

电弧离子镀 TiN/ZrN 多层膜力学性能研究

杨皓 郭圆萌 东帅 黄美东*
(天津师范大学 物理与材料科学学院 天津 300387)

Mechanical Properties of TiN/ZrN Multilayers by Arc Ion Plating

YANG Hao, GUO Yuanmeng, DONG Shuai, HUANG Meidong*
(College of Physics and Materials Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract A series of TiN/ZrN multilayer films, characterized by a consistent modulation ratio and total thickness but varying numbers of periods, were meticulously fabricated through arc ion plating. This study delved into the impact of the number of periods on mechanical properties of these multilayer films. Structural and morphological analyses were conducted utilizing X-ray diffraction and scanning electron microscopy, respectively. To evaluate the mechanical and tribological attributes of the films, a battery of tests was employed, including a microhardness tester, a reciprocating friction and wear tester, and a multifunctional material surface performance tester. The findings elucidated that all multilayer films displayed a singular face-centered cubic structure featuring columnar crystal growth, a compact and smooth surface, and distinctive interface effects. The mechanical properties were intricately linked to both the interface structure and preferred orientation. Notably, at 50 periods, TiN exhibited a pronounced (200) preferred orientation, resulting in the multilayer films reaching their pinnacle hardness at 2568 Hv. Tribological properties were discernibly affected by both surface morphology and hardness. The film with 40 periods demonstrated the lowest friction coefficient at 0.47, and wear rates exhibited a decreasing trend with escalating hardness. At 50 periods, the wear rate attained an optimal value of $6.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, indicative of superior wear resistance.

Keywords Arc ion plating, Multilayer film, Modulation period, Hardness, Tribology performance

摘要 采用电弧离子镀制备了调制比和总厚度一定,周期数不同的一系列 TiN/ZrN 多层膜,研究了周期数对多层膜力学性能的影响。使用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜分析了多层膜的结构形貌,利用显微硬度计、往复摩擦试验机和多功能材料表面性能测试仪测试了薄膜的力学性能和摩擦学性能。结果表明,多层膜都呈现单一的面心立方结构,以柱状晶结构生长,表面致密光滑,界面效应明显,力学性能受到界面结构和择优取向的影响,当周期数为 50 时, TiN 具有明显的(200)择优取向,多层膜的硬度达到最大值 2568 Hv,多层膜的摩擦学性能受到表面形貌和硬度的影响,当周期数为 40 时,具有最低的摩擦系数为 0.47,磨损率随着硬度的增加而减少,在 50 周期时的磨损率为 $6.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,耐磨性最佳。

关键词 电弧离子镀 多层膜 调制周期 硬度 摩擦学性能

中图分类号: TB383.2

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312006

目前,薄膜材料被广泛应用于汽车制造,微电子,模具加工,航空航天等领域^[1-4],提高材料表面的耐磨性,耐腐蚀性和抗疲劳性具有重要意义。TiN 由于其具有较高的硬度,良好的韧性以及稳定的化学性质,成为了氮化物涂层中被应用最广泛的涂层之一^[5-9]。

然而随着现代工业的快速发展,传统的单层膜已经很难满足产业对涂层综合性能日益增高的需求^[10-11]。纳米多层薄膜是由两种或两种以上的材料在垂直于薄膜方向上交替沉积而形成的薄膜材料,由于层间界面效应和耦合作用,可有效阻碍位错运动和裂纹扩展,降低薄膜的残余应力,改善薄膜韧

性,形成更加稳定的外延结构,相比于单层膜,力学性能更加优异^[12-13]。两单层膜间的调制比与调制周期是改变多层膜性能的重要参数^[14]。例如: Leonov 等^[15]制备了不同调制周期的 CrN/TiN 纳米多层膜,发现多层膜均为面心立方结构,当调制周期为 250 nm 时,多层膜硬度有最大值 28 GPa,同时表现出较强的耐磨性。靳巧玲^[16]研究了调制周期对 TiN/CrN 纳米多层膜力学性能的影响,发现多层膜中的界面结构可以阻碍裂纹的扩展,增强薄膜的韧性,其硬度随着调制周期的减小而逐渐增大,硬化机理主要遵循 Hall-pech 理论。

目前,对氮化物/氮化物纳米多层膜的研究主要集中在 TiN/AlN, TiN/CrN, TiN/NbN 等体系上^[17-21],对采用电弧离子镀制备 TiN/ZrN 纳米多层膜的报道还相对较少^[22]。相较于磁控溅射技术,电弧离子镀具有离化率高,成膜速率快等显著优势。因此本文采用电弧离子镀技术在 304 不锈钢,硅基底上制备 Ti 过渡层的 TiN/ZrN 多层膜,通过固定薄膜总厚度和调制比,以研究周期数对 TiN/ZrN 纳米多层膜微观结构和性能的影响,改善薄膜的力学性能和摩擦学性能。

1 实验方法

1.1 基材预处理

采用 SA-700 6T 电弧离子镀膜机,以抛光的 304 不锈钢和硅作为基底制备 TiN/ZrN 纳米多层膜。将基底用去离子水,无水乙醇,丙酮依次超声清洗 15 min 以去除表面杂质,烘干后放入真空室。

1.2 薄膜制备

采用 SA-700 6T 电弧离子镀膜机制备 TiN/ZrN 纳米多层膜。镀膜前,将本底真空抽至 8×10^{-3} Pa,保持腔室温度为 290℃,通入纯度 99.99% 的 Ar,设置脉冲偏压-400 V,直流偏压-200 V,对基底进行辉光清洗 15 min,以除去基底表面杂质,提高膜基结合力。镀膜时,设置脉冲偏压-150 V,直流偏压-50 V,占空比 20%,Ar 和 N₂ 分压分别为 0.1 Pa 和 0.5 Pa,先沉积 2 min 的 Ti 过渡层,然后固定薄膜调制比和总厚度,通过控制每一周期的沉积时间,以获得周期数不同的 TiN/ZrN 纳米多层膜,总沉积时间为 20 min,调制周期与周期数成反比。TiN, ZrN 单层膜和 TiN/ZrN 纳米多层膜相关参数如表 1 所示。

表 1 TiN/ZrN 相关沉积参数

Tab. 1 TiN/ZrN related deposition parameters

样品编号	TiN 层沉积时间/s	ZrN 层沉积时间/s	调制比	周期数
S1	1200	—	—	—
S2	20	40	1:2	20
S3	13.3	26.7	1:2	30
S4	10	20	1:2	40
S5	8	16	1:2	50
S6	6.7	13.3	1:2	60
S7	—	1200	—	—

1.3 测试表征

采用德产 D/MAX-2500 型 X 射线衍射仪(XRD)测试样品物相结构,阴极为 Cu 靶 K α 射线($\lambda=0.154$ nm),扫描范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$;利用 SU8010 型扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜表面形貌;通过显微硬度计测定薄膜硬度,加载载荷 24.5 g,加载时间 15 s;采用 MS-M9000 往复摩擦试验机测试薄膜表面摩擦系数,摩擦副为 Al₂O₃,摩擦频率 3 Hz,摩擦长度 5 mm,载荷 2 N;采用 MFT-4000 多功能材料表面性能测试仪测试薄膜表面磨损体积。

2 结果与讨论

2.1 薄膜晶体结构

图 1 为不同周期数的 TiN/ZrN 纳米多层膜以及相同条件下制备得到的 TiN, ZrN 单层薄膜的 XRD 测试结果。由图谱可以看出, TiN, ZrN 都呈现出单一相的面心立方结构,没有其它杂质相生成,其中 TiN 单层膜在(200)峰表现出明显的择优取向。对于 TiN/ZrN 多层膜,当周期数增加时, TiN(111)衍

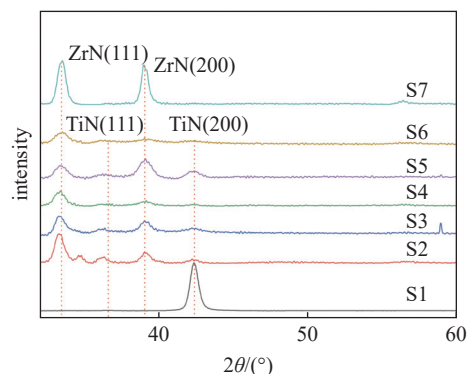


图1 TiN、ZrN 单层膜和 TiN/ZrN 纳米多层膜的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of TiN, ZrN monolayer and TiN/ZrN nanomultilayer films

射峰强度逐渐减小, 由(111)择优取向逐渐变为(200)择优取向, 在 50 周期时具有最明显的(200)择优取向, 同时 ZrN(111)衍射峰强度减弱, 峰宽变宽, 说明多层膜的晶粒尺寸随着周期数的增加而逐渐减小; 另外 TiN(111)峰逐渐向小角度方向偏移, 而 ZrN(111)峰逐渐向大角度方向偏移。根据协调应变效应^[23], TiN 与 ZrN 在形成共格生长结构时, 两单层间存在共格界面应力, 晶格常数较小的 TiN 受到拉应力, 而晶格常数较大的 ZrN 受到压应力, 最终在垂直于薄膜的一维方向上形成周期性交变应力场, 影响晶粒取向。

2.2 表面形貌

图 2 是不同周期数的 TiN/ZrN 纳米多层膜的 SEM 表面形貌图。从图中可以看出 5 组样品表面

致密性良好, 没有出现裂缝。同时可以观察到, 样品表面存在大小不一, 数量不等的金属大颗粒, 原因是在高温电弧的作用下, 电弧斑内能量密度大, 从熔池中蒸发出来的金属熔滴直接溅射到基底表面, 从而形成如图所示的大颗粒。对比五张图片可以发现, 当周期数增大时, TiN/ZrN 多层膜表面的金属大颗粒尺寸和数量均逐渐减少。这是因为当周期数增加时, 单一调制层内使用金属靶材的时间变短, Ti 靶和 Zr 靶的冷却时间相对变长, 靶材处温度更低, 从而蒸发出来的金属熔滴数量和尺寸变小, 大颗粒的形成受到了抑制, 改善了表面形貌^[24]; 另外, 随着周期数的增加, TiN/ZrN 多层膜的界面结构增多, 这种结构也阻碍了金属熔滴 Ti, Zr 在薄膜上的生长, 使表面变得更加光滑平整。

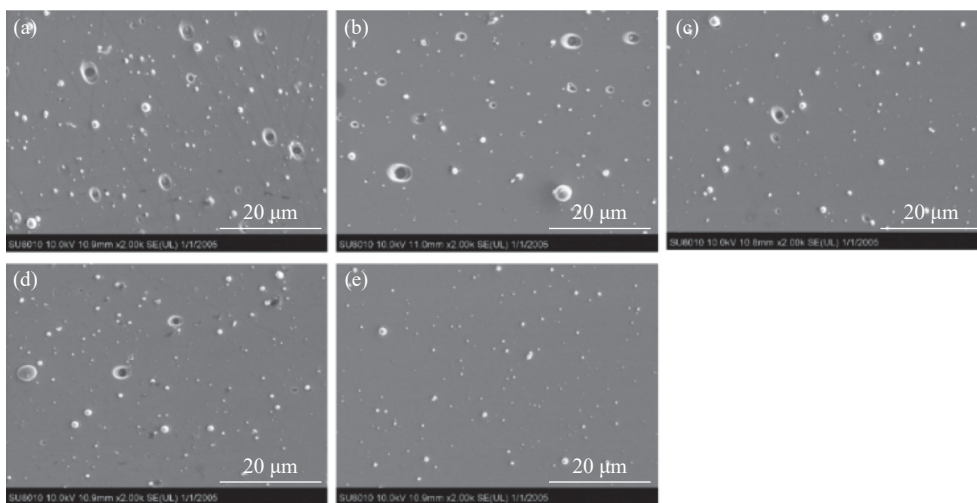


图2 不同周期数 TiN/ZrN 纳米多层膜 SEM 表面形貌图。(a) S2, (b) S3, (c) S4, (d) S5, (e) S6

Fig. 2 SEM surface topography of the TiN/ZrN nano-multilayer films with different cycle numbers. (a) S2, (b) S3, (c) S4, (d) S5, (e) S6

2.3 截面形貌

图 3 是周期数为 50 的 TiN/ZrN 纳米多层膜截面形貌图。从图中可以看到, 多层膜具有明显的层状结构, 其中暗层为 TiN, 亮层为 ZrN, 层厚比约为 1:2, 这与设计的相一致。多层膜呈现典型的柱状晶生长结构, 柱状晶贯穿整个薄膜, 沿垂直于薄膜方向生长, 在 TiN/CrN 和 AlTiN/VN 等^[25-26] 多层膜的报道中也见到了类似现象。这表明 ZrN 层的加入并不会打断柱状晶的生长, 而是与先沉积的 TiN 形成共格外延生长结构。

2.4 力学性能

通过显微硬度计在样品表面选取 5 个点进行

测试取平均值, 得到的 TiN, ZrN 单层膜和不同周期数 TiN/ZrN 多层膜的表面硬度结果见表 2。相比于 TiN, ZrN 单层薄膜, TiN/ZrN 纳米多层膜的硬度得到显著提升, 在 20 周期时的硬度最低为 1905 Hv, 这可能是由于调制周期较大, 界面效应不太明显。随着周期数增加, 硬度呈现先增大后减小的趋势, 在 50 周期时具有最高硬度 2568 Hv, 相较于 TiN 单层膜的硬度增高了 46%。这种现象主要归因于多层膜中产生的位错源较少, 位错在层间的运动受阻, 力学性能得到增强, 可通过模量差异理论和协调应变效应得到解释。

根据模量差异理论^[12], TiN 与 ZrN 具有不同的剪切模量($E_{\text{TiN}} > E_{\text{ZrN}}$), 当膜层厚度足够小时, 位错主

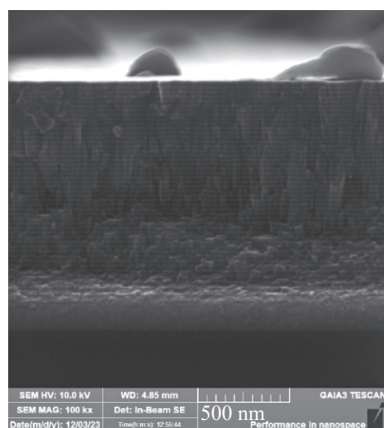


图3 50周期的TiN/ZrN纳米多层膜截面形貌图

Fig. 3 Sectional topography of TiN/ZrN nanomultilayers of 50 cycles

表2 TiN/ZrN和不同周期数TiN/ZrN多层膜的表面硬度

Tab. 2 Surface hardness of TiN/ZrN and TiN/ZrN multilayers with different cycle number

样品编号	周期数	硬度/HV _{0.245}
S1	—	1764
S2	20	1905
S3	30	2059
S4	40	2312
S5	50	2568
S6	60	2093
S7	—	1617

要由剪切模量较小的ZrN向剪切模量较大的TiN方向移动,此时会受到TiN排斥力的作用,位错运动受阻,硬度得到增强。

根据协调应变效应^[27],具有不同晶格常数的TiN和ZrN在形成共格界面时,会产生一定的晶格畸变,TiN层和ZrN层分别受到拉应力和压应力,在界面处形成周期性交变应力场,阻碍位错的运动。由XRD分析结果可知,随着周期数增加,晶粒更加细化,缺陷减少,位错运动受阻,薄膜得到强化,在50周期时硬度达到最大值,但当周期数进一步增加到60周期时,多层膜中的“混合界面”的比例可能增多,导致界面效应不明显,硬度反而降低。

除此之外,择优取向对薄膜的硬度也有影响,由XRD分析结果可知,TiN/ZrN多层膜在50周期时具有最明显的(200)择优取向,(111)为面心立方晶体的密排面不利于大晶格失配度的异质外延,(200)界面比(100)界面窄,对多层膜的硬度增加有利^[28]。

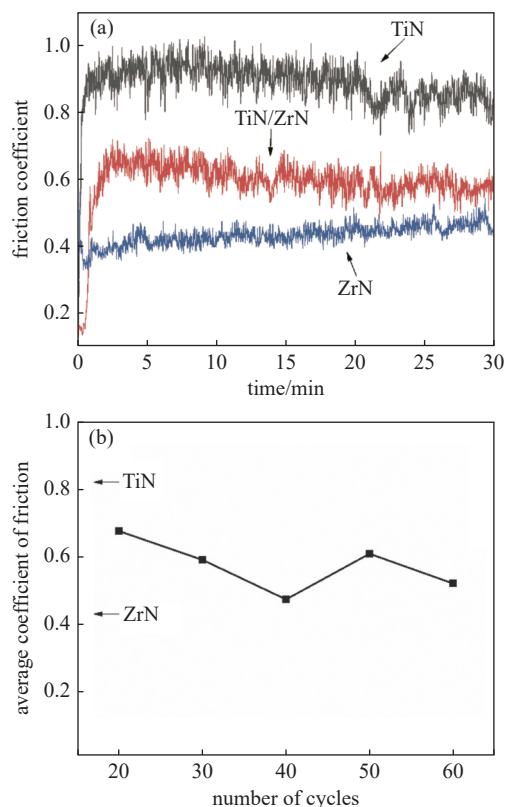


图4 膜层表面的摩擦系数测试结果。(a) TiN, ZrN 单层膜和 TiN/ZrN 多层膜, (b) TiN/ZrN 多层膜

Fig. 4 Measured friction coefficients of (a) the TiN, ZrN monolayer and the TiN/ZrN multilayers, and of (b) the TiN/ZrN multilayers

2.5 摩擦学性能

2.5.1 摩擦系数

图4(a)给出了TiN, ZrN和TiN/ZrN纳米多层膜的摩擦系数随时间变化的关系。从图4(a)可以看出三者均包括摩擦系数快速上升期和稳定期。在摩擦初始阶段,摩擦副最先和薄膜表面的微凸体接触^[29],使得实际接触点压力过大,薄膜产生塑性形变,随磨损产生的磨粒对薄膜具有犁耕作用,导致摩擦系数快速上升,随着时间的推移,薄膜表面的大颗粒逐渐被磨平,摩擦系数趋于稳定。TiN和ZrN的摩擦系数分别为0.88和0.43,对于TiN/ZrN纳米多层膜,由于插入了摩擦系数较低的ZrN,多层膜的摩擦系数处在两层膜之间。

由图4(b)可以看出,多层膜的平均摩擦系数介于0.4到0.7之间,随着周期数的增加,TiN/ZrN多层膜的平均摩擦系数先减小后增大,在40周期时,具有最低的摩擦系数0.47。结合TiN/ZrN多层膜SEM表面形貌图(图2)分析,这主要是由于周期数

的增加时, 薄膜表面的金属大颗粒减少, 表面形貌得以改善, 更加光滑平整, 使得摩擦系数逐渐降低。而对于 50 周期, 由于薄膜的硬度增高, 剪切强度增大, 导致摩擦系数略有上升。薄膜表面的粗糙度和硬度对摩擦系数都会产生影响。

2.5.2 磨损率

图 5 表示 TiN, ZrN 单层膜和不同周期数 TiN/ZrN 多层膜的磨损率。由图 5 可知, TiN/ZrN 多层膜的磨损率在 10^{-6} 数量级, 低于两单层膜, 具有更好的耐磨性。多层膜耐磨性的变化趋势并不完全与摩擦系数一致, 多层膜在 50 周期时的磨损率最低, 抗磨能力最强, 这说明 TiN/ZrN 多层膜磨损率并不完全由摩擦系数决定。通过前面的分析可以发现, 多层膜的磨损率随着硬度的升高而降低, 可见硬度是影响多层膜磨损性能的主要因素^[30]。当薄膜硬度较低时, 抵抗塑性变形能力弱, 膜层容易剥离脱落, 产生磨削, 加剧了膜层的磨损。

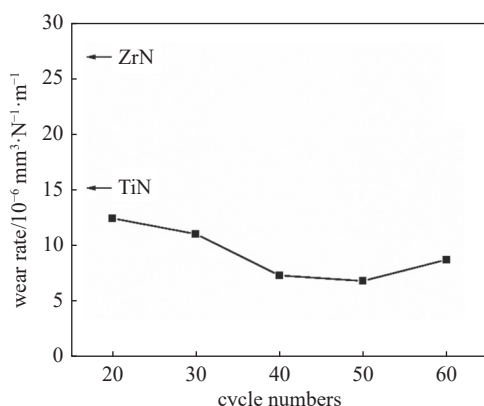


图5 TiN, ZrN 单层膜和不同周期数 TiN/ZrN 多层膜的磨损率

Fig. 5 Wear rates of TiN, ZrN monolayers and TiN/ZrN multilayers with different cycle number

3 结论

(1) 采用电弧离子镀制备的不同周期数的 TiN/ZrN 多层膜都呈现单一的面心立方结构, 随着周期数的增加, TiN 的择优取向逐渐由 (111) 变为 (200), 在 50 周期时具有最明显的 (200) 择优取向。

(2) TiN/ZrN 多层膜的结构致密, 呈现柱状晶生长结构, 周期数增多时, 多层膜的界面结构增多, 阻碍了金属熔滴 Ti, Zr 在薄膜上的生长, 表面变得更加光滑平整。

(3) TiN/ZrN 多层膜的力学性能受到界面结构

和择优取向的影响, 在 50 周期时最高硬度为 2568 Hv。多层膜的摩擦学性能与表面粗糙度和硬度均有关, 磨损率随着硬度的增加而减少, 在 50 周期时的磨损率为 $6.9 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 耐磨性最佳。TiN/ZrN 多层膜的综合性能优于 TiN, ZrN 单层膜。

参 考 文 献

- [1] Venkatesan G, Jithin P R, Rajan T V, et al. Effect of titanium nitride coating for improvement of fire resistivity of polymer composites for aerospace application[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(9): 1692–1703
- [2] North B. Six issues for the hard coatings community[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 106(2–3): 129–134
- [3] Chen P R. New materials: the cornerstone of high-end complex manufacturing[J]. *Jetliner*, 2019(06): 14–19 (陈培儒. 新材料: 高端复杂制造业的基石 [J]. *大飞机*, 2019(06): 14–19(in Chinese))
- [4] Peng X, Matthews A, Xue S. Plasma-based processes and thin film equipment for nano-scale device fabrication[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46: 1–37
- [5] Musil J, Bárdoš L, Rajský A, et al. TiN_x coatings prepared by dc reactive magnetron sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 1986, 136(2): 229–239
- [6] Cselle T, Barimani A. Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995, 76: 712–718
- [7] Matsunaga T, Okochi M, Takahashi M, et al. TiN electrode reactor for disinfection of drinking water[J]. *Water research*, 2000, 34(12): 3117–3122
- [8] Sundgren J E. Structure and properties of TiN coatings[J]. *Thin solid films*, 1985, 128(1–2): 21–44
- [9] Qin F, Chen X, Yi Z, et al. Ultra-broadband and wide-angle perfect solar absorber based on TiN nanodisk and Ti thin film structure[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 211: 110535
- [10] Tang W Z. Fabrication principles, techniques and applications of thin film materials[M]. Metallurgical Industry Press, 1998 (唐伟忠. 薄膜材料制备原理, 技术及应用 [M]. 冶金工业出版社, 1998(in Chinese))
- [11] Cheng W, Wang J, Ma X, et al. A review on microstructures and mechanical properties of protective nano-multilayered films or coatings[J]. *Journal of Materials Re-*

- search and Technology, 2023
- [12] Koehler J S. Attempt to design a strong solid[J]. *Physical review B*, 1970, 2(2): 547
- [13] Lin S, Zhou K, Dai M, et al. Structural, mechanical, and sand erosion properties of TiN/Zr/ZrN multilayer coatings[J]. *Vacuum*, 2015, 122: 179–186
- [14] Li X D, Zhao Z J, Huang S M, et al. Structure, magnetic properties and giant magnetostriction studies in [Tb/Fe/Dy] n nano-multilayer film[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(4): 608–611
- [15] Leonov A A, Denisova Y A, Denisov V V, et al. Structure and properties of CrN/TiN multi-layer coatings obtained by vacuum-arc plasma-assisted deposition method[J]. *Coatings*, 2023, 13(2): 351
- [16] Jing Q L. Study on the nano-mechanical properties of TiN/CrN multilayer films by magnetron sputtering[D]. Hebei University of Technology (靳巧玲. 磁控溅射 TiN/CrN 多层膜纳米力学性能研究 [D]. 河北工业大学, 2017(in Chinese))
- [17] Zuo B, Xu J, Lu G, et al. Microstructures, mechanical properties and corrosion resistance of TiN/AlN multilayer films[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(8): 11629–11635
- [18] Zeng Y, Zhen Y, Bian J, et al. Cubic AlN with high thermal stabilities in TiN/AlN multilayers[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 364: 317–322
- [19] Du J W, Chen L, Chen J, et al. Mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of TiN/CrN multilayer coatings[J]. *Vacuum*, 2020, 179: 109468
- [20] Atmani T D, Bouamerene M S, Gaceb M, et al. Improvement of the tribological behavior of TiN/CrN multilayer coatings by modulation wavelength variation[J]. *Tribology International*, 2024, 192: 109226
- [21] Kim S H, Baik Y J, Kwon D. Analysis of interfacial strengthening from composite hardness of TiN/VN and TiN/NbN multilayer hard coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 187(1): 47–53
- [22] Yang L, Chen Y, Chen J, et al. Anisotropic deformation and fracture mechanisms of physical vapor deposited TiN/ZrN multilayers[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 15502–15509
- [23] Kato M, Mori T, Schwartz L H. Hardening by spinodal modulated structure[J]. *Acta Metallurgica*, 1980, 28(3): 285–290
- [24] Lin S S, Zhou K S, Dai M J, et al. Modulation cycle of Ti-TiN-Zr-ZrN multilayer membrane performance impact[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(01): 114–118 (林松盛, 周克崧, 代明江, 等. 调制周期对 Ti-TiN-Zr-ZrN 多层膜性能的影响 [J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(01): 114–118(in Chinese))
- [25] Atmani T D, Gaceb M, Aknouche H, et al. Parametric study of the mechanical properties of nanocrystalline TiN/CrN multilayer coatings with a special focus on the effect of coating thickness and substrate roughness[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 23: 101001
- [26] Li M L, Wang E Q, Yue J L, et al. Microstructure, Mechanical and Tribological properties of TiAlN/VN nanomultilayer Films[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, 32(12): 1280–1284 (李淼磊, 王恩青, 岳建岭, 等. TiAlN/VN 纳米多层膜的微结构与力学和摩擦学性能 [J]. 无机材料学报, 2017, 32(12): 1280–1284(in Chinese))
- [27] Sproul W D. New routes in the preparation of mechanically hard films[J]. *Science*, 1996, 273(5277): 889–892
- [28] Xu X M, Wang J, Zhao Y et al. Interface and preferred orientation of TiN/ZrN nanometer multilayer film hardness change[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006(10): 5380–5385 (徐晓明, 王娟, 赵阳, 等. 界面和择优取向对 TiN/ZrN 纳米多层膜硬度变化的影响 [J]. 物理学报, 2006(10): 5380–5385(in Chinese))
- [29] Zhang Q Y, Chen H, Ren X R, et al. Effect of Al target sputtering power on microstructure and tribological properties of CrAlN coatings[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2017, 8(05): 109–114 (张钦英, 陈颖, 任兴润, 等. Al 靶溅射功率对 CrAlN 涂层组织结构及摩擦性能的影响 [J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(05): 109–114(in Chinese))
- [30] An J, Zhang Q Y. Structural and tribological properties of TiN/TaN multilayers[J]. *Journal of tribology*, 2005(01): 7–12 (安健, 张庆瑜. TiN/TaN 多层膜的结构和摩擦学性能 [J]. 摩擦学学报, 2005(01): 7–12(in Chinese))