



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

特种熔炼

薛正良 朱航宇 常立忠 编著

非外借



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

特种熔炼

薛正良 朱航宇 常立忠 编著

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书内容共分7章,首先简要介绍了特种熔炼技术的基本特征和发展历程,随后按感应炉熔炼(包括非真空和真空感应熔炼)、电渣重熔、真空电弧重熔、电子束熔炼和等离子熔炼的顺序,分别介绍了各种特种熔炼方法的工作原理、设备结构特点、适用范围、熔炼工艺和冶金质量,反映了该领域的最新发展成果。

本书为冶金工程及金属材料制备等相关专业的本科生或研究生教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种熔炼/薛正良等编著. —北京:冶金工业出版社,
2018.10

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7884-1

I. ①特… II. ①薛… III. ①熔炼—高等学校—教材
IV. ①TF111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 235637 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红 禹 蕊

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7884-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安县京平诚乾印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版,2018 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.25 印张; 345 千字; 220 页

35.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

在传统的学科分类中,特种冶金(或特种熔炼)属于电冶金的一个分支,它包含真空冶金、电渣冶金和等离子冶金三大部分。这里所述的真空冶金,并不包含钢铁生产流程中常用的钢液真空精炼方法(如VD、VOD、RH、AOD-VCR、VODC等)。特种冶金所述的真空冶金,包含真空感应熔炼、真空电弧重熔、电子束熔炼、冷坩埚悬浮熔炼等方法,电渣冶金则包含电渣重熔和电渣熔铸。特种熔炼技术在高质量民品生产中应用广泛,在军工、航空航天领域的产品制造中,具有无可替代的地位。本书在编写过程中,为便于教程的循序渐进,按感应炉熔炼(包括非真空和真空感应熔炼)、电渣重熔、真空电弧重熔、电子束熔炼和等离子熔炼的顺序编写。本书共分7章,第一章主要介绍各种特种熔炼方法的基本特征和发展历程,其余六章分别讨论各种特种熔炼方法的工作原理、设备结构特点、适用范围、熔炼工艺和冶金质量。

本书是在武汉科技大学丁永昌、徐曾启教授于20世纪90年代初编著的《特种熔炼》的基础上增补改编而成,并尽可能反映近30年来特种熔炼技术的最新发展成果。本书所涉及的冶金反应的基本理论,在有关前导课程中已有详细论述,为避免重复,本书中只分析讨论这类冶金反应在特种熔炼的具体条件下所具备的特点。目前,在特种熔炼的各种方法中,以感应熔炼(包括非真空和真空感应熔炼)和电渣重熔生产的产品量占特种熔炼产品总量的80%以上,所以在本书中这两部分内容占据相对较多的篇幅。

本书由武汉科技大学薛正良教授、朱航宇副教授和安徽工业大学常立忠教授联合编著,其中第1、2、3、5、6章由薛正良编写,第4章由常立忠、薛正良编写,第7章由朱航宇、薛正良编写。

由于时间仓促,加之编者水平所限,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者
2018年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 特种熔炼技术的发展	4
1.2.1 感应炉熔炼	5
1.2.2 电渣重熔	5
1.2.3 真空电弧重熔	6
1.2.4 电子束熔炼	7
1.2.5 等离子弧熔炼	7
1.2.6 复合熔炼工艺	8
2 感应炉熔炼	9
2.1 概述	9
2.1.1 感应炉的用途	9
2.1.2 感应炉的分类	9
2.2 感应炉工作原理	14
2.2.1 感应炉基本电路	14
2.2.2 感应加热原理	17
2.2.3 感应加热的电特性	18
2.3 感应炉工艺参数设计	22
2.4 感应炉熔炼用原材料	24
2.4.1 对原材料的要求	24
2.4.2 原材料的种类	25
2.5 配料计算	30
2.5.1 配料计算的依据和原则	30
2.5.2 配料计算的一般方法	32
2.5.3 全新料的配料计算	33
2.5.4 返回料的配料计算	36
2.5.5 熔炼过程中合金添加量的计算	37
2.6 感应炉熔炼工艺	38
2.6.1 熔炼方法的选择	38
2.6.2 工艺过程	38
2.7 感应炉熔炼用坩埚	40

2.7.1 坩埚的工作条件及对其要求	40
2.7.2 坩埚用耐火材料	41
2.7.3 坩埚成型方法	43
2.7.4 坩埚的使用和维护	48
参考文献	49
3 真空感应熔炼	50
3.1 概述	50
3.2 真空感应炉熔炼的特点	50
3.3 真空感应炉结构	51
3.3.1 真空感应炉结构形式	51
3.3.2 真空感应炉设备构成	53
3.4 真空下炉衬耐火材料与金属熔池的相互作用	60
3.4.1 真空下耐火材料的相对稳定性	60
3.4.2 真空下炉衬耐火材料向钢液供氧	61
3.5 真空下金属熔池中元素的挥发	66
3.6 真空感应炉熔炼工艺	68
3.7 合金的镁处理	71
3.8 其他真空感应熔炼方法	72
3.8.1 半连续真空感应熔炼	72
3.8.2 真空感应浇铸炉 (VIDP)	74
3.8.3 真空感应悬浮熔炼	76
参考文献	79
4 电渣重熔	80
4.1 概述	80
4.2 电渣炉基本结构	84
4.2.1 电渣炉设备	84
4.2.2 电渣炉类型	87
4.3 电渣重熔的基本原理	93
4.3.1 基本过程	93
4.3.2 电渣重熔的特点	94
4.3.3 钢渣间的冶金反应	95
4.3.4 凝固过程	103
4.3.5 能量的产生与消耗	104
4.4 电渣重熔用渣系	105
4.4.1 熔渣的物理化学性能	105
4.4.2 电渣重熔常用渣料及要求	112
4.4.3 电渣重熔过程常用渣系选择	116

4.5 电渣重熔工艺	123
4.5.1 电渣重熔工艺流程	123
4.5.2 电渣重熔工艺参数选择	129
4.5.3 电渣重熔工艺控制方式	140
4.6 电渣重熔技术的发展	140
4.6.1 可控气氛电渣炉	141
4.6.2 导电结晶器及液态金属电渣冶金技术	145
4.6.3 快速电渣重熔技术	147
4.6.4 洁净金属形核铸造技术	147
4.6.5 电渣热封顶技术	149
4.6.6 电渣中心填充技术	150
4.6.7 电渣重熔空心锭	151
4.6.8 有衬电渣炉	152
4.6.9 电渣熔铸	152
参考文献	153
5 真空电弧重熔	155
5.1 概述	155
5.2 真空自耗电弧炉的结构及分类	156
5.2.1 结构简介	156
5.2.2 真空自耗电弧炉的分类	158
5.3 钢和合金的重熔工艺	160
5.3.1 重熔工艺过程	160
5.3.2 工艺参数	161
5.4 真空电弧重熔常见的冶金质量问题	163
5.4.1 钢和合金的宏观缺陷	163
5.4.2 钢和合金的微观缺陷	164
5.5 真空电弧重熔的特点	165
5.6 真空电弧凝壳熔炼	166
5.7 真空电弧炉生产的品种	167
参考文献	167
6 电子束熔炼	169
6.1 概述	169
6.2 电子束熔炼的基本原理	171
6.3 电子束熔炼炉的主要设备	172
6.3.1 炉体	173
6.3.2 电子枪	173
6.3.3 进料系统	176

IV	
6.3.4	真空系统 177
6.3.5	高压电源 177
6.3.6	铸锭系统和冷却系统 177
6.4	电子束熔炼工艺及其冶金特点 178
6.4.1	电子束重熔工艺 178
6.4.2	电子束重熔的冶金特点 179
6.5	电子束重熔的效果 180
6.5.1	金属中气体和夹杂的去除 180
6.5.2	金属中夹杂元素的去除 182
6.5.3	金属性能的改善 182
6.6	其他电子束熔炼炉 183
6.6.1	电子束凝壳炉 183
6.6.2	多用途电子束熔炼炉 183
6.6.3	电子束冷床熔炼 (EBCHM) 或电子束连续流熔炼 (EBCFM) 184
	参考文献 187
7	等离子熔炼 188
7.1	等离子熔炼及其特点 188
7.1.1	等离子体简介及其分类 188
7.1.2	等离子体发生器 192
7.1.3	等离子弧的特点 195
7.1.4	等离子弧的温度特性 196
7.1.5	等离子熔炼的优越性 196
7.2	等离子枪的电极材料和等离子工作气体 200
7.2.1	等离子枪的电极材料 200
7.2.2	等离子工作气体 201
7.3	等离子熔炼的类型 202
7.3.1	等离子电弧熔炼 202
7.3.2	等离子感应熔炼 205
7.3.3	等离子弧重熔 209
7.3.4	等离子电子束重熔 210
7.4	等离子在冶金工业中的其他应用 212
7.4.1	等离子中间包加热技术 212
7.4.2	氢等离子体在冶金中的提纯作用 215
7.4.3	等离子冷床炉熔炼技术 217
	参考文献 220

1 绪 论

1.1 概 述

钢铁工业是国民经济的重要基础产业，是体现国家经济水平和综合国力的重要标志之一。一个国家在工业化前期和中期，必然是钢铁工业发展最快的时期。改革开放给我国钢铁工业带来了重大历史机遇，粗钢产量自 1996 年突破 1 亿吨后一路攀升，至 2017 年达到顶峰（8.317 亿吨），占全球钢产量的 49.20%（见表 1.1）。

表 1.1 近 15 年来中国大陆粗钢产量与世界粗钢产量变化

年 度	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
中国粗钢产量 /亿吨	2.20	2.70	3.49	4.18	4.89	5.012	5.68	6.27	6.83	7.16	7.79	8.23	8.038	8.08	8.32
世界粗钢产量 /亿吨	9.62	10.3	11.31	12.39	13.43	13.29	12.2	14.14	15.27	15.48	16.06	16.62	16.23	16.29	16.91
中国粗钢/世界粗钢 /%	22.8	26.2	30.8	33.7	36.4	37.6	46.56	44.32	44.73	46.3	48.5	49.58	49.52	49.60	49.20

8 亿多吨的粗钢产量，绝大部分来自以下两种生产工艺：（1）从铁矿石开始的所谓“长流程”生产工艺。包括铁矿石造块、高炉炼铁、氧气转炉炼钢、钢水炉外二次精炼和连续铸钢。（2）从废钢开始的所谓“短流程”生产工艺。包括超高功率电弧炉熔化废钢、钢水炉外二次精炼和连续铸钢。在不同的发展时期，出于技术经济的考虑，“长流程”工艺中的转炉也可以多吃废钢，“短流程”工艺中的电弧炉也可以吃铁水。上述两条生产工艺最终的产品都是连铸坯，包括方坯、板坯（大板坯、薄板坯、薄带）、圆坯和工字型坯，等等。

方坯有小方坯和大方坯之分，通常将断面大于 90000mm^2 的铸坯（包括矩形坯）称为大方坯。目前，我国最大断面的连铸机是 2011 年 5 月投产的湖北新冶钢有限公司的 R16.5m 四机四流全弧形大方坯合金钢连铸机，铸坯最大断面 $410\text{mm}\times 530\text{mm}$ 。

圆坯连铸机通过圆形结晶器浇铸成不同直径的圆截面铸坯。进入 21 世纪，国内许多钢厂相继建成了可生产 $\phi 400\sim 600\text{mm}$ 大断面圆坯连铸机，特别是 2010 年 10 月江阴兴澄特种钢铁有限公司投产了能生产 $\phi 900\text{mm}$ 圆坯的 R17m 三机三流全弧形连续矫直圆坯连铸机，2011 年 11 月，又在二分厂建成了 3 号连铸机投产，是目前世界上最大的可生产 $\phi 1000\text{mm}$ 圆坯的三机三流连铸机。

板坯连铸机的断面厚度以 $210\sim 230\text{mm}$ 居多。为了生产厚钢板，诞生了能生产厚度 400mm 以上的特厚板坯连铸机。日本川崎制铁和新日铁名古屋钢厂的立式连铸机能生产厚度达 600mm 的特厚坯；德国迪林根（Dillinger）钢铁公司用直弧形板坯连铸机可生产最大

断面厚度为 500mm 的特厚板。我国南阳汉冶特钢有限公司和江西新余钢铁集团等,于 2011 年相继建成投产了可生产厚度为 420mm 的特厚板直弧形连铸机;2014 年江阴兴澄特板厂建成投产了目前国内厚度最大的 450mm 直弧型板坯连铸机。

连铸机浇铸过程中,由于二冷区钢液凝固过程中形成的液芯很长,造成诸如溶质元素的宏观偏析、组织疏松,甚至缩孔、内部大型夹杂和裂纹等无法避免的凝固缺陷。为了保证热加工后材料的机械力学性能,必须满足必要的热加工锻压比才能在一定程度上消除上述连铸坯凝固缺陷对材料性能带来的危害。因此,热加工后材料的特征尺寸会大大小于连铸坯的断面尺寸,再加上制造各类工件前的切削等机加工,实际工件的最大特征尺寸远小于连铸坯的断面尺寸。

可是,在军工生产、国防建设、能源工程、机械制造和其他民用工程建设中经常需要用到如图 1.1~图 1.4 所示的大规格单体工锻件或坯料,这些大规格锻件或坯料的特征尺寸和自重已非连铸坯能够满足,且大规格锻件对材料内部质量的要求也是连铸坯无法满足的。



图 1.1 110 万千瓦核电半速转子



图 1.2 CPR1000 堆芯支承板锻件



图 1.3 水轮机主轴坯料 ($\phi 1950 \times 6200$)

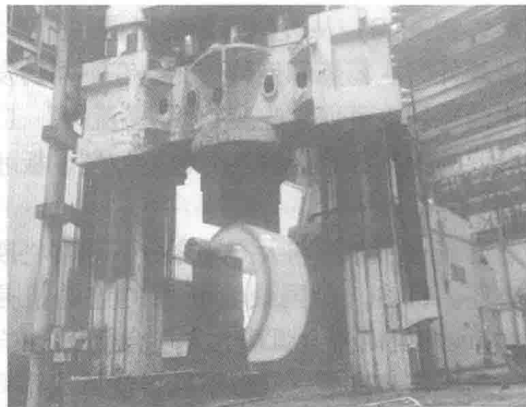


图 1.4 超大型筒类锻件 ($\phi 3900/2700 \times 2265$)

这些特大型锻件或坯料需要用特大型模铸锭或电渣重熔锭来制造。如图 1.1 所示的 110 万千瓦核电半速转子是用图 1.5 所示的 600t 特大型模铸锭锻造而成。由于模铸锭存在许多诸如横向和纵向成分的宏观偏析、组织疏松和缩孔等本身无法避免的凝固缺陷(图 1.6),均需要通过特殊的冶金方法来加以避免或减轻其对锻件整体力学性能的不利影响。



图 1.5 600t 特大型模铸锭

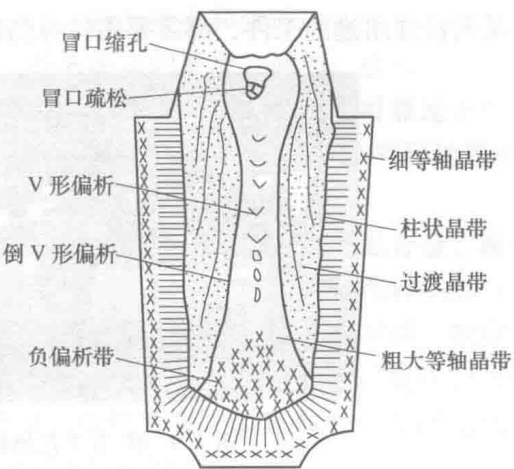


图 1.6 镇静钢锭结构

在兵器制造领域，坦克及其他装甲车辆的某些部位需要用加厚装甲钢板来制造；航母船体水下部分和机仓，为了防鱼雷和来自潜艇的导弹攻击，采用的高强度钢板厚度达 150~203mm；航母指挥中心的防护钢板最厚达 330mm。这些特厚钢板，有些可以用特厚连铸板坯来制造，有些则要依靠特种熔炼方法来制造。另外，像水轮机（图 1.7）、大型螺旋桨（图 1.8）、超超临界汽轮机高中压一体转子（图 1.9）和大型曲轴（图 1.10）等



图 1.7 水轮机转子

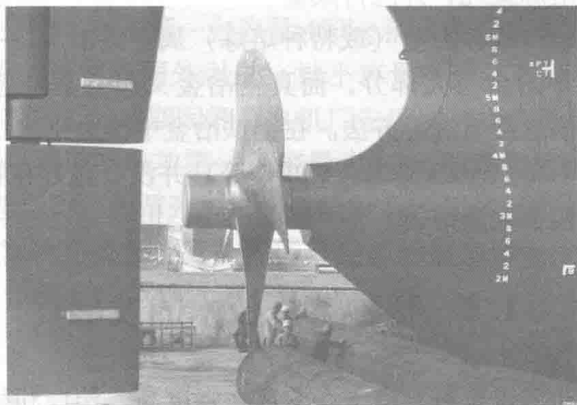


图 1.8 大型舰船用螺旋桨

一系列特殊用途的工件，都需要用特殊的冶金技术来实现。



图 1.9 60 万千瓦超超临界汽轮机高中压一体转子



图 1.10 电渣熔铸曲轴毛坯

有些铁基和镍基合金材料（如某些特殊钢、高温合金、精密合金、电热合金和高合金钢等）对气体含量、大型夹杂物尺寸和数量、成分和组织均匀性有特殊的要求，是传统冶炼方法及铸锭工艺无法达到的，必须通过特种冶金方法来获得具有超纯净度、化学成分均匀、组织结构致密的铸锭。在航空、航天及军工生产领域，难熔金属、活泼金属及其合金材料的生产与制造，必须用特种熔炼技术将诸如 Nb, Ta, W, Ti, Mo, Zr, 以及稀土等高熔点金属及其合金进行熔炼提纯，并浇铸成锭。

在传统的学科分类中，特种冶金（或特种熔炼）属于电冶金的一个分支，它包含真空冶金、电渣冶金和等离子冶金三大部分，而真空冶金又包含真空感应熔炼、真空电弧重熔、电子束熔炼、冷坩埚悬浮熔炼等方法。在钢铁冶金中作为钢水二次精炼手段的真空精炼设备（如 RH、VD、VOD、AOD-VCR、VODC 等）并没有包含在特种冶金的范畴；电渣冶金除电渣重熔外，还包含电渣熔铸。

1.2 特种熔炼技术的发展

以铁碳合金为代表的钢铁材料，由于来源广、强度高、塑性和韧性好，同时又具有良好的加工性能和焊接性能，因而在国民经济的各个领域、国防建设和科学技术发展中得到

广泛应用。当代电子技术、航空航天技术、航海技术、能源技术和交通运输等领域日新月异的发展,对钢铁和合金材料的质量和品种提出了越来越高的要求。例如,要求钢或合金材料能够在高温、高压、高速度、动载荷、高辐射、高腐蚀性介质等环境下可靠地进行工作。而按转炉或电弧炉加精炼-连铸等常规工艺路线的生产手段已不能满足实际的需求,无法提供如此高质量的产品,这就需要用特种熔炼方法来完成。

特种熔炼是用来生产某些具有特殊纯净度要求的特殊钢和高合金钢、高温合金、精密合金、难熔金属及合金、超纯金属、钛和锆及其合金等高级合金的特殊而有效的方法。

高温合金是现代航空燃气涡轮、舰船燃气涡轮和火箭发动机的重要金属材料,航空发动机中高温合金的用量占40%~60%,因此这类材料被称为燃气涡轮的心脏。精密合金通常包含磁性合金、弹性合金、膨胀合金、热双金属、电热合金、储氢合金、形状记忆合金、磁致伸缩合金等一系列具有特殊电、磁、热和其他性能的合金。

特种熔炼方法是在第二次世界大战以后,为适应航空、电子、机械制造等工业对高质量金属材料的要求而发展起来的。常用的特种熔炼方法有感应熔炼(induction melting)、电渣重熔(electro-slag remelting)和电渣熔铸(electro-slag casting)、真空电弧重熔(vacuum arc remelting)、等离子弧熔炼(plasma arc melting)和电子束熔炼(electron-beam smelting)等,每一种特种熔炼方法都经历了自身的发展和完善的过程。

1.2.1 感应炉熔炼

1901年,诞生了第一台用于炼钢的无芯工频空感应炉;1917年,美国人MR. J. R. Wyatt开发出了第一台用于工业生产的工频有芯感应炉(俗称“熔沟炉”)用于黄铜的熔炼;1917年,德国海拉斯(Heraeus)公司制造了第一台真空感应炉用于熔炼飞机和火箭发动机引擎的镍铬合金材料。但感应熔炼方法的大规模工业应用还是在第二次世界大战以后,随着航空航天、电子信息、石油化工以及机械制造等工业的迅速发展,对金属材料的需求日益增长,一般的冶炼方法生产的金属材料难以满足高质量的需求,而感应熔炼利用电磁感应原理加热和熔化金属,没有来自电极材料的污染,合金成分和温度容易控制,金属洁净度高,因而受到各工业发达国家的普遍重视并得到大力发展。目前,国外运行的最大的中频感应炉容量达60t,大型真空感应炉的容量一般为1~30t,最大的真空感应炉据称可达到60t。

我国于20世纪40年代开始采用感应炉炼钢,1942年,国民政府资源委员会下属的四川綦江电化冶炼厂炼钢分厂建立了第一台容量450kg的中频感应炉,用于生产合金钢。新中国成立后的1950年代,我国从国外引进一批小容量中频、高频感应炉和真空感应炉,主要用于新材料的研发工作。在此期间湘潭电机厂先后试制成功了50~430kg中频感应炉;1962年,锦州新生电器公司试制成功第一台容量为10kg的真空感应炉,随后又陆续研制成功了50~200kg真空感应炉。改革开放以来,随着我国国民经济的快速发展,我国感应炉制造和应用得到迅速发展与普及。目前我国已经能够制造容量大于40t的工频感应炉、20t的中频感应炉和13t的真空感应炉。

1.2.2 电渣重熔

电渣重熔法始于20世纪40年代美国霍普金斯(R. K. Hopkins)的一份专利,凯洛公

司购买了该专利生产了第一台电渣炉,因而最初的电渣重熔法称为“凯洛法”。由于“凯洛法”使用铁基或镍基管包裹的合金碎料做自耗电极,凝固后的铸锭中出现未熔化的“夹生”组织,这一方法没有得到工业界的重视。苏联的电渣重熔法起源于电弧焊,乌克兰巴顿电焊研究所在一次偶然的电弧焊接现象中得到启发,逐渐开发出了独立于美国的电渣重熔技术。直到1956年采用实心自耗电极后,电渣重熔法才得到快速发展,使其成为至今最主要的钢与合金的特种熔炼方法。随着技术的不断进步,从电渣重熔法派生出了许多专业分支,形成一门跨行业、跨专业的新的“电渣冶金”学科方向,包括:电渣重熔、电渣熔铸、电渣转铸、电渣浇注、电渣离心浇注、电渣热封顶、电渣中心填充、电渣焊接、电渣连铸等。

电渣重熔能生产大中型锻件所需的高质量铸锭,重熔的产品硫含量低,大型非金属夹杂物少,重熔后铸件成分均匀、组织结构致密、表面光滑,因而大大提高了铸锭的成材率和产品质量,锻件的机械性能、加工性能、使用性能等各项指标大幅度提高。

电渣重熔可以重熔高温合金、耐热钢、电热合金、轴承钢、特种不锈钢等大多数钢或合金材料,在优质工具钢、模具钢、高速钢、马氏体时效钢、双相钢管坯以及冷轧轧辊的生产中具有很强的优势;对于受周期性疲劳的弹簧钢及其产品、航空轴承、重型车辆及高铁用轴承,以及仪器仪表轴承用钢,也适于用电渣重熔;电渣重熔在超级合金(高温合金、精密合金、耐蚀合金和电热合金等)的生产中也具有很大的优势;此外,在异形铸件的生产中电渣熔铸法具有不可替代的优势,如大型曲轴、曲拐、轧辊、中空管坯等铸件的生产。

20世纪80年代,我国建成了当时世界上容量最大的200t电渣炉;目前,世界上最大吨位的电渣重熔炉是我国上海重型机器厂具有自主知识产权的可生产450t特大型铸锭的三相摇臂双极串联电渣炉。

1.2.3 真空电弧重熔

真空自耗电弧重熔依靠真空下电弧放电产生的高温来熔化金属,并在真空下实现熔体的脱氧、杂质元素的挥发和夹杂分解等净化过程。

1903年,英国人伯顿(W. V. Bolton)首次使用自耗电极在真空充氩气氛下进行了钽的熔炼实验。第二次世界大战后,由于钛生产的需要,真空电弧炉首先在美国得到工业应用。1949~1953年美国杰伯特(Gilbert)成功地进行了海绵锆、钛的真空电弧熔炼。20世纪50年代中期,由于导弹、重型武器装备生产的需要,真空电弧炉开始用于高级合金钢和高温合金的重熔。1957年用于特殊钢熔炼的真空电弧炉在美国的Allegheny Ludlum Steel公司和Universal Cyclope公司投入工业运行。同年,联邦德国、日本等国也相继成功地研制出特殊钢熔炼用真空电弧炉,并投入工业运行。

20世纪80年代初,美国特种金属公司(Special Metals Corp)研制出采用两根水平布置的自耗电极取代传统真空自耗炉中单根垂直悬挂的自耗电极,靠两根电极极间的电弧来熔化金属的真空电弧双电极重熔炉。此炉的主要优点是:(1)可生产超细晶粒的高温合金钢锭;(2)电耗低。1989年能够生产 $\phi 300\text{mm}$ 、重2t锭子的真空电弧双电极重熔炉在美国投入工业运行。20世纪末,世界上容量最大的真空电弧炉是美国Midvale-Heppenstall公司于1961年建造、1962年实施技术改造的特殊钢熔炼用52t真空电弧炉,可以用于

φ1520mm 钢锭的重熔。

我国于 20 世纪 60 年代开始研究、制造真空电弧炉。60 年代中期,西安电炉研究所与长春电炉厂合作为长城钢厂设计、制造了 3t 真空自耗电弧炉。70 年代末,钢铁研究总院设计并制造了 200kg 同轴真空电弧重熔炉,上海钢铁研究所建成了双电极真空电弧重熔炉用于重熔 INCO718 合金。钢铁研究总院与抚顺钢厂合作采用真空感应熔炼+真空电弧重熔及真空感应熔炼+电渣重熔生产出优质铁基与镍基高温合金。中科院金属所采用真空感应炉+真空电弧重熔生产出超纯铁素体不锈钢应用于核工业。

我国生产并投入使用的真空电弧炉主要有 250kg, 1000kg, 3000kg 等几种规格。另外,还拥有可熔铸重 15t 钛锭的真空自耗炉和铸件重达 1t 的凝壳式真空电弧熔铸炉等。20 世纪 90 年代以来,由于钢包精炼炉和电渣重熔炉等的迅猛发展与竞争,真空电弧炉在炼钢方面的应用已日趋减少,而主要用于熔炼 Pt, Ta, W, Zr, Mo, Ti 等难熔金属和易氧化的金属。在特种熔炼中,真空电弧重熔法仍然是重熔精炼的主要方法之一。

1.2.4 电子束熔炼

电子束熔炼(或重熔)法是在高真空度条件下,利用电子枪发射的高能电子束的动能在阳极转化为热能,使金属熔化的一种熔炼方法。

电子束熔炼方法最早出现于 1905 年,德国西门子(Siemens)公司将电子束熔炼法用于高熔点金属钽的提纯。到 20 世纪 50 年代中,由于真空技术的发展以及市场对高纯度难熔金属的需求量增大,电子束熔炼方法才得以加快发展,熔炼的金属锭重可达 30t 以上。电子束熔炼法从熔炼难熔金属(钽、铌、钨、钼、钨等)开始,现已扩展到生产半导体材料和高性能的磁性合金以及部分特殊钢,如滚珠轴承钢、耐腐蚀不锈钢以及超低碳纯铁等。特别是用来生产钛合金,回收钛废料,生产钛锭、钛板坯。

1958 年,我国从德国引进电子束熔炼炉,并着手研究和试制。到了 20 世纪 60 年代,已经具备了工业化生产电子束炉的规模。1964 年,有色金属研究总院研制成功 120kW 电子束熔炼炉,1987 年改造成 200kW 电子束熔炼炉。目前可以制造最大功率 300~600kW 电子束熔炼炉。宁夏东方铝业从德国 ALD 公司引进 1200kW 电子束炉,用来熔炼钽、铌及合金,锭子直径可达 100~500mm。

1.2.5 等离子弧熔炼

等离子弧熔炼是利用等离子弧作为高温热源来熔化、精炼和重熔金属的一种新型熔炼方法。现代等离子熔炼技术开发于 20 世纪 50 年代末至 60 年代初美国联合碳化物(Union Carbide)公司所属的林德(Linde)公司开始研制的 11kg 的等离子电弧炉(PAF)和实验型等离子弧重熔炉(PAR)。在同一时期,苏联、东欧国家以及日本也进行了许多研究工作,并将其应用于工业生产。到了 20 世纪 70 年代乌克兰巴顿电焊研究所已形成等离子弧重熔炉的系列设备,最大容量为 5t。民主德国弗赖塔尔(Freital)特殊钢厂于 1973 年和 1977 年先后投产了 15t 和 40t 两座等离子弧重熔炉。日本大同特殊钢公司于 1969 年和 1975 年开发了 0.5t 和 2t 的等离子感应炉(PIF),还于 1982 年建成了 2t 的等离子弧重熔炉。日本不锈钢公司(Ul-vac)在 20 世纪 60 年代开发了等离子电子束重熔技术,1971 年建成了一台有 6 支枪,每支枪输出 400kW 的等离子电子束重熔(PEB)设备,直接由海

绵钛炼成 3t 的钛锭。进入 20 世纪 80 年代, 等离子熔炼技术已比较成熟, 发展也相对减慢。在钢水加热方面的应用发展较快, 如等离子钢包加热和中间包加热。中国于 20 世纪 70 年代初开始研究等离子熔炼技术并建成了一些实验设备和容量在 0.5t 以下的工业炉。利用等离子弧的高温, 来熔炼 W, Mo, Re, Ta, Zr 及合金, 等离子弧调整范围广, 输入功率与金属熔化率无直接关系, 因此, 重熔过程可以控制金属的凝固, 利用这一优势来制取单晶体。等离子冶金用氮气作为工作气体可以熔炼高氮奥氏体不锈钢, 还可以利用等离子冶金来制取超细粉和纳米粉等。

等离子熔炼已在许多国家得到开发和应用, 所涉及冶炼产品也十分广泛, 但总的产量还较低。

1.2.6 复合熔炼工艺

20 世纪 50 年代国际上普遍采用电弧炉或非真空感应炉熔炼高温合金及特种钢。但电弧炉只能熔炼合金比低的合金及铝、钛等易烧损元素含量少的合金。现代的高温合金含有大量的易烧损元素及微量元素, 必须采用真空下的熔炼工艺。要进一步提高合金的质量, 改善合金的铸态组织和热加工塑性、力学性能等, 须采用双联及三联工艺。通常情况下, 对合金化程度较低的合金来说, 一般是采用电弧炉或非真空感应炉熔炼铸成电极后再进行真空自耗电弧重熔或电渣重熔; 对合金化程度较高的合金, 则采用真空感应炉熔炼成自耗电极棒, 然后再经真空自耗重熔或电渣重熔。采用不同的冶炼工艺方法冶炼不同类型的合金, 其冶炼工艺因素对冶金质量的影响各不相同。采用电渣重熔金属作为三次真空电弧重熔的自耗电极, 主要应保证合金具有很低的气体含量。

目前和未来的高温合金的熔炼方法有:

单炼: 电弧炉熔炼 (AAM)、感应炉熔炼 (AIM)、真空感应熔炼 (VIM)、真空电弧重熔 (VAR)、电渣重熔 (ESR)、电子束熔炼 (EBM) 或电子束冷床熔炼 (EBCHM)、等离子电弧炉熔炼 (PAF)、等离子感应炉熔炼 (PIF)。

双联工艺: 真空感应熔炼 (VIM)+真空电弧重熔 (VAR) 或真空电弧双电极重熔 (VADER), 真空感应熔炼 (VIM)+电渣重熔 (ESR), 非自耗真空电弧熔炼 (NAV)+电渣重熔 (ESR), 真空感应熔炼 (VIM)+电子束重熔 (EBM), 非自耗真空电弧熔炼 (NAV)+电子束熔炼 (EBM)。

三联工艺: 真空感应熔炼 (VIM)+真空电弧重熔 (VAR)+电渣重熔 (ESR), 真空感应熔炼 (VIM)+电渣重熔 (ESR)+真空电弧重熔 (VAR), 非自耗真空电弧熔炼 (NAV)+电子束熔炼 (EBM)+真空电弧重熔 (VAR)。

2

感应炉熔炼

2.1 概 述

2.1.1 感应炉的用途

2.1.1.1 金属料的熔化炉、保温炉

(1) 代替冲天炉熔化铸造生铁，用来生产各种铸件。与冲天炉相比，感应炉熔化铸铁时铁水成分和温度容易控制，P、S 含量低，铸件中杂质少，气体含量低，作业环境好。

(2) 回收含 Cr、Ni、W、Mo、V 等贵重金属元素的合金钢废料，如不锈钢、高速工具钢、模具钢等的用后废弃品。同钢种的废料熔化后浇铸成钢锭，再把钢锭锻造成圆柱形自耗电极，通过电渣重熔工艺加工成电渣锭。

(3) 生产“地条钢”。收集社会废钢铁用感应炉熔化后浇铸成锭或用连铸机浇铸成小方坯，再用热轧机轧成螺纹钢或线材。由于感应炉熔化过程无脱碳、脱磷、脱硫和脱氧能力，因此钢水的碳含量、有害元素含量、气体含量都无法有效控制，用这种方法生产出的钢材的化学成分和力学性能波动很大，达不到国家标准对建筑用钢材的基本要求。

(4) 大吨位的工频感应炉用来熔化铜及其合金、铝、锌等有色金属，并在炉子中保温备用。

2.1.1.2 钢铁料的熔炼炉

生产合金铸件、铸钢件等，如烧结机台车上的炉算、高炉冷却壁、各种耐磨衬板、磨球等。真空感应炉可用来熔炼各种高纯合金或钢铁产品。

2.1.2 感应炉的分类

2.1.2.1 工频感应炉

工频感应炉简称工频炉，是以工业频率的电流（50Hz 或 60Hz）作为电源的感应电炉。工频感应炉主要作为熔化炉或保温炉，如在有色金属领域用来熔化铜、铝、锌等；在黑色金属领域工频感应炉代替冲天炉熔化生铁来生产灰口铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁等的铸件，也可以用来熔化废钢，生产质量要求不高的钢材。根据炉子结构的不同，工频感应炉可分为工频有芯感应炉和工频无芯感应炉。

工频有芯感应炉诞生于 1917 年，美国人 MR. J. R. Wyatt 开发出了商品名为 AJAX-WYATT 的“熔沟式”有芯感应炉（图 2.1），并用于黄铜的熔炼。因此，工频有芯感应炉又叫熔沟或沟槽式感应炉。其利用电磁感应加热原理，当初级绕组（铁芯上的多匝线圈）接通工频交流电源后，闭合的金属熔沟（相当于次级绕组）产生感应电流，从而产生大量热量，通过熔化的金属液的循环流动，将热量向外传递，达到熔化全部金属的目的。工频