

· 冶炼与凝固 ·



真空自耗重熔电弧稳定性的影响因素与工艺控制

刘文学¹, 刘光辉¹, 李林森¹, 费三林¹, 许勇¹, 谢伟², 许广鹏¹, 倪燕红¹

(1 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001; 2 中信特钢研究院, 江阴 214400)

摘要:通过研究真空自耗重熔高温合金和特种不锈钢过程中极间电弧的行为变化,分析了电极尺寸、外部质量、气体含量等因素对电弧与熔炼稳定性的影响。结果表明,电极直径偏差较大时,明显影响料杆移动速度计算,从而异常地调节电弧间隙,出现短路、熔滴频率偏离等工况,应控制其锥度 $\leq 0.5\%$;电极上的裂纹和缩孔缺陷干扰电弧稳定控制,尤其横裂纹导致熔滴和熔速严重失稳;母材氮含量较高时气体溢出显著,会引起电弧偏移,熔滴、气氛压力波动。因此,电极制备时控制 $w[\text{N}] \leq 0.003\%$ 为宜;不同炉台存在明显设备差异性,应针对性探索合适的PID控制参数。

关键词:VAR; 电弧行为; 稳定性; 自耗电电极

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00065 中图分类号:TF132

Influencing Factors and Process Control of Vacuum Consumable Remelting Arc Stability

Liu Wenxue¹, Liu Guanghui¹, Li Linsen¹, Fei Sanlin¹, Xu Yong¹,
Xie Wei², Xu Guangpeng¹, Ni Yanhong¹

(1 DaYe Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Research institute, CITIC Pacific Special Steel Group Co., Ltd. Jiangyin 214400, China)

Abstract: The behaviors of interelectrode arc during vacuum arc remelting of high-temperature alloy and special stainless steel were investigated in this paper, and the influence factors such as electrode size, external quality, and gas element content on arc stability were analyzed. The results showed that large deviation of electrode diameter significantly affected the calculation of rod base speed, resulting in abnormal adjustment of arc gap, short circuits, and deviation of droplet frequency. The electrode taper should be controlled to be $\leq 0.5\%$. Cracks and shrinkage cavities defect on the electrode interfered with arc stability control, especially radial cracks leading to severe instability of droplets and remelting rates. Gas overflow was significant with high nitrogen in base material, which caused arc deviation, fluctuations in droplet and atmosphere pressure. Therefore, it is advisable to control $w[\text{N}] \leq 0.003\%$ during electrode preparation. There were obvious differences in equipment among different furnaces, and appropriate PID parameters should be explored.

Key Words: VAR; Arc Behavior; Stability; Consumable Electrode

真空自耗重熔(Vacuum Arc Remelting, VAR)是指在真空下,被熔材料作为自耗电电极母材,水冷铜坩埚作为另一个电极,在两极间引燃和保持电弧,母材被电弧高温熔化而滴入坩埚内,逐步熔化并在强制冷却条件下冷凝成金属锭的冶炼方法^[1-2]。作为最严格控制的精炼技术之一,VAR除了能够进一步提升合金洁净度(去除气体、微量和杂质元素以及非金属夹杂物)外,还可以减少铸锭内部微观和宏观缺陷,显著优于其他重熔技术。因此,VAR主要应用于特殊钢、高温合金和钛/锆合金等成品锭的终端冶炼工艺,旨在满足航空航天等特殊行业对金属材料的高标准需求^[1-3]。

经研究发现,影响真空自耗重熔钢锭质量的因素包括母材质量、熔化速度、电弧行为和冷却条件

等。电弧作为熔炼过程中提供热能的来源,在整个熔炼操作中须根据既定的标准进行精确控制,确保电弧在电极与熔池上部之间持续燃烧^[2,4]。金属从自耗电电极到熔池的转移主要是通过电弧实现的,称为“熔滴过渡”^[5],因此,电弧行为直接关系到熔炼过程顺行和铸锭质量。为了获得最稳定的重熔过程,极间电弧的稳定性尤为重要^[6]。基于工艺试验研究了真空自耗重熔过程中电弧的行为变化,分析了电极尺寸、氮含量以及内外质量等因素的影响,综合提出了提升电弧稳定性的工艺要求。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验在奥地利和德国的A和B两家著名特种

冶金技术与设备厂家进口的6 t真空自耗炉上进行,配套圆形坩埚/结晶器的规格为 $\phi 638\text{ mm}/\phi 660\text{ mm}$ 。重熔材料为高温合金GH696、GH4698,以及含氮型特种不锈钢15-5PH(初始 $w[\text{N}]$ 约 900×10^{-6}),其典型合金成分见表1。所用带锥度的自耗电极母材为6 t进口真空感应炉(VIM)冶炼+模铸成型钢锭并进行表面车削,电极直径为底部530 mm(对应起弧端),顶部约558 mm(对应补缩端)。

1.2 试验方法

真空自耗炉结构和重熔过程原理如图1所示,主要分为起弧→稳定重熔→热封顶(补缩)三个阶段。本试验共进行6个炉次,分别编号为RM1~RM6。根据生产单位现有的自耗电电极材料的内外部质量情况见表2,在A厂VAR炉上重熔GH696高温合金,分析电极锥度与直径误差对重熔稳定性的影响;在A厂VAR炉上重熔GH4698高温合金,分析电极不同方向裂纹的影响;在B厂VAR炉上重熔无氮GH4698合金和含氮15-5PH不锈钢,对比分析电极中气体元素的影响。在真空自耗重熔过程中,观察并记录设备监测的熔炼电流、电压、熔速、熔滴频率,以及真空度、氦气压力等关键参数的数据,绘制趋势线和评估其稳定性。

2 试验结果与讨论

2.1 真空自耗重熔电弧行为

电弧行为受熔化电流、电极与熔池间环境等复杂因素影响,很大程度上取决于操作参数与条件,如电流强度、电弧间隙(长度)、炉内气氛环境和压强等^[1]。其中,最为重要的是电极与熔池之间的电弧间隙^[7]:电弧间隙必须控制在一定范围内,使电弧均匀地分布在电极端部,并通过短滴转移金属,如图2所示;此外,也包括电极母材条件与化学成分,比如气体元素氮和氢等。

2.2 电弧间隙与料杆驱动速度控制

在VAR炉的工作过程中电极的升降调节系统

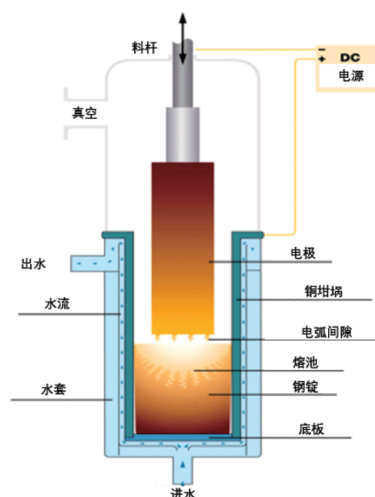


图1 真空自耗重熔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum arc remelting

起着至关重要的作用,此系统包括电极的定位装置和料杆驱动机构,其功能是精确控制电极的位置。电弧间隙的大小便是主要通过料杆驱动速度结合电参数进行控制的,保持合理的驱动速度是获得稳定电弧的基本条件^[2]。

图3及式(1)所示为VAR关键几何尺寸以及料杆驱动速度的计算方式^[4]。可以看出,料杆的移动距离由电极直径、铸锭直径(铜坩埚内壁尺寸)、钢密度以及熔化速度来确定。在实际操作中,电极升降控制需要根据不同的冶炼阶段和工艺要求进行调整,前述这些参数共同作用决定了料杆驱动的电极进给速度。

$$W_{dr} = \frac{W_{mr}}{d \times \pi} \times \left(\frac{1}{R_e^2} - \frac{1}{R_s^2} \right) \quad (1)$$

式中, W_{dr} 为料杆驱动速度,mm/s; W_{mr} 为重熔速度,g/s; d 为钢密度,g/(mm³); R_e 为电极半径,mm; R_s 为铸锭半径,mm。

在炉台设备上,料杆驱动速度的调节由PLC^[7]以及PID控制系统共同完成:如图4所示,P值部分的输出构成了料杆运行的基本速度,而I值部分的

表1 VAR试验品种的合金成分(质量分数)
Table 1 Alloy composition of VAR trial materials

品种	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W
GH696	0.06	0.02	0.07	0.002	0.000 8	11.01	23.00	0.01	-
GH4698	0.05	0.01	0.03	0.003	0.000 4	14.46	余量	0.02	0.027
15-5PH	0.04	0.80	0.34	0.006	0.000 6	14.56	4.62	3.51	-
品种	Mo	V	Al	Ti	B	Nb	Zr	N	
GH696	1.30	/	0.486	3.06	0.014 9	-	-	0.004 8	
GH4698	3.00	0.011	1.583	2.64	0.005 5	2.05	0.04	0.001 7	
15-5PH	0.29	0.033	0.007	-	-	0.290	-	0.090 5	

表 2 VAR 电弧稳定性试验方案
Table 2 Trial scheme for VAR arc stability

试验炉号	VAR 设备	品种	试验内容
RM1	A	GH696	电极锥度直径误差
RM2	A	GH696	直径误差
RM3	A	GH4698	纵裂纹
RM4	A	GH4698	横裂纹
RM5	B	GH4698	无气体元素氮
RM6	B	15-5PH	含氮品种

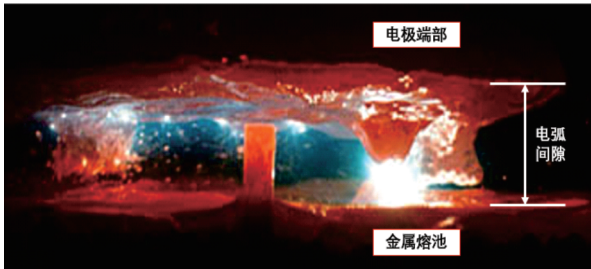


图 2 电弧形貌示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arc morphology

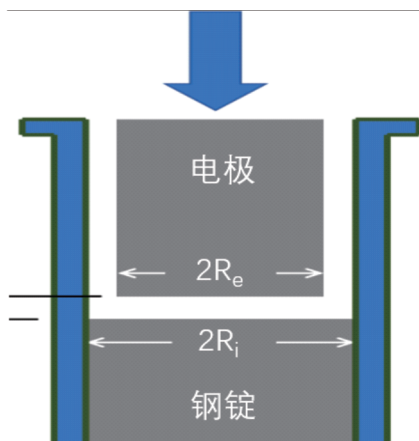


图 3 料杆驱动速度计算

Fig. 3 Calculation of driving speed of rod

响应通过设置控制器的积分参数来调整,从而精确地控制料杆上下。如果 P 和 I 值设置不合理,电极升降与熔速和电弧间隙不匹配,将造成驱动速度的波动,影响电弧恒定。

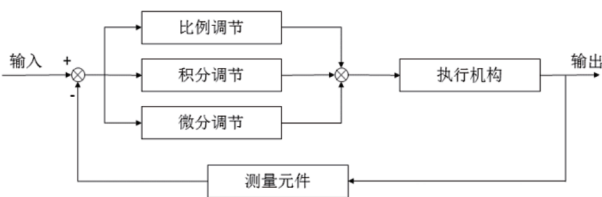


图 4 VAR 熔炼 PID 控制系统结构

Fig. 4 Structure of VAR PID control system

而实际熔化速度是由电流和电弧间隙来决定,在电弧间隙保持不变的情况下,当冶炼过程熔化电流发生波动时,熔化速度也将发生波动^[8]。根据图 5 熔滴频率(n/s)与电弧间隙和电流的关系所示:在相同的熔滴频率下,电流改变会造成电弧长度的改变:电流增大时,电弧间隙减小;在相同电流下,熔滴频率增大也会导致电弧间隙减小,电弧变短。

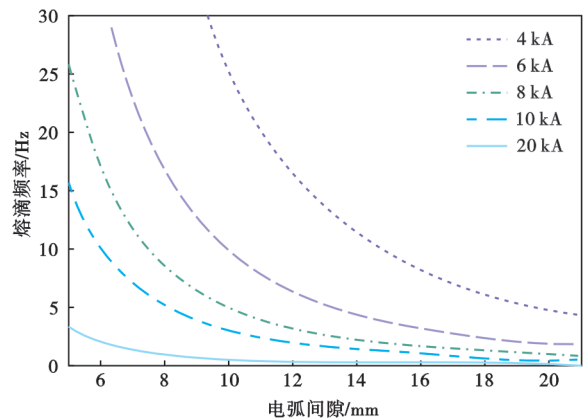


图 5 熔滴频率与电弧间隙和电流的关系

Fig. 5 The relationship between droplet frequency, arc gap, and current

2.3 电弧稳定性的影响因素分析

2.3.1 电极直径的影响

真空自耗炉使用的电极来源通常为真空感应熔炼铸锭、电渣(ESR)或真空自耗重熔锭,或者改锻电极,再经表面处理(扒皮、车削)后焊接使用。由于模铸锭和重熔锭大多数都有脱模锥度,因此,自耗电头尾尺寸存在一定的偏差。通常在较小范围内变化时,不会产生明显的影响,若局部直径变化过大或录入系统的直径与实际值偏差,不利影响更为显著。

在试验 RM1 熔炼初期,根据电极起弧端尺寸,电极直径录入后设定值为 530 mm,但随着冶炼的进行,电极的实际直径逐渐变大,设定值并未随之进行调整,系统依然根据初始直径信息计算料杆驱动速度。其熔炼曲线如图 6 所示,中期料杆下落变得较快,熔滴值位于设定值上方震荡。根据熔滴与弧长的关系,这个阶段的实际电弧长度偏短,端部与熔池已经开始出现局部短路现象。熔炼至中后期,反馈曲线异常情况,操作人员将电极设定值由 530 mm 调整到 555 mm,可见,曲线中实际熔滴值迅速恢复到设定值附近。

在相似试验炉次 RM2 中,如图 7 所示,电极直径

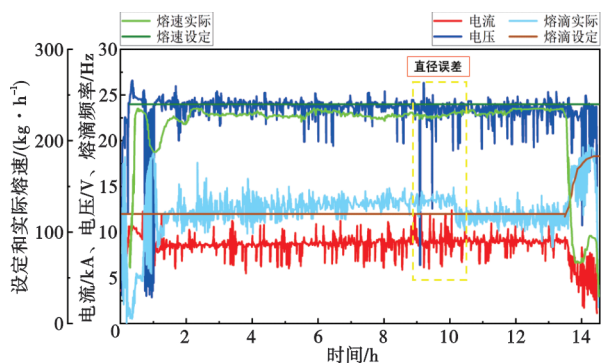


图6 VAR熔炼曲线:电极锥度的影响

Fig. 6 Melting curve of VAR: the effect of electrode taper

录入值相比于实际值偏小且偏差程度过大,熔炼控制系统为了达到设定的熔滴频率,大幅加快料杆驱动速度,使得料杆下降过快,与金属熔池短接造成了短路,电弧过短后PID系统控制料杆抬起;然而,由于直径持续误差,自耗电电极如此反复下降和抬起,导致电压和熔滴速度等参数波动异常,极间电弧极不稳定。

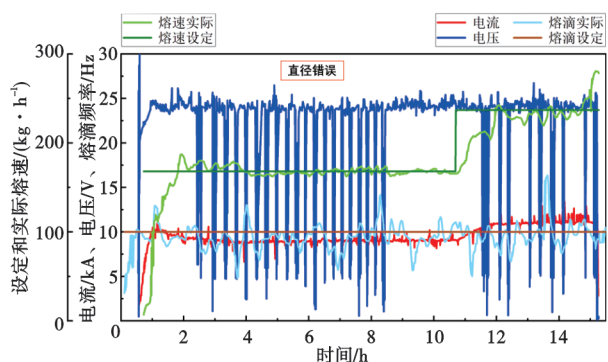


图7 电极直径误差对VAR熔炼曲线影响

Fig. 7 The effect of electrode diameter error on VAR melting curve

试验结果表明,电极直径的锥度或录入误差,直径的设定值与实际值相差太大,明显影响料杆移动速度计算,实际的电极升降速度与工艺设定电参数方案不匹配。表3统计了RM1和RM2两炉在重熔阶段参数的稳定性,曲线数据显示随着直径误差的增大,电压、熔速和熔滴的方差值显著扩大,极间电弧长度波动^[2,4]、电弧严重失稳。最终,该炉次钢锭表面质量差、凹凸不平,内部存在较多疏松和夹杂、夹杂缺陷,只能报废处理。因此,为了避免尺寸误差及其引起的PID调节料杆驱动速度不匹配,生产工艺上要求自耗电电极的锥度应满足 $\leq 0.5\%$ 。

同理,由于凝固条件差异,铸造电极与重熔锭、

表3 参数稳定性对比

Table 3 Comparison of parameter stability

参数项	试验炉号	均值	方差
电压/V	RM1	23.42	2.92
	RM2	18.43	18.05
熔速/(kg·h ⁻¹)	RM1	229	8.802
	RM2	182.54	3088
熔滴/Hz	RM1	12.41	1.147
	RM2	9.37	3.96

改锻电极等材料的平均密度不一致。因此,在使用不同母料时录入系统的电极密度应有所区别,否则系统计算出的驱动速度偏差变大,无法保证合理电弧长度。

2.3.2 电极纵向和横向裂纹的影响

自耗电电极由于裂纹、缩孔等缺陷而不完整,可造成冶炼过程不稳。电极母材的裂纹通常分为纵向和横向两种,如图8所示。一般而言,针对纵裂纹,在母材处理时可将表面处理干净,不会对电弧和熔炼稳定性产生明显影响。如图9所示,GH4698电极中的纵裂仅引起极短暂的电压异常,整体上熔速和熔滴保持稳定。但其存在的风险是,如果裂纹较深,裂纹内带来的夹杂不可避免进入金属液中而造成污染。

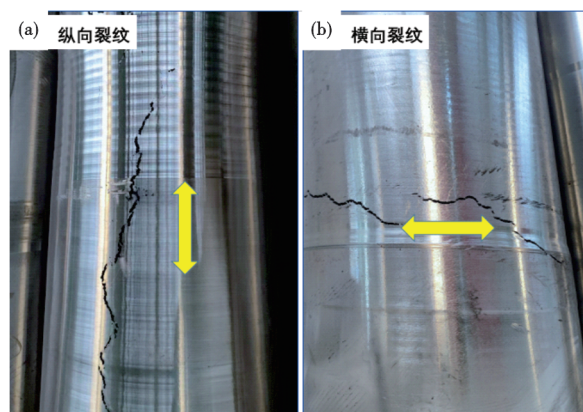


图8 自耗电电极裂纹形貌:(a)纵裂纹;(b)横裂纹

Fig. 8 Crack morphology of consumable electrode: (a) longitudinal crack; (b) radial crack

相比之下,电极横裂纹的影响更为严重。当横裂纹肉眼可见时,即认定裂纹缺陷不满足生产要求,不进行生产冶炼。但是仍然有部分母材,表面未观察到裂纹,心部出现不可见的裂纹,相应地在VAR重熔时出现类似的曲线异常情况。如图10和表4所示,熔滴速度先涨高再快速下降(骤升→骤

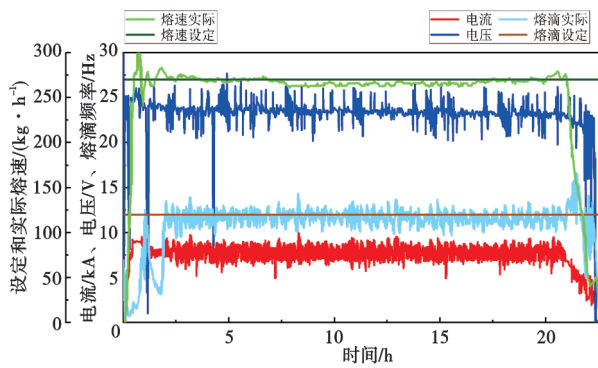


图 9 电极纵裂纹对 VAR 熔炼曲线影响

Fig. 9 The effect of longitudinal crack of electrode on VAR melting curve

降), 熔化速度也随之急剧增高和降低, 由统计结果可以看出, RM4 熔速和熔滴值的方差远大于 RM3, 波动强。

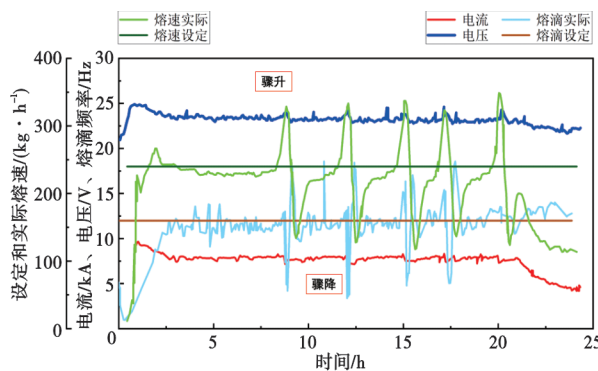


图 10 电极横裂纹对 VAR 熔炼曲线影响

Fig. 10 The effect of radial crack of electrode on VAR melting curve

相关研究认为, VAR 电弧在裂纹处容易发生局部集中, 改变了电弧的路径和能量分布: 一方面导致电弧偏离正常路径, 增加电弧的偏吹现象, 使熔池的搅拌效果减弱, 影响金属的凝固过程; 另一方

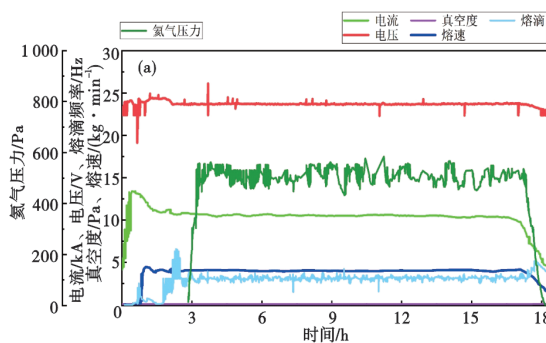


表 4 参数稳定性对比

Table 4 Comparison of parameter stability

参数项	试验炉号	均值	方差
电压/V	RM3	23.41	10.37
	RM4	23.26	7.17
熔速/(kg·h ⁻¹)	RM3	266.45	2144
	RM4	220.59	4478
熔滴/Hz	RM3	11.66	2.86
	RM4	11.73	12.52

面影响熔池温度和流场的均匀性, 引起局部过热, 母材局部剥落, 剥落的材料进入熔池后会形成夹杂物, 降低铸锭纯净度、形成内部缺陷。尤其是存在横裂纹时, 横截面上电流通路的分布很不均匀且裂纹区域热传递受阻, 从电弧产生的热量在母材端部造成局部热量过冷或过热, 导致熔速急剧增高和降低。因此, 生产上需要提升电极母材的铸造及热处理工艺, 尽量减少电极表/内裂纹、缩孔等缺陷。

2.3.3 电极化学成分的影响

气体含量较高的电极在重熔过程中容易释放出气体, 通常为氮气, 熔炼时从电极端部挥发出来, 或从熔池中溢出。通过图 11 中曲线对比可见, 图 11(a) 中不含氮 GH4698 合金的熔炼曲线保持稳定, 而以含氮型不锈钢 15-5PH 的生产为例, 重熔过程中出现剧烈的熔滴速度波动以及炉中气体压强变化, 如图 11(b) 所示。由表 5 可以看出, 在采用氮含量较高的 15-5PH 品种后, 几乎所有参数尤其是电压、熔滴、气体相关的真空度和炉内压力 (He 气压力) 均出现大幅度的不稳定。

成分检测也表明, 如图 12 所示, 在重熔前后 15-5PH 钢中氮含量损失严重, 由电极母材 $w[N]0.09\%$ 降至自耗锭中 0.03% 以下。氮作为一种气体元素, 重熔时逸出产生的气泡会改变炉内的介质空间, 影响电弧的分布状况或者稳定性出现边弧、偏弧等异

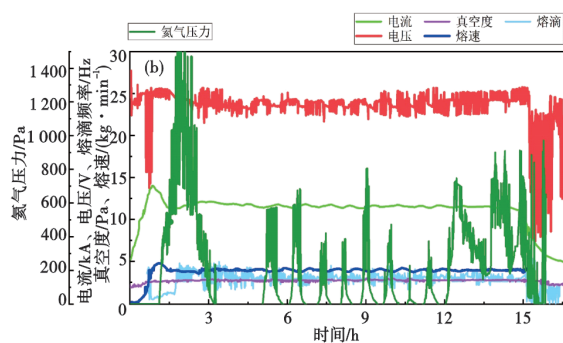


图 11 电极中气体元素对 VAR 熔炼曲线影响: (a) 无氮 GH4698; (b) 含氮 15-5PH

Fig. 11 The effect of gas element in electrode on VAR melting curve: (a) nitrogen-free GH4698; (b) nitrogen-containing 15-5PH

表5 参数稳定性对比

Table 5 Comparison of parameter stability

参数项	试验炉号	均值	方差
电压/V	RM5	23.68	0.35
	RM6	23.89	4.54
熔速/(kg·h ⁻¹)	RM5	4.02	1.89
	RM6	3.95	2.64
熔滴/(n·s ⁻¹)	RM5	3.12	2.37
	RM6	2.99	6.33
真空度/Pa	RM5	0.07	6.77×10 ⁻⁶
	RM6	2.72	0.067
He气压力/Pa	RM5	511	13 778
	RM6	275	250 996

常现象^[4,9]。气体逸出到电弧区域,电弧中的电子与气体原子产生碰撞,产生电离现象,形成辉光,俗称辉光放电^[4]。由于电弧中的电子受到强烈碰撞,电弧稳定性也受到了严重的破坏。此外,氮作为一种间隙元素,其含量过高会导致材料的脆性增加,可能引发裂纹或局部剥落。电弧在氮含量较高的区域容易发生局部能量集中,导致熔池温度分布不均,影响铸锭的凝固组织和成分均匀性^[10],导致铸锭表面变差和内部质量缺陷,如脏白斑的出现^[1]。

因此,采用气体含量较高的母材会明显影响重熔,控制电极中的氮含量对于确保VAR过程的电弧稳定性和铸锭质量至关重要。通常需要通过优化原材料选择和冶炼工艺,将氮含量控制在合理范围内,对于不含氮品种, $w[\text{N}] \leq 0.003\%$ 为宜,以减少其对电弧和铸锭质量的负面影响,避免引起冶金缺陷。

3 结论

研究分析了真空自耗重熔过程电弧与熔炼稳

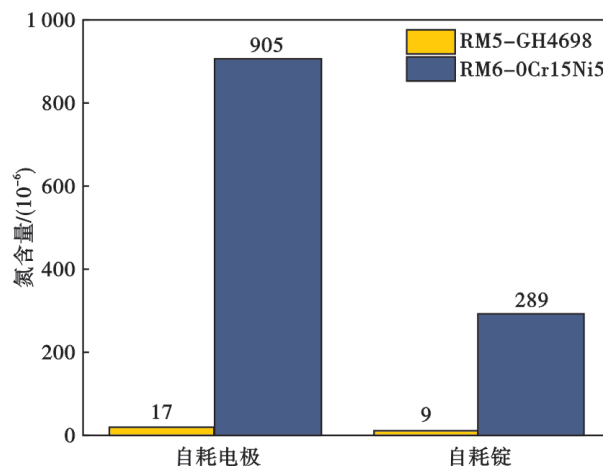


图12 真空自耗重熔前后钢或合金中氮含量

Fig. 12 Nitrogen content in metal or alloy before and after VAR

定性受到电极尺寸、电极中气体氮含量、内/外部质量等因素影响,为了获得稳定的电弧熔炼过程,试验优化生产工艺如下:

1) 电极直径偏差影响料杆驱动速度计算,异常调节电弧间隙,出现短路、熔滴值偏离,应严格控制电极锥度 $\leq 0.5\%$,设定电极直径数值限制误差;

2) 电极裂纹缩孔缺陷干扰电弧稳定,尤其横裂纹导致熔滴和熔速严重失稳。提升电极母材的铸造及热处理工艺效果,减少缩孔、表面或内部裂纹;

3) 母材氮含量较高会引起电弧偏移,熔滴、气氮压力波动,控制自耗电电极的气体 $w[\text{N}] \leq 0.003\%$,避免气体元素逸出的不利影响;

4) 根据不同炉台设备特性,探索适合自身PID控制参数,达到理想的稳定控制要求。

参考文献

- [1] 李俊杰,李盼悦,黄立清,等. 真空自耗电弧熔炼铸锭凝固行为多尺度模拟研究进展[J]. 金属学报, 2025, 61(1): 12-28.
- [2] 孙成仁,吴晓强. 真空自耗电弧炉熔滴控制研究[J]. 科学家, 2017, 5(16): 174-175.
- [3] 陈国胜,刘丰军,王庆增,等. GH4169合金VIM+PESR+VAR三联冶炼工艺及其冶金质量[J]. 宝钢技术, 2012, 5(1): 6-10.
- [4] 张晶宇,范丽娟,张一鹏,等. 影响真空自耗电电极电弧炉电弧稳定性的因素及对策[J]. 真空, 2003, 40(3): 21-24.
- [5] 任伟,唐佳佳,胡玲,等. 真空电弧重熔炉钢锭断面形状与电气控制的关系探讨[J]. 工程技术研究, 2017, 2(3): 109-110.
- [6] 邹武装. 钛及钛合金真空自耗熔炼过程中关键参数控制分析[J]. 钛工业进展, 2011, 28(5): 41-44.
- [7] 杨永维,陈今润,纪亚芳. 基于PLC的真空自耗电弧炉控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(5): 50-53.
- [8] 杨玉军,赵长虹,李爱民,等. 高温合金真空自耗重熔的工艺控制[C]. 动力与能源用高温结构材料——第十届中国高温合金年会论文集. 北京, 2007: 17-19.
- [9] 王小川,王佳明. 浅议真空电弧炉重熔含氮钢的过程控制[J]. 特钢技术, 2021, 27(3): 16-19.
- [10] 陈庆红,徐世珍,蒋晓东. 真空自耗电弧熔炼过程电弧及熔滴热传输行为的数值模拟[C]//2013海峡两岸功能材料科技与产业峰会论文集. 2013: 30-33.