

大规格H型钢开坯轧制变形分析

李彬¹,曹杰¹,张波¹,闫军¹,吴保桥²,邢军²

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院,安徽 马鞍山 243032;2. 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心,安徽 马鞍山 243000)

摘要:借助有限元分析软件MSC.Marc,对大规格H型钢开坯轧制过程进行有限元模拟,分析轧件的变形特点。结果表明:大规格H型钢开坯轧制时轧件各部位变形不均匀,翼缘与腹板的变形不一致;腹板部位“舌头”的产生是由于轧件各部位延伸不均匀所致,腹板部位较薄导致轧制过程易出现倾斜失稳现象。开发适合大规格H型钢轧制的孔型系统具有重要意义。

关键词:H型钢;开坯轧制;有限元模拟;变形

中图分类号:TG 335.4 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2017.04.003

Deformation Analysis of Break-down Rolling of Large H-beam

LI Bin¹, CAO Jie¹, ZHANG Bo¹, YAN Jun¹, WU Baoqiao², XING Jun²

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; 2. Technology Center, Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd., Ma'anshan 243000, China)

Abstract: With the aid of finite element analysis software MSC.Marc, the process of break-down rolling of large H-beam with profiled billet was simulated, and the deformation characteristics of workpiece were analyzed. The results show that deformation of different parts of workpiece is inhomogeneous during rolling, the deformation of flange and web is inconsistent. The "tongue" in the site of the web is caused by the uneven extension of various parts of the workpiece; and the thinner web site leads to the slope instability in the rolling process. It is significant to develop a proper pass system for large H-beam rolling.

Key words: H-beam; break-down rolling; finite element simulation; deformation

H型钢因具有截面模数大、抗弯能力强、质量轻等优点被广泛应用于桥梁、厂房、高层建筑、港口、地铁工程、石油化工等领域^[1-3]。H型钢断面形状复杂,一般通过开坯和万能轧制成材。开坯轧制时,使用异形坯轧制H型钢能够减小轧制力,减少轧辊磨损,降低生产成本^[4]。但是,轧制过程中,轧件腹板和翼缘的延伸不均匀,致使腹板部位产生舌头^[5]。轧件在异形孔和箱形孔中存在轧件不能充满孔型、变形不一致的现象^[6-7]。万能轧制时,腹板与翼缘的变形互相牵制,加之温度和孔型等因素的影响,致使H型钢的变形复杂,采用传统的方法难以分析轧件的变形特点。

随着数值计算的不断发展,数值模拟在H型钢轧制过程中的应用越来越广泛,采用有限元数值模拟的方法不仅可预测H型钢的可制造性和产品性能,而且可减少实验成本。曹杰等^[8]借助有限元软件MCS.Marc研究H型钢万能轧制的金属变形特点,发现轧件出变形区后出现腹板增厚现象,为使腹板与翼缘延伸一致,避免轧制过程中出现缺陷,翼缘的压下率应大于腹板的压下率;赵学武等^[9]借助有限元软件分析了轧件在万能轧制不同阶段宽展在孔型中的变化规律;朱国明等^[10]利用有限元软件对轧件的变形和轧制区内应力场的分布进行了分析。纵观目前研究现状,学者们主要对中小规格H型钢热轧过程轧制阶段进行研究,对大规格H

收稿日期:2017-09-08

基金项目:安徽省科技攻关计划项目(1501021003)

作者简介:李彬(1991—),男,安徽颍上人,硕士生,主要研究方向为H型钢轧制孔型系统及规程优化。

通信作者:曹杰(1971—),男,安徽砀山人,博士,副教授,主要研究方为金属塑性成型理论与工艺。

型钢开坯轧制阶段的研究鲜有报道。为此,笔者利用有限元软件MSC. Marc,模拟大规格H型钢多道次开坯轧制过程,以期获取大规格H型钢开坯过程的变形特点。

1 有限元模型的建立

1.1 开坯孔型与轧制规程

模拟轧制的大H型钢产品规格为 $700\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 13\text{ mm}\times 24\text{ mm}$,采用连铸异形坯进行轧制,开坯孔型见图1。由于轧件的对称性,模拟过程中取1/4轧件为研究对象,孔型具体的尺寸为实际生产采用的尺寸。开坯轧制时,轧件首先在1号异形孔轧制7个道次;然后进入2号孔型轧制3道次,为保证轧件的外形和尺寸,第11道次将轧件翻转 90° 轧制;最后进入3号异形孔,轧制3道次后获得万能轧制的初始坯料,具体的开坯轧制规程如表1。

1.2 坯料断面与尺寸

坯料为连铸异形坯,横断面尺寸为 $750\text{ mm}\times 450\text{ mm}\times 120\text{ mm}\times 105\text{ mm}\times 75\text{ mm}$,如图2所示。开坯完成后轧件尺寸为 $883\text{ mm}\times 302\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 。模拟计算过程中,为缩短求解时间,减少网格划分的单元数量,单元数量取15 699~29 043个。同时在满足稳定轧制长度的前提下,将轧件长度缩短为900 mm。模拟材料材质为C22,热物理性能参数和变形抗力模型取自MSC.Marc材料库。

1.3 初始条件与边界条件

初始条件为:轧制开始温度 $1\ 180\text{ }^\circ\text{C}$,均匀温度场;各道次轧件断面形状和尺寸均取自上一轧制道次,轧制温度见表1;轧辊表面温度取 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 。边界条件的设定参照文献[11],具体如下。

1) 摩擦边界条件 整个轧制过程中,轧件为变形体,轧辊视为恒温刚性体,轧件与轧辊刚性接触,两者之间的摩擦采用库仑摩擦,摩擦系数0.35。

2) 传热边界条件 包括轧件与周围环境的对流与辐射换热,轧件与轧辊接触时的接触传热。轧件与环境的对流换热系数取 $0.02\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,轧件与环境间的辐射换热系数根据辐射定律进行转换,热辐射率取0.8;轧件与轧辊之间的接触热传导一般用接触热传导系数来简化处理,热传导系数取 $15\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$;轧件对称面采用绝热边界处理;由于金属变形和接触面的摩擦使轧件产生温升,其热功转换系数取0.9。

2 模拟结果与分析

2.1 轧件变形

选取部分道次轧件稳定轧制阶段的形状,分析轧制过程中轧件的变形状况,图3为根据模拟轧制结果提取的部分道次稳定轧制阶段的轧件断面形状,图中的数字均为轧制道次。由图3可看出,大规格H型钢在开

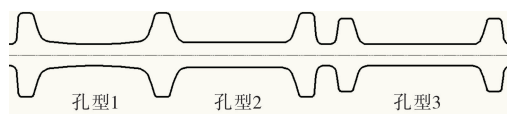


图1 开坯孔型

Fig. 1 Groove shape of break-down rolling

表1 开坯轧制规程

Tab. 1 Rolling schedule of break-down rolling

道次号	孔型编号	辊缝/mm	轧制速度/(m/s)	轧制温度/ $^\circ\text{C}$
1	1	115	2.5	1 180
2	1	92	3.0	1 170
3	1	83	3.0	1 160
4	1	76	3.0	1 150
5	1	70	3.0	1 140
6	1	65	3.0	1 130
7	1	60	2.5	1 120
8	2	49	3.0	1 110
9	2	44	3.5	1 100
10	2	40	3.5	1 090
11	2	825	3.0	1 080
12	2	37	3.5	1 070
13	3	36	3.0	1 060
14	3	33	3.5	1 055
15	3	30	4.0	1 050

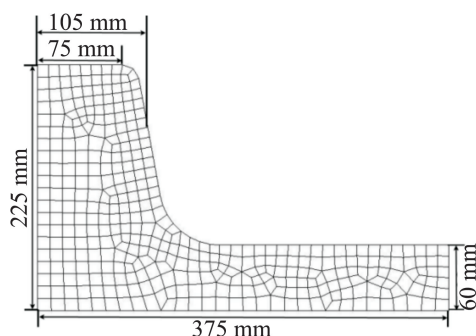


图2 1/4坯料断面形状与尺寸

Fig. 2 Section shape and size of 1/4 billet

坯阶段,轧件在异形孔中主要变形是腹板减薄,翼缘厚度基本不发生变化,整个轧件的宽度变长,高度变小,各部位变形很不均匀。

由于轧件各部位产生了不均匀变形,在开坯过程中,随着轧制道次的增加,轧件腹板部位产生“舌头”。除第一道次外,其余道次坯料的形状和尺寸均取自上一道次轧件断面,且经过网格重新划分和扩展得到,所以此处研究的是单道次轧制产生的“舌头”长度。第9道次轧制结束,腹板部位“舌头”长度在所有轧制道次中最大,如图4所示。由图4可见,腹板端部形状呈抛物线型,在中心线处“舌头”长度最大为69.6 mm,靠近翼缘的部位长度最小,接近0。

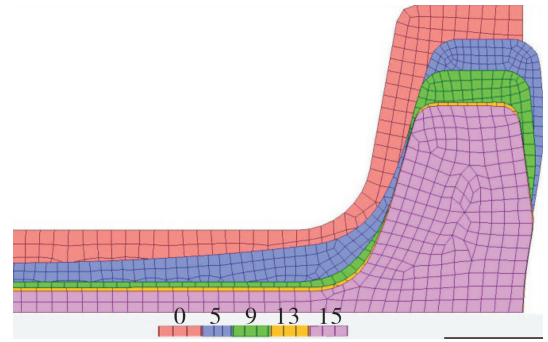
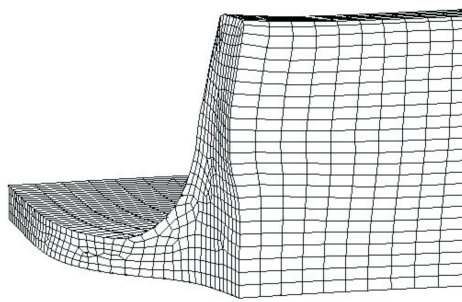
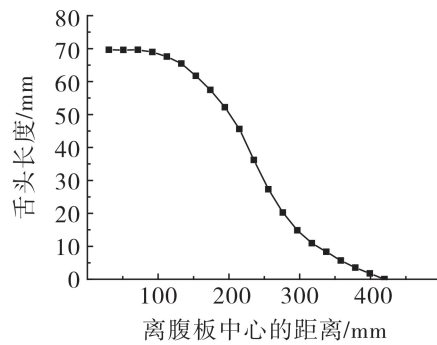


图3 部分道次轧件轧后断面形状

Fig. 3 Section shape of partial pass workpiece after rolling



(a) “舌头”形状



(b) “舌头”尺寸分布

图4 轧件“舌头”形状

Fig. 4 Shape of the tongue of workpiece

为研究轧件腹板部位“舌头”形成的原因,分别测量轧制前后轧件腹板与翼缘沿轧制方向的长度,两长度相比得到轧件各部位的延伸系数,结果如表2。

由表2可知:第1道次腹板延伸系数为1.00,说明腹板基本没有发生变形,轧辊主要对翼缘作用,轧件腹板部位不会产生“舌头”;第5道次轧制过程中,轧件腹板部位的延伸系数大于翼缘部位,腹板部位产生“舌头”,“舌头”长度为23.6 mm;第9道次H型钢开坯轧制中,腹板延伸系数较大,翼缘部位延伸系数较小,两者延伸系数相差0.15;轧件各部位变形很不均匀,变形主要集中在腹板部位,腹板部位产生“舌头”,“舌头”长度为69.6 mm;轧件在第13道次开坯轧制中,延伸系数最大的部位出现在翼缘部位,最大值为1.13,腹板延伸系数仅为1.03,轧件腹板部位不产生“舌头”。由表2还可看出,当腹板部位延伸系数大于翼缘部位延伸系数时,轧件腹板部位产生“舌头”,两者延伸系数差值越大,轧件腹板“舌头”长度越大。

“舌头”是大H型钢在开坯过程中,轧件各部位变形不均匀的宏观表现,“舌头”长度越大,说明轧件不均匀变形越严重。结合图3及表2可以看出,大规格H型钢在轧制过程中,对腹板的压下量较大,而对翼缘厚度的压下量较小,变形的不均匀导致轧件各部位延伸不均匀。另外,由于H型钢腹板中间部位受两边翼缘的约束相对较小,所以此部位“舌头”长度最大。

为进一步分析轧件各部位变形的不均匀性,分别选取第1,5,9,13道次稳定轧制阶段的轧件断面,得到等效应变分布云图,如图5。由图5可知:大规格H型钢在开坯过程中,由于异形孔的限制,加之异形坯断面形状的复杂性,轧件腹板变形量较大,而翼缘变形量较小,轧件各部位变形非常不均匀,翼缘与腹板的变形存

表2 轧件不同部位延伸系数

Tab. 2 Elongation coefficients of different parts of workpiece

道次	腹板延伸系数	翼缘延伸系数	“舌头”长度/mm
1	1.00	1.08	0
5	1.09	1.02	23.6
9	1.16	1.01	69.6
13	1.03	1.13	0

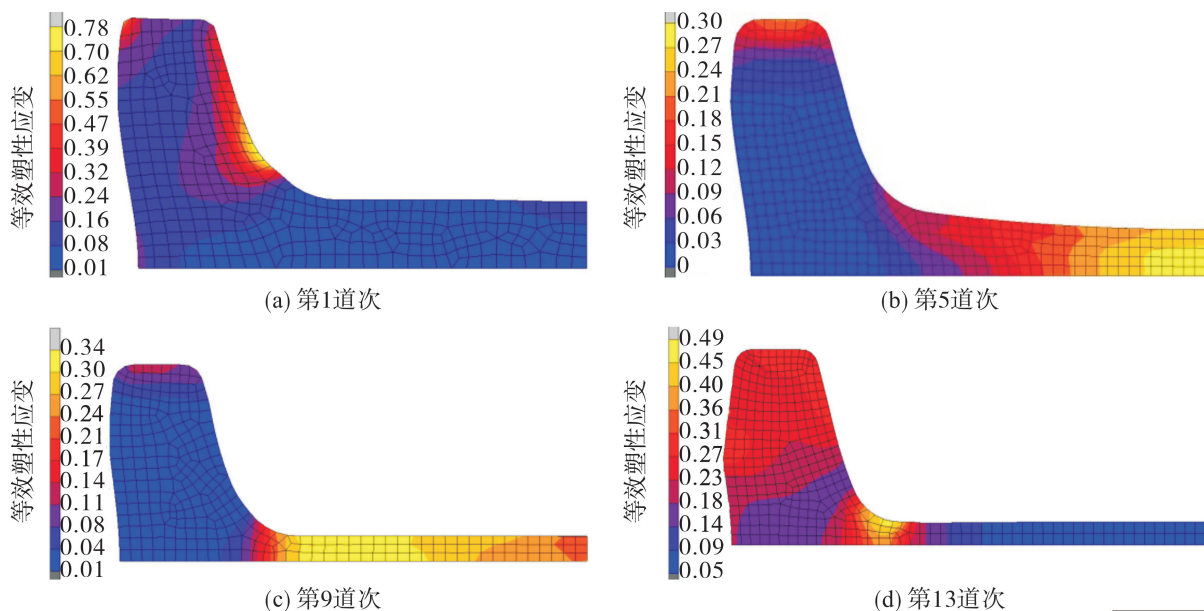


图5 轧件断面等效塑性应变的分布

Fig. 5 Distributions of equivalent plastic strain of billet section

在不同步性;第1道次轧件在1号孔型中轧制,轧辊与翼缘直接接触,翼缘变形量较大,最大等效应变达0.7左右,而腹板基本不变形;第5道次开坯轧制时,最大等效塑性应变出现在腹板中心部位,最大值为0.3,翼缘部位变形较小,轧件各部位变形不均匀;第9道次轧件在2号孔型中轧制,翼缘部位变形难以渗透到翼缘内部,仅端部有较小的变形,而腹板部位变形较大,塑性应变为0.3左右;第13道次轧件在3号孔型中轧制,腹板变形量较小,塑性应变为0.05左右,翼缘与腹板连接处变形量较大,其中连接处变形量最大,塑性应变为0.5左右,翼缘部位等效应变为0.3左右,介于腹板与连接处两者之间。

以上分析表明,开坯轧制过程轧件各部位变形非常不一致,导致断面各部位金属再结晶情况不同,造成断面各部位晶粒尺寸大小不一致^[12]。晶粒尺寸不均匀严重影响产品的力学性能。所以在大规模H型钢生产中应避免由于腹板和翼缘变形不同步造成的组织性能的差别。

2.2 立轧道次稳定性

第11道次轧制模型及轧件断面形状与尺寸如图6。由图6可知,轧件经过多道次轧制后翼缘部位的形状很不规整。为使轧件的后续轧制顺利咬入且获得满足尺寸要求的万能轧制中间坯,需对轧件翻转90°轧制,对翼缘进行加工。

由轧件变形分析可知,异形坯开坯大规格H型钢多道次往复轧制时,为满足成品的尺寸要求,腹板部位变形量较大,导致轧件腹板部位厚度较小。再将轧件翻转90°进入第11道次孔型轧制时,由于轧件高度较高,压下不对称或压下过大时容易出现轧件倾斜失稳现象。由此可以看出,大规格H型钢开坯轧制时受到孔型系统的限制,轧件腹板和翼缘的变形不同步会导致轧件产生失稳现象。所以,采用现有的孔型系统轧制大规格H型钢有一定的局限性,开发更为合理的孔型系统对大规格H型钢的生产具有重要意义。

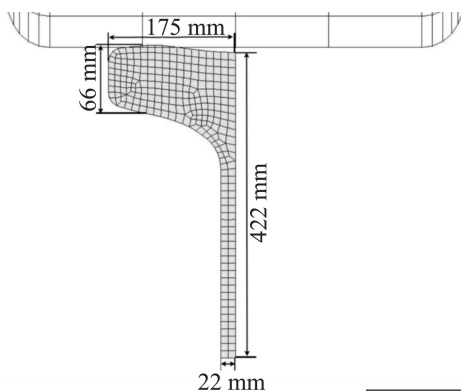


图6 第11道次轧制情况

Fig. 6 Rolling condition of pass 11

3 结 论

借助MSC. Marc有限元软件,模拟分析采用异形坯开坯轧制大规格H型钢的多道次轧制过程,得出以下

结论:

- 1) 大规格H型钢在开坯轧制过程中, 轧件腹板与翼缘的变形不均匀, 导致腹板和翼缘变形不一致, 当腹板部位延伸系数大于翼缘部位时, 轧件腹板部位出现“舌头”, 两者延伸系数差值越大, “舌头”长度越大;
- 2) 大规格H型钢开坯多道次轧制时, 轧件腹板部位压下量较大造成腹板的厚度较薄, 将轧件翻转90°轧制时, 轧件易出现倾斜失稳现象;
- 3) 采用现有孔型系统轧制大规格H型钢具有一定的局限性, 实际生产中应采用更为合理的孔型系统。

参考文献:

- [1] WANG P Q, ZHANG Q H, DONG B T, et al. Finite element simulation of large H-beam in X-H rolling process[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 569:251-255.
- [2] 冶金部研究总院, 马鞍山钢铁有限公司. 热轧H型钢应用手册[M]. 北京: 中国计划出版社, 1998:3-6.
- [3] 徐至钧, 赵锡宏. 新世纪高层建筑结构设计与施工手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006:221-225.
- [4] 郭善莉, 田仲良, 陈林. HN450型钢开坯轧制变形模拟[J]. 包钢科技, 2011, 37(6):40-42.
- [5] 马光亭, 臧勇. H型钢往复开坯轧制过程仿真分析[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(6):25-27.
- [6] 奚铁, 章静. H型钢开坯轧制变形分析[J]. 钢结构, 2004, 21(6):40-41.
- [7] 罗双庆, 李忠义, 张文满. H型钢开坯轧制过程金属流动的有限元分析[J]. 安徽冶金, 2005(3):4-7.
- [8] 曹杰, 奚铁, 章静, 等. H型钢万能轧制变形分析[J]. 重型机械, 2005(1):23-25.
- [9] 赵学武, 黄贞益. H型钢万能轧制宽展有限元分析[J]. 钢结构, 2006, 21(1):65-68.
- [10] 朱国明, 吴迪, 赵宪明. H型钢开坯轧制四道次有限元模拟[J]. 材料与冶金学报, 2002, 1(3):226-228.
- [11] 阎军, 鹿守理, 陈希克. 切分孔形状对轧件变形影响的有限元分析[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(2):25-28.
- [12] 马劲红, 李慧. H型钢轧制过程的再结晶数值模拟[J]. 河北联合大学学报, 2012, 34(2):35-39.

责任编辑: 何莉

(上接第321页)

- [10] ZHANG G Q, ZHANG T A, LV G Z. Extraction of vanadium from LD converter slag by pressure leaching process with titanium white waste acid [J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2015, 44(8):1894-1898.
- [11] LIU Z H, LI Y, CHEN M L. Enhanced leaching of vanadium slag in acidic solution by eletro-oxidation[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 159:1-5.
- [12] MIRAZIMI S M J, RASHCHI F, SABA M. A new approach for direct leaching of vanadium from LD converter slag[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2015, 94:13-14.
- [13] ZHANG J H, ZHANG W, ZHANG L, et al. Mechanism of vanadium slag roasting with calcium oxide[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 138:20-29.
- [14] 张菊花, 张伟, 张力, 等. 酸浸对钙化焙烧提钒工艺钒回收率的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(11):1574-1578.
- [15] 王俊, 孙朝晖, 苏毅, 等. 高钙高磷钒渣焙烧浸出的研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(11):1038-1042.
- [16] 付自碧, 彭毅, 何文艺, 等. 钒渣富氧钙化焙烧试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(4):1-5.
- [17] 唐华应, 方艳, 薛秀萍. 高锰酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法测定五氧化二钒含量: YB/T5328-2009[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2009:1-3.
- [18] COATS A W, REDFERN J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data[J]. *Nature*, 1964, 201(1):68-69.
- [19] 张菊花, 张伟, 薛正良. 加热速率对钒渣钙化提钒中钒回收率及钒渣氧化机理的影响[C]//第七届全国稀有金属学术交流会论文集. 江西: 宜春, 2016:210-216.
- [20] 张菊花. 转炉钒渣制备V₂O₅清洁工艺的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014:1-141.
- [21] PTÁČEK P, KUBÁTOVÁ D, HAVLICA J, et al. The non-isothermal kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite by thermogravimetric analysis[J]. *Powder Technology*, 2010, 204:222-227.

责任编辑: 何莉