

引用格式:袁亨通,宋阳,孙鹏飞,等.真空自耗电弧炉的弧压与熔速自动控制系统研究[J].有色设备,2025,39(2):90-95.

YUAN Hengtong, SONG Yang, SUN Pengfei, et al. Research on control system of arc voltage and melting speed in vacuum consumable arc furnaces[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 90-95.

# 真空自耗电弧炉的弧压与熔速自动控制系统研究

袁亨通, 宋阳, 孙鹏飞, 王伟

(西部金属材料股份有限公司, 陕西西安710201)

**[摘要]** 针对真空自耗电弧炉的自动控制系统,根据炉体结构、技术规格要求以及熔炼工艺,提出了弧压控制与熔速控制结合的综合控制策略。阐述了补偿重量与熔速的计算方法,针对每种控制方法设计了程序的采样算法和思路,确保了控制系统的有效实施与精确调控。深入剖析了弧压与电流耦合现象产生的原因,并提出了解决方案。应用结果发现,熔速波动减小了约28.2%,熔速的控制效果良好,能有效减小电压波动。该控制策略的实施,对于提升真空自耗电弧炉的操作稳定性、优化熔炼过程、提高生产效率及产品质量等方面,具有重要的实践价值与理论意义。

**[关键词]** 真空自耗电弧炉; 弧压; 补偿重量; 熔速计算; PID控制

**[中图分类号]** TF132 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0090-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.012

## 0 引言

真空自耗电弧炉作为钛及钛合金等有色金属熔炼的主要设备,其熔炼过程较为复杂,手动操作在很大程度上主要依赖操作人员的经验,存在一定的安全隐患,成品率较低,产品质量不稳定。因此,大部分操作趋向于通过自动控制实现,而自动控制系统是该设备核心与难点<sup>[1]</sup>。目前,大多数真空自耗电弧炉均是恒电压控制,此控制方法响应速度慢,熔速波动相对较大,越来越难满足生产工艺的要求<sup>[2-3]</sup>。熔速控制是工艺改进的重要依据,通过设定合理的熔化速率曲线能减少铸锭偏析,可有效提高产品质量。因此,针对最新的弧压与熔速控制策略进行分析研究和转化,可以提高真空自耗电弧炉的自动化程度,提升控制效果。

## 1 熔炼工艺及控制

### 1.1 熔炼工艺

真空自耗电弧炉的熔炼工艺一般分为起弧、熔炼和补缩3个阶段<sup>[4]</sup>,每个阶段的主要特点如下。

1)起弧阶段:为了保护坩埚,在结晶器底部放置金属底垫,在底垫上布置起弧料。直流电源合闸后,空载电压一般为60~80V,缓慢下降电极杆,当达到起弧条件时,金属被电离,端面瞬间产生弧光放电,稳定燃烧一段时间后产生金属熔池。起弧电流一般较小,熔池产生后可适当增大电流,直至熔池完全形成。

2)熔炼阶段:每隔一段时间逐级增加熔炼电流,达到工艺规定的熔炼电流,进入熔炼阶段。此阶段相对简单,可以使用自动控制,只需要保证弧压、电流、熔速、真空度、冷却水温和流量在规定范围内,并适时调整稳弧电流即可。

3)补缩阶段:此阶段,为了减少铸锭顶部的缩孔,从而提高成材率,所以需要逐级减小熔炼电流,以降低熔池凹陷,尽量保证顶部端面的平整性。

### 1.2 控制要求

真空自耗熔炼是一种将自耗电极加热熔化,滴落到结晶器中形成熔池,再冷却凝固的过程。在熔炼过程中,弧压、电流和熔速波动均会导致铸锭内部成分不均匀,出现偏析和低倍检查不合格。因此,电

[收稿日期] 2024-11-20

[基金项目] 陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台(2024ZG-GXPT-02)。

[第一作者] 袁亨通(1996—),男,陕西咸阳人,硕士,主要研究方向为工业控制。

弧长度和工作电流是决定自耗电电极熔化效果的直接因素,也是保证熔池深度和状态稳定的重要条件<sup>[5]</sup>。电弧长度无法直接测量,其变化一般通过弧间电压反映<sup>[6]</sup>。工作电流可根据工艺直接设定或通过熔速调节。为确保成品铸锭合金含量的均匀性和稳定性,需要进行弧压与熔速两组闭环控制。

## 2 弧压(弧长)控制机理

### 2.1 弧压

电弧长度由自耗电电极和熔池之间的间隙距离确定,控制电弧长度的间隙距离通过控制电极杆的进给速度实现。在真空状态下,电弧长度和电弧电压的关系如图1所示。由图1可知,在短弧阶段,弧长和弧压的依附关系比较明显,当弧长超过一定程度,弧压便趋于稳定<sup>[7]</sup>。电弧过短可能发生短路,电弧过长会造成断弧。因此,弧压控制的主要目的是通过控制电极杆组件的进给速度,得到恒定的弧长。

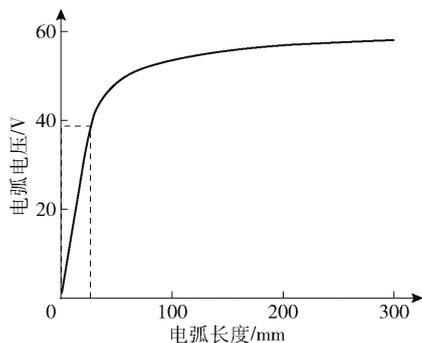


图1 电弧长度和电弧电压的关系

Fig.1 Relationship between arc length and voltage

在实际熔炼过程中,即使熔速、结晶器尺寸和自耗电电极的尺寸确定后,施加恒定的熔炼电流,弧压也不会保持恒定,因为随着熔炼时间的增加,自耗电电极长度减小,结晶器中的铸锭长度增大,总体电阻减小。另外,电弧的波动、测量电压的准确度、真空度、

自耗电电极的密度和尺寸变化等均会对弧压造成影响。因此,需要持续调节电极杆的进给速度来稳定弧长。

### 2.2 电极杆自动进给速度的PID调节

在西门子1500PLC中,使用CONT\_C基本函数块进行非线性PID控制,计算实际电压和给定电压的差值,将电压差值分为若干个范围,每个范围分别设置不同的延时接通定时器,当电压差值在所属范围内持续一定时间后,根据不同范围改变CONT\_C基本函数块的设定参数,如比例增益、调节时间和调节变量的上下限等,从而得到2种PID控制器:基本控制器和多个辅助控制器。弧压控制的原理框图如图2所示。

当电压偏差在较小范围内时,采用基本控制器,此时比例增益较小,积分时间较大,调节变量的上下限也较小。当电压偏差在较大范围内时,采用辅助控制器,增大比例增益以减少频繁震荡,减小积分时间以加快消除余差,扩大调节变量的上下限,使得电极杆的进给速度能大幅调节,保证弧长恒定。

## 3 熔速控制

### 3.1 称重补偿

熔速即电极的熔化速率,表示单位时间内电极重量的变化程度,是熔炼过程中最重要的控制参数之一,对熔炼温度场和熔池形貌影响明显<sup>[8-10]</sup>。熔速由相应周期内测量到的电极重量计算得到,电极重量由称重系统测量。真空自耗电弧炉的称重系统结构如图3所示。由图3可知,电极杆两侧的导向柱安装在下连接板上,下连接板与支撑框架通过关节轴组件连接,支撑框架与定位框架也通过关节轴组件连接。定位框架与支撑框架放置在3个称重块上,称重块受压变形称重,定位框架与炉头之间连接有2个纵向和1个横向的调节杆,防止电极杆偏移。

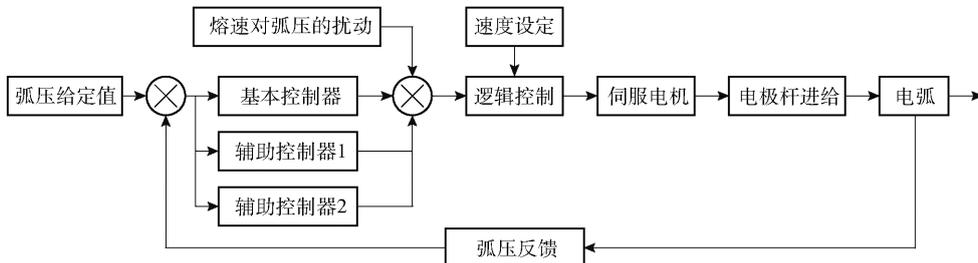


图2 弧压控制的原理

Fig.2 Principle of arc voltage control

称重传感器接入信号调理器,对测量数据进行预处理后接入 PLC。

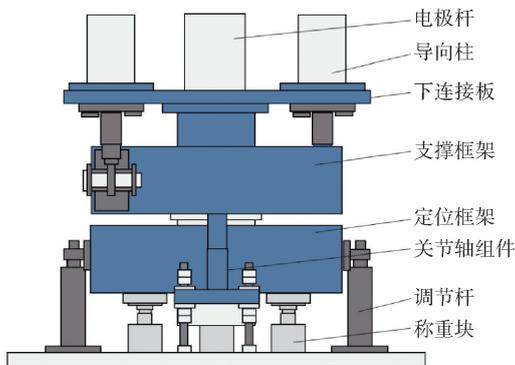


图3 真空自耗电弧炉的称重系统结构

Fig.3 Structure of weighing system for vacuum consuming arc furnace

在熔炼生产过程中,称重传感器采集到的电极杆的组件原始重量  $m'$  由 6 个参数部分组成,不能直接用来计算熔速,因此需要对重量参数进行修正,获得补偿重量  $m$ 。以上重量参数包括:①电极杆组件的重量( $m_0$ );②辅助电极的重量( $m_1$ );③电极杆动密封处的阻尼力( $F_c$ );④电极杆加速移动时的力( $F_a$ );⑤真空对电极杆产生的大气压力( $F_p$ );⑥自耗电电极的重量( $m_2$ )。

分别对上述几部分进行测定或计算。

1)空载静止状态(不移动电极杆、不抽真空)下,称重测量得到的参数便是电极杆组件的重量( $m_0$ ),将重量清零后挂上辅助电极,称重得到辅助电极的重量( $m_1$ )。

2)电极杆动密封处的阻尼是一种线性黏性阻尼,其阻尼力( $F_c$ )的大小与电极杆的移动速度成正比,方向相反<sup>[11]</sup>。设阻尼系数为  $c$ ,电极杆的移动速度为  $V$ ,则电极杆动密封处的阻尼力计算公式为式(1)。

$$F_c = cV \quad (1)$$

定速移动电极杆,分别记录电极杆静止和匀速移动过程中传感器的测定值,则阻尼系数根据公式(2)计算。

$$c = \frac{F_c}{V} = \frac{(m_{\text{静止}} - m_{\text{移动}})g}{V} \quad (2)$$

式中: $m_{\text{静止}}$ 、 $m_{\text{移动}}$ 分别为电极杆静止和匀速移动过程中传感器的测定重量,kg; $V$ 为电极杆的移动速度,mm/min; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

现场记录的重量数据和计算得到的阻尼系数如表1所示。从表1取得的数据可以计算得到阻尼系数的平均值为 0.011 33 kg·min/mm。

表1 阻尼系数数据记录

Table 1 Data recording of damping coefficient

方向	速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	移动重 量/kg	静止重 量/kg	阻尼系数/ (kg·min·mm <sup>-1</sup> )
慢上	500	342.6		0.009 6
慢下	500	331.7	337.8	0.012 2
快上	800	348.3		0.013 1
快下	800	329.5		0.010 4

当电极杆加速提升或下降时,会对称重系统产生影响,该附加力计算见式(3)。

$$F_a = ma \quad (3)$$

式中: $m$ 为电极杆组件的重量,kg; $a$ 为电极杆的加速度,m/s<sup>2</sup>。

由于减速机减速比大,且丝杠导程小,实际加速度产生的力非常小,可以忽略。

3)炉内抽真空后,大气会对电极杆产生压力,压力大小与动密封处电极杆的截面积有关,大气压力的计算公式为式(4)。

$$F_p = (p_0 - p)S = \frac{\pi d^2}{4}(p_0 - p) \quad (4)$$

式中: $p_0$ 为大气压力,Pa; $p$ 为炉内真空度,Pa; $d$ 为动密封处电极杆的直径,m。

综上,自耗电电极的补偿重量计算见式(5)。

$$m = m' - m_0 - m_1 - \frac{F_c + F_p}{g} = m' - m_0 - m_1 - \frac{\frac{\pi d^2}{4}(p_0 - p) + cV}{g} \quad (5)$$

### 3.2 熔速计算

$k$ 时刻熔速的计算见式(6)。

$$V^*(k) = \frac{m^*(k) - m^*(k-1)}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: $m^*(k)$ 和  $m^*(k-1)$ 分别为  $k$ 、 $k-1$ 时刻的自耗电电极补偿重量,kg; $\Delta t$ 为重量的采样周期,min。

自耗电电极重量的采样周期决定了熔速的灵敏性和稳定性。采样周期过短,熔速灵敏度高,能实时反映当前数值,但抗干扰能力差,结果波动大;采样周期过长,抗干扰能力提高,但数值滞后,相当于当前

熔速是根据  $\Delta t$  时间前的重量计算的,不能反映当前熔速变化。经过不断测试,本系统将采样周期设定为 5 s。

在西门子 S7-1500 PLC 的软件设计中,每隔 0.5 s 采集一次自耗电电极的补偿重量。在熔炼过程中,由于自耗电电极的密度不均匀,经过焊缝时会发生“掉块”等现象,重量的采集值发生突变。为了消除重量突变的影响,计算相邻重量的差值,将差值超过 5 kg 的重量剔除掉,这种操作称为“滤波”。将滤波后的 20 个重量值入栈,并计算均值。再每隔 5 s 采集一次滤波后的重量均值,并根据公式

$$V(k) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} V^*(k-i)}{n} \quad (7)$$

### 3.3 熔速的 PID 调节

熔速控制是真空自耗电弧炉熔炼控制的核心,其原理如图 4 所示。从图 4 可以看出,控制系统先计算熔速给定值与反馈值的差值,再通过差值调节电流,并根据补偿重量计算熔速。

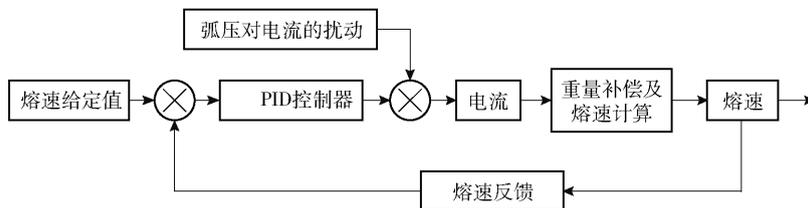


图 4 熔速控制的原理

Fig. 4 Principle graph of melting rate control

## 4 整体控制策略

### 4.1 耦合原因

结合图 2 和图 4 可以看出,2 组控制系统并不是相互独立的,互相关联,即弧压与电流存在耦合关系,这种耦合关系会影响控制系统的稳定。

电弧的电压和电流特性曲线如图 5 所示。根据图 5 分析耦合产生的原因,以  $a$ 、 $b$  点为例,当  $a$  点处的电弧电流增大,理论情况下弧压会沿着静态特性曲线从  $a$  点经  $b$  点变化到  $c$  点,则  $b$  点的弧压见式(8)。

$$V(b) = I(b) \cdot R(b) \quad (8)$$

但在实际过程中,由于电弧处的温度变化存在滞后性,金属的电离程度短时间内几乎不变,所以此时电流变化到了  $b$  点,但阻抗几乎不变,即式(9),因为  $a$  点处的阻抗大于  $b$  点,所以  $V(b') > V(b)$ ,此时动态弧压高于静态弧压。同理,当  $c$  点处的电弧电流减小,动态弧压低于静态弧压。这样产生的动态特性曲线围绕静态特性曲线形成滞环,滞环的面积随着电流的调节速度和幅度发生变化,电流调节速度越快,幅度越大,滞环越大。

$$V(b') = I(b) \cdot R(a) \quad (9)$$

滞环是熔炼过程中弧压与电流耦合关系的表

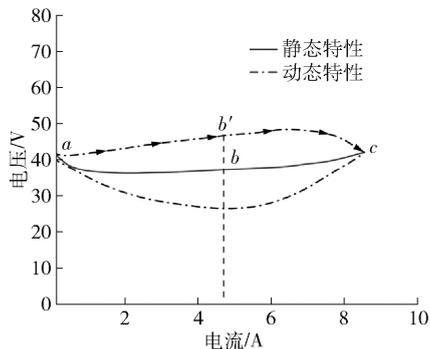


图 5 电弧的电压和电流特性曲线

Fig. 5 The V/A characteristic curve of arc

现,对整个控制系统造成影响的过程为:电流发生突变后,弧压偏离静态曲线,弧压控制系统因弧长发生了变化,调整电极杆进给速度,从而调整弧压,使得熔化电流发生变化,形成循环,造成弧压和熔速的波动。电弧处温度变化的滞后性决定了滞环无法被消除,只能尽量减小。因此,保证弧压和电流的控制系统平稳调节,减小波动是解决 2 组控制系统互相干扰的关键。

### 4.2 平稳控制

为了降低弧压与电流的耦合关系的影响,可以从程序和工艺两方面入手。

1) 在程序设计上,与弧压控制不同,熔速控制

采用模糊自适应整定和积分分离相结合的PID控制策略。在1500PLC程序设计中,使用CONT\_C搭建模糊PID,先对熔速偏差进行判断,如果偏差过大,将控制结构改为PD模式,屏蔽积分作用,避免积分累计,引起系统超调和加大震荡;如果偏差较小,将控制结构改为PID模式,启用积分环节,以消除稳态误差,提高控制精度。在调试过程中,先设定1组比例增益、积分时间和微分时间的初始值,再采用模糊推理在线校正PID参数,并将校正后的参数下载到PLC中。

2)在工艺流程上,一般先手动设定电流,等到熔池形成,且熔速稳定到工艺给定值上下时,切换到熔速的自动控制,并保存此时的电流值,根据该电流值设定PID调节变量的上下限,减小电流的波动,防止出现超调。

## 5 应用实践效果

根据控制策略对1台600kg真空自耗电弧炉的控制系统进行改进,并在熔炼过程中整定PID参数。在控制系统改进前后,采用2种某牌号相同和规格近似的难熔金属分别在该电弧炉上使用相同工艺进行熔炼。对比改进前后熔化阶段熔速随时间的变化,如图6所示,结果显示熔速波动减小了约28.2%,表明熔速的控制效果良好。

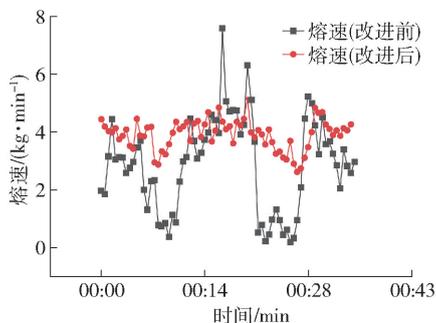


图6 某难熔金属熔化阶段熔速随时间的变化  
Fig. 6 Variation of melting rate with time during the melting phase of a refractory metal

难熔金属由于高熔点、高黏度,在熔化过程中熔滴易拉长且难以快速脱落,造成电极与熔池间距缩短,即弧长缩短,电压减小。在熔滴脱落瞬间,电压又会突然增大,造成电压的剧烈波动,对电弧炉自动控制系统的要求更加严格。图7是改进前后某难熔金属熔化阶段,电压随时间变化的对比情况,由图7

可知,改进后能有效减小电压波动。

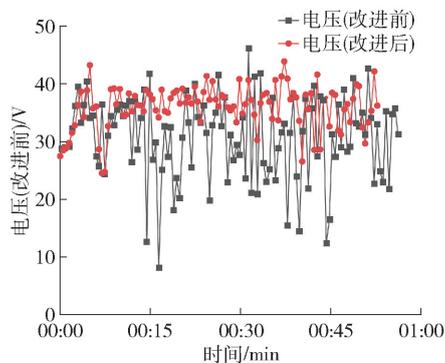


图7 某难熔金属熔化阶段电压随时间的变化  
Fig. 7 Variation of voltage with time during the melting phase of a refractory metal

## 6 结论

1)弧压控制的主要目的是通过控制电极杆的进给速度,得到恒定的弧长。在程序设计中可根据电压差值的范围选择对应的基本控制器或辅助控制器进行控制。

2)电极杆的原始重量分为6个部分,计算后得到补偿重量,再经过滤波、入栈和均值计算后得到实时熔速。

3)熔速控制的方式是调节电流,电流与弧压的耦合关系会干扰控制系统平稳运行,可从程序设计和工艺流程上降低该耦合关系的影响。

4)在实际应用时,发现难熔金属的熔速和电压波动明显减小,控制效果良好,表明本控制策略对电弧炉的改进具有一定的指导意义。

### [参考文献]

- [1] 杜亚宁,任源.基于分布式网络的真空自耗电弧炉之控制系统[J].有色设备,2011(1):28-30.
- [2] 南条敏夫等.炼钢电弧炉设备与高效益运行[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [3] 宋青竹,鄂东梅,王玲玲,等.真空电弧炉及凝壳炉的控制技术进展[J].真空,2022,59(6):1-9.
- [4] 戴永年,杨斌.有色金属真空冶金[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [5] 李鹏飞,李金山,孙畅,等.钛合金真空自耗电弧熔炼过程的多尺度模拟[J].钢铁钒钛,2013,34(2):24-29.
- [6] Lv G Y, Hu S X. Research on vacuum consumable arc remelting furnace drop testing system for thyristor power supply[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 268: 1494-1498.

- [7] 张乃禄,王伟,李伟强,等. 钛及钛合金真空自耗熔炼爆炸预警系统研制[J]. 钛工业进展,2018,35(2):42-45.
- [8] 赵小花,李金山,杨治军,等. 钛合金真空自耗电弧熔炼过程中温度场的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(11):1001-1004,974.
- [9] 于骞翔,张元生. 基于动态事件触发机制的电弧炉弧流参数建模及控制[J]. 中国有色冶金,2023,52(6):86-95.
- [10] 郭天宇,姚心,王成成,等. 冶炼电弧炉多物理场耦合仿真分析及结构优化[J]. 绿色矿冶,2024,40(6):58-66.
- [11] 田民波. 材料学概论[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

## Research on control system of arc voltage and melting speed in vacuum consumable arc furnaces

YUAN Hengtong, SONG Yang, SUN Pengfei, WANG Wei

(Western Metal Materials Co. Ltd., Xi'an 710201, China)

**Abstract:** A comprehensive control strategy combining arc pressure and melting rate is proposed for the automatic control system of vacuum consuming arc furnace, based on the furnace structure, technical specifications, and melting process. The calculation methods for compensating weight and melting rate were explained, and program design ideas were provided for each control method to ensure the effective implementation and precise regulation of the control system. In addition, this paper deeply analyzes the reasons for the coupling phenomenon between arc voltage and current, and proposes solutions. The application results showed that the melt speed fluctuation was reduced by about 28.2%, and the melt speed was well controlled to reduce the voltage fluctuation. The implementation of this control strategy has shown important practical value and theoretical significance in improving the operational stability of vacuum consumable arc furnaces, optimizing the melting process, improving production efficiency and product quality, and other aspects.

**Keywords:** vacuum consumable arc furnace; arc voltage; compensated weight; melting rate calculation; PID control

