

# 合金元素对 Ti-5Ta 合金耐硝酸腐蚀性能的影响

吴俊宇, 徐建平, 刘后龙, 李欢

(西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 研究了 Cr、V、Mo、Al 等元素对 Ti-Ta 系合金在 6 mol/L 沸腾硝酸中腐蚀行为的影响规律。通过扫描电子显微镜 (SEM) 和电化学工作站等分析方法对不同成分合金的腐蚀速率、钝化膜形貌、极化曲线等进行分析。结果表明, 单独添加 Cr、V、Mo 元素对 Ti-Ta 合金的耐蚀性能影响较小, 而添加 Al 元素会大幅降低合金耐蚀性能; Ti-Ta-Cr 合金的腐蚀速率最低, 钝化膜致密度最高, 稳定性最佳; Ti-Ta-Al 合金在腐蚀过程中很难形成致密且稳定的钝化膜。对于 Ti-Ta 系多元合金, 复合添加 Cr、V 元素有助于获得致密的钝化膜, 添加 Mo 元素会降低钝化膜致密度和稳定性, Al 元素添加量为 1% (质量分数) 时对合金钝化行为的影响不大。提高氧浓度会恶化 Ti-Ta-X 三元合金在沸腾硝酸中的耐蚀性能。

**关键词:** Ti-Ta 合金; 易钝化元素; 耐硝酸腐蚀; 电化学; 钝化膜

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-013-06

## Effect of Alloying Elements on Nitric Acid Corrosion Resistance of Ti-5Ta Alloy

Wu Junyu, Xu Jianping, Liu Houlong, Li Huan

(Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The influence of elements, such as Cr, V, Mo and Al, on the corrosion behavior of Ti-Ta alloy in 6 mol/L boiling nitric acid was investigated. Corrosion rate, passive film morphology and polarization curve of the alloys with different compositions were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and electrochemical workstation. The results indicate that the addition of Cr, V and Mo elements alone in Ti-Ta alloy has little effect on the corrosion resistance, but the addition of Al element significantly reduces the corrosion resistance. Ti-Ta-Cr alloy exhibits the lowest corrosion rate, highest passive film density and stability. It is difficult for Ti-Ta-Al alloy to form dense and stable passive film during the corrosion process. As for Ti-Ta multicomponent alloys, the co-addition of Cr, V elements helps to form dense passive film, while the addition of Mo element can reduce the density and stability of the passive film. The addition of 1% mass fraction of Al element has little effect on the passivation behavior of the alloy. Increasing oxygen concentration will deteriorate the corrosion resistance of Ti-Ta-X ternary alloy in boiling nitric acid.

**Keywords:** Ti-Ta alloy; easy passivation elements; resistance to nitric acid corrosion; electrochemistry; passive film

随着我国经济的快速发展, 能源需求日益增长。核能作为一种清洁能源, 已经得到全世界的广泛认可和接受, 并成为我国能源结构中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。随

随着我国核电发展速度的逐渐加快, “不平衡不充分发展”的问题凸显, 主要体现在核乏燃料产生量和贮存量的增大与后处理工业发展缓慢间的矛盾。为解决核燃料闭式循环产业体系存在的突出问题, 确保我国核能可持续发展, 扩大乏燃料后处理规模刻不容缓<sup>[2-3]</sup>。为此, 我国计划引进并消化法国 800t U/a 后处理大厂技术, 预计总投资超过 1000 亿人民币<sup>[4-6]</sup>。虽然前期开展了大量工作, 但关键核心技术仍然依赖于自主研发。

800t U/a 后处理大厂采用的后处理工艺为当前最广泛使用的 Purex 流程<sup>[7]</sup>, 该流程采用沸腾或亚沸腾浓硝

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 国防科技工业核材料技术创新中心项目 (ICNM-2022-ZH-18); 国家自然科学基金项目 (52203383); 国家自然科学基金项目 (12205242); 陕西省创新能力支持计划项目 (2023KJXX-095); 陕西省自然科学基金项目 (2022JQ-452); 陕西省秦创原项目 (QCYRCXM-2022-189)

通信作者: 吴俊宇 (1989—), 男, 工程师。

酸对乏燃料进行溶解<sup>[1]</sup>，其关键设备长期服役于含有放射性阳离子的高温硝酸中<sup>[8-11]</sup>，这就需要相关材料具有良好的抗辐照性能和耐腐蚀性能。另外，随着后处理厂规模的扩大，相关装备将会向大型化方向发展，必然会对耐蚀材料的强度提出更高的要求。因此，如何在保证材料耐蚀性能的前提下实现更高的强度成为后处理工业关注的重点问题。

国内外学者针对乏燃料后处理关键设备用耐蚀材料已开展了大量研究<sup>[5,12-14]</sup>，研究对象主要集中在不锈钢、Ti-Ta 系合金和 Zr 基合金<sup>[15-18]</sup>。Ti-Ta 系合金在具有氧化性金属阳离子的高温浓硝酸中仍具有优异的耐蚀性能，与不锈钢相比具有极大的优势<sup>[19-22]</sup>，但目前成熟应用的 Ti-Ta 二元合金为强度相对较低的  $\alpha$  型钛合金，很难满足后处理装备大型化后某些关键部件对耐蚀材料力学性能的要求。因此，开发耐硝酸腐蚀的高强度钛合金材料具有积极意义。

本研究以 Ti-Ta 合金为基础，系统研究 Cr、V、Mo、Al 等常用钛合金强化元素单独以及复合添加对 Ti-Ta 系合金耐蚀性能的影响规律，以期为后处理用高强度耐蚀钛合金的成分设计提供依据，为核乏燃料后处理关键设备特殊部件的选材提供实验参考。

## 1 实验

以 Ti-Ta 合金为基础，通过加入 Cr、V、Mo、Al 等元素设计了多种 Ti-Ta 系合金，目标化学成分如表 1 所示。采用真空非自耗电弧熔炼炉进行熔炼，得到合金纽扣锭，然后在 780 °C 对所有纽扣锭进行 30 min 固溶处理。

在经固溶处理的纽扣锭上切取尺寸为 24 mm × 18 mm × 2 mm 的挂片试样和 10 mm × 10 mm × 5 mm 的金相试样。将挂片试样各个表面打磨至光亮。分别使用 240#、600#、1000# 和 1500# 砂纸对金相试样进行打磨，随后抛光。将同一合金成分的挂片试样和金相试样共同悬挂于 6 mol/L 硝酸溶液中进行全浸腐蚀实验，每种合金成分

表 1 Ti-Ta 系合金的目标化学成分 (w%)

Table 1 Target chemical composition of Ti-Ta alloys

Specimen	Ta	V	Cr	Mo	Al	Ti
Ti50	5	—	—	—	—	Bal.
Ti55C	5	—	5	—	—	Bal.
Ti55V	5	5	—	—	—	Bal.
Ti55M	5	—	—	5	—	Bal.
Ti55A	5	—	—	—	5	Bal.
Ti5581	5	5	8	—	1	Bal.
Ti5851	5	—	5	8	1	Bal.
Ti55551	5	5	5	5	1	Bal.

挂片取 2 个平行试样。腐蚀时溶液保持沸腾状态，每 48 h 取出试样烘干称重并更换溶液，总腐蚀时间为 240 h。为避免溶液中溶解的其他合金元素对腐蚀速率产生影响，不同合金成分的试样采用单独的容器进行腐蚀实验。

采用失重法评价合金的耐蚀性能，腐蚀前以及不同腐蚀时间下各试样质量使用感量为 0.1 mg 的电子天平称量，腐蚀速率采用公式 (1) 进行计算：

$$R = 87\ 600 \times \Delta W / (ST\rho) \quad (1)$$

式中： $R$  为年化腐蚀速率，mm/a； $\Delta W$  为腐蚀前后试样的质量差值，g； $\rho$  为合金的密度，g/cm<sup>3</sup>； $S$  为试样的表面积，cm<sup>2</sup>； $T$  为腐蚀时间，h。

经 240 h 腐蚀后，对挂片试样的表面宏观形貌进行观察，使用 EM30AX+ 型扫描电子显微镜 (SEM) 对金相试样的表面显微形貌进行观察。

为了研究较高氧浓度条件下不同合金元素对腐蚀行为的影响规律，在 6 mol/L 沸腾硝酸溶液中对腐蚀 240 h 后的 4 种三元合金挂片试样单独进行悬挂腐蚀实验。4 个容器中溶液初始体积相同，试样上缘与液面平齐，随着溶液蒸发，液面下降，样品逐渐暴露在富氧的酸蒸气环境中。加热腐蚀 96 h 后，使用 ICS-5000+ 型离子色谱仪对各容器溶液中的金属阳离子浓度进行分析。

将不同成分的合金纽扣锭切割成 10 mm × 10 mm × 10 mm 的立方体试样，用环氧树脂涂封 5 个面，剩余裸露面积为 1 cm<sup>2</sup>。分别使用 240#、600# 和 1000# 砂纸将裸露表面打磨至光亮，使用酒精清洗后，在蒸馏水中煮沸并烘干。采用德国 ZAHNER 电化学工作站进行极化曲线测试，其中工作电极为不同成分的合金立方体试样，参比电极为饱和 KCl 溶液，辅助电极为铂电极，腐蚀溶液为 6 mol/L 硝酸溶液，实验温度为 110 °C (微沸腾)。采用电加热套对腐蚀溶液进行加热，待开路电位稳定后进行极化曲线扫描。极化曲线扫描电位从 -0.5 V 开始扫描至 3.5 V，扫描速度为 5 mV/s。使用 CS Studio 软件进行电化学数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 腐蚀行为分析

不同成分的合金试样在 6 mol/L 沸腾硝酸溶液中腐蚀速率随时间的变化曲线如图 1 所示。由图 1 可见，在所有设计的 Ti-Ta 系合金中，Ti-Ta 二元合金的腐蚀速率最低，240 h 时腐蚀速率小于 0.01 mm/a。对于 Ti-Ta-X 三元合金，单独添加 Cr 或 Mo 元素时，合金的腐蚀速率较低，Ti55C 合金腐蚀速率略低于 Ti55M 合金；单独添加 V 元素时合金腐蚀速率略有升高；单独添加 Cr、Mo、V 元素的三元合金在 240 h 时的腐蚀速率均不大于 0.02 mm/a。添加 Al 元素会大幅恶化三元合金的耐蚀性

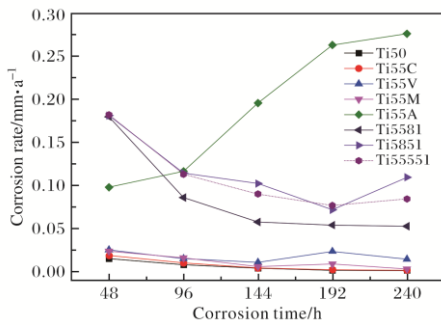


图1 不同成分合金在6 mol/L 沸腾硝酸中的腐蚀速率

Fig.1 Corrosion rate of designed alloys in 6 mol/L boiling nitric acid

能, Ti55A合金在240 h时的腐蚀速率可达到0.275 mm/a, 并且随着腐蚀时间的延长, 腐蚀速率呈上升趋势。基于上述实验结果, 设计了Ti5581、Ti5851和Ti5551 3种多元合金。全浸腐蚀实验结果表明, 3种多元合金中, Ti5581合金腐蚀速率最低, 240 h时腐蚀速率为0.055 mm/a; Ti5851合金腐蚀速率波动较大, 低点处(192 h)的腐蚀速率与Ti55551合金持平, 高点处(240 h)的腐蚀速率大于Ti55551合金, 分别为0.087、0.112 mm/a。

综上所述, 在Ti-Ta合金中分别引入Cr、V、Mo元素后, 合金的腐蚀速率变化不大, 但引入Al元素会急剧增加合金的溶解速率, 显著恶化合金的耐蚀性能。虽然Ti-Ta-Mo三元合金的耐蚀性能优于Ti-Ta-V合金, 但对于多元化Ti-Ta合金, 添加8%Mo元素对合金耐蚀性能

恶化程度的影响大于添加5%V+3%Mo; 结合Ti5581和Ti55551合金的化学成分可知, 当使用3%Cr元素代替5%Mo元素时, Ti-Ta系合金的耐蚀性能明显提高, 说明添加Cr元素有利于降低合金的腐蚀速率。相比而言, 添加Mo元素会恶化合金的耐蚀性能, 所以为了提高Ti-Ta系合金耐蚀性能的稳定性, 应尽量降低Mo元素的添加量。

合金腐蚀速率的变化是由合金中金属元素的溶解速率不同所导致的。为了评估合金中添加元素的溶解速率, 测试了Ti-Ta-X三元合金腐蚀96 h后溶液中的金属离子浓度, 结果如表2所示。由表2可见, Ta元素的溶解速率较慢且受其他合金元素的影响较小, 而其他合金元素对基体中Ti元素的溶解速率影响较为明显。在较高氧浓度条件下, Ti55C合金腐蚀速率仍然最小, Ti55V合金腐蚀速率略有升高, Ti55A和Ti55M合金腐蚀速率接近, 均较Ti55C合金大幅提高。与全浸腐蚀实验相比, 除了Ti55A合金外, 其余3种Ti-Ta-X三元合金的腐蚀速率均有所升高, 其中Ti55M合金腐蚀速率升高幅度最大, 由0.01 mm/a升高至0.188 mm/a, Ti55A合金腐蚀速率虽然有所降低, 但仍达到0.188 mm/a。由此说明, 在Ti-Ta系合金中添加Cr、V、Mo元素时, 合金在沸腾硝酸中的腐蚀行为对氧浓度均较为敏感, 氧浓度提高会导致合金耐蚀性能恶化, 其中添加Mo元素后耐蚀性能恶化程度最大。

表2 Ti-Ta-X三元合金腐蚀96 h后溶液中金属离子浓度以及合金腐蚀速率

Table 2 Metal ion concentration in solution and corrosion rate of alloy after Ti-Ta-X ternary alloy corrosion for 96 h

Alloy	Metal ion concentration/mg L <sup>-1</sup>						R/mm a <sup>-1</sup>
	Ti	Ta	V	Cr	Mo	Al	
Ti55C	10.87	0.035	—	0.735	—	—	0.044
Ti55V	15.93	0.03	0.965	—	—	—	0.065
Ti55M	42.33	0.04	—	—	6.97	—	0.188
Ti55A	45.03	0.03	—	—	—	4.58	0.188

## 2.2 表层钝化膜分析

为了阐明不同合金在沸腾硝酸中的腐蚀动力学行为, 对不同成分Ti-Ta系合金腐蚀后的表面宏观形貌进行分析, 建立腐蚀速率与表面形貌之间的联系, 以揭示合金元素对Ti-Ta系合金腐蚀性能的影响。Ti55X三元合金挂片试样经过240 h腐蚀后的宏观形貌如图2所示。由图2可见, Ti55C和Ti55V合金试样经240 h腐蚀后表面光亮, 其中Ti55C合金表面呈金黄色(图2a), Ti55V合金表面呈银色(图2b), 说明试样表面形成了致密的钝化膜。Ti55M合金试样表面较为粗糙, 呈暗红色(图2c), 形成的钝化膜致密性相对Ti55C和Ti55V合金明显降低。Ti55A合金试样表面腐蚀最为严重, 粗糙度较

大且晶粒组织明显(图2d), 说明腐蚀过程中未形成致密钝化膜。为深入研究合金元素对钝化行为的影响规律, 对不同成分合金的挂片试样腐蚀240 h后的表面形貌进行观察, 结果如图3所示。由图3可见, Ti55C和Ti55V合金腐蚀后表面钝化膜致密且平整, 基体组织不明显, 无明显点蚀坑, 腐蚀均匀性良好(图3a、3b)。Ti55M合金表层钝化膜平整, 基体组织清晰显现(图3c), 腐蚀均匀性劣于Ti55C和Ti55V合金。Ti55A合金表面不平整, 基体组织腐蚀程度较大, 存在高低起伏, 且钝化膜连续性较差(图3d)。Ti5581合金表层氧化膜致密且平整, 仅存在少量纳米级的点蚀坑, 未见基体组织和晶界(图3e), 腐蚀均匀性良好。Ti5851合金表层钝化



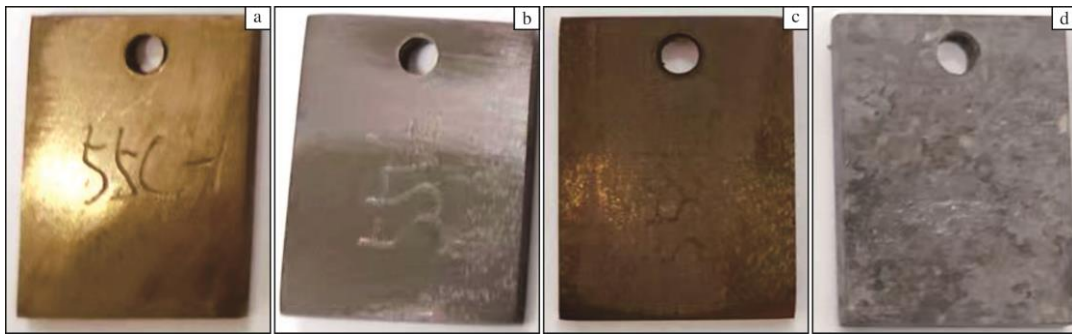


图2 Ti55X 三元合金挂片试样经过 240 h 腐蚀后的宏观形貌

Fig.2 Macro-morphologies of Ti55X trinary alloys hanging pieces after 240 h corrosion: (a) Ti55C; (b) Ti55V; (c) Ti55M; (d) Ti55A

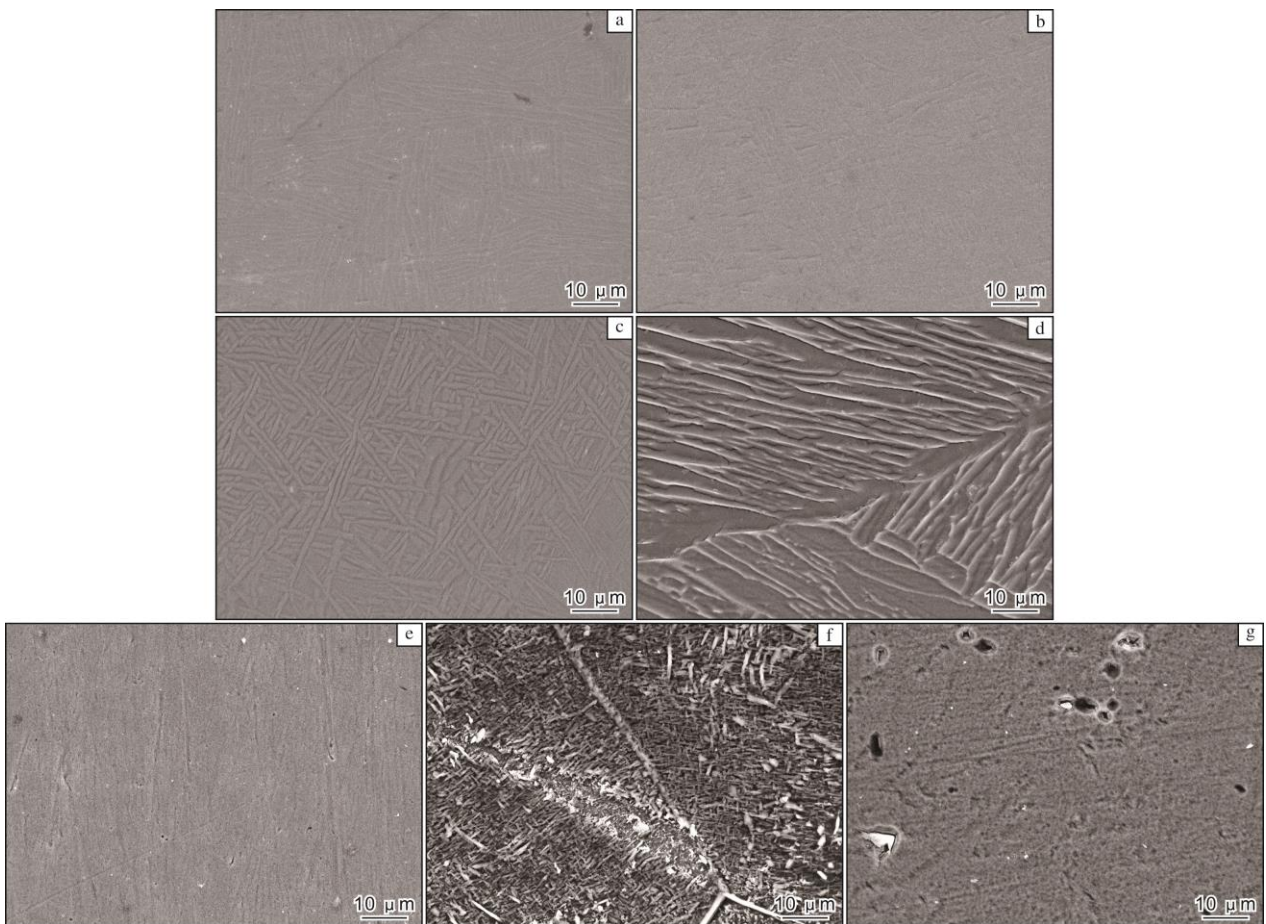


图3 不同成分合金挂片试样腐蚀 240 h 后表面的显微形貌

Fig.3 Surface microstructures of hanging pieces with different compositions after 240 h corrosion: (a) Ti55C; (b) Ti55V; (c) Ti55M; (d) Ti55A; (e) Ti5581; (f) Ti5851; (g) Ti55551

膜呈针状的疏松结构，致密性较差，并且晶界腐蚀较严重，腐蚀均匀性和钝化膜连续性均较差（图 3f）。Ti55551 合金表层钝化膜较平整，未见基体组织和晶界，腐蚀均匀性良好，存在微米级点蚀坑（图 3g），钝化膜致密性劣于 Ti5581 合金。

综上所述，单独或复合添加 Cr、V 元素会在一定程

度上导致 Ti-Ta 系合金耐蚀性能恶化，但合金表层可以形成致密钝化膜，能够很大程度减缓腐蚀的进行，其中添加 Cr 元素后的耐蚀性优于添加 V 元素。在 Ti-Ta 合金中单独添加 Mo 元素时，虽然腐蚀均匀性相对较差，但由于钝化膜仍然较为致密，故腐蚀速率增大不明显。Ti-Ta 合金中复合添加 Mo 与 Cr、V 等元素，当 Mo 质

量分数不大于 5% 时,合金在腐蚀过程中仍然可以形成较为致密的钝化膜;当 Mo 质量分数达到 8% 时,表层钝化膜致密性显著降低,合金表层腐蚀加剧。Ti-Ta 系合金中单独添加 Al 元素且质量分数达到 5% 时,合金表面无法形成稳定的钝化膜,耐蚀性能显著恶化;当复合添加 Al 与 Mo、Cr、V 等元素且 Al 质量分数仅为 1% 时,合金表层钝化行为受 Al 元素影响不大。

### 2.3 电化学分析

为了深入探究 Ti-Ta 系合金在沸腾硝酸中的钝化行为,对不同成分合金在沸腾硝酸中的动电位极化曲线进行测试,结果如图 4 所示。图 4 中极化曲线数据拟合的统计结果见表 3。其中,  $I_C$  为钝化电流密度,  $E_C$  为钝化电位,  $E$  为过钝化电位,  $\Delta E$  为过钝化电位与钝化电位的差值。由图 4 和表 3 可知,对于 Ti-Ta-X 三元合金,钝化电流密度由小到大依次为: Ti55V < Ti55C < Ti55M < Ti55A。其中, Ti55A 钝化电流密度较其他 3 种三元合金显著提高,由此说明 Ti55V 合金在腐蚀过程中最易形成稳定钝化膜,而 Ti55A 合金不容易形成稳定的钝化膜。虽然 Ti55V 合金的钝化电流略低,但钝化后随着电位增大,钝化电流呈明显的上升趋势。与 Ti55C 和 Ti55M 合金相比, Ti55V 合金曲线斜率显著增大,说明钝化后腐蚀速率随电位升高而逐渐增大,间接表明其钝化膜致密性相对较差。Ti-Ta-X 三元合金过钝

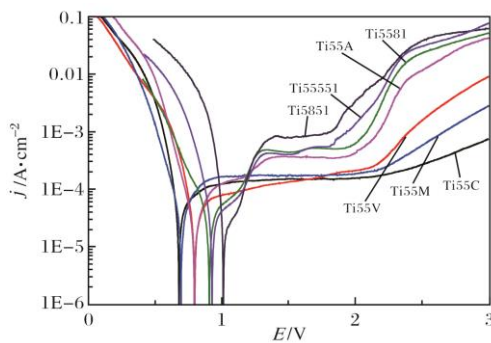


图4 不同 Ti-Ta 系合金的阳极极化曲线

Fig.4 Anodic polarization curves of different Ti-Ta alloys

表3 不同 Ti-Ta 合金的电化学性能

Table 3 Electrochemical properties of different Ti-Ta alloys

Specimens	$I_C/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$E_C/\text{V}$	$E/\text{V}$	$\Delta E/\text{V}$
Ti55C	0.124	0.731	2.236	1.505
Ti55V	0.064	0.828	2.158	1.330
Ti55M	0.158	0.756	2.158	1.402
Ti55A	0.370	1.358	2.071	0.713
Ti5581	0.480	1.269	2.044	0.775
Ti5851	0.810	1.304	1.838	0.534
Ti5551	0.422	1.284	1.841	0.557

化电位与钝化电压差值由高至低依次为 Ti55C > Ti55M > Ti55V > Ti55A, 说明 Ti55C 合金钝化膜稳定性最好,不易发生点蚀击穿,而 Ti55A 合金钝化膜稳定性最差。总体来说, Ti-Ta-X 合金腐蚀速率随着过钝化电位升高而降低。电化学实验结果与图 1 所示的腐蚀速率结果相符合。分析可知, Ti55A 合金在腐蚀初期可以形成钝化膜,随着腐蚀时间延长,稳定性较差的钝化膜发生破裂、剥落且很难再次形成致密钝化膜,导致其腐蚀速率随腐蚀时间延长而增大。

Ti-Ta 系多元合金与三元合金相比,钝化电流升高且过钝化电位降低,说明多元合金更易发生腐蚀,相对不易形成稳定钝化膜且钝化膜的稳定性相对较差。具体来说, Ti5851 合金钝化电流最大,且过钝化电位与钝化电位差值最小,说明该合金不易形成稳定钝化膜且钝化膜的稳定性相对较差,所以随着时间延长其腐蚀速率波动较大。3 种多元合金中, Ti5581 合金钝化电流密度与 Ti5551 合金接近,而过钝化电位区间较宽,说明 Ti5581 合金钝化膜的稳定性最好,所以其腐蚀速率低,并且随着腐蚀时间延长波动较小。

综上所述, Cr 元素对 Ti-Ta 系多元合金钝化膜的稳定效果最佳,虽然 Mo 和 V 元素单独添加时 Ti-Ta 系三元合金钝化行为差别不大,但当进行多元合金设计时, Mo 元素对钝化膜稳定性的恶化程度明显大于 V 元素。通过多元合金化提高 Ti-Ta 系耐蚀合金的力学性能时, Cr 和 V 复合添加可减少对合金耐蚀性能的牺牲。

### 3 结论

(1) Ti-Ta 合金中单独添加 Cr、V、Mo 元素对合金的耐蚀性能影响较小,而添加 Al 元素使得合金耐蚀性能大幅降低。基于腐蚀速率,合金元素对 Ti-Ta 合金耐蚀性能的影响由小到大依次为: Cr < Mo < V < Al。当进行复合添加时, Mo 元素导致合金耐蚀性能恶化的程度大于 Cr 和 V 元素,复合添加元素 Cr 和 V 可以使 Ti-Ta 系多元合金获得较低的腐蚀速率。

(2) 单独或复合添加元素 Cr、V 时, Ti-Ta 系多元合金在腐蚀过程中均可以形成致密钝化膜,其中 Cr 元素对钝化膜致密性和稳定性的提升效果优于 V 元素;钝化膜致密性随着 Mo 元素质量分数的升高而降低,复合添加 Cr 和 V 元素可以获得更加稳定的钝化膜;当添加 Al 元素质量分数仅为 1% 时,对 Ti-Ta 系多元合金钝化行为影响不大。

(3) 提高氧浓度会恶化 Ti-Ta-X 三元合金在沸腾硝酸中的耐蚀性能,其中 Cr 和 V 元素对合金耐蚀性能的影响程度不大,但 Mo 和 Al 元素会严重恶化合金的耐蚀性能。

## 参考文献 References

- [1] 李金英, 石磊, 胡彦涛. 我国乏燃料后处理大厂建设的几点思考[J]. 核化学与放射化学, 2011, 33(4): 204-210.
- [2] 杨帆, 巨建辉, 毛小南, 等. 高 Ta 钛合金在沸腾硝酸中的腐蚀行为[J]. 钛工业进展, 2014, 31(6): 17-21.
- [3] 李想, 张宏韬. 乏燃料后处理产业的市场前景及发展路径[J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 35-38.
- [4] 顾忠茂. 核能与先进核燃料循环技术发展动向[J]. 现代电力, 2006, 23(5): 89-94.
- [5] Li H, Liu C, Xu J, et al. Gamma-ray irradiation behavior of a hexagonal Ti-6Ta alloy applied in spent nuclear fuel reprocessing[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(43): 20521-20530.
- [6] Liu C, Li H, Xu J, et al. Gamma-ray irradiation induced dislocation loops in hexagonal zirconium[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2023, 60(2): 93-97.
- [7] 徐建平, 苏航标, 郭荻子, 等. 核乏燃料后处理设备用钛合金腐蚀性能研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(3): 36-37.
- [8] 杨帆, 吴金平, 郭荻子, 等. Ti-Ta 合金在硝酸中电化学腐蚀研究[J]. 钛工业进展, 2018, 35(2): 22-25.
- [9] 陈延鑫, 何辉, 唐洪彬, 等. 后处理工艺 Purex 流程计算机模拟研究现状及展望[J]. 核化学与放射化学, 2012, 34(4): 193-200.
- [10] 于婷, 叶国安, 何辉, 等. PUREX 流程铀还原反萃过程的计算机模拟研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2017, 39(4): 257-267.
- [11] 叶国安, 张虎. 核燃料后处理技术发展及其放射化学问题[J]. 化学进展, 2011, 23(7): 1289-1294.
- [12] Raj B, Mudali U K. Materials development and corrosion problems in nuclear fuel reprocessing plants[J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48(4): 283-313.
- [13] Kamachi Mudali U, Ravishankar A, Ningshen S, et al. Materials development and corrosion issues in the back end of fuel cycle[J]. Energy Procedia, 2011, 7(1): 468-473.
- [14] 宋品玲, 吴金平, 杨英丽. Ti-6Ta 合金等离子焊焊接接头的组织与性能[J]. 钛工业进展, 2013, 30(6): 30-33.
- [15] Ningshen S, Mudali U K, Mukherjee P, et al. Influence of oxygen ion irradiation on the corrosion aspects of Ti-5%Ta-2%Nb alloy and oxide coated titanium[J]. Corrosion Science, 2008, 50(8): 2124-2134.
- [16] Tonpe S, Saibaba N, Jayaraj R N, et al. Process development for fabrication of Zircaloy-4 dissolver assembly for reprocessing of spent nuclear fuel[J]. Energy Procedia, 2011, 7: 459-467.
- [17] 齐博毅, 刘承泽, 杨庆浩, 等. 用于乏核燃料后处理的商用 Zr702 在沸腾硝酸溶液中的应力腐蚀开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4483-4487.
- [18] 王德鹏, 李毅丰, 梁雪, 等. 压水堆燃料包壳锆合金中第二相的腐蚀行为研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(2): 753-762.
- [19] Balbaud F, Sanchez G, Fauvet P, et al. Mechanism of corrosion of AISI 304L stainless steel in the presence of nitric acid condensates[J]. Corrosion Science, 2000, 42(10): 1685-1707.
- [20] 杨英丽, 赵彬, 林桥, 等. 冷加工率对 Ti-35 合金组织性能的影响[J]. 钛工业进展, 2004, 21(6): 22-24.
- [21] Kamachi Mudali U, Dayal R K, Gnanamoorthy J B. Corrosion behavior of weldments of Ti and Ti-5Ta for nuclear fuel reprocessing plants[J]. Journal of Materials Engineering and performance, 1995, 4: 756-760.
- [22] 徐潇潇, 崔岚, 邱绍宇, 等. Ti-5%Ta 钛合金在乏燃料模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 核动力工程, 2005, 26(4): 406-409.

## 行业动态

## 2022 年 1—6 月日本海绵钛产销数据统计

时间	海绵钛产量/t	国内出货量/t	国外出货量/t	出货量合计/t
2022 年 1 月	3744	1374	1791	3165
2022 年 2 月	3281	1587	3456	5043
2022 年 3 月	3431	1823	3124	4947
2022 年 4 月	3304	1358	3563	4921
2022 年 5 月	3482	1161	3794	4955
2022 年 6 月	3417	1580	3101	4681
合计	20 659	8883	18 829	27 712

王运锋摘自《チタン》