

基于比磨削能的中低速钢轨打磨技术研究

刘 洁¹, 郑 涛²

(1. 株洲时代电子技术有限公司, 湖南 株洲 412007;
2. 中国铁路南宁局集团有限公司 柳州工务机械段, 广西 柳州 545007)

摘 要: 为了提高钢轨打磨效率, 依据现有机床加工磨削原理与高速切削比磨削能计算方法, 开展中低速钢轨打磨切削量精准控制技术应用研究。以标准 60N 钢轨轨头廓面打磨为例, 首先提取廓面几何特征并将其分为 4 个打磨区域, 根据钢轨预打磨廓面比磨削能与切削量的经验关系, 建立钢轨廓面各打磨区域切削量的经验计算模型, 并通过现场打磨测试验证该计算模型的可行性和精准性。结果表明, 经过 3 次打磨计算, 钢轨轨头廓面区域 2 的磨削面积总量最大为 7.28 mm^2 , 区域 3 的磨削面积总量最小为 1.18 mm^2 , 并且现场打磨测试的总切削量与理论计算的相对偏差分别为 -3.57% 和 -4.24% , 磨削总量结果基本吻合, 达到钢轨磨削精度要求。

关键词: 钢轨打磨; 比磨削能; 经验模型; 轨头轮廓; 磨削测试; 钢轨

中图分类号: U216.65 **文献标识码:** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**

文章编号: 1000-128X(2021)03-0032-05



Research on Rail Grinding Technology of Medium and Low Speed Based on Specific Grinding Energy

LIU Jie¹, ZHENG Tao²

(1. Zhuzhou Times Electronic Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China; 2. Liuzhou Engineering Machinery Section of China Railway Nanning Bureau Group Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545007, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of rail grinding, according to the existing machining and grinding principles of machine tools and the calculation method of high-speed cutting specific grinding energy, the application research of precision control technology for medium and low speed rail grinding was carried out. Taking the standard 60N rail profile grinding as an example, the geometric features of the profile surface were extracted and divided into four grinding areas. According to the empirical relationship between the rail pre-grinding profile surface ratio grinding energy and the amount of grinding, the empirical calculation model of the grinding amount of the rail profile surface is established, and the feasibility and accuracy of the calculation model were verified through on-site grinding tests. The results showed that after three grinding calculations, the maximum grinding amount of rail head profile area 2 was 7.28 mm^2 , and the minimum grinding amount of area 3 was 1.18 mm^2 , and the total cutting amount of the on-site grinding test was relative to the theoretical calculation. The deviations were -3.57% and -4.24% , respectively, and the total grinding results were consistent with the rail grinding accuracy requirements.

Keywords: rail grinding; specific grinding energy; empirical model; rail head profile; grinding test; rail

0 引言

采用钢轨打磨车打磨是一种高效的钢轨打磨维

护方法^[1-2]。钢轨打磨车通过打磨作业消除轨面的病害和损伤, 修复并改善钢轨轨头廓面。目前, 根据钢轨的养护需求和应用实践, 钢轨打磨作业类型主要分为

预打磨、修复性打磨和预防性打磨^[3-4]。随着我国铁路里程的快速增长和运输能力的不断提高, 铁路高速化和重载化的发展导致钢轨接触疲劳损伤越来越严重, 传统钢轨打磨车在实际运用过程中存在的技术缺陷逐渐凸显。因此, 急需开展钢轨打磨作业效率优化和定量打磨智能控制研究, 以提升我国铁路钢轨打磨的作业效率。钢轨打磨作业的工作原理是以金属切削为理论基础, 通过砂轮磨削清除轨头表面金属, 将砂轮作为切削刀具对钢轨进行切削加工的一种机械加工方法。与机床定量切削金属控制方式不同的是, 钢轨的切削方式是多个砂轮的切削组合, 技术难点在于如何在运动车辆上实现钢轨轨头切削量的定量控制。当前, 针对钢轨打磨的研究主要集中于钢轨打磨技术的发展与工艺探讨, 以及钢轨廓形打磨等方面^[5-7], 而对于钢轨轨头打磨量控制与精准轮廓磨削的相关研究较少。

本文基于机床加工磨削原理与高速切削比磨削能计算方法, 开展中低速钢轨切削量精准控制技术应用研究; 以标准 60N 钢轨轨头廓面打磨为例, 建立钢轨廓面各打磨区域切削量的经验计算模型, 并通过现场打磨测试验证该计算模型的可行性和精准性。

1 钢轨轨头预磨削廓面设计

1.1 钢轨廓面磨削原理

图 1 为 GMC-48JS 型钢轨打磨车砂轮在钢轨轨头廓面外侧进行打磨作业的各部件位置关系示意图, 依据钢轨打磨车打磨机构的运动特性, 沿打磨电机运动方向, 确定砂轮切面位置。

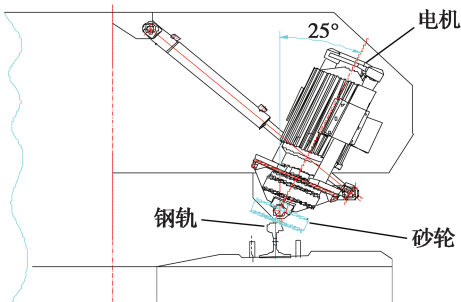


图 1 GMC-48JS 钢轨打磨车打磨机构示意图
Fig. 1 Grinding diagram of GMC-48JS rail grinding vehicle

钢轨打磨车在沿线路铺设的方向上分布多个打磨砂轮, 通过控制电机的位置和偏角来调整砂轮的打磨位置, 砂轮在钢轨轨头廓面进行打磨的工作原理如图 2 所示。砂轮以不同的偏摆角度沿钢轨横向分布, 每个偏摆角度对应于一个钢轨轮廓型面的打磨角度, 砂轮电机以 3 600 r/min 的中低速旋转, 沿钢轨打磨车作业方向, 对钢轨轨头廓面进行磨削作业。

钢轨打磨车钢轨打磨原理为砂轮按一定规则组合排布, 其切面构成钢轨轮廓包络线, 并在钢轨表面沿

z 方向运动, 保持打磨下压力随切削阻力动态调整, 打磨切削量在 z 方向基本保持一致。铁路线路新铺设钢轨或钢轨表面磨损后, 需要对钢轨与列车轮轨接触面进行打磨, 钢轨打磨之前的廓形与目标廓形之间的关系如图 3 所示, 在图 3 中蓝色曲线为需进行打磨的钢轨轨头廓形, 红色曲线为预打磨成型的目标轨头廓形^[8]。

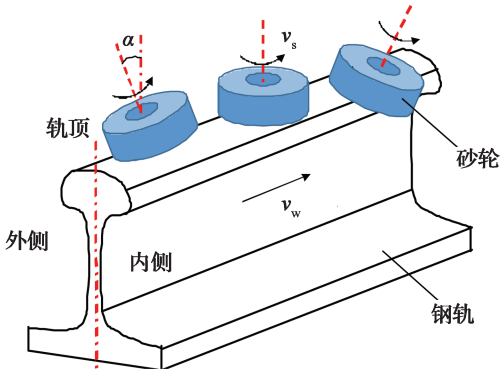


图 2 砂轮打磨钢轨示意图
Fig. 2 Diagram of grinding wheels grinding rail

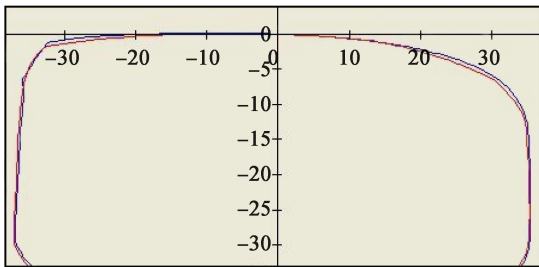


图 3 磨耗钢轨轨头实测廓形与目标廓形
Fig. 3 Measured profile and target profile of rail cross-section

1.2 廓形特征提取

钢轨轮廓为多弧面组成, 文献 [9] 研究的新轨轮廓为标准 60N 钢轨轨头轮廓, 尺寸示意图如图 4 所示。标准 60N 钢轨是在 60 kg/m 钢轨基础上进行优化设计的新型钢轨轮廓, 在钢轨轨顶圆弧宽度和高度保持不

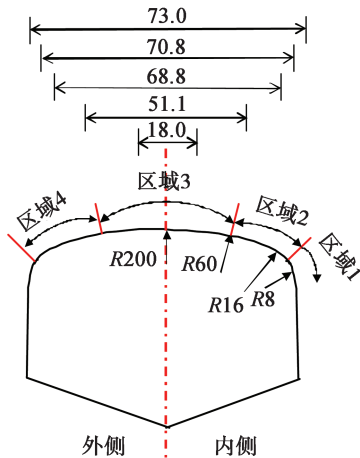


图 4 标准 60N 钢轨轨头轮廓示意
Fig. 4 Diagram of the 60N rail cross-section

变的情况下,将钢轨轨顶圆弧由 5 段增加为 7 段,与欧洲 60E2 钢轨一致,并且标准 60N 钢轨轮廓的轨顶圆弧半径在原 60 kg/m 钢轨的基础上进行了适当的调整。根据 60N 钢轨轮廓打磨实践数据,将轨头廓形划分为 4 个区域,轨头内侧弧半径 $R \leq 13 \text{ mm}$ 区域为区域 1,轨头内侧 $13 \text{ mm} < R \leq 60 \text{ mm}$ 区域为区域 2,轨顶 $60 \text{ mm} < R \leq 200 \text{ mm}$ 区域为区域 3,轨头外侧 $13 \text{ mm} < R \leq 60 \text{ mm}$ 区域为区域 4。

由于测量数据较多,如采用逐点逼近算法计算廓形特征会消耗大量计算资源,因此采用文献 [9] 提出的特征提取算法进行计算,该方法可以快速识别打磨之前廓形与目标廓形之间的几何差异,图 5 为廓形特征提取流程。

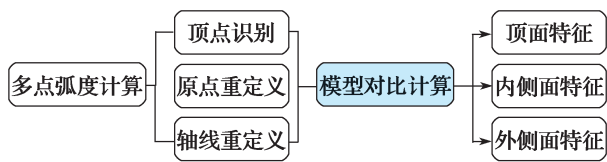


图 5 廓形特征提取计算

Fig. 5 Profile feature extraction and calculation

通过廓形特征提取与断面计算算法,确定切削量,被磨削的弧长计算公式为

$$b_k = \sum_{i=0}^n (R_k \cdot \alpha_k) \quad (1)$$

式中: b_k 为打磨弧长; R_k 为钢轨轨头半径; α_k 为钢轨轨头 k 点弧度; k 为特征点。

2 钢轨切削量与比磨削能经验模型建立

2.1 比磨削能计算模型

磨除工件上单位体积的金属所消耗的能量叫比磨削能,是反映磨削加工效率的重要指标之一^[10-12]。以磨削加工为例,可得比磨削能的表达式为

$$u = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_t \cdot v_s}{v_w \cdot a_p \cdot b} \quad (2)$$

式中: u 为切削加工中的比磨削能; P 为磨削功率; Q_w 为磨削掉的工件材料体积率; F_t 为切向磨削力; v_s 为砂轮线速度; v_w 为砂轮相对工件的速度即打磨车作业前进速度; a_p 为磨削深度; b 为磨削宽度。

根据钢轨磨削的情况得出比磨削能的经验公式为^[13]:

$$u = K \left(\frac{P \cdot v_w}{v_s} \right)^{\frac{1}{4}} a^{\frac{7}{8}} b^{\frac{1}{8}} \quad (3)$$

式中: a 为磨削深度; K 为系数,与钢轨材质和砂轮颗粒有关。

2.2 钢轨目标切削量经验模型

根据式 (3) 中比磨削能公式,计算单个磨头偏转一

定角度后的打磨切削深度为

$$a_k = \left[\frac{u}{\frac{1}{b_k^8} \cdot K} \left(\frac{v_s}{P \cdot v_w} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{8}{7}} \quad (4)$$

式中: b_k 为打磨弧长; a_k 为钢轨轨头打磨弧长 b_k 区域的磨削深度。

钢轨打磨车上安装有多个砂轮,可对钢轨轨头廓面的不同位置同时进行打磨作业,因此多个磨头作业的效果可以看作是多个磨头打磨量的总和,磨削总面积为

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=0}^n (a_k \cdot b_k) \quad (5)$$

磨削面积与钢轨打磨车的前进速度的乘积则为钢轨打磨过程中的磨削总体积。由于钢轨打磨车的运动速度相对固定,并且每个砂轮随钢轨打磨车的前进速度一致,因此在考虑钢轨打磨量计算时可不考虑钢轨打磨车运行速度的影响,仅需分析钢轨打磨的磨削总面积。

在同种型号钢轨和同一列打磨车上,可以将 K 视为常数 K_0 ,结合式 (3)~式 (5),近似得出磨削总面积计算公式为

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=0}^n \frac{P^{3/8} \cdot v_s^{1/8}}{K_0^{1/2} \cdot v_w^{5/8}} \cdot \left(\frac{a_k}{b_k} \right)^{1/16} \quad (6)$$

2.3 钢轨打磨车打磨特征参数测试

根据钢轨打磨车应用需要和打磨效率最优原则,结合现场打磨作业方法与前期钢轨打磨切削量测算方法^[14],对 GMC-48JS 钢轨打磨车作业效率的 2 个主要特征参数——速度和打磨功率,进行切削量的测试,图 6 为轨顶打磨特征参数测试结果。

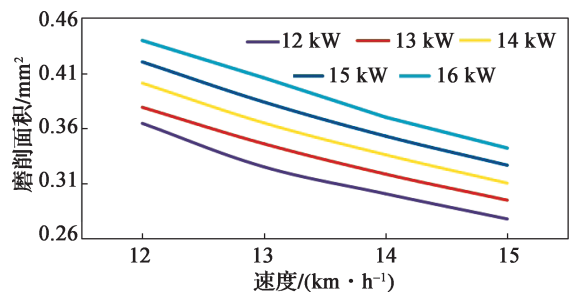


图 6 打磨特征参数测试结果

Fig. 6 Cutting quantity results of the grinding parameters

通过 4 个区域测试,可发现速度和打磨功率与切削面积呈线性关系,通过计算,可得到与切削量计算模型适配的修订参数。

2.4 打磨车控制参数切削量查表修订

参考该车型磨削试验报告和作业存储数据,以切削宽度、粗糙度和磨头偏转角度范围等因素修定切削量公式,形成参数修订表(见表 1)。

表 1 控制参数修订表
Table 1 Revision of control model parameters

弧半径/mm	切削宽度 b /mm	粗糙度/mm	角度范围/(°)	切削修订量/mm	公式编号
(0, 13]	(0, 2]	0.018	8.800	$a_k = [\frac{u}{0.86b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.04} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (7)
	(2, 3]	0.087	13.200	$a_k = [\frac{u}{0.57b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.1} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (8)
	(3, 4]	0.153	17.500	$a_k = [\frac{u}{0.4b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.27} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (9)
(13, 60]	(0, 3]	0.014	2.130	$a_k = [\frac{u}{1.2b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.85} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (10)
	(3, 4]	0.025	2.820	$a_k = [\frac{u}{1.03b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.45} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (11)
	(4, 5]	0.039	3.550	$a_k = [\frac{u}{0.98b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.33} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (12)
(60, 200]	(0, 5]	0.010	0.965	$a_k = [\frac{u}{2.61b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{2.87} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (13)
	(5, 6]	0.014	1.124	$a_k = [\frac{u}{2.38b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{2.47} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (14)
	(6, 7]	0.020	1.355	$a_k = [\frac{u}{2.12b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.98} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (15)
	(7, 8]	0.027	1.528	$a_k = [\frac{u}{1.76b_k^{\frac{1}{8}} \cdot K} (\frac{v_s}{P^{1.36} \cdot v_w})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{8}{7}}$	式 (16)

3 钢轨切削量理论计算与试验测试

3.1 切削量经验模型计算

对标准 60N 新型钢轨轨头预磨削廓形进行几何特征提取, 将钢轨轨头预打磨廓形分成 4 个区域, 在对预磨削区域进行理论计算时, 忽略砂轮材质、钢轨硬度、砂轮直径、打磨车运行速度、砂轮型号等次要因素, 根据式 (4)~ 式 (16) 建立的磨削深度与比磨削能的经验计算模型, 在设定每遍打磨功率提升的基础上对钢轨轨头廓面不同区域进行多次打磨, 并计算出单遍打磨总切削量, 表 2 为经验模型计算的各次打磨的切削量。

表 2 切削量计算结果
Table 2 Cutting quantity calculation results mm²

打磨面积	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
S_1 (打磨 1 遍)	0.71	0.40	0.27	0.65
S_2 (打磨 2 遍)	1.29	2.90	0.33	2.14
S_3 (打磨 3 遍)	2.06	3.98	0.58	3.59
总切削量 S	4.06	7.28	1.18	6.38

从表 2 可以看出, 经过 3 次打磨计算, 钢轨轨头廓面内侧 (区域 2) 的磨削面积总量最大, 为 7.28 mm², 轨顶 (区域 3) 的磨削面积总量最小, 为 1.18 mm²。由此可以看出, 预打磨钢轨在钢轨轨头内侧的区域 2 为主要打磨区域, 计算结果与实际打磨作业规律相吻合。由于钢轨轨头顶部位置的砂轮采用平磨, 轨顶需要打磨的深度较小, 因此其磨削总量相比磨削的其他区域要小。

3.2 钢轨廓形打磨切削量测试

对钢轨轨头部预打磨廓形进行经验模型计算, 可获得各区域位置处的切削量。为验证经验计算模型的可行性和准确性, 采用同济大学研制的型号为 RM2012 的轨廓测量仪对打磨钢轨轨廓进行测量。轨廓测量仪对钢轨打磨车每遍打磨的磨削面积进行测量, 测量结果如表 3 所示。在现场测试中打磨 2 遍后的效果已满足总切削量要求, 为避免钢轨过打磨, 未进行第 3 遍打磨测试。

从表 3 可以看出, 钢轨在第 1 遍打磨时, 轨顶与内侧打磨面积远小于计算值。结合文献 [14] 分析认为:

①波磨主要发生在轨顶，轨顶进行第 1 遍打磨时不能完全消除波磨，在第 2 遍打磨时切削量上升较多；②边缘肥边发生在内侧，采用 45° 角打磨，出现线状钢条剥离钢轨，第 1 遍打磨切削量和第 2 遍打磨切削量均能超过计算值；③钢轨外侧为非接触面，仅有轮轨接触导致的挤压变形，钢轨更易切削，打磨切削量也超出计算值。

表 3 现场打磨切削量测量结果
Table 3 Cutting quantity test results of field grinding mm²

打磨面积	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
S ₁ (打磨 1 遍)	0.52	0.90	0.13	1.04
S ₂ (打磨 2 遍)	1.29	6.10	0.99	4.33
总切削量 S	3.87	7.02	1.13	5.33

4 结 语

本文对 GMC-48JS 打磨车切削量控制改善做了部分研究，通过测量该车打磨切削量，表明现场实际应用符合理论模型规律，利用比磨削能计算打磨作业控制参数的方法可行。但是实际线路条件各不相同，钢轨应用损伤的原因也千差万别，因此测试数据相较理论模型会有差别，需要继续在现场收集更多打磨数据，对计算模型进行训练。

参考文献:

[1] 周坤, 王文健, 刘启跃, 等. 钢轨打磨机理研究进展及展望 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 284-294.
ZHOU Kun, WANG Wenjian, LIU Qiyue, et al. Research progresses and prospect of rail grinding mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 284-294

[2] 樊文刚, 刘月明, 李建勇. 高速铁路钢轨打磨技术的发展现状与展望 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 184-193.
FAN Wengang, LIU Yueming, LI Jianyong. Development status and prospect of rail grinding technology for high speed railway[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 184-193.

[3] ISHIDA M, AKAMA M, KASHIWAYA K, et al. The current status theory and practice on rail integrity in Japanese railways—rolling contact fatigue and corrugations[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003, 26(10): 909-919.

[4] 龚继军, 郭猛刚, 侯博, 等. 钢轨打磨技术发展现状及打磨策略探讨 [J]. 机车电传动, 2020(3): 23-29.
GONG Jijun, GUO Menggang, HOU Bo, et al. Discussion on rail grinding technology development situation and grind strategies[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 23-29.

[5] 梁德敏, 丘文生, 杨岳, 等. 采用打磨列车对高速铁路打磨的工艺探讨 [J]. 企业技术开发, 2014, 33(16): 38-40.

LIANG Demin, QIU Wensheng, YANG Yue, et al. Rail grinding process research on high-speed railway by rail grinding train[J]. Technological Development of Enterprise, 2014, 33(16): 38-40.

[6] 陈经纬, 崔涛, 孙建锋, 等. 基于高速列车异常晃动的钢轨廓形打磨管理 [J]. 机车电传动, 2020(5): 128-131.
CHEN Jingwei, CUI Tao, SUN Jianfeng, et al. Grinding management of rail profile based on abnormal hunting of high-speed train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 128-131.

[7] 金学松, 温泽峰, 王开云. 钢轨磨耗型波磨计算模型与数值方法 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 12-18.
JIN Xuesong, WEN Zefeng, WANG Kaiyun. Theoretical model and numerical method of rail corrugation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 12-18.

[8] 周培, 刘铭, 王腾, 等. 基于几何配准的三维模型几何比对方法研究 [J]. 图学学报, 2016, 37(4): 483-490.
ZHOU Pei, LIU Ming, WANG Teng, et al. Research on geometric comparison of 3D models based on geometric registration[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(4): 483-490.

[9] 全顺喜. 60 kg/m 钢轨和 60N 钢轨轮轨接触几何关系对比分析 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61(6): 38-43.
QUAN Shunxi. Comparison analysis of wheel-rail contact geometric relationship between 60 kg/m rail and 60N rail[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(6): 38-43.

[10] ZHAN Youji, TIAN Xiao, XU Yongchao, et al. Study on the specific grinding energy of cemented carbide (YG8) grinding with a vitrified diamond wheel in high speed regime[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2019, 9(4): 286-302.

[11] 赵恒华, 孙顺利, 高兴军, 等. 超高速磨削的比磨削能研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(5): 453-456.
ZHAO Henghua, SUN Shunli, GAO Xingjun, et al. Study on specific grinding energy of ultra high speed grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(5): 453-456.

[12] 朱广平, 刘洁. 钢轨打磨车作业效率评估方法探讨 [J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 103-105.
ZHU Guangping, LIU Jie. Discussion on rating method of working efficiency of rail grinding machine[J]. Railway Engineering, 2018, 58(3): 103-105.

[13] 钱源, 徐九华, 傅玉灿, 等. cBN 砂轮高速磨削镍基高温合金磨削力与比磨削能研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(6): 33-37.
QIAN Yuan, XU Jiuhua, FU Yucan, et al. Grinding force and specific grinding energy of nickel based superalloy during high speed grinding with cBN wheel[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(6): 33-37.

[14] 肖杰灵, 刘学毅. 钢轨非对称廓型的设计方法 [J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(3): 361-365.
XIAO Jieling, LIU Xueyi. Design method of rail asymmetric silhouette[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(3): 361-365.