

钛_{Ti} 钼_{Mo} 钽_{Ta} 铪_{Hf}
铌_{Nb} 钨_W 镍_{Ni} 锆_{Zr}

稀有金属真空熔铸技术 及其设备设计

毅 马 琨 著

 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

稀有金属真空熔铸技术 及其设备设计

马开道 鲁毅 马琨 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 简 介

本书系统地阐述了钛及钛合金真空熔炼、铸造的基本工艺技术和难熔金属熔炼、烧结工艺技术及其所用各种真空熔铸设备的设计计算。在内容上综合了国际、国内的最新钛熔炼、铸造设备研究和发展成果,既注重成熟理论及生产技术的介绍,也注重本领域的新技术、新设备发展动向的归纳。

本书可供冶金工程技术人员、科研人员及大中专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀有金属真空熔铸技术及其设备设计/马开道,鲁毅,马琨著.
—北京:冶金工业出版社,2011.3
ISBN 978-7-5024-5453-1

I. ①稀… II. ①马… ②鲁… ③马… III. ①稀有金属—
熔铸成型 IV. ①TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 020063 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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 楠 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5453-1

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

2011 年 3 月第 1 版,2011 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;29.75 印张;717 千字;456 页

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(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)

序 言

钛是20世纪前半叶才登上世界工业舞台的“年轻”金属，是金属王国中一颗闪亮的新星。它具有许多优良的性能，例如比强度高、耐蚀性好，并具有较高的耐热性，是一种优质金属结构材料；钛无磁性、无毒性，并具有许多特殊功能，像储氢、超导、形状记忆等，也是重要的新型功能材料和生物医用材料。从工业价值、资源寿命和发展前景看，钛仅次于铁、铝，被誉为正在崛起的“第三金属”。钛产业对我国国防建设、经济与社会发展具有重要的战略意义，钛产业的发展水平已是体现国家综合实力的重要标志之一。

钛元素的发现距今已有200多年。1791年，英国人W. 格雷格尔（Gregor）在黑磁铁矿中发现一种新的金属元素，1795年德国化学家M. H. 克拉普鲁斯（Klaproth）在研究金红石时也发现该元素，并以希腊神Titans命名。1910年美国科学家M. A. 亨特（Hunter）首次使用钠还原 TiCl_4 制取了纯钛。1940年卢森堡科学家W. J. 克劳尔（Kroll）用镁还原 TiCl_4 制取了纯钛。从此，镁还原法（又称克劳尔法）和钠还原法（又称亨特法）成为生产海绵钛的工业方法。1948年美国用镁还原法制出2t海绵钛，从而宣告金属钛工业化生产时代的开始。由此可见，钛的工业化是一个漫长的历程，从钛元素的发现到工业海绵钛的生产，有150年的工业孕育期。由于真空电弧熔炼技术的发展，解决了高熔点活性金属的冶金难题，才使钛工业在20世纪50年代之后实现快速发展。

钛在地壳中的丰度为8.6g/kg，按元素丰度排序，钛居第9位，仅次于氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾和镁，按结构金属排序，钛仅次于铝、铁、镁，占第4位，比常见的铜、铅、锌储量的总和还多。因此，从储量而论，钛不是稀有金属。钛被列入稀有金属的原因正是由于其提取冶金技术高，钛的生产成本长期居高不下。克劳尔法奠定了海绵钛生产的工业基础，真空电弧熔炼技术打开了钛加工的大门，这两项技术对钛工业的发展起到了巨大的推动作用，但它们形成的钛材制备的高成本已成为钛进一步发展的制约因素。

钛的提取冶金技术和钛的熔铸技术的低成本化一直是钛加工技术研究与开发的热点。在海绵钛的制取方面，由于克劳尔法或亨特法存在工艺复杂、成本高、能耗大和环境污染问题，多年来，人们一直在对克劳尔法进行改进和完

善,使其向大型化、连续化和自动化发展;另外在寻求用 TiO_2 直接制取海绵钛的短流程工艺,例如用液态钠还原 TiCl_4 的 Armstong (ITP) 法,用氧化钛直接电解的 FFC/Cambridge 工艺(剑桥法), TiO_2 钙热还原(OS)法,碳热还原-电解提取钛(USTB)法等,目前二氧化钛电解直接提取钛的研究尚处于实验室研究或半工业化的初期发展阶段。

钛及钛合金的熔铸技术的发展与应用,特别是低能耗节约型钛和钛合金熔炼技术的发展显示了其强大的生命力。真空自耗电弧熔炼、真空非自耗熔炼、真空感应熔炼、电子束熔炼和等离子熔炼等技术用于钛及钛合金熔炼都已相当成熟,而且新工艺、新技术、新设备在不断涌现。近十几年来,在钛的熔炼技术方面,最引人注目的进展是发展了冷床炉熔炼技术,包括电子束冷床炉和等离子冷床炉技术,已达工业化水平,可熔炼重达 25t 的铸锭。冷床炉熔炼能生产无偏析、无夹杂的优质钛及钛合金铸锭,满足航空转动部件对高性能钛材的需求,而且能生产扁锭、空心锭,简化了板材和大管材的后续加工,并可大量回收残钛。但是这种技术还存在成本高、操作复杂的问题。目前,正在开发高效短流程的熔炼加工技术,例如美国在积极发展钛锭的一步法熔炼加工技术,即经单次冷床炉熔炼纯钛扁锭,就可直接轧制钛板带;乌克兰一直在研究直接采用钛坩进行电子束冷床炉熔炼技术;俄罗斯也发展了一种凝壳-自耗电弧熔炼技术,该技术可大量利用残钛,可调整熔融金属保持液态时间的长短,可制备异型铸锭,而且炉子造价低,耗电少。

中国钛工业的起步并不算晚,1954 年起开始研究钛的冶炼技术,1959 年用镁热还原法生产出第一批海绵钛工业产品,1956 年开始钛和钛合金的研究与开发。科研人员先后开展了钛冶炼和加工技术的实验研究和工业试验,打破了国外的技术封锁,实现了多方面“零的突破”。1978 年中国海绵钛和钛材最高产量分别为 1224t 和 508t,到 2000 年,海绵钛和钛材产能才达到 2000t/年,可见上世纪我国钛工业的发展速度还比较缓慢,中国钛工业经历了一段较长的创业期和成长期。进入 21 世纪,在需求牵引和新技术发展的推动下,在新世纪的第一个 10 年,中国钛产业出现跨越式发展,特别是 2004~2008 年,中国成为国际上钛产量增长最快的国家。2008 年中国海绵钛产量接近 5×10^4 t,钛材产量接近 3×10^4 t,一跃成为世界第一大海绵钛生产国和第三大钛材生产国。经过半个多世纪的奋斗,中国的钛工业从无到有,从小到大,取得了举世瞩目的成就,凝聚了几代人的心血和汗水,有许多东西值得总结、继承和发扬。

据分析,未来 10~15 年内,中国将成为世界第二大航空市场,另外,核能和海水淡化市场对钛材的需求将持续增长,中国将成为仅次于美国的第二大钛市场。从资源看,中国已探明钛储量为 8.7 亿吨,占世界总储量的 48%。中

国钛资源从数量上处于世界优势地位，但是钛铁岩石占储量的 93%，提取冶金困难，综合利用难度大，钛的提取冶金技术有待突破。与美国、日本等发达国家相比，中国钛工业在工艺装备、技术经济指标、产品品种和质量、节能减排方面还有一定差距。目前中国钛产业的总体规模还比较小，与钢铁和铝业已是世界第一的地位相比，钛产业发展相对滞后。有人用“钛-钢”比来衡量钛产业规模，世界的“钛-钢”比平均为十万分之六，而中国的仅为十万分之二，中国的钛产业既需要提升水平，也需要壮大规模，还有很大发展空间。钛作为一种极具发展潜力的新金属材料，其制备技术及材料应用虽然已取得长足发展，但是面对气候变化、能源和环境安全的挑战，材料工作者肩负着艰巨而光荣的任务，大力发展低成本、绿色化制造技术已是“低碳经济时代”的呼唤，和传统材料一样，钛也承担着节能减排的重要任务。

马开道等高级工程师，长期在我国钛的大型骨干企业宝钛集团（原宝鸡有色金属加工厂）从事钛及钛合金以及难熔金属材料的熔炼设备管理和技术开发工作，他汇集了国内外有关稀有难熔金属熔炼的先进技术和先进理念，特别是总结了在这方面的实践经验，潜心编著了《稀有金属真空熔铸技术及其设备设计》一书，比较全面地介绍了钛及钛合金的各种熔炼方法特点和设备设计与计算方法。该书对从事这一领域工作的同志会有重要参考价值，相信这本书的出版将会促进钛及钛合金熔炼的技术进步，也会对我国钛产业的发展起到积极的作用。

中国工程院院士

周康

2010 年 10 月

前 言

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀、线胀系数小、生物相容性好等优异性能，在航空、航天、海洋运输、石油、化工、冶金、医疗卫生等行业中都是不可缺少的结构材料、功能材料。钛及钛合金在熔融状态下具有高化学活性，在大气中易于氧化，与常用的各种耐火材料发生化学反应，熔炼和铸造成型难度大，必须在其专用的熔炼和铸造设备中进行。

为了进一步推动与促进钛及钛合金熔炼、铸造以及熔铸设备的发展，作者综合了国际、国内最新设备研究和发展成果，并结合几十年的工作实践，编写了这本基础性的专业书，书中概述了钛及钛合金熔炼、铸造基本工艺技术和难熔金属熔炼、烧结工艺技术，并详细地介绍了真空自耗电弧炉、凝壳炉、电子束冷床炉、等离子束冷床炉、真空感应炉、难熔金属熔炼设备以及上述各种真空熔铸设备的设计计算。

本书在编写过程中，东北大学真空与流体工程研究中心主任、中国真空学会真空冶金专委会主任巴德纯教授对第3章进行了修改；宝钛集团稀有金属装备设计研制所所长、副总工程师于润康及高级工程师郭辉、杨军辉热情支持，并为本书提供了一些技术资料和对凝壳炉、电弧炉自动控制等内容进行了修改；西安石油大学李宏教授为电弧炉电源、感应炉电源等内容做了重要的修改；西安建筑科技大学蒋明学教授大力支持；特别是承蒙西北有色金属研究院刘建章副总工程师对全部书稿进行认真审阅，并提出修改建议。在此谨向他们表示衷心的感谢！

由于笔者是业余时间笔耕，加上学识水平有限，书中难免会有不妥之处，恳望广大读者批评指正。

作 者
2010年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 真空熔炼、铸造、烧结	1
1.2 真空电炉	1
1.3 钛及钛合金铸锭、铸件生产的特点及设备与方法	2
1.3.1 钛及钛合金铸锭、铸件的冶金特点	2
1.3.2 钛及钛合金铸锭、铸件真空熔炼设备	2
1.3.3 钛及钛合金铸锭、铸件真空熔炼方法	4
参考文献	8
2 真空熔炼的物理化学过程	9
2.1 真空熔炼热力学	9
2.1.1 挥发	9
2.1.2 脱气	12
2.1.3 分解	13
2.1.4 脱氧	14
2.2 真空熔炼动力学	15
2.2.1 挥发	15
2.2.2 脱气	20
2.2.3 脱氧	21
参考文献	22
3 稀有金属真空熔炼、烧结、热处理炉的真空系统的设计与计算	23
3.1 真空系统设计概述	23
3.2 真空系统设计内容与计算的一般程序	23
3.2.1 真空系统设计的内容	23
3.2.2 设计计算的一般程序	23
3.3 真空系统设计中的主要参数与分析	24
3.3.1 真空系统设计依据的主要参数	24
3.3.2 真空室内的气源情况	24
3.4 真空系统的选泵和配泵计算	28

3.4.1 炉室放气量、漏气量的计算	28
3.4.2 选择主泵	29
3.4.3 主泵的抽速计算	30
3.4.4 配泵计算	32
3.4.5 维持泵计算	34
3.4.6 炉室预真空的抽气时间计算	35
3.4.7 预真空泵的抽速计算	35
3.5 真空系统的设计	36
3.5.1 中真空系统	36
3.5.2 高真空系统	38
3.6 真空系统的结构设计注意事项	41
3.7 真空系统设计中应注意的问题	42
3.8 真空系统的工作状态	43
3.9 真空管路流导的计算	44
3.9.1 真空管道内气体流动状态	44
3.9.2 黏滞流、分子流和黏滞-分子流的判别	44
3.10 真空系统设计计算举例	47
3.10.1 技术要求	47
3.10.2 主泵类型和真空系统的确定	47
3.10.3 炉室内放气量的计算	47
3.10.4 主泵抽速的计算	49
3.10.5 配泵计算	51
3.10.6 预真空机械泵抽速计算	51
3.10.7 维持泵抽速 S_w 的计算	52
3.10.8 抽气时间的计算	52
3.11 真空测量	54
3.11.1 真空表(计)的选用方法	54
3.11.2 常用热传导真空表(计)和电离真空表(计)	55
3.12 真空系统中常用结构材料与处理	56
3.12.1 对结构材料的基本要求	57
3.12.2 常用的金属及其合金	57
3.13 真空检漏技术	57
3.13.1 概述	57
3.13.2 对真空系统密封程度的分析	59
3.13.3 真空检漏方法	61
3.13.4 检漏的过程	63
参考文献	63

4 真空电弧炉	64
4.1 真空电弧熔炼概论	64
4.2 真空非自耗电弧炉	64
4.3 真空自耗电弧炉	67
4.3.1 VAR 法的优缺点	68
4.3.2 真空自耗电弧炉结构类型	68
4.3.3 真空自耗电弧炉的发展概况	69
4.3.4 VAR 法的工艺过程	73
4.3.5 钛合金铸锭 VAR 法熔炼的基本工艺过程	87
4.3.6 VAR 法工艺参数的选择原则	93
4.4 真空自耗电弧炉的结构及其设计计算	95
4.4.1 概述	95
4.4.2 真空自耗电弧炉的结构和作用	99
4.4.3 结构设计与计算	103
4.5 真空自耗电弧炉的电源与电气控制系统	133
4.5.1 真空自耗电弧炉的熔炼电流、电压和炉子功率的计算	133
4.5.2 电弧电源	145
4.5.3 电源与炉体之间的引线	155
4.5.4 电气控制系统设计	157
4.5.5 电极杆传动的自动控制	160
4.6 真空系统	169
4.6.1 真空系统的确定	169
4.6.2 真空电弧炉真空系统设计的注意事项	171
4.6.3 真空系统的电气自动控制	171
4.7 关于真空自耗电弧炉的其他问题	174
4.7.1 光学观察装置	174
4.7.2 真空自耗电弧熔炼的安全问题	175
4.7.3 VAR 法熔炼特点和需要解决的技术问题	178
参考文献	178
5 真空自耗电弧凝壳炉	179
5.1 概述	179
5.1.1 凝壳炉的类型	180
5.1.2 凝壳炉电弧熔炼的优缺点	182
5.2 钛及钛合金铸造的发展概况	183
5.3 凝壳炉的结构	185

5.3.1	炉体	185
5.3.2	坩埚及坩埚翻转系统	185
5.3.3	电极杆及其升降系统	189
5.3.4	光学观察系统	190
5.3.5	装料机构	190
5.3.6	离心转盘机构	190
5.3.7	真空系统	190
5.3.8	电源部分	191
5.3.9	电气控制系统	191
5.3.10	计算机监控系统	191
5.3.11	操作车	191
5.4	500kg 凝壳炉的设计计算实例	192
5.4.1	主要技术参数	192
5.4.2	基本参数的设计计算	192
5.4.3	坩埚直径 (D) 和深度 (H) 的选择	193
5.4.4	熔化速度及熔化时间的确定	195
5.4.5	热平衡计算炉子的功率	195
5.4.6	工作电流 I_1 与电弧电压 $U_{\text{弧}}$ 的计算	198
5.4.7	凝壳炉的热平衡功率及电源输出电压计算	199
5.4.8	单位能耗及炉子效率的计算	201
5.4.9	坩埚冷却水带走的热量计算	201
5.4.10	电极杆冷却水带走的热量计算	203
5.4.11	500kg 凝壳炉的真空系统设计计算	204
5.4.12	电极杆升降传动系统的设计计算	221
5.4.13	电源与自动控制	225
5.5	真空自耗凝壳炉控制系统的设计概述	226
5.5.1	真空自耗凝壳炉控制系统的功能要求	226
5.5.2	硬件构成	226
5.5.3	软件方案	227
5.5.4	系统模块	228
5.6	L2000SM—Ti 真空凝壳熔化炉	229
5.6.1	主要技术参数	229
5.6.2	真空凝壳炉的结构组成	229
5.6.3	真空凝壳炉的设计特点	229
5.7	凝壳炉的熔化浇铸工艺流程	231
5.7.1	准备阶段	232
5.7.2	熔化、浇铸阶段	233

5.7.3 凝壳炉的熔化、浇铸工艺	233
5.8 钛铸造工艺设计	239
5.8.1 钛及合金的铸造特性	239
5.8.2 钛铸造的造型工艺	240
5.8.3 确定工艺方案	245
5.8.4 浇铸系统的设计	245
5.8.5 浇铸系统形式	246
5.8.6 钛及钛合金的物理性质、化学性能	249
5.9 钛铸件的缺陷及防止方法	250
5.9.1 钛铸件常见的内部缺陷	250
5.9.2 钛铸件的表面缺陷	253
5.10 凝壳炉的安全	255
5.10.1 真空凝壳炉产生爆炸的危险	255
5.10.2 安全措施	255
参考文献	256
6 电子束炉	257
6.1 电子束熔炼概况	257
6.2 电子束炉的工作原理	261
6.2.1 电能转换成热能	261
6.2.2 电子束熔炼的基本原理	263
6.3 电子枪的种类	264
6.3.1 远聚焦枪	265
6.3.2 近环形枪	266
6.3.3 远环形枪	266
6.3.4 横向枪	267
6.4 120kW 电子枪的工作原理	267
6.5 电子束炉的结构及其设计计算	269
6.5.1 炉体	270
6.5.2 电子束发生器(电子枪)结构及设计计算	271
6.5.3 进料机构	287
6.5.4 坩埚及拖锭机构	290
6.5.5 真空系统	290
6.5.6 水冷却系统	291
6.5.7 观察装置	292
6.5.8 高压电源与自动控制系统	292
6.6 基本工艺及参数	297

6.6.1 熔炼功率的确定	297
6.6.2 比电能	299
6.6.3 熔化速度	299
6.6.4 熔炼真空度	300
6.6.5 熔炼次数	300
6.6.6 拉锭工艺	301
6.7 EB 法熔炼铸锭质量	301
6.7.1 铸锭组织	301
6.7.2 铸锭化学成分	301
6.7.3 合金成分的控制	301
6.7.4 EB 法熔炼铸锭缺陷及防止措施	302
6.8 EB 法熔炼时炉内的反应	302
6.9 电子束冷床炉熔炼技术概况	303
6.9.1 2400kW 电子束冷床炉	303
6.9.2 1800kW 电子束冷床炉	309
6.9.3 500kW 电子束冷床炉熔炼炉	311
6.10 60kW 电子枪的设计计算实例	316
6.10.1 60kW 电子枪的设计	317
6.10.2 电子束光路系统的计算	321
6.10.3 一次聚焦线圈、偏转线圈、二次聚焦线圈的设计	325
参考文献	329
7 真空感应炉	330
7.1 感应加热与熔炼的物理基础	331
7.1.1 电磁感应现象与感应加热的物理实质	331
7.1.2 集肤效应与透入深度	333
7.1.3 邻近效应与圆环效应	336
7.1.4 感应加热时的传热及温度分布	338
7.1.5 电动力效应与搅拌作用	338
7.1.6 感应加热过程中材料物理性能的变化	340
7.2 真空感应炉的发展概况	341
7.2.1 国内部分	341
7.2.2 国外部分	342
7.2.3 真空感应熔炼炉在钛工业的发展趋势	343
7.3 真空感应熔炼的优点与缺点	343
7.3.1 感应熔炼炉的优点	343
7.3.2 感应熔炼炉的缺点	344

7.4 真空感应熔炼炉的分类	345
7.4.1 卧式炉	345
7.4.2 立式炉	346
7.4.3 炉体倾动式	347
7.4.4 下铸式(底漏式)	347
7.5 真空感应炉的结构及设计计算	348
7.5.1 炉体结构设计计算	348
7.5.2 坩埚结构设计计算	353
7.5.3 坩埚的制作	357
7.5.4 感应器结构设计计算	359
7.5.5 感应熔炼炉的电工计算	362
7.5.6 真空中频感应熔炼炉感应圈的结构设计计算实例	377
7.5.7 能量消耗	390
7.5.8 电源设备	391
7.5.9 功率因数和补偿电容	392
7.5.10 真空系统	393
7.5.11 转轴结构设计	393
7.6 真空感应熔炼工艺	395
7.7 真空感应氧化物坩埚熔炼法	396
7.8 真空感应水冷铜坩埚熔炼法	401
7.8.1 真空感应水冷铜坩埚熔炼法(钛的悬浮熔炼)的基本原理	401
7.8.2 钛悬浮熔炼的特点	404
7.8.3 钛的悬浮熔炼与铸造	405
7.9 真空吸铸式水冷铜坩埚感应凝壳炉	406
参考文献	407
8 真空等离子熔炼炉	408
8.1 等离子枪基本工作原理	408
8.2 真空等离子束炉	411
8.2.1 真空等离子束熔炼炉(PA法)	411
8.2.2 等离子束炉的工作原理	412
8.2.3 等离子束炉的放电过程	412
8.3 400kW 等离子束熔炼炉	413
8.3.1 等离子枪与聚焦线圈	415
8.3.2 料仓和加料机构	416
8.3.3 坩埚和拉锭机构	416
8.3.4 真空系统	416

8.3.5 充氩系统	417
8.3.6 电源	417
8.4 等离子束炉熔炼工艺	418
8.4.1 等离子束炉熔炼工艺	418
8.4.2 等离子束炉熔炼参数	418
8.5 真空等离子束冷床炉	420
8.5.1 真空等离子束冷床炉概况	420
8.5.2 钛合金等离子束冷床炉熔炼技术的发展	420
8.5.3 等离子束冷床炉工作原理	421
8.5.4 等离子束冷床炉熔炼技术的优点	423
8.5.5 等离子束冷床炉熔炼技术的发展应用	423
8.5.6 我国等离子束冷床炉熔炼技术的发展	425
8.6 真空等离子弧炉	426
参考文献	429
9 高真空垂熔烧结炉	430
9.1 真空烧结一般理论根据	431
9.1.1 电流的集肤效应	432
9.1.2 被加热材料截面上温度分布	432
9.1.3 加热过程中材料温度随时间的变化	433
9.2 直接电阻加热的电热计算	433
9.2.1 加热时间的确定	433
9.2.2 变压器容量的确定	434
9.2.3 供给被加热材料的端电压(变压器的次级电压)的确定	434
9.3 600kW 高真空垂熔烧结炉	436
9.3.1 主要技术参数	436
9.3.2 高真空垂熔烧结炉的主要组成部分及其主要功能	436
9.4 烧结工艺过程	439
9.4.1 烧结	439
9.4.2 烧结温度的确定	439
参考文献	440
10 真空中频感应烧结炉	441
10.1 真空中频感应烧结炉频率的选择	441
10.2 100kW 真空中频感应烧结炉	442
10.2.1 主要技术参数及性能	442
10.2.2 主要结构及组成	443

10.3 真空中频感应氢气烧结炉	446
10.3.1 主要技术参数及性能	447
10.3.2 主要结构及组成	448
10.3.3 控温系统	448
10.4 粉末冶金方法	449
10.4.1 粉末制坯的成形过程	449
10.4.2 预结	449
10.4.3 烧结过程	449
10.5 真空中频感应烧结钼板坯工艺	450
10.5.1 典型工艺流程	450
10.5.2 原料	450
10.5.3 油静压成形	451
10.5.4 坯料预结	451
10.5.5 真空烧结	452
10.5.6 钼坯料质量检验	452
10.5.7 粉末冶金法的优点	453
参考文献	453
附 录	454
附录 1	454
附录 2	455
附录 3	456

1 绪 论

1.1 真空熔炼、铸造、烧结

真空在冶金工业中应用非常广泛。真空冶金主要指真空熔炼、真空铸造和真空烧结等。真空作为一种保护性气氛，能防止氧化，能使金属内部的气体与金属氧化物等杂质大大减少，提高了金属的纯洁度，在真空条件下向金属内添加的元素成分和含量（特别是活性元素）容易控制，提高了合金的性能，为熔炼钛、锆、钨、钼、钽、铌、钎等活性金属及合金开辟了道路。在真空下脱气和熔铸可以得到消除或减少偏析、夹杂和微裂纹的铸件，能够提高铸件的致密性和可塑性。在大气下不能进行的某些反应过程在真空条件下可以顺利进行，又容易热分解某些化合物，为稀有金属的熔炼提供了条件。在真空条件下进行热处理可以达到脱脂、除气和光亮的目的，得到满足要求的产品性能。在粉末冶金中是将成型的钨、钼、钽、铌粉末坯体，经过预烧结，再在真空中高温烧结，能使多孔的粉末体或海绵体，转化为致密的、并具有一定加工性能的金属或合金。

金属的熔炼方法、设备、工艺，都是随着科学技术和生产发展的需要，在实践中不断开发和完善的。金属材料不仅品种繁多，而且对其成分、组织、性能、规格、能耗、成本及寿命等都有严格的标准和要求，这为研究和开发新的熔炼技术提供了依据和动力。近年来，新的熔炼方法、设备及工艺不断出现，材料的质量和产量也有长足的发展，但还存在耗损大、能耗高、经济技术指标较低、成本高等问题。因此，不断开发应用新的熔炼技术设备和工艺，有着重要的实际意义。

1.2 真空电炉

真空电炉是在真空中利用电能作为热能来源的一种加热设备。可以用来熔炼合金钢和各种稀有金属及其合金，如钨、钼、钽、铌、钛、锆、钎等难熔或活泼性金属的熔炼，也可用于各种金属材料或工件的热处理以及新型原材料的制取、科学研究等。随着工业的发展，各种真空电炉的发展不论在种类还是在规格上都还远不能满足国民经济的发展需要，设计新结构的炉子以及寻求新的电热转换形式或技术使用于炉子上，是人们不断研究的课题。当代工业中使用的真空电炉种类繁多，用途不一，这里仅叙述一些关于稀有金属材料熔炼、铸造、烧结的部分真空电炉。

真空电炉通常是按电能转变为热能的方法（即电加热的方法）不同来分类。目前在稀有金属熔炼、铸造、烧结上应用的真空电炉分为真空电弧炉、真空凝壳炉、真空电子束炉、真空等离子炉、真空感应炉、真空电阻炉等等。其电能转换成热能的方法和用途如下。

(1) 真空电弧炉、真空凝壳炉是利用弧光放电产生的电弧热能熔炼金属材料。将自耗电极接负极，坩埚接正极，通电时两极间产生弧光放电，正离子打到阴极（自耗电极），