

基于磁过滤阴极真空弧沉积技术制备 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜及其性能研究*

陈淑年 廖 斌 欧阳晓平[†]

(北京师范大学核科学与技术学院, 100875, 北京)

摘要 基于磁过滤阴极真空弧沉积技术研究了负偏压对 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜的形貌、元素以及微观结构的影响, 进而讨论了 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜的成膜及结晶机制. 通过 SEM、EDS、XRD 和 TEM 对薄膜的形貌与结构等性能进行测试分析, 实验结果表明: 不同沉积离子能量条件下, 薄膜具有优异的表面品质; 随着沉积离子能量的不断增加, 薄膜厚度随之减小; 同时, 沉积离子能量对高熵晶相的调控有明显效果, 沉积离子能量的增加使 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜微结构从非晶相(am)转变为相稳定的 am+FCC 纳米复合结构.

关键词 磁过滤阴极真空弧; 非晶高熵合金薄膜; 沉积离子能量

中图分类号 O472+.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022238

0 引言

高熵合金是近年来发展的新型高强度合金之一, 又称为多主元合金, 中国台湾学者叶均蔚教授等于 2004 年首次公开报道了多组元高熵合金新材料的设计思想^[1-2], 这一概念打破了传统合金以 1 种或 2 种元素为主的设计思路, 自提出后受到了学者的广泛关注. 不同于传统合金, 多主元的高熵合金成分复杂, 但结构更倾向于形成面心立方(FCC)、体心立方(BCC)或密排六方(HCP)等简单固溶结构, 而不是复杂的金属间化合物. 而且其特殊的成分和组织结构使高熵合金展现出传统合金无法比拟的高强度、高硬度、高耐回火软化、高耐磨、高抗氧化性和耐腐蚀等优异性能^[3-5]. 叶均蔚教授等经过大量实验总结出高熵合金 4 大效应^[6-8], 即热力学上的高熵效应、晶体结构上的晶格畸变效应、动力学上的迟滞扩散效应、性能上的鸡尾酒效应.

随着高熵合金研究的不断发展, 2011 年 Zhao 等^[9]报道了 1 种 $Zn_{20}Ca_{20}Sr_{20}Yb_{20}(Li_{0.55}Mg_{0.45})_{20}$ 非晶高熵合金块体, 首次提出了高熵金属玻璃(HE-BMG)的概念. 该材料具有接近室温的玻璃转化温度, 室温下应力作用无剪切带生成, 展现均匀变形行为. 此后, 国内外关于非晶高熵合金的研究才大量开展. 与高熵固溶体合金相比, 报道的非晶高熵合金体系都表现出

优异的性能, 比如高硬度和大的弹性模量、优异的磁热性能等^[10-12]. 此外, 其独特的晶化机制和优异高温相稳定性备受关注, 理论上非晶高熵合金是结构上不稳定, 处于能量上的亚稳态, 在一定条件下最终转变为稳态的晶态物质, 但高混合熵、迟滞扩散效应使它具有高的相结构稳定性, 表现出异常热稳定性和独特的晶化行为. 由于研究发展时间短, 现已开发的非晶高熵合金体系研究有限, 相关相稳定性及晶化机制缺乏系统的研究与探讨.

目前, 有关非晶高熵合金的研究主要集中于合金块体的制备, 主要工艺方法有电弧熔炼法、铸造法、等离子体烧结等^[13-15]. 块体的制备以及后序的加工成本高昂, 极大程度限制了高熵合金块体的尺寸和材料应用范围的拓展. 通过表面改性技术, 在低值基体材料上用简单和低成本的技术, 制备具有优异性能的非晶高熵合金薄膜, 可以实现成本和性能的合理结合, 以赋予关键部件优异的物化性能. 从制备技术的研究来看, 急冷条件下, 熔融体凝固时原子没有足够时间有序排列结晶, 更有可能形成非晶相. 理论上, 在 $>1010 K \cdot s^{-1}$ 的十分苛刻的冷却速率下, 合金元素可能变为非晶态. 因此, 受限于体系的非晶形成能力以及制备技术的冷却速率, 非晶高熵合金薄膜的研究较少, 有关非晶高熵合金薄膜体系的研究更令人期待. 尽管困难重重, 但非晶高熵合金薄膜的应用潜力使近

* 国家自然科学基金资助项目(U1865206)

[†] 通信作者: 欧阳晓平, 研究员, 中国工程院院士. 研究方向: 核物理、材料、能源. E-mail: oyxp2003@aliyun.com

收稿日期: 2022-08-06

年来仍有很多学者开展相关方向的研究,他们致力于利用激光熔覆和等离子熔覆等方法制备非晶高熵合金薄膜. 比如: Shu 等^[16]通过激光熔覆技术成功制备出 FeCrCoNiSiB 非晶高熵合金薄膜,非晶相的出现显著提高了高温耐磨性能; Cheng 等^[17]通过激光熔覆技术研究 Nb 对薄膜中非晶相形成的影响. 但激光熔覆和等离子熔覆的方法制备非晶高熵合金薄膜的局限性在于成型差、熔覆层的元素比例难以保证等方面. 磁控溅射作为 20 世纪 70 年代迅速发展的一种“高速低温溅射技术”,可作为非晶高熵合金薄膜沉积技术之一. Liu 等^[18]通过磁控溅射技术制备了非晶 FeCoNiCuVZrAl 高熵合金薄膜,且具有致密光滑的表面. Lai 等^[19]采用射频磁控溅射技术制备了 AlCrTaTiZr 非晶高熵合金薄膜,并研究 N₂ 流量对薄膜结构的影响. 但磁控溅射技术沉积速率过低、合金溅射靶材成本高且固定的元素成分比等问题,极大程度限制了非晶高熵合金薄膜的进一步研究. 因此如何能够解决由于制备技术导致的表面缺陷、沉积速率过低、固定成分比以及制备成本高等问题,对于非晶高熵合金薄膜的发展至关重要.

本课题组自主研发的磁过滤阴极真空弧沉积技术具有高离化率、沉积速率快等优点. 尽管阴极真空弧存在大颗粒污染的问题,但是通过磁过滤系统可以很好地解决这一问题,可以广泛应用于薄膜制备. 沉积过程中高离化率可以实现多离子的空间均匀合金化,多通道离子束可以实现元素成分的实时调控. 此外,该技术可以实现低温沉积,对于非晶高熵合金薄膜沉积具有明显的制备优势.

基于上述问题,本文采用磁过滤阴极真空弧技术制备新型 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜体系,并对非晶高熵合金薄膜成膜过程及晶化机制进行探讨与研究.

1 实验方法

1.1 薄膜制备 采用磁过滤阴极真空弧技术制备 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜,将 TiMo(原子分数 50% Ti, 50% Mo, 纯度 99.99%)、Al(纯度 99.99%)、Cr(纯度 99.99%)、Zr(纯度 99.99%) 4 个合金靶作为阴极弧源,304 不锈钢和单晶 Si 片作为基材. 沉积前,先将基材在丙酮和乙醇溶液中分别清洗 5 min. 清洗完成后,将基材放入真空室开始抽真空,工作气压达到 2.5×10^{-2} Pa. 正式沉积薄膜前,在 -800、-600 和 -400 V 的负偏压条件下对基材分别进行 30 s 溅射清洗. 在正偏压 24 V、沉积盘距离等离子体出口为 10 cm、

负偏压为变量等条件下进行薄膜沉积,具体工艺参数见表 1.

表 1 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜制备工艺参数

参数	数值
金属靶	Ti _{0.5} Mo _{0.5} /Al/ Cr/ Zr
弧流 /A	90/ 110/ 100/ 100
弯管电流 /A	2
正偏压/V	24
占空比 /%	100
负偏压 /V	0/-50/-100/-150/ -200/-250/-300
本底真空/mPa	3

1.2 薄膜表征 采用 S-4800 冷场发射扫描电镜(SEM)观察和分析薄膜的表面和截面形貌. 用扫描电镜自配的 EMAX-350 能谱仪(EDS)对薄膜元素种类和相对含量进行分析. 采用 X 射线衍射仪(XRD, X'Pert PRO MPD)分析薄膜的相结构,使用 Cu 的 K α 源,掠射角为 1°,每扫描 1 min 步长角度变化 6°,连续扫描模式的工作条件. 使用透射电子显微镜(HRTEM, TF20)对选区电子衍射花样(SAED)、高分辨透射图像(HRTEM)进行分析.

2 结果与讨论

2.1 元素选取 非晶高熵合金发展至今,成分设计思路主要为:找出已知的传统非晶合金成分;将传统非晶合金中的元素根据成分相似性进行替换得到非晶合金成分. Wen 等^[20]和刘春海等^[21]采用原子尺寸差 δ 、混合焓 ΔH_{mix} 和混合熵 ΔS_{mix} 界定高熵合金非晶相形成条件,将 $\delta > 0.064$, $-49 < \Delta H_{\text{mix}} < -12.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $7 < \Delta S_{\text{mix}} < 16 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的范围定义为非晶相形成区域,也就是说当涉及的合金成分参数落在这一范围内时,多组元合金才会形成非晶.

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i (1 - r_i / \bar{r})^2}, \bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i,$$

式中 r_i 和 c_i 分别为第 i 个组元的原子半径和原子分数, n 为组分数;

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n c_i c_j \theta_{ij}, \theta_{ij} = 4 \Delta H_{\text{mix}}^{\text{AB}},$$

式中 $\Delta H_{\text{mix}}^{\text{AB}}$ 是二元液态等原子合金的混合焓;

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i,$$

式中 R 为气体常数。

AlCrTiZr-系难熔非晶高熵合金具有优异的耐腐蚀性能、力学性能及高的相稳定性等优异性能^[22-24], 因此本文在 AlCrTiZr-系基础上添加力学性能和高温性能优异的 Mo 元素形成 AlCrTiZrMo 体系, 对其非晶相形成依据进行计算, 研究非晶高熵合金成膜和晶化机制。

2.2 表面形貌及元素含量 调节负偏压分别为 0、-50、-100、-150、-200、-250 和 -300 V, 对应的沉积离子入射能量分别为 520、1100、1680、2260、2840、3265 和 4000 eV, 因为沉积离子能量无法具体测量, 这里提出的沉积离子入射能量指沉积离子平均入射能量。其他实验参数保持不变, 采用 EDS 测量 AlCrTiZrMo 薄膜中各元素的相对含量(表 2)。在不同负偏压条件下, 各元素的原子质量的差异以及溅射率不同。随着负偏压的增大, 沉积离子入射能量增大, 各原子之间产生碰撞, 反溅射效应明显, 导致各元素含量有明显的改变, 但当负偏压增大为 -300 V 时, Cr 元素含量已经增加为 35.41%, 同时 Al 元素含量已经减少至 4.11%, 此负偏压条件下的 AlCrTiZrMo 薄膜元素含量已不满足高熵合金的成分定义(图 1)。

表 2 不同负偏压沉积的 AlCrTiZrMo 薄膜的元素相对含量及沉积离子入射能量

负偏压/V	沉积离子入射能量/eV	元素原子分数/%				
		Al	Cr	Ti	Zr	Mo
0	520	20.83	20.85	22.08	21.83	14.41
-50	1100	18.47	21.13	22.12	23.13	15.15
-100	1680	15.82	22.86	19.49	24.74	17.09
-150	2260	8.35	26.69	17.23	23.47	24.26
-200	2840	7.79	27.22	16.30	22.48	26.21
-250	3265	5.37	31.51	13.47	21.19	28.46
-300	4000	4.11	35.41	10.32	20.99	29.17

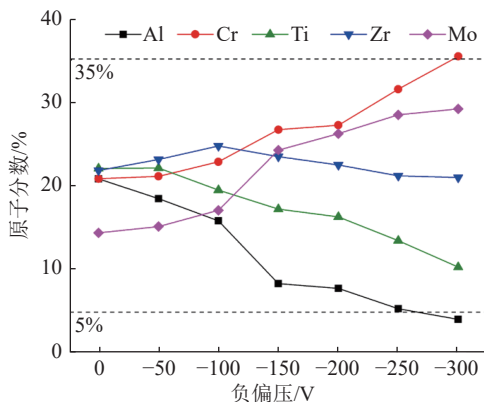


图 1 不同负偏压沉积的 AlCrTiZrMo 薄膜元素相对含量变化

通过非晶相形成判据对负偏压为 -100 V 时的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜体系的相结构进行计算, 通过文献查阅到 Al、Cr、Ti、Zr、Mo 这 5 种元素的原子尺寸和二元合金混合焓, 如表 3 所示。通过计算得到 δ 为 0.077, ΔS_{mix} 为 $13.4 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, ΔH_{mix} 为 $-18.40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 负偏压为 -100 V 沉积得到的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜体系满足非晶相(am)形成区域。

表 3 元素的原子信息和二元合金混合焓

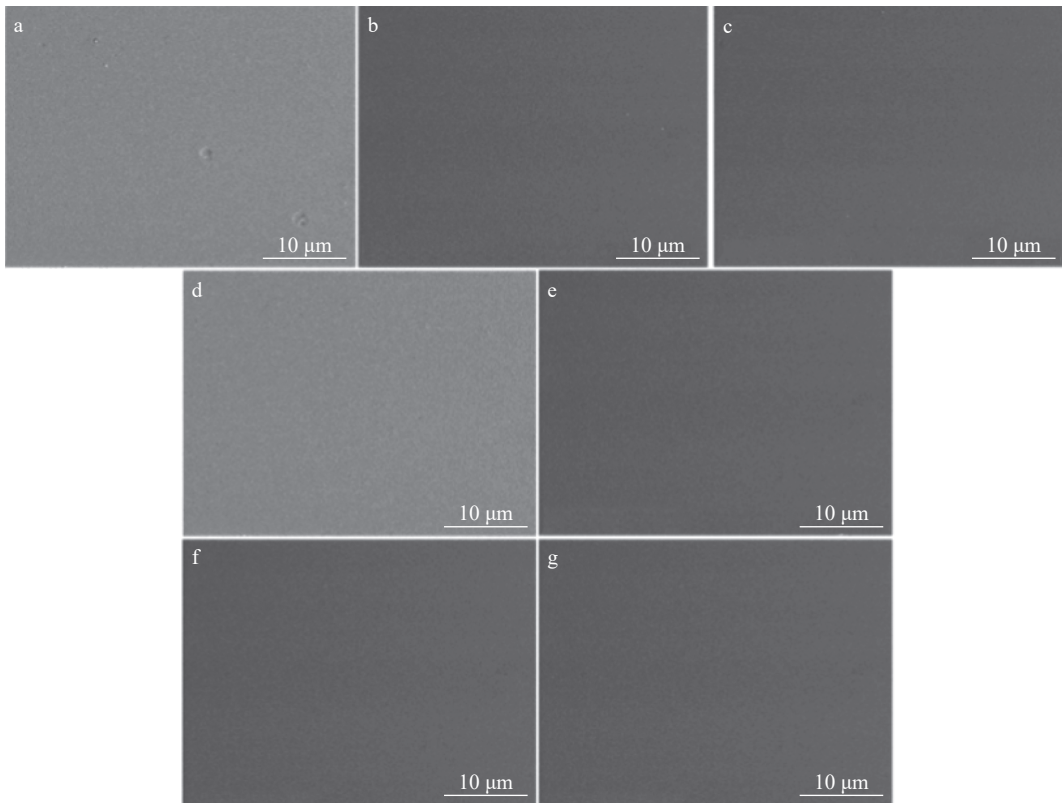
元素	原子半径/nm	晶格类型	$\Delta H_{\text{mix}}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$				
			Al	Cr	Ti	Zr	Mo
Al	0.143	FCC	-	-10	-30	-44	-5
Cr	0.127	BCC	-	-	-7	-12	0
Ti	0.145	HCP	-	-	-	0	-4
Zr	0.160	HCP	-	-	-	-	-6
Mo	0.140	BCC	-	-	-	-	-

图 2 和 3 为负偏压为 0、-50、-100、-150、-200、-250 和 -300 V 的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜的 SEM 表面和截面形貌, 观察发现沉积离子能量的增加对薄膜表面形貌没有明显影响, 不同负偏压下的薄膜表面平整均匀, 无大颗粒等明显缺陷, 通过磁过滤阴极真空弧技术制备的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜具有优异的表面品质。随着负偏压的不断增大, 离子能量较高而产生较强的表面溅射作用使薄膜厚度明显降低, 由 $1.5 \mu\text{m}$ 降低为 $0.4 \mu\text{m}$ 。在负偏压为 -300 V 时, 由于较高的离子能量轰击, 薄膜截面形貌可以观察到已不是平整分布。

2.3 物相结构 图 4 为负偏压为 0、-50、-100、-150、-200、-250 和 -300 V 的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜的 XRD 衍射图谱。随着负偏压从 0 增加为 -150 V, 仅出现非晶相(am)的馒头特征峰。当负偏压增加为 -300 V, 出现了 FCC(111)取向的结晶峰。沉积离子能量的增加使薄膜微结构有明显的改变。

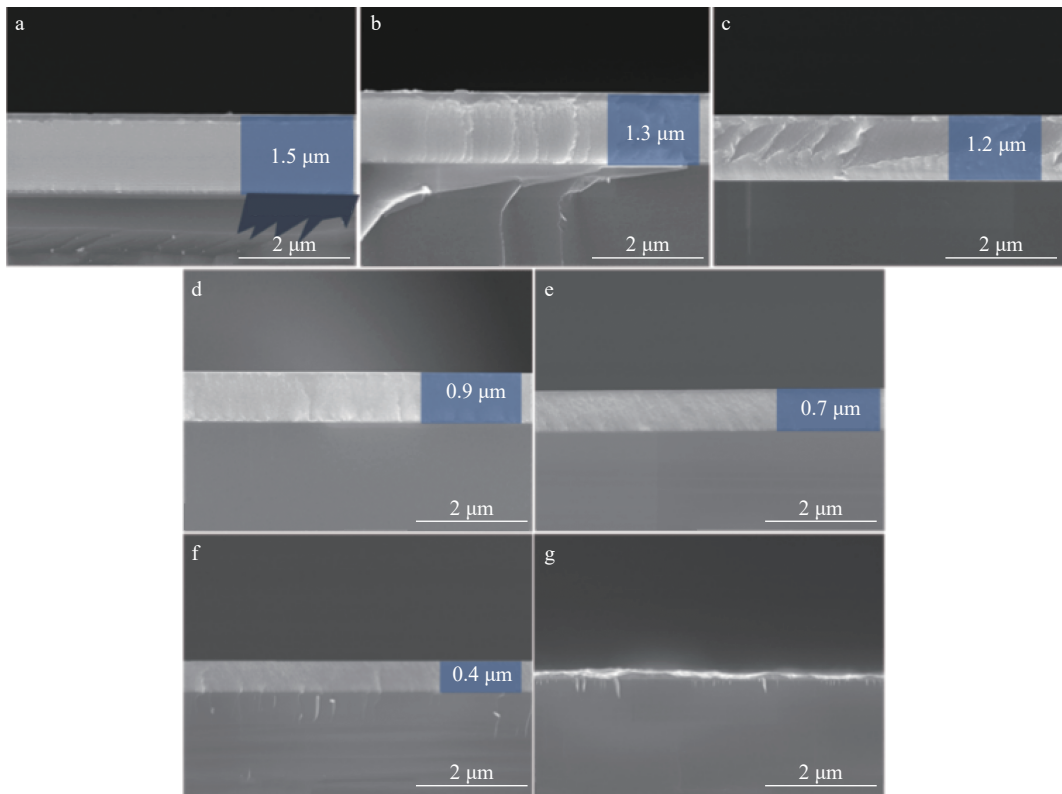
为了进一步确认不同沉积离子能量下的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜的物相结构, 我们通过 TEM 分析负偏压为 -100 和 -300 V 时薄膜的微观结构。图 5 为负偏压为 -100 V 时 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜的高分辨图像(HRTEM)及其选区电子衍射花样(SAED)。分析发现, 此时 SAED 为表征非晶相的中心较宽衍射晕环, HRTEM 图像中没有任何有序微结构, 这与 XRD 图谱结果相对应, 进一步证明负偏压为 -100 V 时的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜为非晶结构, 与非晶相判据结果一致。成功制备了 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜。

图 6 为负偏压为 -300 V 时, AlCrTiZrMo 高熵合金



a. 0; b. -50 V; c. -100 V; d. -150 V; e. -200 V; f. -250 V; g. -300 V.

图 2 不同负偏压沉积的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜表面形貌



a. 0; b. -50 V; c. -100 V; d. -150 V; e. -200 V; f. -250 V; g. -300 V.

图 3 不同负偏压沉积的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜截面形貌

薄膜的高分辨图像(HRTEM)及其选区电子衍射花样 (SAED). HRTEM 图像可以观察到薄膜结构出现尺

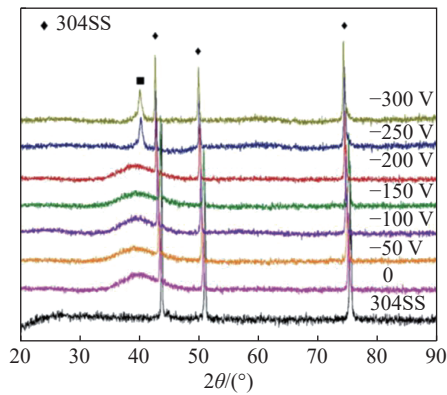
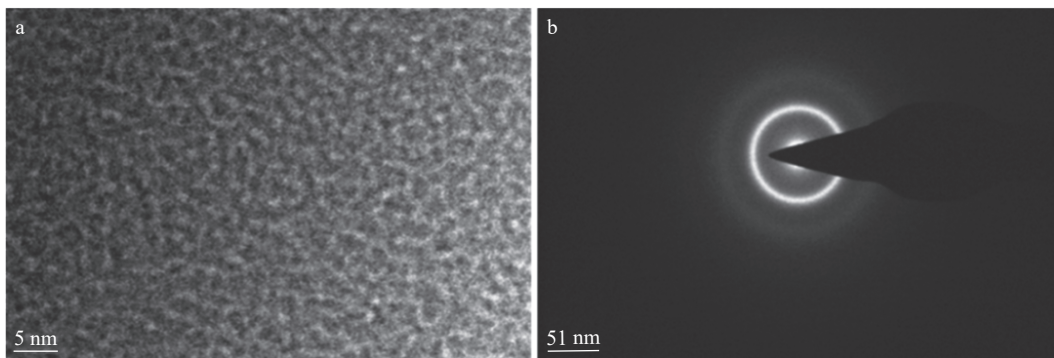


图 4 不同负偏压沉积的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜 XRD 图谱

寸约为 5 nm 的纳米晶分布在非晶基质中, 另外, SAED 花样分析纳米晶为 FCC 结构. HRTEM 结果中可以看出析出的 FCC 纳米晶为椭球状, 没有明显缺陷结构, 与非晶基质稳定共存. 通过计算得到 FCC 相的晶格参数为 0.3798 nm, 与 XRD 计算结果近似. 沉积离子

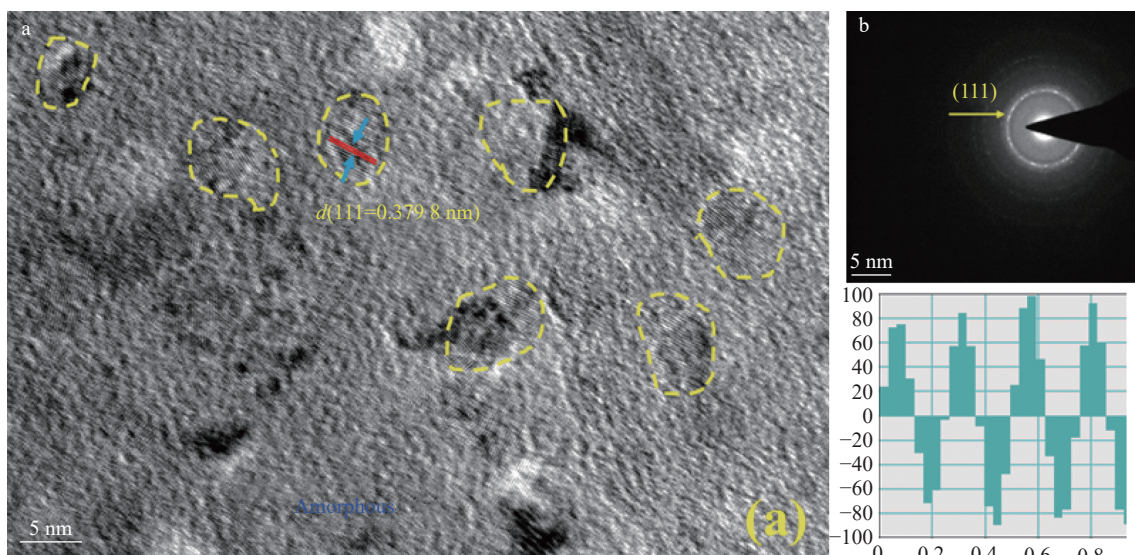
能量的增加使 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜转变为 am+FCC 两相稳定共存的独特复合结构, 而且从 XRD 图谱中的结晶峰发现, 沉积离子能量的进一步增加并没有使结晶峰出现明显改变, 这种复合结构具有较高的相稳定性.

载能的入射离子与沉积层相互作用时, 负偏压的增加使沉积离子轰击作用增强, 入射离子与沉积层中的原子相互碰撞, 从而更多的能量转移给沉积层中的电子. 这些转移的电离损失是指损失给沉积层中电子的能量. 沉积层中的电子会从快速运动的离子和反冲原子中获得能量, 这种瞬时获得的巨大能量会产生“热峰效应”, 随后以热量的形式来释放掉这些能量^[25]. 因此, 有 2 个原因可能导致较高负偏压时 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜出现从 am 到 am+FCC 的结构演变: 1) 负偏压的增大使沉积离子能量增加, 导致入射离子能量增加, 瞬时的热脉冲会加速局部晶核的形核和内聚; 2) 基于薄膜沉积的亚表层注入模



a. 高分辨 TEM 图; b. 选区电子衍射花样.

图 5 负偏压-100 V 沉积的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜 TEM 图像



a. 高分辨 TEM 图; b. 选区电子衍射花样.

图 6 负偏压-300 V 沉积的 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜 TEM 图像

型,随着离子能量的增加,原子射程差会进一步增大,从而导致薄膜沉积过程中纳米晶沿薄膜生长方向出现相分离。

值得注意的是,在负偏压为-200 V 时 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜转变为 am+FCC 复合结构,随后继续增大沉积离子能量并未给结晶峰带来较大的影响,am+FCC 复合结构薄膜展示出较高的相稳定性,这是由于:1)高熵多组元体系的低迁移率抑制了 FCC 相分解和晶粒的长大;2)非晶相包裹抑制了晶粒的长大以及析晶过程的元素再分配具有了更高的热稳定性,因此保证了纳米级 am+FCC 复合结构的稳定性。

3 结论

本工作基于性能优异的难熔非晶高熵合金 AlCrTiZr-体系添加 Mo 元素形成新型 AlCrTiZrMo 体系。采用磁过滤阴极真空弧技术,在不同负偏压条件下成功制备具有优异表面品质的 AlCrTiZrMo 非晶高熵合金薄膜和 am+FCC 复合结构高熵合金薄膜。负偏压增大使沉积离子入射能量增加,导致较强的表面反溅射效应,使薄膜厚度明显降低。此外,沉积离子能量的增加使 AlCrTiZrMo 高熵合金薄膜结构从非晶相 am 转变为 am+FCC 复合结构,但高熵多组元体系的低迁移率和非晶相包裹结构保证了纳米级 am+FCC 复合结构在更高沉积离子能量下的相稳定性。本工作对非晶高熵合金薄膜的发展具有积极的指导意义。

4 参考文献

- [1] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299
- [2] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448
- [3] HUANG P K, YE H J W, SHUN T T, et al. Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(1/2): 74
- [4] ZINKLE S J, TERRANI K A, GEHIN J C, et al. Accident tolerant fuels for LWRs: a perspective[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 448(1/2/3): 374
- [5] BRAGG-SITTON S. Development of advanced accident-tolerant fuels for commercial LWRs[J]. *Nuclear News*, 2014, 57: 83
- [6] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C. Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2014, 68: 214
- [7] TSAI K Y, TSAI M H, YE H J W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(13): 4887
- [8] CHUANG M H, TSAI M H, WANG W R, et al. Microstructure and wear behavior of $Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y$ high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(16): 6308
- [9] ZHAO K, XIA X, BAI H Y, et al. Room temperature homogeneous flow in a bulk metallic glass with low glass transition temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(14): 141913
- [10] LU C Y, NIU L L, CHEN N J, et al. Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multicomponent single-phase alloys[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13564
- [11] CHEN Y Y, HONG U T, YE H J W, et al. Selected corrosion behaviors of a $Cu_{0.5}NiAlCoCrFeSi$ bulk glassy alloy in 288 °C high-purity water[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(12): 1997
- [12] LIU Y X, CHENG C Q, SHANG J L, et al. Oxidation behavior of high-entropy alloys $Al_xCoCrFeNi$ ($x=0.15, 0.4$) in supercritical water and comparison with HR3C steel[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(4): 1341
- [13] 向超,王家贞,付华萌,等. 几种高熵合金在核电高温高压水中的腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(2): 107
- [14] CHEN Y Y, DUVAL T, HUNG U D, et al. Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys: a comparison with type-304 stainless steel[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(9): 2257
- [15] CHOU Y L, WANG Y C, YE H J W, et al. Pitting corrosion of the high-entropy alloy $Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1}$ in chloride-containing sulphate solutions[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(10): 3481
- [16] SHU F Y, LIU S, ZHAO H Y, et al. Structure and high-temperature property of amorphous composite coating synthesized by laser cladding FeCrCoNiSiB high-entropy alloy powder[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731: 662
- [17] CHENG J B, SUN B, GE Y Y, et al. Nb doping in laser-cladded $Fe_{25}Co_{25}Ni_{25}(B_{0.7}Si_{0.3})_{25}$ high entropy alloy coatings: microstructure evolution and wear behavior[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 402: 126321
- [18] LIU L, ZHU J B, HOU C, et al. Dense and smooth amorphous films of multicomponent FeCoNiCuVZrAl high-entropy alloy deposited by direct current magnetron

- sputtering[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 675
- [19] LAI C H, LIN S J, YEH J W, et al. Preparation and characterization of AlCrTaTiZr multi-element nitride coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201: 3275
- [20] WEN L H, KOU H C, LI J S, et al. Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy[J]. *Intermetallics*, 2009, 17(4): 266
- [21] 刘春海, 蒲国, 张伟, 等. FeCrNiMoCu高熵合金涂层的多靶磁控共溅射制备及微结构分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(5): 1578
- [22] 张光钧, 吴培桂, 许佳宁, 等. 激光熔覆的应用基础研究进展[J]. *金属热处理*, 2011, 36(1): 5
- [23] CHANG H W, HUANG P K, YEH J W, et al. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202: 3360
- [24] YIN Z J, WANG S B, FU W, et al. Evolution and prospect of thermal spraying technique[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(3): 225
- [25] CHEN S N, ZHAO Y M, ZHANG Y F, et al. Influence of carbon content on the structure and tribocorrosion properties of TiAlCN/TiAlN/TiAl multilayer composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 411: 126886

AlCrTiZrMo amorphous high entropy alloy thin films prepared by magnetic filter cathode vacuum arc deposition

CHEN Shunian LIAO Bin OUYANG Xiaoping

(College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Effects of negative bias on morphology, elements and microstructure of AlCrTiZrMo amorphous high entropy alloy films were investigated by magnetic filter cathode vacuum arc deposition. Film formation and crystallization mechanism of AlCrTiZrMo amorphous high entropy alloy films were investigated. SEM, EDS, XRD and TEM were used to examine and analyze film morphology and structure. These films were found to have excellent surface quality under different ionic energy for deposition. With increasing energy, film thickness decreased. The deposition ion energy was found to have a significant effect on the regulation of crystal phase. An increase in deposition ion energy was found to change microstructure of AlCrTiZrMo high entropy alloy film from amorphous phase (am) to phase stable am +FCC nanocomposite structure.

Keywords magnetic filter cathode vacuum arc deposition; amorphous high entropy alloy films; deposition ion energy

【责任编辑: 武 佳】