

真空电渣重熔炉发展前景的探讨

刘喜海¹ 徐成海² 单丹阳² 陈丽华² 李杰¹ 刘景远² 金鑫¹ 贾维国¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110004)

摘要 真空电渣重熔炉是在真空电弧重熔炉和气体保护电渣炉的基础上发展起来的一种冶炼高性能合金的特殊真空重熔冶金装备。真空电渣重熔炉冶炼的钢种和合金有优质合金钢, 高温合金, 精密合金, 耐蚀合金, 铝、钛、银等合金。介绍了真空电渣重熔炉的工作原理, 冶金特点, 比较了真空电弧重熔、普通电渣重熔和真空电渣重熔的钢材的冶炼成本、冶金质量和性能, 并讨论了真空电渣重熔炉的应用前景。

关键词 真空电渣重熔 结构 冶金特点 应用前景

Delving on Development Prospect of Vacuum Electroslag Remelting Furnace

Liu Xihai¹, Xu Chenghai², Shan Danyang², Chen Lihua², Li Jie¹, Liu Jingyuan², Jin Xin¹ and Jia Weiguo¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The vacuum electroslag remelting (VESR) furnace is a developed special vacuum remelting metallurgical unit for melting high performance alloy based on vacuum arc remelting (VAR) and gas-shielded electroslag remelting (ESR). The steel grades and alloys remelting by VESR are high quality alloy steels, high temperature alloys, precious alloys, anti-corrosion alloys and aluminium, titanium and silver alloys. This article introduces the working principle and metallurgical characteristics of VESR, compares the melting cost, metallurgical quality and properties of steel products melted by VAR, general EAR and VESR, and discusses application prospect of VESR.

Material Index Vacuum Electroslag Remelting, Structure, Metallurgical Characteristics, Application Prospect

1 真空电渣重熔炉在真空电炉中的地位

真空电炉包括有:真空电阻炉、真空感应炉、真空电弧炉、真空电子束炉和真空电渣重熔炉等。其中真空电阻炉主要用于真空热处理、真空钎焊、真空干燥、真空脱气和真空烧结等领域。其他几种真空电炉都应用于真空冶炼方面。

真空感应炉起步较早,第二次世界大战后得到很快发展,主要集中在东欧、西欧、北美和日本等地区。我国生产制造真空感应炉始于20世纪60年代初,主要集中在东北地区,现已遍及北京、上海、四川等地多家企业。真空感应炉生产容量从10 kg到12 t已形成系列产品。真空感应炉主要用于生产大批量高级材料和合金材料。如生产耐热合金、高温合金、磁性合金、电工合金等。同时还正向着生产高强度、耐蚀、抗腐、抗低脆裂等新型材料发展。

真空电弧炉从1839年熔炼白金丝试验成功以来,经历100多年的熔炼试验,直到20世纪50年代才达到生产规模。真空电弧炉可用于冶炼黑色金

属,如熔炼耐热钢、不锈钢、工具钢和轴承钢等;应用于有色金属冶炼特别是有色金属中的活性金属、难熔贵金属,如钛、锆、钨、钼、钽、铌,还有铀等。

我国真空自耗电弧炉的容量规格以炼钢统计有15、50、200、1 000、3 000、5 000、10 000 kg;真空自耗电弧凝壳炉的容量规格以炼钢统计有5、25、50、100、250、500、1 000、2 000 kg。

真空电子束炉又称真空电子轰击炉,世界上第1台真空电子轰击炉出现在1905年,当时是对稀有金属钽进行了成功的熔炼。但是,受当时的真空工程技术和电子光学技术等方面的限制,它的发展较慢,直到第二次世界大战期间及以后,真空电子轰击炉才得到了发展。目前,真空电子束炉在冶金工业中正发挥很大作用,它的最大成就是熔炼有色金属中的高温、高纯度稀有金属,例如难熔金属钽、钼、钨等;在黑色金属冶炼中可以熔炼优质合金钢、镍基和钴基合金钢。

真空电渣重熔炉是在真空电弧重熔炉和气体保

护电渣重熔炉的基础上发展起来的一种特殊的真空冶金技术工艺装备。在国外已经形成了专用的冶炼高性能合金的冶金设备。如在美国、奥地利等国均已有了真空电渣重熔炉。

20 世纪 60 年代我国在抚顺特钢和本钢特钢先后各建造了 1 台 200 kg 真空电渣重熔炉冶金设备,但由于当时真空电渣重熔设备的真空处理技术水平的局限性,受到设备的密封效果等多种因素影响,达不到理想的冶金效果,到 20 世纪 70 年代末相继将设备拆除。

随着世界范围内冶金装备技术的迅猛发展及航天、军工对高端材料的需求,真空电渣重熔炉在国外得到较快发展,对我国电渣冶金装备技术、高端合金材料需求与发展又是个新的促进。

真空电渣重熔炉可以冶炼的钢种有:优质合金钢、高温合金、精密合金、耐蚀合金,还有铝、钛、银等合金^[1]。因此,真空电渣重熔炉是真空电炉家族中的新成员。

2 真空电渣重熔炉的结构及工作原理

真空电渣重熔炉的结构如图 1 所示。通常由 5 部分组成:机械结构及传动、供电、控制、真空和冷却系统。机械系统包括:电极升降立柱、电极横臂、电极旋转升降机构、电极夹头、假电极、结晶器平台、水冷结晶器、排烟除尘等设备;供电系统包括:高压电

气柜、变压器、大电流线路、电流互感器、换相开关等;控制系统包括:高压切换、低压操作指令元件、电动机、电极升降及旋转控制、面板指示仪表及信号灯等;真空系统包括:真空罩、真空泵、真空阀、真空计、真空密封、真空除尘器、过滤器和真空管道等;冷却系统包括:水泵、水箱、水表、阀门和管路等。

真空电渣重熔原理和普通电渣重熔基本相同,熔炼的电极浸入熔池中,电流通过熔渣产生电阻热,使浸入熔池的电极材料净化,在重力和熔渣的润湿作用下,使熔化的电极材料形成细小的液滴,这些液滴在进入熔池的过程中被净化。图 2 给出的是真空电渣重熔过程的示意图^[2]。熔炼过程是先在水冷铜坩埚内加入熔渣,电极下降到熔渣内通电,导电路线是电极→电离的熔渣→金属熔池→凝固的铸锭→水冷铜坩埚。在熔炼过程中,渣除了热源作用之外,主要是冶金作用,熔化的金属滴在滴落过程中,落入金属熔池以后,都与炉渣发生一系列的物理化学反应,从而达到精炼的目的。渣还可以保护金属熔渣及金属熔池不与空气接触,防止金属氧化,减少吸气,同时还可以在结晶器内表面与铸锭之间形成一薄层均匀的渣皮,保护结晶器,使铸锭表面成型良好,易于脱模和促进铸锭轴向结晶。

真空电渣重熔与普通电渣重熔不同的是真空室内、熔池中气体的压力低于大气压,气体分子数比常

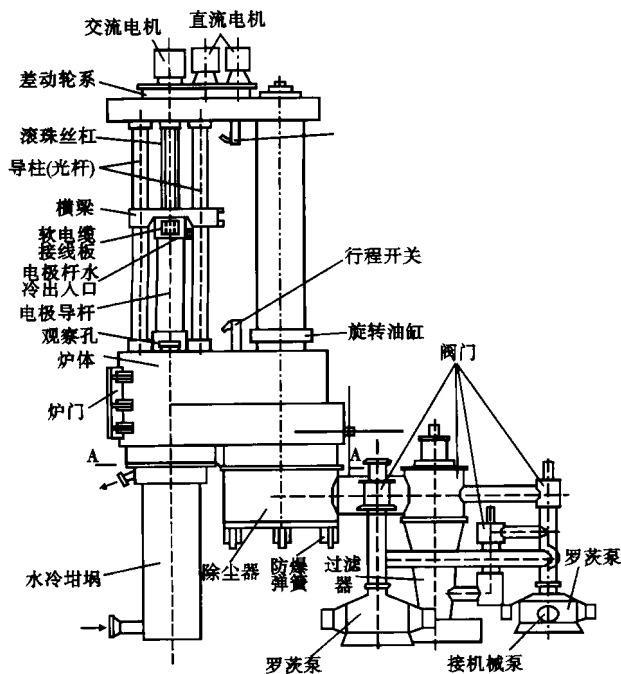


图 1 真空电渣重熔炉的结构示意图

Fig. 1 Schematics of structure of vacuum electroslag remelting unit

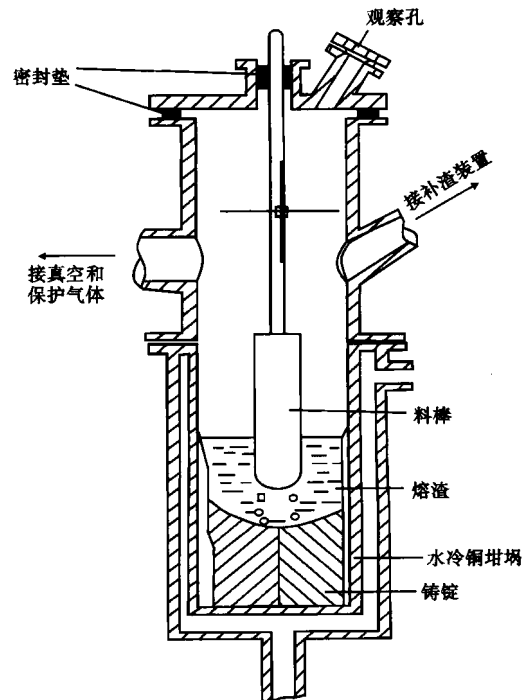


图 2 真空电渣重熔示意图

Fig. 2 Schematics of vacuum electroslag remelting process

压少,渣层中的含气量少,特别水蒸气含量更低。因此,在冶炼过程中能去除 O_2 、 H_2 、 N_2 等气体,例如 H_2 含量可达到 1×10^{-6} 。同时能去除一些饱和蒸汽压高的金属元素。

3 真空电渣冶金的特点

真空电渣冶金除普通真空冶金的特点之外,还具有普通电渣冶金、气体保护电渣冶金的特点。而且真空电渣冶金的渣在冶炼同时得到真空干燥,因此去除了水蒸汽,增加了透气性,使冶炼时产生的熔滴得到了更好的脱气^[3]。

(1) 真空环境中气体压力低,使冶炼的物理过程发生了改变,有利于脱出气体。

在真空条件下,物质的物理性质发生改变,沸腾温度降低了。例如,水在常压下沸腾温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$,而在真空条件下只有 $70 \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$,随真空的变化而变化。金属也是一样,例如锌在常压下 $906\text{ }^\circ\text{C}$ 沸腾,在真空条件下只有 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 即可沸腾。铅在常压下沸点为 $1740\text{ }^\circ\text{C}$,而在真空中 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 即可蒸发。就是说在真空条件下,金属的沸点降低了,有利于金属的气化,蒸发和脱气。

在真空条件下,金属熔化时使原来夹杂在金属中的气体放出,很快离开金属溶液被真空泵抽走。原来金属与气体生成的化合物,在熔炼过程中分解放出的气体也很快被真空泵抽走。

在真空条件下,渣的温度、粘度、透气性都有改变,随冶炼温度的升高,渣的湿含量降低,粘度降低,透气性变好,使得熔炼过程中气体夹杂减少,更容易脱气。

金属在真空中精炼不会形成气孔或中间夹杂。金属或氧化物在真空中形成气体之后其分子直径很小且分散性好,在真空中多原子分子倾向于较少原子组成的分子,形成的气体分子很少,粒径一般在 0.1 nm ,容易被真空系统抽走。

(2) 在真空环境中气体稀薄,使冶炼的化学反应发生了变化,很少有气体参加反应。

在真空电渣重熔过程中,金属氧化物被还原成气态金属或液态金属,金属与气体生成的化合物分解放出气体,金属在熔化过程中不会氧化,无论在液

态或是固态都不会被氧化。

(3) 真空电渣重熔可实现节能环保。从表面上看真空电渣重熔比普通电渣重熔多了 1 套真空系统,必然增加设备的成本和运转费用,实际上并非如此。真空电渣重熔无废水、废气、废渣,对环境极少污染;金属回收率高,烧损少;能解决普通电渣炉解决不了的问题,提高了熔炼产品的质量和销售价格。因此,对长期使用真空电渣重熔进行综合分析,达到了环保节能,提高产品质量和经济效益的目标。而真空电渣重熔设备的投资和运转费用增加可以忽略。

(4) 真空电渣重熔与真空电弧重熔和普通电渣重熔的比较。

德国的 Leybold 公司在 20 世纪 90 年代,综合了真空电弧重熔的优点^[4],对超级合金而言,真空电弧重熔纯净度高,气体含量极低,成分可精确控制,凝固性好,铸锭组织致密,成分较均匀。但是,真空电弧重熔不能脱硫,且易形成白点及年轮状偏析^[5]。

普通电渣炉熔炼金属同样会有良好的组织结构和高的纯度,而且脱硫效果好,不易形成白点及年轮状偏析。但是,普通电渣重熔过程中活泼元素烧损大,成分控制困难,气体含量有时会增加。

考虑到真空电弧重熔与普通电渣重熔各自的优缺点,德国 ALD 真空技术公司开发了能综合两者优点,克服两者不足的真空电渣重熔技术。该公司生产的真空电渣重熔锭直径 250 mm ,锭重 360 kg ,铸锭表面光滑,无任何表面缺陷,在有效脱硫的情况下,活泼元素钛、铝等没有烧损。表 1 列出了 Inconel 718 合金真空电渣重熔前后的化学成分对比情况^[2]。

真空电渣重熔的熔化速度比普通电渣重熔大约慢 60%,过度区域柱状晶少,固化速度快,钢锭气体含量低,带状偏析低。图 3 为真空电渣重熔与电渣重熔的比较,可见真空电渣重熔的渣池比普通电渣重熔小很多,这是真空电渣重熔独特优点之一。真空电渣重熔钢的韧性、强度、耐磨性、抗冷热疲劳裂纹能力、抗金属粘着能力和抗氧化能力均明显提高,

表 1 Inconel 718 合金真空电渣重熔前后化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of alloy Inconel 718 before and after VESR / %

项目	C	Co	Cr	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Ti	V	Al	Cu
自耗电板	0.028	0.18	18.94	17.20	0.008 1	0.08	3.02	5.31	53.24	0.010	0.008	0.13	0.95	0.03	0.66	0.07
重熔锭	0.028	0.18	18.97	17.20	0.005 3	0.08	3.02	5.32	53.24	0.007	0.007	0.13	0.93	0.03	0.67	0.07
变化量	0	0	0.03	0	-0.002 8	0	0	0.01	0	-0.003	-0.001	0	-0.02	0	0.01	0

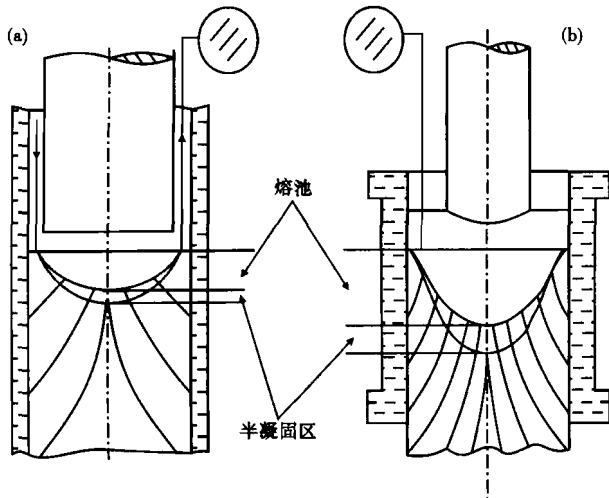


图 3 真空电渣重熔(a- VESR)与电渣重熔(b- ESR)的比较图
Fig. 3 Comparison between vacuum electroslag remelting (a- VESR) and electroslag remelting (b- ESR)

使模具寿命明显高于普通电渣重熔钢。传统冶炼的 W403 钢模具与真空电渣重熔的 W403 钢模具使用结果比较表明,对于某类模具,传统冶炼的 W403 模具使用约 30 000 次没有修模,而真空电渣重熔的 W403 模具使用约 130 000 次没有修模,说明了真空电渣重熔钢的寿命极高。表 2 为不同冶炼方法钢制模具的单个模次成本对比,从表 2 中可以看到,随着模具钢质量的提高,尽管模具的生产总成本依次提高,但铸件实际单个成本却呈下降趋势,真空电渣重熔钢模具的实际单件成本仅为普通材料模具的 45.5%,实际生产成本最低^[6]。

表 2 不同冶炼方法生产的钢制模具的单个模次成本对比
Table 2 Comparison of cost of single cast-forging die of steel produced by different melting method

牌号	冶炼方法	模具钢成本 US-\$	模具生产成本 US-\$	总成本 US-\$	实际模次	实际单件成本 US-\$
W302	传统冶炼	1 255	75 000	76 255	87 000	0.876
W302	普通电渣重熔	1 502	75 000	76 502	107 000	0.715
W400	真空电渣重熔	2 506	75 000	77 506	194 000	0.399

实际检测结果表明,真空电渣重熔钢的显微组织比普通电渣重熔钢组织明显细化和均匀化。传统冶炼钢、普通电渣重熔钢和真空电渣重熔钢的韧性依次提高,如图 4 所示。

4 真空电渣重熔炉的广阔应用前景

随着国防工业、机械工业、核电工业、航空航天事业的发展,对金属材料的种类、质量和性能的需求越来越高,冶金工业必须适应国民经济发展的需求,

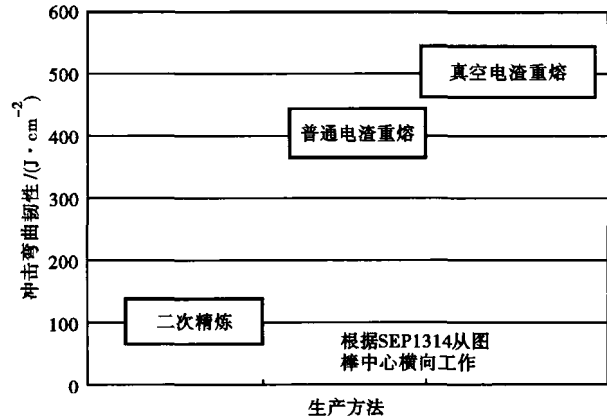


图 4 不同精炼方法生产的钢材的韧性对比
Fig. 4 Comparison of toughness of steel products melted by different refining method

其中真空冶金技术的发展成为必然的趋势。

在诸多真空冶金技术中,真空电渣冶金技术近年来有了新的发展。真空电渣重熔与真空电弧重熔和普通电渣重熔比较,具有许多优点,有着广阔的应用前景。

许多行业开始重视了真空电渣重熔与其它种类冶炼技术的联合应用。出现了不少科技发明专利。例如,“一种低氧低夹杂物铜钴合金触头的生产方法”^[7],属于电工材料领域,是真空感应熔炼与真空电渣重熔双联技术。“一种聚变堆用低活化马氏体钢的冶炼生产方法”,属于金属材料加工领域,也是采用经过真空感应熔炼熔铸母材电极再进行真空电渣重熔的方法。

参考文献

- 1 陈希春,冯 涂,傅 杰,等.电渣冶金最新进展.钢铁研究学报,2003,15(2):62
- 2 李正邦.电渣冶金的理论与实践.北京:冶金工业出版社,2010
- 3 戴永年,杨 斌.有色金属材料的真空冶金.北京:冶金工业出版社,2003
- 4 Wicssncr O, Kemmer H, Icbricher V, et al. Vacuum Metallurgy Systems and Technologies. MPT Internation, 2001, 24(3):3
- 5 李正邦.21 世纪电渣冶金的新进展.特殊钢,2004,25(5):1
- 6 董加坤,张宏康,蔡耀清,等. W 系列高性能热作模具钢特性浅谈.热处理技术与装备,2009,30(6):1
- 7 王亚平,周志明,蒋 鹏.一种低氧低夹杂物铜铬合金触头的生产方法.发明专利申请书公开说明书,2005:5

刘喜海(1963-),男,副教授,大型电渣冶金理论、工艺研究,装备设计与制造。现为国家“十一五”科技重大专项“大型电渣重熔炉设备”课题负责人,并曾组织三峡水利电站工程电渣熔铸导叶项目及电渣熔铸巨型板坯重大科技项目。

收稿日期:2011-09-05