

## 立式九辊轧机的孔型标定与调整

白辉东, 刘华堂, 侯沛云

(太原重工轨道交通设备有限公司, 山西 太原 030032)

**摘要:** 为了提高立式九辊轧机轧制孔型标定和孔型调整的精度和效率、提高轧制毛坯的形状尺寸精度、降低生产成本, 研究了轧制孔型标定的原理, 建立了孔型标定时和轧制结束瞬间两种状态之间的轧辊位置关系, 提出了孔型标定的方法; 研究了轧制过程中轧辊的运动规律, 通过将辐板辊的圆周摆动运动分解为沿车轮轴向和径向的运动, 分别研究了轧制时辐板辊沿车轮轴向和径向的位移参数, 提出了孔型调整的方法; 设计了可以测量轧辊相对空间位置关系的专用工具, 辅助孔型标定和孔型调整。生产实践表明, 提出的轧制孔型标定和孔型调整方法提高了车轮轧制毛坯的形状和尺寸精度, 同时提高了孔型标定和孔型调整的效率。

**关键词:** 立式九辊轧机; 轧制孔型; 孔型标定; 孔型调整; 轧辊位置

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.027

**中图分类号:** TG33, TH-39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0181-07

## Groove calibrating and adjusting for vertical nine-high rolling mill

Bai Huidong, Liu Huatang, Hou Peiyun

(Taiyuan Heavy Industry Transit Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and efficiency of rolling groove calibration and groove adjustment for vertical nine-high rolling mill, improve the shape and dimension accuracy of rolling blank, and reduce the production cost, the rolling groove calibration principle was researched, the positional relationship of rolls between the two states for groove calibration and end moment of rolling was established, and the method of groove calibration was proposed. Then, the movement law of roll during the rolling process was studied, and by decomposing the circular oscillating motion of web roll into the movements of wheel along the axis and radial directions, the displacement parameters of web roll along the axis and radial directions for wheel during the rolling was researched respectively to propose the groove adjustment method. Furthermore, the special tool for measuring the relative spatial position of rolls was designed to assist the groove calibration and groove adjustment. The results of production show that the rolling groove calibration and groove adjustment method can improve the shape and dimension accuracy of rolling blank for wheel, and at the same time improve the efficiency of groove calibration and groove adjustment.

**Key words:** vertical nine-high rolling mill; rolling groove; groove calibration; groove adjustment; roll position

立式九辊轧机是用于制造轨道交通车辆如铁路客车、货车、高速动车组车轮的关键设备, 其轧辊数量较多且空间相对位置较为复杂。轧制孔型是轧机轧制结束时多个轧辊在工件的轧制面上形成的孔口形状, 对应着工件受轧制区域的截面形状。轧制孔型标定也称轧机标定, 是控制系统进行轧制控制的基础。轧制孔型调整是对轧制结束时各轧辊的相对位置进行调整。轧机控制系统在孔型标定建立的“零点”基础上, 建立轧制控制模型并控制轧制过程; 提高轧制孔型的标定精度和调整精度对于提高产品的轧制质量具有重要意义。

目前, 研究者对轧制孔型标定和调整的研究主要集中在板材或型材轧机方面, 文献 [1]~文献 [3] 通过计算机模拟的方式研究了轧制孔型调整对轧制结果的影响; 文献 [4] 研究了 ZR22B52 型 20 辊轧机辊系的空间位置模型; 文献 [5]~文献 [13] 研究了冷轧和热轧机的轧制孔型标定和调整过程及其优化方法。以上研究内容丰富了板材或型材轧机轧制孔型方面的研究成果, 但由于板材或型材轧机的结构和控制方式与立式九辊轧机存在较大差异, 因此, 相应的研究方法和成果对立式九辊轧机的孔型标定和调整的参考意义有限。吴江淮等<sup>[14]</sup>对马钢股份有限公司的立式九辊轧机的辊系调整方法进行了研究, 设计了辊系调整尺, 通过测量轧制结束时轧辊的位置, 依据控制系统的调整计算表给出了轧辊位置的修正值。由于控制系统的区别, 太

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-07-06

作者简介: 白辉东 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: WYiang@126.com

原重工轨道交通设备有限公司的立式九辊轧机轧制结束时各轧辊的位置无法直接测量,也没有调整计算表,因此,马钢股份有限公司的研究结果无法直接用于太原重工轨道交通设备有限公司的轧机轧制孔型标定和调整。

本研究提出的轧制孔型标定方法,目的是确定立式九辊轧机孔型标定时各轧辊的理论位置,为孔型标定提供量化指导和实现方法,从而提高孔型标定的精度;提出的轧制孔型调整方法,目的是在轧机轧制工作前预判轧制孔型是否满足工艺要求,不

满足要求时提前进行调整,减少试制废品和试制时间,提高孔型标定和调整效率;同时,在生产期间出现轧制缺陷时及时对轧制孔型进行调整,提高车轮轧制毛坯的形状和尺寸精度。

## 1 立式九辊轧机简介

立式九辊轧机的轧辊包括背辊、一对辐板辊、一对轧边辊、一对导向辊以及上、下对中辊,轧辊结构分布如图 1 所示,车轮的结构如图 2 所示,车轮带轮缘的一侧为内侧。

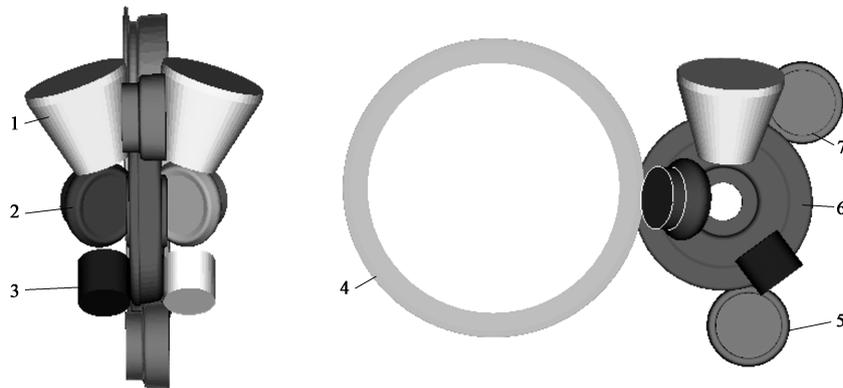


图 1 立式九辊轧机轧辊分布图

1. 轧边辊 (一对) 2. 辐板辊 (一对) 3. 导向辊 (一对) 4. 背辊 5. 下对中辊 6. 车轮 7. 上对中辊

Fig. 1 Distribution diagram of rolls in vertical nine-high rolling mill

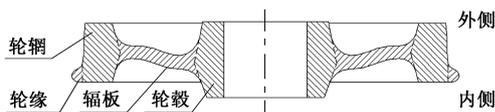


图 2 车轮结构图

Fig. 2 Structure diagram of wheel

### 1.1 轧制孔型标定

轧制孔型标定是根据轧辊形状尺寸确定控制系统中轧辊初始位置的“零点”,轧机每次变更轧辊尺寸后均须进行孔型标定。背辊、辐板辊、轧边辊为起到轧制作用的轧辊,其他为辅助轧辊。标定时需要使标定轮的轮缘处于背辊凹槽内,标定轮的轮辋侧面与轧机的中心对称面平行,标定轮的辐板、内径处的圆弧面与辐板辊贴合。轧制孔型标定时轧辊的平面投影位置如图 3 所示(上、下对中辊在车轮踏面位置处,图 3 中未标出)。

理论上,每种车轮轧制前均应根据车轮、辐板辊、背辊的形状尺寸来制作与之形状相匹配的标定轮,但由于车轮产品种类多达数百种且不断增加,实际中使用通用的标定轮对所有产品进行孔型标定,

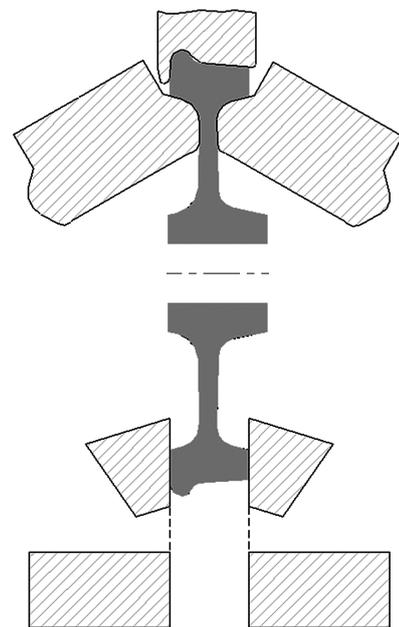


图 3 孔型标定时轧辊平面投影

Fig. 3 Plane projection of rolls during groove calibration

标定轮的形状与背辊、辐板辊形状不匹配,因此造成标定时的偏差。

## 1.2 轧制孔型调整

立式九辊轧机轧制车轮时，辐板辊、背辊、轧边辊共同在车轮上施加变形压力，如图4所示。轧制结束时，辐板辊、背辊、轧边辊围成的空间即轧制孔型；轧制孔型直接决定了轧制坯轮辋和辐板的形状尺寸，因此，对轧制孔型的标定和调整是整个轧制过程中最重要的问题。

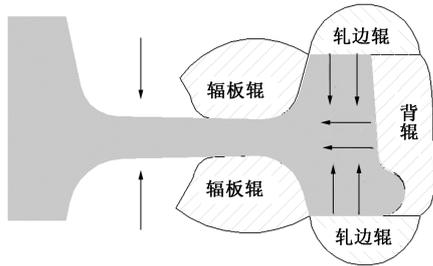


图4 车轮轧制原理图

Fig. 4 Principle diagram of wheel rolling

立式九辊轧机工作时在工件上料—轧制—卸料的工作循环中自动控制，禁止人工干预或暂停中断，操作界面也未显示各轧辊的绝对位置参数或相对位置参数，使用者无法获知各轧辊的相对位置，无法提前判断，仅能通过试制轧制来判断轧制孔型是否满足工艺要求，生产过程中出现轧制缺陷时，通过经验和感觉进行调整，效率低下且成本高。

以上特征导致孔型调整的研究难度较大。因此，对孔型调整进行研究时，必须建立轧制结束与上料时各轧辊的位置关系，通过对上料时轧辊位置进行测量，判断轧制结束时轧辊的相对位置是否满足工艺要求。

## 2 轧制孔型标定过程

轧制孔型标定是在变更轧辊形状尺寸后，重新确定轧边辊、辐板辊和背辊之间的初始相对位置关系。由于背辊处于轧机的对称中心平面上，结构相对简单，且仅存在绕自身轴线的转动和沿车轮径向的平动两种运动，为了方便研究，选择将背辊作为参考物，研究辐板辊和轧边辊与背辊的位置关系。

### 2.1 轧制孔型标定的参数关系分析

为了研究孔型标定的原理，确定标定时各轧辊的理论相对位置，实验记录了不同直径产品的各轧辊在孔型标定时与轧制结束瞬间的传感器参数，如表1所示，并结合标定轮和产品尺寸参数，分析二

表1 孔型标定过程的轧辊位置参数 (mm)

Table 1 Position parameters of rolls during groove calibration (mm)

产品直径	设备状态	轧边辊		辐板辊	
		内侧	外侧	内侧	外侧
Φ840	标定时	216.0	208.7	136.2	114.9
	轧制结束	216.0	204.8	140.9	120.0
Φ850	标定时	214.8	209.9	141.1	116.3
	轧制结束	214.8	198.1	146.9	109.1
Φ860	标定时	209.0	217.0	145.1	126.9
	轧制结束	209.0	216.7	143.7	129.7

者之间的关系。

研究表1数据发现，在孔型标定时与轧制结束瞬间，内侧轧边辊的位置相同，其他轧辊位置的差值等于标定轮与轧制坯在轮辋宽度和辐板厚度方面的差值，轧机控制系统以内侧轧边辊工作面为基准，以目标车轮与标定轮各部位的尺寸差值为各相应轧辊的位移量进行控制轧制。

设计轧制工艺时，可以确定轧制结束瞬间内侧轧边辊在轧机中相对背辊的理论相对位置，结合以上研究结果可以确定标定时内侧轧边辊的理论相对位置，进而可以根据标定轮的尺寸参数确定孔型标定时外侧轧边辊、外侧辐板辊、内侧辐板辊的理论相对位置。

### 2.2 轧制孔型标定方法

通过以上研究得到了标定时各轧辊的理论相对位置，实际孔型标定时需要使各轧辊处于理论的标定位置。立式九辊轧机各轧辊的相对空间位置关系复杂，使用传统的测量工具无法找到方便、统一的测量基准，也无法进行方便的测量。

实验设计了专用的测量尺，如图5所示，测量内侧轧辊位置时，将测量尺吸附固定在背辊内侧并以此为基准，依次移动滑块使游标分别与内侧轧边辊、辐板辊的工作面接触，如图6a和图6b所示，从F向读取标尺的刻度，读数即为相应轧辊与背辊在轴线方向的相对位置；测量外侧轧辊位置的方法类似，如图6c和图6d所示。

使用测量尺辅助孔型标定的步骤如下：

(1) 计算辐板辊与轧边辊的理论标定位置。工艺设计时可以确定内侧轧边辊位置，根据标定轮和轧辊形状，计算标定时辐板辊、轧边辊与背辊内、外侧面的理论距离，如图7所示。图7中，A为内侧轧边辊与背辊内侧面的理论距离，B为内侧辐板

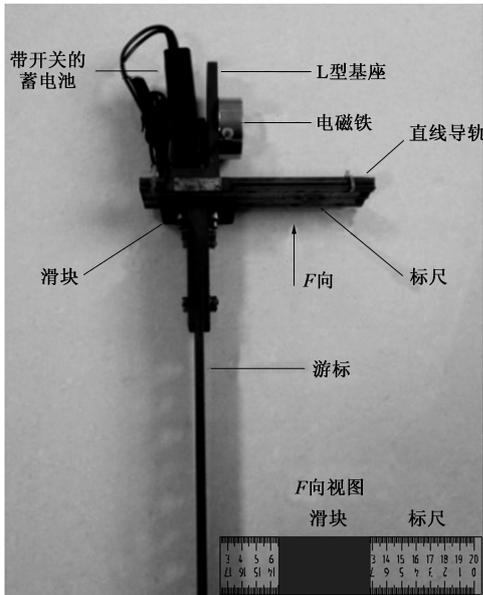


图 5 轧辊位置测量尺

Fig. 5 Gauge for rolls position measuring

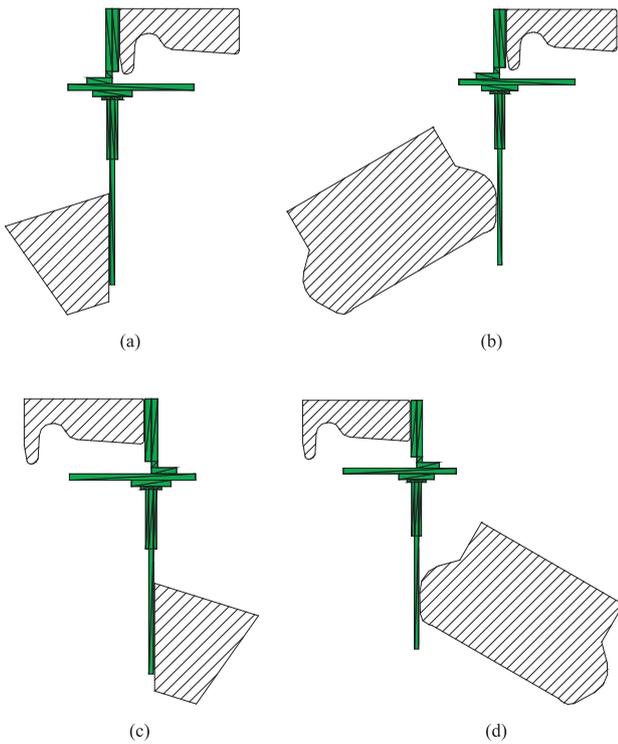


图 6 轧辊位置测量示意图

(a) 内侧轧边辊 (b) 内侧辐板辊 (c) 外侧轧边辊 (d) 外侧辐板辊

Fig. 6 Schematic diagrams of measurement for rolls position

(a) Inner edger roll (b) Inner web roll (c) Outer edger roll (d) Outer web roll

辊与背辊内侧面的理论距离,  $C$  为外侧轧边辊与背辊外侧面的理论距离,  $D$  为外侧辐板辊与背辊外侧面的理论距离。

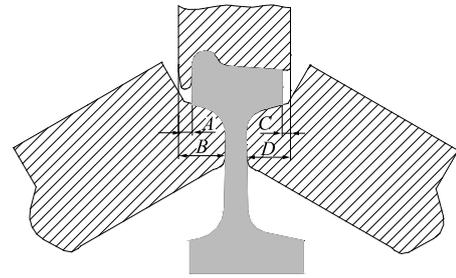


图 7 辐板辊和轧边辊的理论标定位置

Fig. 7 Theoretical calibration positions of web rolls and edger rolls

(2) 将测量尺吸附固定在背辊的内侧面, 测量内侧轧边辊的位置 (图 6a), 并调整使其处于孔型标定时的理论相对位置; 通过类似方法测量并调整内侧辐板辊也处于孔型标定时的理论相对位置 (图 6b)。

(3) 使用机械手将标定轮放入轧机中, 使其辐板内侧面与内侧辐板辊接触、轮辋内侧面与内侧轧边辊接触; 保持内侧轧辊不动, 移动外侧轧辊直至夹持住标定轮, 此时, 外侧轧辊即处于孔型标定的理论相对位置。

(4) 将背辊移动至与车轮踏面接触, 将内、外侧导向辊分别移至与标定轮轮辋面接触; 将上、下对中辊分别移动至与标定轮踏面接触, 此时, 各轧辊即处于孔型标定的理论相对位置。

(5) 各轧辊均处于理论相对位置后, 对系统进行标定程序, 即完成标定过程。

### 3 轧制孔型调整过程

立式九辊轧机在轧制前需要输入轧制前锻造毛坯和轧制后轮坯的设计尺寸, 控制系统根据输入参数自动控制、确定轧制孔型。由于实际的锻造轮坯尺寸与输入的理论尺寸存在差异, 控制系统自动确定的轧制孔型不能完全满足工艺要求, 生产中需要对轧制孔型进行调整。

由于无法直接测量立式九辊轧机轧制结束瞬间轧辊的位置, 只能测量上料时的轧辊位置, 实验中研究了轧制前后各轧辊位置传感器参数之间的关系, 通过对上料时轧辊位置进行调整实现对轧制孔型的调整。

为了研究方便, 实验中分别从沿车轮轴向和径向两个方向研究轧辊的运动。

#### 3.1 沿车轮轴向的轧制孔型调整

沿车轮轴向的轧制孔型调整, 主要解决轧制时的辐板厚度、轮辋宽度、辐板与轮辋的相对位置这

3个尺寸参数。实验中研究轧辊的运动时，记录上料时轧辊的传感器参数为  $P_1$ 、轧制结束瞬间轧辊的传感器参数为  $P_2$ ，轧辊从上料到轧制结束的行程为  $\Delta P$ ， $\Delta P = |P_1 - P_2|$ ，如表2所示。

表2 孔型调整过程的轧辊位置参数 (mm)

Table 2 Position parameters of rolls during groove adjustment (mm)

产品类型	参数	轧边辊		辐板辊	
		内侧	外侧	内侧	外侧
KKD	$P_1$	232	246	229	248
	$P_2$	207	216	149	158
	$\Delta P$	25	30	80	90
HESA	$P_1$	236	237	228	251
	$P_2$	211	207	151	167
	$\Delta P$	25	30	77	84
HDSA	$P_1$	230	241	227	235
	$P_2$	205	211	146	145
	$\Delta P$	25	30	81	90

对KKD、HESA、HDSA这3种车轮轧制前、后的辐板厚度 ( $W$ 、 $w$ )、辐板位置 ( $M$ 、 $m$ ) 以及轮辋宽度 ( $R$ 、 $r$ ) 参数进行研究，相关轮坯示意图如图8所示，发现轧辊位移满足以下规律：

$$\Delta P_{bs} = 25 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\Delta P_{fs} = 30 \text{ mm} \quad (2)$$

$$\Delta P_{bw} = 25 + (M - W/2) + (W/2 - w/2) = 25 + M - w/2 \quad (3)$$

$$\Delta P_{fw} = 25 + (R - r) + (R - M - W/2) + (W/2 - w/2) = 30 + R - M - w/2 \quad (4)$$

式中： $\Delta P_{bw}$  为内侧轧边辊从上料到轧制结束的行程； $\Delta P_{fs}$  为外侧轧边辊从上料到轧制结束的行程； $\Delta P_{bw}$  为内侧辐板辊从上料到轧制结束的行程； $\Delta P_{fw}$  为外侧辐板辊从上料到轧制结束的行程。

通过式(1)~式(4)，结合轧制结束时各轧辊的理论相对位置，可以计算出上料时各轧辊的理论相对位置，通过测量上料时各轧辊的实际相对位置并与理论值比较后进行调整，即可实现轧制结束瞬间轧辊实际相对位置的调整，即轧制孔型的调整。

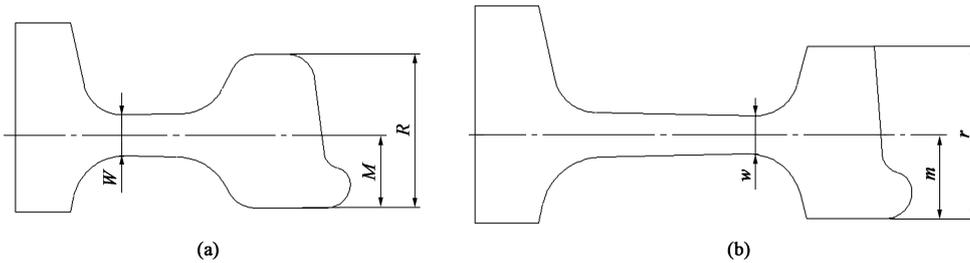


图8 轧制前后轮坯尺寸示意图

(a) 轧制前 (b) 轧制后

Fig. 8 Schematic diagrams of wheel blank sizes before and after rolling

(a) Before rolling (b) After rolling

轧制孔型调整的方法如下：

(1) 根据轧制坯的尺寸参数及  $\Delta P_{bs}$ 、 $\Delta P_{fs}$ 、 $\Delta P_{bw}$ 、 $\Delta P_{fw}$ ，计算上料时内侧轧边辊、外侧轧边辊、内侧辐板辊、外侧辐板辊的理论相对位置  $P_{bs}$ 、 $P_{fs}$ 、 $P_{bw}$ 、 $P_{fw}$ ；

(2) 内侧轧辊位置测量、调整。以背辊内侧为基准，将测量尺固定在背辊内侧，测量内侧轧边辊的实际相对位置  $P'_{bs}$ ，其调整量为  $\Delta_{bs} = |P'_{bs} - P_{bs}|$ ，同样方法测量内侧辐板辊的实际相对位置  $P'_{bw}$ ，其调整量为  $\Delta_{bw} = |P'_{bw} - P_{bw}|$ ；

(3) 外侧轧辊位置测量、调整。以背辊外侧为基准，将测量尺吸附在背辊外侧，测量外侧轧边辊的实际相对位置  $P'_{fs}$ ，其调整量为  $\Delta_{fs} = |P'_{fs} - P_{fs}|$ ，同样方法测量外侧辐板辊的实际相对位置  $P'_{fw}$ ，其调

整量为  $\Delta_{fw} = |P'_{fw} - P_{fw}|$ ；

(4) 启动轧机动力机构，将各轧辊按以上的调整量进行调整，各轧辊调整到位后，即完成沿车轮轴向轧辊位置的调整。

### 3.2 沿车轮径向的轧制孔型调整

沿车轮径向的孔型调整，主要解决轧制时轮辋厚度的尺寸参数问题。对立式九辊轧机的图纸进行研究，并对辐板辊的运动参数进行计算验证后发现，辐板辊除自转外，同时与其装配的驱动轴在自身轴线所在水平面内作圆周摆动，通过圆周摆动实现上料时辐板辊对车轮的夹持和轧制过程中对车轮辐板的减薄；辐板辊动作示意图（俯视图）如图9所示，其中，G点为辐板辊与轧机驱动轴装配时接触面的中心，K点为驱动轴在水平面内圆周摆动所围绕

的圆心,  $H$  点为几何作图的构造点,  $GH = 1925 \text{ mm}$ ,  $HK = 629.3 \text{ mm}$ ,  $GH \perp HK$ 。图 9 中, 弧形虚线为辐板辊的摆动轨迹, 辐板辊虚线、实线分别为其在上料时和轧制结束瞬间的位置。

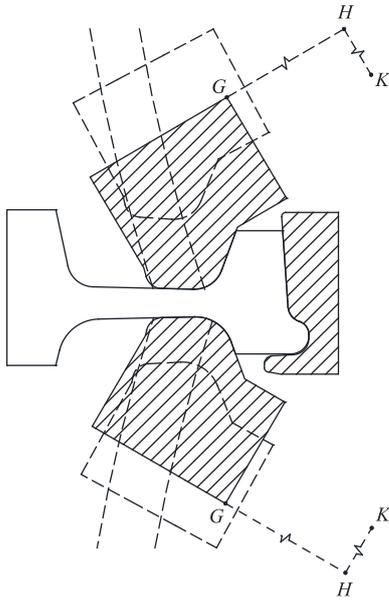


图 9 辐板辊摆动示意图

Fig. 9 Schematic diagram of web rolls swing

与研究轧制孔型沿车轮轴向调整的方法类似, 沿车轮径向的调整也需通过对上料时的轧辊位置进行调整来实现。

轧制前后轮坯的轮辋厚度差值  $S$  为轧制时背辊的进给量, 工艺设计时以轧制后轮坯的位置为参考位置, 可以计算出上料时背辊的理论相对位置; 根据图 9 中辐板辊的摆动运动特征、轧制前后轮坯的尺寸以及内外侧辐板辊进给量  $\Delta P_{bw}$ 、 $\Delta P_{fw}$ , 可以确定上料时辐板辊的理论相对位置, 并进一步计算出上料时背辊、辐板辊在沿车轮径向的理论相对距离  $Q$ , 如图 10 所示。图 10 中, 虚线为轧制结束瞬间辐板辊、背辊和轮坯的位置, 实线为上料时轧辊和轮坯的位置。

实验中设计了测量辐板辊和背辊沿车轮径向相对位置的样板 (图 10 中阴影部分), 测量了实际上料时辐板辊与背辊的距离  $Q'$ , 轮辋厚度的调整量  $\Delta = (Q - Q')/2$ 。当  $\Delta > 0$  时, 需增大轮辋厚度;  $\Delta < 0$  时, 需减小轮辋厚度。

#### 4 实践应用

太原重工轨道交通设备有限公司的车轮锻轧生产线在运行初期, 由于缺少理论指导, 主要依靠操

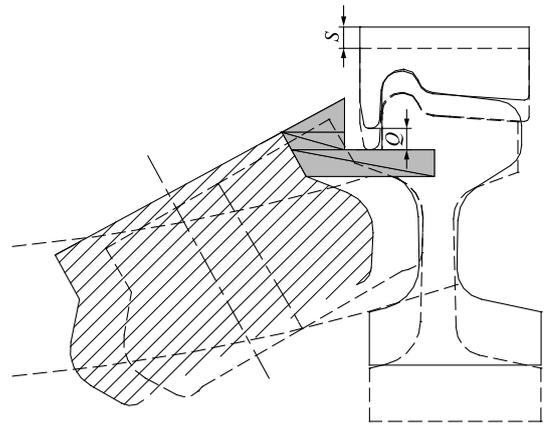


图 10 测量辐板辊和背辊径向位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of radial positions for measuring web roll and back roll

作员的经验和感觉进行立式九辊轧机的孔型标定和调整, 精度较差且与操作者的个人经验密切相关, 经常出现一对轧边辊、一对辐板辊和背辊共 5 个轧辊之间的相对位置不合理造成车轮轧制毛坯辐板厚度小、轮辋位置超差等缺陷, 如图 11 所示。图 11 中, 粗实线为车轮实际测量的轮廓线, 4 条细实线从外向内依次为锻件形状尺寸上限、设计值、下限和成品车轮轮廓线。重新进行孔型标定和孔型调整需要 2 h, 造成生产线停机, 孔型调整期间一般会生产 5~10 件不合格品, 造成较高的生产成本。

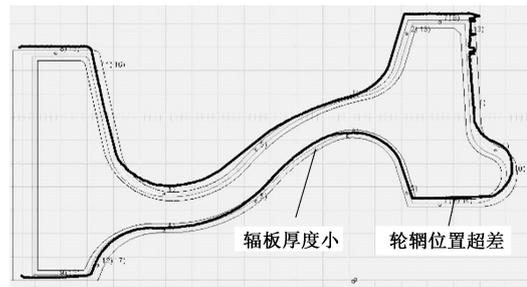


图 11 缺陷车轮形状

Fig. 11 Shape of defective wheel

本研究中的轧制孔型标定和调整方法确定了孔型标定时和轧制结束瞬间各轧辊的理论相对位置, 并给出了测量调整轧辊位置的方法及调整量, 消除了不同人员之间由于经验水平不同造成的孔型标定和孔型调整差异; 经过对操作人员培训指导本研究中的孔型标定和调整方法, 车轮轧制毛坯的形状尺寸精度得到了明显提高, 消除了辐板厚度小、轮辋位置超差等缺陷 (图 12)。使用本研究中的方法将孔型标定和调整时间缩短至 0.5 h, 提高了孔型标定和调整的效率, 孔型调整期间至多产生 2 件

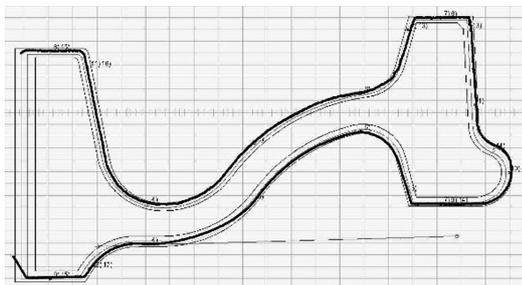


图12 合格车轮形状

Fig. 12 Shape of qualified wheel

不合格品,降低了生产成本。

## 5 结论

(1) 本研究提出了立式九辊轧机轧制孔型的标定方法,为标定操作提供了定量指导,在实际生产中能够提高轧制孔型标定的精度。

(2) 本研究建立了轧制前后轧辊的位置关系,提出了轧制孔型的测量调整方法,在实际生产中能够在轧机工作前判断轧制孔型是否符合工艺要求。

(3) 本研究中的轧制孔型标定和调整方法在实际生产中能够提高孔型标定和调整的效率,提高车轮轧制毛坯的形状和尺寸精度,降低生产成本。

### 参考文献:

- [1] 李有智,季业益,陶宝山,等. 轧辊辊缝差和轧机组装间隙对精轧钢带尾板侧偏的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 116-125.  
Li Y Z, Ji Y Y, Tao B S, et al. Influence of roll gap difference and mill assembly gap on side deviation of finished steel strip tail plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 116-125.
- [2] 王飞龙. 大扁豆花纹板轧辊孔型设计合理性评价及验证 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 21-27.  
Wang F L. Evaluation and verification of design rationality for roll pass of large lentil-shaped checkered plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 21-27.
- [3] 常彬彬,帅美荣,刘鑫. 棒材三辊孔型自由宽展流动模型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 207-214.  
Chang B B, Shuai M R, Liu X. Flow model of free spread in three-roll passes of rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 207-214.
- [4] 贾志伟,张海利,庞树芳,等. ZR22B52型20辊轧机辊系空间位置模型研究 [J]. 鞍钢技术, 2019, 57 (6): 30-34.  
Jia Z H, Zhang H L, Pang S F, et al. Study on space position model for roll system in ZR22B52" 20-H rolling mill [J]. Angang

Technology, 2019, 57 (6): 30-34.

- [5] 高强,田宇,李大华,等. 冷弯型钢机组轧辊位置自动调整控制系统的研究与改进 [J]. 现代制造工程, 2019, 43 (11): 117-122.  
Gao Q, Tian Y, Li D H, et al. Research and improvement of roll position automatic adjustment control system for cold formed steel unit [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, 43 (11): 117-122.
- [6] 张鹏飞. 热轧轧机辊缝标定系统优化研究 [J]. 现代信息技术, 2019, 3 (18): 141-145.  
Zhang P F. Research on optimization of roll gap calibration system for hot rolling mill [J]. Modern Information Technology, 2019, 3 (18): 141-145.
- [7] 岳殿佐,侯玉双. CSP生产线轧机自动标定过程分析 [J]. 包钢科技, 2017, 43 (5): 76-82.  
Yue D Z, Hou Y S. Analysis on automatic calibration process of rolling mill in CSP production line [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2017, 43 (5): 76-82.
- [8] 康永林,朱国明,陶功明,等. 高精度型钢轧制数字化技术及应用 [J]. 钢铁, 2017, 52 (3): 55-63.  
Kang Y L, Zhu G M, Tao G M, et al. Digital technology and application of high precision section steel rolling [J]. Iron and Steel, 2017, 52 (3): 55-63.
- [9] 陈金山,王君,曹勇. 冷连轧过程控制系统的自适应功能实现 [J]. 中国冶金, 2016, 26 (6): 51-56.  
Chen J S, Wang J, Cao Y. Development of self-adaption function for control system for tandem cold rolling process [J]. China Metallurgy, 2016, 26 (6): 51-56.
- [10] 高健. 冷轧机辊缝位置精确控制技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Gao J. Research on Precision Control Technology of Roll Gap Position in Cold Rolling Mill [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [11] 曹文豪. 轧机自动辊缝标定技术 [J]. 冶金丛刊, 2011, (1): 28-31, 34.  
Cao W H. Technology of roll gap automatic calibration [J]. Metallurgical Collections, 2011, (1): 28-31, 34.
- [12] 张岩,邵富群,王生均,等. 冷连轧机辊缝自动标定原理及应用 [J]. 冶金自动化, 2009, 33 (5): 33-37.  
Zhang Y, Shao F Q, Wang S J, et al. Theory and application of roll gap automatic calibration in tandem cold mill [J]. Metallurgical Industry Automation, 2009, 33 (5): 33-37.
- [13] 郭拉风. 线材轧机孔型系统及调整 [J]. 现代制造工程, 2006, 43 (3): 130-131.  
Guo L F. Opening-mold system and adjustment of rolling mill for wire rod [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006, 43 (3): 130-131.
- [14] 吴江淮,许章泽. 辗钢车轮立式轧机辊系的调整方法 [J]. 轨道交通装备与技术, 2006, 28 (8): 11-13.  
Wu J H, Xu Z Z. Adjustment of the roller assembly of the vertical rolling machine for rolled steel wheel [J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2006, 28 (8): 11-13.