

DOI: 10.3901/JME.2018.22.184

高速铁路钢轨打磨技术的发展现状与展望*

樊文刚^{1,2} 刘月明^{1,2} 李建勇^{1,2}

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 北京交通大学载运工具先进制造与测控技术教育部重点实验室 北京 100044)

摘要: 钢轨在服役过程中不可避免会产生波磨、裂纹、剥离、肥边等各种损伤和缺陷,严重影响其使用寿命和列车运行安全。钢轨打磨是当前国内外公认的去表面损伤和缺陷、抑制滚动接触疲劳、改善轮轨匹配关系、延长钢轨使用寿命、提高列车运行平稳性、安全性以及乘客舒适度的有效和通用手段。概述预打磨、预防性打磨和修复性打磨三种钢轨打磨策略,然后将适用于高速铁路的钢轨打磨技术系统性的分为砂轮端面打磨技术、砂轮周边打磨技术、铣磨复合打磨技术、砂轮高速打磨技术和砂带打磨技术,并对每种打磨技术的原理、国内外相关研究及其对应的典型打磨装备发展现状进行详细评述,最后指出高速铁路钢轨打磨装备总体上呈现智能化、高效化、多样化和绿色化发展趋势,打磨技术将随着先进制造理念的不断渗透而发展进步,同时须研发我国自主化高端钢轨打磨装备,以全面提升我国高速铁路钢轨维护水平。

关键词: 高速铁路; 钢轨打磨; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: TG743

Development Status and Prospect of Rail Grinding Technology for High Speed Railway

FAN Wengang^{1,2} LIU Yueming^{1,2} LI Jianyong^{1,2}

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Key Laboratory of Vehicle Advanced Manufacturing, Measuring and Control Technology, Ministry of Education, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044)

Abstract: Rails in service are unavoidably prone to suffer from kinds of defects such as corrugation, crack, spalling and lipping, leading to serious influence to its life and train's safety. Rail grinding has been widely recognized as an effective and general means to remove the flaws, restrain the rolling contact fatigue, improve the wheel-rail contact condition, extend the rail's service life, and increase running stability, safety as well as passengers' comfort. Three kinds of rail grinding strategies are outlined, and the rail grinding technologies for high speed railways are systematically divided into the facing grinding by abrasive wheel, the peripheral grinding by abrasive wheel, the milling and grinding compound process, the high speed grinding by abrasive wheel and the abrasive belt grinding. Then the basic principle, the related research at home and abroad, and the corresponding typical rail grinding equipments for every technology are reviewed in detail. Finally, the development trend is pointed out that the rail grinding equipments for high speed railways advance towards intellectualization, high efficiency, diversification and greenization, and the rail grinding technologies progress with the continuous infiltration of advanced manufacturing philosophy. Meanwhile, the autonomous high-end rail grinding equipments should be developed to comprehensively upgrade the rail maintenance level of the high speed railways.

Key words: high speed railway; rail grinding; research status; development tendency

0 前言

铁路是国民经济大动脉、关键基础设施和重大民生工程,是综合交通运输体系的骨干和主要运输方式之一^[1]。自1825年世界上第一条铁路在英国诞

生、1964年世界上第一条高速铁路在日本运营以来,铁路对世界各国经济社会发展的推动作用日益凸显。作为铁路系统中的核心部件,钢轨在对机车车辆提供导向作用的同时,也将所承受的机车载荷传递给铁路路基或桥隧,由于服役过程中时刻受到来自垂向、横向以及纵向的复杂多变载荷冲击作用,其表面和内部容易出现各种损伤和缺陷(图1),如波磨、裂纹、剥离、压溃、点蚀和肥边等^[2-4]。

* 中央高校基本科研业务费(2017JBM043)和国家自然科学基金(51505025)资助项目。20180425收到初稿,20180710收到修改稿

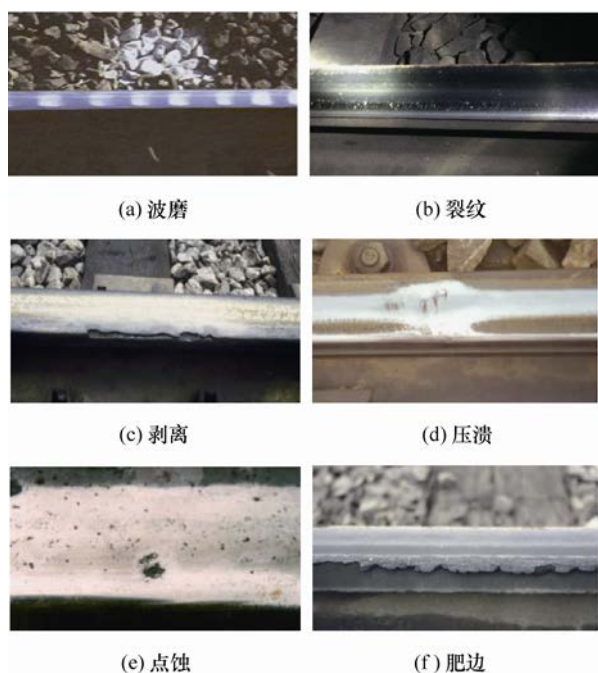


图1 钢轨常见损伤和缺陷

这些损伤和缺陷若得不到及时处理和有效控制, 钢轨将因不断恶化而失效, 带来高额维护成本。例如, 北美每英里钢轨更换费用为 30~60 万美元^[5]; 欧洲每年钢轨更换及维护费用约为 30 亿欧元^[6], 其中英国在 2014—2015 年投入铁路维护费用高达 12 亿英镑; 我国每年的钢轨更换及维护费用至少为 12 亿美元^[7]。目前, 钢轨打磨已经成为世界上公认的去表面损伤和缺陷(图 2)、改善轮轨匹配关系的通用手段^[8-9], 可有效抑制滚动接触疲劳、延长钢轨使用寿命、降低列车运行噪声、提高列车运行平稳性、安全性以及乘客舒适度, 其社会和经济效益显著, 而高速铁路不断提高的运营速度、不断增加的客货列车数量和不断缩短的天窗时间客观上对钢轨打磨效率和质量提出了更高要求和更大挑战。基于此, 本文对适用于高速铁路的国内外钢轨打磨技术研究和应用现状进行了客观评述, 并给出了其未来发展的趋势和建议。



图2 钢轨打磨去除损伤和缺陷演变过程

1 钢轨打磨策略

按照打磨策略不同, 钢轨打磨通常可分为预打

磨、预防性打磨和修复性打磨三类。其中, 预打磨是指对铺设上道后的新钢轨进行打磨, 除常规消除钢轨表面脱碳层、缺陷和损伤外, 一般还要形成新的特定轨头廓型, 这已经成为我国高速铁路正式运营前的一项必不可少的工序^[10]; 预防性打磨的主要思想是在损伤和缺陷刚刚萌芽或产生初期, 通过去除钢轨表层少量金属材料(厚度一般为 0.1~0.2 mm), 达到阻止或延缓钢轨损伤和缺陷进一步发展的目的, 其打磨周期较短; 而修复性打磨则往往适用于钢轨表面发生较严重损伤和缺陷或轨头廓型发生较大改变的情况, 其材料去除厚度一般为 1.0~1.5 mm, 其打磨周期较长^[11]。

特别指出, 为获得良好的轮轨接触关系, 无论采用哪种打磨策略, 都应该能够保持或恢复与车轮型面相匹配的轨头廓型。针对我国 CRH1、CRH2、CRH3 和 CRH5 四种型号动车组对应的三种型面车轮 LMA、S1002CN 和 XP55, 在标准轨廓型 60GB 的基础上, 基于轮轨接触动力学理论和长期实践经验, 铁道科学研究院^[12-13]研发了高速铁路钢轨打磨设计廓型 60D 和新轨头廓型 60 N, 满足了我国铁路 1/40 轨底坡、1 353 mm 轮背内侧距、轨面需要与多种车轮型面达到理想匹配状态的工况要求。目前, 60D 和 60 N 已经成为我国各铁路局工务段对高速铁路钢轨实施打磨作业的主要目标廓型。

图 3 为对钢轨未实施打磨、实施修复性打磨和预防性打磨的对比情况。可以看出, 与未打磨状态相比, 修复性打磨可以显著提升钢轨服役寿命, 而以“单次磨削量小、多次磨削、防患于未然”为理念的预防性打磨则可以更大幅度的延长钢轨服役寿命, 因此成为国外经常采用的一种方式, 效果良好。以北美某试验铁路区段为例^[14], 在无打磨作业下钢轨表面损伤和缺陷的发生概率约为 15%, 在修复性打磨下钢轨表面损伤和缺陷的发生概率约为 8%, 而采用预防性打磨后, 其钢轨表面损伤和缺陷的发生概率降至最低约为 4%。当前, 在保证打磨作业效率和质量、总体成本可控的前提下, 采用预防性打磨逐步替代修复性打磨已经成为钢轨打磨策略的必然发展趋势。

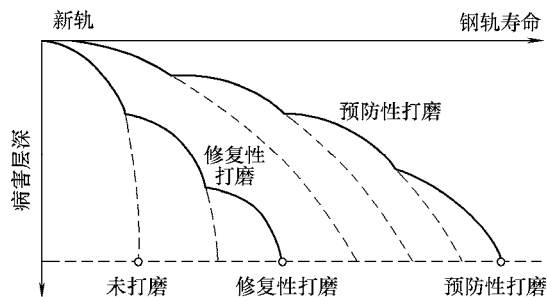


图3 未打磨、修复性打磨与预防性打磨对比

2 钢轨打磨技术与装备现状

经过 60 多年的发展,钢轨打磨技术早已被美国、俄罗斯、德国、日本、英国、加拿大、澳大利亚等纳入到钢轨的日常维护中。美国、加拿大等国家由于尚未发展高速铁路,其钢轨打磨作业主要集中在重载线路和普速线路,法国和德国等国家则在高速铁路钢轨打磨方面积累了丰富的成功应用经验^[15],且形成了相关打磨标准与实施方法。我国钢轨打磨作业起步较晚,随着上世纪 80 年代对国外钢轨打磨技术和装备的引进,国内对钢轨打磨理论和工艺的内在认识和实践水平都得到了较大提升,并同样将钢轨打磨作为我国铁路尤其是高速线路的一项基本维护操作,但总体上仍与国外发达国家存在较大差距。

依据线路维护的一般工艺流程,钢轨打磨作业主要是根据对钢轨损伤和缺陷的测量与分析结果,制定合理的打磨策略,确定合适的打磨装备,设定准确的打磨模式,采用规范的打磨工艺,驱动高效的打磨磨具,在钢轨表面指定区域内去除一定厚度的金属材料,以减小、消除或防止钢轨表层的各类损伤和缺陷,并将钢轨表面打磨成所希望的目标廓型,从而切实改善轮轨匹配关系。在分析国内外现有钢轨打磨工艺及其装备研发和实际应用的基础上,本文将适用于高速铁路的钢轨打磨技术系统性的分为砂轮端面打磨技术、砂轮周面打磨技术、铣磨复合打磨技术、砂轮高速打磨技术和砂带打磨技术。下面将详细论述每种打磨技术的原理、国内外研究现状及其对应的典型打磨装备。

2.1 砂轮端面打磨技术

当前应用最为广泛的钢轨打磨工艺为砂轮端面打磨技术,其基本原理如图 4 所示,多个打磨砂轮沿钢轨纵向(即打磨装备行进方向)排列,并以不同的摆角 α 沿钢轨横向分布,其中每个摆角对应于一

个钢轨廓型打磨角度,该角度可定义为砂轮端面接触钢轨廓型所形成的切线与空间水平方向之间的夹角。所有沿钢轨纵向和横向布置的砂轮,在通过电机或者液压马达驱动以速度 w 高速旋转的同时,也随同打磨装备以进给速度 f 沿钢轨行进,则在打磨压力 F_n 的作用下,砂轮端面磨粒侵入钢轨表层并与其形成相对运动,从而去除钢轨表层材料,最终实现钢轨廓型的包络式打磨。

国内外专家学者在砂轮端面打磨技术领域开展了大量卓有成效的研究工作。ZAREMBSKI 等^[16-18]打破了传统钢轨打磨仅仅注重钢轨表面损伤的局限性,提出通过廓型打磨方式实现钢轨损伤和缺陷去除并控制钢轨廓型的思想,可显著改善轮轨接触关系。肖杰灵^[15]对客货混跑铁路钢轨的非对称打磨进行了理论和试验研究,基于经典的轮轨接触几何学与接触力学,建立了钢轨廓型优化的轮轨接触关系模型,形成了钢轨非对称廓型优化原则和实用方法。YUKIO 等^[19]利用金相学、晶向分析和电子背散射衍射分析方法,研究了钢轨打磨对滚动接触疲劳的影响,指出钢轨打磨不仅可以有效去除表面损伤层,而且也会减缓钢轨内部疲劳发展。聂蒙^[20]针对气动加载形式的钢轨打磨功率控制难题,研究了打磨功率控制系统的气路结构、反馈信号处理方法与控制策略,提出了一种基于变参数气动结构的钢轨打磨恒功率控制技术。

近年来,ZHI 等^[21-22]实现了贴近实际的砂轮三维形貌数字化表征,然后从微观磨粒角度出发,建立了宏观钢轨打磨工艺理论预测模型,并提出了一种基于材料去除行为的磨削电机节能方法。REAL 等^[23]针对表面遭受波磨困扰的曲线轨道,建立了轮轨接触关系的时间域模型,可用来评定钢轨打磨带来的减振降噪效益。HARTSOUGH 等^[24]基于钢轨实际测量数据,详细论述了实际打磨作业中打磨模式的动态设定过程,包括数据采集、廓型对齐、打磨量计算、打磨头布置等。ZHANG 等^[25]基于移动热源法,建立了钢轨打磨过程的三维热模型,分析了磨削工艺参数以及砂轮布置对温度场的影响规律。GU 等^[26]基于大量试验研究了砂轮转速对摩擦系数、表面粗糙度、表面硬度、材料去除量、温度以及磨屑形态的影响规律。STEENBERGEN 和 SANTA 等^[27-28]深入研究了钢轨打磨工艺参数与滚动接触疲劳的关联性,指出现有钢轨砂轮端面打磨方式容易导致钢轨表面产生白色马氏体层,对钢轨服役寿命产生一定影响。RASMUSSEN 等^[29]等进一步指出钢轨表面裂纹的形成与白色马氏体层密不可分,建议采用硬度和粗糙度较小的砂轮以实现相对

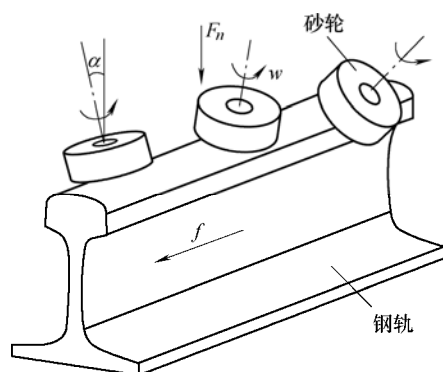


图 4 砂轮端面打磨技术原理

柔和的磨削。

在砂轮端面打磨装备方面, 主要的制造商有美国 HARSCO 公司、瑞士 SPENO 公司、美国 LORAM 公司以及国内中车北京二七机车有限公司(以下简称中车二七)、襄樊金鹰轨道车辆有限责任公司(以下简称襄樊金鹰)等。其中, 中车二七通过引进瑞士 SPENO 公司技术和国产化, 形成了 GMC-96B 型钢轨打磨列车, 如图 5a 所示; 襄樊金鹰通过引进美国 HARSCO 公司技术和国产化, 形成了 GMC-96x 型钢轨打磨列车, 如图 5b 所示。GMC-96B 型钢轨打磨列车由一节动力车和六节打磨作业车组成, 总长约: 150 m, 其最大自走行速度(双向): 100 km/h, 打磨速度可调范围: 3~15 km/h, 打磨角度范围: 钢轨内侧-70°到外侧+ 20°, 最小作业曲线半径: 250 m, 拥有 96 个打磨角度和压力可调的打磨砂轮, 具有 99 种打磨模式, 能在运行中对钢轨进行在线打磨, 可实现钢轨表层金属磨削量不少于 0.2 mm / 遍, 以及 300 mm、1 000 mm 钢轨纵向波长范围内最大幅值分别为 0.02 mm 和 0.2 mm 波磨的消除, 适用于 50/60/75 kg/m 钢轨。而 GMC-96x 型钢轨打磨列车同样拥有 96 个打磨角度和压力可调的打磨砂轮, 其对砂轮施加的打磨功率更高, 打磨速度可调范围更大: 3~24 km/h, 客观上具有更高的切削能力和更大的工况适应性。



(a) GMC-96B 型大型钢轨打磨列车



(b) GMC-96x 型大型钢轨打磨列车

图 5 典型的砂轮端面打磨装备

2.2 砂轮周面打磨技术

砂轮周面打磨技术是采用砂轮的圆周面作为工作面以去除钢轨表层材料, 其基本原理如图 6 所示, F_n 代表打磨压力, w 为砂轮转速, f 为进给速度。由砂轮端面打磨原理可知, 砂轮端面打磨只能通过沿钢轨横向和纵向布置的多个砂轮组合实现钢轨廓型打磨, 打磨精度取决于多个直线段逼近钢轨廓型曲线的精度, 且所获得的钢轨表面具有很多平面和棱线, 如图 7a 所示; 而砂轮周面打磨既可以按照砂轮端面包络方式实现钢轨廓型打磨, 又可以将外圆周面依据钢轨目标廓型内凹成特定曲面, 通过整体仿形或者分段仿形方法实现钢轨廓型打磨, 结果可以获得比较光滑的钢轨表面, 如图 7b 所示。

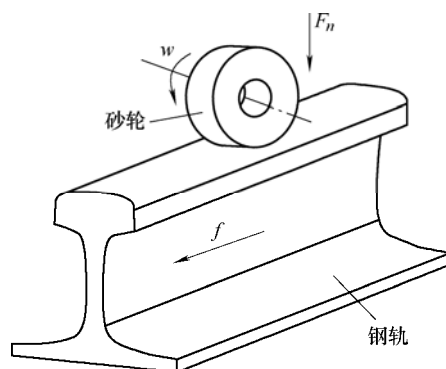


图 6 砂轮周面打磨技术原理



(a) 砂轮端面包络打磨



(b) 砂轮周面仿形打磨

图 7 砂轮周面打磨与端面打磨后钢轨表面形态对比

国内外涉及到砂轮周面打磨技术的研究文献较少。SINGLETON 等^[30]将航空领域中的高效深磨削技术引入到钢轨打磨中, 通过给超硬磨料砂轮设定高的旋转速度和大的磨削深度等, 在不影响打磨质

量的前提下,可以把当前的预防性钢轨打磨最高作业速度由 16 km/h 大幅度提高至 32 km/h,同时可有效减小切削厚度,延缓砂轮磨损进程。UHLMANN 等^[31]则研究了砂轮周面打磨工艺参数、砂轮特征参量与钢轨表面粗糙度、硬度之间的关系规律,结果表明不同工艺参数组合所导致的钢轨打磨效果差异明显,通过定量分析有助于获得具有高材料去除和低钢轨损伤的打磨模式。

目前,已经得到实际应用的典型砂轮周面打磨装备是意大利 MECNOSERVICE 公司研制的 MS12S-ASG 打磨车,如图 8 所示,其总长约: 12 m,最大自走行速度: 35 km/h,打磨作业速度: ≥ 1 km/h,打磨角度范围: 钢轨内侧 -70° 到外侧 $+5^{\circ}$,最小作业曲线半径: 25 m,打磨砂轮数量: 12 个,包括全电动操作控制系统、集尘和噪音控制系统、尾气处理系统、监控系统和火灾预防装置等,适用于高速铁路、普速铁路、轻轨、有轨电车等。



图 8 典型的砂轮周面打磨装备

2.3 铣磨复合打磨技术

铣磨复合打磨技术一般是采用铣刀切削和砂轮磨削的复合工艺实现对钢轨的打磨维护,其基本原理如图 9 所示,前置铣刀盘在其圆周面上镶嵌有大量硬质合金材质且不同形状的刀粒,同时绕平行于钢轨横向的水平轴旋转,以圆周铣削方式整体仿形铣削掉钢轨表层材料;后置砂轮外圆周工作面则依据钢轨廓型被制作成内凹型,砂轮宽度比钢轨略宽,且轴线与钢轨横向倾斜一定角度 α ,使砂轮上的磨

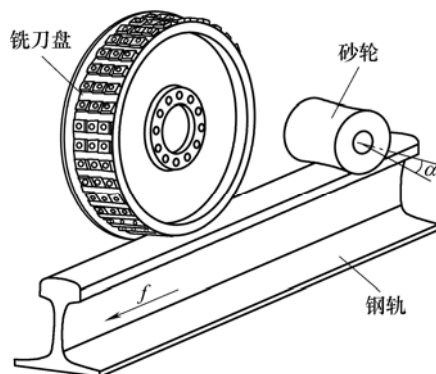


图 9 铣磨复合打磨技术原理

粒运动轨迹为一条曲线,实现对铣削痕迹的整体仿形周面磨削处理,最终可获得比较光滑的钢轨表面,如图 10 所示。一次铣磨复合打磨作业可去除材料深度 0.1~3.0 mm^[32],切削优势明显,特别适合对波磨、侧磨、肥边等损伤和缺陷严重的高速铁路和重载铁路等实施修复性打磨作业。



(a) 铣磨作业前



(b) 铣磨作业后

图 10 铣磨前后钢轨表面形态对比

在工艺和装备基础研究方面,刘真兵和胡军科等^[33-34]设计了钢轨铣磨车磨削装置结构及液压系统,分析了磨削砂轮受力,提出了一种磨削力的广义预测控制方法,可消除多种干扰因素对磨削力的影响。刘江南等^[35]提出了一种融合功能倒推与裁剪法的系统创新设计方法,实现了对钢轨铣磨车相关装置的快速、可靠三维构建。占国栋^[36]针对 60 kg/m 钢轨的铣磨要求,设计了一种铣刀盘理论廓型,并采用圆弧形刀片和方形刀片对该理论廓型进行了拟合,同时研究了铣削参数和刀具参数对切屑尺寸的影响规律。潘超等^[37]针对曲线路段内、外轨廓型及伤损分布的非对称性,基于非对称铣磨原理和最小二乘法,提出了一种适用于曲线路段钢轨的非对称铣削方法,扩大了钢轨铣磨车的应用范围。史智勇^[38]则基于轮轨接触动力学理论及仿真系统,对钢轨铣磨车的运行稳定性、平稳性、动态曲线通过和振动传递特性等进行了研究分析,为工程实际提供了理论依据。

目前,钢轨铣磨车在国内外已经得到了广泛应用,国外主要制造商有奥地利 LINSINGER 公司和 MFL 公司、德国 GBM 公司等,国内制造商则主要有中车二七和中国铁建高新装备股份有限公司(简

称铁建装备), 其中可用于高速铁路钢轨维护的典型产品是 LINSINGER 公司生产的 SF03-FFS 型号钢轨铣磨车, 如图 11a 所示。该铣磨车总长约: 25 m, 最大自走行速度: 100 km/h, 打磨作业速度: 0.36~1.20 km/h, 采用“两铣一磨”的作业方式, 在车体两侧各装备两套铣刀盘和一套砂轮, 每套装置可单独作业; 铣刀盘如图 11b 所示, 其圆周工作面径向安装有 22 组共 198 个刀片, 每组刀片包括 8 个轨顶面刀片和 1 个轨距角刀片, 以此包络形成钢轨目标廓型; 整机包括操作驾驶室、冷却间、动力间、工具间、电器柜间、铁屑收集箱等, 具有运行模式、调车模式和作业模式 3 种工况。



(a) SF03-FFS 铣磨车



(b) SF03-FFS 铣磨车铣刀盘

图 11 典型的铣磨复合打磨装备

2.4 砂轮高速打磨技术

砂轮高速打磨技术是利用打磨装备将无动力驱动的专用砂轮在钢轨表面上高速拖行(一般为 60~80 km/h)以去除钢轨表面材料, 其基本原理如图 12 所示, F_n 为打磨压力, w 为砂轮被动旋转速度, f 为打磨装备进给速度。为实现对钢轨横向廓型的优化和纵向波磨的消除, 砂轮轴线需与钢轨横向倾斜一定角度 α , 且沿钢轨纵向成组相对布置, 如此形成的钢轨表面打磨痕迹呈现出与其它打磨技术不同的交织网状形式, 如图 13 所示。砂轮高速打磨技术的作业强度只由打磨压力和装备行走速度决定, 可以获得比较固定的材料去除量, 同时因为打磨速度高, 作业时不用封闭线路, 因此特别适用于要求控制滚动接触疲劳的高速密

集线路的预防性打磨^[39]。

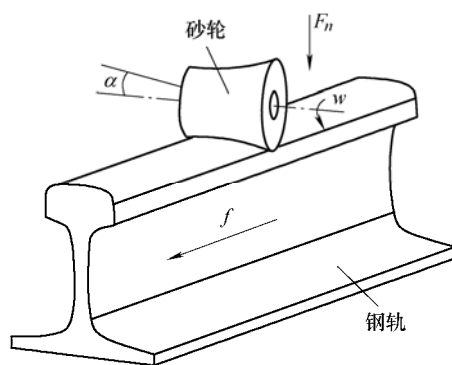


图 12 砂轮高速打磨技术原理



图 13 砂轮高速打磨后的钢轨表面形态

在砂轮高速打磨理论研究层面, 国外未见公开的相关文献, 国内仅有西南交通大学科研团队对其进行了较为系统的探索性研究。许孝堂^[40]利用高速打磨试验台, 研究了打磨作业参数、砂轮特征参量和外部环境等因素对打磨作业效果的影响规律, 设计了高速打磨试验车的切削方式、作业参数和牵引方式等, 以及与之相应的机械结构和液压系统, 进而建立了打磨小车的动力学模型, 并基于自行设计生产的高速打磨车开展了系列现场打磨试验。

目前唯一的砂轮高速打磨装备是德国 VOSSLOH 公司生产的 HSG 型高速打磨列车, 如图 14 所示, 其总长约 45 m, 最大走行速度 120 km/h, 打磨作业速度 60~80 km/h, 一次作业(3 遍)材料去除厚度约 0.1 mm, 打磨后钢轨表面粗糙度约 2~8 μm ; 全车安装有 4 组打磨架, 同时有 96 个砂轮处于作业状态, 且以每分钟约 6 000 转速高速旋转; 每



图 14 典型的砂轮高速打磨装备

组打磨架在径向方向又包含 4 组布置型式完全相同的联排砂轮(全车实际上安装有 384 个砂轮),这使得打磨车可以在高速作业过程中实现 3 次砂轮自动更换,连续打磨作业里程可高达 70 km。

2.5 砂带打磨技术

砂带打磨技术是利用砂带这一涂附磨具代替常见砂轮对钢轨进行打磨维护,基本原理如图 15 所示。接触轮由刚性轮毂和弹性橡胶层组成,砂带被接触轮带动以速度 v_b 旋转,并随打磨装备以速度 f 沿钢轨纵向前进,此时在打磨压力 F_n 的作用下,砂带表面随机分布的大量形态各异磨粒压入钢轨表面并与其形成相对切削运动,从而实现材料去除。类似于砂轮周面打磨技术,砂带打磨技术既可以采用外圆周面平型接触轮实现对钢轨廓型的包络式打磨,又可以采用外圆周面内凹型接触轮,通过整体仿形或者分段仿形方法实现钢轨廓型打磨,结果同样可以获得比较光滑的钢轨表面,如图 16 所示。

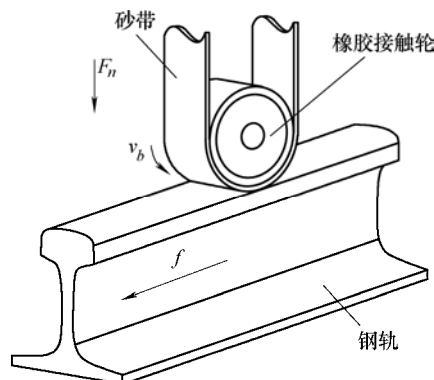


图 15 砂带打磨技术原理



图 16 砂带打磨后的钢轨表面形态

随着现代砂带制造技术的快速发展和磨削性能的不断提升,砂带早已超越了其发明之初只用于抛光的局限性,凭借独有的磨粒植砂方式、弹性和柔性特征等因素,其在打磨效率、打磨质量、经济、环保、安全等方面均体现出了一定优势,并正逐渐得到应用推广,如瑞士 AUTECH 公铁两用钢轨砂带打磨车等,而用于高速铁路维护的钢轨砂带打磨列车尚未出现。目前,国内外对砂带打磨机理、工艺和装备等研究总体上还比较缺乏,国内仅有北京交通大学科研团队在该领域进行了较为深入的探索性

研究。王荣全^[41]基于打磨过程中砂带表面磨粒与钢轨之间的作用机理和砂带表面形貌特征等,建立了钢轨打磨量理论预测模型,掌握了打磨工艺参数和砂带表面特征参量对打磨量和打磨效率的影响规律。HE 等^[42]基于传统赫兹接触理论,建立了钢轨砂带打磨接触区域和接触应力分布计算模型,并结合试验研究了接触力变量对打磨效率、磨削比、钢轨表面粗糙度、表面硬度以及磨屑形态、成分等的影响机制。王文玺等^[43-44]提出了一种包含功率谱密度分析、自相关函数分析和磨粒特征统计学分析的评价方法,实现了对砂带表面磨粒三维形貌特征的量化评价,并基于钢轨与砂带之间的赫兹接触理论,由单颗磨粒受力分析计算获得了整个接触区域的切向力,进而建立了钢轨砂带打磨功率的预测模型。王立峰^[45]针对高铁钢轨廓型修复与波磨消除等工程需求,设计建立了闭式砂带打磨小车的数字化模型,并利用 SIMPACK 软件建立了打磨小车的动力学模型,分析了打磨小车在自行走和打磨作业状态下的动力学性能。樊文刚等^[46-47]建立了面向内凹型面接触轮的钢轨砂带打磨静态接触理论模型,计算得到了接触区域边界曲线函数和应力分布函数,获得了打磨压力、接触轮直径等参量对接触区域形态和应力分布的影响规律,同时分析了波浪型面钢轨与内凹型接触轮的时变动态接触特性。

3 展望与建议

3.1 高速铁路钢轨打磨装备总体上呈现智能化、高效化、多样化和绿色化发展趋势

随着高速铁路运营里程的不断增加、“天窗”时间的不断减少,以及由“修复性打磨”转向“预防性打磨”引发打磨次数的不断增多等,在保证打磨作业质量的前提下,如何提升钢轨打磨作业智能化(涉及高精度在线检测、打磨模式自动生成、刀具磨具服役状态监测与工艺智能调度规划等)、提高钢轨打磨作业效率以应对激增的打磨任务已成为高速铁路线路维护亟需解决的关键问题。同时,不同钢轨打磨策略、不同打磨技术原理和不同线路区域(如道岔)等客观因素将推动打磨装备的持续多样化,以适应未来钢轨打磨的复杂、个性化工程需求。此外,集尘降噪、节能环保等也日益成为钢轨打磨装备不可忽视的组成部分。

3.2 高速铁路钢轨打磨技术将随着先进加工技术的应用而发展进步

钢轨打磨是通过行驶在钢轨上的打磨装备驱使刀具或磨具去除钢轨表面金属材料的过程。本文系

统分类的砂轮端面打磨技术、砂轮周面打磨技术、铣磨复合打磨技术、砂轮高速打磨技术和砂带打磨技术, 其本质上均隶属十分传统的金属切削磨削加工范畴。目前, 以人工智能、特种加工、工业机器人、增材制造等为代表的先进制造技术已经在航空航天、汽车、轮船、能源等诸多行业得到了广泛应用, 若将相关技术应用于钢轨打磨领域, 预期可有力推动高速铁路钢轨打磨技术的显著发展, 甚至可能会产生具有变革性的新型钢轨打磨技术与装备, 例如可探讨利用激光特种加工代替传统切削磨削工艺来消除钢轨表面损伤和缺陷的可能性。

3.3 研发适用于高速铁路的我国自主化高端钢轨打磨装备迫在眉睫

我国高速铁路在经过“原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新”的战略方针指导下, 已经取得了举世瞩目的发展成就, 部分关键技术和系统集成技术更是已经达到世界领先水平。然而, 与之形成鲜明对比的是, 我国高速铁路钢轨打磨装备水平却十分落后, 其原始技术几乎全部从国外引进, 不仅耗资巨大, 而且关键部件和系统核心仍然掌握在外国制造商手中。为此, 必须立足国情, 针对我国高速铁路线路密度、客货混运、地形气候等特殊性质, 集中产学研用等行业优质资源, 完善协同创新体系, 在已有基础上开展持久、全面、深入的理论研究和攻关工作, 以打破国外技术封锁, 全面提升我国高速铁路钢轨打磨养护能力。

参 考 文 献

- [1] 铁路“十三五”发展规划. 国家发展改革委、交通运输部、国家铁路局、中国铁路总公司, 2017 年 11 月 20 日. National Development and Reform Commission, Ministry of Transport, State Railway Administration, China Railways Corporation, The 13th five-year plan for railways [R]. 2017-11-20.
- [2] CANNON D F, EDEL K O, GRASSIE S L, et al. Rail defects: An overview[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010, 26(10): 865-886.
- [3] GRASSIE S L. Rail corrugation: Characteristics, cause, and treatments[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit*, 2009, 223: 1-16.
- [4] 金学松, 杜星, 郭俊, 等. 钢轨打磨技术研究进展[J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(1): 1-11.
JIN Xuesong, DU Xing, GUO Jun, et al. State of arts of research on rail grinding[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(1): 1-11.
- [5] ZAREMBSKI M, PATEL P. Estimating maintenance costs for mixed higher speed passenger and freight rail corridors[C/CD]//*Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference*, Urbana, Illinois, USA, Rail Transportation Division, 2010.
- [6] SCHOECH W, HEYDER R, GROHMANN D. Contact geometry and surface maintenance[C/CD]//7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System, Brisbane, Australia, 2006.
- [7] 智少丹. 钢轨打磨车磨削过程建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHI Shaodan. Modelling research on the grinding process of rail grinding vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] ERIC E M, JOSEPH K. The application of contact mechanics to rail profile design and rail grinding[J]. *Wear*, 2002, 253(1): 308-316.
- [9] ZHI S D, ZAREMBSKI A M, LI J Y. Towards a better understanding of the rail grinding mechanism[C/CD]//*Proceedings of the ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, Altoona, Pennsylvania, USA, 2013.
- [10] 周清跃, 田常海, 张银花, 等. 高速铁路钢轨打磨关键技术研究[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(2): 66-70.
ZHOU Qingyue, TIAN Changhai, ZHANG Yinhua, et al. Research on key rail grinding technology of high-speed railway[J]. *China Railway Science*, 2012, 33(2): 66-70.
- [11] 刘月明, 李建勇, 蔡永林, 等. 钢轨打磨技术现状和发展趋势[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(4): 29-37.
LIU Yueming, LI Jianyong, CAI Yonglin, et al. Current state and development trend of rail grinding technology[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(4): 29-37.
- [12] 周清跃, 刘丰收, 俞喆, 等. 我国铁路钢轨型面优化研究[J]. *中国铁路*, 2017, 12: 7-12.
ZHOU Qingyue, LIU Fengshou, YU Zhe, et al. Study on the optimization of rail profile in china[J]. *China Railway*, 2017, 12: 7-12.
- [13] 周清跃, 张银花, 田常海, 等. 60N 钢轨的廓型设计及试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(2): 128-135.
ZHOU Qingyue, ZHANG Yinhua, TIAN Changhai, et al. Profile design and test study of 60N rail[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(2): 128-135.
- [14] ZAREMBSKI A M, PALESE J W. Does rail grinding reduce rail defects[J]. *Railway Track & Structures*, 2011, 107(2): 32-35.
- [15] 肖杰灵. 客货混跑铁路钢轨非对称打磨的理论与试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
XIAO Jieling. The theory and test research on rail asymmetric grinding for the passenger and freight railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,

- 2005.
- [16] ZAREMBSKI A M. The art and science of rail grinding[M]. Simmons-Boardman Books, Inc., Omaha, Neb., 2005.
- [17] ZAREMBSKI A M. Grinding as part of rail management strategy[J]. Railway Track & Structures, 2008, 104(6): 55-58.
- [18] ZAREMBSKI A M. High-speed rail grinding and metal removal[J]. Railway Track & Structures, 2012, 108(6): 44-46.
- [19] YUKIO S, KENGO I. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan[J]. Wear, 2008, 265(9): 1342-1348.
- [20] 聂蒙. 基于变参数气动结构的钢轨打磨恒功率控制技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- NIE Meng. Research on constant-power control technology for rail grinding based on variable parameter pneumatic structure[J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [21] ZHI S D, LI J Y, ZAREMBSKI A M. Predictive modeling of the rail grinding process using a distributed cutting grain approach[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit, 2016, 230(6): 1540-1560.
- [22] ZHI S D, LI J Y, ZAREMBSKI A M. Grinding motor energy saving method based on material removal model in rail grinding processes[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, 2(1): 21-30.
- [23] REAL J I, ZAMORANO C, VELARTE J L, et al. Development of a vehicle-track interaction model to predict the vibratory benefits of rail grinding in the time domain[J]. Journal of Modern Transportation, 2015, 23(3): 189-201.
- [24] HARTSOUGH C M, PALESE J W, SCHMITZER G, et al. Optimized rail grinding through dynamic positioning and powering of grinding motors[C/CD]// Proceedings of the ASME Joint Rail Conference, Columbia, SC, USA, 2016.
- [25] ZHANG Z Y, SHANG W, DING H H, et al. Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 855-864.
- [26] GU K K, LIN Q, WANG W J, et al. Analysis on the effects of rotational speed of grinding stone on removal behavior of rail material[J]. Wear, 2015, 342-343(3): 52-59.
- [27] STEENBERGEN M. Rolling contact fatigue in relation to rail grinding[J]. Wear, 2016, 356-357: 110-121.
- [28] SANTA J F, TORO A, LEWIS R. Correlations between rail wear rates and operating conditions in a commercial railroad[J]. Tribology International, 2016, 95: 5-12.
- [29] RASMUSSEN C J, FAESTER S, DHAR S, et al. Surface crack formation on rails at grinding induced martensite white etching layers[J]. Wear, 2017, 384-385(9): 8-14.
- [30] SINGLETON R, MARSHALL M B, LEWIS R, et al. Rail grinding for the 21st Century-Taking a lead from the aerospace industry[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit, 2015, 229(5): 457-465.
- [31] UHLMANN E, LYPOVKA P, HOCHSCHILD L, et al. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness[J]. Wear, 2016, 366-367: 287-293.
- [32] 余念东, 张蒙. SF03-FFS 型钢轨铣磨车的应用[J]. 铁路技术创新, 2013(1): 37-38.
- YU Niandong, ZHANG Meng. The application of SF03-FFS rail milling train[J]. Railway Technology Innovation, 2013(1): 37-38.
- [33] 刘真兵. 钢轨铣磨车磨削装置设计及磨削力控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LIU Zhenbing. The design of rail milling train grinding equipment and the research of the grinding force control[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [34] 胡军科, 蒋亚军, 方健康, 等. 钢轨铣磨车磨削力的广义预测控制[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 84-90.
- HU Junke, JIANG Yajun, FANG Jiankang, et al. Generalized predictive control of the grinding force of rail milling train[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 84-90.
- [35] 刘江南, 杨小娟, 张文博, 等. 融合功能倒推与裁剪法的系统创新设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23): 69-76.
- LIU Jiangnan, YANG Xiaojuan, ZHANG Wenbo, et al. Systematic innovative design by integrating function backtracking with trimming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 69-76.
- [36] 占国栋. 钢轨铣磨车铣刀盘设计与优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- ZHAN Guodong. Design and optimization research of the milling cutter for rail milling train[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [37] 潘超. 钢轨铣磨车非对称成型铣削方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1526-1530.
- PAN Chao. Method of asymmetric profile forming milling for rail milling train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1526-1530.
- [38] 史智勇. 某型钢轨铣磨车动力学性能及振动传递特性

- 研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- SHI Zhiyong. Analysis on dynamics performance and vibration transmission characteristic of a rail milling train[J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [39] 许孝堂, 王衡禹, 吴磊, 等. 水介质对钢轨高速被动式打磨影响的试验研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(11): 41-44.
- XU Xiaotang, WANG Hengyu, WU Lei, et al. An experimental study on high-speed rail grinding under wet condition[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(11): 41-44.
- [40] 许孝堂. 钢轨高速打磨机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- XU Xiaotang. Study on the mechanism of rail high speed grinding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [41] 王荣全. 面向钢轨打磨的砂带磨削过程建模与实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- WANG Rongquan. The modeling and experimental research of belt-grinding process in rail grinding[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [42] HE Z, LI J Y, LIU Y M, et al. Investigating the effects of contact pressure on rail material abrasive belt grinding performance[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(1-4): 779-786.
- [43] WANG W X, LI J Y, FAN W G, et al. Characteristic quantitative evaluation and stochastic modeling of surface topography for zirconia alumina abrasive belt[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 3059-3069.
- [44] 王文玺, 李建勇, 樊文刚, 等. 基于赫兹接触的钢轨砂带打磨功率预测模型[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 25-30.
- WANG Wenxi, LI Jianyong, FAN Wengang, et al. Grinding power prediction model for abrasive belt rail grinding based on Hertzian contact[J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 25-30.
- [45] 王立峰. 基于虚拟样机的高铁钢轨闭式砂带打磨小车设计与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- WANG Lifeng. Design and optimization of high speed rail closed belt grinding vehicle based on virtual prototype[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [46] 樊文刚, 程继发, 吴月峰, 等. 基于内凹型接触轮的钢轨砂带打磨静态接触行为与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 152-158.
- FAN Wengang, CHENG Jifa, WU Yuefeng, et al. Research on static contact behavior and simulation for rail grinding by abrasive belt based on concave type contact wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 152-158.
- [47] 樊文刚, 程继发, 吕洪宾, 等. 波浪型面钢轨砂带打磨时变接触行为与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 87-92.
- FAN Wengang, CHENG Jifa, LÜ Hongbin, et al. Research on time-varying contact behavior and simulation for waved rail surface grinding by abrasive belt[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 87-92.
-
- 作者简介: 樊文刚(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为钢轨打磨养护技术与装备、多轴数控加工技术等。
E-mail: wgf@bjtu.edu.cn
李建勇, 男, 1962 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为钢轨打磨养护技术与装备、机电一体化等。
E-mail: jyli@bjtu.edu.cn