

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181201001

新型多弧磁过滤系统对 TiAlN 薄膜的组分调控

黄杰^{1,2}, 史学伟^{1,2}, 廖斌^{1,2}, 吴先映^{1,2}

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875; 2. 北京市辐射中心, 北京 100875)

摘要: 针对磁过滤阴极真空电弧沉积技术制备多元复合薄膜的不足, 设计研制一种新型的多弧磁过滤系统。该多弧磁过滤系统由两个支线管和一个干线管组成“Y”型的三通管结构。通过有限元分析和试验测量确定该新型多弧磁过滤器的最佳运行参数为: 支线管和干线管的长度分别为 180 和 230 mm, 内径为 200 mm。支线管和干线管的磁场强度分别为 40 和 90 mT。采用该新型多弧磁过滤系统制备 TiAlN 多元复合薄膜, 结果表明: 该新型多弧磁过滤系统可实现多元复合薄膜的组分调控, 并且膜层的表面形貌光洁, 膜层元素分布均匀。

关键词: 多元复合膜; 磁过滤; 阴极真空电弧; 组分调控

中图分类号: TG174.444

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0027-07

Composition Control of TiAlN Thin Film by A Novel Multi-arc Magnetic Filter System

HUANG Jie^{1,2}, SHI Xuewei^{1,2}, LIAO Bin^{1,2}, WU Xianying^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

Abstract: A novel multi-arc magnetic filter system was designed and developed, which ensured the widely application of cathode vacuum arc technology in the field of preparing multi-component composite films. The optimal parameters of the multi-arc magnetic filter were determined by finite element analysis and experimental measurement. The lengths of the branch pipe and main pipe were 180 and 230 mm, respectively, and the inner diameter was 200 mm. The magnetic field strengths of the branch pipe and the main pipe were 40 and 90 mT, respectively. The TiAlN multi-component composite films were prepared by the system. The results show that the novel multi-arc magnetic filter system can adjust the composition of the multi-component composite films, the surface of the films layer is smooth and the film elements are evenly distributed.

Keywords: multi-component composite films; magnetic filter; cathode vacuum arc; component regulation

0 引言

多元复合薄膜比单一组分薄膜具备更加优良的力学、光学和电学性能, 其应用领域也越来越广泛^[1-5]。以 TiAlN 三元复合薄膜为例, TiAlN 比 TiN 具有更高的硬度、更好的抗摩擦磨损性能、更优异的高温稳定性和抗氧化性能^[6-9]。TiAlN 和 TiN 的晶格结构相似, Al 元素的加入替代了原有位置上的 Ti, 这种结构具有固溶强化的效果^[10], Al 原子替代 Ti 原子的比例直接决定了 TiAlN 三元复合薄膜的性能。因此多元复合薄膜中各组分的

相对含量和膜层元素的均匀性分布直接关系到薄膜的性能。对膜层中各元素组分的调控和膜层元素的均匀性分布控制是制备多元复合薄膜的关键。

目前, 文献报道的 TiAlN 三元复合薄膜的制备工艺主要有磁控溅射^[11-12]、阴极真空电弧沉积^[13-15]。采用磁控溅射工艺制备 TiAlN 薄膜需要 Ti/Al 合金溅射靶材, 合金靶材通常采用粉末冶金的方法制备, 这样制备的合金靶材具有固定的 Ti/Al 成分比, 使得膜层元素的组分不可实时调控, 并且合金靶材制作困难、成本高昂。阴极真

收稿日期: 2018-12-01; 修回日期: 2019-03-12

通信作者: 廖斌(1984—), 男(汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 材料表面改性; E-mail: liaobingz@bnu.edu.cn

引用格式: 黄杰, 史学伟, 廖斌, 等. 新型多弧磁过滤系统对 TiAlN 薄膜的组分调控[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 27-33.

HUANG J, SHI X W, LIAO B, et al. Composition control of TiAlN thin film by a novel multi-arc magnetic filter system[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 27-33.

空电弧沉积具有离化率高、沉积速率快等优点。尽管阴极真空电弧存在大颗粒污染的问题,但是加装磁过滤系统可以很好的解决大颗粒污染的问题。因此磁过滤阴极真空电弧沉积技术广泛应用于各种硬质、功能薄膜、多层薄膜的制备。采用磁过滤阴极真空电弧技术制备多元复合薄膜一般有两种方案:一是和磁控溅射一样采用合金靶,这同样也受到合金靶成分比不可实时调控的限制;二是使用多个单质靶材,多套沉积系统,在基体上交替沉积。这样制备的多元复合薄膜存在组分分布不均,薄膜成分具有分层结构,且工艺复杂。

为了克服以上两种方案的不足,针对磁过滤阴极真空电弧沉积技术制备 TiAlN 膜层的需要,文中设计研制了一种新型磁过滤系统,该系统简单易操作。使用该系统在制备 TiAlN 三元复合薄膜时不仅可以对薄膜组分进行实时调控,薄膜表面光洁度较好,而且膜层中元素分布均匀。

1 理论模型

阴极真空电弧产生的等离子体束包含电子、离子、中性原子和大颗粒。其中离子作为薄膜的成膜粒子是所需要的粒子。而中性原子和大颗粒是不被需要的粒子,应尽量剥离,特别是大颗粒,对薄膜具有致命的污染和损伤,应尽可能的完全避免。从阴极真空电弧等离子体中剥离大颗粒的方案主要有两个思路:一是从等离子体产生源头剥离,二是在等离子体传输过程中剥离。阴极真空电弧产生等离子体的物理机制决定了其必然产生大颗粒^[16-17],所以在等离子体传输过程中剥离大颗粒成为研究的重点。目前,使用弯曲通电螺线管作为等离子体的传输导管是剥离阴极真空电弧等离子体中的大颗粒最行之有效的办法^[18]。

等离子体在电磁场中的运动即电荷粒子(电子、离子)在电磁场中的运动,运动规律由式(1)给出:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = Qe(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

v 是粒子的速度, m 和 Q 是粒子的质量和电荷态, e 是元电荷, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别是电场强度和磁感应强度。将等离子体在电磁场中的运动简化为最简单的模型,即只考虑等离子体受外电场和外磁场的影响,忽略等离子体自身电场和磁场的耦合。等离子体在外部电磁场的作用下将会被磁

化。被磁化后等离子体中的带电粒子将会在电磁场的作用下做拉莫尔(Larmor)回旋运动,运动半径由式(2)表达^[19]:

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} \quad (2)$$

式中, r_L 拉莫尔回旋半径, v_{\perp} 是垂直于磁场 \mathbf{B} 方向的速度, ω_c 是拉莫尔回旋频率。回旋频率由式(3)给出:

$$\omega_c = Qe\mathbf{B}/m \quad (3)$$

对于等离子体中的电子,其速度分布近似于麦克斯韦分布,在垂直方向上的速度分布由式(4)给出:

$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}} \quad (4)$$

等离子体在一个过滤器中传输,必须满足带电粒子的拉莫尔回旋半径远远小于过滤器的物理尺寸 r_{filter} , 即:

$$r_L = \sqrt{\frac{2kTm}{\pi}} / Qe\mathbf{B} \ll r_{\text{filter}} \quad (5)$$

因此过滤器的磁场由式(6)给出:

$$\mathbf{B} \gg \frac{\sqrt{2kTm}}{\sqrt{\pi}Qer_{\text{filter}}} \quad (6)$$

简单的计算表明:对于过滤器典型的磁场范围为:10 mT < \mathbf{B} < 100 mT, 进而计算表明电子的拉莫尔回旋半径在几百微米量级,离子的拉莫尔回旋半径在几十厘米量级。因此,在过滤器中电子将会被磁化,离子和中性原子不会被磁化。被磁化了的电子在过滤器中回旋前进,牵引着离子从引出口引出。而不带电的中性原子和大颗粒不受磁场的影响,打在过滤器的壁上而剥离掉。

2 磁过滤器设计

磁过滤器的设计需要遵循以下两个原则^[20]:一是视线外原则:过滤管道需要一定的曲率,不能让大颗粒直接到达工件表面,污染工件;二是传输效率原则:在保证原则一的基础上,尽量提高等离子体的传输效率。对于多元复合薄膜磁过滤器的设计不仅要满足以上两个原则,还要保证能够对各个元素成分比进行实时调控,且从过滤器引出口引出的等离子体离子混合均匀,大颗粒

较少。从而使得制备的多元复合薄膜元素成分比可控,膜层内元素分布均匀,薄膜表面光洁度较好。

根据以上规则,设计加工的多弧磁过滤系统原理图如图1所示。

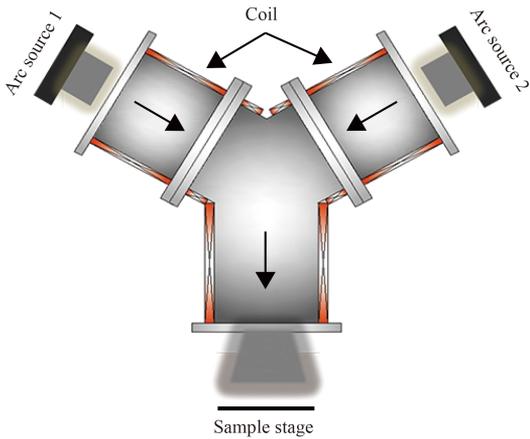


图1 多弧磁过滤系统原理图

Fig.1 Schematic of multi-arc magnetic filter system

该套多弧磁过滤装置主要由两个阴极弧源和一个三通管式样的磁过滤管道组成。磁过滤管道采用不锈钢制作,由两个支线管(等离子体引入管)和一个干线管(等离子体引出管)组成,彼此成 120° 夹角,通过连接法兰连接而成Y型。管道外绕制通电线圈,构成通电螺线管。法兰之间用橡皮圈密封且在法兰内设计有冷却水回路。该新型多弧磁过滤装置能够在支线管上装配两个阴极弧源同时工作。等离子体由两个弧源同时产生,在支线管磁场的作用下,等离子体经过滤和引导,两束等离子体汇聚进入干线管,再经干线管磁场过滤和引导后进入真空靶室,在样品台沉积成膜。图1中为等离子体的运动方向和汇聚情况。

要满足磁过滤器的设计原则,过滤器的机械尺寸和磁场强度分布需要合理匹配。对于该新型多弧磁过滤器,如果支线管与干线管机械尺寸太短,不但不能满足视线外原则,还不能形成均匀的磁场分布。如果支线管与干线管机械尺寸太长,虽然能满足视线外原则,但是等离子体的传输效率降低。另外,该过滤器支线管与干线管的磁场匹配也对等离子体的传输效率起着决定性的作用。

依据试验所采用的内径为200 mm的阳极筒,设计的磁过滤器内径也为200 mm。支线管与干线管的几何尺寸关系着过滤器内磁场是否均匀分布。获得均匀分布的磁场有利于阴极弧源的稳

定运行。为了对该新型多弧磁过滤器进行优化设计,采用有限元分析的方法,确定了合理的支线管与干线管的几何尺寸和均匀的磁场分布,其结果如图2所示。从图2可知,当支线管和干线管的长度分别为180和230 mm时,过滤器不仅满足视线外原则,而且过滤器内磁场对称均匀分布。

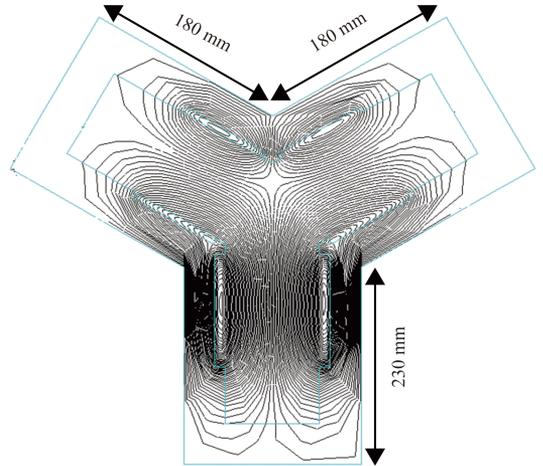


图2 多弧磁过滤器的几何尺寸和磁场分布

Fig.2 Geometric size and magnetic field distribution of multi-arc magnetic filter

一个磁过滤器的过滤效果通常采用过滤系数 k_{eff} 来表征。过滤系数是指从过滤器引出的离子数量与进入过滤器的离子数量之比,即:

$$k_{\text{eff}} = N_{\text{exit}}/N_{\text{enter}} \quad (7)$$

但进入过滤器的离子数量和引出的离子数量都难以测量,所以过滤器的过滤系数难以获得真实的测量值。实际工作中通常采用系统系数 k 来表征过滤器的过滤效率。系统系数可以通过引出等离子体的离子电流与离子源的弧流来定义^[20]:

$$k = I_i/I_{\text{arc}} \quad (8)$$

该多弧磁过滤器的系统系数可以通过固定弧流,测量引出等离子体的离子电流来确定,离子电流越大,表明过滤器的传输效率越高。引出等离子体的离子电流可以采用一个吸收电极来测量。经过磁过滤管道过滤后的等离子体到达吸收电极将形成一个电流,假设离子到达吸收电极全被吸收,那么该电流为等离子体的离子电流。

通过试验确定了该多弧磁过滤系统最大传输效率时所需要的磁场大小。在试验过程中,阴极弧源分别为Ti和Al同时工作,固定弧流为100 A,

施加在过滤器上的全管正偏压为 24 V。试验中发现当支线管磁场为 40 mT 时, 磁过滤器具有最大的传输效率, 事实上, 适当提高支线管的磁场在一定程度上能继续增加传输效率, 但是, 支线管连接着弧源, 继续增加支线管的磁场, 对弧源的稳定工作具有一定的影响。对比支线管的磁场分别为 30 和 40 mT 时, 离子电流 I_i 随干线管磁场大小的变化如图 3 所示。

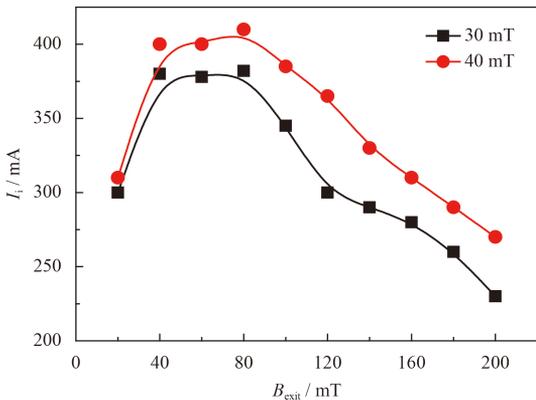


图 3 离子电流 I_i 随干线管磁场大小的变化

Fig.3 Ion current I_i varied with magnetic field of the main pipe

由图 3 可知, 当支线管的磁场分别为 30 mT、40 mT 时, 离子电流 I_i 随干线管磁场的增加。此呈现出先增加后减小的趋势。因此, 当支线管的磁场取 40 mT、干线管的磁场取 90 mT 时, 该多弧磁过滤器具有最大的传输效率。

综上, 设计研制的多弧磁过滤器的最优参数为: 支线管和干线管的长度分别为 180 和 230 mm, 支线管和干线管的磁场分别为 40 和 90 mT。在这样的参数下, 该多弧磁过滤器不仅满足两个基本原则, 而且弧源能够稳定工作。

采用文中设计研制的多弧磁过滤系统沉积 TiAlN 复合薄膜的装置如图 4 所示。该装置能够保证两个弧源同时独立工作, 互不干扰。Ti 和 Al 两个弧源分别产生相应元素的等离子体, 分别进入磁过滤器, 各元素等离子体在磁场的引导下共同进入过滤器的引出端, 在等离子体传输过程中进行充分混合和过滤, 并且电离 N_2 , 使得 N 离子也加入混合。充分混合后的多元素等离子体最后均匀沉积在样品表面, 形成 TiAlN 复合薄膜。实验中, 其它实验条件为: 样品台距离干线管引出端 100 mm, 样品台偏压为 -100 V, 靶室温度保持在 200 °C, 薄膜基底为硅 (100) 面, 过滤器全管正偏压为 24 V。如图 4 所示, 样品从上到下依次编号 (No.1~9), 便于分析。

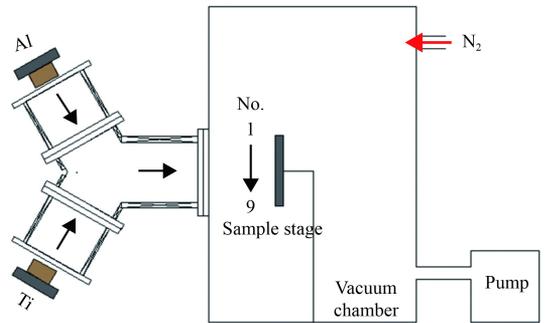


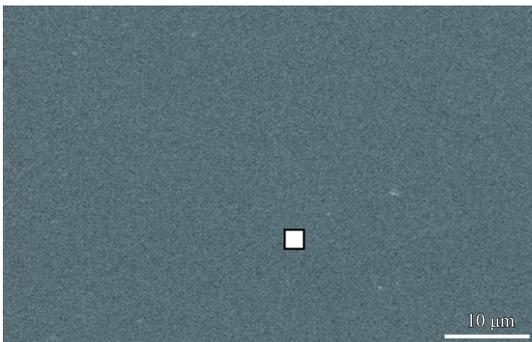
图 4 TiAlN 复合薄膜沉积装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of deposition device of TiAlN composite film

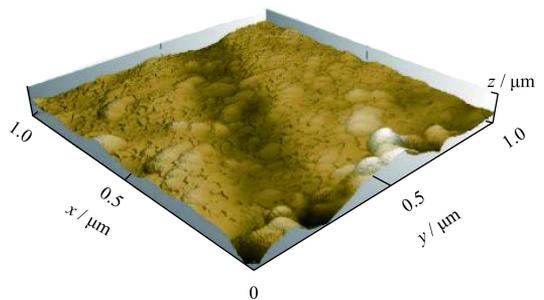
3 结果与分析

3.1 形貌分析

图 5 为多弧磁过滤器对大颗粒的过滤效果和微区表面形貌。从图 5(a)SEM 照片可知, 该新型



(a) Macroscopic particles removed by the multi-arc magnetic filter (SEM)



(b) Micro-area surface morphology (AFM)

图 5 多弧磁过滤器对大颗粒的过滤效果和微区表面形貌

Fig.5 The result of macroscopic particles removed by the multi-arc magnetic filter and micro-area surface morphology

多弧磁过滤系统能够很好的过滤掉等离子体中的大颗粒。制备的 TiAlN 复合薄膜表面光洁度较好, 膜层质量较高。通过原子力显微镜 (AFM) 对薄膜进行微区表面形貌测量, 结果如图 5(b) 所示。AFM 测量结果表明薄膜的表面粗糙度为 23.47 nm。

3.2 组分调控

图 6 为弧流与离子电流的关系。由图可知, 弧流与离子电流具有极强的线性关系。通过调节弧源的弧流可以调节相应的离子电流大小, 从而调节混合等离子体中元素的成分比, 进而调节 TiAlN 复合薄膜中 Ti 原子和 Al 原子的成分比。

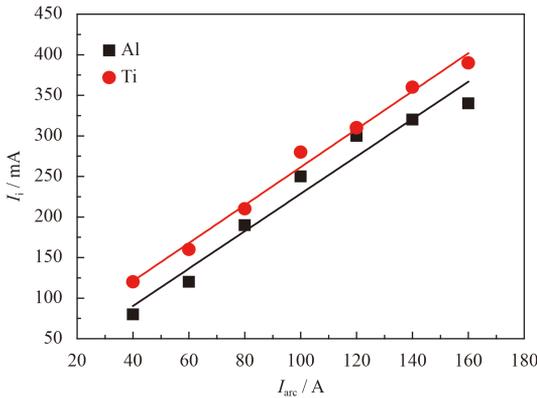


图 6 弧流与离子电流的关系

Fig.6 Ion current as a function of arc current

试验验证了通过调节 Ti 和 Al 的弧流来控制 TiAlN 复合薄膜中 Ti 和 Al 的成分及均匀性, 采用 EDS 测量图 4 中 1-9 号试样薄膜中各元素的原子数分数。N₂ 流量为 30 mL/min 的试验结果 (图 7) 表明: N 元素在 TiAlN 复合薄膜中的原子数分数占比较高, 达到 50% 左右。随着 Ti 和 Al 弧流的

比值增加, Ti 元素的原子数分数在 TiAlN 复合薄膜中占比增加, 相应的 Al 元素的原子数分数在 TiAlN 复合薄膜中占比减少。特别是当 Ti 弧流为 100 A, Al 弧流为 60 A 时, TiAlN 复合薄膜中, Ti 元素的原子数分数已经大于 Al 元素的原子数分数。当相同弧电流下 Ti 和 Al 的组分比例不同, 主要受材料的熔点影响, Al 元素的熔点远低于 Ti 元素, 导致在相同弧电流下, Al 元素的原子数分数大于 Ti 元素的原子数分数。

当 N₂ 流量为 100 ml/min 时结果如图 8 所示。制备的 TiAlN 复合薄膜中 N 元素原子数分数占比达到 60% 左右。这是因为随着 N₂ 流量的增加, 等离子体中 N 离子增加。与图 7 所示的结果相同, 即随着 Ti 和 Al 弧流的比值增加, Ti 元素的原子数分数在 TiAlN 复合薄膜中占比增加, 相应的 Al 元素的原子数分数在 TiAlN 复合薄膜中占比减少。样品台上不同位置的样品中 Ti、Al 和 N 元素的成分比能够很好的保持一致, 相同元素在不同位置上的原子数分数相差在 5% 以内。表明 Ti、Al、N 这 3 种元素在样品台上的分布均匀。有 3 个因素保证了 Ti、Al、N 3 种元素在样品台上的分布均匀。一是试验中 N₂ 流量较大, N₂ 分子弥漫在整个真空腔, 使得等离子体中离子的平均自由程缩短, 粒子之间更加频繁的碰撞和电离导致各元素的等离子体混合更加均匀; 二是样品台采用旋转靶台; 三是样品台距离引出口较远, 保证了等离子体充分自由扩散。

综上所述表明, 采用该多弧磁过滤沉积系统制备 TiAlN 复合薄膜能够调控膜层中元素的成分比, 并且膜层中各元素分布均匀, 制备的 TiAlN 复合薄膜表面光洁。

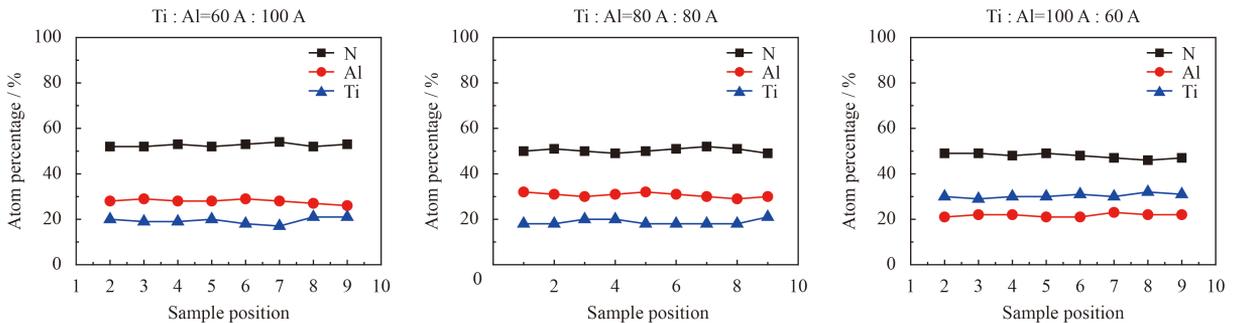


图 7 N₂ 流量为 30 mL/min 时薄膜中元素的成分比

Fig.7 Composition ratio of the elements in the film with the N₂ flow rate of 30 mL/min

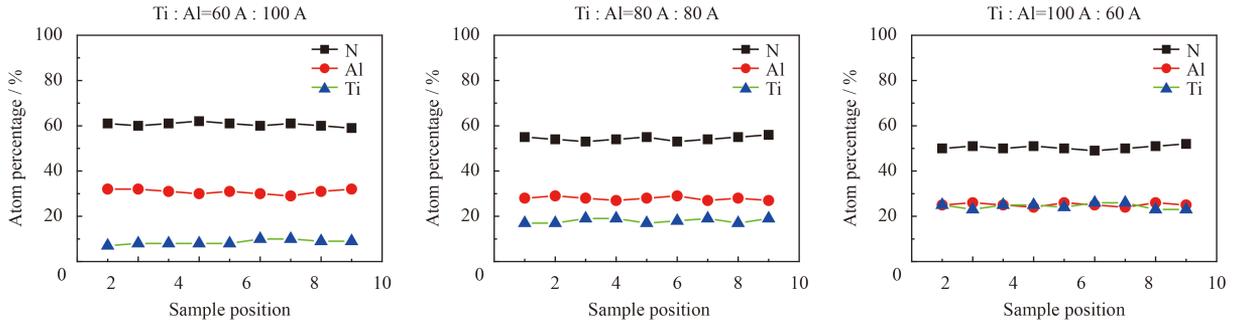


图8 N_2 流量为 100 mL/min 时, 薄膜中元素的成分比

Fig.8 Composition ratio of the elements in the film with the N_2 flow rate of 100 mL/min

4 结论

(1) 针对现有技术制备多元复合薄膜存在合金靶制作困难、薄膜组分不可调控、薄膜元素分布不均等不足, 设计加工了一套新型多弧磁过滤阴极真空电弧沉积系统来制备多元复合薄膜。该系统主要由一个 Y 型磁过滤器组成, 能够装配两个弧源同时独立工作。

(2) 通过有限元分析和试验确定了该多弧磁过滤器的最优几何尺寸为: 过滤管道内径 200 mm, 支线管和干线管的长度分别为 180 和 230 mm。支线管和干线管的磁场强度分别为 40 mT, 90 mT。

(3) 采用 Y 型磁过滤系统制备了 TiAlN 三元复合薄膜。该 Y 型多弧磁过滤器能够很好的移除等离子体中的大颗粒, 制备的薄膜表面光洁度高。通过调节 Ti、Al 两弧源的弧流可以调节薄膜中 Ti、Al 两元素的成分比, 实现对元素比例的调控, 并且制得的薄膜元素分布均匀, 薄膜质量较高。

参考文献

[1] KOLLER C M, HOLLERWEGER R, SABITZER C, et al. Thermal stability and oxidation resistance of arc evaporated TiAlN, TaAlN, TiAlTaN, and TiAlN/TaAlN coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014(259): 599-607.

[2] NAM N D, VAKA M, HUNG N T. Corrosion behavior of TiN, TiAlN, TiAlSiN-coated 316L stainless steel in simulated proton exchange membrane fuel cell environment[J]. *Journal of Power Sources*, 2014(268): 240-245.

[3] BARSHILIA H C, RAJAM K S. A raman-scattering study on the interface structure of nanolayered tialn/tin and tin/nbn multilayer thin films grown by reactive magnetron sputtering[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(1): 14311.

[4] HARRIS S G, DOYLE E D, VLASVELD A C, et al. Dry cutting performance of partially filtered arc deposited titani-

um aluminium nitride coatings with various metal nitride base coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2001 (146): 305-311.

- [5] SHANG H F, LI J, SHAO T M. TiaAlN/Ta 多层膜的力学性能及热稳定性取得新进展[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(6): 141.
- SHANG H F, LI J, SHAO T M. New progress in mechanical properties and thermal stability of multilayer films[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(6): 141 (in Chinese).
- [6] WEBER F R, FONTAINE F, et al. Bock. Cathodic arc evaporation of (Ti, Al)N coatings and (Ti, Al)N/TiN multilayer-coatings—correlation between lifetime of coated cutting tools, structural and mechanical film properties[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2004(177): 227-232.
- [7] MAYRHOFER P H, HORLING A, KARLSSON L, et al. Self-organized nanostructures in the Ti-Al-N system[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(10): 2049-2051.
- [8] 冯长杰, 陈恩. 电弧离子镀 TiAlN、TiAlSiN 涂层在高温及变温环境中的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(5): 17-27.
- FENG C J, CHEN E. Tribological properties TiAlN and TiAlSiN coatings by arc coating in high temperature and variable temperature environments[J]. *China surface engineering*, 2017, 30(5): 17-27 (in Chinese).
- [9] 曾琨, 邹长伟, 郑军, 等. 电弧离子镀 TiAlN 和 TiAlSiN 涂层的高温摩擦磨损行为[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(6): 28-38.
- ZENG K, ZHOU C W, GUI B H, et al. High temperature friction and wear behavior of TiAlN and TiAlSiN coatings deposited by arc ion plating[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(6): 28-38 (in Chinese).
- [10] PRENGRL H G, SANTHANAM A T, et al. Advanced PVD-Ti Al N coatings on carbide and cermet cutting tools[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1997(94): 597-602.
- [11] MADAN A, KIM I W, CHENG S C, et al. Stabilization of cubic AlN in epitaxial AlN/TiN super lattices[J]. *Physical*

- Review Letters. 1997, 78(9): 1743.
- [12] MUNZ W D. Titanium aluminum nitride films: A new alternative to Ti N coatings[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1986, 4(6): 2717-2725.
- [13] FALUB C V, KARIMI A, ANTE M, et al. Interdependence between stress and texture in arc evaporated Ti-Al-N thin films[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(12): 5891-5898.
- [14] MASHIKI T, HIKOSAKA H, TANOUE H, et al. TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 516(19): 6650.
- [15] 杨立军, 张泽辉, 党新安, 等. 钢领表面电弧离子镀 TiAlCN 薄膜[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(2): 51-55.
YANG L J, ZHANG Z H, DANG X A. et al Arc ion plating TiAlCN film on steel collar surface[J]. *China surface engineering*, 2013, 26(2): 51-55 (in Chinese).
- [16] DAALDER J E. Components of cathode erosion in vacuum arcs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1976(9): 2379-2395.
- [17] BYSTROV, KOSTRIN YU A, LISENKOV D K, et al. Cathode spots of vacuum arc discharge[J]. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2015, 27(2): 22-25.
- [18] 王广甫, 张荟星. 聚焦磁场对电弧放电和传输效率的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(3): 340-343.
WANG G F, ZHANG H X. Effects of focusing magnetic field on arc discharge and transmission efficiency[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2000, 36(3): 340-343 (in Chinese).
- [19] MARTIN P J, BENDAVID A. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 394(1): 1-14.
- [20] ANDERS A. Approaches to rid cathodic arc plasma of macro- and nanoparticles: A review[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1999(121): 319-330.

• 本刊讯 •

2019 高功率脉冲磁控溅射沉积薄膜技术与应用专题会议将于上海召开

高功率脉冲磁控溅射技术 (HiPIMS) 作为一种利用高脉冲峰值功率和低脉冲占空比实现高离化率的溅射沉积薄膜新技术, 可以控制膜层的微结构、降低膜层内应力、提高膜层致密度和膜基结合力、获得性能优异的薄膜, 在国内外研究领域和工业界受到了广泛关注。

中国机械工程学会表面工程分会作为全国性的学术组织, 于 2017 年在上海首次成功举办了高功率脉冲磁控溅射技术与应用会议, 交流报告 14 篇, 涉及高功率脉冲磁控溅射过程中电子与离子的相互作用, 深振荡、中频叠加等电源与阴极靶结构协同控制等基础研究、工艺参数对膜层性能的影响、工业化存在的主要问题及对策等应用研究。通过会议交流、深入讨论及与国际知名企业的对接, 推动了我国高功率脉冲磁控溅射技术的发展。经中国机械工程学会表面工程分会与承办单位协商, 定于 2019 年 7 月 28—30 日在兰州召开“2019 高功率脉冲磁控溅射技术与应用会议”。会议由中国机械工程学会表面工程分会主办; 兰州空间技术物理研究所、真空技术与物理重点实验室承办。热忱欢迎国内外从事薄膜技术研究与应用的科技工作者参会, 同时, 也欢迎有意推动我国薄膜技术发展的企业参加会议和提供支持!

会议联系方式: ①中国机械工程学会表面工程分会, 联系人: 段金弟 13971036507, 027-83614523; 蒋超 18971299299, djd430030@sina.com; ②兰州空间技术物理研究所, 联系人: 任妮 13893497847; 郑军 18193162512。

(本刊编辑部 供稿)