

# 表面工程在摩擦学方面的应用

刘家浚

(清华大学摩擦学研究所)

表面工程即应用表面技术改善零件表面性能从而提高产品质量的工程。本文概述了表面工程的基本概念和特点,表面技术的内容和分类,及其在摩擦学方面的几种主要应用:固体润滑涂层;超硬涂层;堆焊及热喷涂涂层,表面改性等。通过这些例子,可了解表面工程与摩擦学的关系,及其应用的重要意义。

表面工程的含义很广,它概括了所有“表面处理”、“表面加工”、“表面涂层”、“表面改性”的内容,即利用各种物理的、化学的或机械的过程,使零件表面获得特殊组织结构和性能以提高产品质量的工程。它广泛适用于零件的耐磨、防腐、装饰,用于制造各种功能器件,它有如下特点:

1. 因为材料的磨损和腐蚀都发生在表面,使表面强化而不必整体改善材质,使材料“物尽其用”,或者作成保护层,防止材料的磨损与腐蚀,可显著地节约材料消耗。

2. 可使材料表面层获得作为整体材料很难得到的特殊组织结构,如超细晶粒、非晶态、超饱和固溶体等,其耐磨抗蚀性能远非一般材料可比。

3. 因为表面涂层很薄,涂层用材料很少,为了保证涂层的性能质量,可以无顾虑地采用贵重稀缺元素而不会显著增加成本。

4. 利用表面技术不但可以制造性能优异的零件产品,而且可以用于修复已经磨损或腐蚀失效的零件。

因此,发展表面工程对于提高零件的使用寿命和可靠性,改善机械设备的性能质量,增强产品的竞争能力,解决引进设备零、备件的修复及国产化问题,支持高技术和新技术的发展,以及节约材料,节约能源等都具有重要意义。

表面工程所以受到重视,不仅在于它的经济意义,而且由于它的学术价值。表面工程的出现,有力地促进了材料科学、冶金学、机械学、机械制造工艺学、以及物理学和化学等基础学

科的发展。表面工程中遇到的许多新现象、新问题,难于用传统的概念和理论去解决,因此自然地就形成了新的研究领域。

## 一、表面技术的内容与分类<sup>[1-3]</sup>

表面技术正处于蓬勃发展的阶段,种类繁多,常常从一些基本工艺不断地演变出新的技术,或是出现两种或多种技术的结合而形成某种复合工艺,所以究竟有多少种,很难精确统计。表面技术的分类有很多种分法,本文主要针对摩擦学方面的应用,按工艺过程特点将主要的表面技术分类如下。

### 1. 表面热处理及化学热处理

(1) 表面热处理: 火焰淬火、感应淬火等。

(2) 化学转变涂层: 磷化处理、硫化处理、阳极氧化、氧化处理等。

(3) 扩散处理: 渗碳、氮化、碳氮共渗、渗硼、渗硅、渗金属等。

### 2. 堆焊及热喷涂

(1) 堆焊: 火焰堆焊、电弧堆焊、等离子堆焊、真空熔烧等。

(2) 热喷涂: 火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂等。

### 3. 电镀及电沉积

(1) 电镀: 槽镀、刷镀、电泳、电成型等。

(2) 化学镀。

### 4. 气相沉积

(1) 物理气相沉积: 真空蒸发、离子溅射、离子镀等。

(2) 化学气相沉积。

## 5. 高能密度处理

(1) 激光处理: 激光相变硬化、激光熔凝处理、激光合金化、激光涂敷等。

(2) 电子束处理。

(3) 离子注入。

## 6. 胶粘非金属涂层

### 二、固体润滑涂层的应用<sup>[4]</sup>

为了减少零件的摩擦和磨损,一般的方法是使用润滑油,但是在很多特殊情况(如高真空、超高温、超低温、电磁场、桥梁支承部件等难维修的地方)下,润滑油无法使用,就需要使用固体润滑剂。即使在有油润滑的条件下,采用固体润滑涂层,也能有效地降低摩擦系数,防止磨损和提高零件的承载能力,这方面的效果还远未受到充分的重视,开发的潜力极大。

为了实现固体润滑涂层,有多种方法可以采用。

1. 电镀或刷镀 Pb, Sn, In, Au, Ag (或它们的合金)等软金属镀层。

2. 离子镀或离子溅射软金属、MoS<sub>2</sub> 或它们的复合镀层。

3. 硫化处理,形成 FeS 膜。

4. 磷化处理,形成磷酸盐膜。

5. 氧化处理,形成 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 膜。

在上述各种方法中,刷镀技术是工艺和设备最为简便、适应面广、效果明显、已在我国形成特色的表面技术<sup>[5]</sup>。它的基本原理与一般电镀相同,只是不用镀槽,而是用作为电极并连续供应电镀液的镀笔在工件表面擦拭而获得电镀层。它的主要优点在于:由于电流密度比槽镀大几倍到几十倍,沉积速度提高,镀层结合强度大为改善,而且工装轻便,便于携带,可在现场进行施工。

固体润滑涂层的主要应用对象包括:(1)滑动轴承。为了提高承载能力和延长使用寿命,近代内燃机滑动轴承均已采用疲劳强度较高的铝基和铜基轴承合金,表面电镀 Pb-Sn 或 Pb-Sn-Cu 合金镀层的多层结构。(2)发动机零件如凸轮和挺杆,已普遍采用磷化处理。(3)工模

具如刀具(铣刀、滚刀、钻头、锯片等)、压铸模、塑料模具等,经硫化处理后,使用寿命可提高1—3倍。(4)滚动轴承。用电镀或气相沉积的方法将软金属镀在轴承内外圈滚道和滚珠上,适用于精密与航天轴承<sup>[6]</sup>。

### 三、超硬涂层的应用

为了抵抗材料的粘着磨损和磨粒磨损,需要尽量提高材料的硬度。如在高温条件下工作,更需要具备好的超硬性。但是,常用的强化手段最多使一般钢铁材料达到 HRC65 的硬度。因此,在零件表面涂敷具有极高硬度的陶瓷涂层,是提高耐磨性的一个有效途径,如 TiN 的硬度可达 HV2000, TiC 可达 3200, TiB<sub>2</sub> 可达 3500。

实现超硬涂层的主要方法是化学气相沉积(CVD)和各种物理气相沉积(PVD)。在这些方法中,CVD 技术更为成熟和稳定<sup>[7,8]</sup>。它的主要过程是使镀层材料的化合物气体发生分解和化学反应,并在零件上沉积成膜。利用多种化学反应可以得到不同的金属、非金属及化合物镀层。与 PVD 方法相比,CVD 镀层更为致密,内应力小,结合力强,均匀性好,形状复杂的零件也可得到均匀的镀层。同时,因为设备投资较少,一次装炉量较大,因而成本较低。它的主要缺点是处理温度较高,例如沉积 TiC 涂层,反应温度达到~1000℃,因而零件容易变形;或零件镀后热处理恢复性能方面不及 PVD。但是,近十几年来发展很快的等离子体增强化学气相沉积(PCVD)<sup>[9]</sup>可降低沉积温度。例如, TiC 的沉积温度可降至 550℃, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TaC 和金刚石的沉积温度可降至室温。

超硬涂层的应用,可使零件的寿命显著增加。超硬涂层已广泛用于刀具、工模具及轴承上。例如,高速钢刀具沉积 TiC 后,刀具寿命可增加三倍以上。多种多层复合涂层是八十年代硬质合金刀头沉积超硬涂层的一种新趋向。例如,联邦德国已推销了七层多种复合涂层的刀头,并开发了铝-氧氮化铝新型涂层,以提高切削速度;奥地利和瑞典等国的公司普遍提供四、

五层的复合涂层。最近日本有报道甚至将复合涂层增至15—30层。在冲孔冲头、压铸模、塑料模上镀TiN,可提高寿命五倍以上。有的冲模寿命甚至提高30多倍。此外,在航天轴承上沉积TiC,已使轴承寿命达到十几年以上<sup>[10]</sup>。

#### 四、堆焊及热喷涂涂层的应用

堆焊技术的优点在于堆焊材料范围广,可以实现厚涂层,冶金结合强,可以采用廉价基体材料,可以在现场进行施工等。它广泛用于加固、修复重载工程机械上遭受严重磨料磨损及冲击磨料磨损的零件,例如,冶金、电力部门所用风机,因气体中含有大量矿渣粉末和砂粒,而且温度较高,有时可达300℃,还有腐蚀作用,所以寿命很短。普碳钢寿命只有两个月,改用Ni-Cr奥氏体不锈钢,寿命可提高到五个月,后来在低碳钢上堆焊Ni-Cr-B-Si自熔合金,耐磨性比不锈钢提高了三倍。磨煤机打击板一般用Mn13高锰钢,堆焊Ni基合金+25%WC,寿命提高了五倍。

真空熔烧工艺是一种特殊的堆焊技术,在我国的发展很有特色,效益显著<sup>[11]</sup>。其工艺过程为:利用粘结剂将自熔合金粉末调成糊状,涂敷在零件表面,于低真空下( $10^{-2}$ Torr)进行辐射加热。当温度升到750—900℃时,形成硼硅酸盐玻璃,可溶解基体表面氧化膜。温度继续上升,出现共晶相,借助于液相共晶对固态基体表面溶解、扩散等物理化学反应、迅速冷凝而形成具有可靠冶金结合的涂层。与一般堆焊技术相比,它具有涂层质量好,性能稳定,不受操作人员熟练程度的影响,涂层基本无稀释现象,合金粉可全部回收,无损耗,无环境污染。真空熔烧工艺已在很多零件上得到成功的应用,经济效益十分显著。例如,内燃机排气阀原来的寿命只有1200小时,采用真空熔烧涂层后,寿命达到6000小时。无缝钢管穿孔顶头原来只能穿制合金钢管50支,普碳钢管200支,采用熔烧涂层后,寿命达到合金钢管250支,普碳钢管500支以上,而日本的穿孔顶头寿命不过100多支。

物理

热喷涂与堆焊的基本区别是:只有被喷涂的材料熔化,而基体不熔化,因此这种技术可以适用于用各种材料做成的零件,原则上任何材料都可用于热喷涂,但是高熔点材料需要借助于热源温度更高的等离子或爆炸喷涂方法。热喷涂的主要缺点是其直线过程,即只有与喷涂方向垂直的表面上涂层的密度和结合强度最好,喷涂角度减小,涂层质量就要下降,而且涂层带有一定孔隙度,对抗腐蚀不利。

#### 五、表面改性技术的应用

严格地讲,表面改性是指不靠外加涂层或元素,而是靠外部能源使表面层结构和性能发生改变的表面技术。它包括激光处理、电子束处理、电火花处理、表面热处理等。下面仅介绍一下有代表性的激光处理技术。

激光表面处理包括多种形式,如相变硬化、熔凝处理、合金化、涂敷等,当然后两种处理按前述定义应不算在表面改性之列。激光相变硬化的过程为:一定功率密度、一定能量分布的激光束照射在金属表面时,除去反射掉的部分外,主要是被极薄的表面层吸收并转换成热,使材料表面迅速加热到相变点以上,当激光束离开后,表面层的热量迅速向心部传递,冷却速度可达 $10^4$ — $10^7$ ℃/s,因此可以靠自激冷却使表面层淬火。硬化层通常为0.3—0.5mm。由于加热速度很大,相变是在很大过热程度下进行的,因而形核率很高。由于加热时间短,碳原子的扩散及晶粒长大都受到限制,冷却后可转变成晶粒非常细小的马氏体,其硬度可比常规淬火提高15—20%。这种技术工艺简单,效率很高,变形极小,光洁度不受影响,可在精加工之后进行,处理后的零件可直接装配。

激光表面处理比较普遍的应用是大批量生产的发动机零件,美国已用大功率的激光器在生产线上处理汽缸套内壁和转向器壳体。在我国比较成功的应用实例是邮票打孔器<sup>[12]</sup>。打孔器由针模与孔模组成,为使针与孔能精密配合,辊筒的径向变形不能超过0.05mm,难于进行

(下转第478页)