

PVD强化涂层在辊轧模具上的应用

彭新¹,王福德¹,国振兴²,曹家洺¹,李建福¹

(1.空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室,沈阳110043;2.沈阳黎明航空发动机有限责任公司,沈阳110043)

摘要:为了解决冷辊轧模具寿命短、人工修复周期长、修复一致性差等问题,提高了模具耐磨性,延长模具使用寿命,在辊轧模具表面涂敷了PVD强化涂层。采用真空阴极多弧离子镀技术,在不同材质模具钢表面制备AlCrN多元纳米硬质涂层。试验样品基材选用Cr8W1Mo2V2SiNb、W6、Cr12MoVCo及V-4E工具钢作为样品基体,采用2种工艺制备硬质PVD涂层,V-4E基材AlCrN涂层的晶粒尺寸最小,沉积的AlCrN涂层结构更致密。V4E+CrAlSiN强化体系获得最优的综合测试性能。验证结果表明:涂敷PVD强化涂层可使模具寿命提高20倍以上。

关键词:辊轧模具;物理气相沉积强化涂层;真空阴极多弧离子镀;航空发动机

中图分类号:V261.93+3

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.022

Application of PVD Strengthening Coating in Rolling Die

PENG Xin¹, WANG Fu-de¹, GUO Zhen-xing², CAO Jia-ming¹, LI Jian-fu¹

(1. Air Force Equipment Department Second Military Representative Office in Shenyang, Shenyang 110043, China;

2. Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to solve the problems of low life, long manual repair period and poor repair consistency, the wear resistance of the die was improved and the service life of the die was prolonged. PVD coating was applied on the surface of the rolling die. Multi element nano hard coatings of AlCrN were prepared on the surface of die steel with different materials by vacuum cathode multi-arc ion plating technology. Cr8W1Mo2V2SiNb, W6, Cr12MoVCo and V-4E tool steels were selected as the base materials. The grain size of AlCrN coating on V-4E substrate was the smallest, and the structure of deposited AlCrN coating was more compact. V4E+CrAlSiN strengthening system obtained the best comprehensive test performance. The results show that the service life of the die can be increased by more than 20 times with PVD strengthening coating.

Key words: rolling die; Physical Vapor Deposition (PVD) strengthening coating; enhanced; aeroengine

0 引言

随着现代机械加工的迅速发展,各种机械零部件的加工模具也引起广泛研究,尤其是应用于航空发动机叶片的加工模具使用条件更为苛刻。选择合适的方式提高该类模具的摩擦磨损和耐高温性能,从而提高它们的使用寿命是加工合格叶片的关键^[1-2]。大量研究表明,要实现模具性能的提升,最正确且有效的方式,除了选择合理的材料和正确的加工工艺之外,关键在于应用合理的表面处理技术^[3]。应用最早且最为广泛的是TiN涂层,该涂层的使用大大延长了模具的寿命,减少了更换模具的次数和时间。该类涂层最早应用于硬质合金刀具上以提高刀具的耐磨性。为满足工业中高速切削的需求,在TiN涂层的基础上,又发展出了添加第3组元,使其部分代替TiN涂层中的Ti原子的TiAlN和TiVN等涂层。其中,研究最多的当属TiAlN涂层。在氧化过程中,涂层表面会形成1层具有保护性的Al₂O₃膜,从而能够阻止基体合金的进一步氧化。由于Al原子置换了TiN涂层中部分Ti原子的位置,其硬度和耐磨性与TiN涂层相比均有提高。但TiN系列涂层的抗氧化性能和耐热性不足,在600℃空气中使用较短时间就会出现龟裂剥

收稿日期:2020-12-18

作者简介:彭新(1980),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机质量监督工作;E-mail:563122861@qq.com。

引用格式:彭新,王福德,国振兴,等. PVD强化涂层在辊轧模具上的应用[J]. 航空发动机, 2021(增刊1): 133-138. PENG Xin, WANG Defu, GUO Zhenxing, et al. Application of PVD strengthening coating in rolling die[J]. Aeroengine, 2021(S1): 133-138.

落现象。

辊轧叶片广泛应用于航空发动机压气机部位,对加工精度和效率有着较高要求。不锈钢、高温合金叶片加工模具长期使用寿命较低,已成为制约航空叶片产品生产效率和质量的瓶颈问题。对于高精度叶片加工模具而言,首先需能够在高速重载荷下保持良好的加工精度和效率,其表面需承受数百甚至上千度的高温,对于此类工模具材料的表面强化改性要求涂层不仅具有超高硬度且需要拥有极低的表面摩擦系数和良好的高温稳定性。其次对于复杂零部件加工的工模具来说,其表面往往具有异形结构,且加工面常常位于空洞或者缝隙的内表面,工艺性差。

超硬纳米复合薄膜材料具有高强、高韧、高硬度等有意性能,在工模具表面改性领域显示出极其诱人的应用前景。近年来纳米薄膜材料的明显趋势之一是由单一纳米薄膜材料向纳米复合薄膜材料发展。针对辊轧模具磨损失效问题,本文采用PVD技术中典型的阴极多弧离子镀技术,在不同基材模具钢表面制备了AlCrN多元纳米硬质涂层,分析了不同基材对辊轧模具涂层耐磨性的影响,探讨了最适合涂覆Al-CrN涂层的基材^[4]。

1 样品制备

试验样品基材选用Cr8W1Mo2V2SiNb(HRC20,退火态)、W6(HRC20,退火态)、Cr12MoVCo(HRC20,退火态)及V-4E(HRC57,回火态)工具钢作为样品基体,分别简称为Cr8、W6、Cr12及V-4E,尺寸为30 mm×30 mm×5 mm,基材经化学、组织分析均符合GB1299-2000《合金工具钢》标准要求。样品首先经过丙酮、酒精超声清洁除油,装入真空涂层设备中。涂层制备由3部分组成:底层使用100 nm厚金属薄膜作为基础层,再使用200 nm厚金属氮化物作为过渡层(涂层工艺参数见表1),最后制备所需功能涂层(涂层工艺参数见表2)。涂层由工业型阴极弧离子

表1 真空等离子氮化(PN)涂层工艺参数

参数	数值
偏压/V	600
沉积温度/°C	550
H ₂ 流量/(mL/min)	600
N ₂ 流量/(mL/min)	150
气压/Pa	200
时间/h	10

表2 离子镀(PVD)涂层工艺参数

参数	CrAlN	CrAlSiN
沉积偏压/V	100	100
沉积温度/°C	450	450
气压/Pa	2.5	2.5
Ar流量/(mL/min)	40	40
N ₂ 流量/(mL/min)	200	1000
Cr	80	80
弧电流/A	CrAlSi	80
	CrAl	80
沉积时间/h	2~6	2~6

镀设备制备,安装8套金属或合金靶材。

2 结果与分析

2.1 显微维氏硬度

CrAlN和CrAlSiN 2种涂层分别在4种基体材料表面及在0.245 N和0.49 N 2种载荷下的显微硬度数据见表3、4。从表中可见,在0.49N载荷下的显微硬度比在0.245N下的均有明显降低,说明显微硬度均受基体影响,在所测试数据中,CrAlSiN涂层的硬度明显高于CrAlN涂层的;当载荷为0.245N时,2种涂层显微硬度均超过3000 HV,其中,CrAlSiN涂层在0.245N载荷下,其显微硬度已经超过4000 HV,且基材硬度对涂层显微硬度影响显著,较高的基材硬度获得的涂层硬度更高^[5-6]。

表3 不同基体表面CrAlN强化涂层显微硬度 HV

样品编号	平均值	HV0.025(测试点)	平均值	HV0.05(测试点)
Cr8	3255	3109~3398	2075	1983~2153
W6	3330	3125~3605	2122	1953~2253
Cr12	3208	3115~3605	2346	2095~2526
V-4E	3473	3225~3688	2536	1887~2628

表4 不同基体表面CrAlSiN强化涂层显微硬度 HV

样品编号	平均值	HV0.025(测试点)	平均值	HV0.050(测试点)
Cr8	3613	2734~4205	2815	2172~3105
W6	4270	3938~4605	3109	2954~3253
Cr12	4208	4115~4413	3302	3085~3528
V-4E	4951	4688~5225	3616	3423~3807

2.2 结合强度

共测试4种工艺涂层样品,利用WS2005型划痕试验机进行测试,每个样品至少测试5点。以划痕侧边出现第1个明显内裂纹点位置所对应的划痕载荷为结合力评价指标1(临界载荷 C_{L1}),划痕开始出现剥落初始点为评价指标2(临界载荷 C_{L2}),2种涂层在不同基体样品结合强度数值见表5。一般来讲,对于工模具使用的硬质涂层,其划痕临界载荷大于60 N,方能满足高速重载要求^[7]。数据显示2种涂层临界载荷 C_{L2} 均值基本在60 N以上(除Cr8基材表面CrAlN涂层外),符合工业使用标准。相比较而言,CrAlSiN具有更优的结合强度,其中V4E表面CrAlSiN涂层具有最优的膜基结合强度,其在100 N的加载范围内,几乎未出现涂层剥落,这是由于其基材强度高而增加了涂层体系韧性;表中同时给出压痕法评价结合强度数

据,表明涂层结合强度均为I级,符合使用要求,划痕法结果受到涂层表面摩擦学特性影响,结合力需要结合划痕形貌图进行判定,否则会受基体粗糙度、磨屑等声发射信号干扰^[8-9]。

表5 涂层样品划痕结合强度

样品	C_{L1}/N	临界载荷 C_{L2}/N	压痕法
Cr8-CrAlN-S	40.59	48.46	HF1
W6-CrAlN-S	41.05	68.79	HF1
Cr12-CrAlN-S	40.79	69.99	HF1
V4E-CrAlN-S	60.91	87.89	HF1
Cr8-CrAlSiN-S	32.34	69.98	HF1
W6-CrAlSiN-S	40.48	78.41	HF1
Cr12-CrAlSiN-S	67.02	90.90	HF1
V4E-CrAlSiN-S	44.20	100.00	HF1

2.3 涂层相结构及残余应力分析

试验分别对不同基材表面2种制备的涂层样品进行X射线衍射相结构分析,CrAlN涂层相结构XRD谱图如图1所示。从图中可见,其相成分为立方相CrN和AlN,并呈现(111)择优取向;利用谢乐公式计算CrAlN涂层晶粒尺寸大小,不同基体表面晶粒尺寸均为纳米级别,且随基体硬度升高晶粒尺寸有所减小。CrAlSiN涂层相结构XRD谱图如图2所示。其相

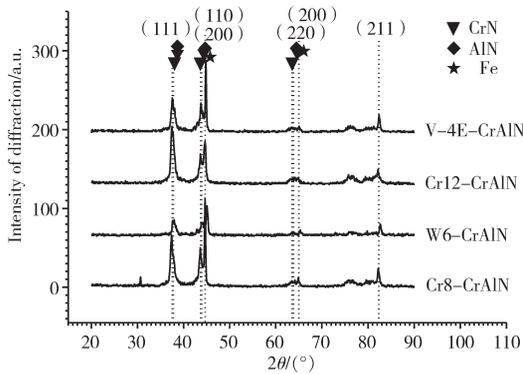


图1 CrAlN涂层XRD图谱

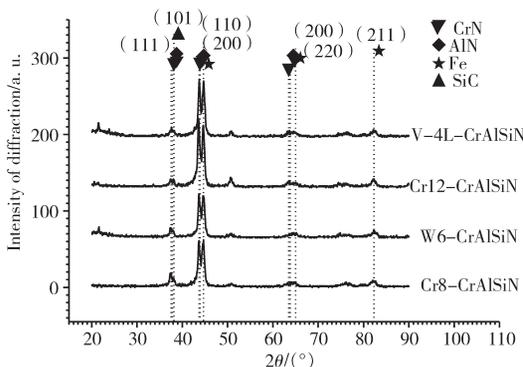


图2 CrAlSiN涂层XRD图谱

成分仍为立方相CrN和AlN,随着Si元素添加,相结构呈现(200)择优取向转变,即涂层结构由原始的柱状结构向纳米等轴结构转变。表明Si元素添加,晶粒尺寸持续减小至15 nm左右。涂层晶体结构与基体材料关系不大^[10-11]。

利用X射线应力仪测试涂层残余应力,结果见表6。

表6 涂层残余应力测试结果

样品	残余应力/ GPa	误差限/ GPa
CrAlN	-1.15	0.04
CrAlSiN	-1.03	0.06

对残余应力测试的 $2\theta-\sin^2\psi$ 进行拟合,综合

数据可知,2种涂层样品的残余压应力均低于2 GPa,符合应用条件。CrAlSiN的残余压应力相对更低,表明Si元素可降低薄膜的残余应力^[12]。

2.4 涂层表面形貌及成分

TiAlN和AlTiN涂层表面形貌如图3、4所示。对

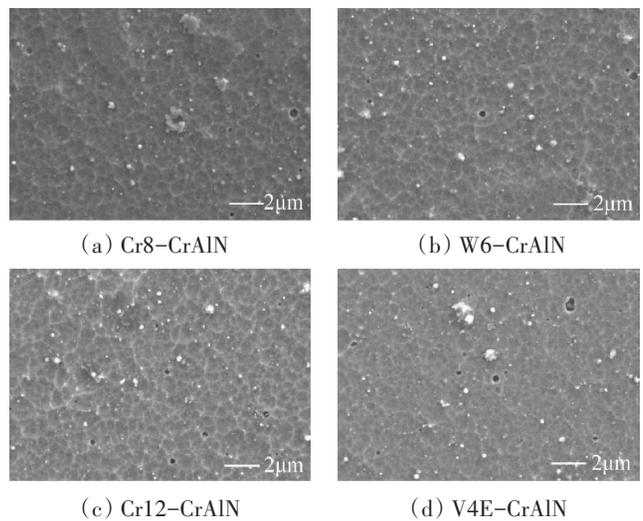


图3 TiAlN涂层表面形貌

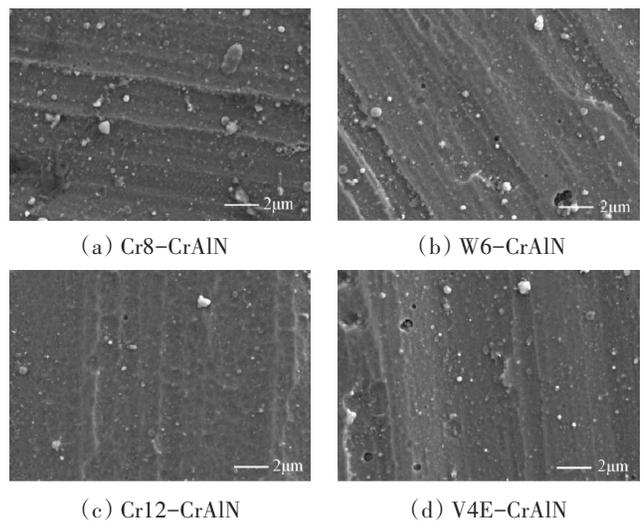


图4 AlTiN涂层表面形貌

比CrAlN和CrAlSiN涂层表面形貌,由于添加Si元素,涂层表面组织更为致密,光洁度增加金属颗粒明显减少^[13];通过对比不同基体表面涂层形貌,表明涂层表面形貌与本试验所用材料基体相关性不大。

2.5 摩擦磨损性能

采用销盘式摩擦磨损仪测试摩擦磨损性能,对比CrAlN及CrAlSiN涂层摩擦学特性,如图5~8所示。添加Si元素后涂层表面摩擦系数减小且抗磨损性能提高,随着基体材料硬度增强,涂层摩擦系数有减小趋势,且抗磨损性能提高。综合比较,V4E基材表面

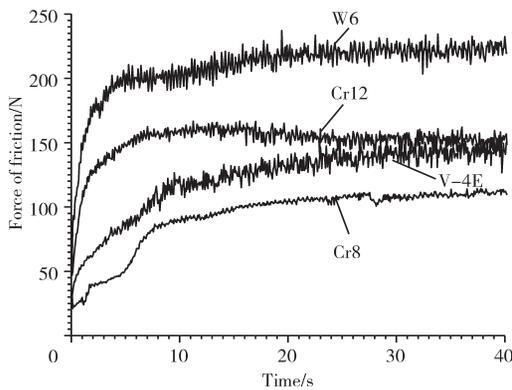


图5 CrAlN涂层摩擦力

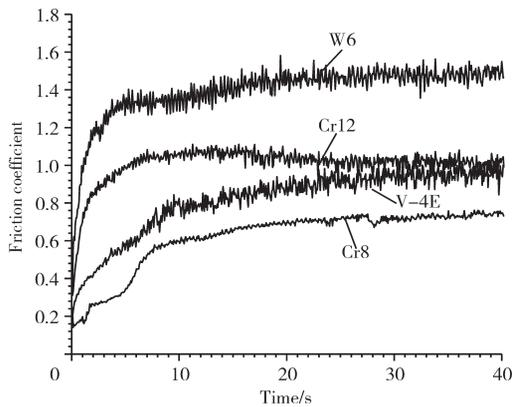


图6 CrAlN涂层摩擦系数

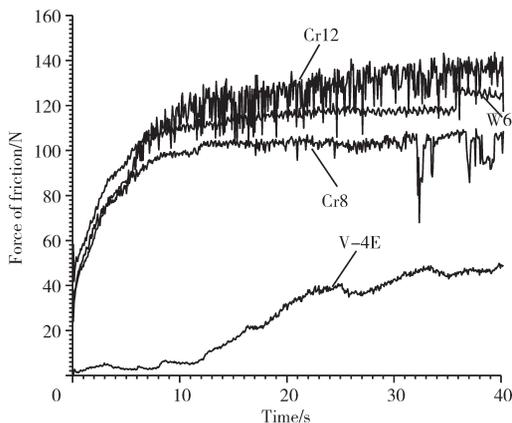


图7 CrAlSiN涂层摩擦力

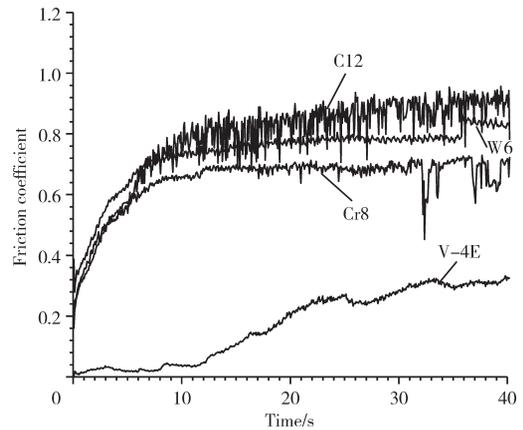


图8 CrAlSiN涂层摩擦系数

CrAlSiN涂层具有更为优良的摩擦学特性^[14]。

2.6 微观组织及化学态分析

CrAlSiN涂层横截面高分辨透射电子显微镜图像如图9所示。图9(a)、(b)示出的明场相的组织结构为多晶态结构;图9(c)示出的暗场相可分辨出平均晶粒尺寸大于30 nm;图9(d)示出的电子衍射谱的涂层为纳米多晶复合体系,其晶相组成符合XRD结果,由纳米晶AlN和CrN相混合构成。

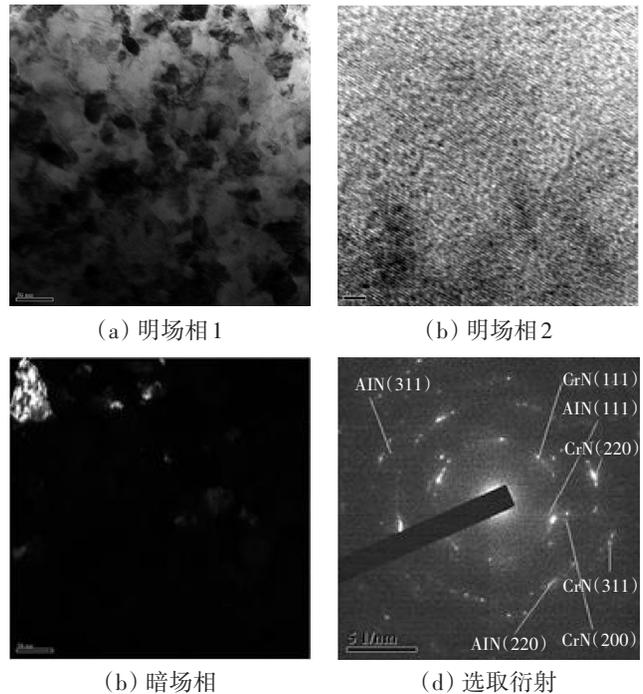
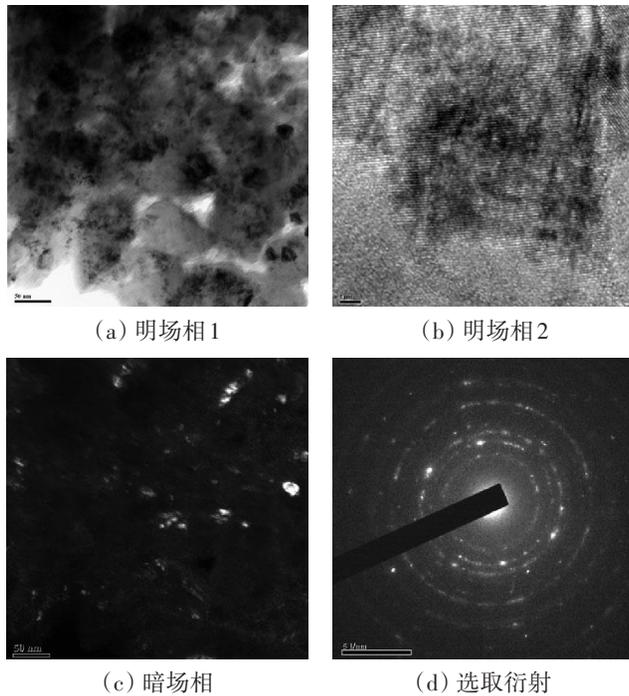


图9 CrAlN涂层横截面透射电镜照片

CrAlSiN涂层横截面高分辨透射电子显微镜图像如图10所示。图10(a)、(b)示出的明场相的组织结构为纳米多晶态结构且镶嵌于无定形结构中;图10(c)示出的暗场相可分辨出平均晶粒尺寸小于10 nm,说明Si元素添加可使涂层晶粒细化;图10(d)示出的

电子衍射谱由连续光环与光晕组成,因此分析涂层为纳米多晶非晶复合结构,其晶相组成同样符合XRD结果,由纳米晶AlN及CrN相及少量Si相混合构成。



(a) 明场相1 (b) 明场相2
(c) 暗场相 (d) 选取衍射

图 10 CrAlSiN 涂层横截面透射电镜照片

为了进一步确定 CrAlSiN 涂层中 Si 元素化学态,对涂层进行表面 XPS 谱分析,CrAlSiN 涂层 Si 元素的 XPS 谱线如图 11 所示。通过曲线数学拟合对元素化学价态进行分析,Si 元素主要以非晶态 Si₃N₄ 和单质 Si 存在;CrAlSiN 涂层内部组织结构应非晶硅化物包覆纳米晶复合混合框架结构,具有高硬度及耐磨性能。

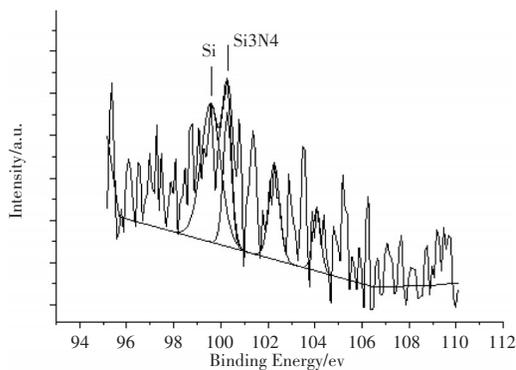


图 11 CrAlSiN 涂层 Si2P 电子 XPS 谱

2.7 膜层韧性

采用自制薄膜冲击试验机对 CrTiAlN/TiN/Ti 和 TiAlN/TiN/Ti 涂层韧性进行测试。CrAlN 及 CrAlSiN 涂层冲击后光学显微镜形貌如图 12、13 所示。从图

中可见,2种涂层均有良好的断裂韧性和抗冲击疲劳性能,在图 12(b)、(c)、(d)中出现了零星压痕边部裂纹,但未出现剥落失效,而 CrAlSiN 涂层多次冲击疲劳后未出现任何裂纹和剥落,表明 CrAlSiN 涂层具有更优的抗冲击疲劳性能^[15]。

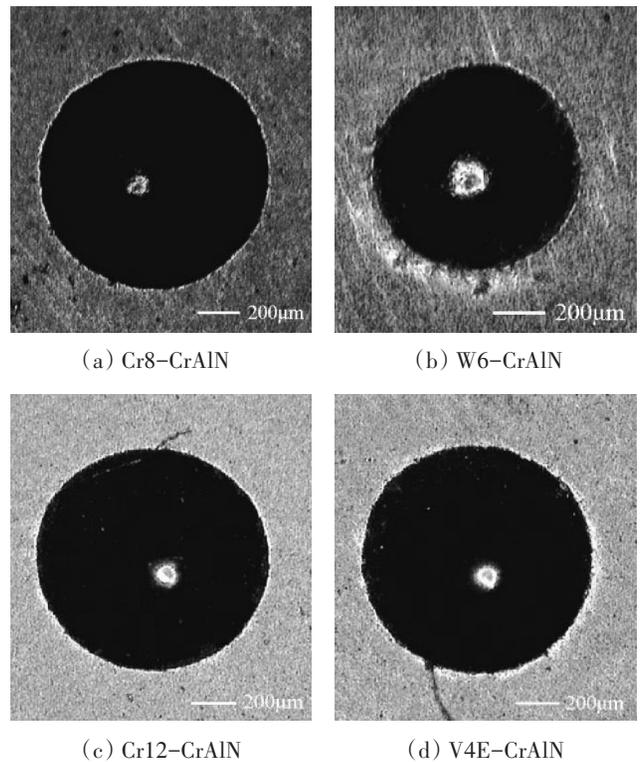


图 12 CrAlN 涂层冲击后形貌

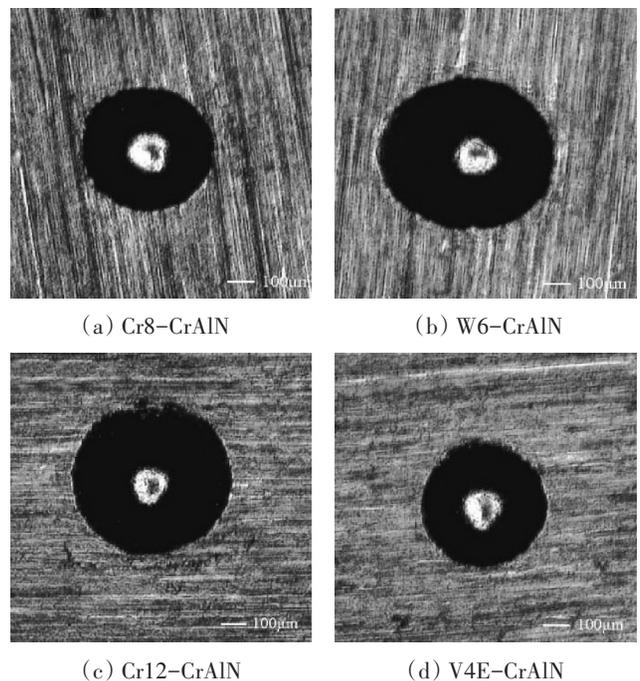


图 13 CrAlSiN 涂层冲击后形貌

3 结论

本文采用工业型真空电弧离子镀膜设备,利用等离子体氮化后的4种基体材料制备出2种典型硬质涂层,并对其性能结构进行测试,得到以下结论:

(1)通过显微硬度、划痕法膜基结合强度、摩擦磨损测试、膜厚等综合测试可知,相比CrAlN涂层,CrAl-SiN具有最优的综合性能,表现出优越的力学性能和良好的耐磨、减摩性能。

(2)通过对比4种典型低温合金钢基体材料,选择V4E+CrAlSiN强化体系获得最优的综合测试性能。

(3)通过X射线衍射、扫描电子显微镜、透射电子显微镜以及X射线光电子能谱测试可知,2种涂层主相成分均为纳米立方相AlN和CrN,Si含量增加涂层取向由(111)向(200)转变;相对比CrAlN涂层,CrAl-SiN涂层晶粒尺寸更为细小(15 nm左右),且伴随纳米柱状结构向纳米等轴晶的组织结构转变,呈现择优取向的各向异性向各向同性转变。

(4)CrAlSiN涂层具有纳米晶/非晶Si₃N₄复合框架的涂层结构。

参考文献:

- [1] 李美姮,孙晓峰,张重远,等. 溅射NiCrAlY涂层氧化过程Al₂O₃膜结构与形貌的转变[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 142-146.
LI Meiheng, SUN Xiaofeng, ZHANG Zhongyuan, et al. Transformation of structure and morphology of Al₂O₃ film during oxidation of sputtered NiCrAlY coating [J]. Corrosion Science And Technology Protection, 2002, 14(3): 142-146. (in Chinese)
- [2] 戴达煌,周克崧,袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004: 141-151.
DAI Dahuang, ZHOU Kesong, YUAN Zhenhai. Modern material surface technology science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 141-151. (in Chinese)
- [3] 刘先兰,张文玉,胡治流. 热作模具的表面强化新技术[J]. 机床与液压, 2006(5): 47-49, 56.
LIU Lanxian, ZHANG Wenyu, HU Zhiliu. New surface strengthening technology of hot working die[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2006(5): 47-49, 56. (in Chinese)
- [4] 董瑞华,冯海美. 热作模具的疲劳性能分析研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(2): 461-465.
DONG Ruihua, FENG Haimei. Analysis and research on fatigue performance of hot working die[J]. Foundry Technology, 2015, 36(2): 461-465. (in Chinese)
- [5] 崔华丽,李炎粉. 浅谈热作模具的失效形式及耐磨层的修复工艺[J]. 科教导刊, 2013(4): 207-208.
CUI Huali, LI Yifen. Discussion on the failure from of hot working die and the repair process of wear resistant layer[J]. Science and Education Guide, 2013(4): 207-208. (in Chinese)
- [6] Mei Xinhao, Pan Ling, Liu Xiaofei. Effect of cerium on microstructure and wearing resistance of 5CrMnMo hot working die steel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1333(248): 1615-1620.
- [7] Wang Huajun, Sun Yuzhu, Wu Yanzhao, et al. Thermomechanical load study on FGM clad hot forging die under mechanical press [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1335(291): 693-679.
- [8] Wang Liping, Zhang Guangan. Fabrication of AlCrN nanocomposite films with high hardness and excellent anti-wear performance for gear application [J]. Surface and Coating Technology, 2010, 204(21-22): 3517-3524.
- [9] Yoo Y H, Hong J H, Kim J G, et al. Effect of Si addition to CrN coatings on the corrosion resistance of CrN/stainless steel coating/substrate system in a deaerated 3.5wt.% NaCl solution [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(24): 9518-9523.
- [10] 景浩,张钧,赵时璐,等. 硬质涂层膜基结合力的测定方法与改善途径[J]. 热加工工艺, 2015, 45(24): 40-44.
JING Hao, ZHANG Jun, ZHAO Shilu, et al. Determination method and improvement way of binding strength of hard coating film substrate[J]. Hot Process Technology, 2015, 45(24): 40-44. (in Chinese)
- [11] Sam Z, Deen S, Yongqing F, et al. Toughness measurement of thin films: a critical review [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 198(1): 74-78.
- [12] Sanchez J E, Sancheza O M, Ipaz L. Mechanical, tribological and electrochemical behavior of Al_{1-x}Cr_xN coatings deposited by reactive magnetron co-sputtering method [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(8): 2380-2387.
- [13] 周兴夏,彭卫珍,周书助. (Cr_{0.72}Al_{0.29})N涂层的微观组织结构及力学性能研究[J]. 硬质合金, 2008, 25(2): 82-84.
ZHOU Xingxia, PENG Weizhen, ZHOU Shuzhu. Microstructure and mechanical properties of (Cr_{0.72}Al_{0.29})N coating[J]. Cemented Carbide, 2008, 25(2): 82-84. (in Chinese)
- [14] 邵清安,柳琪,国振兴,等. 基体材料对AlCrN硬质涂层结构及摩擦学性能的影响[J]. 铸造技术, 2017, 206(38): 2141-2144.
TAI Qing'an, LIU Qi, GUO Zhenxing, et al. Effect of substrate on microstructure and tribological properties of AlCrN Hard coating[J]. Foundry Technology, 2017, 206(38): 2141-2144. (in Chinese)
- [15] Sugishima A, Kajioka H, Makino Y. Phase transition of pseudobinary Cr-Al-N films deposited by magnetron sputtering method [J]. Surface & Coatings Technology, 1997, 97(1-3): 590-594.

(编辑:刘 亮)