

文章编号:1000-582X(2012)10-024-06

轧制润滑对 H 型钢翼缘宽展的影响

赵景云, 臧 勇

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 轧制工艺润滑能有效减少轧制力, 降低能耗, 但是在 H 型钢轧制过程中引入工艺润滑造成了翼缘宽展不均、腹板偏心等缺陷。针对 H 型钢工艺润滑生产中遇到的问题, 建立了 H 型钢万能轧制过程的有限元模型, 对轧辊各部位不同摩擦分布情况进行了仿真模拟, 深入研究了轧制润滑影响 H 型钢翼缘宽展的机理。通过分析不同工况条件下轧件变形区内的摩擦力分布、金属流动等因素, 解释了翼缘宽展的机理并得到了翼缘宽展的规律。分析结果表明, 对 H 型钢腹板进行轧制工艺润滑能有效减少轧制力、降低能耗; 在其它工艺参数一定的情况下, 翼缘宽展随翼缘及轧辊间的摩擦系数增大而减小, 且基本上呈线性关系; 在翼缘的二个表面中对内侧的摩擦系数更为敏感。现场工艺润滑方案设计时应充分考虑宽展对润滑轧辊不同位置时的敏感性差异。

关键词: H 型钢; 万能轧制; 润滑; 翼缘宽展; 摩擦

中图分类号: TG335.4

文献标志码: A

Effects of rolling lubrication on flange lateral spread of H-beam

ZHAO Jingyun ZANG Yong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: Although rolling lubrication can decrease rolling forces and energy consumption, it also causes defects such as uneven flange lateral spread and web eccentricity during H-beam rolling process. To solve the problem caused by lubrication, finite element models of H-beam universal rolling were established. The different friction conditions of the contact surface between the rollers and work piece were simulated individually. The mechanism of rolling lubrication impacting on flange spread was studied, and the law of flange lateral spread was gained by analyzing the factors such as friction distribution and metal flow in different situations. Analytical results show that lubrication in rolling process can effectively decrease rolling forces and energy consumption. In the condition that technological parameters except friction are fixed, the flange lateral spread decreases in a linear way as the friction coefficient between flange and roller increases, and the flange lateral spread is more sensitive to the friction of flange's the inner side. Design of lubrication process should take full account of the sensitiveness differences of flange lateral spread to the lubrication conditions of different parts of roller surface.

Key words: H-beam; universal rolling; lubrication; flange lateral spread; friction

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA03Z515)

作者简介: 赵景云(1984-), 女, 博士研究生, 主要从事 H 型钢轧制方向研究, (E-mail)l4ben@163.com。

臧勇(联系人), 男, 北京科技大学教授, 博士生导师, (Tel)010-62334441; (E-mail)yzang@ustb.edu.cn。

轧制工艺润滑最先应用在热轧板带的生产上,由于它可以有效地降低能耗,并减少轧辊磨损,提高轧辊使用寿命,已在钢材轧制生产中得到了广泛的应用^[1-6]。目前型钢生产中也逐渐开始引入工艺润滑。某型钢厂在 H 型钢万能轧制中引入工艺润滑以后,轧制力降低,尤其在减轻轧辊磨损方面表现出很好的效果,毫米平均过钢量可提升约 50%,有效地延长了工装使用寿命,提高了设备工作效率,改善了产品表面质量;但也出现了腹板偏心、翼缘宽展改变等问题,影响了产品的质量。跟踪研究表明,不同规格的 H 型钢的宽展对轧制润滑的敏感度也不同,这为质量的控制带来了困难。为了将工艺润滑更好的应用到 H 型钢生产中,需要研究轧制润滑对 H 型钢翼缘宽展的影响规律。

到目前为止,以前对 H 型钢翼缘宽展的研究多集中在立辊压下量、翼缘宽度等方面^[7-8]。吉田素久通过对不同规格的 H 形铅制轧件进行实验,得出不同规格的 H 型钢翼缘宽展量与翼缘、腹板的压下差呈线性关系;通过考虑翼缘和腹板互相影响系数,修正线性斜率,可以用同一参数预测不同的 H 型钢规格的宽展量^[9]。赵松筠根据体积不变条件导出了计算 H 型钢翼缘宽展变形的理论公式,但是该公式主要适用于翼缘和腹板压下系数相等的情况,且未考虑摩擦系数的影响^[10]。冯宪章、谢红飙等人研究了立辊锥角对翼缘宽展的影响^[11-12]。孙会朝研究了 UF 轧制摩擦系数对翼缘宽展的影响,但也未分开考虑平辊和立辊摩擦系数的影响^[13]。轧辊不同位置的摩擦系数对 H 型钢金属流动规律以及变形特性的影响更鲜见研究。

结合现场轧制润滑遇到的问题,分析不同工况摩擦状态下轧件变形区的压力分布、摩擦力分布和金属流动规律,以期解析翼缘宽展机理,得出翼缘在轧辊各位置不同摩擦条件下的宽展规律,为 H 型钢的轧制润滑提供技术支持。

1 大 H 型钢万能轧制有限元模型

选择 H496×199 规格连轧第 2 道次中的 UR 轧制道次进行研究,首先建立该道次的有限元仿真模型。如图 1 所示,其中上下 2 个平辊为主动辊,左右 2 个立辊为从动辊。H 型钢在平辊和立辊组成的 H 孔型中进行轧制。

1.1 有限元模型的建立

1.1.1 材料模型

取得 Q345 轧制前的坯料进行了不同温度、不同变形速率下的变形抗力实验,得到 Q345 的变形

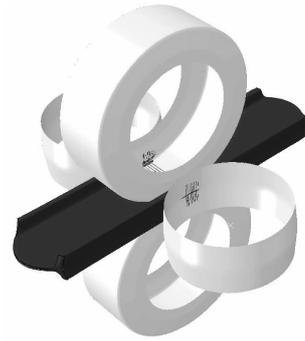


图 1 UR 轧制模型

抗力曲线。将该材料的应力—应变数据引入有限元模型。

1.1.2 接触与摩擦

在轧制过程中,采用面对面接触方式进行轧辊与轧件之间的接触定义,采用库伦摩擦方式进行摩擦的定义。一般热轧生产中的摩擦系数为 0.2~0.4^[14]。改变轧制润滑液浓度直接效果是改变了轧辊和轧件间的摩擦系数。本模型在不同分析工况中改变轧辊和轧件之间的摩擦系数,摩擦系数设定范围为 0.24~0.36。

1.1.3 温度边界条件

为了得到 H 型钢轧制过程中的温度条件,采用非接触式红外热像仪 G90 对轧制过程进行了连续温度采集。得到了 H 型钢表面温度场。

在 H 型钢轧制模型中,在腹板和翼缘位置设置不同的换热系数,通过前面道次的轧制过程仿真得到该轧制道次的 H 型钢整体模型的温度场,计算得到的 H 型钢的表面温度和测试数据相符,说明模型中的温度场基本合理。

1.1.4 H 型钢轧制模型

由于万能轧制的孔型和载荷上下左右对称,所以建立第二道次 UR 轧制道次的 1/4 有限元模型进行仿真模拟,并设轧辊为刚性,不计机架间张力。表 1 所示为第二道次 UR 轧制的主要工艺条件。

在仿真分析中采用正交右手坐标系:Z 向为轧件长度方向(纵向),正向为前,负向为后;Y 为翼缘高度方向(垂直方向),正向向上,负向向下;另一水平方向为 X 向,正向指向翼缘,负向指向腹板。

表 1 UR 轧机主要的轧制条件

材料	腹板压下量/mm	翼缘压下量/mm	轧制速度/(m·s ⁻¹)
Q345	2.6	9	4.5

1.2 有限元模型的验证

图 2 所示为第二道次的轧制力测试数据, F_{UR-H} 、 F_{UR-V} 、 F_{UE} 分别为 UR 轧机水平轧制力、UR 轧机立辊轧制力和 UE 轧机水平轧制力。万能轧制有限元模型中的稳定轧制段的平均轧制力为 5.85×10^3 kN, 仿真和实测轧制力的误差约为 1.4%, 证明所建立的有限元轧制模型基本正确, 可用于后面翼缘宽展问题的研究。

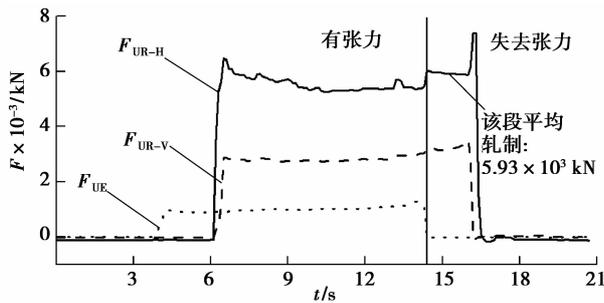


图 2 实测轧制力

2 轧制润滑对轧制力能参数的影响

2.1 分析工况

轧制润滑测试试验中, 改变润滑液的浓度造成的直接效果是改变了轧辊和轧件之间的摩擦系数; 另外因接触状态不同, 相同的润滑条件也会形成不同的摩擦效果。所以轧制润滑对翼缘宽展的影响主要就是不同轧制接触区的摩擦系数及其分布的影响问题。

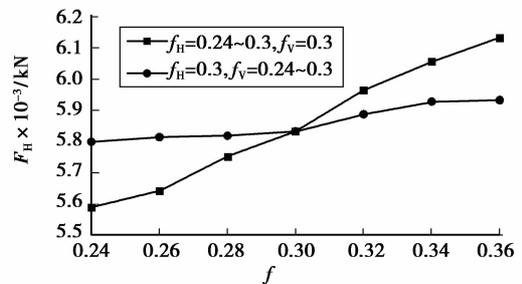
根据不同润滑情况设定轧辊不同位置的摩擦系数, 得到不同的工况, 如表 2 所示: 其中 f_H 为平辊和腹板之间的摩擦系数, f_V 为翼缘内外侧和轧辊的摩擦系数, f_{V1} 为平辊侧面和翼缘内侧的摩擦系数, f_{V2} 为立辊和翼缘外侧的摩擦系数。

表 2 计算工况

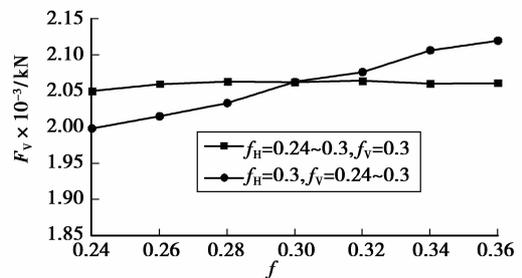
改变 f_H ($f_{V1}=0.3, f_{V2}=0.3$)							
工况	1	2	3	4	5	6	7
f_H	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
改变 f_V ($f_H=0.3$)							
工况	1	2	3	4	5	6	7
f_V	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
改变 f_{V1} ($f_H=0.3, f_{V2}=0.3$)							
工况	1	2	3	4	5	6	7
f_{V1}	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
改变 f_{V2} ($f_H=0.3, f_{V1}=0.3$)							
工况	1	2	3	4	5	6	7
f_{V2}	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36

2.2 摩擦对轧制力能参数的影响

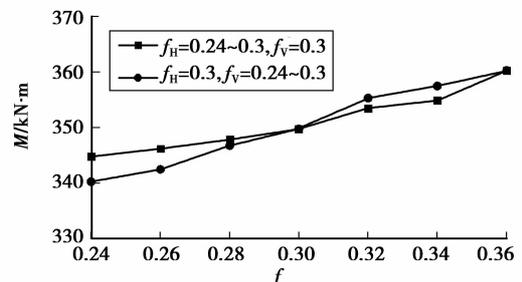
利用上节模型, 通过计算可得不同工况条件下的轧制稳定段的平均轧制力和轧制扭矩, 如图 3 所示。保持 $f_V=0.3$ 不变, f_H 从 0.24 变化到 0.3, 平辊轧制力增加了 9.7%; 立辊轧制力增加了 0.5%, 基本未变; 平辊的轧制扭矩增加了 4.5%。保持 $f_H=0.3, f_V$ 从 0.24 变化到 0.3, 平辊轧制力增加了 2.3%; 立辊轧制力增加了 6.1%; 平辊的轧制扭矩增加了 5.9%。仿真结果表明: 轧制润滑, 尤其是对腹板位置的润滑能有效减小平辊轧制力, 但对立辊轧制力影响不大; 随着平辊摩擦系数的降低, 轧制扭矩下降。立辊润滑对平辊轧制力亦有影响, 但影响不大; 能减少立辊轧制力和降低平辊扭矩。这些和实际生产中测试到的规律吻合。



(a) 水平辊轧制力



(b) 立辊轧制力



(c) 水平辊扭矩

图 3 摩擦系数对力能参数的影响

3 轧制润滑对翼缘宽展的影响

轧件翼缘顶端的 Y 向位移量为轧件翼缘的宽展

量。以 $f_H=0.3$ 、 $f_V=0.3$ 该工况为例,如图 4 为翼缘沿轧件长度方向的宽展规律,可以看出轧件稳定段的翼缘宽展量较小,变化平稳;轧件头部和尾部的宽展量较大,且变化很大,所以仅分析轧件稳定段的翼缘宽展规律。

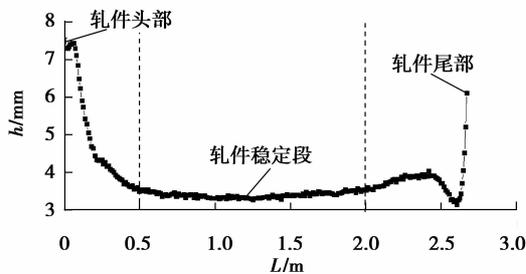


图 4 翼缘沿轧件长度方向的宽展量

图 5~6 为不同工况条件下稳定轧制段翼缘的平均宽展量,可以看出在其他工艺条件不变的情况下:

1) 轧辊和翼缘间摩擦系数对翼缘的宽展起主要作用,而水平辊和腹板间的摩擦系数对翼缘宽展的影响不大;

2) 随着侧壁摩擦系数的降低,翼缘宽展量增大,宽展量与摩擦系数间呈近似线性关系,线性拟合方程为 $h = -8.433f_v + 4.514$,线性相关系数为 0.996。

3) 在翼缘两侧的摩擦系数中,内侧摩擦状态对翼缘宽展的影响更大。

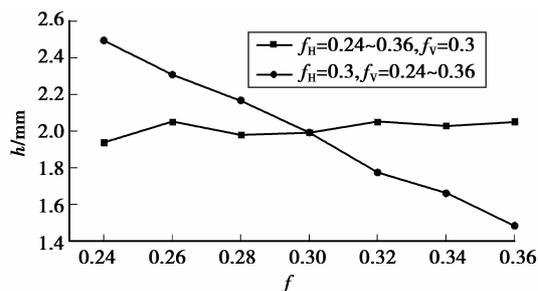


图 5 f_H 、 f_V 对翼缘宽展的影响

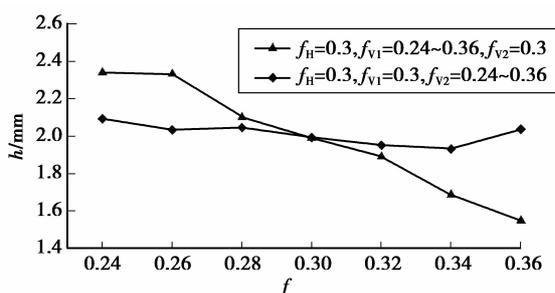


图 6 f_{V1} 、 f_{V2} 对翼缘宽展的影响

4 摩擦系数对翼缘宽展的影响机理

4.1 轧制变形区的金属流动及受力分析

H 型钢万能轧制是在主动的水平辊和被动的立辊组成的四辊孔型内进行,同时存在两种不同的变形区,金属流动非常复杂^[15-16]。以典型工况($f_H=0.3$ 、 $f_V=0.3$)为例分析轧件变形区的金属流动趋势。立辊咬入时翼缘外侧金属向内流动,内侧金属在平辊侧面的带动下向圆角流动,整个翼缘部分的金属呈现内翻现象。在平辊未咬入前,翼缘底部一部分金属受立辊的压下向腹板位置移动,翼缘顶端一部分金属受立辊挤压向上流动;另一部分金属以立轧变形区的中性面为界分别相对立辊向前和向后流动;平辊咬入后,腹板位置的金属被压下,腹板金属向下流动;出口位置前,腹板靠近圆角的金属向翼缘方向流动;以腹板变形区的中性面为界,前滑区的金属相对轧辊向前流动,后滑区的金属相对轧辊向后流动。

结合以上金属流动规律可以看出:腹板变形区金属的横向流动先由外流向内部,受平辊向外的摩擦力;接近出口位置时靠近圆角位置的少部分金属流向翼缘,受平辊向内的摩擦力;腹板变形区沿纵向以中性面为界分为前滑区和后滑区,两个区域所受摩擦力方向相反,均指向中性面。翼缘外侧的金属沿纵向受指向中性面的摩擦力,高度方向由于宽展,金属向上流动,受到立辊向下的摩擦力;翼缘内侧金属在高度方向受平辊侧面向下相对运动的影响,主要受向下的摩擦力,而纵向摩擦力与外侧相同,受指向中性面的摩擦力。

表 3~4 为不同在不同摩擦系数下轧件腹板和翼缘所受摩擦力情况。正负号代表受摩擦力的方向。由表中可以看出随着翼缘内外表面的摩擦系数增大,翼缘内外受到的摩擦力均增大,阻碍金属向上流动,另一方面,纵向的摩擦力也增大,阻碍翼缘金属的纵向延伸;这其中以翼缘内侧向下的摩擦力随着摩擦系数的增大变化最为剧烈,将有更多的金属由轧辊代入圆角位置。根据体积不变以及最小阻力定律,翼缘金属将向阻力较小的方向流动,翼缘高度方向减少的金属体积将流向腹板或者转变为翼缘的长度方向的延伸,或者二者兼有。腹板的摩擦增大时,各向摩擦力均增加。但由于立辊的限制,腹板金属横向流动很小,另由于腹板金属横向受力为双向,摩擦力增加时,流向翼缘的金属和流向腹板的金属均减少,所以对腹板的摩擦系数对翼缘的宽展作用不大。

表 3 不同工况下翼缘内外侧 Y 向和 Z 向的摩擦力

kN

轧件位置	$f_H=0.3, f_V=0.24\sim0.36$							
	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	
翼缘内侧	Y 向负向	-143.33	-156.85	-174.21	-186.04	-201.16	-216.55	-228.56
	Z 向正向	35.13	39.75	43.61	47.40	55.10	59.19	64.84
	Z 向负向	-62.73	-70.56	-80.63	-82.87	-85.90	-95.90	-97.52
翼缘外侧	Y 向负向	-86.51	-91.87	-97.42	-101.03	-105.63	-111.10	-115.027
	Z 向正向	92.40	100.52	107.87	113.90	120.10	125.70	130.67
	Z 向负向	-95.57	-103.38	-108.88	-116.22	-125.50	-133.69	-140.33

表 4 不同工况下腹板 X 向和 Z 向的摩擦力

kN

轧件位置	$f_H=0.24\sim0.36, f_V=0.3$							
	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	
腹板	X 向正向	64.11	66.78	70.65	73.40	75.91	77.81	82.01
	X 向负向	-38.28	-42.23	-45.86	-49.87	-53.44	-57.00	-60.38
	Z 向正向	345.50	366.41	390.64	414.04	435.37	452.69	470.00
	Z 向负向	-108.06	-124.44	-142.39	-155.85	-172.73	-187.30	-205.04

4.2 轧制变形前后的金属位移

轧制变形前后的金属位移分为沿轧件长度方向的位移和横截面内的位移。不同轧制规格、不同道次和不同条件下的金属位移规律均不同。由前面分析可知腹板位置的摩擦系数改变对金属变形影响不大,在此主要分析翼缘位置摩擦系数改变的工况。

如图 7 所示,翼缘位置的摩擦系数改变时轧件横截面金属垂直方向流动的等值线图。可见随着 f_V 增大,翼缘内侧垂直方向的零位移线上移,甚至

到达翼缘顶端。这表明,受摩擦力增大影响,金属受挤压向翼缘顶端流动的阻力变大,宽展减小。这和前面的变形区的金属受力分析吻合。随着翼缘位置的摩擦系数增大,翼缘宽展减小,其多余的金属一部分流向腹板;一部分转变为翼缘的延伸,这将导致其长度方向的延伸率增加。因此,翼缘摩擦系数的增大,导致变形难度增大,轧制力和轧制力矩提高、翼缘宽展减小,同时将会使翼缘的长度方向延伸率增大,如图 8 所示: f_V 为翼缘两侧的摩擦系数, η 为翼缘的延伸系数。所以工艺润滑引起的摩擦系数变化也会导致 H 型钢翼缘和腹板延伸率的变化,产生新的匹配问题。这是应当注意的。

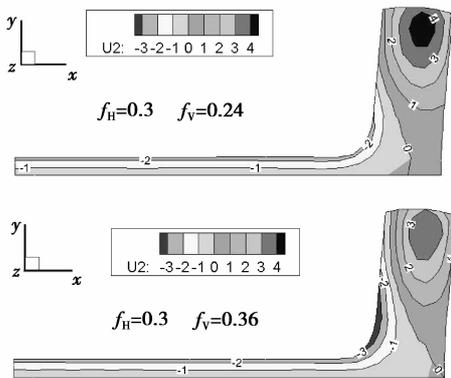


图 7 f_V 改变时横截面垂直位移等值线图

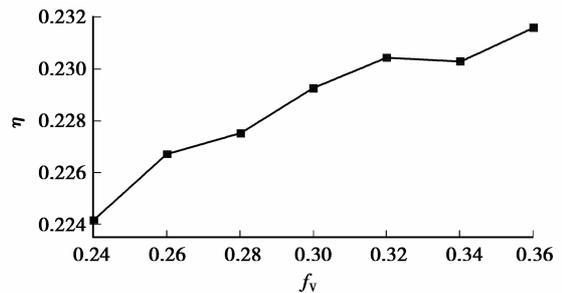


图 8 翼缘延伸率随 f_V 改变

5 结 论

1) 轧制润滑降低轧制力和轧制扭矩,减少耗能。平辊圆周面的摩擦系数对减少轧制力起最主要的作用。

2) 通过分析 H 型钢轧制变形区的受力及变形,对变形前后的金属流动机理做出了很好的解释,进而证明了翼缘的宽展规律。

3) 翼缘内侧和轧辊侧面的摩擦系数对翼缘宽展起主要作用,并且翼缘的宽展量和翼缘的摩擦系数呈线性关系。线性拟合方程为 $h = -8.433f_v + 4.514$, 线性相关系数为 0.996。

4) 翼缘宽展量对平辊侧面的摩擦系数最为敏感,所以控制平辊侧面的润滑浓度,可以有效控制翼缘的宽展量。

参考文献:

- [1] 孙建林. 轧制工艺润滑原理、技术与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
- [2] Amnon S, Lenard J G. The effect of lubrication on mill loads during hot rolling of low carbon steel strips[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 97(1/2/3):61-68.
- [3] Tieu A K, Jiang Z Y, Lu C. A 3D finite element analysis of the hot rolling of strip with lubrication[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125/126:638-644.
- [4] Jiang Z Y, Tieu A K, Zhang X M. Finite element modelling of mixed film lubrication in cold strip rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/2/3):242-247.
- [5] Azushima A, Xue W D, Yoshida Y. Lubrication mechanism in hot rolling by newly developed simulation testing machine [J]. CIRP Annals; Manufacturing Technology, 2007,56(1):297-300.
- [6] Azushima A, Xue W D, Aoki K. New evaluation method of lubricity of hot-rolling oil using SRV test machine[J]. Japanese Society of Tribologists, 2006, 51(7):532-538.
- [7] 张云田,周成. 轧制 H 型钢边部宽展的研究[J]. 钢铁, 1988(8):73.
ZHANG Yuntian, ZHOU Cheng. Flange spread in Hsteel rolling[J]. Iron and Steel, 1988(8):73.
- [8] Xu X D, Bai J I, Wang B X, et al. Research on flange spread of H-beam on universal mill[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2006, 13(1):27-30,39.
- [9] 吉田素久, 张玉刚. H 型钢万能轧制时翼缘的展宽特性研究[J]. 钢铁译文集, 1998(2):13-14.
Jitian S J, ZHANG Yugang. The characteristics of flange spread in H-beam universal rolling [J]. Translations Corpus of Iron and Steel,1998(2):13-14.
- [10] 赵松筠. 在万能孔型中轧制 H 形轧件时凸缘变形的研究[J]. 钢铁, 1985(9):25-31.
ZHAO Songyun. A study on the deformation of flanges in H-beam[J]. Iron and Steel, 1985(9):25-31.
- [11] 冯宪章, 刘才, 江光彪. 立辊锥角对 H 型钢翼缘宽展的影响[J]. 钢铁, 2004, 39(10):43-45.
FENG Xianzhang, LIU Cai, JIANG Guangbiao. Effect of vertical rolled cone angle on H-beam flange lateral spread[J]. Iron and Steel, 2004, 39(10):43-45.
- [12] 谢红飙, 肖宏, 张国民, 等. 立辊锥角对 H 型钢翼缘宽展和轧制力的影响[J]. 燕山大学学报, 2005, 29(1):34-37.
XIE Hongbiao, XIAO Hong, ZHANG Guomin, et al. Effect of cone angle of vertical roll on flange spread and rolling load during H-beam rolling [J]. Journal of Yanshan University, 2005,29(1):34-37.
- [13] 孙会朝, 周俊陵, 许荣昌, 等. 接触摩擦对 H 型钢万能轧制影响的仿真分析[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(2):143-146.
SUN Huizhao, ZHOU Junling, XU Rongchang. Simulation of the friction influence on H-beam universal rolling[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010,33(2):143-146.
- [14] 曹鸿德. 塑性变形力学基础与轧制原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
- [15] Jin X G, Liu Y L, Lian J C, et al. A three-dimensional analysis of the universal beam tandem rolling process: part I. deformation analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102(1/2/3):59-64.
- [16] Komori K, Koumura K. Simulation of deformation and temperature in multi-pass H-shape rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1/2):24-31.

(编辑 张小强)