

· 工艺材料进展 ·

第一代和第二代电渣冶金技术的发展

傅 杰

(北京科技大学, 北京 100083)

摘 要 论述了电渣冶金技术的分类, 第一代和第二代电渣冶金技术的特点, 电渣冶金发展历史的分期, 第一代和第二代电渣冶金技术的发展, 第二代电渣冶金进一步发展的方向。指出第一代电渣重熔技术是伴随电渣重熔锭大型化发展起来的, 随着核电技术的迅速发展, 第二代电渣重熔技术应实现大型装备优化设计、气氛可控制、重熔和凝固过程可控制, 并提高计算机控制水平。

关键词 第二代电渣冶金技术 电渣重熔锭大型化 惰性气体保护 快速冷却 发展方向

Development of First and Secondary Generation of Electro-Slag Metallurgical Technology

Fu Jie

(University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The classification of electro-slag metallurgy, the characteristics of first and secondary generation of electro-slag metallurgical technology, the stage of development history of electro-slag metallurgy, the development of first and secondary generation of electro-slag metallurgical technology, and the orientation for further development of secondary electro-slag metallurgy have been reviewed. It is pointed out that the first generation of electro-slag technology was developing accompanied with progress in electro-slag remelting heavy-ingot, and with the rapid progress of nuclear power station, the optimum design of heavy equipment and optimum production technology for the secondary generation of electro-slag metallurgical technology should be realized to control remelting atmosphere, remelting and solidification process, and to increase computer control standard.

Material Index Secondary Electro-Slag Metallurgical Technology, Heavy Electro-Slag Remelting Ingot, Inert Gas Atmosphere, Quick Cooling, Orientation for Development

现代钢及合金生产流程包括高炉-转炉流程、电炉流程和特种熔炼。2008 年世界钢产量为 13.297 亿 t, 转炉钢产量占世界钢总产量的 60% 以上, 电炉钢产量占世界钢总产量的 30% 以上, 特种熔炼钢及合金占总产量约为 1.0%。特种熔炼产品总量虽小, 但其对国民经济的发展具有重大的影响。

电渣冶金是特种熔炼领域内产量最大的一种特种熔炼方法, 应用最广, 包括自耗电电极的电渣重熔与液态金属的电渣冶炼与浇铸两大分支。

1 电渣冶金技术分类

自耗电电极电渣重熔包括:

(1) 电渣重熔(三相、双极串联、双臂交替、多极如 4 极或 6 极、低频电渣重熔等); (2) 电渣熔铸; (3) 电渣熔焊; (4) 快速电渣重熔; (5) 真空电渣重熔; (6) 氩气保护电渣重熔; (7) 高压电渣重熔; (8) 氩气保护快速电渣重熔; (9) 电渣连铸; (10) 电弧电渣重熔。

液态金属的电渣冶炼与浇铸包括:

(1) 单电极炉底导电有衬电渣炉冶炼; (2) 单相

双自耗极串联有衬电渣炉冶炼; (3) 三相有衬电渣炉冶炼; (4) 水平电渣浇铸; (5) 电渣离心浇铸; (6) 感应电渣冶炼; (7) 感应电渣离心浇铸; (8) 直流电弧电渣钢包炉; (9) 电渣补缩; (10) 电渣中间包加热; (11) 电渣分批(多炉次)浇铸大钢锭; (12) 电渣转注, 经中注管、汤道系统, 将液态金属下注至水冷结晶器凝固成锭; (13) 电渣浇铸双金属轧辊; (14) 电渣浇铸空心锭; (15) 电渣浇铸实心锭。

其中自耗电电极电渣重熔(1)~(3)属于第一代电渣冶金技术, (4)~(10)属于第二代电渣冶金技术。液态金属的电渣冶炼与浇铸(1)~(12)属于第一代电渣冶金技术, (13)~(15)属于第二代电渣冶金技术。

前苏联 1981 年出版的《电渣金属》封面上所示的四通道活动模 150 mm 小方坯电渣重熔炉^[1]和 1982 年第七届国际真空冶金会议文集中发表的加压电渣重熔炉^[2]属于第二代电渣重熔炉。第二代液态金属电渣浇铸的原理如图 1 所示^[3]。

2 第一代和第二代电渣冶金技术特征

第一代电渣冶金技术特征为:(1)渣钢作用充

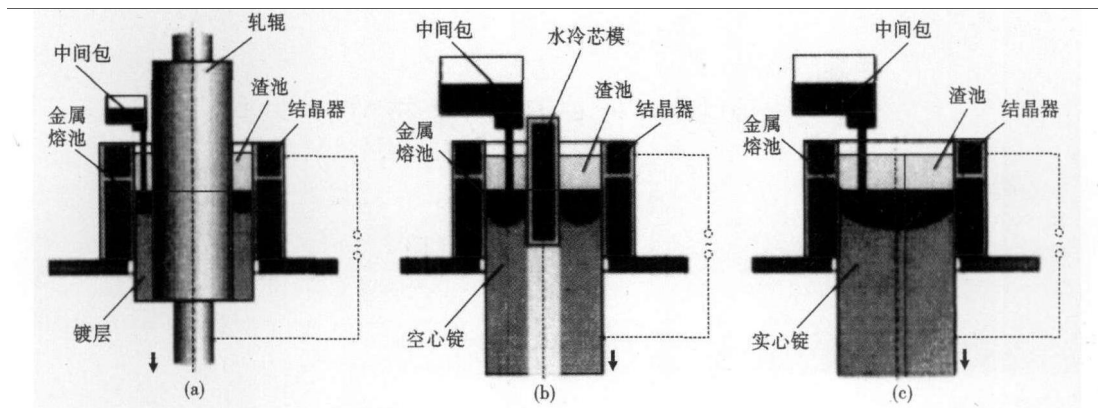


图1 第二代液态金属电渣浇铸技术示意图:浇铸复合轧辊(a);空心锭(b);实心锭(c)

Fig.1 Scheme of secondary generation liquid metal electroslag casting technology: casting clad roller (a); hollow ingot (b); solid ingot (c)

分;(2)无耐火材料污染;(3)水冷快速凝固,均匀性和致密度高;(4)金属收得率高。

第一代电渣冶金技术的不足之处有:(1)大气下熔炼;(2)效率低;(3)能耗高,需制备自耗电极也增加了能耗;(4)电渣重熔速度高和电渣浇铸时,金属熔池深,体积大,电渣过程的优越性降低。

第二代电渣冶金技术特征有:(1)与现代高炉-转炉和电弧炉流程一样,产品是钢坯,取消了开坯工艺;(2)隔绝大气;(3)计算机控制水平高;(4)电渣浇铸时,金属过热度低,铸造速度快,时间短,能耗低。

3 电渣冶金发展历史“分期”

3.1 国际电渣冶金会议

在过去的半个世纪中,随着电渣冶金技术的发展,共举行过十多次国际会议,有的会议对于电渣冶金技术的发展起了里程碑式的作用。作者了解的重要国际电渣冶金会议的有关情况列于表1。

第一到第三届国际电渣冶金会议,主要是美国Mellon 研究院院长巴特博士、前苏联梅多瓦尔院士等之间的技术交流会。第六和第七届国际真空冶金会议,内容分别为电渣冶金以及特种熔炼和冶金涂层。在第六届国际真空会议中,开始设立国际顾问委员会,但仅有亚洲和欧洲的两名顾问委员。第七到第十一届国际真空冶金会议中有的设立了特种熔炼和冶金涂层两个国际顾问委员会,特种熔炼委员会有中国、美国、前苏联、英国、德国、奥地利、日本、法国等国的特种熔炼专家。

3.2 电渣冶金发展历史“分期”

作者认为可以分第一代电渣冶金和第二代电渣冶金,每一代电渣冶金的发展历史又可细分为初始发展期和成熟期(表2)。第一代电渣冶金技术在发展过程中孕育着第二代电渣冶金技术。初始发展期

表1 历次重要的国际电渣冶金会议

Table 1 All previous major international conference on electroslag metallurgy

序号	会议名称	时间	地点	备注
1	第一届国际电渣冶金交流会	1967	美国匹兹堡 Mellon 研究院	
2	第二届国际电渣冶金交流会	1969	美国匹兹堡 Mellon 研究院	
3	第三届国际电渣冶金交流会	1971	美国匹兹堡 Mellon 研究院	
4	第四届国际电渣重熔过程研讨会	1973	日本东京	
5	第五届国际电渣和其它特种熔炼技术研讨会	1974.10	Carnegie-Mellon 研究院	
6	第六届国际真空冶金会议 (6 th ICVM)	1979.4	美国圣迭哥 (San Diego)	国际顾问委员会,亚洲 Hayashi 和欧洲 Wahlster
7	第七届国际真空冶金会议 (7 th ICVM)	1982.11	日本东京	特种熔炼领域主要国家专家组成国际顾问委员会,中国傅君昭
8	第八届国际真空冶金会议 (8 th ICVM)	1985.10	奥地利林茨 (Linz)	没有设立国际顾问委员会
9	第九届国际真空冶金会议 (9 th ICVM)	1988.4	美国圣迭哥 (San Diego)	特种熔炼领域主要国家专家组成国际顾问委员会,中国林宗棠
10	第十届国际真空冶金会议 (10 th ICVM)	1990.6	中国北京	特种熔炼领域主要国家专家组成国际顾问委员会,中国徐匡迪
11	第十一届国际真空冶金会议 (11 th ICVM)	1992.5	法国安梯贝 (Antibes)	特种熔炼领域主要国家专家组成国际顾问委员会,中国傅杰、郭元恒
12	梅多瓦尔纪念会	2001.5	乌克兰基辅	特种熔炼领域主要国家专家应邀出席纪念会,中国傅杰

中的电渣重熔技术孕育着成熟期的电渣重熔技术。第一和第二代电渣冶金的成熟期都还将延续较长时间,不断发展和完善。

表 2 电渣冶金发展历史“分期”

Table 2 “Stage” of development history of electro-slag metallurgy

第一代电渣冶金		第二代电渣冶金	
初始发展期	成熟期	初始发展期	成熟期
20 世纪 50 年代至 1988 年第九届国际真空冶金会议	1988 年第九届国际真空会议至今	1982 年第七届国际真空会议至 2001 年多瓦尔纪念会	2001 年多瓦尔纪念会至今

第一代电渣重熔技术的发展是伴随着电渣重熔大型化而发展起来的。

自耗电电极的电渣重熔始于 20 世纪 30 年代的霍普金斯凯洛克电渣铸锭,实质上是在电渣焊基础上发展起来的电极丝电渣重熔方法。大断面自耗电电极电渣重熔始于 50 年代,由巴顿电焊研究所巴顿院士和梅多瓦尔院士等研制成功,1952 年建成大断面自耗电电极电渣重熔实验炉,生产出第一个电渣重熔锭,1958 年实现了工业化。

我国自耗电电极电渣重熔始于 1959 年,北京钢铁学院朱觉教授与冶金部建研院曾乐、李正邦等合作,首次用直径为 40 mm 的自耗电电极在水冷结晶器中电渣重熔航空滚珠钢取得成功。1960 年北京钢铁学院与北京钢厂合作,在北京钢铁学院建成了我国第 1 台 150 kg 工业性电渣炉,生产了航空滚珠钢等。1960 年 5 月,当时的冶金部在北京钢铁学院召开了全国现场会议,推广电渣重熔工艺,傅杰在大会上作了“电渣炉冶炼无钒高速钢”的技术报告。会后,建研院电渣冶炼研究组李正邦等赴重庆二钢,北京钢铁学院电渣小组傅杰等赴大冶钢厂、大连钢厂、抚顺钢厂、上钢五厂等单位推广电渣重熔技术,帮助重庆二钢、大冶钢厂、大连钢厂、抚顺钢厂、上海五厂等建立了电渣重熔车间,使我国在电渣重熔技术方面较早的实现了工业化^[4]。

在前苏联和我国,电渣重熔技术是与真空电弧重熔技术同期、独立发展起来的,是科研院所、高等学校的科研人员与冶金工厂合作的产物。开始时锭子较小,在技术上采用较小的充填比。

美国真空电弧重熔先于电渣重熔工业化。真空电弧重熔在大型铸锻厂先被采用,电渣重熔是在真空电弧重熔的基础上发展起来的。象真空电弧重熔一样,在技术上采用了大的充填比。通过由梅隆研究院院长巴特博士在梅隆研究院举行的第一至第三届国际电渣冶金技术交流会,从起步开始就想到要生产大型电渣重熔锭以满足大型机械设备制造对大锻件的需求。

20 世纪 70 年代,前苏联曾试图发展 200 t 级电渣重熔锭,但未见结果,后改走了电渣焊接和分批电渣浇铸生产大型锭的道路。

美国康萨克公司 20 世纪 60 年代末,制造了双工位,双臂交替的同轴电渣炉;西德国 Leybold-Heraeus 开发了容量为 165 t、4 电极电渣炉,生产直径为 2 300 mm 重 80 t 的电渣重熔锭,70 年代以后康萨克公司制造并出口的 100 t 电渣重熔炉,业绩不详;西德萨尔钢厂创建的 165 t 电渣炉一直生产正常,目前正在扩建。

1961 年底,作者作为在读研究生随导师朱觉教授考察了上海重型机器厂,了解到大锻件由于大型钢锭冶金质量问题使钢锭利用率和合格率都较低,性能波动较大。电渣重熔在解决洁净度和凝固这两大冶金质量问题上独具优势,这就使朱觉教授萌生了研制大型电渣炉的设想。

在朱觉教授的指导和亲自参与下,1965 年上海重型机器厂建成了 1 台 100 t 电渣炉,1965 年 6 月 29 日重熔出 55 t 电渣锭,1965 年 9 月 27 日重熔出第 1 根 100 t 电渣锭,1965 年共生产了 4 根 100 t 电渣锭。

100 t 电渣炉把当时世界上的电渣锭重量提高了两个数量级,解决了当时生产大锻件缺乏大钢锭的困难,为制造我国当时最大的 2 300 mm 冷轧机支撑辊等做出了积极贡献。

在朱觉教授的精心指导下,1980 年上海重型机器厂又建成了 1 台 200 t 电渣炉,可生产 240 ~ 300 t 重电渣锭,热加工成 200 ~ 250 t 的锻件,成功地批量生产出一系列核电大锻件所需电渣重熔大型锭,并不断解决了一系列与生产大型电渣锭有关的设备、工艺及理论问题,使技术趋于成熟。

在 1982 年第七届国际真空冶金会议上,朱觉教授首次向世界宣布中国已成功生产出了 200 t 级的大型电渣重熔锭。在 1985 年第八届国际真空冶金会议上,发表了朱觉、刘海洪等关于 200 t 电渣炉的研究文章。在 1988 年第九届国际真空冶金会议上,林宗棠同志应邀参加了该届会议的国际顾问委员会,作了有关 200 t 电渣炉的特邀报告。作为 200 t 电渣炉的研制单位北京钢铁学院和上海重型机器厂,朱觉、林宗棠、刘海洪等获得了国际奖。朱觉教授是中国电渣冶金的奠基人。

在一定意义上,可以认为电渣重熔技术是伴随着电渣重熔锭的大型化而发展起来的。随着大型电渣炉的发展,促进了复杂设备制造业工艺,大型锭熔

渣成分,凝固组织和成分均匀性、稳定性控制技术的发展。故一个国家大型锭电渣重熔技术的水平,标志着这个国家电渣冶金技术的发展水平。大型锭电渣重熔技术的发展,带动了整个电渣重熔技术的发展。

4 电渣冶金技术的发展

4.1 第一代电渣冶金

半个世纪以来,我国冶金工作者在电渣冶金技术和电渣冶金理论方面取得了重大成果,不少方面居国际领先地位。

在电渣重熔技术方面,最突出的是大型锭电渣重熔技术的发展,在200 t电渣炉建成后,针对重熔工艺的关键技术,向大林等展开了全方位、多层面的深入系统的研究,攻克了一系列重大技术难题^[5,6]。进入21世纪,成批生产了高合金大锻件^[7,8]。

第一代电渣重熔大型锭主要技术成果有:(1)大型锭成分均匀性控制技术;(2)大功率,快熔速、高冷却和强氧化工艺;(3) $\leq 2 \times 10^{-6}$ 低氢控制技术;(4) $\leq 0.010\%$ Al的低铝控制技术。

在电渣重熔理论方面,除围绕上述大型锭电渣重熔技术开展理论研究所取得的成果以外,主要有:

(1) 电渣重熔过程中氧化物夹杂的变化规律。

根据电渣重熔过程中非金属夹杂物洁净度显著改善和作者从事电渣重熔工作的实践,分析了电渣重熔过程自耗电极端部熔滴呈薄层熔化,熔滴过渡及处于熔池阶段渣钢作用的物理化学条件,认为电渣重熔过程自耗电极中氧化物夹杂的去除主要是由于熔滴形成和通过渣池向金属熔池过渡过程中的渣钢作用(渣洗),而不是金属熔池中夹杂物的浮升。

在1961年的全国电渣重熔会议上发表了“电渣重熔过程中非金属夹杂物去除机理”一文,以后又采用截取过渡熔滴的实验方法,得到了自耗电极、端部熔滴、过渡熔滴、金属熔池、重熔钢材的试样,用金相法研究了电渣重熔过程中氧化物夹杂的变化,发现:①重熔金属在进入金属熔池以前氧化物夹杂基本去除了;②快速凝固的电极端部液层及过渡熔滴中夹杂物尺寸细小,数量比自耗电极原始金属、金属熔池及重熔钢材的多很多,说明重熔过程中氧化物夹杂有一个溶解析出的过程;③自耗电极原始金属中氧化物夹杂溶解,未被溶解的夹杂物,在液层与熔渣作用时可基本去除,电渣钢中的非金属夹杂物主要是在金属熔池结晶过程中新生成的;④重熔钢中的氧化物夹杂纯洁度取决于金属氧化程度及结晶条

件。这些工作以“电渣重熔过程中氧化物夹杂的变化”一文于1964年发表在《金属学报》上^[9]。

后来前苏联研究人员用与傅杰文章同样的实验钢种、实验参数与实验方法得到了同样的结果。1970年拉塔什和梅多瓦尔院士在新版《电渣重熔》一书关于电渣重熔过程中非金属夹杂去除机理一节中,改用了《金属学报》上傅杰这篇文章的试验结果和上述论点,但指出用金相法研究氧化物夹杂去除有不足之处^[10]。我国李正邦用放射性同位素示踪法,傅杰用化学相分析方法对夹杂物进行了定量研究,弥补了这方面的不足。

(2) 渣池中的电弧放电现象。

对于电渣重熔的本质,有一个认识过程。最初人们认为电渣重熔是一个电弧过程,接着认为是一个无弧过程,即自耗电极通过熔渣的电阻热熔化,是一个电渣过程。

作者在研究生工作阶段,发现电渣重熔过程中,从结晶器中传出咚咚响声,用示波器、录音机及热模拟的方法,发现自耗电极端部金属熔滴逐渐形成和断落时,电流、电压的变化与由声音转化而来的波形对应。并观察到熔滴断落时象带电拉闸一样,在电极端部与断落熔滴之间产生周期性变化的电弧,导致熔滴分散,有利于冶金反应动力学条件的改善,加深了对电渣重熔本质的理解。文中的热模拟试验大概是世界上最早进行的热模拟试验^[11]。

(3) 电渣重熔过程中镁的控制。

由于镁是一个易挥发、易氧化的活泼元素。给自耗电极的制备和重熔过程中镁的控制带来了很大的困难。作者所在的项目组系统研究了真空熔炼及电渣重熔过程中Mg挥发的动力学,开发了控Mg技术,解决了这一难题^[12]。

在液态金属的电渣冶炼与浇铸方面,由我国发明的液态电渣冶炼和浇铸技术,主要有:

(1)有衬电渣炉。单相单自耗电极炉底导电式有衬电渣炉的发明人已无从考证。1958年我国江西地区就有了这种方法。原冶金部建筑研究院曾乐、李正邦等1958年在衡阳用这种方法回收了高速钢的废料。

单相双自耗电极串联有衬电渣炉和三相有衬电渣炉技术于1961年由北京钢铁学院(现北京科技大学)发明。20世纪70年代初,昆明工学院(现昆明理工大学)研制成功双极串联有衬电渣炉自动控制系统,在我国西南地区大力推广了这种技术。北京钢丝厂用三相有衬电渣炉和电渣重熔双联解决了

国急需的电热丝生产问题,满足了国内对电热丝的迫切需求。1998年,北京钢丝厂生产的电热丝占全国电热丝总产量的47%。经国家科委批准,我国用三相有衬电渣炉技术与美国的电渣离心浇铸技术进行了交换^[13,14]。

(2)感应电渣离心浇铸。在用三相有衬电渣炉技术交换回的电渣离心浇铸技术的基础上,北京钢铁学院发明了感应电渣离心浇铸,并成功应用于生产^[5]。

(3)直流电弧电渣钢包炉。北京钢铁学院与安阳钢铁公司合作,发明了直流电弧电渣钢包炉,成功应用于安钢、郑州永通特钢、酒泉钢厂等^[5]。

上述工作引起了国外同行的高度重视:

1980年,在美国第四届国际高温合金会议上,高良作了有关中国电渣冶金的报告^[15]。

1982年,第七届国际真空冶金会议邀请中国学者参加国际顾问委员会。在会上,朱觉第一次公开介绍了中国的200 t级电渣炉,引起了世界电渣冶金工作者的重视。

1986年,作者应第十届国际真空会议主席的邀请,在真空冶金分会上作了“中国高温合金技术进展”的特邀报告。

1988年,在美国召开的第九届国际真空冶金会议上,北京科技大学、钢铁研究总院、上海重型机器厂三个单位,傅杰、李正邦、朱觉、刘海洪、林宗棠等5位个人被国际成果确认与评奖委员会评为“1961~1988年间对特种熔炼作出突出贡献的单位与个人”,获荣誉奖,奖牌数与前苏联并列第二(美国作为东道主奖牌数第一)。林宗棠作为大会国际顾问委员会委员,作了有关200 t电渣炉的特邀报告^[16,17]。

1989年,巴顿电焊研究所邀请中国代表团访问了该所。

1990年,第十届国际真空冶金会议在北京召开,世界上最有名的电渣冶金专家都出席了这次会议^[18]。在第十一届国际真空冶金会议的国际顾问委员会会议上,讨论决定今后不再举行国际真空冶金会议(ICVM)了,有关内容并入国际真空会议(ICV)的特种冶金分会。

4.2 第二代电渣冶金

1982年,在日本东京举行的第七届国际真空冶金会议期间,电渣冶金奠基人梅多瓦尔院士在与作者的一次谈话中,指着他赠给作者的一本新著《电渣金属》的封面,首次提出了第二代电渣炉的概念。

20世纪60年代初期,北京钢铁学院在实验室条件下,研制成功真空电渣炉(负压氩气保护电渣炉)及加压电渣炉,容量为5 kg,工作气体压力26.664~709.275 kPa,电渣重熔出航空轴承钢、高温合金及钛合金。在抚顺钢厂进行了200 kg真空电渣炉电渣重熔钛合金的中试,并于1965年在抚顺钢厂建成了世界上第1台1 000 kg的真空电渣炉设备。后因故未进行试验。

从1982年第七届国际真空会议到2001年梅多瓦尔纪念会,20年间,国外第二代电渣重熔技术迅速发展^[19],快速电渣重熔技术、真空电渣炉、加压电渣炉等实现了产业化和商业化。而我国电渣重熔技术发展缓慢,除了大型化发展独树一帜外,创新的东西不多,虽然电渣钢的产量有很大的增长,但大部分是新增加的小炉子生产出来的,技术基本上停留在20世纪60年代的水平。

近年来,我国年轻的电渣冶金工作者,跟踪国际电渣冶金的发展,也试制成功了氩气保护电渣炉、加压电渣炉、特大型板坯电渣炉、计算机控制系统等,并与INTECO及巴顿电焊研究所建立了国际合作关系。此外,我国还引进了氩气保护电渣炉,使电渣炉装备水平逐步与国际接轨。可喜的是,东北大学姜周华、钢铁研究总院陈希春,自主创新,发明了带快速电渣重熔系统的氩气保护电渣炉和电渣连铸,建立了带计算机控制的电渣熔铸系统等,开发了电渣重熔高温合金、有色金属、合金钢新产品,并成功应用于生产,为我国第二代电渣重熔技术的发展做出了贡献。

5 第二代电渣冶金进一步发展的方向

为了使我国的电渣冶金技术进一步发展,建议开展以下几方面的工作。

(1)实现电渣重熔锭的大型化。在能源工程、石化工程、冶金机械,特别是核电产业的发展过程中,需要大量高端优质的大锻件。据不完全统计,近期我国正在筹建的核电机组数量已达到40台以上,大型电渣冶金技术在核电建设中大有可为。上海重型机器厂有限公司2009年4月已建成1台450 t电渣炉,450 t电渣炉的产品对象主要是百万千瓦核电站的核岛锻件、汽轮机低压转子、管板和大型支撑辊等超大型锻件。第一重型机械集团有限公司的120 t电渣炉即将安装,东北特钢正在大连基地上马100 t电渣炉。还有单位正在筹建大型电渣炉。山东通裕集团2009年生产的几根75 t电渣锭,锭高

4. 1 m, 锭子上下成分一致, 底部质量、顶部补缩和低倍组织优良, 洁净度高, $[H] = 1 \times 10^{-6}$, $[O] = 17 \times 10^{-6}$, $[S] = 20 \times 10^{-6}$ 。

为了进一步发展我国的电渣冶金技术, 应重视第二代大型锭电渣重熔应实现装备优化设计、气氛可控、重熔过程可控和凝固过程可控, 要加强计算机控制水平和重视基础研究。

(2) 开发快速电渣重熔高速钢技术, 进行结构调整, 形成大的生产基地。

(3) 开发氩气保护电渣重熔模具钢技术, 创中国模具钢名牌, 进行结构调整, 形成大的生产基地。

(4) 开发惰性气体保护下的高合金钢电渣连铸技术, 减少长时间电渣重熔过程中渣成分的剧烈变化和性能恶化, 提高优质合金钢的成材率、降低成本。

(5) 推广带计算机控制的电渣熔铸大型轧辊和大型船用曲轴技术。带计算机控制, 可保证单件生产的电渣熔铸产品质量的稳定性。近终成形的电渣熔铸产品属于第二代电渣重熔产品, 在 20 世纪 60 ~ 80 年代国内外发展迅速, 但由于质量的稳定性、可靠性或投资等问题大多终止了。

(6) 研究氩气保护电渣重熔对高温合金及有色金属组织性能的影响。

(7) 开展第二代电渣重熔过程的基础理论研究, 如惰性气体、熔渣、金属熔池三相反应特征, 快速

熔炼与金属液凝固特征的控制, 有色金属中微量元素的控制与作用研究等。

(8) 研究电渣浇铸过程中的钢液凝固特征, 进行大锭电渣浇铸, 电渣浇铸复合轧辊的研究。研究电渣离心浇铸过程中钢液的运动和凝固特征, 开发带计算机控制的电渣离心浇铸。

相信在未来的 10 年中, 到 2020 年, 我国能在电渣冶金技术的进步和电渣冶金生产的发展方面向前迈出更大的步伐。

6 结论

(1) 讨论了电渣冶金技术的历史“分期”问题, 阐明了第二代电渣冶金技术的特征。

(2) 指出电渣冶金技术主要是伴随大锭电渣重熔技术的发展而发展起来的。

(3) 我国核电产业的发展必将拉动电渣重熔锭大型化的发展; 电渣重熔锭大型化的发展反过来又必将促进我国核电产业迅速赶上国际先进水平。

(4) 第二代大型电渣重熔应实现装备优化设计、气氛可控、重熔过程可控和凝固过程可控, 要提高计算机控制水平和重视基础研究。

致谢 衷心感谢向大林同志在本文撰写过程中与作者进行了有益的讨论和给予的帮助

参考文献

- 1 Патона Ё Е, Медовара Ё И. Злектрошлаковий Металл Киев. 《Наукова Думка》1981
- 2 Holzgruber W. New ESR-Technology for New and Improved Products. Proceedings of the 7th ICVM Special Meltings, 1982, Tokyo; 1452
- 3 Saenko V Ya. Medovar Boris Israilevich - A Person, Scientist and Citizen. Medovar Memorial Symposium, Kyiv, Ukraine, 2001; 5
- 4 冶金工业部建筑研究院电渣冶炼研究组, 北京钢铁学院电渣小组. 电渣冶炼合金钢工艺. 发明记录, 中华人民共和国科学技术委员会, 1964. 2. 8. 发明证书号 000184
- 5 Fu Jie, Li Zhengbang. Recent Advances in Electroslag Metallurgy of China. Medovar Memorial Symposium, Kyiv, Ukraine, 2001; 157
- 6 Harald Scholz, Ulrich Biebricher, Alok Choudhury. Recent Development of Technology and Equipment Design of Electroslag Remelting Process. Medovar Memorial Symposium, Kyiv, Ukraine, 2001; 27
- 7 向大林. 200 吨电渣炉的技术特点和产品评价. 特殊钢, 1999 (增刊): 66
- 8 向大林. 为核电发展助力-国产三相双极串联 200 吨电渣炉的生产实践. 中国冶金报, 2008, B3(12): 25
- 9 傅杰, 朱觉. 电渣重熔过程中氧化物夹杂的变化. 金属学报, 1964, 7(3): 250
- 10 Лагаш Ю В, Медовар Ё И. Злектрошлаковъый Переплава. Издательство · Металлургия · Москва 1970
- 11 傅杰, 陈恩普, 朱觉. 电渣重熔过程中渣池内的电弧放电现象. 金属学报, 1965, 8(1): 8
- 12 Fu Jie, Gao Liang. Advances in Superalloy Technology of China. 《J. Vac. Sci. Technol. A》, Jul/Aug, 1987, 5(4): 2687
- 13 中华人民共和国国家科学技术委员会. 双自耗极串联有衬电渣炉. 发明证书, 1983. 1. 发明证书号 01007
- 14 Bhat N, Bhat G K, Fu Jie, et al. Manufacture of High Performance Near Net Shaped Components of Alloy Metals by Electroslag Crucible Melting and Permanent Mold Casting Process. 《Proc. of 9th ICVM》, San Diego, USA, 1988; 756
- 15 Gao L, Fu J, Chen C X. Recent Advances in Understanding Electroslag Remelting Metallurgy of Superalloy. 4th International Conference on Superalloy, 1980; 99
- 16 Zhu Jue, Liu Haihong, Sun Shuye, et al. The Development of A 200t ESR Furnace in China. 8th ICVM. Linz Austria, 1985; 1053
- 17 Zhu Jue, Lin Zongtang. The Construction and Operation of the 200 Ton ESR Furnace in China. 《Proc. of 9th ICVM》, San Diego, USA, 1988; 632
- 18 Fu Jie, Zhang Rongsheng, Xie Xishan, et al. (Ed) Proceedings of the 10th ICVM. Metallurgy Industry Press, Beijing China, 1990
- 19 Paton E O. Electric Welding Institute. Medovar Memorial Symposium. Kyiv. Ukraine, 2001, 1, 169, 211, 225

傅杰 (1937-), 男, 教授, 《特殊钢》特邀编委, 钢铁冶金研究。

收稿日期: 2009-08-20