

脉冲高能量密度等离子体材料表面改性及其应用*

冯文然[†] 陈光良 顾伟超 张谷令

范松华 刘赤子 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(pulsed high energy density plasma, PHEDP)是一项新的材料表面改性技术. 它集高电子温度、高能量密度、高定向速度于一身,在制备薄膜时具有沉积薄膜的温度低、沉积效率高、能量利用率高的优点,并兼具表面溅射、离子注入、冲击波和强淬火效应等综合效应;它可以制备纳米晶或非晶硬质薄膜,提高基底材料的表面硬度和耐磨、耐蚀性能,能够实现非金属材料表面金属化,所制备薄膜与基底之间存在很宽的混合过渡区,因此膜/基结合良好. 文章主要介绍了作者近年来在该领域的部分研究成果,简要介绍了脉冲高能量密度等离子体的原理、特点及应用. 分析了脉冲等离子体与材料相互作用的基本物理现象.

关键词 等离子体 脉冲高能量密度等离子体 综述 表面改性

Surface modification of materials by pulsed high energy density plasma and its applications

FENG Wen-Ran[†] CHEN Guang-Liang GU Wei-Chao ZHANG Gu-Ling

FAN Song-Hua LIU Chi-Zi YANG Si-Ze

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

Abstract Pulsed high energy density plasma (PHEDP) is a new technology for material surface modification which combines high electron temperature, high energy density, and high velocity. It is characterized by a low deposition temperature, high deposition efficiency, and high-energy usage during film fabrication; and is accompanied by surface sputtering, ion implantation, shock waves, and intensive quenching. The PHEDP technology can be used to prepare various nanocrystalline and amorphous hard films, with improved surface hardness and wear and corrosion resistance of the substrate. Non-metallic materials can also be metallized by this technology. The PHEDP deposited films have good adhesion between the film and substrate, which can be attributed to the wide mixed transition zone between them. In this paper we describe some of our research results in this field. The fundamental principle, characteristics and application of PHEDP are briefly reviewed, and the basic physics of the interaction between the pulsed plasma and materials is analyzed.

Keywords plasma; pulsed high energy density plasma; review; surface modification

1 引言

脉冲高能量密度等离子体(pulsed high energy density plasma, PHEDP)是在核聚变研究基础上发展起来的一项新技术,该技术最早用在热核聚变和军事高技术武器研究领域. 在 20 世纪 80 年代,强流

脉冲加速器、同轴等离子枪等所产生的脉冲大功率粒子束和高能量密度等离子体束开始被应用到材料表面改性领域^[1]. 这种方法既有激光束和电子束处理表面的优点,又能把不同的元素注入到材料表面,

* 国家自然科学基金(批准号 59871060)资助项目

2004-12-31 收到初稿 2005-03-18 修回

[†] 通讯联系人. Email: fengwr@aphy.iphy.ac.cn

可以达到多种要求. 这种方法不但能用于材料表面改性, 而且还可以作为材料表面科学研究的新手段.

脉冲高能量密度等离子体具有很高的电子温度(约 $10-100\text{ eV}$)和等离子体密度($10^{14}-10^{16}\text{ cm}^{-3}$), 以及相对较高的定向运动速度($10-100\text{ km/s}$), 能量密度可达 $1-10\text{ J/cm}^2$ [2]. 脉冲高能量密度等离子体的基本构思是, 将高能量密度等离子体, 瞬间地作用在材料表面, 可以导致材料表面出现局部急剧熔化, 紧接着急剧冷却凝固, 加热或冷却速率可达 $10^8-10^{10}\text{ Ks}^{-1}$. 因此可以在基材表面形成一层微晶或非晶薄膜, 从而达到改善材料表面性能的目的. 该技术具有沉积薄膜的温度低(可在室温下), 沉积效率高, 薄膜与基底粘结良好[远高于 CVD(化学气相沉积)和 PVD(物理气相沉积)], 高的能量利用率等优点. 并且通过改变同轴枪内、外电极材料, 工作气体种类及工艺参数, 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的薄膜. 当脉冲高能量密度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、离子注入、冲击波压力和强的热效应等综合效应[3].

2 脉冲高能量密度等离子体的原理和特点

脉冲高能量密度等离子体的产生装置是按照同轴等离子体加速器的概念来设计的[4], 其中运用了许多模型, 例如雪犁模型(snow plow model)[4,5]、燃料块模型(slug model)[6]、爆燃(deflagration)[7]及冲击波(shock wave)模型[8], 其中用得最多的是雪犁模型.

脉冲高能量密度等离子体装置如图 1 所示. 它是由快速充气电磁阀、同轴等离子体枪[9]、真空室、充放电回路等部分组成的. 等离子体枪由同轴的内电极和外电极组成, 系统的真空度可选用范围为 $1\text{ Pa}-1 \times 10^{-4}\text{ Pa}$; 快速充气电磁阀的工作电压为 $1-5\text{ kV}$, 一般选用 1.5 kV , 其功能主要用于瞬间开启, 充入气体, 然后迅速关闭; 同轴枪外电极接地, 内电极接 $1-5\text{ kV}$ 的电容器的正极.

其工作原理可简述为: 先将能量储存于电容器内, 然后在内外电极间通过电容器加一个高压, 当工作气体在脉冲电磁阀控制下快速从同轴枪底端充入时, 被高压击穿电离, 产生一个很大的脉冲电流, 使

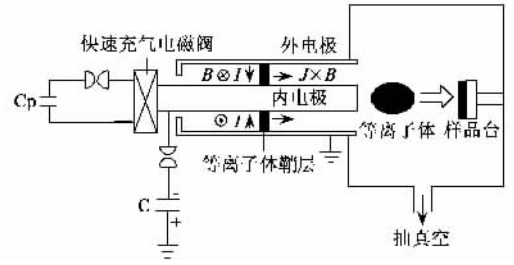


图 1 脉冲高能量密度等离子体装置示意图

气体电离形成等离子体, 同时巨大的脉冲电流使内、外电极材料表面蒸发、溅射, 形成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、外电极材料等离子体组成的. 由放电电流本身产生的洛伦兹力将所产生的等离子体加速向同轴枪出口处推进, 同时电极材料不断地被溅射出来, 形成等离子体. 在到达电极出口处的瞬间, 等离子体团自动收缩, 称作“致密等离子体聚焦”[10]. 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. 在有些情况下, 气体还作为反应物, 与电极材料发生化学反应, 合成所需薄膜材料, 沉积到基体表面.

杨思泽等[11]利用 PHEDP 技术于室温下在 45 号钢基底上沉积了 TiN 薄膜, 在假定加热及冷却过程仅受基体材料的热导率影响, 忽略熔化热以及等离子体的辐射热损失的条件, 计算了试样沿深度方向的温度分布情况, 并导出了薄膜沉积后的冷却速率.

计算结果如图 2 所示. 可以看出, 高能量密度等离子体轰击样品 $15\mu\text{s}$ 后, 基材表面温度达到熔点, 在第一个脉冲结束时, 即第 $60\mu\text{s}$, 基材内 $15-20\mu\text{m}$ 的深度熔化, 一个脉冲结束时, 表面淬火速率达 $5.0 \times 10^8\text{ K/s}$. 根据理论计算的结果, 在试样基材中应该有 $10-20\mu\text{m}$ 的快速淬火热影响区, 在此热影响区内, 晶粒会发生细化.

随后在电镜检测中观察到了与理论推导相当吻合的结果, 如图 3 所示. 图中左侧是基材, 呈树枝状粗晶粒; 中部是厚度为 $20\mu\text{m}$ 的热影响区, 在该区晶粒非常细小; 最右侧是晶粒同样细小的 TiN 薄膜. 这种由强烈的淬火效应形成的热影响区, 一方面非常有利于增强膜/基之间的结合力, 另一方面, 基材本身晶粒细化使其力学性能得到提高.

通过双探针诊断技术, 得到脉冲等离子体的运

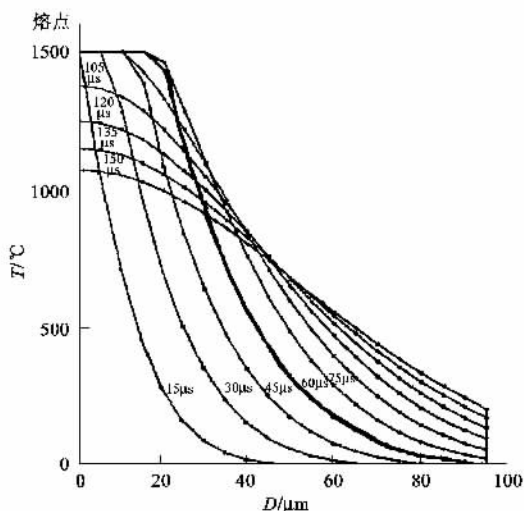


图2 充放电过程中试样温度随深度D的分布结果

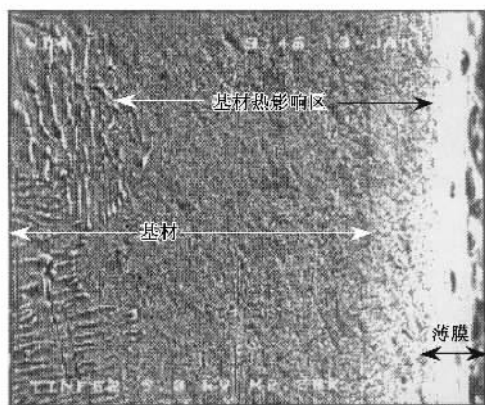


图3 45 钢基底 TiN 薄膜断面 SEM 形貌

动速度、电子温度和电子密度等参数。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。在不同的实验条件下，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。

脉冲高能量密度等离子体轰击衬底材料时，伴随着一系列复杂的物理化学过程：首先，由于能量和动量的转移，将在极短时间内引发基材局部温度迅速升高，然后温度又快速降低，形成明显的淬火效应，淬火速度可达 10^8 K/s 以上；第二，等离子体的撞击将使基底表面局部形成高的压应力状态；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。因此，脉冲高能量密度沉积薄膜和材料改性具有如下特点：局部

的微观高温高压状态使该技术能在室温条件下制备化合物及亚稳态薄膜材料；高速淬火效应可以使材料表面产生非晶及纳米晶相；离子注入效应可以提高薄膜与基底之间的结合力。

3 脉冲高能量密度等离子体沉积硬质薄膜

运用脉冲高能量密度等离子体技术，我们已在室温下在不同衬底材料上制备出性能良好的 $c\text{-BN}$ ， TiN ， $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ ， $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$ ^[12]， WC ^[13]，类金刚石等薄膜。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，在此之前国际上还没有在室温下合成较大颗粒立方氮化硼薄膜的报道。

3.1 c-BN 薄膜

阎鹏勋选用 $50\% \text{ B}_2\text{H}_2$ (或 $50\% \text{ B}_2\text{H}_6$) + $50\% \text{ N}_2$ 混合气体为工作气体，气体压力 0.12 MPa ，分别在单晶硅 (100)^[14]、氯化钠单晶和 GCr15 钢^[15] 基底上沉积得到了 $c\text{-BN}$ 薄膜。沉积时基底保持室温，放电电压选择 15 、 20 和 25 kV ，脉冲宽度为 $60 \mu\text{s}$ 。薄膜晶粒形状明显，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。单晶硅基底上 $c\text{-BN}$ 平均晶粒尺寸为 $4 \mu\text{m}$ ，钢基底上为 $1.5 \mu\text{m}$ ，而氯化钠上则仅为 $0.5 \mu\text{m}$ 。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，才能形成 $c\text{-BN}$ 。脉冲等离子体轰击基底过程中产生的微观高温高压状态，是形成 $c\text{-BN}$ 相的主要原因。由于脉冲之间有 $2 - 3 \text{ min}$ 的间隔，整个基底材料仍保持室温。不同衬底上的 $c\text{-BN}$ 晶粒尺寸不一样，是由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。同时还发现，过高的放电电压不能形成 $c\text{-BN}$ 相，只能形成非晶态的氮化硼。

3.2 TiN 及 Ti(C,N) 薄膜的沉积

TiN ， $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 等硬质膜主要的沉积技术包括： CVD ， PVD ，等离子体辅助 CVD (PACVD)，离子束沉积技术 (IBM ， IBAD) 等。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。其主要优点是沉积速率高，且膜/基之间结合强度很高。 TiN 薄膜具有高硬度、耐磨性、耐腐蚀性等很多优异性能，以及漂亮的金黄色，是工业上应用最广泛的镀膜材

料之一.利用 PHEDP 工艺,在硬质合金刀具表面制备了 TiN 薄膜,使其能够在较高的速度下切削淬硬钢,刀具的耐磨损性能很强^[16].TiN 薄膜氮化硅(Si_3N_4)陶瓷刀具也具有非常优良的性能^[17].在 $V_{\text{gun}}=3.5\text{kV}$ 和处理 5 个脉冲的条件下,TiN 薄膜的厚度约为 330nm,薄膜与基体的结合很好,纳米滑痕临界载荷最高值达 80mN;处理后陶瓷刀具的使用寿命可提高约 2—4 倍.

Ti(C,N)化合物兼具 TiN 和 TiC 两种化合物的优越性能,如具有高硬度、高耐磨和良好的自润滑性能.制备 Ti(C,N)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(C,N)薄膜的应用.用脉冲等离子体可以在室温下沉积 Ti(C,N)薄膜^[18].在制备 Ti(C,N)薄膜时,分别选用工业纯钛作内电极,石墨作外电极,工作气体选用纯度为 99.9% 的氮气,所用基体材料为抛光的 45 号钢,实验工艺参数如表 1 所示.

表 1 脉冲高能量密度沉积 Ti(C,N)薄膜实验条件

放电电压 /kV	本底真空 /Pa	电源脉宽 /μs	脉冲频率 /s ⁻¹	样品温度
3	10 ⁻³	60	10 ⁻²	室温

所得薄膜表面光滑,晶粒细小,平均晶粒尺寸约为 2μm.根据 X 射线掠入射(glancing-angle X-ray diffraction)结果,可以看出薄膜主要由 Ti(C,N)相组成,晶格常数为 4.30Å,介于 TiN 及 TiC 之间.根据样品的 AES 谱线,可以测出 Ti(C,N)薄膜的沉积效率约为 1.2μm/脉冲;同时,在薄膜和基体之间有一个很宽的过渡层,这是由离子注入效应引起的,能够有效提高膜/基之间的结合强度.

3.3 类金刚石膜

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,包含有一定比例的 sp³ 结构的碳材料和非晶碳材料都可称为类金刚石材料.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、耐磨性好等优点^[19].脉冲等离子体可以用来制备 DLC 薄膜^[20-21],内、外电极使用纯石墨,工作气体选择甲烷(CH₄)气体.在单晶硅(100)面上沉积的 DLC 薄膜晶粒平均尺寸为 25nm.红外光谱表明,DLC 薄膜中既有 sp²C—C 键又有 sp³C—C 键.在 45 号钢上沉积的 DLC 薄膜与基底具有很好的结合力,钢的表面硬度提高一倍以上.AES

和 XRD 分析结果表明,DLC 薄膜和钢基底之间存在有硬度很高的 FeC 化合物过渡层.

4 脉冲高能量密度等离子体材料表面改性

脉冲能量束包括脉冲激光束和电子束被广泛应用于材料表面改性领域.脉冲高能量密度等离子体作用在材料表面可以引起表面层的快速熔化和快速凝固,加热及冷却速度可达 10¹⁰K/s^[2].束能作用在表面层几微米之内,表面层可在极短时间内加热到几千摄氏度,随后发生快速熔化和凝固.如此高的冷却速度足以制得非晶及纳米晶相,因此,可以改变多种材料的物理及化学性能,包括非金属及金属材料,例如经 PHEDP 处理后,铸钢样品的硬度可以提高一倍^[18].

下面介绍几种典型的应用 PHEDP 技术对材料表面进行改性的研究.

4.1 陶瓷表面金属化

陶瓷表面金属化在超大规模集成电路(ULSI)及其他工业领域具有重要的作用.氧化铝和铝分别用作集成电路的基底和金属材料,但是在超微器件应用方面,由于铝的电阻率较高,难以克服其电子流动性差的问题^[22],因此,通常用铜代替铝作为金属材料^[23].目前的铜薄膜主要通过 CVD、PVD 及化学镀的方法沉积得到,但是由于铜与氧化铝基底的润湿性很差,造成膜/基结合不牢.而脉冲高能量密度等离子体在处理材料时,等离子体能够与基底材料直接发生反应,这样,制备薄膜及膜/基混合可同步实现^[2],能够有效提高膜/基结合力.荣春等^[24]利用 PHEDP 技术在氧化铝陶瓷基底上沉积了铜膜,同轴枪的内外电极都用铜,工作气体选用 Ar 气,内外电极之间电压介于 600—1000V,枪样距 30mm,每个样品处理 60 次,所制备铜膜最大厚度约为 5μm.

由图 4(a)可以看出,铜膜由形状、尺寸、分布均匀的片状铜颗粒组成.铜膜与氧化铝基底结合良好,抗氧化效果好,试样在空气中暴露 3 个月依然没有破坏的迹象.铜膜的表面电阻为 4Ω/□,3 个月后表面电阻变化很小,说明铜膜非常稳定.样品俄歇深度谱结果表明,铜膜厚约 500nm,膜/基没有明显的界面,Cu 元素在 Al₂O₃ 基底中扩散了至少 300nm 深,形成梯度混合区,如此深的混合区足以保证膜/基之

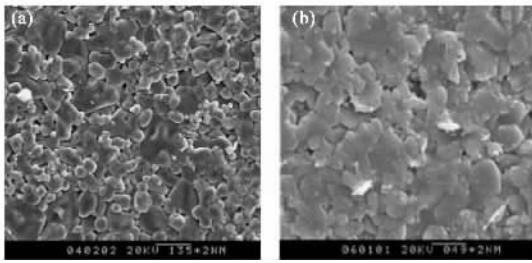


图4 未处理的氧化铝基底 (a)和氧化铝表面铜薄膜 (b) SEM 形貌

间良好的结合。

使用 Ti 电极在 Si_3N_4 基底上得到了类似的结果^[25],处理过程中 Ti - Si_3N_4 发生化学反应,在基底表面形成 TiN, Ti_5Si_3 以及游离的 Si. 同时,处理后 Si_3N_4 陶瓷能够导电,且表面电阻随处理枪压的不同而改变。

4.2 单晶硅表面金属化

金属硅化物在 ULSI 领域应用十分广泛,由于 TiSi_2 具有低电阻、热导率高以及利用钛直接自组装硅化法制备较容易等优点,它已成为应用最为广泛的硅化物^[26]. TiSi_2 通常由是 Ti 和 Si 在 550—650℃ 之间反应形成电阻率较高的底心正交点阵(C49)结构,然后在 650℃ 退火,就能得到电阻率较低的面心正交点阵(C54)结构. 而利用 PHEDP 技术则能够通过单步处理得到 C54 结构的 TiSi_2 ^[27].

研究中使用 Ti 内电极,工作气体为 Ar 气,枪压为 1.4—1.8kV,基底材料选单晶 Si. 根据处理后样品的 X 射线衍射结果,Ti 与 Si 完全反应,在合适的枪压下(1.6kV),检测到了 C54 结构的 TiSi_2 相;枪压过高(>1.8kV)时, TiSi_2 消失. 同时,文献[2]作者还研究了在不同脉宽条件下的结果. 发现在脉宽较长时,可以形成硅化物,且 Si 表面会发生重结晶现象,而在脉宽较短时,硅化物量减少,基底表面出现多晶 Si.

图 5 为在枪压 1.9kV 条件下处理 10 次的样品表面形貌(脉宽 29 μs),晶粒尺寸约为 40—70nm,且尺寸分布较均匀,形状较规则,是典型的纳米晶薄膜材料。

4.3 高分子材料表面金属化

高聚物表面金属化不仅可以提高高分子材料的表面硬度和耐磨性^[27],而且可以提高其抗腐蚀性和导电^[28]等性能. 鲍春莉^[29]等利用 PHEDP 技术轰击高密度聚乙烯(HDPE)薄膜表面,使之金属化。

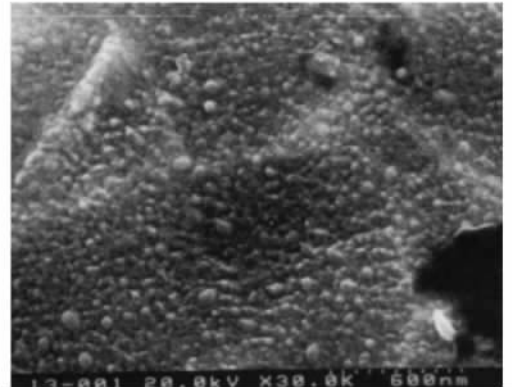


图5 重结晶 Si 样品表面 SEM 形貌

PHEDP 技术的突出特点是能在室温条件下产生气体等离子体,激发同轴金属电极溅射出金属原子,在加速电磁场的作用下形成混合等离子体,轰击注入到材料表面,达到高聚物表面金属化的目的. 研究结果发现,经不同脉冲次数的 Al 等离子体轰击注入高聚物表面,引起 HDPE 薄膜表面微结构的不同变化. 随着等离子体轰击脉冲次数的增加,薄膜表面结构经历了表面非晶化、沟槽结构直至近似网络结构的发展过程,并且 Al 等离子体轰击处理也可使 HDPE 发生交联反应。

鲍春莉^[30]使用 Al/Al 及 Cu/Pb(内/外)电极研究了聚丙烯(PP)表面经 PHEDP 轰击后的微观结构和电学特性. 经 Al 原子在 3.5kV 枪压下轰击后,PP 表面镶嵌着很多粒径在 50—100nm 的球形 Al 颗粒,以及微米量级的孔洞,这些孔洞是由于在轰击时,金属原子与 PP 表面作用的瞬时温度远远高于其熔点所致;Cu 或 Pb 原子轰击后,表面的金属颗粒约为 100—200nm. 通过观察样品的断口形貌,发现金属原子已经注入到基底内部. 在 3.5kV 枪压下轰击后,PP 样品的表面电阻分别为 4.6 $\times 10^{14} \Omega/\square$ (Al/Al 电极)和 1.1 $\times 10^{12} \Omega/\square$ (Cu/Pb 电极),较处理前降低了 3—6 个数量级。

4.4 金属材料表面改性

TiNi 形状记忆合金是一种效果很好的生物医学材料,但是由于其耐腐蚀性能不如不锈钢及 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金,限制了它的应用^[31]. 傅莺^[32]等应用 Ti、N 脉冲等离子体对 TiNi 合金进行了表面改性处理,在基底表面制备了一层耐蚀性很好的 TiN 薄膜,TiN 膜对合金本身的形状记忆效应影响甚微. TiN 薄膜的耐蚀性与膜内的孔隙率和膜/基界面性能有关^[33],

由于 PHEDP 的强淬火作用,所制备的薄膜大多都是由纳米晶构成,因此, TiN 薄膜的孔隙率很低,同时,膜/基结合力也很强.作者分别研究了处理后的和未处理的 TiNi 合金在 2% 浓度的 NaCl 及 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸溶液中的极化曲线,结果发现,在 NaCl 溶液中,处理后样品的腐蚀电流密度较未处理样品减少了一个数量级,并且前者电流密度随电位增加得较后者缓慢,前者在电流密度约为 $10^{-7.25} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时出现钝化现象,后者则没有钝化.这说明经 PHEDP 表面改性处理后, TiNi 合金的耐蚀性增加了一个数量级.对于硫酸溶液而言,处理后的样品由于表面有 TiN 膜而自动钝化,因此 TiN 膜作为钝化膜阻止腐蚀液中离子入侵基体.

韦颀^[34]研究了高能量密度等离子体改性 45 号钢的硬度及显微结构的变化, Ti, N 等离子体改性处理后, 45 号钢的表面硬度可以提高 6 倍;处理后钢表面形成一层厚约 $1 \mu\text{m}$ 的薄膜.经透射电镜(TEM)检测发现薄膜由 TiN, $\text{Ti}_2\text{N}(\alpha)$, $\text{Ti}_2\text{N}(\beta)$ 及 FeTi 等相构成,这些硬质相是 45 号钢硬度增加的主要原因;同时,薄膜都是由尺寸为 10—30nm 的颗粒构成的.离子注入效应与基底快速熔化及快速凝固共同作用,导致了基底表面多相薄膜的形成.在 PHEDP 表面改性过程中,大量具有很高能量密度的活性 Ti 及 N 颗粒注入到 45 号钢样品表面,使样品表面局部熔化,加剧了颗粒的反应和在表面的扩散过程.与氮相比,钛元素的扩散率较低,因此 $\text{Ti}_2\text{N}(\alpha)$, $\text{Ti}_2\text{N}(\beta)$ 等富钛相只在薄膜表面附近存在, TiN 则不同,在薄膜内部仍然存在,这是因为 TiN 的化学成分范围较宽^[35].由于 PHEDP 的轰击作用而从 45 号钢基底溅射出来的 Fe 原子与注入的 Ti 颗粒发生反应,形成 FeTi 相,这也是 PHEDP 技术膜/基结合力高的主要原因.

5 结束语

近年来,在材料表面改性领域,各种脉冲能量束受到广泛关注^[36],许多研究成果已经应用到工业生产中.脉冲高能量密度等离子体,作为一项新的材料表面处理和薄膜制备技术,已经成为充分发挥现有材料潜能和制备新材料的一个重要途径,并显示出它在材料科学中的独特作用. PHEDP 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,能够同时完成薄膜沉积和基底材料的改性处理; PHEDP 与材料表面作用,能够引起表面晶粒细化、表面非晶

化,提高整个材料的强度; PHEDP 材料表面改性及镀膜可在室温条件下实施,可有效避免由于基体变形过量而导致废品率升高的问题.总之,脉冲高能量密度等离子体材料表面处理有着非常广阔的应用前景.

目前,我们正致力于利用该项技术处理地铁施工用盾构刀具的研究.根据盾构刀具的服役条件,制备出耐磨、耐腐蚀、抗冲击韧性优异的薄膜材料,以显著提高盾构刀具的使用寿命,大幅度降低地铁隧道的施工成本,努力促进盾构刀具的国产化.

限制 PHEDP 材料表面改性应用的主要障碍是该体系非常复杂,还有一些问题有待深入研究.因此,建立更加准确的数学、物理模型,对于该技术的进一步完善及其工业应用具有重要的意义.

参 考 文 献

- [1] 沈志刚,李椿萱,吴成等.材料科学与工程,1989,7:39[Shen Z G, Lee C X, Wu C *et al.* Material Sciences and Engineering, 1998, 7: 39(in Chinese)]
- [2] Liu B, Liu C Z, Cheng D J *et al.* Thin Solid Films, 2001, 390: 149
- [3] Yan P X, Hui P, Zhu W G *et al.* Surf. Coat. Tech., 1998, 102: 175
- [4] Butler T D, Henins I, Jahoda F C *et al.* Phys. Fluids, 1969, 12: 1904
- [5] Philip J H. Phys. Fluids, 1962, 5: 38
- [6] Wyld H W. J. Appl. Phys., 1958, 29: 1460
- [7] Lindhart J G. Nucl. Fusion, 1961, 1: 78
- [8] Woodalland D M, Len L K. J. Appl. Phys., 1985, 57: 961
- [9] Marshall J. Phys. Fluids, 1960, 3: 134
- [10] Mather J W. Phys. Fluids, 1965, 8: 366
- [11] Yang S Z, Wu C, Li B *et al.* Strong adhesive Titanium Nitride on 45# steel substrate. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Bonding and Sealing Technology. Swiss, 1996, 121
- [12] 刘元富,张谷令,王久丽等.物理学报,2005,54(3):1301 [Liu Y F, Zhang G L, Wang J L *et al.* Acta Physica Sinica, 2005, 54(3): 1301(in Chinese)]
- [13] Liu Y F, Feng W R, Zhang G L *et al.* TiN and WC Coatings Prepared by Pulsed High Energy Density Plasma. In: Boris Kovalchuk and Gennady Remnev. Proceedings of the 7th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia, 2004, 427
- [14] Yan P X, Yang S Z, Li B *et al.* J. Crystal Growth, 1995, 148: 232
- [15] Yan P X, Yang S Z. Appl. Surf. Sci., 1995, 90: 149
- [16] 苗赫濯,彭志坚,杨思泽等.陶瓷科学与艺术,2003,5:4 [Miao H Z, Peng Z J, Yang S Z *et al.* Ceramics Engineering, 2003, 5: 4(in Chinese)]

- [17] Peng Z J , Miao H Z , Wang W *et al.* Surf. Coat. Tech. 2003 , 166 :183
- [18] Yan P X , Yang S Z , Liu B *et al.* Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B , 1995 95 :55
- [19] Heimberg J A , Waahl K J , Singer I L *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 78 :2449
- [20] Yan P X , Yang S Z , Li B *et al.* Mater. Chem. Phys. , 1996 , 45 :167
- [21] 杨武保 , 范松华 , 刘赤子等. 物理学报 , 2003 , 52 :140 [Yang W B , Fan S H , Liu C Z *et al.* Acta Physica Sinica 2003 52 : 140(in Chinese)]
- [22] Akbulut H , Inal O T. J. Mater. Sci. , 1998 33 :1189
- [23] Mak C Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1991 59 :3449
- [24] Rong C , Zhang J Z , Liu C Z *et al.* Appl. Surf. Sci. 2002 , 200 :104
- [25] Liu B , Zhang J Z , Chen H F *et al.* Mater. Chem. Phys. , 1999 57 :219
- [26] Colgan E G , Gambino J P , Hong Q Z. Mater. Sci. Engi. R , 1993 16 :43
- [27] Pivin J C *et al.* Thin Solids Films , 1993 263 :185
- [28] Nguyen T P *et al.* Synthetic Metals , 1995 72 :35
- [29] 鲍春莉 , 杨思泽 , 刘赤子等. 电子显微学报 , 1992 , 18 :611 [Bao C L , Yang S Z , Liu C Z *et al.* J. Chinese Electron Microscopy Society , 1992 , 18 :611(in Chinese)]
- [30] Bao C L , Xu D F , Yang S Z *et al.* Mater. Chem. Phys. , 1999 , 61 :163
- [31] Assad M , Berneche S , Desrosiers E A *et al.* Ann. Chir. , 1994 48 :731
- [32] Fu Y , Wu X F , Wang Y *et al.* Appl. Surf. Sci. 2000 , 157 : 167
- [33] Penttinen I M , Korhonen A S , Harju E *et al.* Surf. Coat. Tech. , 1992 50 :161
- [34] Wei K , Wu X F , Yang S Z *et al.* Mater. Sci. Engi. A , 1998 , 254 :129
- [35] Massalski T B , Thaddeus B *et al.* (Eds.) , Binary Alloy Phase Diagrams. American Society for Metals. Metals Park , OH , 1986. 1655
- [36] Shimotori Y , Yokoyama M , Harada S. J. Appl. Phys. , 1988 , 63 :968

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
微分几何入门与广义相对论(上 第二版)	梁灿彬 , 周彬	¥59.00	2005年12月	0-2363
液晶物理与液晶显示	王新久	估计 65.00	2005年12月	
量子信息物理原理	张永德	¥59.00	2005年12月	0-2347
相互作用的规范理论	戴元本	估计 65.00	2005年6月	0-2148
计算物理学	马文淦	¥37.00	2005年5月	0-2147
计算电磁学要论	盛新庆	¥32.00	2005年3月	0-1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	¥120.00	2005年5月	0-2093
计算声学——声场的方程和波	李太宝	¥38.00	2005年1月	0-2016
半导体量子器件物理	傅英 , 陆卫	¥50.00	2005年1月	0-2004
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005年1月	0-1830
物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元 , 侯伯宇	¥98.00	2005年3月	0-1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2005年2月	0-1952
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004年8月	0-1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光 , 傅恒志	¥42.00	2004年8月	0-2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明 , 孙兆奇	¥56.00	2004年7月	0-1942
软 X 射线射线与极紫外辐射的原理和应用	张杰	¥59.00	2003年9月	0-1682
现代压电学(上中下)	张福学	¥99.00	2003年5月	
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光照	¥48.00	2003年5月	0-1301
应用力学对偶体系	钟万勰	¥42.00	2003年3月	0-1542
广义相对论和引力场理论	胡宁	¥15.00	2003年3月	0-1157

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向, 请和我们联系. 凡购书者均免邮费, 请按以下方式和我们联系:

电 话 : 010 - 64017957 64033515 电子邮件 : mlhukai@ yahoo. com. cn 或 dpyan@ cspg. net

通讯地址 : 北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 邮政编码 : 100717 联系人 : 胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>