

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170903002

锆合金表面磁控溅射与多弧离子镀 Cr 涂层的高温抗氧化性能

黄 鹤¹, 邱长军¹, 陈 勇¹, 胡良斌¹, 刘艳红², 李怀林²

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 国家电投集团中央研究院, 北京 102209)

摘 要: 为了研究磁控溅射 (MS) 和多弧离子镀 (MAIP) 技术制备 Cr 涂层的高温抗氧化性能, 分别在锆合金表面制备厚度约 5 μm 的 Cr 涂层。利用氧化动力学曲线对比研究 800 $^{\circ}\text{C}$ 条件下涂层的高温抗氧化性能, 利用 SEM、XRD、EDS 分析涂层表面形貌和相结构。结果表明: 磁控溅射和多弧离子镀 Cr 涂层均能显著提高锆合金的高温抗氧化性能; 磁控溅射 Cr 涂层表面光滑、致密, 但涂层表面存在一定数量的孔洞, 占涂层表面积 0.40%, 氧化 7 h 后涂层表面出现裂纹, 单位面积氧化增重 6.434 mg/cm^2 ; 与磁控溅射 Cr 涂层相比, 多弧离子镀 Cr 涂层不再有 (211) 单一择优取向, Cr 涂层厚度均匀, 表面平整, 膜/基界面分明, 孔洞相对较少, 占涂层表面积 0.21%, 氧化 7 h 后涂层表面依然致密, 单位面积氧化增重 5.616 mg/cm^2 , 高温抗氧化性能优于磁控溅射 Cr 涂层。

关键词: 磁控溅射; 多弧离子镀; Cr 涂层; 孔洞; 高温抗氧化性能

中图分类号: TG174.444

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0051-08

High Temperature Oxidation Resistance of Magnetron Sputtering and Multi-arc Ion Plating Cr Films on Zirconium Alloy

HUANG He¹, QIU Chang-jun¹, CHEN Yong¹, HU Liang-bin¹, LIU Yan-hong², LI Huai-lin²

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan; 2. State Power Investment Corporation Central Research Institute, Beijing 102209)

Abstract: In order to study the high temperature oxidation resistance of Cr films deposited using magnetron sputtering (MS) and multi-arc ion plating (MAIP) methods, Cr films with a thickness of approximately 5 μm were deposited on the surface of zirconium alloy through different methods. The oxidation kinetics curve was used to compare the high temperature oxidation resistance of the coating at 800 $^{\circ}\text{C}$. Microstructure and phase structure of the films were investigated by SEM, XRD and EDS, respectively. The results show that the high temperature oxidation resistance of zirconium alloys is significantly enhanced by the Cr films deposited by MS and MAIP. The Cr films surface deposited by MS is continuous and uniform without obvious cracks, however, many holes (0.40%) are observed after high temperature oxidation of 7 h. The oxidation resistance is increased by 6.434 mg/cm^2 . Compared with the Cr films deposited by MS, the single optimal orientation (211) of the Cr films deposited by MAIP is vanished. Cr films have uniform thickness, smooth surface and clear layer/matrix interface. Moreover, only 0.21% holes exist on the films' surface which shows the stronger high temperature oxidation resistance. The oxidation increase of Cr films is 5.616 mg/cm^2 , remaining compact after high temperature oxidation of 7 h.

Keywords: magnetron sputtering (MS); multi-arc ion plating (MAIP); Cr films; holes; high temperature oxidation resistance

收稿日期: 2017-09-03; 修回日期: 2017-12-28

网络出版日期: 2018-01-05 14:49; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180105.1448.026.html>

通讯作者: 邱长军 (1965—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料表面改性; E-mail: qiuchangjun@hotmail.com

基金项目: 国家科技重大专项 (2015ZX06004001-002); 湖南省重点学科建设 (湘教发[2011]76); 湖南省高校重点实验室基金 (湘教发[2014]85)

Fund: Supported by Major Projects of National Science and Technology (2015ZX06004001-002), Construct Program of the Key Discipline In Hunan Province ([2011]76) and Hunan Province Key Subject Building Project ([2014]85)

引文格式: 黄鹤, 邱长军, 陈勇, 等. 锆合金表面磁控溅射与多弧离子镀 Cr 涂层的高温抗氧化性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 51-58.

HUANG H, QIU C J, CHEN Y, et al. High temperature oxidation resistance of magnetron sputtering and multi-arc ion plating Cr films on zirconium alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 51-58.

0 引言

随着我国核能产业的迅速发展，人们对核反应堆结构材料要求日益提高，锆合金作为重要的核燃料包壳材料，需具有较好的高温抗氧化性、耐腐蚀性及力学性能，而表面涂层技术被认为是提高锆合金高温抗氧化性能的有效途径^[1-3]。近年来，国内外主要研究的金属涂层为 FeCrAl 涂层和 Cr 涂层^[4]，Cr 涂层具有较好的耐腐蚀性、高温抗氧化性和较低的摩擦因数，故在表面工程领域作为功能性涂层应用广泛^[5-7]。

多弧离子镀 (Multi-arc ion plating, MAIP) 技术具有沉积速度快、绕射性好、涂层膜基结合力强以及靶材离化率高等优点，成为了一种重要的涂层制备技术^[8-9]，但在镀膜过程中，容易出现弧斑烧蚀不均匀的现象，从而在涂层表面产生液滴沉积。J. H. Park 等人借助多弧离子镀，在锆合金表面制备金属 Cr 涂层，在高温环境下锆合金基体几乎不氧化^[6]。磁控溅射 (Magnetron sputtering, MS) 具有镀膜温度低、工件变形小、涂层表面大颗粒较少等优点，但磁控溅射离子绕射性和靶材离化率较差^[10-11]。因此，分别采用磁控溅射和多弧离子镀技术在锆合金表面制备 Cr 涂层，研究对比在不同制备方法下涂层表面形貌、物相组织及高温抗氧化性能，为选择高温抗氧化性能涂层的制备方法提供试验依据。

1 试验与方法

1.1 样品制备

试验设备为国产 TSU-650 型多功能镀膜机。分别采用磁控溅射和多弧离子镀技术在锆合金表面制备 Cr 涂层，靶材为 Cr 靶，尺寸分别为 $\Phi 82\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 和 $\Phi 100\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ ，纯度为 99.99%。基材 (锆合金， $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$) 经过砂纸打磨，镜面抛光后，依次用丙酮和乙醇对试样进行超声波清洗，时间为 10 min，吹干后固定在真空镀膜室的工装上，工装自转，转速为 2 r/min，待腔室气压降至 $8\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 以下、温度加热至 400 ℃，通入高纯氩气 (99.999%)，流量调至 160 mL/min，脉冲偏压设置为 -800 V，对试样进行辉光清洗，时间为 10 min；将偏压降至 -600 V，开启弧电流，设置为 55 A，点燃 Cr 多弧靶并对试样进行弧光清洗 15 min。沉积工艺参数见表 1。

表 1 Cr 涂层的沉积参数

Table 1 Deposition parameters of Cr films		
Deposition parameters	MAIP	MS
Matrix material	Zirconium	Zirconium
Gas pressure / (10^{-3} Pa)	<8.0	<8.0
Pulsed bias / V	200	200
Arc current / A	65	0
Magnetron target power / W	0	500
Substrate temperature / ℃	400	400
Argon flow / ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	110	110
Deposition time / h	3	4

将制备好的 Cr 涂层试样和原始锆合金竖直放置在 SX-2.5-10 高温箱型电炉中进行高温氧化试验，温度设定为 800 ℃，试验气氛为空气，采用氧化增重法评定试样的抗氧化性能。每隔 1 h 取出试样，在大气室温的环境下自然冷却后进行称重，氧化时间 7 h，试样氧化增重测量采用精密电子天平测量，其精度为 0.000 1 g。统计增重量与试样表面积的比值，得到单位面积涂层氧化增重与时间之间的关系。

1.2 表征与分析

采用 CARL ZEISS EVO18 型扫描电镜 (SEM) 观察涂层的表面、截面形貌特征；采用 OXFORD X-Max Extreme 型能谱仪 (EDS) 对涂层元素进行分析；利用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对涂层的物相组成进行分析，Cu 靶作为阳极靶材，特征 X 射线为 Cu $K\alpha$ ，波长为 0.154 nm，扫描速度 4°/min，扫描范围 20°~90°，扫描步长 0.02°。

2 结果与讨论

2.1 Cr 涂层表面微观形貌与物相分析

图 1 为不同制备方法下 Cr 涂层氧化前的表面形貌。涂层表面均连续、致密，但存在一定数量的孔洞；多弧离子镀 Cr 涂层表面存在大颗粒，这是多弧离子镀的典型特征，产生原因是阴极弧斑温度高、烧蚀不均匀，在 高能粒子轰击下，熔融的金属液滴飞溅并沉积在基材上，凝固呈颗粒状^[12-13]，而大颗粒会对涂层产生阴影效应，是多弧离子镀涂层表面孔洞产生的原因之一^[14]。

图 2 为 Image J 软件处理后的涂层表面形貌。表 2 为不同制备方法下涂层表面孔洞数据统计，多弧离子镀 Cr 涂层孔洞所占面积为 0.21%，小于

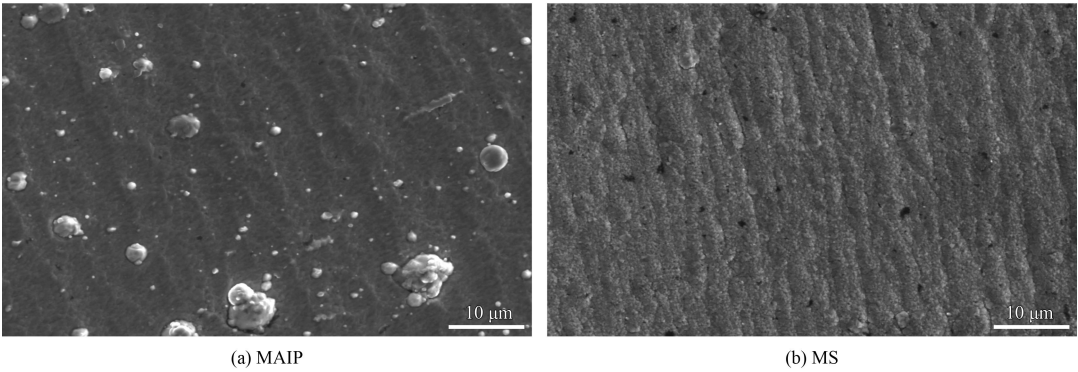


图 1 不同制备方法下 Cr 涂层氧化前的表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of Cr films via different methods before oxidation

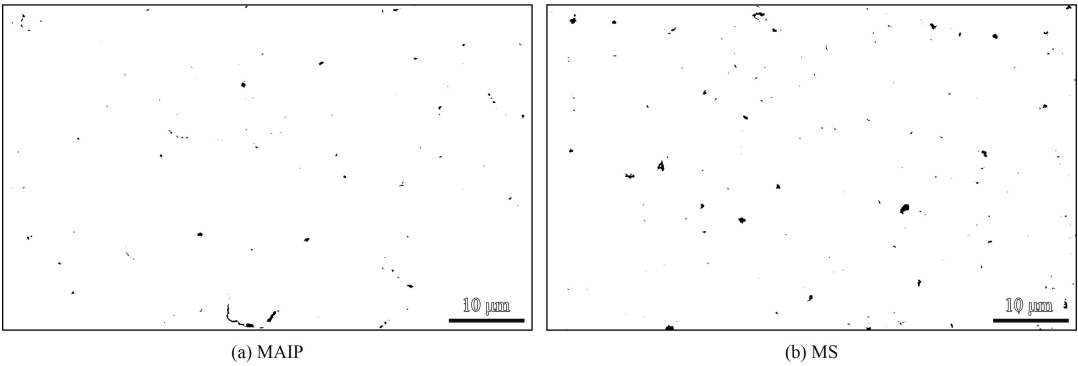


图 2 Image J 处理后的 Cr 涂层氧化前表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of Cr films processed by image J software before oxidation

表 2 不同制备方法下 Cr 涂层的表面孔洞数据

Method	Count	Total area / μm^2	Average size / μm^2	Area / %
MS	164	7.815	0.048	0.40
MAIP	106	4.481	0.042	0.21

磁控溅射 Cr 涂层 (0.40%)。

图 3 是在不同能量粒子入射情况下涂层的二维模拟结构, 假设衬底温度 $T=0$, 入射粒子动能为 E_t , 吸附原子的脱附能为 E_c , 用 E_t/E_c 表示沉

积粒子的能量效应, 即入射粒子具有一定的表面扩散能力, 粒子的扩散能力受到其具有能量的影响^[15]。图 3(a) 中 $E_t/E_c=0.02$ 时, 涂层中形成了大量的孔洞, 孔洞尺寸最小只有 1 nm 左右, 但是其密度可达 10^{17} 个/ cm^2 , 孔洞的产生是受到阴影效应的影响, 涂层在沉积过程中, 有原子或原子团沉积在基底表面, 随后而来的原子有可能被相邻的原子遮挡, 导致孔洞的产生。图 3(b) 为 $E_t/E_c=0.5$ 时, 图 3(c) 为 $E_t/E_c=1.5$, 相对于图 3(a), 涂层中的孔洞明显减少。

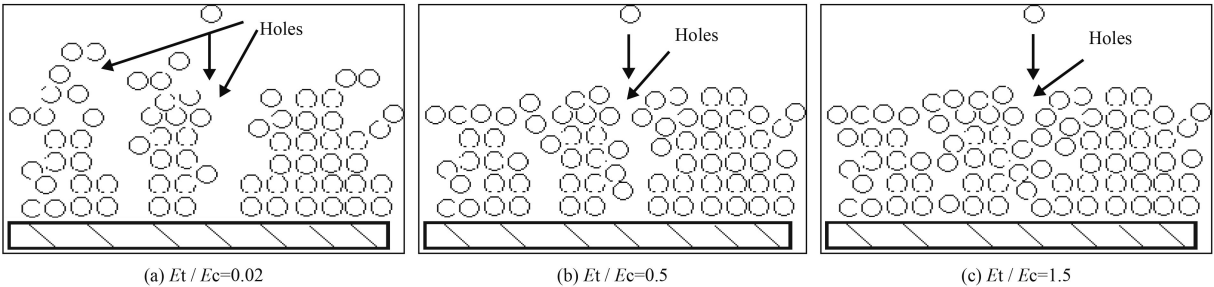


图 3 不同能量的入射粒子对涂层组织的影响

Fig.3 Influences of incident particles with different energy on the films structure

由上述可知,随着能量效应的增强,阴影效应减弱,涂层中的孔洞减少。这是因为在涂层沉积过程中入射粒子能量越高,高能粒子本身会具有更高的迁移几率,同时会将动能传递给涂层表面的其他粒子,出现再溅射现象,能铺平填充其他孔洞,减少孔洞数量^[15]。而磁控溅射中粒子能量仅为 1~10 eV,多弧离子镀中的粒子能量高达 100~1 000 eV^[15],所以与磁控溅射 Cr 涂层相比,多弧离子镀 Cr 涂层的孔洞更少。同时多弧离子镀中的粒子绕射性更好,有利于涂层表面粒子的扩散。

图 4 为不同制备方法下 Cr 涂层氧化前的 XRD 图谱,在 44.392°, 64.581°和 81.729 °分别出现 Cr 的衍射峰,对比 XRD 衍射卡片 06-0694,衍射峰分别对应 (110)、(200)、(211) 晶面,同时存在与基材相对应的 Zr 峰。采用织构系数 (TC 值) 来研究不同制备方法对 Cr 涂层择优生长取向的影响规律:

$$TC_{hkl} = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{\sum_{i=1}^n I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}} \times 100\%$$

(1)

式中: $I_{(hkl)}$ 为涂层 (hkl) 晶面的实际衍射强度; $I_{0(hkl)}$ 为涂层 (hkl) 晶面对应的标准卡片上衍射强度。如果 Cr 涂层的 $TC_{(hkl)}$ 值大于 $1/n$ (n 为 Cr 峰个数),则该晶面为择优取向面; $TC_{(hkl)}$ 值越大,表明 (hkl) 晶面择优取向程度越高^[16]。

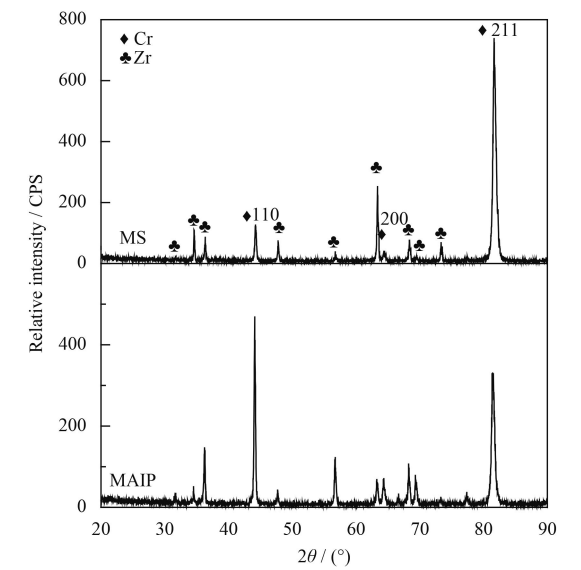


图 4 Cr 涂层氧化前的 X 射线衍射图谱
Fig.4 XRD patterns of Cr films before oxidation

表 3 为 Cr 涂层 $TC_{(hkl)}$ 数值统计。由表 3 的计算结果可知:在不同制备方法下 Cr 涂层均沿着 (211) 晶面择优生长,但多弧度离子镀 Cr 涂层沿 (200) 晶面择优取向得到改善。

平均晶粒尺寸根据 Scherrer 公式来计算:

$$D = K\lambda/\beta\cos\theta$$

(2)

其中: D 为晶粒垂直于晶面方向的平均厚度; K 为 Scherrer 常数,取 0.89; λ 为 X 射线的波长(取 0.154 056 nm); β 为衍射峰半高宽, θ 为 Bragg 角。计算出磁控溅射、多弧离子镀工艺下 Cr 涂层的平均晶粒尺寸为 25.79 nm 和 29.00 nm,磁控溅射 Cr 涂层平均晶粒尺寸小于多弧离子镀 Cr 涂层的。

表 3 Cr 涂层的 $TC_{(hkl)}$ 数值统计

Table 3 Numerical statistics of $TC_{(hkl)}$ of Cr films

Process	$TC_{(110)}$	$TC_{(200)}$	$TC_{(211)}$
MAIP	0.035	0.438	0.527
MS	0.231	0.222	0.547

2.2 Cr 涂层的高温抗氧化性能

图 5 为 800℃ 恒温环境下, Cr 涂层氧化 7 h 后的 XRD 图谱,由图可知:涂层氧化后的产物主要为 Cr_2O_3 ,同时存在 Cr 和 Zr 峰,说明 Cr 与 O_2 反应生成了 Cr_2O_3 氧化膜。另一方面,没有出现明显的 ZrO_2 峰,表明 Cr 涂层经 7 h 高温氧化后尚未失效,依然对基材起到了保护作用。

图 6 为不同制备方法下 Cr 涂层氧化后的表面形貌,两种涂层表面均形成了连续的氧化膜,结

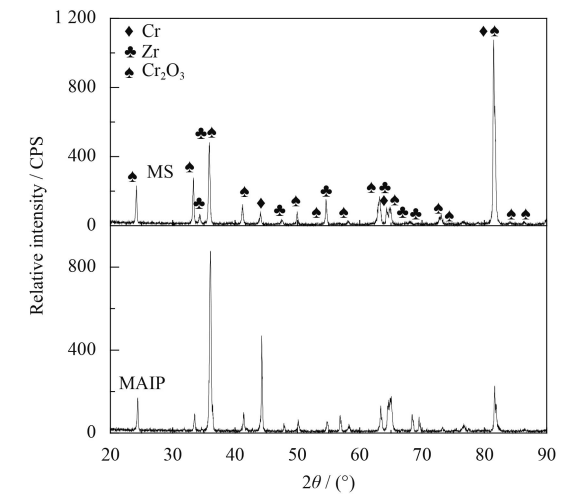


图 5 Cr 涂层氧化后的 X 射线衍射图谱
Fig.5 XRD patterns of Cr films after oxidation

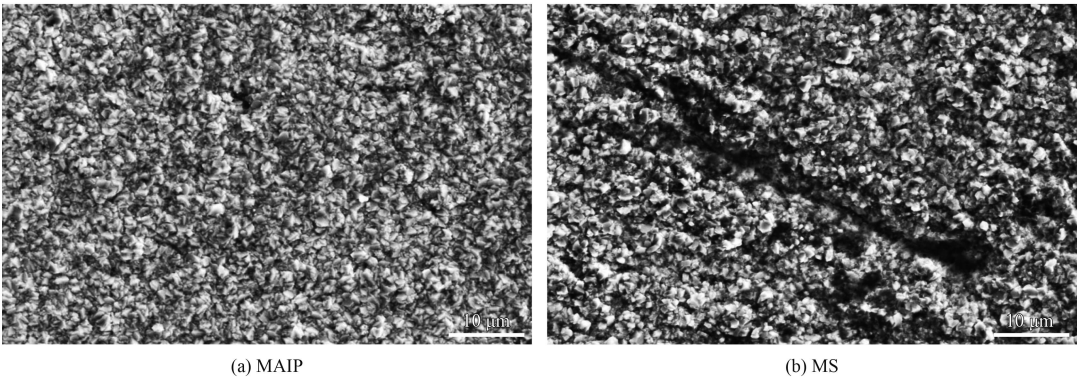


图 6 不同制备方法下 Cr 涂层氧化后的表面形貌

Fig.6 Surface morphologies of Cr films deposited by different methods after oxidation

合 XRD 结果分析, 可以判断该氧化膜为 Cr_2O_3 。在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下, Cr 与 O_2 反应生成 Cr_2O_3 , Cr_2O_3 为菱方晶系结构, 连续、致密具有较高的热稳定性, 不容易分解, 阻碍了 O_2 向涂层内部扩散进而到达基材表面, 具有较强的保护性^[17]。磁控溅射 Cr 涂层表面出现了裂纹缺陷, 因为氧化膜的生成会产生内应力, 随着氧化膜不断生成、增厚, 当内应力积累到极限时, 将通过氧化膜的塑性变形进行释放^[18]。相比于多弧离子镀 Cr 涂层, 磁控溅射 Cr 涂层存在更多孔洞, 孔洞不仅破坏涂层结构的稳定性, 还为氧气向涂层内部扩散提供通道, 同时磁控溅射 Cr 涂层平均晶粒尺寸更小, 更容易形成氧化膜, 因此在涂层内部释放更多的内应力而产生裂纹。

图 7 为不同制备方法下 Cr 涂层氧化后的截面形貌及 EDS 分析, 由图可知涂层表面均形成了连续均匀的氧化膜。EDS 分析表明, 基材表面氧元

素含量均较低, 说明了涂层起到了保护作用。多弧离子镀 Cr 涂层的氧元素主要集中在涂层; 在膜基结合处, 氧元素含量急剧下降, 说明多弧离子镀涂层表面生成了连续、致密的氧化膜, 阻碍了氧气向基材的扩散。在磁控溅射 Cr 涂层的膜基结合处, 氧元素含量曲线呈“斜坡状”, 说明基材表面受到了轻微氧化, 综合上文分析, 磁控溅射 Cr 涂层在生成氧化膜时产生的裂纹破坏了涂层的致密性, 为氧元素的扩散提供了通道, 导致基材表面受到了氧化。

图 8 为不同制备方法下 Cr 涂层在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温环境下的氧化动力学曲线。由图 8 可知, 随着氧化时间的增长, 原始铝合金的氧化动力学曲线急剧增长, 而涂层试样的氧化速率变化缓慢。氧化 7 h 后, 原始铝合金、多弧离子镀 Cr 涂层、磁控溅射 Cr 涂层单位面积增重分别为 20.201 、 5.617 和 6.517 mg/cm^2 , 说明 Cr 涂层具有较好的高温抗

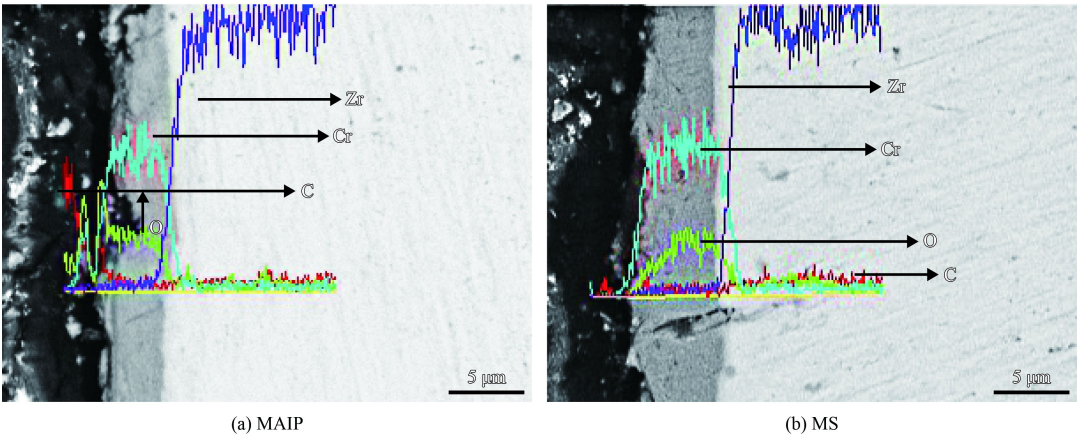


图 7 氧化后 Cr 涂层截面形貌及 EDS 分析

Fig.7 Cross section morphologies and EDS analysis of Cr films after oxidation

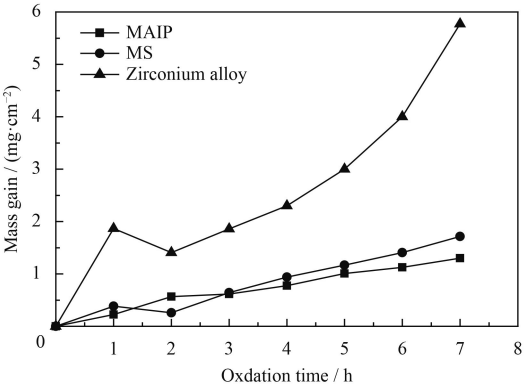


图 8 不同制备方法下 Cr 涂层的氧化动力学曲线

Fig.8 Oxidation kinetic curves of Cr films deposited by different methods

氧化性，多弧离子镀 Cr 涂层抗氧化性能优于磁控溅射 Cr 涂层。

高温氧化过程包括两个方面：界面与氧气的反应和氧气向涂层内部扩散的反应。其中界面包括氧化物与氧气的界面和金属与氧化物的界面。高温环境下，涂层与氧气接触，在界面处发生氧化反应生成氧化膜，阻碍氧气向涂层内部扩散，此时界面反应强于扩散反应；随着氧化膜的增厚，界面反应减弱，扩散反应起主导作用^[19]。

图 9 为不同氧化时间下 Cr 涂层表面宏观形貌。氧化 3 h 时，磁控溅射 Cr 涂层表面出现裂纹，随着氧化时间增长，涂层表面裂纹数增加；在相同时间段内多弧离子镀 Cr 涂层并未出现裂纹。氧化第一阶段 (0~3 h)，多弧离子镀 Cr 涂层单位面积氧化增重 1.408 mg/cm²，磁控溅射 Cr 涂层单位面积氧化增重 1.202 mg/cm²，少于多弧离子镀 Cr 涂层。因为磁控溅射 Cr 涂层平均晶粒尺寸更小，界面反应强于多弧离子镀 Cr 涂层，更快的形成了氧化膜，起到了更好的保护效果。氧化第二阶段 (4~7 h)，多弧离子镀 Cr 涂层单位面积氧化增重 4.208 mg/cm²，磁控溅射 Cr 涂层单位面积氧化增重 5.232 mg/cm²，多弧离子镀 Cr 涂层增重更少，两种涂层试样的氧化动力学曲线变平缓。随着氧化膜的增厚，孔洞逐渐被氧化膜填充而变致密，对氧气的扩散起到了阻碍作用。而磁控溅射 Cr 涂层的氧化速率超过多弧离子镀 Cr 涂层，这是因为磁控溅射 Cr 涂层氧化时产生了裂纹，导致磁控溅射 Cr 涂层氧化膜的致密性比多弧离子镀 Cr 涂层的差，因此多弧离子镀 Cr 涂层单位面积氧化增重速率更低。

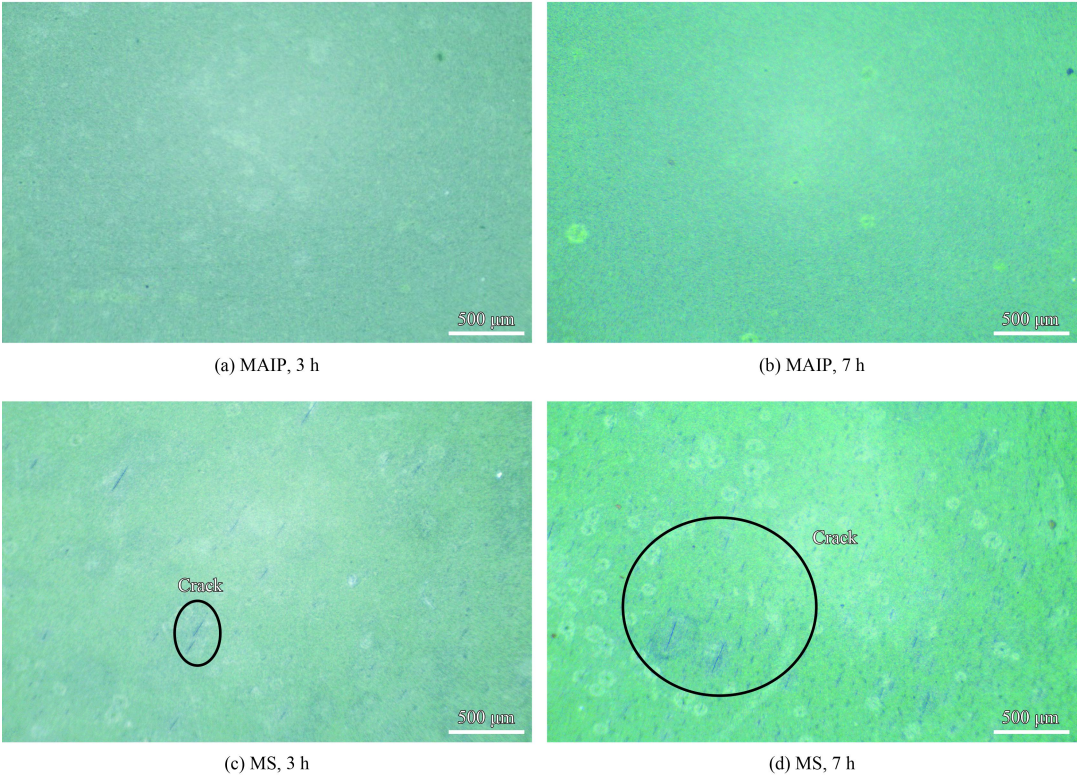


图 9 不同氧化时间下 Cr 涂层的表面宏观形貌

Fig.9 Surface macro-morphologies of Cr films with different oxidation time

3 结 论

(1) 磁控溅射 Cr 涂层表面光滑, 颗粒少, 存在一定数量的孔洞, 占涂层表面积的 0.40%; 多弧离子镀 Cr 涂层表面存在明显大颗粒, 但孔洞的数量相对较少, 占涂层表面积的 0.21%。

(2) 磁控溅射 Cr 涂层的平均晶粒尺寸 25.79 nm, 多弧离子镀 Cr 涂层的平均晶粒尺寸 29.00 nm, 磁控溅射 Cr 涂层的晶粒尺寸更小。两种工艺下, Cr 涂层均沿着 (211) 晶面择优生长, 多弧离子镀 Cr 涂层晶粒沿 (211) 晶面的择优生长趋势被抑制, 沿 (200) 晶面择优生长得到改善。

(3) 在 800℃ 高温环境下, 多弧离子镀 Cr 涂层 (7 h 内单位面积氧化增重 5.616 mg/cm²) 抗氧化性能优于磁控溅射 Cr 涂层的 (7 h 内单位面积氧化增重 6.434 mg/cm²), 磁控溅射 Cr 涂层表面出现裂纹。

参考文献

- [1] DAUBA K, VAN NIEUWENHOVE R, NORDIN H. Investigation of the impact of coatings on corrosion and hydrogen uptake of zircaloy-4[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 467: 260-270.
- [2] 柏广海, 陈志林, 张晏玮, 等. 核燃料包壳铝合金表面涂层研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(7): 2035-2040.
BAI G H, CHEN Z L, ZHANG Y W, et al. Research progress of coating on zirconium alloy for nuclear fuel cladding[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 2035-2040 (in Chinese).
- [3] KIM H G, KIM I H, JUNG I J, et al. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 465: 531-539.
- [4] DONG H K, LEE J H, LEE T, et al. Critical heat flux for SiC and Cr-coated plates under atmospheric condition[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 76: 335-342.
- [5] 李洪涛, 蒋百灵, 曹政, 等. 偏压对磁控溅射纯 Cr 镀层组织形貌及耐腐蚀性能的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2009, 25(2): 141-145.
LI H T, JANG B L, CHAO Z, et al. Effect of bias voltage on micromorphology and corrosion resistance of pure Cr coating deposited by magnetron sputtering[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(2): 141-145 (in Chinese).
- [6] PARK J H, KIM H G, PARK J Y, et al. High temperature

steam-oxidation behavior of arc ion plated Cr coatings for accident tolerant fuel claddings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 280: 256-259.

- [7] 魏祥飞, 张平则, 魏东博, 等. 多弧离子镀 Cr 涂层对 γ -TiAl 合金高温氧化性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(3): 707-711.
WEI F X, ZHANG Z P, WEI D B, et al. Effect of multi-arc ion plating chromium films on the high temperature oxidation resistance of γ -TiAl alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(3): 707-711 (in Chinese).
- [8] LEI S, WANG Y X, LI J L, et al. Structure and mechanical properties of thick Cr/Cr₂N/CrN multilayer coating deposited by multi-arc ion plating[J]. *Science Direct*, 2015, 25: 1135-1143.
- [9] ZHAO Y H, GUO C Q, YANG W J, et al. TiN films deposition inside stainless-steel tubes using magnetic field-enhanced arc ion plating[J]. *Vacuum*, 2015, 112: 46-54.
- [10] BELIARDOUH N E, BOUZID K, NOUVEAU C, et al. Tribological and electrochemical performances of Cr/CrN and Cr/CrN/CrAlN multilayer coatings deposited by RF magnetron sputtering[J]. *Tribology International*, 2015, 82: 443-452.
- [11] LU Z, LONG L, ZHONG Z, et al. Structural characterization and optoelectrical properties of Ti-Ga co-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering[J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, 27(3): 2875-2884.
- [12] YOON S Y, KIM K H, LEE K O, et al. Comparison for mechanical properties between TiN and TiAlN coating layers by AIP technique[J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2002, 130: 260-265.
- [13] SHIAO M H, SHIEU F S. A formation mechanism for the macroparticles in arc ion-plated TiN films[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 386(1): 27-31.
- [14] 王浩然, 邱长军, 曾小安, 等. 温度对纯 Cr 涂层表面形貌和抗腐蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(6): 192-196.
WANG H R, QIU C J, ZENG X A, et al. Effect of temperature on morphology and corrosion resistance of pure Cr coating[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(6): 192-196 (in Chinese).
- [15] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用. 第 2 版[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 187-188.
TANG W Z. Principle, technology and application of film material preparation. the second edition[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 187-188 (in Chinese).
- [16] 曾小安, 邱长军, 张文, 等. 负偏压对纯 Cr 涂层表面液滴及涂层结合力的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(2): 177-181.
ZENG X A, QIU C J, ZHANG W, et al. Effect of negative

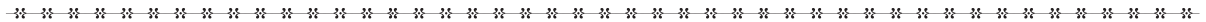
bias on droplet deposition and interfacial adhesion of chromium coating[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(2): 177-181 (in Chinese).

[17] WANG H T. Influence of Cr₂O₃-Al₂O₃ composite oxide scale on oxidation resistance of ZG40Cr24[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2012, 27(3): 405-410.

[18] 陈勇. 热障涂层中热生长氧化层应力及变形研究进展[J]. 航空材料学报, 2013, 33(6): 86-95.
CHEN Y. Progress in research on stress and distortion of thermally grown oxides in TBCs[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(6): 86-95 (in Chinese).

[19] 陆冠雄, 刘彻, 郝利军, 等. QT-500 基体上等离子喷涂 8YSZ 热障涂层系统的高温氧化行为研究[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(2): 14-19.
LU G X, LIU C, HAO L J, et al. High temperature oxidation behavior of 8YSZ thermal barrier coatings plasma sprayed on QT-500 cast iron[J]. Thermal Spray Technology, 2014, 6(2): 14-19 (in Chinese).

(责任编辑: 黄艳斐)



• 本刊讯 •

中英绿色制造与再制造产业发展峰会在河间圆满召开

2018 年 3 月 12—13 日, 京津冀再制造产业技术研究院和英国布莱顿大学联合主办的“中英绿色制造与再制造产业发展峰会”在河北省河间市成功举办。英国驻华大使馆、英国创新署等英国政府及其再制造企业 and 中华人民共和国工业和信息化部、科技部、中国工程院、陆军装甲兵学院等有关单位的领导及国内再制造行业的专家、企业、科研院所等代表共 360 余人参加了会议。

再制造技术国家重点实验室荣誉主任、工程院院士徐滨士, 工业和信息化部节能与综合利用司副司长毕俊生, 英国驻华大使馆公使衔参赞 Tom Child, 英国创新署高端制造主任 Simon Masters, 英国威尔士政府重庆办公室首席代表 Ma Qingyun, 英中贸易协会先进制造与运输部副主任 Mark Xu, 国标委工业标准一部肖寒主任等出席峰会并致辞讲话。

此次峰会以“中英绿色制造与再制造创新与共享”为主题, 旨在搭建中英再制造产业技术和项目合作的桥梁, 进一步提升再制造产业的技术研发和创新能力, 拓宽合作领域, 共同推动中英再制造企业的循环绿色发展。峰会期间, 参会人员到京津冀再制造产业技术研究院、再制造体验中心以及河间市再制造企业进行了参观, 针对高端智能制造与再制造产业发展、汽车零部件再制造实践、中英绿色制造与再制造技术研究和科技合作等进行了深入研讨和交流。会议举行了“再制造院士工作站”、“中英再制造工业园”和“中欧再制造产业技术合作备忘录”的签约仪式。河间市“国家再制造产业示范基地”被纳入欧盟再制造委员会的国际合作单位, 京津冀再制造产业技术研究院被确立为“中欧再制造产业技术合作联盟”的秘书处单位。

此次峰会对促进中英两国的再制造产业技术进步与发展、加强双方经贸交流与合作、增进两国传统友谊有重要推动作用。同时, 对扩大我国再制造企业对外开放水平, 加快再制造产业走向世界步伐产生积极的推动作用。

(本刊编辑部 供稿)