

热等离子体技术：现状及发展方向^{*}

E Pfender

Department of Mechanical Engineering and ERC for Plasma-Aided Manufacturing, University of Minnesota,
Minneapolis, MN 55455 USA

摘 要 试图从以下 4 个方面对热等离子体材料加工现在以及将来的研究与发展进行评价：(1) 热等离子体涂镀技术；(2) 热等离子体微细粉末合成；(3) 热等离子体处理废物；(4) 热等离子体球化及致密化。一般来讲，由于热等离子体加工由大量参数决定，实行控制非常必要。在某些情况下，缺乏足够的控制以及经济方面的一些不利因素是热等离子体技术成长的主要障碍。但是，目前的研究与开发工作正在致力于解决这些问题

关键词 热等离子体技术评价，研究与开发，综述

1 引 言

热等离子体技术已从 60 年代最初的与空间有关的研究逐渐转到 80 年代和 90 年代越来越着重以材料为中心。空间科技的需要给热等离子体的基础研究与开发提供了强大的动力。例如，开发了功率水平从 1kW 到 10MW 以上的等离子体炬。对等离子体/粒子相互作用和热等离子体化学的研究则直到 80 年代初期才开始，虽然一些成功的应用这一时期在某些领域中早已存在，例如，电弧焊、电弧切割、一些特殊领域的等离子体微细粉末合成。在此应该强调，电弧断路器和弧光灯的成功开发，为我们对电弧的基本了解做出了贡献。

除了这些常见的应用之外，今天热等离子体技术已覆盖了很广阔的应用领域，并获得了新的进展。典型的有：(1) 热等离子体涂镀技术，包括等离子体喷涂、电弧喷涂、等离子体化学蒸气沉积 (TPCVD) 技术；(2) 热等离子体微细粉末合成，特别是达到纳米级粉末的合成；(3) 热等离子体处理废物，特别是有毒废物；(4) 热等离子体使粉末致密化；(5) 热等离子体冶金，包括用于大型炉的熔炼、再熔炼；(6) 热等离子体提取冶金技术。

本综述试图对以上领域的现状进行评价，并对热等离子体技术在下个世纪到来时在材料科学和工程学的更广大范围可能起的作用做出推测。

由于篇幅的限制，本文只讨论前面提到的热等离子体技术的前 4 个方面。

2 热等离子体涂镀技术

此部分包括等离子体喷涂、电弧喷涂和热等离子体化学蒸气沉积技术 (TPCVD)。

^{*} 本文是 1997 年 8 月 18 日~22 日第 13 届国际等离子体化学学术会议的主旨报告

2.1 等离子体喷涂

在过去的 35 年中，等离子体喷涂技术得到了很好的确立和广泛的应用，其范围从耐腐蚀、耐热、耐磨涂层到生产整体的近最终形状金属或陶瓷部件。“玻璃”金属粉末不必改变它们的非结晶性能即可进行等离子体喷涂，如近年来证实，超导材料可以通过等离子体喷涂过程进行沉积。

除了最普遍的常压空气中等离子体喷涂过程 (APS) 外，其他等离子体喷涂过程也得到了发展。诸如低压喷涂 (LPSP)，超声速喷涂，控制环境喷涂 (如氩气中) 甚至水下等离子体喷涂。针对各种等离子体涂镀过程的等离子体炬设计基本如图 1 所示。其原理是在棒状阴极和喷管状阳极之间通过直流电弧产生等离子体射流。近年来对等离子体炬的研究涉及中央喷射微粒子、等离子体射流包套，并且结合等离子体周流与反旋周流以提高沉积的效率和涂层的质量。一种新的等离子体喷涂方法是利用感应耦合高频 (射频) 等离子体，由于其高效的热喷涂过程而日益受到重视。在最近的革新中，自动化和机器人技术应用于等离子体喷涂过程可能是这一快速发展领域中最重要的新进展。

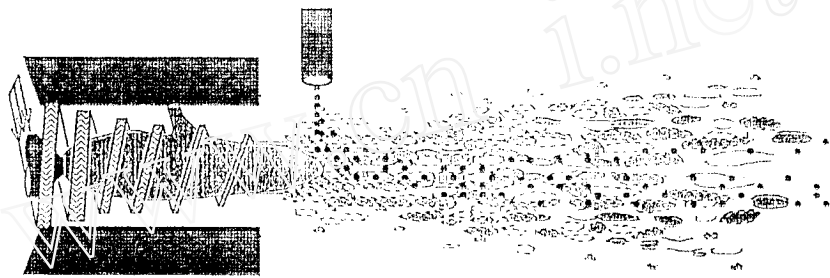


图1 直流等离子体炬喷涂示意图

尽管有以上这些重大进展,但是人们对于等离子体喷涂过程的一些基本原理并没有十分深刻的认识,包括等离子体射流的特性,等离子体与粉末粒子的相互作用以及基材上涂层的形成机理等。

就直流等离子体喷涂 (APS) 而言,等离子体射流的流体动力学过程导致湍流产生,从而将周围气体卷挟进等离子体射流之中^[1,2],如图2。图2示意的等离子体射流的这种行为已通过阴

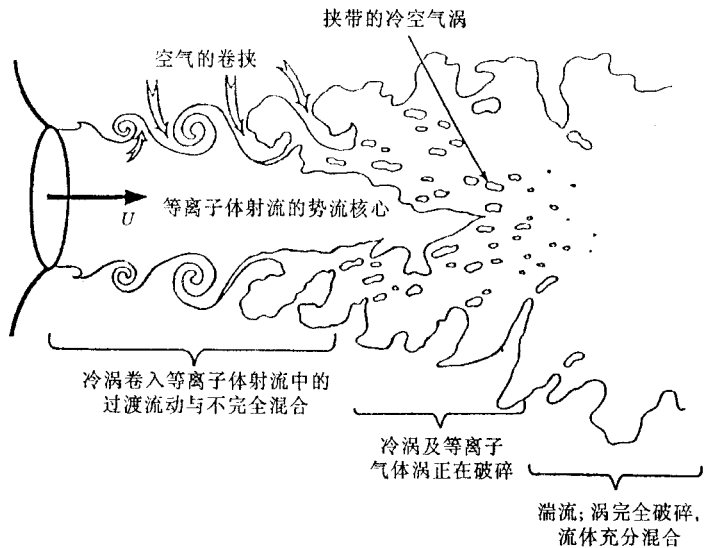


图2 等离子体炬不稳定的主要区域

影图和 CARS 光谱测量^[3]、条件抽样试验^[4]和等离子体射流取样探测^[5]得到证实。

叠加在上述流体动力效应上的是涌动和抖动(surging and whipping motion),它可从等离子体射流的时间分辨照片看出(图 3)。阳极喷管内,电弧根部的轴向和切向运动引起电弧不稳定,使等离子体射流产生这些不定常运动^[6,7]。电弧不稳定与电弧电压、声光发射脉动之间的相互关联^[2]可以证实这种可观察到的等离子体射流的脉动(图 3),在很大程度上是由于电弧的不稳定引起的。

最近对工业喷炬的研究表明,无论是有旋还是无旋的等离子气体流动,在 2kHz~6kHz 的频率范围都有脉动,并且电弧状态对等离子气体的组成成分(Ar/ H₂, Ar/ He, Ar/ N 混合物)具有很强的依赖关系^[8]。这种脉动影响炬的性能(阳极寿命)和喷涂质量。研究人员已设法用磁性探测器测量了阳极喷管内电弧根部的运动^[9],并且利用 Steenbeck 最小原理^[10,11]计算了阳极喷管内阳极电弧根部的位置^[12]。实验结果与分析预测比较吻合。

前面讨论的等离子体射流的脉动在极端情况下可能导致如图 4 所示的情况,即喷入的粉末粒子并未射入绝大部分热等离子体射流^[13],于是涂层上未熔或部分熔化的粉末将使涂层质量大大降低。

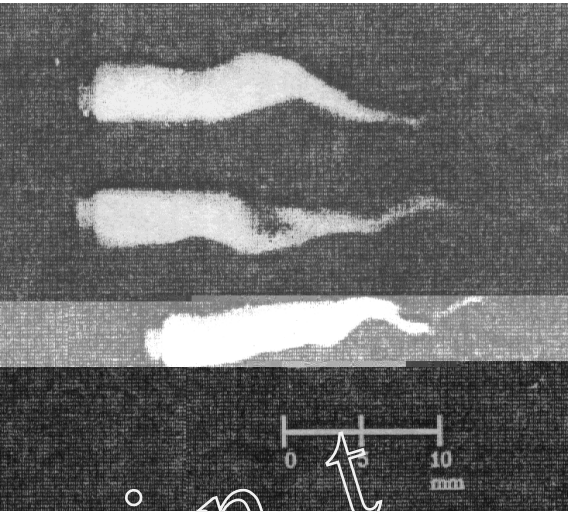


图 3 直流等离子体射流的瞬时(50ms)图像

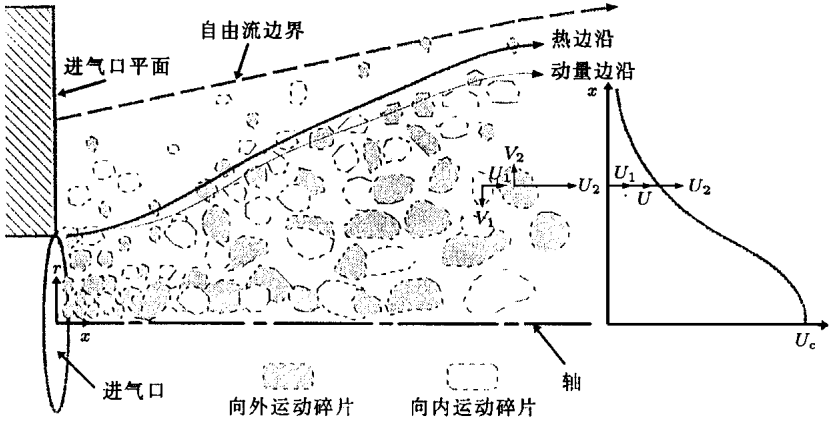


图 4 计算区域的二流体模型和边界示意图

要建立等离子体喷涂过程的模型,首先要建立一个等离子体射流的完整模型。然而,等离子体射流的建模面临着诸如实验观察显示的一系列障碍。利用激光散射发射谱(Rayleigh 和会集的 Thomsen 散射)测量法、激光 Doppler 测风速法、焓探测器法、质谱测定法(见文献[14])对等离子体射流进行的诊断实验可以看出几乎所有的等离子体射流都可能与局域热力学平衡(LTE)有很大的偏差。这点以及前述的典型等离子体射流的脉动都给建模的尝试带来了严重困难。一个符合实际的模型还必须考虑到周围气体的大量卷入。惯用的湍流模型不能预计湍流的间歇和分离现象。这类模型忽视了实际湍流的“斑点特征(spottiness)”和“碎块特征(fragmentariness)”,而这些特征在许多情况下都可观察到。只有多相湍流模型才可能再现这些特征^[15]。

基于 Spalding 研究的模型^[15~17]把等离子体射流视作冷热两种流体的混合物,向外运动的部分为热流体碎块,向内运动的为冷流体碎块,如图 4。

支配方程包括两种不同流体部分(向内运动的部分和向外运动的部分)的质量、动量和能量输运方程。支配流体间质量、动量和能量交换的物理现象的辅助关系及对控制碎块大小的增减机理的描述同时运用。其结果可通过条件和无条件平均形式给出并与利用焓探测器测量的实验结果对比^[18,19]。

由于等离子体喷涂涂层的质量严重依赖于粒子的性质,包括速度、温度、熔化程度及其统计分布,为发展预测等离子体中粒子行为的能力,人们已做出了很大的努力,从最初简单地将粒子作用与等离子体流动分离开来^[20]发展到今天的迭代技术^[21],包括粒子云对等离子体流动的作用,也发展出结合进 LAVA 程序的随机粒子喷涂模型^[22]。LAVA 程序可以预计粒子轨迹和热过程,包括自洽地计算与气体运动同时发生的熔化和粒子的湍流扩散。与暂态的多组分非局域热力学平衡性能相结合,随机粒子喷涂模型视 LAVA 为一个独特的综合计算模型。

2.1.1 等离子体喷涂目前研究与开发工作概要

目前的研究方向主要集中在诊断实验和建模两方面。其目的是:

(1) 改进和优化等离子体炬的性能。包括研究由于流体动力学过程和典型的等离子体炬中的相关电弧行为引起的等离子体射流的不稳定性。与电弧的状态密切相关的问题是电极侵蚀。最新的等离子体湍流模型提出了用两种流体描述等离子体及其周围环境的方法。由于模型中迄今未能包括等离子体流脉动的影响,模拟结果尚不能与实验数据进行比较。最近,已有尝试在这类模型中引入脉动的报道^[23]。

(2) 目前研究的另一个重要目的是粒子喷涂型式的控制和与之相联的沉积效率的优化。这在喷涂贵重粉末物质时受到特别关注。除了沉积效率之外,涂层质量也会受到喷涂型式的严重影响。

(3) 最近的一些研究集中在基材上涂层的形成,包括摊片(splat)形成,摊片的固化,摊片微结构,相邻摊片粘聚力,基材上涂层的附着力、涂层中孔隙率及未熔量的控制等^[24]。研究发现,基材温度是涂层附着力的决定参量^[24]。喷涂过程中固有的残余应力是涂层是否完整或失效的决定因素。

由于对等离子体喷涂过程的全面控制是这一领域研究和开发的最终目的,所以,完整的数据库的建立和基本控制参数的选择在过去几年受到特别的关注。它不仅应用于常压等离子体喷涂(APS),而且还应用于其他等离子体喷涂过程。

最新的开发工作基本上有如下几个方面:

(1) 传感器的研制。这种传感器必须在等离子体喷涂的不利环境下耐用,同时其造价又不能太贵(值得花费)。

(2) 在各种控制对策中,等离子体射流状态(焓水平和等离子体射流的脉动)的反馈控制是一种可行的选择。

(3) 喷入等离子体中的粉末粒子温度、速度控制是具有挑战性的问题。世界各国的许多等离子体喷涂的一流实验室都在致力于解决这一难题。

(4) 对涂层厚度的现场控制是另一个难题,且还没有得到解决。

(5) 已有重大进展的机器人技术已经在涂镀过程中喷雾炬运动和基材运动两方面得到了成功的应用。

在过去的时间内,等离子体喷涂的应用经历了一个缓慢但却是稳步成长的过程。缺乏有效的控制手段是这一领域进步的基本障碍。因此,随着整体的自动化控制水平的更加提高,等离

子体喷涂技术有望得到更快的发展。

2.2 电弧线喷涂

电弧线喷涂是一种经济的喷涂技术，通常限于喷涂金属和合金。很大范围的基底材料 (substrate materials) 可以通过这一过程进行涂镀，包括陶瓷、金属和塑料。应用的范围从耐磨涂层到大尺度结构的防腐蚀保护涂层 (例如桥梁) 以及磨损金属部件的修复。虽然它与等离子体喷涂过程很相似，但这种过程的控制参数比较少。

图 5 为双线电弧喷涂的结构示意图。要沉积的物质作为消耗电弧电极做成两条导线被引入电弧。气体射流通过电弧时从导线末端带动熔化的液滴，使液滴雾化并喷至基材 (substrate) 上。各个熔化的小液滴在冲击、变形和快速固化的作用下，在基材上形成涂层。这种涂层结构由一系列相互重叠的薄层组成。涂层的附着力决定于薄层与薄层之间以及薄层与基材之间的相互作用。我们对电弧喷雾涂层的结合机理还了解甚少，仍用经验方法来优化过程参数。涂层的极好的附着力被认为是工业应用的最重要的先决条件之一 [25~29]。

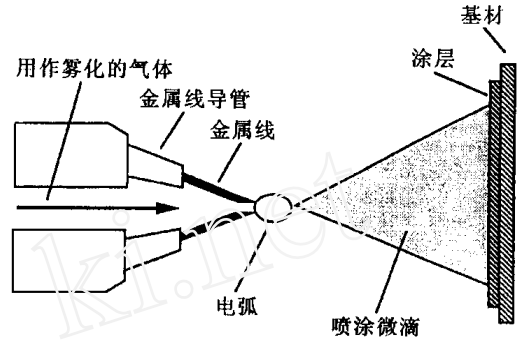


图 5 双线电弧喷涂示意图

如果界面间的附着力低，将有可能发生涂层分离并导致过早的失效。涂层结合力的大小决定于涂层与基底材料之间的物理的和化学的相互作用程度以及界面部分的微细结构。不良的附着力可能来源于不良的界面联结、很低的冶金结合力和较高的内应力。

附着力在很大程度上决定于粒子的速度。常规的电弧线喷涂，粒子速度必然要受到限制，因此通常只经过一次气体雾化的涂层会有相对较高的孔隙率和较低的结合力。二次气体雾化喷涂是一种新的尝试。它可以使粒子大小分布更加均匀，喷涂面更加集中，并具有较高的粒子速度和更好的涂层性能 [30]。图 6 反映了二次气流对液滴大小的影响。这些扫描电子显微镜 (SEM) 的显微图是通过液滴喷射到一块薄冰上经过快速固化而得到的。

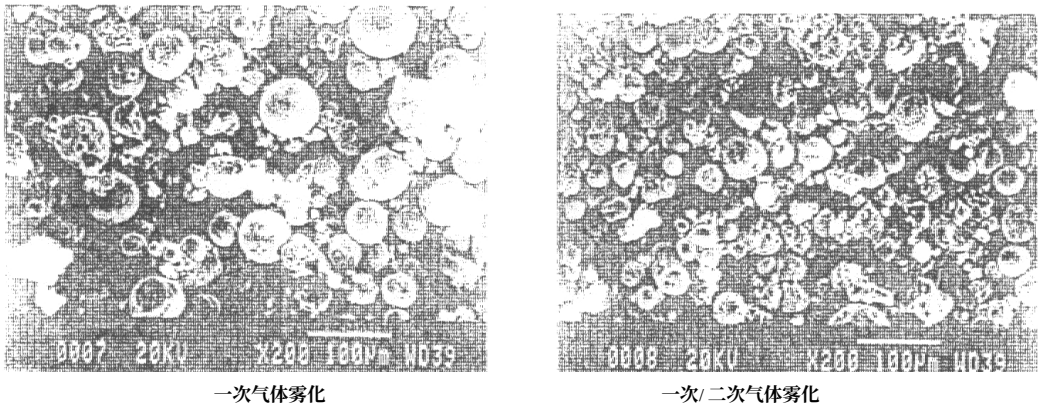


图 6 液滴喷射于薄冰上的显微图

研究表明，经过二次气体喷涂到铝基材上的不锈钢涂层的结合力比只作一次气体喷涂的要高。在具有二次气体雾化的喷涂中有三种结合机理起作用：(1) 物理结合；(2) 机械结合；(3) 冶金结合。更好的结合被认为是由于液体金属微粒对基材的瞬间撞击带来了更高的温度。这种高温是由于液滴有更高的速度以及卷挟进的冷空气较少所致，从而导致基材与涂层之间产

生一个相互扩散层。这种相互扩散层的存在可以从对涂层截面的初步分析得到证实，它与结合力的提高密切相关^[30]。二次气流还可以减少雾化气体与周围空气的混合，从而降低涂层中氧化物的含量和铬的损失（对不锈钢）^[31]。为进一步降低涂层中氧化物含量，使用二氧化碳作为雾化气体，这也可以降低涂层的孔隙率^[31]。

电弧线喷涂的缺陷之一是产生大量的金属烟气而对人的健康造成损害。文献 [32~34] 报道了对相关的电弧焊过程中烟气产生作为操作参数的函数进行的研究。通过控制烟气产生源以改善整个过程的烟气产生量，将使电弧线喷涂技术在工业应用中被广泛接受。在最近的研究实验中，用铝作电弧线材料，通过计算机图像处理定量测定烟气产生量，结果表明，电弧线端部的金属蒸发是烟气的主要产生源，而氧化作用似乎又使金属蒸发有所增加。由于电流主要集中在（高电流密度）在阴极，所以烟气产生存在着明显的不对称性^[35]。

2.2.1 电弧线喷涂目前研究与开发工作概要

目前的研究活动致力于涂层质量的提高，包括：

- (1) 电弧的控制；
- (2) 流动的优化；
- (3) 液滴形成的控制。

涂层质量主要与涂层的附着力与粘聚力、密度（孔隙率）、均匀性、氧化程度及厚度控制等相关。需要指出的是以上提及的控制函数并不是相互独立的，例如，电弧和流动的控制就与液滴的形成直接相关。

电弧的控制与电源相关，因为电源的性质将对电弧行为产生影响。电弧的脉动表现为电弧电压的脉动，应尽量减少这种电弧脉动，尤其必须避免电弧熄灭现象^[36]。

流动的优化包括优化一次气体流动即雾化气体流动（超声速）、二次流动即罩式流动、所用气体类型及其温度。湍流对空气卷挟的影响以及通过气体封罩使空气卷挟率降低的研究工作比较活跃。还应当提到的是，电弧线喷涂过程的建模，包括流动的影响，是另一个活跃的课题。

正如前面提到的，与等离子体喷涂过程相比，影响电弧线喷涂过程的重要参数要少得多。因此，这方面已取得一定的成绩，并已着重关注电弧线喷涂过程的完全控制系统的开发，这点很有可能较早实现。

2.3 热等离子体化学蒸气沉积（TPCVD）

在过去的几年中，一种利用热等离子体化学蒸气沉积一系列物质的新技术逐渐形成，它在金刚石涂层上的最高沉积率尤为突出。这一新技术将填补高质量但速度极慢的涂镀过程（溅射、物理蒸气沉积）与快速但难以控制的热喷涂过程之间的空白。

由于其独特的性能，TPCVD 技术可能得到广泛应用。并且已在有些工业加工中加以考虑，例如金刚石、致密陶瓷或超导镀膜。TPCVD 技术也可能在纳米结构镀膜的加工制造方面起着重要作用。随着这种新技术的进一步成熟，它的其他应用无疑将会出现。

在 TPCVD 过程中，高能量密度等离子体产

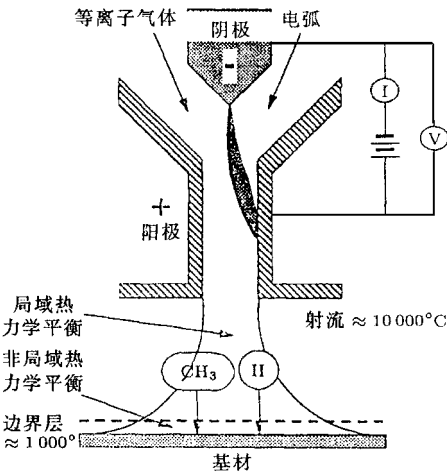


图7 直流电等离子体炬的金刚石 TPCVD 示意图

生高密度蒸气相初级粒子 (precursors), 这些粒子沉积后产生相对较厚的镀膜. TPCVD 的典型构成如图 7 所示. 在此, 直流电等离子体炬产生的高温、高速的等离子体射流撞击到冷的基材上. 在炬管出口附近的温度超过 10^4 K, 进入等离子体的原料 (precursor material) 快速气化, 并由于等离子体射流的高速度 (可达 100m/s 量级) 而加速冲向基材, 在冷基材的前部形成一个边界层, 其特征是有很陡的梯度. 由于与星际飞行和再入大气层的模拟相关, 使人们对化学反应气体中的这种边界层产生了强烈的兴趣. 因此, 这种边界层得到了大量的分析研究^[37].

除了直流电等离子体射流以外, 其他类型的等离子体反应器, 如高频 (射频)、复合型 and 微波等离子体也得到了利用. 为了增加可用的等离子体体积, 已研制出了复式炬结构. 一种安装了三个炬的典型反应器从某种意义上讲因聚合了 3 股射流而形成了一个更大的等离子体区 (图 8). 反应物经水冷探测器射入三股射流汇合区, 此法曾用于过程参数对镀膜性能影响的参量研究^[38,39]. 其典型能量水平在 270Torr 的反应器压力的情况下总功率为 36kW , 沉积速率为 $40\mu\text{m/hr} \sim 60\mu\text{m/hr}$. 这种反应器也曾用于金刚石镀膜的同质外延的生长, 生长速率为 $100\mu\text{m/hr} \sim 200\mu\text{m/hr}$ ^[40,41].

图 9 所示为无二次原料入射 (图 9 (a)) 和有二次原料入射 (图 9 (b)) 时产生的典型金刚石镀膜的情况. 二次原料经等离子体羽流外周的一个环中射入 (图 8), 使基材表面上的初级粒子分布更加均匀, 并对沉积镀膜的表面结构产生显著的影响. 图 9 (b) 示出了基材直径为 30mm 的范围内接近完全均匀的镀膜结构.

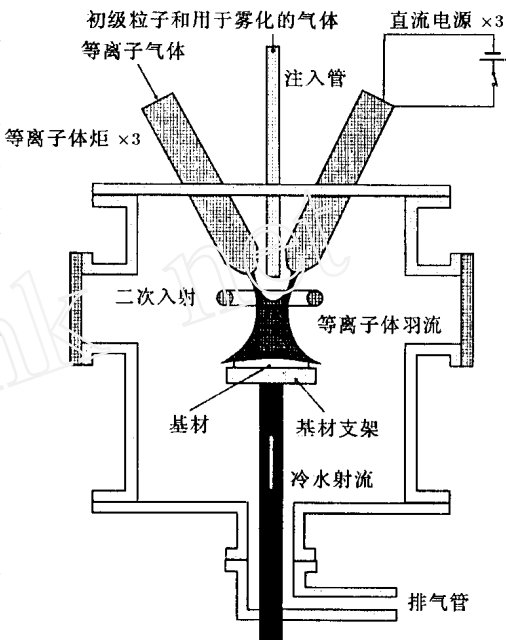


图 8 TPCVD 的三炬等离子体反应器示意图

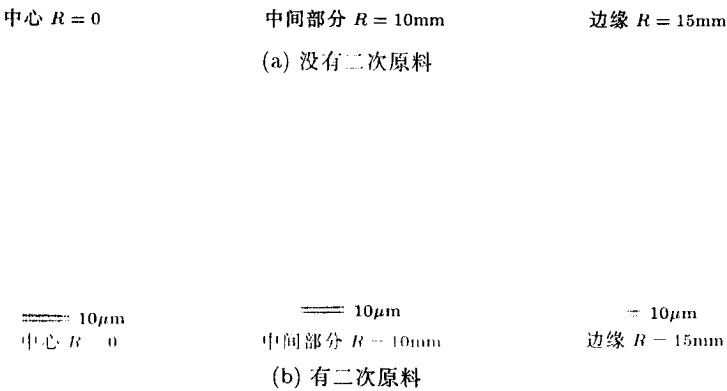


图 9 利用三炬等离子体反应器进行金刚石镀膜沉积的显微图

目前对这种新技术的研究主要集中在进一步发展所需要的基础知识的确立上。无论是实验还是模型研究都十分关注基材前部边界层中的化学反应情况，目的是要找出最重要的生长物质种类，并帮助我们弄清其生长过程。对于金刚石化学蒸气沉积的情况，作为控制参数的函数的生长速率、晶体结构和晶向是最重要的几个研究课题。

图 10 为用于射频等离子体金刚石沉积过程中测定基材上初级粒子物质种类的装置^[42,43]。这个装置对控制基材前部边界层的厚度非常有用。边界层厚度的控制是通过改变入射探测器中入射氩气流的流量实现的，如图 10 所示。增加氩气流的流量，同时控制其他参数不变，边界层的厚度就可以减小，边界层厚度减小对边界层化学反应的影响也就可以确定。相应的模型研究工作示出了金刚石边界层厚度变化时烃类及碳类物质对金刚石的重要性也随之改变，如图 11 所示。基材前部化学反应边界层的厚度严重影响生长化学反应和生长速率。

对于相对厚的边界层 ($\approx 2\text{ mm}$)，模型预测金刚石的生长速率 $\approx 10\mu\text{m/hr}$ ，与实验数据一致，其主要的生长物质为甲基。对于非常薄的边界层 ($\approx 0.1\text{ mm}$)，模型预测金刚石的生长速率为几百

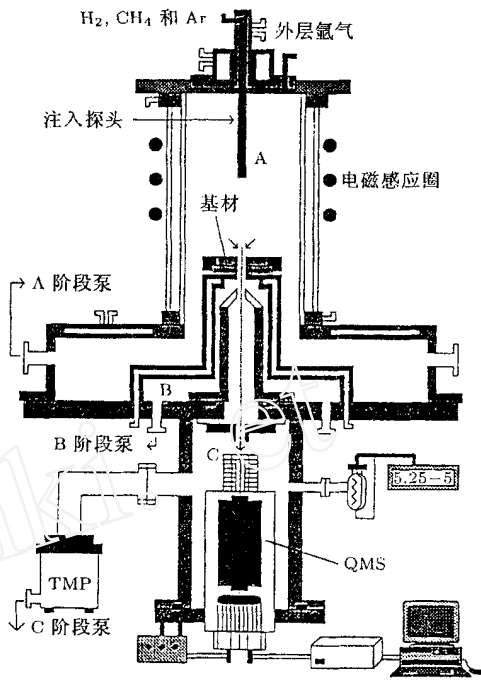


图 10 利用四极质谱仪测定射频等离子体反应器的 TPCVD 金刚石镀膜

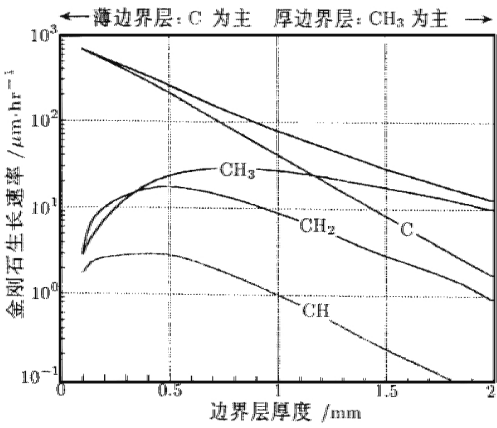


图 11 各个初级粒子对金刚石生长所作的贡献

沉积法可以有很高的生长速率，但沉积镀膜的质量能否胜任预期的应用还存在问题。在高生长速率下生产高质量的镀膜依然是一个挑战。

镀膜附着力在金刚石沉积中是一个主要问题，特别是不能承受高温 ($< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的基底材料上的沉积和各种金属基材上的沉积，如钢^[46]。通过增加中间层 (如钼)，金刚石可以粘合得很好，或利用金属黏合剂^[47,48]，附着力问题也可以解决。

$\mu\text{m/hr}$ ，主要生长物质转变为单原子碳，如图 11 所示^[44,45]。

2.3.1 TPCVD 技术目前研究与开发工作概要

目前的研究课题主要集中在 3 个方面：

- (1) 边界和基材表面化学反应情况。正如前面提及的，实验和模型研究两方面都集中在结合边界层和基材表面的化学反应模型寻找基材上的主要生长物质种类。
- (2) 控制镀膜的结构和质量是当前这一领域的主要研究课题。金刚石镀膜在光学和电子领域的应用方面，镀膜质量受到特别的关注。
- (3) 镀膜的生长速率及附着力。虽然用热等离子体作为一种工具来产生生长成分的镀膜

在研究与开发之间本来就没有十分清晰的分界线，在 TPCVD 领域中这条线尤其模糊不清。就金刚石镀膜的生产而言，这一领域的开发工作是相当可观的。利用 TPCVD 技术生产单纯的金刚石膜片已进入工业产品阶段，直径可达 10cm。复杂三维物体的涂镀是困难但并非不可超越的问题，已经着手解决。

作为新出现的崭新技术，经济的因素可能成为新的开发工作中压倒性的问题，金刚石镀膜的发展足以证实这一点。这一领域最初预计的市场的增长率并未实现。

与等离子体喷涂和电弧线喷涂相似，TPCVD 过程的完全控制是从事这方面研究与开发的最终目的。

3 热等离子体合成

热等离子体是一种具有极高温度和很陡温度梯度的源，可用于小到纳米级的细粉末合成，并在化学反应上没有特殊的要求。

蒸气的过饱和现象为颗粒的凝聚提供了驱动力，这一现象在热等离子体中可以非常显著，导致均相成核现象形成超细粒子。诸如碳化物、氮化物、氧化物和固溶体这样一些陶瓷粉末已成功地在热等离子体反应器中合成。适合于细粉末合成的热等离子体主要通过高强度电弧（交流或直流）和 高频放电产生（射频和微波）。

热等离子体反应器中的高温可使工作时间缩短，因此可以得到具有较高生产能力的相对较小的反应器。尽管热等离子体反应器具有这样那样的优点，但与具有竞争力的加工过程相比，高的加工费用必须由产品的优越性能来补偿。一般来说，只有高附加值的产品在市场竞争中才能生存下去。

新型反应器和加工过程设计的最新进展提高了热等离子体生产的粉末的质量。这些新型的设计包括射频-直流型混合反应器^[49]，反应型淹没弧（RSA）^[50]，多股等离子体射流以及逆向喷射液体的等离子体反应器。这些措施的目的在于使等离子体中的原料的加热、混合和滞留时间达到最大值。不论是放电本身还是沿放电流方向的等离子体尾焰都可用于合成粉末。在热等离子体合成中，进入等离子体的反应物可以是气体、液体或固体。但是，可用的金属气态原料非常有限。因此，等离子体合成中最常用的反应物是固体。几年前，研制出了液体喷射方法，它可克服固体喷射中存在的问题并可利用气态反应物的优点^[51]。

在这种情况下，传统的直流电等离子体炬产生的通常是惰性气体高温等离子体流（图 12）。雾化的液体原料是从与等离子体射流相对的一端喷出，成为细雾进入等离子体并与其作相对运

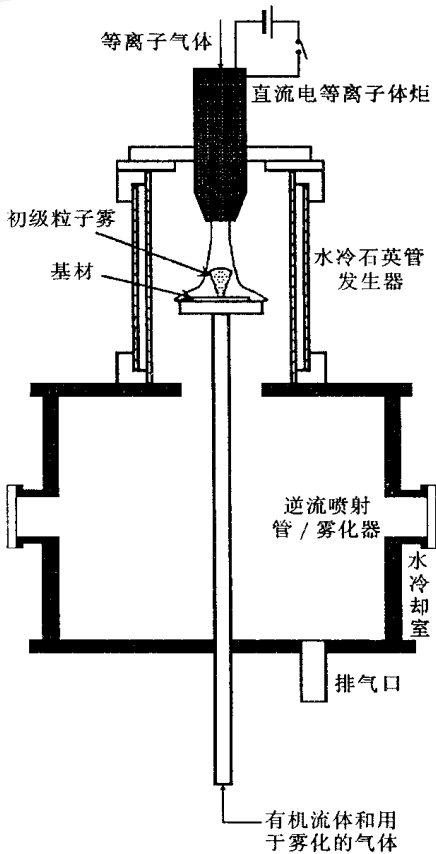


图 12 液体原料喷射与等离子体射流相对流动示意图

动而引起回流涡旋。回流使初级粒子在相对较高温度的热区域的停留时间延长，从而保证原料的气化和离解更完全。热区域下游的快速冷却使离解的初级粒子蒸气出现过饱和现象，从而又引起预期的化学反应并通过均匀的成核作用而产生微细的粉末粒子。所产生的粉末是在水冷收集室和与此室出口相连的过滤器中收集的。以上基本原理对其他反应器型式和非液态反应物原料也同样适用。

过去，大多数氧化物合成工厂把精力集中在二元化合物。在英国，Tioxide 公司使用兆瓦级电弧气体加热器大规模地生产 TiO_2 颜料已经进行了许多年。

由于液体喷射等离子体合成在最近 8 年里取得了进展，在直流和射频等离子体中已合成三元、四元及更高元氧化物固溶体，其中包括铝酸盐的尖晶石、铁素体、亚铬酸盐^[51~54]以及高温氧化物超导体^[51,55~58]。图 13 举了一个运用于合成超导粉末的射频等离子体反应器的例子^[55]。除了这些“全新的”氧化物外，其他氧化物热等离子体合成的研究几乎未见。

与氧化物粉末的合成相比，人们对非氧化物陶瓷粉末的热等离子体合成作了持续时间更长的更大的努力。最强烈感兴趣的似乎是氮化物，其后依次是碳化物和硼化物。最常见的用于非氧化物陶瓷热等离子体合成的反应物是固体和金属卤化物^[59]。

最近报道了一个实验，含有蒸气相原料的等离子体从具有热陶瓷壁面的喷嘴喷出^[60]，如图 14 所示。这种装置在喷嘴中流动方向上具有近一维温度梯度的一维流动结构，可使冷却速度非常均匀。而且，喷嘴产生的冷却速度比别的装置快得多。采用这种装置，用 SiCl_4 和 CH_4 作为反应物已经合成得到超细的 SiC 粒子。结果表明，用这种方法得到的粒子，其大小分布在一狭窄的峰值区域，粒子大小多为几纳米。合成的 SiC 粒子和 Si 粒子平均直径为 8.5nm，且 90 % 的粒子直径都小于 16nm。

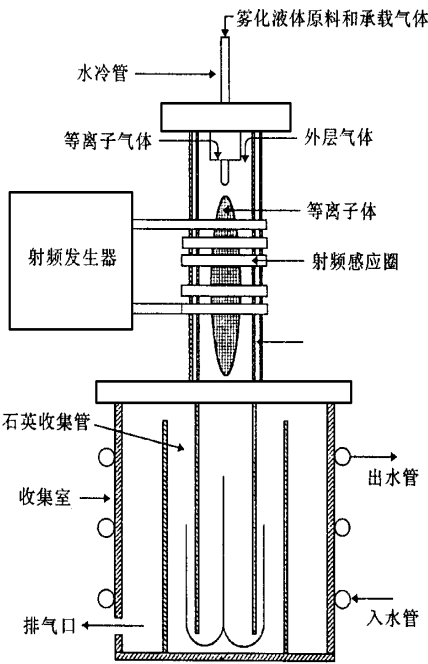


图 13 用于等离子体合成微细粉末的射频等离子体反应器示意图

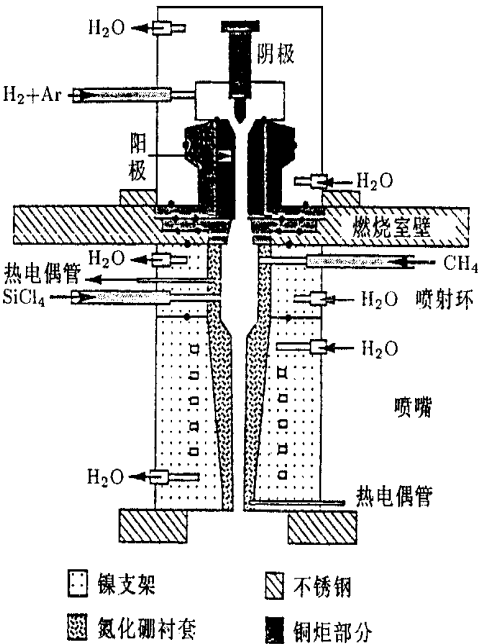


图 14 用于合成纳米级粒子的等离子体反应器示意图

3.1 热等离子体合成近期研究与开发工作概要

目前的研究集中在非氧化物粉末（氮化物、碳化物）和新的方法合成纳米级粒子。这种技

术将来的发展趋势很大程度上取决于有效控制的发展和实现。

这包括粒子大小的控制及分布，以及所得粉末的结构。极感兴趣的是新型的反应器设计，例如多炬装置，把直流炬和射频炬组合起来的混合反应器，以及不仅提高产品质量而且提高加工效率的其他创新设计。

最近的开发工作主要集中在等离子体反应器的放大和对过程进行自动控制方面。

4 热等离子体处理废物

热等离子体反应器用于处理有害废物具有其独特的优点：(1) 热等离子体的高能量密度和高温及其相应的短时间快速反应，使得在一个小反应器中处理大量的废物成为可能。(2) 高温还可以获得很高的冷却速率以抑制亚稳态和非平衡组合成分的出现。(3) 与其他诸如焚烧炉之类的热处理过程相比，即使在频繁的快速启动和关闭时，由于反应器边缘的高热流而可以很快达到过程的稳定状态。(4) 电能的使用可降低气流的需要量和废气处理的要求，并且可以控制其整个化学反应过程，包括得到有销路的副产品的可能性。(5) 在产生有害废物的生产过程中，以上这些性能很容易与生产过程结合在一起，于是可以在废物产生的源头即时对其进行处理。等离子体过程的主要缺点在于以电力作为能源，经济成本高。此外，与传统过程相比，等离子体过程具有更多的过程控制参数，从而在过程控制中要求自动化程度很高。看来对于这种大规模的设备仍然缺乏一个坚实的工程基础。

现已开发出许多等离子体处理废物的方法，主要分为以下几类：(1) 使用带有非转移等离子体炬的反应器热解液体有害废物。(2) 利用转移电弧等离子体反应器与热解和压实残余物的方法相结合来处理固体物质或浆体物质。(3) 回收生产过程中的废弃物，如从电弧反应炉集尘，在此非转移和转移电弧反应器都有应用。废物处理过程中的一个特殊情况是有销路的副产品的生产带来了经济利益。例如，在一处理过程中，有害液体化学物质被处理的同时，金刚石被沉积在反应区的基材上了。

图 15 所示为 Westinghouse 研制的等离子体热解反应器系统示意图。这一系统是在 Borton^[61,62] 最初研制的基础上，加上 Westinghouse 的工业等离子体技术改进得到的。反应器有 1MW 的非转移等离子体炬，反应生成物经过一个耐热的热反应直管道进入一个大的储箱，再从这里排到洗气装置。Westinghouse 炬由两个相同直径的圆柱形水冷电极组成，等离子气体（空气）从它们之间的一个窄间隙射入。磁场使电弧弧根旋转，降低了电极的损耗。液体废物在紧接等离子体炬出口处喷入气流，只有液体废物能被处理。一个基于平衡态化学反应的计算机程序已经研制

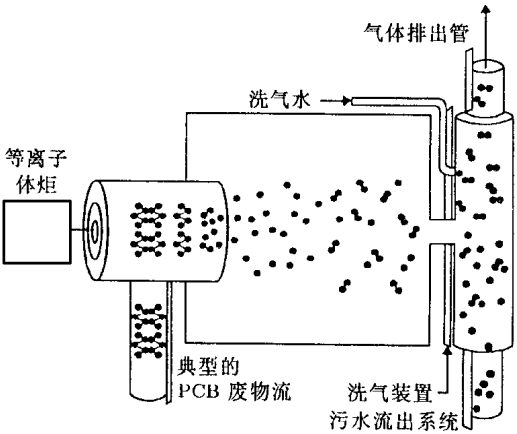


图 15 Westinghouse 研制的高温等离子体热解装置

出来，它可以针对任何特殊的废物组成成分，确定最佳的运行参数，如炬的能量、炬的气体流量、液体废物的流量、可能需要的使化学反应过程更加有利的添加反应物。此流程已经对不同的废物进行了处理，当炬的能量为 850kW 时，PCB 的处理速度可达到 12l/min，处理效率可达 8~9 成，粒子和酸排出物达到 EPA 标准^[63]。整个反应装置自成体系地安装在一个拖车上，从

而可以很容易地从一个废物点移动到另一个废物点。电源、水和排出废水需要一些联结装置。气态排放物和废水的成分被不断监测。

利用转移电弧等离子体反应器处理固体污染物的开发工作水平最高。图 16 是位于瑞士 Muttentz 的 MGC 等离子体公司的商业化等离子体反应器示意图。此装置以旋转等离子体炉为基础，由 Retech^[64~68] 研制。

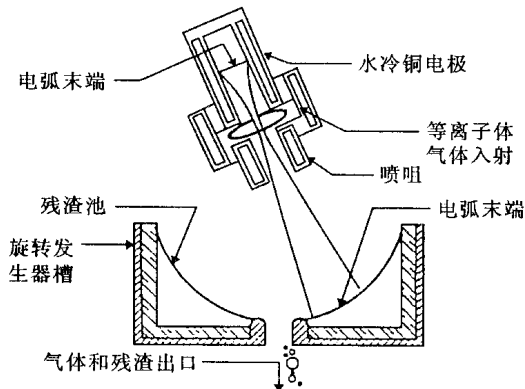


图 16 Retech 等离子体离心炉示意图

反应器由直径 2.4m 的柱形圆桶组成，1.2MW 的等离子体炬安装于其上，工质为富氧空气（见图 16）。等离子体炬的安装允许喷嘴移动，于是就能导引等离子体流朝着位于其下的圆桶的任一部分。电弧在炬与圆桶之间放电，并且维持在 0.5m 的典型长度，其电压为 600V，电流为 2000A。废物从一个自动进料装置填入。这一系统可容纳装有污染物的全部铁筒，容器在进入等离子体装置之前，在反应器上部空间被截断。等离子体释放的热使有机化合物挥发，从而使无机物熔化。圆桶以 50rpm~70rpm 的速度转动使液态废物保持在内而气态释放物从一个中心圆孔进入后燃烧室，在该室加入空气和氧后，追加的燃烧过程确保有毒挥发成分在其中被完全处理。如果需要，可以用一个较小的炬（250kW）来防止中心圆孔由于结渣造成阻塞。在熔化物充满圆桶后，圆桶转速降低，熔化物从中心孔流入坩埚，在此形成不可浸出的残渣。废气还需经洗气装置，再用进一步处理降低 NO 的成分。废气的热量在进入洗气装置之前加以回收。废气的成分被不断监测。对有机污染物的处理效率可达 99.9968 % 以上。根据残渣中的重金属表明残渣是不可浸出的。

Retech 等离子体离心炉也是另一个系统的核心，它由蒙大拿 Butte 的能源部开发，用于混合废物（核物质和有害的有机物）的销毁和陶瓷化^[69,70]。此反应器比安装在瑞士的反应器稍小，其圆桶直径为 1.8m，功率为 600kW。

等离子体化学反应器中的热量输入和化学反应分别独立控制，这给有用副产品的生产提供了机会。虽然它还不能大批量的生产，但已有了一些实验室的成果，或已进入了较高的开发阶段。一个例子就是在处理有害液体废物过程中生产工业金刚石的研究正在明尼苏达大学进行^[71,72]。一个与图 12 所示相似的等离子体反应装置已在实验中应用。苯和四氯化碳（CCl₄）的处理和清除效率可达到 99.99 % 以上，同时，金刚石也以超过 0.1mm/hr 的线性生长速率生长。图 17 为金刚石从 PCB（聚氯联苯）中合成的显微图。

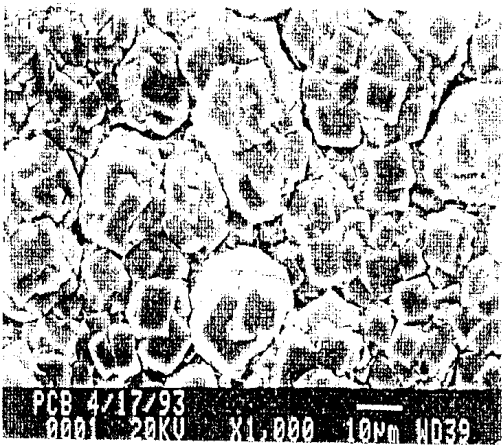


图 17 用 PCB 做原料在 Mo 基材上沉积金刚石镀膜显微图

4.1 热等离子体处理废物近期研究与开发工作概要

与其他有竞争力的废物处理过程相比，热等离子体处理废物自然是较为昂贵的。因此，目前这一领域的研究工作多局限于一些特殊类型的有毒废物处理问题。在这类问题上热等离子体

处理具有独特的优势，这在工业领域是显而易见的。虽然等离子体过程的潜在优势继续引起新的开发工作，但其经济问题常常是不那么明朗的。焚化技术的经济优势，迫使等离子体技术的利用转向处理“棘手废物”，即焚烧炉难于处理的废物，包括被污染的陶瓷废物，高熔点金属，或需要治理的含有毒挥发成分的废气。等离子体过程的较高温度和较低气体流量是其优点。虽然只有有限数量的利用等离子体化学反应生产有用副产品的研究，但这一领域仍具有相当大的潜力。

5 热等离子体致密化

热等离子体致密化技术主要指粉末的致密化，虽然利用等离子体烧结的致密化也有所报道。粉末的致密化包括颗粒状物质在飞行中熔化，随之又被冷却和凝固，并视粒子的密度和大小而被收集到致密室底部或进入一个适当的收集装置。利用直流电或电感耦合射频等离子体炬，大量的物质可以成功地致密化和球化，这些物质的范围可以从低熔点金属如铜、镍到氧化的金属陶瓷如氧化铝、用氧化钨稳定的氧化锆，以及钼、钨这样的高熔点金属。

典型的电子显微图 18 示出了氧化铝、钼和钨的粉末粒子在经过电感耦合射频等离子体致密化之前和之后的组织结构。粒子平均直径为 $45\ \mu\text{m}\sim 76\ \mu\text{m}$ 。

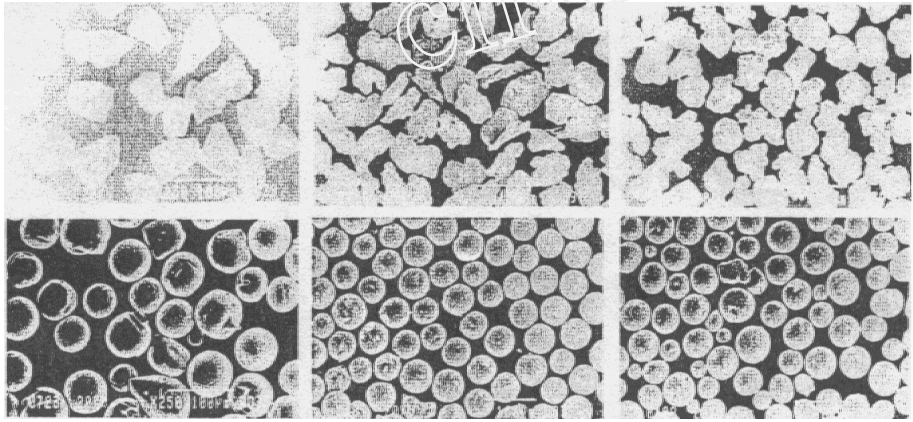


图 18 原始的粉末（上）和等离子体致密的粉末（下）显微图，从左至右为： Al_2O_3 ，Mo，W

等离子体烧结指的是利用等离子体的热量使粒子粘结和物质致密的过程。高熔点材料，主要是陶瓷的等离子体烧结是一项相当新的技术。60 年代末，Bennett 等^[73,74]利用 2450MHz 的微波等离子体在气体压力介于 $100\text{Pa}\sim 7000\text{Pa}$ 时烧结出了一些氧化物物质。他们发现，氧化铝和其他一些陶瓷物质在微波激励作用下产生的等离子体中可以很快地被成功烧结。他们观察到了比在同样温度下传统的烧结物质更为微细得多的晶粒尺寸和更大的致密率。他们还假定，通过清洁粒子表面，等离子体可能增加烧结作用。

相对于传统的烧结技术，等离子体烧结的优点在于具有极高的热量传递，可以产生快速烧结和极微细的晶粒生长^[75~80]。后者对于纳米级粒子的烧结具有特别的重要性。遗憾的是，这时等离子体烧结局限于轴对称小直径的样本。这一过程的另一个缺点是相当高的能量损失。实验和模拟两者都表明，样本表面上的荷电物质成分的重组在某些情况下可能是基本的传热途径^[80,81]。

5.1 热等离子体致密化近期研究与开发工作概要

等离子体球化和致密化方面的研究工作相对较少，因为粉末的致密化是等离子体技术在材

料加工中应用最简单但却是最成功的技术之一。目前所知的研究工作似集中在射频等离子体陶瓷粉末的球化和致密化方面。

同样道理适用于等离子体烧结, 过去几年很少看到这方面的研究工作。这些领域的新开发工作所知极少。

6 结 论

下面对本文综述的几个方面作一总结, 特别是: (1) 热等离子体涂镀技术; (2) 热等离子体微细粉末合成; (3) 热等离子体处理废物; (4) 热等离子体致密化和球化。

一般来讲, 热等离子体技术的发展由于控制上的欠缺而受到限制。基础研究和开发之间的协同对于实现控制具有决定性的意义。实现控制对于热等离子体涂镀技术的成长将产生很大的作用。

热等离子体合成的进展也将得益于控制的改进。可以预料, 这方面的研究将大量集中于纳米结构物质。

热等离子体处理废物面临着同低费用处理过程的强烈竞争。可是, 经济评估必须包括整个系统, 而不只是等离子体部分。生产副产品的可能性以及将废物处理系统集成到整个生产过程中, 有可能改善经济上的劣势。

热等离子体使粉末致密化和球化仍将是切实可行的技术。

致谢 众多的同事和现在的及以前的研究生对本文所概述的工作有诸多贡献, 作者对他们的工作和美国国家科学基金会及美国能源部的资助深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Spores R, Pfender E. Flow structure of a turbulent thermal plasma jet. *Surf Coat Technol*, 1989, 37: 251
- 2 Spores R. Analysis of the Flow Structure of a Turbulent Thermal Plasma Jet. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis. 1989
- 3 Pfender E, Fincke J, Spores R. Entrainment of cold gas into thermal plasma jets. *Plasma Chem Plasma Process*, 1991, 11 (4): 529
- 4 Schefer R W, Hartmann V, Dibble R W. *AIAA J*, 1987, 25: 1318
- 5 Brossa M, Pfender E. Probe measurements in thermal plasma jets. *Plasma Chem Plasma Process*, 1988, 8: 75
- 6 Wutzke S A. Conditions Governing the Symptomatic Behavior of an Electric Arc in a Superimposed Flow Field. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis. 1967
- 7 Wutzke S A, Pfender E, Eckert E R G. Study of electric-arc behavior with superimposed flow. *AIAA J*, 1967, 5 (4): 707
- 8 Planche M P, Duan Z, Lagnoux O, Heberlein J, Fauchais P, Pfender E. Study of arc fluctuations with different plasma spray torch configurations. In: Wu C K, ed. *Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry*. Beijing, China, Vol III, 1997. 1460~1465
- 9 Collares M P, Pfender E. Magnetic probe measurements in plasma spray torches. In: Wu C K, ed. *Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry*. Beijing, China, Vol III, 1997. 1466~1470
- 10 Finkelnburg W, Maecker H. Electric arcs and thermal plasmas. *Encyclopedia of Physics*. Berlin: Springer, 1956. Vol XX II
- 11 Peters Th. *Z Phys*, 1956, 144: 612
- 12 Paik S, Huang PC, Heberlein J, Pfender E. Determination of the arc-root position in a dc plasma torch. *Plasma Chem Plasma Process*, 1993, 13 (3): 379~397
- 13 Malmberg S. Analysis of the Plasma Jet Structure, Particle Motion, and Coating Quality During dc Plasma Spraying. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis, 1994
- 14 Fauchais P, Coudert J F, Vardelle M. Diagnostics in thermal plasma processing. In: Anciello O, Flamm D L, eds.

Plasma Diagnostics, Vol I. New York: Academic Press, 1989

- 15 Spalding D B. Two-Fluid Models of Turbulence. CFDU Report CFD/85/4, CFDU, Imperial College, London. 1985
- 16 Spalding D B. A Turbulence Model for Buoyant and Combusting Flows. CFDU Report CDF/86/4, CFDU, Imperial College, London. 1986
- 17 Spalding D B. *Int J Physiochem Hydrodynam*, 1983, 4: 323
- 18 Huang P C, Heberlein J, Pfender E. A two-fluid model of turbulence for a thermal plasma jet. *Plasma Chem Plasma Process*, 1995, 15 (1): 25~46
- 19 Huang P C. A Turbulent Swirling Arc Model and a Two-Fluid Turbulence Model for Thermal Plasma Sprays. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis, 1993
- 20 Apelian D, Wei D, Paliwal M. *Thin Solid Films*, 1984, 118: 395
- 21 Chyou Y P, Pfender E. Behavior of particulates in thermal plasma flows. *Plasma Chem Plasma Process*, 1989, 9: 45~71
- 22 Chang C H. Numerical simulation of alumina spraying in argon-helium plasma jet. In: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Orlando, Florida, June 1992. 793
- 23 Park J H, Duan Z, Heberlein J, Pfender E, Lau Y C, Wang H P. Modeling of fluctuations experienced in N₂ and N₂/H₂ plasma jets issuing into atmospheric air. In: Wu C K, ed. Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry. Beijing, China, Vol I, 1997. 326~331
- 24 Fauchais P, L'eger A C, Vardelle M, Vardelle A. Formation of plasma-sprayed oxide coating. In: Sohn H Y, Evans J W, Apelian D, eds. Proceedings of the Julian Szekely Memorial Symposium on Materials Processing and the TMS Fall Extraction & Processing Conference. Cambridge, Massachusetts, October, 1997. 571~592
- 25 Steffens H D, Babiak Z, Wewel M. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1989, 18 (6): 974
- 26 Thorpe M L. *Adv Mat Process*, 1988, 134: 69
- 27 Marantz D R, Marantz D R. In: Proceedings of the 3rd National Thermal Spray Conference. 1990. 113
- 28 Sampson E, Neider L. In: Proceedings of the 5th National Thermal Spray Conference. 1993. 271
- 29 Sampson E R. In: Proceedings of the 5th National Thermal Spray Conference. 1993. 257
- 30 Wang X, Heberlein J, Pfender E, Gerberich W. Effect of gas velocity and particle velocity on coating adhesion in wire arc spraying. In: Berndt C C, ed. Proceedings of the 9th National Thermal Spray Conference, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems. ASM International, 1996. 807~811
- 31 Wang X, Heberlein J, Pfender E, Gerberich W. Effect of shrouded CO₂ gas atomization on coating properties in wire arc spray. In: Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference. Houston TX, 1995. 31~37
- 32 Heile R F, Hill D C. *Welding J*, 1975, 201~205
- 33 Wewitt P J, Hirst A A. *Ann Occup Hyg*, 1993, 37: 297
- 34 Ushio M, Nakata K, Tanaka M, Tong H, Mita T. *Trans JWRI*, 1994, 23: 21
- 35 Watanabe T, Wang X, Heberlein J, Pfender E. Fume Generation Mechanism in Wire Arc Spraying. ISPC-12, Minneapolis, MN, Vol II, 1995. 889~894
- 36 Watanabe T, Wang X, Heberlein J, Pfender E, Herwig W. Voltage and Current Fluctuations in Wire Arc Spraying as Indications for Coating Properties. In: Berndt C C, ed. Proceedings of the 9th National Thermal Spray Conference, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems. ASM International, 1996. 577~583
- 37 Eckert E R G, Pfender E. Advances in plasma heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, 1967, 4: 229~313
- 38 Lu Z P, Heberlein J, Pfender E. Process study of thermal plasma chemical vapor deposition of diamond, Part I: Substrate material, temperature, and methane concentration. *Plasma Chem Plasma Proc*, 1992, 12: 35~52
- 39 Lu Z P, Heberlein J, Pfender E. Process study of thermal plasma chemical vapor deposition of diamond, Part II: Pressure dependence and effect of substrate pre-treatment. *Plasma Chem Plasma Proc*, 1992, 12: 55~69
- 40 Snail K A, Marks C M, Lu Z P, Heberlein J, Pfender E. High temperature, high rate homoepitaxial synthesis of diamond in a thermal plasma reactor. *Mater Lett*, 1991, 12: 301~305
- 41 Lu Z P, Snail K, Marks C, Heberlein J, Pfender E. High rate homoepitaxial growth of diamond in thermal plasma. In: Proc 2nd Intl Symp Diamond Mater. The Electrochemical Society, Washington D C, 1991. Vol 91-8: 99~106
- 42 Greuel P, Yoon H, Ernie D, Roberts J. *Mat Res Soc Sym Proc*, 1994, 334: 141
- 43 Greuel P, Roberts J, Ernie D. In: Heberlein J, Ernie D, Roberts J, eds. Proceedings of the 12th International Symposium on Plasma Chemistry. Minneapolis, Minnesota, Vol IV, 1995. 2209
- 44 Yu B W. A model for Chemical Vapor Deposition of Diamond in a Radio-Frequency Induction Thermal Plasma. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis. 1994
- 45 Yu B W, Grishick S L. Atomic carbon vapor as a diamond growth precursor in thermal plasma. *J Appl Phys*, 1994, 75: 3914~3923
- 46 Asmann M, Borges C F M, Heberlein J, Pfender E. Thermal plasma chemical vapor deposition of diamond on steel. In: Wu C K, ed. Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry. Beijing, China, Vol III,

1997. 1206~1211

- 47 Tsai C, Nelson J, Gerberich W, Heberlein J, Pfender E. Metal reinforced thermal plasma diamond coatings. *J Mater Res*, 1992, 7: 1967~1969
- 48 Tsai C, Nelson J C, Gerberich W W, Heberlein J, Pfender E. Diamond-metal composite coatings on cemented carbide tools. *Diamond Related Mater*, 1993, 2: 617~620
- 49 Yoshida T, Tani T, Nishimura H, Akashi K. *J Appl Phys*, 1983, 2: 640
- 50 Kumar A, Roy R. *J Mater Res*, 1989, 3 (6): 1373
- 51 Kong P, Pfender E. In: Proceedings of the 2nd Int Conf Ceram. Powder Processing Sci, Berchtesgaden, 1988
- 52 Kong P, Pfender E. In: Munir Z A, Holt J B, eds. Combustion and Plasma Synthesis of High Temperature Materials. New York: VCH Publishers Inc, 1990. 420
- 53 Kong P, Or T, Stachowicz L, Pfender E. In: Zelinski B J J, Brinker C J, Clark D E, Ulrich D R, eds. Better Ceramics Through Chemistry IV. Mater Res Soc Symp Proc. Pittsburgh, Pennsylvania, Vol180, 1990. 849
- 54 Or T, Lu Z, Stachowicz L, Kong P, Pfender E. In: Apelian D, Szekely J, eds. Plasma Processing and Synthesis of Materials III. Mater Res Soc Symp Proc. Pittsburgh, Pennsylvania, Vol 190, 1991. 83
- 55 Zhu H, Lau Y C, Pfender E. RF plasma synthesis of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ powders. *J Supercond*, 1990, 3: 171~175
- 56 Terashima K, Yoshida T, Akashi K. *Jpn Symp on Plasma Chemistry*, 1988, 157
- 57 Ono T, Kagawa M, Syono Y, Ikebe M, Muto Y. *Plasma Chem Plasma Process*, 1987, 7 (2): 201
- 58 Zhu H, Lau Y C, Pfender E. Deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thick films by the spray-caps technique. In: Proc 9th Intl Symp Plasma Chem. Pugnochiuso Italy, Vol 3, 1989. 1497
- 59 Kong P C, Pfender E. Chapter 14: Plasma Processes. In: Weimer A W, ed. Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing. London: Chapman & Hall. 1997
- 60 Rao N, Grshick S, Heberlein J, McMurry P, Tones S, Hausen D, Micheel B. *Plasma Chem Plasma Process*, 1995, 15: 581
- 61 Barton T G. Problem Waste Disposal by Plasma Heating. Berlin: Int Recycling Congress, 1979. I, 733~736
- 62 Heberlein J V R. New Developments in non-transferred plasma torch technology. In: Proceedings of the 2nd Japanese Symposium on Plasma Chemistry, 1989. 131
- 63 Heberlein J V R, Melilli W J, Dighe S V, Reed W H. Adaptation of non-transferred plasma torches to new applications of plasma systems. In: Boulos M I, ed. Proceedings of the Workshop on Industrial Plasma Applications. Pugnochiuso, Italy, 1989. 1
- 64 Funfschilling M R, Bernhard W, Eschenbach R C. Test results with the plasma centrifugal furnace at Muttentz, Switzerland. In: Proceedings of the 1991 Incineration Conference, Knoxville, Tennessee
- 65 Eschenbach R C. Use of plasma torches for melting special metals and for destroying and stabilizing hazardous wastes. In: Boulos M, ed. Proceedings of the Workshop on Industrial Plasma Applications. Pugnochiuso, Italy, 1989. 127~136
- 66 Eschenbach R C. Plasma centrifugal furnace for destroying hazardous wastes. In: Proceedings of the 1st International EPRI Symposium, 1990
- 67 Schlienger M P. Apparatus and Method for High Temperature Disposal of Hazardous Waste Materials. US Patent 4770109, 1988
- 68 Funfschilling M R, Eschenbach R C. A plasma centrifugal furnace for treating hazardous waste, Muttentz, Switzerland. In: Proceedings of the XIth Congress International Union for Electroheat. Montreal, Canada, 1992
- 69 Sears J W, Eschenbach R C, Hill R A. The plasma centrifugal furnace: a method for stabilization and decomposition of toxic and radioactive wastes. *Waste Management*, 1990, 10: 165
- 70 Haun R, Eschenbach R, Battleson D, Alsberg C, Jackson T. Site test results with the PCF-6. In: Proceedings of the 1992 Incineration Conference
- 71 Pfender E, Han Q Y, Or T W, Lu Z P, Heberlein J. Rapid synthesis of diamond by counter-flow liquid injection into an atmospheric pressure plasma jet. *Diamond Related Mater*, 1992, 1: 127~133
- 72 Han Q Y, Or T W, Lu Z P, Heberlein J, Pfender E. DC thermal plasma deposition of diamond films. In: El-Kaddah N, ed. Thermal Plasma Applications in Materials and Metallurgical Processing. TMS, Warrendale, Pennsylvania, 1992. 277~291
- 73 Bennett C E G, Kinnon N A, Williams L S. Sintering in gas discharges. *Nature*, 1968, 217: 1287
- 74 Bennett C E G, Kinnon N A. Glow Discharge Sintering of Alumina. In: Gray T J, Frechette V D, eds. Kinetics of

Reactions in Ionic Systems. New York: Plenum Press, 1969. 408

- 75 Johnson D L, Rizzo R R. Plasma sintering of α -alumina. *Am Ceram Soc Bull*, 1980, 59: 467
- 76 Kim J S, Johnson D L. Plasma sintering of alumina. *Am Ceram Soc Bull*, 1980, 62: 620
- 77 Johnson D L, Sanderson W B, Knowlton J M, Kemer E L. Sintering of α - Al_2O_3 in gas plasmas. *Adv Ceram*, 1985, 10: 656
- 78 Kong P C, Lau Y C, Pfender E. The effects of gas composition and gas pressure on RF sintering of MgO. In Proceedings of the MRS 1987 Spring Meeting. Anaheim, California, Vol 98, 1987. 371~375
- 79 Pfender E, Lee Y C. Heat Transfer analysis of the plasma sintering process. In: Proceedings of the Materials Research Society. Elsevier Science Publishing Co, Inc, Vol 30, 1984. 141
- 80 Tandian N P. Heat Transfer in RF Plasma Sintering: A Modeling and Experimental Study. [Ph D Thesis]. University of Minnesota-Minneapolis. 1994
- 81 Tandian N P, Pfender E. Studies of the high frequency (RF) plasma sintering process. In: Wu C K, ed. Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry. Beijing, China, Vol IV, 1997. 1630~1635
- 82 Dignard N M, Boulos M. Ceramic powder spheroidization under induction plasma conditions. In: Wu C K, ed. Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry. Beijing, China, Vol III, 1997. 1031

中国科学院力学研究所 齐志红 陈允明译自

Plasma Chemistry and Plasma Processing, March 1999

中国科学院力学研究所 吴承康 董务民校

THERMAL PLASMA TECHNOLOGY : WHERE DO WE STAND AND WHERE ARE WE GOING?

E. Pfender

Department of Mechanical Engineering and ERC for Plasma-Aided Manufacturing,
University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455 USA

Abstract In this overview, an attempt is made to assess the present and future research and development in thermal plasma processing of materials restricted to (1) thermal plasma coating technologies, (2) thermal plasma synthesis of fine powders, (3) thermal plasma waste destruction, and (4) thermal plasma spheroidization and densification. Since thermal plasma processing is, in general, governed by a large number of parameters, implementation of controls becomes mandatory. The lack of sufficient controls combined with economic drawbacks in some cases has been the main obstacle for the growth of thermal plasma technology. Present R & D efforts, however, address these problems.

Keywords thermal plasma technology assessment, research and development, overview