

等离子工艺与设备在 冶炼和铸造生产中的应用

[乌克兰] Б.Е. ПАТОН Г.М. ГРИГОРЕНКО
И.В. ШЕЙКО В.А. ШАПОВАЛОВ 著
В.Л. НАЙДЕК В.Н. КОСТЯКОВ

许小海 汪 源 李兴华 袁庭宪 徐海莎 译
李建新 审



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2018-5512 号

内 容 提 要

本书共 8 章，内容包括：低温等离子体的物理现象、性能与特点；低温等离子体发生器（等离子枪）的种类和特征；等离子体加热过程中熔融金属与气体的相互作用；等离子体加热在冶金工业中的应用；带水冷结晶器等离子电弧炉的结构特点；带水冷结晶器的等离子重熔工艺；等离子体加热在铸造生产中的应用；等离子电弧炉熔炼金属的质量等。

本书可供从事冶金专业的工程技术人员阅读使用，也可供相关专业的大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

等离子工艺与设备在冶炼和铸造生产中的应用/(乌克兰)
B. E. 巴顿等著；许小海等译. —北京：冶金工业出版社，
2018. 9

ISBN 978-7-5024-7803-2

I. ①等… II. ①B… ②许… III. ①等离子冶金
IV. ①TF19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 144543 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 戈 兰 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 李玉山

ISBN 978-7-5024-7803-2

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018 年 9 月第 1 版，2018 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；25.25 印张；613 千字；389 页

136.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 touguxin@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)



译者序

等离子冶炼是 20 世纪 60 年代出现的新型冶炼工艺。它不是为了取代传统的冶炼工艺，而是为了更有效地精炼小数量、满足特种需求的高端优质合金材料。

等离子冶炼能够产生高温，让气体发生电离，产生导电性，让自由电子形成的电流在电弧阳极斑点内猛烈轰击炉料，传递能量。

不仅如此，等离子冶炼的最大本领是能够在有限熔炼空间内把纯净的氩气、氧气、氢气、氮气激发为等离子体。电子与正电荷频繁发生离解与复合。在温度较高的电弧中心，气体分子分离为原子，原子储存了更多热量。在离开电弧中心稍远处温度略有下降时，原子又复合为分子，释放出储存的热量。等离子体的热对流使上述过程循环往复地进行。这些过程在促使温度均衡的同时造成了气相振动。这种振动会传递到与气相交界的液态金属表面，使后者也进入振动状态。随着金属以液态薄膜的形式逐层熔化，熔滴穿过气相包围落入熔池，以及熔池内金属的搅拌和翻滚，金属像过筛子一样获得与振动态气相接触的机会。这样，就能最大限度地引发和加速冶炼者希望发生的那些化学反应，实现对液态金属的精炼或改性。气体发挥了工艺作用，可以称之为“工艺性气体”。

在大气层内，等离子体只能在特定空间内暂时存在，一旦条件消失，气相振动会逐渐停息，液态金属中合金成分与晶体结构的均匀有可能被重新打破，化学反应的良好结果有可能保留不住。所以必须在液态金属状态尚好的时候把冶炼者希望的结果固定下来。等离子冶炼通过在水冷结晶器中完成熔炼和快速成锭，实现了固定金属熔体良好状态的目的。

炼制高氮钢是等离子冶炼的拿手好戏。高氮钢是 20 世纪 60 年代以来获得蓬勃发展的新兴钢种。人们通常把氮含量高于 0.40% 的钢称为高氮钢。炼制高氮钢有两个难点：一是通常需要用含氮铁合金加氮，氮含量提高的同时，碳含量也会提高，不利于某些钢材性能；二是在不同成分的钢中氮气溶解度有一定极限（标准溶解值）。当氮气含量超过标准溶解

值时,富余的氮气无法保留在金属内,会以气泡形式从金属熔池中解析出去。等离子冶炼是能够解决这一难题的方法之一。在等离子气源中加入一定数量的氮气,能够把氮气激发为等离子体。强烈振动的氮气粒子在液气相交界面猛烈撞击金属粒子,由于粒径小于金属粒子,所以迅速进入金属粒子内部,形成化合物。饱含氮气的金属粒子在熔池搅拌和分子对流扩散作用下快速转移到金属熔池深处。水冷结晶器让金属熔池底部以高于氮气解析的速度完成结晶。抽锭机构不停顿地把结晶的钢锭抽出熔炼室。大量氮气粒子就这样被锁在了固体金属里。在采用等离子重熔的所有牌号的含氮钢与合金中,氮气的实际溶解度都远高于标准溶解值。根据任务需要,还可以通过调节等离子气源中氮气比例等方法控制实际氮含量。运用等离子重熔工艺时,氮气成为一种独立的合金元素。加氮过程不需要高压,也有助于提高生产安全性。

等离子冶金工艺具有很强的兼容性。它与电渣工艺配合使用,可更有效清除磷、硫等其他非金属夹杂物。它与感应熔炼配合使用,可提高熔炼强度,缩短熔炼时间。它还能与外加电磁场配合使用,培养难熔金属单晶体,发展新型增材制造。

等离子冶炼能够在熔化金属的同时精炼金属。这一特点使它在回收利用废弃贵重金属方面发挥着十分重要的作用。

等离子重熔工艺的理论基础是什么,为什么能够产生“神奇”的效力?等离子重熔设备的结构有哪些种类?它们能单独做什么事,与其他冶炼设备配合做什么事?它们制备了哪些金属,其纯度与力学物理性能如何?这一定是冶炼者们所关心的问题。

《等离子工艺与设备在冶炼和铸造生产中的应用》一书详尽地回答了上述问题。这是一部全面归纳等离子冶炼理论与实践的专著。它既概括了国际上已经公开发表的大量学术文献,也展示了作者自己几十年来取得的理论研究成果和在实验室试验、工业化试验,以及工业应用中取得的宝贵经验。这部专著对于促进等离子冶炼技术的发展具有里程碑的意义。2017年5月本专著荣获乌克兰国家科学院颁发的2017年度优秀科学著作奖。

《等离子工艺与设备在冶炼和铸造生产中的应用》的六位作者都是几十年在焊接、冶金和金属材料科学领域辛勤耕耘、硕果累累的乌克兰著

名科学家。他们是：

巴顿·鲍里斯·叶甫根尼耶维奇 (1918. 11. 27—)，教授，技术科学博士，乌克兰国家科学院院士，巴顿电焊接研究所所长。焊接、冶金和材料学领域学者。1962 年至今任乌克兰国家科学院院长。

基于他杰出贡献被授予乌克兰社会主义劳动英雄两次，列宁勋章四次，十月革命勋章，劳动红旗勋章，人民友谊勋章，雅罗斯拉夫大公 1 级、4 级、5 级勋章。此外还被授予：M. V. 莱蒙诺索夫、C. Y. 瓦维诺夫、C. P. 科罗廖夫、A. 爱因斯坦、V. Y. 维尔纳斯基、M. 哥白尼、V. G. 舒霍夫金质奖章，K. E. 齐奥尔科夫斯基俄罗斯宇航科学院一级荣誉勋章，捷克斯洛伐克科学院金质奖章，哈萨克斯坦科学院金质奖章，洛桑大学（瑞士）金质奖章，世界知识产权组织（日内瓦）金质奖章。同时他还是科学技术领域列宁资金、斯大林资金获得者，乌克兰国家科学技术奖金获得者。

格里戈连科·格奥尔吉·米哈伊洛维奇 (1939. 8. 24—)，技术科学教授，博士，乌克兰国家科学院院士。乌克兰国家科学院巴顿电焊接研究所学部主任。焊接、冶金和材料学领域学者。乌克兰国家科学技术奖金获得者。

申科·伊万·瓦西里耶维奇 (1943. 8. 7—)，技术科学博士。乌克兰国家科学院巴顿电焊接研究所主任研究员。冶金和金属工艺领域学者。

沙波瓦洛夫·维克多·亚历山大洛维奇 (1950. 11. 9—)，教授、技术科学博士，乌克兰国家科学院通讯院士。乌克兰国家科学院巴顿电焊接研究所学部主任。冶金和金属工艺领域学者。乌克兰国家科学技术奖金获得者。

纳伊杰科·弗拉基米尔·列欧恩季耶维奇 (1937. 8. 9—)，教授，技术科学博士，乌克兰国家科学院院士。乌克兰国家科学院金属与合金物理工艺学院院长。冶金、金属工艺和材料学领域学者。乌克兰国家科学技术奖金获得者。

科斯佳阔夫·弗拉基米尔·尼古拉耶维奇 (1934. 12. 25—)，技术科学博士。乌克兰国家科学院金属与合金物理工艺学院主任研究员。冶金和金属工艺领域学者。乌克兰国家科学技术奖金获得者。

2013 年，这部专著的作者之一沙波瓦洛夫教授把一本刚刚出版尚存

墨香的著作赠送给我，并把等离子冶炼的神奇故事讲给我听。此后的日子里，我们一起把书中的一些内容编译成文章发表在我国刊物上，印制成小册子呈送给相关机构和企业，在国内研究院所协助下举办讲座，采取多种方式推介等离子冶金工艺。然而零散的介绍毕竟传达不了专著所蕴含的海量信息。所以在原作者们的一致支持下，我下决心把这部专著翻译成中文，把书中有益信息最大限度原汁原味地展现给我国读者，希望对我国等离子冶金事业的发展起到促进作用。

本书第1、2、5、6章由汪源翻译，第3、7章由李兴华翻译，第4章由袁庭宪翻译，第8章由徐海莎翻译。许小海对全书译文进行了校对和最终审定。汪源对校审全程给予了密切协助。李兴华参加了全书校审工作。所有不易理解的地方均得到沙波瓦洛夫教授耐心细致的讲解。河钢集团钢研总院的李建新博士对译稿进行了技术审核。重庆材料科学院王东哲副院长审阅了译稿并提出宝贵的修正意见。在此一并对他们的支持和帮助表示诚挚感谢。感谢冶金工业出版社出版这部译作，使广大中文读者得以一窥等离子冶金的奥妙。

翻译这部专著对我和我的翻译集体来说不是一件容易事。虽然付出了最大努力，但水平所限一定留有不少疏漏，衷心表示歉意，并希望读者把指正意见转达给我们，再版时加以修正。

本书的翻译出版得到武汉枢驰科技有限公司的资助，在此一并表示感激。

许小海

2018年1月

审者序

许小海先生请我从冶金专业角度审核一遍《等离子工艺与设备在冶炼和铸造生产中的应用》的译文。因此我有幸先于其他中国读者阅读了这部译著。

这部专著的第一作者巴顿先生将于2018年11月年满百岁华诞。其他几位作者也都是自20世纪五六十年代即开始从事冶金专业研究与创造的科学家。他们凭借自己深厚的理论功底、广阔的国际视野和丰富的实践经验,对等离子冶炼工艺的基本规律与特点,等离子设备的结构、应用领域与应用效果进行了系统和详致的论述。这部专著2017年5月荣获乌克兰国家科学院颁发的2017年度优秀科学著作奖,足以说明它的学术价值。

等离子冶炼给我印象最深刻的一点是对氩气、氧气、氢气、氮气的高效利用。将等离子体,即气体的等离子状态,应用到冶炼和铸造生产中,无疑打破了冶炼和铸造领域利用这些气体的常规,使这些气体在强化冶炼过程、精炼金属与金属合金化方面所起的作用发生了一个质的飞跃,可以说把这些气体在冶炼过程中促进化学反应的作用发挥到了极致。

等离子体在熔炼空间内发挥的最大作用之一,是通过气体分子和原子的电离与复合、分解与复合创造出一种强烈振动的气相环境。振动对于加快化学反应的速度与深度发挥了极大作用。专著中把这种状态称为“激发态”是有充分科学依据的。

振动气相环境强烈作用于金属熔体表面,使后者也进入振动状态,为加速在那里发生的物质传递,包括反应物输送与化合物扩散提供了良好条件。等离子体加热类似于电渣重熔加热,能够通过坯料熔化时的液态薄膜、熔滴和熔池表面,创造出最大的金属表面积,而使液态金属与振动的气相拥有最大的接触面积则是等离子冶炼超凡能力的关键支点之一。

等离子体来源于气体，具有气体所特有的强大流动性。所以等离子体加热金属时不仅有电弧传递热量，而且有等离子体热对流作为热能载体发挥热量传递作用。电弧传递热量是直线性的，而等离子体热对流则是在熔炼空间内自由流动，无孔不入。这一特点对于使用碎屑状、块状或粉末状炉料进行熔炼具有现实意义。对于感应炉熔炼块状炉料也具有特殊意义，将炉料熔化的时间减少了二分之一。

低温等离子体能够产生远高于高温金属熔点的温度。所以，当以难熔金属作为原料制备颗粒状粉末，或者进行增材制造时，等离子加热能够发挥良好作用。

等离子冶炼在使用氧气、氢气、氮气对金属进行熔炼、精炼和合金化的同时，能够使用氩气进行保护。这对于冶炼高合金金属，防止低熔点合金元素损失具有重要意义。

等离子冶炼另一大特点是它的兼容性。高温，激发态的氩气、氧气、氢气、氮气，各种性质的炉渣，惰性气体创造的准真空状态等，这些功能的有效组合，使它兼备了在一个炉次中熔化各种形状金属炉料、精炼、去除夹杂与合金化（变性）的功能。这一特点使它特别适合于回收利用贵重金属废料。

本书的翻译者原本不具备冶金学科的教育背景。但是他们能深入领会原作者所叙述的冶炼与铸造生产的现象与过程，细心考证相关的专业术语，使得这部译著叙述通畅，逻辑清晰，语言简炼，看得出是下了功夫的，态度是极为严肃认真的。我国目前有关等离子冶炼的论述在系统性和理论性上尚显薄弱。把国外的最新科研成果介绍到国内来是一件有益的事。希望等离子冶金工艺在国内得到更多的关注、研究和应用。

李建新

2018年1月

作者序

我们是《等离子工艺与设备在冶炼和铸造生产中的应用》一书的作者，这本书的中译本能够在中国出版发行我们感到非常高兴。

这本书总结了长期致力于低温等离子体物理化学、热工程物理、冶金、金属学、铸造生产等领域研究的科学家和设计师们自 1960 年以来的研究成果。

20 世纪中叶冶金领域提出了提高金属质量的迫切需求。真空冶金与电渣重熔技术得到迅猛发展。大约 10 到 15 年后，低温等离子体进入冶金领域。等离子冶金的许多工艺路线参考了真空电弧重熔和电渣重熔的经验。等离子冶金采用的熔炉，基本工作方式是在一个较短的结晶器中熔炼钢锭随后将其拉出。这也成为等离子熔炉构造的特点并决定了等离子冶炼工艺的特点。

等离子电弧工艺与真空电弧重熔和电渣重熔的主要区别，是重熔过程中对等离子气源的利用，这使它可以在熔炉的熔炼空间内创造出氧化、还原或中性气氛。在等离子电弧作用下，气体的活泼性和化学反应的进行速度均有极大提高。这就为气体发挥脱氧作用或实现进入金属的饱和度创造了条件。新的工艺能力得以拓展，例如用气相氮使金属合金化。以这种方式给金属增氮不再需要使用专门炼制的含氮铁合金。另外，在等离子电弧作用下可以得到含氮浓度高于氮气标准溶解值的金属。

等离子体对流与金属相互作用，还可以对金属精炼、排除夹杂产生良好影响。以氧化物形式存在于金属中的夹杂可以被多种机制清除掉：分离，凝结，使夹杂颗粒浮上金属表面，或者借助于脱氧剂或气相中活泼的氢气进行还原。

等离子电弧与固体和液态金属的相互间物理作用也具有自己的特点。电弧直接对金属产生物理作用。让数支等离子枪以不同角度吹向熔池表面，可以形成深度最小的熔池，最大限度地搅拌金属，极大程度地改变

结晶过程和液气相物质交换过程。等离子电弧重熔工艺的这些特点可以保证炼制出只有这种工艺能够实现的性能优良的金属。

本书是一本系统讲述等离子冶金著作。我们期待本书对冶金专业的大学生、研究生、科技工作者和工程师们带来补益。

很荣幸在中国有一批志同道合的人付出巨大努力将这本书翻译给中国读者。特别感谢许小海先生、汪源女士和他们的同事为翻译此书花费了许多时间和精力。感谢中国学者和冶金学家李建新先生、王东哲先生审阅了译文，保证了译文技术上的正确，并且帮助我们排除了原作中一些不精确之处。还要感谢中国冶金工业出版社出版发行这本书的中译本。

我们期待，这本译作能给中国读者带来阅读享受。



2018年1月18日

目 录

概论	1
第1章 低温等离子体的物理现象、性能与特点	5
1.1 电弧与等离子体的基本过程	5
1.2 获得低温等离子体的方法	7
1.3 等离子火焰的温度	9
1.4 低温等离子体的基本特性	10
1.5 等离子电弧稳定燃烧的条件和直流电弧调节办法	16
1.6 生成等离子体的工艺性气体	21
1.6.1 氩气	21
1.6.2 氮气	23
1.6.3 氦气	24
1.6.4 氢气	24
第2章 低温等离子体发生器	26
2.1 等离子枪的分类及特征	26
2.2 电弧等离子枪	26
2.2.1 射流式电弧等离子枪	28
2.2.2 直接作用电弧等离子枪	35
2.2.3 冶炼用电弧等离子枪的结构特点	43
2.2.4 直流等离子枪	51
2.2.5 交流等离子枪	55
2.2.6 带等离子电极的等离子枪	66
2.2.7 交流等离子加热设备	71
2.2.8 浸入式等离子枪	72
2.2.9 带空心石墨电极的等离子电弧加热器	75
2.2.10 真空等离子枪	77
2.2.11 用电磁力稳定电弧的水冷非自耗电板	81
2.2.12 自耗等离子枪	85
2.3 感应等离子枪	87
2.4 等离子体燃料燃烧器	91
第3章 等离子体加热条件下金属熔体与气体的相互作用	94
3.1 金属熔体与气体多相反应的基本规律	94

3.2 等离子体加热过程中对金属熔池的热传递	98
3.3 等离子体熔炼金属过程中气体交换的基本规律	100
3.4 等离子熔炼过程中金属熔体吸收氮气和氢气的动力学规律	104
3.5 合金元素对金属熔体从等离子体中吸收气体的影响	107
3.6 活泼金属吸收氮气的特点	113
第4章 等离子体加热在冶金工业中的应用	118
4.1 矿石还原	119
4.2 在有耐火材料内衬的等离子电弧炉中熔炼金属与合金	132
4.3 在水冷坩埚和结晶器中用等离子电弧重熔金属与合金	147
4.3.1 等离子电弧凝壳熔炼	147
4.3.2 在水冷结晶器中进行的等离子电弧重熔与成锭	156
4.4 熔炼和加工金属熔体与钢锭的特种方法	161
4.4.1 用等离子加热源在钢包炉中加工金属	161
4.4.2 用低温等离子体重熔金属坯料表层	168
4.4.3 培养难熔金属单晶体	179
4.4.4 制备颗粒状金属粉末	185
4.4.5 制备非晶态和微晶态结构的金属带材	189
第5章 带水冷结晶器等离子电弧炉的结构特点	195
5.1 等离子电弧炉的结构件、执行机构和保障系统	195
5.1.1 熔炉框架	195
5.1.2 熔炼室	195
5.1.3 等离子枪及其控制机构	196
5.1.4 结晶器	197
5.1.5 底座	197
5.1.6 自耗坯料供料机构	198
5.1.7 抽锭机构	200
5.1.8 存锭室	201
5.1.9 水冷系统	202
5.1.10 等离子气源供给、净化和循环系统	202
5.1.11 真空系统	203
5.1.12 等离子枪电源系统	204
5.1.13 锁定和信号报警系统	204
5.2 用于金属与合金提纯或用氮气进行合金化的熔炉	205
5.3 用于重熔钛回炉料的熔炉	211
5.3.1 重熔薄板状钛回炉料的 U-599 型等离子电弧炉	211
5.3.2 重熔低等级海绵钛的 UP-100 型等离子电弧炉	218

第 6 章 带水冷结晶器的等离子重熔工艺	235
6.1 在等离子电弧炉中用氮气对钢与合金进行合金化	236
6.2 利用含氢等离子体进行金属与合金脱氧	244
6.3 等离子电弧重熔时的提纯过程	250
6.3.1 在惰性气体中进行提纯重熔	250
6.3.2 清除非金属夹杂物的提纯	255
6.3.3 利用等离子体和炉渣进行金属脱硫	259
6.3.4 利用氧气进行金属脱碳	263
6.3.5 通过蒸发夹杂物实现提纯	265
第 7 章 等离子体加热在铸造生产中的应用	270
7.1 电磁感应现象及其基本规律	270
7.2 电磁场内的热量释放与导体加热特性	274
7.3 金属感应熔炼方法与熔炼设备分类	278
7.4 提高感应坩埚炉熔炼强度的方法	282
7.5 等离子感应炉	285
7.6 交流等离子电弧设备	292
7.7 等离子感应炉的热效应	301
7.8 等离子感应炉的冶炼工艺	305
7.8.1 炉内气氛	306
7.8.2 熔体与氧气的相互作用	308
7.8.3 碳与氧的相互作用	309
7.8.4 合金元素的氧化	313
7.8.5 有害杂质的表现	314
7.8.6 熔体与氮气、氢气的相互作用	316
7.8.7 非金属夹杂物的表现	319
7.8.8 炉渣的工艺作用	322
第 8 章 等离子电弧炉所熔炼金属的质量	325
8.1 带水冷结晶器等离子电弧炉所熔炼金属的质量	325
8.1.1 滚珠轴承钢	325
8.1.2 结构钢	328
8.1.3 不锈钢	331
8.1.4 含氮奥氏体钢	332
8.1.5 高温合金	335
8.1.6 高速工具钢	337
8.1.7 精密合金	342
8.1.8 钛与钛合金	346

8.2 等离子感应炉熔炼金属的质量	349
8.2.1 结构钢	351
8.2.2 精密合金	352
8.2.3 高合金钢	353
8.2.4 高温钢	356
8.2.5 精坯料	357
8.2.6 铜合金	359
8.3 等离子体加热凝壳炉熔炼金属的质量	361
8.3.1 0X15H65M16B (ЭП567) 号镍基耐腐蚀合金	364
8.3.2 ЮНДК-35Т5 号磁性硬合金	365
结束语	366
参考文献	367

概 论

近几十年来,在经济发达国家冶金工业的生产实践中,优质钢与优质合金在总生产规模中所占比重呈现稳定增长的态势。不断提高钢材性能是冶金工业的现实任务,因为其他许多领域的生产规模和技术水平取决于各种结构钢的生产状况。

现代冶金工业广泛使用各种电加热源熔炼和提纯金属与合金,主要加热源有:(1)电弧;(2)工业高频电磁场(感应加热);(3)定向电子流(电子束);(4)电渣熔池中释放的焦耳热(电渣工艺);(5)低温等离子体。

各种电加热源的物理特性决定了其熔炼过程的技术和工艺能力。

20世纪30年代,德国对电弧放电现象进行了深入研究,诞生了第一批低温等离子电弧发生器(盖尔丁电弧)。随后,有人尝试在工业领域使用以气流稳定的长电弧(达1000mm)从天然气中合成乙炔,电压达到7000V,电流达到1000A。

20世纪50年代初期,美国和苏联展开了对原子弹和氢弹投送工具(火箭)的大规模研发,低温等离子体研究也因势而得到加速发展。在这段时间里,低温等离子体被视为等离子发电机的工作介质和测试航天器前端特种涂层强度的工具。

在很短时间内即取得了令人惊叹的成果:研制出了更好的低温等离子体发生器,阐明了低温等离子体的基础热物理特性,研发了电源和控制等离子体参数的方法与器材,更重要的是,研制出了航天器重返地球时表面覆盖层的防护材料。

最先利用低温等离子体激发技术的是从事切割与焊接的电焊工,还有在等离子离心机中分离同位素铀的化学家。

此后,电弧等离子体与感应等离子体被广泛应用在多项工艺技术中,例如:在金属与合金表面进行熔焊与喷涂,用不同成分的合金制备颗粒状粉末,局部性熔炼高纯度金属,对各种金属零件的表面进行强化处理,用等离子体机械切削、铣刨难加工金属与合金等。

低温等离子体技术在冶金工业的推广应用略晚一些。美国 Union Carbide Corporation 集团旗下的 Linde 公司率先宣布在半工业化规模上将低温等离子体用作熔炼金属与合金的加热源。可以认为,正是这家企业的专家们所做的工作对低温等离子体在冶金工业和铸造工业的推广应用产生了巨大推动作用。

由 Linde 公司建造的等离子电弧炉在外观上(实心的底座、用耐火砖铺砌的炉衬、烟囱状的拱顶)与一般的炼钢炉没有很大区别。为了给炉料和液态金属熔池通电,他们在炉体结构中增加了底部电极,并用等离子电弧枪代替了石墨电极。极大简化了电弧电压调节系统、整体结构以及电极夹臂控制系统。

炉子一经投入使用,便显示出等离子熔炼的一系列技术优势。首先,氩气被用作形成等离子流的气体。金属熔炼是在充满可控气体的环境中完成的,从而克服了多种合金元素特别是钛、锰、铝等元素烧损的弊端。等离子电弧稳定的工作状态还使耐火炉衬的使用寿命

命得以提高。所以尽管使用氩气略贵一些,但是等离子熔炼的经济性还是令人满意的,而所炼制金属的质量可以与真空熔炼金属相媲美。

这种炉子的主要缺点是,液态金属长时间与耐火材料铺砌的底座和炉壁相接触,导致金属被液态金属与炉衬交界处产生的反应物质所污染。

20 世纪 60 年代初期,乌克兰国家科学院巴顿电焊接研究所设计了在铜制水冷结晶器中重熔金属并结晶成锭的新工艺和新设备。这一技术是在电渣重熔和电子束重熔技术的基础上取得的新发展。

在发展初期,等离子电弧重熔在制备特殊用途结构钢的黑色金属领域(俄罗斯电钢厂和伊热夫斯克冶炼厂)和制备钛锭的有色金属领域(乌克兰扎波罗日钛镁联合工厂)找到了用武之地。不夸张地说,借助这项技术,世界上第一次在工业化生产规模上炼制出了含氮量超级均匀的钢与合金,并且合金化冶炼是利用气态氮完成的,没有使用昂贵的含氮铁合金。

用等离子电弧在铜制水冷结晶器中重熔金属合金的技术迅速得到推广。在许多冶炼厂有许多台熔炼炉在炼制着不同形式的(圆形的、方形的、直角形的)钢锭。

可以从结晶器中抽锭并使用多支等离子枪的熔炼炉不仅可以重熔规整的自耗坯件,而且可以重熔块状和片状活泼金属和高温金属(钛与钛合金)的回收料。

1974 年,拉科姆斯基 B. И. 在其专著《等离子电弧重熔》中总结了他在等离子体中的氮气、氢气与液态金属相互影响,以及多支等离子枪熔炼炉所制备金属质量方面的研究成果。

除了巴顿电焊接研究所,苏联的很多研究机构(苏联科学院拜科夫冶金研究所、莫斯科钢铁与合金研究所、伊热夫斯克冶炼技术科学研究所、拜耳金黑色冶炼中心科学研究所、乌克兰国家科学院金属与合金物理工艺研究所)和许多工业企业对等离子冶炼的理论和工艺,以及所制备金属的质量进行了系统研究。巴顿电焊接研究所的专家设计了系列型号的冶炼用等离子枪,建造了系列型号的水冷结晶器重熔炉。乌克兰国家科学院金属与合金物理工艺研究所的专家们为感应坩埚炉设计了等离子加热设备,以及制备异性铸件的金属与合金熔炼工艺。

还在苏联时期,不同结构和用途的等离子熔炼炉就炼出了 40 多个牌号的钢材与合金。用等离子电弧炉熔炼出的金属里,非金属夹杂物和气体杂质的含量已经与真空感应炉熔炼的金属相差无几。

20 世纪 70 年代,自耗式等离子枪(即一个空心的重熔电极同时起到等离子体发生器的作用)重熔得到了广泛的工业试验。

使用感应坩埚炉熔炼铸造合金,可以对液态金属进行深度热时效加工、提纯、合金化与其他种类的改性处理。感应炉的特点是具有高度工艺灵活性,能够保证按照指定化学成分制得相应金属,能够让金属以液体状态长时间储存,并且能够以任意份量产出液态金属。

为降低铸件生产过程中的能耗与金属消耗量,需要改进工艺,强化现有感应炉内的熔炼过程,并且制造新的高效熔炼装置。

国内外经验告诉我们,这些任务可以通过特种电冶金方法和手段顺利解决,其中包括

采用辅助性等离子加热设备。

在乌克兰,最先将辅助性等离子加热设备应用于感应炉的是乌克兰国家科学院金属与合金物理工艺研究所的专家。他们在很短时间内进行了大量科学研究、试验设计和工艺研发工作,得以形成发展熔炼铸造合金技术的新概念。与此同时,他们为感应炉(炉容为0.16~1t)研制了结构合理的辅助性等离子加热设备。

等离子感应炉可以重熔低品位的碎小金属废料、各种报废钢材和其他低品位原料。在密闭的等离子感应炉中合金元素的回收率可以达到很高水平,首先是锰、硅、铬、钒,可以达到98%~100%,钛、铝可以达到95%~97%。这种熔炼设备已经应用在许多铸造车间,用来加快熔化炉料和提高铸造钢材与合金(不锈钢、高温合金、工具钢等)的质量。

1991年,科斯嘉科夫B. H. 在其专著《等离子感应炉》中分析概括了国内外制造和使用各种用途等离子感应炉的经验并指出,使用等离子感应炉可以提高铸件生产的技术水平,实现对熔炼工段和车间工位的技术改造,提高劳动生产率和铸件质量。

在拉科姆斯基B. И. 和科斯嘉科夫B. H. 发表专著后的数十年里,低温等离子体应用领域出现了新的研究方向并且已经达到工业化应用水平,例如:

- (1) 等离子电弧凝壳熔炼;
- (2) 交流等离子加热设备;
- (3) 强化真空感应炉熔炼的三相电等离子电弧设备;
- (4) 在钢包炉中对钢材与合金进行等离子加热;
- (5) 使用等离子加热工艺重熔和提纯钢锭或坯件表层;
- (6) 使用等离子感应炉培养难熔金属的单晶体;
- (7) 制备非晶或微晶结构的金属带材;
- (8) 使用等离子化的工艺气体加工铸造有色合金。

在等离子电弧凝壳炉中,熔化的金属不会与炉衬发生相互作用,液态金属只接触由同类合金形成的凝壳。独立的高温热源可以熔化各种形式的炉料,可以让金属在液体状态保持任意时间,实现充分的重熔,然后再浇出。

在低压条件下进行的等离子电弧凝壳熔炼,可以重熔钛与钛合金废料。在表压条件下进行的等离子电弧凝壳熔炼,可以把熔炼过程与增氮过程相结合,用气相氮实现对金属熔体的合金化,然后在压力保护下浇入模具。这种熔炼方法可以用于生产高氮不锈钢和高氮合金铸件。

巴顿电焊接研究所的专家和设计师们制造了用于在钢包中加热和加工液态金属的超大功率交流等离子电弧加热设备,还制造了在炉容为1~3t的真空感应炉中强化熔炼过程的三相电等离子电弧加热设备。

针对重熔和提纯各种形式(圆形、直角形断面)钢锭或坯件表层的需求,他们也研究了科学原理,完成了工艺设计,制造了工业化样机,可以保证提高加工质量和金属合格率。

他们还研究并制造了专用设备,利用等离子感应工艺培养各种形状的难熔金属(钨和