

现代物理基础丛书

77

电弧等离子体炬

〔俄〕M.F.朱可夫 等 编著

陈明周 邱励俭 译

王文浩 黄文有 校



科学出版社

现代物理基础丛书 77

电弧等离子体炬

[俄]M. F. 朱可夫等 编著

陈明周 邱励俭 译

王文浩 黄文有 校

科学出版社

北 京

图字:01-2014-6875

内 容 简 介

本书由俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所朱可夫(M. Ф. Жуков)院士领衔编著,全面介绍了朱可夫院士团队在电弧等离子体炬的特性、设计及应用等领域的研究成果,是对其四十多年研究工作的总结。

全书共 11 章。第 1、2 章阐述电弧等离子体炬的原理及等离子体炬电极中的电物理和气体动力学过程;第 3、4 章介绍电弧等离子体炬的研究方法;第 5、6 章讨论电弧的能量特性和等离子体炬电弧室中的换热过程;第 7~9 章分别讨论直流轴线式等离子体炬、双射流等离子体炬和交流等离子体炬;第 10 章讨论影响等离子体使用寿命的重要问题——电极的烧蚀及减缓方法;第 11 章介绍等离子体反应器。

本书可供从事等离子体炬的研究与设计、等离子体加工(切割、焊接、喷涂)、等离子体材料处理(等离子体化工、废物处理及资源化)的科研人员和工程技术人员使用,也可作为等离子体物理、热物理、电气工程以及环境工程专业的高年级本科生和硕士、博士研究生的学习用书。

©(information on the author's rights for the original edition).

The present translation of the monograph is published within the framework of the Agreement with ITAM SB RAS.

图书在版编目(CIP)数据

电弧等离子体炬/(俄罗斯)M. F. 朱可夫等编著;陈明周,邱励俭译. —北京:科学出版社,2016

(现代物理基础丛书:77)

ISBN 978-7-03-049146-6

I. 电… II. ①M… ②陈… ③邱… III. 电弧-等离子体-研究
IV. ①O461②O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143590 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张:30 3/4

字数:600 000

定价:178.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢
副主 编 阎守胜 聂玉昕
编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧	王鼎盛	朱邦芬	刘寄星
杜东生	邹振隆	宋菲君	张元仲
张守著	张海澜	张焕乔	张维岩
侯建国	侯晓远	夏建白	黄 涛
解思深			

序

我从 20 世纪 60 年代应用电弧加热等离子体进行烧蚀研究以来,一直关心等离子体炬的研究和发展。积多年来的体验和观察,我认为朱可夫院士的研究,使这一领域拥有了充分的科学基础和实验研究依据,形成了系统理论的分支学科,并实现了许多创造性高水平应用。他是这一学科的创始人和研究带头人。他和他的同事,形成了有特色的学派,所出版的丛书系统地总结了他们数十年的研究成果,代表着热等离子体学科的最高水平。丛书的第 17 卷《电弧等离子体炬》,从电弧的基础知识开始,对电弧等离子体炬的内部过程进行了基于实验和计算的详细描述和分析;提出了有关的相似准则,对关键的问题如电弧特性、传热与流动、电极烧损等做了深入的研究;介绍了各种类型的等离子体炬,其中不少是他们所创造的,并介绍了一些重要的应用。可以说,任何研究或使用等离子体炬的工作人员都应该好好阅读和学习这本经典著作。它的英译本也早在 2007 年问世。现在中译本由邱励俭和陈明周同志翻译,科学出版社出版,这对我国的有关研究人员、学者、教师和学生是一个非常及时和有意义的事。

邱励俭是我的老同事,早在 1958 年就由当时的中国科学院动力研究室派往苏联动力研究所学习,后来又多年和我同在力学研究所工作,任职电磁流体与等离子体研究室主任。其后调往合肥中国科学院等离子体所,历任所长、合肥分院院长等职。他在等离子体科学与技术方面有很深的造诣,具有高度的创造力和三严作风。这本著作由他翻译并把关,是再合适没有的了。陈明周博士,在等离子体所研究生期间以及 2010 年毕业后一直从事等离子体处理危险废物的研究。他在等离子体所期间就开始学习并翻译本书英文版,前后将近 5 年方得定稿。他们的这本译作,内容准确,文字流利易读,无愧于原著,为在我国介绍推广这一重要著作做出了贡献。

我还想借此机会回忆 1988 年我和力学所沈青研究员到苏联新西伯利亚参加等离子体研讨会期间,到朱可夫院士家中做客的情景。朱可夫院士那时虽年事已高,但还是精神很好,十分和蔼可亲。他以经典的俄罗斯丰盛晚餐招待我们并和我们亲切交谈。他赠送给我的刻绘着俄罗斯乡村冬景——积雪小屋和白桦林的精美小礼品,一直珍藏在我家的书柜中。我十分敬佩和怀念他。

非常高兴能为这本重要的著作中译本作序。可以肯定,此书的出版将在我国等离子体研究中起到非常重要的作用。

吴永康

中国科学院院士

2016年5月

译者的话

电弧等离子体炬,又称等离子体发生器、电弧气体加热器,工业中常称等离子体枪,是太空事业、核工业和军事工业发展的成果,如今在我国工业领域中得到了广泛应用,包括化工、冶金、切割、焊接、喷镀、材料制备与处理和电弧风洞等。近年来,随着环境问题的凸显,电弧等离子体技术在环保领域的应用也逐渐得到重视,包括放射性废物的最小化、稳定化和常规废弃物的无害化与资源化等。从事等离子体技术研究与应用的相关人员都希望进一步了解电弧等离子体炬中的物理过程,掌握其设计与计算基础,以便更好地进行研究、开发和应用。

在朱可夫(М. Ф. Жуков)院士的领导下,俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所于1990~2000年出版了《低温等离子体丛书》,这是低温等离子体领域的巨著。本书为该丛书的第17卷,也是其核心卷,出版于1999年,2007年被译成英文。

本书综合了对电弧等离子体炬进行实验研究和理论分析的成果,对电弧与气流、电弧与磁场的相互作用规律,电极烧蚀及影响因素等基本现象进行了深入讨论,给出了关于等离子体炬研究的大量实验数据和处理实验数据的工程方法,提供了归纳成准则形式的等离子体炬中电弧的电、热特性,具有重要的参考价值。

本书中的部分内容(等离子体炬电极中的气体动力学过程、研究电弧的数学方法以及相似性准则等)在作者早期的著作 *Прикладная Динамика Термической Плазмы* (М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков Новосибирск: Наука, 1975. 中译本:热等离子体实用动力学,赵文华,周力行译,北京:科学出版社,1981)中做了初步阐述,本书进一步丰富了这方面的内容。

基于上述原因,我们认为本书是电弧等离子体方面相当好的参考书之一,值得向国内等离子体界推荐。

由于译者的水平所限,译文中疏漏和不足在所难免,恳请读者不吝指正。

陈明周
2016年5月

前 言

本书所讨论的大量研究成果,都直接或者间接地与等离子体炬(电弧气体加热器)和等离子体工艺反应器的计算与设计有关。电弧气体加热器利用放电产生焦耳热的原理把电能转化为热能。在这些系统中,对气体的加热主要通过电弧与气流之间的传导换热和对流换热实现。

人们对电弧的研究与应用感兴趣的原因在于:

- (1) 电弧等离子体的体积小而能量密度高;
- (2) 在电弧等离子体中化学反应速率高,因而有可能建立起高生产率的装置(反应器);
- (3) 利用电弧能够在气压高达 20 MPa 的条件下,把气体的平均质量温度平稳地加热到 15×10^3 K 的量级;
- (4) 利用比较简单的设备就能把电能高效地转变成热能;
- (5) 设备运行稳定、可靠;
- (6) 几乎可以加热所有气体,包括还原性、氧化性、惰性气体和混合气体;
- (7) 电弧的运行形态自动控制简便;
- (8) 等离子体技术的设备尺寸小,金属需求量少。

电弧的产生最早是由彼得罗夫(V. V. Petrov)教授于 1802 年实现的。仅 100 年之后,在 20 世纪初,工业上就出现了使用电弧从空气中制取氮氧化物的硝酸生产工艺系统。在基于伯克兰(Birkeland)与艾德(Eide)提出的电路制造的等离子体炬上,鲍林(Pauling)和希伯(Siebe)使用了交流电;而在森凯尔(Sencher)建立的系统中,电弧是直流的,长 7m,在吹入空气的竖直管道中燃烧。

在 20 世纪 30 年代,德国引入了利用电弧由天然气制取乙炔的方法。所使用的电弧用旋转气流稳定,长度超过 1m,运行电压为 7000V,电流高达 1000A。如今,这种方法已被多个国家采用。

20 世纪 50 年代末,在模拟航空器超音速飞行,以及研究空间系统进入地球或者其他星球大气层的条件时,由于需要在风洞中加热气体,人们对电弧等离子体炬给予了特别关注。

在 20 世纪 60 年代,等离子体炬技术的应用重心快速向化工、冶金和其他传统以及新兴产业转移。低温等离子体具有体积小而能量密度高、温度和化学反应速率高等特点。低温等离子体引起人们关注的主要原因在于,利用该技术有可能建立起全新的高产率设备与工艺。

今天,完全可以说低温等离子体已经成为工业技术的重要组成部分。它使工艺流程实现极高的反应速率,而这在通常条件下是不可能的。

在等离子体科学与技术中,对基础科学和应用科学的兴趣与生产紧密相连。应用低温等离子体是现代生产的一种典型现象,等离子体炬在许多产业中都代表着一种强大的工具。

等离子体技术为闭环工艺提供了适宜条件,这为解决全球问题——降低环境污染程度创造了最佳条件。

还应当指出,等离子体炬在喷涂中的应用同样重要,这也是工业中一个快速发展的新兴领域。

俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所等离子体动力学部发展出了计算轴线式等离子体炬电特性和热特性的半经验方法。这些方法建立在实验确定的相似准则关系的基础上,奠定了等离子体炬工程计算方法和选择等离子体炬电源参数的基础。

等离子体技术在工业中的应用领域的进一步扩展与这些因素有关:改进等离子体炬和电弧反应器的所有特性;电极(等离子体炬中承受热负荷最大的部件)的工作寿命增加 1~2 个数量级,即把等离子体炬持续运行时间增加到几百小时甚至上千小时;提高使用不同化学成分的工作气体的热效率;考虑工艺流程的具体特征,能够确保目标产物的产率最高。

本书对处理固体材料的电弧等离子体炬反应器也给予了特别关注。其意义在于这些反应器要满足特定的需求,其中主要有高产率、工作气体消耗低而固体材料消耗高。除此之外,在这类反应器中,还有必要在一个大反应室内把有可能同时发生的化学过程与电物理过程有机地结合起来。这就要求电弧在特殊布置的外磁场的作用下,以相对较高的速度在反应室中运动,有效地充满反应室的空间。

等离子体炬尽管外形上设计简单,却具有复杂的电磁、热和气体动力学物理过程;这些物理过程发生在电弧放电的近电极区域内、电极的表面上以及制造电极用的金属的晶格中。为了了解这些过程,必须对电弧室中的大量现象进行系统的实验研究,这些现象决定了等离子体炬的电热特性和烧蚀特性。

在电弧中,弧斑在与通道壁、内禀磁场以及外磁场相互作用的过程中发生了各种各样的复杂过程。这些过程阻碍了从理论上研究接入不同直流和交流电路的等离子体炬中的电弧行为。这也是对实验研究特别关注的原因。

关于电弧室内最重要的物理过程、不同工作气体中电弧的能量特性、电弧与热气流和电弧室壁之间的热交换,以及保护电弧室壁免受高强度热流损坏的方法等,都可以通过实验获得丰富的信息。对于在电极本体中发展并加剧电极烧蚀的过程,本书给出了这方面的数据。设计用于等离子体化学合成气体介质和处理粉末材料的等离子体工艺反应器,本书对其电路给予了特别关注。本书还提供了发生

在电弧室中的那些过程的相似准则材料,这些材料被用作归纳等离子体炬电、热特性的基础。

目前,研究者已经开发出轴线式、同轴式、混合式、多弧式以及其他类型的直流和交流等离子体炬。等离子体炬系统的类型取决于具体的技术应用要求。炬的功率范围涵盖了几百瓦到几兆瓦。

作者希望本书能够对以下读者有所帮助:在不同技术应用领域中使用等离子体炬的技术人员,关心等离子体炬中物理过程的研究、致力于改进等离子体炬电热特性和烧蚀特性的研究者。

目 录

第 1 章 热等离子体和电弧加热气体简述	1
1.1 电弧的形成和电弧等离子体的特性	1
1.2 电弧气体加热器——等离子体炬	5
第 2 章 等离子体炬中的电物理和气体动力学过程	10
2.1 长圆管状通道中冷气体的流动特性	10
2.2 长圆管状通道中电弧的燃烧特性	14
2.3 电弧元的速度和脉动特性	21
2.4 电弧的 X 射线层析成像研究	23
2.4.1 简述	23
2.4.2 非稳态电弧等离子体的实验研究	25
2.5 电弧的分流	41
2.5.1 定性分析	41
2.5.2 研究分流过程的一些定量结果	46
2.5.3 两个固体之间的放电	52
2.6 轴线式等离子体炬的输出电极中电弧径向部分的脉动	55
2.7 电弧参数的自振荡	59
2.8 内电极的气体动力学研究	65
2.9 具有突扩结构的圆管状输出电极的气体动力学研究	73
第 3 章 研究电弧放电的数学方法	84
3.1 描述电弧等离子体的主要方程组	84
3.1.1 磁流体力学方程组	86
3.1.2 磁流体力学边界层的近似	88
3.1.3 积分形式	89
3.2 电弧放电的解析模型	89
3.2.1 圆柱形电弧的温度分布	90
3.2.2 外场中长电弧的动力学	97
3.3 电磁力对电弧等离子体流形成的影响	100
3.3.1 基于边界层方程组的数值分析	100
3.3.2 基于磁流体力学方程组的数值分析	103

3.4	电弧放电等离子体中的非平衡过程	104
3.5	湍流中的电弧	109
3.5.1	湍流模型	109
3.5.2	结果分析	111
第4章	电弧等离子体炬中过程的模拟	114
4.1	过程模拟的概念	114
4.2	确定相似准则的方法	115
4.3	电弧过程的相似准则	118
4.4	相似准则的物理含义	121
4.5	归纳实验结果的方法	123
第5章	不同气体中电弧的能量特性	126
5.1	不同气体中电弧的广义伏安特性	126
5.2	带有电极间插入段的等离子体炬中电弧的能量特性	137
5.2.1	长圆管状通道中电弧电场强度的分布	139
5.2.2	通道的初始段和过渡段中的电弧电场强度与决定性参数的关系	141
5.2.3	气动力带来的弧电压变化	145
5.2.4	在气流的发展湍流段中电弧的电场强度与决定性参数的关系	149
5.3	多孔通道中电弧的能量特性	155
5.4	氢气和含氢介质中电弧的电场强度	165
5.4.1	放电通道中气流特征段的长度	168
5.4.2	通道初始段中氢电弧的电场强度	169
5.4.3	充分发展的氢气湍流中电弧的电场强度	170
5.4.4	混合气体中的电弧	174
第6章	轴线式等离子体炬电弧室中的热交换	177
6.1	自稳弧长和(利用台阶形电极)固定弧长的等离子体炬的 总体热特性	177
6.2	带有电极间插入段的等离子体炬电弧室中的热损失	179
6.2.1	旋气稳弧等离子体炬中的热损失	180
6.2.2	轴向气流中电弧的特性	182
6.3	湍流气流中电弧与电弧室壁的热交换	184
6.3.1	通道初始段中的热交换	185
6.3.2	气流的发展湍流段中的热交换	187
6.3.3	气膜对电弧室壁保护的效率	188
6.3.4	带有电极间插入段的等离子体炬的输出电极中的电流分布和热交换	196
6.3.5	带有电极间插入段的等离子体炬的热效率	201

6.4 带旋气电极间插入段的等离子体炬	202
6.5 通入强烈气流的组合通道和多孔通道中的热交换	205
6.6 氢电弧与电弧室壁之间的热交换	214
6.6.1 流入内电极——阴极的热流	215
6.6.2 电极间插入段的部件和触发极中的热流	215
6.6.3 流入输出电极——阳极的热流	218
6.7 水蒸气旋流等离子体炬的广义热特性	219
第7章 直流轴线式等离子体炬	221
7.1 轴线式等离子体炬的分类	222
7.2 自稳弧长型等离子体炬	224
7.2.1 单电弧室等离子体炬	224
7.2.2 双电弧室等离子体炬	232
7.2.3 带有延伸电弧的双电弧室等离子体炬	232
7.3 利用台阶形电极固定平均弧长的等离子体炬	234
7.4 利用电极间插入段固定平均弧长的等离子体炬	236
7.4.1 加热氢气和含氢介质的等离子体炬	237
7.4.2 喷涂用一体化等离子体炬(PUN-3)	245
7.5 分裂弧等离子体炬	245
7.5.1 电弧阳极段沿纵向分裂的等离子体炬	246
7.5.2 电弧阳极段沿径向分裂的等离子体炬	246
7.5.3 电弧阴极段分裂的等离子体炬	248
7.5.4 电弧阴极段扩散附着到管状电极表面的等离子体炬	249
7.5.5 电路中无镇流电阻的多电弧阴极	249
第8章 双射流等离子体炬	253
8.1 固定弧斑的双射流等离子体炬	254
8.1.1 双射流等离子体炬的结构和电源	254
8.1.2 阳极部件和阴极部件	255
8.1.3 电极的使用寿命	256
8.1.4 热特性和电特性	257
8.1.5 等离子体流的温度场	261
8.1.6 等离子体流的电场结构	263
8.1.7 导电等离子体射流之间的相互作用	266
8.2 具有旋转电弧和静止弧斑的双射流等离子体炬	268
8.2.1 电特性	268
8.2.2 电弧与固体表面的相互作用	271

8.3 管状电极双射流等离子体炬	274
8.3.1 等离子体炬及其电路设计	274
8.3.2 等离子体炬的特性	275
第9章 工频交流等离子体炬	279
9.1 单相交流等离子体炬	280
9.1.1 对交流电弧供电的特征	280
9.1.2 大电流电弧与高频电弧的联合燃烧	282
9.1.3 燃烧在旋气稳弧单相等离子体炬中的交流电弧的伏安特性	286
9.2 星型三相等离子体炬	290
9.2.1 星型等离子体炬的方案和工作原理	290
9.2.2 星型电弧的伏安特性和热特性	292
9.2.3 星型等离子体炬的广义工作特性	296
9.3 三角形接法三相等离子体炬	299
9.3.1 棒状电极交流等离子体炬	299
9.3.2 带有导轨型管状电极的交流等离子体炬	303
9.3.3 大功率三相等离子体炬的电弧室中的主要物理过程	305
9.3.4 三角形接法三相等离子体炬的近电极过程	307
9.4 高电压多电极交流等离子体炬	311
第10章 近电极过程和减缓电极烧蚀的方法	315
10.1 经弧斑流入电极的热流	317
10.2 具有静止弧斑的棒状热阴极烧蚀表面的形成	322
10.3 热钨阴极的比烧蚀	326
10.4 热化学阴极的比烧蚀	328
10.5 圆管状中空钨阴极的内表面结构	331
10.6 弧斑作用下的棒状钨阴极工作表面的结构特征	332
10.7 自恢复阴极研究综述	337
10.8 含碳介质中阴极质量的增加速率	341
10.9 冷管状铜电极的烧蚀	342
10.9.1 冷管状铜电极的比烧蚀与电流强度的关系	342
10.9.2 电弧径向部分的运动速度与其轴向部分的扫描速度对比烧蚀的影响	344
10.9.3 轴向感应磁场对电极烧蚀速率的影响	346
10.9.4 管状内电极——阴极中电弧径向段的气动-磁场轴向扫描	348
10.9.5 铜电极表面温度对比烧蚀的影响	350
10.9.6 对等离子体炬中电弧径向段行为的磁控制	352
10.9.7 氧在缩短电极使用寿命中的作用	355

10.9.8 管状铜阳极的比烧蚀的总体特征	358
10.9.9 等离子体炬电极中的温度场和应力场	360
10.9.10 管状电极次表层材料的结构	369
10.9.11 降低管状铜电极烧蚀速率的方法	371
第 11 章 等离子体反应器	374
11.1 多射流反应器	374
11.1.1 运动学系统	374
11.1.2 混合室的热效率	377
11.1.3 混合室中总气压的脉动	378
11.2 三射流反应器的流体力学特性和热工特性	380
11.2.1 一些高温合成反应器的方案	381
11.2.2 基于多射流混合室的反应器	383
11.2.3 三射流直流反应器的热工特性	386
11.2.4 反应器的能量平衡	389
11.3 直流电磁控制联合反应器	391
11.3.1 联合反应器的原理图	391
11.3.2 电弧产生上升伏安特性的电磁控制方法	393
11.3.3 向反应器中通入气体的方式和气流量对电弧伏安特性的影响	395
11.3.4 联合反应器的热特性	396
11.3.5 400kW 级熔融锆生产工业反应器	399
11.4 同轴式等离子体反应器	401
11.4.1 同轴式直流电弧等离子体炬	401
11.4.2 同轴式等离子体炬(等离子体反应器)	403
11.5 电磁控制同轴式交流反应器	405
11.6 利用轴线式等离子体炬热解和处理化工废物的反应器	408
11.6.1 利用石油产品生产丙酮和乙烯	408
11.6.2 处理有机化工废物和含氯的有机化工废物	409
结论	412
参考文献	415
索引	468

第 1 章 热等离子体和电弧加热气体简述

按照现行术语,“等离子体炬”或者“热等离子体发生器”是指一种装置:设计用来产生热等离子体,即被加热到 $(3\sim 50)\times 10^3\text{ K}$ 的气体。目前,利用电弧加热气体是产生热等离子体的最通用途径。

1.1 电弧的形成和电弧等离子体的特性

电弧放电既可产生于分离起初互相接触的电极,也可源自于电极间气隙击穿形成的火花放电,或者形成于辉光放电电流的增大。图 1.1 显示的是,在从辉光放电向电弧放电转变的过程中阴极电位降与电流的关系曲线。这种转变的特征是,随着电流的增大,阴极电位降急剧降低,同时总电压降也降低。

如果辉光放电的阴极电位降近似有 100 V 或者更高量级,那么在电弧放电中,这个电位降则仅有 10~15 V。造成这一差异的原因在于近阴极区内电荷传输的过程不同,以及电场向气体传递能量的方式不同。在辉光放电中,阿极的电子发射源自于近阴极区域内的正离子被电场加速对阿极的轰击以及气体放电中辐射产生的光效应。在与离子或者光子碰撞获得所需的动能后,电子能够克服势垒而从金属逸出。然后,电子在近阴极的电场中被加速,达到足以使原子碰撞电离的能量,同时使从阴极发射电子的过程得以维持。

如果增大放电的电流强度,那么电子碰撞的次数就增加,这样就使阴极附近区域内的气体温度升高;并且从某一时刻起热致电离开始在气体电离中起主导作用。在热致电离中,电子的温度接近于离子和中性粒子的温度。因此,为了使电子获得很高的能量,必须保证在阴极附近存在较大的电位降。此时,电子从阴极逃逸的主要机制是自动电子发射(阴极温度低)或者是热电子发射(阴极温度高)。

在大电流密度下形成的具有低阴极电位降特征的放电形式被称作电弧。电弧有高压和低气压两种形式。

在高压电弧的弧柱中,电子温度和重粒子(离子和中性粒子)温度在放电的

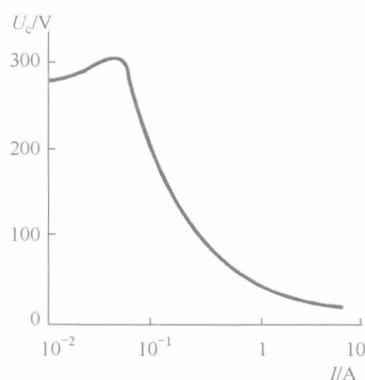


图 1.1 辉光放电过渡到电弧放电时阴极电位降与电流强度的关系

每一个给定位置上都接近,即这时的电弧等离子体近似于局域热力学平衡,后者认为等离子体是准等温的。然而,电弧等离子体无法达到绝对局域热力学平衡,原因在于电场能量主要传递给了电子,然后通过碰撞再传递给重粒子。下面来估算电弧等离子体可以被认为是准等温的条件。

假设电子从电弧的电场中获取的能量通过弹性碰撞全部传递给了重粒子,则

$$\sigma E^2 = \frac{3}{2} k (T_e - T_g) \delta \nu_{eg} n_e \quad (1.1)$$

其中, σ 是等离子体电导率,等于 $e^2 \cdot \lambda_e n_e / m_e \nu_e$, e 是电子电荷, λ_e 是电子在气体中的自由程,取决于等离子体中所有成分的稀疏度和碰撞截面 Q_{ek} , $\lambda_e = (\sum_k n_k Q_{ek})^{-1}$, ν_e 是电子热运动的速度; T_e 和 T_g 分别是电子和重粒子的温度; $\delta = 2m_e/m_g$ 是电子通过一次弹性碰撞转移的能量份额(m_e 和 m_g 分别为电子和重粒子的质量); $\nu_{eg} = \nu_e / \lambda_e$ 是电子与重粒子碰撞的频率; n_e 是电子密度。

方程(1.1)可以化为如下形式

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{3\pi}{32} \left[\frac{\lambda_e e E^2}{\frac{3}{2} k T_e} \right]^2 \frac{m_g}{m_e} \quad (1.2)$$

括号中的复合量具有能量比的含义,即电子从电场中获取的能量与其热运动的动能之比。从式中可以看出,高的电场强度 E 和低的气体压强不利于平衡的建立。例如,在高气压电弧的近电弧区,强电场无法使准等温条件得到满足。在空气等离子体和金属蒸气等离子体中,弧光正柱中的平衡在 $p \geq 1.013 \times 10^5$ Pa 的条件下才能建立。在惰性气体中,由于光学过程占据主导地位(等离子体中不吸收辐射),只有当电流强度很大时才会建立起准等温条件。例如,只有当氩等离子体中电流强度大于 10 A,或者氦等离子体中电流强度大于 200 A 时才能建立平衡。向电弧等离子体中引入足量的金属蒸气(>1%)可以更快地建立平衡。

在电弧放电中,由于单次电离从中性粒子中产生的离子数与电子数相等,因而离子总数等于电子总数。通常而言,可能存在一些过程,使个别小放电区域内带某种电荷的粒子数多于带另一种电荷的粒子数。这些过程包括(譬如说)电子扩散和强电场中的电荷分离等。然而,电荷分离所产生的力非常大,以至于可以不用考虑这种效应,从而可以认为在几乎所有情况下电弧放电都是准中性的,即离子和电子的局域密度彼此接近。我们可以估算电弧放电等离子体形成准中性的条件。采用泊松方程

$$\operatorname{div} E = \frac{e}{\epsilon_e} (n_i - n_e) \quad (1.3)$$

其中, n_i 和 n_e 分别是离子和电子密度; ϵ_e 是介电常数。由于弧柱中心部分的电场强度沿径向几乎保持恒定,因此 $\operatorname{div} E$ 的值应根据电场强度沿通道轴向的变化来计