

沉积温度对 CrB₂ 涂层结构与性能的影响 *

张树参^{1,2}, 李晓伟¹, 王 丽¹, 张 栋¹, 柯培玲¹, 李志勇², 汪爱英¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 2. 中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘 要: 为了研究沉积温度对涂层微结构与力学性能的影响, 采用直流磁控溅射技术制备了 CrB₂ 涂层。通过 XPS、XRD、SPM、SEM、HRTEM、纳米压痕仪和维氏压痕仪分别分析了涂层的成分、结构、微观形貌和力学性能。结果表明: 在不同沉积温度下, CrB₂ 涂层均由 CrB₂ 和少量 Cr 相组成。涂层具有致密的纳米柱状结构, 其直径大约为 7 nm, 且沿着生长方向贯穿整个涂层截面。随沉积温度升高, 涂层晶体取向由 (101) 和 (001) 的混合取向逐渐转变为 (001) 择优取向, 涂层由纤维状结构转变为柱状晶结构, 且柱状晶尺寸随沉积温度的增加逐渐细化, 致密化程度增加。涂层的力学性能随沉积温度的升高而显著增加; 当沉积温度达到 400 °C 时, 涂层具有最高硬度 (50.7 ± 2) GPa 和最高弹性模量 (513.6 ± 10) GPa。微观结构和力学性能随沉积温度的演变归因于沉积原子运动的逐渐增强和结构的致密化。

关键词: 沉积温度; CrB₂ 涂层; 微结构; 硬度; 韧性

中图分类号: TG 174.444; TG 115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)02-0069-08

Influences of Deposition Temperature on Microstructure and Properties of CrB₂ Coatings

ZHANG Shu-can^{1,2}, LI Xiao-wei¹, WANG Li¹, ZHANG Dong¹, KE Pei-ling¹, LI Zhi-yong², WANG Ai-ying¹

(1a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 1b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang; 2. College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: In order to investigate the influence of deposition temperature on microstructure and properties of CrB₂ coatings. The CrB₂ coatings were deposited by DC magnetron sputtering technique. The microstructure and properties were mainly analyzed by XPS, XRD, SPM, SEM, HRTEM, nano-indentation and Vickers indentation tester. The results show that all the deposited CrB₂ coatings consist of CrB₂ and a small amount of free Cr. The coating has a dense columnar structure with an average column diameter of 7 nm extending along the film growth direction throughout the thickness of the coating. With increasing deposition temperature, the degree of crystallization of the coating is improved and the texture changes from random orientation mixed with (101) and (001) plane to (001) preferred orientation. The microstructure evolves from the fibrous structure to the columnar structure and becomes denser and finer. Meanwhile, the mechanical properties of the coating are improved high. When the deposition temperature is 400 °C, the coating acquires the highest hardness of (50.7 ± 2) GPa and the elasticity modulus of (513.6 ± 10) GPa, respectively. The evolution of the orientation, microstructure and mechanical properties are attributed to the enhanced surface adatom mobility with increasing as the deposition temperature.

Keywords: deposition temperature; CrB₂ coating; microstructure; hardness; toughness

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-01-20; 基金项目: * 江西省对外科技合作计划重点项目(20151BDH80002); 宁波市重点科技项目(2014B10032); 宁波市自然科学基金(2015A610073); 宁波市国际合作项目(2014D10014)

通讯作者: 汪爱英(1975—), 女(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 先进碳基功能薄膜材料与关键技术; Tel: (0574) 8668 5170; E-mail: aywang@nimte.ac.cn

网络出版日期: 2016-04-13 11:39; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160413.1139.028.html>

引文格式: 张树参, 李晓伟, 王丽, 等. 沉积温度对 CrB₂ 涂层结构与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 69-76. ZHANG S C, LI X W, WANG L, et al. Influences of deposition temperature on microstructure and properties of CrB₂ coatings[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 69-76.

0 引言

过渡族金属硼化物具有高的熔点、硬度、耐磨性和抗氧化性能,是除了过渡族金属氮化物及碳化物之外又一种具有良好应用前景的硬质涂层材料^[1-2]。然而,与金属氮化物及碳化物的大规模工业应用相比,金属硼化物涂层尚未获得真正应用,主要原因有两方面:一是采用气源沉积时,含硼气体(如硼烷)都有剧毒性,从而限制了其使用;另一方面,采用硼化物固体靶材沉积时靶材脆性大,在溅射过程中容易开裂甚至破碎,且成分难以均匀调控。尽管如此,近年来过渡族金属硼化物作为新一代超硬涂层材料仍引起了众多研究者的关注。

CrB_2 是一种六方结构的过渡族金属硼化物,空间群为 $P6_3/mmm$, B 原子在 Cr 基中形成二维网状结构,并与 Cr 原子面层叠分布^[2]。由于其具有熔点高、硬度大、优异高温稳定性和耐蚀性等特点^[3-5],可作为理想的刀具和模具等保护性涂层材料之选。

Dahm^[6]等最早于 1998 年采用 CrB_2 陶瓷靶材,通过非平衡磁控溅射沉积技术制备了 CrB_2 涂层,研究发现涂层硬度为 42~49 GPa,达到超硬涂层水平,同时具有(001)晶面取向的 CrB_2 涂层比(101)晶面取向的涂层具有更好的耐蚀性和耐磨性。随后 Audronis^[7]等采用脉冲磁控溅射沉积技术制备了 CrB_2 涂层,研究发现脉冲占空比和基体偏压的增加促进了涂层中(001)晶面的形成,且增加了涂层硬度。Choi^[8]采用电感耦合等离子辅助直流磁控溅射技术制备了 CrB_2 涂层,研究表明随着电感耦合线圈功率的增加,涂层的生长取向由(101)转变为(001)方向,涂层硬度由 30 GPa 增加到 54 GPa。

目前,磁控溅射是沉积 CrB_2 涂层的主要技术。在涂层沉积过程中,沉积工艺参数对涂层的结构和性能有很大影响。其中,沉积温度在沉积过程中决定着沉积原子扩散能力的大小,从而对涂层的结构和性能产生重要影响,但以往研究尚缺乏此方面的研究。

综上,文中采用直流磁控溅射技术制备 CrB_2 涂层,并重点研究了不同沉积温度对 CrB_2 涂层的化学组成、结构和力学性能的影响规律。

1 材料与方法

1.1 涂层制备

采用直流磁控溅射技术制备 CrB_2 涂层,阴极

靶材为 CrB_2 (99.9%) 化合物靶。沉积系统如图 1 所示。

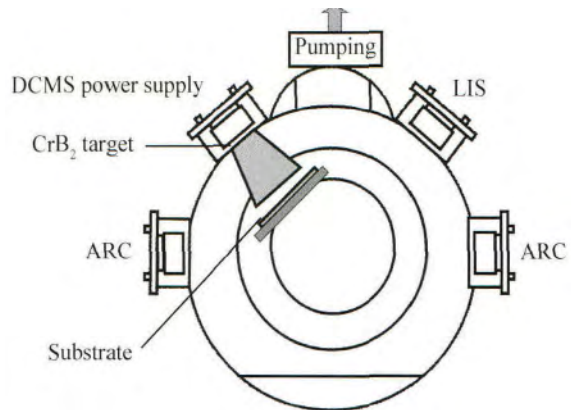


图 1 沉积系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the deposition system

分别选用硬质合金(WC-Co)和单晶硅(100)作为基体材料。涂层沉积前,基体分别在丙酮、酒精中超声清洗 15 min,然后置于真空腔室。通过支架的公转系统将基体移动到正对直流磁控靶材的位置,待腔体内真空气压为 3.0×10^{-3} Pa 后向腔内通入 Ar 气(纯度为 99.99%),使气压达到 1.064 Pa,同时基体上施加 -600 V 负偏压,利用辉光放电对基体刻蚀 15 min,随后开始沉积 CrB_2 涂层,具体参数如表 1 所示。

表 1 CrB_2 涂层的沉积参数

Table 1 Deposition parameters for the CrB_2 coatings

Parameters	Value
Sputtering power / W	183
Argon pressure / Pa	0.28
Deposition time / min	180
Substrate bias voltage / V	-100
Substrate temperature / °C	100, 200, 300, 400

1.2 涂层结构及性能表征

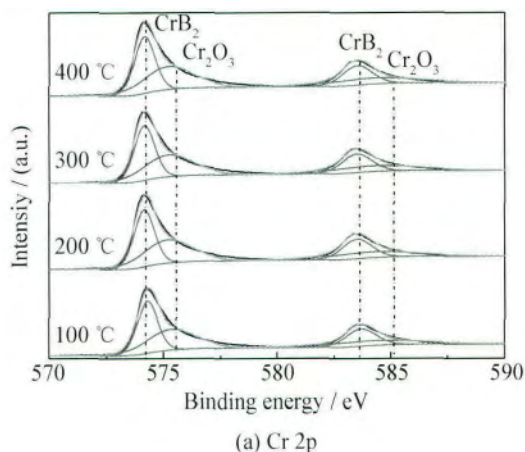
涂层表面元素成分和价态信息借助 AXIS ULTRA DLD X 射线光电子能谱仪(XPS)分析,测试前对涂层表面刻蚀 5 min,以去除样品表面杂质;涂层物相组成采用德国布鲁克公司 D8 Advance X 射线衍射仪(XRD)测试,采用 Cu 靶($\lambda = 0.1542$ nm),测试扫描角度范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$;采用 FEI Tecnai F20 透射电子显微镜(HR-TEM)分析涂层的微观结构;采用 Dimension3100V 扫描探针显微镜(SPM)观察和测量涂

层的三维形貌和粗糙度;截面微观形貌通过日立公司 S-4800 场发射扫描电镜(FESEM)分析。

涂层硬度及弹性模量采用美国 MTS 公司 NANO G200 纳米压痕仪测试,利用动态连续加载卸载模式,为了减小基体对测量结果的影响,取压入深度为涂层厚度 1/10 处的 4 个测点的平均值;采用维氏压痕仪(MVS-1000D1)用于定性分析涂层的韧性,所用载荷为 2.94 N。

2 结果与讨论

图 2 为不同沉积温度下在单晶硅基体上制备 CrB_2 涂层 XPS 测试结果。 $\text{Cr } 2p$ 曲线经 Gaussian 分峰拟合后分为两对峰,分别为 $\text{Cr } 2p_{3/2}$ (574.1 eV)



和 $\text{Cr } 2p_{1/2}$ (583.4 eV), $\text{Cr } 2p_{3/2}$ (575.2 eV) 和 $\text{Cr } 2p_{1/2}$ (584.3 eV), 前者对应 CrB_2 , 后者对应单质 Cr [9]。B 1s 曲线经 Gaussian 拟合后只有一个峰,位于 188 eV,对应于 CrB_2 [2, 9]。

图 3 为不同沉积温度下在硬质合金基体上所制备的 CrB_2 涂层的 XRD 图谱。所有涂层均检测到硬质合金基体中 WC 相的峰。随着沉积温度的升高,涂层结晶性逐渐增加。当沉积温度为 100 °C 和 200 °C 时,在涂层中同时检测到 (001) 和 (101) 晶面;增加沉积温度到 300 °C 和 400 °C,涂层中 (101) 晶面消失,涂层呈现出 (001) 的择优取向。另外,涂层中并没有检测到 Cr 的峰位,这是由于涂层中 Cr 的含量很少,低于 XRD 的检测范围。

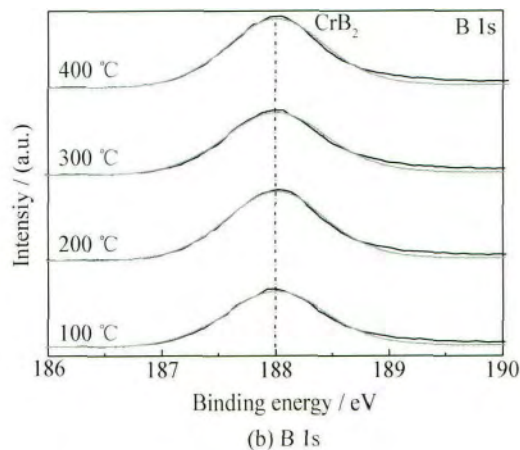


图 2 不同沉积温度下制备的 CrB_2 涂层的 XPS 光谱分峰拟合

Fig. 2 XPS spectra of the CrB_2 coatings deposited at different deposition temperatures

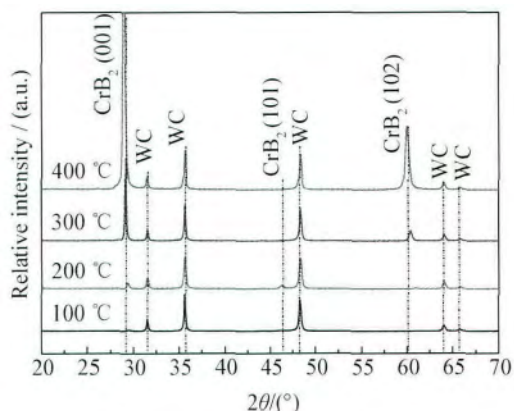


图 3 不同沉积温度下制备的 CrB_2 涂层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the CrB_2 coatings at different deposition temperatures

通常,在六方 CrB_2 晶体结构中,(001) 晶面为最密排面,具有最低表面能 [8],而 (101) 晶面的形成需要较短的吸附原子扩散距离 [10-12]。当沉

积温度为 100 °C 和 200 °C 时,由于吸附原子的扩散能力有限,使得吸附原子不足以进行充分扩散,无法完全以最低表面能的 (001) 晶面生长,部分吸附原子经过较短距离的扩散后形成了 (101) 晶面,因此在涂层中同时检测到了 (001) 和 (101) 晶面。而当沉积温度增加到 300 °C 以上时,沉积在薄膜表面的吸附原子扩散能力增强,吸附原子能够进行长距离的扩散,具有较高表面能的 (101) 面消失,涂层呈现出 (001) 的择优取向。

图 4 给出了在沉积温度为 300 °C 时,在单晶硅基体上所制备 CrB_2 涂层的截面 TEM 形貌和选区电子衍射花样。选区电子衍射花样证实了 CrB_2 (001)、(100)、(101) 和 (002) 衍射环的存在。图 4(b) 观察到涂层具有致密的纳米柱状结构,其直径大约为 7 nm,且沿着生长方向贯穿整个涂层截面,与文献中的结果相类似 [13-14]。

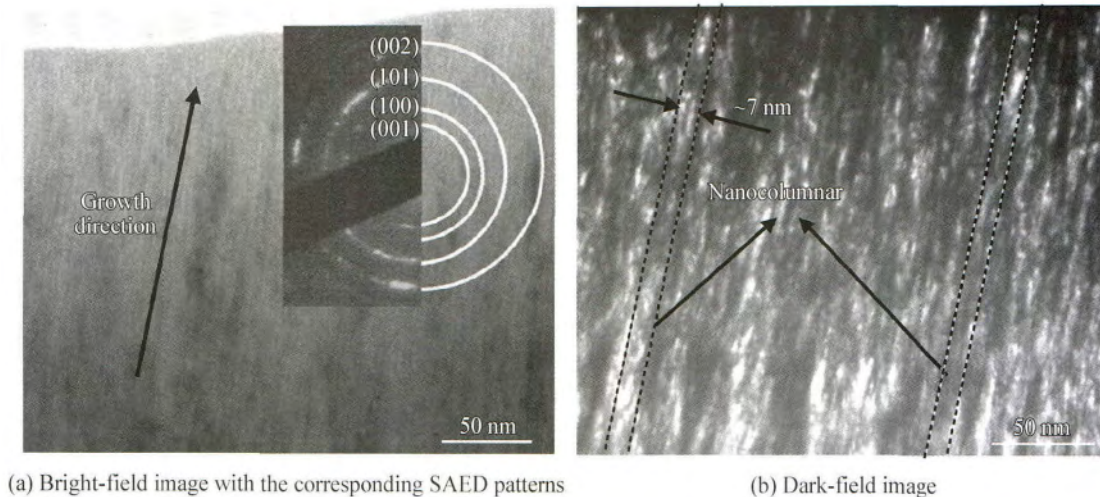


图 4 沉积温度为 300 °C 时所制备 CrB₂ 涂层的截面形貌

Fig. 4 Cross section morphologies of the CrB₂ coating deposited at 300 °C

图 5 为不同沉积温度下在单晶硅上所制备的 CrB₂ 涂层的三维 SPM 图像。如图所示,与传统磁控溅射技术制备的粗大柱状涂层粗糙表面不同,不同沉积温度下所制备的 CrB₂ 涂层表面光滑平整,均呈现出“小山丘”状的形貌。图 6 为不同沉积温度下在单晶硅上所制备 CrB₂ 涂层在扫描面积为 1 μm×1 μm 的均方根粗糙度值(R_q),与单晶硅基体的 R_q(0.412 nm)相比,涂层的 R_q 整体增加,且随沉积温度升高呈现先减小后增大的趋势。沉积温度较低时,吸附原子扩散能力弱,沉积在基

体后已失去扩散能力,表面粗糙度较大;随着沉积温度增加,扩散能力增强,粗糙度有所减小;当沉积温度为 400 °C 时,粗糙度有所增加,这与涂层结晶性提高,晶粒长大有关。

不同沉积温度下所制备的 CrB₂ 涂层的截面形貌如图 7 所示。沉积温度为 100 °C 时,涂层截面表现为细纤维状结构;当沉积温度升高到 200、300 和 400 °C 时,涂层均呈现出柱状生长结构,且随沉积温度的增加柱状晶致密化程度增加。

研究表明^[15-18]:沉积温度较低,薄膜的临界形

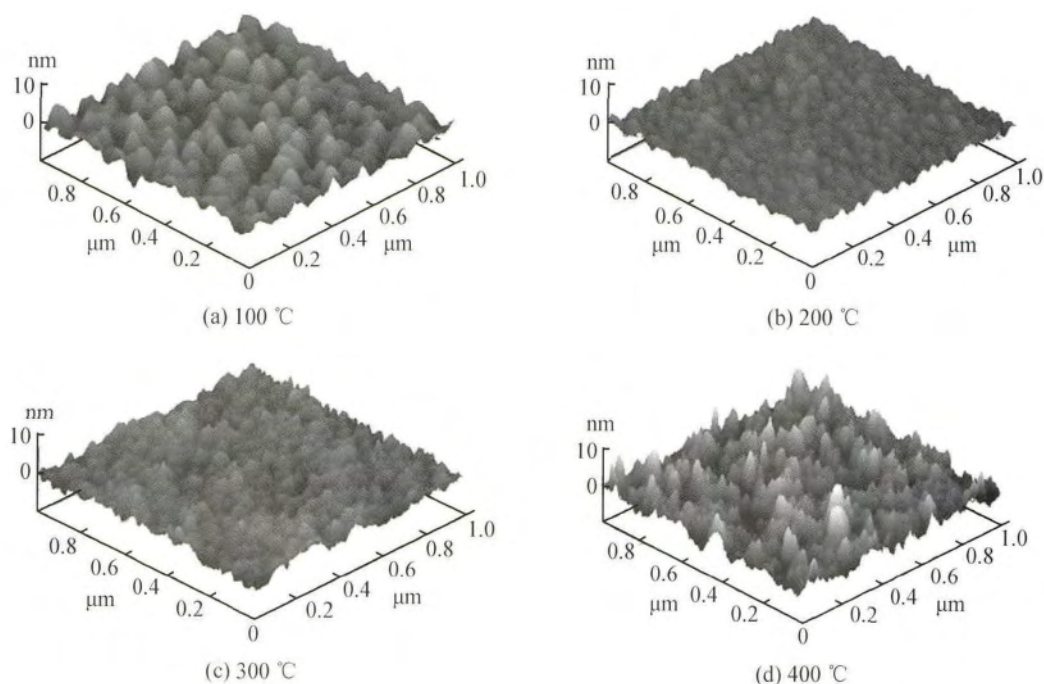


图 5 不同沉积温度下制备 CrB₂ 涂层的三维 SPM 形貌

Fig. 5 SPM morphologies of the CrB₂ coatings deposited at different deposition temperatures

核尺寸很小,在沉积过程中不断产生新的核心,而吸附原子扩散能力弱,沉积在基体后已失去扩散能力,加上阴影效应的影响,沉积组织现出细纤维状形态。当沉积温度升高时,吸附原子的扩散能力增强,可进行相当距离的扩散,晶粒逐渐长大、外延形成均匀的柱状晶组织。同时,扩散能力增强的吸附原子可以填充晶粒之间的空穴和空洞等缺陷,提供柱状晶的结构致密性。

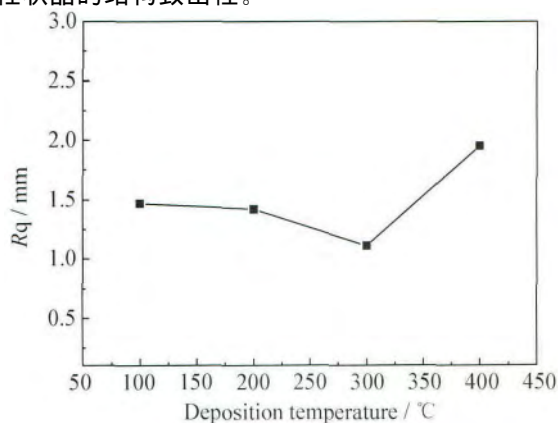


图6 不同沉积温度下 CrB₂ 涂层的表面粗糙度

Fig. 6 Roughness (R_q) of the CrB₂ coatings deposited at different deposition temperatures

图8为不同沉积温度下在硬质合金基体上制备的 CrB₂ 涂层的硬度(H),弹性模量(E)和 H/E 。从图中可以观察到,随着沉积温度的升高,涂层的硬度(H)和弹性模量(E)逐渐升高, H/E 呈现先大幅增加后减小的趋势。当沉积温度为 400 °C 时,涂层具有最高硬度(50.7 ± 2) GPa 和最高的弹性模量(513.6 ± 10) GPa。

涂层的力学性能演变机制主要从以下两个方面解释: ① 沉积温度为 100 °C 时,吸附原子的扩散能力弱,沉积在基体的原子已失去扩散能力,由于沉积阴影效应的影响,晶粒内缺陷密度很高,而晶粒边界处组织疏松,柱状组织被空洞所包围,力学性能较差^[19];随着沉积温度的升高,吸附原子扩散能力增强,不断填充晶粒之间空穴和空洞等缺陷,涂层的缺陷密度显著降低,柱状晶组织细化,涂层变得更加致密,力学性能显著增加。② 随着沉积温度的升高,涂层的晶体取向由(101)和(001)并存的混合生长取向转变为(001)择优取向。具有(001)择优取向的 CrB₂ 涂层比其他生长取向的 CrB₂ 涂层具有更高的硬度和弹性模量,这是由于与(101)晶面相比,(001)晶面具有更高的弹性常数和键能^[7-8, 20]。

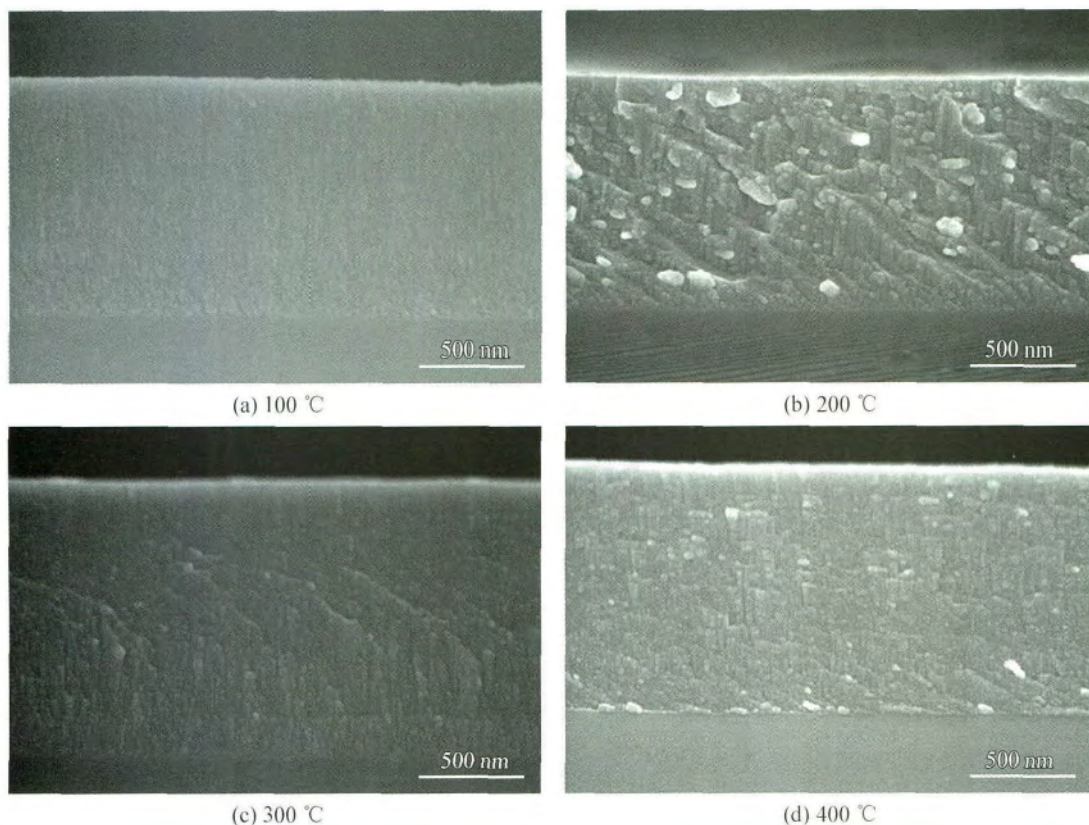


图7 不同沉积温度下制备的 CrB₂ 涂层的截面形貌

Fig. 7 Cross section morphologies of the CrB₂ coatings deposited at different deposition temperatures

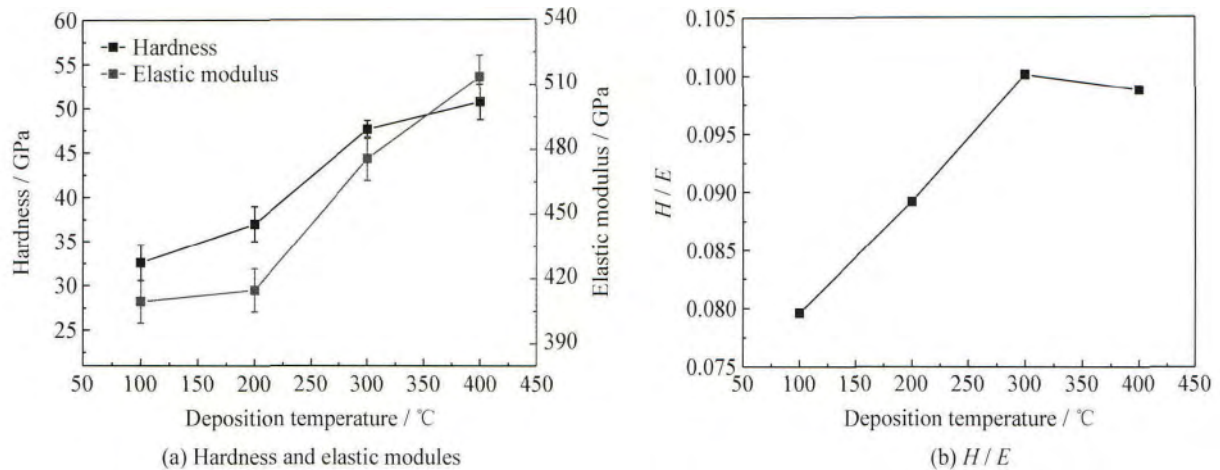


图 8 不同沉积温度下制备的 CrB_2 涂层的硬度(H),弹性模量(E)和 H/E

Fig. 8 Hardness (H), elastic modulus (E) and H/E of the CrB_2 coatings deposited at various temperatures

沉积温度在 300 °C 和 400 °C 时,获得了超硬的 CrB_2 涂层($H > 40$ GPa),主要原因归结为:一方面, CrB_2 涂层本身晶体结构决定涂层性能,B 原子在 Cr 基中形成很强的二维网状共价键,使涂层具有很高的本征硬度;另一方面,从图4(b)中可以

观察到,涂层具有致密的纳米柱状结构,且沿生长方向贯穿整个涂层截面,这使位错的形成和滑移受阻,从而使涂层具有很高的硬度^[14]。

图 9 为不同沉积温度下在单晶硅基体上制备的 CrB_2 涂层在 2.94 N 载荷下的维氏压痕

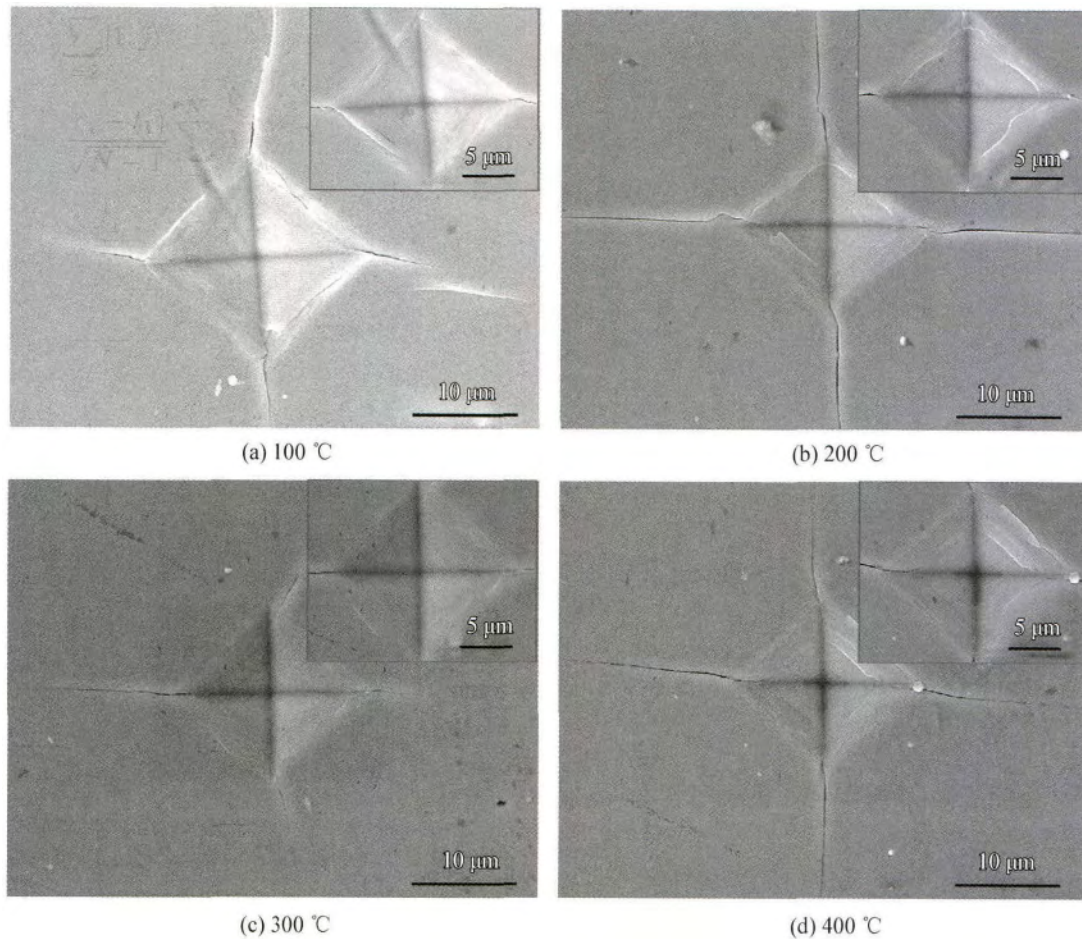


图 9 不同沉积温度下制备的 CrB_2 涂层维氏压痕 SEM 形貌

Fig. 9 SEM morphologies of the Vickers indents of the CrB_2 coatings deposited at various temperatures

SEM 形貌。从图中可观察到:在 100、200 和 400 °C 的沉积温度下,制备的 CrB₂ 涂层的压痕形貌均出现径向和周向裂纹,表明涂层具有较高的脆性;然而,沉积温度为 300 °C 时所制备的 CrB₂ 涂层压痕形貌中径向裂纹最短,且没有出现周向裂纹,表明涂层具有较高的韧性。由于 H/E 可表示涂层的断裂韧性,其值越大表明涂层的韧性越好。根据公式(1)可定量的计算涂层的断裂韧性(K_{IC}):

$$K_{IC} = \delta \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, δ 为试验常数,0.016; E 为弹性模量,MPa; H 为硬度,MPa; P 为压痕载荷,N; c 为径向裂纹长度,m^[21]。

从图 8(b)中可观察到,当沉积温度由 100 °C 增加到 400 °C 时, H/E 呈现先大幅增加后减小的趋势,并通过计算得到对应的断裂韧性值大小分别为 1.16,1.23,2.41 和 1.22 MPa·m^{1/2},其中,在沉积温度为 300 °C 时, H/E 达到最大值 0.1,断裂韧性大小为 2.41 MPa·m^{1/2},对应涂层有最高的韧性。与其他硬质涂层相比,比如溅射沉积 DLC 涂层(1.57 MPa·m^{1/2})、化学气相沉积(CVD)SiC 涂层(0.78 MPa·m^{1/2})和等离子体增强 CVD 获得的 nc~TiN/Si_xN 涂层(1.3 ~ 2.4 MPa·m^{1/2})^[21],CrB₂ 涂层的韧性达到了较高的水平。这一结果同样解释了图 9 维氏压痕裂纹的变化规律。

沉积温度较低时(100 °C 和 200 °C),吸附原子扩散能力弱,沉积在基体后已失去扩散能力,加上阴影效应的影响,涂层缺陷较多,在压痕作用力下,裂纹易于萌生和扩展,韧性较差;当沉积温度大于 300 °C 时,吸附原子充分扩散,涂层缺陷减少,不再起主导作用,Liu 等^[20]认为一定含量的非晶相可以抑制裂纹的扩展,且非晶-晶体界面与晶体-晶体界面相比具有更低的界面能,沉积温度为 300 °C 时非晶-晶体界面较多,因此具有较好的韧性。

3 结 论

(1) 采用直流磁控溅射技术制备了 CrB₂ 涂层。沉积温度在 100~400 °C 变化时,所制备的 CrB₂ 涂层均由 CrB₂ 相和少量的 Cr 组成。涂层表面平整光滑,粗糙度整体较小, R_q 在 1.11~1.95 nm 之间。

(2) CrB₂ 涂层具有致密的纳米柱状结构,其直径大约为 7 nm,且沿着生长方向贯穿整个涂层

截面。

(3) 随着沉积温度的升高,涂层的晶体取向由(101)和(001)的混合取向逐渐转变为(001)择优取向,且涂层致密化程度增加,柱状晶细化。

(4) 涂层的力学性能随沉积温度的升高而显著增加,当沉积温度达到 300 °C 时,涂层具有最高的韧性;当沉积温度达到 400 °C 时,涂层具有最高的硬度和最高的弹性模量,分别为(50.7 ± 2) GPa 和(513.6 ± 10) GPa。

参考文献

- [1] KIESSLING R. The borides of some transition elements [J]. Acta Chemica Scandinavica, 1950, 4(2): 209-227.
- [2] IVANOVSKII A L. Mechanical and electronic properties of diborides of transition 3d - 5d metals from first principles: toward search of novel ultra-incompressible and superhard materials [J], Progress in Materials Science, 2012, 57(1): 184-228.
- [3] CUI X L, WU Y Y, GAO T, et al. Influence of preparation temperature on morphology evolution and growth mechanism of CrB₂ in Al-Cr-B alloys[J]. Materials Letters, 2014, 118(3): 176-179.
- [4] JORDAN L R, BETTS A J, DAHM K L, et al. Corrosion and passivation mechanism of chromium diboride coatings on stainless steel[J]. Corrosion Science, 2005, 47(5): 1085-1096.
- [5] NEDFORS N, PRIMETZHOFFER D, WANG L P, et al. Characterization of magnetron sputtered Cr-B and Cr-B-C thin films for electrical contact applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 266: 167-176.
- [6] DAHM K L, JORDAN L R, DEARNLEY P A, et al. Magnetron sputter deposition of chromium diboride coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 108(98): 413-418.
- [7] AUDRONIS M, KELLY P J, ARNELL R D, et al. The structure and properties of chromium diboride coatings deposited by pulsed magnetron sputtering of powder targets [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(5/6): 1366-1371.
- [8] CHOI H S, PARK B, LEE J J, et al. CrB₂ coatings deposited by inductively coupled plasma assisted DC magnetron sputtering[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(4/5/6/7): 982-986.
- [9] MOULDER J F, STICKLE W F, SOBOL P E, et al. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy: a reference book of standard spectra for identification and interpretation of XPS data[M]. Eden Prairie: Perkin-Elmer Corporation, 1992.
- [10] PELLEG J, SADE G, SINDER M, et al. Compositional and structural changes in TiB₂ films induced by bias, in situ and post-deposition annealing, respectively[J]. Physica

- B, 2006, 381(1): 118-127.
- [11] KAJIKAWA Y, NODA S, KOMIYAMA H. Comprehensive perspective on the mechanism of preferred orientation in reactive-sputter-deposited nitrides[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2003, 21(6): 1943-1954.
- [12] ZHANG T F, GAN B, PARK S, et al. Influence of negative bias voltage and deposition temperature on microstructure and properties of superhard TiB₂ coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253(9): 115-122.
- [13] AUDRONIS M, KELLY P J, LEYLAND A, et al. A TEM study of the structure of magnetron sputtered chromium diboride coatings[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 26(26): 355-358.
- [14] MAYRHOFFER P H, MITTERER C. Self-organized nanocolumnar structure in superhard TiB₂ thin films[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(86): 1-3.
- [15] THORNTON J A. High rate thick film growth[J]. Annual Review of Materials Research, 2003, 7(4): 239-260.
- [16] BARNA P B, ADAMIK M. Fundamental structure forming phenomena of polycrystalline films and the structure zone models[J]. Thin Solid Films, 1998, 317(1/2): 27-33.
- [17] GROVENOR C R M, HENTZELL H T G, SMITH D A. The development of grain structure during growth of metallic films[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(5): 773-781.
- [18] MESSIER R, GIRI A P, ROY R A. Revised structure zone model for thin film physical structure[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 1984, 2(2): 500-503.
- [19] 田民波, 李正操. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- TIAN M B, LI Z C. The technology and materials of films [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011 (in Chinese).
- [20] LIU Y M, JIANG C L, PEI Z L, et al. Microstructure and properties of AlB₂-type WB₂ thin films deposited by direct-current magnetron sputtering [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 245(5): 108-116.
- [21] 薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- XUE Q J, WANG L P. Diamond-like carbon film material [M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)

• 本刊讯 •

版权转让声明

根据《中华人民共和国著作权法》等法规要求和国内有影响的期刊对著作权保护的做法,自 2007 年起,凡向本刊所投稿件应为原创作品,无一稿多投且不涉及保密问题及其他与著作权有关的侵权问题。全体作者需在投稿时签署《论文著作权转让书》,将该论文的复制权、发行权、翻译权、汇编权、信息网络传播权(包含优先数字出版权)等权利在全世界范围内转让给本刊;且授权中国科技期刊开放获取平台(COAJ)进行开放获取全文。本刊入编《中文核心期刊要目总览》,系中国期刊方阵“双效”期刊,并被中国知网、中国学术期刊综合评价数据库、中国科学引文数据库收录,被 EI Compendex、美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》等国外数据库收录;凡被本刊录用的稿件将视为同意通过网络进行出版或提供信息服务。稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费)。

著作权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行和信息网络传播本刊全文。作者向本刊所投文章即视为同意在中国学术期刊(光盘版)电子杂志社出版。所付稿酬包括该社著作权使用费。

《中国表面工程》编辑部

2016 年 1 月