

火炮身管材料表面 TiAlYN 镀层组织及摩擦行为研究

武晨阳, 郭巧琴*, 杨忠, 齐源昊

(西安工业大学材料与化工学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 针对火炮身管内膛磨损严重的问题, 采用物理气相沉积技术进行涂层制备, 延长身管服役寿命。**方法** 采用磁控溅射/多弧离子镀复合处理工艺, 通过改变氮气与氩气流量比, 在身管材料表面制备 TiAlYN 涂层, 研究 Y 元素含量对涂层组织及性能的影响。分别用 SEM、EDS、XRD 对涂层的微观结构、元素含量和物相成分进行表征。利用白光干涉仪和划痕仪分析涂层的三维形貌与膜基结合力, 采用摩擦磨损试验机对涂层的摩擦行为进行研究。**结果** 随着 Y 元素含量的增加, 涂层晶粒逐渐细化, 致密度增加, 无孔洞缺陷和柱状生长情况。涂层中 AlN(200)晶面有明显的择优生长趋势, 表现为面心立方结构。随着腔室内氩气流量比例的升高, 膜基结合力最大值为 54 N。当 N₂: Ar 流量比为 40:60 时, 涂层摩擦因数达到最小值 0.4, 磨损机制以磨粒磨损和氧化磨损为主。**结论** Y 元素的细晶强化作用提高了涂层质量, 改善了涂层与基体的结合强度。涂层中形成的 Y₂O₃ 相提升了涂层的抗磨损性能, TiAlYN 涂层为火炮身管耐磨延寿提供了理论及实践基础。

关键词: 火炮身管; 物理气相沉积; 磁控溅射; 多弧离子镀; 气体流量; TiAlYN 涂层; 摩擦行为

中图分类号: TJ301

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0021-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.003

Microstructure and Friction Behavior of TiAlYN Coating on the Surface of Gun Barrel

WU Chenyang, GUO Qiaoqin*, YANG Zhong, QI Yuanhao

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem of serious wear and tear of the inner chamber of the gun barrel, the work aims to adopt physical vapor deposition for coating preparation to extend the service life of the gun barrel. The TiAlYN coating was prepared on the gun barrel substrate by changing the flow ratio of nitrogen to argon through magnetron sputtering/multi-arc ion plating. The effects of different Y contents on the microstructure and friction behavior of the coating were investigated. The microstructure, element content and phase composition of the coating were characterized by SEM, EDS and XRD. The three-dimensional morphologies and bonding force of the coating were analyzed by white light interferometer and scratch meter, and the friction

收稿日期: 2024-10-28; 修订日期: 2024-12-11

Received: 2024-10-28; Revised: 2024-12-11

基金项目: 陕西省教育厅“发动机关键部件材料研发及应用”创新团队(K20220185); 西安市科技计划项目(23GXFW0036)

Fund: “Research and Application of Key Engine Component Materials” Innovation Team of Shaanxi Provincial Department of Education (K20220185); Xi'an Science and Technology Plan Project (23GXFW0036)

引文格式: 武晨阳, 郭巧琴, 杨忠, 等. 火炮身管材料表面 TiAlYN 镀层组织及摩擦行为研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 21-30.

WU Chenyang, GUO Qiaoqin, YANG Zhong, et al. Microstructure and Friction Behavior of TiAlYN Coating on the Surface of Gun Barrel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 21-30.

*通信作者 (Corresponding author)

behavior of the coating was studied by friction and wear testing machine. With the increase of Y content, the grain of the coating was gradually refined, the density increased, and there was no hole defect and columnar growth. The (200) crystal surface had an obvious preferential growth trend, showing a face-centered cubic structure. With the increase of argon flow ratio in the chamber, the maximum bonding force was 54 N. When the flow ratio of $N_2:Ar$ was 40:60, the friction coefficient of the coating reached the minimum value 0.4, and the wear mechanism was mainly abrasive wear and oxidation wear. The fine grain strengthening of Y element improves the coating quality and the bonding strength between the coating and the substrate. The Y_2O_3 phase formed in the coating improves the wear resistance of the coating, and the TiAlYN coating provides a theoretical and practical basis for the wear resistance and life extension of gun barrels.

KEY WORDS: gun barrel; physical vapor deposition; magnetron sputtering; multi-arc ion plating; gas flow; TiAlYNcoating; friction behavior

身管作为火炮的主要零部件之一,其主要功能是为弹丸提供加速通道,通过发射药燃烧产生的高温高压气体推动弹丸,赋予弹丸一定的初速度和飞行方向^[1-3]。为了进一步提升火炮的火力打击性能,弹丸发射的火药装填量及装填密度不断增加,导致燃气温度和膛压不断升高,对火炮身管强度和耐磨性能提出了更高的要求^[4-6]。目前,提高身管性能与寿命的主要措施有改进发射药、优化弹丸设计和改变炮管材料等^[7-8],均在提升身管寿命方面作用显著。当前,关于火炮身管材料选择的研究已趋于成熟,为了进一步提高身管性能,表面涂层技术成为一种很好的选择,这种技术可以在保留基体材料原本性能的同时,进一步提高火炮身管的强度和耐磨性^[9-10]。

铬层具有耐磨性好、硬度高、摩擦因数低和熔点高等优异性能,电镀铬层已经在延长身管寿命方面得到了应用^[11]。经研究发现,采用电镀工艺制备铬层,涂层与基体之间存在的硬度差异导致二者之间内应力较大,涂层与基体结合强度差,且电镀铬制备过程较为复杂,对环境存在危害,已无法满足实际需要^[12]。在表面处理的前提下,国内外专家学者已经开展了利用磁控溅射和多弧离子镀的物理气相沉积技术来延长火炮身管寿命的研究^[13-15],结果表明,在身管内膛表面沉积涂层可以有效地提高其性能和使用寿命。

随着新材料表面性能要求的不断提高,硬质涂层如 TiN、TiCN、TiAlN 被广泛用于高耐磨和高硬度的工业领域。TiN 是一种具有高熔点、高硬度和优良耐磨性能的硬质涂层^[16-17],已经在航空航天、机械加工和合金刀具等领域得到广泛应用,但其热稳定性较差,难以满足更苛刻的使用环境。因此,在二元 TiN 涂层基础上,通过添加第三组元来进一步提高涂层的耐磨性。其中,添加 Al 可以引起 TiN 晶格结构的变化,Al 原子会置换一部分 Ti 原子,通过固溶强化的方式提高涂层的耐磨性和热稳定性^[18]。王北川等^[19]、段佳妮等^[20]、李昌恒等^[21]分别采用多弧离子镀、磁控溅射工艺在合金表面制备 TiAlN 涂层,结果表明,TiAlN 涂层在结合力、耐磨性方面较 TiN 涂层均有很大提升。

为了进一步提高 TiAlN 涂层的耐磨性,在涂层中添加第四组元已成为改善其性能的主要方法之一。研究发现,稀土 Y 具有较强的活性和吸附能力,可以在薄膜界面处富集,起到细晶强化的作用。在硬质薄膜中引入适量 Y 元素,能显著提高涂层在摩擦过程中的抗氧化能力。李明升等^[22]认为,微量元素 Y 可以提高膜层抗氧化性能的原因在于合金元素 Y 倾向于在晶界处偏析,晶界又通常是阴离子 (O^{2-}) 的快速扩散通道,因此 Y 在晶界处的偏析阻挡了 O^{2-} 的向内扩散以及阳离子的向外扩散,从而使膜层的磨损氧化速度降低。国内郭策安等^[23]、张健等^[24]利用电弧离子镀在炮钢表面沉积了 TiAlN 和 TiAlYN 膜层,并研究了添加 Y 对膜层硬度、摩擦磨损性能和抗氧化性能的影响。结果显示,TiAlYN 薄膜的硬度较 TiAlN 薄膜提高了约 25%,摩擦因数和磨损率均低于 TiAlN 薄膜,且 TiAlYN 薄膜具有更优越的抗烧蚀和腐蚀性能。Belous 等^[25]和 Riedl 等^[26]采用多弧离子镀沉积含少量 Y 的 TiAlN 涂层,对不同 Y 含量的 TiAlYN 涂层进行研究。结果表明,当涂层中 Y 的原子分数在 1%~2%时,Y 元素的细晶强化作用最显著,涂层的力学性能最佳。经研究者证实,含 Y 的 TiAlN 薄膜晶粒尺寸减小,截面的致密度提高。当薄膜中同时含有 Al 和 Y 时,氧化实验中 Y 会促使 Al 形成稳态的 $\alpha-Al_2O_3$,含 Y 的 TiAlN 薄膜的结合力和抗磨损氧化性能会有所提高。目前关于 TiAlN 涂层的研究均集中在低 Y 含量,涂层中 Y 的原子分数高于 2%会造成涂层的性能下降。由于多弧离子镀沉积速率快,入射粒子产生的能量高,且无法对 Y 元素含量进行精确控制,而磁控溅射沉积速率慢,成膜质量高,能准确地控制膜层厚度,可以实现对 Y 的少量掺杂,提高涂层的耐磨性能。因此,首先采用多弧离子镀沉积过渡层的方式,先在基体表面沉积 Ti 作为过渡层,减小涂层与基体之间的内应力,再进行 TiAlN 涂层的制备,同时采用磁控溅射向 TiAlN 涂层中掺杂 Y 元素,探究氮气和氩气流量比例对涂层微观组织和减摩耐磨性能的影响。氩气作为磁控溅射的工作气体,直接影响靶材中溅射出的粒子数量。为了实现 Y 元素的

少量掺杂, 通过调控腔室中氮气与氩气流量比例, 来改变溅射出的 Y 粒子数量, 从而实现对镀层中 Y 含量的合理控制。

在当前军事实力的快速发展阶段, 火炮身管延寿一直是亟待解决的问题之一。耐磨性能是影响火炮身管寿命的重要因素之一, 但已有关于火炮身管研究考虑的因素各不相同, 且对火炮身管摩擦磨损的研究较少。本文在现有研究基础上, 通过磁控溅射/多弧离子镀物理气相沉积技术, 对 Y 元素单独采用磁控溅射工艺进行掺入, 创新性地将 2 种工艺进行复合, 实现涂层制备, 并对涂层的微观结构和摩擦学行为进行系统的研究, 旨在为火炮身管耐磨延寿提供一定的理论和实践基础。

1 试验

1.1 涂层制备

实验所用基体材料为 30CrNi3MoV 合金钢, 尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 化学成分见表 1。镀膜前, 先对试样预处理, 依次用 180#~2000#砂纸对试样进行逐级打磨, 然后使用抛光机抛光至镜面。之后将试样置于超声波容器中, 使用酒精溶液清洗 10 min, 脱水干燥后, 放入真空腔室内。本实验采用 TSU-650 多功能离子镀膜机进行涂层的制备, 该设备主要由冷却系

统、真空系统和控制系统 3 部分构成, 极限真空度可以达到 $0.1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。制备涂层时, 偏压为 -300 V , Ti 靶、Al 靶为多弧离子镀溅射源, 靶材尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 工作电流均为 40 A , Y 靶为磁控溅射源, 靶材尺寸为 $400 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 工作电流为 3 A , 靶材均为纯度为 99.99% 的单质靶。沉积过程中, 电弧靶和磁控靶同时工作, 工作距离为 250 mm , 温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 工作台转速为 2 r/min , 工作层沉积时间为 80 min , 氮气与氩气流量比 (mL/min) 分别为 $70:30$ 、 $60:40$ 、 $50:50$ 、和 $40:60$ 。

1.2 涂层表征

采用扫描电子显微镜 (TESCAN CLARA) 观察涂层表面截面形貌及相成分, 并测定涂层厚度。采用白光干涉仪对涂层表面三维立体形貌进行分析。采用 X 射线衍射分析仪 (XRD-D2) 对涂层相成分和元素化学态进行分析, 测试步长为 0.1° ; 扫描速度为 $5 (^\circ)/\text{min}$; 扫描角度为 $20^\circ \sim 90^\circ$ 。采用 WS-2005 涂层附着力自动划痕仪对涂层的结合力进行测定, 结合力测试设备选用金刚石压头, 试验动载荷范围为 $0 \sim 100 \text{ N}$, 加载速度为 60 N/min , 划痕长度为 5 mm , 单向方式运动。本试验使用 HT-1000 多功能摩擦磨损试验机测试涂层的摩擦因数, 摩擦副采用 GCr15 小球, 载荷为 5 N , 摩擦转动半径为 3 mm , 电机频率为 5 Hz , 试验时间为 30 min 。

表 1 30CrNi3MoV 合金钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of 30CrNi3MoV alloy steel

元素	Ni	Cr	Mn	Mo	Si	C	V	Cu	Fe
质量分数/%	2.89	1.03	0.65	0.49	0.40	0.34	0.13	0.06	余量

2 结果与讨论

2.1 TiAlYN 涂层微观形貌观察

不同氮气与氩气流量比下的 TiAlYN 涂层表面形貌如图 1 所示。由图 1 可见, 涂层表面存在形状不规则、分布不均匀的颗粒和凹坑, 这主要是由于多弧离子镀和磁控溅射共同作用时, 腔室温度过高导致靶材表面产生的熔滴溅射效果。随着氮氩比中氩气比例的不断升高, 涂层表面逐渐平整, 致密度升高, 孔洞数量减少, 亮白色颗粒直径变小, 且分布更加均匀, 晶粒得到细化。结合图 2 的 EDS 能谱分析可知, 大颗粒主要是 Al 的熔融液滴。由于 Al 的熔点较低, 在蒸发过程中从阴极靶面飞溅, 较高的腔室温度使液态颗粒未得到充分的电离, 随着靶材离子一起沉积在基体上, 形成 Al 的熔融颗粒。随着腔室中氩气含量不断升高, 涂层表面凹坑消失, 团聚状大液滴和亮白色颗粒逐渐细化, 且分布更加均匀。由于腔室中氩气比例的升高, 会电离出更多的 Ar^+ , 作为磁控溅射工作气体的氩气会增加 Y 靶材受到轰击而沉积在基体表面

的粒子数量, 使粒子分布更加均匀。随着涂层中 Y 含量不断升高, 有晶粒细化作用的 Y 元素, 减少了涂层中孔洞等组织缺陷^[27], 使涂层表面更加平整, 颗粒逐渐细小, 涂层的致密度升高。

由图 2 可见, 涂层表面的大熔滴和白色颗粒呈球状, 且表面粗糙, 涂层本底呈现为光滑的灰白色, 附着片状熔融物。选取 3 个明暗不同的特征点 a、b、c 进行能谱分析, 结果见表 2。涂层中亮白色颗粒主要为 Al、Ti 熔滴, 其中 Al 元素含量最多, Al 的低熔点导致较多的 Al 未经过充分电离, 熔滴飞溅后与 Ti 粒子同时沉积于基体表面形成大小不一的亮白色颗粒。涂层本底中 Ti 元素含量高于 Al 元素, Al 元素含量的不同造成了图 2 中 a、b、c 这 3 个区域的明暗差异。对涂层进行表面能谱扫描结果如图 2 所示, 其中 Ti、Al 元素含量较高, 分布均匀, 且密度较高, N、Y 元素含量较少, 分布密度低。由表 2 可以看出, 涂层中还存在少量的氧元素, 主要是由于涂层制备完成与空气接触后发生了短暂的氧化。对不同参数下涂层进行 EDS 能谱面扫, 涂层中 Y 的原子数分数随着氩气比例的上升逐渐增加, 分别为 1.14%、1.58%、

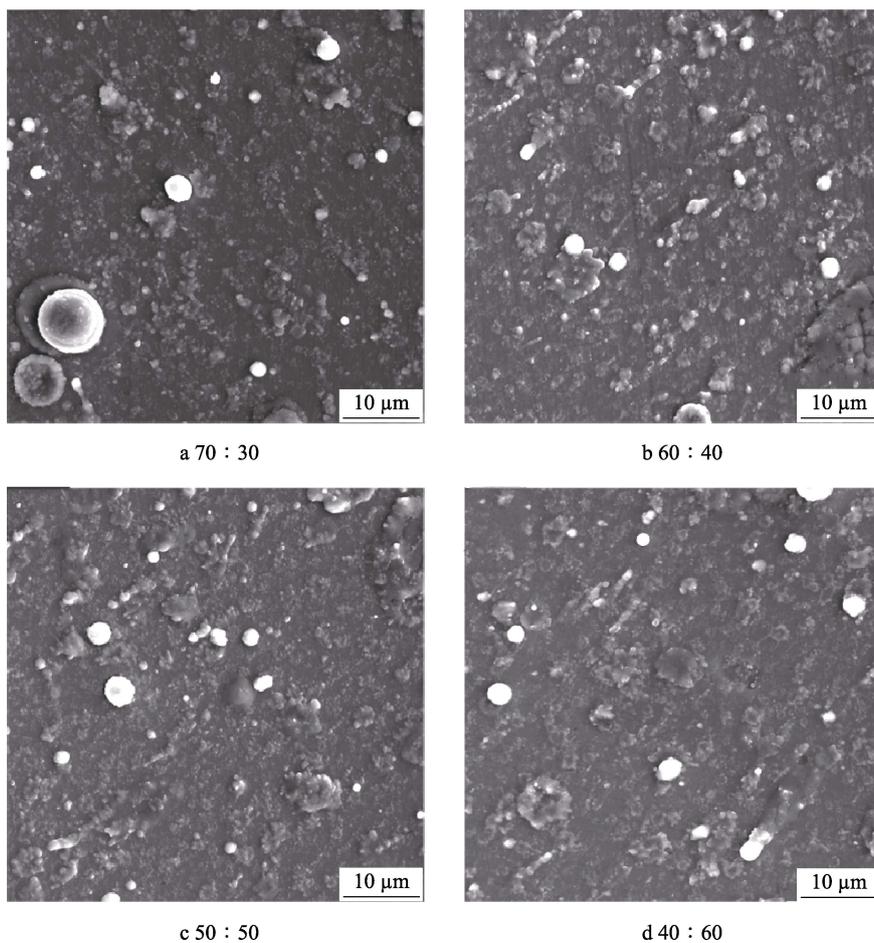


图1 不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 镀层表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of TiAlYN coatings at different $N_2 : Ar$ flow ratios

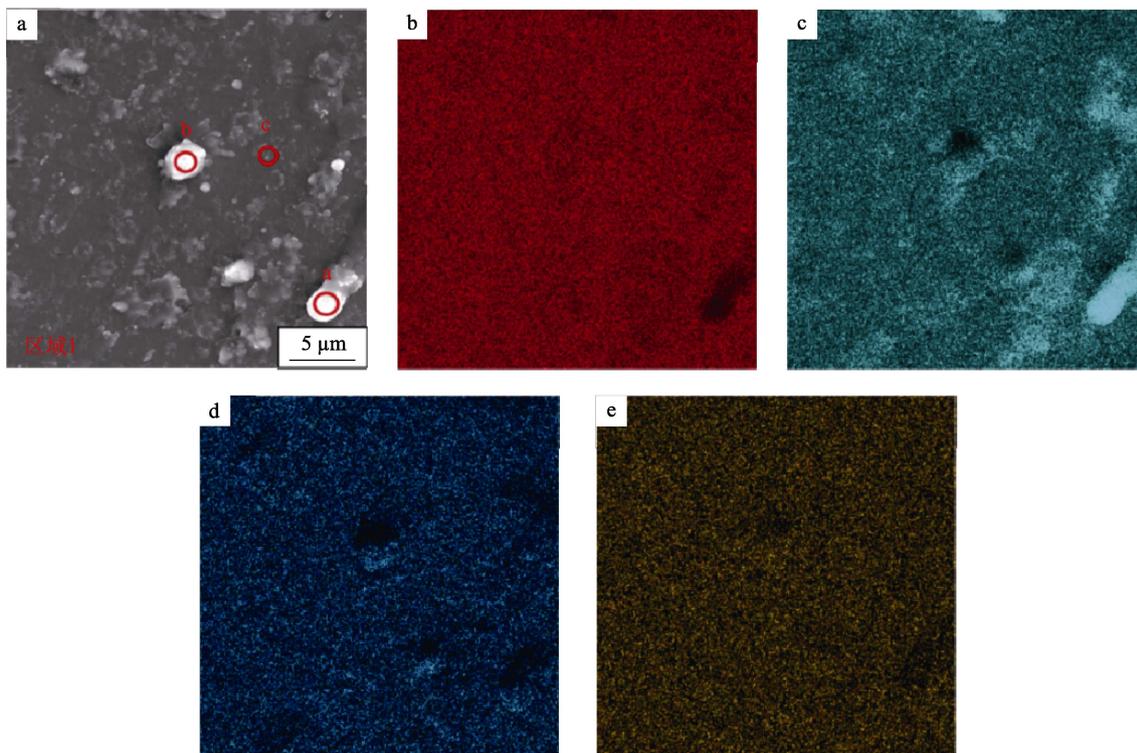


图2 TiAlYN 镀层表面元素面分布 (氮气与氩气流量比 40 : 60)

Fig.2 Surface element distribution of TiAlYN coating ($N_2 : Ar$ flow ratios is 40 : 60)

表 2 TiAlYN 镀层表面的元素含量 (氮气与氩气流量比为 40 : 60) (原子数分数, %)

Tab.2 Surface element content of TiAlYN coating (N₂ : Ar = 40 : 60) (atomic fraction, %)

Feature	Ti	Al	N	Y	O
a	12.37	61.92	24.21	0.38	1.13
b	33.85	37.53	20.57	0.88	7.18
c	41.54	35.39	21.56	0.76	0.75
Region 1	58.44	30.38	8.72	2.01	0.45

1.95%、2.01%，说明采用磁控溅射工艺通过对氮气与氩气流量比的调整，可以将 Y 的原子数分数控制在 1%~2%，实现 Y 少量掺杂的预期目标。

不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 涂层的截面形貌如图 3 所示。可以看到明显的三层结构：基体、过渡层和工作层。涂层平均厚度分别为 1.85、1.86、1.94、1.89 μm ，在氮气与氩气流量比为 50 : 50 时，涂层厚度最大为 1.94 μm 。涂层与基体界面处结合良好，涂层与基体之间存在明显的亮白色条纹，其为过渡层 Ti。涂层整体致密，无柱状生长现象，没有出现裂纹等缺陷，整体沉积状态良好。

2.2 TiAlYN 涂层三维形貌

在三维形貌图中，相同颜色表示此位置处起伏高度相同，多数试样表面高度一致的部分被认定为基准面，采用同一种颜色表示。距离基准面越远，颜色也会随之变化，代表高度差越大，整体粗糙度也越大。不同氮气和氩气比例下 TiAlYN 涂层的三维形貌和表面粗糙度如图 4 所示。可以看出，涂层表面粗糙度随着氮气与氩气流量比中氩气比例的升高而降低。当气体流量比为 40 : 60 时，达到最小值 66 nm，表面存在的大熔滴和颗粒呈现出红色，说明其偏离了蓝色的基准面，存在一定的缺陷。随着氩气比例升高，涂层表面晶粒更加细小，分布更均匀，表面起伏度变小。这是由于作为磁控溅射工作气体的氩气比例升高，轰击出了更多的 Y 粒子，使沉积到基体表面的 Y 粒子数量增多，晶粒有足够的界面能来形核、长大。Y 元素的加入形成了致密的非柱状晶的纳米结构细颗粒，可以显著地降低表面粗糙度，大大降低内应力^[28]。当氮气与氩气流量比为 40 : 60 时，涂层表面最为致密，颗粒细小且分布均匀，具有最小的表面粗糙度。涂层中 Y 含量提高，Y 的细化晶粒效果更加显著，使涂层

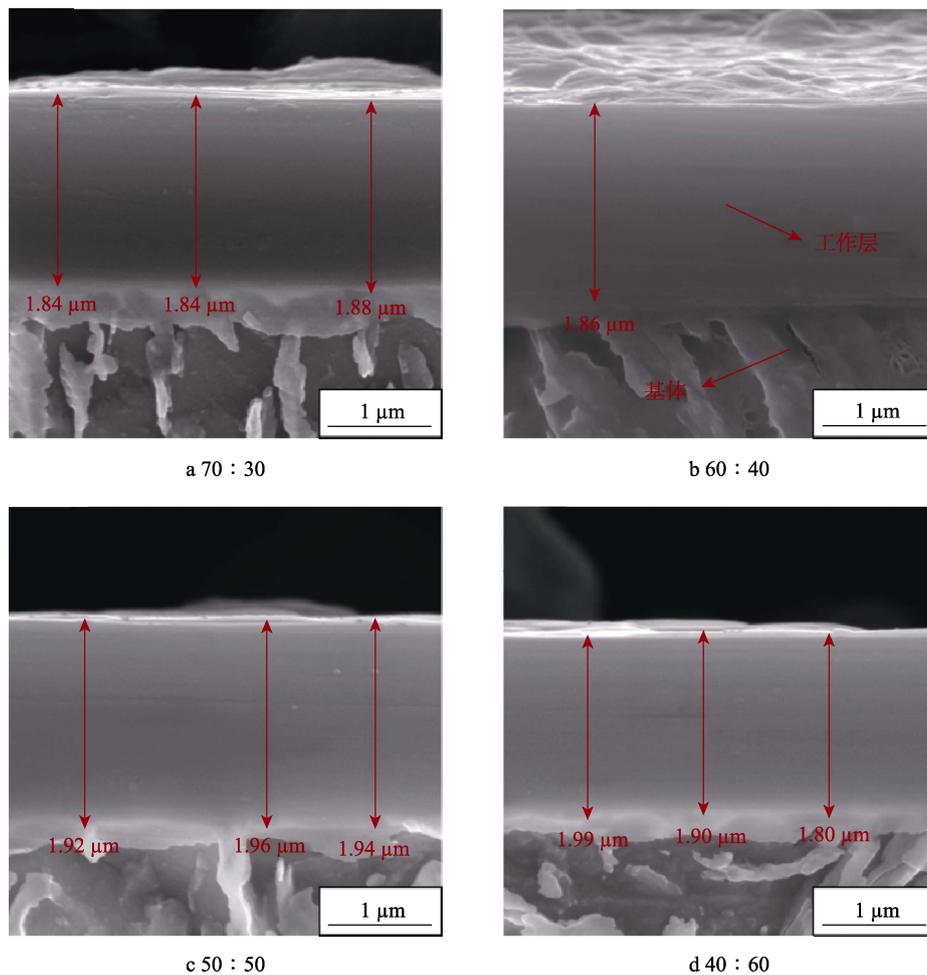


图 3 不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 镀层截面形貌

Fig.3 Cross-sectional morphologies of TiAlYN coatings at different N₂ : Ar flow ratios

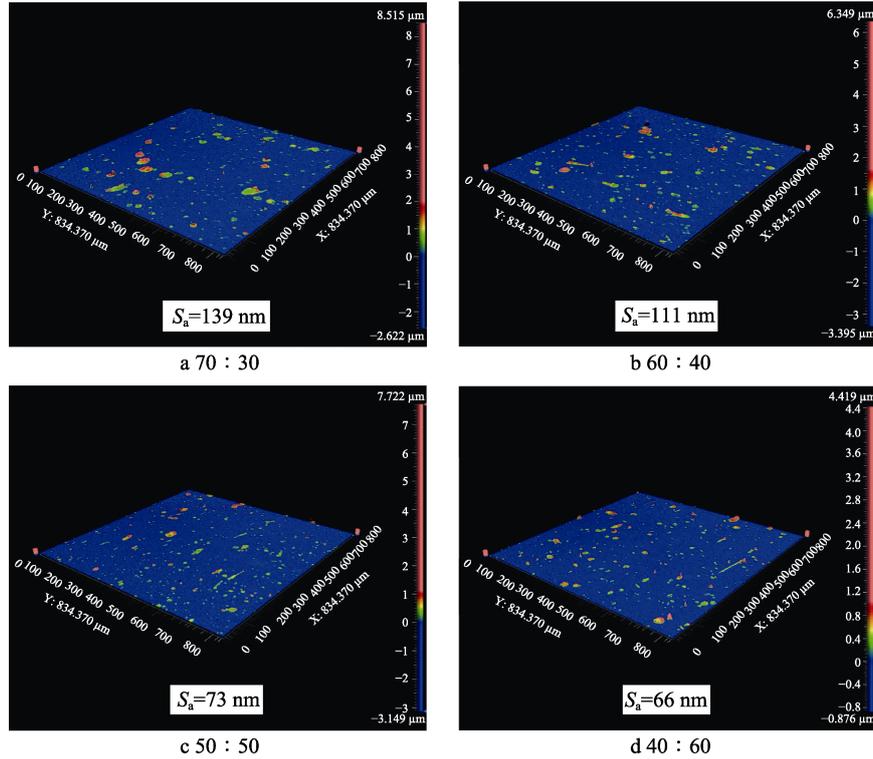


图4 不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 涂层的三维形貌

Fig.4 Three-dimensional morphologies of TiAlYN coatings at different N₂ : Ar flow ratios

表面的大颗粒尺寸变小，表面起伏度降低，从而粗糙度越小。

2.3 TiAlYN 涂层 XRD 物相分析

不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 涂层的 XRD 衍射图谱如图 5 所示。衍射图谱表明，涂层中 AlN 相衍射强度最高，表现为面心立方结构，(200)晶面有明显的择优生长取向。根据表 2 可知，Ti 元素含量高于 Al 元素，但在涂层中 Ti 元素形成的晶体结构少，说明薄膜倾向于沿低应变能的方向发展，形成更多 Al 的化合物^[29]。当气体比例为 70 : 30 时，腔室中氮气的比例较高，形成了较多的 AlN，所以 AlN 的峰值最高。随着氮气比例的下降，Y 含量的增加促进了薄膜沿(200)方向的生长。衍射峰在半峰宽处的衍射角远超过 1°，衍射峰更加尖锐，且内部残余应力较小，显示出非晶态物质所具有的典型特性。通过对不同氮气与氩气流量比下 AlN 择优生长取向(200)衍射峰的半峰宽进行计算，气体流量比为 70 : 30、60 : 40、50 : 50、40 : 60 时，衍射峰半峰宽分别为 0.279 1、0.369 0、0.268 7、0.260 9。氩气比例不断上升，Y 含量随之增加，衍射峰半峰宽越窄，说明晶粒尺寸越均匀，缺陷越少，涂层质量越高。利用谢乐公式对镀层晶粒尺寸进行计算，气体流量比为 70 : 30、60 : 40、50 : 50、40 : 60 时，镀层平均晶粒尺寸分别为 24.5、21.4、20.6、18.4 nm。随着氮气与氩气流量比中氩气比例的不不断提高，镀层平均晶粒尺寸不断减小，由 24.5 nm 减小到 18.4 nm。Y 元素含

量的增加，起到了更好的晶粒细化效果，涂层本底更加致密，结合强度更高。此外，图 5 中还检测出了 Al₂O₃ 相，是由于 Al 极易被氧化，在表面生成了致密的氧化膜来保护基体，提高涂层的抗氧化性。

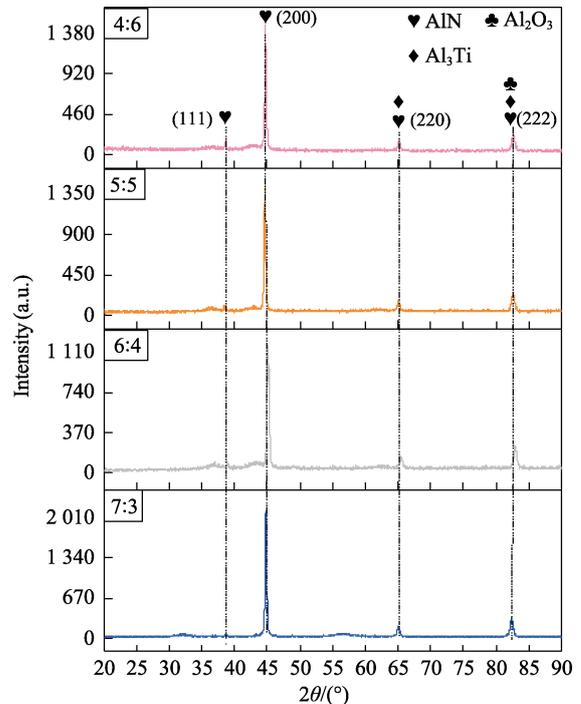


图5 不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 镀层 XRD 衍射图谱

Fig.5 XRD diffraction patterns of TiAlYN coatings at different N₂ : Arflow ratios

2.4 TiAlYN 涂层膜基结合力

不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 涂层的结合力如图 6 所示。可以看出, 随着氩气的比例上升, 涂层结合力不断提高, 最大值为 54 N。当 Y 的原子数分数从 1.14% 增加到 1.58%, 涂层与基体的结合力由 38 N 上升到 53 N, 然后趋于平稳。当氩气比例较低时, 涂层表面存在许多未被完全电离就沉积在基体上的大颗粒和大熔滴, 靶材粒子没有充足的能量形核、长大。当作为磁控溅射工作气体的 Ar 含量不断增加, 腔室中 Ar^+ 含量增多, 溅射出了更多的 Y 离子, 会在基体表面充分生长, 提高涂层致密度, 使涂层表面晶粒结构得到细化, 为涂层的形成提供了足够的硬度支撑来减弱塑性变形。

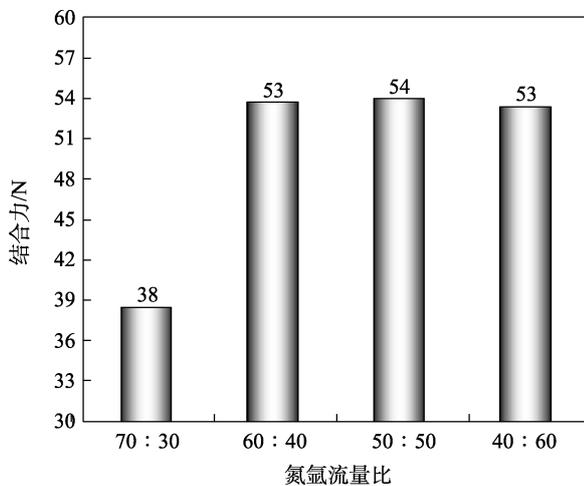


图 6 不同氮气与氩气流量比下镀层的膜基结合力
Fig.6 Film-substrate bonding force of the coating at different $N_2 : Ar$ flow ratios

2.5 TiAlYN 涂层摩擦学行为研究

不同氮气与氩气流量比下 TiAlYN 涂层的摩擦因数随时间变化曲线如图 7 所示。在摩擦初期, 摩擦因数曲线剧烈升高, 这是由于镀层表面存在一些粗大颗粒和细小缺陷, 从而造成表面粗糙度变大。当高速钢小球与镀层表面刚接触时摩擦失稳, 就会出现摩擦因数突然升高的现象。在经历了一个短暂的磨合期之后, 就立即进入摩擦曲线的平稳阶段, 维持着一个良好的磨损状态。摩擦因数随着氩气含量的升高而逐渐降低, 基体炮钢的摩擦因数在 0.65~0.7, 当氮气与氩气流量比为 40:60 时, TiAlYN 涂层摩擦因数达到最小值 0.4。涂层的摩擦因数与粗糙度存在一定的关系, 涂层的粗糙度越大, 摩擦因数越大, 耐磨性越差。这是由于在涂层与对磨材料刚开始接触时, 接触面积仅有涂层与对磨小球突起的小部分, 摩擦力主要来源于涂层表面的微小凸起部分的塑性变形或弹性变形。在摩擦初期, 随着 2 个接触面表面膜 (如氧化膜或吸附膜等) 的破裂, 二者直接接触, 接触面积增大。由于

表面黏着和塑性变形, 摩擦因数迅速增加, 直至磨屑产生, 第三体层形成, 减少了摩擦副之间的直接接触, 摩擦因数减小。

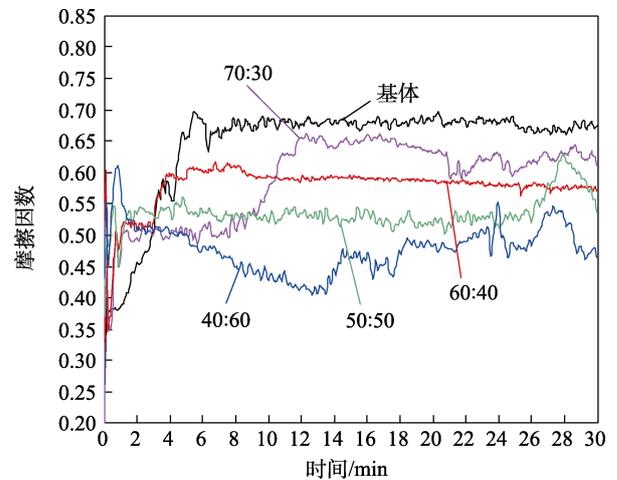


图 7 TiAlYN 涂层摩擦因数曲线
Fig.7 Friction coefficient curve of TiAlYN coating

不同 $N_2 : Ar$ 流量比下 TiAlYN 磨痕表面形貌如图 8 所示。可以看出, 镀层的磨损机制以磨粒磨损为主, 在滑动摩擦时, 磨粒在镀层表面发生滚动和压入, 在样品表面犁出许多犁沟和撕裂痕, 这些犁沟之间有大量磨屑残留。另外, 镀层还存在氧化磨损, 镀层亮白色区域的 O 元素含量高, 金属与空气中的氧作用生成氧化膜, 并随着摩擦的进行, 氧化膜在磨料作用下被不断磨去。同时, 摩擦过程中温度不断升高, 新的表面继续生成氧化膜, 并被磨去, 如此反复。不同 $N_2 : Ar$ 流量比镀层的磨痕宽度依次为 961、936、845、750 μm 。随着通入腔室氩气流量升高, 磨痕宽度逐渐变窄。当 $N_2 : Ar$ 流量比为 40:60 时, 磨痕宽度达到最小值 750 μm 。随着表面粗糙度和摩擦因数减小, 相对应的磨痕宽度逐渐变窄。这是由于作为磁控溅射工作气体的氩气流量增加时, 相同时间内轰击 Y 靶的 Ar^+ 离子数量变多, 沉积在涂层中的 Y 含量增加, 同时形成更多的 Y_2O_3 强化相, 这种强化相可以显著提高涂层的耐磨损性能^[30-31]。随着氩气流量的增加, 沉积到涂层的耐磨粒子增加, 涂层的抗磨损性能提升, 磨痕宽度变窄, 镀层的摩擦因数降低。同时, 随着氩气流量升高, 表面粗糙度降低, 抵抗磨损变形的能力提升, 磨痕宽度就会变窄, 摩擦因数降低。对图 8c 中不同特征的形貌进行 EDS 能谱分析, 元素含量和元素分布如表 3、图 9 所示。磨痕暗色区域仍保留为涂层成分, 涂层没有完全脱落, 由 Ti、Al、N、Y、Fe 元素组成; 而亮白色区域为磨损后涂层出现脱落, 基体组织氧化后的结果, 主要由 O、Fe 元素组成, 与基体成分相近。通过分析磨痕的形貌特征和表面元素分布可知, 镀层主要磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。

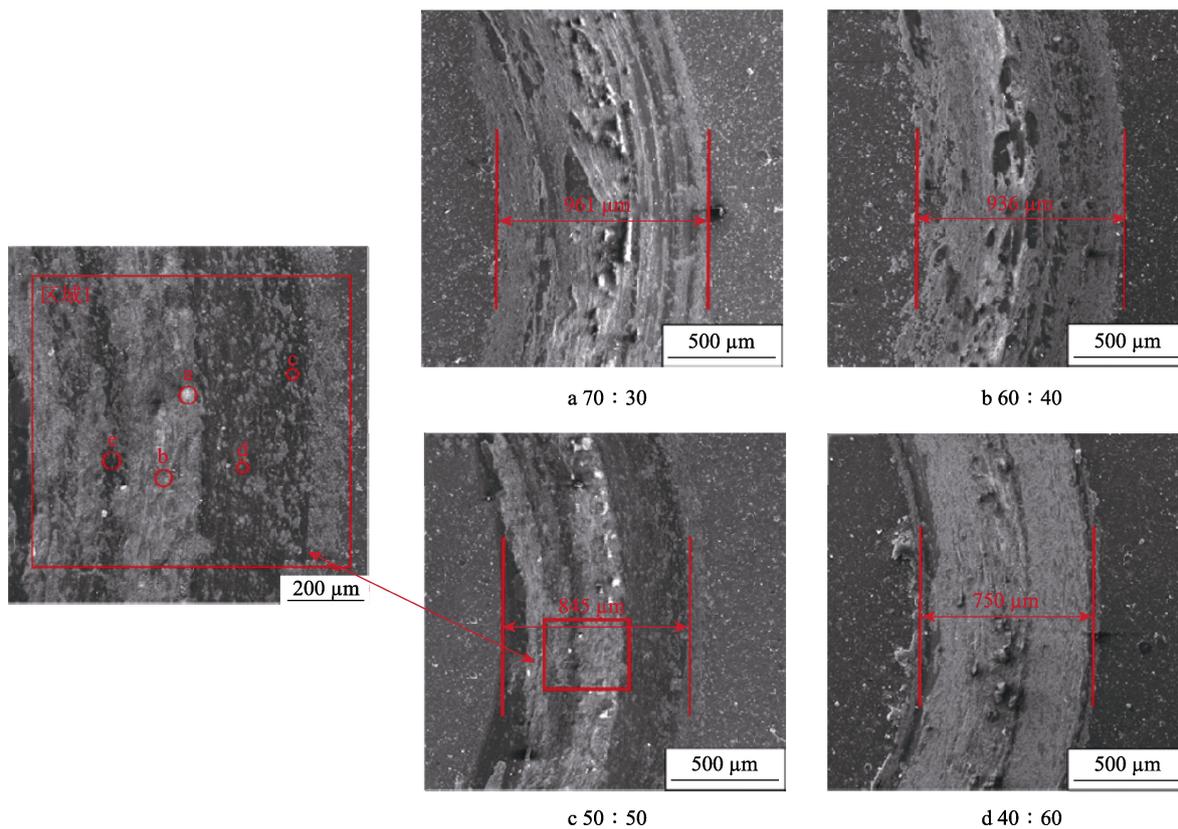


图8 不同 N₂ : Ar 流量比下 TiAlYN 镀层磨痕表面形貌
Fig.8 Surface morphologies of abrasion marks of TiAlYN coatings at different N₂ : Ar flow ratios

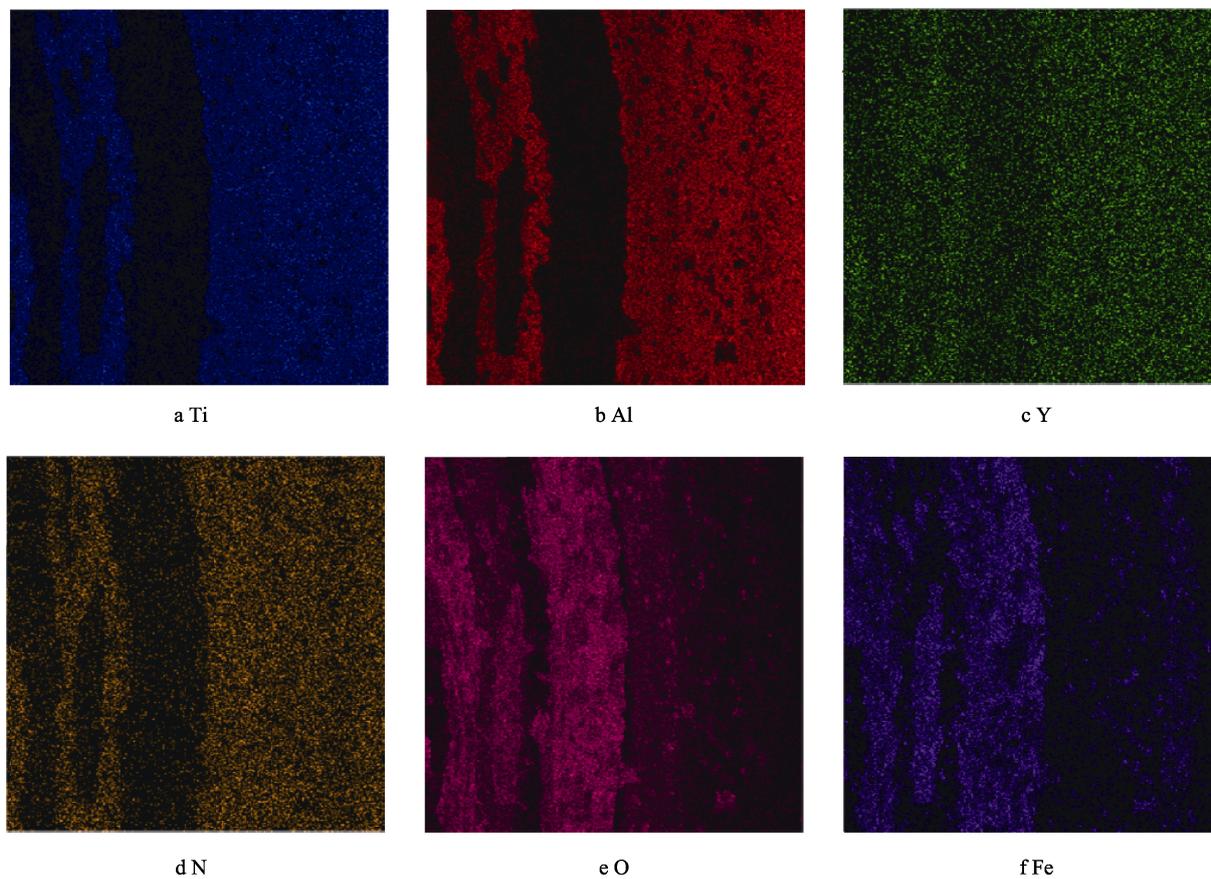


图9 磨痕元素分布图 (N₂ : Ar 流量比为 50 : 50)
Fig.9 Element distribution of abrasive marks (N₂ : Ar flow ratios is 50 : 50)

表 3 镀层表面的元素含量 ($N_2 : Ar$ 流量比为 50 : 50) (原子数分数, %)
Tab.3 Surface element content of the coating ($N_2 : Ar$ flow ratios is 50 : 50) (atomic fraction, %)

特征点	Ti	Al	N	Y	O	Fe
a	3.69	2.39	0	0.14	25.66	68.12
b	2.62	1.44	0	0.12	12.29	83.52
c	20.84	13.38	1.45	1.15	24.97	38.20
d	38.63	24.38	7.36	2.04	0.43	27.16
e	46.06	30.78	7.02	2.32	0.89	12.92
区域 1	23.97	15.85	3.31	1.22	8.61	47.05

3 结论

1) 随着腔室内氩气流量比例的升高, 涂层表面熔滴和亮白色颗粒逐渐细化, 致密性增加, 并且涂层整体致密, 无孔洞缺陷、无柱状生长情况。Y 元素的细晶强化作用提高了涂层质量, 通过调整氮气与氩气的比例, 可以将 Y 的原子数分数控制在 1%~2%, 实现磁控溅射对 Y 元素的少量掺杂。

2) 镀层 AlN(200)晶面有明显的择优生长趋势, 表现为面心立方结构。当 $N_2 : Ar$ 流量比为 40 : 60 时, 涂层表面的粗糙度最小值为 66 nm。Y 的掺入可以形成致密的非柱状晶纳米结构细颗粒, 显著降低涂层表面粗糙度, 降低涂层与基体之间的内应力。涂层表面起伏度降低, 也会降低涂层的摩擦因数, 提高涂层的减摩耐磨性。

3) 随着腔室内氩气流量比例的升高, 膜基结合力最大值为 54 N。当 $N_2 : Ar$ 流量比为 40 : 60 时, 镀层摩擦因数达到最小值 0.4, 镀层的磨损机制以磨粒磨损和氧化磨损为主。随着 Y 含量的不断升高, 摩擦过程中对涂层的损害程度降低, 延缓了火炮身管在炮弹发射过程中受到的剧烈摩擦磨损, 以保证更长的服役寿命。

4) 镀层制备过程中, 随着磁控溅射工作气体氩气比例的上升, 镀层中 Y 元素含量随之升高。Y 元素的细晶强化作用提升了镀层表面致密度, 降低了镀层摩擦因数。通过合理调控氮气与氩气流量比例, 得到了性能优异的氮化物涂层, 为火炮身管延寿提供了理论依据。

参考文献:

[1] 朱梦然, 曹京华, 先赫, 等. 身管内表面烧蚀磨损研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(10): 159-164.
ZHU M R, CAO J H, XIAN H, et al. Research Progress of Erosion on Inner Bore Surface of Gun Barrel[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(10): 159-164.

[2] 毛保全, 赵其进, 白向华, 等. 火炮身管延寿技术研究现状与展望[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 638-655.
MAO B Q, ZHAO Q J, BAI X H, et al. Review and

Prospect of Life Extension Technology for Gun Barrels[J]. ActaArmamentarii, 2023, 44(3): 638-655.

[3] 许耀峰, 杨雕, 刘朋科, 等. 火炮身管内膛表面材料强度退化机理研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1288-1295.
XU Y F, YANG D, LIU P K, et al. Study on Strength Degradation Mechanism of Material on Inner Bore Surface of Gun Barrel[J]. ActaArmamentarii, 2023, 44(5): 1288-1295.

[4] ZHANG L K, WANG K, PAN G, et al. A Review on Life Prediction Methods of Gun Barrel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2460(1): 012042.

[5] 夏明旗, 段艳君, 赵红瑞, 等. 火炮身管抗磨损烧蚀技术及发展动向[J]. 中国军转民, 2023(3): 36-37.
XIA M Q, DUAN Y J, ZHAO H R, et al. Anti-Wear and Ablation Technology and Development Trend of Gun Barrel[J]. Defence Industry Conversion in China, 2023 (3): 36-37.

[6] KUMAR D, KALRA S, JHA M S. A Concise Review on Degradation of Gun Barrels and Its Health Monitoring Techniques[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106791.

[7] 彭小敏, 夏长清, 吴安如, 等. 火炮身管烧蚀及其防护研究进展[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(3): 11-17.
PENG X M, XIA C Q, WU A R, et al. Development of the Ablation Behavior and Protection of Gun Barrel[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(3): 11-17.

[8] YANG D, YAN B, XU Y F, et al. Mechanism of Initiation and Propagation of Surface Cracks in Gun Bore under Thermomechanical Coupling Impact[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 62: 105194.

[9] 陈永才, 李鹏, 狄长春. 火炮身管内膛涂层制备及检验方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2008, 29(4): 53-58.
CHEN Y C, LI P, DI C C. Study on Inner Surface Coating and Test Method of Gun Barrel[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2008, 29(4): 53-58.

[10] 李硕, 李希超, 赵经香, 等. 基于涂层改性炮管寿命的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(2): 295-302.
LI S, LI X C, ZHAO J X, et al. Research Progress on Life-Extension of Gun Barrel Based on Coating Modification[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(2): 295-302.

[11] SHUKLA P, AWASTHI S, RAMKUMAR J, et al. Protective Trivalent Cr-Based Electrochemical Coatings for Gun Barrels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 768:

- 1039-1048.
- [12] WANG Z M, HU C D, WANG Y X, et al. Failure Mechanism of Gun Barrel Caused by Peeling of Cr Layer and Softening of Bore Matrix[J]. *Metals*, 2021, 11(2): 348.
- [13] MULLIGAN C P, SMITH S B, VIGILANTE G N. Characterization and Comparison of Magnetron Sputtered and Electroplated Gun Bore Coatings[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2006, 128(2): 240-245.
- [14] 刘展硕, 张罡, 柳泉, 等. $W_{18}Cr_4V$ 表面制备 CrAlYN 膜层的高温性能及耐磨性能研究[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(24): 68-71.
- LIU Z S, ZHANG G, LIU Q, et al. Study on High Temperature Performance and Wear Resistance of CrAlYN-Film Layer Prepared on Surface of $W_{18}Cr_4V$ [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(24): 68-71.
- [15] ROJAS T C, DOMÍNGUEZ-MEISTER S, BRIZUELA M, et al. High-Temperature Oxidation of CrAlYN Coatings: Implications of the Presence of Y and Type of Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 354: 203-213.
- [16] 谷佳宾, 李建勇, 李刘合, 等. 溅射技术对 TiN 涂层结构和力学性能的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(9): 160-169.
- GU J B, LI J Y, LI L H, et al. Effect of Sputtering Technology on Microstructure and Mechanical Properties of TiN Coatings[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(9): 160-169.
- [17] 于朋, 何箐, 袁涛, 等. 不同工艺参数对 TiN 薄膜形貌和力学性能的影响[J]. *新技术新工艺*, 2023(10): 59-65.
- YU P, HE Q, YUAN T, et al. Effect of Different Process Parameters on Morphology and Mechanical Properties of TiN Thin Films[J]. *New Technology & New Process*, 2023(10): 59-65.
- [18] MA H R, MIAO Q, ZHANG G H, et al. The Influence of Multilayer Structure on Mechanical Behavior of TiN/TiAlSiN Multilayer Coating[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(9): 12583-12591.
- [19] 王北川, 陈利. Al 含量对 TiAlN 涂层结构及性能的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(2): 29-38.
- WANG B C, CHEN L. Effect of Al Content on Microstructure and Properties of TiAlN Coatings[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(2): 29-38.
- [20] 段佳妮, 李文正, 赵春蕾, 等. 多弧离子镀制备 TiAlCN 和 TiAlN 涂层的结构和摩擦磨损性能[J]. *表面技术*, 2022, 51(4): 139-148.
- DUAN J N, LI W Z, ZHAO C L, et al. Structure and Tribological Property of TiAlCN and TiAlN Coatings Prepared by Multi-Arc Ion Plating[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 139-148.
- [21] 李昌恒, 刘奎仁, 魏世丞, 等. 磁控溅射工艺参数对 TiAlN 薄膜结构和性能影响规律研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2023, 51(1): 70-76.
- LI C H, LIU K R, WEI S C, et al. Study on Effect Law of Magnetron Sputtering Process Parameters on Microstructure and Properties of TiAlN Films[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2023, 51(1): 70-76.
- [22] 李明升, 冯长杰, 王福会. 钇元素的添加对电弧离子镀氮化钛铝涂层 900 °C 氧化行为的影响[C]// 第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 武汉: 重庆仪器材料研究所, 2007.
- LI M S, FENG C J, WANG F H. Influence of Y on the Oxidation Behavior of TiN Coatings Deposited by Arc Ion Plating at 900 °C[C]// Proceedings of the Sixth Chinese Academic Conference on Functional Materials and Their Applications. Wuhan: Chongqing Materials Research Institute Co Ltd, 2007.
- [23] 郭策安, 赵宗科, 胡明, 等. 添加 Y 对电弧离子镀 TiAlN 薄膜结构和摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(10): 139-144.
- GUO C A, ZHAO Z K, HU M, et al. Influence of Y on Microstructure and Performance of Friction and Wear of Arc Ion Plated TiAlN Film[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(10): 139-144.
- [24] 张健, 韩继龙, 郭策安, 等. 添加 Y 对炮钢表面电弧离子镀(Ti, Al)N 薄膜氧化性能的影响[J]. *功能材料*, 2015, 46(13): 13144-13147.
- ZHANG J, HAN J L, GUO C A, et al. Influence of Y Addition for Oxidation Performance of Arc Ion Plated(Ti, Al) N Films on Gun Steel[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(13): 13144-13147.
- [25] BELOUS V A, VASYLIEV V V, GOLTVYANYTSYA V S, et al. Structure and Properties of Ti-Al-Y-N Coatings Deposited from Filtered Vacuum-Arc Plasma[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(7): 1720-1726.
- [26] RIEDL H, HOLEC D, RACHBAUER R, et al. Phase Stability, Mechanical Properties and Thermal Stability of Y Alloyed Ti-Al-N Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 235: 174-180.
- [27] KOMAROV F F, KONSTANTINOV S V, STREL' NITSKIJ V E, et al. Effect of Helium Ion Irradiation on the Structure, the Phase Stability, and the Microhardness of TiN, TiAlN, and TiAlYN Nanostructured Coatings[J]. *Technical Physics*, 2016, 61(5): 696-702.
- [28] 范永中. Si 和 Y 掺杂对(Ti, Al)N 和(Cr, Al)N 涂层结构及性能的影响[D]. 南昌: 江西师范科技大学, 2012.
- FAN Y.C. Effects of Si and Y Doping on the Structure and Properties of (Ti,Al)N and (Cr,Al)N Coatings[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University of Science and Technology, 2012.
- [29] 韩继龙. 基于 TiAlN 和 TiAlYN 薄膜的火炮身管内膛强化研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
- HAN J L. Study on Strengthening of Gun Barrel Bore Based on TiAlN and TiAlYN Films[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2017.
- [30] ANINAT R, VALLE N, CHEMIN J B, et al. Addition of Ta and Y in a Hard Ti-Al-N PVD Coating: Individual and Conjugated Effect on the Oxidation and Wear Properties[J]. *Corrosion Science*, 2019, 156: 171-180.
- [31] 张云露. 合金元素 Y 及离子轰击对 α - Al_2O_3 涂层的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHANG Y L. Effect of Alloying Element Y and Ion Bombardment on α - Al_2O_3 Coating[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.