

# 特种合金真空感应悬浮熔炼工艺控制研究

李万青, 刘志中, 张鹏程, 何永亮, 刘新峰

(中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

**摘要:** 通过真空感应悬浮熔炼技术、采取特种合金感应熔炼工艺, 解决高熵合金、高温合金、钛合金等高质量特种合金材料熔炼和无污染的高端铸件的问题, 以满足生产工艺技术要求, 提高产品质量。

**关键词:** 特种合金; 真空悬浮; 熔炼; 高端铸件

随着国家对特种、高纯材料研究及需求的逐渐增多, 我国真空熔炼技术迅速发展, 传统的设备已经不能满足其生产需求, 因此, 需要一种冶金装备技术能够满足特种和高纯材料的生产需求。目前真空熔炼是生产镍基高温合金、钛合金、不锈钢和超高强度钢等特种合金材料的重要熔炼技术, 真空感应悬浮熔炼是在负压条件下进行加热、熔化、精炼、合金化和浇注的熔炼方法。真空悬浮熔炼炉(VILF)适用于高纯、活泼和难熔等金属材料的熔炼及制备。在熔炼过程中, 被熔材料呈悬浮或准悬浮状态, 排除了在高温条件下坩埚材料对金属熔体的污染, 因此是一种理想的熔炼技术, 属于当前最先进的材料制备技术之一。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<sup>[1]</sup>。

真空感应悬浮熔炼装备作为熔炼高品质合金的专用设备, 解决了合金熔炼过程中的污染问题和温度与成分的均匀性问题; 解决了高温、超高温难熔合金的熔炼问题, 能熔化Cr、Zr、V、Hf、Nb等高温金属或合金; 解决了熔炼合金种类多样性问题。实现国内高端装备重要技术以及解决新材料“卡脖子”问题, 填补了国内悬浮熔炼系统的技术空白, 在装备研制、材料研发、试验测试等环节均有强大的支撑保障。在真空状态下利用交变电流作用到感应线圈产生交变磁场, 交变磁场在炉料上感应出交变的电流——“涡流”, 炉料靠“涡流”加热并熔化, 从而使金属熔化。利用中频感应加热的原理, 将置于坩埚中的金属炉料在感应圈产生的交变磁场作用下悬浮熔化, 采用冷坩埚悬浮熔炼技术和真空熔炼技术有机结合, 实现半连续无污染熔炼各类金属及合金材料, 尤其是高熔点、高纯净金属及合金, 并可进行铸锭及小型铸件生产。

## 1 真空感应悬浮熔炼系统

真空感应悬浮熔炼系统包含真空系统、阀泵系统、倾炉浇注系统、进电系统、中频电源、电气控制系统、气动装置等构成, 如图1所示。真空系统包含炉盖升降移动机构、主真空室、加料及测温系统, 倾炉浇注系统包含伺服控制系统和电机系统, 电气控制系统是对真空系统的阀泵进行控制。

控制系统采用全数字化操作, 控制台采用触摸屏操作和PLC、工控机智能控制两种操作方式, 能实现现场面板以及计算机远程控制。设备采用多组智能传感器, 可以时时采集设备水温、水压、流量, 时时监控合金熔炼状态, 具备远程操作及监视功能, 能够自动记录操作工艺, 所有功能均具备数字化显示存储功能, 设备能

作者简介:

李万青(1979-), 女, 高级工程师, 研究方向为智能化、自动化控制系统。E-mail: 374333797@qq.com

中图分类号: TG232.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

12-1757-04

收稿日期:

2024-10-12 收到初稿,

2024-11-18 收到修订稿。

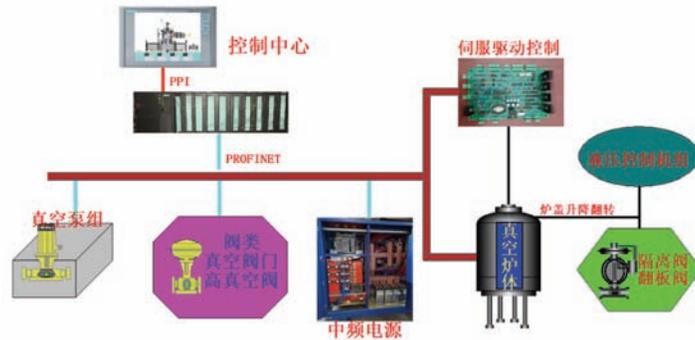


图1 真空悬浮系统组成

Fig. 1 Composition of the vacuum suspension system

够按特定合金工艺曲线实现自动熔炼浇注过程，减少了外界环境变化产生的干扰；智能控制系统为用户提供人机操作界面以及各种图形画面。通过与其他设备相联，可对工艺过程和参数进行预先设定，对设备运行情况和工艺参数进行监控。实现远程操作、监控并能够对工艺参数进行采集、整理、分析、优化，整体设计安全可靠，提高了设备的可靠性和劳动生产率，

数字化控制系统可提供人机操作界面以及各种图形画面，通过与其他设备相联，可对工艺过程和参数进行预先设定，对设备运行情况和工艺参数进行监控。完全可以解决工艺操作过程存在的计算偏差和再现性差的问题，对生产过程中的数据进行积累、整理、分析、优化，以满足生产过程管理以及工艺优化。系统上位机操作组态界面如图2所示。

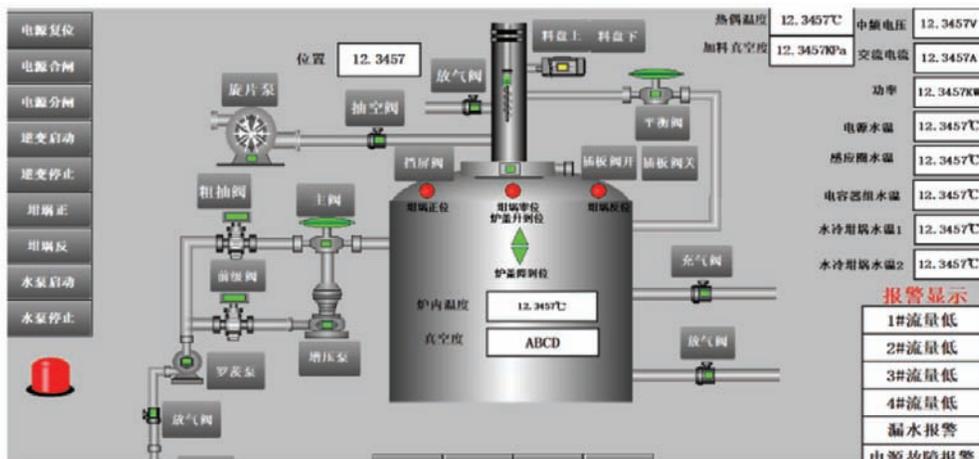


图2 系统上位机操作组态界面

Fig. 2 Operation and configuration interface of the upper computer system

图3所示为实现真空悬浮熔炼工艺要求所特殊研发的悬浮熔炼电源，形式不同于国内外同类型产品，将电源柜与负载柜分离开，使得高电流的二次槽路尽量短，采用IGBT模组控制，功率因数0.95以上，设备具有热效率高、安全稳定、自动化程度高等特点。电源和负载的设计与操作，按照工艺参数设计悬浮熔炼的效果，系统配热电偶测温 and 红外双色测温系统。可在不破坏熔炼室真空度情况下实时温度监测和记录，实现自动测温 and 闭环温度控制<sup>[2]</sup>，按照温度高低自动调节电源的功率大小，从而实现合金料的熔炼和悬浮效果。

## 2 工艺参数的实现

### 2.1 实现工艺熔炼的操作方法

合金粉末或原材料经过如图4所示高温加热悬浮熔炼过程，实现了特殊材质的高纯度、高硬度的高温合金成品元件制备。

### 2.2 高温合金熔炼过程自动控制温度的工艺曲线

根据图5温度控制曲线，温度实时自动监测，根据温度值自动调节中频电源的输出功率，从而实现自动控制熔炼的温度。



图3 真空悬浮熔炼电源系统

Fig. 3 Power supply system of the vacuum suspension melting

### 2.3 工艺参数设定的实现方法

按照工艺参数进行整体设计与控制软件编程，应用的软件有STEP7-V5.6、MCGS-7.2和Wincc7.5，实现下位机PLC的数据采集与控制功能、上位机组态界面，实现上位机组态和数据显示与操作控制功能。在熔炼室上部的加料室可进行熔炼过程中的二次加料操作；在多合金元素熔炼过程中，因各元素熔化温度差距较大，需要分批次加料熔化，如图6所示。

系统由电源控制柜、PLC柜、按钮操作面板、触摸屏操作面板等组成。可实现抽真空控制、冷却控

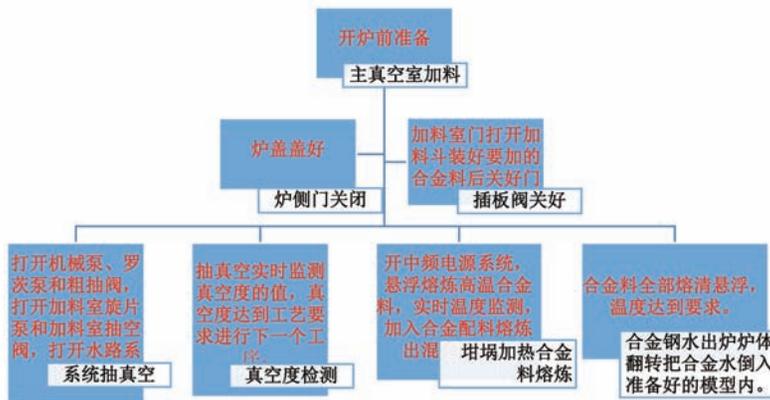


图4 悬浮熔炼工艺的实现过程

Fig. 4 Realization process of the suspension melting process

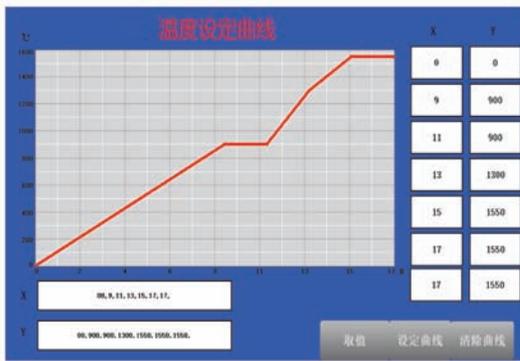


图5 温度曲线

Fig. 5 Temperature curve

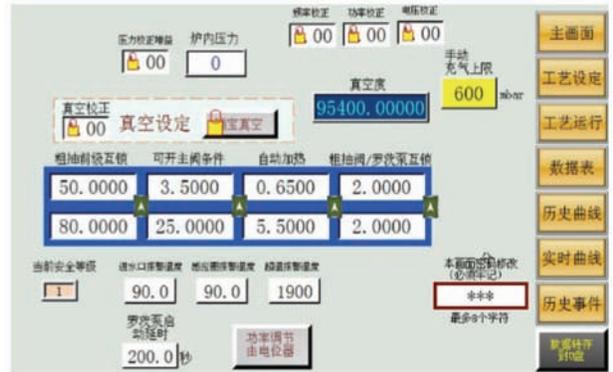


图6 参数设定

Fig. 6 Parameters setting

制、液压及气动控制、炉体及坩埚操作控制，温度记录、报警显示等功能。

操作员通过按钮操作面板或触摸屏组态界面进行生产操作过程控制，在触摸屏上参数输入设定，工艺菜单调用。主要功能包括：熔炼生产过程控制、真空度控制、电源控制、真空气动阀体控制、冷却水系统控制。其中熔炼生产过程控制由几个部分组成：数据采集（冷却水温、水压）、工艺曲线模型的管理（包括功率、熔炼温度的工艺曲线，测温、加料工艺参数

管理）、报警日志。

图7所示记录历史数据、统计报表、保存数据，以方便查询历史数据记录。另外，最主要是可以用U盘操作，U盘查到触摸屏上在开始时间和结束时间框中输入时间段，图8数据导出后以Excel表格的形式存储，可以用U盘拷到任意电脑都能查询和打印，方便查看。

图9实际真空悬浮熔炼15 kg钛合金过程效果图，能看到悬浮的效果，熔化金属没有接触到坩埚的内壁。熔炼效果无污染。



图7 统计报表记录

Fig. 7 Statistical report records

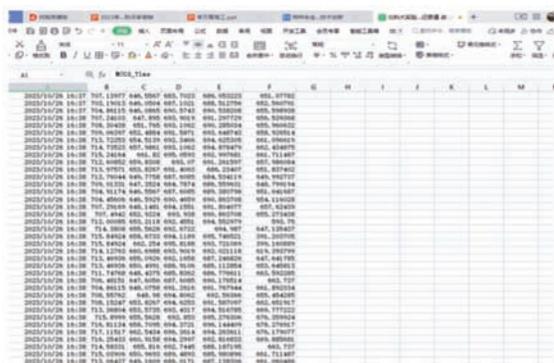


图8 数据导出界面

Fig. 8 Data export interface



图9 实际效果

Fig. 9 The actual result

### 3 结论

伴随着新技术的发展，现代化的装备制备技术对新材料的研究、产业化具有决定性的影响，对于促进材料科学与技术的进步具有十分重要意义。今后特种高温合金材料的材质应用要求越来越高，我们将依托该项目继续研发为解决行业共性和国家重大需求的特种合金材料熔炼问题，建立大数据平台，为国内外高校、科研院所、军工单位提供尖端材料熔铸实验。特种合金真空感应悬浮熔炼工艺控制在其设计以及制造过程中的安全性、智能化越来越重要。本文针对真空感应悬浮熔炼工艺自动监控系统的应用，采用自主编程控制软件实现了自动监控功能，改善了真空炉控制方法，解决了人工操作以及手动写入记录的复杂问题，通过实际应用分析该设计思路的特点与适用范围，增加了记录的可靠性和真实性。

#### 参考文献:

- [1] 何永亮, 李万青, 严建强, 等. 真空感应悬浮熔炼工艺的自动控制研究 [J]. 铸造, 2021 ( 5 ) : 598-602.
- [2] 韩少华, 任栋, 陈兰华. 基于模糊自整定PID控制的真空炉温度系统的设计及仿真 [J]. 冶金工业, 2024 ( 8 ) : 25.

## Study on Process Control of Vacuum Induced Suspension Melting of Special Alloy

LI Wan-qing, LIU Zhi-zhong, ZHANG Peng-cheng, HE Yong-liang, LIU Xin-feng  
(China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co. Ltd., Shenyang 110022 Liaoning China)

#### Abstract:

Through vacuum induction suspension melting technology and special alloy induction melting process, we can solve the smelting of high quality special alloy materials such as high entropy alloy, high temperature alloy, titanium alloy and way of pollution-free high-end castings to meet the technical requirements of production process and improve product quality.

#### Key words:

special alloy; vacuum suspension; melting; high-end casting