

傅杰 等编著

创新无限 保持领先

傅杰文选（2009-2012年）

CHUANGXIN WUXIAN BAOCHI LINGXIAN
FUJIE WENXUAN (2009-2012 NIAN)

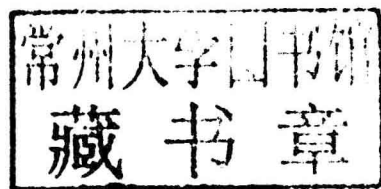


冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

创新无限 保持领先

——傅杰文选（2009—2012 年）

傅 杰 等编著



北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书为北京科技大学傅杰教授 2009—2012 年的文选, 收录了傅杰教授及其部分学生的文章以及相关图书、报刊介绍、采访傅杰教授的文章共 30 余篇。本书主要分为特种熔炼、现代电炉炼钢、新一代钢铁材料的重大基础研究、钢铁强国之路与科技创新机制五个方面, 反映了傅杰教授近年来在钢铁冶金领域的认识与思考成果。

本书可供冶金领域科研、教学、生产、管理等相关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

创新无限 保持领先: 傅杰文选. 2009 ~ 2012 年/傅杰等编著.
—北京: 冶金工业出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5024-5976-5

I. ①创… II. ①傅… III. ①钢铁冶金—文集 IV. ①TF4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 104582 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 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 曾 媛 刘小峰 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5976-5

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销
2012 年 6 月第 1 版, 2012 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 24 印张; 4 彩页; 476 千字; 373 页

75.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前言

半个世纪以来，我一直战斗在钢铁冶金材料的第一线，涉及特种熔炼（包括电渣冶金、真空冶金、高温合金中微量元素的控制与作用）、现代电炉炼钢和新一代钢铁材料的重大基础研究等领域。

我有幸师从北京钢铁学院（现北京科技大学）朱觉教授，长年跟随他赴现场，在他的言传身教下，我学到了一些他的长处，继承了一些他的学风，在特种熔炼和现代电炉炼钢方面有所建树。

朱觉教授是我国著名的钢铁冶金专家和教育家，是我国电渣冶金的奠基人和电冶金教育的开拓者。他毕生致力于电炉炼钢、铁合金冶炼和电渣冶金的科研与教学。他深入实践，入深水以缚蛟龙，硕果累累，为我国冶金事业做出了卓越贡献。

柯俊院士是国际著名的金属物理、材料学科学家和杰出的教育家。20世纪60年代初，在我当研究生时，听他讲授了实验技术和科研方法的课程，我研究生毕生后留在北京钢铁学院材料系高温合金教研室工作，经常有机会向他请教一些问题。柯先生1980年为我们修改了第四届国际高温合金会议邀请报告的英文稿“Recent advances in understanding ESR metallurgy of superalloy”，这是我国在国际上发表的第一篇有关电渣冶金的文章。1995年至今，承蒙他选择我参加了他的多学科结合团队，进行微合金钢的强韧化研究，后转为新一代钢铁材料的重大基础研究以后，我和他接触较多。柯先生学风严谨、平易近人、心态年轻、谈吐诙谐、创新思想一直非常活跃，90高龄还亲自为我修改论文和专著并作序，鼓励我们争取做工程师级的教授，指导我们在珠钢和新一代钢铁材料的重大基础研究中，在前人工作的基础上有所创新，使新一代钢铁材料的重大基础研究成为了我近期的一个主要研究领域。

前辈的培养和影响是我在特种熔炼、现代电炉炼钢和新一代钢铁材料的重大基础研究（钢中纳米铁碳析出物及钢的综合强化机理）等



三个学术领域中有所成就的一个重要原因。

自身方面,在我的学术生涯中,通过实践,我深深地认识到:人应该有理想、有抱负、有创新精神,力争创新无限、保持领先。理想抱负是一个人能经受起挫折、委屈、失败,战胜困难的动力。追求理想,一方面要学习继承现有的反映客观事物的理论;另一方面又不能一味的迷信书本,盲目的迷信权威,要敢于做前人没有做过的事,坚持实践,以求对事物认识的不断深入和完善。

在实践中,20世纪60年代初,作为一个研究生我参加了以朱觉教授为首的北京钢丝厂、学校、研究院所三结合的铁铬铝攻关组,这是我最早的“产学研”三结合实践。我体会到企业要以生产为主,融生产、科研及培养人才为一体,学校要以培养人才为主,把教学、科研、生产结合起来,取长补短,分别发挥各自的优势,并把三者的优势集中起来。

20世纪70年代末至90年代中,我工作的高温合金教研室组成了以陈国良、谢锡善、傅杰为首的GH132烟气轮机涡轮盘课题组,通过多学科结合,学校与科研院所(石油科学研究院)、生产厂家(上海五厂、抚顺钢厂)和用户(兰州炼油厂、抚顺炼油厂)不同行业合作、联合攻关,开发了AAM+VAR及VIM+ESR新的冶炼工艺路线,取代原AAM+ESR冶炼工艺路线,生产了无中温低塑性区的高品质GH132合金,成功地制备了大型GH132烟气轮机涡轮盘,取得了显著的节能减排效果和经济效益。

20世纪90年代末、21世纪初,在珠钢,我的科研团队继续坚持“产学研用”结合,再创了辉煌。

基于此,当我在京的部分学生提出要在北京给我过一次75岁生日的时候,我欣然地同意了这次聚会,并准备出版一本2009—2012年文选。我觉得过生日本身不是主要的,而是希望通过这一次活动,加强联系,增进友谊和沟通,这有利于培养学生的科学发展观,激励学生的爱国热情与创新精神,培养学生包容、厚德的思想品质,更好地为国效力!



经过大家的努力，准备工作正在顺利地进行，文选的初稿也出来了，从书稿的内容看，我深深地体会到：弟子不必不如师，师不必贤于弟子。学生们在政府、不同类型的企业、高等学校、研究院所等各条战线上，八仙过海，各显神通，取得了显著的成绩，在我所从事的领域中，青出于蓝胜于蓝，学生们写的文章超过了老师。了解到未能参与这次活动的一些弟子也都在积极地为国工作，做出了重要贡献，作为他们的老师我感到十分的快慰！

希望通过这次活动，能够使大家进一步领会《国家“十二五”科学和技术发展规划》的精神，体会到为什么中央要提出“加快建立和完善社会主义市场经济条件下，‘政产学研用’相结合的新型举国体制”这一具有中国特色的科技创新体制。

今天是青年节，我不禁回忆起塞缪尔·乌尔曼在他那著名的《年轻》一文中写的：

“没有人仅仅因为时光的流逝而变得衰老，只是随着理想的毁灭，人类才出现了老人。”

“在你我心灵的深处，有一个无线电台，只要它从无限的时间中接收美好、希望、欢欣、勇气和力量的信息，你我就永远年轻。如果这无线电台，始终耸立在你心中，捕捉着每个乐观向上的电波，你便有希望超过年轻的90岁。”

愿大家永远年轻！

衷心感谢参与和支持这次活动的同志和朋友们，特别是将在科技部主管的《中国新技术新产品》2012年6月份出版一期专刊的《中国新技术新产品》杂志社的同志们。

再次谢谢大家！

傅 杰

2012年5月4日

目 录

特 种 熔 炼

第一代和第二代电渣冶金技术的发展	3
第二代大型电渣冶金技术的发展	15
第一代电渣重熔装备技术的发展	22
第一代电渣冶金理论成果	24
第二代电渣重熔装备技术的发展	26
大型电渣重熔技术在我国的发展	28
液态金属的电渣冶炼与浇注	31
关于“400t 电渣炉及其工艺技术研究”科技重大专项的建议	33
关于“液态金属水平电渣浇注 100t 电渣锭”的技术开发概要	36
第二代电渣重熔的基础理论问题	38
第二代液态电渣冶金技术的发展	60
液态金属电渣冶金技术工业化 50 周年	76
特种熔炼工艺的最新进展	88

现代电炉炼钢

现代电炉炼钢冶炼周期的综合控制理论与应用	111
The Development of Hot Metal Charging process in China	127
Optimisation of Modern EAF Process Focused on its Economic Benefit	140
Kinetic Model of Decarburization and Denitrogenation in VOD Process for Ferritic Stainless Steel	150
我国特殊钢发展模式探讨	165
发展现代电炉炼钢 促进我国钢铁工业可持续发展	178
发展现代电炉炼钢 助力中国钢铁产业重新振兴 ——访北京科技大学教授傅杰	186
大型超高功率电炉炼钢工艺及装备研发 ——中国中冶“三五”期间“钢铁冶金”领域专项 5 项目建议书	190



新一代钢铁材料的重大基础研究

基于纳米铁碳析出物的钢综合强化机理	197
Nanoscale Cementite Precipitates and Comprehensive Strengthening	
Mechanism of Steel	217
钢中纳米析出物的控制及钢的综合强化机理	
——国家自然科学基金重点项目建议书	248
关于“钢中纳米碳化物析出控制及钢的综合强化机理(E0416)”	
项目申报书撰写要点的建议	259
钢中的纳米铁碳析出物及其强韧化作用	
——纳米技术在冶金行业中的应用探讨	261

钢铁强国之路

钢铁强国之路	279
学习十七届五中全会精神 切实做好钢铁产业的结构调整	289
关于在我国建设“新一代钢铁冶金材料国家重点实验室”的建议	298
新一代控轧控冷低成本高强度钢(NG-TMCP High Strength	
Low Cost Steel)基础研究	
——“十二五”“973”立项建议书	303
关于建设“电炉小方坯连铸连轧高强钢筋示范工程”的建议	307
低成本高强度钢筋研究	312

科技创新机制

电炉 CSP 工艺基础研究与技术创新	325
坚持产学研用结合 发展高强集装箱板	342
学习国家“十二五”科技发展规划和钢铁工业“十二五”	
发展规划的点滴体会	350
坚持产学研用结合 促进高科技产业化和低碳经济发展	358
坚持政产学研用相结合 促进新技术新产品发展	
——群策群力 奋战“十二五”	364
加快建立和完善中国特色的科技创新机制	372



特种熔炼



第一代和第二代电渣冶金技术的发展

傅 杰

(北京科技大学)

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)

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.

Keywords: secondary electro-slag metallurgical technology; heavy electro-slag remelting ingot; inert gas atmosphere; quick cooling; orientation for development

原文发表于《特殊钢》2010, 31(1): 18~23。类似内容参见: 第二代电渣冶金技术与重大装备制造, 材料与冶金学报, 2011, 10(51): 8~13。



现代钢及合金生产流程包括高炉—转炉流程、电弧炉流程和特种熔炼。2008年世界钢产量为13.297亿吨,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注两大分支。

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注包括:

(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) 水平电渣浇注;

(5) 电渣离心浇注;

(6) 感应电渣冶炼;

(7) 感应电渣离心浇注;

(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注(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。

苏联 1981 年出版的《电渣金属》封面上所示的四通道活动模 150mm 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注的原理如图 1 所示^[3]。

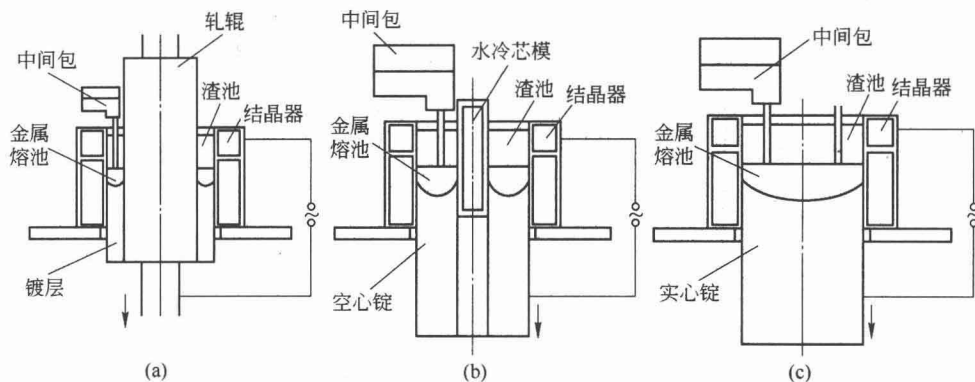


图 1 第二代液态金属电渣浇注技术示意图

Fig. 1 Scheme of secondary generation liquid metal electro-slag casting technology

- (a) 浇注复合轧辊；(b) 浇注空心锭；(c) 浇注实心锭
(a) casting clad roller; (b) hollow ingot; (c) solid ingot

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注时，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) 电渣浇注时，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。笔者了解的重要国际电渣冶金会议的有关情况列于表1。

表1 历次重要的国际电渣冶金会议

Table 1 All previous major international conference on electro-slag 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他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 (6th 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 (7th 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, 中国傅杰
8	第八届国际真空冶金会议 (8th 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 (9th 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 (10th 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 (11th 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

第一到第三届国际电渣冶金会议, 主要是美国梅隆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，特种熔炼委员会中有中国、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”

笔者认为可以将电渣冶金的发展分为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（见表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。初始发展期中的电渣重熔技术孕育着成熟期的电渣重熔技术。第一代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 年梅多瓦尔纪念会	2001 年梅多瓦尔纪念会至今

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 40mm 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一台 150kg 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地实现了工业化^[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。像真空电弧重熔一样,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,苏联曾试图发展200t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注生产大型锭的道路。

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Leybold-Heraeus开发了容量为165t、4电极电渣炉,生产直径为2300mm重80t的电渣重熔锭;20世纪70年代以后康萨克公司制造并出口的100t电渣重熔炉,业绩不详;西德萨尔钢厂创建的165t电渣炉一直生产正常,目前正在扩建。

1961年底,笔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一台100t电渣炉。1965年6月29日重熔出55t电渣锭,1965年9月27日重熔出第一根100t电渣锭,1965年共生产了4根100t电渣锭。

100t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2300mm冷轧机支承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一台200t电渣炉,可生产240~300t重电渣锭,热加工成200~250t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地产出了200t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200t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200t电渣炉的特邀报告。作为200t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 200t 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)含量不高于 2×10^{-6} 的低氢控制技术;(4)含量不高于 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笔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,笔者发表了《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