

电渣冶金理论与实践

Electroslag Metallurgy Theory and Practice

李正邦 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

电渣冶金理论与实践

李正邦 著

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 简 介

电渣冶金技术可以被认为是一种金属或合金精炼提纯及凝固控制的复合技术,其产品具有纯净度高、成分均匀、力学性能和使用性能好、近终形、过程可控等特点,因此在国民经济的许多重要领域用于生产高端产品或关键部件。

本书分 8 章,分别介绍了电渣冶金技术的发展和现状、电渣冶金的基本原理、电渣冶金用渣系、电渣冶金工艺、电渣炉、电渣金属的质量和性能、电渣冶金过程的热传递和凝固控制、电渣冶金技术的展望等内容。书中简明、记实地阐述了经典的电渣冶金原理和重要的研究成果,用通俗易懂的文字系统地介绍了电渣工艺、设备和渣系,对电渣金属质量和性能的分析能使读者了解到电渣冶金技术的重要性,而技术展望将使读者对电渣冶金技术的内容有更为深刻的认识。

本书内容涉及电渣金属的生产领域——材料、冶金、铸造等和电渣金属的应用领域——能源、航空航天、造船、机械制造、医药等,本书可供这两个领域的工程技术人员、科研人员、管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电渣冶金的理论与实践 / 李正邦著. —北京:冶金工业出版社, 2010.1

ISBN 978-7-5024-5109-7

I. ①电… II. ①李… III. ①电渣熔炼 IV. ①TF14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 244522 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 张熙莹 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5109-7

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 1 月第 1 版, 2010 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 29.25 印张; 567 千字; 453 页; 1-2000 册

79.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010) 65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

作者曾主编的《电渣熔铸》和《电渣炉》两书是冶金学科重要专著，引用率较高，但早已脱销，因各种原因，再版一直未能如愿。应读者要求，作者重新编著了《电渣冶金理论与实践》一书。本书以《电渣熔铸》和《电渣炉》两书为基础，吸取原书中对经典的电渣冶金原理和重要的研究成果的介绍，系统地论述了电渣冶金用渣系和工艺、电渣冶金设备概况、电渣钢的质量及性能、电渣冶金过程的热传递及凝固控制等，而且综合归纳了近几十年来国内外电渣冶金技术的发展，增添了有关无氟渣、酸性渣、电渣渣系发展趋势、电渣炉的微机控制、电渣重熔各种合金以及电渣冶金的前沿技术等内容，以供电渣冶金工作者回顾过去，分析现状，展望未来。

另外，研究电渣冶金史，人们不难发现 20 世纪 60 年代和 70 年代，冶金工作者对是发展电渣重熔还是真空电弧重熔曾出现一场激烈的技术争论，不同的企业和研究机构发表了大量的论文与数据。这些数据无疑是较全面和可靠的，具有对比性。作者很重视这些数据，故在本书中予以保留；同时作者还广泛地收集了 21 世纪以来直至 2009 年的数据，以丰富本书的内容。

感谢林功文教授和我的两位博士后常立忠、董艳伍，他们参与了此书的汇编、内容补充等工作。我的同仁姜周华教授、张家雯教授、杨海森高工等一直支持我的工作，在此一并表示感谢！

由于编写仓促，书中难免有缺点和不足之处，恳请批评指正。

李正邦
2009 年 10 月

目 录

1 电渣冶金概述	1
1.1 电渣冶金在国际上的发展	1
1.2 我国电渣冶金的起步与重大发展	4
1.2.1 我国电渣冶金的起步	4
1.2.2 我国电渣冶金的重大发展——200 t 级电渣炉	4
1.2.3 电渣熔铸	6
1.2.4 电渣重熔去夹杂机理的研究	7
1.2.5 电渣炉炉型创新	10
1.3 电渣冶金的现状	12
1.4 电渣冶金的优越性和局限性及其在材料领域的应用前景	13
参考文献	15
2 电渣冶金原理	17
2.1 基本原理	17
2.1.1 基本过程	17
2.1.2 金属电极的熔化	18
2.1.3 熔滴的形成和过渡	31
2.1.4 熔池形状	34
2.1.5 金属的结晶	35
2.1.6 电渣过程的整流效应	37
2.2 电渣冶金过程的热传递	38
2.2.1 电渣冶金过程中渣池的热源分布及渣池和铸锭中的温度分布	38
2.2.2 电渣过程放出的总热量及分配	41
2.2.3 热平衡方程式及各部分热量确定方法	42
2.2.4 电渣过程的热效率	44
2.3 冶金反应	46
2.3.1 电渣过程的冶金特点	46
2.3.2 非金属夹杂物的去除	50
2.3.3 去硫	58
2.3.4 去磷	60

2.3.5 去气 (氢、氮、氧)	61
2.3.6 合金元素的氧化和还原	63
2.4 电渣过程的凝固和结晶	65
2.4.1 顺序结晶特点	65
2.4.2 凝固	67
2.4.3 金属结晶组织与凝固参数的关系	70
2.5 电渣冶金基础理论的发展	75
2.5.1 电化学的应用	75
2.5.2 以理论创新为依据的电渣技术创新	76
参考文献	76
3 电渣冶金用渣系	79
3.1 渣的功能	79
3.2 渣的物理化学性能	80
3.2.1 相平衡	80
3.2.2 导电度	89
3.2.3 黏度	91
3.2.4 密度	94
3.2.5 热容	96
3.2.6 表面张力和界面张力	99
3.2.7 导热系数	107
3.2.8 透气性	109
3.2.9 蒸气压及安全性	117
3.3 电渣重熔或熔铸常用渣系	121
3.3.1 渣的选择	121
3.3.2 渣的组元	122
3.3.3 常用渣系和多元渣系	123
3.3.4 无氟渣的开发与应用	128
3.3.5 酸性渣电渣重熔的展望	135
3.3.6 电渣重熔含钛钢的渣系	141
3.3.7 电渣重熔含镁钢及合金所用渣系	141
3.4 电渣冶金渣系发展趋势	142
参考文献	149
4 电渣冶金工艺	153
4.1 电渣锭生产的工艺程序	153

4.1.1 电极布置和自耗电极的制备	153
4.1.2 电渣锭的制备与结晶器	156
4.1.3 附属设备	159
4.2 电渣熔铸工艺	160
4.2.1 电渣熔铸件的类型	160
4.2.2 电渣熔铸工艺制定的原则及分类	163
4.2.3 电渣熔铸条件参数的选择	165
4.2.4 电渣熔铸基本控制参数的选择	169
4.2.5 电渣熔铸目标参数的选择	192
4.2.6 电渣熔铸工艺控制方式	199
4.2.7 典型电渣熔铸工艺规范的制定	199
4.3 电渣熔铸操作	203
4.3.1 电极的制备	203
4.3.2 渣料的准备	206
4.3.3 电渣熔铸操作	210
4.4 典型产品电渣熔铸工艺	220
4.4.1 轴类（阶梯轴）	220
4.4.2 轧辊	221
4.4.3 曲轴	221
4.4.4 中空管	224
4.4.5 拖拉机轮	227
4.4.6 机座	227
4.4.7 钻头	228
4.4.8 涡轮盘 GH136	228
4.4.9 耐热合金 HK40/HK50 炉管	231
参考文献	237
5 电渣炉	239
5.1 电渣炉的布置	239
5.1.1 电渣炉本体布置	239
5.1.2 电渣炉车间布置	242
5.2 电渣炉设备及结构	244
5.2.1 电渣炉的类型	244
5.2.2 电渣炉的机械设备	260
5.2.3 电渣炉的电气设备	282

5.3 电渣炉车间辅助设备	287
5.3.1 化渣炉	287
5.3.2 电极电渣焊装置	289
5.3.3 渣料储存及供给装置	289
5.3.4 电极表面清理装置	290
5.3.5 渣料干燥设备	290
5.3.6 除尘装置	290
5.3.7 测量仪表	290
5.4 电渣炉的计算机控制	292
5.4.1 电渣炉计算机控制的发展历史和趋势	292
5.4.2 国外当代典型电渣炉控制系统概貌	294
5.4.3 国内电渣炉微机控制应用现状	294
5.4.4 计算机控制技术的经济优越性	295
参考文献	295
6 电渣金属的质量和性能	297
6.1 电渣金属的纯净度	297
6.1.1 钢中非金属夹杂物含量	297
6.1.2 钢中有害气体含量	299
6.1.3 钢中有害元素含量	300
6.2 电渣铸钢的致密性及低倍组织	301
6.3 电渣铸钢化学成分、组织均匀性及显微组织	303
6.3.1 化学成分均匀性	303
6.3.2 组织均匀性	306
6.3.3 电渣铸钢的断口	307
6.4 电渣铸钢的力学性能	311
6.4.1 常温力学性能	312
6.4.2 低温力学性能	314
6.4.3 高温力学性能	315
6.5 电渣重熔轴承钢	317
6.5.1 夹杂物的去除	317
6.5.2 熔渣成分对去除夹杂物的影响	321
6.5.3 夹杂物性质的控制	322
6.5.4 疲劳寿命	323
6.6 电渣重熔高速钢和模具钢	324

6.6.1 电渣重熔高速钢	324
6.6.2 电渣重熔模具钢	325
6.7 电渣重熔厚板锭	325
6.7.1 20 锰镍钼优质钢	325
6.7.2 20 锰镍铜钒铌钢	328
6.7.3 05Cr18Ni9 钢	331
6.7.4 电渣重熔 AISI4140 钢厚板	334
6.8 电渣重熔超级合金	336
6.8.1 电渣重熔以钴为基的 MAR - M302、MAR - M509 和 X - 45 超合金 (叶片合金)	337
6.8.2 电渣重熔 Inconel 718 和 Inconel 901 和 A-286 合金	339
6.8.3 用电渣重熔法生产热强合金	340
6.8.4 电渣重熔固溶强化型热强合金	341
6.8.5 电渣重熔 GH34 合金	342
6.8.6 电渣重熔 V57 合金	343
6.9 电渣重熔其他金属	351
6.9.1 铝	351
6.9.2 铜	351
6.9.3 钛	352
6.9.4 铀	353
6.9.5 钼	353
6.10 电渣熔铸件的热处理及使用性能	354
6.10.1 电渣熔铸冷轧辊的热处理	354
6.10.2 电渣熔铸阶梯轴的热处理	356
6.10.3 电渣熔铸曲轴的热处理	357
6.10.4 电渣熔铸空心管的热处理	358
6.10.5 电渣熔铸机座的热处理	359
6.10.6 电渣熔铸钻头的热处理	359
参考文献	360
7 电渣冶金热传递及凝固控制	363
7.1 电渣重熔渣池及铸件热平衡	363
7.2 渣池温度场分布的计算	364
7.2.1 渣池温度的计算	364
7.2.2 用热传递方程求渣池温度场分布	365

7.2.3 通过耦合场求解重熔体系的温度场分布	367
7.3 金属熔池形状的控制	369
7.3.1 控制目标	369
7.3.2 铸锭热传递模型	370
7.3.3 模型及边值条件	370
7.4 模型求解	371
7.5 局部凝固时间 LST 计算	375
7.6 电渣重熔显微结构	377
7.6.1 弗莱明斯公式	377
7.6.2 局部凝固时间 LST 概念的应用	379
7.6.3 重熔速度 v_M 对局部凝固时间 LST 的影响	379
参考文献	381
8 电渣冶金技术的展望	383
8.1 电渣熔铸中空钢锭	383
8.1.1 多根小截面的实心电极环绕可移动的金属芯棒熔铸空心锭	385
8.1.2 使用大的实心电极移动芯棒式(或固定芯棒移动结晶器)/使用 多根小截面实心电极环绕固定芯棒式的电渣重熔	388
8.1.3 使用实心电极偏置芯棒的电渣重熔	393
8.1.4 非专用电渣炉熔炼空心锭	394
8.1.5 焊接成型法电渣熔铸空心锭	395
8.2 电渣熔铸小断面棒材	403
8.3 复杂异型件的电渣熔铸	406
8.3.1 电渣连续转注技术	407
8.3.2 复杂异型件电渣熔铸实例	408
8.4 液态金属的电渣浇注	416
8.4.1 电渣浇注的设备装置及其工艺过程	417
8.4.2 电渣浇注钢的质量	418
8.4.3 电渣浇注的工艺参数对钢质量的影响	419
8.4.4 分批电渣浇注	421
8.5 电渣离心浇铸	422
8.5.1 电渣离心浇铸的工作原理	423
8.5.2 电渣离心浇铸的工艺特点	423
8.5.3 离心浇铸的动态效应	425
8.6 电渣热封顶	426

8.6.1 电渣热封顶原理	427
8.6.2 电渣热封顶设备	427
8.6.3 电渣热封顶的冶金效果	428
8.7 电渣焊接钢锭	429
8.8 自耗模电渣重熔	431
8.9 真空电渣重熔与高压电渣重熔	433
8.10 快速电渣重熔 (ESRR)	436
8.10.1 快速电渣重熔工艺原则	436
8.10.2 快速电渣重熔设备及工艺	436
8.10.3 快速电渣重熔效果	437
8.11 电渣复合技术	438
8.12 洁净钢形核铸造技术	439
8.12.1 洁净钢形核铸造设备及特点	439
8.12.2 应用 CMNC 技术生产燃气轮机涡轮盘	440
8.13 旋转电极电渣重熔技术	441
8.14 电弧渣重熔技术	442
8.14.1 电弧渣重熔设备及特点	442
8.14.2 电弧渣重熔效果	443
8.15 进一步提高电渣熔铸产品质量的可能途径	444
8.15.1 稀土元素在电渣熔铸中的应用	444
8.15.2 电磁搅拌与超声波处理	445
8.15.3 “气—粉”吹炼及变性处理	449
参考文献	451

1 电渣冶金概述

当前正处于 21 世纪初期,在这划时代的时刻,由于高新技术进入产业,引发了“第三次产业革命”和“第四次科技浪潮”,出现了一系列令人瞩目的新动向。现代尖端技术迅速转化为社会生产力:核动力、宇航、电脑机器人、生命科学基因工程、海洋开发、超导、激光等技术的发展,提出对新型功能材料与新型结构材料的一系列要求。传统工业沿着生产高效率、流程紧凑化发展。高效率首当其冲是设备大型化,例如涡轮发电机单机容量迅速增长、100 万 kW 发电机已正常运转、5000 m³ 以上高炉定型投产。采用新型材料及毛坯质量优化是高新技术应用与设备高效大型化的保证,在本世纪初欧盟先进材料计划 EURAM 的 84 个重点中新金属材料科研费最高,占 45%;而在贸易市场上新型钢制品仍占 47%。所谓金属材料工业是“夕阳工业”,真可谓是“杞人忧天”!

1.1 电渣冶金在国际上的发展

20 世纪特种冶金三大突破是真空冶金、等离子冶金及电渣冶金。电渣冶金在世界上获得工业应用是 20 世纪 60 年代的事。

发达国家的研究人员论述电渣发展史往往追溯到美国霍普金斯(R. K. Hopkins)于 1940 年获得的“凯洛电铸锭”专利(美国专利 No.2191470)^[1],但由于独家封闭性生产,技术上若干问题未能解决,例如因管状电极包装合金掉块引起铸锭成分不均等而未获推广。霍普金斯作为 Kellogg 公司技术负责人,长期垄断这一技术,用于高速钢(M2, T1)和高温合金(Fe-16Cr-25Ni-6Mo)的小量生产。1959 年霍普金斯作为 Firth-Sterling 公司副总经理,新建三台 3.6 t 电渣炉,变直接冶炼为重熔精炼,电渣炉依旧沿用直流电源,铸锭接负极,霍普金斯及其同事仍误认为重熔过程是“埋弧放电”,而不是电渣过程^[2]!

1953 年苏联 Г. З. Вопошкевич 在电弧焊焊纵缝过程中发现电弧熄灭,其过程稳定,焊缝质量优异,由此发现了电渣焊。1953 年后经巴顿电焊研究院历时五年的开发研究,于 1958 年 5 月在梅多瓦尔(Б. И. Медовар)院士的领导下,在乌克兰扎波洛什市德聂泊尔特钢公司建成 0.5 tP909 型电渣炉 4 台^[3,4],苏联电渣冶金工业拉开了序幕!

20 世纪 50 年代由于钛合金的需要,美国真空电弧重熔生产能力扩张很快,生产能力达 15.3 万 t/a,以后,60 年代钛合金市场萧条,相当一部分真空电弧炉转为生产超级合金与优质合金钢。1959~1965 年美国和西欧电渣重熔与真空电弧

重熔之间展开了激烈的技术竞争，这场竞争持续达七年之久。1965 年西欧和美国冶金工作者做了全面的、系统的研究，其结论是电渣重熔设备简单、生产费用低廉、操作方便、铸锭表面光洁、热塑性好、成材率高（见表 1-1）。电渣重熔在纯净度方面不亚于真空电弧重熔，去硫、去除非金属夹杂物均超过真空电弧重熔，仅去气（N、H、O）不及真空电弧重熔，而在铸锭结晶方面优于真空电弧重熔，铸锭组织的致密性、化学成分均匀性还超过了真空电弧重熔，没有低倍缺陷，成品率高。法国航空材料中心用电渣重熔钢制造协和喷气式客机起落架。一些生产真空冶金设备的著名公司开始转向制造电渣炉，这些公司是：美国 Consarc 公司、联邦德国 Loybold-Heraeus 公司、英国 Birlec 公司、奥地利 Bohler 公司和日本真空株式会社。

表 1-1 英国资料对电渣重熔和真空电弧重熔的比较

比 较 指 标		真空电弧重熔	电 渣 重 熔
含 氧	普通钢	降 低	降低少些
	沸腾钢	降 低	同样降低
含 氮	溶解氮	降 低	同样降低
	化合氮	实际不变	实际不变
含 氢	普通钢	降 低	降低少些
	沸腾钢	降 低	同样降低
含 硫		很少变化	用含 CaO 基渣可大量降低，对易切削钢可保持不变
非金属夹杂物		氧化物去除，硫化物不变	可去除氧化物、硫化物
化学均匀性		因元素在真空挥发而不均匀	均匀性提高
异相性		降 低	同样降低
热塑性		高	更 高
铸锭表面		需要加工	不需加工
合格率		55%~65%	95%~100%
设备特性		直流电源，真空系统，运行可靠性差	交流电源，设备简单，运转可靠
生产费用		比电渣高 2~4 倍	低 廉

美国和西欧借助其雄厚的经济实力及技术基础，使电渣技术在国际上发展极为迅速，出现飞跃之势，其表现为：

(1) 产量呈抛物线增长：

年份	1960	1965	1969	1973	1988	2008
产量/万 t	3	29	48	80	120	200

(2) 锭重呈几何级数增长：

年份	1960	1965	1970	1988	2008
锭重/t	12	30	80	165	204

(3) 产品扩大。生产的优质钢及超级合金到 1985 年近 300 个牌号, 开始用于生产有色金属 (Al、Cu、Ti 合金) 及贵金属 (Ag 合金)。

(4) 打破专业及行业的界限。1980 年巴顿 (E. O. Паро) 电焊研究所推广了电渣熔铸异型铸件 ESC 和双极串联电渣焊 ESWB 两项新技术。中国、日本、美国、联邦德国、加拿大相继在电渣熔铸上有所突破。电渣技术从焊接领域扩大到冶金领域, 再扩大到铸造行业。

电渣钢产量继续增长, 到 1988 年达到 120 万 t, 第一代电渣炉开始更新。苏联及东欧国家电渣炉台数、生产能力及产量是严格保密的。但据发达国家的情报分析, 苏联电渣钢产量约为 40~45 万 t, 东欧国家的产量约为 4~5 万 t。到 1985 年止, 西方工业电渣炉达 204 台, 其中 38 台是 1975 年以后新建的。值得注意的是, 美国 Erie 市 National Forge 公司 92 t 电渣炉、韩国 Hundai 国际公司 92 t 电渣炉、印度 88 t 电渣炉、英国 British 钢铁公司 Scottish 分公司 50 t 三相板坯电渣炉、中国台湾省高雄台湾重型机器公司 30 t 电渣炉、前苏联 VIII-107 型多流电渣炉及电渣熔铸专用电渣炉 VIII-106 先后投产。

这一阶段随着重熔锭型的扩大、电渣熔铸管件及异型铸件的出现, 对金属质量要求日益严格, 要求对过程进行严格控制, 开始用计算机控制电渣炉作业。要进行控制必须有模型, 研究电渣重熔过程的理论模型应运而生, 包括: 热传递模型、物质传递模型 (热力学模型、薄膜及渗透理论为基础的新传质模型) 和热塑性模型。

A.Mittchell 和 F. S. Suarcz 等人成功地把热传递模型与现代凝固理论结合起来, 用热传递模型求得温度场, 预测铸锭显微结构。计算机实际应用于电渣重熔以实现熔速、渣池电阻、电压波动闭环的控制。

这一阶段一些生产超级合金的公司继续扩大生产能力, 一批电渣炉相继建成并投产。如美国 Teledyne Allvac 公司建立 23 t 电渣炉, Inco 合金国际公司两台电渣炉于 1986 年投产生产 Ni 基合金、Co 基合金及其他耐热合金板锭及圆锭, 锭重 18 t, 1992 年 Consarc 公司制造 100 t 电渣炉在日本钢厂投产。

从美国电渣冶金生产的品种看超级合金所占比重最大, 电渣重熔钢产量也有 32 万 t 之多。具体为: 碳钢及低合金钢 22%; 工具钢及模具钢 27%; 不锈钢及耐热钢 20%; 镍基及钴基超级合金 31%。各厂产品结构相对稳定。

西欧与美国致力于电渣热封顶 B·E·S·T 法及电渣自熔模 MIKW 法生产大钢锭。乌克兰巴顿电焊研究所应用双极串联电渣焊, 铸焊结合生产大毛坯, 并研究电渣分批浇铸生产大锭。巴顿电焊研究所用电渣坩埚炉熔炼获得纯净钢水, 与离心浇铸结合形成电渣离心浇铸 CESC, 将钢水浇入耐用金属模, 形成电渣耐用模

浇铸 EPMC。

21 世纪电渣冶金正在酝酿新突破,如真空电渣与高压电渣重熔、快速电渣重熔 ESRR、电渣复合浇注、电渣浇铸空心锭及电渣浇铸铸件等将在第 8 章电渣冶金技术的展望中详述。

1.2 我国电渣冶金的起步与重大发展

1.2.1 我国电渣冶金的起步^[5]

1958 年苏联公开技术仅限于电渣焊,而电渣重熔属于保密禁区。作者为解决焊缝热裂纹问题采用低碳钢板涂上锰铁合金粉末,得到成分均匀、组织致密的焊缝,使热裂纹问题得到解决^[6],并由此受到启示,于是利用废旧的高炉风管改装成结晶器,将电渣焊机改装成电渣炉,预熔了重熔渣料,将铁合金粉涂在电极上作自耗电电极,冶炼出优质的高速钢。

1959 年作者在衡阳冶金机械厂生产了 100 kg 高速钢电渣铸锭,还采用电渣重熔回收了一批废旧高速钢刀具,成果于 1959 年 10 发表于《焊接》杂志建国 10 周年特刊^[7],这一成果受到国内冶金界关注。同期在衡阳冶金机械厂还试验成功了电渣冒口热封顶^[8]。

1959 年北京钢铁学院朱觉教授率电冶金专业师生与作者领导的冶金建筑研究院电渣实验室合作,采用电渣重熔法研制成功了航空轴承钢。

1960 年作者负责设计创建了国内第一代工业电渣炉,先后承担了重庆特钢、大冶钢厂建立电渣车间的任务,生产出无发纹钢、航空轴承钢、模具钢、工具钢、高温合金等一系列产品 1965 年被授予国家发明奖,他是发明人之一^[9]。

1.2.2 我国电渣冶金的重大发展——200 t 级电渣炉

世界各国都致力于电渣重熔生产质量大于 100 t 的大锭,最成功的是德国 Loybold-Heraeus 公司为萨尔钢厂(Searsthl GmbH)建的 FB45/165G 炉子,供电用可控硅变频电源 0~10 Hz,短网感抗 $\cos \varphi=0.98$,1971 年建成以来生产正常,炉子负荷饱满,缺点是变频设备庞大、昂贵,且元件老化快。

上海重型机械厂与北京钢铁学院合作,于 1981 年建成 200t 级三相双极串联电渣炉,如图 1-1 所示,1982 年经国家鉴定后,即为秦山 30 万 kW 核电站提供了 124 件毛坯。

炉子由 3 根立柱呈等边三角形布置,每根立柱上有可上下移动、左右旋转的支臂,其端头夹持电极,夹持双极呈串联(Bifilar)回路,重熔 6 根自耗电电极分别由 3 个 5200 kV·A 单相变压器供电,变压器二次线抽零,3 根抽零线同接引锭板,6 根 $\phi 500$ mm 的自耗电电极同插入一个 $\phi 2800$ mm 结晶器,液渣引燃,通电即可开始重熔。采用抽锭装置,可用短结晶器抽长锭,重熔过程 3 个旋转支臂可

轮流更换电极。这种电渣炉的 3 个变压器接三相电网，有利于电网平衡，双极串联可以降低回路感抗，提高设备功率因数，短网感抗 $\cos\varphi$ 为 0.87~0.96，因双极串联两极间有效电阻 R_S 增大，从而提高电效率 η_E ($\eta_E = R_S / (R_S + \Sigma r)$)，其中 Σr 为短网电阻的总和。设置两路供电电网，以防止长时间重熔断电，水路有两路水源，有深水井可控制夏天进水温度不大于 25℃，并有磁化水处理装置，有抽风排烟除尘系统及烟气净化处理设备。这无疑是一台设计精巧、功能齐备、动作灵活的电渣炉，在世界上实属罕见^[10]。多年来，上海重型机器厂已摸索出了一套成熟的工艺，在工艺上的创新如下：

(1) 低氢控制^[11]。200 t 电渣炉熔炼中空气与熔渣界面面积达 5 m²，上海地区空气湿度偏高（最高达每立方米 30gH₂O），要防止重熔过程中钢液吸氢。采取的有效措施为：自耗电极冶炼用 RH 炉精炼，Al₂O₃ 粉焙烧去 Al(OH)₃，结晶器热水启动，用石墨电极在结晶器内造渣，通干燥空气保护，渣中适度加入 SiO₂，降低 (O²⁻) 的活度等。

(2) 凝固控制^[12]。熔炼开始时增大功率，熔速高达 5 t/h，加强冷却，重熔过程熔速递减，保持熔池深度不大于铸锭直径的 1/2，铸锭中心二次枝晶仅 2 mm，超声探伤 ϕ 1.1 m，未发现缺陷。

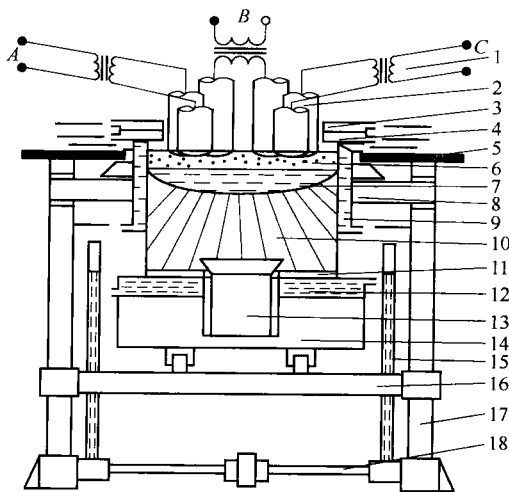


图 1-1 200t 电渣炉重熔示意图

- 1—变压器；2—自耗电极；3—排气装置；4—保护罩；5—工作台；6—渣池；7—金属熔池；
8—支撑架；9—结晶器；10—电渣锭；11—引锭板；12—水冷底板；13—钳把；14—平车；
15—丝杆；16—支撑台；17—立柱；18—传动装置

(3) 低铝控制^[13]。汽轮机转子要求含 Al 不大于 0.01%。电渣重熔过程中渣-钢界面铝的浓度梯度大，易增铝，上海重型机械厂采用 60CaF₂-20CaO-20Al₂O₃ 渣，通过渣成分调整，渣氧化性适度，选择脱氧剂及采用相应脱氧技术并控制自

耗电极残铝量，使生产的 300MW 和 600MW 转子钢重熔锭的铝含量在 0.005%~0.007%之间。

采用了上述技术，1989 年试制 600MW 核电站模拟件，材料的均匀性与纯净度极高，碳含量变化为±0.01%，氧含量为 0.001%，硫含量为 0.0005%，氢含量小于 0.0001%，达到国际先进水平。上海重型机器厂电渣钢与国外电炉真空铸锭钢性能比较见表 1-2。

表 1-2 200 t 电渣钢与国外电弧炉真空铸锭钢性能比较

类 别		标 准 要 求	我国 200 t 级电渣炉钢	国外电炉钢（真空浇注）
σ_b /MPa	20℃		581.7, 565.0	601.4
	350℃	≥549	567.0, 559.2	542.5
σ_s /MPa	20℃		470.9, 462.0	450.3
	350℃	≥343	412.9, 412.0	383.6
δ /%	20℃	≥18	25.3, 27.5	25.3
ψ /%	20℃	≥50	73.0, 78.2	71.9
a_k /kg·m·cm ⁻²	20℃	≥8.2	37.2, 35.2, 35.2	
	-10℃	≥5.2	28.2, 25.4, 33.6	15.8, 16.2, 15.4
	-20℃		24.7, 27.8, 37.2	
	-30℃		28.2, 25.2, 19.9	
NDT/℃		-10	-40	-20

1.2.3 电渣熔铸

1969 年 9 月在美国匹兹堡召开的第二届国际会议上，苏联巴顿电焊研究所及美国卡内基-梅隆研究所首次发布电渣熔铸消息，并展示照片，令人炫目。

我国冶金工作者从电渣重熔金属的组织致密、成分及结构均匀和铸锭表面光洁方面受到启示，早在 1966 年就对铸态电渣锭进行热处理与性能测试，得到了肯定的结论。1967 年就掌握了电渣熔铸变断面铸件工艺，解决了如输入功率随断面变化及金属铸件收缩引起铸件与底板分离等问题。1968 年开始熔铸炮管及潜望镜管，1969 年在美国和苏联炫耀技术的时候，我国钢铁研究总院与大冶钢厂合作熔铸的 122 榴弹炮管已在靶场试炮，潜望镜已装艇使用，为此，该技术在 1978 年全国科技大会上获奖。

电渣熔铸产品不胜枚举，现以航空发动机涡轮盘为例^[14,15]。涡轮盘是喷气式发动机的核心，因在高温、高速、高负荷和气流冲击的恶劣条件下工作，对材质与性能的要求十分苛刻。前苏联生产的涡喷八发动机涡轮盘是用 3200 t 水压机锻压而成，锻压设备庞大、金属消耗大、生产周期长、成本昂贵，而且锻造盘往往出现点状偏析和局部未锻造等缺陷。为了克服这些缺陷，特别是从当