

大型气垫式退火炉试验平台的研究与开发

侯 帅¹, 王 效², 花福安¹, 王国栋¹

(1. 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;

2. 内蒙古民族大学 机械工程学院, 内蒙古 通辽 028403)

摘 要: 为研究工业气垫炉的运行规律,以工业气垫炉的热处理区为研究对象,开发了大型气垫炉试验平台的机械结构和控制系统,并搭建了带材高度预报模型.从运行情况来看,所开发的气垫炉试验装置能够将厚度为0.3~2 mm的一系铝带材稳定漂浮在0~200 mm的高度上;所建立的漂浮高度混合预报模型能够对带材的漂浮高度进行准确预测,预测精度在 ± 3 mm以内.设计的气垫炉平台与工业气垫炉的结构和运行过程相似,为工业化气垫炉的国产化提供了理论依据.

关 键 词: 气垫炉试验装置;漂浮高度;结构设计;控制系统设计;漂浮高度模型

中图分类号: TG 155.12 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)12-1706-04

Research and Development of the Test Platform for Large Air Flotation Type Annealing Furnaces

HOU Shuai¹, WANG Xiao², HUA Fu-an¹, WANG Guo-dong¹

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Nationalities, Tongliao 028403, China.

Corresponding author: HOU Shuai, E-mail: houshuai20072@163.com)

Abstract: In order to study the operation mechanism of industrial air flotation annealing furnace, the mechanical structure and control system are developed and the flotation height of web is established using the heat treatment zone as a subject. According to the operation process, the experimental air flotation platform can stabilize one series aluminum strips with the thickness of 0.3~2 mm to the float heights between 0~200 mm. The hybrid flotation height model can predict the flotation height of the strips precisely, whose accuracy is ± 3 mm. The structure and running process of the developed air flotation platform are similar to those of present industrialized air flotation furnaces structure. The research provides good theoretical guidance to industrialize air flotation oven.

Key words: test platform of air flotation furnaces; flotation height; structure design; control system design; flotation height model

气垫式连续退火炉,简称气垫炉,是一种先进的热处理设备,广泛用于铝带和铜带的热处理过程.气垫炉的加热速度快、工作效率高,能够生产出高表面质量、高性能、大规格、高合金化、晶粒细化的铝带材.对于1.5 mm以下铝带材的热处理,特别是薄带材的热处理,气垫炉具有无可比拟的优势^[1-3].

气垫炉设备结构复杂、设计难度高,气垫炉技

术被国外大型工业炉制造公司所垄断,例如美国Surface公司、德国Otto Juncker公司、奥地利Ebner公司等.目前,我国尚未将气垫炉成功应用于工业生产过程中.

国内关于气垫炉装置自主开发的研究比较少^[4],东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室以工业气垫炉的热处理区为研究对象,设计并制造了一台与工业气垫炉结构相近的大型冷

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110604011).

作者简介: 侯 帅(1984-),男,河北邯郸人,东北大学博士研究生,河北工程大学讲师;王国栋(1942-),男,辽宁大连人,东北大学教授,博士生导师,中国工程院院士.

态气垫炉装置,以探索工业气垫炉的运行规律,获得大量实验数据及设计经验。

1 气垫炉的基本工作原理

在气垫炉的工作过程中,带材一边漂浮一边前进,在漂浮的过程中与热空气进行热交换,从而完成加热过程。气垫炉的工作过程如图 1 所示。在工作过程中,气垫炉主要有两个功能:一方面,基于空气动力学原理,喷嘴喷射气流到带材的上下表面,使带材漂浮在空中;另一方面,基于对流传热原理,热气流与带材相接触,使带材完成对流传热过程。

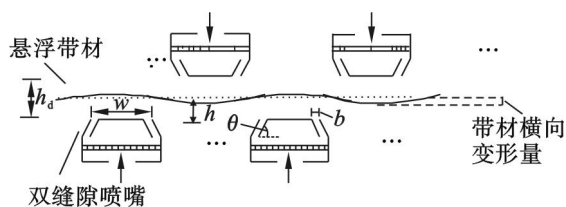


图 1 气垫炉工作过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working process of the air flotation furnace

图 1 中: h_d 为上喷嘴下边沿与下喷嘴的上边沿之间的间距,m; h 为带材漂浮高度,m; θ 为缝隙喷嘴倾斜喷射角度, $(^\circ)$; w 为两个缝隙之间的间距,m; b 为缝隙宽度,m。

2 气垫炉试验设备

气垫炉由若干个热处理区组成,故气垫炉的结构设计工作主要是对气垫炉的单个热处理区进行设计。本文以气垫炉的热处理区为研究对象,对气垫炉试验平台进行了设计与研究。

2.1 机械结构

对气垫炉试验平台进行了设计,气垫炉试验平台主要包括炉体、鼓风机与机架系统、风道、导流结构、喷嘴、气封系统、张力装置、检测系统等几个部分。气垫炉试验平台的机械设计原理图如图 2 所示。

2.2 设备自动化部分

气垫炉试验平台包含有两个气体控制回路,一个为空气循环回路,另一个为压缩空气回路。

在空气循环回路中,空气由下鼓风机进入鼓风道,再被分配到喷嘴内,然后由回风道回到下鼓风机的入口,从而完成一次循环。当气垫炉试验平台工作时,通过调整上鼓风机转速、下鼓风机转

速,使鼓风道压力、喷嘴压力和炉膛压力达到期望值。

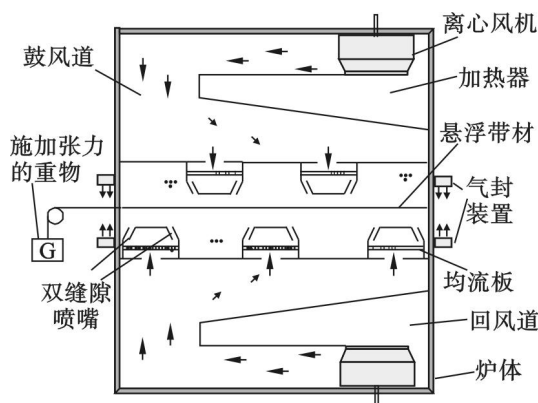


图 2 气垫炉试验平台整体设计原理图

Fig. 2 The schematic diagram of air flotation furnace test platform

在压缩空气回路中,压缩空气由空压机送入总压缩空气管道中,再被分配到炉前和炉后的气封装置中,从而在炉前与炉后形成气幕,以防止炉内气体逸出。

2.3 设备运行情况

基于上述设计思想,对气垫炉试验平台的零件进行了加工与制造,对加工后的零件进行了整体组装,最终制造出一台以工业化为目的的大型气垫炉试验平台。气垫炉实物如图 3 所示。

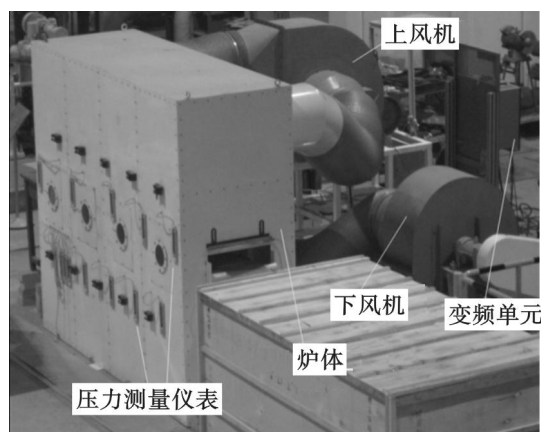


图 3 气垫炉试验平台

Fig. 3 The air flotation furnace test platform

测试了气垫炉试验平台的一些关键性能指标,例如横向均匀性、纵向均匀性、风机与机架的静力学特性和动力学特性、设备整体结构配置的合理性、气密性、噪声等性能指标。测试结果表明设备的关键性能指标符合要求。

在气垫炉试验平台上进行整条带材的漂浮实验,飘浮实验过程如图 4 所示。

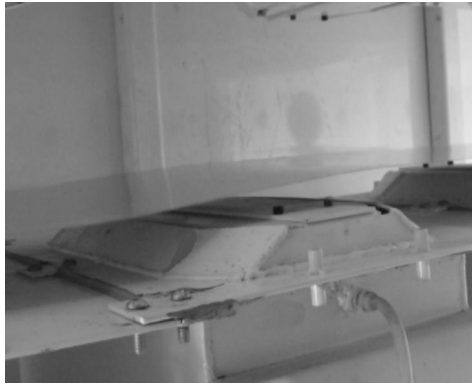


图 4 气垫炉试验平台实物图

Fig. 4 The physical map of the air flotation furnace test platform

实验结果证明气垫炉试验平台能够将厚度规格在 0.3 ~ 2 mm 之间的 1 系铝带材漂浮到 0 ~ 200 mm 的任意高度上,能够达到气垫炉试验平台对带材的漂浮要求。

3 数学模型

气垫炉内带材的漂浮高度是气垫炉过程控制的一个重要参数^[5],本文的带材漂浮高度混合结构的预报模型由机理模型部分和数据模型部分组成。其中,机理模型预测漂浮高度的主要信息,数据模型预测机理模型预测值与试验值之间的误差,数据模型采用现有的 Bagging 算法^[6-10],本文不再详细介绍。

3.1 机理模型原理

机理模型部分基于重力平衡原理和射流理论进行建模,其建模过程如下。

忽略带材的横向变形量,假设带材的形状为平直的,在气垫炉内欲使板带材漂浮稳定,必须满足下气垫与上气垫两者静压力之差等于板带材本身重力的力平衡条件,即

$$G = F_1 - F_2. \quad (1)$$

式中: F_1 为带材下表面的漂浮力, N; F_2 为带材上表面的漂浮力, N; G 为带材的重力, N。

根据壁面射流理论^[11-12],可得出漂浮力为

$$F_1 = P_{c1}w + \frac{\sin\theta \times P_{c1}(2h + b)}{1 + \cos\theta}. \quad (2)$$

式中, P_{c1} 为带材下表面的气垫压力, Pa。

当带材距离下喷嘴的漂浮高度为 h , 则带材距离上喷嘴的高度为 $h_d - h$ 。

上气垫作用在带材上表面的力 F_2 为

$$F_2 = P_{c2}w + \frac{\sin\theta \times P_{c2}(2(h_d - h) + b)}{1 + \cos\theta}. \quad (3)$$

式中, P_{c2} 为带材上表面的气垫压力, Pa。

将式(2), 式(3)代入式(1)中, 即获得含有带材漂浮高度的方程:

$$\begin{aligned} & [4b\sin\theta(P_{j2} - P_{j1}) + G]h^2 + \\ & [4(1/2 + \cos\theta)b^2\sin\theta(P_{j2} + P_{j1}) - 0.8b\sin\theta(P_{j2} - \\ & P_{j1}) - 2bw(1 + \cos\theta)(P_{j2} + P_{j1}) - 0.2G]h + \\ & 0.4(1 + \cos\theta)bwP_{j1} + 2(1 + \cos\theta)(1/2 + \\ & \cos\theta)b^2w(P_{j1} - P_{j2}) - 0.8(1/2 + \\ & \cos\theta)b^2P_{j2}\sin\theta - (1/2 + \cos\theta)b(0.2 + \\ & (1/2 + \cos\theta)b)G = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P_{j1} 为等效下喷嘴压力(下喷嘴出口压力 × 喷嘴个数), Pa; P_{j2} 为等效上喷嘴压力(上喷嘴出口压力 × 喷嘴个数), Pa。

对式(4)进行求解即可获得带材的漂浮高度。

3.2 混合模型结构

混合模型的结构如图 5 所示。



图 5 混合模型结构

Fig. 5 Hybrid model structure

机理模型部分预测带材的平均漂浮高度, 数据模型部分对带材的变形量以及机理模型的未建模部分进行补偿。混合模型的输入变量为空气密度、上喷嘴工作压力、下喷嘴工作压力、带材厚度、铝带密度。

3.3 数学模型验证

本文以带材的漂浮高度为研究对象, 对带材进行了漂浮实验。在实验过程中, 激光测距仪记录下带材的漂浮高度, 该实验仪器只是为了方便检测带材的漂浮高度, 在实际的生产中是没有该仪器的。对宽度为 200 ~ 400 mm, 厚度为 0.8 ~ 2 mm 的 1 系铝带材进行漂浮实验, 在不同的工况下采集到 850 个实验数据, 利用这些数据对数据模型进行训练。当下喷嘴的等效工作压力 P_{j1} 和上喷嘴的等效工作压力 P_{j2} 稳定时, 测试带材的漂浮高度, 带材漂浮高度预报模型的预测值和实验过程中带材漂浮高度的实测值如图 6 所示。

由图 6 可见本文提出的混合预报模型具有较高的预测精度, 能够对带材的漂浮高度进行准确预测。

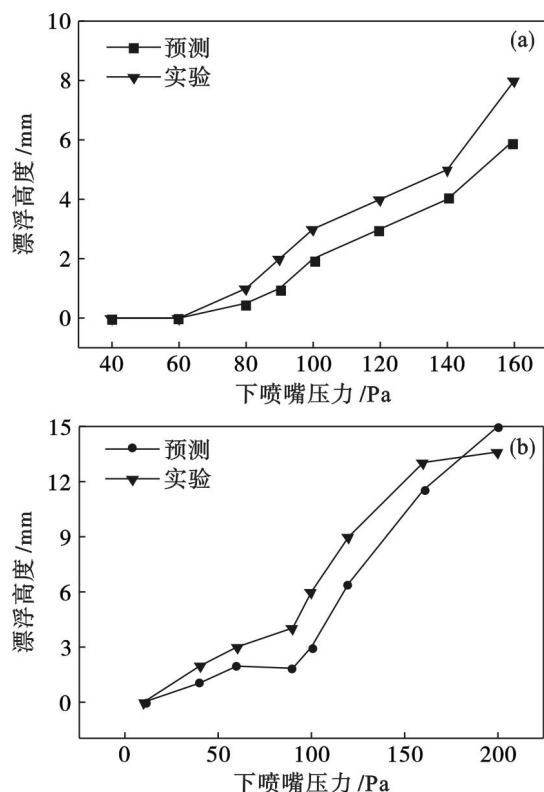


图6 漂浮高度模型预测和实测曲线

Fig. 6 The prediction and actual practice flotation height curves

(a) —带材厚度 1 mm, 上喷嘴压力 0 Pa;
(b) —带材厚度 1 mm, 上喷嘴压力 65 Pa.

4 结 论

1) 在国内首次以工业气垫炉的热处理区为研究对象,设计并制造出一台与工业气垫炉结构相似的气垫炉试验平台,为气垫炉的国产化奠定了基础。

2) 该平台整体结构设计合理,能够将厚度为 0.3~2 mm 的一系铝带材稳定漂浮在 0~200 mm 的高度上,达到设计要求。截止到设备调试成功时,通过对国内文献进行检索,有色金属行业内未发现比该装置规模更大、国内自主研发的以工业化为目的的气垫炉装置。

3) 建立了带材漂浮高度混合预报模型,该混合预报模型解决了机理模型结构复杂、建模困难和参数难确定等问题,也能够克服单纯数据模型对数据的过度依赖和泛化性能差等问题。经过实验验证,该模型具有良好的预测精度。

参考文献:

- [1] 苏晓莉,王业科. 铝合金大规格带材气垫炉连续固溶热处理机组[J]. 铝合金加工技术,2011,39(7):29-32.
(Su Xiao-li, Wang Ye-ke. Domestic largest air cushion furnace in continuous solution heat treatment line for aluminum alloy strip [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2011, 39(7): 29-32.)
- [2] 侯帅,李勇,王昭东,等. 气垫炉圆形喷嘴漂浮力及传热研究[J]. 工业炉,2013,35(1):1-4.
(Hou Shuai, Li Yong, Wang Zhao-dong, et al. Study on round nozzle floating force and heat transfer character of air cushion furnace [J]. *Industrial Furnace*, 2013, 35(1): 1-4.)
- [3] 侯帅,王超,王坤,等. 气垫炉缝隙喷嘴传热特性研究[J]. 轻合金加工技术,2013,41(3):45-48.
(Hou Shuai, Wang Chao, Wang Kun, et al. Study on heat transfer character from slot nozzle of air cushion furnace [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2013, 41(3): 45-48.)
- [4] Moretti P M. Lateral deflections of webs in air-flotation ovens [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(3): 314-320.
- [5] 陈文修,何英和,刘非轼,等. 气垫式金属板带材连续热处理炉内气体动力过程的研究[J]. 中南大学学报,1987,18(2):145-150.
(Chen Wen-xiu, He Ying-he, Liu Fei-shi, et al. The research of aerodynamic process in air flotation oven [J]. *Journal of Central South University*, 1987, 18(2): 145-150.)
- [6] Hou S, Hua F A, Lyu W, et al. Hybrid modeling of flotation height in air flotation oven based on selective bagging ensemble method [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 9: 1-9.
- [7] Lyu W, Mao Z Z, Yuan P. Ladle furnace liquid steel temperature prediction model based on optimally pruned bagging [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2012, 19(12): 21-28.
- [8] Lyu W, Mao Z Z, Yuan P, et al. Pruned bagging aggregated hybrid prediction models for forecasting the steel temperature in ladle furnace [J]. *Steel Research International*, 2014, 85(3): 405-414.
- [9] Tang L, Yu L, Wang S, et al. A novel hybrid ensemble learning paradigm for nuclear energy consumption forecasting [J]. *Applied Energy*, 2012, 93: 432-443.
- [10] Wu M P, Zhao Y, Wang C X. Knowledge-based approach to assembly sequence planning for wind-driven generator [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 7: 1-7.
- [11] Davies M, Wood D. The basic aerodynamics of floatation [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1983, 105(3): 323-328.
- [12] Chang Y, Moretti P. Aerodynamic characteristics of pressure-pad air bars [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(1): 177-182.