

多弧离子镀 TiAlCrN 薄膜的制备及其抗氧化性能研究

付泽钰, 王天国

(湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002)

[摘要] 为提高模具钢表面性能, 延长模具钢使用寿命, 采用多弧离子镀技术在 H13 模具钢表面制备 TiAlCrN 薄膜。采用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)等方法研究氮氩流量比对 TiAlCrN 薄膜的表面形貌、物相组织、硬度、结合力、高温抗氧化性能的影响。研究表明: 随着氮氩比的增加, TiAlCrN 薄膜表面大颗粒数量先增加后减少, 硬度、结合力、高温抗氧化性能先增强后减弱; 在氮氩比为 8:2 时, TiAlCrN 薄膜具有最优性能, 氧化前的薄膜硬度达到最大值 2 700 HV_{0.5N}, 膜基结合力达到最大值 26 N, 高温抗氧化性能达到最优。

[关键词] 多弧离子镀; TiAlCrN 薄膜; 氮氩比; 抗氧化性能

[中图分类号] TG174.444 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0122

[文章编号] 1001-1560(2022)05-0035-06

Research on Preparation and Oxidation Resistance of TiAlCrN Film by Multi-Arc Ion Plating

FU Ze-yu, WANG Tian-guo

(School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: In order to improve the surface properties and prolong the service life of die steel, TiAlCrN film was prepared on the surface of H13 die steel by multi-arc ion plating technology. The effects of nitrogen-argon flow ratio on the surface morphology, phase structure, hardness, adhesion, and high temperature oxidation resistance of TiAlCrN film were investigated through scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Results showed that with the increase of nitrogen-argon ratio, the number of large particles on the surface of TiAlCrN film increased first and then decreased, and the hardness, adhesion and high temperature oxidation resistance also increased first and then decreased. When the nitrogen-argon ratio was 8:2, the as-prepared TiAlCrN film had the optimal properties, such as the maximum hardness of 2700 HV_{0.5N}, the maximum film-substrate adhesion of 26 N, and the optimal high-temperature oxidation resistance.

Key words: multi-arc ion plating; TiAlCrN film; nitrogen-argon flow ratio; oxidation resistance

0 前言

目前,世界制造业中大多数零部件都是通过模具成型制造。模具的使用寿命和表面质量是衡量模具性能的重要指标,但由于其恶劣的工作环境使表面极易氧化,从而使模具使用寿命降低。模具的成本一般较高,更换模具不仅会降低工作效率,还会提高成本。因此,提高模具的表面高温抗氧化性能是一个尤为重要的方向^[1]。硬质薄膜能够显著提高模具表面高温抗氧化性能,提高模具质量,延长模具的使用寿命,具有很大的经济效益。硬质薄膜的制备方法主要有物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)。其中,CVD制

备过程中温度要求较高,超过大多数基体的热处理温度,且容易使基体表面产生残余应力,影响硬质薄膜的性能;而 PVD 技术对环境要求较低,且制备出的硬质薄膜结构致密,性能优异。多弧离子镀是目前应用最广泛的 PVD 技术,有离化率高、沉积速度快、沉积膜的质量及附着性好、靶材选择范围广泛等优点,能制备出结构致密、膜基结合力高的硬质薄膜^[2-8]。

TiN 硬质薄膜具有较高的硬度、耐磨性,被广泛应用于刀具、模具表面。许建平等^[9]以高速钢为基底采用多弧离子镀技术制备 TiN 涂层,发现 TiN 涂层在 500 °C 以上时开始氧化生成 TiO₂,当氧化温度超过 600 °C 时,会快速生成 TiO₂,使涂层力学性能急剧下降,降低

[收稿日期] 2021-11-30

[基金项目] 湖北省教育厅科学技术项目(Q20181802)资助

[通信作者] 王天国(1978-),博士,教授,研究方向为多弧离子镀硬质薄膜技术,电话:0719-8238783, E-mail: tgwang1978@sina.com

工、模具使用寿命。在 TiN 硬质薄膜中加入 Al 形成 TiAlN 硬质薄膜,能大幅提高薄膜的力学性能、氧化性能。梁启超等^[10]、吴浩龙等^[11]发现 TiAlN 薄膜在 800 °C 下氧化 1 h 后,表面组织形貌并未发生明显变化。这是由于在氧化过程中,Al 原子在薄膜表面能率先氧化形成致密的 Al₂O₃,保护内部被进一步氧化^[12]。王赛玉等^[13]在金属陶瓷基体上制备 TiAlCrN 薄膜,发现在 1 000 °C 氧化 1 h 后,薄膜表面氧化物颗粒细小,没有出现开裂。吴亚文等^[14]采用多弧离子镀技术在钎合金基体表面制备 CrTiAlN 薄膜,研究表明在 1 060 °C 下氧化 1 h 后,薄膜表面出现局部开裂,基体开始氧化。在 TiAlN 薄膜中加入 Cr 形成 TiAlCrN 薄膜,Cr 元素的加入会细化晶粒尺寸,使薄膜更加均匀致密,增强薄膜的高温抗氧化性能,提高薄膜的综合力学性能^[15-20]。目前在金属陶瓷基体及合金表面制备 TiAlCrN 薄膜的研究较多,但在 H13 模具钢表面制备 TiAlCrN 薄膜的研究报道较少。在模具钢基体上沉积 TiAlCrN 薄膜,可望改善模具钢表面性能,延长模具钢的使用寿命。因此,本工作采用多弧离子镀技术在 H13 模具钢表面制备 TiAlCrN 薄膜,研究不同氮氩流量比对 TiAlCrN 薄膜表面形貌、力学性能以及高温抗氧化性能的影响。

1 试验

1.1 薄膜制备

选用 H13 模具钢作为本次试验基体材料,尺寸为 20 mm×10 mm×8 mm。对基材进行预先热处理以提高硬度,先加热至 750 °C 保温 25 min,再升至 1 050 °C 保温 20 min 后气油淬火,最后 450 °C 回火 2 次。使用 200~2 000 目砂纸逐渐将试样表面打磨精细,然后用抛光机抛光至表面粗糙度 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$,再分别用丙酮和无水乙醇超声波清洗 30 min,以增强膜基附着,最后吹干装入炉中。

采用 TSU-650 型多功能镀膜机进行镀膜试验,靶材为 Ti-Al-Cr 合金靶,工作气体为高纯氩气,反应气体为高纯氮气。镀膜试验前先将炉腔内抽真空至 1.0×10^{-3} Pa,通入氩气使炉腔压强至 2 Pa,调节偏压电源至 400 V 进行偏压清洗,以提高基体表面清洁度,偏压清洗 20 min 后调节偏压,打开镀膜电源先预镀 TiAlCr 中间层 5 min,中间层可以增加涂层与基体的亲和度,增强膜基结合力,然后通入氮气镀膜,30 min 后关闭镀膜电源,随炉冷却至室温后取出试样。本次试验工艺参数见表 1,氮氩比为氮气与氩气的流量比。

表 1 TiAlCrN 薄膜沉积工艺参数

Table 1 TiCrAlN film deposition process parameters

样品号	镀膜压力/Pa	氮氩比	偏压/V	镀膜时间/min
1	0.8	6 : 4	100	30
2	0.8	7 : 3	100	30
3	0.8	8 : 2	100	30
4	0.8	9 : 1	100	30

1.2 测试分析

使用 JSM-6510LV 型扫描电镜(SEM)观察氧化前后薄膜表面形貌;使用 DX-2700 型 X 射线衍射仪(XRD)检测氧化前后薄膜物相组织;使用 HV-1000 型显微硬度计检测氧化前后薄膜的显微硬度,加载载荷 0.49 N,加载时间 20 s,每个试样取 7 个点检测,取平均值;使用 WS-2005 型涂层附着自动划痕仪测量氧化前后薄膜与基体的膜基结合力,试验在动载荷状态下进行,加载载荷 40 N,加载速率 40 N/m;使用 SX-2.5-10 型箱式电阻炉进行氧化试验,使用分析天平称取高温氧化前的质量,将试样在 800 °C 保温 1 h 后称取氧化后质量,计算氧化前后质量变化百分比以及单位面积氧化增重;检测 TiAlCrN 薄膜 800 °C 氧化 1 h 后薄膜表面的硬度、结合力等力学性能与氧化前对比分析。

2 结果与讨论

2.1 TiAlCrN 薄膜氧化前后表面形貌

图 1 为不同氮氩比下制备的 TiAlCrN 薄膜氧化前的表面 SEM 形貌。从图 1a,1b 可以看出,当氮氩比较小时,TiAlCrN 薄膜表面大颗粒数量明显较多,表面颗粒尺寸不均匀。大颗粒形成原因可能是阴极 TiAlCr 靶材熔点较低,在蒸发过程中产生金属原子,这些原子无法完全电离,直接沉积基体表面形成大颗粒。从图 1c,1d 可以看出,随着氮氩比的增加,TiAlCrN 薄膜表面大颗粒数量、尺寸都减小,表面均匀致密,孔隙率降低。由此可以得出,氮氩比能直接影响 TiAlCrN 薄膜表面大颗粒数量,当氮氩比较小时,反应炉腔中钛、铝、铬离子无法完全与 N₂ 发生碰撞反应,沉积到基体表面形成大颗粒;随着氮氩比逐渐增加,炉腔内 N₂ 充分,钛、铝、铬离子能与 N₂ 多次发生碰撞反应,减少大颗粒数量^[10]。但图 1c 颗粒尺寸明显比图 1d 小,这是因为氮氩比过高时,炉腔内 N₂ 过多,N₂ 会直接与阴极 TiAlCr 靶材发生反应,形成靶中毒,使大颗粒数量增加;过高的氮气压还会减小离子自由程,减弱离子轰击作用,使薄膜氧化前的表面大颗粒数量增加。

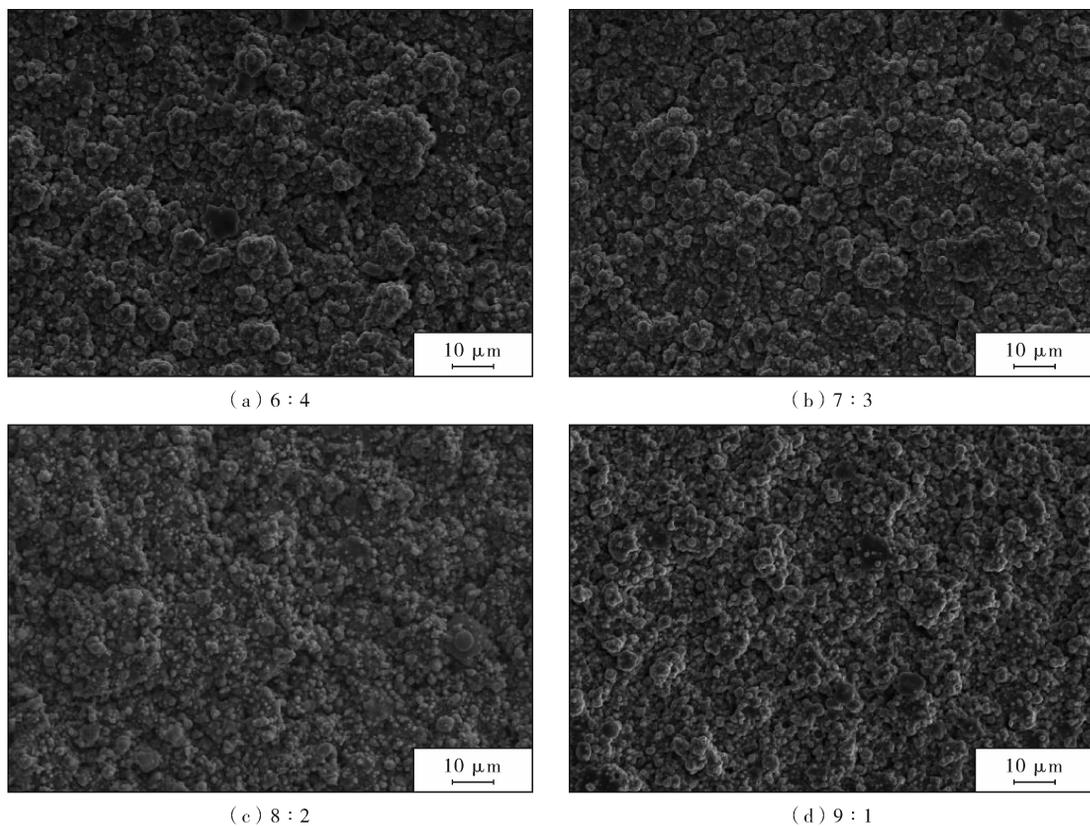


图 1 不同氮氩比 TiAlCrN 薄膜氧化前的表面 SEM 形貌

Fig. 1 Surface SEM morphologies of TiAlCrN films at different N_2/Ar ratios before oxidation

图 2 为不同氮氩比下制备的 TiAlCrN 薄膜在 800 °C 氧化 1 h 后表面 SEM 形貌。

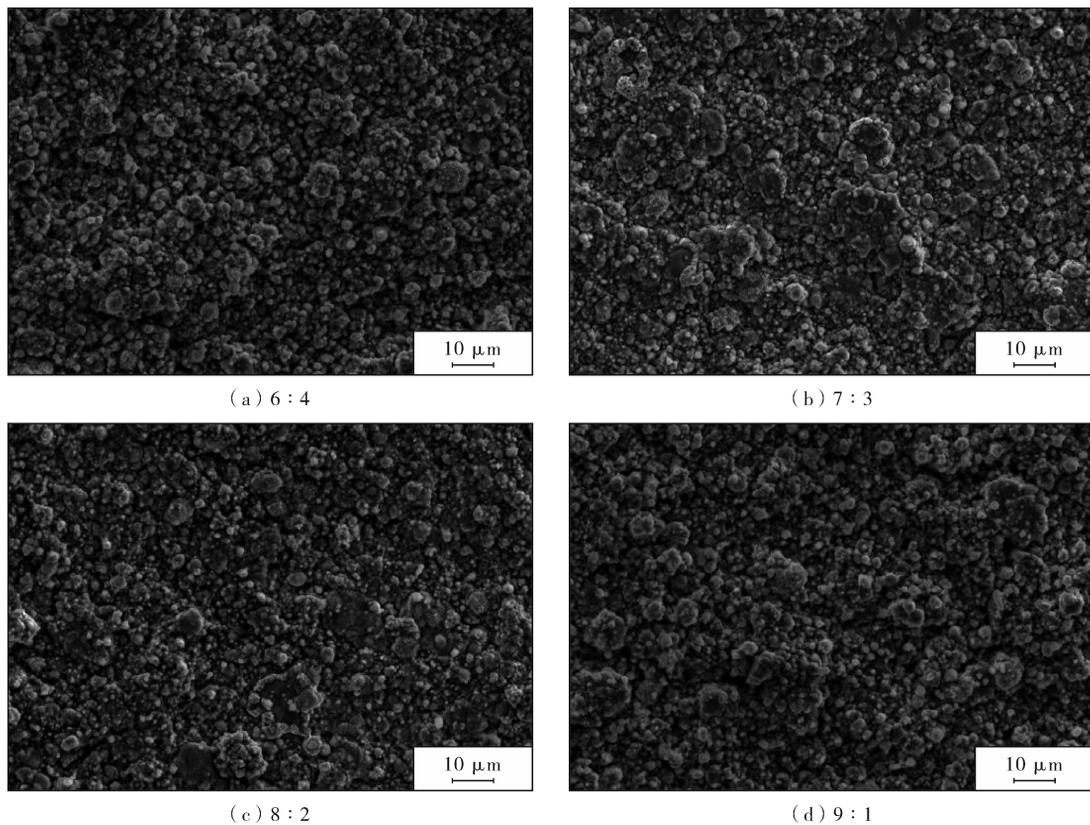


图 2 不同氮氩比 TiAlCrN 薄膜 800 °C 氧化 1 h 后表面 SEM 形貌

Fig. 2 Surface SEM morphologies of TiAlCrN films at different N_2/Ar ratios after oxidation at 800 °C for 1 h

从图2中可以明显看出,在4种不同氮氩比下制备的TiAlCrN薄膜表面均产生白色颗粒状氧化产物,其中氮氩比为8:2时氧化颗粒最小,氮氩比为6:4时氧化颗粒最大,且4种氮氩比下制备的TiAlCrN薄膜在800℃氧化1h后都未出现明显裂缝。以上试验现象表明,TiAlCrN薄膜具有良好的高温抗氧化性能。

2.2 TiAlCrN薄膜氧化前后物相

图3为不同氮氩比下制备的TiAlCrN薄膜氧化前的XRD谱。可以看出TiAlCrN薄膜在(111)和(200)面出现面心立方晶体结构的特征图谱,最强峰对应为(111),即TiAlCrN薄膜在(111)面择优取向生长。从图中可以看出氮氩比对薄膜微观组织生长和相组成有很大影响。随着氮氩比的增加,(111)面呈现出先增强后减弱特征,在氮氩比为8:2时最强,当氮氩比继续增加时,(111)衍射峰减弱;(200)面随着氮氩比增加衍射峰逐渐减弱,在氮氩比为8:2时消失,随着氮氩比继续增加,(200)面又出现。这表明TiAlCrN薄膜在氮氩比为8:2时结晶性最好。当氮氩比继续增大,使炉腔内N₂流量增加,粒子散射增强,降低粒子沉积时轰击能量,从而降低薄膜的结晶性^[4,8]。

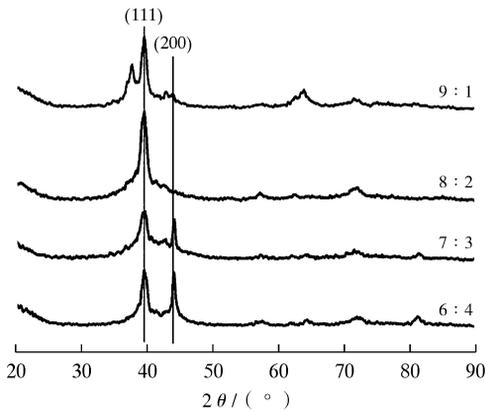


图3 不同氮氩比TiAlCrN薄膜氧化前的XRD谱
Fig. 3 XRD patterns of TiAlCrN films at different N₂/Ar ratios before oxidation

图4为不同氮氩比下制备的TiAlCrN薄膜在800℃氧化1h后的XRD谱。从XRD谱分析可得,TiAlCrN薄膜经过800℃氧化1h后生成Al₂O₃,TiO₂,Cr₂O₃相,没有生成Fe的氧化物,且仍能检测出TiAlCrN相,说明TiAlCrN薄膜在800℃具有良好的抗氧化性能,膜层在此温度下没有破裂或剥落,对基体有很好的保护作用。从图4可以看出,随着氮氩比增加,Al₂O₃,TiO₂,Cr₂O₃峰强度先减弱后增强,在氮氩比为8:2时各个峰强度最弱;同时,TiAlCrN相的衍射峰随着氮氩比增加先增强后减弱,在氮氩流量比为8:2时达到最

强,说明在此时生成的氧化产物最少,TiAlCrN薄膜的抗氧化性能最优。

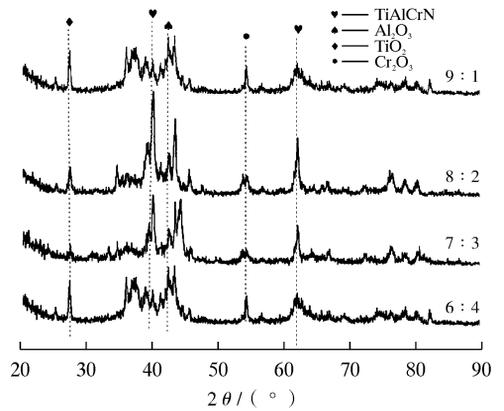


图4 不同氮氩比TiAlCrN薄膜800℃氧化1h后的XRD谱
Fig. 4 XRD patterns of TiAlCrN films at different N₂/Ar ratios after oxidation at 800℃ for 1 h

2.3 TiAlCrN薄膜氧化前后硬度

图5为不同氮氩比下制备的TiAlCrN薄膜氧化前后的显微硬度。

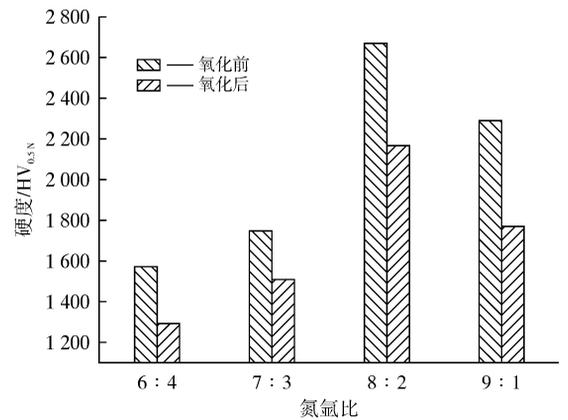


图5 不同氮氩比TiAlCrN薄膜氧化前后的显微硬度
Fig. 5 Microhardness of TiAlCrN films at different N₂/Ar ratios before and after oxidation

从图5可以明显看出,氮氩比对TiAlCrN薄膜氧化前后的显微硬度有显著影响,随着氮氩比增加,TiAlCrN薄膜的显微硬度均先增加后减小,在氮氩比为8:2时达到最大值,氧化前约为2700 HV_{0.05}。氮氩比主要是通过对TiAlCrN薄膜的表面形貌以及相结构的影响从而影响硬度。从图1可以看出,随着氮氩比增加,TiAlCrN薄膜表面大颗粒数量逐渐减少,大颗粒尺寸逐渐细小,使得TiAlCrN薄膜更加均匀致密,因而具有更高的硬度。另外,从图3可以看出,随着氮氩比增加,(111)衍射峰先增强后减弱,在氮氩比为8:2时为(111)面择优取向,研究表明,相较于(200)晶面择优取向,(111)面择优取向形成的TiAlCrN薄膜致密度高,形成的TiAlCrN薄膜硬度更高。从图5可以看出,氧化后

TiAlCrN 薄膜的显微硬度相较于氧化前有所下降。由图 2 和图 4 可以看出,氧化后 TiAlCrN 薄膜表面增加许多氧化颗粒,经过 800 °C 高温氧化 1 h 后,TiAlCrN 薄膜表面生成部分软质氧化物颗粒,这些氧化物使得薄膜表面硬度有所下降,但下降幅度不大,依然对基体有保护作用。

2.4 TiAlCrN 薄膜氧化前后结合力

图 6 为不同氮氩比下制备的 TiAlCrN 薄膜氧化前后的膜基结合力。从图中可以看出,随着氮氩比增加,TiAlCrN 薄膜的膜基结合力先增加后下降,在氮氩比为 8 : 2 时达到最大值,氧化前约 26 N。这是因为随着氮氩比增加,炉腔内 N_2 含量逐渐增加,有足够的 N_2 与阴极靶材溅射出的离子发生碰撞反应形成高能量的小颗粒沉积在基体表面,这些高能小颗粒在基体表面沉积形成组织细小且均匀致密的 TiAlCrN 薄膜,能保证基体与膜层间有良好的膜基结合力^[11]。从图 6 可以看出,氧化后的 TiAlCrN 薄膜膜基结合力相较于氧化前有所下降,从图 2、图 4 可以看出,氧化后 TiAlCrN 薄膜表面生成氧化物小颗粒,这些氧化物降低膜层的致密性,使 TiAlCrN 薄膜表面组织不均匀,因此 TiAlCrN 薄膜氧化后膜基结合力会下降。

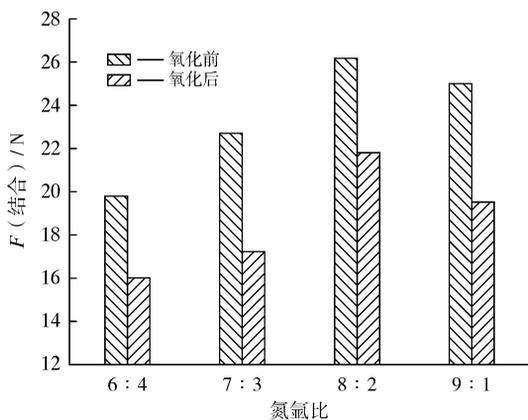


图 6 不同氮氩比 TiAlCrN 薄膜氧化前后的膜基结合力

Fig. 6 Adhesion strength of TiAlCrN films at different N_2/Ar ratios before and after oxidation

2.5 TiAlCrN 薄膜氧化增重

表 2 为不同氮氩比下 TiAlCrN 薄膜在 800 °C 氧化 1 h 后的质量对比及质量增加率。从表 2 可以看出,在 800 °C 氧化 1 h 后,不同氮氩比下制备的 TiAlCrN 薄膜质量均有所增加,且随着氮氩比增加,TiAlCrN 薄膜的氧化增重先减少后增加,在氮氩比为 8 : 2 时氧化增重率最小,表明氮氩比为 8 : 2 时,TiAlCrN 薄膜的高温抗氧化性能最优。从图 2 中 TiAlCrN 薄膜氧化后 SEM 形貌可明显看出,薄膜表面的氧化颗粒最少。在 TiAlCrN 薄膜氧化过程中,由于 Al 相较于 Ti、Cr 和 O 有更强的

亲和力,因此 Al 会先与 O 反应生成 Al_2O_3 ,但膜层中的 Al 含量较低,不会生成一层连续致密的 Al_2O_3 膜,但生成的 Al_2O_3 颗粒仍然会对基体产生保护作用;随着氧化的进行,膜层表面未被氧化的区域里钛、铬离子会相继被氧化生成 TiO_2 、 Cr_2O_3 ,此时 TiAlCrN 薄膜外层会生成一层由 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 组成的混合氧化层,该氧化层会降低薄膜的氧化速率,这是因为氧化层能显著阻止 O 向内层的扩散,并且随着氧化的进行,氧化层会逐渐变厚,O 的扩散距离会越来越远^[5,12-16]。

表 2 不同氮氩比 TiCrAlN 薄膜氧化前后质量对比及质量增加率

Table 2 Quality comparison of TiCrAlN films at different N_2/Ar ratios before and after oxidation

氮氩比	6 : 4	7 : 3	8 : 2	9 : 1
m (氧化前)/g	12.416 6	12.473 9	12.511 3	12.471 6
m (氧化后)/g	12.421 6	12.477 9	12.514 0	12.475 2
η (质量增加)/%	0.040 3	0.032 1	0.021 6	0.028 9

3 结 论

(1) 采用多弧离子镀技术制备的 TiAlCrN 薄膜呈面心立方晶体结构,随着氮氩比的增加,表面大颗粒数量先减少后增加,在氮氩比为 8 : 2 时表面最为平整。

(2) 随着氮氩比的增加,氧化前后的 TiAlCrN 薄膜的硬度与结合力都呈先增大后减小趋势,在氮氩比为 8 : 2 时,氧化前薄膜有最大硬度值 2 700 $HV_{0.5N}$,最大膜基结合力 26 N。

(3) TiAlCrN 薄膜在 800 °C 氧化 1 h 后,表面会生成氧化物颗粒,硬度、结合力都有所下降;当氮氩比为 8 : 2 时,氧化后生成的颗粒物最少、最细小,硬度、结合力最高,薄膜的高温抗氧化性最优。

[参 考 文 献]

- [1] 赵志刚,王树奇,张秋阳,等. 高载荷作用下 H13 钢磨损行为的研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 63-67. ZHAO Z G, WANG S Q, ZHANG Q Y, et al. Research on Wear Behavior of H13 Steel under High Loads [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 63-67.
- [2] 刘瑞霞,朱福栋,由国艳. 等离子体增强的磁控溅射 TiSiN 薄膜结构与耐蚀性[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(2): 11-15. LIU R X, ZHU F D, YOU G Y. Microstructure and Corrosion Resistance of TiSiN Films Deposited by Plasma-Enhanced Magnetron Sputtering [J]. Plating & Finishing, 2021, 43(2): 11-15.
- [3] 王 军,张 明. N_2 流量对车用钢表面磁控溅射 CrTiAlN

- 涂层性能的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(2): 53-55.
- WANG J, ZHANG M. Effect of N₂ Flow on the Performance of CrTiAlN Coating Prepared by Magnetron Sputtering on Car Steel Surface[J]. Materials Protection, 2018, 51(2): 53-55.
- [4] 王晓奇, 曹慧, 雷彪. 镁合金表面电弧离子镀 TiAlN 薄膜的结构与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(6): 25-29.
- WANG X Q, CAO H, LEI B. Structure and Properties of TiAlN Films by Arc Ion Plating on Mg Alloys[J]. Plating & Finishing, 2021, 43(6): 25-29.
- [5] 付泽钰, 王天国. 氮氩比对模具钢表面镀 CrAlN 薄膜形貌和性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 105-112.
- FU Z Y, WANG T G. Effect of the Ratio of Nitrogen and Argon on the Microstructure and Properties of CrAlN Film Deposited on Die Steel Surface [J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 105-112.
- [6] ARGYRIOS G, GONZALO G F, ELUXKA A. Characterisation of cathodic arc evaporated CrTiAlN coatings: Tribological response at room temperature and at 400 °C[J]. Materials Chemistry and Physics, 2017, 190: 194-201.
- [7] 楼白杨, 王肖璟, 周艳, 等. 温度对复合 CrTiAlN 涂层摩擦磨损性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 949-953.
- LOU B Y, WANG X J, ZHOU Y, et al. Effect of Temperature on Friction and Wear Behavior of Multi - component CrTiAlN Coating [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(3): 949-953.
- [8] 贵宾华, 周晖, 郑军, 等. N₂流量对HIPIMS/DCMS 共沉积制备 TiAlCrN 涂层结构及性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(7): 800-806.
- GUI B H, ZHOU H, ZHENG J, et al. Effect of N₂ Flow - Rate on Improvement of Mechanical Properties of TiAlCrN Composite Coatings [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(7): 800-806.
- [9] 许建平, 王国星, 王佳杰, 等. 多弧离子镀 TiN 涂层高温氧化特性[J]. 焊接技术, 2020, 49(11): 14-16.
- XU J P, WANG G X, WANG J J, et al. High Temperature Oxidation Characteristics of TiN Coating by Multi - arc Ion Plating [J]. Welding Technology, 2020, 49(11): 14-16.
- [10] 梁启超, 王天国. 多弧离子镀 TiAlN 薄膜的制备及其抗氧化性能[J]. 材料保护, 2017, 50(1): 1-4.
- LIANG Q C, WANG T G. Preparation of TiAlN Films by Multi - Arc Ion Plating Techniques and Its Oxidation Resistance [J]. Materials Protection, 2017, 50(1): 1-4.
- [11] 吴浩龙, 王天国. 氮氩比对模具钢表面镀 TiAlN 薄膜形貌和性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 43-47.
- WU H L, WANG T G. Effect of the Ratio of Nitrogen and Argon on the Microstructure and Properties of TiAlN Film Deposited on Die Steel Surface [J]. Materials Protection, 2020, 53(8): 43-47.
- [12] 张豪, 许向敏, 费晓燕, 等. CrTiAlN 涂层在 800 °C 和 900 °C 时对 H13 钢氧化性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(12): 2 715-2 719.
- ZHANG H, XU X M, FEI X Y, et al. Effect of CrTiAlN Coatings on Oxidation Behavior of H13 Steel at 800 °C and 900 °C [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(12): 2 715-2 719.
- [13] 王赛玉, 蔺绍江, 陈肖. TiAlCrN 涂层的高温氧化行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2 267-2 273.
- WANG S Y, LIN S J, CHEN X. High temperature oxidation behavior of TiAlCrN coating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2 267-2 273.
- [14] 吴亚文, 贺秀杰, 张继龙, 等. 钎合金表面 CrAl 基耐高温涂层及氧化行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 34-41.
- WU Y W, HE X J, ZHANG J L, et al. CrAl - based High - temperature Coatings on Zirconium Alloy and Oxidation Behavior [J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 34-41.
- [15] SUI X D, LI G J, ZHOU H B, et al. Evolution behavior of oxide scales of TiAlCrN coatings at high temperature [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 360: 133-139.
- [16] GUI B H, ZHOU H, ZHENG J, et al. Microstructure and properties of TiAlCrN ceramic coatings deposited by hybrid HiPIMS/DC magnetron co-sputtering [J]. Ceramics International, 2020, 06(47): 8 175-8 183.
- [17] CHEN Y H, Rogström L, OSTACH D, et al. Effects of decomposition route and microstructure on h - AlN formation rate in TiCrAlN alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 691: 1 024-1 032.
- [18] 周昆凤, 周志明, 涂坚, 等. 6W6Mo5Cr4V 钢表面 CrTiAlN 复合涂层的性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(6): 113-115.
- ZHOU K F, ZHOU Z M, TU J, et al. Research on Properties of CrTiAlN Composite Coating on 6W6Mo5Cr4V Steel Surface [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(6): 113-115.
- [19] MA X F, WU Y W, TAN J, et al. Evaluation of corrosion and oxidation behaviors of TiAlCrN coatings for nuclear fuel cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 521-530.
- [20] LIN J L, ZHANG X H, OU Y X, et al. The structure, oxidation resistance, mechanical and tribological properties of CrTiAlN coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 277: 58-66.