

难变形材料轧制实验机开发及实验研究

矫志杰, 孙 涛, 李建平
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为满足难变形材料轧制实验研究, 开发新型实验轧机. 采用液压张力缸和液压夹头夹持短试样, 实现直拉张力轧制. 采用两台主电机对上下工作辊单独传动和速度调整, 实现异步轧制时速度比连续调整. 将夹持轧件两端的夹头作为正负极, 通低电压大电流, 对轧件进行电阻加热, 实现温轧功能. 利用该新型实验轧机进行验证实验. 对 3% Si 无取向硅钢进行带张力异步轧制, 异步比设定为 1.12, 总压下量增大 28.4%. 对 AZ31 镁合金进行带张力温轧实验, 厚度由 4 mm 轧制到 0.633 mm, 顺利完成轧制并得到很好的表面质量. 实验表明, 该实验轧机可以作为难变形材料轧制实验研究的有力工具.

关 键 词: 轧制实验机; 难变形材料; 直拉张力轧制; 异步轧制; 温轧

中图分类号: TG 335.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)02-0229-05

Pilot Mill Development for Difficult-to-Deform Materials and Experimental Research

JIAO Zhi-jie, SUN Tao, LI Jian-ping
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: JIAO Zhi-jie, E-mail: jiaozj@ral.neu.edu.cn)

Abstract: A new pilot mill was developed for the experimental rolling of difficult-to-deform materials. Hydraulic tension cylinders and clamps were used for direct pulling tension rolling on short material specimen. In order to realize the differential speed rolling with continuously variable speed ratio, two main motors were used and the motors' speeds were adjusted respectively for upper and lower work rolls. Warm rolling process was implemented through strip resistance heating. The clamps at the two sides of the mill were used as the positive and negative electrodes, while low voltage and high current DC power was acted on the strip specimen. These functions were realized on the new pilot mill for experimental validation. The 3% Si silicon steel was rolled with direct pulling tension and differential speed rolling mode. With speed ratio of 1.12, the total thickness reduction was increased by 28.4%. The AZ31 magnesium alloy was rolled with direct pulling tension and warm rolling mode, and the thickness was reduced from 4 mm to 0.633 mm with good surface quality. This new pilot mill can be used as an effective tool for the difficult-to-deform material experimental research.

Key words: pilot mill; difficult-to-deform material; direct pulling tension rolling; differential speed rolling; warm rolling

轧制是金属材料成形最重要的方式之一, 冷轧可以保证较好的轧件表面质量, 是轧制薄规格产品的主要方式. 但有一部分难变形材料, 如高硅钢、高强度合金钢以及镁基合金等, 由于其材料本身的性能限制, 采用普通冷轧方式很难完成轧制. 国内外学者针对这类金属材料的轧制成形开展了大量研究工作, 证明带张力轧制、异步轧制、温轧是轧制难变形金属材料非常有效的方式^[1-7]. 在开展针对上述难变形金属材料的轧制实验研究时, 目前普遍采用普通的单机架可逆冷轧实验机; 由于条件限制, 这类轧机存在以下问题: ①由于缺少前后卷取设备, 一般都无法实现带张力轧制;

②这类轧机一般采用单电机通过齿轮箱对上下辊集中传动,很难灵活设定异步轧制的速度比;③为了进行温轧实验,需要提前在离线的加热炉中对试样进行加热,达到要求温度后再到轧机上进行轧制,很难保证温轧过程的温度控制。

难变形金属材料在国防和民用工业中的应用越来越广泛,因此要对其轧制工艺、性能等各方面开展大量的研究工作,迫切需要一种新型轧制实验装备来满足研究需要. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室根据这种需求,在前期开发的新型直拉式可逆冷轧实验机的基础上,增加了异步轧制和温轧功能. 该轧制实验机已经开

发成功,并用于进行相关材料的轧制实验. 实际功能测试表明,该轧制实验机可以较好地满足难变形金属轧制工艺研究的需求。

1 轧制实验机开发

1.1 直拉张力冷轧实验机的开发

为满足较小的单片原料带张力轧制的需求,对传统可逆轧机进行改进,在轧机两侧安装了产生和保持轧件张力的张力液压缸,并在张力液压缸活塞杆前端设计和安装液压夹头. 设备示意图如图 1 所示。

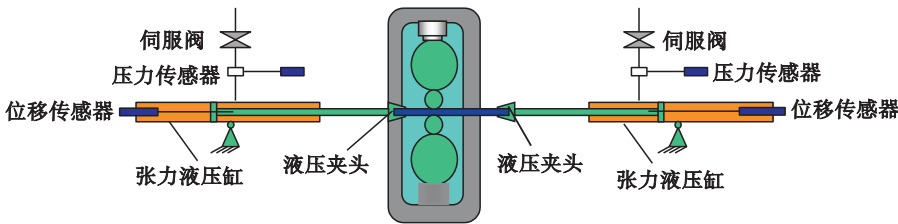


图 1 直拉冷轧实验机设备概况
Fig. 1 Equipment schematic of direct pulling cold rolling pilot mill

基于该直拉式冷轧实验轧机,设计了轧制实验的工艺过程^[8],并为其配备了由基础自动化、过程自动化以及人机界面组成的自动化控制系统,实现轧机的精确控制功能^[9]. 由于轧制过程中,两侧的液压张力缸的活塞杆要跟随轧件进行大行程运动,且在该过程中要保持张力恒定,因此采用速度前馈加张力反馈的组合控制策略提高张力控制精度^[10]. 通过上述设计,可以实现最短 350 mm 试样的带张力轧制,并可以保证轧制过程中两侧张力的稳定控制。

1.2 异步轧制功能实现

为了灵活调整上下辊线速度,实现不同的异步比,采用双电机分别驱动上下工作辊的传动方式实现异步轧制功能. 使用两台 160 kW 的直流电机并通过变速齿轮箱和传动轴分别与上下工作辊连接. 使用西门子的 Simatic S7 - 400 + FM458 的 PLC 和 SIEMENS 6R80 调速器实现轧制速度控制,在两台主电机上分别安装光电编码器检测实际速度,并用于速度反馈控制。

异步轧制速度以下工作辊线速度为基准速度,异步比为上下工作辊线速度比值. 图 2 为基准速度 0.15 m/s,异步比 1.12 时,上下辊线速度的实际采样值. 可见,除了道次开始和结束的升速和降速阶段,中间稳定轧制时,上下辊线速度保持了很好的稳定性。

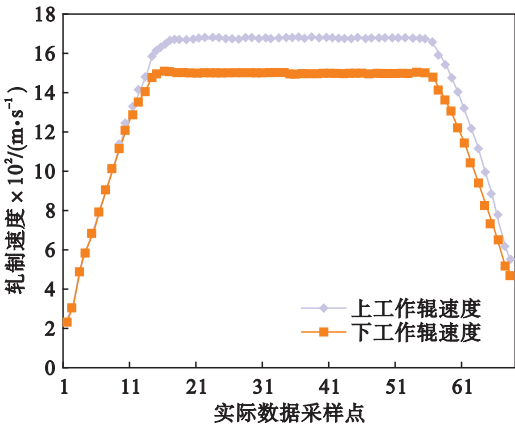


图 2 异步轧制实际轧制速度
Fig. 2 Actual roll speed of differential speed rolling process

1.3 温轧功能实现

温轧是介于冷轧和热轧之间的一种轧制工艺形式. 由于温轧时材料的加工硬化得到一定回复,材料的屈服强度低、塑性高. 特别是对难变形材料,温轧既可以较好地完成材料的成形过程,又可以保证产品的使用性能。

目前在普通实验轧机上进行难变形金属的温轧实验研究时,普遍采用的方式是在轧机旁边配备加热炉,将试样在加热炉中加热到要求的温度后取出试样,再到轧机上进行轧制. 这种方式无法精确控制轧件在整个轧制过程多道次期间的轧制温度. 另外,加热后高温坯料也很难在轧机上完成

上料和带张力轧制. 针对上述问题, 在前述功能基础上, 在该实验轧机上增加温轧功能, 对试样进行在线加热.

对试样采用电阻加热方式, 即将左右张力缸的夹头作为正负极, 利用大电流低电压对夹持的带钢进行电阻加热. 通电加热时, 通过测温仪对带

钢试样进行温度检测, 并将实测温度作为反馈值, 与设定的目标温度值进行比较, 由 PLC 控制系统自动调整可控硅电源的输出电流, 进行温度闭环控制; 在带钢温度达到设定目标温度后, 加热停止, 进行轧制. 每道次轧制前都可以对试样加热. 温轧的加热设备及温度控制示意图如图 3 所示.

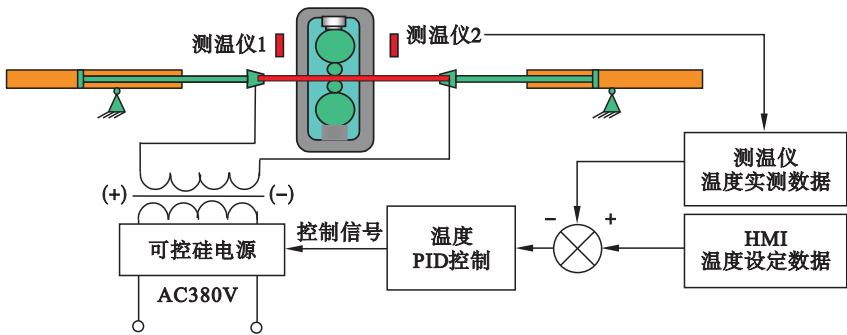


图 3 温轧加热及温度控制示意图
Fig. 3 Diagram of heating for warm rolling and temperature control

2 实验研究

2.1 实验轧机主要工艺参数

成功开发的新型实验轧机主要工艺参数如表 1 所示.

2.2 轧制实验研究

为了验证该实验轧机对难变形材料的成形能力和效果, 进行了以下轧制实验研究.

2.2.1 硅钢带张力异步轧制实验

采用含硅 3% 的无取向硅钢原料进行轧制实验, 坯料尺寸为: 厚度 2 mm, 宽度 200 mm, 长度

900 mm. 分别取 3 块试样进行 3 道次轧制, 每块试样的道次辊缝、张力和速度设定取相同值. 第 1 块试样不进行异步轧制, 第 2 和第 3 块试样分别进行不同异步比的异步轧制. 其中第 2 块试样第 1 道次上下辊线速度比设定为 1.06:1, 即异步比为 1.06, 第 2 道次, 上下辊线速度比为 1:1.06, 即异步比为 0.943, 第 3 道次采用同步轧制对带钢进行平整; 第 3 块试样第 1 道次上下辊线速度比设定为 1.12:1, 即异步比为 1.12, 第 2 道次上下辊线速度比为 1:1.12, 即异步比为 0.893, 第 3 道次采用同步轧制对带钢进行平整.

表 1 实验轧机主要工艺参数
Table 1 Process parameters of the pilot mill

最大 轧制力	最大 张力	最大轧 制速度	最大 速度比	主电机 功率	加热 功率	最高加 热温度	工作辊		支撑辊	
							直径	长度	直径	长度
kN	kN	m·s ⁻¹		kW	kW	℃	mm	mm	mm	mm
4500	50	0.6	1.3:1	2×160	180	800	180~200	370	530~550	350

实际轧制过程的数据如表 2 所示, 3 块试样各道次轧制力和压下率数据比较如图 4 所示. 由图可以看出, 相同轧制条件下, 采用异步轧制后道次轧制力明显减少, 压下率增大. 异步比越大, 道次轧制力越小, 压下率越大. 在相同轧制规程下, 同步轧制的最终成品厚度为 0.799 mm; 而异步比为 1.12 时, 最终成品厚度减薄为 0.572 mm, 厚度减薄了 28.4%.

2.2.2 镁合金微张力温轧实验

镁合金在常温下很难完成轧制, 但采用温轧方式可以较好地完成镁合金的轧制.

采用 AZ31 镁合金进行轧制实验, 坯料尺寸为: 厚度 4 mm, 宽度 120 mm, 长度 1 000 mm. 首先, 通过 4 道次轧制到 1.5 mm; 由于带材过长, 超过张力液压缸行程, 分段后再经过 6 道次继续轧制到最终成品 0.633 mm. 镁合金最终成品表面质量良好. 轧制相关数据见表 3.

表 2 异步轧制硅钢轧制过程数据表
Table 2 Differential speed rolling process data of silicon steel

试样号	道次号	辊缝 设定值	后张力 设定值	前张力 设定值	轧制速度 设定值	异步速比 设定值	实际 轧制力	实际出口 厚度	实际 压下率
		mm	kN	kN	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		kN	mm	%
1 [#] 正常轧制	1	0.93	48.00	45.00	0.10	1.000	2 163	1.477	26.14
	2	0.16	45.00	43.00	0.10	1.000	2 830	1.032	30.13
	3	-0.11	40.00	34.00	0.10	1.000	2 784	0.799	22.62
2 [#] 异步轧制	1	0.93	48.00	45.00	0.10	1.060	2 045	1.405	29.74
	2	0.16	45.00	43.00	0.10	0.943	2 680	0.915	34.87
	3	-0.11	40.00	34.00	0.10	1.000	2 521	0.679	25.80
3 [#] 异步轧制	1	0.93	48.00	45.00	0.10	1.120	1 814	1.289	35.57
	2	0.16	45.00	43.00	0.10	0.893	2 424	0.786	39.05
	3	-0.11	40.00	34.00	0.10	1.000	2 351	0.572	27.20

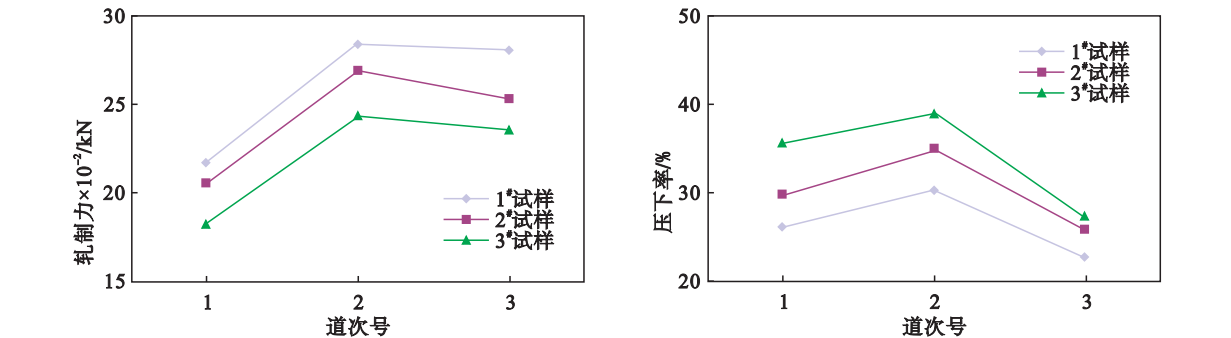


图 4 异步轧制硅钢各道次轧制力和压下率
Fig. 4 Rolling force and reduction of each pass tor silicon steel with differential speed rolling

表 3 AZ31 镁合金温轧数据
Table 3 AZ31 warm rolling data

轧制情况	道次号	辊缝 设定值	后张力 设定值	前张力 设定值	轧制速度 设定值	温轧温度 设定值	实际 轧制力	实际出口 厚度	实际 压下率
		mm	kN	kN	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	℃	kN	mm	%
分段前轧 制阶段	1	4.00	3.60	3.60	0.15	300	405	2.664	33.40
	2	3.55	3.50	3.50	0.17	300	288	2.147	19.41
	3	3.20	3.40	3.40	0.19	300	250	1.800	16.16
	4	3.00	3.30	3.30	0.20	300	203	1.540	14.44
分段后轧 制阶段	1	2.85	3.40	3.40	0.12	250	125	1.221	20.71
	2	2.70	3.40	3.40	0.15	250	120	1.066	12.69
	3	2.55	3.00	3.00	0.17	250	115	0.939	11.91
	4	2.40	3.00	3.00	0.19	250	153	0.821	12.57
	5	2.25	3.00	3.00	0.20	250	129	0.723	11.94
	6	2.10	3.00	3.00	0.20	250	170	0.633	12.45

3 结 论

1) 为满足难变形金属材料轧制实验研究的需要,在新型实验轧机上实现了带张力轧制、异步轧制和温轧功能;

2) 采用张力液压缸和液压夹头对单片试样施加张力,实现带张力轧制;通过双电机分别驱动上下工作辊进行调速,实现可连续变速的异步轧制;将两侧夹头作为正负极,采用大电流低电压对夹持试样进行电阻加热的方式实现温轧功能.

3) 在该实验机上进行验证轧制实验,针对普

通轧制方式难以完成生产的难变形金属材料分别进行带张力异步轧制和温轧实验:相同轧制条件下,采用异步比为 1.12 的异步轧制 3% Si 无取向硅钢,3 道次的总压下量增大 28.4%;采用温轧方式成功将镁合金 AZ31 由 4 mm 轧制到 0.633 mm,并保证了较好的表面质量.

参考文献:

[1] Wantanbe H,Mkai T,Ishikawa K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties[J]. *Journal of Materials Science*,2004,39(4):1447-1480.

[2] Lee J B,Konno T J,Jeong H G. Grain refinement and texture evolution in AZ31 Mg alloys sheet processed by differential speed rolling[J]. *Materials Science and Engineering*,2009,161(1):166-169.

[3] Liu X L,Zhang W Y,Liu C M,et al. Microstructure of AZ31 magnesium alloy sheets processed by differential speed rolling [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2008,39(6):1244-1250.

[4] Zhang Q L,Lu C,Zhu Y P,et al. Effect of rolling method on microstructure and properties of AZ31magnesium alloy thin sheet[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Materials*,2004,14(3):391-397.

[5] Liu X,Chen Z H,Xia W J. Influence of differential speed rolling process on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheet [J]. *Hot Working Technology*,

2006,35(20):22-25.

[6] Ye F,Liang Y F,Wang Y L. Fe-6.5wt.% Si high silicon steel sheets produced by cold rolling[J]. *Materials Science Forum*,2009,638/639/640/641/642:1428-1433.

[7] Fu H D,Zhang Z H,Pan H J,et al. Warm/cold rolling processes for producing Fe-6.5wt% Si electrical steel with columnar grains [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*,2013,20(6):535-540.

[8] 矫志杰,李建平,张福波,等. 新型冷轧实验轧机的工艺设计[J]. 钢铁,2007,42(9):53-55.
(Jiao Zhi-jie,Li Jian-ping,Zhang Fu-bo,et al. Technological design of new type pilot cold rolling mill[J]. *Iron and Steel*,2007,42(9):53-55.)

[9] 李建平,杨红,牛文勇,等. 直拉式冷轧实验机自动控制系统[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(7):970-974.
(Li Jian-ping,Yang Hong ,Niu Wen-yong,et al. Automatic control system of direct tension-type pilot cold rolling mill [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2012,33(7):970-974.)

[10] 孙涛,王贵桥,吴岩,等. 直拉式可逆冷轧实验轧机张力控制技术[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(4):528-532.
(Sun Tao,Wang Gui-qiao,Wu Yan,et al. Tension control technique for hydraulic-tension reversible experimental cold mill [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2012,33(4):528-532.)