

装备科技译著出版基金

S

urface Engineering for Enhanced
Performance against Wear

抗磨损 表面工程技术

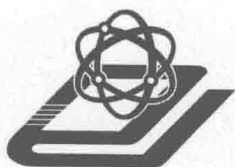
\\ [印度] Manish Roy 编
\\ 何卫锋 李应红 何光宇 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

抗磨损表面工程技术

Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear

[印度] Manish Roy 编

何卫锋 李应红 何光宇 译

国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2015-146号

图书在版编目(CIP)数据

抗磨损表面工程技术 / (印) 马尼什·罗伊
(Manish Roy) 编; 何卫锋, 李应红, 何光宇译. —北
京: 国防工业出版社, 2018. 6

书名原文: Surface Engineering for Enhanced
Performance against Wear

ISBN 978-7-118-11424-9

I. ①抗… II. ①马… ②何… ③李… ④何… III.
①抗磨损-金属表面处理 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 103157 号

Translation from English language edition:

Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear

By Manish Roy

Copyright © 2013 Springer Vienna

Springer Vienna is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

※

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)

天津嘉恒印务有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16½ 字数 303 千字

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 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

表面处理是提高机械设备零部件表面性能最有效的方法之一,可使其表面性能与基体不同,从而满足零部件的使用环境和功能要求。尽管表面工程学从古代就开始被运用,但是表面处理技术的理论研究和工程应用仅仅在最近几十年才获得了迅速发展。当表面处理技术在工程部件上应用之后,其性能得到显著提高,取得了良好的经济效益,这一研究方可获得重大进步。目前,有许多表面处理技术可供选择,选择表面处理技术时,需要考虑被处理层的厚度、黏附强度、处理层与环境的相互作用、机械加工方法等。涂层的选择由部件的尺寸、功能和非功能需求、涂装和加工特性以及经济成本所决定。因此,本书的目的是引导读者针对特定应用环境选择最适合的处理方法和涂层,当然,这并不是最终目的。

本书共8章,每章由来自表面工程各个领域的专家撰写。本书由表面热喷涂涂层的摩擦学开始,第1章讨论各种表面热喷涂涂层的特性、优势、不足及摩擦学性能,着重介绍一些典型的表面热喷涂涂层的应用,并且给出一些范例。第2章介绍纳米复合材料薄膜在部件抗磨损中的应用,主要包括纳米复合材料薄膜的变形行为、微观特性、机械性能和摩擦学性能等。第3章涉及金刚石薄膜及其摩擦学性能,主要介绍金刚石薄膜的各种沉积技术、微观特性描述、各种参数的影响及薄膜的纳米摩擦学性能等。第4章主要介绍表面扩散处理及其摩擦学性能。第5章主要包括耐磨堆焊对冲蚀磨损的影响,讨论各种耐磨堆焊处理及其表面力学性能、滑动磨损、磨损和腐蚀性能等。第6章介绍电镀技术在摩擦学中的应用,在介绍完电解和电解电镀层技术后,对电镀表面的滑动磨损性能进行描述。第7章的主题是激光表面处理技术,在这一章中讨论激光处理表面的摩擦学性能。第8章为本书的总结性章节,主要讨论表面工程学在生物摩擦学上的应用,各种生物活性的、生物惰性的、抗生物的涂层的摩擦学行为及其在人体上的应用是这一章的讨论重点。本书每一章都包含现有技术的总结和对未来研究的预测。

本书既可以用作教材也可以当作参考书使用,编写本书的一个主要目的是突出在表面摩擦学上的许多最新成就。本书的读者对象是本科生、研究生、工程师、各学术机构的研究人员以及研究和生产单位。对于致力于采用表面处理方

法提高材料抗磨损性能的人来说,本书是一本有价值的参考书。

在本书的编写过程中,得到了许多人的支持和帮助。十分感谢我的合著者们,他们花了大量时间来准备各章节。感谢来自印度国防冶金研究实验室的科学家 D. K. Das、印度克勒格布尔技术学院教授 Rahul Mitra、奥地利摩擦学技能中心的 CEO Andreas Pauschitz、海得拉巴有色金属材料技术开发中心主任 K. Balasubramanian、印度国防冶金研究实验室科学家 Subir Kr. Roy,他们给了我持续不断的鼓励,对本书的内容和我进行了深入的讨论,并且提供了有价值的信息。还要感谢来自国防冶金研究实验室的高级助理 M. Ramakrishna,他在技术图表和草图的处理上给了我很多帮助。

Manish Roy 博士

印度 海德拉巴

2012 年 12 月

目 录

第1章 热喷涂涂层的抗磨蚀性	1
1.1 引言	1
1.2 工艺分类和基本原理	1
1.3 喷粉的制备	3
1.4 热喷涂涂层的分类	4
1.5 热喷涂涂层的性能	5
1.5.1 微观结构特征	5
1.5.2 力学性能	10
1.6 摩擦性能	11
1.6.1 摩擦磨损	11
1.6.2 冲蚀磨损	18
1.6.3 磨料磨损	23
1.7 热喷涂涂层的应用	28
1.8 未来研究方向	30
参考文献	31
第2章 抗磨损纳米复合涂层的应用	36
2.1 引言	36
2.2 纳米复合薄膜的沉积	37
2.3 纳米复合涂层的重要特点	38
2.3.1 纳米复合涂层的微观结构特点	38
2.3.2 纳米复合涂层的力学性能	42
2.4 纳米复合涂层的摩擦性能	46
2.4.1 摩擦行为	46
2.4.2 摩擦性能	52
2.4.3 纳米摩擦性能	54
2.5 纳米复合涂层的应用	57
2.6 总结与展望	59
参考文献	60

第3章 金刚石薄膜及其摩擦性能	65
3.1 引言	65
3.2 金刚石薄膜的沉积	66
3.3 金刚石薄膜的特性描述	67
3.4 金刚石薄膜的摩擦学应用	72
3.5 金刚石薄膜的摩擦性能	74
3.5.1 金刚石薄膜摩擦性能的重要特点	74
3.5.2 滑动磨损	75
3.5.3 磨粒磨损	79
3.5.4 冲蚀磨损	80
3.5.5 振动磨损	82
3.6 纳米晶体金刚石薄膜的摩擦学	84
3.7 微米和纳米级金刚石薄膜摩擦学	85
3.8 未来研究方向	88
参考文献	88
第4章 表面扩散处理摩擦学	94
4.1 概述	94
4.2 表面扩散处理的分类	94
4.2.1 渗碳	94
4.2.2 渗氮	98
4.2.3 碳氮共渗	100
4.2.4 氮碳共渗	102
4.2.5 渗硼	103
4.2.6 其他扩散处理	104
4.3 扩散涂层的摩擦学	107
4.3.1 滑动磨损	107
4.3.2 固体颗粒冲蚀	114
4.3.3 磨损	115
4.4 扩散渗层部件的应用	118
4.5 总结	120
参考文献	120
第5章 耐磨堆焊对冲蚀、腐蚀及磨损的影响	124
5.1 引言	124
5.2 热流方程的分析模型	124

5.3 堆焊过程	126
5.3.1 气焊工艺	126
5.3.2 电弧焊工艺	126
5.3.3 高能束处理	128
5.3.4 其他堆焊工艺	128
5.4 堆焊材料	128
5.4.1 铁基材料	129
5.4.2 镍合金	133
5.4.3 钴合金	134
5.4.4 铜合金	136
5.4.5 复合材料	136
5.5 耐磨堆焊摩擦学	138
5.5.1 滑动磨损	138
5.5.2 磨料磨损	143
5.5.3 冲蚀磨损	150
5.6 耐磨堆焊表面的应用	153
5.7 未来研究方向	154
参考文献	155
第6章 电镀与摩擦学	159
6.1 概述	159
6.2 电镀涂层	160
6.2.1 连续电镀	161
6.2.2 熔盐电镀	161
6.3 化学镀层	161
6.3.1 还原剂	162
6.3.2 络合剂	163
6.3.3 稳定剂	163
6.3.4 表面活性剂	163
6.3.5 缓冲剂	163
6.3.6 催化剂	163
6.4 摩擦性能	166
6.4.1 电镀层	166
6.4.2 化学镀层	177
6.5 电镀层和化学镀层的摩擦学应用	181

6.6 总结	183
参考文献	184
第7章 激光表面处理(技术)在抗磨损中的应用	188
7.1 概述	188
7.2 激光表面改性工艺	189
7.2.1 工艺基础	189
7.2.2 工艺分类	190
7.2.3 核心方程	196
7.3 激光表面处理层的特性	198
7.3.1 微观结构	198
7.3.2 力学性能	202
7.4 激光表面改性的摩擦学	203
7.4.1 滑动磨损	204
7.4.2 磨蚀	212
7.4.3 冲蚀磨损	215
7.5 激光表面改性的应用	219
7.6 未来研究方向	221
参考文献	222
第8章 表面工程在生物摩擦学上的应用	226
8.1 概述	226
8.2 植入体磨损	227
8.3 涂层在生物医学应用的分类	229
8.3.1 生物活性涂层	229
8.3.2 生物惰性涂层	237
8.3.3 抗生物涂层	240
8.4 总结与展望	249
参考文献	250

第 1 章 热喷涂涂层的抗磨蚀性

1.1 引言

热喷涂是指用粉末原料或细小的丝材熔滴及半熔滴进行涂层制备的一种工艺。热喷涂技术可以追溯至 1911 年, Schoop 博士成功地利用高压气体将熔融金属进行雾化,并将其喷涂至物体表面。1912 年,他制作了一个装置用以喷涂金属丝,这个工艺就是火焰喷涂(FS)。随后,他又研发出一项新的技术,即使用电熔原材料进行热喷涂。这种方法在当代被称为电弧喷涂。1930 年, F. 斯科利首次提出将粉末用于火焰喷涂。

上述几种工艺只限于低熔点金属粉末。随后,渐渐出现了对高熔点和耐氧化粉末的需求,如喷涂金属粉或陶瓷粉,这一需求促进了 1955 年爆炸喷涂和 1960 年大气等离子喷涂技术的研发,继而促进了 1970 年底和 1980 年真空等离子喷涂(VPS)和低压等离子喷涂(LPPS)技术的发展。热喷涂技术 1980 年有了突破性的进展,技术人员发明了一种名为超声速火焰喷涂(HVOF)的技术,这是一种在富氧条件下进行喷涂的新技术。1990 年又出现了一种非常重要的技术,即冷喷涂,它能够制备出一种其他喷涂技术均无法实现的涂层。

热喷涂技术的主要优势在于:处理过程简单、基体选材方便、基体无须加热。关于该工艺的进一步评述见文献[1-5]。本章旨在介绍热喷涂技术的最新发展,并提供其在各工业部门进行摩擦应用的相关数据。

1.2 工艺分类和基本原理

热喷涂工艺分为 3 类:第一类是以燃烧作为热源;第二类是以等离子体状或弧状的电能为热源;第三类则是冷喷涂技术。低速燃烧——也称火焰喷涂,和高速燃烧是两种不同的燃烧喷涂法。一般来说,这两种喷涂方式所能达到的最高温度均接近于常见的气体燃料所能达到的温度,如丙烯、丙烷、乙炔、氢气或煤油之类的液体燃料。无论是哪种处理工艺,都需要以氧气作为助燃剂。在高速燃烧中,与低速燃烧中的火焰喷涂相对应的是超声速火焰喷涂,而有时也以空气为助燃剂,这一方法则被称为超声速空气火焰喷涂(HVAF)。在低速技术中,气

体中粒子停留的时长大于高速技术,因此粒子的氧化和降解会更加充分。这样形成的涂层孔隙度较大、结合强度较低(50~75MPa)。而超声速火焰喷涂法则不同,由于使用粗粉、金属丝,火焰喷涂产生的沉积率更高,而且方法简便、低噪、经济。

在高速技术中,粉末停留的时长小于 $1\mu\text{s}$,因而导致粉末的氧化和降解不足。而使用细小粉末,运用高速技术将细粉推压至基材,获得的涂层孔隙度则最少小于0.5%,且结合强度颇佳。高速度带来的充分沉积,使得可采用熔点更高的喷粉进行沉积,涂层应用范围也相应更广,包括高温涂料和抗热耐磨涂层。运用金属丝在高速度下制得的涂层允许连续沉积。然而,金属丝的种类远不及喷粉多。这些超声速火焰喷涂技术大多是连续燃烧。相比而言,爆炸法则是一个反复循环的过程,采用火花放电推压喷粉。但这种方法的缺点是噪声太大。

超声速火焰喷涂法依照其燃烧器大致可分为两种,即咽喉燃烧器和炉室燃烧器。在咽喉燃烧法中,喷粉沿轴向喷入。爆炸喷涂法可被视为咽喉燃烧法的实例,如图1.1所示。基于咽喉燃烧法的许多技术因其管筒短、速度慢、粒子加热不匀等还存在一些缺点。在炉室燃烧法中,喷粉呈放射状或轴向注入。如图1.2所示,超音速火焰喷涂法属于轴向注入,采用水冷却技术,在直角方向有燃烧室。连续爆炸喷涂法则是用同轴燃烧室进行轴向注入的咽喉燃烧法,如图1.3所示。图1.4中的JP 5000是一种液体燃料、双炉室、放射状喷射燃烧法。

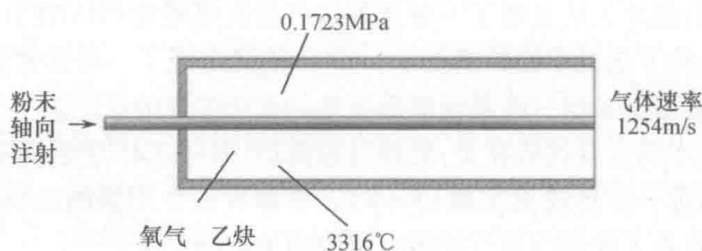


图 1.1 爆炸喷涂法示意图

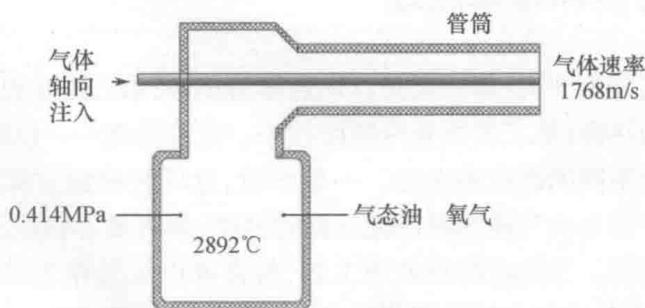


图 1.2 超音速喷气喷涂法示意图

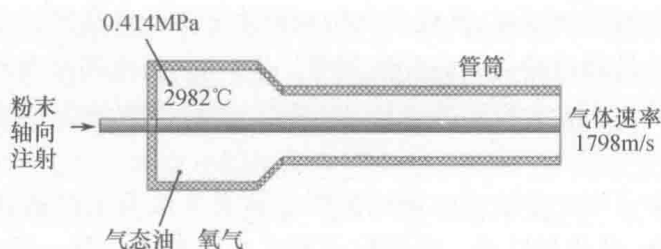


图 1.3 连续爆炸喷涂法示意图

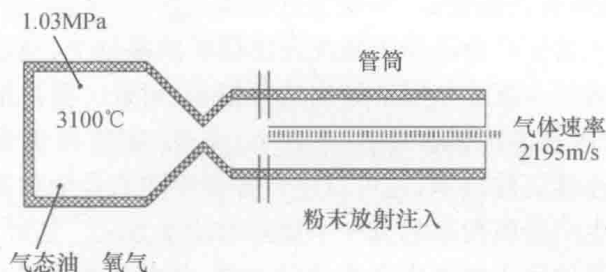


图 1.4 JP 5000 燃烧法示意图

等离子喷涂法和电弧喷涂法是由电驱动的两不同的热喷涂技术。金属丝电弧喷涂法是利用电弧产生的高温来熔炼原料。相比而言,等离子喷涂法则是利用电来电离气体介质。等离子喷涂法的应用非常普遍,除金属粉、金属陶瓷粉和陶瓷粉外,还可用来喷涂各种不同大小规格较粗糙的粉末。该设备精密复杂,会放射紫外线,需要专业技术人员进行操作。等离子喷涂技术包括大气等离子喷涂(APS)、低压等离子喷涂(LPPS)和真空等离子喷涂(VPS)3种。具体方法的选择取决于喷粉的特点及实际应用需求。

1.3 喷粉的制备

喷粉的制备方法根据所需粉末的特性来选择。一般来说,雾化是制备金属粉末和合金粉末最常用的方法之一。当进行雾化时,先将金属或合金熔液倒入一个高温漏斗,漏斗的一端连接着喷管,在喷管处用水或气体对金属或合金进行精细分散。有时也会用离心法进行熔液分散,这种方法比气化或水雾化法更加节能。低熔点焊粉常用转盘雾化技术制备,其生产率高达70%。高熔点粉末,如锌(用于电池)和铝(用于化学品)等,由转杯雾化技术制备,该技术生产率颇高,超过70%。高腐蚀性粉末,如钛粉,可以用旋转电极法生产。通过该方法制得的粉末相比气体雾化法洁净度更高,颗粒大小均匀。超声波气体雾化法或振动超声波雾化法更适用于生产形状要求较高、成分较单一的圆球状粉末。其他的雾化技术,如滚转雾化、振动电极雾化和熔滴雾化法尚在试验阶段。雾化技术

生产的粉末多为圆球状颗粒,其成分和物相取决于雾化和离散的方法。

多数陶瓷粉是通过熔化和破碎法制得。生产时,将所需材料放入熔炉熔化,再凝固成块,然后,用工业破碎机将铸块粉碎。通过该方法生产的粉末紧致、结实、形状不一。

金属粉末也可用化学法或电解法制得。这类方法可生产多种粉末,并严格控制粉末的成分、形状和尺寸。用氧化还原法生产粉末已是一项相当成熟的工业生产技术。若考虑经济因素,不妨用该方法生产高熔点金属粉末,如钨、钼等。此外,这些粉末还具有性能稳定、不易变色的特点。

湿法冶金加工法生产金属粉末是在浸出精矿的基础上,通过电解、胶结或化学还原法从浸出溶液中沉淀金属。运用这种技术,附带一些添加物,并控制好颗粒的增长、成核和附聚情况,就可以生产尺寸、形状、密度和表面积各异的粉末。采用共同沉淀或连续沉淀技术,还可以生产各种不同的合金和复合粉末。

热分解法是生产金属粉末的另一个重要的化学方法。这种方法常用来生产高纯超细粉末。其他用于粉末生产的化学方法,如盐液沉淀法、气体沉淀法、氢化物分解法和热反应法也不容忽视。

电沉积法也可以生产各种不同的金属粉末。通过直接电沉积,可以制得松散吸附的粉末和轻软蓬松的沉积物,经过进一步物理分离即可获得精细粉末。精炼金属形成致密、光滑、脆薄的沉积层,经过粉碎制成细粉。电解极化高的金属经过阴极处理会形成一个极易破碎的易脆聚合沉积层,这个沉积层经过进一步加工即可制成细粉。

作为一种常用方法,喷雾干燥法运用有机胶黏剂生产各种结块粉末。该方法将掺有有机胶黏剂、水和待结块材料的混合物喷入反应室,室内高温干气循环流动,当混合物中的水分蒸发后,加入有机胶黏剂即可覆盖材料颗粒,从而制得结块粉末。这种方法生产的粉末多孔,有时易于致密化。

1.4 热喷涂涂层的分类

热喷涂涂层可分为不同的类型。许多涂层以纯金属的形式沉积,如钼、镍、铜、钨等。纯金属沉积具有耐磨抗蚀的功用。由各种不锈钢、镍基耐腐蚀合金、蒙乃尔铜镍合金等构成的合金涂层主要用作抗腐蚀层。还有金属陶瓷粉末,如最常见的 $WC-Co$ 和 Cr_3C_2-NiCr , 主要用于提高耐磨性。许多陶瓷粉末,如 ZrO_2 、 Al_2O_3 、氧化钇稳定的氧化锆等,主要作为耐高温涂层。高分子聚合物,因其自身的高密度、低孔性和耐磨性而具有超强的耐腐蚀性和出色的密封性,这使其成为一种常见的防护涂层。各种聚乙烯、聚酰胺、聚芳醚酮、聚甲基丙烯酸甲酯和其他热塑性塑料都可以进行喷涂并应用于工程中。分散在软质基底上的低

摩擦材料通常称为耐磨涂层。这些涂层主要用于控制两个活动部件之间的间隙。(Al-Si)-石墨、Ni-石墨、(Al-Si)聚酯都是典型的耐磨涂层。还有一种涂层采用自熔粉末,这些粉末经过处理可以在喷涂时进行重熔。它们的主要成分是硼和硅,在熔化喷涂时会与氧气发生反应变成熔渣,从而形成一层由致密的硼化物和氮化物颗粒组成的无氧金属涂层。这些涂层具有优异的耐高温摩擦性能。

1.5 热喷涂涂层的性能

热喷涂涂层的性能是由其化学成分、孔隙率和氧化物的含量决定的。此外,喷涂形态和涂层介面与基体介面间的强度也会影响涂层的各种性能。

1.5.1 微观结构特征

研究对象是大小为 $8 \sim 64 \mu\text{m}$ 的 WC-17% Co 颗粒。图 1.5^[6,7] 所示为工业用圆球状 WC-17% Co 粉、圆球状 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 粉、多棱角 WC-12% Co 粉和圆球状 WC-12% 粉的典型电子显微图像。所有的粉粒皆呈圆球状,其初始孔隙度相对较大。通过电子显微镜可以分析检测喷涂颗粒的表面氧化情况。大小、形状各异的多棱粉末用途非常广泛,它不仅易制备,而且正因其精细度不足,反而使其形成的涂层孔隙度较高。过于精细的粉末往往不易于匀速供给,有时还会导致过度氧化和不必要的相变。

图 1.6 所示为超声速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 涂层、爆炸喷涂 WC-12% Co 涂层和等离子喷涂 WC-12% Co 涂层的横切面低倍放大图。从该图可清楚看出涂层与基体的紧密贴合。涂层的厚度为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$,切面未见裂纹。该涂层是通过一层层沉积而成,这种分层结构常见于超声速火焰喷涂^[8]。

图 1.7 所示为使用爆炸喷涂形成于材料表面的 WC-12% Co 涂层的高倍放大电子显微图像。显然,在该爆炸喷涂中,涂层熔解不足,层片是经过一层层沉积而成。图 1.7(b)和 1.7(c)分别为等离子喷涂和超音速火焰喷涂涂层的横截面微观结构经图像分析确定 WC-17% Co 涂层的表面孔隙度不超过 0.5%。未熔颗粒的相关百分比低于 0.2%,其中 WC 粒子除外,因为它们属于难熔颗粒。WC 粒子属于最坚硬的碳化物,其熔点约为 3043K。然而,相比在超声速火焰喷涂工艺中,WC 粒子的高温轧平性能在等离子喷涂工艺中效果更显著。因此,可以通过等离子技术制备密度高、黏附强的涂层。在生产过程中,涂层表面的粗糙度为 $1.5 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 。

图 1.8 所示为爆炸喷涂 WC-12% 涂层和超声速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$

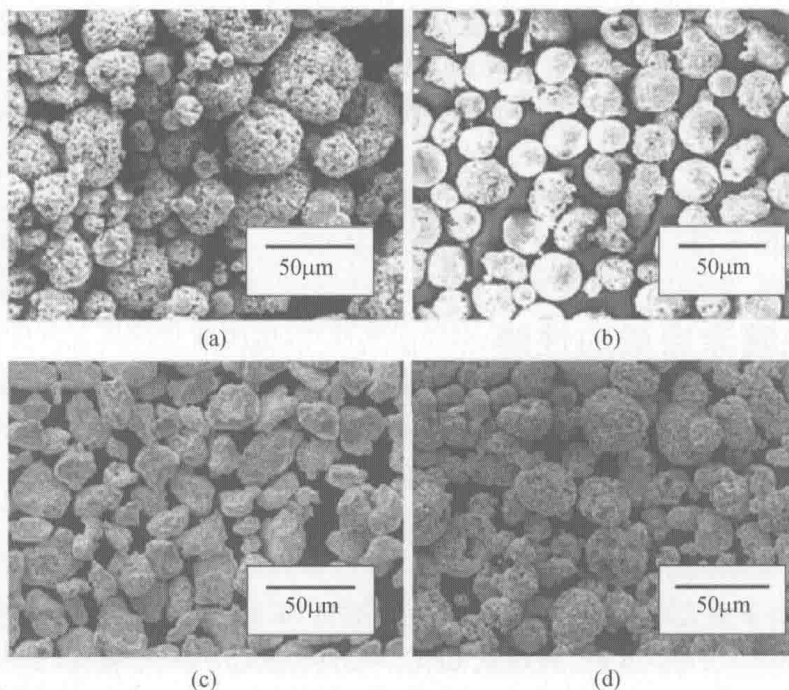


图 1.5 不同粉末的电镜图像

- (a) 工业用圆球状 WC-17% Co 粉; (b) 圆球状 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 粉;
(c) 多棱角 WC-12% Co 粉; (d) 圆球状 WC-12% 粉。

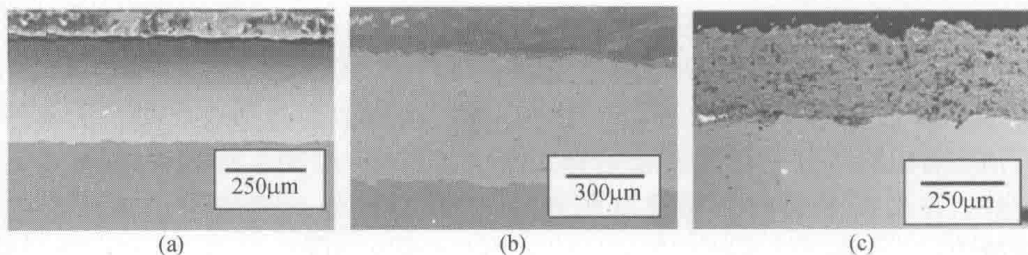


图 1.6 低倍显微镜下涂层图像

- (a) 超声速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 涂层; (b) 爆炸喷涂 WC-12% Co 涂层;
(c) 等离子喷涂 WC-12% Co 涂层。

涂层部分截面的高倍放大背散图像。涂层中的气孔(黑色区域)和氧化物(黑色环形区域)清晰可见。超声速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 涂层的图像分析显示涂层的孔隙度和氧化物分别为 1.5 和 0.75%。涂层微观结构也显示有 3 种不同区域:第一个区域为黑色,能谱仪显示该区域主要包含铬和碳,即正交 Cr_3C_2 相;第二个区域为灰色,能谱仪显示该区域包含所有的 3 种重要元素,即镍、铬和碳,定量分析表明该区含有 Cr_3C_2 和 NiCr ;第三个区域为白色,能谱仪显示其重要相为 NiCr 。3 个区域的定量分析如表 1.1 所列。

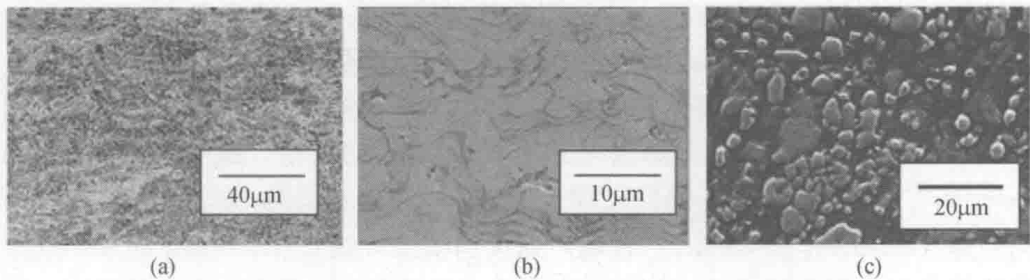


图 1.7 高倍背散射图像

(a) WC - 12% 爆炸喷涂涂层；
(b) WC - 12% Co 等离子喷涂涂层；(c) WC - 17% Co 超声速火焰喷涂涂层电镜图像。

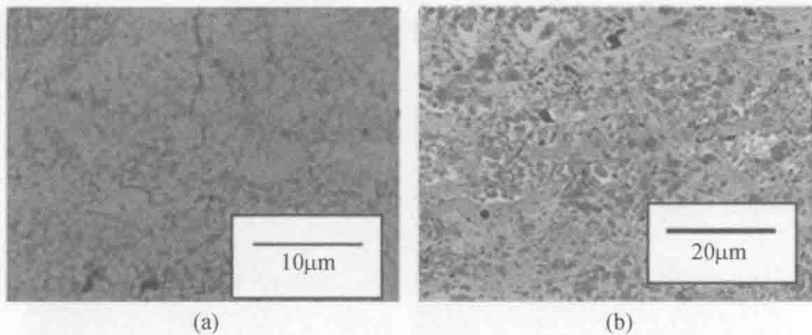


图 1.8 爆炸喷涂 WC - 12% 涂层和超声速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 涂层部分截面的高倍放大背散图像

表 1.1 3 个区域的定量分析

		元素		
		C	Cr	Ni
黑色区域	质量分数	16. 05	83. 04	0. 91
	原子分数	45. 40	54. 07	0. 53
灰色区域	质量分数	13. 31	65. 86	20. 83
	原子分数	40. 68	46. 30	13. 03
白色区域	质量分数	12. 72	58. 66	28. 62
	原子分数	39. 67	42. 08	18. 25

图 1.9(a) 所示为 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25(\text{Ni} 20\text{Cr})$ 涂层任意区域的电子显微照片以及电子衍射图和能谱图^[9]。从中可见微粒整齐排列,大小为 $40 \sim 80\mu\text{m}$ 。选定区域的衍射(SAD)图案代表细小微粒。能谱图和衍射图皆证实显微照片显示的是含 Cr_3C_2 相的深色区域。选定区域衍射图案表明存在某种非晶化趋势,这与从

X 射线衍射图中所观察到的相一致。图 1.9(b) 所示为亮场透射电镜图及另一区域的电子衍射图和能谱图。衍射图和能谱图证实含有面心立方 (FCC) NiCr 和正交 Cr_3C_2 相。图 1.9(c) 所示为透射电子显微明场图像, 对应另一区域的电子衍射图。这个区域的粒子非常精细, 约为 $25\mu\text{m}$, 可明显看出结晶。根据图 1.9(c), 可以得出该区域主要包含 FCC NiCr 结构的结论。这一发现与 He 和 Lavernia^[10] 的记录相一致, 他们发现了 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$ 涂层的 NiCr 结晶基质。不同的是, Guilemany 和 Calero^[11] 在超声速火焰喷涂常规 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$ 涂层中观察到非晶质相。灰色区里的一些区域表明除纳米结晶区外还有一个非结晶区。这个区域有可能在喷涂过程中发生了熔解, 而随后的迅速凝固便导致了这种非晶化结果。图 1.9(d) 是该区域的典型透射电子显微照片。图中可见完全的非结晶区和包含小块晶体及非结晶相混合物的区域之间有一个过渡区域。因此, 制得的涂层包括 3 个不同的区域, 其中包含不同量的正交 Cr_3C_2 相和 FCC NiCr 相。

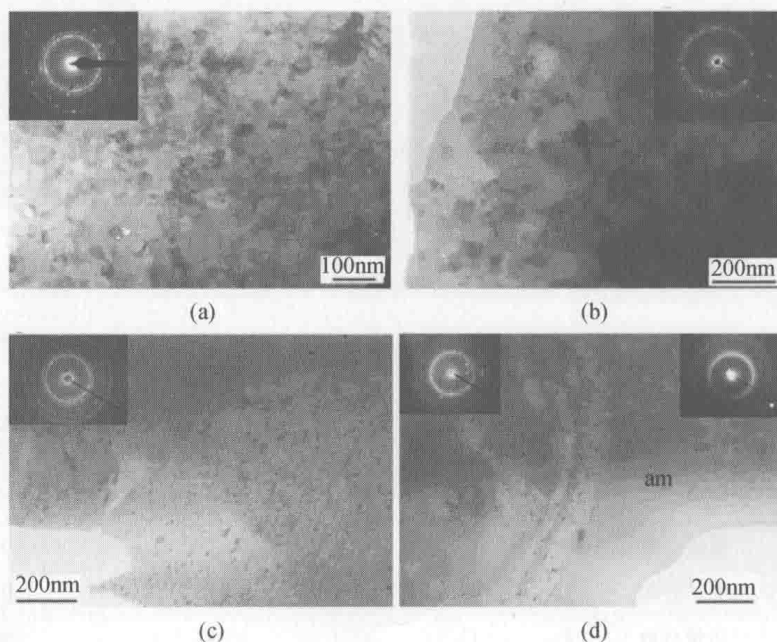


图 1.9 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25(\text{Ni}20\text{Cr})$ 涂层任意区域的透射电镜图

(a) 含 Cr_3C_2 相; (b) 含有 FCC NiCr 和正交 Cr_3C_2 相;

(c) 含 FCC NiCr 结构; (d) 含小块晶体及非结晶相混合物的过渡区域。

图 1.10 所示为是 WC - 12% Co 粉、爆炸喷涂 WC - 12% Co 涂层、WC - 17% Co 粉及爆炸喷涂 WC - 17% Co 涂层的 X 射线衍射图。两种成分的粉末都呈现出 WC 和 Co 相。然而, 一经喷涂纯 Co 就不复存在。爆炸喷涂导致部分结晶失败。喷粉的主要成分是 WC 和 Co, 而涂层主要包含 W_2C 和 $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ 外加 WC 和