



低温等离子体 物理及技术

〔苏〕C. B. 德列斯文 主编

低温等离子体物理及技术

〔苏〕C. B. 德列斯文 主编

唐福林 陈允明 毛 斌 译

曹永仙 校

科 学 出 版 社

1 9 8 0

内 容 简 介

低温等离子体物理是研究各种形式(直流、高频等)放电的原理及弧柱性质的学科。它与基础研究有着密切的关系,同时又有广泛的工业应用。本书共分三部分,第一部分介绍低温等离子体的一般性质及诊断技术,第二部分叙述各种放电的设备、原理及实验数据,最后一部分阐述放电的理论计算。全书叙述简明扼要,理论与实际结合得较好。

本书可供从事气体放电、电弧冶炼、等离子体化工以及有关学科的科技人员阅读,亦可供物理、力学、热物理等专业的师生参考。

С. В. Дресвин
ФИЗИКА И ТЕХНИКА
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
Москва Атомиздат, 1972

低温等离子体物理及技术

[苏] С. В. 德列斯文 主编

唐福林 陈允明 毛 斌 译

曹永仙 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1980 年 10 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 0001—3,500 字数: 278,000

统一书号: 15031·293

本社书号: 1812·15—10

定价: 1.90 元

前 言

谨请读者注意，这本书专门论述低温等离子体物理学和技术的某些问题。温度为3000—50000K的低温等离子体，近年来在各个科学和技术领域中获得极其广泛的应用。在过去十几年中，由于对能够稳定并控制稠密等离子体流的某些方法和装置进行了卓有成效的研究，所以促使这个新方向得到了蓬勃的发展。这种装置叫做等离子炬或低温等离子体发生器。在等离子炬中能获得任何气体介质（中性的、氧化的、还原的）的高温、高焓的新型热源，这就开辟了它们异常广泛的实际应用的可能性。

许多工艺过程目前不采用低温等离子体已是不可思议的。象各种金属的切割和熔炼；耐热涂层的喷涂、熔焊；微粒的球化处理及介电材料的加工等这类课题，都可以应用等离子炬很好地解决。已经出现了一个崭新的领域——有机物和无机物的等离子体化学，它需要发展上百上千千瓦功率的等离子炬。火箭和宇航技术的发展也需要研究等离子体在超声速气流中的传热和传质过程。

随着低温等离子体科学研究和实际应用的扩大，吸引了大量的科学工作者参与工作，他们以前从未研究过有关等离子体物理学和技术上的各种问题。另一方面，又无疑需要来自各个不同知识领域（物理学、气动力学、电工学、热物理、化学、金属学等等）的专家共同工作。这样就要求将大量材料按这些学科的各个问题进行系统整理，并将它应用于低温等离子体的专门课题。所以，本书的某些章节对有关知识领域中

的一些基本原理,作了扼要的论述,然后,以此为基础提出了等离子体的诊断或计算方法。

书中试图系统地介绍等离子炬的某些诊断方法以及在具体条件和结构中使用的计算方法。对于作者曾亲自研究过的一些问题,都作了极其详尽的论述,而这些也正是从事低温等离子体物理学和技术应用的领域中工作的工程师和研究工作者不可避免要遇到的。通常对处在具体工艺应用条件中的等离子体,给出在大气压下一些主要的资料。

作者曾给自己提出了两个任务: 材料要写得深入浅出,使以前未从事过等离子体物理学和技术方面工作,但具有足够的普通物理学和数学知识的读者易于理解,同时又要介绍具体等离子炬的实际诊断和计算所必需的主要资料。为此,在第七章和第八章中介绍了等离子炬的计算方法。对某些方法,引用了一些具体例子,把计算结果制成表格,用这些表格能够比较简单地解决诊断和计算中的某些问题。

在把大量材料按等离子炬的各种具体结构参数加以系统分类的过程中,选用了一些新的数据,对有些参数则几乎没有研究过,因为这些参数在有关低温等离子体发生器的某些书籍和文集中已经得到系统的整理(参看第六章所列文献)。

在论述和系统地整理感应等离子体计算方法的过程中,吸收了许多直接研究这方面问题的专家参与工作。例如,7.3节由洛维斯基(Ровинский)和索波列夫(Соболев)撰写的,而7.4节则由阿布拉莫夫(Абрамов)和基别尔(Зибер)撰写的。

本书是由列宁格勒加里宁工学院工作的作者集体撰写的: 德列斯文(Дресвин)——第一,二,五一七(7.3和7.4节除外),八,十章,9.5和9.6节;董斯基(Донский)——第一,四,五章;哥利德法尔布(Гольдфарб)——第二,三章;克鲁布

宁克 (Клубникин)——第四, 九章, 5.2, 5.3, 6.3 和 8.1 节。
另外伏洛巴耶夫 (Воропаев), 尼兹柯夫斯基 (А. А. Низковский), 卡尔柯诺娃 (Калганова), 巴尔霍明科 (Пархоменко) 参与本书所用材料中的许多实验工作, 在此, 作者谨致谢意。

目 录

第一章 等离子炬,它的发展和技术上实现的可能性 ...	1
1.1 等离子炬的一般特性	1
1.2 电弧和电弧等离子炬	2
1.3 稳态感应无电极放电的特性和感应等离子炬	5
参考文献	12
第二章 平衡等离子体的成份、热力学函数和输运系数	15
2.1 平衡等离子体成份的计算	15
2.2 等离子体的焓和比热	22
2.3 有效相互作用截面	24
2.4 等离子体中扩散、粘性和导热过程	30
2.5 等离子体电导率	35
参考文献	38
第三章 低温等离子体的辐射和光谱诊断	43
3.1 低温等离子体的辐射	43
3.2 在近大气压下等离子体的平衡条件	70
3.3 几种光谱诊断法	83
3.4 光谱诊断技术的几个问题	102
3.5 根据宽光谱间隔积分辐射确定等离子体的参数	110
参考文献	113
第四章 等离子体的热学及气动诊断方法	119
4.1 重粒子温度测量	119
4.2 热流的测量	124
4.3 等离子体流速测量	134
4.4 等离子体流湍流度的测量	147
参考文献	150

第五章 高频感应等离子炬.....	155
5.1 用光学方法对高频感应放电等离子体温度进行研究的一些结果	155
5.2 高频感应等离子炬的气动力学	165
5.3 大气压下感应无电极氩气放电的热力学非平衡性	170
5.4 高频感应等离子体的电参数	175
5.5 高频感应等离子炬的能量学	187
5.6 高频感应等离子炬的结构	191
参考文献	197
第六章 电弧等离子炬.....	200
6.1 工艺用敞开电弧等离子炬	200
6.2 圆柱形通道中电弧对气体的加热及其运动的动力学	212
6.3 电弧等离子炬的等离子体射流	218
参考文献	232
第七章 平衡等离子体理论.....	235
7.1 爱伦勃司-希勒尔电弧方程	235
7.2 运动等离子体动力学的全方程组及其电弧解	245
7.3 高频感应放电	255
7.4 辐射在等离子体能量平衡中的作用	287
参考文献	297
第八章 等离子体的双温模型.....	299
8.1 问题的提法	299
8.2 按给定的 T_e 值确定原子-离子气体的温度.....	306
8.3 求柱形等离子炬中 T 及 T_e 的完整问题	316
参考文献	337
第九章 低温等离子体绕物体流动时的传热.....	338
9.1 关于传热的一般概念	338
9.2 气流横向绕流圆柱时的传热 ($T_w < 1500K$)	339
9.3 等离子体中传热的特点	351
9.4 氩等离子体对横向绕流圆柱的传热	354

9.5 氧等离子体中横向绕流柱体的传热	361
9.6 氩等离子体绕流圆球时的传热	364
参考文献	366
第十章 在等离子体射流中难熔粒子运动的动力学和加 热	370
10.1 等离子体射流中粒子运动的计算	370
10.2 等离子体中固体粒子的运动速度和加热的实验研究	374
10.3 计算在等离子体中运动的粒子的温度	378
参考文献	381

第一章 等离子炬,它的发展和 技术上实现的可能性

1.1 等离子炬的一般特性

现代的等离子炬是一种能够获得和稳定地维持温度为5000—50000K的等离子体的装置。从等离子炬中释放出的电功率为几十到几千千瓦。它在科学和实际中的应用是多种多样的。本书详细介绍各种等离子炬的结构,以及在大气压下,主要对工艺应用中(切割、熔焊、喷涂、等离子化学等)获得稳定等离子体的各种条件。

等离子炬中的能量释放和等离子体射流的产生是由于电流通过电离的气体介质。其实,正是电离的导电气体本身才叫做等离子体。这个概念是由朗缪尔(Ленгмюр)从生物学中沿用过来,并在1928年对于真空放电管中严格确定的均匀辉光区域将它引进到气体放电物理学中。现在,这个概念被大大地扩展了,几乎包括所有和电离气态物质有关的现象。这里所介绍的等离子体技术的基础是人所共知的各种类型放电:电弧、高频感应和高频电容放电及超高频放电等。其中某几种是人们所熟悉的,而且已经研究了好几十年(电弧放电始于1803年,感应放电始于1884年)。但是,等离子炬概念本身及物理学与技术的新领域——低温等离子体——相比之下出现的时间并不长,大约在五十年代末期。其原因正是由于在这个时期内才出现了第一批结构可靠的等离子炬,它能够稳定地获得和维持低温等离子体,并对其加以控制。在这

方面,低温等离子体研究远远超越了对高温热核的探索,在后一个领域中,维持和控制等离子体的问题仍然是将来的事情。在低温等离子技术的发展中,这样质的飞跃取决于上个世纪就已经开始的研究工作的整个过程。这一飞跃开辟了新的学科方向。

在设计任何等离子炬时,必须考虑该种类型气体放电的特点。为了在等离子炬中稳定地维持放电,除了磁场外,还必须用各种特殊方法组织气流。因此,在将等离子炬分类时,这两种特征(放电类型和等离子体稳定的方法)可以作为基础。

等离子炬按其结构特征可以分为三类:电弧、高频和超高频等离子炬。电弧等离子炬的基础是直流和交流电弧(常常是二频),它在通道中的稳定方式是有区别的:磁场的、旋转气流或轴向气流的。使用频率为0.3—60兆赫电子管振荡器作为高频感应和尾焰等离子炬的电源。感应等离子炬是一种能在灯具中维持无电极感应放电的装置,而放电是由感应线圈的交变磁场产生的。结构上又因灯具型式和热防护方式而有所区别(参看第五章)。

超高频等离子炬是一种获得超高频放电的装置,使用一种连续作用磁控管型的波长为10—30厘米的电磁振荡器作为电源。已经知道的有尾焰型和共振器型的超高频等离子炬。

这里只介绍直流电弧和高频感应等离子炬,也就是作者曾亲自研究过的那些等离子炬。

1.2 电弧和电弧等离子炬

自从别特罗夫(Петров)(1803年),德法雅(Дэвя)和列格捷尔(Ригтер)(1808年)的一些经典的电弧试验以来,

曾对这方面进行了大量的研究工作。从奥尔道 (Айртон), 斯塔克 (Штарк), 汤姆逊 (Томсон) 等的书中, 可以获得有关电弧的早期工作和文献的完整概念。在一些著名的专著中^[1,2]也概括了稍晚些的一些工作。在所有这些工作中, 这里仅仅指出那些试图控制电弧并使它在空间中稳定的工作, 以及对现代等离子炬中维持电弧方法的发展中起了重要作用的工作。

肖海尔 (Шёнхер) 最先采用气流来稳定较长的碳电弧^[3]。在1909年, 他首次采用现在人所共知的、旋转气流稳定电弧的方法。肖海尔先在管中起弧, 而后把空气或另一种需要研究的气体沿管壁切向送入此管中。这个旋转气流稳定的电弧等离子炬原型, 当时已经使肖海尔能够在空间中稳定一些高压长弧, 并研究了他们的某些特性。

此后, 在1922年曾试图用旋转水流来稳定和收缩电弧, 也取得了成效。盖尔金 Гердиен 和洛兹 Лотц^[4]采用在狭小的圆柱型光阑中点燃电弧获得高的电流密度, 并将水切向送入到此光阑中, 使得在电弧和壁之间建立冷却膜。调节水的速度和流量, 就能改变电弧通道的直径。

在1931年安盖尔 (Энгель) 和施坦贝克 (Штеенбек)^[5], 以及后来的法希柯 (Фойцик)^[6], 为了使水平点燃的电弧能够稳定, 将它置于快速旋转的玻璃或石英管里面。这个方法是由霍里姆 (Хольм) 提出来的。当管的旋转超过某一最小转速之后, 电弧沿旋转轴处于稳定的位置。

在1933年, 霍里姆, 基尔旋顿 (Кириштейн) 和柯别尔曼 (Коппельман)^[7]首次采用现在人所共知的电弧轴向稳定法。在采用了沿着管的方向流动的气流之后, 他们在两个同轴电极之间的玻璃管中得到了稳定性良好的电弧。后来, 这种结构曾由他们作了重大改进^[8]。在1951年, 拉列兹 (Ларец)^[9],

布尔霍 (Бурхон), 麦克尔 (Меккер) 和别捷尔斯 (Петерс)^[10] 从结构上改进了盖尔金电弧, 并且进行了引人注目的物理测量。他们借助水的切向稳定方法, 在直径为 2.5 毫米的光阑中, 很成功地把电弧压缩到电流强度为 1500 安, 同时得到稳态电弧的轴向温度超过 50000K。尤尔盖斯 (Юргенс)^[11] 测出了这样电弧的轴向温度, 并确定了原子氧某些谱线的跃迁几率。1953 年, 别捷尔斯^[12] 将霍里姆、安盖尔、斯坦贝克等有关在旋转管中稳定电弧的思想和盖尔金的水流收缩原理结合在一起。使他在充满了水而又以高速旋转的管中起弧。在放电室里的压力达到了几百个大气压, 弧的电流强度为 50—200 安, 轴向温度为 11500—12500K。

上面列举的一些工作, 已得到了等离子炬技术的一个重大成果——电弧柱在空间中稳定和灯具边壁的可靠的热防护。解决了这两个问题, 就能建立起具有非常大电流密度的稳定工作的电弧。在所有这些工作中, 研究和稳定的对象就是电弧柱。别捷尔斯的工作曾经是低温等离子体技术发展上的一个新的阶段^[13] (1954 年)。在继承早已开始了的有关盖尔金电弧的结构改进工作之后, 他制作了一个带孔的阳极, 此孔制成拉伐尔喷管形状。速度 ~6.5 千米/秒、温度 8000K 的超声速等离子流由孔向外喷射到敞开的空间中去。从此以后, 出现了一个新的研究对象——等离子体射流, 此后对能获得这种射流的装置, 就叫做等离子炬。

后来所进行的研究和改进射流等离子炬的工作中, 应当提到文献[14—16]。有关等离子炬的一些早期工作和书目已收进文集^[16—18]中。苏联在 1955—1958 年期间, 以巴柯夫命名的冶金学院的一些研究工作者, 从事过各种工艺应用的稳定的电弧和等离子体射流的研究, 他们是库拉金 (Кулагин) 和尼柯拉耶夫 (Николаев)^[19], 瓦西里耶夫 (Васильев), 依萨钦柯

(Исаченко)^[20](ВНИИ汽车制造厂),以及在巴顿(Патон)研究所中有杜德柯(Дудко)和拉凯基(Лакиза)^[21]. 1958年,在以伏龙芝(Вологдин)命名的 НИИТВЧ 中,格鲁哈诺夫(Глуханов)和德列斯维(Дресвин)设计并试验了水流稳定的电弧射流等离子炬.朱柯夫(Жуков),乌托夫(Даутов),雅柯(Яеько)等完成了大功率等离子炬的设计和研究.

也就在这个期间,改进收缩弧的稳定性和它实际应用的工作仍在继续进行着. 将收缩弧首先用于金属切割的工作中,应当注意到《Линде》公司^[22]和一些作者的著作^[19-21,23,24]的报道.

从所罗列的这些简略和不完全的工作中,可以看出: 电弧研究的整个过程已经为现代等离子炬技术的发展和低温等离子体广泛应用作了准备工作. 在本世纪的头几十年中,已经具备了等离子炬中稳定和维持电弧的一些基本原理. 米特凯维奇(Миткевич),布朗(Брон),特列特维雅克(Третьяк),柴列斯基(Залесский),库克科夫(Кукеков)等工作,对于理解电弧的物理本质具有重大意义.

1.3 稳态感应无电极放电的特性和感应等离子炬

大气压下高频感应等离子体的广泛实际应用,标志着等离子体技术和工艺的现代水平. 但是,在此时期之前,对于低气压感应无电极放电的物理本质,已进行过长期而细致的研究. 在赫道尔夫(Хитторф)的著作中,第一次提到有关高频无电极放电^[25]. 赫道尔夫曾经指出,当感应线圈通上高频电流之后,装有感应线圈的真空管中的残留气体,就开始产生辉光. 此后,捷斯拉(Тесла)^[26],列尔玛恩(Лерманн)^[27],列黑尔(Лехер)^[28]和什塔涅尔(Штайнер)^[29]就把注意力转向

这个现象。他们用感应线圈匝间电场作用来解释气体的辉光。但是，赫道尔夫^[25]及其后的汤姆逊^[30]曾假设，这种形式的放电不是由感应线圈电场而是由磁场激发，并且具有在气体中感应出电流的特性，汤姆逊的工作使高频感应无电极放电的理论得到了进一步的发展^[31,32]。他描述了一些实验，并创立了感应放电理论，由此导出确定这类放电点火电势的表达式。汤姆逊认为，感应线圈的磁场是产生放电的主要原因，所以，引进了磁场强度和灯具半径的乘积 Hr ，作为确定放电点火的量值。汤姆逊在其实验中令人信服地证实了无电极放电具有感应现象的本性。

以后在这方面的作品中，塔乌恩谢恩特 (Таунсенд) 和多纳尔顿 (Дональдсон) 的著作^[33,34]是很重要的。这些文章的作者对感应(磁场的)放电的假设提出了异议。他们指出，螺管线圈的两端间的电场强度比交变磁场激发的电场强度大 30—40 倍。他们和文献 [26—29] 的作者一样，认为放电是由感应线圈的电场引起的，并且论证了这种形式的电场可以保证环形放电。汤姆逊和塔乌恩谢恩特两者观点之间这种原则分歧，把为数众多的研究工作者吸引到该问题的研究上来。

在文献 [35—40] 中，借助各种各样的试验已经证明了，在高频感应线圈内真空灯具中可能有两类放电，分别由感应线圈匝间的电场和磁场激发。巴巴特 (Бабат) 把它们相应地定名为 E 放电和 H 放电*。

正如马克-基诺恩 (Мак-Киннон) 指出的^[35]，塔乌恩谢恩特和汤姆逊两者所得结果之间的矛盾，是由于进行实验的条件不同所导致的。汤姆逊使用了衰减振荡的振荡器，并在

* 按上一句提法，原书定名不妥。——译者注

较低气压的狭窄区域中工作。而塔乌恩谢恩特采用非衰减振荡的电子管振荡器,并在压力范围较宽的气体中进行放电。马克-基诺恩重复了塔乌恩谢恩特和汤姆逊的一些工作条件。他使用了两种电源,并证明了,即使使用非衰减振荡的发生器(塔乌恩谢恩特方案),也可以得到图形清晰的 H 放电。灯具(管)中的放电实际上是在感应线圈匝间电场作用下产生的,而顺着整个灯具,具有纵向弱辉光的特征。随着高频振荡振幅的增加,辉光变得越来越明亮了。最后发生了环形放电,而这种放电的出现可以根据光辐射强度和振荡器的反应来确定。这时 E 场激发的纵向辉光消失。马克-基诺恩将灯具装在感应线圈外面 E 电场作用区域里,仅仅得到 E 放电的纵向辉光,而且不论条件怎样变化也不会过渡到 H 形式放电。

从近代解释高频无电极放电本质的观点来看,所发生现象的物理实质,看来在于下述一点。无电极放电的点火总是在感应线圈的电场作用下进行的,正如塔乌恩谢恩特正确地指出过的,感应线圈的电场强度可以超过感应电动势强度30倍或更多。这个电场激发气体初始电离,随着高频振荡的振幅的增大,气体电离程度也上升,从而也提高了气体放电的电导率。当气体电导率很小时,就 H 场而论,放电是透明的,感应线圈的交变磁场不能将自身能量转给放电。但是,当电导率在 E 场增加的影响下刚刚达到某个临界值时,感应线圈的磁能开始释放,而 H 型无电极放电也随之开始了。此时,感应线圈电压降低, E 放电也随之熄灭了。

感应 H -放电可能有两种显现形式:雪崩型放电和 E 放电逐渐过渡到 H 放电,马克-基诺恩在平稳地提高感应线圈电压过程中,在同时存在着两种形式放电时,观察到一类放电逐渐过渡到另一类放电。看来,汤姆逊遇到的是雪崩型过程,因为他未曾观察到 E 放电。这是因为衰减振荡发生器一次谐波

的功率和振幅都很大,使气体立即在感应线圈的电场中产生强电离,其结果是雪崩式的 H 放电产生了,就看不到明显的过渡。

在阐明高频无电极放电的物理本质的同时,在此时期(1920—1934年)的文献中,包含有其他不少引人注目的研究。由汤姆逊建立的产生高频无电极放电的理论^[32],曾经受过精确的定量检验。在文献[38, 40]中,得到过空气、氧、氮、氢、氩、氖和氦等的高频无电极放电的点火曲线。在这些文献中得到的有关特性,证实了汤姆逊理论的结论,并在漫长的年代里,确立了气体放电物理学中的试验电荷模型。

在阐明了高频无电极放电的本质及解决了汤姆逊和塔乌恩谢恩特之间的争论之后,在很长时间内,无论是对这类放电还是对其物理现象都失掉了兴趣。在那个时期(1926—1934年),无电极放电的所有实验都是在小功率电源上进行的,所以如何实际运用这类放电,那时是根本谈不上的。

随着大功率电子管振荡器的出现和放电本身功率的提高,高频无电极放电的研究又开始了一个美好的新时期。应当把巴巴特^{[41]*}的工作看作为该时期中第一个最重要的工作。他使用了振荡频率超过3兆赫的大功率电子管振荡器,使之能够在直径100—400毫米的石英灯具中压力为 10^{-1} 到760毫米汞柱下获得放电,他首先成功地获得大气压下的感应无电极放电。在其它的工作中,放电功率大到使直径100毫米的石英灯具在几秒钟里熔化了。

巴巴特曾提到过,在直径350毫米的灯具中,当气体压力

* 1941年,在战前最后几个月及战后头几个月,在列宁格勒《Светлан》工厂里,巴巴特完成了有关高频无电极放电的研究工作。一些实验是在被封锁后的头一个冬季的困难条件下,在电力供应时常中断的那样严重日子里进行的。结果巴巴特的某些同事在列宁格勒被围困时牺牲了,此项工作也因所有供电系统毁坏而被迫中断了。