

Cr 涂层对 Zr-1Nb 合金包壳微动磨损行为的影响

彭振驯¹, 王占伟¹, 严俊¹, 赵亚欢¹, 梁雪², 刘婷婷¹, 马文慧¹, 任啟森¹,
廖业宏¹, 李坤¹

(1. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518026)

(2. 上海大学 微结构重点实验室, 上海 200444)

摘要: 采用三维白光干涉仪、扫描电子显微镜、能谱仪等表征技术对比研究 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳和 Zr-1Nb 合金包壳与格架在模拟压水堆一回路水环境下的微动磨损行为及损伤机制。结果表明, Cr 涂层显著提高 Zr-1Nb 合金包壳的抗微动磨损性能。此外, 对磨副为刚凸时, Zr-1Nb 合金包壳微动磨损机制以磨粒磨损和剥层磨损为主, 而 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳由于表面硬度较高, 且表面形成具有保护作用的三体层, 其损伤机制以黏着磨损和材料单向转移为主。对磨副为弹簧时, Zr-1Nb 合金包壳微动磨损机制主要为剥层和黏着磨损, Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳主要为磨粒磨损。

关键词: 核燃料包壳; Zr-1Nb 合金; Cr 涂层; 微动磨损

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)09-3419-08

2011 年日本福岛核事故后, 核工业各机构纷纷开展事故容错燃料 (ATF) 研发工作, 旨在研制新型核燃料及包壳材料, 消除或最大限度减缓失水事故条件下的包壳-蒸汽相互作用, 提高反应堆安全裕量。目前, ATF 包壳候选材料主要包括表面改性锆合金^[1-3]、铁基合金^[4, 5]、难熔金属及其合金^[6]、SiC_p/SiC 复合材料^[7, 8]等。其中, 表面改性锆合金中的 Cr 涂层锆合金具备抗高温蒸气氧化能力强、耐腐蚀性能优异、力学性能良好以及技术成熟度高等优点, 被视为最具有工业化应用前景的 ATF 包壳候选材料之一。

在燃料组件服役过程中, 高流速冷却剂的轴向流和横向流作用导致燃料棒产生振动, 从而引发燃料包壳与支撑格架间的微动磨损^[9-11], 加速燃料组件失效。因此, 揭示核燃料包壳微动磨损机制、提高包壳抗微动磨损性能至关重要。然而, 目前 Cr 涂层锆合金包壳的相关研究工作主要集中于包壳制备及显微组织表征、高温蒸气氧化和腐蚀性能评价等方面^[12-14], 而对 Cr 涂层锆合金包壳微动磨损行为的研究鲜有报道。近年来, 法国原子能委员会、法玛通等机构初步研究了 Cr 涂层 Zr-4 和 M5 合金包壳在压水堆一回路水环境中的微动磨损行为, 表明 Cr 涂层能显著降低锆合金包壳的磨损程度^[13, 15], 但该研究并未对 Cr 涂层锆合金包壳的微动磨损机制作出合理解释。

本研究以 Zr-1Nb 合金管为基体, 制备 Cr 涂层

Zr-1Nb 合金包壳, 在模拟压水堆一回路水环境中开展包壳-格架微动磨损试验, 通过对比分析原始包壳和 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳外表面的磨痕三维形貌、二维轮廓及微观形貌等, 研究 Cr 涂层对 Zr-1Nb 合金包壳微动磨损行为的影响及机制, 为建立 Cr 涂层锆合金包壳磨蚀失效准则提供数据支撑。

1 实验

采用外径为 9.5 mm、长度为 130.0 mm 的 Zr-1Nb 合金管为基体, 通过磁控溅射方法制备 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳, 涂层厚度为 15 μm。

微动磨损试验中的对磨副主要包括刚凸和弹簧, 与包壳管分别形成摩擦副。其中, 刚凸材质为 Zr-4 合金, 弹簧材质为 Inconel 718 合金, 2 种材料的化学成分如表 1 所示。

为分析和比较摩擦副材料的硬度, 分别采用显微硬度测试仪 (型号 Buehler, Omniment MHT) 和纳米压痕仪 (型号 KLA, iMicro) 在包壳样品截面和刚凸、

表 1 对磨材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of the grinding material (wt%)

Material	Zr	Sn	Fe	Cr	Ni	Ti	Mo	Nb
Zr-4	Bal.	1.50	0.20	0.10	-	-	-	-
Inconel 718	-	-	16.42	19.92	Bal.	1.13	3.26	5.73

收稿日期: 2021-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (52001192)

作者简介: 彭振驯, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518026, E-mail: pengzhenxun@cgnpc.com.cn

弹簧样品表面进行硬度测试。其中，显微硬度测试采用维氏硬度压头，加载载荷为 1.96 N (0.2 kg)，保压时间为 10 s，而纳米压痕采用深度控制模式，压入深度为 2 μm。为保证数据的准确性，每个试样至少测试 5 个数据点，并取平均值。

采用自主搭建的微动磨损试验机开展试验，示意图如图 1 所示。其中，定位格架为 AFA 3G，其对包壳的初始夹持力为 35 N。此外，刚凸与包壳之间为面接触，而弹簧与包壳之间为线接触。微动磨损试验主要参数列于表 2 中。

磨痕三维形貌和二维轮廓能直观反映材料的微动磨损程度。因此，磨损试验后，采用三维白光干涉形貌仪 (XAM) 表征包壳的磨痕三维形貌和二维轮廓。依据文献[16]，低于摩擦副原始表面的部分为材料损失或磨损体积，高于原始表面的部分为材料转移或磨屑堆积。为研究包壳的微动磨损机制，采用扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS Gemini 500) 表征磨痕的表面微观形貌，并结合能谱仪 (EDS, INCA) 分析磨痕表面化学成分及元素分布。

2 实验结果

2.1 磨蚀前原始包壳和 Cr 涂层包壳的微观形貌

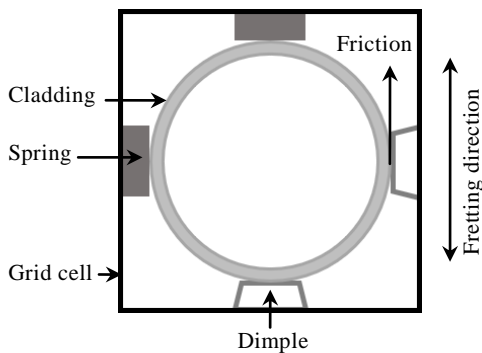


图 1 栅格单元内包壳与刚凸/弹簧微动磨损示意图

Fig.1 Schematic diagram of fretting wear between cladding and dimple/spring in grid cell

表 2 微动磨损试验参数

Table 2 Test parameters of fretting wear

Environment	2.2 μg/g Li + 1200 μg/g B
Temperature/°C	310
Pressure/MPa	15.5
Dissolved oxygen/ $\times 10^{-3}$ μg g ⁻¹	<10
Frequency/Hz	30
Amplitude/μm	±50
Time/h	192

图 2 为原始 Zr-1Nb 合金包壳和 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳表面与截面微观形貌。可知，原始包壳表面较为粗糙，并呈“沟壑”状；Cr 涂层均匀、致密，无裂纹、气孔等缺陷，且涂层-基体界面结合良好。

2.2 摩擦副试样显微硬度与纳米压痕硬度

摩擦副试样显微硬度和纳米压痕硬度如表 3 所示。可知，Cr 涂层的硬度高于 Zr-4 合金的硬度，但低于 Inconel 718 合金；Zr-1Nb 合金硬度与 Zr-4 合金相近，但显著低于 Inconel 718 合金。

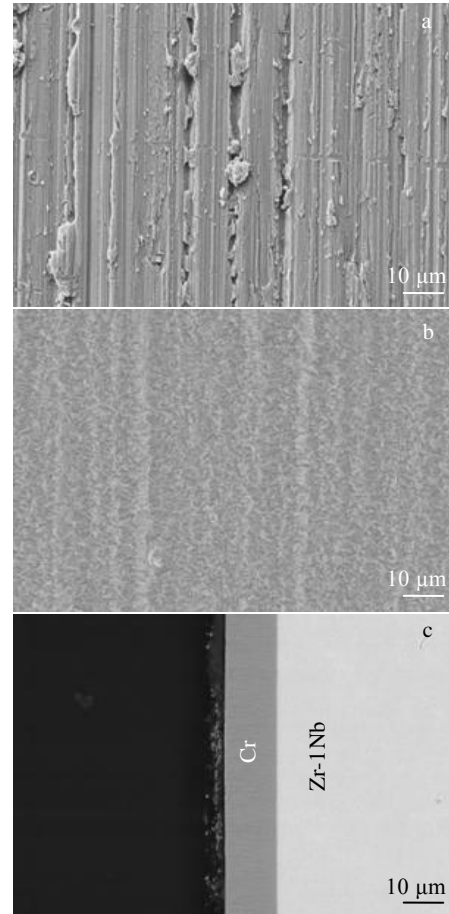


图 2 磨蚀前包壳 SEM 照片

Fig.2 SEM images of unworn claddings: (a) as-received Zr-1Nb; (b) surface of Cr-coated Zr-1Nb; (c) cross section of Cr-coated Zr-1Nb

表 3 摩擦副试样的显微硬度和纳米压痕硬度

Table 3 Microhardness and nanohardness of grinding materials

Sample	Vickers hardness, HV _{0.2} /×9.8 MPa	Nanohardness/GPa
Cr coating	282	2.9
Zr-1Nb	215	2.2
Zr-4	226	-
Inconel 718	495	7.3

2.3 磨痕形貌和磨痕轮廓

在微动磨损过程中, 由于包壳与刚凸和弹簧相互作用, 摩擦副表面在平行于微动方向上产生磨痕, 而在垂直于微动方向上产生压痕, 本研究重点关注摩擦副表面的磨痕。

图 3 为包壳表面磨痕三维形貌。由图 3a、3b 可知, 当对磨副为刚凸时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳磨损明显, 而 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳损伤轻微, 只有少量磨屑碎片黏着于磨痕表面。由图 3c、3d 可知, 当对磨副为弹簧时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳表面出现了明显的磨痕, 损伤较为严重; Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳表面损伤轻微, 磨损深度很小。

图 4 为不同摩擦副中包壳表面磨痕的二维轮廓。当对磨副为刚凸时, Zr-1Nb 合金包壳磨痕形貌为三角形, 其材料损失量较大 (图 4a); Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨痕形貌为扇形且磨痕面积小于原始锆合金包壳, 表面既有材料损失又有材料转移, 但损失量和转移量均较小 (图 4b)。由图 4c、4d 可知, 当对磨副为弹簧时, Zr-1Nb 合金包壳材料损失量和磨屑堆积量较大, 而 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨痕轮廓与未磨蚀表面轮廓趋于一致, 几乎未发生材料损失和转移。

包壳磨痕深度测量结果如图 5 所示, 对磨副为刚

凸时, Zr-1Nb 合金包壳和 Cr 涂层包壳的最大磨痕深度分别为 14.7 和 2.7 μm ; 对磨副为弹簧时, Zr-1Nb 合金包壳和 Cr 涂层包壳的最大磨痕深度分别为 8.4 和 0.5 μm 。这一结果说明, 对磨副为刚凸或者弹簧时, Zr-1Nb 合金包壳的磨痕深度均明显大于 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳, 表明 Cr 涂层抑制了 Zr-1Nb 合金包壳的微动磨损。

2.4 磨痕表面微观形貌与成分分析

对磨副为刚凸时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面微观形貌和 EDS 元素面分布如图 6 所示。Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面形成大面积光滑、致密、均匀的三体层, 仅部分区域发生轻微损伤和少量线状剥落, 且磨痕边缘区域存在少量磨屑堆积, 表明原始 Zr-1Nb 合金包壳微动磨损过程中排屑顺畅。由 EDS 结果可知, 包壳表面基本被 O 和 Zr 元素覆盖, 其中的贫 O、富 Zr/Nb 区可能由试验后拔棒取样造成的三体层剥落所致。此外, 磨痕中心三体层、边缘磨屑堆积区及非磨痕区域的 O 含量相近, 分别为 60.35% (P1)、68.09% (P2) 和 63.55% (P3) (表 4), 表明 Zr-1Nb 合金包壳发生了明显的氧化。综合 XAM、SEM 和 EDS 分析结果可以得出, 当对磨副为刚凸时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳的微动磨损机制主要为磨粒磨损和剥层磨损, 可能伴有一定程度氧化磨损。

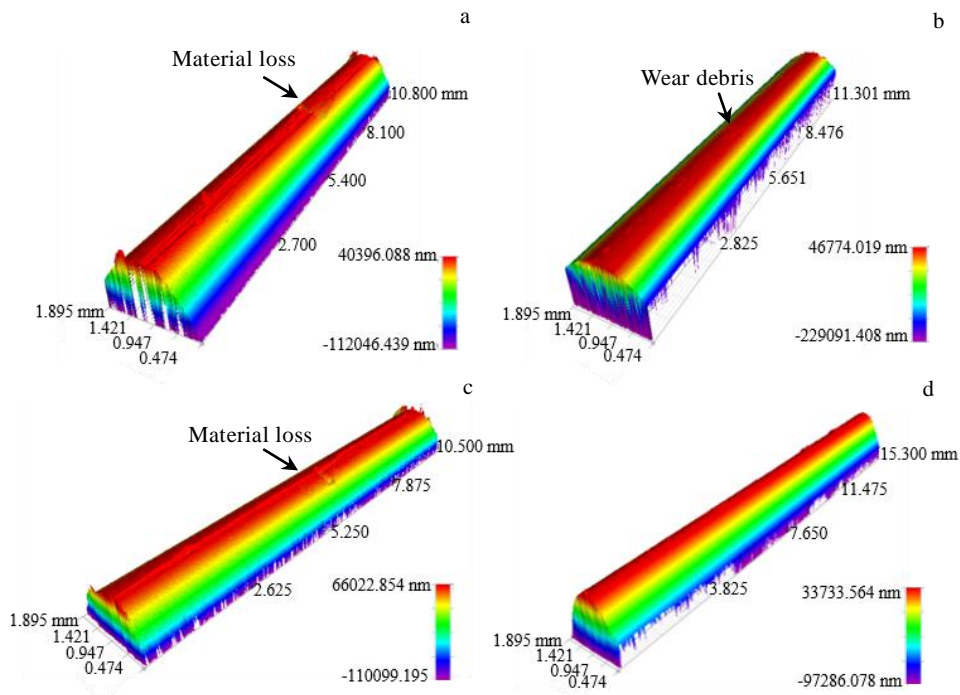


图 3 包壳磨痕三维形貌

Fig.3 3D-profile morphologies of worn scars on claddings: (a) as-received Zr-1Nb with dimple; (b) Cr-coated Zr-1Nb with dimple; (c) as-received Zr-1Nb with spring; (d) Cr-coated Zr-1Nb with spring

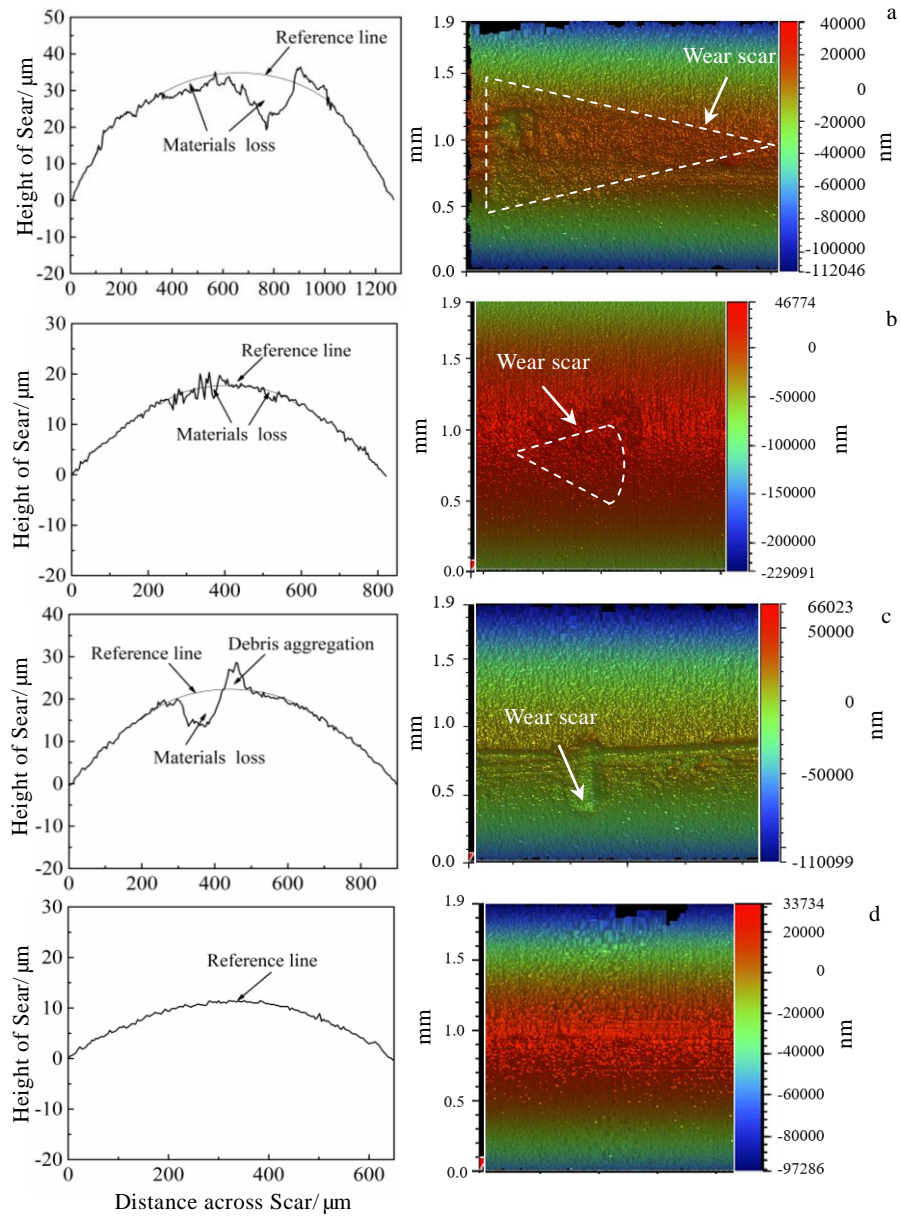


图 4 包壳磨痕二维轮廓

Fig.4 2D contour curves of wear scars on claddings: (a) as-received Zr-1Nb with dimple; (b) Cr-coated Zr-1Nb with dimple; (c) as-received Zr-1Nb with spring; (d) Cr-coated Zr-1Nb with dimple

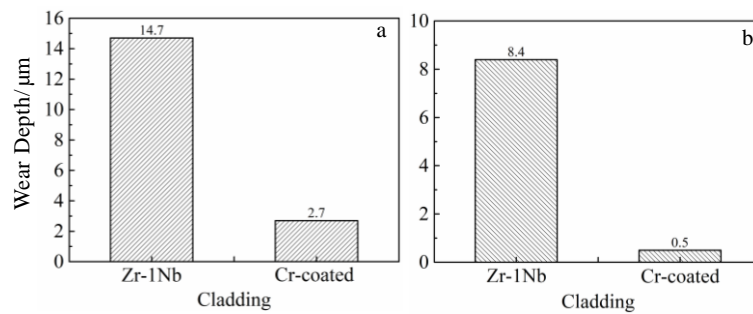


图 5 包壳对刚凸、弹簧的最大磨痕深度

Fig.5 Maximum wear depths for cladding against dimple (a) and spring (b)

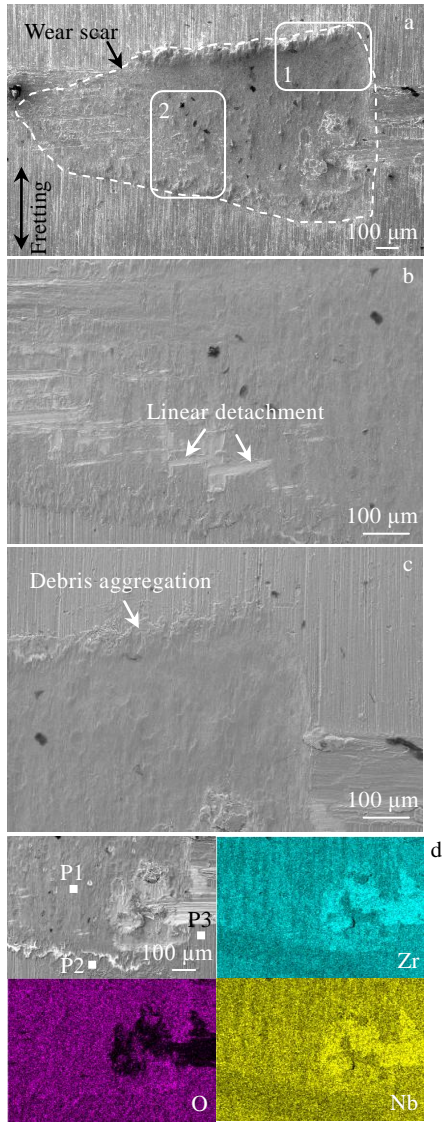


图 6 对磨副为刚凸时 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面形貌和 EDS 元素面分布

Fig.6 Wear scar morphologies (a~c) and EDS element mapping (d) of Zr-1Nb alloy cladding against dimple: (a) overall SEM micrography; magnified micrography of the rectangle 1 (b) and the rectangle 2 (c) marked in Fig.6a

对磨副为刚凸时, Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面微观形貌和 EDS 元素面分布如图 7 所示。可以看出, Cr 涂层包壳磨痕表面覆盖大量块体磨屑, 磨痕整体呈部分滑移特征, 中心区域无明显磨损痕迹。由 EDS 面分布结果(图 7d)可知, Cr 涂层包壳磨痕表面主要含有 Zr 和 O 元素, 而非磨痕区域主要含 Cr 元素, 说明磨痕表面存在 Zr 的氧化物, 这可能是微动磨损过程中磨损材料由刚凸转移到包壳所致。此外, 由 EDS 点

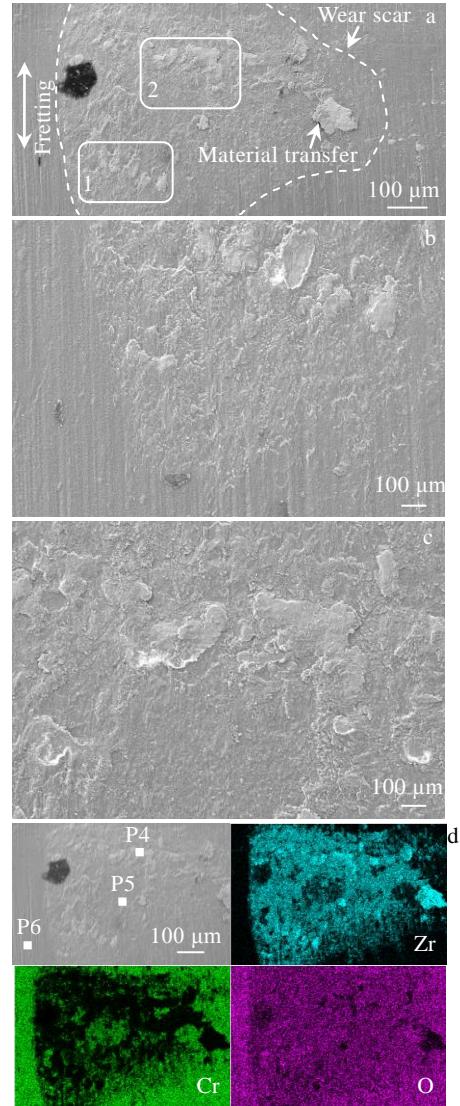


图 7 对磨副为刚凸时 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳表面磨痕形貌和 EDS 元素面分布

Fig.7 Wear scar morphologies (a~c) and EDS element mapping (d) of Cr-coated Zr-1Nb cladding against dimple: (a) overall SEM micrography; magnified micrography of the rectangle 1 (b) and the rectangle 2 (c) marked in Fig.7a

分析结果(表 4)可知, 磨痕表面块体磨屑 O 含量(P4: 65.59%)略高于周围碎屑 O 含量(P5: 47.86%), 但显著高于非磨痕区域 O 含量(P6: 5.01%), 表明非磨痕区域的氧化程度较低, 即 Cr 涂层耐腐蚀性能优良。根据上述结果可以得出, 对磨副为刚凸时, Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳微动磨损机制主要为黏着磨损和材料单向转移。

对磨副为弹簧时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面微观形貌和 EDS 元素面分布如图 8 所示。可知, 原始

锆合金包壳与弹簧之间发生了黏着磨损，往复振动使包壳表面发生较大塑性变形和氧化，从而形成了三体层。此外，磨痕中心区域部分磨屑剥落，而边缘区域磨屑呈层片状堆积，且磨痕部分区域沿微动方向呈现犁沟痕迹，表现出典型的磨粒磨损特征。磨痕表面大部分区域由 O 和 Zr 元素组成，仅局部存在 Ni 元素的富集，表明弹簧磨损材料基本未向包壳发生转移。值得注意的是，磨痕表面未氧化部分可能由试验结束后拔棒造成的磨屑层剥落所致，也可能是因为包壳与弹簧结合过紧导致试验过程中高温水无法渗透至缝隙，接触区材料未发生氧化。根据图 8 所示结果可以得出，当对磨副为弹簧时，原始 Zr-1Nb 合金包壳的磨损机制主要以黏着磨损和剥层磨损为主，局部存在磨粒磨损。

对磨副为弹簧时，Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面形貌和 EDS 元素面分布如图 9 所示。可以看出，Cr 涂层损伤轻微，磨痕表面覆盖一层较薄的磨屑，磨痕中心区域三体层光滑致密，而边缘区域三体层相对疏松，且存在微裂纹。磨痕表面主要含有 O 和 Cr 元素，局部分布 Ni 和 Fe 元素。由于对磨副弹簧 Inconel 718 为 Ni 基合金，因此 Cr 涂层包壳磨痕表面富集的 Ni 元素可能是由弹簧磨损的材料转移至 Cr 涂层包壳磨痕表面所致。根据以上结果可知，当对磨副为弹簧时，Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨损机制主要为磨粒磨损，伴有微量材料转移。

3 分析与讨论

3.1 Cr 涂层对 Zr-1Nb 合金包壳-刚凸微动磨损行为的影响

依据文献[17]，力学性能相似的摩擦副处于相对滑动状态时，磨屑因发生严重塑性变形而破裂后直接从接触面剥离。一般而言，粗糙度较大的接触面会降低裂纹临界剪切应力，导致磨屑加速剥落[17]。因此，原始 Zr-1Nb 合金包壳和刚凸在微动磨损过程中，磨屑易从粗糙度较大的刚凸表面剥落，并直接作用于接触面，造成锆合金包壳氧化膜处于高应力状态而发生严重塑性变形、破裂、剥落和被冲刷。如此周而复始，使包壳表面氧化膜不断被移除-再生，导致材料不断流失，磨痕深度较大，如图 6 所示。三体层对 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面产生磨粒磨损，导致其表面氧化物沿微动方向剥落，加剧磨损。

摩擦副接触面处于相对滑动状态，且局部微凸体界面结合强度高于任一摩擦副材料强度时，黏着节点发生剪切失效，导致材料由一个表面迁移至另一个表面，或脱落形成磨粒，此类磨损统称为黏着磨损[18, 19]。

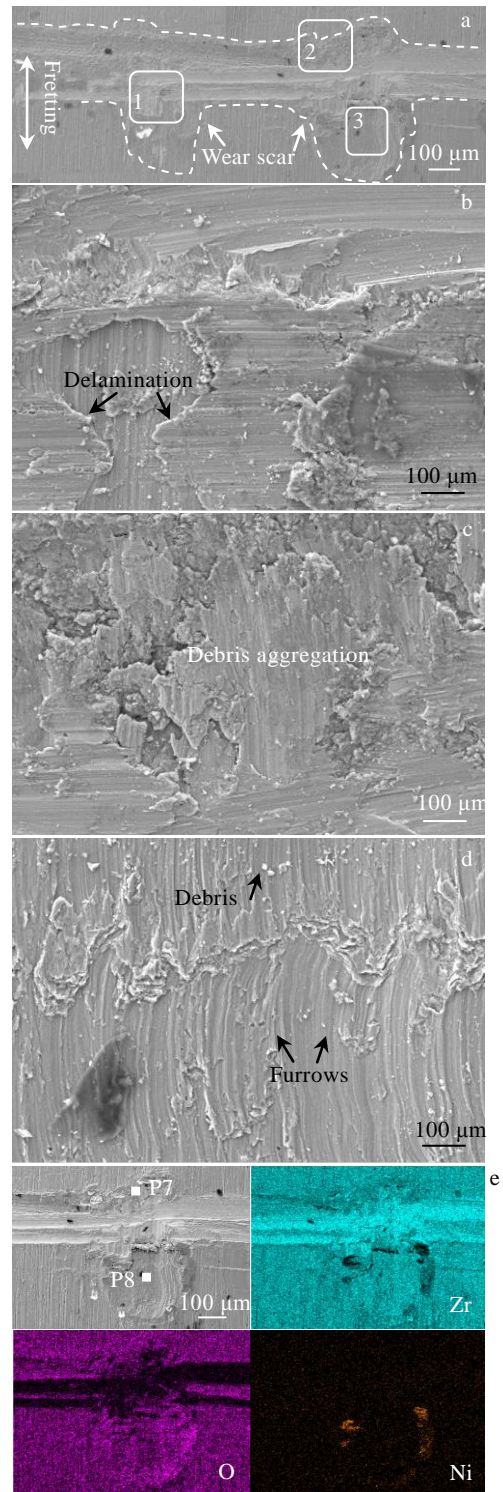


图 8 对磨副为弹簧时 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面形貌和 EDS 元素面分布

Fig.8 Wear scar morphologies (a~d) and EDS element mapping (e) of Zr-1Nb cladding against spring: (a) overall SEM micrography; magnified micrography of the rectangle 1 (b), the rectangle 2 (c), and the rectangle 3 (d) marked in Fig.8a

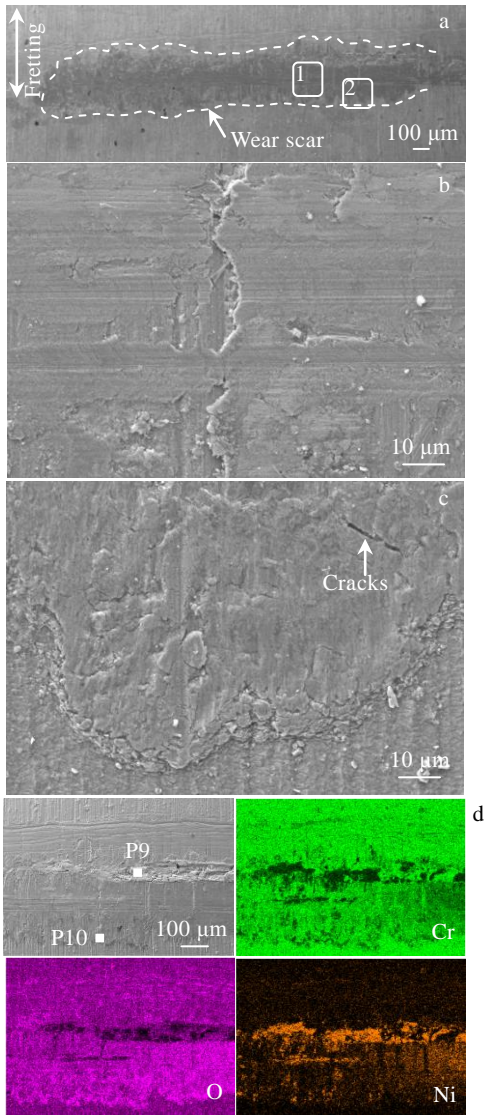


图 9 对磨副为弹簧时 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳磨痕表面形貌和 EDS 元素面分布

Fig.9 Wear scar morphologies (a~c) and EDS element mapping (d) of Cr-coated Zr-1Nb cladding against spring: (a) overall SEM micrography; magnified micrography of the rectangle 1 (b) and the rectangle 2 (c) marked in Fig.9a

Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳-刚凸摩擦副中, 由于 Cr 涂层硬度高于 Zr-4 合金, 依据黏着磨损机制, 刚凸磨损材料将转移至 Cr 涂层磨痕表面, 且不断被碾压、碎化和氧化, 逐渐形成三体层, 如图 7 所示。三体层将摩擦副运行状态转变为氧化膜层间磨损, 调节损伤机制, 避免 Cr 涂层受损。因此, Cr 涂层锆合金包壳微动磨损过程中基本未发生涂层开裂、剥落等现象, 其磨痕深度远小于锆合金包壳。

表 4 图 6d、7d、8e、9d 中包壳表面不同位置点 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of different positions on claddings in Fig.6d, 7d, 8e, 9d (at%)

Position	O	Cr	Zr	Nb	Ni	Fe
P1	60.35	-	38.16	1.04	-	-
P2	68.09	-	31.22	0.70	-	-
P3	63.55	-	35.36	1.09	-	-
P4	65.59	1.97	32.00	0.44	-	-
P5	47.86	32.31	19.49	0.34	-	-
P6	5.01	94.99	-	-	-	-
P7	60.77	0.02	37.96	1.05	0.03	0.17
P8	69.08	-	29.81	0.81	0.11	0.19
P9	5.19	21.55	-	2.41	51.93	18.91
P10	48.09	41.07	-	0.55	7.28	2.61

3.2 Cr 涂层对 Zr-1Nb 合金包壳-弹簧微动磨损行为的影响

原始 Zr-1Nb 合金包壳-弹簧微动磨损过程中, 摩擦副间反复相对运动导致剪切变形不断积累, 锆合金包壳磨痕表面下方材料内部出现位错塞积和应力集中^[10], 微动方向空穴或裂纹易于形成。当剥层裂纹相互连接、扩展至临界尺寸时, 磨屑沿微动方向以片状或块状形式剥落。剥落的磨屑一部分被高温水冲刷、溢出, 一部分堆积于磨痕边缘, 另一部分碎化为磨粒磨屑对磨痕面产生二次微动, 其磨痕形貌表现为犁沟^[20], 如图 8 所示。因此, 剥层裂纹的形成和扩展加剧了锆合金包壳磨损和氧化行为。

Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳-弹簧摩擦副中, Inconel 718 合金硬度高于 Cr 涂层, 但由于 Cr 涂层-基体结合强度良好, Cr 涂层在微动磨损过程中未发生开裂、剥落等现象。相反, 包壳和弹簧磨痕表面均形成了大面积平滑三体层, 摩擦副由“金属-金属”接触转变为三体层间磨损。由于三体层表现出稳定的润滑特性, 从而使摩擦系数、磨损深度等降低^[20-22]。

4 结 论

1) Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳的磨痕深度远小于原始合金包壳, 表明 Cr 涂层显著提高了 Zr-1Nb 合金包壳的耐腐蚀性能。

2) 对磨副为刚凸时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳的微动磨损机制主要为磨粒磨损和剥层磨损, 而 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳的磨损机制主要为黏着磨损、材料单向转移。

3) 对磨副为弹簧时, 原始 Zr-1Nb 合金包壳的微动磨损机制以剥层磨损和黏着磨损为主, 局部存在磨粒磨损, 而 Cr 涂层 Zr-1Nb 合金包壳的微动磨损机制主要为磨粒磨损, 伴有微量材料转移。

参考文献 References

- [1] Kim H G, Kim I H, Jung Y I *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2017, 465: 531
- [2] Daub K, Van N R, Nordin H. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2015, 67: 260
- [3] Kuprin A S, Belous V N, Voyevodin V N *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2015, 465: 400
- [4] Cheng T, Keiser J R, Brady M P *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2012, 427: 396
- [5] Gamble K A, Barani T, Pizzocri D *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2017, 491: 55
- [6] Nelson A T, Sooby E S, Kim Y J *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 448: 441
- [7] Yueh K, Terrani K A. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 448: 380
- [8] Katoh Y, Ozawa K, Shih C H *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 448: 448
- [9] Blau P J. *Wear*[J], 2014, 313: 89
- [10] Zhang L F, Lai P, Liu Q D *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2018, 499: 401
- [11] Jiang H, Qu J, Lu R Y *et al.* *Progress in Nuclear Energy*[J], 2016, 91: 355
- [12] Ševeček M, Gurgun A, Seshadri A *et al.* *Nuclear Engineering and Technology*[J], 2018, 50: 229
- [13] Bischoff J, Delafoy C, Vauglin C *et al.* *Nuclear Engineering and Technology*[J], 2018, 50: 223
- [14] Han X C, Chen C Tan Y Q *et al.* *Corrosion Science*[J], 2020, 174: 108 826
- [15] Brachet J C, Isable I T, Flem M L *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2019, 517: 268
- [16] Elleuch K, Fouvry S. *Wear*[J], 2002, 253: 662
- [17] Proudhon H, Fouvry S, Buffiere J Y. *International Journal of Fatigue*[J], 2005, 27: 569
- [18] Aghababaei R. *Physical Review Materials*[J], 2019, 3: 063 604
- [19] Svenningsson I, Tatar K. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 113: 3457
- [20] Song Wei(宋 伟), Chen Qiang(尘 强), Yu Shurong(俞树荣) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(7): 2393
- [21] Zhuang Wenhua(庄文华), Fan Xiaoqiang(樊小强), Li Hao(李 浩) *et al.* *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2019, 32(4): 84
- [22] He Yanni(何燕妮), Yu Shurong(俞树荣), Li Shuxin(李淑欣) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(4): 1417

Effects of Cr Coating on Fretting Wear Behavior of Zr-1Nb Alloy Cladding

Peng Zhenxun¹, Wang Zhanwei¹, Yan Jun¹, Zhao Yahuan¹, Liang Xue², Liu Tingting¹, Ma Wenhui¹, Ren Qisen¹, Liao Yehong¹, Li Kun¹

(1. China Nuclear Power Research Institute, Shenzhen 518026, China)

(2. Laboratory for Microstructures, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The fretting wear behavior and damage mechanism of Cr-coated and uncoated Zr-1Nb alloy cladding with AFA 3G grid under simulated PWR primary water environment were studied contrastively by 3D white light interferometer, SEM and EDS. The results indicate that Cr coating can significantly improve the fretting wear resistance of Zr-1Nb alloy cladding. In addition, for cladding against dimple, the dominant wear mechanism of Zr-1Nb is delamination and abrasive wear. However, the main damage mechanism of Cr-coated Zr-1Nb is adhesive wear and materials transfer, due to higher surface hardness and formation of protective third body layer. For cladding against spring, the damage mechanism is delamination and adhesive wear for Zr-1Nb, while abrasive wear for Cr-coated Zr-1Nb.

Key words: fuel cladding; Zr-1Nb alloy; Cr coating; fretting wear

Corresponding author: Liang Xue, Assistant Researcher, Laboratory for Microstructures, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China, Tel: 0086-21-66135030, E-mail: liangxue@shu.edu.cn