

钛合金铸造真空自耗电弧炉熔炼参数设置

魏芳¹ 侯敏¹ 侯继伟¹ 柳森¹ 武建强²

(1. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 2. 二炮驻北京星航机电装备有限公司军事代表室, 北京 100074)



摘要: 为了解决钛合金熔炼过程中参数设置不当、凝壳重量大、材料浪费多和合金液温度偏低的问题, 采用理论分析和计算, 对熔炼参数进行设置。通过实验验证, 将凝壳重量控制在合理范围, 铸件表面质量显著提高。将得到的熔炼参数用于指导生产实践, 获得了良好的效果。

关键词: 钛合金; 熔炼参数; 真空自耗熔炼

Melting Parameters Setting of Titanium Alloy Casting by VAR Furnace

Wei Fang¹ Hou Min¹ Hou Jiwei¹ Liu Sen¹ Wu Jianqiang²

(1. Beijing Equipment Limited Corporation of Xinhang Mechanics & Electricity, Beijing 100074; 2. The Second Artillery Forces in Beijing Equipment Limited Corporation of Xinhang Mechanics & Electricity, Beijing 100074)

Abstract: Problems were solved on heavy concreting shell, excessive material wasting and low temperate alloy fluid when titanium alloy was melted by VAR. The melting parameters were mounted through theory analysis and calculation. Based on experiment validating, the concreting shell weight was controlled under the proper range, and casting surface quality was enhanced remarkably. The parameters were used in practice and good results were gained.

Key words: titanium alloy; melting parameters; VAR (vacuum arc remelting)

1 引言

钛和钛合金的工业生产, 不论是重熔的自耗电电极或锻造用的开坯料, 或是异型铸件, 大多都是通过真空自耗电电极电弧熔炼来获得的^[1]。熔炼过程中当合金熔化进入坩埚后, 熔液在水冷系统的作用下温度呈现下降趋势, 因此熔液温度不易提高。当熔炼参数设置不当时, 合金液温度会更低, 这种情况将严重影响铸件成形和铸件表面质量, 具体体现在铸件薄壁处出现浇不足、铸件表面冷隔流痕缺陷多、铸件体孔洞类缺陷多。单纯依靠试验手段进行参数设置, 会出现进电母排严重振颤、短弧、金属液滴严重喷溅等现象, 造成熔炼失败, 试验工作量大。为此本文采取理论分析、计算与实验验证相结合的方法进行熔炼参数设置。

2 熔炼参数理论分析及计算

由于熔融钛化学活性高, 因此采用水冷铜坩埚进行熔炼。在熔融过程中电弧把热能传送到钛和钛合金熔池表面, 为确保水冷铜坩埚不被熔化, 在水冷铜坩埚内侧表面与液态金属熔池之间有一个具有一定厚度的完整的凝壳, 为此在熔池与凝壳的交界面的温度为金属结晶的温度, 从而在熔池与这个交界面就形成了一个存在温度差的变化温度场, 凝壳厚度取决于这个温度场, 即温度场或过热度。过热度越大, 凝壳厚度越小。研究结果^[1]表明这个温度场的变化很大程度上取决于电弧输入的能量(即电参数)——熔炼电压与电流, 电弧长度与熔炼速度。

图1为真空自耗电电极电弧熔炼浇注炉的熔炼浇注工艺流程, 包含准备期(装炉抽真空)、引弧期、正

常熔炼期、停弧浇注和铸件冷却五个步骤。

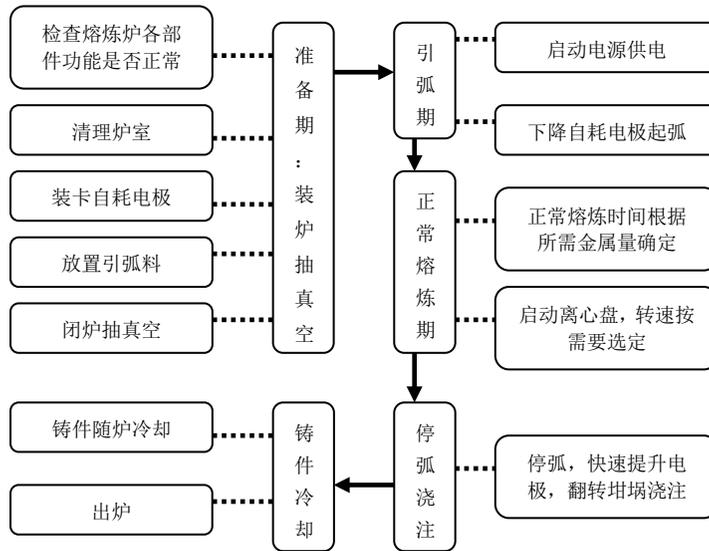


图1 真空自耗电极电弧熔炼浇注炉的熔炼浇注工艺流程

2.1 熔炼电流分析及计算

钛合金真空自耗熔炼采用低电压大电流，它的额定电流由熔炼炉型号大小确定。熔炼起弧有一个瞬时短路过程，为了避免线路过载，应设置较小的弧电负荷，见图2。起弧后应采用正常熔炼的20%~25%的较小电流预热自耗电极和凝壳，以加快随后的熔化速度。在进入正常熔炼后，熔炼电流可用公式(1)进行计算：

$$I = Q \cdot A \tag{1}$$

I ——熔炼电流； Q ——电流密度； A ——电极截面积。通过电极的电流密度通常控制在 $0.4 \sim 0.6 \text{ A/mm}^2$ ，随着电极直径的增大，电流密度可相应低些。

凝壳炉的熔炼速度与熔炼电流和电压成正比，即式(2)：

$$v = KIU \tag{2}$$

式中： v ——熔炼速度， g/s ； k ——常数(系数)，其值为 $0.33 (\text{g/s.kW})$ ； U ——熔炼电压， V ； I ——熔炼电流， kA 。

增加熔炼电流可以加快钛的熔化速度，使凝壳重量降低。同时也伴随着使熔池深度变深。因而熔池的深度也与熔炼电流成正比，见式(3)。随着熔池的深度变深，熔池的过热度也提高了。

$$h \cong \frac{1.5 \times I}{1000} \cong 1.5I \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中： h ——熔池深度， cm ； I ——熔炼电流， A 。

根据设备条件，配备了 $\Phi 220 \text{ mm}$ 和 $\Phi 160 \text{ mm}$ 两种规格的电极直径，由式(1)、(2)和(3)对熔炼参数进行计算，结果见表1。

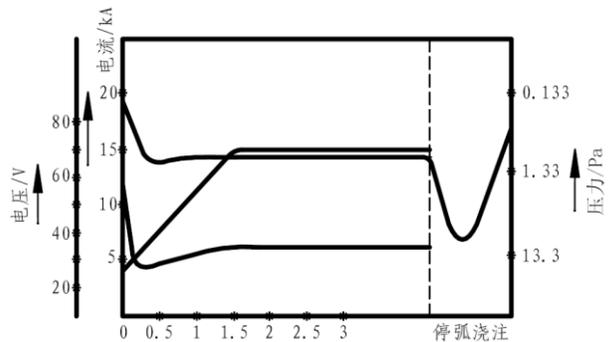


图2 钛合金熔炼电参数的变化

表1 熔炼参数计算结果

电极直径 /mm	引弧电流 /A	正常熔炼电流 /A	熔炼速度 / kg min^{-1}	熔池深度 /cm
$\Phi 220$	3040~5699	15198~22796	12~18	23~34
$\Phi 160$	1607~3015	8038~12058	6.4~9.5	12~18

2.2 熔炼电弧长度及电压分析

当熔炼电流确定后，电弧的长度将决定熔炼正常与否。在真空直流电弧熔炼过程中，通过熔炼弧压信号来控制熔炼弧长和熔炼过程。直流电弧静特性 U 型曲线如图3所示。由图3可知，在a-b段，弧压 U 随电流 I 的增加而下降；在b-c段，弧压 U 随电流 I 的增加呈平稳特性；在c-d段，弧压 U 随电流 I 的增加

而上升。在熔炼时,使用大电流 c-d 段,此时弧压 U 与弧流 I 为非线性关系,由此得到弧压计算公式(4)。

$$U = a + \frac{KI}{d} L \quad (4)$$

式中: a ——金属和气体有关的常数(19.8V); K ——与金属有关的常数(钛为 0.004); d ——熔化电极直径, mm; L ——熔炼弧长, mm。从图 4 弧压与弧长曲线关系可知,在短弧阶段,二者有明显的依附关系,当弧长超过一定值后,弧压已趋于一稳定值。因此在短弧熔炼的情况下,才能实现弧压控制弧长^[2]。

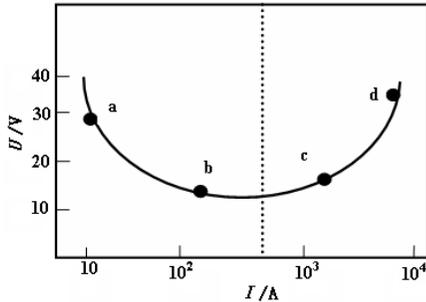


图 3 直流电弧的静特性曲线

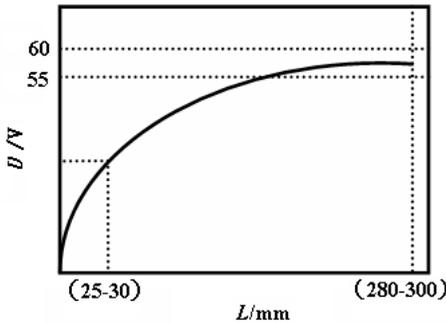


图 4 电弧电压与电弧长度关系

实际操作过程中,当电压为 42~45V,或更高时,电弧过长,热量不集中,表现为钛熔池呆滞,表面模糊不清并漂浮有杂质花瓣。当弧长在 15mm 以下时,电弧过短,会造成频繁短路,使钛熔池温度急剧变化,熔池的颜色明暗不定,且伴随发生严重的金属喷溅,电流表和电压表指针频繁大幅度摆动,进电母排间由于互相吸引而发出撞击声。当电弧长度为 25~30mm,电压值为 38~42V 时,钛熔池表面十分清晰活跃,钛液徐徐波动,电流表和电压表指针周期性地微微上下摆动,为合适的电弧长度和电压。

3 试验结果

根据上述理论计算,在最大熔炼电流为 20000A 的熔炼炉上开展了实验验证工作,制定熔炼实验工艺参数见表 2。由表 2 结果可见,对于直径为 $\Phi 220$ mm 的电极,当正常熔炼电流为 17000~19000A 时,获得的凝壳重量占比为 13%,效果良好;当正常熔炼电流小于 17000A 时,凝壳重量占比在 15% 以上,凝壳重量占比偏大。对于直径为 $\Phi 160$ mm 的电极,当正常熔炼电流为 10000~12000A 时,获得的凝壳重量占比为 12%,效果良好。采用效果良好的参数进行铸件浇注,结果显示铸件表面流痕、冷隔缺陷显著减少。未经热等静压的铸件,内部空洞类缺陷也较少。

表 2 熔炼试验工艺参数

电极直径/mm	引弧电压/V	引弧电流/A	正常熔炼电压/V	正常熔炼电流/A	凝壳重量/熔炼重量
$\Phi 220$	40~80	3000~4500	38~42	15000~16000	26/100=26%
				16000~17000	15/100=15%
				17000~19000	13/100=13%
$\Phi 160$	40~80	2400~3000	38~42	10000~12000	7/60=12%

4 结束语

采用理论分析、计算和实验相结合的方法,对熔炼参数进行了设置,当电极直径为 $\Phi 160$ mm、正常熔炼电流为 10000~12000A、电压为 38~42V 时,获得的凝壳重量占比为 12%。当电极直径为 $\Phi 220$ mm,正常熔炼电流为 17000~19000A 时,获得的凝壳重量占

比为 13%。采用上述参数进行钛合金熔炼,凝壳重量稳定,铸件表面质量和内部质量均大幅度提高。

参考文献

- 1 谢成木. 钛及钛合金铸造. 机械工业出版社, 2005. 231~249
- 2 孙足来, 党哲鹏, 杨洪帅, 等. 真空电弧炉和真空感应炉的研究[J]. 真空, 2008, 4(45): 5~6