

超音速火焰 喷涂技术及应用

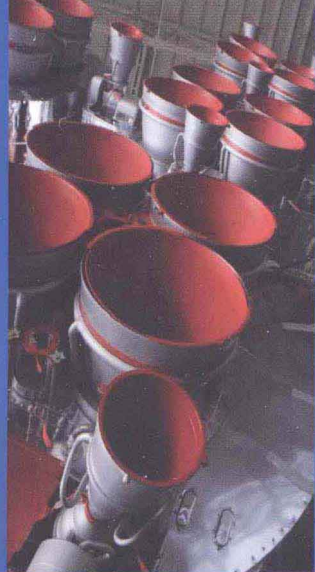
CHAOYINSU HUOYAN
PENTU JISHU JI YINGYONG

查柏林 王汉功 袁晓静 著



国防工业出版社

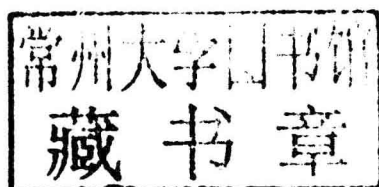
National Defense Industry Press



本著作受到国家自然科学基金资助,项目号 51275...

超音速火焰喷涂 技术及应用

查柏林 王汉功 袁晓静 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要介绍了多功能超音速火焰喷涂的系统设计与试验,耐磨 WC-Co 涂层的性能与应用,吸波涂层的制备与性能,自润滑 Ni-MoS₂ 复合涂层的制备与摩擦学特性,耐蚀玻璃涂层的制备与性能,铜涂层的制备及性能等。

图书在版编目(CIP)数据

超音速火焰喷涂技术及应用/查柏林,王汉功,袁晓静
著. —北京:国防工业出版社,2013. 7
ISBN 978-7-118-08718-5

I. ①超... II. ①查... ②王... ③袁... III. ①超
音速-火焰喷涂 IV. ①TG174. 442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 045965 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11½ 字数 224 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

超音速火焰喷涂焰流速度高,温度适中,适宜于碳化物金属陶瓷涂层的制备。喷涂过程中,极高的粒子速度有利于获得高的涂层致密度和结合力,同时,低的焰流温度可有效地减少硬质相碳化物的分解,制备的涂层能较好地保持陶瓷原有的良好的耐磨性。超音速火焰喷涂按助燃剂可分为氧燃料超音速火焰喷涂 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel)和空气燃料超音速火焰喷涂 HVAF(High Velocity Air Fuel),两者工作原理基本相同,HVOF 采用氧气助燃,而 HVAF 采用空气助燃。

作者所在的科研团队提出了“多功能超音速火焰喷涂技术”,可以使用氧气、空气及氧气与空气的混合气体作为助燃剂,实现焰流速度和温度在大范围内的连续可调,从而满足多种喷涂材料的要求。专利技术于 2001 年开发成功,经过 1 年多的改进提高,于 2003 年在军内外推广应用。随后,作者所在科研团队又进行了“低温超音速火焰喷涂技术”的开发以及功能涂层的制备与性能研究,本书是十余年研究工作的总结。

全书共 8 章,重点介绍多功能超音速火焰喷涂技术的设计、试验和应用情况。前两章介绍多功能超音速火焰喷涂技术以及低温超音速火焰喷涂技术;第 3 章介绍应用多功能超音速火焰喷涂技术制备的 WC-Co 耐磨涂层的性能研究,重点介绍涂层的磨粒磨损性能与冲蚀磨损性能;第 4、5 章主要介绍常温和耐高温吸波涂层,重点介绍两类吸波涂层的性能和制备工艺,以及加入相粒子的浓度对涂层吸波性能的影响;第 6 章介绍 MoS₂ 自润滑涂层制备及性能研究,重点介绍涂层的摩擦磨损性能以及磨屑的研究及分形处理;第 7 章介绍玻璃耐蚀涂层的制备与性能研究;第 8 章介绍导电导热铜涂层的制备与性能研究。

本书的研究工作得到了徐滨士院士、周克崧院士的鼓励和支持,得到了总装备部和第二炮兵装备部机关的指导和帮助,得到了积极推广该技术的军地用户的厚爱和理解,在此一并表示衷心地感谢!

由于作者水平有限,书中不足与错误敬请读者批评指正。

作者
2013 年 2 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 超音速火焰喷涂技术	1
1.2 冷喷涂技术	4
1.3 低温超音速火焰喷涂技术的提出	7
第二章 多功能超音速火焰喷涂技术	9
2.1 多功能超音速火焰喷涂系统总体设计	9
2.2 多功能超音速火焰喷涂系统喷枪总体设计	11
2.3 雾化特性分析与雾化喷嘴的设计	12
2.3.1 雾化特性分析	12
2.3.2 雾化喷嘴的设计	14
2.4 燃烧特性分析与燃烧室的设计	15
2.4.1 燃烧特性分析	15
2.4.2 燃烧室的设计	20
2.5 拉伐尔喷嘴的分析与设计	22
2.5.1 拉伐尔喷嘴特征参数的计算过程	22
2.5.2 拉伐尔喷嘴的型面设计	27
2.5.3 多功能超音速火焰喷涂拉伐尔喷嘴的设计	27
2.6 喷枪强度设计	34
2.7 喷枪的冷却设计	35
2.7.1 喷枪冷却系统设计及冷却过程	35
2.7.2 喷枪冷却的影响因素	37
2.7.3 喷枪冷却的参数计算	37
2.8 点火系统的设计	39
2.8.1 点火的原理及过程	39
2.8.2 点火的影响因素	39
2.8.3 点火系统的设计	40
2.9 多功能超音速火焰喷涂控制系统	41
2.9.1 煤油供给系统	42
2.9.2 氧气-空气供给系统	42

2.9.3	水冷系统	42
2.9.4	送粉系统	43
2.9.5	控制台	43
2.10	低温超音速火焰喷涂	44
2.10.1	系统总体设计	44
2.10.2	喷枪总体设计	44
2.10.3	调温送料器的设计	45
2.10.4	低温超音速火焰喷涂焰流温度的测定	46
2.11	小结	47
	参考文献	47
第三章	WC 耐磨涂层制备及性能研究	50
3.1	试验材料与方案	50
3.1.1	WC 的特点	50
3.1.2	试验材料与试验设备	50
3.2	涂层结构与分析	53
3.2.1	孔隙率	53
3.2.2	粒子形貌	54
3.3	涂层的相结构与分析	56
3.4	涂层显微硬度与分析	56
3.5	涂层结合强度与分析	57
3.6	涂层磨粒磨损性能与分析	59
3.7	涂层冲蚀磨损性能与分析	60
3.8	多功能超音速火焰喷涂纳米结构 WC 涂层	62
3.8.1	试验材料与试验方法	63
3.8.2	试验结果与讨论	63
3.9	多功能超音速火焰喷涂 WC - Co 涂层的应用	66
3.9.1	冶金业中的应用	66
3.9.2	造纸印刷业中的应用	67
3.9.3	石油工业中的应用	68
3.9.4	电力系统中的应用	68
3.9.5	液压气动设备中的应用	69
3.10	小结	70
	参考文献	71
第四章	低温吸波涂层的制备及性能研究	72
4.1	试验与工艺	72
4.2	聚酰胺低温复合涂层性能研究	72

4.2.1 粉末表征与涂层组织结构	72
4.2.2 混合比对吸波涂层电磁性能的影响	74
4.2.3 混合比对吸波涂层质量密度影响	76
4.2.4 吸波涂层结合强度与断裂特征	77
4.2.5 涂层厚度对电磁波吸收能力的影响	78
4.3 环氧树脂复合涂层性能研究	79
4.3.1 吸波涂层拉伸强度与断裂特征	79
4.3.2 α -Fe 含量对复合吸波涂层反射率系数的影响	81
4.4 低温吸波涂层结合强度与反射率之间的关系	82
4.5 小结	83
参考文献	83
第五章 高温复合吸波涂层制备与性能研究	85
5.1 试验与工艺	85
5.2 LBS 玻璃基纳米 SiC 吸波涂层性能研究	86
5.2.1 LBS/SiC 复合吸收剂粉末的制备	86
5.2.2 LBS/ β -SiC 复合吸波涂层组织形貌	89
5.2.3 涂层的结合强度与断裂特征	90
5.2.4 β -SiC 含量对涂层微波性能的影响	91
5.3 金属铁粒子对 LBS 基复合吸波涂层性能的影响	93
5.3.1 复合粉末的表征	93
5.3.2 α -Fe 对复合吸波涂层组织形貌的影响	94
5.3.3 Fe 含量对涂层吸波性能的影响	96
5.4 超细镍对 LBS 基复合吸波涂层性能的影响	97
5.4.1 复合粉末的表征	97
5.4.2 超细 Ni 对吸波涂层组织的影响	99
5.4.3 超细 Ni 对涂层电磁波反射率的影响	100
5.5 金属粒子含量对涂层结合强度的影响	100
5.6 小结	101
参考文献	102
第六章 MoS₂ 自润滑涂层制备及性能研究	103
6.1 喷涂粉末	103
6.2 复合固体润滑涂层制备工艺	108
6.3 涂层微观结构特征	109
6.4 复合固体润滑涂层硬度	113
6.5 复合固体润滑涂层结合强度研究	116
6.5.1 涂层结合强度试验结果与讨论	116

6.5.2 涂层断面特征·····	117
6.6 颗粒增强固体润滑涂层的摩擦磨损性能研究·····	119
6.6.1 材料的干摩擦·····	119
6.6.2 颗粒增强固体润滑涂层摩擦试验·····	120
6.6.3 干摩擦过程颗粒增强润滑涂层摩擦面磨损研究·····	125
6.7 固体润滑涂层磨损研究·····	128
6.7.1 5kgf 载荷下涂层磨损特征·····	129
6.7.2 10kgf 载荷下涂层磨损特征·····	130
6.8 复合固体润滑涂层磨屑的研究及分形处理·····	130
6.8.1 磨屑的分形·····	130
6.8.2 干摩擦过程颗粒增强固体润滑涂层磨屑研究·····	132
6.9 小结·····	141
参考文献·····	142
第七章 玻璃耐蚀涂层的制备与性能研究·····	144
7.1 玻璃粉末的配制·····	144
7.1.1 配料设计·····	144
7.1.2 粉末制备工艺·····	145
7.1.3 玻璃粉末的组织成分分析·····	145
7.2 防腐玻璃涂层的制备·····	147
7.2.1 试样的准备及预处理·····	147
7.2.2 制备工艺·····	147
7.3 显微组织及成分分析·····	148
7.3.1 X 射线衍射及析晶特性·····	148
7.3.2 涂层结构及成分分析·····	150
7.4 耐温差性能分析·····	153
7.4.1 试验设备·····	153
7.4.2 耐温差试验·····	153
7.5 涂层结合强度·····	153
7.5.1 试验结果及分析·····	153
7.5.2 耐冲击强度·····	154
7.6 玻璃涂层耐腐蚀性能研究·····	155
7.6.1 盐雾试验及分析·····	155
7.6.2 强腐蚀液浸泡试验·····	155
7.7 小结·····	161
参考文献·····	161

第八章 导电导热铜涂层的制备与性能研究	162
8.1 试验材料与方法	162
8.2 涂层显微结构与分析	163
8.3 涂层相组成与分析	167
8.4 涂层结合强度测试与分析	168
8.5 涂层导电性能测试与分析	173
8.6 小结	174
参考文献	174

第一章 绪 论

1.1 超音速火焰喷涂技术

超音速火焰喷涂基于高粒子速度获得高性能涂层的思想,采用高效燃烧室与拉伐尔喷嘴,将焰流的速度提高到马赫数 2 以上,速度高而温度适中,在制备合金和金属陶瓷涂层领域有很大的优势,工业中应用广泛。超音速火焰喷涂特别适合金属陶瓷涂层的制备,结合强度高,孔隙率低,耐磨损性能优越,与爆炸喷涂相当,优于等离子喷涂,也优于电镀硬铬层。但是,与等离子喷涂相比,其焰流温度相对较低,难以制备高熔点氧化物陶瓷涂层。

按助燃剂的不同,超音速火焰喷涂技术可分为两大类:氧燃料超音速火焰喷涂,即 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel Spray);空气燃料超音速火焰喷涂,即 HVOF(High Velocity Air Fuel Spray)。相对来说,HVOF 采用氧气助燃,焰流具有高温高速的特点,而 HVOF 采用空气助燃,焰流具有低温高速的特点。图 1.1 为 HVOF 原理图,采用煤油为燃料,氧气为助燃剂,径向送粉。

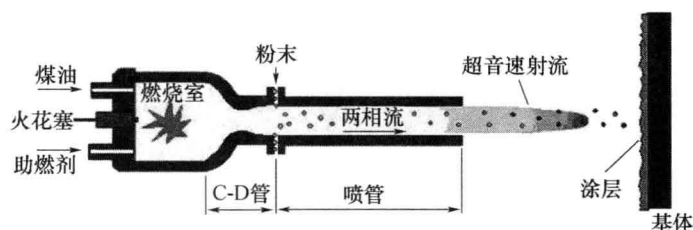


图 1.1 超音速火焰喷涂原理图

Jet - Kote 于 1982 年开发成功,1985 年在工业中得到应用,标志着 HVOF 喷涂技术的形成。爆炸喷涂层性能的优异性和对专利技术的长期保护,在一定程度上促进了 HVOF 喷涂技术的产生。HVOF 喷涂技术作为近三十年来热喷涂领域最有影响的喷涂技术,大致经历了四代的发展。

第一代的 HVOF 喷涂系统以“Jet - Kote”喷枪为代表,氧气和燃气在燃烧室中燃烧,高温气体(约 2800℃)通过一定角度环形分布的内孔到达枪筒。粉末沿轴向送进枪筒内孔中心,高温气体加热粉末并将其加速喷出枪筒,燃烧室和枪筒都采用水冷,粒子的速度和温度可达到 450m/s 和 2000℃ 以上。

第二代超音速火焰喷涂系统以 1989 年出现的 Diamond Jet 和 Top - Gun 为

代表。1989 年 Diamond Jet 由美国 Sulzer Metco 公司研制成功,它的特点是压缩空气冷却、无燃烧室和收缩喉管燃烧,与火焰丝材喷枪结构类似。由于无燃烧室和采用高压气体冷却枪筒,使粉末粒子的加热加速受到影响,而且空气中氧的吸入会增加涂层的氧化而影响涂层质量,其优点是结构简单、重量轻,适用于喷涂粒度均匀的细粉,但喷涂效率较其他喷枪低。Top - Gun 喷涂系统,可以使用高压燃气和压力较低的乙炔气体,火焰温度较高,实现了高熔点材料如氧化物陶瓷、难熔金属钼等的喷涂。Top - Gun 喷枪获得的粒子速度和温度范围分别为 $300 \sim 450\text{m/s}$ 和 $2000 \sim 2500^\circ\text{C}$ 。第一、第二代喷枪的喷涂功率约为 80kW ,送粉量为 $2.1 \sim 3.0\text{kg/h}$,且其涂层性能基本相近。

第一代和第二代 HVOF 喷涂设备使用的燃料为气体燃料,包括乙炔、氢气、丙烷等。气体燃料安全性相对较差,给生产带来不便,喷枪燃烧室的压力较低,限制了焰流的速度。第三代超音速火焰喷涂设备中,已开始使用煤油作燃料,具有挥发性低、安全性高、易于储存搬运、成本低等优点,且燃烧室压力高,与气体燃料相比,焰流速度得到提高,涂层性能得到进一步改善。

第三代 HVOF 喷涂系统以 1992 年研制成功的 JP - 5000 型喷枪为代表,从 1993 年到 1995 年出现了数种喷涂系统,这些系统大多有一个较大的燃烧室或一个较长的枪管,在高的燃气流量、氧气流量和燃烧室压力下工作,可产生比第二代 HVOF 喷枪更高的粒子速度。DJ2600 和 DJ2700,粉末轴向送入焰流;而 JP5000 喷枪,粉末径向送入燃烧室与喷嘴连接的喉部扩张部位,粉末粒子不经过燃烧室,可减少碳化物的分解。第三代 HVOF 喷涂系统,火焰喷涂效率较高,其喷涂速率达到 $6 \sim 8\text{kg/h}$,为其他轴向送粉的 2 倍。同时,粒子的速度可达 $600 \sim 800\text{m/s}$ 。由于高的粒子速度可使涂层中产生压应力,因此能制备较厚的涂层。

第四代超音速火焰喷涂技术引入了计算机信息处理、人机接口、质量流量控制等先进技术,提高了设备的可操作性,确保了涂层质量的稳定性和可重复性。在硬件系统上,第四代超音速火焰喷涂的控制系统有较大的改进与提高,而喷枪、冷水机组、送粉器等与第三代基本相同。第四代超音速火焰喷涂的典型代表有 TAFA 开发的 JP - 8000 和 Sulzer Metco 开发的 EvoCoat™ - LF 系统。JP - 8000 是 JP - 5000 系统的下一代产品,在硬件上采用了 PLC、触摸屏、质量流量控制,控制台采用抽屉式设计,方便维修,并开发了功能强大的人机界面(HMI),具有喷涂过程闭环控制、工艺参数存储、系统自诊断与维护管理、密码保护等特征。EvoCoat™ - LF 在硬件上也采用了 PLC、触摸屏、质量流量控制,控制台采用分区设计,使电气控制与燃料、氧气隔离,提高了系统的安全性,具有喷涂过程闭环监控、工艺参数存储、火焰探测、快速启动、多级报警、网络连接等功能。图 1.2 为 EvoCoat™ - LF 的控制台与触摸屏人机界面。

尽管 HVOF 技术有多种不同的设备,但它们有共同的特点:无论是喉管式

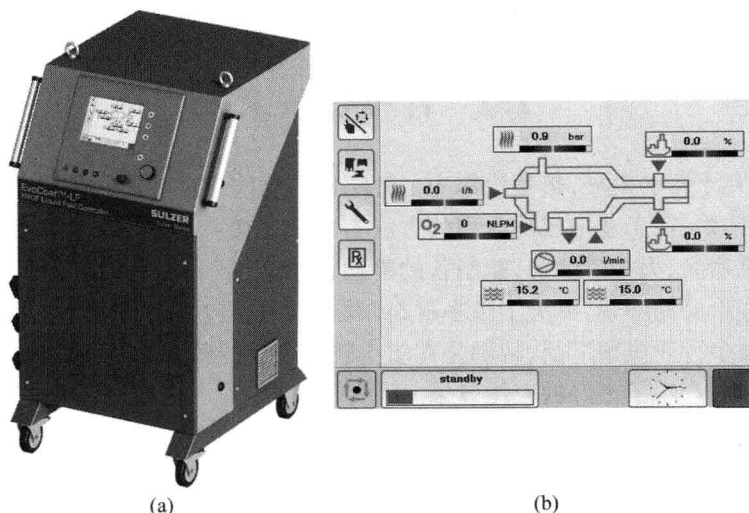


图 1.2 EvoCoat™ - LF 的控制台与触摸屏人机界面
(a) 控制台;(b) 人机界面。

还是腔膛式喷枪,都有一个有限的几何空间构成燃烧区域,燃料与氧气在有限的空间进行高强度的燃烧,使气体高速膨胀,形成高压,燃烧产物在高压驱动下形成高速气流,以两倍马赫以上的高速通过长度不同的枪管冲出枪外;火焰温度相对较高,燃烧室温度通常为 $2900 \sim 3100^{\circ}\text{C}$;粒子的速度很高,涂层与基体的结合强度高,对 WC-Co 涂层来说,可达到 150MPa 以上;涂层孔隙率低,通常为 3% 以下,甚至小于 1%;涂层硬度高,残余应力小,可喷涂厚涂层;涂层制备过程中,受焰流的热影响,部分 WC 出现了分解脱碳。

与 HVOF 不同,HVAF 使用空气而不是氧气作为助燃剂,它的原理与 HVOF 相似,压缩空气与燃料在燃烧室内混合,火花塞点燃燃烧,氮气将粉末送入焰流,高速飞行的粒子冲击基体表面形成致密的涂层。由于 HVAF 采用空气,而不是氧气,降低了生产成本。HVAF 焰流的温度比 HVOF 低,有部分学者研究表明,在喷涂 WC 系陶瓷涂层时 WC 几乎不分解,避免了涂层中脆性相 W_2C 的形成,提高了涂层性能,特别是涂层的韧性、耐磨、耐冲击等性能比 HVOF 有所提高,目前这个结论在国内还没有达成一致,有待工程实践与应用的检验。

近年来,以 AC-HVAF 为代表的超音速火焰喷涂技术在工业中得到成功应用,该技术可以制备金属陶瓷及高性能金属、合金涂层。AC-HVAF 使用的主气为丙烷、丙烯或者天然气,次气为氢气,压缩空气和主气的混合物通过多孔陶瓷片进入燃烧室,经由火花塞初始点燃混合气体后,该陶瓷片被加热到混合气体的燃点以上,然后持续点燃混合物,喷涂粉末预先与次气混合,轴向注入燃烧室,在燃烧室被加热、加速进入喷嘴,喷向基体撞击形成涂层。通过调整主气和次气

的流量,可以控制喷涂粒子的温度,涂层工艺设计提供方便。

1.2 冷喷涂技术

经过几十年的发展,热喷涂作为一种结构与功能涂层的制备技术,已形成比较成熟的体系,在工业中成功应用的方法有等离子喷涂、超音速火焰喷涂、爆炸喷涂、电弧喷涂、火焰喷涂等,能制备的涂层包括金属、合金、陶瓷及部分高分子材料,这些涂层的应用,解决了很多材料领域的难题,包括耐磨、耐蚀、隔热、抗氧化等,在很多行业应用广泛,特别是在航空航天、机械制造、冶金、水利电力、机械维修等行业,产生了很好的应用效果。

传统的热喷涂技术使用的热源主要有气体放电热源(包括电弧、等离子体)与燃烧火焰,温度都比较高,电弧的温度达 5000°C 以上,等离子体的温度更是高达 16000°C ,燃烧火焰随燃料不同,温度有所变化,但也均高于 2000°C 。丝状、棒状或粉末状的喷涂材料经过热源的加热(丝状与棒状材料还有雾化过程)后,熔化或软化,高速飞向基体表面沉积形成涂层。由于材料要经过高温热源加热,材料的特性将会发生改变,包括氧化、分解、相变等,部分改变了喷涂材料的原有性能,影响了涂层质量,如电弧喷涂锌、铝防腐涂层时,氧化物含量通常高于 5%,超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层时,WC 发生分解,传统的热喷涂技术在保持喷涂原材料的成分与结构方面遇到了困难。

冷喷涂技术可有效地解决热喷涂技术的这一难题,由于冷喷涂的热源温度相对较低,远低于材料的熔点,喷涂时材料只是软化,避免了氧化、分解与相变等问题。冷喷涂(Cold Spray, CS),又称冷空气动力学喷涂法(Cold Gas Dynamic Spray Method, CGDSM 或 CGDS、CGSM)。该技术最初在 20 世纪 80 年代中期,由当时的苏联科学院理论及应用力学研究所的学者 Papyrin 等人提出。20 世纪 90 年代以来,冷喷涂技术在世界范围得到了很大的发展。例如美国、欧洲分别于 1994 年、1995 年出现了冷喷涂专利,俄罗斯科学院理论及应用力学研究所(The Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Science)、Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratories)、宾夕法尼亚大学(the Pennsylvania State University)、ASB 公司、University of Bundeswehr 等研究机构都进行了有关研究,目前研究集中在喷涂中的气体动力学、高速碰撞的物理模型、喷涂材料以及工艺研究优化等。国内,大连理工大学、西安交通大学、中国科学院沈阳金属研究所相继研制冷喷涂设备。

冷喷涂技术的原理如图 1.3 所示,它利用专门的电加热设备将氮气、氦气等惰性气体加热,依据喷涂材料的不同,温度范围为 $100 \sim 500^{\circ}\text{C}$,加热后的气体进入喷枪,经拉伐尔喷嘴加速至超音速,喷涂粉末材料高压轴向送入喷枪,经加热加速后,喷向工件表面形成涂层。

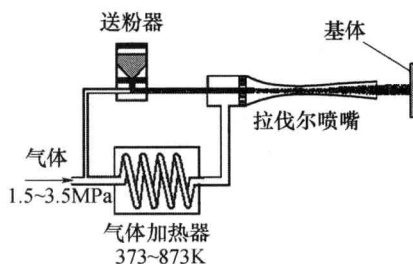


图 1.3 冷喷涂原理图

冷喷涂层具有氧化物含量低、涂层热应力低、硬度高、喷涂层厚度大等优点。冷喷涂实际上是一种低温喷涂，与传统的热喷涂特征不同，喷涂的粉末达不到熔化状态，只是达到软化状态，因此冷喷涂要求喷涂粒子的速度很高，如德国汉堡大学测得镍粒子的临界速度为 640m/s ，镍基合金粒子的临界速度为 $750 \sim 800\text{m/s}$ 。冷喷涂技术可以制备氧化物极少，甚至是无氧化物的涂层。

通常认为，冷喷涂适用于有一定塑性的材料涂层的制备，如纯金属、合金、高分子材料以及复合材料等，近年来，也有冷喷涂制备 WC-Co 涂层的成功实例。特别是由于粒子加热温度低，基本无氧化，适用于对温度敏感（纳米、非晶等）、对氧化敏感（ Cu 、 Ti 等）和对相变敏感（金属陶瓷）材料的涂层制备。由于高速粒子碰撞时对基体或涂层表面强烈的喷丸效应，涂层内一般处于压应力状态，有利于沉积厚涂层。而且，由于粉末没有经历与热喷涂一样强烈的热过程，基本不发生组织结构的变化，未沉积的粒子也可以回收利用。冷喷涂技术为了获得高的粒子速度与沉积效率，要求粉末粒子粒度及其分布范围小，一般为 $10 \sim 45\mu\text{m}$ 。

与传统喷涂技术相比，冷喷涂技术具有以下特点：

- (1) 粒子速度具有临界值，低于临界速度的粒子不能在基体上沉积形成涂层，铜、钛粒子的临界速度分别为 550m/s 和 800m/s ；
- (2) 气源压力高，范围为 $1.5 \sim 3.5\text{MPa}$ ；
- (3) 需要大功率电加热设备加热惰性气源；
- (4) 采用轴向高压送粉，需要高压送粉器。

图 1.4 为工业型冷喷涂设备安装图，包括喷枪、控制柜、送粉器及气体回收增压装置。该系统使用氦气作为工作气体，由于价格昂贵，系统中增加了气体回收装置。图 1.5 为喷枪的实物图，由图可知，喷枪供气管上有隔热套，并有测压与测温装置。

冷喷涂技术目前还没有得到大量应用，但是，由于其涂层能较好保留喷涂原材料的特性，潜在的应用领域很多，高性能的铜涂层可应用于导电导热，锌涂层可用于腐蚀防护，镍与镍合金涂层可用于高温腐蚀防护。表 1.1 为不同方法制备的铜材的电阻率，由表可知，在喷涂方法中，冷喷涂铜涂层的电阻率最低，相应地，其导热性能是最好的。

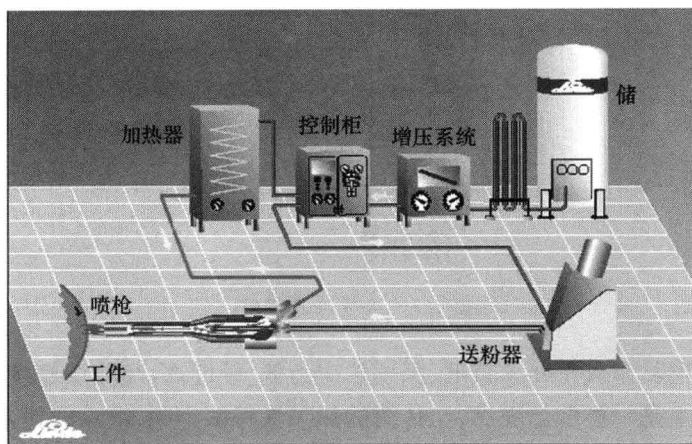


图 1.4 冷喷涂设备安装图

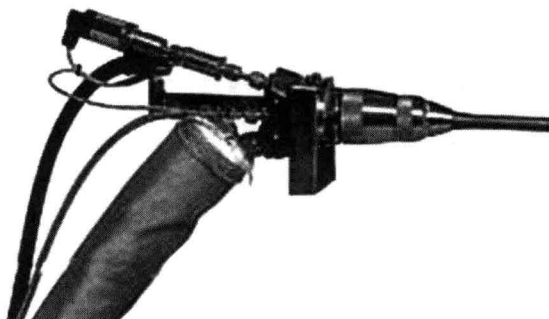


图 1.5 喷枪实物图

表 1.1 不同方法制备的铜材的电阻率

制备方法	电阻率/($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	制备方法	电阻率/($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
冶炼	1.68	电弧喷涂	3.05
硬拔	1.77	等离子喷涂	5.45
冷喷涂	2.39		

图 1.6 是应用冷喷涂技术为火箭发动机热端部件制备导热涂层。该热端部件靠近燃烧面,易受高温燃气的热影响,为避免过热失效,试图通过电镀的方法在其表面制备厚为 1.27mm 的铜镀层,将热量迅速导出,以减小热负荷,但由于厚度太大,镀层结合强度不能满足要求。通过冷喷涂在该部件表面喷涂铜涂层,厚度为 1.27 ~ 2.54mm,涂层与部件结合力高,涂层磨削后还可以再钻孔加工。

铜涂层另一个典型的应用是集成电路与散热器之间的高效导热涂层,如图 1.7 所示。铜涂层作为电的良导体,还能用于电磁屏蔽,以防止电磁干扰,图 1.8 是冷喷涂铜涂层用于塑料机架电磁屏蔽的实例。

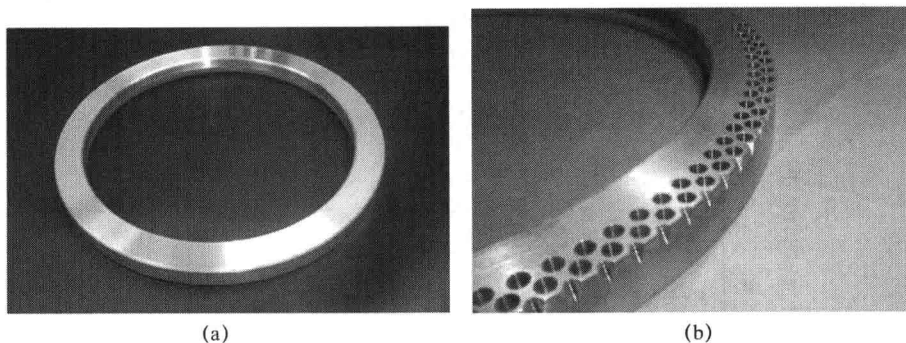


图 1.6 冷喷涂制备导热涂层
(a) 喷涂磨削后；(b) 钻孔加工后。

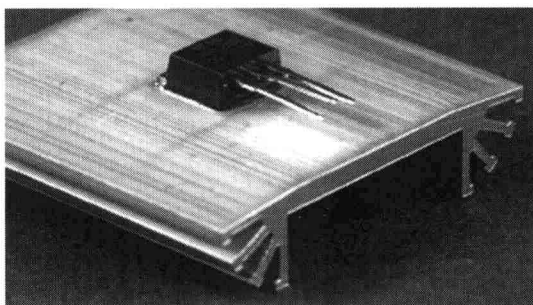


图 1.7 冷喷涂制备集成电路导热涂层

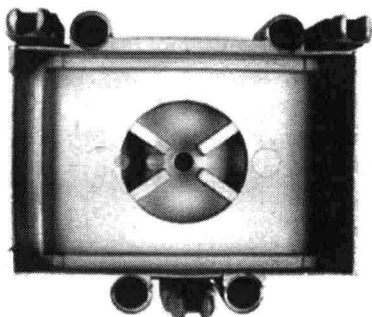


图 1.8 冷喷涂铜涂层用于
塑料机架电磁屏蔽

冷喷涂制备的铝涂层可用于过渡层,钛涂层可用于快速成型,近年来,冷喷涂已开始成功制备金属陶瓷涂层,随着研究的深入,冷喷涂在工业中的应用将会占有一席之地。

1.3 低温超音速火焰喷涂技术的提出

涂层的性能与粒子沉积前的状态密切相关,包括粒子的速度、温度与熔化状态,不同喷涂方法得到的粒子速度与气流温度如图 1.9 所示。由图可知,在粒子速度范围的上限,超音速火焰喷涂与冷喷涂最为接近,超音速火焰喷涂粒子速度可达 800m/s 左右,而冷喷涂可达 1200m/s 左右,一般来说,在冷喷涂中,粒子形成涂层的临界速度为 $450 \sim 800\text{m/s}$ 。在焰流温度方面,相对来说,超音速火焰喷涂的焰流温度也较低,经过拉伐尔喷嘴的加速降温后,焰流的温度一般低于 2600°C ,而冷喷涂的气流温度通常为 $100 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

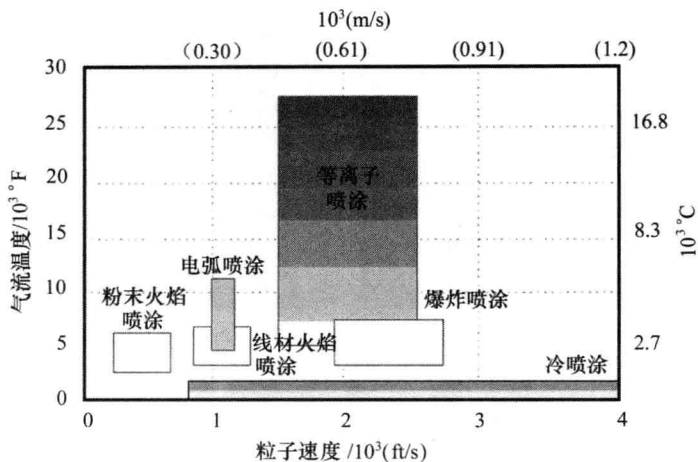


图 1.9 各种喷涂技术的特征参数

由以上分析可知,在各种喷涂方法中,超音速火焰喷涂与冷喷涂最为接近,它们有一个共同的特点——高粒子速度,因此,可以作一个设想,如能将超音速火焰喷涂的焰流温度降至冷喷涂的范围,同时保持其超音速的特性,即通过焰流的改性,将焰流的速度保持在超音速,温度调整低于 1000°C ,由此形成低温超音速火焰喷涂,部分具备冷喷涂的功能,以拓展超音速火焰喷涂的涂层制备范围。

由空气动力学和火箭发动机原理可知,以煤油为燃料的超音速火焰喷涂技术,煤油与氧气的供给压力大,雾化燃烧之前的系统压降大,对其焰流进行处理,从理论与工程实践来看,容易保证火焰燃烧的稳定性,而以煤油为燃料的超音速火焰喷涂技术本身的调节范围就较大,因此,超音速火焰喷涂焰流的低温化有较大的可行性。

对焰流进行降温处理有两种途径,一种是在焰流中注入大量的氮气,由氮气吸收燃烧火焰的热量,但同时保证燃烧室有足够的压力形成膨胀比压,使焰流保持超音速;另一种是在焰流中注入水,通过水的蒸发对焰流进行降温。这两种方式,以第一种方式较好,由于燃烧与加速都是紊流,氮气易于与焰流混合,形成均匀的喷涂射流,而且,氮气比水的可控性好。

经过大量的理论分析与工程实践,第二炮兵工程大学以火箭发动机技术为基础,研制了以航空煤油为燃料的多功能超音速火焰喷涂技术(HVOF/HVAF),具备氧气与空气助燃的功能,并通过对焰流的改性处理,获得了低温超音速火焰喷涂技术,部分具备冷喷涂的功能,在分子、金属、合金、金属陶瓷涂层的制备领域获得广泛的应用。