

锆合金表面涂层耐高温高压动水腐蚀性能的研究

杨振¹, 樊湘芳¹, 邱长军¹, 李涛¹, 刘艳红², 王晓婧², 李怀林²

(1.南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2.国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: **目的** 提高锆合金在高温高压环境中耐动水腐蚀性能。**方法** 利用多弧离子镀技术 (MAIP) 在 Zr-4 合金表面分别制备了 Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 复合涂层, 利用磁控溅射技术 (MS) 在 Zr-4 合金表面制备了 TiN 涂层。通过堆外高压釜实验, 对比研究了三种不同涂层的耐高温高压动水腐蚀性能, 利用自动划痕仪检测膜基结合力, 利用 XRD 分析涂层的物相成分, 利用 SEM 观察涂层腐蚀前后的微观形貌, 利用 EDS 对涂层元素种类与含量进行分析。**结果** 多弧离子镀技术制备的 Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 涂层致密度较高, 但表面存在少量大颗粒与微孔洞; 磁控溅射技术制备的 TiN 涂层均匀平整, 表面大颗粒较少。 Al_2O_3 涂层、TiN 涂层和 Cr/TiAlN 涂层可承受的临界载荷分别为 26、16、26.5 N。在实验条件下, Cr/TiAlN 涂层和 TiN 涂层表面均发生了剥落或腐蚀现象, 且这两种试样表面均检测出大量的 ZrO_2 , 而 Al_2O_3 涂层几乎未被破坏, 基体得到了充分防护。**结论** 利用多弧离子镀技术在 Zr-4 合金表面制备的 Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 涂层的膜基结合力较高, 利用磁控溅射技术制备的 TiN 涂层的膜基结合性能较差, 其中 Al_2O_3 涂层具备良好的耐腐蚀性能, 在高温高压动水腐蚀环境中能够有效地保护锆合金基体。

关键词: Zr-4 合金; Al_2O_3 涂层; Cr/TiAlN 涂层; TiN 涂层; 膜基结合力; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0204-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.022

High Temperature and High Pressure Hydrodynamic Corrosion of Zirconium Alloy Surface Coating

YANG Zhen¹, FAN Xiang-fang¹, QIU Chang-jun¹, LI Tao¹,
LIU Yan-hong², WANG Xiao-jing², LI Huai-lin²

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

2.State Power Investment Corporation Science and Technology Research Institute Company Limited, Beijing 102209, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the resistance to dynamic water corrosion of zirconium alloy in high temperature and high pressure environment. Oxide-coated Al_2O_3 and composite coating Cr/TiAlN were prepared on the surface of Zr-4 alloy by multi-arc ion plating (MAIP). Nitride coating TiN was prepared on the surface of Zr-4 alloy by magnetron sputtering (MS). The high temperature and high pressure hydrodynamic corrosion performance of three different coatings were compared by

收稿日期: 2019-03-23; 修订日期: 2019-06-23

Received: 2019-03-23; Revised: 2019-06-23

基金项目: 国家科技重大专项子课题 (2015ZX06004001-002); 湖南省教育厅重点实验室创新平台开放基金 (16K076)

Fund: National Science and Technology Major Special Sub-project (2015ZX06004001-002); Hunan Provincial Department of Education Key Laboratory Innovation Platform Open Fund (16K076)

作者简介: 杨振 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为金属材料表面改性。

Biography: YANG Zhen (1993—), Male, Master, Research focus: surface modification of metal materials.

通讯作者: 樊湘芳 (1963—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为金属材料表面改性。邮箱: hefanyibang@163.com

Corresponding author: FAN Xiang-fang (1963—), Female, Master, Professor, Research focus: surface modification of metal materials. E-mail: hefanyibang@163.com

autoclave experiments. The adhesion of the film base was detected by automatic scratch tester. The phase composition of the coating was analyzed by XRD. The microstructure of the coating before and after corrosion was observed by SEM. The type and content of the coating elements were analyzed by EDS. The Al_2O_3 coating and Cr/TiAlN coating prepared by multi-arc ion plating technology had higher density, but there were some small amount of large particles and micropores on the surface. The TiN coating prepared by magnetron sputtering technology was even and flat, and the surface had small particles. The critical loads that the Al_2O_3 coating, TiN coating, and Cr/TiAlN coating could withstand are 26 N, 16 N, and 26.5 N, respectively. Under the experimental conditions, the surface of Cr/TiAlN coating and TiN coating peeled off or corroded, and a large amount of ZrO_2 was detected on both surfaces. Al_2O_3 coating was almost unbroken and the substrate was fully protected. The adhesion of oxide coating Al_2O_3 and composite coating Cr/TiAlN film prepared on the surface of Zr-4 alloy by multi-arc ion plating technology is high, while nitride coating TiN film base prepared by magnetron sputtering technology has poor bonding properties, and the Al_2O_3 coating has good corrosion resistance and can effectively protect the zirconium alloy matrix in the high temperature and high pressure hydrodynamic corrosion environment.

KEY WORDS: Zr-4 alloy; Al_2O_3 coating; Cr/TiAlN coating; TiN coating; film-based bonding force; corrosion resistance

核能作为世界上公认的清洁能源，具有高效、安全和经济等特点，是缓解当前水资源和煤电短缺的重要资源。锆合金因其热中子吸收截面小、耐腐蚀性能优良、同 UO_2 相容性好等优点，而被用为核燃料包壳和堆芯结构材料。近年来，随着反应堆中燃料燃耗加深及运行条件的变化，人们对燃料元件、包壳材料的要求日益增高，已有的 Zr-4 合金已经不能满足需求，这就要求开发抗腐蚀性能比 Zr-4 合金更好的锆合金^[1-3]。目前改善锆合金耐蚀性能的主要途径有：表面激光处理、改变元素成分和比例、离子注入及表面涂层技术^[4]。表面激光处理可在基材和膜层间形成致密的保护层，但是在制备过程中涂层易产生裂纹。由于不同合金元素对于处在不同介质中的锆合金的影响不同，所以若要改变合金元素的成分和比例，就必须考虑合金元素的协同和相互作用^[5]。元素种类及注入量的不同，会使锆合金表面产生致密性不均匀的氧化膜，也可能会产生无保护作用的 ZrO_2 ，导致发生点状腐蚀^[6]。多弧离子镀（Multi-arc ion plating, MAIP）技术具有绕射性好、沉积速度快且靶材离子化率高等优点^[7-8]。磁控溅射（Magnetron sputtering, MS）技术具有镀膜温度低、工件变形小、涂层表面大颗粒较少等优点^[9]。

关于锆合金的电化学腐蚀性能已有研究，至于 Zr-4 合金的耐高温高压动水腐蚀性能，文献鲜有报道。本实验利用多弧离子镀技术在 Zr-4 合金表面分别制备 Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 涂层，利用磁控溅射技术在 Zr-4 合金表面制备 TiN 涂层，采用多种分析手段研究不同涂层的耐高温高压动水腐蚀性能，以期探索锆合金耐蚀性、延长核反应堆包壳材料的使用寿命提供实验方法和依据。

1 实验材料与方法

实验基材为 Zr-4 合金，化学成分（以质量分数计）为：98%Zr，1.2%~1.7%Sn，0.18%~0.24%Fe，0.07%~0.13%Cr。利用线切割将其加工成 20 mm×20 mm×5 mm 的块状样品，经砂纸逐级打磨、镜面抛光后，放在乙醇溶液中，用 KQ-500E 超声波清洗器清洗 15 min。实验所用设备为国产 TSU-650 型多功能镀膜机，镀膜之前抽真空至 4.0×10^{-3} Pa，多弧离子镀薄膜沉积工艺参数见表 1。直流磁控溅射 TiN 涂层的工艺参数为：镀膜偏压-100 V，占空比 50%，氮气流量 30 mL/min，氩气流量 50 mL/min，镀膜时间 240 min，温度 330 ℃，厚度 13.9 μm。

表 1 镀膜的工艺参数
Tab.1 Coating process parameters

Coating type	Base bias/V	Duty cycle/%	Multi-arc current/A	Argon flow/ (mL·min ⁻¹)	Coating time/min	Temperature/℃	Thickness/μm
Al_2O_3	-200	50	60	100	240	330	13.9
Cr	-200	50	65	110	240	330	5.4
TiAlN	-100	50	60	100	120	260	8.5

反应堆的冷却介质是以一定速度流动着的高温高压水，材料实际上同时受到温度、压力、冲刷、辐照等多种因素的影响，因此动水腐蚀比静水腐蚀（除

辐照外）更接近于实际工况^[10-12]，故本实验在高温高压动力水腐蚀试验系统中进行。由于铂的化学性质极其稳定，不溶于强酸强碱溶液，所以采用细铂丝将三

种试样分别固定在支架上,置于 FCZ10-20/370 升降式反应釜中;为进一步降低电偶腐蚀的影响,实验所用介质为电阻率极大的去离子高纯水,流速 3.5 m/s,比电阻大于 $500\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 。当氧含量低于 $5\text{ }\mu\text{g/L}$ 时,开始加压升温,温度 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 12 MPa ,氢含量为 2.6 mg/L ,pH 值为 6~7,氮含量小于 0.1 mg/L ,腐蚀时间 15 d,游离氧通过升温过程中多次放气排除。试样采用精度为 $0.000\text{ }01\text{ g}$ 的 ES1035A 电子天平称量。

采用 WS-2005 自动划痕仪对样品的膜基结合性能作出测评,负载 $0\sim 50\text{ N}$,速率 50 N/m ,划痕长度 4 mm ,运行方式动态负载,单向划痕。利用 TESCANMIRA3LMU 型扫描电镜 (SEM) 及 OXFORD X-Max Extreme 能谱仪 (EDS) 分析涂层的微观形貌和化学成分。利用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对涂层的物相组成进行分析,X 射线管 Cu 靶,波长 0.154 nm ,

工作高压 35 V ,工作电流 25 V ,扫描方式为连续扫描,扫描速度 $4\text{ }(^{\circ})/\text{min}$,扫描范围 $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描步长 0.02° 。

2 结果与分析

2.1 涂层的表面形貌

根据图 1a 和图 1b 显示, Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 涂层致密度较高,但表面出现了一些大颗粒和微孔洞,并伴随少量白色液滴存在,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,在高速粒子轰击下,熔融的金属液滴飞溅并沉积在基体上,凝固呈颗粒状,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^[13-14]。观察图 1c 可看出, TiN 涂层表面均匀平整,大颗粒数量极少,无明显缺陷。

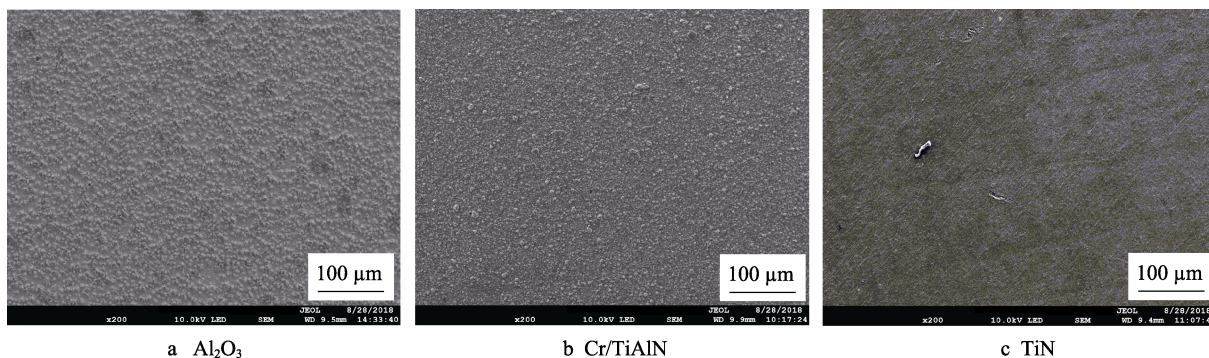


图 1 三种涂层的 SEM 形貌
Fig.1 SEM topography of three coatings

2.2 膜基结合力

图 2 为膜基结合力测试结果。由图 2a 可知, Al_2O_3 膜层在进行划痕实验时,声发射信号不明显,故通过摩擦力信号和涂层划痕相结合判断膜基结合力,当载荷为 26 N 时,摩擦力曲线发生突变并且伴随着涂层剥落,所以初步判断其临界载荷为 26 N 。 Al_2O_3 涂层中的 Al 具有良好的导热性,能够驱散金刚石压头在加载时的部分热量,降低了热应力,从而提高了膜基

结合性能。观察图 2b 并结合涂层剥落情况可知, 控制溅射 TiN 涂层的膜基结合力为 16 N ,膜基结合性能较差。观察图 2c,结合摩擦力曲线和声发射信号判断 Cr/TiAlN 涂层的临界载荷为 26.5 N ,这是由于 Cr/TiAlN 涂层除了含有 Al 之外, Cr 层的细小晶粒也在组织结构上发挥着过渡作用,既可以使膜不易从衬底剥落,又能有效地缓解铝合金与含 Al 层之间热膨胀系数差异对膜基结合性能的影响^[15-16]。

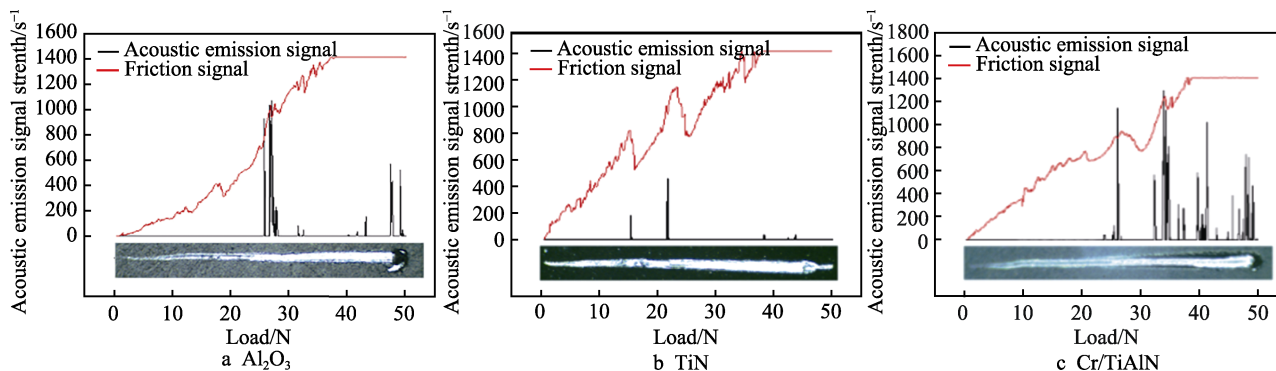


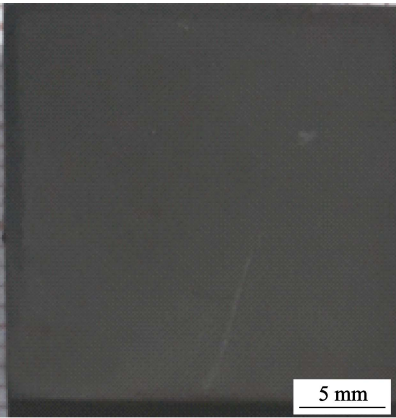
图 2 Al_2O_3 、TiN、Cr/TiAlN 涂层声发射图谱和切向摩擦曲线

Fig.2 Acoustic emission pattern and tangential friction curve of Al_2O_3 coating (a), TiN coating (b) and Cr/TiAlN coating (c)

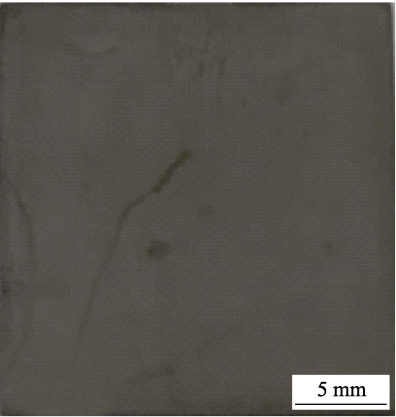
2.3 耐高温高压动水腐蚀性能

将试样置于反应釜中 15 d 后取出，经超声波清洗并烘干，实验前后试样的宏观形貌如图 3—5 所示，质量变化见表 2。经过对比观察发现，图 3 中的 Al_2O_3 涂层无脱落现象，且未发生明显腐蚀现象，涂层表面无明

显变化。从图 4 可看出，TiN 涂层镀膜前表面呈金黄色，腐蚀后变为深蓝色，试样失去了原有的金属光泽，被严重腐蚀破坏。图 5 中的 Cr/TiAlN 涂层部分脱落，且局部区域被腐蚀导致变色。综上所述，可初步分析推测， Al_2O_3 涂层耐高温高压动水腐蚀性能较好。

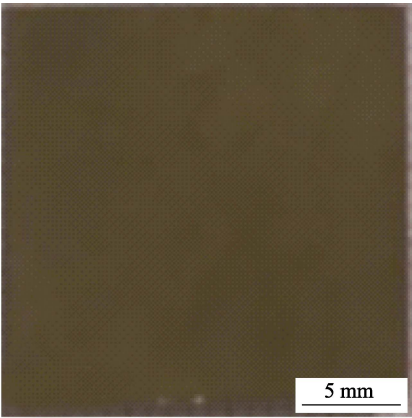


a 腐蚀前

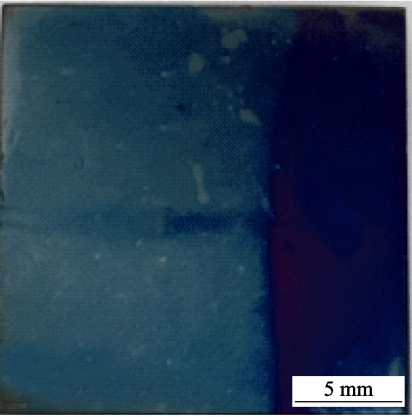


b 腐蚀后

图 3 Al_2O_3 涂层宏观形貌对比
Fig.3 Comparison of macroscopic morphology of Al_2O_3 coating:
a) before corrosion, b) after corrosion

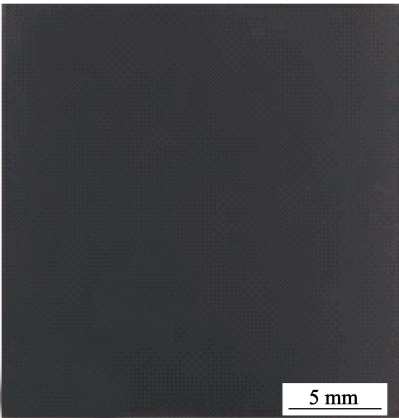


a 腐蚀前

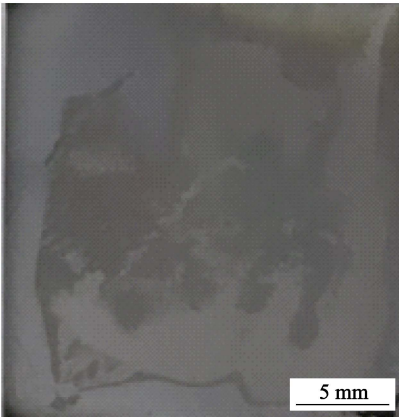


b 腐蚀后

图 4 TiN 涂层宏观形貌对比
Fig.4 Comparison of macroscopic morphology of TiN coating:
a) before corrosion, b) after corrosion



a 腐蚀前



b 腐蚀后

图 5 Cr/TiAlN 涂层宏观形貌对比
Fig.5 Comparison of macroscopic morphology of Cr/TiAlN coating:
a) before corrosion, b) after corrosion

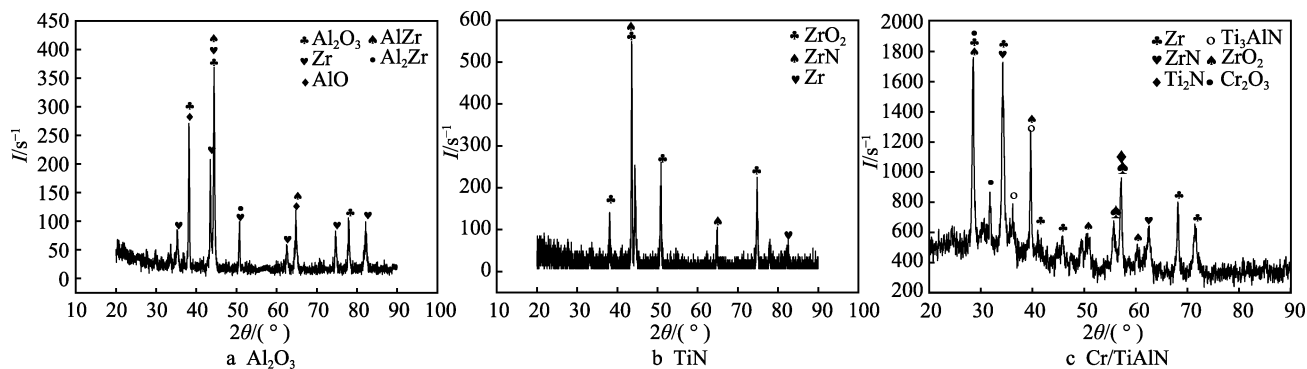
表 2 试样质量变化
Tab.2 Change of sample quality

Coating type	Original quality/g	15 d quality/g	Weight gain/g	Combination status
Al_2O_3	13.182 80	13.181 56	-0.001 24	Not falling off
TiN	12.196 37	12.196 56	0.000 19	Completely corroded
Cr+ TiAlN	12.433 65	12.427 57	-0.006 08	Partial shedding, partial corroded

2.4 涂层的物相组成

图 6 是经过高温高压动水腐蚀后三种涂层的 XRD 图谱。由图 6a 可以看出， Al_2O_3 涂层试样除了 Al_2O_3 的存在，还有 AlZr 、 Al_2Zr 相生成，Zr 衍射峰的强度也很高。这是由于涂层较薄，X 射线比较容易透过表层达到铝合金基体； Al_2O_3 保护膜致密连续，性

能稳定，具有优异的抗高温氧化性，有效地防止了基体被侵蚀^[17]。观察图 6b 可知，TiN 涂层试样表面有大量 ZrO_2 、 ZrN 相生成，Ti 相已经无法检测到，说明在实验条件下，TiN 涂层本身结构已被破坏，无法有效地保护基体。观察图 6c，虽然 Cr/TiAlN 复合涂层中 Cr_2O_3 的特征衍射峰较强，可以起到阻止部分 O

图6 水腐蚀后的 Al_2O_3 、TiN、Cr/TiAlN 涂层的 XRD 图谱Fig.6 XRD patterns of Al_2O_3 coating (a), TiN coating (b) and Cr/TiAlN coating (c) after water corrosion

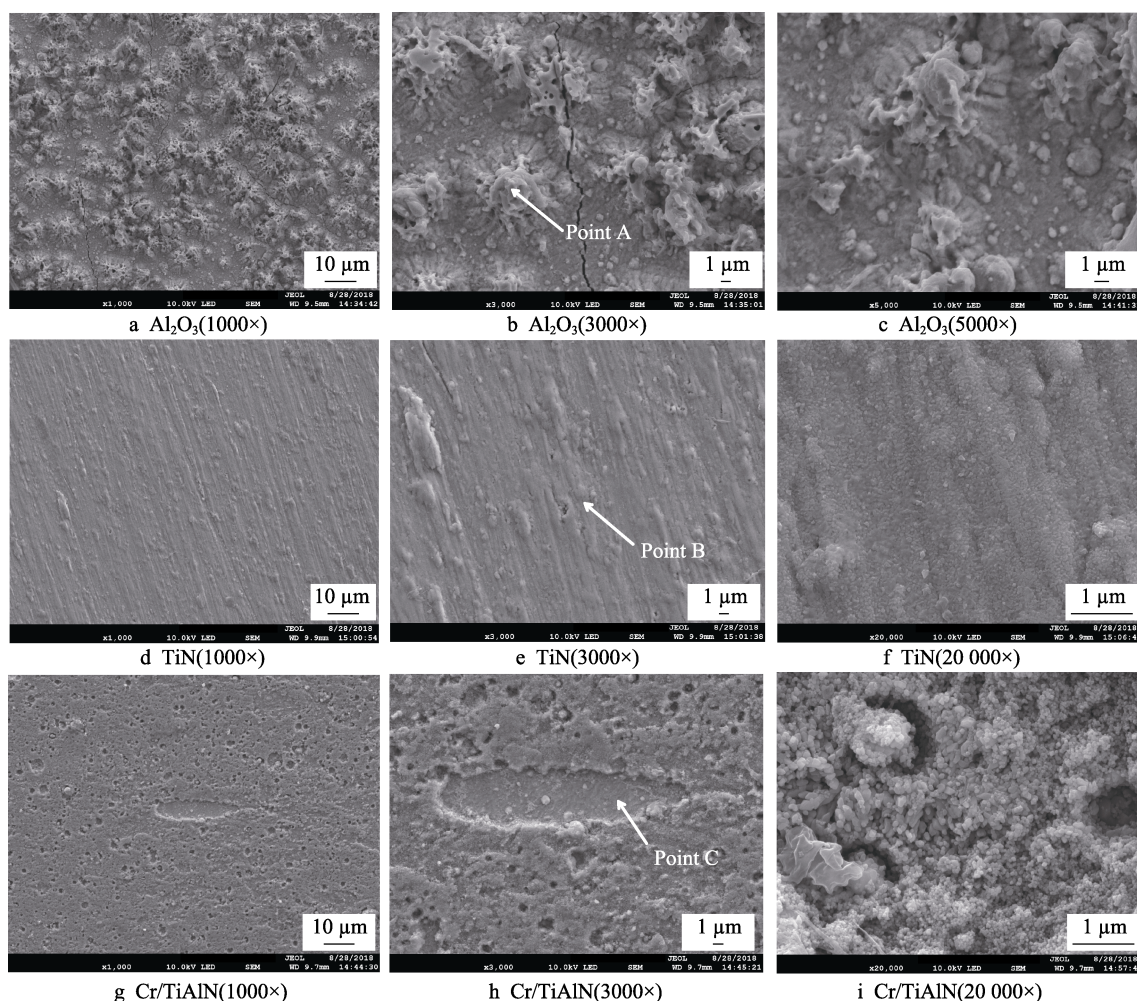
渗入基体的作用, 但仍有大量 ZrO_2 相生成, 表明 Cr/TiAlN 涂层部分区域已被腐蚀, 失去了防护能力。

2.5 腐蚀后的表面形貌分析

图7是三种涂层不同倍数下的表面微观形貌。对于 Al_2O_3 涂层试样, Al_2O_3 涂层组织依旧较为致密且分布均匀(图7a), 涂层局部出现一些微裂纹(图7b), 涂层表面呈现大量图7c所示的簇状结构, 除此之外

涂层并无其他缺陷, 未遭明显腐蚀破坏。图7d中的 TiN 涂层与镀膜初期相比, 并未出现明显变化, 图7f显示涂层表面分布着大量颗粒状的小晶粒。由图7g不难看出, Cr/TiAlN 涂层表面出现了大量的蚀坑, 观察图7i发现, 蚀坑内部依然存在大小不一的孔洞, 这些缺陷的存在会导致相和晶粒内外氮含量分布不均, 从而使涂层被加速腐蚀。

图8是图7中A点(Al_2O_3 涂层)、B点(TiN涂层)

图7 水腐蚀后的 Al_2O_3 、TiN、Cr/TiAlN 涂层微观 SEM 图像Fig.7 SEM image of Al_2O_3 coating (a—c), TiN coating (d—f) and Cr/TiAlN coating (g—i) after water corrosion

和 C 点 (Cr/TiAlN 涂层) 的能谱。图 7b 显示,除了少量的微裂纹,膜层表面呈现出一些簇状结构,对该组织的成分进行分析,根据图 8a 及表 3 可知,该组织主要由 Al 和 O 组成 (Pt 的存在是由于实验初期固定试样时使用了铂丝),再结合图 6a 分析,该簇状物很有可能就是 Al_2O_3 ,由于热稳定性高不易被腐蚀,在实验条件下仍未分解,对基体进行了有效保护。此外,随着腐蚀时间的增加,铝合金基体与 Al_2O_3 涂层膜基结合区域的 Al 含量也不相同,根据图 6a 可知,Al 与 Zr 可以形成多种共晶化合物,其中一些共晶化合物 (如 Zr-Al 相) 能大幅提高铝合金的耐高温氧化腐蚀性能^[18]。通过图 8b 及表 4 可知,原本镀 TiN 涂层的铝合金表面只有极少量的 N、Ti,剩下元素为大量的 Zr 和 O,这表明涂层本身已被严重腐蚀破坏,导致剥落,从而造成基体裸露;再结合图 6b 的结果分析,失去涂层防护的基体遭受氧化, O 通过 TiN 涂层的缺陷和孔隙进入基体,造成基体氧化,形成内氧化层^[19],由此可推断图 7f 中试样表面大量的小晶粒极有可能是基体的氧化产物 ZrO_2 。对比图 1b 和图 7g 发现,腐蚀之前 Cr/TiAlN

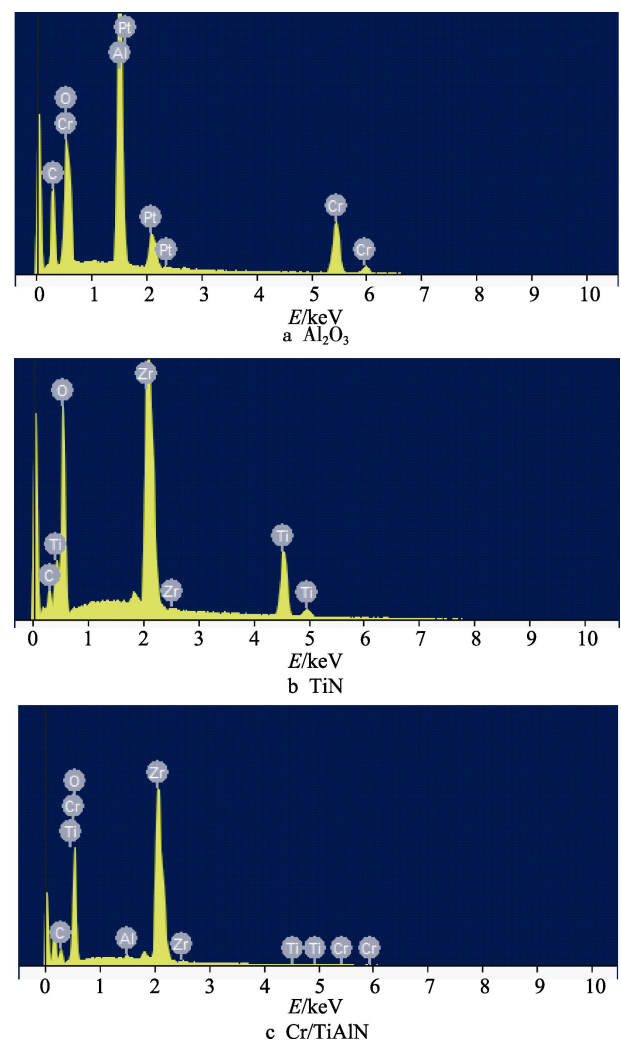


图 8 Al_2O_3 、TiN 和 Cr/TiAlN 涂层的能谱
Fig.8 Energy spectrum of Al_2O_3 coating (a), TiN coating (b) and Cr/TiAlN coating (c)

涂层表面存在大量大小不一的颗粒和微孔洞,而腐蚀之后试样表面出现大量蚀坑,根据图 8c、表 5 及 XRD 结果可以推断, Cr/TiAlN 涂层的腐蚀极有可能发生在这些颗粒和微孔洞中。由于多弧离子镀制备 Cr/TiAlN 涂层过程中,靶材沉积到基体表面而形成的颗粒很难避免,这些颗粒大小不一且分布位置不均匀,部分颗粒在沉积过程中受到离子轰击而从涂层中剥落,导致在表面形成了微孔洞。涂层中的颗粒是靶材沉积时液滴溅射到基材表面而形成的沉积物,所以这些颗粒也含有大量的金属相 Ti 和 Al,而涂层中含有大量的陶瓷相 TiAlN,两者间的腐蚀电位不同,极易在动水腐蚀环境中形成微电池,从而加速涂层腐蚀^[20]。

表 3 Al_2O_3 涂层表面元素比例					
Tab.3 Surface element ratio of Al_2O_3 coating					
Element	C K	Cr K	O K	Al K	Pt
Weight%	12.88	5.15	18.12	55.61	8.24
Atomic%	33.75	10.13	21.14	33.66	1.33

表 4 TiN 涂层表面元素比例					
Tab.4 Surface element ratio of TiN coating					
Element	C K	N K	O K	Ti K	Zr K
Weight%	4.89	4.70	34.39	3.04	52.98
Atomic%	15.07	12.40	33.27	17.79	21.48

表 5 Cr/TiAlN 涂层表面元素比例					
Tab.5 Surface element ratio of Cr/TiAlN coating					
Element	C K	Al K	O K	Ti K	Zr K
Weight%	8.20	0.25	31.79	0.34	60.26
Atomic%	20.50	0.28	59.66	0.21	19.84

3 结论

- 1) 经高温高压动水腐蚀 15 d 后, TiN 涂层遭到严重腐蚀破坏, 试样表面出现大量基体氧化产物 ZrO_2 , 并形成内氧化层; Cr/TiAlN 涂层表面出现大量蚀坑与孔洞, 涂层部分脱落; Al_2O_3 涂层几乎无明显变化, 耐腐蚀性能较好, 有效地保护了铝合金基体。
- 2) 划痕实验结果表明, 多弧离子镀 Al_2O_3 涂层和 Cr/TiAlN 涂层膜基结合力较高, 分别为 26 N 和 26.5 N, 而磁控溅射制备的 TiN 涂层膜基结合力较低, 仅为 16 N。
- 3) 采用多弧离子镀技术在 Zr-4 合金表面沉积 Al_2O_3 涂层, 可以有效地改善铝合金的耐腐蚀性能。但长期在高温腐蚀环境中服役, 会使涂层中的 Al 向基体扩散而逐渐贫化, 导致耐腐蚀能力下降, 涂层的热稳定性也随之降低, 表层出现少量微裂纹。

参考文献:

[1] 杨忠波, 赵文金. 铝合金耐腐蚀性能及氧化特性概述

- [J]. 材料导报, 2010, 24(9): 120-124.
YANG Zhong-bo, ZHAO Wen-jin. Review of corrosion and oxide characterization for Zr alloys[J]. Material guide, 2010, 24(9): 120-124.
- [2] 杨波, 李谋成, 姚美意, 等. 高温高压水环境中锆合金腐蚀的原位阻抗谱特征[J]. 金属学报, 2010, 46(8): 946-950.
YANG Bo, LI Mou-cheng, YAO Mei-yi, et al. In-situ impedance characteristics of zirconium alloy corrosion in high temperature and pressure water environment[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(8): 946-950.
- [3] 赵文金, 周邦新, 苗志. 我国高性能锆合金的发展[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(增刊): 2-9.
ZHAO Wen-jin, ZHOU Bang-xin, MIAO Zhi. Development of Chinese advanced zirconium alloys[J]. Atomic energy science and technology, 2005, 39(Suppl): 2-9.
- [4] 罗扬, 林庆选. 锆合金 R60705 的表面渗氮处理[J]. 金属热处理, 2014, 39(12): 64-66.
LUO Yang, LIN Qing-xuan. Surface nitriding treatment of zirconium alloy R60705[J]. Heat treatment of metals, 2014, 39(12): 64-66.
- [5] 王辉, 王艳丽, 王西涛, 等. 锆合金耐蚀性能影响因素概述[J]. 材料导报, 2013, 27(1): 116-120.
WANG Hui, WANG Yan-li, WANG Xi-tao, et al. Overview of influence factors about corrosion resistance of zirconium alloys[J]. Materials guide, 2013, 27(1): 116-120.
- [6] 周军, 樊湘芳, 丰振东, 等. 锆合金表面 TiAlN 和 TiAlSiN 涂层微观形貌和性能的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45(6): 66-69.
ZHOU Jun, FAN Xiang-fang, FENG Zhen-dong, et al. Research on micromorphology and performance of TiAlN coating and TiAlSiN coating on zirconium alloy surface[J]. Rare metals and cemented carbides, 2017, 45(6): 66-69.
- [7] LEI Shan, WANG Yong-xin, LI Jin-long, et al. Structure and mechanical properties of thick Cr/Cr₂N/CrN multilayer coating deposited by multi-arc ion plating[J]. Science direct, 2015, 25(4): 1135-1143.
- [8] ZHANG Shi-hong, WANG Lei, WANG Qi-min, et al. A superhard CrAl-SiN superlattice coating deposited by a multi-arc ion plating: II. thermal stability and oxidation resistance[J]. Surface & coatings technology, 2013, 214(2): 153-159.
- [9] 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.
- [10] JIANG Xu, LI Zheng-yang, MUNROE P, et al. Role of Cr additions in enhancing wear and oxidation resistance of (Mo_{1-x}Cr_x)Si₂ nanocrystalline films[J]. Ceramic international, 2014, 40(10): 15859-15874.
- [11] 王辉, 黄玉才, 马树春, 等. 新锆合金水侧腐蚀性能研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(7): 88-93.
WANG Hui, HUANG Yu-cai, MA Shu-chun, et al. Study on water-side corrosion of new zirconium-based alloys[J]. Atomic energy science and technology, 2003, 37(7): 88-93.
- [12] YABUUCHI K, KURIBAYASHI Y, NOGAMI S, et al. Evaluation of irradiation hardening of proton irradiated stainless steels by nanoindentation[J]. Journal of nuclear materials, 2014, 446(1-3): 142-147.
- [13] SHIAO Ming-hua, SHIEU Fuh-sheng. A formation mechanism for the macroparticles in arc ion-plated TiN films[J]. Thin solid films, 2001, 386(1): 27-31.
- [14] 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): 51-57.
HUANG He, QIU Chang-jun, CHEN Yong, 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): 51-57.
- [15] 陈灵, 曾德长, 邱万奇, 等. M2 和 H13 钢离子渗氮-电弧镀 TiAlCrN 膜复合技术[J]. 材料热处理学报, 2009(4): 175-179.
CHEN Ling, ZENG De-chang, QIU Wan-qi, et al. M2 and H13 steel ion nitriding-arc plating TiAlCrN film composite technology[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2009(4): 175-179.
- [16] 何迪. Cr₂O₃/Al₂O₃ 阻氢渗透涂层制备与性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014.
HE Di. Preparation and properties of Cr₂O₃/Al₂O₃ hydrogen permeation coatings[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2014.
- [17] 严艳芹, 邱长军, 黄鹤. 锆合金表面耐腐蚀涂层现状[J]. 机械工程师, 2018(2): 6-8.
YAN Yan-qin, QIU Chang-jun, HUANG He. Research status of corrosion resistant coating on zirconium alloy surface[J]. Mechanical engineers, 2018(2): 6-8.
- [18] 郑康培, 刘平, 李伟, 等. AlCrN 硬质涂层材料的研究进展[J]. 材料导报, 2010(17): 44-48.
ZHENG Kang-pei, LIU Ping, LI Wei, et al. Progress in research of AlCrN hard coating materials[J]. Materials guide, 2010(17): 44-48.
- [19] 袁琳, 高原, 张维, 等. 多弧离子镀制备 TiN 涂层的高温抗氧化性能研究[J]. 硬质合金, 2012, 29(1): 15-18.
YUAN Lin, GAO Yuan, ZHANG Wei, et al. Research on high temperature oxidation resistance of TiN coating by multi-arc ion plating[J]. Cemented carbide, 2012, 29(1): 15-18.
- [20] PAN Xiao-long, WANG Shao-peng, LI Zheng-xian, et al. Corrosion resistance of TiAlN coatings deposited by arc ion plating and magnetron sputtering[J]. Hot working technology, 2013, 42(24): 184-186.