

真空感应悬浮熔炼工艺的自动控制研究

何永亮, 李万青, 严建强, 刘静岩, 刘新峰, 严增男, 张鹏程

(沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 简要介绍了冷坩埚真空感应悬浮熔炼装备的发展现状、应用及其组成。在实际熔炼合金的过程中, 通过PLC对熔炼中的各项工艺数据采集、运算、存储、分析、优化, 制定了最优的熔炼工艺曲线, PLC和工业计算机之间相互通讯使真空悬浮熔炼过程的逻辑控制与过程控制得以实现, 并能够进行远程监控、控制、诊断与管理, 保证了后续熔炼合金成分均匀及质量稳定。

关键词: 真空感应; 悬浮熔炼; 自动控制

高品质合金熔炼过程污染问题, 几乎是热加工企业的共同特点, 而随着对合金品质要求逐渐提高, 实现清洁熔炼以及流程自动化和智能化, 是控制能耗、降低污染、提高合金质量的有效手段。真空感应悬浮熔炼装备作为熔炼高品质合金的专用设备, 其熔炼技术是目前国际上最先进的材料制备技术之一, 是专门为材料科学的科研而设计的, 水冷铜坩埚对所熔材料没有污染, 熔池深且温度场均匀, 又称真空冷坩埚感应熔炼, 是一种理想的清洁熔炼技术。该设备在美国、俄罗斯、德国、日本、法国等国家经历了几十年的发展历程, 在俄罗斯, 冷坩埚技术存在已超过70年^[1]。在设备容量、性能参数以及功能上都有较大发展。随着我国装备制造业的高速发展, 真空感应悬浮熔炼装备在我国航空航天事业、钛铝合金生产、高纯材料制备、金属氧化物制备、特种合金材料制备等领域的应用也得到了快速发展。

1 真空感应悬浮熔炼装备组成

真空感应悬浮熔炼装备主要由真空系统、水冷系统、感应熔炼系统以及控制系统等组成, 真空系统根据真空室数量、体积、抽空时间、要求真空度等, 可以设计并选择相应的真空机组; 水冷系统根据熔炼过程中各元件以及负载的功率损耗, 冷却水流量压力, 选择适合的冷却形式以及冷却设备; 感应熔炼系统和控制系统是整个真空感应悬浮熔炼的关键部分。感应熔炼系统包括熔炼电源和熔炼负载两部分, 熔炼电源主要采用中频IGBT形式, IGBT是一种快速开关器件, 其开通或关断时间非常短, 如图1所示, 包含整流组件部分, IGBT逆变组件1和逆变组件2的逆变部分。中频电源采用IGBT控制实现调功的稳、准、快的特性, 在真空悬浮熔炼系统中起到重要的作用。

电容、中频变压器、水冷线圈产生交变的磁场, 在利用交变磁场来产生涡流达到加热的效果。设备频率满足如下公式:

$$f=1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

式中: f 为中频电源频率, L 为电感, C 为电容。

真空感应悬浮熔炼装备的控制系统正逐渐向着智能化控制技术的方向发展, 智能化控制是控制理论发展的新阶段, 主要是用来解决在无人干预的情况下, 系统能够按照事先设定的程序自主完成复杂系统性问题。真空感应悬浮熔炼装备能够按事先设定好的程序自动完成合金材料的熔炼, 在熔炼过程中能够自动调节功率, 使用

作者简介:

何永亮(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造设备及铸造工艺技术研究工作。电话: 13897931842, E-mail: hehe32787152@163.com

中图分类号: TG232.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

05-0598-05

收稿日期:

2021-03-24 收到初稿,

2021-04-19 收到修订稿。

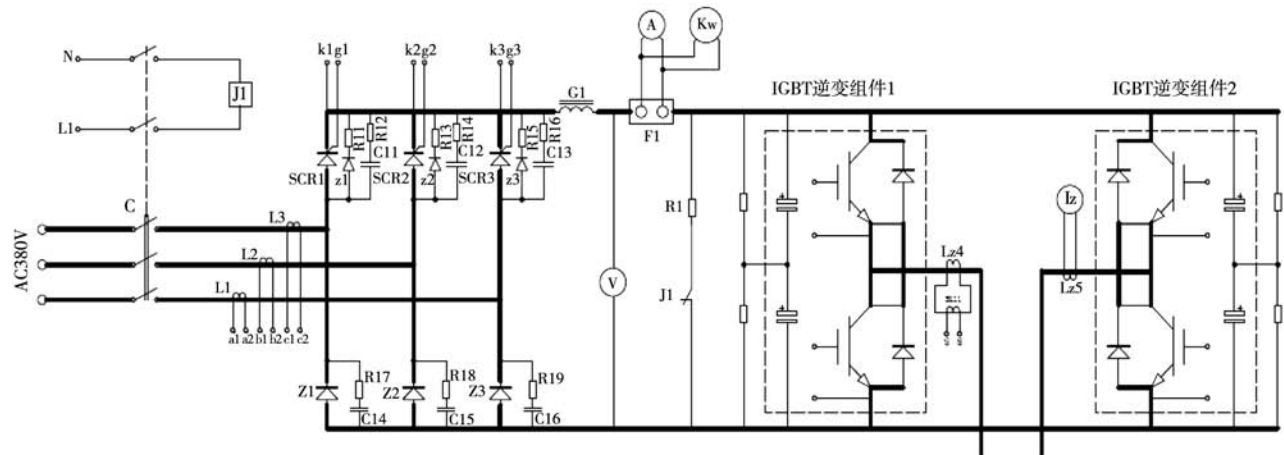


图1 IGBT主回路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of IGBT main circuit

最低的功率，使合金处于最佳的悬浮状态，熔炼完成后能够自动浇注，浇注过程中根据坩埚中剩余合金质量自动降低熔炼功率，达到最小的凝壳率。

熔炼负载主要包括水冷铜坩埚、水冷线圈及电容和中频变压器，水冷铜坩埚即承载着被熔物料，又能够产生与被熔物料重量相抵消的电磁力，使被熔物料尽量远离水冷铜坩埚壁，减少物料与坩埚壁接触，进而减少物料的热量损失以及对所熔物料的污染。水冷铜坩埚采用无氧铜加工制造，整个坩埚采用分瓣结构，每瓣之间采取绝缘处理，并需要进行通水冷却，目的是使磁力线有效穿过水冷铜坩埚作用在被加热的物料上，并保证铜坩埚不会被感应熔化，或者被高温物料所损坏，实际生产中该种坩埚的使用寿命很长，维护费用相对较低。

2 系统智能控制方案设计

中频感应加热效率不仅与电源本身的频率和磁场强弱有关，而且还与所加热的合金的截面大小、截面形状、合金本身的导电、导磁特性、坩埚形式等有关。因此，先进的控制系统能够收集各种熔炼工艺记录、存储、优化，实现最优控制，达到最低能耗、最低污染和最高的合金质量。

真空感应悬浮熔炼装备控制系统主要有下位机PLC、工业计算机以及人机交互界面触摸屏、各种传感器一次元件等组成，通过PLC编程来实现泵、阀、检测报警、信号采集、逻辑控制、各项参数计算与比较功能，上位机触摸屏是悬浮熔炼设备的主要操作面板，实现熔炼工艺的采集、数值显示、优化、历史曲线记录、数据的统计报表、显示和输出报警记录、实时监控的作用，操作各个阀之间的开关状态，实现按照工艺要求可以无人干预自动熔炼控制功能。目前大多数

设备在熔炼合金材料时仍然采用手动调节功率，人工观察熔炼状态，人为的经验因素为主。随着大数据时代的到来，我们完全可以将PLC和工业计算机各自优点相结合，利用PLC灵活的可编程功能以及数据采集、运算和存储功能，将现场设备、PLC、工业计算机相互通讯^[2]组建成小型工业互联网平台，通过数据积累、分析、优化，制定最优的工艺曲线，我们还可借助该平台远程监控该系统，并能够实现远程的控制、诊断与管理。

真空感应悬浮熔炼装备控制系统主要采用PLC运算、传输数据，精度高、抗干扰能力强、响应快速性和稳定性特点。系统被控量较多，既有执行元件的开关量，也有实时监控元件的模拟量，因此需要将操作系统模块化。图2程序段是在某段时间内设定功率和温度相应的数值按照此数学模型进行实际熔化，实际功率自动跟踪设定功率控制。采用闭环PID自动调节功能，系统稳定性高，速度快。

2.1 基本逻辑动作设计

该系统的逻辑动作主要包含真空系统各个泵阀之间的开关、冷却系统开关、感应熔炼系统的开关、离心浇注系统以及报警功能等，主要以开关动作为主。采用PLC可编程控制器，由专门用于各种开关量的控制模块，并能够不断的扫描传感器反馈信号的数据和状态，然后通过分析与比较事先设定的数据与状态，做出相应的判断。设备严格按照设定的程序运行，工艺技术条件完全可以得到保障，重复再现性好，并且PLC同样还具备数据的存储记录功能，在对数据进行一定量的积累后，可以根据数据曲线的跟踪形状，重新设定动作状态以及参考数据，使设备整体运行最优化。

2.2 计算机辅助控制

在完成设备逻辑动作的同时，我们还需要对运行工艺参数进行编程，并能够针对采集的模拟量进行控制。各种传感器主要负责对各种实时变化的工艺参数进行采集，编码器功能是对炉体翻转速度、角度的测量，编码器发出来的脉冲经过PLC采集运算后转换成对应的炉体翻转速度和角度。冷却水温度、压力、流量、真空度等对冶炼合金质量以及冶金工艺稳定性和操作安全性非常重要，合金温度通过红外测温仪自动测量，并将其反馈给PLC，通过数学模型进行运算对比，自动对电源功率进行调节。合金成分可以首先通过预测模型进行计算，并预测终点成分的变化，经过多炉次的数据记录和积累，对预测模型进行校正，实

现终点成分的准确控制。操作过程中所有信号最终全部都反馈给PLC，通过PLC实时运算与控制，实现真正的闭环控制。PLC组态还可以实现远程监控（可修改PLC数据，查看数据，历史数据报表，趋势图等），手机和电脑直接查看并修改PLC数据。可以通过PLC实时监测设备各项运行数据，例如设备水温水压、流量、真空度、熔炼参数等，保障设备安全稳定运行（图3）。

图4所示是功率设定曲线及功率实际运行曲线，目前我们已经实现在同一段时间内的实际功率实时跟踪设定功率。通过红外测温实时测量合金温度并反馈给PLC，后期我们会根据在PLC中前期运行的参数以及数据累计，建立数学模型，能够对功率进行自动的实时调节，最终满足实际功率与设定温度的实时跟踪。

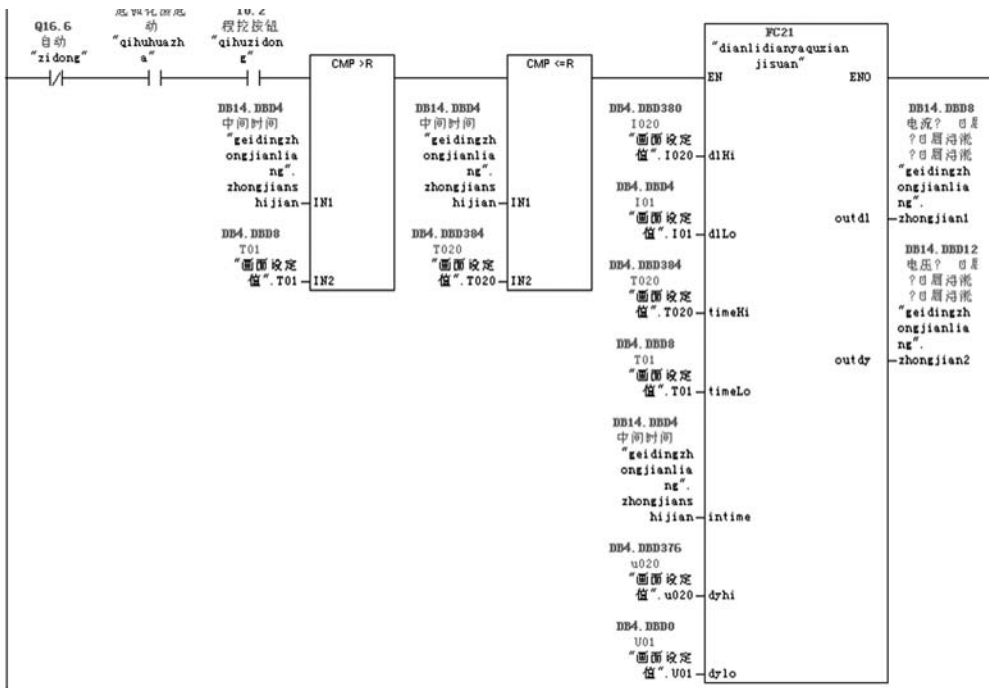


图2 程序调用建模
Fig. 2 Modeling of program call

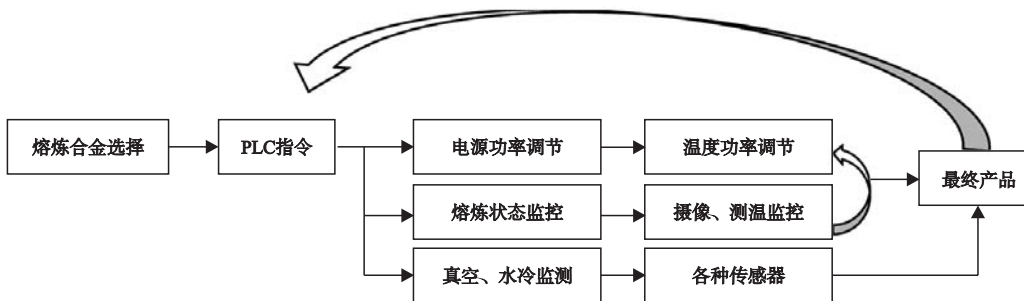


图3 熔炼工艺流程图
Fig. 3 Melting process flow chart

3 现场实际应用情况

实际生产当中, 分别对纯Ti、Ti-Al、Al、高温合金、非晶合金以及高熵合金进行了熔炼, 在2 kg、3 kg、5 kg、10 kg、15 kg、30 kg坩埚上进行了试验。首先根据所要熔炼的合金种类, 确定相应的熔炼工艺, 采用PLC来运算、发出指令控制, 并对设备的真空度、水温水压、熔炼状态进行监控, 通过对合金熔炼状态进行自动监控, PLC自动运算并调节相应的熔炼功率, 最终合金是否充分熔化需要人工以及测温进行综合判断, 最后自动浇注成产品。

钛铝合金有很多优良性能, 铸造钛铝合金存在铸锭成分偏析和组织不均匀等问题。真空悬浮钛铝合金, 液态钛加入金属Al形成金属间化合物, 化学成分稳定, 工艺性能良好。高熵合金是有多主元^[3]、较高原子百分比的合金, 真空悬浮熔炼强烈的电磁搅拌以及水冷铜坩埚非常适合熔炼高纯净的高熵合金, 熔炼5 kg含铌钛锆钒铝高熵合金, 选择等比例配比, 熔炼后合金成分非常均匀。

通过分析表1钛铝合金和高熵合金熔炼过程, 最终实际成分差别很小, 并且两种不同成分合金, 根据合

金类型、成分等, 要求分别使用不同熔炼工艺, 以保证熔炼后合金成分均匀, 质量稳定。系统通过数据记录存储, 形成不同合金熔炼工艺曲线, 通过分析产品的成分、合金材料的均匀性以及性能, 最终形成固定成分的合金熔炼工艺。通过分析优化该熔炼工艺, 形成最优的熔炼工艺存储在PLC中, 当下次再熔炼该合金时, 可以自动调用最优化的熔炼工艺进行熔炼, 无需人为判断合金的熔炼状态, 完全实现自动熔炼浇注。

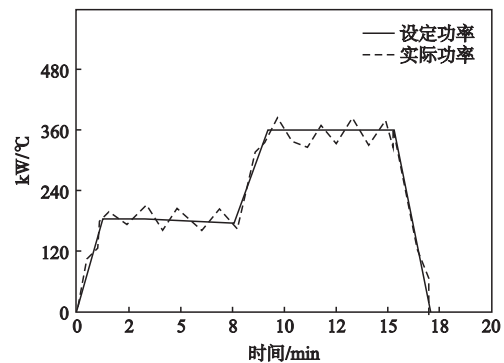


图4 功率实时跟踪曲线

Fig. 4 Power real time tracking curves

表1 钛铝合金熔炼实际成分

Table 1 Actual melting composition of TiAl alloy

项目	Al	Nb	Mo	Fe	Si	N	H	O	Ti
第1炉	29.2	9.1	2.3	0.02	0.005	0.01	0.005	0.07	余量
第2炉	29.1	9.0	2.3	0.03	0.005	0.01	0.005	0.07	余量

4 结语

真空悬浮熔炼技术所熔合金与水冷铜坩埚软接触和熔炼温度高等优点, 非常适合熔炼高纯活泼金属和合金、高熔点的难熔金属和合金以及一些非金属材料, 有着极其广泛的应用前景。先进的控制系统不仅

能够完成复杂的、多变量的、实时变化的关键参数控制, 还能够基于长期采集积累的冶金工艺参数, 通过相应的数学模型对数据进行处理, 并充分利用工业计算机的能力完成在动态环境中的变量控制, 实现冶金工艺的最优化, 最终企业实现利润最大化。

参考文献:

- [1] 宋青竹, 张哲魁, 孙足来, 等. 冷坩埚真空感应熔炼设备进展 [J]. 真空, 2014 (4): 19-21.
- [2] 王庆, 巴德纯, 王冬, 等. 真空感应CVI-CVD系统自动化控制技术 [J]. 真空, 2005 (3): 29-32.
- [3] 兰利娟, 顾莹莹, 濮天娇, 等. 高熵合金性能的研究现状 [J]. 冶金工程, 2018, 5 (1): 17-24.

Study on Automatic Control of Vacuum Induction Levitation Melting Process

HE Yong-liang, LI Wan-qing, YAN Jian-qiang, LIU Jing-yan, LIU Xin-feng, YAN Zeng-nan, ZHANG Peng-cheng

(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The development status, application and construction of cold crucible vacuum induction levitation melting equipment are briefly introduced. In the actual melting process of alloy, the optimal melting process curve is established through PLC data acquisition, calculation, storage, analysis and optimization. The communication between PLC and industrial computer makes the logic control and process control of vacuum suspension melting process easy to be realized, and remote monitoring, control, diagnosis and management can be carried out, which can ensure the composition uniformity and quality stability of the subsequent melted alloy.

Key words:

vacuum induction; floating melting; auto-control
