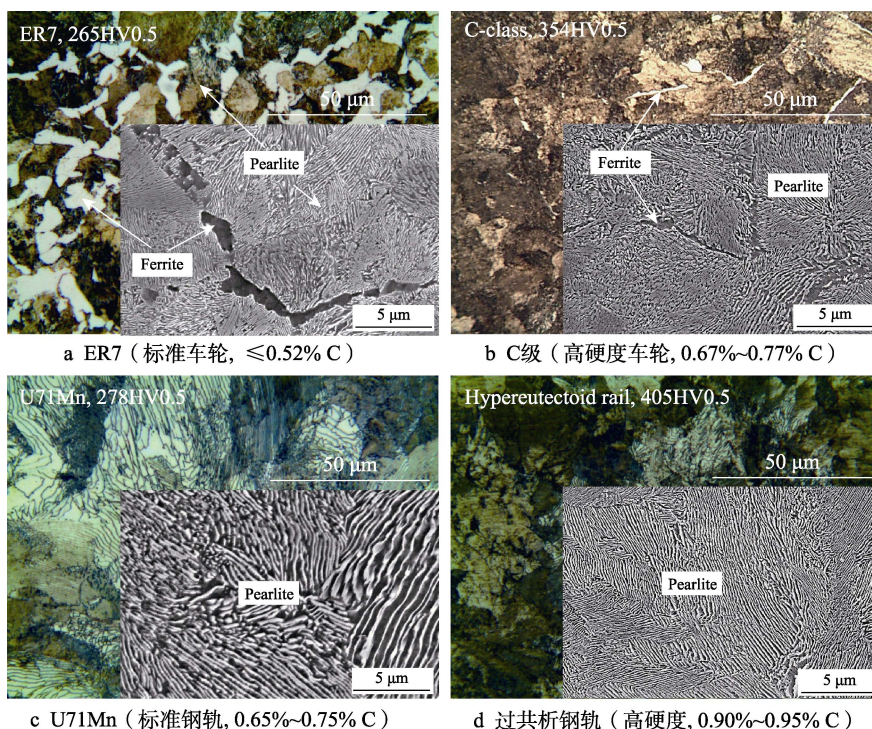


图 2 我国部分标准轮轨材料与高硬度轮轨材料微观组织对比
Fig.2 Comparison of microstructure of some standard and high-hardness wheel/rail materials: a) ER7 (standard wheel, $\leq 0.52\text{wt.}\% \text{ C}$); b) C-class (premium wheel, $0.67\text{wt.}\% \sim 0.77\text{wt.}\% \text{ C}$); c) U71Mn (standard rail, $0.65\text{wt.}\% \sim 0.75\text{wt.}\% \text{ C}$); d) hypereutectoid rail (premium rail, $0.90\text{wt.}\% \sim 0.95\text{wt.}\% \text{ C}$)

表 3 国内外高速铁路轮轨材料与硬度^[8]
Tab.3 Material and hardness of high-speed railway wheels and rails in various countries^[8]

Country/Region	Rail/Wheel		C/wt. %	H_R (HB)	H_W (HB)	H_R/H_W
Japan	Rail	60 kg	0.63-0.75	>235	311-363	≥ 0.65
	Wheel	SSW-Q3R	0.60-0.75			
Europe	Rail	R260	0.62-0.80	260-300	≥ 245	≤ 1.22
	Wheel	ER8	≤ 0.56			
China	Rail 1	U71Mn	0.60-0.75	260-300	≥ 245	≤ 1.22
		ER8	≤ 0.56			
	Wheel 1	ER9	≤ 0.60		≥ 245	≤ 1.22
		SSW-Q3R	0.60-0.75			
		CL60	0.55-0.65		270-341	0.72-0.96
	Rail 2	U75V	0.65-0.80	280-320	≥ 245	≤ 1.31
		ER8	≤ 0.56			
	Wheel 2	ER9	≤ 0.60		≥ 245	≤ 1.31
		SSW-Q3R	0.60-0.75			
		CL60	0.55-0.65		270-341	0.77-1.03
						0.82-1.19

铺设 U75V 系列钢轨为主。其中，U71Mn 与欧洲广泛使用的 R260 钢轨和日本 60 kg 钢轨的硬度要求及强韧性指标趋于一致；而 U75V 中硅元素（Si）含量高，有利于细化晶粒尺寸，提高强度与硬度。我国的动车组车轮是随高速动车组配套引进的，CRH1、CRH2、CRH3 和 CRH5 型动车组车轮材料分别为 ER9、SSW-Q3R、ER8、ER8C，国产车辆大部分选用 CL60 车轮钢^[9]。因此，在我国高速铁路系统中，轮轨匹配行为极其复杂。

2 轮轨材料/硬度匹配研究进展

轮轨接触对列车运行安全至关重要，多年来国内外研究人员开展了大量研究，探索最佳轮轨硬度匹配，以延长轮轨服役寿命。早在 1982 年 Steele 等^[10]就提出了轮轨硬度比与磨损关系的经典模型，如图 3 所示，试验前提是车轮硬度恒定不变。可以看出，当 $H_R/H_W < 1$ 时，随钢轨硬度增大，钢轨磨损量线性减少，车轮磨损量线性增加；当 $H_R/H_W > 1$ 时，随钢轨硬度增大，钢轨磨损量继续线性减少，车轮磨损量则保持稳定；随钢轨硬度增大，轮轨总磨损持续减小。Lewis 等^[11]认为产生这一趋势的原因是轮轨硬度比的改变导致了接触面积的变化。基于这一理论成果，同时考虑维修性、经济性能等，在轮轨磨损都严重的情况下，普遍使钢轨硬度略高于车轮硬度^[12]。

在 2000 年以前，欧洲铁路联盟 UIC 的研究重点是通过热处理等方式增大钢轨硬度以增强钢轨耐磨性。Harris 等^[13]将磨损模式分为轻微磨损、严重磨损和灾难性磨损，认为硬度对轮轨磨损的作用取决于磨损模式和硬度等级。Bolton 等^[14]匹配了 6 种钢轨和 1 种车轮材料，进行了不同轴重和蠕滑率的双盘试验，

并把磨损过程分为 3 个阶段。结果发现，第一阶段钢轨磨损与材料无关，第二阶段磨损率随钢轨硬度的增大而减小，第三阶段由于材料加工硬化等因素钢轨磨损表现出不一样的趋势。Muster 等^[15]根据 ERRID173 计划选择了 4 条铁路段，对 900A 钢轨和硬度为 340HB、370HB 的热处理钢轨进行全寿命跟踪试验。结果表明，表面热处理大大减小了钢轨损伤，成功延长了钢轨服役寿命，主要原因在于热处理材料在循环工况下有更高的屈服点。这一发现推动了热处理钢轨在曲线路段的使用。

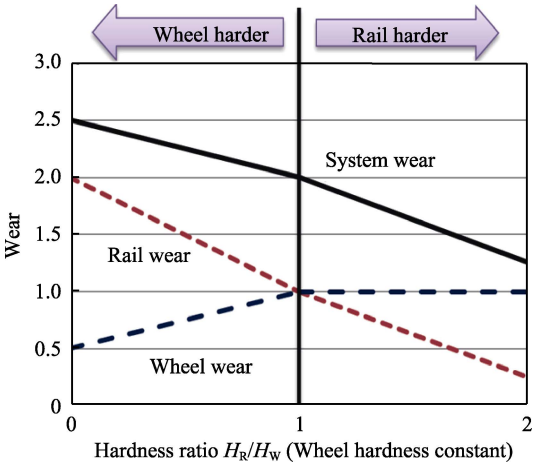


图 3 磨损与轮轨硬度比的关系^[10]
Fig.3 Wear in a wheel/rail system versus H_R/H_W ^[10]

欧洲前期对轮轨硬度匹配的研究主要致力于钢轨硬度的选用，研究结果认为增大钢轨硬度在减小自身磨损的同时势必会增大对磨车轮材料的磨损。然而，2013 年 Stock 等^[16]进行的全尺寸磨损试验（ER7 车轮匹配 R260、R350HT、R400HT 钢轨）及 Vasic

等^[17]开展的小尺寸双盘试验 (ER7、ER8 车轮匹配 R260、R350HT、R400HT 钢轨) 均发现: 增大钢轨材料硬度有利于减小钢轨磨损, 但车轮材料磨损无显著改变。2015 年, Heyder 等^[18]对 ER7、ER8、C64M 车轮材料和 R260、R350HT、R400HT、CrB1400 钢轨材料进行了全尺寸匹配试验。结果显示: 相比于标准钢轨 R260, 当 3 种车轮材料与高硬度 R350HT、R400HT、CrB1400 钢轨匹配时, 轮轨磨损量都较低, 部分结果如图 4 所示。该研究发现, 增大钢轨材料硬度在降低自身材料磨耗的同时, 还有利于减少对磨车轮材料的磨损。这一结果与传统认识完全相反。然而, 这一结果还得到了其他研究人员的支持, 2019 年, Santa 等^[19]对比了不同轮轨材料的磨损率, 研究发现在相同试验条件下, 高硬度 R400HT 钢轨磨损率及与其匹配的 ER8 车轮磨损率都显著低于其他较低硬度钢轨及其匹配的车轮。此外, Lewis 等^[11]也认为引入高硬度优质钢轨并不会对该线路运行的车轮产生严重影响, 前提是车轮硬度不能太低。

综上所述, 欧洲研究人员主要通过匹配不同硬度的轮轨材料, 研究硬度对轮轨材料及对磨材料的磨损影响。研究发现, 增加轨/轮硬度, 有利于降低材料的自身磨损, 然而对其所匹配的轮/轨磨损行为的影响机制尚不明确。

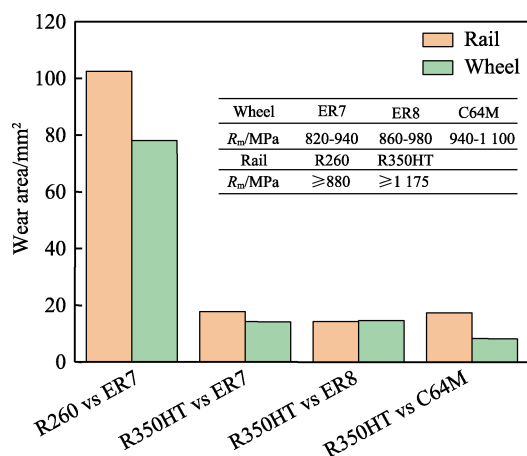


图 4 Heyder 等开展的全尺寸硬度匹配试验结果^[18]

Fig.4 Wear results of full-scale hardness matching tests performed by Heyder *et al.*^[18]

俄罗斯铁路发展战略 (RRDS) 的一个重要方向便是轮轨接触问题。基于对 Steele & Reiff 经典模型 (图 3) 的传统认识, 俄罗斯大量铺设了热处理钢轨, 而同期车轮标准并没有做出调整, 导致车轮严重磨损, 因此俄罗斯研究人员对轮轨硬度匹配的研究致力于车轮硬度的选用^[20]。Markov 进行了 4 种不同条件 (纵向蠕滑率恒定、摩擦力恒定及横向蠕滑率恒定的滚滑磨损, 纯滑动磨损) 下的双盘试验, 试验前提是钢轨硬度不变。结果表明: 滑差小于 5% 时, 增加轮轨硬度并没有实质性意义, 因为增加轮轨硬度只会影

响轮轨磨损分配, 而总磨损影响不大; 在较大滑差条件下, 对车轮材料采取高硬度淬火处理可以提高材料的服役寿命^[21]。Shur^[22]认为轮轨界面不存在最佳硬度比, 但在指定环境下, 有一个最佳轮轨硬度值, 这个硬度值由钢轨承受的轴向载荷、曲率半径以及车轮制动系统的轴向载荷和设计等因素决定。Larin^[23]进行了恒定滑差下的双盘试验, 结果表明, 当 $H_R/H_W=0.83$ 时, 轮轨系统具有最小磨损率。Razhkovskiy 等^[24]为了更好地模拟轮轨接触, 利用卧式牛头刨床改进了试验装置, 将实际轮轨轮廓大幅缩小, 模拟轮轨长粘合循环工况, 进行了一系列变车轮硬度磨损试验, 拟合了磨损率与轮轨硬度的关系模型, 认为 H_R/H_W 最佳范围为 1.03~1.10 或接近 1。

中国铁道科学研究院的研究人员在轮轨材料与硬度匹配方面也开展了大量的研究工作。李家驹等^[25]利用 MM-200 试验机对 6 种钢轨和不同硬度车轮进行了系列磨损试验。结果表明: 增加一方材料硬度将导致对磨材料的磨损量增加, 而自身磨损则减小, 这与传统理论相似。综合考虑, H_R/H_W 在 0.87~0.95 为宜; 对淬火轨 H_R/H_W 在 1.10~1.19 为宜。马腾等^[26]针对热处理钢轨进行了一系列试验, 研究表明, 当 $H_R/H_W < 0.96$ 时, 钢轨磨损明显上升; 当 $H_R/H_W > 1$ 时, 钢轨磨损率稳定在较低水平; 当 $H_R/H_W > 1.25$ 时, 钢轨磨损急剧下降。而车轮试样的磨损与钢轨相反, 当 $H_R/H_W=1.28$ 时, 车轮磨损率增大了 4~5 倍。因此, 就减少轮轨磨耗而言, 认为 H_R/H_W 最佳范围为 1.0~1.2。张银花等^[27]进行了 9 种轮轨硬度比的磨损试验, 结果发现, H_R/H_W 在 0.87~1.05 区间时, 系统总磨损最小; $H_R/H_W < 1$ 时, 轮轨材料变形和疲劳损伤较轻微; 且 $H_R/H_W=0.87$ 时总磨损最小, 接触疲劳损伤最轻微。常崇义等^[28]研究发现, 随 H_R/H_W 减小, 车轮多边形磨耗径跳值逐渐降低。沈文林等^[29]对我国 CRH₃ 型动车组进行了大量现场测试和运行考核试验, 结果表明, 提高车轮硬度可以有效抑制车轮多边形产生。此外, 根据我国高速铁路服役过程中出现的钢轨磨耗少、车轮凹磨和不均匀磨耗、车轮璇修周期短、维护成本高等问题, 张银花等建议适当提高我国使用车轮硬度^[30]。

西南交通大学研究人员前期模拟轮轨点接触工况, 利用 MMS-2A 和 WR-1 磨损试验机对不同轮轨材料进行了大量匹配试验^[31-37], 钢轨材料选用 U71Mn 和 U75V, 硬度集中在 307~314HV0.5, 车轮材料硬度在 227~341HV0.5 之间变化。图 5 归纳总结了点接触试验结果, 可以看出, 车轮磨损率随 H_R/H_W 的增加而显著增大, H_R/H_W 为 1.35 附近时的磨损率是 H_R/H_W 为 0.75 时的 2~3 倍 (图 5a), 这表明提高车轮硬度可增大车轮材料的耐磨性。然而, 钢轨磨损受轮轨硬度比的影响较小, 随 H_R/H_W 的增大有轻微的减小趋势 (图 5a)。与车轮磨损率变化趋势相似, 系统总磨损

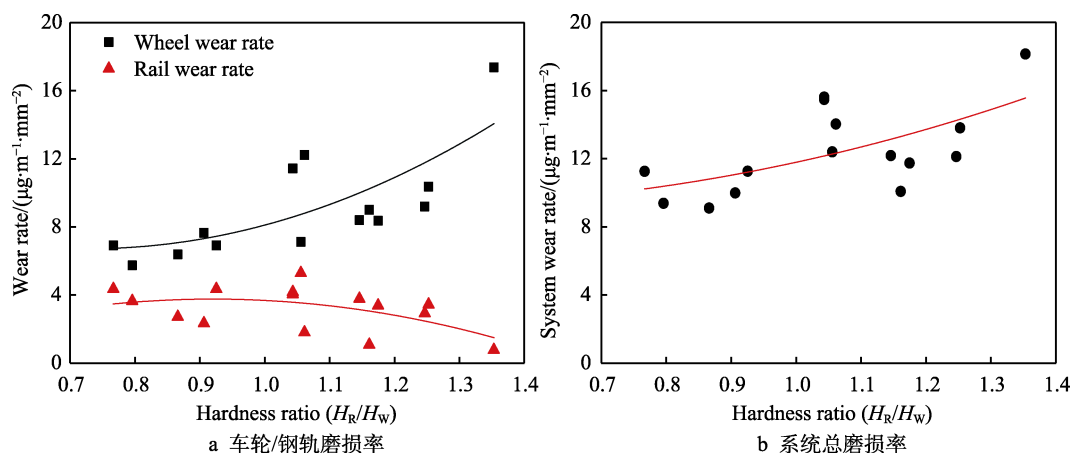
图 5 点接触工况磨损率随 H_R/H_W 的变化情况^[31-37]

Fig.5 Wear rates as a function with H_R/H_W under point contact conditions^[31-37]:
a) wear rate of wheel/rail materials; b) system wear rate

率随 H_R/H_W 的增加而增大 (图 5b)。此外, 由图 4a 可知, 相同硬度匹配下, 车轮磨损率明显高于钢轨, 这一现象在高 H_R/H_W 下更加明显。

然而, 人们发现试验过程中随着轮轨材料的去除, 原本的点接触逐渐转变为线接触, 接触面积增大, 而试验台设置的垂向载荷并没有做出相应的改变, 导致磨损过程中轮轨试样实际接触应力降低, 继而使得试验结果偏小。Lewis 等^[38]对轮轨试验测试方法的报告中指出: 最佳轮轨模拟试验为双盘试验, 建议将试样表面加工成平面以模拟线接触工况。现场车轮和钢轨在磨损之后, 其接触斑也近似转变为矩形斑。因此, 2021 年, Hu 等^[39]在以往试验研究的基础上, 采用线接触方式, 模拟 1 500 MPa 接触应力, 利用 MJP-30A 滚动磨损与接触疲劳试验机开展了 5 种硬度车轮材料 (ER7、ER8、CL60、C 级和 D 级) 和 4 种硬度钢轨材料 (U71Mn、U75V、PG4 和 PG5) 的匹配试验, 实现了 0.7~1.6 的 H_R/H_W , 见图 6。结果表明: 随车轮硬度的增大, 钢轨磨损率显著降低, 这与传统预期相反 (即引入更硬的材料会导致对磨材料的磨损增加), 然而却与文献^[18]结果 (图 4) 相似; 车轮、钢轨和系统的总磨损率都随 H_R/H_W 的增大而增大, 这也

不支持文献^[10]的趋势。此外, 在不同材料/硬度匹配的硬度比重叠区域 (H_R/H_W 在 1.0~1.2 之间, 如图 6 的红色框所示) 内, 在含有高硬度 C 级和 D 级车轮试样的轮轨副中, 车轮、钢轨和系统的总磨损率都显著低于其他轮轨副。这说明硬度比虽然会影响磨损率, 但材料性能还是占主要作用。

综上所述, 欧洲、俄罗斯、中国等国家和地区的研究人员对轮轨材料与硬度匹配开展了大量的试验研究, 根据各国轮轨损伤现状, 欧洲铁路联盟主要致力于钢轨硬度的提高, 俄罗斯和中国则偏向于车轮硬度的选用。研究结果认为增大车轮/钢轨硬度, 可以有效降低材料磨损。然而, 研究人员和轮轨制造公司担心铺设高硬度的钢轨或使用高硬度车轮会加剧对磨轮/轨的损伤, 反而会缩短材料服役寿命、增大运营维护成本。针对这一问题, 前期研究并没有形成统一结论, 对于轮轨最佳硬度匹配行为的研究结果也不能进行直观地比较, 主要原因在于:

(1) 以往对轮轨材料硬度匹配的研究通常保持钢轨或车轮材料 (但主要是车轮) 恒定, 改变对磨副材料硬度, 而其他试验参数 (如接触应力、蠕滑率等) 几乎不变^[16,23,31-37]。然而, 各研究采用的试验

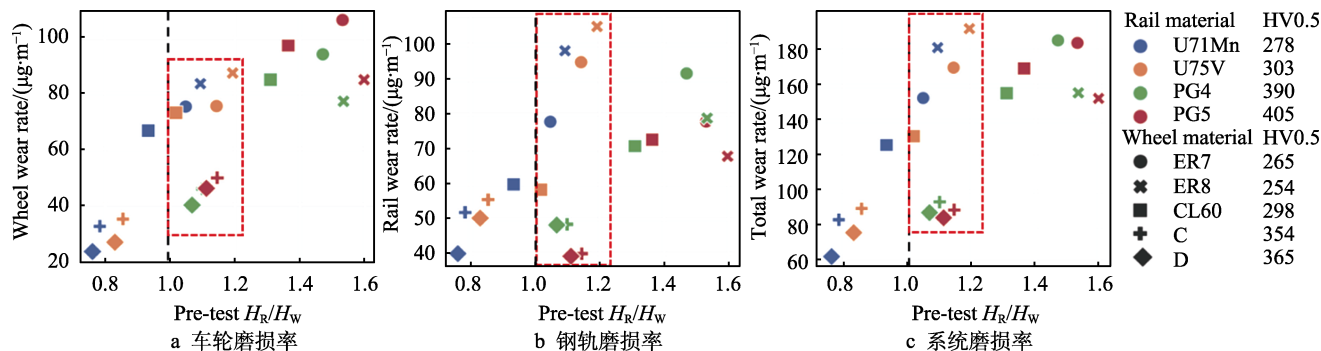
图 6 线接触工况磨损率随 H_R/H_W 的变化情况^[39]

Fig.6 Wear rates as a function with H_R/H_W under line contact conditions^[39]:
a) wheel wear rate; b) rail wear rate; c) system wear rate

机、试样尺寸、试验过程、模拟的试验参数却各不相同^[17-19,24-27,39], 硬度对材料磨损的影响及轮轨硬度匹配可能受试验参数的影响而表现出不同的趋势。

(2) 各国模拟试验和现场服役过程中环境的温度、湿度、第三接触介质等不同, 对轮轨硬度的选用和匹配也会产生影响, 从而使得各国和地区轮轨硬度比差异较大(表3)。

(3) 研究过程中通常只考虑了试验前材料硬度的影响, 并未考虑不同硬度材料的微观组织结构、材料在服役过程中的应变硬化问题。

正如 Sheinman 在文献[40]中所总结到, 影响轮轨磨损因素众多, 包括钢的纯度、热处理、微观组织、润滑和服役环境等, 不可能用一个单独的试验来模拟轮轨接触状态, 针对轮轨材料匹配亟需考虑众多因素的综合作用, 阐明轮轨材料服役过程中硬度的影响因素和机制, 才能达到最佳匹配目的。

3 轮轨材料服役中硬度的影响因素

3.1 材料加工硬化

在轮轨接触中, 所受交变载荷超过材料屈服极限, 材料表层产生塑性变形。随塑性变形进一步累积, 轮轨强度、硬度迅速增大, 韧性、塑性迅速减小, 这种现象称为加工硬化。在循环加载过程中, 车轮和钢轨的接触表面经历了加工硬化, 继而使得试验后轮轨材料副的硬度比发生改变。在现场轮轨接触中, 车轮和钢轨在大多数情况下均以磨后硬度在稳定磨损状态下运行。因此, 轮轨材料的磨后硬度和加工硬化程度可能会对磨损性能产生最大影响。

Tyfour 等^[41]研究发现: 试验后珠光体钢轨表面硬度比初始硬度高 2.5 倍, 且应变硬化和塑性应变累积在滚滑磨损初期最大, 一定周期后非线性减小。文献[17]发现车轮材料在试验过程中由于加工硬化, 改变了初始轮轨硬度比, 从而导致试验前期车轮磨损随钢轨硬度的增加而增大, 但当试验周期到 15 000 转时, 与最硬钢轨所匹配的车轮磨损量反而最小。中国铁道科学研究院的研究人员曾多次跟踪测试和现场调查京津城际钢轨的使用情况, 研究发现: 随通过总质量的增加, 高速铁路钢轨顶面出现了加工硬化现象; 具体来说, 京津城际高速铁路开通前两年, 钢轨硬度增加了 7.1%, 第三年时, 硬度增加 12.5%; 相比于普速铁路, 加工硬化率偏低^[9]。此外, 对武广高速铁路和京沪高速铁路轮轨硬度的现场测试表明: 在约 20 万公里的镟修周期内, ER8 和 ER8C 车轮踏面硬度值分别在 300~320HB 和 310~335HB 范围内波动; 车轮踏面加工硬化不均匀; 直线段钢轨加工硬化轻微, 武广高铁钢轨在 4 400 万吨通过总质量下的相对加工硬化率为 3.1%~8.5%^[9]。

使用过程中轮轨材料的加工硬化会改变轮轨硬

度比, 而试验过程中往往强调对轮轨材料初始硬度的测量, 忽略了对试验后或试验过程中硬度的测量与对比。因此, 要优化轮轨硬度匹配、延长服役寿命, 需要开展轮轨材料加工硬化机制研究, 在整个试验周期内对试样硬度和磨损状态进行分段测试, 以揭示材料加工硬化对硬度匹配的影响。

3.2 合金钢微观组织

轮轨材料微观组织对其服役性具有关键影响。目前各国广泛使用的轮轨材料均为珠光体钢, 具有交叉排列的片层渗碳体和铁素体结构。材料强度和硬度与片层间距、珠光体团尺寸和先奥氏体晶粒大小有关, 其中, 片层间距的影响最大, 且硬度和强度随片层间距的增大而减小^[42-44], 见图 1 和图 2。因此, 对轮轨材料进行热处理和合金化的主要目的便是获得致密的珠光体层间距结构。

此外, 在服役过程中, 轮轨材料表层微观结构发生了改变, 进而影响了材料性能和磨损性能。He 等^[45]发现珠光体车轮材料在深度方向上出现了梯度结构。Pan 等^[46]发现当 CL65 车轮钢最外层组织为亚晶粒时, 其耐磨性最佳。文献[47-50]借助电子背散射衍射 (EBSD) 技术, 进一步揭示了轮轨材料微观组织变化对硬度和磨损的影响机制, 研究发现, 循环载荷诱导轮轨材料经历了动态再结晶, 形成了纳米超细晶粒结构, 使表层硬度明显增大。

不同结构的轮轨材料, 其微观组织、加工硬化率都各有差异, 虽然具有相似硬度却表现出不同的磨损与疲劳性能。Li 等^[51]利用 2 种不同热处理条件 (淬火-回火和淬火-喷水冷却), 得到硬度相同的球状和层状珠光体车轮钢。结果表明, 层状珠光体损耗较小。Teshima 等^[52]对球状和片层状珠光体材料的应变分析表明, 塑性变形与铁素体或渗碳体片层取向有关, 且片层相对施加张力方向 45°左右排列时, 材料应变最高。文献[53-56]等对珠光体、贝氏体和回火马氏体钢轨材料在不同硬度等级下的磨损机制研究表明: 不同微观组织的钢轨材料硬化规律不同, 相同条件下珠光体钢轨硬化程度更高, 贝氏体钢硬化率低。由于加工硬化程度低, 使用贝氏体钢轨可有效降低对磨车轮材料的磨损^[55]。此外, 相同初始硬度下贝氏体钢的自然磨损率比珠光体钢高 2 倍, 疲劳裂纹可在扩展前被磨擦, 从而产生更高的抗疲劳性^[53,57]。

综上所述, 轮轨材料的力学性能和服役行为与其微观组织密切相关。不同轮轨材料基体微观组织结构不同, 其材料硬度、强度、韧性以及服役过程中的加工硬化、组织演变等也应该有所差异, 从而导致磨损与滚动接触疲劳行为的变化。然而, 材料微观结构变化对磨损与损伤的影响机制、不同硬度材料微观结构演变的差异等都尚不清楚。因此, 要合理优化与匹配轮轨材料硬度, 就需要开展各种微观结构轮轨材料匹

配研究, 揭示不同微观结构轮轨材料的加工硬化与微观组织演变机制。

3.3 材料表面处理

随着材料表面处理技术的发展, 研究人员采用轮轨表面强化处理与高能密度处理显著地提高了轮轨表层硬度, 降低了轮轨磨损与损伤。此类研究主要集中在轮轨材料激光淬火、激光熔覆等。Shariff 等^[58]研究发现: 硬化层深度由激光工艺参数和钢轨基体组织共同决定, 钢轨材料经表面强化处理后, 耐磨性能增强。Lewis 等^[59-60]研究了钢轨表面激光熔覆不同合金涂层的磨损与接触疲劳性能, 发现不同合金成分熔覆涂层具有不同的初始硬度; 此外, 相同硬度不同合金涂层的钢轨材料也表现出不同的耐磨性。研究普遍认为, 对轮轨材料进行表面处理可增大材料硬度, 有效减少磨损^[61-62]。然而, 轮轨是一对相互影响的摩擦副, 一方材料硬度的增加必然会影响对磨材料的服役性能。王文健等^[63]研究发现: 单一处理轮轨试样虽能降低处理试样的磨损, 但会加剧对磨副的磨损。此外, 硬度的增大也会导致材料韧性降低。Su 等^[64]研究了淬火比例对钢轨磨损与疲劳裂纹扩展的影响。结果表明: 在钢轨上采用适当比例的激光离散淬火, 可以减缓钢轨波磨; 但离散淬火后材料韧性降低, 疲劳裂纹向深度扩展, 不利于在高速铁路使用。

研究表明, 轮轨材料经激光淬火后得到致密的马氏体, 提高了车轮和钢轨表面硬度, 进一步增强了表面抗磨损和变形能力。激光熔覆处理使材料表面形成均匀致密的涂层, 增强材料耐磨性能。可见, 激光淬火和熔覆除了改变材料表面化学成分与晶体分布外, 主要通过提高材料表面硬度来增强耐磨性能。对于材料表面处理技术的进一步运用将影响轮轨初始硬度的选择与匹配。在提高耐磨性能的同时, 如何增强材料韧性、增加材料耐疲劳损伤性能是轮轨材料激光熔覆和淬火处理研究的关键。

3.4 复杂服役环境

作为一个开放的系统, 轮轨界面不可避免地受服役环境的影响, 特别是环境湿度与温度, 例如我国的南方和北方、中国和日本、中国和欧洲等国家和地区环境湿度和温度差异较大, 也会对轮轨材料的选用产生影响(表 3)。Zhu 等^[65]开展了 3~20 °C 和 35%~85% *HR* (相对湿度) 下的轮轨模拟试验, 发现轮轨磨损率均随环境湿度的增加而显著下降, 且低温下轮轨损伤受湿度的影响更明显。该结果也解释了瑞典铁路和韩国高速铁路在冬季车轮凹磨和钢轨剥落比夏季更严重的现象^[66]。Galas 等^[67]模拟了高湿度($RH \geq 70\%$) 下的轮轨接触, 发现湿度的增加会加速轮轨表面形成氧化层。

环境温度除影响环境中绝对湿度外, 还会直接影

响轮轨材料的力学特性, 如 Zhou 等^[68-69]和 Ma 等^[70]研究发现低温下轮轨材料发生韧脆转变, 使得轮轨硬化率增加。此外, Shi 等^[71]发现, 低温干燥条件下轮轨表面的氧化速度降低。Lyu 等^[72]在 Zhu 的研究基础上进一步研究了低温环境(-35~3 °C) 对轮轨界面损伤的影响, 发现当环境温度大于-15 °C 时, 材料脆性的增加会导致摩擦过程中大片的基体材料从接触表面剥落并被碾碎形成金属微粒。

接触环境主要通过影响轮轨材料的塑性变形和加工硬化, 进而影响轮轨材料或硬度匹配的选择。西南交通大学的研究人员研究了第三接触介质(干态、水态、油脂沙和纯润滑油等) 条件下, 不同轮轨材料的摩擦学性能。研究发现: 不同介质下磨损量都随硬度的增大而减少, 但干态下轮轨表面硬化率明显高于润滑状态^[73-74]。

3.5 车辆运行参数

车辆运行参数复杂多变, 进而引起轮轨界面行为与损伤机制的转变。轴重是影响轮轨损伤的一个非常重要的参数。Zhong 等^[75]利用 JD-1 轮轨模拟试验机研究了 16、21 和 25 t 轴重时, U71Mn 热轧、U71Mn 热处理、U75V 热轧和 U75V 热处理轨钢的磨损性能, 结果发现, 轴重越大, 4 种钢轨材料的磨损越严重。此外, 文献[76-77]研究发现, 虽然不同硬度轮轨材料的磨损率有差异, 但都随轴重或接触应力的增大而增加。与试验研究结果相对应, 现场铁路运营中, 重载铁路的损伤形式以严重磨损为主, 表现为车轮踏面凹陷、车轮失圆、轨顶压溃等^[6,9], 这类损伤会恶化轮轨滚动接触界面状态, 导致车辆/轨道系统产生高频振动冲击, 危及行车安全。

蠕滑率是影响轮轨材料选用与硬度匹配的重要参数。Santa 等^[19]研究发现, 对于不同硬度的轮轨材料, 其磨损率都随蠕滑率的增大而增加。然而, Zhu 等^[78]通过双盘试验发现, 不同硬度材料对蠕滑率的响应有差异, 且随蠕滑率的增大, 车轮磨损率存在线性磨损区、非线性磨损区和不确定磨损区等 3 个区域, 当蠕滑率从 6% 增大到 12% 时, CL60 和 AAR-D 车轮钢磨损率都显著减小, 见图 7。Hu 等^[79]也通过开展 5 种蠕滑率条件下 3 种轮轨材料硬度匹配的磨损试验研究, 证实了材料硬度匹配与蠕滑率等运行参数有关。

运行参数对轮轨材料与硬度匹配的影响和轮轨微观组织演变、加工硬化有关。在重载、制动、小曲线半径条件下, 轮轨接触界面出现白色蚀刻层(WEL), 白层硬度可达到 700~900HB, 远远高于珠光体钢^[80-82], 这些白层结构韧性较差, 极易形成径向裂纹^[82-83], 危害列车运行。Cihak-Bayr 等^[49]发现, 在较低滑动速度(0.025 m/s) 下, 材料亚表面硬度较高。孟庆艳等^[84]也发现纯滚动条件下, U75V 钢轨材料硬化程度高于

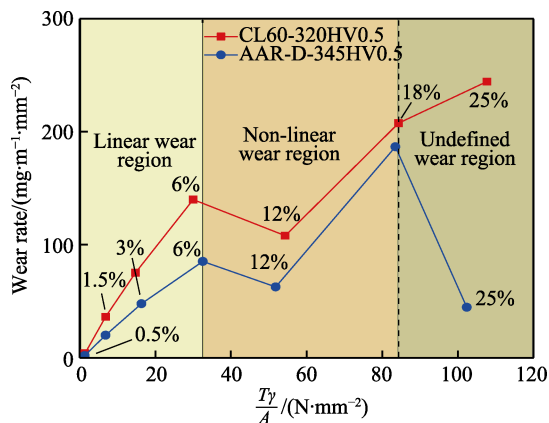
图7 CL60和AAR-D车轮材料的磨损率变化曲线^[78]

Fig.7 Wear rate of CL60 and AAR-D wheel materials at different slippages^[78]

滚滑条件。Eghbali^[85]认为合金钢在大变形过程中,铁素体晶粒发生了动态软化机制。文献[86-87]研究发现,材料塑性累积程度受接触应力、滑动速度、运行速度、切向力、轴重等因素影响,从而影响材料表面硬化程度及硬度沿深度方向的分布。

综上所述,轮轨服役环境和车辆运行参数复杂多变,因此,现场跟踪与调研过程中难以研究单一变量对材料损伤的影响。然而,以往对轮轨材料与硬度匹配的试验研究中,并没有考虑到环境温度、湿度等的影响,不同研究中所模拟的试验参数也各不相同,从而使得诸多轮轨材料与硬度匹配研究无法进行直观的比较和指导。因此,要优化轮轨材料匹配,需要系统地探究不同硬度轮轨材料磨损率随运行参数和服役环境的演变机制。对于材料的选用需要结合轮轨服役的实际工况,如高寒、高湿条件,高速或重载工况。

3.6 其他因素

作为一个开放的系统,轮轨界面受交变应力、接触状态等众多因素的综合影响,导致其服役表现为强非线性耦合特征,损伤形式与失效机制复杂多变。以往的试验研究中,通常采用小尺寸双盘试验机,模拟单一工况,不能完全实现现场轮轨服役工况;而现场跟踪调研涉及诸多因素的共同影响,难以揭示材料硬度对磨损与损伤的影响机制。在研究过程中,一些因素常常被忽略,如轮轨作用频次、车轮滚动方向、列车驱动与制动等。

正常工况下,车轮处于持续作用状态,钢轨处于循环作用状态,所以车轮实际作用频次明显高于钢轨。笔者调研了成都地铁一号线2015年7月21日至2016年5月21日期间,10111和10105列车车轮和钢轨作用情况,以及上海地铁一号线2015年1月至6月,01A01、01A02、01A03、01A04、01A05列车车轮和对应的钢轨作用情况。以每天滚过同一段钢轨的车轮数作为钢轨的作用频次,每天滚动的循环次数作为车轮的作用频次,结果如图8所示。可以看出,

对于地铁,车轮作用频次为钢轨作用频次的10~20倍,对于高速铁路这一比值将更高。

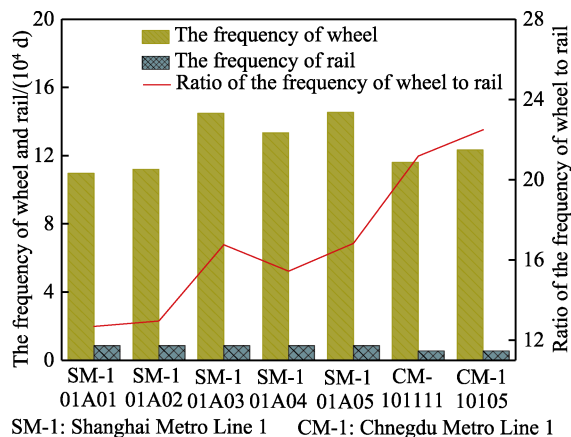


图8 地铁轮轨作用频次 (SM-1和CM-1分别指上海地铁一号线和成都地铁一号线)

Fig.8 The wheel and rail frequency of metro (SM-1 and CM-1 present Shanghai Metro Line 1 and Chengdu Metro Line 1, respectively)

然而,一直以来轮轨作用频次并没有受到广泛关注。Khoddam等^[87]对钢轨进行平面应力局部扭转测试(PSLT),结果表明:循环加载比单向加载积累更多塑性变形,钢轨硬化更严重。以往的双盘试验只通过改变滑差使轮轨试样速率有细微差异,但轮轨作用频次比远远小于实际情况。此外,实际工况下车轮处于持续受热状态而钢轨处于循环受热状态,从而使轮轨材料表层结构发生不同的微观组织演变和应变硬化。这些因素都使得试验结果和实际工况存在较大差异。

已有的试验研究主要针对车轮单向运行工况,而在地铁和高速铁路线路复线工况中,车轮滚动方向在上行线和下行线相反。早在1993年Tyfour等^[88-89]开展了钢轨反向机制的滚动磨损试验,研究了滚动方向对钢轨磨损率与磨损机制以及疲劳裂纹形貌与扩展的影响,并提出了一个新的机制——变裂纹面摩擦机制,来解释滚动方向改变后表面疲劳裂纹扩展以及形态的变化趋势。文献[50,90-92]研究表明:改变滚动方向会减轻对应材料的磨损,且磨损降低程度与材料换向前应变硬化程度有关。因此,改变轮轨滚动方向会影响磨损区的塑性变形与微观组织演变,进而改变材料的加工硬化,使得磨损率也发生相应的改变。

目前广泛采用的双盘试验通过电机控制2个小尺寸圆盘的速度差,以获得不同的蠕滑率。当车轮盘转速较快时为正蠕滑率,模拟牵引工况;当钢轨盘转速较快时为负蠕滑率,模拟制动工况。理论上2种工况下2个试样的磨损机制与磨损率应该不一样,研究发现驱动盘接触表面更容易黏附磨屑等,特别是在低温条件下^[70],磨损机制的不同将导致材料的微观组织演变和加工硬化的差异。然而,驱动轮与被动轮的磨损率

与磨损机制差异尚未得到研究,现场轮轨服役过程中列车连续转换牵引和制动工况,难以探明 2 种工况下的损伤机制。更重要的是,以往的硬度匹配试验研究也并没有区分牵引和制动工况,如文献[14-21,24,34,36,37]模拟牵引工况,而文献[31-33,39]模拟制动工况。因此,不同研究结果不能进行直观地比较。

综上所述,轮轨作用频次、车轮滚动方向以及牵引/制动工况影响轮轨材料的加工硬化和材料硬度匹配研究,要彻底研究硬度匹配与磨损的关系就需要积极开展轮轨作用频次、滚动方向和牵引/制动工况的基础理论。

4 结语

随着高速、重载铁路的快速发展,车轮和钢轨材料磨损与疲劳失效问题日益突出。要系统地阐明轮轨失效机制,优化轮轨材料匹配性能,提高系统可靠性、安全性及运营经济效益,今后的研究工作需要从以下几个方面展开。

1) 建立统一合理的试验标准与评价体系。明确试验模拟准则,规范试验操作过程,严格控制试验过程中的环境变量,减少人为操作对试验结果的影响,是保证研究结果准确可靠的前提。同时,建立完善的试验结果评价体系,是实现小比例试验、全尺寸试验、现场试验等试验结果量化比较的必要手段。

2) 针对我国铁路运营现状,系统开展复杂服役环境(高寒、高湿、风沙)与车辆运行参数(车辆循环往复工况、轮轨作用频次、曲线半径等)下高速、重载轮轨材料失效机制研究。揭示复杂服役条件下高速和重载轮轨材料组织结构演变、应变硬化与动态性能间的关系,掌握各服役环境下轮轨组织硬度的演变规律。研究钢轨、车轮硬度变化对轮轨系统磨损与损伤行为的影响,阐明高速、重载轮轨材料的滚动接触损伤行为及演变规律,揭示其复杂服役条件下的失效机制。

3) 开展高速、重载轮轨材料硬度、韧性最佳匹配行为与选配原则研究。阐明高速和重载条件下轮轨材料磨损与疲劳损伤交互作用机制与演变规律,确定轮轨滚动接触疲劳与磨损同步发展状态下最佳高速轮轨材料硬度和韧性的匹配。以轮轨磨损与疲劳损伤动态平衡为准则,分别研究高速和重载铁路系统中轮轨材料的优化匹配行为,建立轮轨材料硬度、韧性的最佳匹配区间和选配原则,促使全寿命服役周期内轮轨磨损与疲劳损伤达到动态平衡,从而提高高速、重载轮轨服役寿命。

4) 积极开展高速、重载轮轨磨损规律与服役寿命预测方法研究。建立复杂服役工况下轮轨材料运行参数-硬度比-磨损率曲线,分析不同服役环境下各磨损区域的轮轨损伤特征,利用归一化方法建立考虑速

度、轴重、材质特性、轮轨硬度比、损伤特性等多参数综合作用的轮轨磨损与损伤数学分析模型,揭示上述服役环境对轮轨磨损与损伤的影响规律,最终提出复杂服役环境下基于损伤行为的高速、重载轮轨材质/硬度匹配设计理论,促使全寿命周期内轮轨材料磨损与接触疲劳损伤达到动态平衡,从而提高轮轨材料的服役寿命。

参考文献:

- [1] 中国国家铁路集团有限公司.中国铁路总公司 2020 年统计公报[EB/OL].2021-03-05 http://www.china-railway.com.cn/wnfw/sjfw/202103/t20210305_113499.html. China National Railway Group Co., Ltd. China Railway Corporation Statistics Bulletin in 2020 [EB/OL]. 2021-03-05.
- [2] 郭俊, 王文健, 刘启跃. 高速轮轨损伤及材料优化匹配研究进展[J]. 润滑与密封, 2010, 35(9): 118-121. GUO Jun, WANG Wen-jian, LIU Qi-yue. Research Progress of Damage and Material Optimization Matching of High-Speed Wheel/Rail[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(9): 118-121.
- [3] ZHU Yi, WANG Wen-jian, LEWIS R, et al. A Review on Wear between Railway Wheels and Rails under Environmental Conditions[J]. Journal of Tribology, 2019, 141(12): 176.
- [4] DS/EN 13674-1, Railway Applications-Track-Rail-Part 1: Vignole Railway Rails 46 kg/m and Above[S].
- [5] DS/EN 13262, Railway Applications-Wheelsets and Bogies-Wheels-Product Requirements[S].
- [6] BEVAN A, JAISWAL J, SMITH A, et al. Judicious Selection of Available Rail Steels to Reduce Life-Cycle Costs[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(3): 257-275.
- [7] HU Xiao-hua, VAN HOUTTE P, LIEBEHERR M, et al. Modeling Work Hardening of Pearlitic Steels by Phenomenological and Taylor-Type Micromechanical Models [J]. Acta Materialia, 2006, 54(4): 1029-1040.
- [8] 周韶博, 梁旭, 李闯, 等. 国内外高速铁路轮轨硬度匹配研究与应用综述[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(6): 33-36, 43. ZHOU Shao-bo, LIANG Xu, LI Chuang, et al. Comprehensive Review of Study and Application of Wheel-Rail Hardness Matching in Domestic and Foreign High Speed Railways[J]. Railway Quality Control, 2016, 44(6): 33-36, 43.
- [9] 周韶博. 高速铁路轮轨材料硬度匹配试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017. ZHOU Shao-bo. Experimental Study on Hardness Matching of High Speed Wheel and Rail Materials[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.

- [10] STEELE R, REIFF R. Rail-It's Behaviour and Relationship to Total System Wear[C]// Pro 2nd Conf on Heavy Haul. Colorado Springs: [s. n.], 1982.
- [11] LEWIS R, WANG W J, BURSTOW M, et al. Investigation of the Influence of Rail Hardness on the Wear of Rail and Wheel Materials under Dry Conditions[C]// Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Proceedings. Stirlingshire: Civil-Comp Press, 2016.
- [12] 周清跃, 刘丰收, 朱梅, 等. 轮轨关系中的硬度匹配研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 35-41.
ZHOU Qing-yue, LIU Feng-shou, ZHU Mei, et al. Research on Hardness Matching in Wheel-Rail System[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 35-41.
- [13] HARRIS J, LUNDGREN J, TOURNAY H. Guidelines to Best Practices Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issue[M]. Virginia: International Heavy Haul Association, 2001.
- [14] BOLTON P J, CLAYTON P. Rolling—Sliding Wear Damage in Rail and Tyre Steels[J]. Wear, 1984, 93(2): 145-165.
- [15] MUSTER H, SCHMEDDERS H, WICK K, et al. Rail Rolling Contact Fatigue. the Performance of Naturally Hard and Head-Hardened Rails in Track[J]. Wear, 1996, 191(1-2): 54-64.
- [16] STOCK R, EADIE D, OLDKNOW K. Rail Grade Selection and Friction Management: A Combined Approach for Optimising Rail-Wheel Contact[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 40(2): 108-114.
- [17] VASIC G. Modelling of Wear and Crack Initiation in Rails[D]. Newcastle: University of Newcastle Upon Tyne, 2013.
- [18] HEYDER R, MAEDLER K. The Influence of Wheel and Rail Material on the Wear of the Respective Contact Partner[C]//Pro CM2015 10th Inter Conf on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Colorado: [s. n.], 2015.
- [19] SANTA J F, CUERVO P, CHRISTOFOROU P, et al. Twin Disc Assessment of Wear Regime Transitions and Rolling Contact Fatigue in R400HT - E8 Pairs[J]. Wear, 2019, 432-433: 102916.
- [20] PETRAKOVA A G. Optimization of Material Hardness of Solid-Rolled Wheel of Freight Cars[J]. Journal of Friction and Wear, 2009, 30(1): 41-45.
- [21] MARKOV D. Laboratory Tests for Wear of Rail and Wheel Steels[J]. Wear, 1995, 181-183: 678-686.
- [22] SHUR E A. On Optimal Correlation of Hardness Rails and Wheels[C]// Proc Sci Techn Conf. Contemporary Problems of Interaction of Rolling Stock and Line. Moscow: Railway Transport Institute, 2003: 87-93.
- [23] LARIN T V. On Optimal Hardness of Friction Pair Wheel-Rail Elements[J]. Vestn Vse Ross. Nauchn Inst Zhelezn. Transport, 1965, 3: 5-9.
- [24] RAZHKOVSKIY A A, BUNKOVA T G, PETRAKOVA A G, et al. Optimization of Hardness Ratio in Rail-Wheel Friction Pair[J]. Journal of Friction and Wear, 2015, 36(4): 334-341.
- [25] 李家驹, 杨开庭, 应惠敏, 等. 车轮和钢轨硬度匹配的研究[J]. 中国铁道科学, 1984, 5(1): 49-59.
LI Jia-ju, YANG Kai-ting, YING Hui-min, et al. A Study of the Hardness Combination of Wheels and Rails[J]. China Railway Science, 1984, 5(1): 49-59.
- [26] 马腾, 朱桂兰. 热处理钢轨的轨/轮匹配关系研究[J]. 物理测试, 1999, 17(5): 1-3.
MA Teng, ZHU Gui-lan. Study on Matching Relationship between Rail and Wheel[J]. Physics Examination and Testing, 1999, 17(5): 1-3.
- [27] 张银花, 周韶博, 周清跃, 等. 高速铁路轮轨硬度匹配试验研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(4): 1-7.
ZHANG Yin-hua, ZHOU Shao-bo, ZHOU Qing-yue, et al. Experimental Study on Hardness Matching of Wheel and Rail Materials for High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 1-7.
- [28] 常崇义, 李果, 张银花, 等. 轮轨材料硬度匹配对车轮多边形磨耗影响的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 87-93.
CHANG Chong-yi, LI Guo, ZHANG Yin-hua, et al. Experimental Study on Influence of Wheel-Rail Material Hardness Matching on Wheel Polygonal Wear[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 87-93.
- [29] 沈文林, 宋春元, 李国栋, 等. 高速动车组车轮硬度与车轮多边形形成关系及解决措施研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(4): 18-23.
SHEN Wen-lin, SONG Chun-yuan, LI Guo-dong, et al. Research for High-Speed EMU Wheel Hardness and Polygon-Form Relationships with Solutions[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4): 18-23.
- [30] 张银花, 周韶博, 张关震, 等. 高速铁路轮轨硬度匹配研究及方向探讨[J]. 中国铁路, 2018(1): 7-14.
ZHANG Yin-hua, ZHOU Shao-bo, ZHANG Guan-zhen, et al. Study and Discussion of High Speed Wheel-Rail Hardness Matching[J]. China Railway, 2018(1): 7-14.
- [31] 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.
WANG Wen-jian, LIU Qi-yue, ZHU Min-hao. Hardness Matching Behavior of Wheel/Rail Materials[J]. Tribology, 2013, 33(1): 65-69.
- [32] 王文健, 汪洪, 刘启跃. 车轮材料对轮轨滚动摩擦磨损行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 909-914.
WANG Wen-jian, WANG Hong, LIU Qi-yue. Effect of Wheel Material on Rolling Friction and Wear Behaviors of Wheel /Rail Rollers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 909-914.
- [33] 丁昊昊, 付志凯, 郭火明, 等. 三种钢轨材料与车轮匹配时滚动磨损与损伤行为[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3): 233-239.

- DING Hao-hao, FU Zhi-kai, GUO Huo-ming, et al. Rolling Wear and Damage Behaviors between Three Kinds of Rail Materials and Wheel Material[J]. Tribology, 2014, 34(3): 233-239.
- [34] 陈水友, 刘吉华, 郭俊, 等. 车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 531-537.
- CHEN Shui-you, LIU Ji-hua, GUO Jun, et al. Effect of Wheel Material Characteristics on Wear and Fatigue Property of Wheel-Rail[J]. Tribology, 2015, 35(5): 531-537.
- [35] 王延朋, 丁昊昊, 邹强, 等. 列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 120-128.
- WANG Yan-peng, DING Hao-hao, ZOU Qiang, et al. Research Progress on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheel Treads[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 120-128.
- [36] 王文健, 张向龙, 张继旺, 等. 碳含量对车轮钢滚动摩擦磨损性能影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 32-35.
- WANG Wen-jian, ZHANG Xiang-long, ZHANG Ji-wang, et al. Effect of Carbon Content on Rolling Friction and Wear Behavior of Wheel Steel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(2): 32-35.
- [37] 张向龙. U₇₁Mn 钢轨与车轮材料匹配试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- ZHANG Xiang-long. Investigation on Matching Tests of Wheel/U₇₁Mn Rail Materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [38] LEWIS R, MAGEL E, WANG Wen-jian, et al. Towards a Standard Approach for the Wear Testing of Wheel and Rail Materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(7): 760-774.
- [39] HU Y, WATSON M, MAIORINO M, et al. Experimental Study on Wear Properties of Wheel and Rail Materials with Different Hardness Values[J]. Wear, 2021, 477: 203831.
- [40] SHEINMAN E. Wear of Rails. A Review of the American Press[J]. Journal of Friction and Wear, 2012, 33(4): 308-314.
- [41] TYFOUR W R, BEYNON J H, KAPOOR A. The Steady State Wear Behaviour of Pearlitic Rail Steel under Dry Rolling-Sliding Contact Conditions[J]. Wear, 1995, 180 (1-2): 79-89.
- [42] ORDONEZ R, GARCIA C I, DEARDO A, et al. New Rail Steels for the 21st Century[C]//The Fourth Baosteel Biennial Academic Conference. Shanghai: [s. n.], 2010.
- [43] LI X C, DING H H, WANG W J, et al. Investigation on the Relationship between Microstructure and Wear Characteristic of Rail Materials[J]. Tribology International, 2021, 163: 107152.
- [44] MOLYNEUX-BERRY P, DAVIS C, BEVAN A. The Influence of Wheel/Rail Contact Conditions on the Microstructure and Hardness of Railway Wheels[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 209752.
- [45] HE C G, DING H H, SHI L B, et al. On the Microstructure Evolution and Nanocrystalline Formation of Pearlitic Wheel Material in a Rolling-Sliding Contact[J]. Materials Characterization, 2020, 164: 110333.
- [46] PAN Rui, REN Rui-ming, ZHAO Xiu-juan, et al. Influence of Microstructure Evolution during the Sliding Wear of CL65 Steel[J]. Wear, 2018, 400-401: 169-176.
- [47] 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.
- [48] LIU Chun-peng, ZHANG Guan-zhen, LIU Peng-tao, et al. An Electron Backscatter Diffraction Investigation on Microstructural Evolution of Pearlite Wheel Steel near Rolling Contact Fatigue Crack Tip[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(8): 2244-2256.
- [49] CIHAK-BAYR U, MOZDZEN G, BADISCH E, et al. High Plastically Deformed Sub-Surface Tribozones in Sliding Experiments[J]. Wear, 2014, 309(1-2): 11-20.
- [50] HU Y, SU C R, GUO L C, et al. Effect of Rolling Direction on Microstructure Evolution of CL60 Wheel Steel[J]. Wear, 2019, 424-425: 203-215.
- [51] LI Gen, HONG Zhi-yuan, YAN Qing-zhi. The Influence of Microstructure on the Rolling Contact Fatigue of Steel for High-Speed-Train Wheel[J]. Wear, 2015, 342-343: 349-355.
- [52] TESHIMA T, KOSAKA M, USHIODA K, et al. Local Cementite Cracking Induced by Heterogeneous Plastic Deformation in Lamellar Pearlite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 679: 223-229.
- [53] KALOUSEK J, FEGREDO D M, LAUFER E E. The Wear Resistance and Worn Metallography of Pearlitic, Bainite and Tempered Martensite Rail Steel Microstructures of High Hardness[J]. Wear, 1985, 105(3): 199-222.
- [54] ADAMCZYK-CIEŚLAK B, KORALNIK M, KUZIAR R, et al. Low-Cycle Fatigue Behaviour and Microstructural Evolution of Pearlitic and Bainitic Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 747: 144-153.
- [55] LIU J P, LI Y Q, ZHOU Q Y, et al. New Insight into the Dry Rolling-Sliding Wear Mechanism of Carbide-Free Bainitic and Pearlitic Steel[J]. Wear, 2019, 432-433: 202943.
- [56] CHEN Yu-da, REN Rui-ming, PAN Jin-zhi, et al. Microstructure Evolution of Rail Steels under Different Dry Sliding Conditions: A Comparison between Pearlitic and Bainitic Microstructures[J]. Wear, 2019, 438-439: 203011.
- [57] KRÓLICKA A, LESIUK G, RADWAŃSKI K, et al. Comparison of Fatigue Crack Growth Rate: Pearlitic Rail Versus Bainitic Rail[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 149: 106280.
- [58] SHARIFF S M, PAL T K, PADMANABHAM G, et al. Influence of Chemical Composition and Prior Microstructure on Diode Laser Hardening of Railroad Steels[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: 14-26.
- [59] LEWIS S R, LEWIS R, GOODWIN P S, et al. Full-Scale

- Testing of Laser Clad Railway Track; Case Study - Testing for Wear, Bend Fatigue and Insulated Block Joint Lipping Integrity[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 1930-1937.
- [60] LEWIS S R, FRETWELL-SMITH S, GOODWIN P S, et al. Improving Rail Wear and RCF Performance Using Laser Cladding[J]. *Wear*, 2016, 366-367: 268-278.
- [61] ZHAO Ji-zhong, MIAO Hong-chen, KAN Qian-hua, et al. Numerical Investigation on the Rolling Contact Wear and Fatigue of Laser Dispersed Quenched U₇₁Mn Rail[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 143: 106010.
- [62] WANG Xin-lin, LEI Lei, YU Han. A Review on Microstructural Features and Mechanical Properties of Wheels/Rails Cladded by Laser Cladding[J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 152.
- [63] WANG W J, HU J, GUO J, et al. Effect of Laser Cladding on Wear and Damage Behaviors of Heavy-Haul Wheel/Rail Materials[J]. *Wear*, 2014, 311(1-2): 130-136.
- [64] 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.
- [65] ZHU Y, LYU Y, OLOFSSON U. Mapping the Friction between Railway Wheels and Rails Focusing on Environmental Conditions[J]. *Wear*, 2015, 324-325: 122-128.
- [66] LEE C W, KWON S J. Evaluation of Surface Defects of Wheel and Rail for Korean High-Speed Railway[J]. *Materials Science Forum*, 2010, 654-656: 2499-2502.
- [67] GALAS R, OMASTA M, SHI Lu-bing, et al. The Low Adhesion Problem: The Effect of Environmental Conditions on Adhesion in Rolling-Sliding Contact[J]. *Tribology International*, 2020, 151: 106521.
- [68] ZHOU L, WANG W J, HU Y, et al. Study on the Wear and Damage Behaviors of Hypereutectoid Rail Steel in Low Temperature Environment[J]. *Wear*, 2020, 456-457: 203365.
- [69] ZHOU L, HU Y, DING H H, et al. Experimental Study on the Wear and Damage of Wheel-Rail Steels under Alternating Temperature Conditions[J]. *Wear*, 2021, 477: 203829.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] LYU Ye-zhe, BERGSETH E, OLOFSSON U. Open System Tribology and Influence of Weather Condition[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32455.
- [73] 黄万亮, 何成刚, 师陆冰, 等. 第三介质作用下坡道对轮轨黏着特性影响[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(4): 445-450.
- HUANG Wan-liang, HE Cheng-gang, SHI Lu-bing, et al. Influence of Track Ramp on Adhesion Characteristic of Wheel/Rail under Third Medium Conditions[J]. *Tribology*, 2016, 36(4): 445-450.
- [74] WANG C, SHI L B, DING H H, et al. Adhesion and Damage Characteristics of Wheel/Rail Using Different Mineral Particles as Adhesion Enhancers[J]. *Wear*, 2021, 477: 203796.
- [75] ZHONG W, HU J J, SHEN P, et al. Experimental Investigation between Rolling Contact Fatigue and Wear of High-Speed and Heavy-Haul Railway and Selection of Rail Material[J]. *Wear*, 2011, 271(9-10): 2485-2493.
- [76] LIU Ji-hua, JIANG Wen-juan, CHEN Shui-you, et al. Effects of Rail Materials and Axle Loads on the Wear Behavior of Wheel/Rail Steels[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(7): 168781401665725.
- [77] 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.
- [78] ZHU W T, GUO L C, SHI L B, et al. Wear and Damage Transitions of Two Kinds of Wheel Materials in the Rolling-Sliding Contact[J]. *Wear*, 2018, 398-399: 79-89.
- [79] 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.
- [80] ZHOU Y, PENG J F, LUO Z P, et al. Phase and Microstructural Evolution in White Etching Layer of a Pearlitic Steel during Rolling-Sliding Friction[J]. *Wear*, 2016, 362-363: 8-17.
- [81] AL-JUBOORI A, ZHU H, WEXLER D, et al. Characterisation of White Etching Layers Formed on Rails Subjected to Different Traffic Conditions[J]. *Wear*, 2019, 436-437: 202998.
- [82] MESSAADI M, STEENBERGEN M. Stratified Surface Layers on Rails[J]. *Wear*, 2018, 414-415: 151-162.
- [83] LIAN Qing-lin, DENG Guan-yu, ZHU Hong-tao, et al. Influence of White Etching Layer on Rolling Contact Behavior at Wheel-Rail Interface[J]. *Friction*, 2020, 8(6): 1178-1196.
- [84] 孟庆艳, 刘德义, 刘鹏涛, 等. 滚滑磨损对 U₇₅V 钢组织性能影响[J]. *大连交通大学学报*, 2016, 37(4): 100-104.
- MENG Qing-yan, LIU De-yi, LIU Peng-tao, et al. Influence of Rolling and Sliding Wear on Microstructure and Properties of U₇₅V Steel[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2016, 37(4): 100-104.
- [85] EGHBALI B. Study on the Ferrite Grain Refinement during Intercritical Deformation of a Microalloyed Steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(15): 3407-3410.
- [86] 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, 366-367: 13-26.
- [87] KHODDAM S, SHAMDANI A H, MUTTON P, et al. A New Test to Study the Cyclic Hardening Behaviour of a Range of High Strength Rail Materials[J]. *Wear*, 2014,

- 313(1-2): 43-52.
- [88] TYFOUR W R, BEYNON J H. The Effect of Rolling Direction Reversal on Fatigue Crack Morphology and Propagation[J]. Tribology International, 1994, 27(4): 273-282.
- [89] TYFOUR W R, BEYNON J H. The Effect of Rolling Direction Reversal on the Wear Rate and Wear Mechanism of Pearlitic Rail Steel[J]. Tribology International, 1994, 27(6): 401-412.
- [90] ZENG Dong-fang, LU Lian-tao, ZHANG Ji-wang, et al. Effect of Bi-Directional Operation on Rolling-Sliding Wear of Wheel Steel under Variable Amplitude Loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2016, 230(2): 186-195.
- [91] 张明远, 鲁连涛, 曾东方, 等. 滚动方向改变对车轮钢摩擦磨损性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 106-111, 126.
- ZHANG Ming-yuan, LU Lian-tao, ZENG Dong-fang, et al. Effect of Rolling Direction Reversal on Friction and Wear Behavior of Wheel Steel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 106-111, 126.
- [92] 胡月, 李群, 刘启跃, 等. 滚动方向对 CL60 车轮材料接触疲劳损伤的影响[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 84-91.
- HU Yue, LI Qun, LIU Qi-yue, et al. Effect of Rolling Direction on Contact Fatigue Damage of CL60 Wheel Steel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(1): 84-91.

责任编辑: 万长清

(上接第 87 页)

- [54] SINGH S, CHEN Xin-chun, ZHANG Chen-hui, et al. Tribological Performance of Steel with Multi-Layer Graphene Grown by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition[J]. Journal of Tribology, 2020, 142(12): 122101.
- [55] SINGH S, CHEN Xin-chun, ZHANG Chen-hui, et al. Nickel-Catalyzed Direct Growth of Graphene on Bearing Steel (GCr₁₅) by Thermal Chemical Vapor Deposition and Its Tribological Behavior[J]. Applied Surface Science, 2020, 502: 144135.
- [56] BESRA L, LIU Mei-lin. A Review on Fundamentals and Applications of Electrophoretic Deposition (EPD)[J]. Progress in Materials Science, 2007, 52(1): 1-61.
- [57] 洪红, 陈苏琳, 陈茜, 等. 基于电泳法的石墨烯涂层制备与摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(4): 391-400.
- HONG Hong, CHEN Su-lin, CHEN Xi, et al. Friction Properties of Graphene Coating Prepared by Electrophoretic Deposition[J]. Tribology, 2018, 38(4): 391-400.
- [58] HONG Hong, CHEN Su-lin, CHEN Xi, et al. Study on the Friction Reducing Effect of Graphene Coating Prepared by Electrophoretic Deposition[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 335-340.
- [59] SHEN Bin, HONG Hong, CHEN Su-lin, et al. Cathodic Electrophoretic Deposition of Magnesium Nitrate Modified Graphene Coating as a Macro-Scale Solid Lubricant[J]. Carbon, 2019, 145: 297-310.
- [60] QIANG Rui-bin, HOU Kai-ming, WANG Jin-qing, et al. Smooth and Dense Graphene Quantum Dots-Based Lubricating Coatings Prepared by Electrophoretic Deposition[J]. Applied Surface Science, 2020, 509: 145338.
- [61] CIEŚLAK G, TRZASKA M. Tribological Properties of Nanocomposite Ni/Graphene Coatings Produced by Electrochemical Reduction Method [J]. Composites: Theory and Practice, 2016, 2: 79-83. 2016
- [62] XIANG Li, SHEN Qian-qian, ZHANG Yu, et al. One-Step Electrodeposited Ni-Graphene Composite Coating with Excellent Tribological Properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 373: 38-46.
- [63] HAU T, TRINH P, TU N, et al. Electrodeposited Nickel-Graphene Nanocomposite Coating: Influence of Graphene Nanoplatelet Size on Wear and Corrosion Resistance[J]. Applied Nanoscience, 2021, 11(5): 1481-1490.
- [64] MAI Y J, ZHOU M P, LING H J, et al. Surfactant-Free Electrodeposition of Reduced Graphene Oxide/Copper Composite Coatings with Enhanced Wear Resistance[J]. Applied Surface Science, 2018, 433: 232-239.
- [65] WANG Tian, ZHAO Rui, ZHAN Ke, et al. Preparation of Electro-Reduced Graphene Oxide/Copper Composite Foils with Simultaneously Enhanced Thermal and Mechanical Properties by DC Electro-Deposition Method[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 805: 140574.
- [66] TOOSINEZHAD A, ALINEZHADFAR M, MAHDAVI S. Cobalt/Graphene Electrodeposits: Characteristics, Tribological Behavior, and Corrosion Properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 385: 125418.
- [67] TOOSINEZHAD A, ALINEZHADFAR M, MAHDAVI S. Tribological Behavior of Cobalt/Graphene Composite Coatings[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 16886-16894.

责任编辑: 万长清