

# 四辊成品孔型在钢轨生产中的应用

王永明<sup>1</sup>, 郭利宏<sup>2</sup>, 吴迪<sup>3</sup>

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司总工室, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁厂, 内蒙古 包头 014010;
3. 东北大学连轧及自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:**文章针对钢轨万能轧制中存在的问题,从变形工艺的角度进行改进,增加成品孔型轧辊数量,形成四辊成品孔型,增加钢轨高度方向的约束,限制钢轨表面的自由展宽,实现轨高尺寸精度的提高。使用 ANSYS/LS - dyna 进行了数值计算,分析了不同情况下的变形状况,对出现的缺陷进行了修正,得到了最优的解决方案。通过在钢轨生产线上应用,取得了较好的效果,降低了钢轨全长范围内高度尺寸的波动范围,解决了局部高度波动造成的“高点”缺陷,提高了高铁运行的安全性。

**关键词:**钢轨;四辊成品孔型;轧制;LS - dyna;仿真计算

中图分类号: TG332

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2022)01 - 0006 - 05

## Applications of Four - roll Finished Pass in Rail Production

Wang Yong - ming<sup>1</sup>, Guo Li - hong<sup>2</sup>, Wu Di<sup>3</sup>

(1. Chief Engineer Office of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:** In this paper, the improvement is from the point of view of deformation process by increasing the number of roll in finished pass to form four - roll finished pass, increasing the constraint in direction of depth of rail and limiting free spread of rail surface so as to improve dimensional accuracy of depth of rail aiming at the existing problems in universal rolling of rail. The numerical calculation is performed using ANSYS/LS - dyna, deformation states in different conditions are analyzed, defects are amended so that the optimal solution is obtained. The better effects are obtained by applying it in production line of rail, fluctuation range of depth within the full length range of rail is reduced and defect of “high zone” caused by local depth fluctuation is solved so that the safety of running for high - speed train is improved.

**Key words:** rail; four - roll finished pass; rolling; LS - dyna; simulating calculation

钢轨是铁路运输的基础材料,随着铁路运输速度 and 载重量的增加,对钢轨的尺寸精度提出了更高

收稿日期: 2021 - 11 - 25

作者简介: 王永明(1969 - ),男,内蒙古托克托县人,硕士,正高级工程师,现从事钢轨生产工艺设计、型钢孔型设计、钢材热处理工作。

的要求。特别是高速铁路对钢轨平顺性提出了每3 m弯曲波动不大于0.3 mm的技术要求。钢轨高度方向的平顺性尤为重要,直接影响列车运行的舒适性和安全性,包含高度方向的弯曲性以及尺寸波动两个方面,弯曲性由钢轨矫直工艺决定,波动性由钢轨轧制工艺决定。

为了生产高质量的钢轨,国内技术人员进行了大量研究<sup>[1-3]</sup>,针对轨高的波动,通过控制连轧参数、孔型尺寸调整、导卫调整、增加导轮等措施,在连轧状态下取得了一定效果,但都没有从根本上彻底解决问题。

## 1 存在问题

钢轨是型钢产品中比较特殊的品种,钢轨万能轧制法采用三辊成品孔型(图1)进行轧制,钢轨轨头形状控制与二辊孔型(图2)变形规律相似,表面自由变形,受温度波动、轧机晃动、张力变化、磨损影响,孔型充填程度变化,导致钢轨轨头踏面形状变化(图3),从而影响钢轨高度尺寸,在尾部时称为“高点”。“高点”是轨高波动的特殊、局部情况,指特定位置处1 m长度范围内钢轨轨高波动<sup>[4]</sup>。

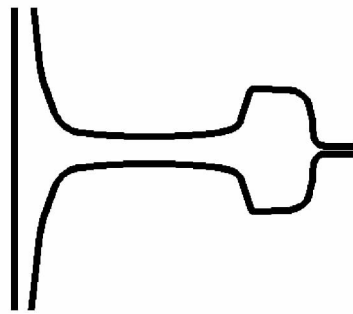


图1 三辊万能成品孔型

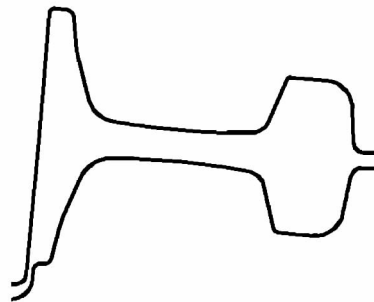


图2 传统二辊成品孔型

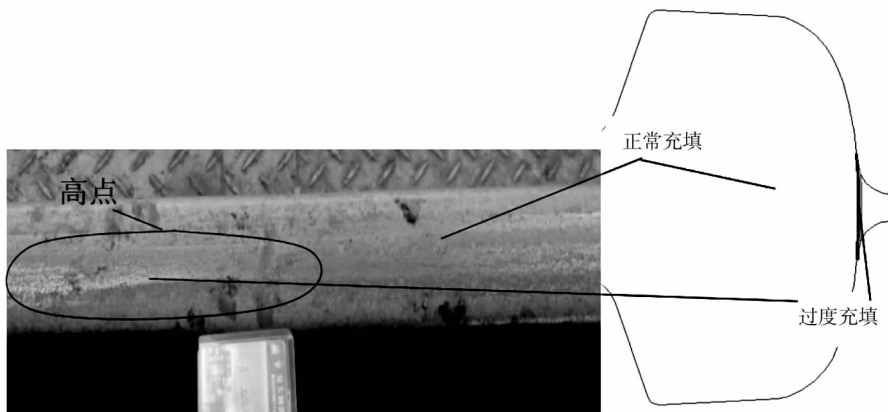


图3 充填波动实物状况和原因示意图

## 2 技术思路

总结大量实践经验后,采取增加头部立辊改变成品轧制方式来彻底解决钢轨变形时自由展宽带来的尺寸波动<sup>[5-7]</sup>,从而提高了钢轨高度方向尺寸精度,降低通长轨高波动。

钢轨成品孔型增加一支轧辊,由三辊孔型变为四辊孔型,必然带来轨头立辊辊缝配置在何处的问

题,这直接影响着孔型设计参数和轧机调整的问题。为了最大限度的利用既有资源,采取最小的改动来实现钢轨四辊全万能轧制,辊缝设计分两种情况考虑,轨头侧面中央开口和轨头角部圆弧处开口<sup>[8-9]</sup>,两种情况下的成品孔型见图4。

根据成品孔型辊缝设置位置不同,成品孔前孔设计相应的控制结构,以保证成品孔轧件的形状、尺寸合格。成品辊缝在轨头侧面中央开口时,前孔相

应位置采用凹形圆弧,成品辊缝在轨头轨距角部圆弧处开口时,前孔相应位置采用凸形圆弧,以保证成品孔和前孔之间的匹配关系,获得饱满、光滑、合格的钢轨形状。

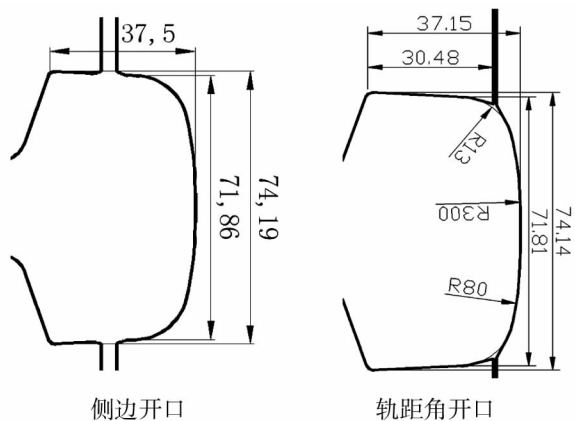
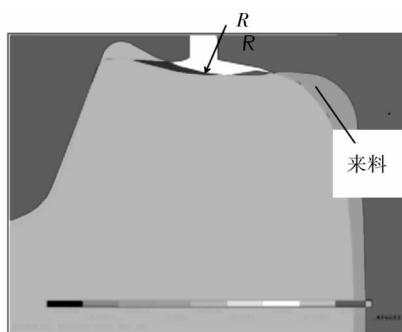


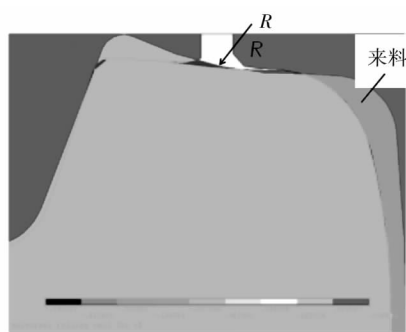
图 4 不同位置开口成品孔示意图

### 3 模拟分析

为了更好地生产高质量钢轨,进一步提高轨底宽度和轨高的尺寸精度,更加精准地进行孔型设计,对设计好的孔型使用 ANSYS/LS-dyna 进行了变形模拟仿真分析,对孔型充满程度进行了风险评估。由于钢轨断面单轴对称,取上半部分进行计算,



(a)  $R=30\text{ mm}$



(b)  $R=50\text{ mm}$

图 6 边部开口时的充填状况

从图 6 计算结果看,圆弧半径为 50 mm 时,成品轨头侧面比较平直,半径小于 50 mm 侧面会有凹陷缺陷出现。设计时轧边孔侧面圆弧半径不应小于 50 mm 为优选。

由于钢轨轨头侧表面是质量评价的关键位置,任何异常变化都会影响钢轨质量,在钢轨生产中属

成品道次参数如表 1 所示。

表 1 UF 成品孔型辊缝参数

mm		
轨腰	轨底	轨头
16.5	8	3

进入 CCS 机组轧件温度 950 °C,出 CCS 机组轧件温度 930 °C,UF 道次的应变速率  $1.2\text{ s}^{-1}$ ,对应的应力-应变曲线如图 5。

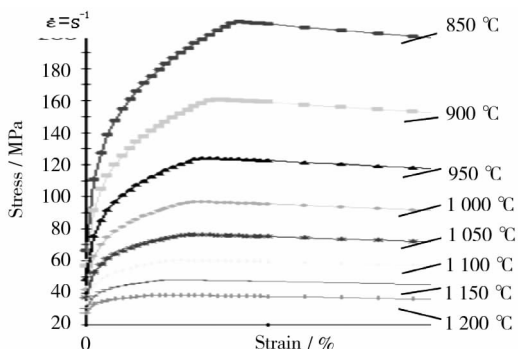


图 5 计算中使用的应力-应变曲线

#### 3.1 边部开口时变形计算

边部开口时,对应的前孔轧边孔设计有相应半径 ( $R$ ) 的圆弧形凹陷,以防止成品开口处出现过充满缺陷,计算了两种圆弧半径的情况,结果如图 6 所示。

于禁忌之地,为避免意外,最好不选侧面开口。

#### 3.2 轨距角部开口时变形计算

轨距角部开口时,对应的前孔轧边孔设计有相应半径 ( $R$ ) 的圆弧形过渡,以防止成品开口处出现欠充满缺陷,计算了四种圆弧半径的情况,结果如图 7 所示。

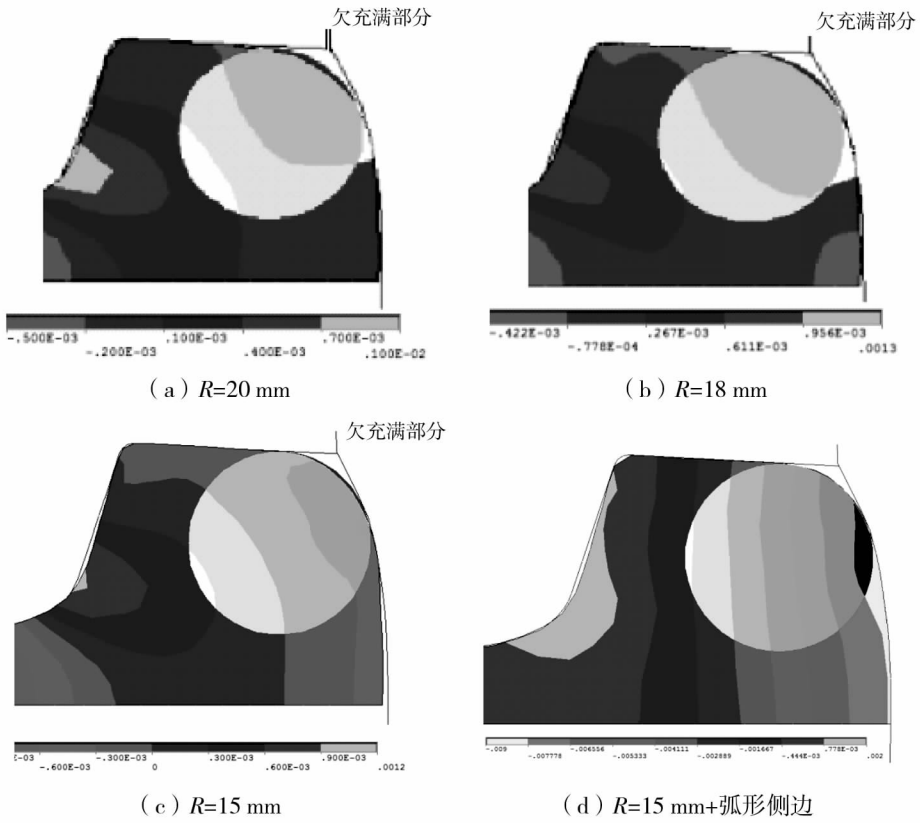


图 7 轨距角部开口时的充填情况

来料轨头轨距角部圆弧半径较大时,成品角部容易未充满,见图 7(a—c),随着前孔圆弧半径减小,欠充满逐步改善。当半径达到 15 mm 时成品孔角部充填基本饱满,但顶面略有不足,来料轨头侧壁由直线变为弧线时,成品角部形状比较完美,见图 7(d)。

对轨距角部开口孔型计算结果表面轮廓点与标准断面轮廓进行比对,如图 8 所示,二者吻合程度良好,表明孔型结构设计是可靠的,能满足断面成型的要求。可以认为在既有轧辊条件下,保持 UR、EF 轧辊孔型主体尺寸不动的条件下,仅仅改动 EF、UF 孔型局部尺寸就可以实现简单的全万能轧制,达到控制钢轨高度方向的尺寸、提高轨高精度的目的,同时消除尾部局部高度过大(通常说的“高点”)的缺陷。

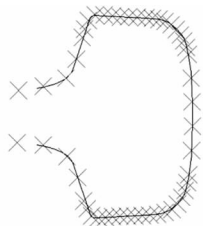


图 8 轨距角部开口计算结果与标准轮廓对比图

## 4 工业应用

2019 年采用轨距角部开口成品万能孔型,在万能机列供料不变的条件下进行了试轧,成品实物表面状况如图 9 所示,采用手持接触式断面轮廓仪测量结果见图 10,实物轮廓与标准断面吻合较好。

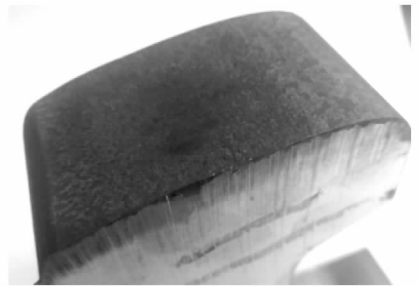


图 9 钢轨万能轧制表面状况

在线轮廓仪测量尺寸形状见图 11,与标准断面吻合,表面过渡光滑。

轧机调整精度直接影响水平轧辊轧制线与立辊中心线对齐效果,对钢轨尺寸精度和外观形状会造成严重影响,因此设备保证精度需要高于产品精度。

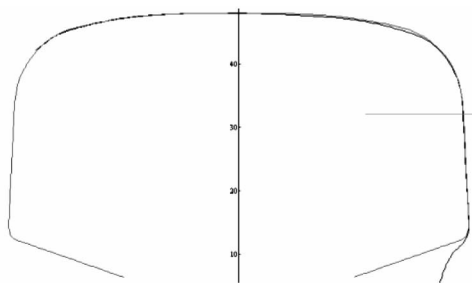


图 10 钢轨万能轧制断面轮廓

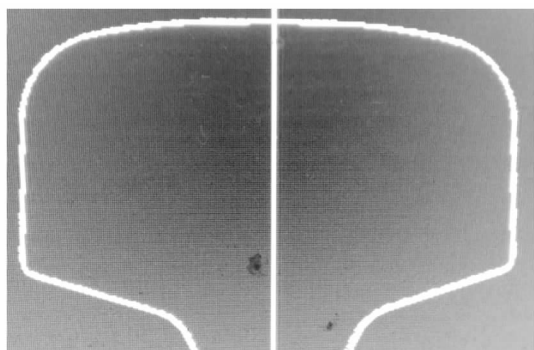
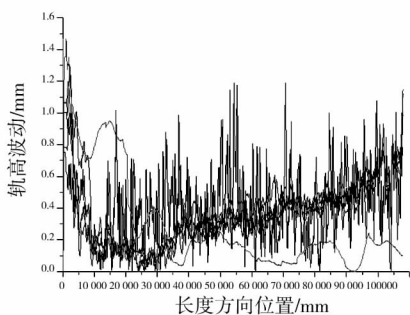
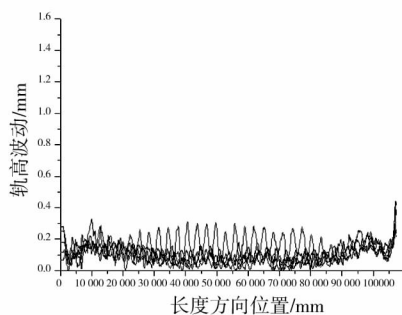


图 11 钢轨万能轧制断面在线轮廓测量



(a) 传统万能轧制



(b) 全万能轧制

图 12 同条轨高热尺寸沿长度方向在线测量波动曲线

## 5 结论

(1) 对比侧边开口、轨距角开口两种成品孔型,认为角部开口最优,可控性好,断面尺寸精度高,表面过渡光滑,无凸起棱角。

(2) 全万能轧制钢轨轨高尺寸精度提高,107 m 长度范围内轨高波动可以减小到 0.4 mm 以下,配合其它措施有望达到 0.2 mm 以下,可最大程度满足高速铁路发展的需要。

(3) 万能成品孔型控制钢轨轨高尺寸精度在

图 12 为传统万能轧制和全万能轧制钢轨时在线轮廓仪测量的多支热态钢轨轨高波动情况。图中数据表明,无论哪种轧制方法,不同轧件的轨高变化沿 107 m 长度方向是不相同的,随机的。传统万能轧制每支钢轨南北端为自由端,端头尺寸波动相对较大,最大可达 1.5 mm,见图 12(a);中部相对比较稳定,但是受孔型轨头顶部开口影响,温度变化、压下量变化都会导致轨高变化,波动能控制在 1.0 mm 以内。全万能轧制方法生产的钢轨,由于高度方向受到控制,消除了自由展宽的影响,轨高波动范围明显比传统万能轧制方法小,且波动范围相对稳定。因为轧件存在温度不均和变形不均的现象,不可能消除尺寸波动,但能控制 107 m 长钢轨轨高波动在 0.4 mm 以下,见图 12(b),去掉两端切头的影响,钢轨本体轨高波动可以达到 0.2 mm 的水平,但比率低于 100%。目前各厂家可以控制“高点”在每米 0.2 mm 以下;采用全万能成品孔型可以达到每米 0.16 mm 以下,配合其他措施有望达到每米 0.1 mm 以下。

$\pm 0.1$  mm 水平,对设备维护精度提出更高要求,设备维护是钢轨全万能轧制顺利应用的基础。

(4) 理论研究和现场试验表明,使用四辊成品孔型的全万能轧制方法比传统万能轧制有明显优势,可以推广使用。

## 参 考 文 献

- [1] 刘宝昇,赵宪明. 钢轨生产与使用[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.

(下转第 49 页)

表4 金属锌定量分析结果(质量分数)

%

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	S	P	F	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Zn
0.26	0.070	0.008	0.006	0.000 9	0.028	0.074	余量
CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	Pb	MnO	TiO	
0.019	<0.01	0.017	<0.005	0.064	<0.005	<0.01	

由图7的XRD分析结果可以看出,电解后的金属在XRD结果的衍射峰均为锌的特征峰值。

由表4可以看出,金属锌中杂质主要是铁、铅,其余元素均在XRD检测下限,其真实含量极低。经换算,确定杂质含量为0.082%。金属锌中锌含量不小于99.5%。

### 3 结论

(1)经过试验验证,可以对高炉布袋灰中的锌、钾进行回收并形成高质量产品,浸出渣中钾、钠、锌都得到了有效的去除,基本满足返回烧结的条件。

(2)NH<sub>4</sub>Cl浸出最佳条件为浸出温度100℃、浸出时间60min、NH<sub>4</sub>Cl浓度3.0mol/L。

(3)本工艺可以得到锌含量不小于99.5%的金属锌产品,杂质主要是铁、铅,确定杂质含量为0.082%。

### 参 考 文 献

[1] 张芳,张世忠,罗果萍,等. 锌在包钢高炉中行为机制[J]. 钢铁,2011,46(8):7-11.  
[2] 付卫国. 攀钢2号高炉炉身结瘤形成原因分

析[J]. 钢铁,2010,45(1):10-13.

[3] 王雪松,付元坤,李肇毅,等. 高炉锌平衡及含锌尘泥的回收利用[J]. 钢铁,2004,39(12):67-70.  
[4] Gladys V, Filippov V, Rudin V S. Influence of Zinc on the Life of the Hearth Lining and Blast-furnace Operation[J]. Steel in Translation, 2001,31(1):1-4.  
[5] Rüdiger Deike, Carsten Hillman. Behavior of Zinc during the Recycling of Iron-Containing Dust and Sludge[J]. Stahl und Eisen,1999,19(2):53-58.  
[6] 胡晓洪,张志芳,黎燕华. 高炉瓦斯泥综合利用的研究[J]. 矿业快报,2004,(8):14-16.  
[7] 汪为民,张光荣. 高炉瓦斯泥循环利用工艺技术探讨[J]. 冶金环境保护,2007,67(1):7-10.  
[8] 胡晓军,郭婷,周国治. 含锌冶金粉尘处理技术的发展和现状[J]. 钢铁研究学报,2011,23(7):1-5.

(上接第10页)

[2] 吴迪,赵宪明. 万能孔型轧制高精度重轨的研究[J]. 轧钢,2000,17(3):12-14.  
[3] 吴迪,赵宪明. 三种成品孔轧制高精度重轨尺寸和形状精度的研究[J]. 钢铁,2001,36(8):30-32.  
[4] 陶功明. 钢轨高点缺陷分析与控制[J]. 轧钢,2015,32(2):85-89.  
[5] 周剑华,吴迪,等. 全万能成品孔型轧制高精度重轨生产工艺研究[J]. 钢铁研究,2007,35(3):31-34.  
[6] 周剑华,吴迪,赵宪明,等. 两种万能成品孔轧

制60kg/m重轨有限元模拟及分析[J]. 塑性工程学报,2007,14(6):28-31.

[7] 王艳敏,吴迪,赵宪明,等. 60kg/m高精度重轨的万能轧制及有限元模拟[J]. 钢铁研究,2006.34(4):42-44.  
[8] 王永明. 一种全万能四辊成品孔型轧制钢轨的方法[P]. 中国专利:ZL201710631301.8, 2020-02-07.  
[9] 王永明. 全万能四辊成品孔型轧制钢轨的方法[P]. 中国专利:ZL201710629798.X, 2020-02-07.