

P60N 型钢轨的地铁服役效果试验研究

向世雄¹ 梁进学¹ 薛晨红¹ 周剑华² 郑建国²

(1. 武汉地铁运营有限公司, 430030, 武汉; 2. 宝钢股份中央研究院(青山), 430080, 武汉 // 第一作者, 工程师)

摘要 针对武汉地铁钢轨伤损现状,开展了在地铁运行环境下 P60N 型钢轨对轮轨接触关系及轨面状态改善的实践研究。跟踪观测了武汉地铁 2 号线小半径曲线 P60N 型钢轨和 3 号线仿形打磨成的 P60N 型钢轨服役周期内的状态。数据表明:相较于 P60 型钢轨,P60N 型钢轨的轮轨接触面光洁、无剥离掉块伤损、光带分布合理、磨损速率较小,达到了预期的效果。建议新建地铁线路或大修换轨施工中推广采用 P60N 型钢轨,以延长钢轨的服役年限、降低维护成本。

关键词 P60N 型钢轨; 轮轨关系; 接触疲劳; 钢轨磨耗

中图分类号 U213.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.026

Experimental Study on P60N Model Rail Performance in Metro

XIANG Shixiong, LIANG Jinxue, XUE Chenhong, ZHOU Jianhua, ZHENG Jianguo

Abstract In view of the rail damage situation in Wuhan Metro, a practice study is carried out on the improvement of P60N model rail for wheel-rail contact relationship and rail surface state while in service. The states of Wuhan Metro Line 2 small-radius curve P60N rails and Line 3 profile-grinded P60N rails in service are tracked and observed. Results show that compared to P60 rail, the P60N rail has smooth wheel-rail contact surface, no spalling defects, reasonable light bands distribution and smaller wear rate, achieving the expected performance. It is suggested that P60N rail should be widely adopted in newly built metro lines or in overhaul and replacement construction, in order to prolong the rail service lifespan and reduce the maintenance cost.

Key words P60N model rail; wheel-rail relation; contact fatigue; rail wear

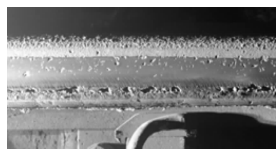
First-author's address Wuhan Metro Operation Co., Ltd., 430030, Wuhan, China

1 背景与现状分析

武汉地铁 2 号线(以下简称“2 号线”)一期工

程,于 2012 年 12 月 28 日开通试运营。其正线全长为 27.73 km,最大坡度为 35‰,采用的是 P60 型钢轨;车辆类型为 B 型车,车轮踏面采用的是 LM 磨耗型踏面。

2 号线开通试运营初期,正线钢轨服役状态正常,而 9 个月 after 在广埠屯站—虎泉站、常青花园站—长港路站等区间的钢轨陆续出现了轨面点状、带状剥离掉块及轨距角条状拉痕等伤损。伤损出现的区域包括直线、曲线,无明显发展规律。钢轨典型伤损形貌见图 1。



a) 带状剥离掉块



b) 鱼鳞状掉块

图 1 2 号线 P60 型钢轨典型伤损形貌

Fig. 1 Topography of typical damages of Line 2 P60 rails

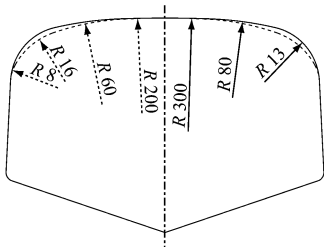
对上述伤损钢轨进行取样检验。由检验结果可知:钢轨的化学成分、拉伸性能、金相组织等各项性能指标均满足铁道行业标准(TB/T 2344.1—2020)的要求。经分析认为:钢轨出现剥离掉块为滚动接触疲劳伤损^[1],与轮轨接触状态关系密切。

针对我国铁路 P60 型钢轨与多种型面车轮混用,以及钢轨轨面接触疲劳伤损的现状,为改善轮轨接触关系,文献[2]从 P60N 型钢轨的廓形设计原理,与 LM 磨耗型踏面车轮接触时的接触应力和等效维度仿真计算,以及在客货混运铁路和高速铁路上的试用试验等方面,开展了研究工作。研究表明,P60N 型钢轨因轮轨接触点更靠近轨顶踏面中心,可明显改善轮轨接触关系,减少了接触应力,从而减缓钢轨接触疲劳伤损的产生和发展。

本文开展了在地铁服役环境下 P60N 型钢轨对轮轨接触关系改善方面的实践研究。

2 P60N 型钢轨试用及效果

P60N 型钢轨与 P60 型钢轨相比较,只对距轨头踏面 14.2 mm 以内的轨头圆弧半径进行了优化,即从 P60 型钢轨的三段圆弧($R\ 13\ \text{mm}$ 、 $R\ 80\ \text{mm}$ 和 $R\ 300\ \text{mm}$)调整为四段圆弧($R\ 8\ \text{mm}$ 、 $R\ 16\ \text{mm}$ 、 $R\ 60\ \text{mm}$ 和 $R\ 200\ \text{mm}$)。两者在距轨头踏面 14.2 mm 以下的尺寸完全相同。两种型号钢轨轨头廓形见图 2。在材质、化学成分以及制造工艺等方面均未作调整。



尺寸单位:mm

注:虚线为 P60N 型钢轨,实线为 P60 型钢轨。

图 2 两种型号钢轨轨头廓形对比

Fig. 2 Comparison of railhead profiles of two rail models

为对比两种型号的钢轨廓形服役效果,选取了轨面剥离掉块较严重的 2 号线小龟山站—洪山广场站下行 JD 34 小半径曲线上股作为试验段。开展了 P60N 型钢轨的试用试验,以考察对钢轨滚动接触疲劳的改善效果。

2.1 试验段基本情况

该区段曲线半径为 350 m,曲线长度为 264 m,坡度为 -18.5‰ ,线路既有钢轨为热轧 U75V 的 P60 型钢轨。2015 年 10 月 25 日—29 日,将曲线上股 200 m 既有钢轨更换为 P60N 型钢轨,并保持原线路轨底坡不变^[3]。

既有钢轨下道时服役近 3 年,钢轨轨距角剥离掉块伤损严重,如图 3 所示。钢轨最大垂磨量为 1.15 mm,最大侧磨量为 5.52 mm,如图 4 所示。



图 3 既有 P60 型钢轨下道时的轨面状态

Fig. 3 Surface state of the existing P60 rail upon replacement

试验段 P60N 型钢轨上道后,分别在圆曲线和缓和曲线设置了跟踪观测点,从 2015 年 11 月至

2021 年 10 月定期对轮轨接触面状态、钢轨硬度以及磨损情况开展观测。铺设至今,除进行电动客车轮缘润滑外,未采取打磨、铣磨等其他轨面治理措施。

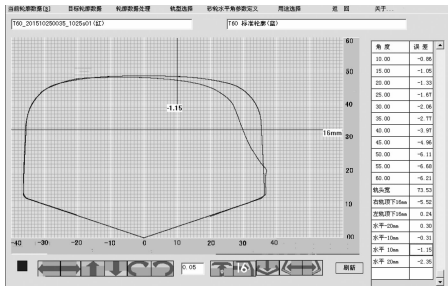


图 4 既有 P60 型钢轨下道时的廓形

Fig. 4 Profile of the existing P60 rail upon replacement

2.2 P60N 型钢轨轨面状态

P60N 型钢轨服役 6 年,除有 25 m 的钢轨轮轨接触面存在轻微无刺手感鱼鳞纹外,其他轮轨接触面均光洁、无剥离掉块。圆曲线与缓和曲线光带均靠近钢轨内侧,光带宽度约为 40 mm,见图 5。对比该区段使用 3 年的 P60 型钢轨,虽然 P60N 型服役年限是 P60 型钢轨的 2 倍,但其轨面状态明显优于 P60。

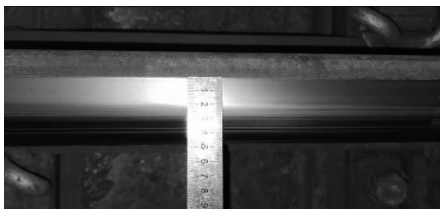


图 5 P60N 型钢轨服役 6 年后的轨面状态

Fig. 5 Surface state of P60N rail after 6 years of service

2.3 P60N 型钢轨轨面加工硬化率变化规律

P60N 型钢轨在地铁服役过程中,在轮轨接触应力的作用下,表层金属会发生塑性变形;随着塑性变形的不断累积,表层金属会发生加工硬化,当加工硬化达到一定程度后,表层金属容易产生微裂纹^[4]。同时,由于轮轨之间的接触摩擦,钢轨表层金属不断被磨耗,当钢轨的磨耗速率大于钢轨的加工硬化速率,其表面硬度会降低,反之硬度会增加。

采用便携式硬度计对跟踪点钢轨的踏面和轨距角硬度进行定期测量,每个跟踪点测 5 个有效值并取平均值。对比 P60N 型钢轨服役 6 年的轨面硬度值,圆曲线测点踏面、轨距角硬度分别从 291 HB 和 323 HB 增至 320 HB 和 363 HB,硬化率分别为 10.0% 和 12.4% (圆曲线 P60N 型钢轨加工硬化率

变化规律见图 6);缓和曲线测点踏面、轨距角硬度分别从 306HB 和 331HB 增加至 315HB 和 369HB,硬化率分别为 2.9% 和 11.5% (缓和曲线 P60N 型钢轨加工硬化率变化规律见图 7)。

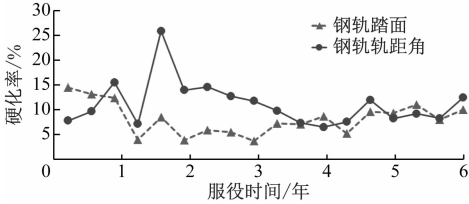


图 6 圆曲线 P60N 型钢轨加工硬化率变化规律
Fig.6 Variation pattern of the work hardening rate of P60N rail on circular curve

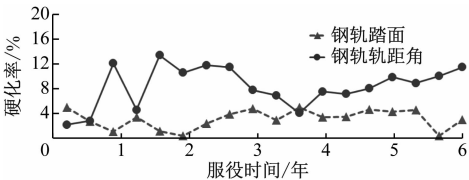


图 7 缓和曲线 P60N 型钢轨加工硬化率变化规律
Fig.7 Variation pattern of the work hardening rate of P60N rail on transition curve

从图 6 和图 7 可以看出,圆曲线与缓和曲线钢轨的加工硬化率变化规律基本相同。因为圆曲线与缓和曲线段轮轨接触均靠近钢轨内侧,钢轨踏面的加工硬化轻微,轨距角的加工硬化相对严重。在钢轨服役 9 至 11 个月时,轨距角的硬化率达到最大值,之后不断降低;使用 2 年时,钢轨轨顶面硬化率基本趋于稳定,说明轮轨接触状态良好,钢轨磨损和硬化达到平衡状态,钢轨不容易出现鱼鳞纹等疲劳伤损。

2.4 P60N 型钢轨磨耗变化规律

采用 RM2012W 钢轨磨耗测量仪对 P60N 型钢轨上道至服役 6 个月的磨耗进行测量,侧磨发展速度相对较快直至侧磨达 1.4 mm,后期逐步趋缓。服役 6 年后圆曲线最大侧磨为 3.58 mm,缓和曲线最大侧磨为 1.85 mm,圆曲线钢轨侧磨发展略快于缓和曲线,如图 8 所示。试验段最大垂磨为 1.8 mm,位于缓和曲线,略大于圆曲线的 1.3 mm。服役 6 年后圆曲线 P60N 型钢轨廓形见图 9。

对比该区段使用 3 年下道的 P60 型钢轨,虽然 P60N 型服役年限是 P60 型钢轨的 2 倍,但其侧磨量仅为 P60 型钢轨的 64.86%。说明 P60N 型钢轨可显著改善小半径曲线地段轮轨接触状态,减少接触应力,减缓钢轨磨耗发展。

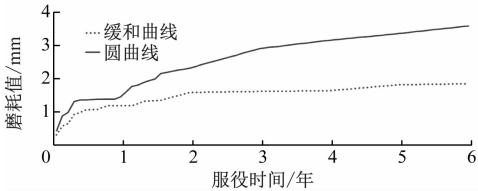


图 8 P60N 型钢轨侧磨变化规律
Fig.8 Variation pattern of P60N rail side wear

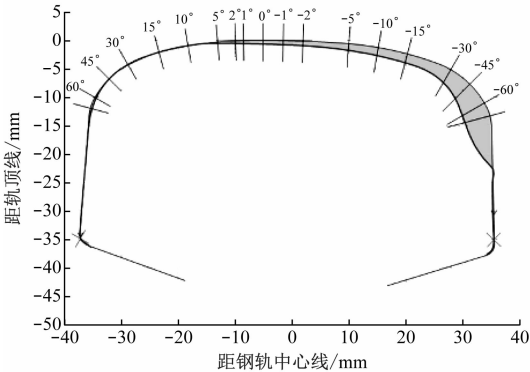


图 9 服役 6 年后圆曲线 P60N 型钢轨廓形
Fig.9 Profile of P60N rail on circular curve after 6 years of service

2.5 钢轨波磨情况

由于试验段只更换了曲线上股钢轨,而下股既有钢轨已存在一定程度波磨,这加快了试验段 P60N 型钢轨轻微波磨的形成。采用 RMF1100 波磨测量小车进行检测,试验段钢轨波磨超限占比分布如图 10 所示。P60N 型钢轨波磨的波长 λ 为 $30\text{ mm} \leq \lambda < 100\text{ mm}$ 时超限(限值为 0.01 mm)占比为 10.1% ;波长为 $100\text{ mm} \leq \lambda < 300\text{ mm}$ 时超限(限值为 0.015 mm)占比为 20.4% ; $10\text{ mm} \leq \lambda < 30\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \leq \lambda < 1\,000\text{ mm}$ 时超限占比分别为 1.7% 和 0.8% 。总体来说,试验段钢轨上道 6 年存在一定波磨,但其发展速率较慢,服役效果理想。

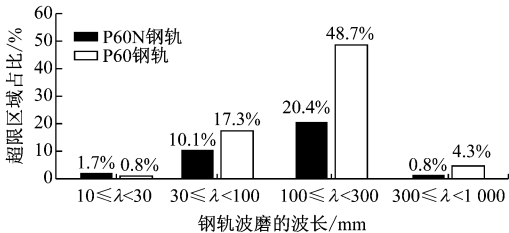


图 10 试验段钢轨波磨超限占比分布
Fig.10 Ratio distribution of rail corrugation exceeding the limit in test section

3 P60 型钢轨仿形打磨成 P60N 型前后服役效果对比

武汉地铁 3 号线(以下简称“3 号线”)范湖站—菱角湖站小半径曲线段(曲线半径为 350 m,曲线长为 197 m)列车运行轮轨噪声大,啸叫及晃车现象明显。经测量,该区段行车速度为 38 km/h,司乘室噪声值为 85 dB,钢轨最大侧磨量为 0.6 mm,曲下股光带宽为 25 ~ 45 mm,曲上股光带宽为 27 ~ 48 mm,光带分布不均匀,且曲上股鱼鳞纹较严重;缓圆点处下股光带宽为 40 mm,偏向工作边一侧,上股光带宽为 29 mm。

鉴于 2 号线 P60N 型钢轨试验段良好服役效果,同时参考由第三方开发的钢轨廓形打磨策略软件的指导意见,于 2021 年 5 月将该曲线上股既有 P60 型钢轨仿形打磨成 P60N 型,下股保持 P60 廓形不变^[5]。经过一年的服役观察,司乘室噪声为 73 dB,较打磨前降低了 12 dB;钢轨最大侧磨量为 0.8 mm,曲下股光带宽为 25 ~ 34 mm,上股光带宽为 29 ~ 36 mm,光带光亮且分布均匀,轨面无明显鱼鳞纹,轨面状态良好。缓圆点处下股光带宽为 26 mm 且相对居中,上股光带宽为 33 mm。钢轨轨面波磨主要分布于波长 100 ~ 300 mm,超限占比为 1.7%,波磨发展速率慢。

采用 miniprof 钢轨廓形测量仪测量分析打磨前和打磨仿形为 P60N 型钢轨服役 1 年后的轮轨接触

关系,如图 11、图 12。相比较,P60N 型钢轨轮轨关系更理想,轮轨接触面增大,减少了轨距角处轮轨接触和剥离掉块等病害。



图 11 打磨前轮轨接触关系示意图
Fig. 11 Diagram of wheel-rail contact relationship before grinding



图 12 打磨使用 1 年后轮轨接触关系示意图
Fig. 12 Diagram of wheel-rail contact relationship after for 1 year of grinding and service

4 不同线路 P60 型钢轨与试验段 P60N 型钢轨服役效果对比

武汉地铁运营线网的正线除 2 号线试验段采用 P60N 型钢轨外,其他区域均采用 P60 型钢轨。经统计,在与 P60N 型试验段曲线半径($R=350\text{ m}$)相同,曲线长度、超高、轨底坡等指标相近的情况下,服役年限超过 5 年的 P60 型钢轨普遍存在较明显的鱼鳞纹、波磨等疲劳伤损及局部剥离掉块,曲上股最大侧磨普遍在 6 mm 以上。武汉地铁类似工况条件下钢轨服役效果对比统计见表 1。

表 1 武汉地铁类似工况条件下钢轨服役效果对比统计表($R=350\text{ m}$)

Tab. 1 Statistics of rail service effect comparison under similar working conditions in Wuhan Metro($R=350\text{ m}$)										
线路	区间	曲线长/m	曲线超高/mm	行车间隔/min	日均客流/(万乘次/d)	行车速度/(km/h)	钢轨类型	服役年限/年	钢轨侧磨/mm	轨面状态
2 号线	小龟山站—洪山广场站	264	110	3.2	98	60	P60N	6	3.6	轻微鱼鳞纹和波磨,轨面状态良好
2 号线	小龟山站—洪山广场站	260	110	3.2	98	60	P60	9	10.0	明显鱼鳞纹和剥落掉块
4 号线	武昌火车站—梅苑小区站	230	110	3.6	61	50	P60	8	8.0	明显鱼鳞纹和剥落掉块
3 号线	宗关站—王家湾站	248	116	4.5	42	48	P60	6	6.0	明显剥落掉块
6 号线	琴台站—武胜路站	300	120	5.8	37	55	P60	5	6.0	明显波磨,局部剥落掉块

相比较而言,2 号线是武汉轨道交通线网中最繁忙的骨干线路,其行车间隔最小,日均客流量最大(约为 100 万乘次/d),日均客运量是其他线路的 1.6 倍以上。但该线路铺设的 P60N 型钢轨无明显的滚动接触疲劳伤损,轨面状态优于 2 号线及其他线路类似工况条件下的 P60 型钢轨。此外,由于改

善了轮轨匹配关系,P60N 型钢轨磨耗速率降低,最大侧磨值仅有 P60 型钢轨的 36% ~ 60%。

5 结语

通过观测 2 号线小半径曲线段试铺的 P60N 型钢轨以及 3 号线既有 P60 仿形打磨成 P60N 型钢轨

的服役效果,可得出以下结论:

1) P60N 型钢轨服役 6 年后,轮轨接触面光洁,无剥离掉块,光带分布合理,同时磨耗发展速度较慢,最大侧磨量只有 3.58 mm。曲线段钢轨轨距角加工硬化率趋于稳定,硬化率为 11.5% ~ 12.4%,钢轨磨耗和加工硬化达到平衡状态,不易出现疲劳伤损,钢轨整体服役状态良好。

2) 将出现接触疲劳伤损的 P60 型钢轨仿形打磨成 P60N 型钢轨服役 1 年后,轨面无明显鱼鳞纹,轨面状态良好,达到预期效果。这说明通过打磨形成 P60N 型廓形,也能很好地改善轮轨匹配关系,其效果显著。武汉地铁 P60N 型钢轨试验段现铺设的数量相对较少,但试验结果与铁路上广泛应用 P60N 型钢轨所得到的结论一致:P60N 型钢轨可有效改善轮轨匹配关系,减少和减缓轨面疲劳的发生和发展。现计划在新建线路中进一步加大 P60N 型钢轨铺设范围,同时继续跟踪分析各工况条件下钢轨服役效果。

3) P60N 型钢轨服役效果与理论研究分析结论一致,效果理想。建议在新建线路或大修改造施工中优先选用 P60N 型钢轨,以延长钢轨服役年限,降低运维成本,同时降低打磨、铣磨和钢轨更换等大型施工所带来的安全风险。

参考文献

[1] 周剑华,任安超,吉玉,等. U71Mn 钢轨踏面剥离掉块缺陷分

析[J]. 中国铁道科学,2013(3):1.

ZHOU Jianhua, REN Anchao, JI Yu, et al. Analysis of the reasons for the spalling defects on U71Mn rail treads[J]. China Railway Science, 2013(3):1.

[2] 周清跃,张银花,田常海,等. 60N 钢轨的廓形设计及试验研究[J]. 中国铁道科学,2014(3):128.

ZHOU Qingyue, ZHANG Yinhua, TIAN Changhai, et al. Profile design and test study of 60N rail[J]. China Railway Science, 2014(3):128.

[3] 李霞,温泽峰,金学松. 钢轨轨底坡对 LM 和 LM_A 两种轮对接触行为的影响[J]. 机械工程学报,2008(3):67.

LI Xia, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Effect of rail cant on the rolling contact behavior of LM and LM_A wheelsets[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(3):67.

[4] 陈朝阳,张银花,刘丰收,等. 朔黄铁路曲线下股热处理钢轨剥离伤损成因分析[J]. 中国铁道科学,2008(7):28.

CHEN Zhaoyang, ZHANG Yinhua, LIU Fengshou, et al. Analysis on the formation cause of spalling and damage of the heat-treated low rail on Shouhuang Railway curve[J]. China Railway Science, 2008(7):28.

[5] 李金良. 周期性钢轨廓形打磨对小半径曲线寿命的影响[J]. 铁道建筑,2019(8):154.

LI Jinliang. Influence of periodic rail profile grinding on life of small radius curve[J]. Railway Engineering, 2019(8):154.

(收稿日期:2022-03-21)

(上接第 142 页)

ZOU Shuliang, HUANG Binhai, LI Shufan. Human cognitive reliability model of marine floating nuclear power plants[J]. China Safety Science Journal, 2020(1):1.

[3] 于海丹,方卫宁. 地铁行车调度员胜任力研究[J]. 城市轨道交通研究,2012(2):5.

YU Haidan, FANG Weining. On the competence of subway dispatchers[J]. Urban Mass Transit, 2012(2):5.

[4] 李志成,李岚,田亮. 地铁控制中心“优秀调度员”胜任力特征模型构建[J]. 安徽建筑大学学报,2017(3):87.

LI Zhicheng, LI Lan, TIAN Liang. Construction of competency model of 'outstanding dispatcher' in metro operating control center[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2017(3):87.

[5] 中华人民共和国交通运输部. 城市轨道交通行车调度员技能和素质要求 第一部分:地铁、轻轨和单轨:JT/T 1004.1—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Skills and competency requirements for train dispatcher of urban rail transit—

part 1: metro, light rail and monorail: JT/T 1004.1—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[6] 李林波,郭晓凡,傅佳楠,等. 基于云模型的城市轨道交通乘客满意度评价[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019(3):378.

LI Linbo, GUO Xiaofan, FU Jianan, et al. Evaluation approach of passenger satisfaction for urban rail transit based on cloud model[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019(3):378.

[7] 王石,宋学朋,石海天. 基于云模型和改进 CRITIC 的深井垂直充填管道磨损风险评估[J]. 重庆大学学报,2020(4):73.

WANG Shi, SONG Xuepeng, SHI Haitian. An improved CRITIC and cloud model evaluation method for predicting the wear risk of vertical filling pipes in deep well[J]. Journal of Chongqing University, 2020(4):73.

(收稿日期:2020-11-09)