

电弧离子镀 TiN 涂层沉积工艺研究

侯翔, 王铁钢, 刘源, 张姣姣, 朱强

(天津职业技术师范大学 天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222)

摘要: **目的** 优化电弧离子镀沉积 TiN 涂层的制备工艺, 分析不同 N₂/Ar 条件对涂层微观结构和力学性能的影响机制, 进一步强化和研究 TiN 涂层的优异性能。**方法** 采用带有附加线圈磁场的电弧离子镀技术在不同 N₂/Ar 条件下制备 TiN 涂层, 利用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、超景深显微镜、维氏硬度计、薄膜应力仪和高温摩擦试验机观察涂层微观结构、测试力学性能。**结果** 随着 N₂/Ar 流量比的增加, 涂层表面形貌得到改善, 大颗粒的数量和尺寸明显减少, 表面变得光滑致密。TiN 涂层的生长取向由沿(110)晶面择优生长, 逐渐转变为沿(111)晶面择优生长。涂层显微硬度呈上升趋势, 硬度最高为 2260HV; 当 N₂/Ar 流量比为 2:1 时, 摩擦系数最低为 0.71, 磨损率最低为 $1.5 \times 10^{-2} \mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \mu\text{m})$, 磨痕边界清晰, 大颗粒和磨屑较少。**结论** 当 N₂/Ar 流量比为 2:1 时, TiN 涂层结构致密, 且具有最佳的各项力学性能。

关键词: 电弧离子镀技术; TiN 涂层; 硬度; 残余应力; 摩擦磨损

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.014

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)05-0072-06

Deposition Technology of TiN Coatings Prepared by Arc Ion Plating

HOU Xiang, WANG Tie-gang, LIU Yuan, ZHANG Jiao-jiao, ZHU Qiang

(Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Manufacturing, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the preparation process of TiN coating deposited by arc ion plating, analyze the influence mechanism of different N₂/Ar on microstructure and mechanical properties of the coating, and further strengthen and study the excellent performance of TiN coating. **Methods** The TiN coating was prepared by arc ion plating under different N₂/Ar conditions. The microstructure and mechanical behavior of the coating was tested by scanning electron microscope, X-ray diffractometer, ultra depth of field microscope, vickers hardness tester, coating stress meter and high temperature friction machine. **Results** With the increase of N₂/Ar, the surface morphology of the coating was improved, the number and size of large particles on the surface of the coating were significantly reduced, and the surface became smooth and compact. The growth orientation of TiN coating was preferentially grown along the (110) crystal plane and gradually changed to preferential growth along the (111) crystal plane, and the microhardness of the coating is increased, the highest hardness was 2,260 HV. When the N₂/Ar was 2:1, the friction coefficient was at least 0.707, and the wear rate was at least $1.5 \times 10^{-2} \mu\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, the wear marks were clear and the defects such as large particles and wear debris were less. **Conclusion** When N₂/Ar is 2:1, TiN coating has good microstructure and the best mechanical properties.

KEY WORDS: arc ion plating technology; TiN coating; hardness; residual stress; friction and wear

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-01-09

基金项目: 天津职业技术师范大学校级科研项目 (KJ1812); 天津职业技术师范大学“创想梦工场”众创空间创新创业项目 (10123001); 天津市高等学校创新团队培养计划项目 (TD13-5096)

作者简介: 侯翔 (1993—), 女, 硕士生, 主要研究方向为刀具涂层技术。

通讯作者: 王铁钢 (1978—), 男, 教授, 主要研究方向为硬质薄膜与刀具涂层技术。

金属氮化物涂层由于具有较高的硬度、强度、耐磨性, 足够的韧性和高的耐热性, 近年来被人们广泛关注, 并用于刀具表面改性处理, 在切削加工时能延长刀具的使用寿命, 提高加工效率和精度^[1-3]。TiN 晶体结构是由 Ti 原子占据面心立方顶角的面心立方结构(fcc), 是典型的 NaCl 结构^[4-5], 因硬度高、耐磨性好、抗腐蚀性性能优异而广泛用于刀具表面。TiN 涂层的制备常用磁控溅射、离子镀、离子束等物理气相沉积技术。其中, 磁控溅射涂层表面光滑, 且均匀性好, 但靶材离化率低、涂层与基体结合力差, 限制了其在切削加工中的应用。电弧离子镀技术沉积速率高, 粒子入射能量大, 可制备结构致密、结合强度高的涂层, 近年来被广泛用于沉积高速钢刀具和发动机叶片高温防护等方面^[6-7], 但始终存在表面大颗粒的难题。在电弧阴极外附加线圈磁场, 可有效控制弧斑的运动范围、提高运动速度, 从而减少大颗粒的产生, 改善涂层表面质量和均匀性。

研究发现, 涂层的沉积工艺直接影响涂层的微观组织和各项性能, 通过改变沉积压强、基体偏压、反应气体流量、沉积温度、弧电流可调控涂层的结构和性能^[8-9], 其中 N_2/Ar 流量比是极为重要的一项参数。钟一昌等人^[10]研究了不同 N_2 流量对磁控溅射 TiN 涂层摩擦学性能的影响, 发现 N_2 流量为 4 mL/min 时, 制备的 TiN 涂层耐磨性能最佳。尚需系统研究 N_2 流量对涂层成分、结构和其他力学性能的影响, 且不同涂层设备最优工艺参数也存在差异, 故文中采用带有附加线圈磁场的电弧离子镀技术, 在不同 N_2/Ar 流量比下沉积一系列 TiN 涂层, 研究 N_2/Ar 流量比对涂层沉积速率、物相组成、形貌、显微硬度、残余应力、摩擦系数和磨损率的影响, 并探讨了它们之间的内在联系。

1 试验

1.1 涂层制备

采用 V-TECH AIP650/750 型电弧离子镀膜机在基体材料为镜面抛光的硬质合金 (25 mm×25 mm×3 mm)、304 不锈钢片 (30 mm×25 mm×1 mm)、单晶 Si 片(100) (50 mm×6 mm×0.67 mm) 基底上制备 TiN 涂层。在沉积涂层前, 使用超声波清洗机将基片分别用超纯水、无水乙醇清洗 15 min, 之后用高纯氮气吹干, 装夹在样片板, 悬挂于真空室中央转架上。靶材选取为直径 ϕ 100 mm×25 mm 的 Ti 靶 (纯度为 99.9%), 数量为 3 个, 靶电流均为 80 A, 工作气体和反应气体为 Ar 和 N_2 (99.999%)。当本底真空为 3.5×10^{-3} Pa, 真空室内温度为 300 °C 时, 开始辉光、轰击清洗, 之后将偏压设为 -30 V, 通过改变 N_2/Ar 值, 沉积 90 min。在沉积过程中, 气体的通入量要进行严密监控。电弧离子镀制备 TiN 涂层的具体工艺参

数详见表 1。

表 1 电弧离子镀 TiN 涂层的沉积参数

Parameters	Value
Base pressure/Pa	3.5×10^{-3}
Working pressure/Pa	3×10^{-1}
Deposition temperature/°C	300
Target current/A	80
Bias voltage/V	-30
N_2/Ar flow ratio/sccm	1:1 (N_2 :100 Ar:100)
	2:1 (N_2 :135 Ar:65)
	3:1 (N_2 :150 Ar:50)
	4:1 (N_2 :160 Ar:40)
Coating thickness/ μ m	~3.5
Total amount of gas/sccm	200
Distance between the target and substrate/mm	70

1.2 性能测试

1) 采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察并分析涂层的表面形貌; 采用 X 射线衍射仪 (XRD) 对涂层进行物相分析, XRD 使用的是 $CuK\alpha$ 射线, 扫描速度为 0.02 (°)/s, 步长为 0.01°, 2θ 扫描范围为 20°~80°。

2) 采用 SuPro FST150 薄膜应力仪, 根据基片曲率法用单晶 Si 片作为基体^[12], 输入涂层基体厚度、Si 泊松比和杨氏模量计算涂层的残余应力, 每个样片测试 5 次求平均值。采用 Wilson 显微硬度计测试涂层的显微硬度, 此时注意选取的载荷所压入的深度不能超过涂层厚度的 1/10, 载荷选取 10 mg, 保压时间为 10 s, 测试 10 次选取平均值。

3) 采用 Anton Paar 公司生产的 THT 型高温摩擦机设备在室温 20~25 °C、相对湿度为 50% 的外界条件下, 选取直径为 5.99 mm 的白色 Al_2O_3 球作为对磨副, 转速为 159 r/min, 半径为 8 mm, 法向载荷为 4 N, 摩擦圈数为 2000, 滑行距离为 100.52 m 测试涂层的摩擦性能。同时为了保证涂层不被磨穿, 通过测试时产生的噪音和观察涂层表面来判断是否磨穿, 故需要严格控制实验时间。采用超景深显微镜观察涂层磨损后的形貌, 选取具有代表性的区域进行拍照记录。

2 结果及分析

2.1 微观结构

图 1 为不同 N_2/Ar 流量比条件下沉积 TiN 涂层的沉积速率。可以得到, 随着 N_2/Ar 流量比的增加, 沉积速率先快速下降然后上升。 N_2/Ar 流量比为 1:1 时, 沉积速率最高约 0.44 nm/s; 随着 N_2/Ar 流量比逐渐增加到 2:1, 沉积速率快速降低到 0.34 nm/s; 当 N_2/Ar 流量比为 3:1 时, 沉积速率再次增加到 0.39 nm/s。由

于 N_2/Ar 较小时, 通入的氩气流量较多, 增强了氩离子对靶材的轰击, 靶材表面溅射速率较大, 致使钛离子和氮气碰撞的几率增大, 氮气可以与溅射出来的钛离子完全反应生成 $TiN^{[13]}$ 。随着 N_2/Ar 的增加, 氮气流量增多, 靶材表面被 TiN 覆盖, 降低了有效溅射面积, 使单位面积溅射出来的粒子数量降低^[14]。随着 N_2/Ar 进一步增加至 3:1, 更多的氮气与金属钛离子结合, 所以沉积速率再次出现上升趋势。此现象说明在沉积涂层过程中的 N_2/Ar 流量比存在一个临界值, 当氮气流量处于临界值以外, 靶溅射模式就会转为化合物模式或过渡溅射模式^[15-16]。

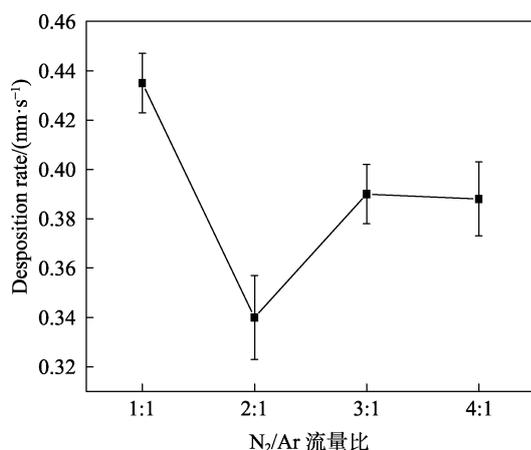


图1 不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的沉积速率

图2为不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的表面形貌图。从图2可见, 涂层表面存在颗粒等缺陷。这是由于氮气较少, 氮离子对基体表面的轰击作用较小, 从靶表面溅射出的钛离子和蒸发出的颗粒由于温度较高且未能和氮气充分反应, 就直接沉积在温度相对低的基片表面形成颗粒缺陷^[17-18]。随着 N_2/Ar 流量比的增加, 从图2b—d可以观察到, 氮气流量相应增

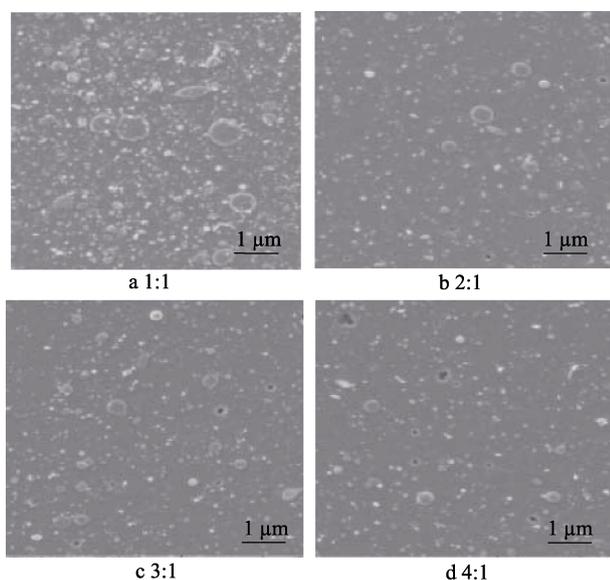


图2 不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的表面形貌

多, 涂层表面大颗粒的数量和尺寸减少, 表面变得光滑致密。这是由于氮气流量增加, 氮离子对基体表面的轰击作用不断增强, 一部分大颗粒没有与生长面形成化学键而被轰击掉, 另一部分在随等离子体运动过程中被消耗^[19], 从而改善了涂层表面形貌。

图3为不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的X射线衍射图谱。由图3可知, TiN 涂层主要由 TiN 相和 Ti 相组成。随着 N_2/Ar 流量比的增加, TiN 涂层的生长取向由沿(110)晶面的 Ti 相逐渐转变为沿(111)晶面的 TiN 相择优生长。这是由于 N_2/Ar 流量比为 1:1 时, 氩气流量较多, 致使靶材溅射的 Ti 离子较多, 随着 N_2/Ar 流量比的增加, 溅射的 Ti 离子与氮气充分反应, 生成较多的 TiN 。这与孔德军^[20]等人提出的 $2\theta=36.7^\circ$ 时出现标准的 $TiN(111)$ 衍射峰相符。同时, (111)面为应变能最低的晶面, 当 N_2 流量超过临界值, 涂层的形核率降低, 并且会沿着应变能最低的(111)面择优生长^[21]。当 N_2 流量小于临界值, 涂层的形核率增强, 并且会沿着表面能最低的(200)面择优生长。在 $2\theta=38.48^\circ$ 、 40.17° 处, 出现(110)、(101)晶面的 Ti 相, 随着 N_2/Ar 流量比的增加, 衍射峰强度总体上减弱, 说明随着氮气流量的增多, Ti 相晶粒结晶度降低, 涂层中的 Ti 逐渐减少。

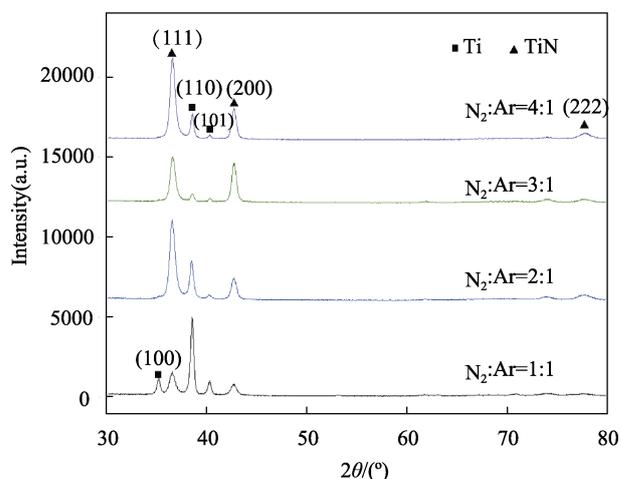


图3 不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的 XRD

2.2 力学性能

残余应力是在无外力的情况下来自涂层内部的一种应力, 一般分为两种: 拉应力和压应力。不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的残余应力如图4所示。观察折线图可知, 涂层均呈现压应力。随着 N_2/Ar 流量比的增加, 涂层的残余应力比较分散, 波动较大, 总体为升高趋势。主要是由于涂层在生长过程中, 氮气不断增多, 入射颗粒高速撞击涂层表面, 诱发压应力的产生。残余应力的大小主要取决于离子颗粒的大小、质量和速度。同时, 待涂层沉积结束降至室温时, 由于收缩变形也会导致应力的产生。

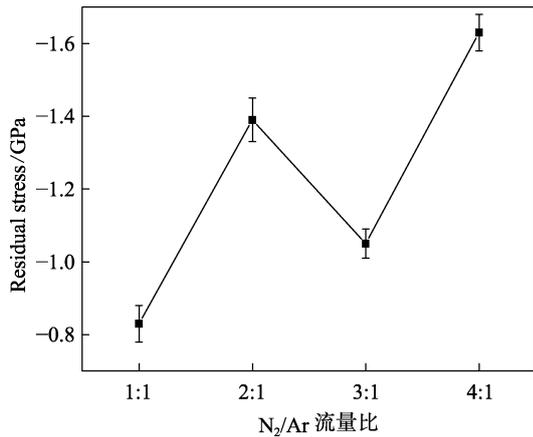


图 4 不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的残余应力

不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的显微硬度如图 5 所示。由图 5 可以看出，N₂/Ar 流量比对涂层硬度的影响显著。随着 N₂/Ar 流量比的增加，涂层硬度呈现明显上升趋势。当 N₂/Ar 流量比为 1:1 时，涂层的显微硬度最低。随着氮气所占比例增大，沉积到 TiN 涂层的显微硬度不断增大。当 N₂/Ar 流量比为 4:1 时，涂层硬度达到最大值为 2260HV。这是由于氮气流量较小时，钛离子并没有完全和 N₂ 结合生成 TiN，而是形成 Ti-Ti 键沉积在工件表面，Ti-Ti 键是金属键，硬度较低^[22-23]。随着氮气比例逐渐增大，涂层 Ti-Ti 键的含量会减少，生成硬度较高的 Ti-N 共价键。同时可归因于 N₂/Ar 流量比为 4:1 时表面光滑致密，出现(111)和(200)晶面择优生长的 TiN 相所致。

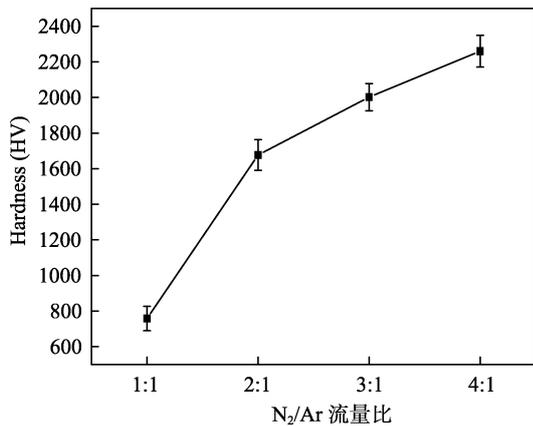


图 5 不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的显微硬度

2.3 摩擦学性能

图 6 为不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的磨痕形貌。磨痕形貌表面出现的大颗粒、细小裂纹的位置用箭头标识，但整体来看，经过摩擦磨损测试后，涂层的表面缺陷较小，分子和离子间结构也相对致密。当 N₂/Ar 流量比为 1:1 时，涂层的磨痕宽度最宽为 232.03 μm，且有大颗粒和细小裂纹出现，有较多黑色磨屑在磨痕轨迹边界，由此推测磨损形式为粘着磨

损。这是由于此时涂层硬度、结合力较低所致，这些磨屑在摩擦过程中很容易粘在对磨副表面，加剧磨损^[24-25]。当 N₂/Ar 流量比为 2:1 时，涂层的磨痕宽度最窄为 153.03 μm，磨痕轨迹清晰，磨屑、大颗粒和微裂纹缺陷较少。N₂/Ar 为流量比 3:1、4:1 时，涂层的磨痕宽度分别为 178.14、185.66 μm，磨痕的中间部位均有大颗粒和裂纹的出现，这些颗粒是由于此时涂层硬度较高，摩擦过程中出现了硬质颗粒的磨粒所致。

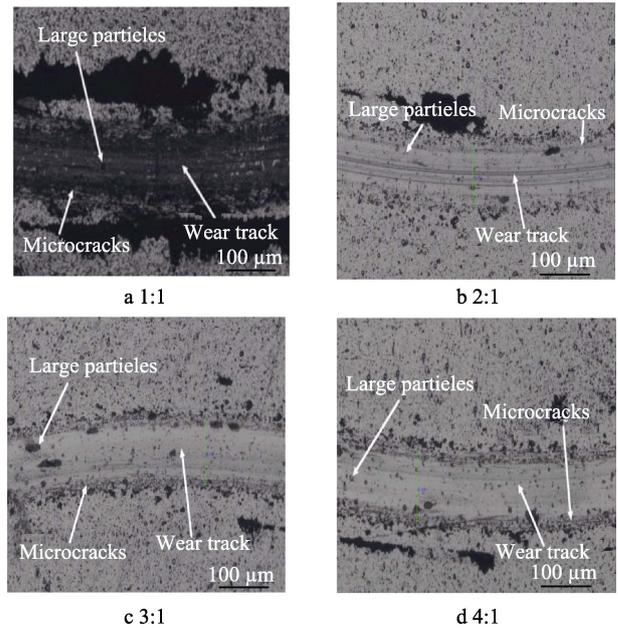


图 6 不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的磨痕形貌

不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的摩擦系数如图 7 所示，选取的数值为进入稳定磨损阶段的平均值。由图 7 可见，涂层经过磨合期后，摩擦系数均处于 0.7~0.8 之间。随着 N₂/Ar 流量比的增加，平均摩擦系数呈现下降然后上升的趋势。当 N₂/Ar 为 2:1 时，摩擦系数最低为 0.71。随着 N₂/Ar 流量比增到 3:1，摩擦系数急剧升高至 0.78。这是由于氮气流量增多，产生的气坑与靶材溅射离子结合变差，与微观结构中

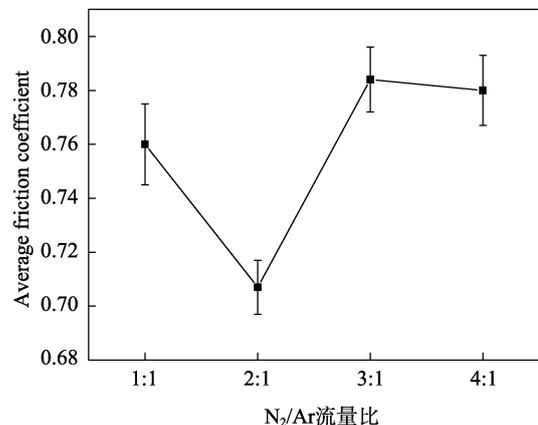


图 7 不同 N₂/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的摩擦系数

涂层粗糙度和表面结构的光滑致密变化程度有关^[26]。从 N_2/Ar 流量比为 2:1 时的磨痕形貌图也可以看出,磨痕宽度最窄,对磨副与表面接触面积最小,促使摩擦系数最低。

磨损率是判断零件和刀具磨损的一个重要参数,且与摩擦系数相关。图 8 为不同 N_2/Ar 沉积 TiN 涂层的磨损率。由图 8 得出,磨损率随 N_2/Ar 流量比的增加先快速下降然后上升。 N_2/Ar 流量比为 2:1 时的磨损率最低,为 $1.5 \times 10^{-2} \mu m^3/(N \cdot \mu m)$ 。磨损率直接影响涂层的摩擦系数,进而影响涂层的使用性能和寿命。从数据可以看出, N_2/Ar 流量比为 1:1 时,涂层磨损率最高,涂层不耐磨损,抗磨损能力最差; N_2/Ar 为 2:1 时涂层磨损率最低,它对应的磨痕形貌缺陷最小,不容易发生大颗粒的脱落,非常有效地保护了基体材料,所以该涂层耐磨性最好。随着氮气流量的不断增加,磨损率数值越接近,大颗粒的脱落几率不断增加,脱落下来的颗粒成为两固体表面间的松散磨粒。在一定的转速下, TiN 涂层具有一定的减摩作用,但在不同 N_2/Ar 流量比条件下,磨损率的值有一定差距,说明抗磨损性能与 N_2/Ar 流量比有确切关系。由此见得,在相同的工况下, N_2/Ar 流量比为 2:1 时的涂层抗磨损率高出 30%左右。

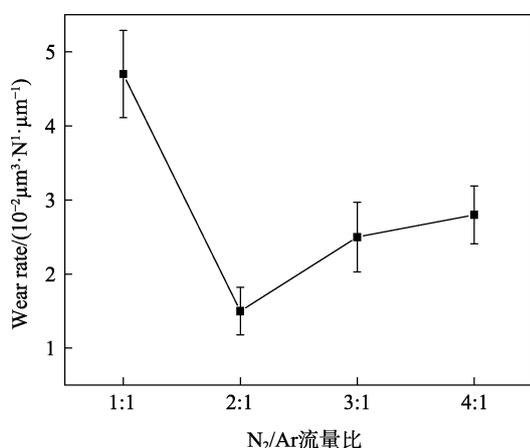


图 8 不同 N_2/Ar 流量比下沉积 TiN 涂层的磨损率

3 结论

1) 随着 N_2/Ar 流量比的增加, TiN 涂层表面质量逐渐改善,生长取向由沿(110)晶面择优生长,逐渐转变为(111)晶面择优生长,涂层微观结构受 N_2/Ar 流量比值的影响显著。

2) 随着氮气所占比例增大, TiN 涂层的显微硬度不断增大。 N_2/Ar 流量比为 4:1 时,硬度最高,约 2260HV。

3) 摩擦试验表明,当 N_2/Ar 流量比为 2:1 时, TiN 涂层的摩擦系数最低,平均摩擦系数为 0.71,磨痕宽度最小约 153 μm ,磨痕边界清晰,耐磨性能最

佳,磨损率约为 $1.5 \times 10^{-2} \mu m^3/(N \cdot \mu m)$ 。

参考文献:

- [1] MUSIL J. Hard Nanocomposite Coatings: Thermal Stability, Oxidation Resisitance and Toughness[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 13(1): 50-65.
- [2] 白晓明, 郑伟涛. 超硬纳米多层膜和复合膜的研究综述[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1): 21-24.
- [3] VEPREK S, VEPREK M G. Limits to the Preparation of Super Hard Nano Composites: Impurities, Deposition and Annealing Temperature[J]. Thin Solid Films, 2012, 522: 274-282.
- [4] 师昌绪, 徐滨士. 21 世纪表面工程的发展趋势[J]. 中国表面工程, 2001(1): 2-7.
- [5] 李鹏, 黄美东, 佟莉娜, 等. 磁控溅射与电弧离子镀制备 TiN 薄膜的比较[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2011, 31(2): 32-37.
- [6] COLOMBO A D. Rolling Contact Fatigue Resistance of PVD CrN and TiN Coated Austempered Ductile Iron[J]. Original Research Article Wear, 2013, 308(2): 35-45.
- [7] MATHTWES A, LEYLAND A. Developments in PVD Rtibological Coatings[J]. Heat Treatmen of Metals, 2001, 28(3): 63-70.
- [8] 王启民, 黄健, 王成勇, 等. 高速切削刀具物理气相沉积涂层研究进展[J]. 航空制造技术, 2013(14): 78-83.
- [9] 季鑫, 宓一鸣, 周细应, 等. TiN 薄膜制备方法、性能及其应用的研究进展[J]. 热加工工艺, 2009(3): 81-83.
- [10] 钟一昌, 任兴润, 黄柱, 等. 氮气流量对 TiN 薄膜组织结构及力学性能的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(3): 47-53.
- [11] 陈昌浩, 金永中, 刘东亮, 等. 气体总流量对多弧离子镀 TiN 涂层表面形貌和力学性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2016, 44(4): 43-47.
- [12] WANG T G, LIU Y M, ZHANG T, et al. Influence of Nitrogen Flow Ratio on the Microstructure, Composition, and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered Zr-B-O-N Films[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(11): 981-984.
- [13] 茅昕辉, 刘云峰, 张浩康, 等. 铝靶脉冲反应溅射沉积氧化铝薄膜中的迟滞回线的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2000, 20(2): 14-17.
- [14] 牛宝林, 陈汪林, 刘书媛, 等. 氮气分压对 AlCrTiSiN 超晶格涂层微观结构及力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 45-52.
- [15] 张启沛, 钟喜春, 杨怡帆, 等. 多弧离子镀 TiN 薄膜颜色性能的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(7): 694-699.
- [16] YEH T S, WU J M, Hu L J, et al. The Properties of TiN Thin Films Deposited by Pulsed Direct Current Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2008, 516: 7294-7298.
- [17] POLCAR T, CAVALEIRO A. Structure and Tribological Properties of Alcrtin Coatings at Elevated Temperature[J].

- Surface and Coatings Technology[J]. 2011, 206(6): 107-110.
- [18] 张姣姣, 王铁钢, 阎兵, 等. 直流基体偏压对 AlCrSiN 涂层结构和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2232-2239.
- [19] 白秀琴, 李健. 磁控溅射 TiN 薄膜低温沉积技术及其摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2006, (5): 15-17, 21.
- [20] 孔德军, 付永忠, 吴永忠, 等. PVD 法制备 TiN 涂层界面特征与摩擦磨损性能[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 12 (32): 1078-1083.
- [21] ZHOU T, LIU D W, ZHANG Ying et al. Microstructure and Hydrogen Impermeability of Titanium Nitride Thin Films Deposited by Direct Current Reactive Magnetron Sputtering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 44-50.
- [22] 赵升升, 赵彦辉, 陈伟, 等. 轴向磁场对电弧离子镀 TiN/Cu 薄膜性能的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 5 (32): 382-387.
- [23] 贺春林, 高建君, 王苓飞, 等. N₂ 流量对反应共溅射 TiN/Ni 纳米复合膜结构和结合强度的影响[J]. 材料导报, 2018, 6(32): 2038-2042.
- [24] CHEN Y, DU H, CHEN M, et al. Structure and Wear Behavior of AlCrSiN-based Coatings[J]. Applied Surface Science, 2016, 370: 176-183.
- [25] WANG T G, ZHAO S S, HUA W G, et al. Design of a Separation Device Used in Detonation Gun Spraying System and Its Effects on the Performance of WC-Co Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(12): 1637-1644.
- [26] 王铁钢, 李柏松, 张姣姣, 等. 沉积温度对高功率脉冲磁控溅射 AlCrSiN 涂层结构和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 8(47): 2578-2584.