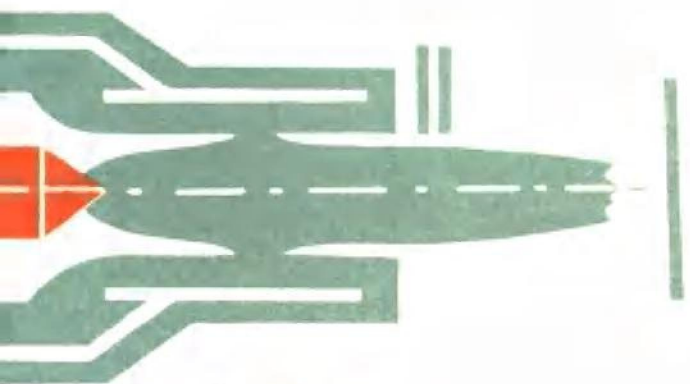


高温电离气体的 传热与流动

陈熙 著



科学出版社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是一本系统地论述温度约一万度的高温电离条件下气体传热与流动问题的专著。着重论述高温电离气体或热等离子体条件下传热与流动的特点、处理方法和现有的研究成果,特别是那些与普通传热学或普通流体力学的结果不相同或不完全相同的结果。

全书分为引论、高温电离气体、基本方程式、等离子体中颗粒的受力、等离子体中颗粒的传热、等离子体发生器与反应器中的传热与流动以及其它一些等离子体传热与流动问题等七章,每章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、等离子体成分组成、热力学与输运性质。

本书可供工程热物理、航天、冶金、化工、机械、材料等工业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,也可作为相应专业的研究生的参考教材。

高温电离气体的传热与流动

陈 熙 著

责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

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

*

1993 年 12 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1993 年 12 月第一次印刷 印张: 16 5/8

印数: 1—880

字数: 433 000

ISBN 7-03-003536-4/TK·7

定价: 21.00 元

前 言

本书是一本论述温度约 10^4K 的高温电离气体或热等离子体的传热与流动问题的专著。人们早在五六十年代即已关心高温电离气体的传热与流动，显然是与高速飞行物体的热防护研究紧密联系的。近二三十年来，热等离子体科学与技术发展迅速。高温电离气体已经可以方便地用电弧放电、感应耦合放电等方法连续地产生，其主要参数的诊断方法日趋完善（尤其是在实验室条件下），等离子体技术已经在高技术陶瓷粉或膜的制备、表面保护涂层的获得、等离子体化工、等离子体冶金、光谱化学分析等方面得到日益广泛的应用。高温电离气体条件下的传热与流动问题的研究也进行得更为深入，已成为传热学的一个生气勃勃的分支，并成为传统的传热学和等离子体物理学、电磁流体力学、高能化学、材料科学等其它学科的交汇点。

高温部分电离气体条件下的传热与流动有许多不同于普通气体情形的特点。温差大因而气体的热物理性质有大幅度的变化；气体电离度的变化大因而电离-复合反应参与能量交换过程；气体导电且有时有电流通过，传热与流动往往和电磁场相互作用；与等离子体相接触的物体（如原料颗粒），会因电子与离子质量间的巨大差异而带相对于当地等离子体为负的电位，等等，就是一些显而易见的特征。实际问题中，化学反应、流动与双极扩散过程的特征时间的相对大小可以很不相同，从而流动可以出现平衡、冻结或既非平衡又非冻结的复杂状况；表示气体粒子的平均自由程长度与物体的特征尺寸（如原料颗粒的直径）之比的 Knudsen 数，可以在从连续介质区（ $Kn \ll 1$ ）直至自由分子流区（ $Kn \gg 1$ ）的广阔范围内变化，从而相应的传热与流动规律可以很不相同，并且需要采用不同的理论处理方法；物体表面对电离-复合等反应是否起

催化作用,有时会对传热产生显著的影响等,这些也都是普通传热学和流体力学中不常遇到的复杂因素。以上这些特点,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丰富的物理现象,并且可以得出一些与常温气体条件下不同的结果。例如,其它条件相同时,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一样,就是普通传热学与普通流体力学中未曾有过的现象。同时,高温电离气体条件下的传热与流动研究,进行起来也比常温气体条件下困难,实验研究中不可避免地要使用适用于极高温度条件的测试技术,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,或考虑带电物体与电子及离子的相互作用,从而不得不更多地依靠对有关方程进行数值解。

本书以常见的电弧或高频等离子体发生器或反应器中的传热与流动,包括发生器或反应器中的能量、动量与质量传递,反应剂的混合、化学反应、淬冷、超细粉的核心形成与颗粒长大,颗粒在等离子体流中的加热与运动等为基本线索,论述高温电离气体的传热与流动问题,试图比较系统地总结现有的研究成果,其中包括著者自己十多年来研究工作的一些成果,有些结果过去尚未发表过。书中提到许多至今研究得不够深入或者连物理现象都还没有弄清楚的问题,这对于这样一个涉及的知识面广、现象纷纭复杂的研究领域而言是毫不足怪的,这也是目前研究活动仍然方兴未艾的原因之一。

我们十多年来关于热等离子体条件下的传热与流动问题研究,得到了国家教育委员会和国家自然科学基金委员会的资助,对此著者要首先表示感谢。正是这些研究中所取得的成果,包括著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,尤其是本书第四章至第七章的重要内容。著者还要特别感谢美国工程科学院院士、Minnesota 大学机械系传热学实验室 E. Pfender 教授,1981—1983年和1989—1990年著者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的研究也是那时开始并和他合作进行的，E. Pfender 教授的远见卓识和他的严谨的治学态度使著者受益匪浅。著者还从 S. V. Patankar 教授那里学到了流动与传热问题的数值解法，从 A. S. Berman 教授那里学到了处理传热与流动问题的动力论方法。本领域的许多著名研究者，如加拿大的 M. I. Boulos 教授，法国的 P. Fauchais 教授，日本的明石和夫 (K. Akashi) 教授和神沢淳 (A. Kanzawa) 教授等，曾给著者提供了有用的参考资料。许共承 (K. C. Hsu) 博士、李永正 (Y. C. Lee) 博士、邱耀平 (Y. P. Chyou) 博士、吕志鹏 (Z. P. Lu) 博士等在许多方面，尤其在等离子体物性数据方面提供了许多帮助。许多曾和我一起工作过的同事和学生对于研究工作的开展作出了重要的贡献。对所有这些人著者均表示深深的谢意。

本书的出版得到了中国科学院科学出版基金的资助。著者要特别感谢中国科学院学部委员、力学研究所吴承康研究员和中国科学院工程热物理所葛绍岩研究员的推荐，感谢中国科学院力学研究所陈允明研究员仔细审读手稿并提出了宝贵的修改意见，感谢科学出版社陈文芳副编审的细致的编辑加工以及其他为本书出版给予了帮助的同志。在本书完稿的时候，著者还要感谢家人的谅解和帮助。谨以此书献给我劳碌一生的父母。

主要符号表

拉丁字母符号

- $\kappa = \lambda / (\rho c_p)$, 热扩散率 (m^2/s)
- a_i 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 磁感强度 (T)
- c 光速 (m/s)
- c_p 定压比热 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
- C_D 阻力系数
- d_s, 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); 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)
- f 漫反射分子的分率; 分布函数; 频率 (s^{-1}); 无量纲流函数
- f^-, f^+ 入射与反射粒子的速度分布函数
- $f_i = \rho_i / \rho$, 质量分数; 分布函数
- $f(R_e)$ 标准阻力曲线的函数表达式
- F 无量纲流函数; 力 (N)
- 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)
- k 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/m²)
 i_e, i_i 电子与离子电流密度 (A/m²)
 J_{Te} 热电子发射电流密度 (A/m²)
 k Boltzmann 常数 (J/k)
 L 特征长度 (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_i 粒子质量 (kg)
 n_i 粒子数密度 (m⁻³)
 p, p_i 压力 (Pa)
 q, q_i 热流密度 (W/m²)
 q_j Joule 热 (W/m³)
 Q 总热流 (W); 体积流量 (m³/s, l/min)
 Q_{ij} 碰撞截面 (m²)
 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
 $S_i = U_\infty / \sqrt{2kT_i/m_i}$, 速度比
 S_v 蒸气的过饱和度
 t 时间 (s)
 τ 折算时间 ($=t/r_w^2$, s/m²)
 T 温度 (K)
 U 相对速度向量 (m/s)
 U_∞ 来流速度
 U_r 单位体积气体的辐射功率 (W/m³)
 v, V 速度向量 (m/s); 气体粒子速度 (m/s)
 \bar{v}_i 平均热运动速率 (m/s)
 V_f, V_i 浮动电位 (V); 等离子体电位 (V)

- V_p 颗粒速度向量 (m/s)
 W 材料的逸出功或功函数 (J, eV)
 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 系数
 γ 比热比
 δ 趋肤深度 (m)
 ϵ 黑度系数;介电常数 (F/m)
 η 无量纲坐标
 θ 电子/重粒子温度比;圆心角($^\circ$);无量纲焓
 κ 热导率 [W/(m·K)]
 λ 波长 (m); 平均自由程长度 (m); 第二粘性系数 (Pa·s)
 μ 动力粘度 (Pa·s)
 ν 运动粘度 ($=\mu/\rho$, m²/s); 频率 (s⁻¹)
 ξ 无量纲坐标;动压力修正因子;导磁率 (H/m)
 ρ 密度 (kg/m³)
 σ 电导率 (S/m); Stefan-Boltzmann 常数
 τ, τ_i 切应力 (N/m²)
 ϕ 颗粒上浮电位的绝对值 (V); 电位 (V)
 χ 电磁场间的相位差
 ψ 流函数 (m²/s)
 ψ_i 气体粒子的通量 (m⁻²·s⁻¹)
 Ψ_i 气体粒子的总通量 (s⁻¹)
 ω 圆频率 (s⁻¹)

无量纲数

- Bi Biot 数 ($=\kappa_g/\kappa_f$)
 Gr Grashof 数 [$=(\rho_w - \rho_\infty)gL^3/(\mu\nu)$]
 Kn Knudsen 数 ($=\lambda/L$)
 Ma Mach 数 ($=U_\infty/\sqrt{\gamma kT/m}$)

Nu Nusselt 数 [$=qL_s/(\kappa\Delta T)$]

Pr Prandtl 数 ($=\mu C_p/\kappa$)

Re Reynolds 数 ($=\rho U_\infty L/\mu$)

Sc Schmidt 数 ($=\nu/D$)

下 角 标

- a* 原子
- av* 积分平均的
- c* 连续介质区
- e* 电子
- 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
- 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
- T* 热泳
- v* 蒸气;蒸发温度下
- w* 壁面
- 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	vii
主要符号表	x
第一章 引论	1
第一节 高温电离气体传热与流动研究的应用背景	1
第二节 典型的热等离子体技术应用中的传热与流动问题	3
第三节 高温电离气体条件下传热与流动的特点	11
第四节 本书的内容安排	16
参考文献	17
第二章 高温电离气体	23
第一节 高温电离气体的产生	23
§ 1.1 电弧热等离子体发生器	23
§ 1.2 高频热等离子体发生器	29
第二节 高温电离气体中的碰撞过程	32
第三节 高温电离气体中的辐射过程	37
第四节 高温电离气体的热力学状态	42
§ 4.1 完全热力学平衡	42
§ 4.2 局域热力学平衡	45
§ 4.3 双温度等离子体	47
第五节 等离子体的特征参量	49
§ 5.1 Debye 长度	49
§ 5.2 等离子体频率——响应时间	54
第六节 高温电离气体的组分、热力学性质与输运性质	56
§ 6.1 平衡等离子体的组成成分	57

§ 6.2	热力学性质	61
§ 6.3	输运性质	67
第七节	等离子体及被加工的颗粒参数的测量	72
§ 7.1	等离子体温度的光谱法测量	74
§ 7.2	静电探针	78
§ 7.3	量热探针	82
§ 7.4	飞行中颗粒参数的测量	84
	参考文献	90
第三章	基本方程式	95
第一节	引言	95
第二节	连续介质基本方程式	98
§ 2.1	方程的一般形式	98
§ 2.2	直角坐标系中的基本方程式	108
§ 2.3	柱坐标系中的基本方程式	110
§ 2.4	球坐标系中的基本方程式	111
第三节	电磁场方程式	113
第四节	自由分子流区的基本方程式	118
§ 4.1	平衡气体中粒子的速度分布函数	118
§ 4.2	有温度梯度或速度梯度的气体中粒子的速度分布函数	122
§ 4.3	气体的平均性质与通量	124
	参考文献	127
第四章	等离子体中颗粒的受力	130
第一节	引言	130
第二节	颗粒所受的各种作用力	131
第三节	连续介质区颗粒的阻力	135
§ 3.1	现有的颗粒阻力表达式	135
§ 3.2	有关颗粒阻力的解析研究与数值计算	141
§ 3.3	实验研究	148
§ 3.4	其它复杂因素	162
第四节	过渡区颗粒的阻力	163

第五节	自由分子流区颗粒的阻力	172
§ 5.1	引言	172
§ 5.2	基本假定、粒子通量与颗粒上的浮动电位	173
§ 5.3	颗粒的阻力	182
第六节	颗粒所受的热泳力	198
§ 6.1	引言	198
§ 6.2	过渡区颗粒上的热泳力	201
§ 6.3	自由分子流区颗粒上的热泳力	202
	参考文献	220
第五章	等离子体中颗粒的传热	225
第一节	引言	225
第二节	连续介质区颗粒的传热：无对流情形	227
§ 2.1	向不蒸发颗粒的定常传热	228
§ 2.2	热边界层的松弛时间	230
§ 2.3	向蒸发(或升华)中的颗粒的传热	232
§ 2.4	颗粒的非定常加热	241
§ 2.5	从颗粒蒸发的蒸汽污染等离子体对传热的影响	258
第三节	连续介质区的传热：有对流情形	262
§ 3.1	现有的颗粒传热表达式	262
§ 3.2	现有传热表达式适用性的评价	265
§ 3.3	有对流、无蒸发颗粒传热表达式(3.8)的推导	270
§ 3.4	有对流条件下向蒸发颗粒的传热	276
§ 3.5	等离子体向球传热的实验研究	278
第四节	温度跳跃区的传热	292
§ 4.1	热传导势跳跃处理办法	292
§ 4.2	Knudsen 数对颗粒传热的影响：无对流情形	296
§ 4.3	压力对等离子体向颗粒传热的影响	298
§ 4.4	有对流条件下 Knudsen 数对颗粒传热的影响	301
§ 4.5	对热传导势跳跃处理办法的修改	304
第五节	自由分子流区的传热	307
§ 5.1	引言	307
§ 5.2	分析结果：球形颗粒情形	310

§ 5.3	向圆柱体的传热	317
§ 5.4	其它复杂因素	320
	参考文献	324
第六章	等离子体发生器与反应器中的传热与流动	329
第一节	通道电弧的数值模拟	330
§ 1.1	充分发展电弧	330
§ 1.2	发展中的电弧	334
§ 1.3	冷气体喷射对通道电弧的影响	340
§ 1.4	其它复杂因素	346
第二节	等离子体反应器的数值模拟	347
§ 2.1	反应器中流动与传热的数值模拟	347
§ 2.2	原料颗粒在反应器中的运动轨迹与加热历程	357
§ 2.3	颗粒的成核、长大与热泳沉积	365
第三节	等离子体射流的数值模拟	369
§ 3.1	引言	369
§ 3.2	层流等离子体射流(亚声速)	374
§ 3.3	紊流等离子体射流(亚声速)	380
§ 3.4	超声速等离子体射流	387
§ 3.5	颗粒在等离子体射流中的运动与加热	389
第四节	高频等离子体发生器的数值模拟	392
§ 4.1	准二维数值模拟	393
§ 4.2	包括二维自洽电磁场解的数值模拟	399
§ 4.3	原料颗粒的运动与加热	417
	参考文献	422
第七章	其它等离子体传热与流动问题	429
第一节	自由边界电弧	429
§ 1.1	自由燃烧电弧	429
§ 1.2	高强度直流电弧的阳极约束区	437
第二节	电弧的电极区	441
§ 2.1	阳极传热	443
§ 2.2	阴极过程	453

第三节	等离子体向处于浮动电位或具有偏置电位的物 体的传热·····	462
第四节	计算大温差变物性条件下传热与阻力的参考温 度法·····	474
	参考文献·····	481
附录 A	物理常数和常用函数·····	486
附录 B	等离子体的成分组成·····	488
附录 C	等离子体的热力学与输运性质·····	494
	参考文献·····	512
内容索引	·····	513

第一章 引 论

第一节 高温电离气体传热与流动研究的应用背景

本书研究高温电离气体的传热与流动。这里所说的高温电离气体,是指电子温度 (T_e) 与重粒子(原子、离子等)温度 (T_i) 均约为 10^4K 的部分电离气体,又称为热等离子体。它由电子、离子、光子和中性粒子(原子、原子团、分子)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 10^8K , 仅有原子核、电子和光子)温度低得多,但是它可容易地用电弧放电或高频感应放电的办法连续地产生与维持,远不像高温等离子体产生与维持那样困难,从而极大地方便了热等离子体的工业应用。热等离子体与冷等离子体(电子温度很高,可达几十电子伏特,但重粒子温度很低,通常为室温)合称为工业等离子体,因为工业中应用的主要是这两种等离子体(此外还有温度在 3000K 左右、以添加易电离的碱金属盐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,放电电流较大,热等离子体条件下传热问题比冷等离子体条件下尖锐。具有较高的温度和含有相当数量的带电粒子(电子与离子),又使热等离子体不同于室温左右的气体或普通的燃烧气体,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或非金属材料(如钨),可以完成一些吸热化学反应(如使空气中氧与氮反应),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晶体),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能提高工业设备的生产率,可以用电磁场对

过程施加影响或加以控制等。

热等离子体的工业应用可追溯到本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(至今仍在继续进行)。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等离子体产生装置和参数诊断手段,同时也缺少材料与热等离子体相互作用方面的知识。50年代末、60年代初的空间研究计划大大促进了热等离子体科学与技术的发展。在空间研究计划中,热等离子体的主要技术应用是模拟空间飞行器再入大气层(包括地球的大气层和其它星体的大气层)时所遇到的高温环境,进行飞行器热防护材料的烧蚀试验。在高超声速飞行器的周围,气体(激波后方)被加热到部分电离状态,飞行器要适当加以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讯中断等其它问题。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的高温环境与进行材料烧蚀试验方面的应用目前仍在继续,并为此研制了功率高达60 MW的电弧加热器^[1]。近30年来,在等离子体发生器的研制^[2-4]及等离子体诊断技术的开发方面^[5]均已取得了巨大的进展。许多等离子体发生设备,包括功率约1 kW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放电型式的等离子体发生装置,直至功率高达几兆瓦的用于金属重熔或气体加热用的等离子体发生器,在市场上已经可买到;许多等离子体参数诊断所需要的基本设备,如激光 Doppler 测速装置、光谱仪、焓探针、多道信号分析仪、微机控制的ICP原子发射光谱分析设备等,也已商品化。人们在热等离子体的基本性质(成分组成,热力学与输运性质,电性质)、等离子体发生器中的基本物理过程(电极过程,电弧与气流相互作用等)、等离子体条件下的流动与传热传质等方面的知识,也有了显著的进展。这些条件的具备促成了目前热等离子体加工的快速发展,预料90年代还会有更

多的工业应用^[6]。和二三十年前不同，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，而是更多地转向冶金、化工、机械等工业部门的应用，特别是在材料加工与新材料研制方面的应用，例如废钢或有色金属边角料的熔化或重熔，金属的提炼，钢水包的保温或加热，高炉鼓风温度的提高与还原气的制备，等离子体喷涂与材料快速固化，钛白等化工原料的生产，各种氮化物、碳化物与氧化物陶瓷材料的合成，金刚石与超导体膜的制备，等等。与航天方面对发生器的要求(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研究所涉及的传热与流动问题。

第二节 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各样的高温电离气体条件下的传热与流动问题。下面举一些具体的例子。

图 1.1 是等离子体喷涂装置的示意图。各种等离子体喷涂装置已经商品化，并广泛用于工业生产中，产生各种防腐蚀、耐磨损、耐高温的表面涂层或进行表面修复。新的应用包括生产不需要或几乎不需要再进行加工的零件，产生具有粉末冶金结构的涂层和

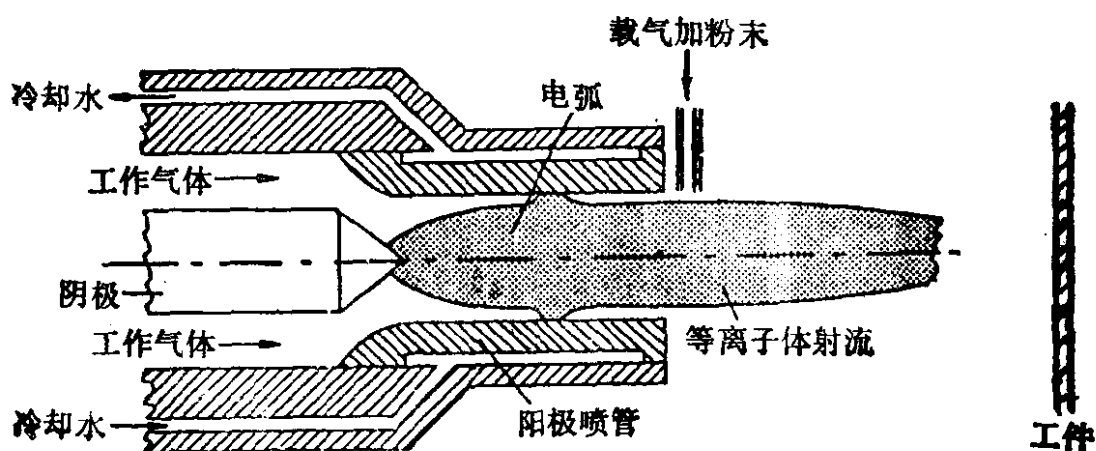


图 1.1 等离子体喷涂装置的示意图