

特种熔炼与 冶金质量 控制

傅杰 著

Special
Melting and
Metallurgical
Quality Control

冶金工业出版社

特种熔炼与冶金质量控制

傅 杰 著

北 京

冶金工业出版社

1999

内 容 提 要

特种熔炼是随着对材料性能要求的不断提高而发展起来的,用于普通熔炼方法不能或难以熔炼的特殊金属材料的制备。特种熔炼金属材料主要包括难熔金属、活泼金属、高纯金属、近终形铸件或熔铸件以及其他优质合金钢及合金。特种熔炼为优质合金钢及超级合金提供了高质量的铸坯和铸锭,是优质合金钢及超级合金生产和研究开发的一个重要前提条件。本书共分4部分,分别地阐述了特种熔炼的现状与发展、电渣冶金、真空熔炼、高温合金及合金钢中微量元素的作用与控制等内容。其中,大部分文章均涉及到冶金质量控制(成分控制、纯洁度控制及铸态组织控制等问题)。

本书可供从事特种熔炼及金属材料研制的有关人员及大专院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种熔炼与冶金质量控制/傅杰著. - 北京:冶金工业出版社,1999.1
ISBN 7-5024-2287-0

I. 特… II. 傅… III. 熔炼,特种-质量控制 IV. TF111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 30718 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 刘小峰 美术编辑 王耀忠 责任校对 刘 倩

北京新兴胶印厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999年1月第1版,1999年1月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 16.875印张; 451千字; 517页; 1-1000册

45.00元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

特种熔炼,主要包括真空熔炼与电渣冶金,是特殊金属材料制备的主要手段,其产量在整个钢产量中只占很小比重,但对国民经济、国防建设及科学技术的发展具有重要的作用。

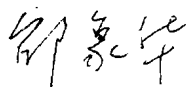
中国紧随前苏联,于1960年开始实现电渣冶金工业化。在电渣冶金技术上,中国与国际先进水平相比,差距不很大,有些方面还有所领先。中国的真空熔炼基本上是和电渣重熔同步发展起来的,多年来我国的冶金工作者在生产实践上和学术上也有不少贡献。

本书作者傅杰教授是我国最早从事特种熔炼领域研究开发的工作者之一。自走上工作岗位以来的近40年中,他在电渣冶金新方法、新工艺的研制、设备的设计、电渣技术的推广、电渣重熔过程冶金特征及金属提纯机理研究等方面做了大量工作的,其中有许多是具有创新性的。随着现代冶金与材料科学的发展,冶金因素对材料组织及性能的影响日益突出。傅杰教授对金属材料的冶金质量控制,包括成分控制(特别是微量元素控制)、纯洁度控制及铸态组织控制进行了较系统深入的研究,在高温合金工艺、真空熔炼过程、微量元素的控制与作用等方面都有新颖的成果。傅杰教授的工作对特种熔炼技术,特别是电渣冶金技术在我国的发展和成长,对我国高温合金工艺的改进,对我国国民经济建设和国防建设的发展以及专业人才的培养做出了重要贡献,在国际同行中也得

到承认,并多次获得奖励。

作者将其在国内外不同年代,不同学术刊物上发表的代表性论文分成四个部分,汇集成本书出版,我觉得很有意义。这些论文有重要的参考价值,集中一册,便于系统查阅,相信它将受到冶金和材料专业及各有关人员的欢迎,对我国特种熔炼和材料制备技术的进步和发展有所促进。

特为序。

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: 邵, 象, and 华, written in a cursive style.

1998年11月4日

前 言

金属材料在现代工农业生产、能源、交通、信息工程、建筑、国防和其他科学技术部门中均有着广泛的应用。尽管面临高分子材料和硅酸盐材料激烈的竞争,金属材料仍在发展,而且占有很大市场。钢在金属材料的用量中约占 85%。1997 年,世界钢产量为 73027.3 万 t,中国达 10034.4 万 t,成为世界第一产钢大国。

钢可分为普通钢和特殊钢两大类。特殊钢包括优质合金钢及合金(合金可以不以铁为基)。

随着本世纪 60 年代以来连铸技术及炉外精炼技术的发展,钢的制备技术发生了根本的变化。现代钢生产流程主要有:

电炉流程:电炉冶炼—炉外精炼—连铸^{热送热装}——轧制;

转炉流程:高炉冶炼—铁水预处理—转炉冶炼—炉外精炼—
连铸^{热送热装}——轧制;

特种熔炼:特种熔炼(真空感应熔炼、冷坩埚熔炼、电渣重熔、真空电弧重熔、电子束重熔、等离子熔炼等)—锻造或轧制。

特种熔炼用于那些用普通熔炼方法不能或难以熔炼的特殊金属材料的制备。特种熔炼金属材料主要包括难熔金属、活泼金属、高纯金属、近终形铸件或熔铸件以及其他优质合金钢及合金。特种熔炼产品的产量在整个钢产量中只占很小的比例,但由于其特殊性能,对国民经济及科学技术发展仍占有重要的地位。

目前,常用的特种熔炼方法主要是电渣冶金与真空熔炼。电渣冶金包括电渣重熔、电渣熔铸、电渣自熔模、电渣转铸、电渣浇

铸、有衬电渣熔炼、电渣离心浇铸、感应电渣离心浇铸、电渣热封顶及电渣钢包或中间罐加热等；真空熔炼主要包括真空感应熔炼、冷坩埚熔炼、真空电弧重熔、真空电弧双电极重熔、凝壳炉熔炼及电子束重熔等。

现代电渣冶金技术是由乌克兰巴顿电焊研究院从 1954 年开始率先发展起来的。1958 年，苏联第聂伯尔特钢厂建成了世界上第一台以重熔大断面自耗电极为特征、容量为 500kg 的 P909 型工业电渣炉。

我国的冶金工作者于 1958 年在电渣焊的基础上开始开发电渣重熔技术。1959 年在衡阳冶金机械厂熔炼出高速钢，在北京钢铁学院的电渣重熔设备上开展了电渣重熔航空滚珠钢的研究。1960 年 5 月在北京钢铁学院建成了我国第一台具有生产规模的电渣重熔炉，生产了重 150kg 的航空滚珠钢锭；同月，冶金部在北京钢铁学院召开了全国电渣重熔技术推广现场会；之后，冶金部建筑研究院和北京钢铁学院的冶金工作者分别在重庆特钢、大冶钢厂及大连钢厂、上钢五厂推广电渣重熔技术，帮助工厂建立电渣重熔车间；1960 年 8 月底，重庆特殊钢厂建成了世界上第一台双臂交替抽锭式 0.5t 电渣炉。1961 年由冶金部主持在重庆召开了第一届全国电渣炉会议。从此，中国的电渣重熔技术走上了工业化道路。目前，国内所有的特殊钢厂都建立了电渣重熔车间。不少机械厂也建立了电渣重熔设备，小型电渣炉遍及全国。电渣钢年生产能力超过 10 万 t，在世界上名列前茅。

在冶金技术上，总体说来，我国和世界先进水平相比有较大差距，但在电渣冶金技术领域内，这一差距并不很大，在有的方面，我国在世界上还处于领先地位，其中主要包括：

(1) 中国建成了世界上最大的 200t 级电渣重熔炉，生产出了大批优质大型锻锭。

(2) 单相双臂交替抽锭式电渣重熔炉、单相单极、单相双极串联及三相有衬电渣炉、结晶器旋转式电渣炉、感应电渣熔炼和感应电渣离心浇铸技术是中国发明的。

(3)在电渣熔铸方面,中国和前苏联几乎同时起步,取得了丰硕成果,电渣熔铸航空发动机涡轮盘,经过地面台架试车及 800h 试飞,在世界航空史上写下了光辉的一页。

(4)在电渣冶金理论上,中国冶金工作者首次指出电渣重熔过程中非金属夹杂物的去除主要发生在自耗电极端部熔滴形成阶段,是通过熔渣对熔化液层渣钢界面上夹杂物的吸附完成的,自耗电极中原始夹杂物可基本去除,重熔钢中的夹杂物主要是金属熔池冷却结晶过程中新生成的,防止氧化和控制凝固是提高电渣钢夹杂物纯洁度的主要途径;首先发现和用实验证明了电渣重熔过程中渣池内存在周期性的电弧放电现象及渣钢界面具有电毛细振动现象;实验测定了电渣重熔过程中渣池内温度分布的不均匀性,研究了渣池内温度分布对重熔钢冶金质量的影响;与国外冶金工作者合作建立了电渣重熔过程成分控制的数学模型,成功地应用于电渣重熔锭中硅、锰、钛的控制。

(5)在电渣重熔工艺方面,关于高温合金电渣重熔过程钛、铝、镁等活泼元素的控制、低氟渣系、工艺参数优化、大型锭重熔工艺球铁电渣重熔和电化学改性等均有独到之处和创新成果。

真空熔炼属于真空冶金的一个分支。真空熔炼的发展,我国始于 50 年代,60 年代从国外引进了一批真空熔炼设备,在一些重点特殊钢厂建成了工业性真空感应炉、真空电弧重熔炉及电子束炉。但是,正和前苏联一样,中国的真空熔炼是和电渣重熔同时发展起来的,电渣重熔所显示出来的优势使真空熔炼技术的发展受到了一定的影响。我国在真空熔炼技术装备水平上,与美国、日本、德国等相比较,差距较大,特别是近年来,这一差距就变得更大了。尽管如此,我国冶金工作者,在真空冶金的理论与实践上也还是做了一些有价值的工作,这里值得指出的有:1964 年邵象华院士发表的专著《真空冶金过程的物理化学》;1988 年出版的由戴永年、赵忠编著的《真空冶金》;作者及其合作者和研究生们多年来所进行的有关真空感应熔炼过程、真空电弧重熔过程和真空电弧双电极重熔过程中元素挥发的动力学、VADER 过程中元素偏析特

征、特种熔炼过程中夹杂物的溶解析出规律、熔渣下钢液真空吹气脱氮动力学的研究等。后者对真空熔炼过程中易挥发元素的控制、VADER 发展前景、用 EB-Button 法评定夹杂物的准确性、确定陶瓷过滤器去除氮化物类型夹杂物的可能性及制定合理的过滤工艺以及制定熔渣下真空吹气脱氮的合理工艺均有指导意义。

我国冶金工作者对特种熔炼技术的贡献得到了国外同行的确认，1988 年在美国召开的第九届国际真空冶金会议上，北京钢铁学院、冶金部钢铁研究总院、上海重型机器厂等三个单位、朱觉教授等五名个人分别被美国真空学会评为 1961~1988 年对特种熔炼技术做出突出贡献的集体及个人，授予荣誉奖。

特种熔炼是随着对材料性能要求的不断提高而不断发展和完善起来的。为了使钢和合金具有所需要的性能，必须保证其具有一定的化学成分和合理的冶炼（包括铸造）、压力加工、热处理、机械加工及焊接工艺。冶炼工艺对合金钢及合金质量具有极为重要的影响。冶炼工艺是否合理，可以用冶金质量控制（包括成分控制、纯洁度控制和铸态组织控制）的好坏来判定，一种好的冶炼工艺应能得到一个好的冶金产品，一个好的冶金产品，成分（包括微量元素）应控制在最佳范围内，纯洁度要高，铸造组织要好。

近年来，发达国家正在大力开展新一代钢铁材料（超级钢）的研究开发。以超高强、高韧为性能特征的超级钢的制备，首先必须具备超高的冶金质量控制水平，即要掌握有关微合金化、微量元素控制、超净化液态金属的冶炼、均质化等轴细晶锭及连铸坯制备等技术。其中，均质化等轴细晶锭及连铸坯的制备是使钢具备均质化超微细组织的前提。

本书所选入的大部分文章均涉及到冶金质量控制问题，例如，电渣重熔过程中活泼元素 Ti、Al、Mg 等的烧损、不同真空熔炼过程中元素的挥发属于成分控制；夹杂物、N、O、H、Pb、Bi、Sn、As 等的控制属于纯洁度控制；细晶锭制备及电渣锭表面质量控制属于铸态组织控制。

微量元素对合金钢及合金具有重要的影响，作者及其同事和研究生们的工作表明，有的合金，如 GH220、GH698，不加镁，性能便达不到技术条件要求；GH36 合金中加入一定的 Al、Mg 可消除持久缺口敏感性；0.0002% 的 Pb 可以导致 GH132 合金产生中温低塑性区；微量的 Al、Mg 对合金钢 35CrNi3MoV 的性能具有重要的影响，等等。通常，微量元素的含量存在着一个最佳范围，如何使微量元素能控制在最佳范围内，取决于对熔炼过程的控制。

多年来，作者结合本人的工作为研究生开设了“特种熔炼与冶金质量控制”课程，在教学中，除了讲述特种熔炼及冶金质量控制的理论与实践，也给学生们介绍一些研究方法。一种新观点的形成、一个新现象的发现或一些新结果的获得，通常是与一些巧妙的试验方法的设计分不开的，例如，正是设计了在电渣重熔过程及真空电弧重熔过程和双电极电弧重熔过程中，取出渣中或真空下所形成和过渡的熔滴，并对熔滴进行逐层夹杂物及成分分析的方法，才有可能对过程中夹杂物去除机理及元素挥发特征提出一些新的观点；正是由于设计了一种专门的物理模拟方法，才发现了电渣重熔过程中渣池中的电弧放电现象及电毛细振动现象；正是由于解决了求解气相边界层传质系数的方法问题，才能对元素挥发动力学提出一些新的看法，等等。在教学过程中，作者发现学生的学习积极性很高，并希望能有一本较全面的参考书。这就使作者萌发了在 1982 年出版的《特种冶炼》一书的基础上，写一本新的有关特种熔炼的参考书（《现代特种冶金》）的愿望，冶金工业出版社也曾列入出版计划，但由于近年来作者的研究重点转到现代电弧炉冶炼及炉外精炼方面，工作较忙，该书一直未能成稿。

最近和几个特殊钢厂的工程师和专家们交谈，大家都感到我国在重视转炉及电炉钢生产发展的同时，也应重视特种熔炼技术的发展。为使我国的特种金属材料或先进材料能满足国家需要和在国际市场上有竞争能力，产品能进入国际市场，必须加强特种

熔炼的装备及工艺改造,提高产品质量;同时尽快掌握国外特种熔炼的发展动态,希望能找到一些这方面的参考资料。为此,作者选择了过去和最近发表的部分有代表性的论文(大部分论文曾被SCI、EI及METADEX-MA等著名国际权威情报刊物收录或被译成英、俄等文字发表,详见英文目录),编辑成了现在这本《特种熔炼与冶金质量控制》,希望它能对我国特种熔炼技术的发展和特种金属材料或先进材料的生产制备以及人才的培养能有所裨益。

全书共分特种熔炼的现状与发展、电渣冶金、真空熔炼、高温合金及合金钢中微量元素的作用与控制4个部分。

在进行本书文稿的选取过程中,多次回忆起我的导师朱觉教授及电渣冶金技术的创始人B. E. 巴顿院士对特种熔炼技术所做出的创造性贡献,因此,怀着深深的敬意,在本书附录中收入了《朱觉教授简介》及《B. E. 巴顿院士简介》两篇短文。为了让读者了解我国在特种熔炼技术方面所做出的突出贡献,在附录中收录了在第九届国际真空冶金会议上由国际成果确认及评奖委员会确认的1961~1998年对国际真空冶金技术做出了突出贡献的单位及个人名单以及我国被授奖的单位及个人成果简介。

本书包括我和我的老师、同事及研究生们在特种熔炼技术及冶金质量控制方面所做的一些工作,有我在三十多年前作研究生时在导师指导下所进行的一些研究工作,也有今天我的研究生们在科研工作中所取得的一些成果。我深深感到,要攀登一个科学高峰,往往需要几代人的努力,一项科研成果的取得,包含了许多人(有名的和无名的)的辛勤劳动。我衷心地感谢曾经给予我指导和关怀的老一辈科学家和老师,特别是朱觉教授、邵象华院士及柯俊院士,同时也衷心感谢曾经和我在同一个科研集体里共同进行研究工作的同事以及进行了大量试验研究工作的研究生们,正是由于他们,由于一个科研群体的力量,才能使我们的工作有所创新,有所前进。

最后,再一次衷心感谢中国科学院和中国工程院邵象华院士

对全书进行了审阅，并作序。

由于作者学识所限，书中缺点、错误在所难免，恳请读者批评、指正。

傅 杰

1998 年 11 月 20 日于北京

目 录

1 特种熔炼的现状与发展	(1)
1.1 特种熔炼	(1)
1.2 高温合金电渣重熔冶金の近期进展(英文)	(10)
1.3 中国高温合金工艺进展(英文)	(30)
1.4 中国的电渣冶金技术(英文)	(48)
1.5 真空熔炼の近期进展	(59)
1.6 特殊钢冶炼技术の近期进展	(73)
1.7 必须重视我国特种熔炼技术的发展	(84)
2 电渣冶金	(93)
2.1 电渣重熔过程中氧化物夹杂的变化	(93)
2.2 电渣重熔过程中氧化物夹杂去除机理の探讨	(111)
2.3 轴承钢电渣重熔过程中氧の控制及作用研究	(130)
2.4 电渣重熔过程中渣池内の电弧放电现象	(138)
2.5 电渣重熔过程中渣池内の温度分布	(151)
2.6 电渣重熔过程中渣池内温度分布对冶金质量の影响	(161)
2.7 高钛低铝高温合金电渣重熔过程中钛烧损の研究	(172)
2.8 铁基高温合金电渣重熔过程中镁の控制(英文)	(182)
2.9 CrNiMoV 钢电渣重熔过程中镁の控制	(192)
2.10 CrNiMoV 钢电渣重熔过程中铝の控制	(198)
2.11 用有衬电渣熔炼永久模浇铸法制备高性能近终形合金钢及	

合金铸件(英文)	(204)
2.12 电渣感应炉技术及应用(英文)	(212)
2.13 感应电渣熔炼过程及应用(英文)	(219)
2.14 感应电渣离心浇铸技术的应用	(224)
2.15 感应电渣离心浇铸件中的夹杂物	(229)
3 真空熔炼	(234)
3.1 镍基高温合金真空感应熔炼及真空电弧重熔过程中镁挥发的动力学(英文)	(234)
3.2 镍基高温合金真空电弧重熔过程中镁挥发的动力学	(244)
3.3 A-286 大断面自耗电极真空电弧重熔过程中元素的挥发行为	(255)
3.4 用 VADER 法制备 718 高温合金锭过程中镁的控制(英文)	(265)
3.5 用真空双电极电弧重熔法制备高合金钢及钛合金的组织及热加工性能研究(英文)	(277)
3.6 718 高温合金 VADER 锭的偏析行为及显微结构(英文)	(286)
3.7 镍基高温合金真空感应熔炼过程中镁挥发动力学	(296)
3.8 钢真空感应熔炼过程痕量元素挥发的动力学	(305)
3.9 真空感应熔炼过程中微量铋的挥发	(313)
3.10 金属液的脱氮	(320)
3.11 熔渣的氮容量及氮在渣气和渣钢中的分配	(328)
3.12 熔渣下钢液真空脱氮动力学	(334)
3.13 钢液真空吹气脱氮动力学(英文)	(340)
3.14 熔渣下钢液真空吹气脱氮动力学模型	(349)
3.15 高温合金特种熔炼过程中夹杂物的行为(英文)	(357)
3.16 钢及合金液中氮化钛夹杂物的溶解与析出规律	(370)
4 高温合金及合金钢中微量元素的作用与控制	(380)
4.1 高温合金中微量元素的作用与控制	(380)
4.2 GH220 合金中微量元素镁的研究	(391)
4.3 用镁微合金化的 GH169 合金	(403)

4.4	氮对 GH36 合金性能的影响	(413)
4.5	铝镁对 GH36 合金强韧化的作用	(422)
4.6	微量元素及夹杂物控制在发展一种高质量涡轮盘合金中的作用(英文)	(435)
4.7	残铝在 35CrNi3MoV 钢中的作用	(445)
4.8	镁处理 35CrNi3MoV 钢中夹杂物的改性(英文)	(453)
4.9	镁对 35CrNi3MoV 钢力学性能的影响(英文)	(463)
4.10	消除合金结构钢中白点的研究	(472)
4.11	铸锭氢含量及微量铅对 GH132 合金中温塑性的影响	(482)
4.12	轴承钢中微量元素——氧、氮、钛、钙的作用与控制	(494)
附录 1	朱觉教授简介	(504)
附录 2	B.E.巴顿院士简介.....	(507)
附录 3	在 9th ICVM 上公布的由国际成果确认及评奖委员会确认的被评为1961~1988年对国际真空冶金技术做出了突出贡献的单位及个人名单(英文)	(509)
附录 4	由国际成果确认及评奖委员会确认的我国被评为1961~1988年对特种熔炼技术做出突出贡献的单位及个人简介(英文)	(512)

Special Melting and Metallurgical Quality Control

Contents

1	Present State and Developments of Special Melting	(1)
1.1	Special Melting(《Chinese Metallurgical Encyclopedia, The Branch Volume of Special Melting》, to be published)	(1)
1.2	Recent Advances in Understanding ESR Metallurgy of Superalloys (Invited Paper, Superalloys 1980)	(10)
1.3	Advances in Superalloy Technology of China (Invited Presentation of 10th International Vacuum Congress,《Journal of Vacuum Science and Technology A》;SCI 08211395)	(30)
1.4	ESR Technology in China (《Steel Technology International》, special invited article;《Problem of Special Electrometallurgy》 in Russian; MA 193306-51-0821)	(48)
1.5	Recent Advances in Vacuum Melting(《Vaccum》;《Current Bibliography on Science and Technology》in Japanese; G97081474)	(59)
1.6	Recent Advances in Special Steel Melting Technology (《Journal of Iron and Steel Research》)	(73)
1.7	Great Attention Should Be Paid to the Development of Special Melting Technology in China (《Journal of Iron and Steel Research》)	(84)
2	Electroslag Metallurgy	(93)
2.1	Change of Oxide Inclusions during ESR process (《Acta Metallurgica Sinica》)	(93)
2.2	An Investigation of Mechanism on the Removal of Oxide Inclusions during ESR Process (《Acta Metallurgica Sinica》; MA 80-440221)	(111)

- 2.3 Oxygen Control and Its Behavior during Electroslag Remelting of Bearing Steel (《Iron and Steel》) (130)
- 2.4 Arc Discharge Phenomena in the Molten Slag Pool during ESR Process(《Acta Metallurgica Sinica》) (138)
- 2.5 Temperature Distribution round the Molten Slag Pool in the Process of Eletroslag Remelting (《Acta Metallurgica Sinica》;EI 80-054060) (151)
- 2.6 Effect of Temperature Distribution round the Molten Slag Pool in the Process of ESR on the Metallurgical Quality (《Acta Metallurgica Sinica》;EI 83-094861) (161)
- 2.7 A Study on the Titanium Loss during Electroslag Remelting High Titanium and Low Aluminum Content Superalloy(《Acta Metallurgica Sinica》;EI 83-100074) (172)
- 2.8 Control of Magnesium during the ESR Process of An Iron Base High Temperature Alloy (《Proc.of 8th ICVM》; MA 460066) (182)
- 2.9 Magnesium Control Content in CrNiMoV Steel during the ESR Process (《Journal of University of Science and Technology Beijing》; MA 199303-51-0457) (192)
- 2.10 Aluminum Control Content in CrNiMoV Steel during the ESR Process (《Journal of University of Science and Technology Beijing》; EI 1998) (198)
- 2.11 Manufacture of High Performance Near Net Shaped Components of Alloy Metals by Electroslag Crucible Melting and Permanent Mold Casting Processes (《Proc.of 9th ICVM》; MA 90-510658) (204)
- 2.12 The Technology and Application of Electroslag Induction Furnace (《Proc.of 1st Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing》; MA 199307-42-0814) (212)
- 2.13 The Electroslag Induction Melting Process and Its Applications (《Proc.of 11th ICVM》;ISTP BY75MV) (219)
- 2.14 Application of Centrifugal Electroslag Induction Casting Techn-