

气相沉积应用技术

王福贞 马文存 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

气相沉积应用技术

王福贞 编著
马文存



机械工业出版社

本书在第1篇中全面阐述了化学气相沉积、物理气相沉积、等离子体增强化学气相沉积的技术基础、技术原理、新的沉积技术、工艺过程、设备配套、膜层质量检测和分析。在第2篇中介绍了气相沉积技术在工模具硬质涂层、防护涂层、光学薄膜、建筑镀膜玻璃、太阳能利用、集成电路制造、信息存储、显示器件、饰品装饰、塑料金属化和柔性基材的卷绕薄膜产品等方面的应用。本书内容丰富新颖，力求紧密联系实际。

本书可供从事气相沉积技术的工程技术人员、科技工作者、在校师生和工人阅读，也可以作为相关专业的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

气相沉积应用技术/王福贞, 马文存编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.10

ISBN 7-111-20065-9

I. 气... II. ①王... ②马... III. 气相沉积—基本知识
IV. TF111.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 122652 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张秀恩 责任编辑: 王兴垣

版式设计: 冉晓华 责任校对: 陈延翔

责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13.375 印张·517 千字

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379770

封面无防伪标均为盗版

序 1

20世纪70~80年代,由于真空技术、薄膜科学与技术和表面物理相结合,使气相沉积技术迅速崛起,亦促进了薄膜产品的开发与应用。气相沉积技术包括化学气相沉积、物理气相沉积和等离子体化学气相沉积。它既是综合性的应用技术,又涉及到许多跨学科的理论基础。可以说,目前采用气相沉积技术几乎能在任何基体工件上,按照不同的性能要求,沉积出各种材料的涂层,以满足实际应用的需要。

当今,世界上一些工业发达的国家,正是由于气相沉积技术日新月异地向前发展,因而在卷缠镀膜产品、塑料金属化制品、硬质涂层工模具、防护涂层、光学薄膜、建筑和汽车挡风窗玻璃、太阳能电池、集成电路、信息显示和存储器件等方面都已具有相当大的生产规模。

在我国,目前直接或间接从事气相沉积技术的工程技术人员、科技工作者人数很多,跨越轻工、机械、电子、能源、材料、信息、航空航天等各个行业,而且这支队伍正在迅速扩大。在膜系开发、工艺研究、设备研制、薄膜质量检测与机理研究方面都取得了可喜的成绩。由于气相沉积技术与高新技术密切相关,而且与许多学科互相交叉、互相渗透。其中不仅需要大量的人力、物力、财力,更需要进行智力投资,其中包括高水平专业人才的培养、普遍的知识更新、在职工程技术人员与工人的再学习等。

《气相沉积应用技术》的出版,适应了我国气相沉积技术发展以及从事这一领域工作人员的知识更新和需要的需要。本书资料齐备新颖、编辑全面系统、论述详尽深刻。内容涉及各种气相沉积技术的原理、设备、工艺、膜层的质量检测和分析以及在各个领域的应用等方面。相信本书的出版对于我国气相沉积技术进一步的发展和推广应用将会产生强有力的推动作用。

中美合资上海凯尼真空设备有限公司 总工程师
原机械工业部沈阳真空技术研究所 总工程师
中国真空学会第二届、第三届 副理事长
教授级高级工程师
享受国务院津贴专家

姜燮昌

序 2

作为固体表面科学重要分支的气相沉积技术，从物理和化学反应基础理论角度已发展到相当完善程度。当前已开发出一系列在金属和/或非金属材料表面牢固沉积异种金属或非金属及其化合物，以改善其表面物理和化学性能的方法。各种气相沉积从基础理论到工艺技术及其在工业应用的纵深延伸，显然已成为一个耀眼的高科技领域，被世界先进工业国家高度重视。

种类繁多的气相沉积层分别具有高硬度、耐磨损、耐腐蚀、抗高温氧化、特殊光学性能、超导性以及获得悦目色彩的表面装饰功能，从而在航空、航天、机械制造、兵器、化工、光学、电工、计算机器械、车辆、建筑、包装和工艺美术制件、制品上获得越来越广泛的应用。

在我国，气相沉积技术自 20 世纪 70 年代开始在气相沉积技术的基础研究、工艺开发、设备研制、推广应用方面都取得了很大进步。有的涂层设备和气相沉积产品还推向国际市场。我国的材料工程学者和热处理工程师在所从事的多年研发中为气相沉积技术的发展作出了卓越贡献。

王福贞教授是北京市有突出贡献专家，在物理气相沉积理论上有着深刻钻研，在此领域的工业设备和关键元器件开发上有丰富的实践经验和创新。她于三十年前就在北京工业大学和北京联合大学从事物理气相沉积技术的研究开发，先后进行活性反应离子镀膜机、空心阴极离子镀膜机、矩形平面大弧源离子镀膜机等工业设备的开发，并成功地研发出柱状阴极电弧源和阴极电弧源离子渗金属设备和工艺，为提高离子渗镀效率和改善离子沉积设备性能和沉积效果做出了杰出贡献。

马文存研究员级高级工程师曾任成都工具研究所涂层技术研发部主任，是国家有突出贡献专家。他从 1971 年至今一直从事刀具、模具、机器易磨损件的化学气相沉积基础理论、工艺技术及生产设备的研发和推广应用，先后承担多项国家重大科研攻关项目，所获成果不乏达到国际先进水平者。他为我国气相沉积硬质涂层技术的发展和实际应用做出了重大贡献。

王福贞教授和马文存研究员合著的《气相沉积应用技术》一书系统地阐述了气相沉积技术的理论基础、各种沉积技术的原理、工艺过程、设备和配套设施、工件的前处理和后检验，以及在工业领域和各种制件、制品上的应用效果，介绍了国际上气相沉积的最新成就，广泛收集了我国的研发成果，总结了国内应用的成功经验，堪称是气相沉积技术在我国第一本理论结合实际、而又特别注重生产

应用、内容十分丰富的杰作。这本书的出版必将进一步推动我国气相沉积技术的发展，更有利于在工程技术人员和工科大专院校教学中普及气相沉积知识，以及扩大其在工业中的应用，更能发挥其节能节材的巨大潜力，产生更大的经济社会效益。

全国热处理学会荣誉理事长
中国热处理行业协会原副理事长兼秘书长
全国热处理标准化技术委员会 1、2、3 届主任委员
原机械工业部北京机电研究所总工程师
北京机械工程学会热处理学会荣誉理事长
教授级高级工程师、享受国家特殊贡献待遇

樊东黎

前 言

气相沉积技术是高新技术的重要组成部分之一，已成为微电子、信息、光学、能源、机械、宇航等的技术基础，与国家建设、国防现代化和人民生活密切相关，是表面工程中的重要技术领域。

气相沉积技术可以获得微米级、纳米级的单层或多层的新材料，获得具有特殊物理性能、化学性能、力学性能的且与基材的结构、性能不同的新材料。与其他表面技术相比，属于薄膜技术范围，是促进新技术、新产品向轻、小、薄、细方向发展的关键技术。

气相沉积技术应用范围广泛，如太阳能集热管、太阳能电池、磁带、光盘、半导体器件、光学器件、光电显示器件、节能玻璃、敏感元件、工模具超硬涂层、汽轮机叶片的抗热涂层、卫生洁具、手表和眼镜的精饰层、塑料制品金属化、包装用塑料薄膜等各个领域，在工业现代化和国民经济发展中的作用越来越大，在国内外生产、科研、教学领域中受到普遍重视，得到迅猛的发展。

气相沉积技术的理论基础涉及化学热力学、化学动力学、真空物理学、电磁学、光学、等离子体物理学、等离子体化学、材料学、材料微观检测技术等，是一项跨学科的技术。

气相沉积技术包括化学气相沉积、等离子体增强化学气相沉积及真空蒸发镀膜、离子镀膜、磁控溅射镀膜、离子辅助沉积等物理气相沉积技术。气相沉积技术十几年来获得了飞速发展，新的气相沉积方法、新的膜系、新的膜层测试技术、新的沉积装备层出不穷，发展很快。

我国的科技工作者，在气相沉积技术的研究、开发方面作出了卓越的贡献，生产气相沉积制品的企业如雨后春笋遍布各地，取得了很大的经济效益。

在我国，工作在气相沉积领域的科技人员和操作者中，有一部分是从其他专业毕业的，对气相沉积中的物理、化学基础知识比较陌生。他们需要一本内容深入浅出、理论与实际相结合、容易掌握的参考书。现在，不少学校开设了相关选修课，本科生、研究生在从事气相沉积方面的科研工作，也需要合适的参考资料。故本书面向广大的气相沉积产、学、研工作者。

撰写《气相沉积应用技术》的目的是向读者介绍近年来各种新的气相沉积技术、新的膜系、新的膜层测试技术和宽广的应用领域。内容包括化学气相沉积技术、物理气相沉积技术、等离子体增强化学气相沉积技术；与气相沉积技术相关的化学、真空物理、低温等离子体物理基础；气相沉积技术的应用实例。

全书分两篇，第1篇包括气相沉积技术基础、各种气相沉积技术原理、气相沉积工艺过程、气相沉积设备配套、气相沉积前处理和膜层质量检验。第2篇包括气相沉积技术在各领域中的应用举例。

本书编著者王福贞在物理气相沉积技术方面、马文存在化学气相沉积技术方面都从事了30年左右的研究和开发工作。

马文存撰写第1篇的化学气相沉积全部、等离子体增强化学气相沉积大部分、第5章设备的部分、第6章全部和第2篇第1章的大部分内容。

为了丰富本书的内容和体现我国的技术水平，本书编著者还特约了国内知名专家撰写相关应用领域的内容，还有多位专家提供了重要资料，由王福贞进行编著。

提供部分书稿的专家有：西安交通大学马胜利副教授提供PECVD的内容；大连理工大学李国卿教授和苟伟博士提供离子束的内容；大连理工大学林国强教授提供脉冲偏压作用方面的内容；清华大学庄大民教授提供太阳能电池方面的内容；浙江大学王德苗教授提供集成电路方面的内容；北京新立基真空玻璃研究所董镛所长提供真空获得方面的内容；北京七星华创公司总工程师龚光祥、总经理张丽琴提供质量流量计方面的内容；成都普斯特电气有限公司总经理曾旭初提供气相沉积电源方面的内容。

本书在撰写的过程中得到刘涌、高见、李建平、周彤、李波、曾祥才等人的积极参与和大力协助。书中还选用了《表面沉积技术》一书中的部分内容。

在此对曾经给予作者支持和帮助的专家、朋友致以深切谢意。由于编著者的水平有限，书中可能会有一些错误，由编著者负责，敬请指正。

编著者 2006年6月

目 录

序 1
序 2
前言

第 1 篇 气相沉积技术基础及各种气相沉积技术

第 1 章 气相沉积技术概述	1	6.1 CVD 装置基本构成	12
1 气相沉积技术分类	1	6.2 负压 CVD 装置主要性能简要说明	12
2 气相沉积技术特点	2	7 高温化学气相沉积技术	13
3 气相沉积技术应用	3	7.1 HT-CVD 硬质涂层种类和性能	13
第 2 章 化学气相沉积技术	5	7.2 HT-CVD 工艺技术	16
1 绪言	5	8 中温化学气相沉积(MT-CVD)技术	33
2 化学气相沉积物理化学基础	5	8.1 MT-CVD 反应机理	33
2.1 CVD 反应方式	5	8.2 MT-CVD 工艺过程及设备	38
2.2 CVD 反应条件	7	8.3 MT-CVD 沉积 TiCN 涂层组织结构及特性	39
2.3 CVD 反应过程	7	8.4 高性能涂层材料及其沉积工艺技术	40
3 化学气相沉积热力学分析	7	8.5 高性能涂层硬质合金刀具组织结构及特性	42
4 化学气相沉积反应物质源	10	参考文献	45
4.1 气态物质源	10	第 3 章 物理气相沉积技术	47
4.2 液态物质源	10	1 物理气相沉积技术概论	47
4.3 固态物质源	11	1.1 物理气相沉积分类	47
5 化学气相沉积涂层质量影响因素	11		
5.1 沉积温度	11		
5.2 沉积室压力	11		
5.3 反应气体分压(配比)	12		
6 化学气相沉积装置	12		

1.2 物理气相沉积的特点	48	5 等离子体增强化学气相沉积	
2 物理气相沉积技术基础	49	工艺过程及特点	201
2.1 物理气相沉积相关的真空物理		5.1 PECVD 工艺过程	201
基础	49	5.2 PECVD 工艺特点	202
2.2 低温等离子体物理基础	61	5.3 采用直流脉冲 PECVD 技术是	
3 物理气相沉积技术	93	硬质涂层的主要发展方向	202
3.1 真空蒸发镀膜	94	6 等离子体增强化学气相沉积	
3.2 离子镀膜	106	涂层组织特征	204
3.3 电子枪蒸发源二极型离		6.1 等离子体增强化学气相沉积	
子镀膜	115	涂层类型	204
3.4 热阴极离子镀膜	118	6.2 等离子体增强化学气相沉积	
3.5 射频离子镀膜	119	涂层组织特征	205
3.6 集团离子束离子镀膜	120	参考文献	206
3.7 活性反应离子镀膜	122	第 5 章 气相沉积设备	208
3.8 空心阴极离子镀膜	126	1 化学气相沉积设备系统	208
3.9 热丝弧枪离子镀膜	132	1.1 CVD 涂层设备系统主要技术	
3.10 电弧离子镀膜	136	指标	208
3.11 磁控溅射镀膜	153	1.2 CVD 涂层设备系统各部分功	
3.12 离子束及其在气相沉积方		能及设计要求	208
面的应用	174	1.3 典型生产用 CVD 涂层	
参考文献	188	设备	213
第 4 章 等离子体增强化学气相		2 等离子体增强低温化学气相	
沉积技术	193	沉积设备	214
1 等离子体增强化学气相沉积		2.1 直流脉冲电源特性	215
技术机理	193	2.2 等离子体增强化学气相沉积	
2 等离子气体产生过程及		设备	215
性质	193	3 物理气相沉积设备及配套	
2.1 多原子分子具有平动、旋转		系统	217
和振动自由度	194	3.1 真空室	217
2.2 分解	194	3.2 真空获得与真空泵	219
2.3 电离	195	3.3 进气系统	234
3 等离子体化学反应过程	197	3.4 真空测量	239
4 等离子体增强化学气相沉积		3.5 气相沉积技术中的电源	242
装置	200	参考文献	255

第 6 章 预处理主要辅助设备	257	2 性能检验	262
1 清洗	257	2.1 膜层硬度测量	262
2 刃口强化	257	2.2 膜层厚度测量	263
2.1 刃口强化作用	257	2.3 膜层附着力测试	266
2.2 刃口强化工艺及设备	258	2.4 膜层内应力测试	267
3 喷砂	259	3 膜层的微区检测	268
参考文献	261	3.1 显微组织形貌分析	269
第 7 章 膜层质量测试	262	3.2 膜层的晶体结构分析	273
1 膜层质量测试内容	262	3.3 膜层成分分析	276
		参考文献	286

第 2 篇 气相沉积技术应用领域

第 1 章 气相沉积技术在硬质涂层中的应用	287	4 不同硬质涂层的实用沉积工艺技术	303
1 硬质涂层制品在机械工业中的应用	287	4.1 硬质合金刀具典型 CVD 实用工艺技术	304
1.1 机械工业发展对涂层工具、模具性能的要求	287	4.2 高速钢刀具 PVD 实用工艺技术	307
1.2 硬质涂层工具的作用	288	4.3 模具 PECVD 实用工艺技术	309
1.3 涂层工模具所占市场份额	289	5 非金属超硬涂层沉积技术	310
2 新型硬质涂层的发展趋势	291	5.1 金刚石涂层的沉积技术及应用	310
2.1 新的金属陶瓷硬质涂层	291	5.2 立方氮化硼涂层的沉积技术及应用	315
2.2 多元复合涂层	291	5.3 氮化碳涂层气相沉积技术及应用	316
2.3 多层复合涂层	292	5.4 纳米级涂层和纳米超硬多层复合涂层沉积技术及应用	318
2.4 纳米复合涂层	292	参考文献	324
2.5 纳米晶-非晶复合涂层	293		
2.6 非金属超硬涂层	293	第 2 章 气相沉积技术在防护涂层方面的应用	327
3 硬质涂层制品应用	293		
3.1 硬质涂层切削工具的应用	293		
3.2 硬质涂层模具及耐磨损、耐腐蚀零件应用	300		

1 防护涂层的作用	327	4.1 防伪技术的现状与薄膜防伪 技术的发展	344
1.1 防护涂层性能	327	4.2 防伪膜的基本理论	344
1.2 获得防护涂层的方法	327	4.3 整膜防伪膜的设计与工艺 举例	345
1.3 用气相沉积技术获得防护 涂层的独特性	327	4.4 碎膜防伪技术要点	346
2 耐腐蚀涂层	328	参考文献	346
2.1 防腐涂层的种类	328	第4章 气相沉积技术在建筑镀膜 玻璃方面的应用	347
2.2 气相沉积技术耐腐蚀层 的应用领域	328	1 建筑镀膜玻璃的功能	347
2.3 防腐涂层的气相沉积 技术	328	2 普通玻璃的光学性能	347
3 热障涂层	329	3 镀膜玻璃的遮阳隔热原理	348
3.1 热障涂层的组成	329	3.1 阳光控制膜	348
3.2 热障涂层的气相沉积 技术	330	3.2 低辐射率膜	349
参考文献	333	3.3 阳光控制膜和低辐射率膜的 材料	350
第3章 气相沉积技术在光学薄膜 领域中的应用	334	4 智能窗玻璃	352
1 光学薄膜的应用领域	334	4.1 智能窗玻璃的应用	352
1.1 光学薄膜的应用范围	334	4.2 智能窗玻璃的种类	352
1.2 光学薄膜的功能	334	4.3 各种智能薄膜变色的 机制	353
2 光学薄膜特性	334	4.4 智能窗玻璃薄膜的沉积 工艺	355
2.1 在不同媒质界面上光的 反射	334	5 防雾防露和自清洁玻璃	355
2.2 减反膜(增透膜)	335	5.1 防雾防露和自清洁玻璃的 功能	356
2.3 反射膜	337	5.2 光催化机理	356
2.4 截止滤光片	338	5.3 防雾防露和自清洁玻璃的 沉积工艺	357
2.5 选择吸收膜	339	参考文献	357
3 光学薄膜的气相沉积技术	340	第5章 气相沉积技术在太阳能利 用领域的应用	359
3.1 减反膜(增透膜)的沉积 工艺	340	1 太阳能——取之不尽的 能源	359
3.2 反射膜的沉积工艺	342		
3.3 选择吸收膜的沉积工艺	343		
4 光学防伪薄膜	344		

目 录

2 太阳能光-热转换	359	4.4 互连布线的沉积和刻蚀	375
2.1 太阳光谱选择性吸收	359	5 分立器件电路的加工	376
2.2 太阳能的光-热转换能效 薄膜	359	5.1 薄膜电阻器	376
2.3 太阳能集热器	360	5.2 薄膜电容器	376
2.4 太阳光谱选择吸收薄膜的 沉积技术	361	5.3 薄膜网络器件	377
2.5 太阳能热水器合成	362	5.4 薄膜温度传感器	377
3 气相沉积技术在太阳能光- 伏转换领域中的应用	362	5.5 薄膜气敏传感器	377
3.1 太阳能光-电转换	363	5.6 高温超导薄膜	378
3.2 太阳能光-电转换薄膜	363	5.7 发光器件	379
3.3 太阳能光-电转换薄膜的沉积 技术	364	参考文献	380
4 太阳能电池的应用实例	367	第7章 气相沉积技术在信息显示 器件中的应用	381
参考文献	369	1 信息显示器件的应用	381
第6章 气相沉积技术在集成电路 制造中的应用	370	2 信息显示器件的种类	381
1 集成电路高集成化发展 方向	370	2.1 阴极射线管 (CRT)	381
1.1 集成电路在高新技术中的 应用	370	2.2 平板显示器	382
1.2 集成电路的高集成化	370	3 平板显示器件用薄膜	382
2 集成电路类型	371	3.1 各种平板显示器的工作原理 及相关薄膜	382
2.1 集成电路	371	3.2 平板显示器薄膜的气相沉积 技术	387
2.2 分立器件电路	371	参考文献	387
3 集成电路组成	372	第8章 气相沉积技术在信息存储 领域的应用	388
3.1 有源器件——包括晶体管的 器件	372	1 信息存储技术的进展	388
3.2 无源元件	372	2 信息存储的类型与存储 薄膜	388
4 集成电路加工工艺	373	2.1 磁信息存储	388
4.1 氧化工艺	373	2.2 磁光信息存储	390
4.2 刻蚀-光刻工艺	373	2.3 全光信息存储	391
4.3 掺杂-离子注入	374	3 超高密度信息存储材料	394
		3.1 科学技术发展进入了纳米电 子器件新时代	394

3.2 超高密度信息存储材料	394	3.2 塑料制品对装饰膜层的 要求	403
4 纳米区内电荷存储技术	395	3.3 塑料制品装饰膜的真空镀膜 工艺	403
参考文献	395	3.4 塑料镀膜中的底漆、面漆 ...	405
第9章 气相沉积技术在装饰饰品 上的应用	397	4 真空卷绕镀膜技术	406
1 装饰品给人们五彩缤纷的 生活	397	4.1 真空卷绕镀膜技术应用 领域	406
1.1 装饰件底材	397	4.2 真空卷绕镀膜技术的设备 分类	407
1.2 装饰薄膜种类	397	4.3 真空卷绕镀膜设备的结构 特征	407
2 金属基材装饰膜的沉积	397	4.4 真空蒸发卷绕镀膜设备的 组成	408
2.1 金属基材装饰品的应用 领域	397	4.5 真空磁控溅射卷线镀膜设备 结构	408
2.2 金属基材制件对装饰膜层的 要求	397	4.6 泡沫塑料镀镍	410
2.3 金属件装饰膜的沉积 工艺	399	参考文献	410
3 塑料件装饰膜的沉积	403		
3.1 塑料镀膜的应用领域	403		

第 1 篇 气相沉积技术基础及 各种气相沉积技术

第 1 章 气相沉积技术概述

1 气相沉积技术分类

近年来表面工程学发展迅速，新的表面涂层技术层出不穷，气相沉积技术就是其中发展最快的新技术之一。所谓气相沉积是利用在气相中物理、化学反应过程，在工件表面形成具有特殊性能的金属或化合物涂层的方法。

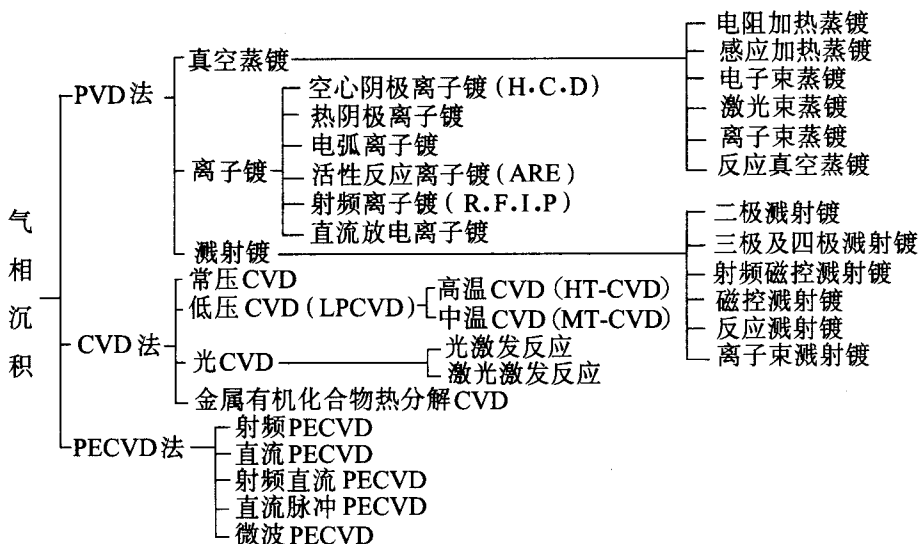
气相沉积技术包括：

化学气相沉积（chemical vapor deposition 简称 CVD）；

物理气相沉积（physical vapor deposition 简称 PVD）；

等离子体增强化学气相沉积（plasma enhanced chemical vapor deposition，简称 PECVD）。

下面为各种气相沉积技术分类及工艺方法。



目前在实际生产中常用的工艺方法是：CVD 技术中低压 HT-CVD 和 MT-CVD；PVD 技术中的离子镀和溅射镀；PECVD 技术中直流脉冲 PECVD 和微波 PECVD。

2 气相沉积技术特点

气相沉积技术之所以在现代工业中发展迅速、应用广泛，是因为它具有非常优异的特点。它不仅可以用来制备具有各种特殊力学性能和物理化学性能（如高硬度、高耐热、高热导、高耐蚀、抗氧化、绝缘等）涂层，不仅可以沉积金属涂层、合金涂层，还可以沉积多种多样的化合物、非金属、半导体、陶瓷和有机物的单层或多层结构的涂层。可以说，目前采用气相沉积技术几乎能在任何基体工件上，按照不同性能要求，沉积出各种材料的涂层，以满足实际使用的需要。

不同气相沉积技术，也具有不同的工艺特点。属于热平衡的 CVD 工艺技术，气体反应源的温度远低于沉积反应温度，所以在沉积工艺中，很容易改变反应源物质组分，获得种类繁多的碳化物、氮化物、氧化物、硼化物、硅化物及单金属和合金涂层。CVD 涂层厚度和质量均匀一致，涂层和基体结合强度高，尤其对形状复杂，面积大的工件更为适合。CVD 工艺装备相对要简单一些，适合工业化生产，所以在气相沉积技术中，CVD 一直占有重要地位。CVD 技术缺点是沉积涂层时基体要加热到 1000℃ 左右高温，超过了钢基体材料的回火温度，沉积后需要再进行热处理，容易产生变形，即使基体为硬质合金材料，也会因高温等因素使基体表面脱碳，形成 η 相，降低了抗弯强度。另外随着环保要求的提高，处理 CVD 排放的有害废气，也会增加生产成本。所以，为了解决一般高温 CVD 的问题，近几年有机金属化合物热分解 MOCVD 和等离子增强 PECVD 技术发展很快。既具有一般高温 CVD 的优点，又使沉积温度降到 600℃ 以下，取得了很好的效果。

PVD 属于非热平衡型。PVD 的沉积温度一般都在 600℃ 以下，不会改变基体的力学性能和尺寸精度，工艺中基本不产生有害废气。近年来，由于 PVD 技术和工艺、设备水平的发展，加上使用靶材品种和质量的增加，有效提高了涂层和基体的结合强度，扩大了涂层材料的种类，使过去难于使用 PVD 技术沉积的碳化物、氮化物、氧化物等硬质涂层，现在变成了可能。极大地扩展了 PVD 技术的应用范围。

表 1.1-1 列出了几种 PVD 和 CVD 技术特性的比较。

表 1.1-1 几种不同 PVD 和 CVD 技术特性的比较

工 艺	PVD 法			CVD 法	
	真空蒸镀	阴极溅射	离子镀	PECVD	一般 CVD
金属涂层	可以	可以	可以	可以	可以

(续)

工 艺	PVD法			CVD法	
	真空蒸镀	阴极溅射	离子镀	PECVD	一般CVD
合金涂层	可以但困难	可以	可以但困难	可以	可以
高熔点化合物涂层	不可以	可以	可以但困难	可以	可以
沉积粒子撞击能量/eV	≤ 0.4	≤ 30	≤ 1000	≤ 1000	≤ 0.1
工作压力/Pa	$< 10^{-2}$	$10^{-1} \sim 1$	$10^{-2} \sim 1$	$10 \sim 100$	$10 \sim 5000$ 或常压
基体温度/°C	< 600	< 600	< 600	< 600	≈ 1000
沉积速率	中	低	中	中	高
涂层密度	较低	高	高	高	高
涂层孔隙度	较小	小	小	小	较小
基体和涂层结合方式	没有扩散	没有扩散	有扩散	有扩散	扩散冶金相结合
结合强度	一般	较好	好	好	很好
涂层均匀性	不太均匀	均匀	均匀	均匀	很均匀
涂层绕度性	不好	稍好	稍好	好	很好

3 气相沉积技术应用

材料、能源和信息工程，是现代社会的三大支柱产业。气相沉积作为促进材料科学发展的新兴技术，承担十分重要的任务。气相沉积技术生产制备的耐磨损、耐热、耐腐蚀硬质涂层；无油润滑涂层；特殊性能的电学、光学功能涂层；装饰装修涂层，广泛用于机械、电子、航天、航空、能源、化工、轻工、建筑等重要工业领域，有效地提高了工件的使用寿命，减缓了材料损耗速度，提高了器件的重要性能。所以气相沉积技术尽快推广应用具有重大技术经济意义。表1.1-2给出了气相沉积技术的主要应用范围。

表 1.1-2 气相沉积技术主要应用范围

应用分类	涂层材料	基体材料	应用范围
高硬度、耐磨损	TiN、ZrN、HfN、TaN、NbN、CrN、CBN、Si ₃ N ₄ 、TiC、ZrC、Cr ₇ C ₃ 、SiC、Ti(C、N)、Ti(B、N)、Ti(Al、N)、β-C ₃ N ₄ 、金刚石等	高速钢、模具钢、硬质合金、金属陶瓷等	机械加工工具、模具、机械零件
耐高温、抗氧化	Al、W、Ti、Ta、Mo、Al ₂ O ₃ 、Ni-Cr、MCrAlY、ZrO ₂ 等	不锈钢、耐热合金、钢、Mo合金等	汽轮机叶片、排气管、喷嘴、航空航天器件、原子能工业耐热构件