

添加 SnAl 元素与中温烧结对 Cr/Zr 膜基 界面结合强度的影响

严艳芹¹, 邱长军¹, 胡良斌¹, 黄鹤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: **目的** 通过在 Cr 膜中添加 SnAl 元素及中温液相烧结, 提高钎合金膜基界面结合强度。**方法** 在 Cr 靶中添加 SnAl 元素, 制备一种均匀分布的 CrSnAl 合金靶材 (原子比 Cr:Sn:Al=95:4:1), 并利用直流磁控溅射 (DCMS) 技术在钎合金表面制备约 5 μm 厚的 CrSnAl 膜层, 再将 CrSnAl 膜层试样放入 Ar 保护气氛炉中进行中温烧结 (温度为 600 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 30 min), 随炉冷却至室温。利用 XRD、SEM、EDS 及体式显微镜分析中温烧结对 CrSnAl 膜层形貌、组织结构及元素扩散的影响; 根据涂层弯曲断裂形貌、切削划痕力和切屑形貌综合评价膜基界面结合强度。**结果** 添加 SnAl 后, Cr 膜层表面孔隙等缺陷明显减少, 膜基界面结合强度得到较大提升, 从 41.7 MPa 提升到了 45.8 MPa。600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后, CrSnAl 膜层韧性增强, 并出现韧窝形貌, 剪切唇仅为烧结前 CrSnAl 膜层的 1/2, CrSnAl/Zr 界面结合强度进一步提升到 52.1 MPa。**结论** Cr 膜中添加 SnAl 有利于膜基界面元素扩散, 对膜基界面结合强度提高有较大影响; 中温烧结 CrSnAl 膜层韧性及膜基界面结合强度均有较大提升, 进而改善了膜基界面结合性能。

关键词: 磁控溅射; CrSnAl 合金膜层; 中温烧结; 膜层韧性; 结合强度

中图分类号: TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0277-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.037

Effect of SnAl and Intermediate-temperature Sintering on Interfacial Bonding Strength of Cr/Zr Film

YAN Yan-qin¹, QIU Chang-jun¹, HU Liang-bin¹, HUANG He¹, LIU Yan-hong², LI Huai-lin²

(1.School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2.State Power Investment Corporation Central Research Institute, Beijing 102209, China)

ABSTRACT: The work aims to increase the bonding strength of zirconium alloy film-based interface by SnAl elements in Cr film and intermediate-temperature liquid phase sintering. SnAl element was added to Cr target to prepare a CrSnAl alloy target with an evenly distributed atomic ratio of Cr : Sn : Al=95 : 4 : 1. DC magnetron sputtering (DCMS) technology was used to prepare approximately 5 μm thick CrSnAl film on the surface of zirconium alloy and then the CrSnAl film sample was placed in

收稿日期: 2018-05-14; 修订日期: 2018-07-12

Received: 2018-05-14; **Revised:** 2018-07-12

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), Hunan Province Key Subject Building Project ([2014]85)

作者简介: 严艳芹 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面改性。

Biography: YAN Yan-qin (1990—), Female, Master, Research focus: material surface modification.

通讯作者: 邱长军 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料表面改性。邮箱: qiuchangjun@hotmail.com

Corresponding author: QIU Chang-jun (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface modification of metallic materials. E-mail: qiuchangjun@hotmail.com

an Ar atmosphere furnace for sintering at an intermediate temperature of 600 °C for 30 minutes and the coated sample was cooled down to room temperature with the furnace. Effect of intermediate-temperature sintering on morphology, structure and element diffusion of CrSnAl films was investigated by XRD, SEM, EDS and stereoscopic microscope, respectively and the film-based interface bonding strength was evaluated by coating bending fracture morphology, cutting scratch force and chip morphology. The defects such as pores on the surface of Cr film with SnAl addition were significantly reduced, and the bond strength at the interface of the film was greatly improved. The average bonding strength at the interface was increased from 41.7 MPa to 45.8 MPa. The toughness of the CrSnAl film after sintered at 600 °C was enhanced, and the dimple appearance was observed. The shear lip was only 1/2 of the pre-sintered CrSnAl film, and the CrSnAl/Zr interface bond strength was further increased to 52.1 MPa. Therefore, the addition of SnAl to the Cr film is beneficial to the diffusion of element at the interface of the film, and has a great influence on the bonding strength of the film-based interface. CrSnAl film sintered at medium temperature increases the toughness of the film and the bonding strength of the film-based interface, thus improving the interface properties of the film-based interface.

KEY WORDS: magnetron sputtering; CrSnAl films; medium temperature sintering; film toughness; bonding strength

锆合金因热中子吸收率低、高硬度及耐腐蚀等一系列优点,被广泛用作核反应堆包壳管材料^[1]。实验表明,锆合金试样表面镀 Cr 能改善锆合金包壳管抗高温蒸气氧化性能^[2-3],提高包壳管事故容错能力。而膜层与锆基材界面的结合能力是锆合金镀 Cr 要解决的主要问题之一。热处理是提高膜层与锆合金界面结合性能较常用的方法,高温会激发锆合金包壳管晶面发生滑移,晶粒孪生等变形机制^[4-5]。而添加低熔点 Sn 等元素会影响锆合金晶粒形态能转变^[6-7],有助于促进锆合金生长晶粒的排列^[8]。Al 在高温条件下,会选择性氧化生成致密氧化膜,阻挡氧、氢、硫等破坏性元素进入到膜层,在 Cr 膜层中添加 Al,可有效隔绝锆合金在水环境下的腐蚀和吸氢^[9-10],有助于延长包壳管事故容错使用寿命。综上,本文通过在 Cr 膜层中添加 Sn、Al 元素,降低膜层元素共晶点,并结合中温液相烧结,进而提高膜基界面结合强度及综合力学性能。

1 实验

1.1 试样的制备

实验所用靶材为商用 Cr 靶材(纯度 99.99%,尺寸 $\phi 82\text{ mm} \times 7\text{ mm}$)和自制 CrSnAl 合金靶材。CrSnAl 合金靶材自制方法:采用商用 Sn、6065Al ($w(\text{Sn}):w(\text{Al})=14:1$),通过 SX-2.5-10 型马弗炉熔炼和陶瓷型模具铸造 SnAl 合金铸锭,铸造温度 700 °C;将铸造的 SnAl 合金铸锭打磨成直径为 2.0 mm 的丝状,并按面积比 Cr:SnAl=95:5 铆接在商用 Cr 靶材上,制备出 CrSnAl(原子比 95:4:1at.%)合金靶材。

镀膜基材为 Zirlo 合金,尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,成分(质量分数计):Sn 1.0%,Nb 1.0%,Fe 0.1%,余量为 Zr。设备为国产 TSU-650 型多功能镀膜设备。基材镀膜前经砂纸打磨、抛光,去离子水

冲洗后,再用无水乙醇超声清洗 10 min,吹干并置于真空室试样架上。开启直流电源,自转(转速 2 r/min),抽真空至 $8 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 以下、温度加热至 180 °C 时,通入高纯氩气(99.999%),流量调节至气压为 1.0 Pa,镀膜偏压设置为 -100 V,偏压占空比 55%,直流溅射功率为 350 W,沉积时间 180 min。此工艺下,沉积涂层厚度约为 5 μm 。

将镀膜完成后的 CrSnAl 膜层试样置于 Ar 保护炉中进行烧结,温度设置为 600 °C,烧结时间设置为 30 min,烧结完成后,试样随炉冷却至室温。

1.2 表征与分析

利用挤压弯断装置及自主改装后的 WS-2005 型划痕仪(将锥角为 120°的金刚钻头替换为与涂层接触面积为 $0.4 \times 0.6\text{ mm}^2$ 的刀具压头)测试涂层韧性及膜基界面结合强度,挤压装置如图 1 所示。其挤压速度 0.001 mm/s,加载 100 N/min,标准挤压试样尺寸为 $20\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,试样底部切一个 90°的楔型槽,楔型槽顶角距离涂层面为 1.5 mm,涂层试样一端固定于夹具上,另一端给夹具施加压力。

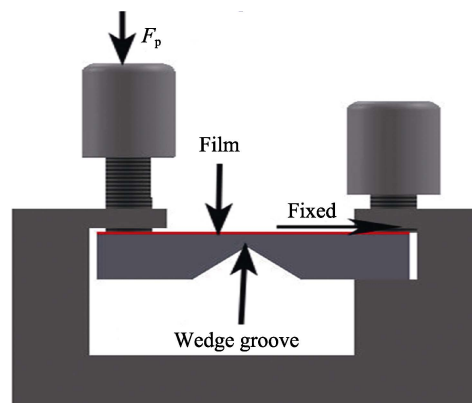


图 1 挤压弯断装置
Fig.1 Extrusion section fixture device

利用 CARL ZEISS EVO18 型扫描电镜、OXFORD X-Max Extreme 型能谱仪和体式显微镜对涂层形貌及元素分布进行表征。利用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (Cu $K\alpha$) 对涂层的相组成进行检测,检测波长为 0.154 nm,扫描速度 4 (°)/min,扫描范围 20°~90°,扫描步长 0.01°。

2 结果与分析

2.1 涂层表面形貌分析

图 2a、b 分别为 Cr、CrSnAl 膜层烧结前的 SEM 表面形貌,图 2c 为 CrSnAl 膜层 EDS 能谱。从图 2a 可观察到,涂层表面粗糙,孔洞等缺陷多。这是因为,在 180 °C 的制备温度下,Cr 原子(熔点 1857 °C)低温沉积,且迅速形核长大,晶粒堆叠形成孔隙。与之相比,图 2b 表面相对致密,几乎无孔洞等缺陷。

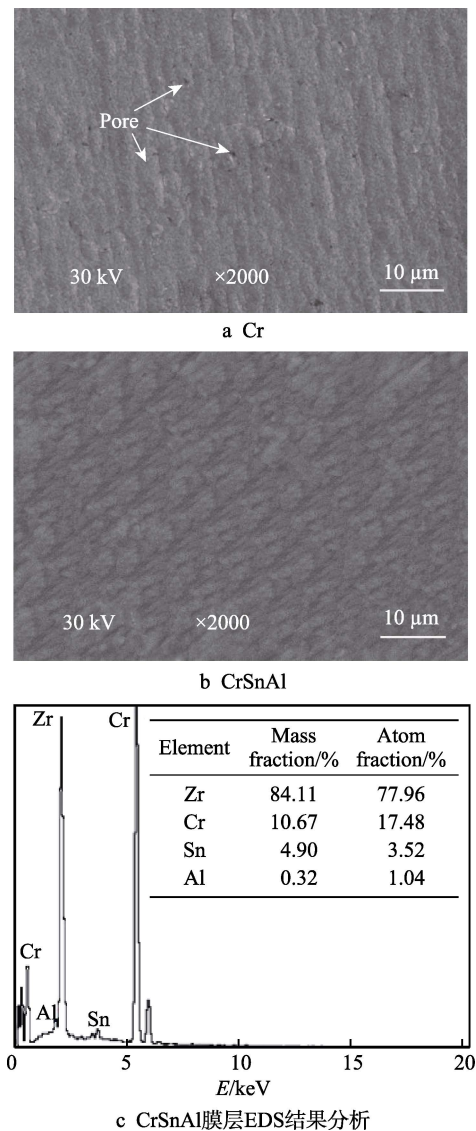


图 2 涂层 SEM 表面形貌及 CrSnAl 膜层 EDS 能谱
Fig.2 Films surface morphology CrSnAl film and EDS result of CrSnAl film

从 CrSnAl 膜层试样的 EDS 图谱(图 2c)可知,CrSnAl 膜层中存在低熔点 Sn/Al 相,由于在腔室高温沉积中,Sn/Al 等低熔点相形核慢,而 Cr 原子形核快,使得膜层存在奥斯瓦尔多吞并、熔结及原子团的迁移等过程^[11],缩减了晶粒间空隙,从而使 CrSnAl 膜层表面更连续,孔隙更少。

2.2 膜层截面形貌分析

图 3a、b 为 CrSnAl 膜 600 °C 烧结前、后的 SEM 截面形貌,图 3c 为 Cr 膜未作烧结处理的 SEM 截面形貌。由于 SnAl 元素添加较少,线扫描不能明显地反映膜层界面元素扩散情况,因此选取膜层界面处的三个点来确定各元素在界面的分布情况。对比图 3a、b、c 可以看出,图 3c 中纯 Cr 涂层有较多孔隙,而添加 SnAl 元素后,膜层孔隙减少,更加致密。结合 EDS

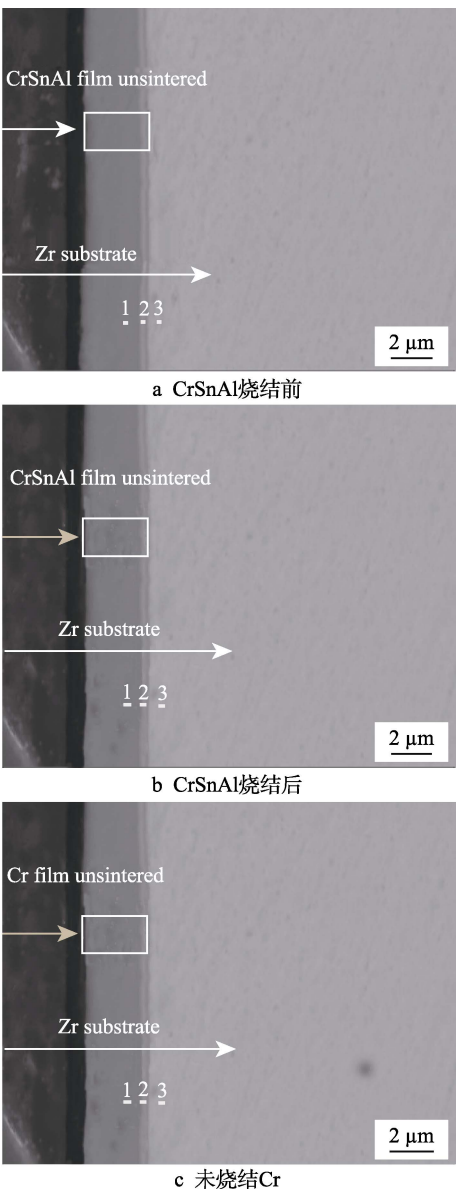


图 3 涂层 SEM 截面形貌
Fig.3 Cross-sectional SEM morphology of films: (a) CrSnAl unsintered, (b) CrSnAl sintered, (c) Cr unsintered

数据分析(表 1)发现,添加 SnAl 元素及烧结膜层后,膜层原子存在扩散现象,原子扩散填补了晶粒间隙,因此孔隙减少,膜层更致密。由图 3a 可以明显看到, CrSnAl 膜基界面处出现宽约 0.5 μm 的衬度色差区域,烧结后(图 3b),膜基界面衬度色差淡化,膜层界面过渡区域更平直。此外,烧结前的 CrSnAl 膜基界面处 Cr、Sn、Al 元素含量分布相对烧结后集中。从 EDS 结果分析还可以看出,烧结前 CrSnAl 膜层发生了一定程度的扩散,但扩散不充分,原因是 180 $^{\circ}\text{C}$ 的腔室衬底温度使部分 Sn/Al 元素获得能量被激活,摆脱原有晶格的束缚而扩散,但扩散程度较小。600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结使 Sn 原子及部分 Al 原子呈现液相,在膜层进行激烈扩散,表现出膜基界面处烧结后衬度色差的变化^[12]。

表 1 图 3 点扫描元素分布
Tab.1 Figure 3 point scan element distribution

Element	Cr			CrSnAl			CrSnAl (600 $^{\circ}\text{C}$)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Cr	94.67	19.52	2.02	97.58	32.95	8.05	91.40	27.48	2.28
Zr	5.33	80.48	97.98	—	63.84	89.93	5.96	67.44	95.34
Sn	—	—	—	1.42	1.91	1.00	1.46	3.52	1.16
Al	—	—	—	1.00	1.30	1.02	1.18	1.56	1.22

2.3 CrSnAl 涂层结合性能分析

利用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (Cu $K\alpha$) 对涂层烧结前后的物相进行分析,如图 4 所示。从衍射图谱可以看出, CrSnAl 膜层中都出现了 $\text{Al}_{9.83}\text{Zr}_{0.17}$ 、 ZrSn_2 等衍射峰, 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后, $\text{Al}_{9.83}\text{Zr}_{0.17}$ 、 ZrSn_2 等衍射峰增强。衍射峰强弱可表示晶面择优生长取向^[13], 从烧结后衍射峰的变化可以看出, 烧结改变了涂层元素择优生长取向, 促进了 $\text{Al}_{9.83}\text{Zr}_{0.17}$ 、 ZrSn_2 等新晶粒的形核、长大, 改善了生长晶粒的排列程度, 使膜基界面晶粒平直生长, 加强了界面膜基结合性能。

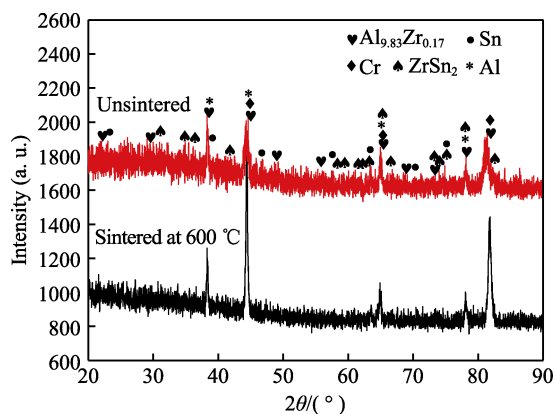


图 4 CrSnAl 涂层 XRD 图谱
Fig.4 CrSnAl films XRD pattern

图 5a、b、c、d 分别为 CrSnAl 涂层 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结前后的弯断形貌及其上视图。体式显微镜观察到涂层断裂最先发生在纤维区, 然后快速扩展成放射区, 形成剪切唇(如图 5 白色圆框中所示), 放射区汇聚方向指向裂纹源, 涂层可以判断为韧性断裂^[14-15]。对比图 5a、b、c、d 白色椭圆区域可以发现, 图 5b、d 中涂层裂纹密度较少, 剪切唇约为图 5a、c 的 1/2, 说明处理后, 涂层韧性加强。进一步观察可以看到, 图 5b 断口出现韧窝(b 椭圆框中所示)形貌, 这是判断涂层韧性较强的典型特征, 说明烧结后, 涂层具有了更好的韧性, 涂层韧性则反应了涂层与基材良好的膜基界面结合强度^[16]。CDMS 膜层界面结合强度本质上是界面两侧原子或分子之间总的结合力的宏观反应, 界面两侧原子或分子形成的结合键的强度越大, 单位面积的结合键数目就越多, 界面的宏观结合强度就越大^[17]。中温烧结给涂层提供更多的结合键能 (Zr—Sn、Zr—Al), 因而增强了 CrSnAl/Zr 界面结合机制; 其次, 烧结使膜层中存在的低熔点 Sn、Al 簇团在界面处扩散, 起到一定的焊接作用^[18-19]。

2.4 涂层划痕形貌观察及界面结合强度评估

利用改装后的 WS-2005 型划痕仪在膜基界面处进行多次剪切涂层试验, 其切屑形貌及结合强度分别如图 6、7 所示。将钎合金基材划痕切削形貌(图 6d)作为评判切屑完整程度的参考。由图可知, 钎合金切削划痕边缘平滑, 无崩碎颗粒散落, 切屑连续完整并呈带状剥离, 有光泽。图 6a 为纯 Cr 膜层未做任何处理时的划痕形貌, 图 6b、c 分别为 CrSnAl 膜层经 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结前、后的划痕形貌。由图 a、b 可以观察出, Cr 涂层划痕边缘堆积的切屑颗粒较大, 划痕较粗糙, 切削不完整, 卷屑脆性较大, 切屑槽边缘散落崩碎颗粒较多。由图 6b、c 对比观察可知, CrSnAl 涂层烧结前, 划痕边缘呈锯齿形, 切屑呈大颗粒崩碎, 散落在划痕边缘; 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后, 卷屑完整连续, 呈带状螺旋卷起, 且有光泽, 膜层划痕边缘较平直, 崩落的碎屑颗粒较少。

参考图 6d 划痕形貌特征, 可以定性判断出膜基界面的结合性能由弱到强依次为: 纯 Cr 膜<未烧结 CrSnAl <600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后 CrSnAl 膜层。其原因可能为, CrSnAl 膜层中存在低熔点 Sn/Al 相(图 4), 在 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结过程中, Sn 原子及部分 Al 原子出现液相, 因而 Sn、Al、Cr 原子分别形成尺寸不同的核心, 较小核心接触面的曲率半径较小, 其向接触曲率半径较大的核心扩散, 从而失去原子。较大核心吸收原子并长大结晶, 晶粒连接在一起, 逐渐减小晶粒间的空隙体积, 因而 CrSnAl 600 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后, 膜基界面连接更加连续致密^[20], 膜层卷屑更完整连续。而未烧结 CrSnAl 膜层与纯 Cr 膜层, 虽在 180 $^{\circ}\text{C}$ 衬底温度镀膜过程中发生了一定程度扩散, 但扩散温度相对较低, 不能充分进行, 使得膜基界面连接相对蓬松, 因而切屑不连续。

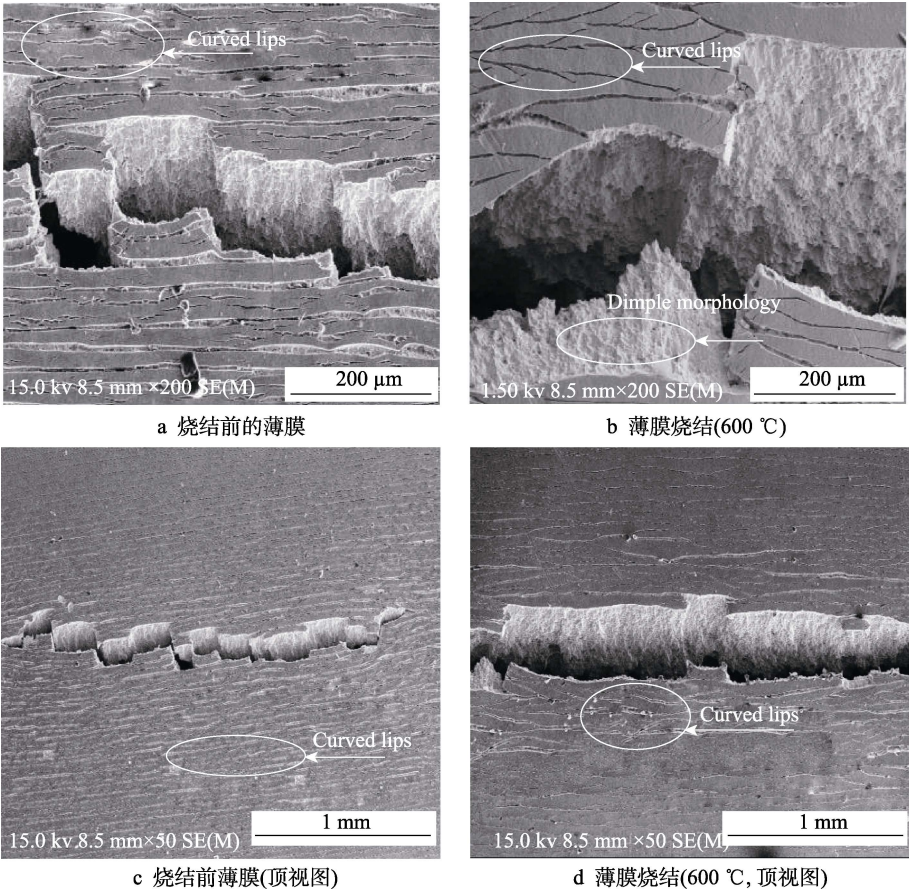


图 5 CrSnAl 涂层烧结前后断面形貌及上视图
Fig.5 Fracture surface morphology of CrSnAl films and top-view: a) before sintered of CrSnAl films; b) sintered of CrSnAl films (600 °C); c) before sintered of CrSnAl films (top-view); d) sintered of CrSnAl films (600 °C, top-view)

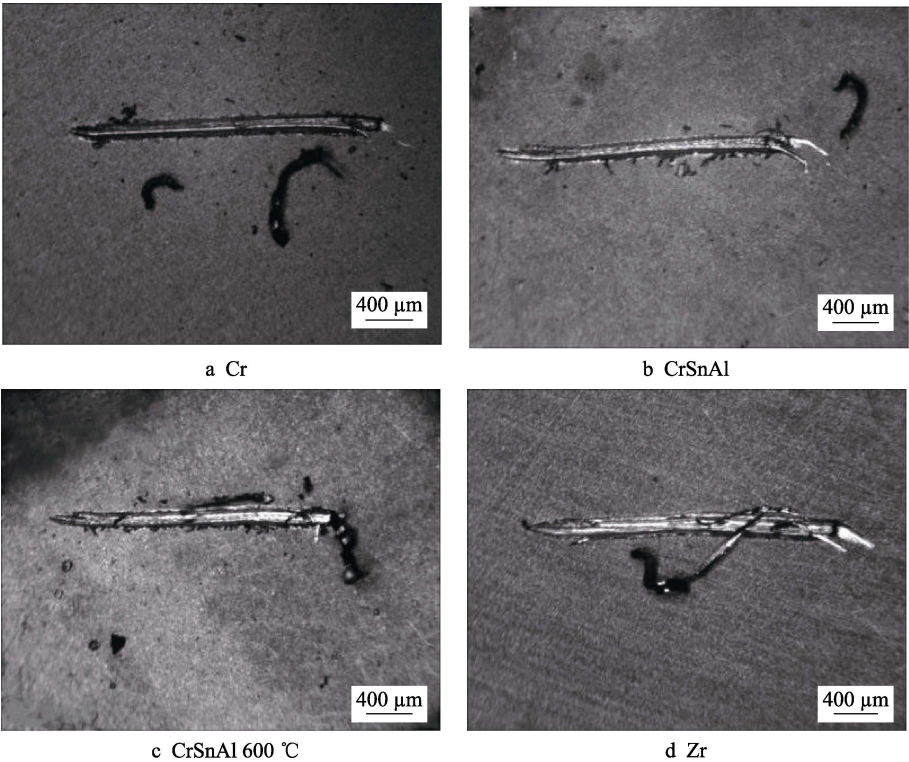


图 6 涂层切削形貌
Fig.6 Cutting morphology of films

但 Sn/Al 元素的添加会影响 Cr/Zr 膜基界面形核及晶粒的排列, 利于界面膜层与基材紧密结合, 所以相较纯 Cr 膜, CrSnAl/Zr 界面结合强度较高, 卷屑相对完整连续, 崩碎切屑较少。

图 7 为不同温度下, 涂层剪切摩擦载荷图。切削摩擦载荷反应了膜基结合强度大小, 切削摩擦载荷越大, 说明将膜层与基材分开所需要的力越大, 膜基界面结合强度越高。简化后的结合强度 F_n 计算公式如下:

$$F_n = \frac{f_1}{S_c} \quad (1)$$

式中 f_1 为剪切涂层摩擦力 (N); S_c 为剪切刀头与涂层接触面积 ($0.4 \text{ mm}^2 \times 0.6 \text{ mm}^2$)。

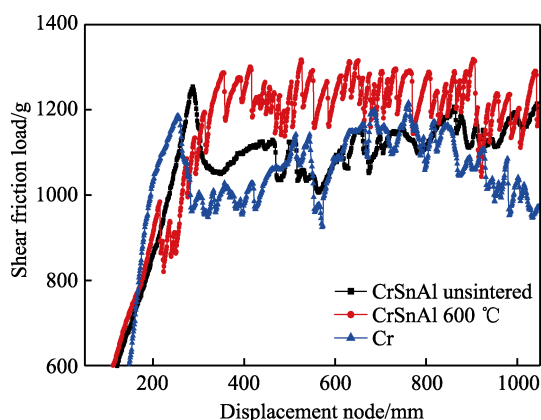


图 7 膜层切削摩擦载荷
Fig.7 Scratch and shear friction Load of coatings

观察图 7 载荷线走向变化可以发现, 涂层划痕载荷在一定范围内呈锯齿型上下波动, 原因是, 刀口划过涂层界面带起的卷屑阻碍了刀具的运动, 卷屑积累一定大小后断掉, 后再次重新卷曲, 再断掉, 重复这样的过程, 从而引起摩擦加载上下波动。根据图 7 还可得出, Cr、CrSnAl 膜层平均切削摩擦载荷分别为 1000、1100 g, 由公式 (1) 可得出, Cr、CrSnAl 膜层平均膜基界面结合强度分别为 41.7、45.8 MPa, 添加 SnAl 的 Cr 膜层界面结合强度提升了 9.8%。膜层界面处 Cr 原子形核结晶的不规则生长会导致应力分布不均, 进而影响涂层膜基结合性能。Sn/Al 元素的添加使膜层中存在 Sn、Al 簇团, 并弥散分布在界面处, 促进 Cr 晶粒错配造成的晶粒间应力达到临界水平之前, 界面处膜层平直生长, 从而减少膜基界面间应力, 增大界面结合强度^[21]。CrSnAl 膜层 600 °C 烧结后, 平均载荷增加至 1250 g, 根据公式 (1) 可以得出, CrSnAl/Zr 界面结合强度为 52.1 MPa, 相较 Cr/Zr 界面结合强度提升了 24.9%。从能量上来看, 膜层界面附着力 (W) 等于膜层与衬底间的界面能减去薄膜剥离后生成的薄膜与衬底的表面能, 用公式^[22-23]表示为:

$$W = \gamma_f + \gamma_s - \gamma_{fs} \quad (2)$$

式中: γ_f 为膜层的表面能; γ_s 为衬底的表面能; γ_{fs} 为膜层与衬底间的界面能。膜层界面附着力可由物质的不同化学键、化学相容性等方面提升。由图 4 可知, 烧结促进膜层生成了 $\text{Al}_{9.83}\text{Zr}_{0.17}$ 、 ZrSn_2 等金属间化合物且加速了 Cr、Sn、Al、Zr 元素间的互扩散, 使膜层界面附着力得到提升, 界面结合强度增大。

3 结论

1) 添加 SnAl 元素后, 膜层中存在低熔点 Sn/Al 相, 在 180 °C 镀膜腔室温度下, 膜层存在奥斯瓦尔多吞并、熔结及原子团的迁移, 相比纯 Cr 涂层, 表面更连续致密, 孔隙等缺陷较少, 膜基界面连接更紧密。

2) 烧结促进 CrSnAl 膜层形成 $\text{Al}_{9.83}\text{Zr}_{0.17}$ 、 ZrSn_2 相, 与基材形成微冶金结合; 且烧结后, 膜层断面出现韧窝形貌, 弯曲唇密度仅为烧结前的 1/2, 具有更好的膜基结合性能。

3) 添加 SnAl 元素及采用烧结处理, 膜层切屑更完整连续, 划痕更平直, 切屑更完整连续, 膜基界面结合强度更高。对比 Cr/Zr 界面结合强度, CrSnAl/Zr 界面结合强度提高了 9.8%, 经 600 °C 烧结后, CrSnAl 膜层界面结合强度相较 Cr/Zr 提升了 24.9%。

参考文献:

- [1] 王峰, 王快社, 马林生, 等. 核级锆及锆合金研究状况及发展前景[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 107-110.
WANG Feng, WANG Kuai-she, MA Lin-sheng, et al. Current situation and development trend of zirconium and zirconium alloys[J]. Ordnance material science and engineering, 2012, 35(1): 107-110.
- [2] 杨红艳, 张瑞谦, 彭小明, 等. 锆合金包壳表面涂层研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 69-77.
YANG Hong-yan, ZHANG Rui-qian, PENG Xiao-ming, et al. Research progress regarding surface coating of zirconium alloy cladding[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 69-77.
- [3] TANG C, STUEBER M, SEIFERT H J, et al. Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-tolerant fuel (ATF) claddings[J]. Corrosion reviews, 2017, 35(3): 141-165.
- [4] 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 & coatings, 2017, 46(6): 192-196.
- [5] 陈科培, 陈志勇, 刘丹, 等. 锆合金表面激光熔覆 TiN/ZrN 复合陶瓷涂层的研究[J]. 应用激光, 2015, 35(2): 166-169.
CHEN Ke-pei, CHEN Zhi-yong, LIU Dan, et al. Studying on laser cladding TiN/ZrN composite ceramic layer on

- zirconium alloy[J]. Applide laser, 2015, 35(2): 166-169.
- [6] 吴亚文, 贺秀杰, 张继龙, 等. 钎合金表面 Cr/Al 基耐高温涂层及氧化行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 34-41.
WU Ya-wen, HE Xiu-jie, ZHANG Ji-long, et al. Cr/Al-based high-temperature coatings on zirconium alloy and oxidation behavior[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 34-41.
- [7] 严艳芹, 邱长军, 黄鹤, 等. 热处理温度对 Cr/Al 涂层组织结构及性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 78-83.
YAN Y Y, QIU C J, HUANG H. et al. Effect of heat treatment temperature on microstructure and properties of Cr/Al coatings[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 78-83.
- [8] GARNER A, HU J, HARTE A, et al. The effect of Sn concentration on oxide texture and microstructure formation in zirconium alloys[J]. Acta materialia, 2015, 99(2-3): 259-272.
- [9] LUKASZKOWICZ K, SONDOR J, KRIZ A, et al. Structure, mechanical properties and corrosion resistance of nanocomposite coatings deposited by PVD technology onto the X6CrNiMoTi17-12-2 and X40CrMoV5-1 steel substrates[J]. Journal of materials science, 2010, 45(6): 1629-1637.
- [10] WU Y P, ZHU S F, ZHANG Y P, et al. The adhesion strength and deuterium permeation property of SiC films synthesized by magnetron sputtering[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(25): 10827-10832.
- [11] WU Y Y, JIANG L J, DI H, et al. Effect of Cr_2O_3 layer on the deuterium permeation properties of $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ composite coating prepared by MOCVD[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(36): 16101-16107.
- [12] CARR J, VASDUEVAMURTHY G, SNEAD L, et al. Investigations of aluminum-doped self-healing zircaloy surfaces in context of accident-tolerant fuel cladding research[J]. Materials engineering and performance, 2016, 25(6): 2347-2355.
- [13] 唐伟忠. 薄膜材料制备原理、技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
TANG W Z. Principle, technology and application of thin film materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [14] 江炳尧, 任琮欣, 郑志宏, 等. 离子束辅助沉积钎薄膜晶粒的择优取向[J]. 中国有色金属学报, 2003(6): 1414-1419.
JIANG B R, REN Z X, ZHENG Z H, et al. Preferred crystal orientation of Hf films prepared by ion beam assisted deposition[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2003(6): 1414-1419.
- [15] KIM H G, KIM I H, JUNG Y I, 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.
- [16] VINCENT P G, BOURGEOIS S, MONERIE Y. Overall elastoplastic behavior of anisotropic metal-matrix composites reinforced by aligned inclusions. Application to hydrided and irradiated zircaloy-4 cladding tubes[J]. Mechanics of materials, 2010, 42(2): 175-188.
- [17] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
ZHONG Q P, ZHAO Z H. Fracture theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [18] 王雪萌, 张思倩, 袁子尧, 等. 时效处理对 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 合金力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017(6): 409-414.
WANG X M, ZHANG S Q, YUAN Z Y, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr alloy[J]. Chinese journal of materials research, 2017(6): 409-414.
- [19] 陈程, 尹海清, 曲选辉. 高纯钼板断口形貌和组织分析[J]. 稀有金属, 2007, 31(1): 10-13.
CHEN C, YIN H Q, QU X H. Fracture and structure analysis of pure molybdenum plate[J]. Chinese journal of rare metals, 2007, 31(1): 10-13.
- [20] AUDIGIE P, PUT A V, MURAKAMI H, et al. Chromium and iridium effects on the short-term interdiffusion behaviour between Pt rich γ - γ' bond-coatings and a Ni-Al-Cr alloy[J]. Surface and coatings technology, 2017, 309(15): 258-265.
- [21] 张元其, 王玲, 杜学铭, 等. 泡沫 Ni/Sn 复合钎料超声波钎焊 Al_2O_3 陶瓷接头组织及力学性能研究[J]. 焊接技术, 2017, 46(5): 43-46.
ZAHNF Y Q, WANG L, DU X M, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 ceramic joints by ultrasonic brazing of foam Ni/Sn composites[J]. Welding technology, 2017, 46(5): 43-46.
- [22] 马奔驰. Sn/Al 界面 Al_2O_3 过渡层形成机理及对界面结合强度的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
MA B C. Forming mechanism of Al_2O_3 intermediate layer at Sn/Al interface and its effect on interfacial bonding strength[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [23] 罗广南, 李文治. 离子能量对薄膜附着力及界面原子混合的影响[J]. 薄膜科学与技术, 1994(1): 41-46.
LUO G N, LI W Z. Influence of ion energy on adhesion of thin films and interface atomic mixing[J]. Membrane science and technology, 1994(1): 41-46.