

脉冲高能量密度等离子体薄膜制备与材料表面改性*

阎鹏勋[†]

(兰州大学等离子体与金属材料研究所 兰州 730000)

杨思泽

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 脉冲高能量密度等离子体是一项全新的等离子体材料表面处理和薄膜制备技术.文章主要介绍了作者近几年来在这方面的研究成果.从理论和试验上研究了脉冲高能量密度等离子体的产生机制及其物理性质.研究了脉冲等离子体与材料相互作用的基本物理现象和物理机制.诊断测量表明,脉冲等离子体具有电子温度高(10—100eV)、等离子体密度高(10^{14} — 10^{16} cm⁻³)、定向速度高($\sim 10^7$ cm/s)、功率大(10^4 W/cm²)等特点.在制备薄膜时具有沉积速率高,薄膜与基底粘接力强,并兼有激光表面处理、电子束处理、冲击波轰击、离子注入、溅射、化学气相沉积等综合性特点,可以在室温下合成亚稳态相和其他化合物材料.在此基础上,系统地进行了脉冲等离子体薄膜制备和材料表面改性及其机理的研究.在室温下的不同材料衬底上成功地沉积了性能良好的较大颗粒立方氮化硼、碳氮化钛、氮化钛、类金刚石、氮化铝等薄膜材料.沉积薄膜和基底之间存在一个很宽的过渡层,因此导致薄膜与基底有很强的粘接力.经脉冲等离子体处理过的金属材料表面性能得到了极大改善.

关键词 脉冲高能量密度等离子体,薄膜,表面处理

DEPOSITION OF THIN FILMS AND SURFACE MODIFICATION BY PULSED HIGH ENERGY DENSITY PLASMA

YAN Peng-Xun[†]

(Institute for Plasma and Metal Materials, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

YANG Si-Ze

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The use of pulsed high energy density plasma is a new low temperature plasma technology for material surface treatment and thin film deposition. We present detailed theoretical and experimental studies of the production mechanism and physical properties of the pulsed plasma. The basic physics of the pulsed plasma-material interaction has been investigated. Diagnostic measurements show that the pulsed plasma has a high electron temperature of 10—100eV, density of 10^{14} — 10^{16} cm⁻³, translation velocity of $\sim 10^7$ cm/s and power density of $\sim 10^4$ W/cm². Its use in material surface treatment combines the effects of laser surface treatment, electron beam treatment, shock wave bombardment, ion implantation, sputtering deposition and chemical vapor deposition. The metastable phase and other kinds of compounds can be produced on low temperature substrates. For thin film deposition, a high deposition ratio and strong film to substrate adhesion can be achieved. The thin film deposition and material surface modification by the pulsed plasma and related physical mechanism have been investigated. Thin film c-BN, TiCN, TiN, DLC and AlN materials have been produced successfully on various substrates at room temperature. A wide interface layer exists between film and substrate, resulting in strong adhesion. Metal surface properties can be improved greatly by using this kind of treatment.

Key words pulsed high energy density plasma, thin films, surface treatment

* 2001-09-24 收到初稿, 2002-03-28 修回

† 通讯联系人. E-mail: pxyan@lzu.edu.cn

1 引言

低温等离子体技术被广泛地运用于半导体、微电子、光学、材料表面处理等工业领域,并日益显示其更多的应用领域.低温等离子体技术的发展,可以说是随着对高温等离子体的研究而发展起来的.20世纪50年代以来,人们意识到面临能源短缺的巨大问题,而一次性能源如煤、石油、天然气总有一天要枯竭.而目前西方发达国家比较普遍使用的核裂变电站存在的主要问题是不能解决核废料的处理.可以说,寻找一种洁净、无污染、无废料、高效的新能源是人类的希望.高温等离子体研究的主要动力和目的之一就是运用受控核聚变的方式来产生洁净的能源.近50年来,各发达国家政府投入了大量的经费来研究受控核聚变问题,目前已经获得很大进展.虽然高温等离子体研究尚未达到使用的目的,但其中的许多新概念和低温等离子体装置则在科研和工业生产中得到广泛的使用,涉及的装置和技术在国际上已形成每年近千亿美元的市场.相关的低温等离子体研究中心在国际上纷纷成立,尤其近二十年来,低温等离子体在薄膜材料制备和材料表面改性方面使用非常广泛.用于材料表面处理和新材料合成的低温等离子体种类可以说是不可胜数^[1-5].有关等离子体与材料相互作用的国际会议非常之多.等离子体在材料表面处理中的应用可以分为两大类:薄膜制备和材料表面改性.当然薄膜制备本身也有材料表面改性的作用.

本文就近年来我们在脉冲等离子体薄膜制备与材料表面改性方面的工作进行简单的介绍.我们自主研制了脉冲高能量密度等离子体装置.它产生的等离子体具有高的电子温度和等离子体密度,以及相对高的定向运动速度.在沉积薄膜过程中,发现它沉积温度要求低(可在室温下),沉积速度快,薄膜与基底粘结良好(远高于CVD和PVD),具有高的能量利用率.通过改变同轴枪内电极材料、工作气体种类及操作参数,可以获得不同种类和比例的等离子体束.从而可以在室温下制备各种稳态和亚稳态相薄膜.当脉冲等离子体束轰击材料表面时,可以有单一的沉积薄膜效应,也可以有表面溅射、注入、冲击波压力和强的热效应等综合效应.

2 脉冲等离子体技术介绍

2.1 装置及工作原理

脉冲高能量密度等离子体的产生原理是按照同轴等离子体枪的概念来设计的.如图1所示,该装置分为四部分:同轴等离子体枪、快速脉冲电磁阀、RLC充放电电路和真空腔体.其工作原理可简要描述如下:由RLC电路系统给内外电极加一个高压,当工作气体在脉冲电磁阀控制下快速从同轴枪底端冲入时,在高压作用下被击穿电离,产生一个大的脉冲电流,使气体电离形成等离子体,同时巨大的脉冲电流使内电极材料表面蒸发,溅射形成内电极材料组成的等离子体.因此等离子体是由工作气体和内电极材料两种等离子体组成的.在洛伦兹力作用下,等离子体加速地向出口处推进,同时内电极材料不断地被溅射出来形成等离子体,可以说,在等离子体运动过程中,工作气体产生的等离子体量由于与内外电极不断碰撞而不断减少,而内电极溅射产生的等离子体量则不断增加.等离子体中最终的成分比例将主要依赖于电极间的电压降.

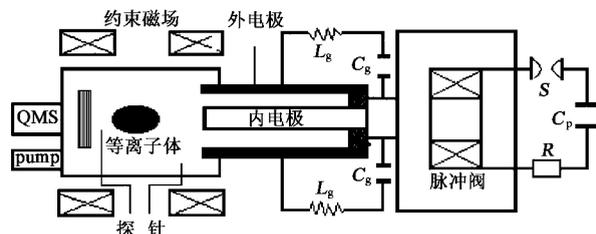


图1 脉冲高能量密度等离子体产生装置

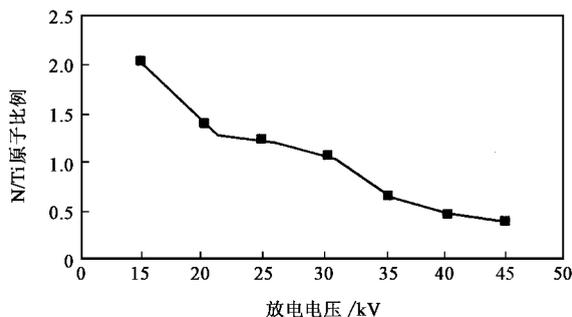


2.2 脉冲高能量密度等离子体的基本特征

我们在研究中发现,当气体被电离时,除了内电极表面材料的溅射而等离子体化外,外电极表面也会有一定量的原子被溅射出来,但外电极材料成分的等离子体量远小于内电极溅射的量.原因是内电极的面积相对较小,内电极表面处的电流密度较大,因此有较多的原子被溅射出来.同时由于圆筒外电极的箍锁作用,等离子体更多地与内电极接触,导致更多的内电极材料被溅射.因此在许多情况下,外电极成分的等离子体量可以不予考虑.等离子体在同轴电极内运动时,其质量在不断地变化,气体电离产生的等离子体量在不断减少.

等离子体的特征除了用一些理论模型预测外,准确地把握要用一定的诊断手段来实现.通过双探针这一简单诊断技术,我们得到了脉冲等离子体的运动速度、电子温度和电子密度.结果显示脉冲等离子体运动速度(v)与放电电压(V_g)成正比: $v = kV_g$, k 是比例系数.根据实验条件的不同,电子密度分布在 $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 之间,电子温度处在 $10 - 100 \text{ eV}$ 之

间.研究发现脉冲等离子体的成分比例强烈地依赖于放电电压.图2反映了采用金属钛作内电极时,在氮气工作气体情况下,在脉冲等离子体中,氮离子和钛离子比值随放电电压变化的关系.结果表明,高的放电电压导致更多的内电极钛离子产生.



2 脉冲等离子体中氮离子和钛离子比值随放电电压的变化

脉冲高能量密度等离子体轰击衬底材料时,可产生一系列复杂的物理化学变化.首先,由于能量和动量的转移,将在极端时间内引发微观范围内的局部温度升高,然后温度又快速下降,形成淬火效应,淬火速度可达 10^8 K/s.第二,等离子体的撞击将在基底表面产生局部高压状态;第三,非弹性碰撞将使衬底材料溅射而产生反应性化学元素,与等离子体中的离子反应形成新的化合物;第四,脉冲等离子体可引起离子注入效应;第五,可在沉积薄膜与基底之间形成宽的过渡层.由上面的一些特征我们可预测脉冲高能量密度沉积薄膜和材料改性的一些特点.局部的微观高温高压状态使该技术能在室温环境下制备化合物及亚稳态薄膜材料(c-BN等).快速的淬火效应可以使材料表面产生非晶态相.离子注入效应可以使薄膜与基底之间有很强的粘接力.

3 脉冲等离子体薄膜制备

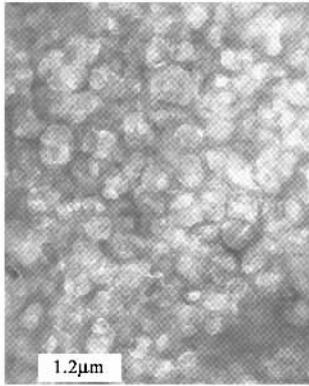
运用脉冲高能量密度等离子体技术,我们在室温下在不同衬底材料上成功地制备了性能良好的大颗粒立方氮化硼、类金刚石、碳氮化钛、氮化钛等薄膜.沉积了硬质薄膜的金属材料表面性能得到了显著改善.需要特别指出的是,国际上还没有室温下合成较大颗粒立方氮化硼薄膜的报道.

立方氮化硼是自然界没有的亚稳态相晶体,其硬度仅次于金刚石,而其综合性能甚至可以说优于金刚石.其结构和金刚石类似,但由于结构中有两种原子,因此人工合成比金刚石更难.直到20世纪50年代,在高温高压条件下,Wentorf首次实现了六方

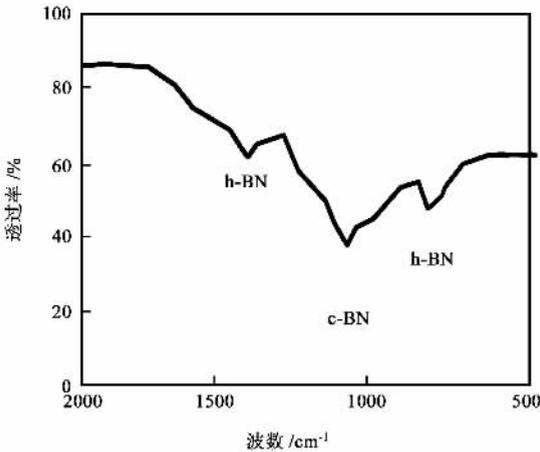
氮化硼相向立方氮化硼相的转变.1980年,Weissmantal等人^[17]用双电子束技术成功地合成了立方氮化硼薄膜,实现了低压下立方氮化硼的合成.近十多年来,各国科学家运用各种不同的气相沉积技术,进行了立方氮化硼薄膜相的合成,在理论和实验上都取得了重要的进展.然而迄今为止,所得的薄膜没有呈现很好的晶体形貌,晶粒很小,大小不超过100nm.我们运用脉冲高能量密度等离子体,在保持衬底材料温度为室温的情况下,在不同材料衬底上制备了较大颗粒的立方氮化硼薄膜.现介绍如下:

我们选用50% B₂H₂ + 50% N₂混合气体为工作气体,气体压力为0.12MPa,靶室真空度为 10^{-3} Pa,基片选用单晶硅(100)、氯化钠单晶和GCr15钢,沉积时保持基片在室温状态.放电电压选择15、20和25keV.脉冲宽度为60μs.采用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、X射线衍射仪(XRD)、红外光谱(IR)等分析技术对沉积的c-BN薄膜给予了表征.结果表明,在几种衬底上都形成了c-BN薄膜,晶粒形状明显,颗粒较大.其结构主要依赖于衬底材料、放电电压和脉冲等离子体的轰击次数.在单晶硅上的c-BN晶粒平均尺寸为4μm,在钢衬底上则为1.5μm,而在氯化钠上则仅为0.5μm.研究发现,在一定条件下相对较低的放电电压有利于立方相的形成.脉冲等离子体的轰击次数达到一定数量时,立方相的氮化硼才能形成.图3(a)是沉积在单晶硅(100)面上的c-BN薄膜形貌.可以明显看出大小分布均匀的c-BN晶粒,晶粒结构基本规则,平均尺寸为1.2μm.图3(b)是相应的c-BN薄膜的红外吸收光谱.可以看到三个吸收峰,波数处在820和1375cm⁻¹的两个峰对应于氮化硼的六方相.波数在1070cm⁻¹的吸收峰对应于立方氮化硼.显然氮化硼薄膜中立方相的成分远多于六方相.脉冲等离子体轰击基底过程中产生的微观高温高压状态,是导致立方氮化硼形成的主要原因.由于脉冲之间有2—3min的间隔,整个衬底材料仍然保持在室温状态之下.不同衬底上的c-BN晶粒尺寸不一样,归结于它们的结构和强度不一样,引起的薄膜与基底之间的内应力大小有区别.研究还发现,过高的放电电压反而不能形成氮化硼的立方相,只能形成非晶态的氮化硼.

硬质氮化物薄膜,包括TiN、TiAl、Ti(CN)等,已用各种方法进行制备、研究和使用.主要的沉积技术包括:化学气相沉积(CVD)、物理气相沉积(PVD)、各种等离子体辅助化学气相沉积(PACVD)、离子束沉积技术(IBM、IBAD)等.各种方法都有其优缺点.



(a)



(b)

图 3

- (a) 单晶硅上的 c-BN 薄膜的电镜图像；
- (b) 单晶硅上的 c-BN 薄膜的红外吸收光谱

我们用脉冲高能量密度等离子体成功地制备了多种氮化物薄膜。主要优点是沉积速率高，且薄膜与基底之间具有很高的结合强度。氮化钛薄膜具有很多优异的性质，如高硬度、耐磨性、耐腐蚀性以及漂亮的金黄色。它可以说是在工业上应用最广泛的镀膜材料。在制备 TiN 薄膜的试验中，内电极采用金属钛，工作气体选用工业氮气。用 SEM 合金相显微镜观察 GCr15 钢表面上沉积的 TiN 薄膜形貌，可以看出薄膜表面均匀光滑，无缺陷。XRD 衍射揭示薄膜的结构为多晶态。研究发现，TiN 薄膜的组织 and 结构强烈地依赖于工作气体的进气量和放电电压大小。当放电电压过高时，薄膜中会出现 Ti₂N 成分，并且成分比例随电压的增大而提高，达到一定程度时仅会出现 Ti₂N 而没有 TiN 的成分。而当进气量不足时，也会导致 Ti₂N 成分的出现。只有当进气量和放电电压之间存在一个合理的匹配时，才会沉积得到 TiN 薄

膜。

Ti(CN) 化合物兼具 TiN 和 TiC 两种化合物的性能优点，如具有高的硬度、高的耐磨性和良好的润滑性能。制备 Ti(CN) 薄膜的传统方法是 CVD。但 CVD 技术需要 1000℃ 以上的高温，这限制了 Ti(CN) 薄膜的使用范围。用脉冲等离子体可以在室温下沉积 Ti(CN) 薄膜。在制备 Ti(CN) 薄膜时，选用高纯钛作内电极，工作气体采用 CH₄ + N₂ 混合气体。由 SEM 可以观察到 Ti(CN) 薄膜表面的平行条纹结构。这与高温 CVD 制备的 Ti(CN) 具有的五线孪晶结构不一样。图 4 是 Ti(CN) 的 XRD 衍射图谱。由图 4 可以看出，在放电电压 $V_g = 4kV$ 条件下，Ti(CN) 化合物中 C/N 原子比是 7:3，晶格参数为 4.27Å，介于 TiN 的 4.24Å 和 TiC 的 4.332Å 之间。原则上 C/N 原子比可随放电电压而变化。由于 Ti(CN) 是连续固溶体，C/N 原子比可以从零变化到无穷大，它的晶格参数依赖于碳原子浓度 $C/(C+N)$ 。在薄膜与基底界面处存在 FeC 化合物。这将降低高硬度薄膜与软基底之间的硬度梯度，有利于薄膜的附着。

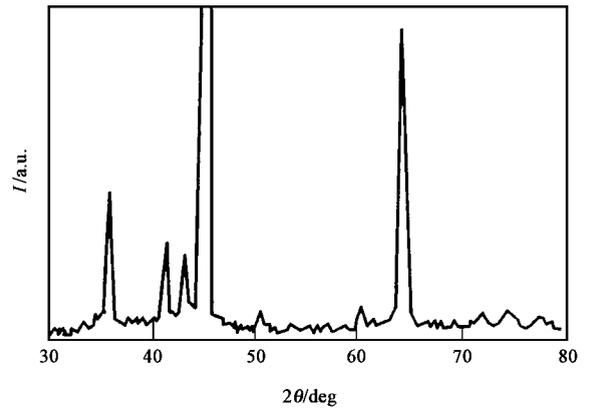


图 4 沉积在 45 号钢衬底上的 Ti(CN) 薄膜的 XRD 谱

AlN 是一种具有优良性能的高温陶瓷材料，但一般的方法难以合成。利用脉冲等离子体在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面沉积了组织致密六方结构的纳米 AlN 薄膜，晶粒尺寸小于 15nm，具有很好的耐磨性能和抗腐蚀性能。AlN 薄膜与基底之间过渡层中还存在 Fe₃N 硬质相，这会提高薄膜的粘结性。在 2% 浓度的 NaCl 溶液中的腐蚀实验表明，不锈钢的耐腐蚀性已提高了 10 倍左右。

类金刚石 (DLC) 材料是一种已经获得广泛研究和工业应用的硬质材料。它的分类和定义很广泛，可以说包含有一定比例的 sp³ 结构的碳材料和非晶碳

材料都可以称为类金刚石材料.顾名思义,它可以和金刚石的结构与性质相比拟.它具有硬度高、表面光滑、耐磨性能好、与基底有很好粘结等优点.制备 DLC 薄膜的技术很多.用脉冲等离子体制备 DLC 薄膜时,内电极材料采用纯石墨,工作气体选择甲烷(CH_4)气体.图 5 是我们用脉冲高能量密度等离子体在单晶硅(100)面上沉积的 DLC 薄膜的 SEM 图像.由图 5 可以看出,与其他方法制备的 DLC 形貌不同,而是显示出纳米晶粒结构.晶粒的平均尺寸 25nm.这应该是具有 sp^3 结构的纳米金刚石颗粒.XPS 谱揭示 DLC 薄膜中碳原子结合能是 285.4eV.红外光谱表明 DLC 薄膜中既有 sp^2 C—C 键又有 sp^3 C—C 键.在 45 号钢基底上沉积的 DLC 薄膜有很好的粘接力,使钢表面硬度提高一倍以上.AES 和 XRD 分析表明,DLC 和钢基底之间存在有硬度很高的 FeC 化合物过渡层.

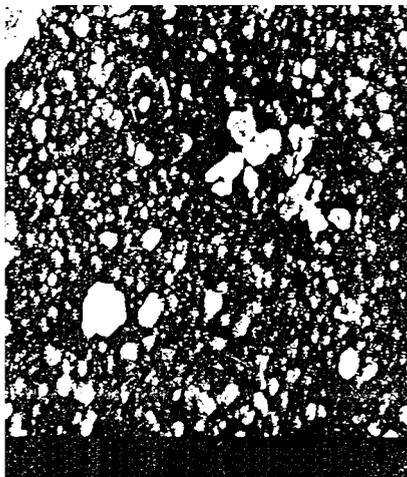


图 5 沉积在单晶硅上的 DLC 薄膜 SEM 像

4 脉冲等离子体材料表面改性

在现代工业和科学研究中,材料表面改性占有很重要的地位.在不改变整体材料本身的成分、结构和性能的情况下,仅通过适当的表面处理技术,使材料表面性能得到改善和提高,达到使用的目的.表面处理的技术种类很多.传统的表面改性技术有化学热处理(包括表面渗碳、渗氮、渗硼等)、表面淬火、表面形变强化、表面制膜(包括电镀、物理和化学气相沉积等).近二十年来,人们又发展了许多现代的表面处理技术,主要是通过各种电磁波束(激光、微波、紫外光等)和荷能粒子(分子、原子、离子、电子等)束

等辐照处理,在材料表面产生物理、化学和机械变化,达到改性的目的.

脉冲高能量密度等离子体对材料表面进行改性时,兼具气相沉积、激光表面处理、电子束处理、溅射、冲击波轰击和离子注入的共同特点.它可以使金属样品表面快速加热直至融化,达到淬火的效果,在待处理材料表面层引入外来原子,形成性能优异的化合物薄膜,在材料表面产生亚稳合金层,产生氮化效果,形成非晶层等,从而使材料表面的性能得到改善和提高.当脉冲等离子体轰击材料表面时,首先会将自身的动能全部传递给基底材料,产生热效应.脉冲等离子体的功率密度可以由下式来计算: $W = nvE$,其中 n 是等离子体密度, v 是等离子体速度, E 是等离子体动能.如等离子体密度 $n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $v = 10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $E = 1\text{—}5 \text{ kV}$,则等离子体沉积功率密度 $W = (1.6\text{—}4) \times 10^4 \text{ W/cm}^2$.所以脉冲等离子体应用于材料表面改性有很重要的意义.我们用脉冲等离子体对 GCr15 轴承钢、不锈钢、45 号中碳钢、工业铸铁等材料进行了表面处理,结果使这些材料的表面性能得到很大提高.

对工业铸铁处理时选用氩气作为工作气体.经脉冲等离子体轰击后,铸铁的表面硬度从 $H_{\text{V}50} = 746 \text{ kg/mm}^2$ 提高到 $H_{\text{V}50} = 1216 \text{ kg/mm}^2$.由 SEM 观察得知,处理后的铸铁表面存在一个厚度达 15—25 μm 的白亮层.这个白亮层是由于表面的快速淬火效应引起的,其效果类似于激光表面热处理.这个厚度是由热扩散长度确定的,可以由下式来确定: $D \sim (\alpha t)^{1/2}$,其中 α 是铸铁的热扩散速度, t 是等离子体的脉冲宽度.成分分析表明,铸铁表面的主要成分,如 Fe、C 和 N 等元素的含量与内部有很大不同.白亮层的相组成主要是尺寸分布在 20 到 60nm 的多晶 Fe_3C 颗粒和多晶 $\alpha\text{-Fe}$ 组成.在部分区域形成晶体织构,表明经等离子体处理后表面晶体存在择优取向.以上这些都是铸铁表面硬度提高的原因.

在 GCr15 轴承钢上沉积的 TiN 薄膜极大地提高了样品表面硬度,薄膜与基底之间有很强的结合力. TiN 薄膜的维氏硬度分布在 1908—2216 kg/mm^2 之间.图 6(a)反映 TiN 薄膜与钢基底之间结合力随膜厚的变化情况,可以看出,临界载荷在 71—92N 之间变化.在某个厚度下面,有一个最大的结合力.这些值远远大于 PVD 和 CVD 镀膜的临界载荷. TiN 薄膜与基底的良好附着起因于脉冲等离子体轰击引起宽的过渡层[见图 6(b)].而宽的过渡层首先起因于初始阶段离子的注入效应,高能离子在膜与基底的界

面处产生充分的动态混合,并形成了有(100)晶面取向的立方结构的 FeTi 合金相.这一界面层使得沉积膜与基底之间存在一个平缓的结构和成分过渡,使沉积膜与基底之间的接触面积明显增加,因而粘结力大大增加.影响薄膜与基底之间结合力的因素很多.薄膜内应力就是一个很重要的因素.大的内应力常引起薄膜的开裂与起皱,这就决定了它们是张应力或压应力.如果内应力大于膜与基底的粘结力,则薄膜无法附着在基底上.研究发现,脉冲等离子体薄膜的结合力随放电电压的升高而变大,主要原因是高放电电压可以导致等离子体定向速度增大和电子密度的提高.前者引起更宽的过渡层,高的电子密度可以使界面层的化学反应进行得更充分.

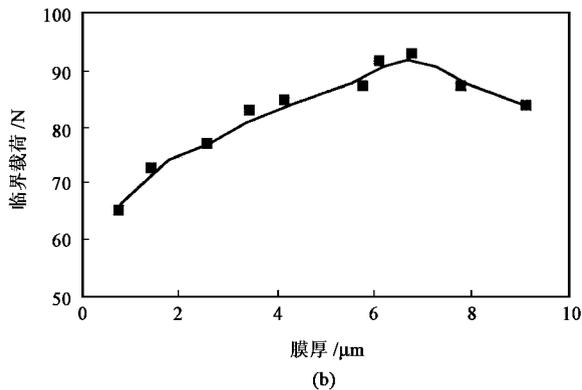
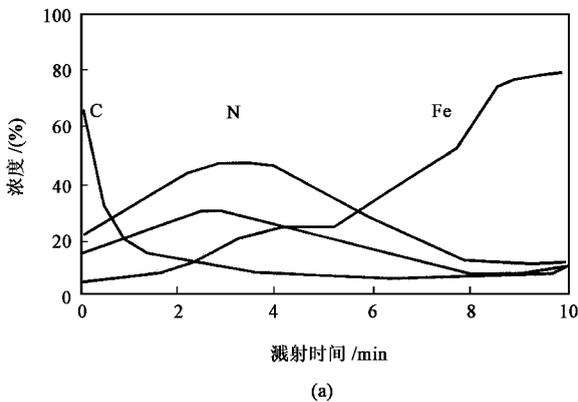


图 6

(a) GCr15 钢上沉积的 TiN 薄膜样品 AES 成分深度分布曲线;
(b) TiN 薄膜的临界载荷随膜厚的变化情况

脉冲等离子体在 45 号钢上沉积的 Ti(CN) 薄膜显著改善了基体材料的表面机械性能,使得镀膜之后 45 号钢表面硬度提高 5 倍以上,耐磨性也明显提高.薄膜与基底之间的附着力也很强.图 7 为沉积在 45 号钢上的 Ti(CN) 薄膜和未沉积薄膜样品的膜粒磨损曲线对比.由图 7 可以看到,镀膜后的样品在摩

擦过程中失重很小,而未镀膜的钢样品则有很大的失重,这表明处理后的样品具有优异的耐磨性能.表征 Ti(CN) 薄膜与基底粘结性能的临界载荷在 50—70N 之间变化,并取决于放电电压和脉冲等离子体轰击次数.对于处理后样品表面硬度的提高, Ti(CN) 薄膜本身的高硬度是主要原因,其次,脉冲等离子体轰击样品引起的快速淬火效应,在基体表面产生微晶和压应力也对硬度的提高有贡献.

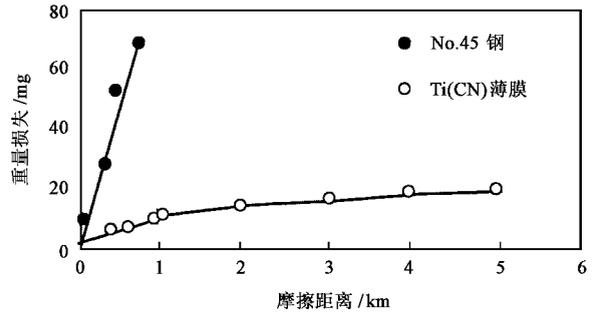


图 7 45 号钢上沉积 Ti(CN) 薄膜和未沉积薄膜样品的膜粒磨损曲线对比

5 讨论

产生脉冲高能量密度等离子体的同轴枪概念最早用于高速等离子体源,作为星际旅行器的推进器和用于托卡马克聚变装置的加热设备.其电子温度和电子密度都远高于一般的低温等离子体,可以说是介于高温和低温等离子体之间的一种新型等离子体.在材料表面处理和薄膜制备方面显示出独特的优点.脉冲等离子体应用于材料表面改性具有设备简单、处理温度可以在室温下进行、沉积速率高、薄膜与基底粘结力强等优点,并兼有激光表面处理、电子束处理、冲击波轰击、离子注入、溅射、化学气相沉积等综合性特点,因此有着广泛的工业用途.

脉冲等离子体处理金属材料表面时,由于能量的快速传递可以首先引起表面淬火效应,使材料表面发生熔融、晶粒细化、晶体择优取向等变化,可使材料表面形成数十微米级深的热作用改性层,因此我们说它具有激光热处理的特点.等离子体中包含大量的电子,因此脉冲等离子体轰击材料时也有电子束表面处理的效果.高速定向运动的脉冲等离子体轰击材料时,可以在表面产生局部的高压效应,类似于冲击波效应.由于它可以使衬底整体保持在室温情况下,并在微观范围内形成高温高压状态,因此实现了室温下亚稳态相立方氮化硼薄膜的合成.

在热化学中 那些只有在高温高压下才能稳定的相 , 可以用脉冲等离子体技术在室温条件下合成 . 当脉冲等离子体刚开始轰击材料表面时 , 可以溅射出基底材料的原子和离子 , 从而使等离子体也可以与基底材料发生化学反应 , 在界面处形成化合物过渡层 , 有利于薄膜与基底的粘结 . 脉冲等离子体离子注入效应与单纯的离子注入时有所区别 , 由于与其他效应互相影响 , 使得离子注入层更深一些 . 等离子体气相沉积薄膜是主要的效果 , 由于脉冲等离子体的成分是由工作气体和金属内电极材料两种类型组成 , 因此用该技术可以形成单一薄膜材料和多种成分的化合物薄膜材料 . 化合物中的原子比例可以由放电电压和每次脉冲的进气量来调节 .

脉冲等离子体与材料相互作用时产生的众多效应 , 往往都是综合性的并互相影响 , 但其中总有一种起主要的支配作用 . 究竟需要哪一种起支配作用 , 可根据表面处理或制膜的目的预先设定 . 由于内电极材料溅射形成等离子体的量主要取决于放电电压 , 因此可通过调节电压值来控制内电极材料形成的等离子体量 . 对于工作气体来说 , 等离子体量则同时取决于放电电压和一次进气量 . 在进行表面镀膜时 , 需要选择适当的条件 , 使两种类型的等离子体达到一种合理的耦合 , 以形成理想的化合物薄膜 . 总的来说 , 脉冲等离子体与材料相互作用会产生复杂的物理、化学和机械性能的变化 , 还需要进行深入的理论探讨 , 建立更加完备的准确的理论模型 , 为该技术的工业应用奠定基础 .

6 结语

近年来各种脉冲等离子体技术不断出现 , 在材

料表面处理和薄膜制备两个方面 , 实际应用和基础研究都取得了很大发展 . 原则上说 , 传统的等离子体技术只要施加脉冲电源 , 都可成为脉冲等离子体 . 作为一项新的表面处理和薄膜制备技术 , 脉冲高密度等离子体已经显示了它在材料科学中的独特作用 . 从另一方面来看 , 我们还需要继续加强脉冲等离子体与材料相互作用的理论研究 , 建立更加完备准确的理论模型 , 为该技术的工业应用奠定基础 .

参 考 文 献

- [1] Yan P X , Hui P . Sur. Coating & Technol. , 1998 , 102 : 175
- [2] Martinu L , Potras D . J. Vac. Sci. Technol. A , 2000 , 18 : 2619
- [3] Buuron H , Bolt A , Yan P X *et al.* Surf. & Coat. Technol. , 1998 , 98 : 1572
- [4] 吴承康 . 物理 , 1999 , 28 : 388 [Wu C K . Wul(Physics) , 1999 , 28 : 388 (in Chinese)]
- [5] Martin P J , Bendavid A , Kinder T J . IEEE Trans. plasma Sci. , 1997 , 25 : 675
- [6] 阎鹏勋 杨思泽 李兵等 . 科学通报 , 1995 , 40 : 414 [Yan P X , Yang S Z , Li B *et al.* Chinese Science Bulletin , 1995 , 40 : 414 (in Chinese)]
- [7] Yan P X , Yang S Z , Chen X S . J. Crystal Growth , 1995 , 148 : 232
- [8] Yan P X , Yang S Z . Appl. Surf. Sci. , 1995 , 90 : 149
- [9] Yan P X *et al.* J. Vac. Sci. Technol. , 2001 , A19 : 232
- [10] 阎鹏勋 杨思泽 陈熙琛 . 金属学报 , 1994 , 30 : 503 [Yan P X , Yang S Z , Chen X C . Acta Metals , 1994 , 30 : 503 (in Chinese)]
- [11] 阎鹏勋 杨思泽 李兵等 . 科学通报 , 1994 , 39 : 1547 [Yan P X , Yang S Z , Li B *et al.* Chinese Science Bulletin , 1994 , 30 : 1547 (in Chinese)]
- [12] Yan P X , Yang S Z . J. Vac. Sci. Technol. , 1996 , A14 : 115
- [13] Yan P X , Yang S Z , Chen X S . Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. , 1995 , B19 : 55
- [14] Yan P X , Yang S Z . Chinese Physics Letter , 1994 , 11 : 558
- [15] Yan P X , Yang S Z , Li B . Mater. Chem. & Phys. , 1996 , 45 : 167
- [16] Wei K , Fu Y , Wu X . *et al.* J. Mater. Eng. & performance , 1999 , 8 : 521
- [17] Weissmantal C . J. Vac. Sci. Technol. , 1981 , 18 : 179

2002 年第 9 期《物理》内容预告

研究快讯

声悬浮研究新进展(解文军等) .

评 述

电子体系与光子体系(徐少辉等) .

知识和进展

新型功能材料——声子晶体(齐共金) ;
二维磁结构的扫描隧道显微术研究(孙霞等) ;
非重子冷暗物质粒子观测研究(盛祥东等) ;
光学小波匹配滤波器与图形识别(吴华文等) .

物理学和高新技术

反恐怖安全检测技术的物理基础(陈心中等) .

实验技术

飞秒脉冲测量技术(王兆华等) .

讲 座

光通信中的光电子器件讲座第四讲 光通信中的波分复用技术及相关器件的原理和应用(王传林等) ;
光通信中的光电子器件讲座第四讲 现代光纤通信中的波分复用技术(忻向军等) .

物理学史和物理学家

杰出的导师赫姆霍兹及其对维恩的影响(王心芬等) .

物理教育

原子物理学课程的教学改革与实践(郭振华) .