

热等离子体传热与流动

陈熙 著



科学出版社
www.sciencep.com

热等离子体传热与流动

陈 熙 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是一本系统论述温度约一万度的热等离子体条件下传热与流动问题的专著,着重论述热等离子体条件下传热与流动的特点、处理方法与现有的研究成果,特别是那些与普通传热学或普通流体力学中不相同或不完全相同的结果。

全书共分为引论、热等离子体、基本方程式、热等离子体中颗粒的受力、热等离子体中颗粒的传热、通道电弧及等离子体发生器中的传热与流动、等离子体射流及反应器中的传热与流动、其他等离子体传热与流动问题等八章,每章末尾均列有大量的参考文献,书末的附录中给出了实际计算中常用的物理常数、函数、典型等离子体的成分组成、热力学性质与输运性质。

本书是1993年由科学出版社出版的《高温电离气体的传热与流动》一书的修订补充版,着重补充了近十几年来新得到的一些重要研究结果,并根据新的研究结果对原书中的一些内容做了修订。

本书可供工程热物理以及航天航空、材料、机械、冶金、化工等部门从事热等离子体科学与技术工作的科研与教学人员使用,也可作为相关专业研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

热等离子体传热与流动/陈熙著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-023657-9

I. 热… II. 陈… III. ①热等离子体-传热②热等离子体-流动(力学)
IV. O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195694 号

责任编辑:刘宝莉 闫井夫 / 责任校对:李奕莹
责任印制:赵 博 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年3月第一次印刷 印张:35 3/4

印数:1—2 000 字数:700 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

热等离子体技术已经得到相当广泛的应用。由于热等离子体条件下重粒子温度与电子温度均高达万度量级,传热与流动往往是热等离子体在许多技术应用中必须关注的重要问题。热等离子体条件下的传热与流动有许多特点不同于普通气体。热等离子体发生器中的传热与流动和电磁场相互耦合,大温差导致气体的热物理性质有大幅度的变化,气体电离度在空间显著变化导致电离-复合反应参与能量输运过程,与等离子体接触的物体(如原料颗粒)会因电子与离子质量间的巨大差异而带电等,都是一些显而易见的特征。这些特征使热等离子体条件下的传热与流动具有比常温气体条件下更为丰富的物理内容,并且可以得出许多和常温气体条件下不相同或不完全相同的结果。例如,当其他条件相同时,流动等离子体中导电良好的金属球形颗粒和不导电的非金属球形颗粒的传热率、阻力与热泳力可以不同,就是普通传热学与普通流体力学中未曾遇见过的现象。同时,热等离子体条件下的传热与流动研究也比常温气体条件下困难,实验研究中不可避免地要采用适用于高温环境的测试技术,理论研究中则往往需要考虑气体的热物理性质随温度的大幅度变化,考虑电离气体流动与传热和电磁场相互耦合等复杂因素,从而不得不更多地依靠对有关方程式进行数值解,即进行数值模拟研究。

著者 1993 年由科学出版社出版了《高温电离气体的传热与流动》一书,以常见的电弧或高频感应耦合热等离子体发生器与反应器以及等离子体射流中的传热与流动为基本线索,论述温度为万度量级的热等离子体或高温部分电离气体条件下的传热与流动特性,试图比较系统地总结有关的研究进展,特别是论述那些与普通传热学或普通流体力学中不相同或不完全相同的结果。本书是《高温电离气体的传热与流动》一书的修订补充版,并将书名改为更为贴切的“热等离子体传热与流动”。本书着重补充了近十几年来新得到的一些重要研究成果,包括著者及其合作者所取得的研究结果,并根据新的研究成果对原书中的一些内容做了修订,如更正了自由分子流区颗粒阻力与热泳力分析中有关表面压力的推导等。书中还提到一些至今研究得不够深入或者连物理现象都还不太清楚的问题,对于这样一个物理现象纷繁复杂的研究领域而言是不足为怪的,这也是目前研究活动仍然方兴未艾的原因之一。

我们近三十年来关于热等离子体条件下传热与流动问题的研究,得到了国家自然科学基金委员会(国家自然科学基金资助号: 83 技 758, 1871211, 8588032, 190705022, 59376308, 59676011, 19872038, 59836220, 50176024, 50336010, 10405015,

10575127, 10772016)以及教育部、科学技术部等有关部门的资助。正是这些研究中所取得的成果,包括著者及其合作者发表的一系列论文和1991年获“国家自然科学基金”三等奖的成果“热等离子体条件下颗粒的传热与阻力”,构成了本书、尤其是本书第4章至第8章的重要内容。

著者衷心感谢美国工程科学院院士、Minnesota大学机械工程系高温与等离子体实验室 Pfender E 教授。1981~1983年和1989~1990年著者曾两次在他的实验室工作,接触到许多热等离子体传热与流动的前沿课题;著者有关热等离子体条件下颗粒加热与运动等问题的研究也是从那时开始并和他合作进行的。Pfender E 教授的远见卓识和严谨的治学态度使著者受益匪浅。著者还向 Patankar S V 教授学习了流动与传热问题的数值解法,向 Berman A S 教授学习了处理传热与流动问题的动理论方法。许多曾和我一起工作过的同事和学生,包括韩鹏博士、李和平博士、叶晓虎博士、王海兴博士、徐东艳博士、程凯博士以及周明德、陈焕倬、查为、陈小明、何评、邱健勇、陶新、苏炳志、俞岚、谷勇先、许波、吴新灿等,对于研究工作的开展做出了重要的贡献。Murphy A B 博士提供了多种类型的等离子体的物性数据表,许共承(Hsu K C)博士、李永正(Lee Y C)博士、邱耀平(Chyou Y P)博士、吕志鹏(Lu Z P)博士等在许多方面,尤其是在等离子体物性计算和传热研究方面也提供了帮助。本书的出版得到中国科学院科学出版基金的资助、科学出版社的支持以及吴承康院士和卢文强教授的推荐。在完成修改稿过程中,承王海兴副教授和李和平副研究员在公式与参考文献录入、物性数据制表、画图、改图等诸多方面进行协助,并读了全部初稿和清样,提出了许多宝贵的修改意见。潘文霞研究员和孟显博士在近期的研究中给予了多方面的帮助,并在百忙中读了部分手稿和清样,提出了改进意见。著者在此对他们表示深深的谢意。

由于著者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

主要符号表

拉丁字母符号

a	$=\kappa/(\rho c_p)$, 热扩散率(m^2/s); 热协调系数
a_j	第 j 种组分的热协调系数
a_0	Bohr 第一轨道半径(m)
A	向量势($\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}$)
b	瞄准距离(m)
B	磁感应强度(T)
c	光速(m/s)
C	修正因子
c_p	定压比热[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
C_D	阻力系数
d_0, d_p	颗粒直径(m)
D	扩散系数(m^2/s)
D_{amb}	双极扩散系数(m^2/s)
e	基元电荷量(C)
E	电场强度(V/m)
E	能量(J, eV)
\dot{E}_{eh}	电子与重粒子间能量交换率(W/m^3)
E_i	电离能(J, eV)
F	体积力(N); 作用力(N); 阻力(N)
f	分布函数; 漫反射分子的分数; 频率(s^{-1}); 无量纲流函数; 动量协调系数; 阻力
f^-, f^+	入射与反射粒子的速度分布函数
f_j	$=\rho_j/\rho$, 第 j 种组分的质量分数; 第 j 种组分的分布函数
$f(Re)$	标准阻力曲线的函数表达式
F_D, F_T	阻力(N); 热泳力(N)
g	重力加速度(m/s^2); 单位面积蒸发量[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
G	蒸发质量流量(kg/s); 质量流量(kg/s)
h	Planck 常数($\text{J} \cdot \text{s}$); 气体的比焓(J/kg)

H	磁场强度(A/m)
I	弧电流(A);探针电流(A)
j	电流密度(A/m ²)
j_e, j_i	电子与离子电流密度(A/m ²)
J_{Te}	热电子发射电流密度(A/m ²)
k_B	Boltzmann 常数(J/K)
L	特征长度(m);基板距离(m);弧长(m)
L_m, L_v	熔化潜热(J/kg);蒸发潜热(J/kg)
\dot{m}	质量流量(kg/s)
m_j	第 j 种组分的粒子质量(kg)
n_j	第 j 种组分的粒子数密度(m ⁻³)
p, p_j	压力(Pa);第 j 种组分的分压力(Pa)
q, q_j	热流密度(W/m ²);第 j 种组分的热流密度(W/m ²)
q_j	Joule 热(W/m ³)
Q	总热流(W);体积流量(m ³ /s, L/min)
Q_{ij}	碰撞截面(m ²)
r	径向坐标, 径向位置(m)
r, θ, z	柱坐标系
r_p, r_w	颗粒半径(m, μm)
R	电弧半径(m);计算域外半径(m);气体常数[J/(kg · K)]
R_0	通道半径(m)
S	热传导势(W/m);方程的源项;颗粒的球形率
S_j	$=U_\infty/\sqrt{2k_B T_j/m_j}$, 速度比
S_v	蒸气的过饱和度
t	时间(s)
\bar{t}	折算时间, $=t/r_w^2$ [连续介质区(s/m ²)]或 $=t/r_w$ [自由分子流区(s/m)]
T	温度(K)
u, v, w	速度分量(m/s)
U	电压(V);速度(m/s)
\mathbf{U}	相对速度向量(m/s)
U_∞	来流速度(m/s)
U_r	单位体积等离子体的辐射功率(W/m ³)
\mathbf{v}, \mathbf{V}	速度向量(m/s);气体粒子速度向量(m/s)
\bar{v}_j	第 j 种组分的平均热运动速率(m/s)
V_f, V_s	浮动电位(V);等离子体电位(V)

V_p	颗粒速度向量(m/s)
W_s	材料的逸出电位(J/C, V)
x, y, z	直角坐标系
z^*	热传导势跳跃距离(m)

希腊字母符号

α	修正因子;系数
β	修正因子;系数
γ	比热比
δ	趋肤层厚度(m)
Δ	载气喷射管到射流边缘的距离(m)
ϵ	内能(J/kg);黑度系数;镜反射分数
ϵ_0	介电常数(F/m)
η	无量纲坐标
θ	电子/重粒子温度比;圆心角($^\circ$);无量纲焔
κ	热导率[W/(m·K)]
λ	波长(m);平均自由程长度(m);第二黏性系数(Pa·s)
λ_D	Debye 长度(m)
μ, μ_0	动力黏度(Pa·s);真空磁导率(H/m)
ν	运动黏度(= $\mu/\rho, m^2/s$);频率(s^{-1})
ξ, ξ_0	无量纲坐标;动压力修正因子;磁导率(H/m)
ρ	密度(kg/m^3)
σ	电导率(S/m);Stefan-Boltzmann 常数
τ, τ_j	切应力(N/m^2);第 j 种组分的切应力(N/m^2)
ϕ, Φ	颗粒上浮动电位的绝对值(V);电位(V)
χ	电磁场间的相位差
ψ	流函数(m^2/s);粒子通量($m^{-2} \cdot s^{-1}$);作用势(eV)
ψ_j	第 j 种组分的气体粒子的通量($m^{-2} \cdot s^{-1}$)
Ψ_j	第 j 种组分的气体粒子的总通量(s^{-1})
ω	圆频率(s^{-1})
ω_p	等离子体频率(s^{-1})

无量纲数

Bi	Biot 数(= κ_g/κ_p)
Gr	Grashof 数[= $(\rho_w - \rho_\infty)gL^3/(\mu\nu)$]

Kn	Knudsen 数($=\lambda/L$)
Ma	Mach 数($=U_\infty/\sqrt{\gamma k_B T/m}$)
Nu	Nusselt 数[$=qL/(\kappa\Delta T)$]
Pr	Prandtl 数($=\mu c_p/\kappa$)
Re	Reynolds 数($=\rho U_\infty L/\mu$)
Sc	Schmidt 数($=\nu/D$)

下 脚 标

a	原子;阳极
av	积分平均的
c	连续介质区;阴极
e	电子
ex	激发
f	膜温度下;冻结条件下;浮动电位下
fm	自由分子流区
g	气体;跳跃后的值
h	重粒子
i	离子;入射的
j	第 j 种组分
j	跳跃后的值
l	液相
m	熔化温度下
p	颗粒
r	径向分量;辐射分量;参考温度下;反应;反射
s	固相;颗粒表面
T	热泳
v	蒸气;蒸发温度下
w	壁面
x, z	轴向分量
θ	周向分量
0	无蒸发;初始值;环境
1	有蒸发
∞	来流;等离子体流

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 引论	1
1.1 热等离子体传热与流动研究的应用背景	1
1.2 典型的热等离子体技术应用中的传热与流动问题	3
1.3 热等离子体条件下传热与流动的特点	10
1.4 本书的内容安排	14
参考文献	16
第 2 章 热等离子体	22
2.1 热等离子体的产生	22
2.1.1 电弧等离子体发生器	22
2.1.2 高频热等离子体发生器	27
2.2 热等离子体中的碰撞过程	29
2.3 热等离子体中的辐射过程	34
2.4 热等离子体的热力学状态	37
2.4.1 完全热力学平衡	38
2.4.2 局域热力学平衡	40
2.4.3 双温度等离子体	41
2.5 热等离子体的特征参量	43
2.5.1 Debye 长度	43
2.5.2 等离子体频率-响应时间	46
2.5.3 回旋频率与 Larmor 半径	47
2.6 热等离子体的成分组成、热力学性质与输运性质	48
2.6.1 局域热力学平衡等离子体的成分组成	49
2.6.2 局域热力学平衡等离子体的热力学性质	51
2.6.3 局域热力学平衡等离子体的输运性质	55
2.6.4 双温度等离子体的成分组成、热力学性质与输运性质	59
2.7 热等离子体及被加工颗粒参数的测量	62
2.7.1 测量热等离子体温度与速度的光学方法	64
2.7.2 静电探针	68
2.7.3 量热探针	71

2.7.4 飞行颗粒参数的测量	73
参考文献	81
第3章 基本方程式	86
3.1 引言	86
3.2 连续介质区的基本方程式	89
3.2.1 局域热力学平衡等离子体流动与传热的基本方程式	89
3.2.2 非局域热力学平衡等离子体流动与传热的基本方程式	101
3.3 非连续介质区的基本方程式	105
3.3.1 近连续介质区的速度滑移与温度跳跃边界条件	105
3.3.2 自由分子流区的基本方程式	109
3.3.3 过渡区的基本方程式	114
3.4 电磁场方程式	116
参考文献	120
第4章 热等离子体中颗粒的受力	123
4.1 引言	123
4.2 颗粒所受的各种作用力	124
4.3 连续介质区颗粒的阻力	127
4.3.1 现有的颗粒阻力表达式	127
4.3.2 有关颗粒阻力的解析研究与数值计算	131
4.3.3 实验研究	138
4.4 过渡区与滑移区颗粒的阻力	155
4.5 自由分子流区颗粒的阻力	162
4.5.1 引言	162
4.5.2 基本假定、粒子通量与颗粒上的浮动电位	163
4.5.3 未蒸发与蒸发球形颗粒的阻力	170
4.5.4 影响颗粒阻力的其他因素	178
4.6 颗粒所受的热泳力	188
4.6.1 引言	188
4.6.2 过渡区颗粒上的热泳力	190
4.6.3 自由分子流区颗粒上的热泳力	190
参考文献	214
第5章 热等离子体中颗粒的传热	220
5.1 引言	220
5.2 连续介质区颗粒的传热: 无对流情形	222
5.2.1 向未蒸发颗粒的定常传热	222
5.2.2 热边界层的松弛时间	224

5.2.3	向蒸发(或升华)颗粒的传热	225
5.2.4	颗粒的非定常加热	231
5.2.5	从颗粒蒸发的蒸气污染等离子体对传热的影响	244
5.3	连续介质区颗粒的传热:有对流情形	247
5.3.1	现有的颗粒传热表达式	247
5.3.2	现有传热表达式适用性的评价	249
5.3.3	有对流、无蒸发颗粒传热表达式的推导	254
5.3.4	有对流条件下向蒸发颗粒的传热	259
5.3.5	等离子体向球传热的实验研究	261
5.3.6	影响颗粒传热的其他复杂因素	269
5.4	温度跳跃区的传热	270
5.4.1	热传导势跳跃处理方法	270
5.4.2	Knudsen 数对颗粒传热的影响:无对流情形	273
5.4.3	压力对等离子体向颗粒传热的影响	274
5.4.4	有对流条件下 Knudsen 数对颗粒传热的影响	276
5.4.5	对热传导势跳跃处理方法的修改	279
5.5	自由分子流区的传热	282
5.5.1	引言	282
5.5.2	分析解结果:球形颗粒情形	283
5.5.3	向圆柱体的传热	290
5.5.4	其他复杂因素	293
	参考文献	305
第 6 章	通道电弧及等离子体发生器中的传热与流动	311
6.1	引言	311
6.2	通道电弧中的传热与流动	311
6.2.1	充分发展电弧	312
6.2.2	发展中的电弧	315
6.2.3	冷气体喷射对通道电弧的影响	323
6.2.4	其他复杂因素	328
6.3	直流电弧等离子体发生器的数值模拟	329
6.3.1	直流电弧等离子体发生器的二维数值模拟	329
6.3.2	直流电弧等离子体发生器的三维数值模拟	332
6.3.3	亚声速-超声速电弧等离子体发生器的数值模拟	340
6.3.4	电极鞘层的处理	348
6.3.5	其他复杂因素	351
6.4	高频等离子体发生器的数值模拟	353

6.4.1	准二维数值模拟	353
6.4.2	自洽二维数值模拟	358
6.4.3	三维数值模拟	371
6.4.4	发生器中原料颗粒的运动与加热	375
	参考文献	378
第7章	等离子体射流及反应器中的传热与流动	384
7.1	等离子体射流的传热与流动	384
7.1.1	引言	384
7.1.2	层流等离子体射流	385
7.1.3	湍流等离子体射流	404
7.1.4	层流与湍流等离子体射流特性对比	416
7.1.5	超声速等离子体射流	435
7.1.6	颗粒在等离子体射流中的运动与加热	439
7.1.7	涂层形成与等离子体喷涂的数值模拟	450
7.2	等离子体反应器中的传热与流动	451
7.2.1	反应器中流场、温度场、颗粒运动与加热的数值模拟	451
7.2.2	颗粒的成核、长大与热泳沉积	466
	参考文献	471
第8章	其他等离子体传热与流动问题	479
8.1	自由边界电弧	479
8.1.1	自由燃烧电弧	479
8.1.2	气流稳定的电弧	485
8.1.3	高强度直流电弧的阳极约束区	488
8.2	电弧的电极区	492
8.2.1	阳极传热	494
8.2.2	阴极过程	503
8.3	热等离子体向处于浮动电位或具有偏置电位的物体的传热	513
8.4	计算大温差变物性条件下传热与阻力的参考温度法	521
	参考文献	527
附录1	物理常数和常用函数	532
附录2	等离子体的成分组成	534
附录3	等离子体的热力学与输运性质	540
	参考文献	550
内容索引	552

第 1 章 引 论

1.1 热等离子体传热与流动研究的应用背景

本书研究热等离子体条件下的传热与流动。这里所说的热等离子体(thermal plasma)是指电子温度(T_e)与重粒子(原子、离子等)温度(T_h)均约为 10^4 K 的高温部分电离气体,它由电子、离子、中性粒子(原子、原子团、分子)和光子所组成。热等离子体比受控热核反应研究中所遇到的完全电离的高温等离子体(温度约 10^8 K,仅有原子核、电子和光子)温度低得多,但是比通常的燃烧体系所能达到的气体温度高相当多,电离度也高得多。热等离子体可以比较容易地用电弧放电、高频感应耦合放电等方法连续地产生与维持,远不像高温等离子体的产生与维持那样困难,从而极大地方便了热等离子体在工业与实验室中的实际应用。热等离子体、低气压放电冷等离子体(以电感耦合或电容耦合辉光放电、微波放电等方法产生,电子温度很高,可达几至几十电子伏特或几至几十万度,但重粒子温度不高,通常为室温或稍高于室温)以及大气压放电非平衡等离子体(以介质阻挡放电、辉光放电、滑移电弧等方式产生,电子温度明显高于重粒子温度),有时合称为工业等离子体,因为工业技术应用中遇到的主要是这几种等离子体(此外还有磁流体发电等场合遇到的、温度在 3000K 左右、以添加易电离的碱金属化合物的办法提高其电离度的燃烧等离子体);文献中,尤其是俄文文献中,时常称之为低温等离子体。由于热等离子体中重粒子温度较高(达 10^4 K),放电电流较大,热等离子体条件下的传热问题比冷等离子体或大气压非平衡等离子体条件下来得尖锐,传热与流动问题的研究往往成为许多热等离子体科学与技术问题研究的关键。具有较高的温度(或气体粒子的平均热运动动能)和含有相当数量的带电粒子(电子与离子),使热等离子体不同于室温左右的普通气体以及温度在 3000K 左右或更低的燃烧气体,从而在热等离子体条件下可以完成许多过去不能完成的工艺过程。例如,可以熔化最难熔的金属(如钨)或非金属材料,可以完成一些吸热量较大的化学反应(如使空气中氧与氮合成氮的氧化物、使甲烷或煤裂解),可以获得许多过去无法获得的产品(如在大气压下获得金刚石膜或晶体、制备富勒烯、碳纳米管等),可以大大提高物理变化(如使材料熔化或蒸发)或化学反应的速率从而可以提高工业设备的生产率,可以用电磁场对相关过程施加影响和控制等。

热等离子体的工业应用可以追溯到 20 世纪初挪威以电弧方法固氮(从空气中获取氮的氧化物并进一步生产氮肥)和德国以电弧方法生产乙炔。然而,早期的热等离

子体在材料加工方面的应用尝试大多不怎么成功。原因是那时缺少合用的热等离子体产生装置和参数诊断手段,对热等离子体的基本性质了解不够,同时也缺少材料与等离子体相互作用方面的知识。20世纪五六十年代的太空研究计划大大促进了热等离子体科学与技术的发展。在太空研究计划中,热等离子体的主要技术应用是模拟太空飞行器高速再入大气层(包括地球的大气层和其他星体的大气层)时飞行器所遇到的高温环境,进行飞行器热防护材料的烧蚀试验与材料评价。在高超声速飞行中,飞行器附近产生的激波后方,气体被加热到高温部分电离状态,飞行器要适当加以热防护才不致损伤内部的人员或仪器设备;还可能因等离子体和电磁波相互作用而出现通信中断等其他问题。这些都刺激了有关研究工作的开展。热等离子体在模拟飞行器遭遇的高温环境与进行材料的烧蚀试验方面的应用目前仍在继续,据报道,已研制了功率高达几十兆瓦^[1]乃至1千兆瓦^[2]的电弧气体加热器,还研制了不存在电极污染问题的感应耦合放电式气体加热器。近年来在利用等离子体进行推进、流场控制等方面也开展了不少研究,如功率为千瓦量级、依靠辐射进行冷却的直流电弧加热推力器已实际用于卫星的姿态调整与位置保持^[3]。

近几十年来,等离子体发生器的研制^[1,4~6]及等离子体诊断技术的开发^[7~9]方面均已取得了巨大的进展。许多热等离子体产生设备,包括功率约1kW的ICP(感应耦合等离子体)光谱分析用的小型高频等离子体炬,功率为几千瓦至几十千瓦的用于等离子体喷涂与切割、高技术陶瓷粉制备等各种目的的直流电弧或高频感应耦合放电型的热等离子体产生装置,直至功率高达几兆瓦的用于金属重熔、气体加热或废弃物处理用的热等离子体发生器等,在市场上已经可以买到;许多等离子体参数诊断所需要的基本设备,如光谱仪、ICCD相机、多通道信号分析仪、激光Doppler测速装置、焓探针、微机控制的ICP原子发射光谱分析设备等,也已经商品化。人们对于热等离子体的基本性质(成分组成、热力学性质与输运性质、电性质等)、等离子体发生器中的基本物理过程(弧根运动、电弧与气流相互作用、电极过程等)、热等离子体条件下的流动与传热传质规律等方面的知识,也有了显著的进步。这些条件的具备促成了目前热等离子体实际应用的快速发展,预料未来还会有更多的工业应用^[10~12]。和几十年前不同,现在热等离子体研究与开发的重点已不再局限于航天航空方面的应用,而是更多地转向机械、化工、冶金、环保等工业部门的应用,特别是在材料加工与新材料研制方面的应用,如各种功能膜的等离子体喷涂制备,各种氮化物、碳化物与氧化物陶瓷材料的合成,钛白、炭黑、乙炔等化工原料的生产,废弃物特别是高危废弃物的无害化处理,废钢和有色金属的熔化或重熔,钢水包的保温和加热,金属的提炼,微-纳米颗粒材料的制备,金刚石与超导体膜的制备等。与航天方面对大功率电弧气体加热器的要求(高焓值但短时间工作)不同,上述应用中,特别是工业生产性应用中,要求热等离子体发生器有较长的工作寿命和较高的效率,从而对发生器的研制提出了新的要求,其中包括要求更

深入地了解所涉及的传热与流动问题。

1.2 典型的热等离子体技术应用中的传热与流动问题

在热等离子体的技术应用中遇到各种高温部分电离气体条件下的传热与流动问题。下面针对一些典型的热等离子体技术应用,简要讨论所涉及的高温部分电离气体的传热与流动问题。

在图 1.1 所示的功率为千瓦量级、依靠外表面辐射进行冷却的直流电弧加热等离子体推力器中,气态推进剂(如肼的分解产物)经过阴极和阳极间放电产生的直流电弧加热,形成最高温度达万度以上的等离子体,经拉瓦尔喷管膨胀加速后以超声速射流(或羽流)形式喷出,产生推力。实际应用对电弧加热推力器的要求是:要能产生卫星姿态调整与位置保持所需要的推力;要有较高的比推力和推力效率,因为这些性能直接影响所需携带的推进剂重量或飞行器的有效载荷量;每次启动后要能连续正常工作足够长时间(例如工作一小时以上),以满足卫星姿态调整与位置保持等任务的需求;要工作性能稳定,能在卫星十年以上寿命期内重复启动许多次而依然能保持良好的性能,不出现故障;推力器累计工作时间需长达一千小时左右,而不出现性能恶化。电弧加热推力器的尺寸颇小,喉部直径不及 1mm,阳极-喷管长度为 cm 量级。在推力器阳极-喷管内的流动与传热直接影响推力器的寿命与效率,由于涉及大温差、多组分、等离子体非平衡、亚声速-超声速流动、阳极弧根贴附形式与弧根位置不易确定、喷管中有冻结流动损失、喷管下游可能出现稀薄气体效应等众多复杂因素,这些都给传热与流动过程的研究带来新的问题。

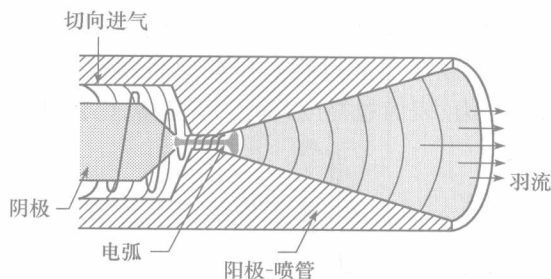


图 1.1 直流电弧加热推力器(Arcjet)工作原理示意图

图 1.2 是直流电弧等离子体喷涂系统装置的示意图,代表较为常见的实心阴极与阳极-喷管同轴放置和侧向喷射载气-原料颗粒的情形。有的研究中也采用多个阴极共用一个阳极,以及从空心阴极轴向供粉等设计方案^[13]。一些等离子体喷涂装置已经商品化,并广泛应用于工业生产中,用来产生各种耐高温、耐磨损、防腐蚀等功能涂层和进行表面修复。新的应用包括生产几乎不需要再进行加工的零

件,制备具有微细冶金结构的涂层和催化剂,制备金属与金属或者金属与陶瓷组合材料,制备微米以至纳米结构的厚涂层与薄涂层,制备生物相容涂层,制造模具,生产固体氧化物燃料电池等^[11,13~15]。在高温超导研究取得新的重大突破后不久,超导涂层即已用等离子体喷涂方法加以制备^[16,17]。等离子体喷涂集材料颗粒的快速加热与熔化、快速冷却与固化于一体,能产生出晶粒微细、性能良好的涂层,甚至能产生性能优异的非晶态合金^[14]和纳米结构的涂层^[15]。在等离子体喷涂(见图 1.2)中,工作气体经直流电弧加热后,以热等离子体射流的形式从喷枪喷出;用于喷涂的金属或陶瓷颗粒从喷枪外部或内部以载气携带侧向送入等离子体射流中,经过加热与加速,在熔融状态下高速撞击工件表面,原料颗粒在迅速变形、铺展过程中快速凝固,一片覆盖一片、一层覆盖一层地形成所需要的涂层。涂层的质量和许多因素有关,其中关键性的因素是要保证原料颗粒能得到适当的加热(加热到熔化但不过多的蒸发)与获得较高的速度,因此需要控制原料颗粒的运动轨迹与加热历程。颗粒的喷射速度与喷射方向是重要影响因素:喷射速度过小,颗粒将不能进入等离子体射流的高温区,因而不能得到有效的加热;喷射速度过高,颗粒则可能穿越等离子体射流的高温区,加热效果也不好。最佳的喷射速度和许多参数有关,如颗粒直径与比重,载气流量与喷射位置,等离子体射流的温度场与速度场以及工作气体种类等。为了改善等离子体与颗粒间的传热,通常在工作气体中添加一些分子量较小的气体,如氢或氦,即以氩-氢、氮-氢、氩-氦等气体混合物作为等离子体形成气体。为了建立等离子体喷涂的科学基础^[9,11,13,18,19],需仔细研究电弧等离子体发生器的内部工作过程,研究等离子体射流的流动、传热以及和周围介质(如环境空气)之间的掺混过程,研究等离子体射流与原料颗粒之间的相互作用(动量、能量与质量交换),研究熔融颗粒与工件表面之间的相互作用(颗粒在撞击工件时的变形、冷却、凝固与形成涂层的过程),研究原料颗粒的沉积率和涂层的质量(功能参数、孔隙率、结合力、表面粗糙度、涂层形貌、氧化程度等)及其与喷涂参数

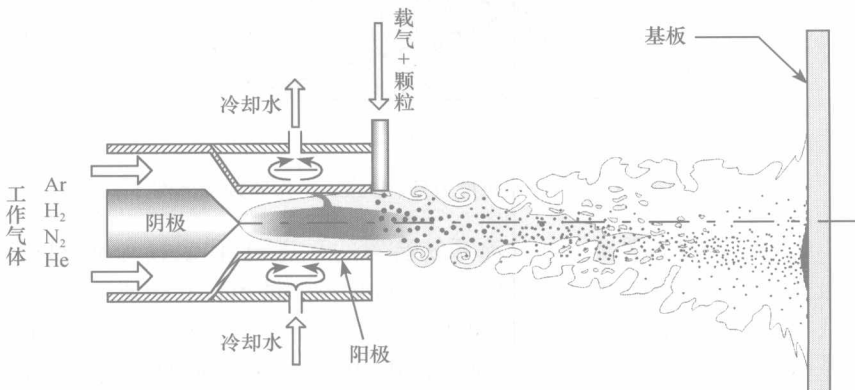


图 1.2 等离子体喷涂装置的示意图