

Ti/Al 合金化对 U-5.5Mo 合金组织与力学性能的影响

王震宏^{1,2}, 张立同¹, 邓鸿章², 陈冬²

(1. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

(2. 中国工程物理研究院 材料研究所, 四川 江油 621908)

摘要: 采用感应熔炼法在 U-5.5Mo 合金中引入 Ti/Al 元素, 通过淬火与时效热处理来调控材料的组织与性能, 获得不同热处理状态下的 U-Mo-Ti/Al 合金。分析析出相的组成、分布与性能的关系, 探讨 Ti/Al 合金元素对 U-5.5Mo 合金力学性能的调控机制。发现在 U-5.5Mo 合金中加入微量 Ti 元素对 U-Mo 合金有明显固溶强化效果, 使合金强度大幅提升; 低温时效热处理可大幅提升 U-Mo-Ti 三元合金的力学性能; 添加微量 Al 元素, 促使 U-Mo-Ti-Al 四元合金中形成高温稳定的富钛与富铝的多元复合金属间化合物, 其在基体与晶界上呈大量不规则连续分布, 对合金具有显著沉淀强化效果, 使 U-Mo-Ti-Al 四元合金的强度大幅提升, 而塑性几乎降为零。

关键词: 时效处理; 固溶强化; 沉淀强化; 力学性能

中图分类号: TG146.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2807-08

用合金元素强化是一种较常用的金属材料强化手段, 其强化机制主要有固溶强化^[1-5]、析出强化^[6-9]和弥散强化^[10-12]等 3 种。U-Mo 合金是一种重要的核材料, 在工业应用及国防科技领域发挥着举足轻重的作用^[13-15], 但是未经强化的 U-Mo 合金存在力学性能、耐腐蚀性能不够理想的问题, 往往难以直接胜任于军品或民品的生产, 而在合金中适当地添加其它金属元素可改善材料的微结构与性能^[16,17]。关于 U-Mo 合金中添加其它金属元素会如何影响合金性能的研究目前还较少见, 在 U-Mo 合金中添加微量元素形成更多元的合金后, 组织和性能的变化规律仍有待更深入的探索。Kim 等人^[18]研究了高熔点金属 Zr 对 U-Mo 合金性能的改善作用, 发现 Zr 与核材料有良好的相容性, 添加 Zr 能显著提高 U-Mo 合金的耐腐蚀性, 且合金的硬度、强度也因微量 Zr 的加入而大幅提升, 但金属 Zr 对 U-Mo 合金的强化机制还不够明确。此外, Zr 是一种贵金属, 不适合广泛用于 U-Mo 合金的强化研究, 在实际应用中更加难以推广。因此, 亟需寻求强化效果显著且价格适中的金属以适应在 U-Mo 合金强化的基础研究与工业应用中推广的需求。

Ti/Al 元素是较常见的合金强化元素, Ti 元素在铀及铀合金材料中具有较高固溶度, Al 元素能与 U、Mo、Ti 等合金元素形成高温稳定的金属间化合物。可以预见的是, 当金属元素在 U-Mo 合金中有较高固溶度时, 可

有效地对合金进行固溶强化。当金属元素在 U-Mo 合金中的固溶度随温度降低而减小时, 则以析出强化方式来提高其强度; 当金属元素添加在 U-Mo 合金熔体并在凝固过程中析出细小颗粒, 则对 U-Mo 合金起到弥散强化作用。故在 U-Mo 合金系中添加适量 Ti/Al 元素, 可能容易达到合金元素固溶强化、析出强化或弥散强化的效果, 从而实现材料性能调控。研究 Ti/Al 元素的添加对 U-Mo 合金组织及性能的改善具有重要的科学意义及工程应用价值。

本研究采用感应熔炼法在 U-5.5Mo 合金中引入 Ti/Al 元素, 通过淬火与时效热处理来调控材料的组织与性能, 获得不同热处理状态下的 U-Mo-Ti/Al 合金。并分析析出相的组成、分布与性能的关系, 探讨 Ti/Al 合金元素对 U-5.5Mo 合金力学性能的调控机制。

1 实验

实验中使用的 U-Mo 系合金材料成分为 U-Mo、U-Mo-Ti 与 U-Mo-Ti-Al, 其中三元合金和四元合金的拟设计成分分别为 U-5.5Mo-0.6Ti 和 U-5.5Mo-0.6Ti-0.35Al。以预制的 U-5.5Mo 合金基体作为母合金, 在其中加入微量的 Ti/Al 元素, 经两次感应熔炼制备成实验所需的 U-Mo-Ti 三元与 U-Mo-Ti-Al 四元合金样品。第 2 次感应熔炼后浇铸成管状试件, 再后续加工成块状试样,

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0701201)

作者简介: 王震宏, 男, 1975 年生, 研究员, 中国工程物理研究院材料研究所, 四川 江油 621908, 电话: 0816-3626860, E-mail: ZHongWang_CAEP@126.com

用于热处理实验研究。每次熔炼温度为 1400 °C 保温 20 min，以确保合金元素充分熔解。实验中制备的 U-Mo-Ti 合金和 U-Mo-Ti-Al 合金的化学成分如表 1 所示，其中 Mo 含量为 4.75%±0.3%，Ti 含量为 0.52%±0.05%，Al 含量为 0.4%±0.1%，质量分数。

U-Mo-Ti 合金和 U-Mo-Ti-Al 合金样品制备完成后，首先进行均匀化热处理，在 1000 °C 环境中保温 4 h 后随炉冷却。然后对均匀化热处理后的样品进行水淬处理，样品先在 800 °C 环境中保温 1 h 再进行淬火。时效处理

包括 2 种工艺，即样品淬火后分别在 300、400 °C 环境中时效处理 2 h。最后对淬火态与时效态的样品进行金相、扫描电镜分析和力学性能测试。

2 结果与讨论

2.1 U-Mo-Ti 合金的凝固组织演化

U-Mo-Ti 合金经不同的热处理工艺后其金相组织如图 1 所示，其中图 1a 为淬火态组织形貌，处理工艺为 800 °C 环境中保温 1 h 后水淬；图 1b 和图 1c 为不同工艺的时效处理后的金相组织形貌，时效温度分别为 300 和 400 °C，保温时间均为 2 h。

由图 1 可见，U-Mo-Ti 三元合金时效后的组织为等轴晶，平均晶粒尺寸介于 400~600 μm，时效温度对晶粒尺寸无显著影响。淬火与时效的晶粒组织中，均分布少量细小黑点，晶界处未发现明显析出相。对合金进行 SEM 与 EDS 分析，结果分别如图 2、3 所示。其中图 2a 为淬火态的合金组织形貌，图 2b 为 300 °C 时效 2 h 的合

表 1 U-Mo-Ti/Al 合金化学成分
Table 1 Chemical composition of the U-Mo-Ti/Al alloy (wt%)

Alloy	Mo	Ti	Al
U-Mo-Ti	4.75±0.3	0.52±0.05	-
U-Mo-Ti-Al	4.75±0.3	0.52±0.05	0.4±0.1

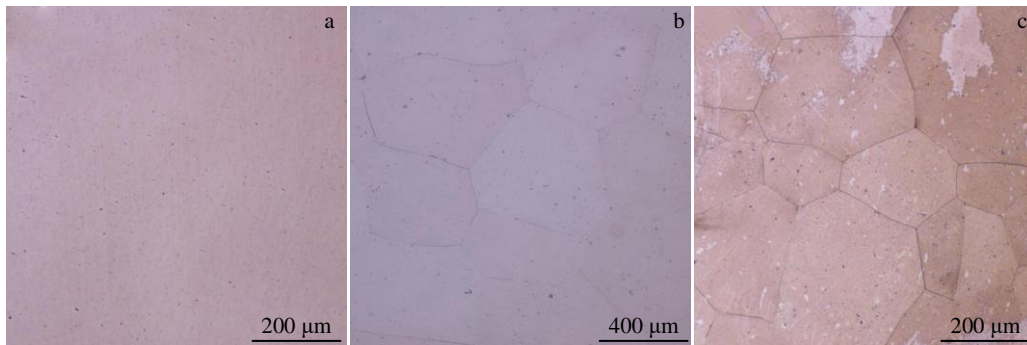


图 1 U-Mo-Ti 合金经不同热处理工艺后的金相组织形貌

Fig.1 OM images of U-Mo-Ti alloy under different heat treatment processes: (a) water quenching, (b) aging treatment at 300 °C for 2 h, and (c) aging treatment at 400 °C for 2 h

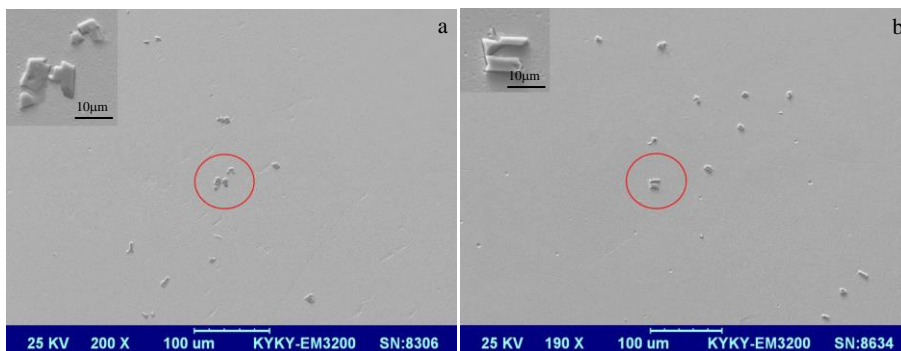


图 2 U-Mo-Ti 合金的 SEM 照片

Fig.2 SEM images of the U-Mo-Ti alloy after water quenching (a) and aging treatment at 300 °C for 2 h (b)

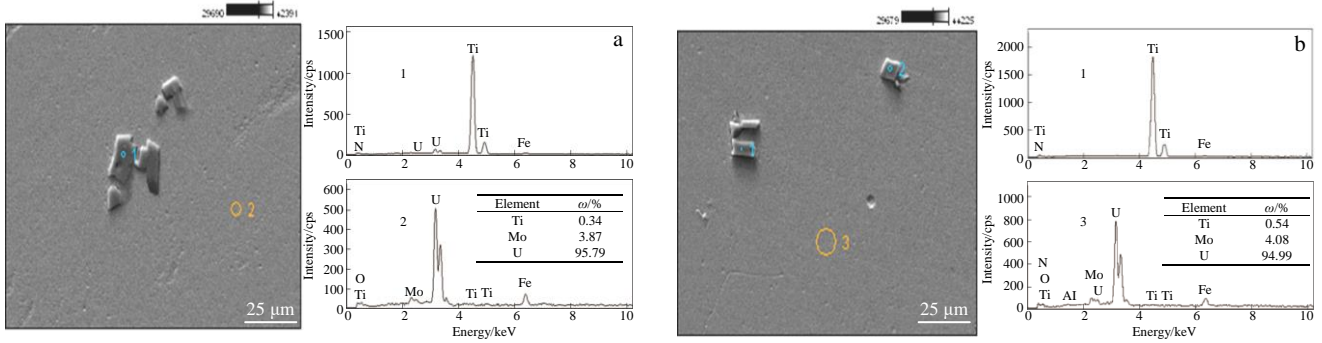


图 3 U-Mo-Ti 合金的 EDS 分析结果

Fig.3 SEM images of inclusions and EDS analysis results of the U-Mo-Ti alloy after water quenching (a) and aging treatment at 300 °C for 2 h (b)

金组织形貌。

由图 2 可知, 不同热处理状态下的 U-Mo-Ti 合金中均存在少量呈无规则分布的黑褐色颗粒, 尺寸介于 0~10 μm, 对黑褐色颗粒进行 EDS 表征后, 发现黑褐色颗粒主要含 Ti 元素, 如图 3 所示。因此可以确定 U-Mo-Ti 合金中存在的细小且无规则分布的黑褐色颗粒为 Ti 的金属夹杂物, 推测这些夹杂物是由合金中存在的 C/N 元素与 Ti 在高温熔体或凝固过程中形成的高温 Ti (C/N) 金属型夹杂物。合金组织中除黑褐色的 Ti (C/N) 夹杂物外, 并未发现存在其他析出相与颗粒物。在 U-Mo 二元合金中添加少量 Ti 元素后, Ti 固溶于 U-Mo 合金基体中, 形成 U-Mo-Ti 三元合金固溶体, 在不同的热处理(淬火与 300、400 °C 时效)过程中, 该三元合金固溶体组织均未发生分解。U-Mo-Ti 合金组织表现为单相三元固溶体, Ti 元素主要以固溶强化的机制来改善 U-Mo 合金的组织与性能。

图 4 所示的是 U-Mo-Ti 合金淬火与 300 °C 时效 2 h 条件下的 XRD 分析结果。由图 4 可知 U-Mo-Ti 合金的淬火态与时效态组织均为 γ-U(Mo, Ti) 相组织, 这与报道的 U-Mo 及 U-Mo-Zr 等合金类似^[18], 并未观测到明显析出相的衍射峰。对比淬火态与时效态的衍射峰可见, 时效态的衍射峰发生了一定程度的宽化, 说明时效过程中合金的晶体结构产生了一定程度的变化。结合 U-Mo 与 U-Ti 二元合金的相图可知, U-Mo 与 U-Ti 合金在 300 °C 时效热处理时, 均会析出 U₂Mo 或 U₂Ti 相, 因此推测淬火态中的过饱和 γ-U(Mo, Ti) 相在时效过程中产生了 U₂(Mo/Ti) 析出相, 从而引起了晶面间距的变化, 最终导致了衍射峰的宽化。

2.2 U-Mo-Ti-Al 合金凝固组织演化

U-Mo-Ti-Al 合金经过不同的热处理工艺后的金相组织形貌如图 5 所示。其中图 5a 为淬火态组织形貌, 处理工艺为 800 °C 环境中保温 1 h 后水淬; 图 5b 和图 5c

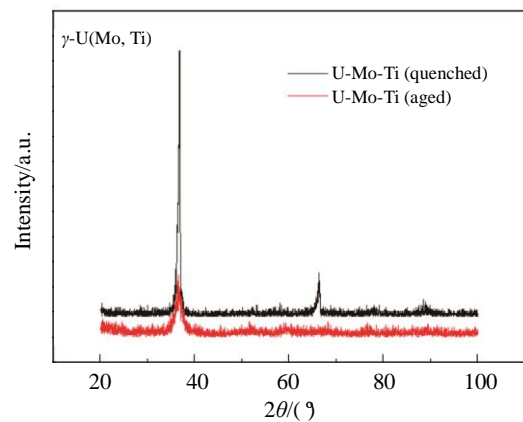


图 4 不同热处理条件下的 U-Mo-Ti 合金 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of the U-Mo-Ti alloy under different heat treatment processes

分别为 300 和 400 °C 条件下时效 2 h 后的组织形貌。

由图 5 可知, U-Mo-Ti-Al 四元合金的平均晶粒尺寸为 200~300 μm, 与图 1 对比可知, U-Mo-Ti-Al 合金的晶粒尺寸明显比 U-Mo-Ti 合金的晶粒尺寸小。可见添加 Al 元素可明显细化晶粒, 且淬火态与时效态 U-Mo-Ti-Al 合金组织的晶界与基体中均分布有大量颗粒物。这些颗粒尺寸介于 0~10 μm 之间, 呈不规则的条状或短棒状形貌。这说明添加了微量 Al 元素后, 在 U-Mo-Ti-Al 四元合金组织中生成了高温稳定的第二相。随后对不同热处理条件下的 U-Mo-Ti-Al 四元合金组织进行了 SEM 与 EDS 分析, 图 6、7 所示的分别为 U-Mo-Ti-Al 合金组织的 SEM 与 EDS 分析结果。其中图 6a 为淬火态的合金组织形貌, 图 6b 为 300 °C 时效处理后的合金组织形貌。

由图 7 可知, 在淬火态与时效态的 U-Mo-Ti-Al 合金组织的晶粒内部和晶界上, 均发现大量的第二相颗粒,

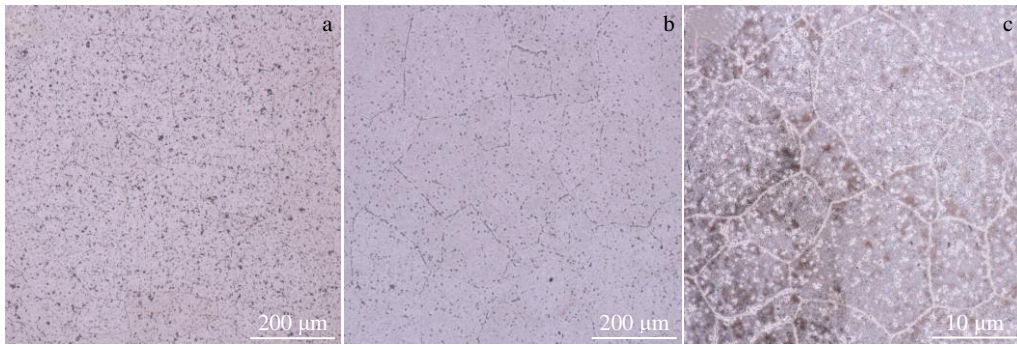


图 5 U-Mo-Ti-Al 合金金相组织形貌

Fig.5 OM images of the U-Mo-Ti-Al alloy after water quenching (a), aging treatment at 300 °C for 2 h (b), and aging treatment at 400 °C for 2 h (c)

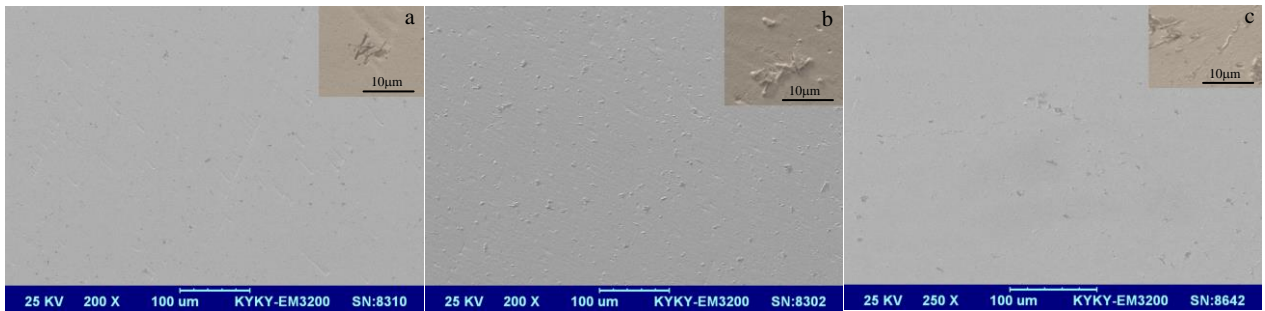


图 6 U-Mo-Ti-Al 合金 SEM 照片

Fig.6 SEM images of the U-Mo-Ti-Al alloy after water quenching (a), aging treatment at 300 °C for 2 h (b), and aging treatment at 400 °C for 2 h (c)

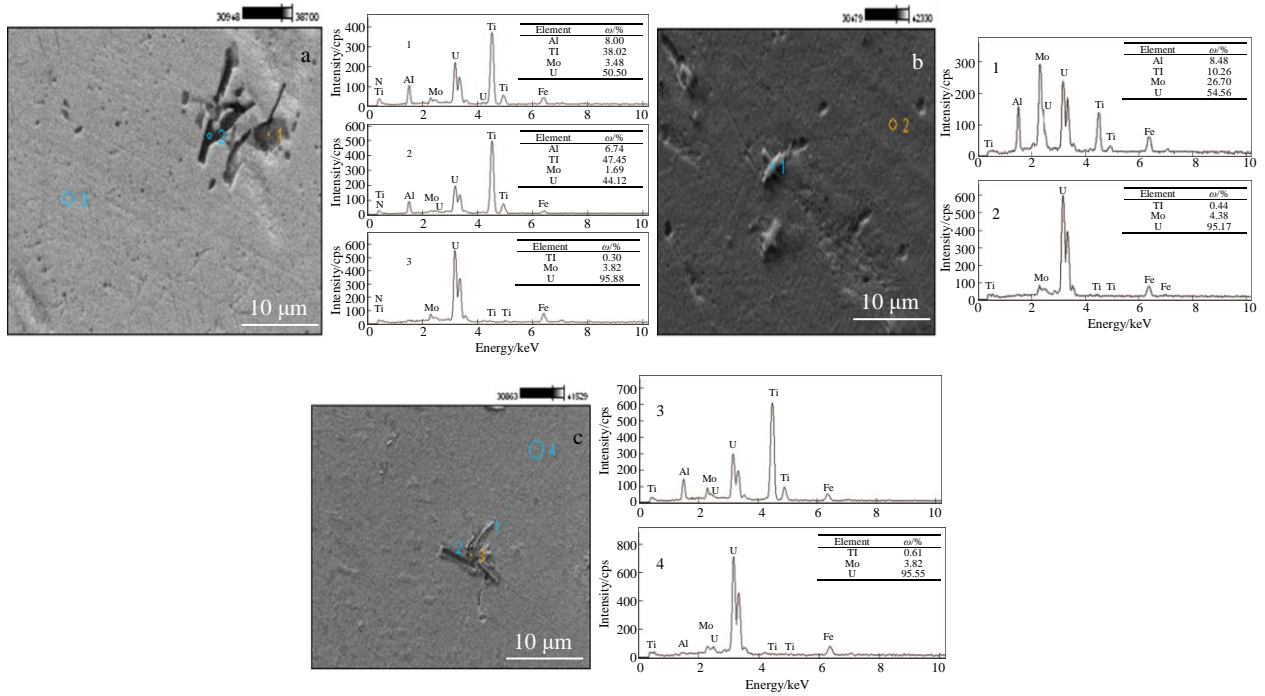


图 7 U-Mo-Ti-Al 合金的第二相及能谱分析结果

Fig.7 SEM morphologies of second phase and EDS analysis results of the U-Mo-Ti-Al alloy after water quenching (a), aging treatment at 300 °C for 2 h (b), and aging treatment at 400 °C for 2 h (c)

形貌呈现为不规则的颗粒状或条状。对比图 7a 与 7b、7c 可见, 淬火态组织中发现的第二相颗粒与时效态组织中的第二相颗粒在微观形貌上存在明显差异。在随后的 EDS 表征中发现, 淬火态组织中存在的第二相颗粒是一种富钛和铝的 U-Mo-Ti-Al 四元金属间化合物, 其中 Ti 含量高达 38%~50%, Al 含量高达 6.7%~8%; 时效态组织中的第二相颗粒是一种富钛、铝和钼的 U-Mo-Ti-Al 四元金属间化合物。与淬火态组织中的金属间化合物相比, 该四元金属间化合物的成分存在明显差异, 主要表现为时效态组织中的四元金属间化合物中 Mo 元素含量大幅增加, 而 Ti 元素含量大幅降低。U-Mo-Ti-Al 合金的基体组织仍为单相 U-Mo-Ti 三元固溶体。

图 8 为 U-Mo-Ti-Al 合金淬火与 300 °C 时效处理后的 XRD 分析结果。由图 8 可知, 淬火态与时效态的 U-Mo-Ti-Al 合金中形成的单相 U-Mo-Ti 三元固溶体基体均为 γ -U(Mo, Ti) 相组织, 这与 U-Mo-Ti 三元合金的组织类似。由图 7 可知, U-Mo-Ti-Al 合金基体中可明显观测到分布不规则的第二相组织; 在图 8 中除 γ -U(Mo, Ti) 相对应明显的衍射峰外, 仍存在很多细小杂乱的衍射峰, 这可能是在 U-Mo-Ti-Al 四元合金组织中, 形成的第二相的相结构与相成分并不固定所导致; 图 7 中 SEM 与 EDS 结果也显示 U-Mo-Ti-Al 合金组织中的第二相组织微观形貌与成分是不固定的, 是一种富 Ti 与富 Al 的多元组织。

2.3 U-Mo-Ti-Al 合金的性能变化

U-5.5Mo (alloy 1)、U-5.5Mo-0.6Ti (alloy 2) 与 U-5.5Mo-0.6Ti-0.35Al (alloy 3) 3 种合金经过不同的热处理工艺后, 屈服强度($R_{p0.2}$)、抗拉强度(R_m)、延伸率(δ)、断面收缩率(Z)以及弹性模量(E)的变化如表 2 所示。

如图 9、10 合金系的屈服强度和抗拉强度所示, 添加金属 Ti 后, U-Mo 合金的抗拉强度与屈服强度均有显

表 2 U-Mo 系合金中添加 Ti/Al 且经过不同热处理工艺后的力学性能

Table 2 Mechanical properties of U-Mo-(Ti/Al) alloy after different heat treatment processes

	Status	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$\delta/\%$	Z/%	E/GPa
Alloy 1	Quenched	306	509	27.5	33.3	58
	300 °C/2 h	517	673	20.2	36	75
	400 °C/2 h	632	756	15.2	25.3	68
Alloy 2	Quenched	401	642	26	46	55
	300 °C/2 h	827	944	12	41	60
	400 °C/2 h	839	906	13.5	39	64
Alloy 3	Quenched	437	855	-	-	55
	300 °C/2 h	-	1012	-	-	-
	400 °C/2 h	-	1302	-	-	-

著提升。从表 2 中可见, 在经过水淬、300 °C 的 2 h 时效及 400 °C 的 2 h 时效这 3 种热处理工艺之后, 屈服强度分别提升 31%、60%、33%, 抗拉强度分别提升 26%、40%、20%; 而延伸率分别降低 5%、40%、11%, 弹性模量分别降低 5%、15%、19%; 此外, 断面收缩率

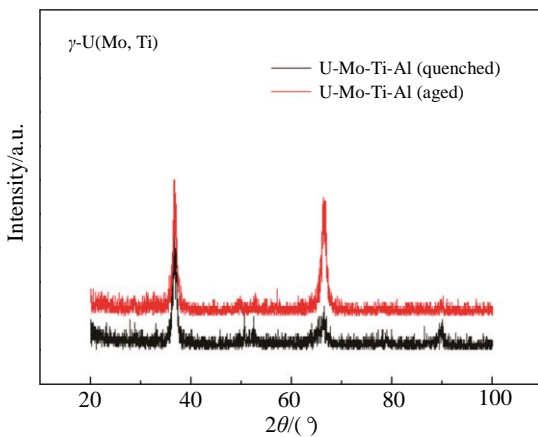


图 8 U-Mo-Ti-Al 合金的 XRD 图谱
Fig.8 XRD patterns of the U-Mo-Ti-Al alloy

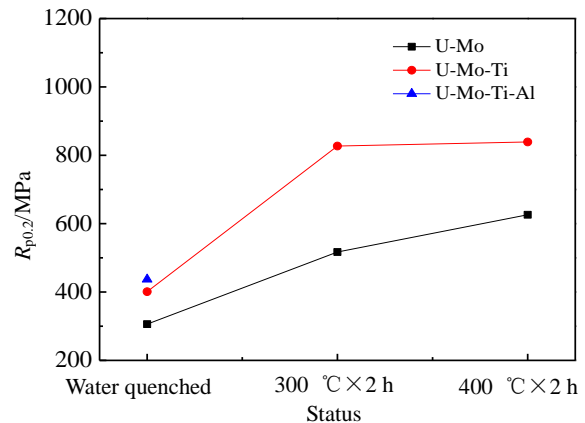


图 9 U-5.5Mo 系合金的屈服强度
Fig.9 Yield strength of the U-5.5Mo alloy

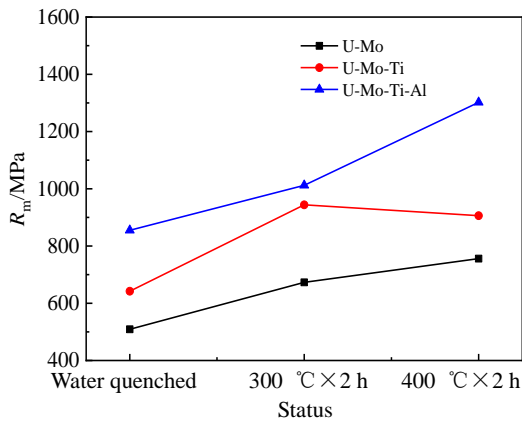


图 10 U-5.5Mo 系合金不同热处理状态下的抗拉强度

Fig.10 Tensile strength of the U-5.5Mo alloy under different heat treatment conditions

分别提升 38%、14%、54%。与淬火态相比，时效态的 U-Mo-Ti 合金抗拉强度约提高 50%，屈服强度约提高 100%，延伸率约降低 50%。时效温度对力学性能的影响也很明显，400 °C 的比 300 °C 的合金抗拉强度更低而延伸率更高，并且时效温度增大会导致断面收缩率降低而弹性模量增大。

图 10 表明，U-Mo-Ti 三元合金中添加少量 Al 元素后，其抗拉强度再次大幅提高。在经过水淬、300 °C 的 2 h 时效及 400 °C 的 2 h 时效这三种热处理后，U-Mo-Ti-Al 合金比 U-Mo-Ti 合金的抗拉强度分别提高 33%、7.2% 和 44%。

添加微量 Ti 元素后，U-Mo 合金的微观组织并未发现明显变化，SEM 测试结果显示，U-Mo-Ti 三元合金淬火态组织仍为单相过饱和固溶体，这与 U-Mo 合金淬火态组织类似。XRD 测试结果显示，U-Mo-Ti 三元合金的淬火态组织为单相的 γ -U(Mo, Ti)，通过对比 U-Mo 合金与 U-Mo-Ti 合金的力学性能可见，微量 Ti 元素添加后，合金强度大幅提升，如图 9、10 所示，合金的屈服强度提升 30% 以上，抗拉强度提升 20% 以上，图 11 则表明 U-Mo 合金的塑性因 Ti 元素的添加而略有降低。

通过以上分析发现，添加 Ti 元素可显著改善 U-Mo 合金的力学性能。U-Mo-Al 合金在低温时效处理后，其强度大幅度提高而塑性大幅降低，这与 U-Mo 合金在相同的热处理之后力学性能的变化规律类似。添加 Ti 元素强化 U-Mo 合金的机制主要为固溶强化，这是因为 U-Mo-Ti 三元合金淬火态与时效态的凝固组织均为过饱和的 γ -U(Mo, Ti) 单相固溶体组织。对比淬火态与时效态 U-Mo-Ti 合金的衍射峰发现，时效态的衍射峰出现一定程度宽化，说明在时效过程中合金的晶体结构发生了

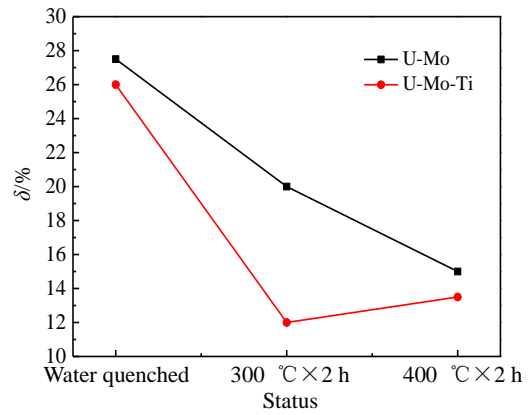


图 11 Ti 对 U-5.5Mo 系合金延伸率的影响

Fig.11 Effect of Ti on the elongation of the U-5.5Mo alloy

一定程度的变化。结合 U-Mo 与 U-Ti 二元合金相图可知，U-Mo 与 U-Ti 合金在 300 °C 时效时，均析出 U_2Mo 或 U_2Ti 相，因此推测 U-Mo-Ti 三元合金时效态的强度较淬火态的有大幅提升而塑性大幅降低，这是因为淬火态形成的过饱和 γ -U(Mo, Ti) 相在时效过程中形成纳米尺度的 $U_2(Mo/Ti)$ 析出相，使 U-Mo-Ti 三元合金强度大幅提升而塑性降低。

图 12、13 分别给出了 U-Mo 合金与 U-Mo-Ti 合金在不同热处理状态下的断面收缩率及弹性模量的变化规律。对比表 2 可见，Al 元素的加入使合金的塑性大幅降低，U-Mo-Ti-Al 合金在经过淬火与时效处理后，延伸率与断面收缩率均直接降至零，宏观表现为基本无塑性。Al 元素的添加使得合金的塑性基本降为零的原因是，Al 元素促使 U-Mo-Ti-Al 四元合金中形成高温稳定的富钛与富铝

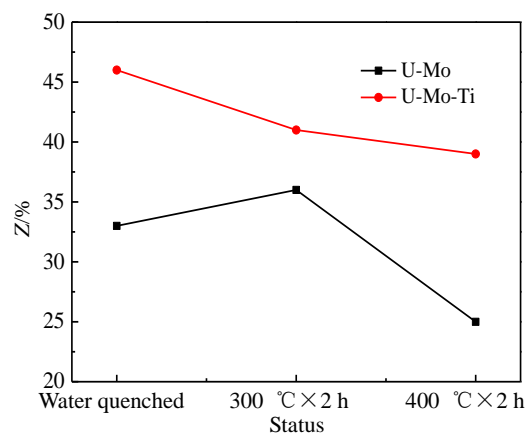


图 12 U-5.5Mo 系合金在不同热处理状态的断面收缩率

Fig.12 Area reduction rate of the U-5.5Mo alloy under different heat treatment conditions

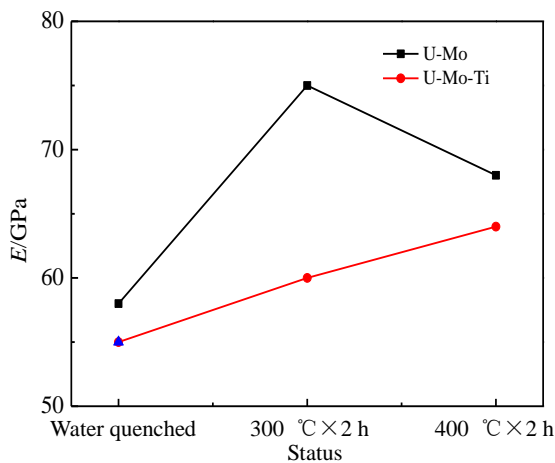


图 13 U-5.5Mo 系合金在不同热处理状态的弹性模量

Fig.13 Elastic modulus of the U-5.5Mo alloy under different heat treatment conditions

多元复合金属间化合物, 其在基体与晶界处不规则连续分布, 对该 U-Mo 合金有显著沉淀强化效果, 造成 U-Mo-Ti-Al 四元合金的强度大幅提升, 而塑性却几乎消失。

3 结论

1) 在 U-5.5Mo 合金中加入微量 Ti 元素后, 其微观组织并未发生明显变化, U-Mo-Ti 三元合金淬火与时效态组织仍为单相 γ -U(Mo,Ti) 的过饱和固溶体, 添加 Ti 元素对 U-Mo 合金有明显固溶强化效果, 使合金强度大幅提升: 其中屈服强度提升 30% 以上、抗拉强度提升 20% 以上而塑性略有降低。

2) 低温时效热处理可大幅提升 U-Mo-Ti 三元合金的力学性能: 相对淬火态合金抗拉强度提升约 50%, 延伸率则降低约 50%, 这是由于过饱和 γ -U(Mo, Ti) 固溶体分解析出纳米尺度 U_2 (Mo/Ti) 导致的。

3) 添加微量 Al 元素, 促使 U-Mo-Ti-Al 四元合金中形成高温稳定的富钛与富铝的多元复合金属间化合物, 其在基体与晶界上呈大量不规则连续分布, 对合金具有显著沉淀强化效果, 使 U-Mo-Ti-Al 四元合金的强度大幅提升, 而塑性降为零。

参考文献 References

[1] Allan Harte, Michael Atkinson, Albert Smith *et al.* *Acta Materialia*[J], 2020, 194: 257

[2] Li Zhutie(李铸铁), Zhao Zhiguo(赵志国), Shi Dandan(史丹丹) *et al.* *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2019, 44(1): 118

[3] Dai Shuai, Wang Feng, Ma Dezhi *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(12): 2416

[4] Li Hongying(李红英), Wang Xiaoyu(王小雨), Yu Weichen(余玮琛) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(11): 2187

[5] Xu Xiaojing(许晓静), Zhu Jinxin(朱金鑫), Yang Fan(杨帆) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2016, 37(12): 36

[6] Caleb Massey, Philip Edmondson, Kinga Unocic *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2020, 553: 152 105

[7] Gao Wenlin(高文林), Wang Xiangjie(王向杰), Li Guoai(李国爱) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 2937

[8] Li Shufeng(李树丰), Zhang Xin(张鑫), Pan Deng(潘登) *et al.* *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2018, 32(11): 843

[9] Huang Rui(黄瑞), Wang Huanrong(王焕荣), Liu Junliang(刘俊亮) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2017, 29(8): 684

[10] Pellizzari Massimo, Cipolloni Giulia. *Materials*[J], 2020, 13(11): 2602

[11] Zhan Xin(展鑫), Wang Guowei(王国伟), Tan Liming(谭黎明) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(3): 612

[12] Xie Rui(谢锐), Lv Zheng(吕铮), Wang Qing(王晴) *et al.* *New Technology and New Process*(新技术新工艺)[J], 2019(3): 7

[13] Douglas Burkes, Amanda Casella, Andrew Casella *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2017, 486: 222

[14] Chen Jiangang(陈建刚), Yin Changgeng(尹昌耕), Liu Yunming(刘云明) *et al.* *Nuclear Science and Engineering*(核科学与工程)[J], 2016, 36(6): 771

[15] Xiao Hongxin, Tang Rui, Tian Xiaofeng *et al.* *Chinese Physics Letters*[J], 2014(31): 047 101

[16] Li Lin(李林), Wang Shun(王顺). *Construction Machinery and Equipment*(工程机械)[J], 2020, 51(7): 96

[17] Yang Kun, Xie Hualong, Sun Cong *et al.* *Materials*[J], 2019, 23: 3839

[18] Kim Yeon Soo, Hofman G L, Robinson A B *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2012, 427: 233

Effect of Ti/Al Alloying on Microstructure and Mechanical Properties of U-5.5Mo Alloy

Wang Zhenhong^{1,2}, Zhang Litong¹, Deng Hongzhang², Chen Dong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Jiayou 621908, China)

Abstract: Ti/Al was introduced into U-5.5Mo alloy by induction melting, and a new alloy U-Mo-Ti/Al was obtained in this way. Its microstructures and properties were controlled by quenching and heat treatment of aging. The relationship between the composition, distribution and properties of precipitates was analyzed, the effect of Ti/Al alloy elements on the mechanical properties of U-5.5Mo alloy was investigated as well. It is found that adding trace element Ti has obvious effect of solution strengthening on the alloy of U-5.5Mo. The mechanical properties of U-Mo-Ti ternary alloy can be greatly improved by low temperature aging. It can promote the formation of stable multi-component intermetallic compounds rich in titanium and aluminum in U-Mo-Ti-Al quaternary alloy under high temperature by adding trace element Al, multitudes of irregular continuous distribution of the trace element in the matrix and grain boundary have significant precipitation strengthening effect on the alloy, as a result, the strengthen of U-Mo-Ti-Al quaternary alloy is greatly improved while the plasticity almost decreases to zero.

Key words: aging treatment; solution strengthening; precipitation strengthening; mechanical properties

Corresponding author: Wang Zhenhong, Researcher, Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Jiayou 621908, P. R. China, Tel: 0086-816-3626860, E-mail: ZHongWang_CAEP@126.com