

## 304 不锈钢扁钢丝轧制过程中的宽展研究

刘世锋 徐 萍 王伯健  
(西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

**摘 要** 研究了室温下 304 奥氏体不锈钢  $\Phi 5.5$  mm 盘条通过  $\Phi 160$  mm 二辊轧机经 33.1% ~ 68.0% 压下量单道次无张力轧制的宽展规律。结果表明,宽展的变化受轧制过程中金属流动均匀程度的影响:当压下率  $\Delta h/h_0$  小于 58.9% 时,随变形量增加,宽展增加明显,拟合得到宽展计算公式  $W_1' = 5.11(\Delta h/h_0) + 4.92$ ,当压下率大于 58.9% 时,变形较均匀,随压下量增加,宽展增加很小。

**关键词** 304 奥氏体不锈钢丝 平辊轧制 宽展计算 显微硬度

### A Study on Spread of 304 Stainless Steel Flat Wires during Rolling Process

Liu Shifeng, Xu Ping and Wang Bojian  
(Metallurgical Engineering College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

**Abstract** Rules of spread for 304 austenite stainless steel  $\Phi 5.5$  mm coil non-tension rolling by a  $\Phi 160$  mm two-high mill at ambient with 33.1% ~ 68.0% reduction has been studied. Results showed that the change of spread was influenced by metal flow uniformity during rolling: as reduction  $\Delta h/h_0$  was less than 58.9%, with increasing reduction ratio, the spread increased obviously, the formula of spread  $W_1' = 5.11(\Delta h/h_0) + 4.92$  was obtained and as the reduction was larger than 58.9%, with increasing reduction ratio, the spread increased a little due to more homogeneous deformation.

**Material Index** 304 Austenite Stainless Steel Wires, Flat Rolling, Lateral Spread Measurement, Microhardness

扁钢丝广泛用于锯条、弹簧、定时器发条、汽车雨刮器骨架及纺织行业大量使用的针布齿条、钢箔及钢片综等纺织器材<sup>[1]</sup>。实际生产中可采用平辊轧机,将拉拔到一定尺寸的规格圆截面钢丝轧制而得到具有大宽厚比的扁钢丝。成品的质量主要取决于两个关键因素:横向宽展和平滑的边部,不合理的工艺设计将导致成品的宽展达不到生产要求尺寸<sup>[2]</sup>。

近年来,钢丝的压扁轧制已受到越来越多的关注,特别是对钢丝轧扁过程中宽展的研究已陆续展开<sup>[3-6]</sup>。对于压下量相对较小的轧制第 1 道次的情况,可用 E. Sibel 宽展公式(1)计算扁钢丝的宽展:

$$\Delta B = C \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1)$$

式中:  $C$ - 钢材的宽展系数;  $\Delta h$ - 压下量;  $H$ - 钢材轧压前的厚度;  $R$ - 轧辊半径。

生产中普遍采用 C. И. 古布金公式:

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H} \quad (2)$$

以及修正式:

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H} + \Delta B_i \quad (3)$$

式中:  $\Delta B_i$ - 与钢材原始状态和轧压条件(前后张力、轧压道次、变形速度等)有关的宽展修正量;  $\mu$ - 摩擦系数。

此外,实际生产中还可遵循以下公式:

$$dn\pi = 2(b+h) \quad (4)$$

式中:  $d$ - 圆钢丝直径;  $b$ 、 $h$ - 分别表示扁钢丝的宽度和厚度;  $n$ - 系数, 1.05 ~ 1.25。

但公式(4)只是近似公式,为确保产品尺寸、力学性能合格,生产前仍需要进行小样模拟试验<sup>[7]</sup>。

最近 Kazeminezhad 等通过热轧高、低碳钢钢丝拟合得到的公式为:

$$\frac{W_1}{W_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.45} \quad (5)$$

$$\ln \frac{W_1}{W_0} = 0.02 \left(\frac{W_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}}\right)^{-2.1} \quad (6)$$

式中:  $W_0$ 、 $W_1$ - 压扁前后钢丝的宽度;  $h_0$ 、 $h_1$ - 压扁前后钢丝的厚度;  $R$ - 轧辊半径。

本文研究了室温条件下 304 奥氏体不锈钢盘条经不同压下量单道次轧制后的宽展规律,拟合了本实验条件下压扁轧制的宽展计算公式,并与其他理

论宽展公式的结果相比较,探讨了压扁轧制过程中宽展变化的原因。

### 1 实验材料及方法

实验采用的材料为经固溶处理后的商用 0Cr18Ni9(304) 不锈钢盘条,其化学成分如表 1 所示。

表 1 实验用 304 不锈钢盘条的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test 304 stainless steel rod coil/%

Ni	Cr	Fe	Mn	C	V	Co	Mo
8.35	18.48	71.32	1.19	0.04	0.01	0.43	0.18

将  $\Phi 5.5$  mm 的 304 不锈钢盘条经单道次轧制至不同厚度,轧制过程如图 1 所示,设备为  $\Phi 160$  mm  $\times$  170 mm 二辊轧机,轧制速度 0.2 m/s,润滑剂为固体石墨粉中加入适量的机油形成的糊状剂,采用无张力轧制。

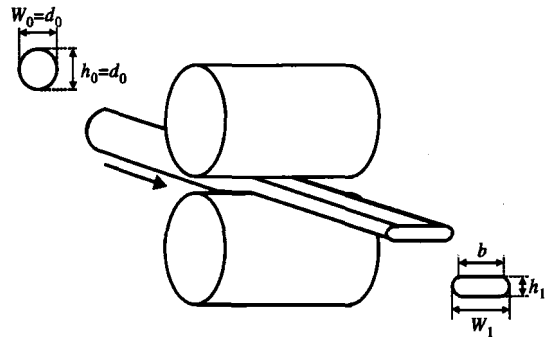


图 1 扁钢丝轧制工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rolling process of flat wire

### 2 实验结果及讨论

如表 2 所示为  $\Phi 5.5$  mm 的 304 不锈钢盘条单道次轧扁后实际宽展随着压下率的变化,并与已有的 Kazeminezhad 公式、近似公式(取系数  $n$  为 1.15)、E. Sibel 及古布金公式的计算结果相对比(公式中  $C$  等参数的取值见文献[6])。

表 2 实验结果与 4 种理论公式计算宽展结果的对比

Table 2 Comparison between results of spread of experiment and 4 theoretical formulas calculation

轧前厚(宽)度 $h_0$ /mm	轧后厚度 $h_1$ /mm	轧后宽度 $W_1$ '/mm	压下率 $\Delta h/h_0$ /%	Kazeminezhad 公式/mm	近似公式/ mm	E. Sibel 公式/ mm	古布金公式/ mm
5.5	3.68	6.60	33.1	6.72	5.39 ~ 7.11	6.46	6.43
5.5	3.34	6.90	39.3	7.02	5.72 ~ 7.45	6.74	6.71
5.5	2.92	7.36	46.9	7.46	6.15 ~ 7.87	7.12	7.09
5.5	2.62	7.64	52.4	7.83	6.45 ~ 8.17	7.41	7.38
5.5	2.26	7.88	58.9	8.37	6.81 ~ 8.53	7.78	7.75
5.5	2.06	7.90	62.5	8.73	7.01 ~ 8.73	7.99	7.96
5.5	1.76	8.00	68.0	9.37	7.31 ~ 9.03	8.32	8.30

表 2 表明,本实验轧制过程中,随着压下率( $\Delta h/h_0$ ,其中  $\Delta h$ 、 $h_0$  分别表示压下量和轧前厚度)的增加,盘条轧扁后的宽度不断增加。当压下率小于 58.9% 时,随压下率的增加,钢丝的宽展变化较大;当压下率大于 58.9% 时,不同压下率轧制后的宽度差别较小。拟合得到本实验条件下当压下率小于 58.9% 时,扁钢丝宽展与压下率的变化呈线形关系,即  $W_1' = 5.11 \frac{\Delta h}{h_0} + 4.92$ ,其中相关系数  $R = 0.99144$ ,拟合结果较为精确。

4 个理论公式中,  $\frac{\Delta h}{h_0} \leq 52.4\%$  时 Kazeminezhad 公式计算结果最接近实际测量数据,因此在该压下变形范围内上述公式适用于 304 不锈钢压扁轧制的宽展计算;当变形量继续增加时,宽展的计算值与实际值的偏离程度越来越大。近似公式的计算结果与实验结果的吻合程度与公式中的系数  $n$  有关,实验真实值总是落在公式的两个极值之间(对应最大和

最小的  $n$ ),因而存在参数  $m$  用于修正原公式中对应的  $n$ ,即  $b = \frac{(1.05 \sim 1.25) d\pi}{2} \cdot m - h$ ,计算得到本实

验变形过程中  $m = 0.89 \sim 1.16$ ,并随压下率的增加,计算结果越接近实际值。对比表 2 中的数据可以看出,E. Sibel 及古布金公式的计算精度是相同的,压下率小于 62.5% 的范围内,两个公式的计算宽展与实际宽展的差值逐渐减小,联系到古布金公式的修正宽展量,可近似计算得到单道次无张力轧制软态 304 盘条时的  $\Delta B_i = 0.13 \sim 0.27$  (mm),且  $\Delta B_i$  随变形增加而减小。因此本实验条件下,压下率小于 52.4% 时,Kazeminezhad 公式较接近实际测量结果,而通过对其他 3 个公式做适当的系数修正,也可提高其计算精度,用于在一定变形范围内的宽展计算。当变形较大时,宽展的增加较小,可近似用压下率为 58.9% 时计算得到的宽展来表示。

### 3 实验结果分析

钢丝压扁轧制的宽展与轧辊直径、摩擦系数、压

下量、前后张力等因素的影响。在本实验条件下,轧辊直径、轧制速度、润滑条件及无张力均为特定的,那么影响宽展的主要因素则为压下量的变化。以压下率在 58.9% 左右为界线,宽展变化规律显然不同,这可以从沿轧制和横截面两个方向上金属的变形来解释。

圆钢丝轧制变形区形状沿轧件宽度方向上是变化的,其中心大而两侧较小,分别为延伸区和宽展区<sup>[7]</sup>。由钢丝咬入至稳态轧制的过程中,变形区从线接触到面接触,逐渐增大。高度被压下的金属,同时向着宽度和长度方向流动,而压下的体积怎样分配给延伸和宽展,则根据最小阻力定律和体积不变定律而定。当压下率不大时,随着变形的增加,一方面高向上压下的金属体积增加,横向移动的体积必然增加;另一方面,变形区长度的增加使得纵向流动的阻力要增加,而边部为自由变形,金属横向运动的趋势增大,宽展的变化明显;当单道次压下率较大时,轧辊与钢丝的接触面积显著增大,变形区形状发生变化,沿宽展及轧制方向扩展,各个方向的摩擦阻力也在增加,当宽展到达一定值时,横向阻力显著增加,变形的金属主要向轧制的延伸方向流动,从而使得宽展变化较小。

如图 2 所示为扁钢丝横截面做硬度试验得到的硬度分布,反映了沿宽展方向上金属的流动规律。可以看出,当压下率  $\Delta h/h_0 = 33.1\%$  时,横截面上的硬度分布呈现明显的 X 形,对应钢丝产生最大应变的区域。随着变形量的增大,该 X 区域逐渐沿扁钢丝宽展方向扩展。当压下率达到 68% 时,除少部分中心的硬度较大及边部硬度相对较小以外,绝大部分区域硬度变化不大。硬度的分布反映了各个区域加工硬化的程度即变形的分布。因此,圆钢丝轧扁的过程中,钢丝与轧辊接触表面的附近区受摩擦阻力的影响最大,变形困难,变形量最小;而与垂直作用力轴向呈  $45^\circ$  交角的区域是产生滑移变形的最有利方位,变形量最大;在扁钢丝的边缘受摩擦阻力影响最小,变形较自由,因此整个截面上变形是不均匀的。但随着压下程度的增加,变形不断向接触区及宽展变形区扩展,当变形量较大时,除较小部分宽展区外整个截面可认为发生了均匀变形,此时宽展变化较小。

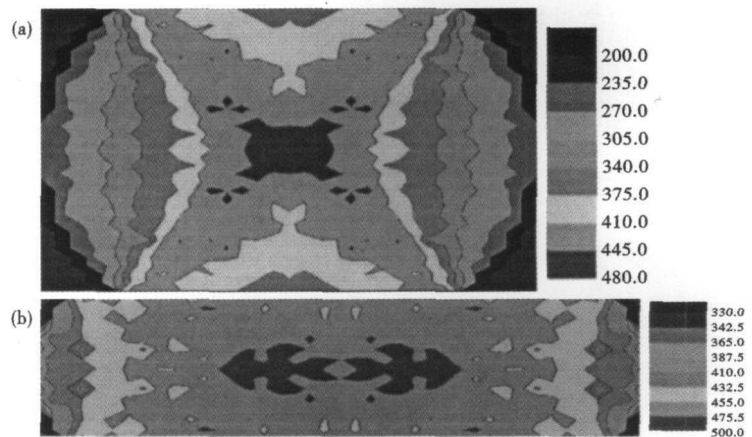


图 2  $\Phi 5.5$  mm 304 钢盘条经不同压下率的扁钢丝横截面的硬度分布图:(a)  $\Delta h/h_0 = 33.1\%$ ,  $b = 6.6$  mm; (b)  $\Delta h/h_0 = 68.0\%$ ,  $b = 8.0$  mm

Fig. 2 Distribution of micro-hardness at cross section of flat wire with different reduction rolling from  $\Phi 5.5$  mm 304 steel rod coil: (a)  $\Delta h/h_0 = 33.1\%$ ,  $b = 6.6$  mm; (b)  $\Delta h/h_0 = 68.0\%$ ,  $b = 8.0$  mm

#### 4 结论

(1) 本实验研究了 304 奥氏体不锈钢盘条单道次轧制过程中的宽展变化,当  $\Delta h/h_0 \leq 58.9\%$  时,拟合得到扁钢丝的宽展计算公式:  $W_1' = 5.11 (\Delta h/h_0) + 4.92$ ,大于 58.9% 宽展增加较小。

(2) 宽展的变化取决于扁钢丝内部金属流动的均匀程度。当压下率较小时,由于变形的不均匀,宽展明显;变形比较大时,朝着宽展的金属流动趋势大致相同,宽展趋于不变。

#### 参考文献

- 1 师晓莉,宋清华,王伯健,等.平辊压扁轧制纺织器材专用超窄钢带的工艺研究.纺织器材,2007,34(2):68
- 2 Kazeminezhad M, Karimi Taheri A. An Experimental Investigation on the Deformation Behavior during Wire Flat Rolling Process. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160: 313
- 3 Vallengano C, Cabanillas P A, Garcia-Lomas F J. Analysis of Deformations and Stresses in Flat Rolling of Wire. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195: 63
- 4 Kazeminezhad M, Karimi Taheri A. The Prediction of Macroscopic Shear Bands in Flat Rolled Wire Using the Finite and Slab Element Method. Materials Letters, 2006, 50: 1
- 5 Kazeminezhad M, Karimi Taheri A. Theoretical and Experimental Investigation on Wire Flat Rolling Process Using Deformation Pattern. Mater Design, 2005, 26: 99
- 6 赵虎.超窄不锈钢带的成型工艺及组织性能研究[硕士论文].西安:西安建筑科技大学,2006
- 7 戴宝昌.重要用途线材制品生产技术.北京:冶金工业出版社,2001

刘世锋(1978-),男,硕士,讲师,不锈钢制品的制备工艺及设备开发研究。

收稿日期:2009-01-07