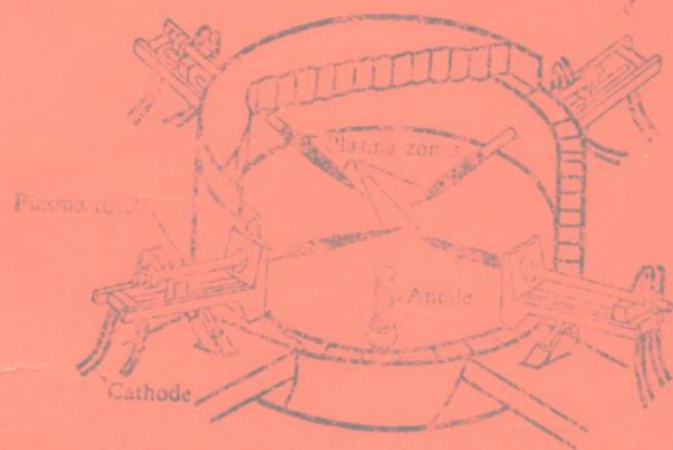


等离子体技术 在冶金中的应用

Jerome Feinman 主编

刘述临 金佑民 等译



北京工业大学出版社

6.16684
624

等离子体技术 在冶金中的应用

Jerome Feinman 主 编

刘述临 金佑民 等 译

北京工业大学出版社

内 容 提 要

本书论述了等离子体的性质,原理和等离子体粒料的传输现象;介绍了等离子体炉的结构、机械传动、电气控制和物料处理;还翔实地介绍了美国、法国和瑞典等国家等离子体在炼铁、炼钢、铁合金生产、废料处理、电弧重熔及有色金属冶金领域中的实际应用,并与普遍的冶金方法作了比较;最后介绍了等离子体技术的研究和应用展望。

本书可供钢铁冶金、有色金属冶金、冶金原理、高温化学和应用物理等领域的科研和工程技术人员使用,也可供高等工科大学冶金专业的师生参考。

等离子体技术在冶金中的应用

Jerome Feinman主编

刘述临 金佑民 等译

责任编辑 吴石忠 张信昭

*

北京工业大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京大兴沙窝店印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 17 1/8 字数 415000

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数0001~1500册

统一书号: ISBN7-5639-0060-8/PF·1 定价9.80元

2k442/03

译者序

当今等离子体发生器的制造、使用已走出了物理实验室，成为一种高效的能源装置推向工业。供工业用的兆瓦级的发生器在70年代已通过长寿考验，并且有高的供电效率、电热转换效率和传热效率。它不但能提供常规矿物燃料所不能达到的高温，而且气氛可控。另一方面，冶金工业也要求开拓高温和不产生环境污染新的能源。自然，冶金工艺就和等离子体科学走到一起来了。

本书系统地介绍了与冶金有关的等离子体技术，既综合了有关文献的研究成果，也反映了当今等离子体冶金的工艺实践，它是等离子体冶金领域中少有的，内容丰富、新颖的著作之一。

回顾冶金工业的历史，高炉由于使用热风而提高了100~200K的燃烧温度，形成了现代高炉；由于将蓄热室用于熟铁冶炼，马丁将燃烧温度提高了200~300K，才真正地炼成了平炉钢。冶金工业的重大进步总是和提高燃烧温度密切联系的。工作温度为4000K的低温等离子体用于冶金工业，将会产生人们还不能完全想象的冶金技术飞跃，为人类创造新的财富。

基于这种认识，我们几位冶金工作者和等离子体工作者自愿合作，共同译出了这样一本有启蒙意义的书。

《等离子体技术在冶金中的应用》实际上是1986年美国一个国际会议的论文集，但它不同于一般的会议文集，而是按专题作了综合整理与评介。它的前8章是等离子体技术，其中有的章节邀请了诸如E. Pfender教授这样国际等离子体学术界的著名学者撰写，而9~16章则是冶金中的应用。图文并茂，利于初学，也报导了最新的实践与进展。例如，报导了瑞典Landskrona在3×6MW炉子上冶炼钢厂粉尘，瑞典Malmö在48MW的规模下用PLASMA-

CHROME 法生产高碳铬铁，南非用 ASEA 的 14MW 的空心电极的炉子冶炼铬铁等，这些都是实实在在的等离子体大规模工业实践。

我们努力推动这本书的出版，它如能将我国的等离子体冶金事业推进一步，那将是我们最大的希望。我们更期待各位专家、同仁提出意见，推动合作。

本书前言、第 1、2、3、5、6 章由金佑民翻译，第 4 章由王本榕、陈端翻译，第 7 章由陈莉莉翻译，第 8 A 章由徐坚翻译，第 8 B 章由陈坤翻译，第 9 章由刘述临翻译，第 10、12 章由梁万林翻译，第 11 章由李怀正翻译，第 13、14 章由范光前翻译，第 15 章由曲英翻译，第 16 章由刘越生、陈燕如翻译。

全书完稿后，第 1 至 8 A 章由中国电子工程设计院高级工程师宋华英和北京科技大学吴石忠校对，第 8 B 至 16 章由北京科技大学刘述临和张信昭校对。

本书的出版得到冶金工业部科技司和陶晋总工程师、北京科技大学科研处和刘越生教授的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

译者：刘述临
金佑民

1988 年 9 月于北京

前 言

等离子体能量一直被视为稀有的和学术的珍品。然而现在，已经发展了更可靠、经济的产生并维持高能量等离子体的技术，在高温工艺过程中，等离子体的实际应用正预示着许多传统的生产过程将发生根本的变化。冶金工艺过程，特别是炼铁、炼钢过程，显然是发挥等离子体独特性质的最理想的领域。

冶金生产过程中应优先发展的是：改善过程控制；直接利用天然可用的原材料和燃料，而无需投资提高品位和/或精选；改善环境效果；显著扩大反应器及过程设备利用率；提高原材料、能源和人力的有效利用率。

由于等离子体在可控条件下具有高能级和高密度特性，所以它为冶金工艺过程技术发展的重要研究课题提供了灿烂的前景。

本书综述了等离子体产生和应用的物理、电 和 机 械 方面知识，使技术人员能够了解等离子体如何产生和怎样用于实际工艺过程。等离子体能量在冶金工艺过程中的应用则深刻强调了那些已有商业产品的以及在早期起过促进作用的项目，并尽可能作出经济上的评估，以便与传统方法进行比较。本书还评述了等离子技术在上述领域的发展前景，使技术专家和企业家在长远规划中考虑如何将等离子体应用到他们的生产中去。

主 编

Jerome Feinman

目 录

第1章 绪 论	(1)
第2章 历史评述	(7)
第3章 热等离子体的物理性质及热力学性质	(23)
引 言	(23)
基本过程	(26)
集体现象	(33)
等离子体中的带电粒子和光子	(38)
等离子体中的平衡	(41)
等离子体的热力学性质	(45)
热等离子体的传输性质	(55)
小结和结论	(62)
第4章 等离子体产生的方法与原理	(71)
引 言	(71)
热电弧	(73)
热射频放电	(100)
小结和结论	(119)
第5章 等离子体-颗粒动量传递和传热的基础	(124)
引 言	(124)
颗粒注入技术	(124)
等离子体-颗粒动量传递和 传 热	(129)
单颗粒轨迹及温度变化	(141)
大量送粉条件下等离子体-颗粒相互作用	(153)
小结与结论	(158)
第6章 等离子体产生和控制的机电技术	(161)

引 言	(161)
电弧特性	(163)
电 源	(165)
电弧电压的波动	(168)
电弧的点火	(172)
电源控制系统	(174)
保护电路	(175)
等离子体约束的热负荷	(176)
对冷却剂传热	(178)
冷却系统中的压降	(181)
冷却系统设计指南	(183)
电弧稳定性与气体注入	(184)
电极过程	(184)
结构材料	(186)
等离子体发生器的安装和使用	(187)
运行参数	(188)
第7章 等离子体炬和等离子体炬炉	(194)
A. 电极	(194)
B. 等离子体炬	(206)
C. 等离子体炬炉	(214)
结 论	(221)
第8A章 石墨电极等离子体炉中的物料处理	(223)
引 言	(223)
电弧炉炼钢的电极气体注入	(227)
材料的熔化、熔炼和处理	(231)
熔融合金的强化精炼	(248)
第8B章 大功率、石墨阴极直流电弧等离子体——性	
质及其在炼钢、铁合金冶炼中的实际应用	(255)
直流、石墨阴极电弧的物理学	(256)

直流电弧的稳定性.....	(259)
过渡到扩散电弧.....	(260)
直流电弧-交流电弧-等离子体电弧的比较.....	(261)
直流电弧和等离子体电弧可达到的功率.....	(263)
直流电弧炉.....	(263)
底部联接器.....	(265)
变电站.....	(267)
用于矿粉还原的直流电弧炉.....	(269)
目前状况.....	(270)
第9章 等离子体技术在炼铁中的应用.....	(274)
高炉作业中使用等离子体能量.....	(274)
等离子体能源用于铁矿的直接还原.....	(278)
用等离子体法使铁矿石熔融还原.....	(287)
第10章 应用等离子体技术处理炼钢厂的废料.....	(309)
几种工业回收工艺.....	(310)
几种处理烟尘和炉渣的等离子体工艺.....	(313)
SKF Plasmadust 法.....	(314)
ScanDust厂头两年生产的经验.....	(319)
第11章 等离子体技术在炼钢过程中的应用.....	(327)
引 言.....	(327)
热等离子体技术在熔化和炼钢方面的应用.....	(328)
使用等离子体加热钢包.....	(364)
其它方面的应用.....	(369)
将来的发展.....	(369)
第12章 等离子体技术在铁合金生产中的应用.....	(380)
引 言.....	(380)
铁合金生产.....	(382)
等离子体法生产铁合金.....	(388)
等离子体法生产铁合金的工业评价.....	(409)

第13章 等离子体电弧重熔	(421)
等离子体电弧重熔过程的特征.....	(421)
等离子体电弧重熔的操作系统.....	(423)
等离子体电弧重熔系统的一般特点.....	(423)
惰性气氛的PAR炉.....	(425)
与炉渣精炼熔融金属相结合的惰性气氛PAR炉.....	(426)
空心自耗电极重熔的PAR系统.....	(428)
用于固结金属材料的PAR系统.....	(430)
用氮气作合金的PAR系统.....	(432)
等离子体弧热阴极熔化装置.....	(435)
生产单晶体的PAR系统.....	(441)
等离子体弧重熔过程.....	(442)
等离子体弧重熔锭的凝固.....	(444)
等离子体弧重熔期间熔池中的运动.....	(445)
等离子体弧重熔去除气体杂质.....	(445)
PAR锭子的结晶特点.....	(447)
等离子体弧重熔时电场的影响.....	(447)
PAR过程的灵活性和PAR合金的质量.....	(448)
第14章 等离子体技术在有色金属和其它方面的应用	(453)
引 言.....	(453)
粗金属生产.....	(455)
电 解.....	(467)
二次金属生产.....	(468)
制 作.....	(474)
结 论.....	(478)
第15章 钢铁生产应用等离子体技术与普通方法的经济比较	(486)
引 言.....	(486)
高炉炼铁应用等离子体技术.....	(487)

用等离子体的直接还原与普通直接还原法 的经济比较.....	(492)
用钢铁厂粉尘回收金属.....	(503)
等离子体加热化铁炉.....	(505)
第16章 发展问题的评价及未来展望.....	(507)
总的展望.....	(507)
还原/熔炼过程.....	(509)
高炉和气化方面的应用.....	(511)
重熔操作.....	(512)
钢包冶金中的应用.....	(514)
回 收.....	(515)
表面处理技术.....	(516)
粉末生产.....	(516)
预热和再加热的应用.....	(518)
作者索引.....	(519)
主题索引.....	(520)

第 1 章 绪 论

J. Feinman

(J. Feinman and Associates, Inc.)

首次提出作为钢铁学会/美国冶金工程师学会(ISS/AIME)的课题,出版一本关于等离子体技术在冶金工艺过程中的应用的书籍之初,有各种意料中的反映。一方面,似乎除了学术上和非常特殊的场合,等离子体并无许多用处,因而就产生疑问:“该书是否有充足的内容及大量的从事各种工作的一般读者?”;另一方面,确实有重要的应用待开发,也有实现了商品化的应用,所以也出现了另一种相反意见:“这样的书是及时的和适用的。”幸而第2种观点占优势。本书编著始于1983年,1986年底出版。类似本书前言的报告书作为大纲以及建议写的章节提要,送给诸编著者,得到了他们的赞同。

为使这本书既是完善的,又不致有太多的高技术的细节,选择了那些能阐明基础和工程原理的诸位著者。他们同意叙述基本的内容,尽可能多的概括实践,不叙述太高深的理论以免使章节内容太神秘。这里再次说明全书的写作宗旨——简明扼要。本绪论的其余部分将简要介绍热等离子体的起源和发展,历史梗概及本书内容。

表 1-1 列出了等离子体技术发展的重大事件。它说明许多重要的概念,即使不是在技术人员的武器库中,也早已在科学家的武器库中存在很久了。这些重大事件由 Palne Mogensen (他是“等离子体产生和控制的机电技术”这一章作者) 搜集,并清楚

地说明：等离子体远非实验室的珍品或基础研究的纯理论工具。在挪威早在1905年，已被广泛应用于工业过程。如果延伸定义至电弧炉技术，我们可以说甚至更早期，等离子体已进入冶金生产。当然，涉及是一回事，而普及应用又是另一回事。只有经过开创新技术的长期艰辛的发展历程后，才能有推广应用。首先认识：用常规的办法来改进现存的工艺，应有一套减少费用的办法。然后，如果强烈要求进一步改进的话，必须有新主意，才能指导行动。最终，俗话说得好：“失败乃成功之母”，改进和实践将促进采用新工艺并获得更广泛的应用。本世纪这种情况在冶金领域已经重复多次——举几个较明显的例子：氧气顶吹转炉炼钢，活性金属提炼，铁和有色金属连铸，钢包冶金和直接还原。某些情况变化时间间隔很长，以致看不到真实的彻底变化。顶吹氧气炼钢是最好的例子。从酸性转炉到40年代和50年代试验的工业用氧侧

表 1-1 等离子体技术发展的一些重大事件

~1804	Davy	碳弧灯，电源电池产生的40cm电弧
1860	Berthelot	甲烷制乙炔用的电弧
1890	Moissant, Heroult	电弧炉
1901	Marconi	电弧无线电发射器(越过大西洋)
1905	Birkeland	用空气固氮(1917年250MW!!), 磁吹交流电弧
~1907	Schönherr	旋转稳定固氮，长直流电弧
1922	Gerdien和Lotz	水压缩电弧
1938	(Chemische Werke Hüls)	大规模生产乙炔~150MW
~1950	Maecker	分段电弧
~1960	(USAF/NASA)	风洞，空间返入模拟用几MW发生器
~1965	(Paton)	生产不锈钢用的转移弧等离子体炬，4 MW
~1970	(Tioxide, UK, Ltd.)	TiCl ₄ 的氧化
1970	(日本，苏联，美国)	等离子体弧重熔(0.1到1.0MW)
1981	(SKF 钢厂)	PLASMARED 连续运行
1986	巴黎钢铁学会(SFPO)	工业锰铁高炉上12支电弧气体加热器(每支 ~2 MW)

吹和顶吹转炉，到早期小型工业用顶吹转炉(BOF)，到底吹转炉(Q-BOP)等等整整经历了一个世纪。这正是冶金工艺过程的特点，某些工艺设备使用寿命达50年左右，因此变化很缓慢。

回来说到等离子体，更应感谢 Palne Mogensen搜集的图1-1和图1-2，用图表示了“无电极等离子体”和“产生电弧”的等离子体技术的发展历程。例如“无电极等离子体”，其范围从极光(Aurora Borealis)——一种被来自太阳的带电粒子激发的分子和原子在去激发时(向低温等离子体转化)产生的可见的自然现象——到用在波导管中的微波等离子体。后一种情况是激发分子和原子的微波能量，通过介电激发产生等离子体。这类等离子体应用于雷达和光谱分析。常规产生电弧等离子体的“种属之树”表示这些高能系统与如极光那种人人都可见的不受控制的自然现象之间的关系。这些等离子体范围包括从来自静电的带电粒

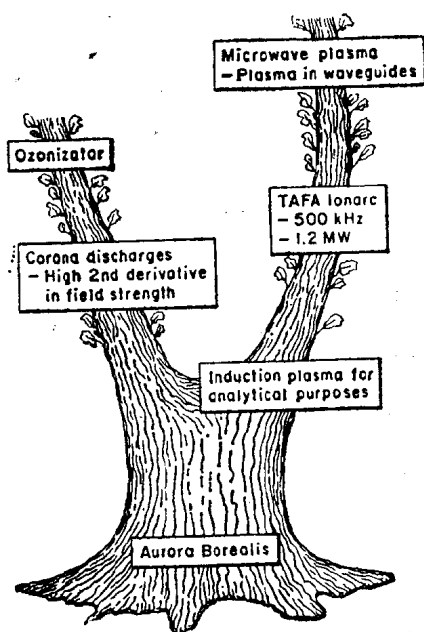


图1-1 无电极等离子体发展进程

子集聚产生高能放电(10^{12} W)到控制方便的大功率等离子体发生器和应用于冶金过程的等离子体炬。遗憾的是图中所绘的树枝太小了,不可能包括所有作过重要贡献的个人和组织。我们打算在下一章历史评论及以后章节中,给予较完全的阐述。

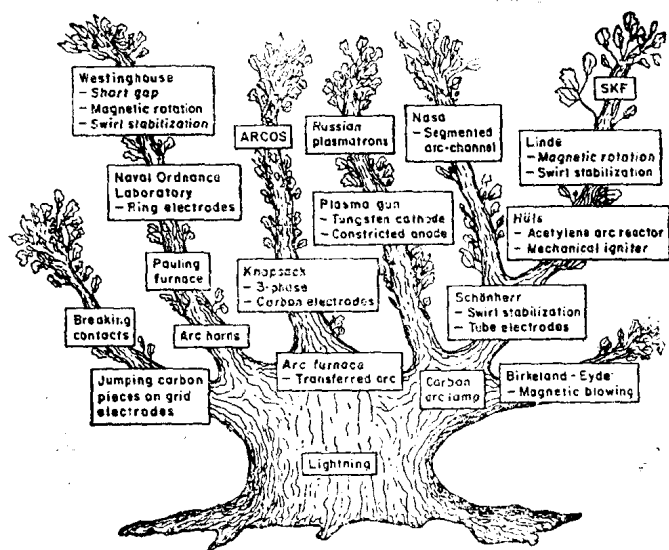


图1-2 等离子体技术的发展进程

接续的4章为后面的实用硬设备 and 应用等章节提供科学基础。首先是综述,而后扼要地阐述热等离子体的物理性质和热力学性质——按物理学家的观点取材。这个开头肯定是好的,只对实际应用有兴趣的人可以浏览这部分。对有些读者而言,可能数学和某些物理——化学概念及分析太深。总之,对于搞学术的人,理解这部分则很重要。它自然地导致评述等离子体产生的原理和方法。如果我们打算应用等离子体,则应该了解等离子体是什么。专业人员更应着重了解等离子体的产生和应用技术。因为通常有效地解决实际问题需要有较深的基础知识,因此,还是浏览一下为好。

接续的章节很好地综述了等离子体的固体颗粒的动量传递和传热。这里有等离子体范畴和应用等离子体的冶金过程范畴之间的混淆。等离子体的品质和独特性质能造成常规方法无法获得的工艺过程。例如，将粉煤和精矿这类反应剂注入热等离子体时，等离子体向固体的能量传递速率远大于常规过程，同时对下游反应器的尺寸和形状有明显的影响。更直接的情况，如等离子体喷涂时，材料喷涂于基体上形成一特殊构层，为了获得理想的涂层性质，甚至必需用等离子体传热和熔融颗粒。这种情况以及其它类似情况下，采用等离子体是必要的，具有优越性。在有的应用中等离子体——颗粒传热是关键，有的则不是关键，但都有重要的影响。另外，课题越难（定量的和定性的观点），越需改进等离子体和颗粒之间的混合和接触。在某些情况下，由于初始交换的有效时间（体积）是如此之短，以致等离子体——颗粒间传热成为关键步骤。

论述等离子体产生和控制的机电技术的章节以及等离子炬体和等离子体炬炉的章节，介绍了有效实现这些技术的基础工程实践，完整地详述了必须有足够的寿命的设备及系统的功能。也许这‘只够’两字也不实用，在本文中‘过得去’确是差的意思。当然，考虑到早期系统中电极的寿命和可达到的功率级，得到足够的长寿命和足够的功率似乎已是不小功绩。然而，因为寿命和功率这些因素经常成为工厂的关键（它们如此明显影响资金和运行费用），这几章详细地分析了数据，评论了概念和鉴定了物理仪器，从中可以领会到，许多可靠的辅助系统是实现新工艺的重要部分。牢牢掌握这些知识，将便于考虑和估算各种应用。

应用范围包括石墨电极炉到有色冶金炉和其它多种炉子。占最大篇幅的石墨电极炉将分别考察，因为它是一种独特的炉种。由于石墨电极炉经常将气体通过电极，以拉长、稳定和控制电弧，所以这种炉子不同于电弧炉。研究石墨电极炉在冶金中多方面的应用也正向常规的转移和非转移等离子体弧炉和等离子体炬（较早

描述的) 发展。这章与其它应用章节间的交叉最少。

等离子体技术应用于炼铁、炼钢工艺过程, 钢厂废尘处理和铁合金工艺过程, 这些应用代表许多最先进的等离子体技术在工业中实施的课题项目。等离子体技术应用于冶金工艺过程的进展快慢显然很大程度上取决这些项目的近期进程。如熔融和废尘处理的应用已相当成熟, 而诸如炼铁和铁合金加工则很早已获工业应用。这些项目难于了解现行状况, 因为经营者很不愿意提供工厂早期开工和发展的详情。这就帮助解释了: 为什么关于应用的资料中没有包含大家希望看到的运行的数据; 这也部分解释了关于等离子体应用的经济评价的章节比常规选取的内容短。钢铁学会/美国冶金工程师学会 (ISS/AIME) 准备本书再版时毫无疑问地将充实这些内容。希望冶金工艺过程中的等离子体技术有巨大进步, 足以保证在今后20年内出第2版。

因为等离子体电弧重熔(PAR)的工业应用实践时间最长, 所以论述这方面的章节特别重要。等离子体电弧重熔的大多数产品单位价值相对较高, 而且提高产品质量时损耗较低, 所以有利于等离子体电弧与真空电弧、电子束和电渣重熔的竞争。

关于有色冶金和各种其它应用的章节从纯理论广泛推测它的前景。例如等离子体反应器中用 Na/H_2 直接还原得到钛; 又如某些现已达到工业规模的工艺过程, 如用等离子体喷涂生产的特殊材料以及用废的汽车催化装置回收铂族金属。这些例子均为极端情况。希望在不久的将来能看到等离子体技术应用的一般情况。由于目前大多数有色金属经营情况萧条, 阻碍了等离子技术在这领域中的发展。

最后一章评述了发展问题和未来前景, 同时试图提供一些观念和引导, 以期人们能接受挑战, 来解决遗留难题, 并博得有关方面的财政赞助。