

钛、锆及其合金的电子束熔炼

**Electron Beam Melting of Titanium,
Zirconium and Their Alloys**

B. E. Paton

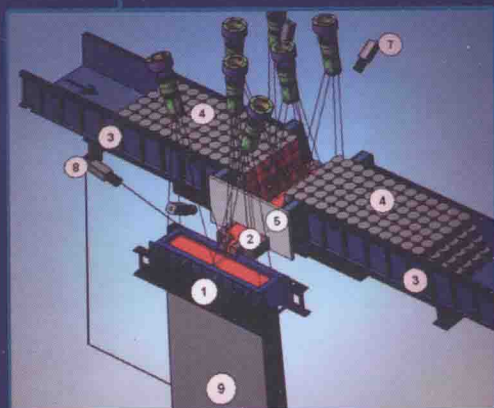
(乌克兰) M. P. Trygub 编著

S. V. Akhonin

樊生文 王殿儒 张海峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



谨借本书中译本面市之机

祝贺青海聚能钛业有限公司成立六周年!

钛、锆及其合金的 电子束熔炼

Electron Beam Melting of Titanium, Zirconium and Their Alloys

B. E. Paton

(乌克兰) M. P. Trygub 编著

S. V. Akhonin

樊生文 王殿儒 张海峰 等译

机械工业出版社

Electron Beam Melting of Titanium, Zirconium and their Alloys
by B. E. Paton, M. P. Trygub, S. V. Akhonin

© E. O. Paton Electric Welding Institute, NASU, 2011

Authorized translation from English Language edition by E. O. Paton
Electric Welding Institute, NASU. All Right Reserved.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版,并限
在中国大陆地区进行销售。未经出版者书面许可,不得以任何方
式复制或发行本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:图字01-2013-3563号。

图书在版编目(CIP)数据

钛、锆及其合金的电子束熔炼/(乌克兰)巴顿(Paton,
B. E.)等编著;樊生文等译. —北京:机械工业出版社,2014.3

书名原文:Electron beam melting of titanium, zirconium and their
alloys

ISBN 978-7-111-47431-9

I. ①钛… II. ①巴…②樊… III. ①钛-合金-电子束熔炼
②锆-合金-电子束熔炼 IV. ①TF823.048②TF841.404.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第162758号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:张俊红

版式设计:赵颖喆 责任校对:樊钟英

责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 10.75印张 · 201千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47431-9

定价:49.80元



凡购本书,

电话服务

社服务中,

销售一

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

部调换

tp: //www. cmpedu. com

ip: //www. cmpbook. com

机工官博: http: //weibo. com/cmp1952

封面无防伪标均为盗版

本书主要介绍了电子束熔炼法生产钛和锆及其合金产品的技术特性，详细阐述了电子束熔炼钛和锆期间杂质、非金属夹杂物以及合金元素的运动模式和机理研究，给出了优化高反应性金属熔炼工艺参数的多种建议，对冶金过程提供了高质量的技术和经济规范。书中给出了在金属铸造和锻造阶段，包括金属化学成分、微观和宏观结构的质量特征以及金属的化学特性；提供了铸锭表面熔炼和熔整时的工艺流程图，并且描述了所研制电子束设备的具体功能。

本书可作为科技人员、工程师和技术人员，以及高等学校在校学生的参考用书。

译 者 序

在翻译本书之际，我们作为发起人和组织者向原书作者乌克兰国家科学院院长、乌克兰国家科学院焊接研究所所长 B. E. 巴顿院士表示感谢，同时对巴顿院长的 95 岁生日（2013 年 11 月 27 日）表示衷心的祝贺，他们友好愉快地将本书的翻译和出版权授予了我方。作者是钛、锆及其合金材料和真空冶炼领域的国际知名专家。乌克兰国家钛中心即设在他们领导的焊接研究所。本书内容来源于乌克兰在该领域的大量研究和科研生产实践，对世界其他国家的进展也有简要叙述。书中资料主要针对钛、锆及其合金的设备和工艺技术，但对其他诸如钨、钼、钽、铌、硅、铀等高温和合金材料的熔炼也有参考价值。

我国高温稀有材料的生产规模正在快速增长，引进设备数量逐年增加，国产的传统型电子束熔炼炉已经进入市场，新一代性能更好的气体放电型电子束熔炼炉的国产化进程正在加快，现有的熔炼产品的质量尚待提高，与生产规模快速发展的状况相比，技术的发展明显迟后许多。希望巴顿院长一书的这个中译本能对我国在本领域的发展有所帮助。

本书由樊生文、王殿儒和张海峰翻译，全书由王殿儒和张海峰统一校对定稿。另外，蔡斌峰、丁茂起、杜军、李洋、刘东、刘鹏、吕冠达、薛昊、郑凯元等也参与了部分翻译工作。还要特别感谢有色金属研究院的杜风贞老师所给出的专业性指导和帮助。同时需要特别指出，译者严格按照原书的意思进行翻译工作，书中内容并不代表译者及译者所在单位的观点。

由于译者水平有限，翻译中必有错误和不妥之处，衷心希望读者批评指正。

王殿儒 李正熙 吴世周

致中文版读者

在最近几十年内，中国的钛、锆生产规模扩大了几十倍。中国企业从海绵体、铸锭、轧材到具体工件，生产所有的高活性金属产品。而具有完整的钛、锆产业链，则是一个国家属于高度发达国家俱乐部的标志之一。

乌克兰国家科学院巴顿焊接研究所在所进行的基础科研和实验设计工作的基础上，掌握了钛基和锆基合金的电子束熔炼技术和实现该技术的装备。采用这些技术确保从金属中去除耐高温的高密度和低密度的杂质。在钛、锆合金的半成品中去掉这些杂质，对其在重要应用装备中能否保证实现它们的功能，是重要的关键因素。总而言之，采用电子束熔炼技术，能够采用较便宜的原料获得高质量的铸锭。

依我们看来，在中国工业中采用乌克兰科学家的最新技术，能够显著提高钛、锆构件的质量并降低其成本。祝中国读者在未来钛、锆冶金的事业中取得成功！

B. E. 巴顿院士

原 书 前 言

在过去几十年里，发生在不同工程领域中的进步，在许多方面都与新型金属材料的应用有关，这些新材料的特点提高了在特殊条件下与在特定的物理力学和化学性能相结合的条件下的使用性能。

这些被用于新材料的发展和传统材料的改进所使用的金属，包括高反应性金属，其典型代表是钛和锆。这种金属具有高熔点、低局部蒸气压力、小热中子捕获横截面、耐腐蚀性、高热导率和延性等力学物理性能，这些优良性能的结合使其成为电子技术、核能发电和化学工程领域独一无二的应用材料。

这些金属在温度增加时具有高活性，特别是在熔化状态下对于气体的吸附性极强，因此这也决定了它们只能在真空或者惰性气体中熔炼提纯。因此，真空电弧重熔（VAR）、真空感应熔炼（VIM）以及电子束熔炼（EBM）技术的最后精炼步骤都在真空中进行。

乌克兰国家科学院巴顿焊接研究所（PWI）在上述金属和合金材料冶炼技术的基础上，开展的有关 EBM 技术的研究开发工作，取得了一定的进展，并且制作了相应的生产设备。与 VAR 和 VIM 相比，EBM 技术提供了更高的去除有害杂质和夹杂物的能力。

本书阐述了用 EBM 方法熔炼高反应性金属的方法。

EBM 技术高效的特性决定了熔炼金属的高反应性进程要在真空中进行（在熔炼室中的真空度维持在 $0.01 \sim 1\text{Pa}$ ），并且分离熔炼和凝固过程同样在此条件下。在熔炼过程中，这一方法几乎完全防止了不可控的物理和化学反应的发生，以及金属凝固过程的目标影响等，包括化学成分的控制和熔化铸锭的晶体结构。

本书涵盖了高反应性金属的化学和物理属性，以及在此基础上这些金属和合金产品在技术方面的应用领域和工艺状态。

本书详尽描述了在真空中高反应性金属的精炼和蒸发的反应机理，并且给出了 EBM 移除有害杂质过程的数学模型。对于熔炼过程的技术参数来说，在铸锭中的杂质成分与数学模型相关，这让 EBM 技术参数得到了优化，增加了金属的纯度，从而降低了产品的成本。

书中给出了大量 EBM 钛和锆金属的实验结果和试点投产的数据结果，电子束熔炼金属的宏观和微观结构的检测结果，以及在铸锭内部杂质成分的分布数据和金属在浇注状态与变形处理后的力学特性。

研究结果被作为 EBM 钛和锆金属的关键性技术参数，提高了金属的生产率、电子束设备的效率，降低了特定功率下的损耗。采用 EBM 方法可以获得高质量的

钛和锆铸锭产品。书中描述了巴顿焊接研究所（PWI）在近半个世纪的电子束技术经验积累的基础上所设计的新一代工业电子束设备。

作者希望书中给出的实验数据和技术过程以及装备，能引起专家和冶金企业的管理者的注意，希望在乌克兰的工业领域增加这项先进技术的应用。

目 录

译者序

致中文版读者

原书前言

第 1 章 电子束熔炼高反应性金属的物理冶金和技术特性	1
1.1 高反应性金属的属性和应用领域	1
1.2 高反应性金属铸锭的生产技术	4
1.3 电子束熔炼技术和装备	6
1.4 真空中熔体表面的物理化学提纯反应	11
1.5 熔融金属和气相中的质量传递	15
第 2 章 电子束熔炼高反应性金属的精炼过程	21
2.1 熔融金属中脱氢过程的动力学方程式	21
2.2 电子束冷床熔炼金属中脱氢过程的数学建模	25
2.3 电子束熔炼时从金属钛中脱氢过程的动力学常量的确定	29
2.4 钛的 EBM 中非金属杂质处理过程的动力学原理	32
2.5 电子束冷床熔炼中的非金属杂质的移除	37
2.6 初始原料成分对于电子束熔炼方法所获得的钛锭质量的影响	39
第 3 章 在真空中钛合金冶炼元素的蒸发过程	43
3.1 实际熔体—蒸气相系统中质量传递过程的动力学原理	43
3.2 电子束冷床熔炼中合金元素的蒸发	45
3.3 电子束熔炼时从金属钛中铝元素蒸发过程的动力学常量的测定	49
3.4 电子束熔炼钛合金在冷床和结晶器中熔体表面的温度条件	51
3.5 电子束熔炼钛合金的参数最优化	54
第 4 章 电子束冷床熔炼中的金属凝固	59
4.1 电子束熔炼中的金属凝固特性	59
4.2 铸锭中热过程的数学模型	63

4.3	电子束冷床熔炼中金属凝固过程机理·····	65
4.4	电子束冷床熔炼铸锭中的缩孔深度的确定·····	70
第5章	钛和钛基合金的电子束熔炼 ·····	75
5.1	圆锭和扁锭的熔炼技术·····	75
5.2	钛基合金铸锭的熔炼·····	79
5.3	电子束熔炼钛锭的半成品加工·····	84
5.4	空心锭熔炼技术·····	89
第6章	锆的电子束熔炼 ·····	93
6.1	装备和原料·····	93
6.2	电子束熔炼中精炼锆的效能·····	98
6.3	电子束熔炼锆锭的质量·····	104
6.4	锆基合金空心铸锭的生产工艺·····	106
第7章	铸锭表面的电子束熔整 ·····	110
7.1	铸锭表面的电子束熔整技术·····	110
7.2	电子束熔整过程发生在铸锭中热过程的数学建模·····	111
7.3	钛合金铸锭表面电子束熔整中合金元素蒸发过程的数学建模·····	118
7.4	钛锭表面的电子束熔整品质·····	127
7.5	锆锭表面的电子束熔整·····	129
第8章	电子束熔炼设备 ·····	133
8.1	电子枪·····	133
8.2	电子束设备设计与系统·····	136
8.3	工业电子束熔炼设备·····	138
结论	·····	152
参考文献	·····	153
后记		

第 1 章 电子束熔炼高反应性金属 的物理冶金和技术特性

1.1 高反应性金属的属性和应用领域

高反应性金属如钛、锆、铪在元素周期表中被列为亚族 IVB[⊖]，具有高化学活性。所有这些元素都具有高熔点和高沸点（见表 1.1）。在各种极端环境下^[1] 和低饱和蒸气压环境下^[2]，它们具有高耐腐蚀性。

表 1.1 钛、锆、铪的物理特性^[3-5]

金属特性	钛 (Ti)	锆 (Zr)	铪 (Hf)
原子数	22	40	72
摩尔质量/(kg/mol)	47.90×10^{-3}	91.22×10^{-3}	178.4
熔点/℃	1668	1855	2220
沸点/℃	3330	4340	4600
密度/(kg/m ³)	4505	6450	1331
特定熔化热/(kJ/kg)	315.2	160.1	117.7
特定蒸发热/(kJ/kg)	8559.5	6117.1	3189.5

高反应性金属不与空气反应，在室温中几乎不与气体相互作用。然而在升温之后会吸附气体（氢、氮、氧），即使金属很少量地吸附以上元素，都会影响它们的力学和电气性能^[5,6]。锆和钛在 300℃ 时发生显著的氧化反应^[7]。在低温时氢元素吸收较慢，但在 300℃ 时氢元素被吸收的速度大大加快，而且会伴随有氢化物的生成等^[8]。氮气在 500 ~ 600℃ 时会参与反应，形成相当数量的固溶体和氮化物^[9,10]。

钛和锆以合金的形式被使用，在非合金的状态下获得^[11]。为了生成锆合金，锆与铌、锡、铬、铁、镍等生成合金的含量见表 1.2。

为了生成钛合金，钛与铝、钒、钼、锰、铬、锡、铁、铬、铌按表 1.3 含量生成合金。其中，元素铝增加了钛合金的强度、耐热性和弹性模量。元素钼、钒、锰、铬和铁，在室温和较低温度下增加了合金的强度、耐热性和热稳定性，降低了它的延性^[12]。

⊖ 原书误为 IVA。——译者注

表 1.2 ASTM B905 - 91 标准要求的锆合金中合金化和杂质元素含量

合金等级		元素含量（质量分数%）											
		铌	锡	铁	铬	镍	氧	碳	氮	硅	钪	钨	氢
001	最大	—	0.005	0.15	0.02	0.007	—	0.027	0.008	0.012	0.01	0.01	0.0025
802	最小		1.20	0.07	0.05	0.03							
	最大	0.01	1.70	0.20	0.15	0.08	—	0.027	0.008	0.012	0.01	0.01	0.0025
804	最小		1.20	0.18	0.07								
	最大	0.01	1.70	0.24	0.13	0.007	—	0.027	0.008	0.012	0.01	0.01	0.0025
901	最小	2.40					0.09						
	最大	2.80	0.01	0.15	0.02	0.007	0.15	0.027	0.008	0.012	0.01	0.01	0.0025
904	最小	2.50											
	最大	2.80	0.01	0.15	0.02	0.007	—	0.027	0.008	0.012	0.01	0.01	0.0025

注：氧和铌元素未标定浓度的，需要另外得到客户同意。

表 1.3 根据 GOST 19807 - 91 要求，钛合金中合金化元素和杂质元素含量

合金等级		元素含量（质量分数%）									
		铝	钒	钼	锆	铁	硅	碳	氮	氧	氢
VT1 - 00	最大	0.3	—	—	—	0.15	0.08	0.05	0.04	0.10	0.008
VT1 - 0	最大	0.7	—	—	—	0.25	0.10	0.07	0.04	0.20	0.010
OT4 ^①	最小	3.5	—	—							
	最大	5.0	—	—	0.3	0.30	0.12	0.10	0.05	0.15	0.015
PT - 7M	最小	1.8	—	—	2.0			0.10			
	最大	2.5			3.0	0.25	0.12		0.04	0.15	0.006
PT - 3V	最小	3.5	1.2	—							
	最大	5.0	2.5		0.3	0.25	0.12	0.10	0.04	0.15	0.006
VT5	最小	4.5									
	最大	6.2	1.2	0.8	0.3	0.30	0.15	0.10	0.05	0.20	0.015
VT6	最小	5.3	3.5	—							
	最大	6.8	5.3		0.3	0.30	0.15	0.10	0.05	0.20	0.015
VT8	最小	5.8	—	2.8			0.20	0.10			
	最大	7.0		3.8	0.5	0.30	0.40		0.05	0.15	0.015
VT9	最小	5.8	—	2.8	1.0		0.20	0.10			
	最大	7.0		3.8	2.0	0.25	0.35		0.05	0.15	0.015

(续)

合金等级		元素含量 (质量分数%)									
		铝	钒	钼	锆	铁	硅	碳	氮	氧	氢
VT14	最小	3.5	0.9	2.5							
	最大	6.3	1.9	3.8	0.3	0.25	0.15	0.10	0.05	0.15	0.015
VT20	最小	5.5	0.8	0.5	1.5			0.10			
	最大	7.0	2.5	2.0	2.5	0.30	0.15		0.05	0.15	0.015

① 合金 OT4 含有 0.8% ~2% 的锰。

工业中使用了大量的钛合金，它们在合金成分上（见表 1.3）和力学性能上都不同。然而，它们的结构被分为以下几类：基于钛 α - 相的 α 合金，具有六方密排（HCP）的晶格；基于钛 β - 相的 β 合金，具有体心立方（BCC）的晶格；基于 α 和 β 两相的（ $\alpha + \beta$ ）合金，组成固熔体^[13,14]。

钛铝系是商业合金的主要发展基础。铝增加了钛的同素异形变化的温度和 α - 相的稳定性^[15]，铝几乎存在于所有钛合金中。铝作为一种合金化元素，有效地增强了几乎所有合金的强度，增加了它们的耐热性和抗蠕变性^[16]，而且铝的存在减少了因为氢的存在而导致的脆性^[17]。

高反应性金属的应用领域非常广泛。这些金属尤其集中使用在高技术领域，如航空飞行器和火箭发动机、精密工程、核能和无线电电子工业。同时高反应性金属也被扩展使用在其他一些领域^[18,19]。

除了具有高熔点、良好的强度和延性，以及抗辐射和耐腐蚀性等优点之外，锆突出的一个特点就是具有小的热中子捕获横截面积，这使得它被广泛应用于核能发电工程结构材料中。基于以上特点，锆及其合金还是制作燃料电池、通道及核反应堆堆芯其他部分的关键性材料^[20]。锆优良的耐腐蚀性决定了它在化学工程中的广泛应用，如制造储罐、管道、节流阀等，这些都使用在极度化学侵蚀环境中。而且，锆及其合金被用在空间工程、电子和冶金行业^[21]。因为它和活体组织有着生物兼容性，它近来被用于生物医疗工程中。锆还被用于消费产品（表壳、手链、首饰等）。

因为钆暴露于辐射中时有更大的热核中子捕获横截面积，因此这种金属被广泛用于核反应堆工业，在其中作为一个控制核反应的吸收核芯以及 WWER - 1000（俄罗斯）、加压水冷却反应堆（PWR）（日本）和沸水反应堆（BWR）（法国）等装置的保护系统，同时也用于保护电力传输设备。在反应堆中，钆的高耐腐蚀性允许它在没有外保护的状态下与水和蒸气直接接触。除了核能发电工程，钆还用在电气和无线电工程领域（电气陶瓷、个别型号的电解电容、整流器电极、阴极、高压气体放电管、X 射线和电视显像管、触点、电阻器和电解质等）。在冶金行业中，钆的使用改善了其他金属的力学和物理性能，把它掺杂在其他合金中间能形成

高温合金（耐热和耐火）。

增加特殊强度（抗拉强度）的钛被广泛应用于航天工程领域^[22]。特别是在航空领域，钛扮演了一个非常重要的角色^[23]。在战斗机发动机中，钛及其合金占据了20%~30%的重量。在波音777中，钛合金的重量占到整个飞机重量的5%~7%^[24]。传统工业中，钛和钛合金被使用在化学工程领域（化学腐蚀严重的储罐、管道、止流阀），造船工业（外壳、节流阀、热交换器），电力设备制造（核电站热交换器），海水淡化，食物机械制造（储水池、热交换、厨房器皿）^[25,26]。在钛新的应用领域中，值得一提的是体育产业（高尔夫俱乐部、自行车、网球拍）^[27]，医疗器械（传统的假肢和假体、轮椅等）^[28]，消费商品（表壳、首饰等）^[29]。在海上天然气和石油平台钛的使用也在增加^[30]。钛新的有发展前景的应用领域包括土木工程（屋顶、体育馆、航站楼、窗户框架、通风系统）、建筑外装饰^[31]以及电动汽车结构件（弹簧、轮盘等）^[32]。

因此，高反应性金属有着独一无二的物理和化学属性，这些特性决定了这些金属及其合金可以被用在航天工程、核工业、化学工程、电子工业以及其他高技术领域（使用其他材料难以胜任）的工艺和技术上。

1.2 高反应性金属铸锭的生产技术

间隙元素（氮、氧、氢和碳）对于高反应性金属的特性有一个重大的影响。甚至0.1%的间隙元素就能降低金属的延性，提高强度和硬度，破坏它们的性能并使它们不再适合加工。因此，高反应性金属铸锭的熔炼都在真空中进行^[21]。

初始炉料中的间隙元素含量维持在低水平是非常重要的，高纯度初始炉料的生产技术非常复杂，并且消耗劳动力。

钛、锆、钪有几种生产技术：减少氧化物法（碳还原或者金属还原方法），减少卤化物法（金属还原、氢还原法）以及电解法。以下方法是工业生产中最广泛采用的冶炼方法：

- 1) 锆镁还原四氟化锆 ZrF_4 ^[33,34]；
- 2) 钛镁还原四氯化钛 TiCl_4 ^[35,36]；
- 3) 钪镁还原四氟化钪 HfF_4 ^[4]。

钛、锆、钪在还原过程中以海绵体形式得到。为了生产高反应性金属铸锭，最初的冶炼技术包括VAR、VIM和EBM^[37]。为了形成VAR的自耗电极，初始的处理技术是对海绵体进行压缩。

应当指出，在真空熔炼的过程中，伴随有气体和其他间隙元素杂质的析出。结果^[38]显示EBM技术中，金属中间隙元素杂质的去除量要比VAR高。这完全是由于EBM和VAR熔炼的设计和技术特点决定的。

VAR 的热源是一个在结晶器中自消耗电极以及熔化金属表面之间直流电弧的燃烧(见图 1.1)。自耗电电极在电弧的热效应下熔化,同时金属也在电弧的热效应下熔化,使得熔化了金属流进结晶器。作为一项规则,熔化是在一个密封水冷的铜结晶器中进行的,在熔化室中气压维持在 $0.1 \sim 1.0 \text{ Pa}$ 。

就精炼的效率来说,VAR 技术的一个缺点就是电极只能在熔炼池的表面扫描加热。在这样的条件下,杂质只能通过一个有底的结晶器的侧壁和自耗电电极之间的狭窄的圆形缺口排出,这个缺口宽度通常不会超过 $30 \sim 50 \text{ mm}$ 。

这阻碍了电弧区域气体杂质的排除^[39],因此在这个区域气体压力会超过 100 Pa ^[40]。而且表面相当多的杂质气体蒸发后,在电极表面和结晶器墙壁上凝结。随着电极消耗以及熔化金属平面的升高,杂质元素又会返回到金属中。此外,在 VAR 期间,熔融金属的保持时间也是有限的,在没有电弧的情况下,由于电极消耗速度的降低所引起的重熔融速率的下降,仅仅可能发生在在一个狭小的范围内,这也妨碍金属脱气反应完整地进行。

目前,EBM 技术对于高温耐火材料以及高反应性金属的铸锭生产,拥有最好的口碑^[41,42]。它的优点在于在真空环境下高的精炼效率,对熔炼金属以及对金属和合金进行处理,真空是一个很好的屏蔽环境。例如,在 0.1 Pa 压力的残余气体中,就氧含量的真空纯度来说比工业氩的 100 万倍还高。电子束能量的高度集中,在熔炼金属时会超过金属的熔点使得熔炼池表面大幅加热^[43]。这在精炼反应动力学上有非常好的效果,随着温度的增加,同时伴随有杂质扩散系数的增加和表面化学反应速率常量的增加。

熔体气相的高稀薄也改善了非均质脱气动力学条件,同时它导致了内相间所形成的分子快速地被移除。真空中熔融金属的停留时间是决定金属杂质和非金属夹杂物从金属中被移除彻底性的主要因素之一^[44]。一个独立的 EBM 电源允许对于铸锭熔化速率和金属在液体状态下停留时间的大范围调节。

此外,与 VAR 形成对照,EBM 过程对自耗坯料的机械强度几乎没有要求。固体电极、块坯料、片状坯料、海绵体坯料等,都可以被用作初始炉料。

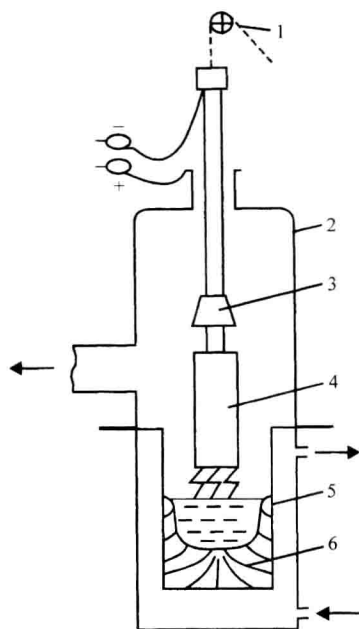


图 1.1 VAR 流程图

- 1—原料进给机构 2—真空室
- 3—电极夹 4—原料
- 5—有底的水冷铜结晶器
- 6—已经熔化的铸锭

1.3 电子束熔炼技术和装备

电子束熔炼金属的可能性最早在 19 世纪末被证明。通过电子束熔炼所生产的第一批纯钽和其他金属的锭坯是在 20 世纪初完成的^[45]。然而, 仅仅是到了 20 世纪 50 年代, 空间技术和核电工程的快速发展, 需要有从质上有突破的新型结构的金属材料, 才导致了电子束 (EB) 技术 (熔化、焊接、涂层等) 发展和商业化运作。从那时起, 通过 EBM 方法熔炼金属获得了持续不断的发展^[46-48]。EBM 技术迅速增长的原因是它能获得高质量的金属, 这一点是其他熔炼方法所不能比拟的。

电子束在电子枪中产生, 在电子枪里面发射自由电子, 电子在静电场中被加速, 束流在电场和磁场下聚焦和偏转。

在加速电压的影响下, 在电子源的静电场里, 后者被加速到 v_e (m/s), 由以下的公式表达:

$$v_e = 5.93 \times 10^5 \sqrt{U} \quad (1.1)$$

式中 U ——加速电压 V。

加速之后, 电子获得动能

$$E_e = \frac{m_e v_e^2}{2} = eU \quad (1.2)$$

式中 m_e ——电子质量;

e ——电子电荷量。

因此, 加速以后电子束的功率将是

$$W = n_e \frac{E_e}{t} = \frac{n_e e}{t} U = IU \quad (1.3)$$

式中 n_e ——电子数量;

t ——时间, 单位为 s;

I ——电子束电流, 单位为 A, $I = \frac{n_e e}{t}$

电流 I 与加速电压 U 由朗缪尔关系确定:

$$I = k_e U^{3/2} \quad (1.4)$$

式中 k_e ——电子束的全导率, 叫做导流系数, 是一个和电子—光系统 (电子枪) 有关的常数。

EBM 过程的物理基础是电子动能的变换, 电子在电场内被加速到 $10^4 \sim 10^5$ m/s, 在金属表面减速形成热能。电子动能在金属表面剧烈运动加剧了金属原子的剧烈运动, 使得金属温度升高^[49]。加速电子的最大穿透深度 $\delta_{\max}$ (m) 取决于原子质量 M (kg/mol) 元素序数 Z 和金属密度 ρ (kg/m³), 并且与加速电

压的二次方成正比^[50]，即

$$\delta_{\max} = A_3 \frac{M}{Z\rho} U^2 \quad (1.5)$$

式中 A_3 ——常量。

加速电子在金属中释放它的动能是不均匀的（见图 1.2），最大热量在最后阶段才被释放。因此，电子束事实上是一个体积能量源。但是，电子束加速电压一般是 20 ~ 40kV，在金属中它的穿透深度从 1μm 到几微米。

因为电子击穿金属的深度有限，所以电子束可以被认为是一个表面热源。

形成一束加速的自由电子流（电子束）的设备叫做电子枪（见图 1.3）。作为一个规则，在电子枪中的自由电子源是一个热阴极，比如钨，即丝、棒或颗粒的材料带具有低功函数。在热阴极下发射的电子，在阴极和阳极之间被加速（电位差维持在 20 ~ 45kV），形成的电子束通过一个孔导向进入阳极，聚焦电磁透镜系统提供电子束约束形状，而电磁透镜偏转系统改变一个电子束的路径让它朝着设定的方向偏转。当电子失去能量并且和气体环境中的分子原子碰撞而消散时，电子枪内部被一个气动油泵抽成 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa 压力的真空。

导致能量耗散的各种物理过程发生在电子在从热阴极到被加热金属的路径中，以及它们的相互作用过程中（见图 1.4）。当电子束穿过真空室气体环境时，能量在激发和电离周围原子过程中损耗，也因为电子运动和熔炼室中的等离子体相互作用而引发的微波频率振荡而损耗。

这些损耗占用 1% ~ 15% 的电子束能量^[51]。损耗值很大程度上取决于熔炼室气体的剩余压力。因此，在熔炼过程中熔炼室的压力应维持在 0.01 ~ 1Pa。

当电子被反射回来时，与加热的金属碰撞，这些电子可能被吸收。吸收电子动能的过程也会转化成 X 射线、二次辐射和热能。X 射线所消耗的功率（kW）可以

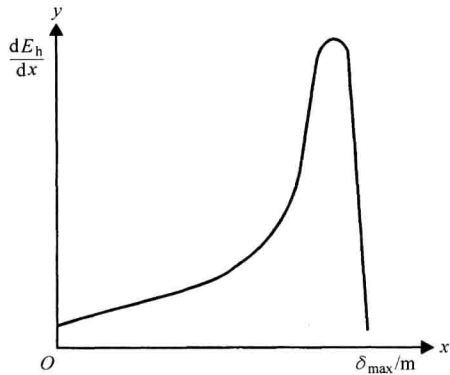


图 1.2 熔化金属时电子的动能损耗与穿透深度的关系曲线

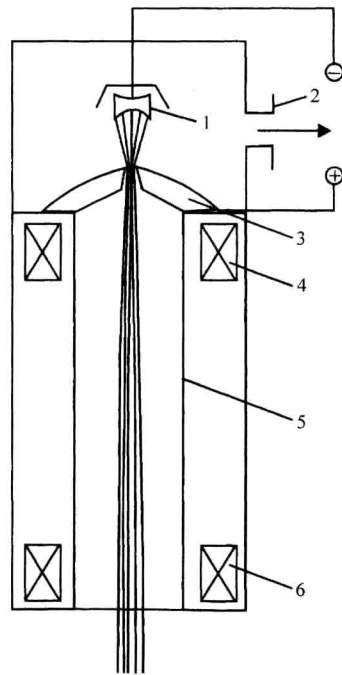


图 1.3 电子枪原理图

1—阴极 2—抽真空系统 3—阳极 4—聚焦系统 5—光波导系统 6—偏转系统