

真空自耗电弧炉充氩系统的改进优化

同朴超, 孙 栋, 吴 明, 生 斌, 刘 俊

(西部超导材料科技股份有限公司 特种钛合金制备技术国家地方联合实验室

西安市特种钛合金制备及仿真技术重点实验室, 陕西 西安 710018)

[摘 要] 真空自耗电弧炉是钛及钛合金行业熔炼的主要设备,对于一些含有 Al、Mn 等易挥发特性元素的钛合金,需要在氩气保护的环境中熔炼,基于目前现有静态充氩熔炼控制方式的不足,通过对充氩系统进行改进优化,实现了多模式动态充氩过程控制,并经过实践验证了其合理性。

[关键词] 真空自耗电弧炉; 充氩; 优化

[中图分类号] TF06

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2022)02-0060-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.02.014

0 引言

近些年真空自耗电弧熔炼技术在钛及钛合金生产中取得了广泛应用,随之获得了高质量的金属产品,用于满足日益增长的航空及航天产业需要。对于一些含有大量高饱和蒸气压元素的钛合金产品如 TC2 的熔炼需要在氩气保护环境中熔炼以避免所含的 Mn、Al 等元素在高温中挥发。因此,充氩熔炼控制系统的性能直接关系到相关钛合金熔炼产品的质量稳定性。

1 原有充氩熔炼功能概述

1.1 原有充氩系统结构

真空自耗电弧炉充氩系统是依附于炉室和真空系统的装置,通过设置独立的管道、压力传感器、电磁阀等。如图 1 所示,在上位计算机上设定充氩压力,控制系统通过比较实际值和设定值来实现恒压力控制。

1.2 原有充氩系统不足

(1)熔炼安全:由于熔炼过程中氩气不排出,气体温度会不断升高,随之炉室内部气体压力也会增

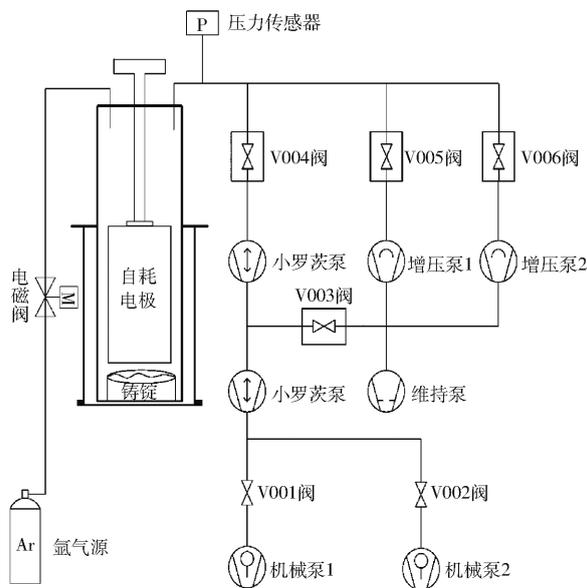


图 1 原有充氩系统结构

大,同时伴随着物料自身放气和熔炼挥发物,通过摄像观察系统无法看清炉内熔炼过程,如图 2 所示,充氩压力在 500、1 000、2 000 Pa 时熔池形态,从图中看出在 2 000 Pa 时已无法看清熔池存在安全隐患,因此为保证熔炼过程稳定性,一般充氩压力控制在 1 300 Pa 以内。但是,该压力远远无法满足工艺对 Mn、Al 元素挥发控制。

(2)控制方式:原有控制系统为静态模式,即充氩熔炼开始时关掉真空系统及真空阀门,将氩气充填至设定压力。由于炉内氩气无法流动,加之氩气本身为易导热介质会传导热量到炉室、电极杆、动密

[收稿日期] 2021-10-09

[作者简介] 同朴超(1986—),男,陕西渭南人,工程师,大学本科,主要从事钛合金熔炼设备改造工作。

[引用格式] 同朴超,孙栋,吴明,等.真空自耗电弧炉充氩系统的改进优化[J].有色设备,2022,36(2):60-63.

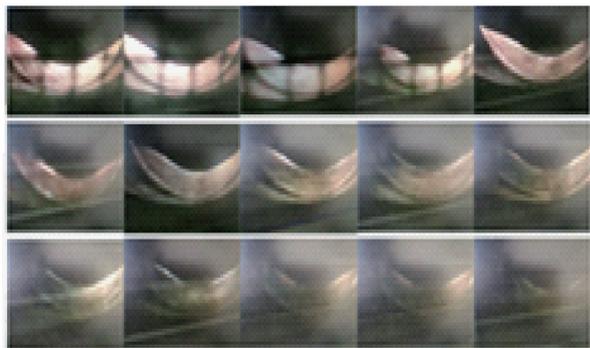


图2 原系统不同压力下充氩熔炼熔池情况
(自上而下 500、1000、2000 Pa)

封等部位。经过热传导计算估算,炉室温度约为 450 ~ 550 ℃ 左右^[1]。因此,熔炼过程中需要对相关无冷却水部位严密监控,否则易造成设备损坏。

(3) 工艺稳定性:原有的充氩管道仅采用一个真空电磁阀控制,在气体充到设定压力时关闭。由于气体惯性及控制系统滞后,压力偏差可以达到几十到数百 Pa,另外使用非调速的真空系统,在压力升高时需要泄压时,直接启动真空系统泄压存在精度差,难于控制等缺陷。

鉴于上述不足,需对充氩系统进行改造以满足工艺元素控制需求。

2 充氩系统改进方案

2.1 改造技术要求

(1) 充氩压力可以控制在 100 Pa ~ 15 kPa 之间,精度 5% ;

(2) 可实现动恒压力动态充氩,以保持熔炼过程的清晰和炉内热量的传导;

(3) 具备流量控制和压力控制两种控制方式。

2.2 系统组成

根据上述技术要求同时考虑现有的真空系统配置,由于原有的真空系统为定频不可调节抽气速度的泵组,要实现动态充氩,即要实现边充边抽模式,因此首先要升级为变频可调节抽气速度的泵组,对于充气端需要增加比例调节阀和气体质量流量控制器以满足可控充气要求,另外需升级测量装置和控制程序。其中抽气系统和充气系统是本次改造的关键,系统组成如图 3 所示。

2.3 抽气系统设计

对于抽气系统首要考虑的是保持或优于原有系统的抽真空效率,以保证正常真空熔炼的需要,另外

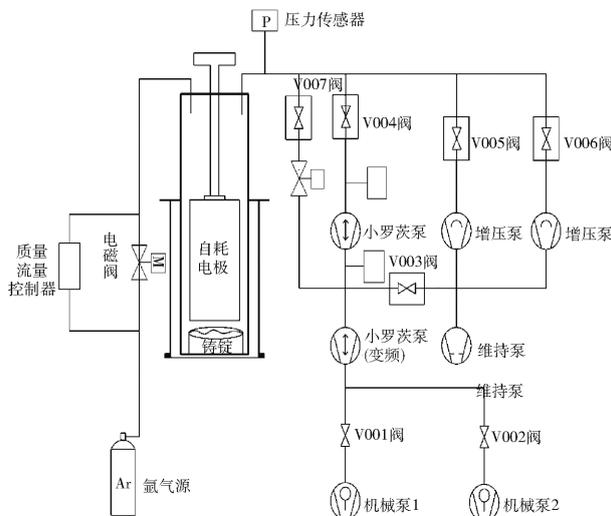


图3 改进后的充氩系统组成图

根据技术要求炉室压力需保持在 100 Pa ~ 15 kPa,因此需要使用小罗茨泵工作,对此将原有抽气速度为 600 L/S 定频机械罗茨泵,替换为 WH2500 抽气速度为 694 L/S 变频罗茨泵,通过调节泵的转速来实现抽气速率的调整。

由于极限压力为 100 Pa 根据抽速计算公式 $S_p = K_q \times (V/S) \times \ln(P_i/P)$ 其中 K_q 为修正系数小罗茨泵工作即可达到,因此大罗茨泵和油增压泵在充氩熔炼过程不予使用,因此不予更换。考虑到系统精度,在大罗茨泵侧并联一个可比例调节电动蝶阀,用于修正抽气速度。

2.4 进气系统

对于进气系统,根据要求由于涵盖 100 Pa ~ 15 kPa 压力区间,考虑到充气速度和充气精度,因此使用电磁阀直通快充和质量流量控制器微充控制。考虑到现有 8 t 电弧炉炉室的容积约为 6 m³,初始时炉室压力为 0.2 Pa,假定第一次需要充到 1 kPa 根据公式: $X_0 = P_i/P$ (P 为设定压力, P_i 为初始压力) 当 $X_0 \leq 0.1$ 时 $C_0 = 15.7D^2$ (C_0 为气体体积流量, D 为管道直径)^[2] 计算, $\Phi 20$ mm 口径管道 95s 可以达到设定值, $\Phi 10$ mm 口径管道 382s 可以达到设定值, $\Phi 30$ mm 口径管道 42s 可以达到设定值。综合考虑到后续精确调整压力,同时兼顾充气速度选取 $\Phi 20$ mm 口径管道结合质量流量控制器,控制器量程选为 10 L/min。

2.5 控制系统改进

2.5.1 整体架构

由于电弧炉控制系统使用西门子 S7-400PLC,

根据抽气系统因此需增加变频器控制小罗茨泵转速从而控制其抽气量,其次,真空压力测量需同时兼顾普通真空熔炼和充氩熔炼,经选型,将原来 Inficon PSG502-S 皮拉尼真空规管替换为 Inficon CDG025D 型电容薄膜规,其特点是使用陶瓷测量元件、寿命长、不区分气体介质,对于流量控制器需要响应快精度高的要求,经过比较使用七星华创 CS200D 型质量流量控制器可满足需求且其带有 Profibus 通讯接口方便集成原系统控制网络,比例调节阀使用 MKS T3B 系列高速蝶阀,信号接口使用模拟量控制。上位控制系统使用 Wonderware Intouch 开发,具备状态监控、熔炼参数显示、故障报警提示等功能。控制系统网络架构如图 4 所示。

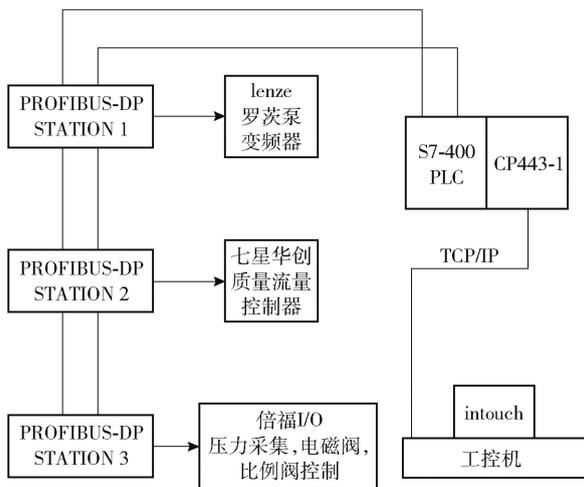


图 4 控制系统 Profibus 网络结构

2.5.2 流量和压力控制

根据技术要求需要具备流量控制和压力控制两种模式,对于流量控制模式使用流量控制器自身的闭环装置完成,通过上位机设定流量和比例阀开度,实现固定气体流量控制。该控制模式一般用于熔炼初期使用。

当熔炼进入稳定期,此时需要切换至压力控制模式,为避免压力超调采用串级 PI 控制,如图 5 所示,当设定压力给定后首先压力调节控制环节计算将结果作为罗茨泵转速设定,参考当前阶段比例阀的开度后,经过 PI 调节模块计算将结果输出至变频器和流量控制器调节块,流量控制器做闭环后输出最终流量,通过压力变送器反馈至压力调节 PI,从而实现恒压力控制。

由于充氩压力控制区间较大,在不同压力区间

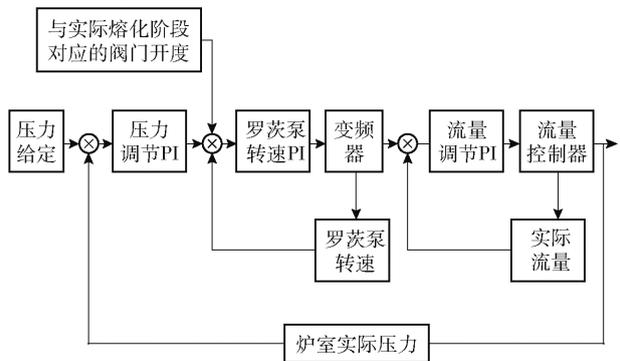


图 5 压力控制原理图

内 PI 控制最优参数不尽相同,为此将 100 Pa ~ 15 KPa 压力区间分为高、中、低三个阶段,100 ~ 800 Pa 为低压力范围,800 ~ 2 000 Pa 为中压力范围,2 ~ 15 kPa 为高压力范围,通过在上位界面分压力区间设置不同的比例及积分时间实现高精度控制,如图 6 所示。

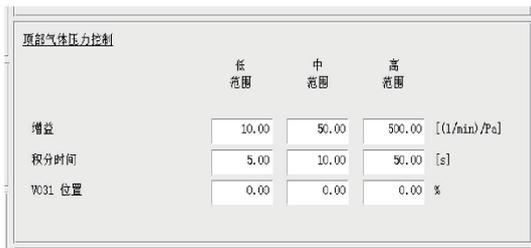


图 6 不同压力范围的 PI 设置

3 实际使用结果

设备改造完成后在 TC2 牌号熔炼进行测试,在稳定期设定压力为初期 2 000 Pa 稳定后上升到 10 KPa 时保持。

3.1 动态充氩

分别设置不同的比例阀开度,观察熔化过程中熔池状态,其熔炼过程如图 7、图 8 所示。

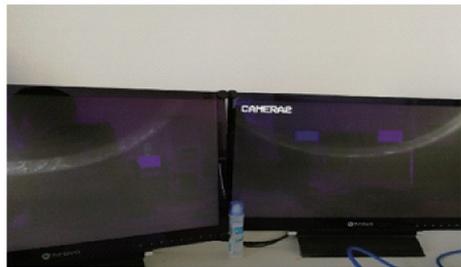


图 7 比例阀开度 7% 时熔池无法看清



图8 比例阀开度 15%熔池清晰可见

3.2 压力控制

动态充氩过程压力控制曲线如图8所示,从图中可以看出从2 000 Pa ~ 10 kPa 压力控制区间内,2 000 Pa 时设定与实际最大偏差为 80 Pa,10 kPa 时最大偏差 500 Pa,因此压力控制系统能较好地将实际压力控制在设定压力的 5% 偏差以内。

4 结语

通过对真空自耗电弧炉充氩系统进行改进优化后,使充氩熔炼压力控制范围由原来的不足 1 000

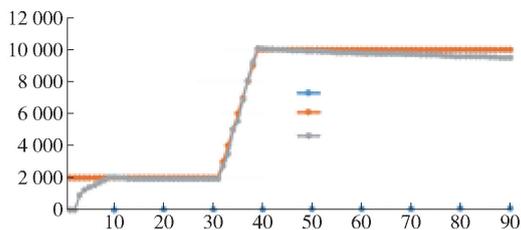


图9 TC2 充氩压力控制曲线

Pa 的静态充氩模式,升级至最大 10 kPa 动态充氩模式,确保了熔炼含 Mn, Al 等易挥发元素的钛合金成分均匀性,通过变频泵组及比例阀门结合质量流量计可以使压力精度控制在 $\pm 5\%$ 之内,在熔炼时可清楚的观察熔化过程,同时熔炼过程通过排出的氩气将炉室内部热量带到外部,保障了设备安全,达到了预期效果。

[参考文献]

- [1] 汶宏伟,邹伟,李平良,等. 真空自耗电弧炉熔炼时的电热计算与技术分析[J]. 真空,2007,44(2):51-54.
- [2] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,1999.

Improvement and Optimization of Argon Filling System of Vacuum Consumable Electric Arc Furnace

TONG Pu-chao, SUN Dong, WU Ming, SHENG Bin, LIU Jun

Abstract: Vacuum consumable electric arc furnace is the main melting equipment in titanium and titanium alloy industry. For some titanium alloys containing volatile elements such as Al and Mn, they need to be melted in an argon-protected environment. Based on the deficiency of the existing static argon filling smelting control mode, the multi-mode dynamic argon filling process control is realized by improving and optimizing the argon filling system, and its rationality is verified by practice.

Key words: vacuum consumable electric arc furnace; argon filling; optimization

▲