

金属表面工艺

张继世 刘江 编



机械工业出版社

金属表面工艺

张继世 刘江 编

机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书主要涉及能够改变金属表面或表层的物理、化学、力学等性能和改变金属表面状态的一系列工艺方法,重点讨论表面强化方法,表面防腐方法,表面装饰加工技术。

本书是以防止零件及工模具常见的表面失效所采用的各种表面工艺方法为主要内容,着重介绍提高零件及工模具的内在质量、外在质量和延长使用寿命的一些具有实际应用价值的表面加工方法。以从事机械行业中工程技术人员专业需要为度,对各工艺原理作简要叙述,对各表面工艺方法前后工艺过程的联系及各工艺方法所产生的表面或表层的性质、应用作较详细的讨论。

图书在版编目(CIP)数据

金属表面工艺/张继世,刘江编. —北京:机械工业出版社,1995
ISBN 7-111-04472-X

I. 金…
II. ①张… ②刘…
III. 金属表面保护
IV. TG17

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第12368号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:汪小星 版式设计:王 颖 责任校对:肖新民
封面设计:方 芬 责任印制:路 琳
机械工业出版社 印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年6月第1版·1995年6月第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·7印张·168千字
0 001—3500 册
定价:9.50 元

前 言

随着现代工业、科学技术的迅猛发展,机械零件及工模具的表面强化、表面防腐蚀及表面装饰加工技术日益显示其重要作用,并已发展成为一门综合性、应用性、实践性很强的表面工艺技术的专门学科——“表面工艺学”。

表面工艺学名称是从英文“surface technology”翻译过来的。表面工艺学按字面含义将涉及到工件表面加工的许多工艺方法。但本书只涉及那些能够改变表面或表层的物理、化学、力学等性能和改变表面状态的一系列工艺方法,重点讨论表面强化方法、表面防腐蚀方法、表面装饰加工技术等方面的表面工艺方法。

本书是以防止零件及工模具常见的表面失效所采用的各种表面工艺方法为主要内容,着重介绍提高零件及工模具的内在质量、外观质量和延长使用寿命的一些具有实际应用价值的表面加工方法。以从事机械行业中工程技术人员专业需要为度,对各工艺原理作简要叙述,对各表面工艺方法前后工艺过程的联系及各工艺方法所产生的表面或表层的性质、应用作较详细的讨论。

本书可作为高等工业学校机械专业的大专生、本科生的教学用书,也可作为机械工程的技术人员的参考用书。

本书由华北航天工业学院副教授张继世编写前言、第一、五~十章,刘江讲师编写第二~四章。国家教委高等专科基础教材编审委员会成员、上海高等机械专科学校副教授王运炎任主审。本书在编写过程中曾受到中国机械工程学会理事长陆燕逊同志的指导、机电部科技司司长朱森弟同志的大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,缺点与错误在所难免,热诚希望读者批评指正。

编 者

1994年5月

目 录

第一章 概论	1	第四节 表面复合强化方法	60
第一节 金属表面	1	第五节 用于模具的主要表面强化技术 综述	61
第二节 金属表面失效	2	第七章 金属的腐蚀与防护概论	65
第三节 金属表面的优化处理技术	5	第一节 金属的腐蚀与分类	65
第二章 金属的热喷涂	7	第二节 在各种条件下的腐蚀	69
第一节 热喷涂的原理与设备	7	第三节 防护方法	71
第二节 喷涂材料	10	第八章 电镀与化学镀	75
第三节 涂层性质	12	第一节 电镀的基本知识	75
第四节 热喷涂工艺	13	第二节 电镀金属	80
第五节 涂层设计	14	第三节 化学镀	82
第六节 热喷涂应用实例	16	第四节 金属的化学保护层	84
第三章 气相沉积	18	第五节 镀层性质与试验方法	87
第一节 化学气相沉积	18	第九章 涂料保护层	89
第二节 物理气相沉积	26	第一节 有机化合物的基本概念、术语 和名称	89
第四章 表面冶金强化	33	第二节 涂料的组成	91
第一节 堆焊与喷焊	33	第三节 涂料的成膜	92
第二节 熔结与重熔	37	第四节 主要涂料品种简介	92
第三节 激光表面快速熔凝处理	38	第五节 涂层系统	95
第四节 电火花表面强化	39	第六节 漆膜质量	98
第五章 金属表面化学热处理	45	第七节 涂料的基本名称、编号与分类	98
第一节 概述	45	第十章 表面装饰加工	101
第二节 渗硼	45	第一节 镜面抛光	101
第三节 渗金属	47	第二节 金属的着色	102
第四节 渗其它元素的化学热处理	52	第三节 光亮装饰镀	104
第六章 其它表面强化方法简介	54	第四节 美术装饰漆膜	107
第一节 表面形变强化方法	54		
第二节 表面相变强化方法	55		
第三节 金属表面的非晶化强化	58		

第一章 概 论

第一节 金 属 表 面

金属零件表面是直接与外界环境接触，并在各种应力作用下发生物理、化学现象的区域。各种影响性能的加工方法都是通过零件表面而起作用的，因而，研究金属表面的组织、结构、成分、性能以及如何改变它们，有着非常重要的实际意义。

一、金属的界面与表面

1. 金属的界面 金属的界面是指金属中具有不同成分、结构或虽然成分结构相同但晶体位向不同的交界面。常见的界面有表面（外界面）、晶界、相界等。

2. 金属的表面 金属的表面是指金属与周围介质之间的过渡区。常见的表面有：

（1）纯净表面 晶体的三维结构与真空空间的过渡层，厚度约 $0.5\sim 2\text{nm}$ 。

（2）清洁表面 表面仅存有气体和洗涤残留物的吸附层。

（3）极表面 是指单原子层或分子层。

（4）污染表面 表面有各种吸附层、化合物层等。

把污染表面变成纯净、清洁表面的过程称为表面净化。常用的方法有离子溅射法、真空处理法等。

3. 金属表面的能量 由于金属晶体表面状态与内部原子排列存在明显差异，因此，金属晶体表面自由能及表面张力与晶体内部不同，表面能量较高，导致性能发生变化。

4. 金属表面的组织结构

（1）金属表面的形貌特征 即使经过精密加工的光滑表面，在微观上也是处于微小的凸凹和谷峰组成的不平表面状态。在机械行业中一般用表面粗糙度与波度来表征微观的几何形状尺寸特征。

（2）机械加工后的表层组织具有特殊的结构，如图1所示。

经过研磨抛光后的表面，最外层形成厚度为 $1\sim 100\mu\text{m}$ 的非晶体结构的微晶层（trilry层）。次层为塑性变形层，其厚度可达 $1\sim 10\mu\text{m}$ 。在近次层也可能产生其它变质层，如双晶、相变、再结晶层等。

5. 金属表面的晶体结构 金属表面的实际晶体结构由于表面原子重构、偏析、吸附层、化学层、缺陷等的存在，造成晶体结构发生变化。

二、金属的表面现象及表面反应

1. 金属的表面现象 金属的表面现象是指金属物体表面上产生的各种物理化学现象，如吸附、湿润、粘着等都是表面现象。由于金属表面现象的存在，就必然会发生各种表面反应，反应经常发生在界面或透过界面进入内部进行的。其基本过程是：

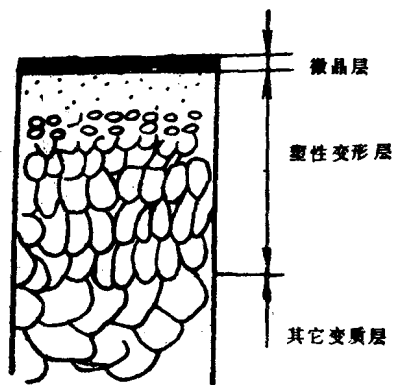


图1 金属表层组织示意图

反应物质扩散到界面上→界面上产生吸附作用→界面反应→反应物离开界面或反应物通过界面向金属内部扩散。

2. 金属表面的钝化与活化 钝化是指金属表面与某种介质发生作用,引起金属表面的腐蚀速度迅速降低的现象,其所处的状态称为钝化。

活化是与金属表面钝化相反的过程,即能消除金属表面的钝化状态,提高金属表面的化学活性过程称活化。

第二节 金属表面失效

机械零件或工模具由于某种原因而丧失原定功能的现象称为失效,失效可分为断裂失效、变形失效、表面失效三种类型。在机械行业中,许多零件或工模具常常从表面损伤开始,然后扩展成为整个零件或工模具的失效。常见的表面失效形式有磨损失效、疲劳失效、腐蚀失效三种。

一、磨损失效

磨损是指两个相对运动的相互接触的物体,由于摩擦作用使两个物体的表面层物质不断损耗或产生残余变形的现象。磨损破坏是一种可以观察到的、渐发性破坏形式。

1. 磨损过程 磨损过程是一个比较复杂的过程,它与摩擦副的材料、表面状态、相对运动速度、载荷性质与大小等均有密切关系。一般说,摩擦必然带来磨损。在摩擦力、热的作用下,磨损过程通常分为下列三个阶段构成,如图2所示。

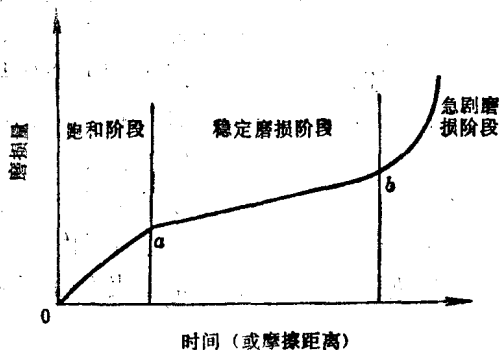


图2 典型的磨损过程

oa阶段称为跑和阶段,此阶段的特点是磨损量随时间增加而加大,磨损速度较快。ab阶段称为稳定磨损阶段。此阶段的特点是磨损量与时间成正比关系。b点以后阶段为急剧磨损阶段。这是由于摩擦产生的接触表面的温度、组织发生变化,引起磨损速度加快。此时,机件会出现大的振动噪声,机械效率降低,精度下降甚至遭到破坏。

2. 常见的磨损种类 常见的磨损种类很多,如磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损等等。

(1) 磨粒磨损 磨粒磨损是由于两个相对运动的物体接触时,滑动表面高低不平,凸出的硬质点将较软的接触面刨出沟槽或划伤而产生的损坏。在所有磨损总量中的50%是属于

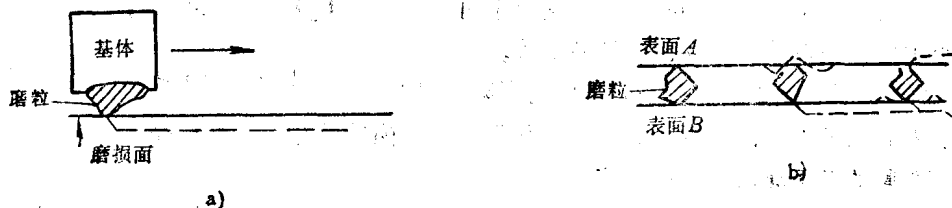


图3 磨粒磨损形式

a) 磨粒磨损第一种形式 b) 磨粒磨损第二种形式

这种磨损形式，是主要的磨损类型。在机械行业中，常见的有两种类型磨粒磨损。第一种是与切削、磨削加工类似的磨粒磨损见图3 a。第二种是具有高强度、高硬度的颗粒进入两个接触面之间犁出沟槽，见图3 b。

(2) 粘着磨损 粘着磨损是指在两个相对运动的物体直接接触中，由于接触应力很高而引起塑性变形，导致物体的接触部位温度升高，并发生粘着、焊合现象而产生的磨损称粘着磨损，见图4。

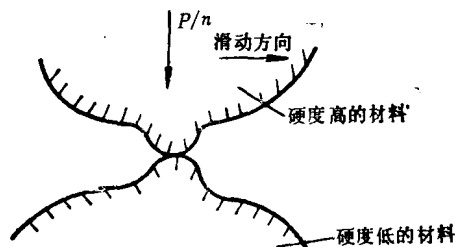


图4 粘着磨损模型

图中硬度高的材料凸起部位与硬度低的材料的凸起部位接触时，由于接触应力很大，导致硬度低的物体接触部位产生塑性变形和温度升高，从而形成了粘着点。此粘着点在切应力作用下产生变形，使金属从硬度低的物体粘附到较硬物体凸起部位。即发生了粘着→剪切→再粘着→再剪切的循环，于是就产生了粘着磨损。

(3) 疲劳磨损 金属在接触表面，在应力反复长期作用下，其表面或表面层的薄弱环节萌生疲劳裂纹，并逐步扩展，最后导致小片金属剥落的现象称为疲劳磨损。疲劳磨损可分为两类：

第一类属于非扩展性疲劳磨损。在刚开始时，由于接触点很小，单位面积上的压力增大，可能产生痘状剥落即麻点剥落。随着接触面积的扩大，单位面积上的压力降低，小麻点可能停止扩大。一般对于塑性好的金属表面，由于加工硬化等原因致使小麻点不能扩展。

第二类属于扩展性疲劳磨损。由于接触面上的麻点在应力作用下继续扩展，发展成为剥落坑而失效。

(4) 腐蚀疲劳磨损 金属在腐蚀环境中产生的一种磨损。材料的摩擦表面同时产生腐蚀和磨损两个过程，其危害性很大。

二、疲劳失效

承受重复应力或交变应力作用下的金属材料，尽管应力值远小于其屈服强度，但也会发生突然断裂。这种现象称为疲劳失效。

1. 疲劳应力 应力大小及方向随时间而改变的应力称为疲劳应力。其应力幅值不变的称为等幅疲劳应力。其应力幅值可变的称为变幅疲劳应力。

2. 疲劳的分类 疲劳的分类方法很多。按疲劳断裂前应力循环周次多少，可分为以下两类：

(1) 高周疲劳 即在低于屈服强度的疲劳应力作用下发生的疲劳断裂。在破坏前经历的循环周次 $N_f > 10^4 \sim 10^5$ ，其寿命的主要控制因素是应力幅值的大小。高周疲劳也称为应力疲劳。

(2) 低周疲劳 即承受的最大疲劳应力接近或高于材料的屈服强度，每一循环有少量变形，断裂前经历的循环周次少， $N_f < 10^4 \sim 10^5$ 就会出现疲劳断裂。其寿命的主要控制因素是应变幅值的大小。低周疲劳寿命主要取决于材料的塑性，在满足强度的前提下应选用塑性较高的材料，而高周疲劳则相反。

3. 疲劳裂纹的萌生与扩展 材料的疲劳破坏过程大概可以分为裂纹的萌生、裂纹的扩展

和断裂三个阶段。材料的疲劳寿命主要取决于前两个阶段。

(1) 裂纹的萌生 裂纹的策源地(裂纹源)一般产生在晶界、相界以及材料中缺陷等部位。从微观上看,一般认为当显微裂纹的尺寸达到 $1 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-2} \text{mm}$ 时,被认为是裂纹的萌生阶段。但工程上常用裂纹尺寸达到 $0.05 \sim 0.08 \text{mm}$ 时就可认为是裂纹的萌生阶段。这个阶段的寿命约占总寿命的 $10\% \sim 80\%$ 不等。

(2) 裂纹的扩展 产生的裂纹在交变应力作用下是否扩展?扩展的速度是快还是慢?是决定材料疲劳寿命的关键阶段,疲劳裂纹的扩展过程可分为如图5所示的两个阶段。

裂纹扩展的第Ⅰ阶段,其扩展方向与最大应力成 45° 角。显然,第Ⅰ阶段扩展主要受剪切应力的作用,称剪切型开裂。裂纹扩展的第Ⅱ阶段,其扩展方向与外部拉应力方向相垂直,称张开型开裂。

第Ⅰ阶段疲劳裂纹的扩展速率很慢且扩展的距离很短,其断口微观特征依材料不同而有区别。而第Ⅱ阶段疲劳裂纹扩展的断口微观特征是疲劳辉纹的存在,它是由一条条平行的条纹组成。一般来说,铝合金疲劳断口上的疲劳辉纹明显,而灰铸铁、铸钢及高强度钢在疲劳断裂时,这种疲劳辉纹不明显。

疲劳辉纹有塑性辉纹、脆性辉纹等几种。塑性辉纹主要以韧性方式扩展,每一次载荷循环使裂纹尖端的周围发生强烈的塑性变形,在电子显微镜下可以看到疲劳断口上的条带。而脆性辉纹主要特点在于它的扩展不是塑性变形而是解理断裂,在断口上呈现河流花样。

疲劳辉纹是用来判断断裂是否是由于疲劳造成的重要的微观特征之一,可依据辉纹间距来近似估计断裂前的应力循环次数。

4. 影响疲劳极限的因素 影响疲劳极限的因素很多,归纳起来,有以下几个方面:

(1) 工作条件

1) 工作应力的频率 当交变应力的频率高于 170次/s 时,随着频率的增加,疲劳极限也增加,当频率在 $50 \sim 170 \text{次/s}$ 范围内时,可认为频率对疲劳极限影响不大。当频率低于 1次/s 时,疲劳极限降低。

2) 使用温度 一般说,使用温度升高,疲劳极限下降。

3) 介质 若所处环境为腐蚀介质,则使疲劳极限下降。

(2) 表面状态及尺寸效应 从疲劳断裂的过程可以看出,疲劳裂纹常常产生在表面上,因此,零件的表面状态对疲劳影响很大。表面加工质量、表面粗糙度、表面损伤都会影响疲劳极限值。同时由实验证实,随着尺寸增大疲劳极限下降。

(3) 材料的本质 材料的成分、组织、缺陷等对疲劳极限有影响。钢中的含碳量增加,通过其增加钢的硬度而提高疲劳极限。但硬度过高使疲劳极限下降。合金元素的影响是通过提高淬透性来提高疲劳极限的。

钢中的不同组织类型有不同的疲劳极限。而晶粒愈细小,疲劳极限愈高。

组织缺陷、夹杂物、第二相质点往往是裂纹萌生发源地,因此使疲劳极限降低。

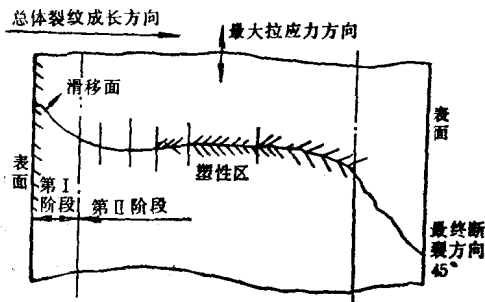


图5 形变铝合金疲劳断口裂纹扩展说明图

(4) 残余应力 实践证明,零件表层的残余压应力对疲劳极限有明显的提高,而残余拉应力正相反。

三、腐蚀失效

1. 金属腐蚀 金属的腐蚀是指金属表面与周围介质发生化学与电化学反应而遭到破坏的腐蚀。

2. 金属腐蚀的分类

(1) 化学腐蚀 金属表面仅与介质发生化学作用而引起的破坏,如气体腐蚀、非电解液中的腐蚀等。

(2) 电化学腐蚀 金属表面与介质产生电化学反应,形成腐蚀电池,使阳极物质受到破坏从而产生腐蚀。

金属表面在一定条件下除了能产生上述的腐蚀以外,还能在其它条件共同作用时产生破坏现象。如在应力与腐蚀环境共同作用下产生的应力腐蚀,在疲劳应力与腐蚀环境作用下的腐蚀疲劳,以及在腐蚀与磨损作用下的腐蚀磨损等。这些均会造成金属表面腐蚀失效。

第三节 金属表面的优化处理技术

在工模具和零件的各种失效中,表面损伤失效约占全部失效总数的80%以上。也就是说,大多数工模具与零件的破坏是从表面或表面层开始的。其主要原因是材料的表面性能不高或表面存在缺陷所致。为了提高材料的使用寿命,应根据其服役条件和主要失效形式,在生产中对材料表面进行优化处理。

一、金属表面优化处理技术的途径

1. 金属表面强化处理 金属表面的强化处理技术是表面优化处理技术的一个非常重要领域。金属表面可以通过其表层的相变、改变表层的化学成分、改变表层的应力状态以及提高表层的冶金质量等途径来改变其性能,从而达到强化表面的目的。目前生产中常用的表面强化方法有以下几种:

(1) 金属表面的覆盖层强化法 金属表面覆盖层强化是使金属表面获得特殊性能的覆盖层(如气相沉积层、喷涂层、镀覆层等),以达到提高强度、耐磨、耐蚀、耐疲劳等目的。它们与基体金属相比都具有明显的物理、化学、力学性能。

(2) 金属表面化学热处理强化法 金属表面化学热处理强化是通过改变材料表层的化学成分,形成单相或多相的扩散层、化合物层来强化表面。如渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗、渗硼等工艺方法使表层获得高强度、高硬度或改变使用性能。

(3) 金属表面形变强化法 金属表面的形变强化法是通过喷丸、滚压、内孔挤压等手段,使金属表层产生形变硬化层,从而产生较高的疲劳强度的工艺方法。

(4) 金属表面相变强化法 金属表面的相变强化是通过相变改变表层的组织结构来强化金属表面的工艺方法。生产中常用火焰表面淬火,感应加热表面淬火等方法使表层获得马氏体组织,从而强化表层。近年来又发展了高能量密度的表面强化方法,如电火花、激光、太阳能等表面淬火方法。

(5) 金属表面复合处理强化法 金属表面复合处理强化法是将两种以上的表面强化工艺复合用于同一工件上,在性能上可以发挥各自优点的处理方法。如渗氮后进行高频感应表

面淬火、镀覆后进行热扩散等。

2. 金属表面防腐处理法 如果改变介质条件,设法避免产生腐蚀的条件,就有可能找到防止金属腐蚀的处理方法。这些方法有以下几个方面:

(1) 正确地选择对某种介质具有耐蚀性的材料和合理设计耐腐蚀的金属结构。

(2) 合理地使用缓蚀剂,降低腐蚀速度。

(3) 采用电化学方法如阴极保护法、阳极保护法等防止腐蚀。

(4) 覆盖层保护法,在金属表面施以覆盖层是防止腐蚀的最重要、最普遍的方法,在工业生产中应用十分广泛。

3. 金属表面装饰加工法 金属表面装饰加工法是指通过表面抛光、表面着色、光亮电镀层和美术装饰漆膜等方法,使零件表面获得光滑如镜、各种美丽色彩的装饰表面,使零件表面不仅具有装饰性,而且也是提高金属零件表面的物理化学性能的一种有效方法。

第二章 金属的热喷涂

第一节 热喷涂的原理与设备

一、简介

1. 热喷涂的原理 热喷涂是一项极其重要的工程材料表面处理工艺。热喷涂的基本原理是将涂层材料加热熔化，以高速气流将其雾化成极细的颗粒，并以很高的速度喷射到事先准备好的工件表面上，形成涂层。对被处理工件的形状、尺寸、材料等原则上没有限制（尺寸过小及小孔内壁的热喷涂工艺上还有困难）。无论是金属、合金，还是陶瓷、玻璃、水泥、石膏、塑料、木材，甚至纸张都是适用的基体材料。涂层材料也是多样的，金属、合金、陶瓷、复合材料都可选用。根据需要选用不同的涂层材料，可以获得耐磨损、耐腐蚀、抗氧化、耐热等方面的一种或数种性能，也可以获得其它特殊性能的涂层。这些涂层能够满足各种尖端科学的特殊需要，也能使普通材料制成的零件获得特殊的表面性能，从而成倍地提高零件的使用寿命，或使报废零件获得再生。

2. 热喷涂分类 根据所用的热源不同，热喷涂方法可分为四类：一为火焰喷涂，其有效温度范围为 3000°C 以下，粉粒速度最高可达 $150\sim 200\text{m/s}$ ；二为电弧喷涂，有效温度可达 5000°C ，粉粒速度为 $150\sim 200\text{m/s}$ ；三为等离子喷涂，有效温度高达 16000°C ，能熔化目前已知的所有工程材料，粉粒速度高达 $300\sim 350\text{m/s}$ ；四为爆炸喷涂，有效温度并不高，约为 $3000\sim 3500^{\circ}\text{C}$ ，但粉粒速度却可达 $700\sim 800\text{m/s}$ 。若按照喷涂材料的形状可分为：粉末喷涂、金属丝喷涂、金属带喷涂和熔罐喷涂。熔罐喷涂法是将涂层金属放入坩埚内加热熔化后输入喷枪，利用压缩空气把它雾化并喷射到工件表面上。此法仅适用于低熔点金属。目前最广泛使用的是粉末喷涂，其次是金属丝喷涂。

3. 热喷涂设备 热喷涂设备是热喷涂技术的核心，在很大程度上决定涂层的质量、应用范围、生产效率和成本。热喷涂技术能否推广普及，可以说是取决于能否提供使用可靠、功能齐全、操作简便、维护容易、价格便宜的设备。

二、火焰喷涂

火焰喷涂是利用气体燃烧火焰的高温将喷涂材料熔化，并用压缩空气流将它喷射到工件表面上形成涂层的方法。喷涂材料可以用金属丝，也可以用粉末。粉末气体火焰喷涂可以获得结合力较高的涂层，可喷涂的材料也较广，而设备简单便宜，操作方便，容易推广。气体燃烧火焰采用氧气作助燃剂，可燃

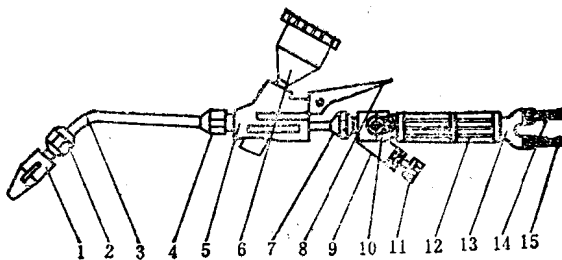


图6 中、小型喷枪典型结构

1—喷嘴 2—喷嘴接头 3—混合气管 4—混合气管接头 5—粉阀体 6—粉斗 7—气接头螺母 8—粉阀开关 9—中部主体 10—乙炔开关阀 11—氧气开关阀 12—手柄 13—后部接体 14—乙炔接头 15—氧气接头

气体最常用的是乙炔气，也可以用氢气、城市煤气、工业煤气、丙烷和丁烷。下面重点介绍氧乙炔火焰粉末喷涂枪。

中小型喷枪的结构基本上是在气焊枪上加一套供粉装置，其典型结构如图6所示。当送粉阀不开启时，其作用与普通的气焊枪相同，可作喷粉前的预热，当火焰将工件预热到一定程度，随即按下送粉阀，粉末就在氧气的抽吸作用下进入枪体，并随混合气一起由喷嘴喷出。粉末喷出后被氧—乙炔火焰加热到塑性状态，同时被加速，以高速冲向工件表面而形成喷涂层。

大型喷枪内另外设置了送粉气路，由氧气送粉，仍从喷嘴喷出。为了操作方便，这类枪多做成手枪型，其典型结构如图7所示。

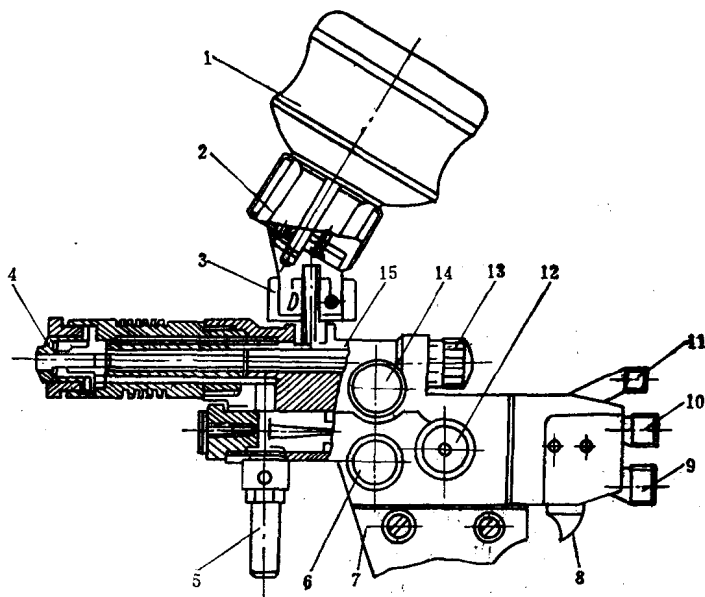


图7 一种大型喷枪的外形图

- 1—粉斗 2—粉斗座 3—锁紧环 4—喷嘴 5—支柱 6—乙炔阀 7—手柄
8—气体快速关闭阀 9—乙炔进口 10—氧气进口 11—附加送粉气体进口
12—氧气阀 13—粉末流量控制柄 14—送粉气体控制阀 15—主体

火焰粉末喷涂枪主要由两大部分组成：火焰燃烧系统和粉末供给系统。对火焰燃烧系统的要求是保证火焰燃烧稳定、工作效率大、可调节、且不易回火。对粉末供给系统的要求是抽吸粉末能力强、吸粉量大、送粉装置开关灵活可靠，送粉量能均匀调节。对于手持式喷涂枪，还要求重量轻，使用操作方便。

三、电弧喷涂

喷涂材料为金属丝，用电弧发出的热量将金属丝熔化。电弧电源可用直流，也可用交流，以直流效果较佳。金属丝熔点高时，需要较高的电压。压缩空气是输送金属丝的动力，又是将熔化金属雾化并喷射到工件上的动力。压力通常为 $0.49\sim 0.686\text{ MPa}$ 。图8为电喷涂设备简图。从图中看出喷枪中的两金属丝4分别接电源两极，彼此绝缘，另一端能接触，以产生电弧而熔化。压缩空气经过空气过滤器送入喷枪内，与金属丝等速向前推进至喷枪。当2、3电源系统通电后，两金属不断产生电弧而熔化。压缩空气将熔化金属雾化并喷射到工件上，得到涂层。

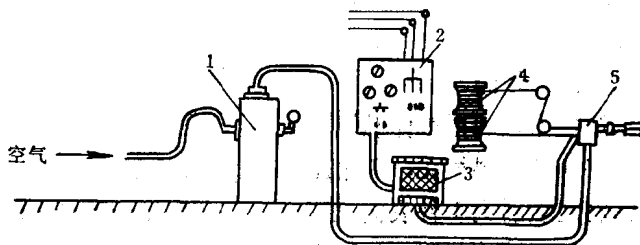


图8 电喷涂设备简图

- 1—空气过滤器 2—配电板 3—变压器 4—金属丝卷 5—电喷枪

电喷涂枪的优点是构造简单,操作灵活,喷涂材料的利用率高,材料价格低,气源单一,总的处理成本低。缺点是喷涂材料局限于能制成丝的金属和合金材料。另外,金属丝穿孔易磨损;金属丝往往由于接触不良而打火,甚至焊住;金属丝导孔内锈皮等脏物易卡住而不能顺利送丝。

四、等离子喷涂

等离子喷涂技术是50年代末开发的一项热喷涂新工艺。它是利用等离子弧作热源、熔化粉末喷涂材料并喷射到工件表面上而获得一层具有特殊性能的表面涂层。

在喷涂领域里,等离子喷涂技术明显的优于氧—乙炔或氢氧焰喷涂工艺,其主要优点是:温度高,当使用惰性气体时,能防止在喷涂中材料的氧化;等离子喷涂速度比普通的火焰喷涂为高,因此被喷涂的粉末质点能获得较高的速度。等离子喷枪结构如图9所示:

进行等离子喷涂时,一般采用两种方法来防止材料的氧化。一是在净化过的真空惰性气氛室里进行喷涂。二是使用如图10所示的特别设计的保护性喷嘴,以挡住周围空气,保护等离子喷射的火焰。在实际应用中后者为好。

等离子喷射火焰温度越高,越均匀,喷射速度越快,则喷涂的粉末与基体的粘附力越强,结合力越好。由于等离子弧可以达到理想的高温,能瞬间熔化任何材料的粉末,因此可喷涂的材料不受熔点限制,可以喷涂各种金属及其合金、金属陶瓷、陶瓷、自熔性材料以及复合材料等,用途十分广泛。

五、爆炸喷涂

爆炸喷涂是美国联合碳化物公司林德分公司的专利,其工作原理如图11所示。把经严格定量的氧气和乙炔气送入水冷式喷枪(喷枪内径25.4mm,枪口对准工件),然后从另一入口以氮气为载气将喷涂粉末(如 $44\mu\text{m}$ 的碳化钨粉末)送入,当粉末在燃烧室浮游时,火花塞点火,使氧—乙炔混合气发生爆炸,产生的热和压力波将粉末加热并以极高的速度喷射到工件表面上。一次可形成大约 $6\mu\text{m}$ 厚的涂层。爆炸气体喷出的速度接近 3000m/s ,从而使粉末的速度达 700m/s 以上。例如在距喷枪口75cm可达 820m/s ,此处产生的冲击热可使粉末的温度升到 4000°C 。在爆炸后瞬间,输入氮气使燃烧气体排出枪身。全部过程在极短的时间内

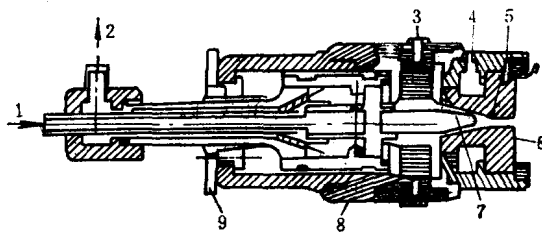


图9 等离子喷枪

1—进口 2—冷却水出口 3—氩气入口 4—冷却水入口
5—送粉 6—铜阳极 7—钨阴极 8—绝缘体
9—电极调节

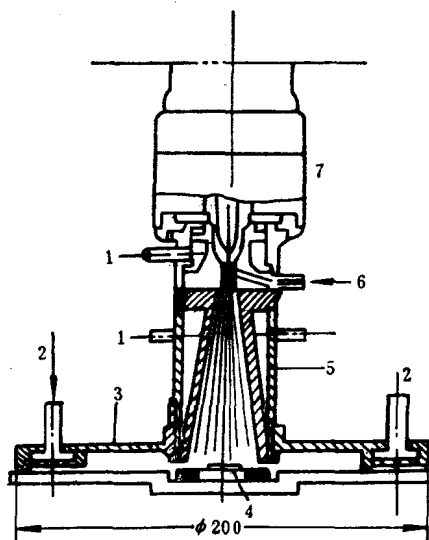


图10 保护性喷嘴和保护盖

1—冷却水 2—氩气入口 3—保护盖 4—试样
5—保护性喷嘴 6—供粉 7—喷枪

完成。

爆炸喷涂与火焰喷涂、等离子喷涂相比,其主要特点是微粒喷射速度极高,而随着喷射速度增高,涂层气孔率下降,结合力增强,故爆炸喷涂的涂层虽是机械性的结合,但其结合力比其它喷涂都高,而气孔率都要低。其次,爆炸喷涂时工件的温度处在 200°C 以下,因此几乎不发生热变形和内部组织结构的变化。爆炸喷涂不足之处是噪声很大(140dB),因此要在隔音室内工作,通过观察口监视操作,使设备造价很高。

爆炸喷涂已推广应用于我国航空工业中许多零件的生产与维修,如三叉戟发动机轴、伊尔—18万向液压接头、导弹挂勾、火箭滑轨、涡轮轴、叶片根部等。

六、各种热喷涂方法比较

表2-1 主要喷涂方法比较

项目	方法	火焰喷涂 (氧—乙炔火焰)	电 喷 涂	等离子喷涂	爆炸喷涂
喷涂材料		金属丝及各种粉末 (熔点 $<2700^{\circ}\text{C}$)	金属 合金丝	各种粉末	各种粉末 (无熔点限制)
工件材质		金属和陶瓷	金属和陶瓷	金属和陶瓷	金属和陶瓷
微粒温度① ($^{\circ}\text{C}$)		800~2500		~3000	4000
微粒速度① (m/s)		50~270	100~220	140~750	800
工件温度 ($^{\circ}\text{C}$)		260~320		$<120\sim 200$	<200
涂层结合		机械的	机械的	机械的	机械的(强化)
喷涂件直径 (mm)		>1.5		>0.65	5~1500
涂层厚度 (mm)		$0.13\sim 5.0\pm 0.075$		$0.05\sim 2.5\pm 0.025$	$0.025\sim 0.03\pm 0.025$
表面粗糙度 (μm)		150~300		75~125	125
喷涂热效率 (%)		13	57	12	

① 该项目受喷涂材料的材质和形状、喷涂工艺参数等的影响变化很大。

第二节 喷 涂 材 料

根据喷涂设备的要求不同,喷涂材料的外形有线材(包括棒材)和粉末两大类。

一、喷涂线材

喷涂线材主要是各种金属丝及其合金丝以及复合线材和陶瓷棒材。

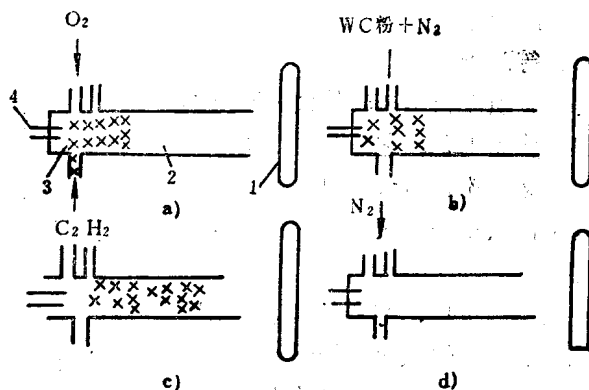


图11 爆炸喷涂原理

1—工件 2—水冷式枪身 3—喷枪燃烧室 4—点火器

金属丝要绕成圈状,丝表面必须光洁、无锈、无油和无折痕。钢丝中的杂质 $S \leq 0.03\%$, $P \leq 0.03\%$ 。硬度要适中,有色金属丝要选用较高硬度的。金属丝的种类、成分和直径应根据喷涂设备和涂层性能的要求并兼顾成本进行选择。通常凡满足上述要求的金属丝都可以采用,也可以采用焊丝。复合型喷涂丝适用于氧—乙炔火焰喷涂。其特点是涂层内氧化物夹杂少,成分均匀,与基体结合力强,容易贮存,喷涂操作简便,对环境污染少。

用粉末材料获得的喷涂层性能优于金属丝,而且材料和性能可以在很大范围内选择,适应性很强。但喷涂粉末的要求较高,生产工艺复杂,价格贵。

二、喷涂用合金粉

喷涂用合金粉可分为结合层用粉和工作层用粉两大类。

1. 结合粉 结合粉喷在基体材料和工作层之间,可使两者的结合强度提高。它是工作层的底层,故又称为打底粉。

结合粉目前多为镍铝复合粉,其特点是每个粉末颗粒中的镍铝都是单独存在的。平时镍和铝不发生反应,喷涂时,当粉末通过火焰受热温度高于 600°C 后,镍和铝之间就会发生强烈的放热化学反应。同时,部分铝还会氧化,产生更多的热量。这两种放热反应在粉末撞击到工件表面后还能进行一段时间,可使粉末与工件接触处瞬时温度达到 900°C 以上。在这种高温下,镍就可以扩散到基体材料中去,从而形成原子扩散结合。

由于制造方法不同,镍铝复合粉可以分为镍包铝和铝包镍两大类。镍包铝粉是较早研制的产品,目前使用较多的镍包铝粉的镍铝重量比为 $80:20$ 或 $90:10$ 。它们用化学冶金方法制取,以铝粉为核心,外层包以镍,铝粉被包复的完整程度应大于 80% 。用氧—乙炔火焰喷涂后,涂层密度为 $5.5 \sim 6.5 \text{ g/cm}^3$,熔点 1535°C ,洛氏硬度 $70 \sim 80 \text{ HRC}$,可在全部普通碳钢、淬火合金钢、不锈钢、氮化钢、铸铁、铸钢、镍、镍铬合金、镍铜合金、镁、铝、钛、铁镍钴合金、钼、铌等材料上进行喷涂,不宜喷涂铜和钨为主要成分的材料。用镍铬合金代替纯镍作粉末芯核,制成铝包镍铬合金的复合粉末,可使涂层具有更好的耐高温性能和抗氧化性能。

2. 工作粉 组成工作层的粉末应有承担服役条件的能力,同时还要能与结合层可靠的结合。作为火焰喷涂常用的工作粉有合金粉、金属包覆粉。常用的国产工作粉可分为镍基、钴基、铁基、铜基四大类。

(1) 钴基合金粉末,钴为基体,添加 Cr 、 W 、 C 等合金元素形成的钴基合金具有耐腐蚀、耐磨损、抗氧化等特点。

(2) 镍基合金粉末,镍为基体,加入 Cr 、 C 、 B 、 Si 等合金元素形成的合金。镍基合金可根据工作条件需要,选择合适的合金元素,配成所需要的镍基合金,使其具有综合力学性质,如耐磨、耐蚀、抗氧化等优点。但由于价格较贵,只能用于关键的而非它不可的零件上。

(3) 铁基合金粉末,以铁为基体,添加 B 、 C 、 Si 、 Cr 、 Ni 等合金元素形成的合金。铁基合金较为便宜,适用于室温下或温度低于 400°C 而腐蚀轻微条件下工作,还能适当满足耐磨性要求。

(4) 铜基合金粉末,是以铜为基体,加入 Sn 、 P 等合金元素形成的合金。这类合金粉末主要用于易加工、摩擦系数小的工件,适用于机床导轨、轴类、柱塞泵转子等耐磨工件,也可用于修复工件。

除了上述四种基本的合金粉末外,还有金属陶瓷粉末、等离子喷涂专用粉末等,可依据要求选用。

第三节 涂 层 性 质

各种喷涂方法的涂层形成过程都是喷涂材料通过高温加热雾化,形成极细颗粒在高速气流作用下向工件表面喷射,最先冲击到工件表面的合金颗粒变形为扁平状,与工件表面凹凸不平处产生机械咬合。随后飞来的合金颗粒打在先到颗粒的表面,也变为扁平状,与先到颗粒之间同样会互相咬合而形成一种机械的结合,逐渐聚积成涂层,这种现象称为“抛锚效果”,因此使涂层具有独特的结构和性质。

一、涂层的结构

涂层是由合金颗粒在工件表面互相挤嵌堆积而成的。其显微结构是大体平行的迭层状组织,疏松多孔,孔隙率高者可达25%。合金粉在飞向工件的路程中,因与空气接触,而会受到氧化和氮化,因此在涂层中还存在氧化物和氮化物。涂层的金相组织中,还可发现夹杂着一些比合金粉的平均直径小得多的球状物,这可能是极细小的粉末在飞到工件表面时受大颗粒的阻碍,未能产生变形而被保留了下来。因此,喷涂层具有迭层状、方向性很高的结构。

基体材料在喷涂过程中受热不多,升温不高,其组织和性能不会发生变化。

涂层还存在一种有规则的应力,外表层为拉应力,内层和基体表面产生压应力。严重时涂层在表面拉应力作用下可以产生裂纹,尤其在喷厚涂层或使用收缩率高的材料时更为明显。

二、涂层的性质

由涂层结构的特点,可以推测其一般性质。

1. 结合强度 因为涂层与基体间靠机械结合,不存在冶金结合,故其结合力是很低的。用一般合金粉喷涂时,涂层与基体材料之间的抗拉结合强度低于20~30MPa,抗剪结合强度低于30~40MPa。为了提高结合强度,可以从改善工件喷前的预处理和使用专门的结合粉两方面着手。在喷前预处理时,对表面进行粗糙处理以加强“抛锚效果”,表面愈粗糙,“抛锚效果”愈好,结合强度也愈高,但工件承受疲劳载荷的能力就相应地下降。使用专门的结合粉可明显地提高结合强度。据测定,使用镍铝复合粉时,结合层与基体材料间的抗拉结合强度约为30~35MPa,抗剪结合强度达140MPa,这样的结合强度可以满足许多工件的要求。

2. 减摩性能 由于涂层的多孔性,可以贮存润滑油。当轴转动时,在孔隙内外形成压力差,迫使润滑油从孔隙中析出,形成包围轴表面的均匀油膜,从而可使磨损减轻。喷涂层孔隙的储油效果对提高减摩性的作用十分显著,但喷涂层在干摩擦条件下往往是不耐磨的。

3. 涂层的抗拉强度 涂层本身的抗拉强度取决于涂层微粒间的结合强度。涂层强度一般比工件强度低很多,因此,它不可能使工件提高强度。不同材质的涂层强度不同。对于同一材质,涂层越致密,杂质和氧化物越少,抗拉强度就越高。有些材质的涂层经过一定的热处理后可提高纯度和致密度,因而提高了强度。

4. 涂层的硬度 涂层的硬度取决于喷涂的材料、喷涂方法和喷涂工艺。除材料外,涂层的结构(微粒大小形态、孔隙数量和多少)和氧化物等都影响涂层硬度。一般情况下,涂层的硬度高于喷涂材料的硬度。高硬度有利于涂层的耐磨性。

5. 韧性与加工性 涂层强度低、硬而脆、韧性很差,而且存在残余应力,机械加工性能差,许多涂层不宜车削,只能磨削。