

# 阴极电弧离子镀膜技术的进步

王福贞

(北京联合大学,北京 100102)

**摘要:**阴极电弧离子镀膜技术是国内外沉积工模具硬质膜层的主要技术。在高新技术产品和高端制造业需求的推动下,阴极电弧离子镀膜技术得到了长足的进步。本文介绍了阴极电弧离子镀膜技术的原理和特点,重点分析了阴极电弧源、硬质膜层性能和工件清洗技术等方面进展,并对未来的发展进行了展望。

**关键词:**阴极电弧离子镀;冷场致弧光放电;硬质膜层;弧光放电氩离子清洗技术

中图分类号:O484

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2020)02-0087-09

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2020.02.001

## Advances in Cathode Arc Ion Plating Technology

WANG Fuzhen

(Beijing Union University, Beijing 100102, China)

**Abstract:** The technology of cathode arc ion plating is the main technology of hard coating for deposition tools. With the development of high-tech products and high-end manufacturing industry, cathode arc ion plating technology has been developed. The principle, characteristics and technical progress of various new cathode arc ion plating technologies are introduced. And the future development is prospected.

**Key words:**cathode arc ion plating;arc discharge of cold field emission;hard coating;argon ion cleaning technology for arc discharge

## 0 引言

阴极电弧离子镀膜技术是由美国 Milti-Arc 公司和 Vac-Tec 公司开发,于 1981 年达到实用化的一种离子镀技术<sup>[1,4]</sup>。

阴极电弧离子镀技术以其金属离化率高、沉积速率高、容易反应沉积获得氮化钛等硬质膜层、沉积温度低、阴极电弧源安装位置多样、镀膜室利用率高等优点,成为在工模具和重要耐磨零件上沉积具有优异性能硬质膜层的主要技术。

随着航空航天、船舶、汽车、通信、微电子等高端制造业的迅猛发展、新材料的不断涌现、对工模具性能要求的不断提高,阴极电弧离子镀技术取得了很大发展。本文重点介绍了阴极电弧离子镀技术在弧源结构、镀膜机配置、膜层性能和工件清洗

方面的进步。

## 1 阴极电弧离子镀原理

该技术原理是利用阴极电弧源产生的冷场致弧光放电,发射高密度的弧光等离子体。在弧光等离子体中有高密度的电子流、金属离子流和金属蒸气流。

### 1.1 冷场致弧光放电

#### (1) 冷场致弧光放电的条件

冷场致弧光放电是从冷态的阴极材料上发射高密度的电子流。材料内部的电子处于稳态,周围离子对其作用可以相互抵消,相当于做自由运动。而处于边界处的电子要飞出阴极表面时会受到离子的吸引力又回到金属中。边界处的电子如果要飞离阴极金属表面,必须有一定的能量克服这个势

收稿日期:2020-01-05

作者简介:王福贞(1935-),女,天津人,教授,主要从事离子镀膜技术科研、教学工作。E-mail: 15600548831@163.com。

引用本文:王福贞. 阴极电弧离子镀膜技术的进步[J]. 真空与低温, 2020, 26(2):89-97.

WANG F Z. Advances in cathode arc ion plating technology[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(2):89-97.

垒。用 $W_0$ 表示电子溢出阴极必须超越的势垒,其大小主要由材料的表面逸出功决定。使阴极表面产生电子发射的方法主要有两种<sup>[1-4]</sup>:一种是将阴极材料加热到高温,使电子的热能超过逸出功。 $W$ 、Mo、Ta等高熔点金属须加热到2 200~2 700 °C才能发射热电子;另一种是使阴极表面堆积大量的离子,形成高的电场强度将电子拉出来,电场强度必须达到 $10^6 \sim 10^8$  V/cm。从电场强度表达式 $E=U/d$ ( $U$ 是两极间电压, $d$ 是两极间距离)可知,形成如此高的电压难度很大,只能设法减小正离子和阴极的距离 $d$ 。通常是在阴极前面形成由正离子堆积的等离子体鞘层来获得足够的电场强度。正离子与阴极的距离必须小于 $10^{-4}$  cm。

### (2) 初始弧光的引燃

在具有很高电场强度的两个电极之间很难自然发生击穿放电,因此在阴极电弧离子镀膜机中设置“引弧针”。阴极靶材接弧电源的负极,引弧针通过 $1\sim 5$  Ω的电阻与弧电源的正极连接。接通弧电源后引弧针与阴极靶面相互接触,形成短路。与此

同时引弧针电源立即切断,引弧针迅速离开靶面。在引弧针脱离阴极的瞬间,靶表面产生初始弧光,等离子体中的正离子堆积在靶面前方形成等离子体鞘层<sup>[1,3-6]</sup>。由于阴极靶面上的凸起部位和正离子堆积层之间的距离最小,电场强度最大,因而优先被击穿,产生冷场致弧光放电。引弧方式主要有高压电场击穿引弧、激光引弧和引弧针电磁驱动引弧,镀膜生产中多用后者。

### 1.2 金属蒸发熔池的形成

由于阴极靶面上的凸起点尺寸很小,所以击穿发射电子的面积很小,约为 $10^{-4}\sim 10^{-6}$  mm<sup>2</sup>。在这样小的面积上通过100 A左右的弧电流,电流密度达到 $10^6\sim 10^7$  A/cm<sup>2</sup>。高密度的电子流将击穿点的金属加热蒸发。蒸发出来的金属流沉积在工件表面形成膜层。击穿点是膜层原子的蒸发熔池。当击穿点处的靶材蒸发、烧蚀成凹形熔池后,电场强度降低,电弧又会在另一个凸起点产生,原来的熔池凝固<sup>[1,3-4]</sup>。图1为冷场致电弧由凸起点产生的示意图。

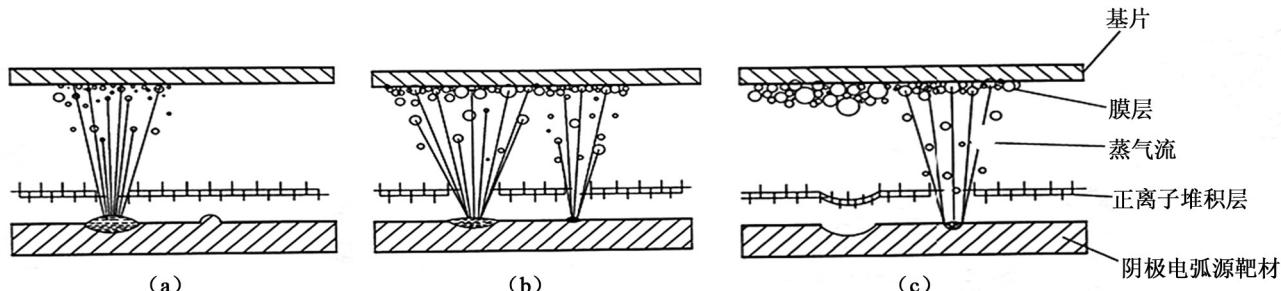


图1 冷场致电弧由凸起点产生的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cold field emission arc generated at the bulge

图1(a)为靶面前形成了由正离子堆积成的等离子体鞘层,首先在表面的凸起位置发生冷场致弧光放电。图1(b)为凸起点开始凹陷,另一个凸起点开始放电。图1(c)中为原来的凸起点熔池凹陷、凝固,另一个凸起点连续放电。靶面上没有固定熔池,宏观上所有的熔池最后都凝固成固态,所以阴极电弧源在镀膜室内可以任意摆放。

### 1.3 金属原子的离化

阴极电弧源既是蒸发源又是离化源,从靶材表面蒸发出来的金属蒸气原子在击穿点附近与阴极发射的高密度电子流激烈碰撞电离,产生由高密度的电子、离子、高能中性蒸气原子组成的高密度等离子体。金属的离化率高达60%~90%,是各种离子镀技术中离化率最高的,离子的能量也很高<sup>[1,3-4]</sup>,

在镀膜过程中容易与反应气体化合生成化合物硬质膜层。而且有助于增强膜层与基材的结合力。

### 1.4 弧斑运动

高密度的电子和离子在击穿点附近复合,产生激烈的复合发光和激发发光。发光强度大,形成刺眼的光芒,称之为“弧斑”<sup>[1,3-6]</sup>。由于冷场致电弧不断地在靶面上最高的凸起点产生,因此弧斑在靶面上不停地移动,这种电弧也被称为“自由弧”。

### 1.5 电磁场控制弧斑的运动

阴极电弧源靶面附近有大量的电子和离子,可以受磁场的控制,在阴极电弧离子镀膜机中多采用电磁场控制弧斑的运动。在靶材后面安装永磁体磁钢或电磁线圈,通过靶面上产生的正交电磁场控制弧斑在表面上的运动。

弧斑在电磁场的作用下,在靶面上做三种运动:(1)受周向力的作用,弧斑在靶面上做周向旋转运动;(2)受径向力的作用,弧斑在靶面上做由小圈到大圈的旋转运动;(3)受轴向推力的作用,电弧沿垂直靶面方向推进。综合起来,阴极电弧源靶面上的弧斑做由小圈到大圈的旋转运动,同时向工件方向发射。图2(a)为圆形弧源弧斑的形貌<sup>[1,3-6]</sup>,图2(b)为矩形平面大弧源的弧斑形貌<sup>[7-9]</sup>,图2(c)为柱状源的弧斑形貌<sup>[10-12]</sup>,图2(d)为电磁偏转电弧的形貌<sup>[13-15]</sup>。

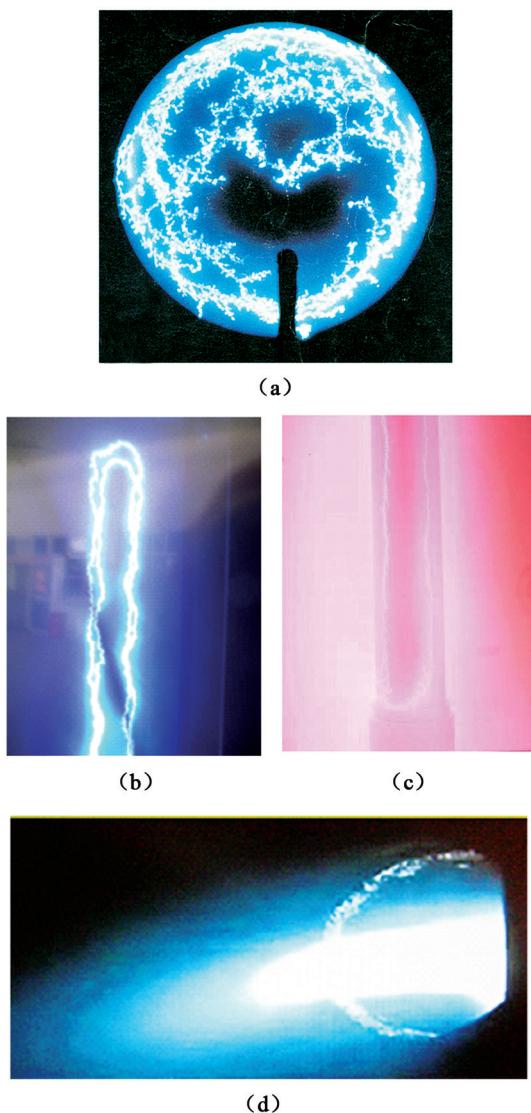


图2 各种阴极电弧源放电的形貌照片

Fig. 2 Morphologies of various cathode arcs with arc spots

当阴极电弧源靶材后面不加磁场时,冷场致弧光放电只是在等离子体鞘层的高压电场作用下优先在最高凸起的位置产生。熔池内的金属被加热并蒸发。由于加热速度太快,表面的金属还没有完

全熔化,熔池内部的金属已经熔透并产生了极高的蒸气压力从熔池中喷发出来。不加磁场时,喷发产物既有细密的金属蒸气,也有大量的大熔滴,沉积到工件表面上的膜层中有大量的颗粒,大的熔滴颗粒可以达到  $10 \mu\text{m}$  以上,造成膜层组织粗糙,装饰产品的表面亮度降低,导致“发朦”;切削加工时刀具刃口上的熔滴颗粒会首先剥落,成为硬质膜层的破损源。在靶材后面增加磁场后,可以加快弧斑在靶面上的运动速度,减少在靶面上的停留时间,使得熔池尺寸减小,喷发出来的金属熔滴数量少、尺寸减小,沉积的膜层组织细密。

## 2 需求变化和镀膜产品

### 2.1 需求变化

(1)现代加工业采用的自动化加工机床要求刀具有高的切削速度和切削寿命,以保证加工精度和生产效率;

(2)新材料的涌现和难加工材料的大量使用,如耐热钢、钛合金、铝合金、铜合金、镁合金、工程塑料、复合材料、橡胶等<sup>[4-5,16]</sup>要求刀模具具有适用性和更高的加工性能;要求被镀工件在保持基底材料良好基本性能的同时,通过膜层增加新的功能和性能,实现结构功能一体化;

(3)苛刻的加工工况,如在无润滑干切削条件下,刀具刃口的温度由  $500^\circ\text{C}$  提高到  $1100^\circ\text{C}$ ,要求刀具保持高的切削速度,刃口保持高硬度;

(4)模具的种类繁多,如冷冲压模具、热注模具、注塑模具等,要求模具表面具有耐磨、耐酸碱、平滑、易脱模、导热好等性能;

(5)飞机发动机的燃气轮机叶片要求有耐高温、耐冲刷、热疲劳的性能<sup>[17-18]</sup>。石油、矿山、纺织机械、汽车等行业中耐磨零件的表面都要求有高耐磨性;

(6)手表、手机、卫生洁具、建筑内装饰表面仿金、玫瑰金、宝石蓝、多彩等精美色彩膜层的制备要求。

在高端制造业发展的促进下,阴极电弧离子镀膜技术涌现出许多新技术、新工艺和新的硬质膜层。

### 2.2 阴极电弧离子镀膜产品

在阴极电弧离子镀技术应用初期,镀制的产品多为小尺寸刀具和模具,近些年发展到镀制大刀具和大模具。刀具材料从高速钢拓展到硬质合金,从简单的成型刀具到复杂形状刀具。图3为采用电弧离子镀膜技术生产的各种产品<sup>[4-5,22]</sup>。用阴极电弧离子镀制备的产品在航空航天、核工业、汽车、舰船用发动机和汽轮机中获得广泛应用。



图3 电弧离子镀的各种产品照片

Fig. 3 The products of arc ion plating

### 3 阴极电弧离子镀膜机

阴极电弧离子镀膜机与其他真空镀膜机,特别是磁控溅射镀膜机在外形上没有本质区别。

在镀膜室壁上排布多个阴极电弧源,每个电弧源配一个引弧针和一个弧电源。工件在镀膜室内进行公自转。镀膜机还配置有抽气系统、进气系统、真空测量系统、工件烘烤加热系统、水冷系统及工件偏压电源等<sup>[4-5]</sup>。

#### 3.1 阴极电弧离子镀膜机的类型

阴极电弧离子镀膜机的类型按电弧源的形状分为圆形弧源电弧离子镀膜机、矩形平面大弧源离子镀膜机、柱状阴极电弧源离子镀膜机<sup>[4-5]</sup>、电磁偏转型电弧离子镀膜机,如图4所示。其中图4(a)、(b)、(c)、(d)按照以上排序分别是大连纳晶科技公司、德国PVT公司、瑞士Platit公司、新加坡纳峰科技公司的产品。

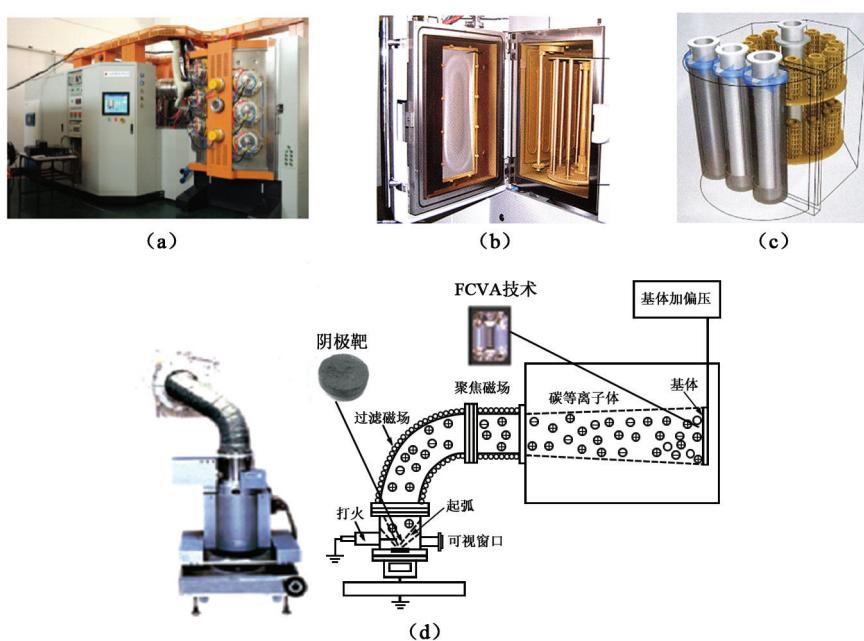


图4 各种形式的阴极电弧离子镀膜机

Fig. 4 Various types of cathode arc ion coater

### 3.2 阴极电弧源的结构

不同的阴极电弧源, 结构大同小异。

(1)“圆形弧源”通常是指靶材形状为圆形的平面阴极电弧源。靶材尺寸由直径 60 mm、100 mm, 发展到 160 mm。弧源靶材后面安装永磁体控制弧斑运动<sup>[3-5]</sup>。其结构如图 5(a)所示。

(2)矩形平面大弧源靶材后面安装电磁线圈<sup>[7-9]</sup>, 用电磁线圈产生的磁场控制弧斑运动。电磁线圈和产生的磁场方向如图 5(b)所示。

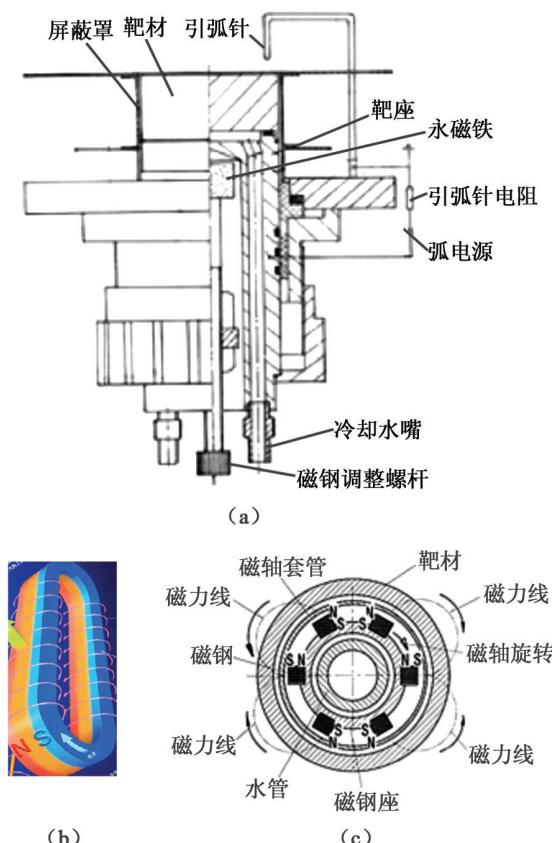


图 5 各种阴极电弧源结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of various cathode arc sources

(3)柱状阴极电弧源靶管内的永磁钢沿靶管长度方向排布<sup>[10-12]</sup>, 靶管表面产生的磁场控制弧斑沿靶管的全长运动。如图 5(c)所示。

(4)磁偏转型阴极电弧离子镀膜机的电弧源和镀膜室之间设置有弯管形通道, 用电磁场控制电弧等离子体中的金属离子通过弯管进入镀膜室, 在工件表面沉积成膜<sup>[13-15]</sup>。从图 4(d)可以看到弯管周围的电磁线圈。调整电磁线圈内通入的电流, 可以控制不同元素的离子沿弯管进入镀膜室沉积薄膜。

### 4 阴极电弧离子镀技术的进步

近年来, 随着高端制造业的发展, 阴极电弧离

子镀膜技术取得了长足的进步, 可以沉积出性能更优异的膜层。

#### 4.1 圆形弧源的进步

圆形弧源是最早使用的阴极电弧源。在工具镀和装饰镀方面做出了很大贡献。

早期使用的圆形弧源靶材尺寸是  $\Phi 60 \text{ mm} \times \Phi 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的。靶材后面的冷却水槽尺寸小, 无法完全带走靶面产生的热量, 导致弧斑和熔池都很大, 喷发出大的熔滴。这是圆形弧源电弧离子镀最大的缺点。几十年来, 许多学者和工程师为了减少熔滴、细化膜层组织, 对圆形弧源进行了大量深入的研究, 取得了丰硕的成果。

(1)在圆形弧源永磁体磁钢的周围加电磁线圈, 提高电弧的旋转速度, 减小弧斑在靶面的停留时间, 减小熔池尺寸, 使之不会喷发出大熔滴。图 6(a)为上下两个阴极电弧源全都采用永磁体时靶面的放电照片。图 6(b)为上部分不加电磁线圈、下部分的电弧源加装了一个电磁线圈后靶面的放电照片<sup>[4-5, 19-20]</sup>。可以看出, 由于弧斑的运动速度加快, 放电区域覆盖整个阴极靶面, 基本看不到明显的弧光斑点。用这种弧源沉积的膜层比只用永磁体时细密许多。

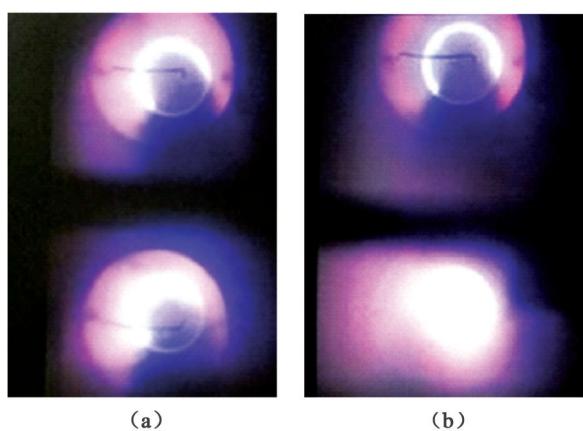


图 6 圆形阴极电弧源增加电磁场控制前后放电形貌图

Fig. 6 Discharge morphology of rounded cathode arc source before and after adding electromagnetic field control

(2)在靶面后边加两个电磁线圈, 可以进一步提高弧斑的旋转速度, 细化膜层组织。图 7 是大连远东科技股份有限公司增加电磁场控制前、后镀制膜层的金相照片。可以看出, 只用永磁体控制时镀制的膜层粗糙(如图 7(a)), 而分别增加一个线圈(如图 7(b))和加两个线圈(如图 7(c))后制备的膜层表面粗糙度明显改善, 加两个线圈的膜层组织更加细密。

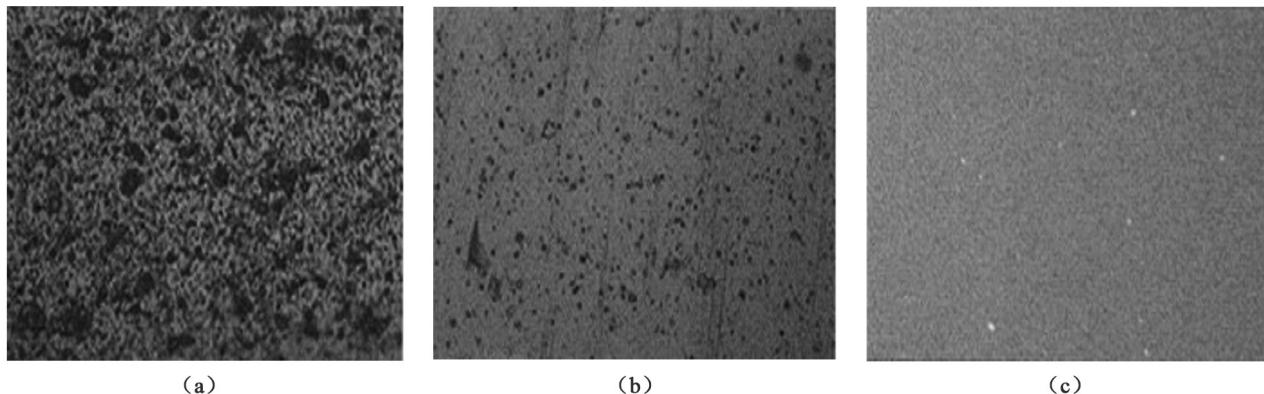


图7 增加电磁线圈前后膜层组织照片

Fig. 7 The organization of the film before and after the electromagnetic coil is added

(3)采用电磁偏转措施减少熔滴颗粒<sup>[4,13-15]</sup>。由于从阴极电弧源发射出来的弧光等离子体中,只有金属离子能沿电磁线圈控制的弯管轨道偏转进入镀膜室,大颗粒不带电,不能沿轨道偏转,进入镀膜室的全部是金属离子,它们沉积在工件表面就可以得到更细密的膜层组织。

电磁偏转型磁过滤电弧离子镀技术虽然可以细化膜层组织,但由于增加了电磁线圈使弧柱汇

聚,电弧中金属的蒸发范围缩小。新加坡纳峰科技公司为了提高弧光等离子体的作用范围,增加了使电弧进入镀膜室后进行周向扫描的装置<sup>[4]</sup>,图8(a)为电磁偏转型阴极电弧离子镀膜机中电弧进行周向扫描的照片。该公司将多个电磁偏转型阴极电弧装置连接起来,组成连续生产线进行批量生产或镀制大零件,如图8(b)所示。

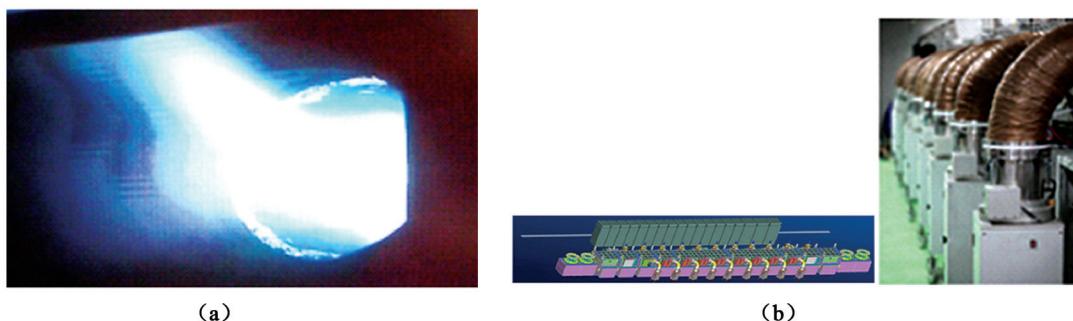


图8 电磁偏转型电弧离子镀电弧扫描图和连续生产线

Fig. 8 Arc scanning chart and continuous production line of electromagnetic deflection transformation arc ion plating

#### 4.2 矩形平面大弧源的进步

早期矩形平面大弧源的初始弧斑如图2(b)和图9的右上角所示。这种放电弧斑导致靶材利用率低,膜层组织中有大熔滴形成的大颗粒。

瑞士科汇公司和德国PVT公司分别采用调整磁场结构或采用脉冲电源的措施获得劈裂弧,弧斑在靶面上移动速度快,可细化膜层组织。图9中的下部为劈裂弧弧斑的照片。放电电流由初始的200 A左右提高到400 A。

#### 4.3 柱状阴极电弧源的进步

##### (1)旋磁型柱状阴极电弧源

早期研发的柱状阴极电弧源<sup>[10-12]</sup>为旋磁型柱弧

源,安装在镀膜室中间,靶管内的磁钢排布如图5(c)所示。可以向周围360°方向镀膜,弧斑如图2(c)所示。

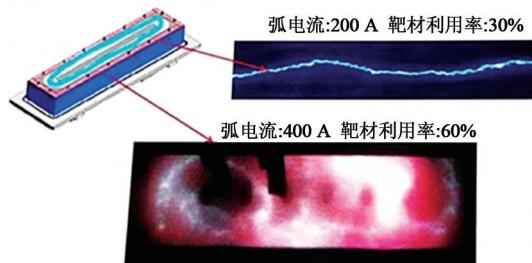


图9 平面大弧源劈裂弧弧斑照片

Fig. 9 Split arcs spot from a planar arc-source

## (2) 旋靶管型柱状阴极电弧源

旋靶管型柱弧源配置在镀膜室壁的侧边, 相当于平面电弧源的作用。图4(c)为Platit公司生产的 $\pi^{31}$ 型旋靶管型阴极电弧离子镀膜机的结构示意图<sup>[21]</sup>。镀膜机的门上安装有三个柱弧源, 中间安装一个柱弧源, 工件在二者中间旋转。在靶管内一侧安装永磁体加电磁线圈。每个柱弧源都采用纯金属靶管, 通过开启不同靶材、通入反应气体进行反应沉积, 可以在工模具上沉积出单层或多层纳米硬质膜层。

在该公司的 $\pi^{41}$ 型旋靶管型阴极电弧离子镀膜机中<sup>[21]</sup>, 镀膜室中间的柱状阴极电弧源被改为柱状旋磁型磁控溅射靶, 采用TiB<sub>2</sub>靶管作为靶材。镀膜时同时开启门上的柱弧源和中间的磁控溅射靶, 可以沉积AlCrTiN/BN多层膜, 获得高硬度、低应力的硬质膜层。TiB<sub>2</sub>是绝缘材料靶材, 磁控溅射时容易发生靶中毒。镀膜时同时开启门上的柱弧源Al靶和Cr-Ti靶, 产生的弧光放电等离子体中大量的弧光电子流将氩气电离, 高密度的氩离子轰击刻蚀TiB<sub>2</sub>靶, 可以提高沉积速率, 还可以提高整个镀膜室内的等离子体密度, 有利于反应沉积。当制备AlCrTiN/BN多层膜时, 沉积速率可达到2 μm/h。同时, 由于高密度氩离子流对靶管的轰击, 还可以及时轰击去除靶管上沉积的绝缘膜, 减轻靶中毒, 提高绝缘膜沉积速率。该公司在利用弧光电子流增强氩离子密度、提高清洗效果和磁控溅射速率方面做出了重要贡献。

旋靶管型柱状阴极电弧源的磁场配置通常是把三条铁氧体磁钢排布在旋靶管型柱状阴极电弧源靶管的一侧, 由三条铁氧体形成平衡磁场, 靶管表面的磁极性是N-S-N或S-N-S。用排布一条铁氧体磁钢和弱磁体磁钢座形成非平衡磁场<sup>[4]</sup>, 靶管表面的磁极性可以是N-S-N或S-N-S。图10为非平衡磁场柱状阴极电弧源磁钢排布图和镀膜时放电的照片。



图10 非平衡柱状阴极电弧源图

Fig. 10 Nonequilibrium cylindrical arc source

## 5 硬质膜层性能的提高

阴极电弧离子镀膜技术沉积速率高、金属离化率高、容易反应沉积获得TiN等化合物硬质膜层。为了满足高端产品发展的需求, 经过多年的发展, 硬质膜层的成分和组织结构都有了很大变化, 膜层成分由单元金属化合物发展到多元化合物, 金属陶瓷膜拓展到硼化物膜、氧化物膜等。膜层的结构也由单层膜发展到多层膜、多层纳米膜。

### 5.1 膜层成分的变化

工模具硬质膜层从单元金属化合物TiN、TiC、CrN, 发展到二元AlTiN、CrAlN和多元化合物TiAl-SiN等, 以及无氢类金刚石膜(Diamond Like Carbon DLC)。反应沉积的金属化合物硬质膜层的硬度由2 000 Hv提高到3 500 Hv, 无氢DLC可达到6 500 Hv, 显著提高了刀具的硬度和切削寿命。图11为无膜层和分别沉积了不同成分硬质膜层后刀具的切削寿命对比图。图中左边第一个无膜层的刀具切削了47 m, 最右边的是沉积了纳米多层膜的刀具, 可以切削654 m<sup>[4,21-22]</sup>。

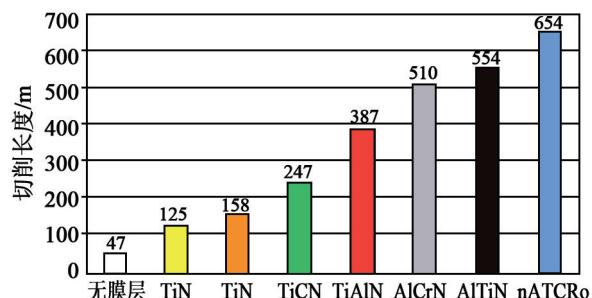


图11 不同成分硬质膜层寿命对比图

Fig. 11 Life of hard coatings with different components

随着航空航天等领域越来越多地使用钛合金、铝合金等难加工材料制造零部件, 近几年研发了具有高硬度、高韧性、低应力的氧化物、硼化物等硬质膜层刀具, 满足了自动化高速、高效切削和高精密加工的要求<sup>[22]</sup>。

### 5.2 膜层结构的变化

工模具硬质膜层从单层膜, 逐渐发展出多层膜、多层纳米膜。阴极电弧离子镀膜机中相邻两个靶安装不同的靶材, 每次开启不同的靶材组合, 可以镀多层膜。目前发展到可以同时开启多个电弧源, 工件连续运转, 可以镀纳米多层膜, 使工模具的寿命进一步提高。图12为渗氮-单层膜-两层膜-纳米多层膜刀具加工零件个数对比图<sup>[4]</sup>。

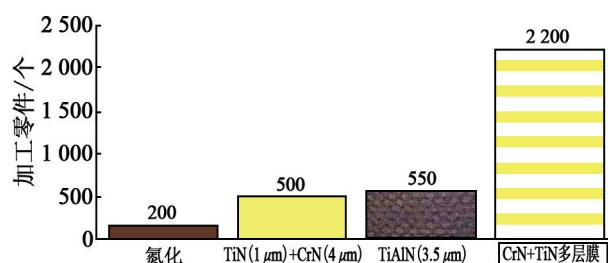


图12 用不同方法表面改性的刀具加工零件对比图

Fig. 12 Tool life comparison of surface modification by different methods

## 6 工件清洗技术的进步

### 6.1 钛离子清洗

镀膜前炉内工件的物理清洗非常重要,可以保证膜-基结合力。在电弧离子镀技术应用初期,通常利用阴极电弧源本身发射的弧光等离子体中的钛离子清洗工件。工件加800~1000 V负偏压,钛离子加速到达工件,以很高的能量将工件表面的污染层刻蚀清洗干净。但是,由于钛离子的能量太大,经常对刀具表面造成损伤、使刃口过热,同时还使沉积的膜层中出现大的熔滴颗粒。

### 6.2 弧光放电氩离子刻蚀清洗

弧光放电氩离子刻蚀清洗技术仍然采用阴极

电弧源产生的弧光等离子体,但不采用弧光等离子体中的钛离子,而是利用弧光等离子体中的电子流将氩气电离,用氩离子流清洗工件。由于氩离子流密度大,工件只须加200 V偏压就可以得到很好的清洗效果。加之氩离子质量较轻,对刀具表面损伤小,刀具刃口不容易过热。用高密度、低能量的氩离子流清洗,工件的亮度更好<sup>[4,23]</sup>。

除了利用阴极电弧源的弧光电子流产生高密度的氩离子流,还可以用空心阴极枪和热丝弧枪产生的高密度弧光电子流将氩气电离。

用弧光放电氩离子清洗工件时偏流密度大幅提高。图13为各种利用弧光放电氩离子清洗源的镀膜机内阴极和阳极布局图。其中,图13(a)为柱状阴极电弧源镀膜机,改进前,镀膜室门上的柱弧源都接弧电源的负极,改进后将1号柱弧源接弧电源的正极。接通弧电源以后在1号和2号柱弧源之间产生弧光放电,弧光电子流在向1号阳极运动的过程中将镀膜室内的氩气电离,再利用低能量高密度的氩离子流清洗工件。图13(b)为在门上的圆形弧源和设在其前面的阳极板之间产生弧光放电;图13(c)为在圆形弧源和镀膜室对面的阳极之间产生弧光放电;图13(d)为在镀膜机壁上的阴极4和设置在镀膜室内部的阳极3之间产生弧光放电<sup>[23~24]</sup>。

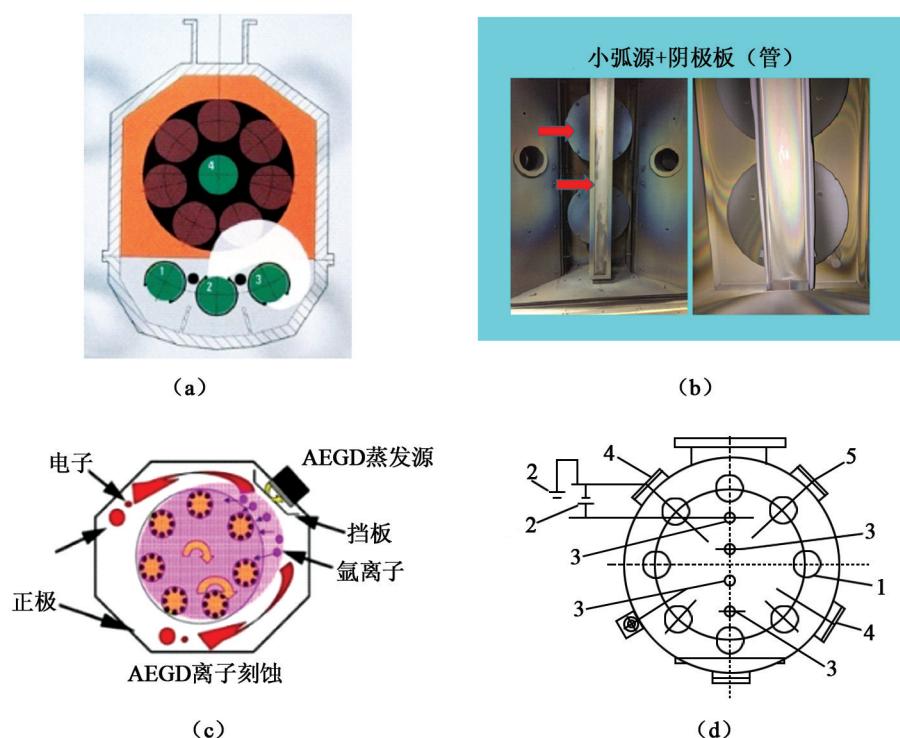


图13 各种利用弧光放电氩离子清洗源的镀膜机内阴阳极布局图

Fig. 13 Arrangement of anode and cathode in coating machine using arc argon ion cleaning source

在这几种镀膜机中设置了不同位置的阴极和阳极,它们之间都可以产生冷场致弧光放电,得到高密度的弧光电子流,用弧光电子流电离氩气得到高密度的氩离子流。使用的偏压在200 V以下,偏流大于10 A。用传统的辉光放电氩离子清洗工件,在相同镀膜机尺寸条件下偏流小于2 A。用弧光放电得到的氩离子流清洗工件的效果,既优于辉光放电氩离子流清洗工件技术,也优于阴极电弧源发射的钛离子流清洗工件技术。

## 7 展望

国防现代化、高新技术和高端制造业的发展、人民生活水平的提高,促进了阴极电弧离子镀膜技术的发展。阴极电弧离子镀膜技术取得的进步说明,国内外科技工作者对气体放电等离子体物理知识的掌握和运用已经有了很大进步。在电弧离子镀膜机配置、工艺参数制定、膜层成分设计等方面展现了大家对电弧离子镀膜技术本质有了更深刻的认识和理解,尤其是在利用电磁场控制弧光电子流方面提出了很多新的设计理念和方法,使得阴极电弧离子镀膜技术在高性能工模具和高端加工制造业的重要零件方面发挥了越来越重要的作用。今后,随着国民经济的发展,会对离子镀膜技术提出更高的要求。相信薄膜领域的科技工作者将会创新、开发出更多的新型阴极电弧离子镀膜机和具有特殊功能的薄膜产品。

## 参考文献:

- [1] 王福贞,马文存.气相沉积应用技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 魏杨.电真空物理[M].北京:人民教育出版社,1962.
- [3] SNAPER A. Arc deposition processan daporatus: U.S. Patent: 3625848[P]. 1971-05-02.
- [4] 王福贞.离子镀膜技术更新版[EB/OL]. [2019-11-01]. <https://study.163.com/course/introduction/508015.htm>. 网易云课堂.
- [5] 王福贞.离子镀膜技术的进展[J].真空,2014(5):1-9.
- [6] BOXMAN R L, SANDERS D M, MARTIN P J, et al. Handbook of vacuum arc saince and technolgy: fundament and applica-tion[M]. ParkRidfeNJ, Noyes, 1995.
- [7] 王福贞,唐希源,周友苏,等.用多弧离子镀膜机镀氮化钛[J].金属热处理,1994(5):17-21.
- [8] 王福贞.新型电磁控阴极电弧源:中国,ZL90100946.6[P].1990-02-27.
- [9] GOROKHOVSKY V I. Rectangular cathodic arc source and method of steering an arc spot: U.S. Patent: 6645354[P]. 2003-11-11.
- [10] 侯彤.旋转磁控柱状阴极电弧源:中国,ZL94102867.4[P]. 1994-03-26.
- [11] 王福贞.旋转磁控柱状阴极电弧源多弧离子镀膜机:中国,ZL96218605.8[P]. 1996-08-09.
- [12] 王福贞.旋转磁控柱状阴极电弧源[J].真空,1997(2):43-45.
- [13] AKSENOV II, BELOUS V A, PADALKA V G, et al. Transport of plasma streams in a curvilinear plasma-optics system [J]. Soviet Journal of Plasma Physics, 1978(4):758-763.
- [14] 李刘合.阴极磁控过滤弧[J].真空,1999(3):14-19.
- [15] 杨木,于振华,张俊,等.离子镀中弯管磁过滤器的效果和颗粒去除效果的研究[J].真空科学与技术学报,2017(12):1217-1223.
- [16] 王铁钢,张姣姣,阎兵.刀具涂层的研究进展及最新制备技术[J].真空科学与技术学报,2017(7):727-729.
- [17] 王凯,许振华,何利民,等.钴基高温合金铝化物涂层的高温氧化行为研究[J].真空,2014(1):50-53.
- [18] 孙刚,冒昌伟,陈希亮,等.不同微结构Ti/TiN多层涂层的抗冲蚀性能研究[J].真空科学与技术学报,2019(8):683-688.
- [19] 樊勇.真空阴极弧离子镀的发展及应用[J].新技术新工艺,2008(4):49-51.
- [20] 杨林生.硬质涂层技术的最新进展[J].真空,2009(6):35-3.
- [21] CSELLE I. Platin advanced coating systems[J]. [s. n.], 2018.
- [22] 李彤.硬质涂层的研究热点及面临问题[J].真空科学与技术,2018(9):755-762.
- [23] 王福贞.弧光放电氩离子清洗源[J].真空,2019(1):27-33.
- [24] 王福贞.一种设置固体弧光等离子体清洗源的镀膜机:中国,ZL201721044882.7[P]. 201-08-21.