

Nb、Ta 和 W 元素对铸造高温钛合金组织及性能的影响

毛浚鉴^{1, 2, 3}, 赵军^{2, 3}, 谭毅¹, 刘时兵^{2, 3},
史昆^{2, 3}, 张志勇^{2, 3}, 刘田雨^{2, 3}, 闫平^{2, 3}

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024;
2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;
3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 以Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-W铸造高温钛合金体系为研究基础, 通过正交试验的方法, 探究了Nb、Ta和W元素对合金组织及性能的影响。通过正交试验分析结果可知, Nb、Ta和W元素对合金组织均具有细化效果, 其对 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响大小顺序为: Ta>Nb>W。此外, 进一步探讨了Nb、Ta和W元素对合金室温及高温拉伸性能的影响规律, 并结合合金随钼当量的变化趋势, 最终确定该合金体系中Nb、Ta和W元素的优选含量配比分别为0.8wt.%、0.9wt.%及0.8wt.%, 获得了较好的700℃时的力学性能, 其中 $R_m=571.5$ MPa、 $R_{p0.2}=349$ MPa、 $A=6\%$ 和 $Z=10\%$ 。

关键词: 铸造高温钛合金; 正交试验; 铸态组织; 拉伸性能

作者简介:

毛浚鉴(1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸造高温钛合金的制备。E-mail: msco1027@163.com

通信作者:

赵军, 男, 研究员。E-mail: 13940026855@163.com;
谭毅, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。E-mail: lnsolar@dlut.edu.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1065-10

基金项目:

辽宁省科技计划联合计划(2023JH2/101700048)。

收稿日期:

2025-04-23 收到初稿,
2025-05-20 收到修订稿。

钛合金具有比强度高、比刚度高和耐高温等优异的综合性能, 被广泛用于航空、航天结构件及多种军工型号配套铸件^[1-3]。然而, 随着航空航天领域的发展, 除要求材料具有低密度和高强度外, 还要求其耐更高的温度, 尤其是针对700℃下应用的铸造高温钛合金。

国内外对于600℃以下应用传统高温钛合金发展得相对成熟, 已实现工程化应用, 如: 美国和英国以Ti-1100和IMI-834变形高温钛合金作为基础, 已经开发出600℃应用的铸造高温钛合金, 并铸造成形构件作为飞行器高温部位结构材料^[4-6]。但是目前传统高温合金存在一个致命的问题, 即使用温度不能超过600℃, 因为在Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si体系基础上固溶强化、 α_2 和硅化物析出相强化基本已达极限, 若进一步提高合金化程度难以保证最基本的热稳定性要求^[7]。目前我国针对600℃以上新型高温钛合金的研究也取得了一定的进展, 其基本思路是向其中加入更高含量的 β 稳定元素Mo、W、Nb和Ta等, 例如Ti65^[8]、Ti650^[9]、Ti750^[10]和BTi-6431S^[11]合金等。通过增加合金化元素, 这些新型高温钛合金的工作温度可以提高到650~700℃。但是该合金体系大多属于变形合金, 对铸造下应用的合金体系急需开展相关研究。

Mo元素作为强 β 稳定元素, 调控余地依然不足, 因为需要探寻其他 β 稳定元素的添加及调控。Nb和Ta作为同晶 β 稳定元素与 β -Ti具有相同的晶体结构, 并且能够在 β 相中无限固溶。王敏等人^[12]通过制备Ti-8Mo-2Zr、Ti-8Mo-4Nb-2Zr和Ti-8Mo-4Nb-2Zr-2Ta(at.%)钛合金, 研究了Nb和Ta元素的添加对合金显微组织、拉伸性能和变形机制的影响, 结果表明, β 相晶粒尺寸随着Nb和Nb+Ta元素的添加逐步减小, Nb和Ta元素添加产生的细晶强化和固溶强化效应进一步提高了合金的强度。通过Nb和Ta元素来替代Mo, 改变了 α_2 相的析出行为和相应的力学性能, 促进了Ti65等高温钛合金的发展^[13-14]。W元素添加是俄罗斯高温钛合金设计的亮点, 其在提高合

金高温强度及抗蠕变性能方面具有积极的作用。Xu等人^[15]研究了W元素的添加对Ti-6.5Al-2Sn-4Hf-2Nb合金的影响,结果表明,W元素的加入细化了 α 片层组织,增加了 β 相的体积分数,且随着W的加入可以提高室温和高温(650℃)屈服强度。

因此本课题组以Ti65合金为基础,经过前期的试验探索,最终确定选用Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-W系铸造高温钛合金,开展700℃下铸造高温钛合金相关研究,主要针对Nb、Ta和W元素采用正交试验的设计方法,并通过极差分析和影响因素主次分析手段来探究Nb、Ta和W三种元素对该体系铸造高温钛合金组织及力学性能的影响,确定元素综合添加的优选范围,为后续试验和优化打下基础。

1 试验材料及方法

本试验在Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-W系钛合金基础上,针对Nb、Ta和W元素设置三因素三水平正交试验。运用正交试验方法,设计正交试验方案,具体试验方案及各个编号对应计算的钼当量[Mo]eq见表1。其中Nb、Ta和W元素对钼当量[Mo]eq的增量表示为:

$$\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}} = \% \text{Ta}/4 + \% \text{Nb}/3.3 + \% \text{W}/2。$$

表1 正交试验方案
Tab. 1 Orthogonal test scheme

编号	因素			[Mo]eq	Δ [Mo]eq
	Nb/wt.%	Ta/wt.%	W/wt.%		
1	0.4	0.3	1.2	1.80	0.80
2	0.4	0.9	0.4	1.55	0.55
3	0.4	1.5	0.8	1.90	0.90
4	0.8	0.3	0.4	1.52	0.52
5	0.8	0.9	0.8	1.87	0.87
6	0.8	1.5	1.2	2.22	1.22
7	1.2	0.3	0.8	1.84	0.84
8	1.2	0.9	1.2	2.19	1.19
9	1.2	1.5	0.4	1.94	0.94

原料均采用各元素单质进行熔炼,通过“汉堡包”的加料方式以确保熔炼的均匀性。原料通过15 kg真空磁感应悬浮熔炼炉进行熔炼,采用重力浇注的方法将熔液浇注到石墨型壳中,制备尺寸为 $\Phi 70$ mm \times 300 mm的铸锭。真空磁感应悬浮熔炼坩埚外设置磁感应线圈,当给磁感应线圈三相低频交流电时,搅拌器就产生旋转磁旋磁场,由于该磁场的作用,在金属熔液内感生电动势,从而产生感应电流。合金熔液在铜坩埚内受到洛伦兹力的作用而产生悬浮效果,熔炼过程中减少了坩埚壁的接触,保证了合金的熔炼的纯

度。熔炼时初始熔炼功率为50 kw,使原料均匀受热,然后逐步提高熔炼功率,保持功率在150~200 kW。为防止合金氧化,在氩气环境中熔炼两次,保证合金成分均匀性。

在铸锭的中心横截面位置取屑,并使用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICAPPRO X ICP-OES Duo)分析合金的成分,各组试验的合金实测成分如表2所示;在铸锭1/4半径处取14 mm \times 14 mm \times 10 mm金相块,使用金相显微镜(GX51OLYMPUS)及扫描电子显微镜(ZEISS EVO/MA25)观察铸锭的微观组织形貌。用于组织观察的样品需要经180#、400#、800#、1 500#和2 000#砂纸打磨,并用1.5 μ m金刚石抛光膏进行抛光处理后,利用酒精超声清洗30 min并烘干,采用Kroll试剂腐蚀10~15 s。Kroll试剂配比为:1 mL氢氟酸、2~6 mL硝酸和100 mL水。通过Image J pro分析软件计算 α 片层宽度及 β 晶粒尺寸。

表2 试验实测成分含量表
Tab. 2 Contents table of experimental measured components

编号	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nb	Ta	W	w_B /%
1	83.04	5.88	3.87	3.32	1.00	0.37	0.39	0.32	1.11	
2	83.74	6.09	3.96	3.30	1.02	0.42	0.38	0.83	0.36	
3	83.64	5.94	3.85	3.37	1.01	0.37	0.39	1.53	0.74	
4	82.80	5.84	3.95	3.36	1.01	0.40	0.77	0.28	0.37	
5	84.02	5.92	3.88	3.33	1.00	0.38	0.77	0.94	0.74	
6	83.04	5.88	3.94	3.37	0.99	0.40	0.79	1.46	1.13	
7	82.04	5.78	3.96	3.460	1.00	0.40	1.14	0.28	0.74	
8	83.24	5.88	3.85	3.39	0.99	0.40	1.19	0.87	1.17	
9	82.26	5.97	3.90	3.42	1.02	0.38	1.18	1.54	0.34	

使用电子万能试验机(INSTRON5982)对加工后的标准拉伸试棒进行室温及高温(600℃、700℃)拉伸试验,试样为标准 $\Phi 6$ mm的拉伸试棒,拉伸试棒的尺寸如图1所示,用于拉伸试验的试棒均在铸态的铸锭底部取得,并通过X射线检测,确保拉伸试棒无明显铸造缺陷。为了避免偶然性,每组合金测试二次,并取二次拉伸试验的平均值。

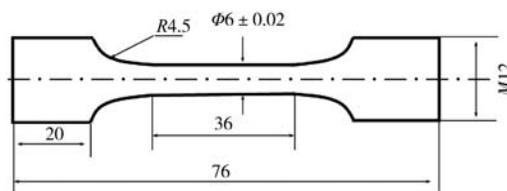


图1 拉伸试棒示意图

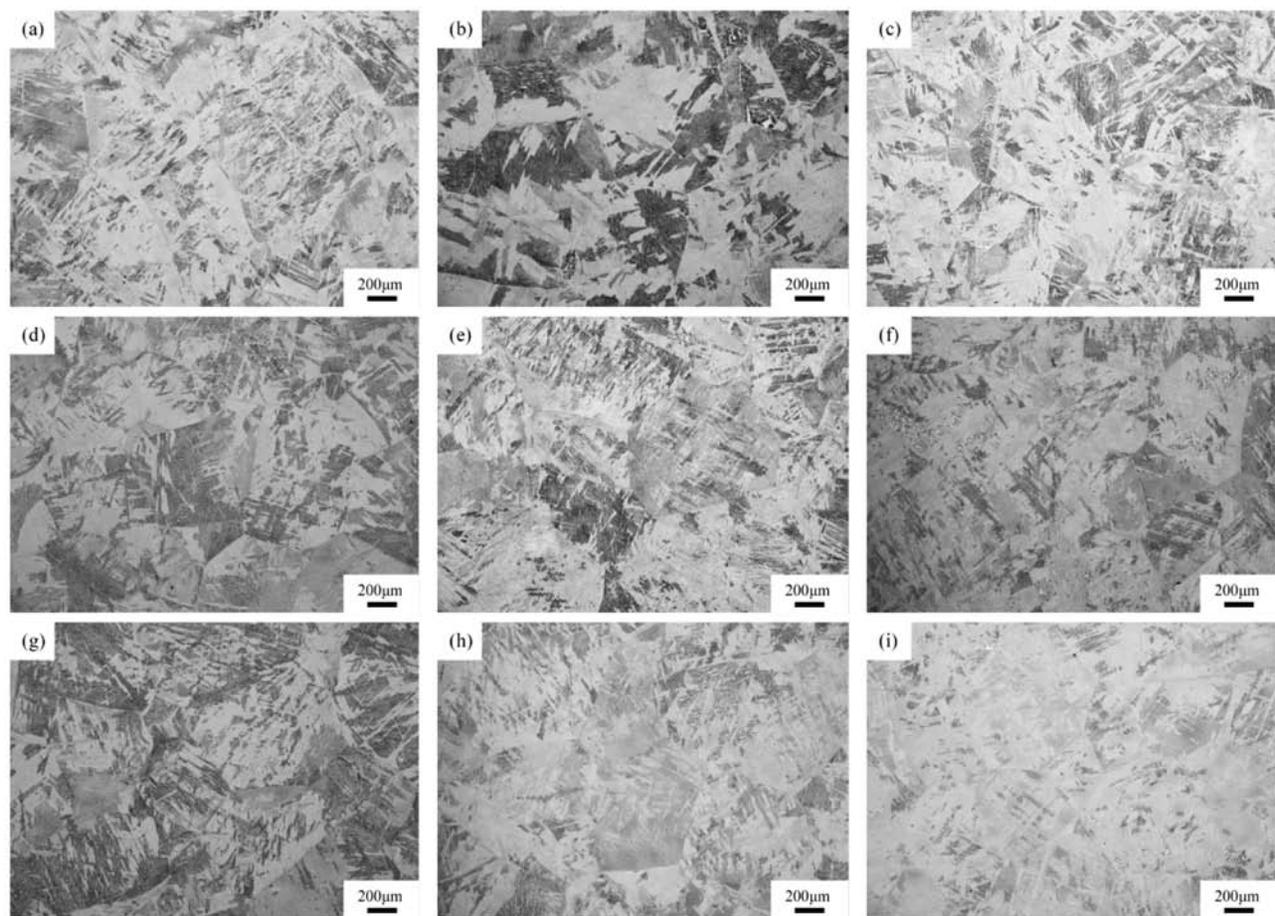
Fig. 1 Schematic diagram of the tensile test bar

2 结果与讨论

2.1 Nb、Ta和W元素对合金铸态组织的影响

图2为各组试验合金50倍下金相组织，图3为各组试验合金的扫描电镜图，由图2(a)-(i)可以看出，

不同Nb、Ta和W元素配比下的合金的铸态组织均为魏氏组织，均由粗大的 β 晶粒及 α 片层组成。 β 晶粒内部 α 片层组织取向存在交叉附带，有一定的网篮结构的特性。



(a) - (i) 分别对应合金1[#]-9[#]

图2 试验合金的金相组织图

Fig. 2 Metallographic microstructures of the experimental alloys

通过Image J pro软件采用划线法测量各组试验 β 晶粒尺寸及 α 片层间距，多次测量取平均值。利用正交试验的极差分析方法，分析Nb、Ta和W元素对 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响。因素的每个水平参加了几次试验，就会导致几个试验结果。把每个因素的同一水平导致的试验结果相加，除以该因素的水平数，就可得出每一因素同一水平导致结果的均值 k 。均值 k 用来表示该水平对指标的综合作用，同一因素不同水平的指标均值最大值与最小值之差即是水平极差 Δk 。极差 Δk 反映了试验中各因素对性能指标的作用大小。 Δk 大表明该因素对指标影响大， Δk 小表明对指标影响小。

图4为合金元素对 β 晶粒尺寸及 α 片间距的影响。由图可知，Nb、Ta和W对合金 β 晶粒尺寸及 α 片层间距均具有一定的细化效果。Nb、Ta和W元素的加入会使合金熔体的比界面能下降，降低形核功，提高形核率，促使 α 相向更多的方向上结晶而降低 α 片层间距。另外，Nb、Ta和W作为 β 稳定元素会在 β 相中富集，进而阻碍晶界的运动降低晶粒的长大速度，进而细化原始 β 晶粒^[16-17]。

根据正交极差分析可知，不同Nb、Ta和W元素含量下合金 β 晶粒尺寸极差 Δk 分别为：50.78 μm 、57.5 μm 和19.39 μm ；合金 α 片层间距极差 Δk 分别为：0.18 μm 、0.32 μm 和0.07 μm 。因此对比极差 Δk 可知，合金元素

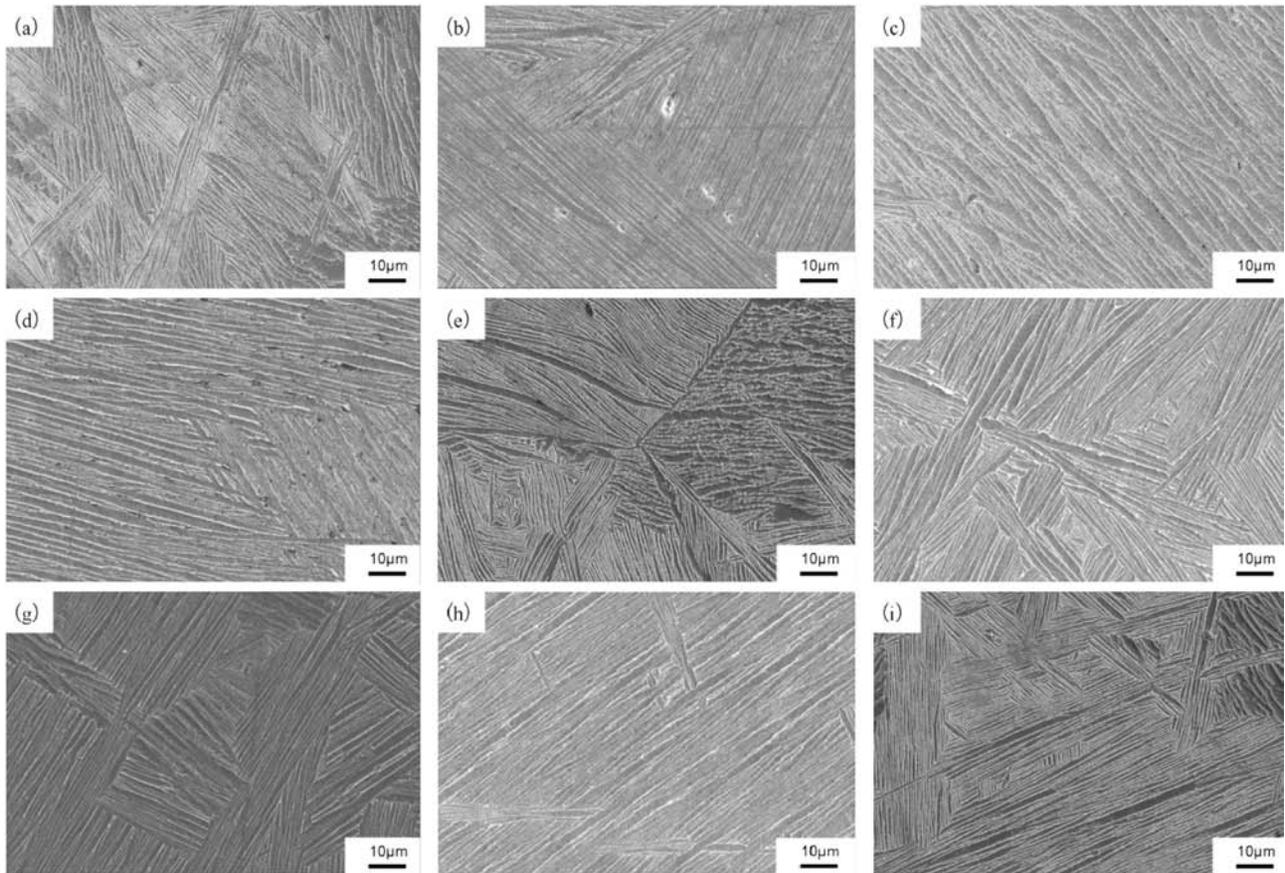
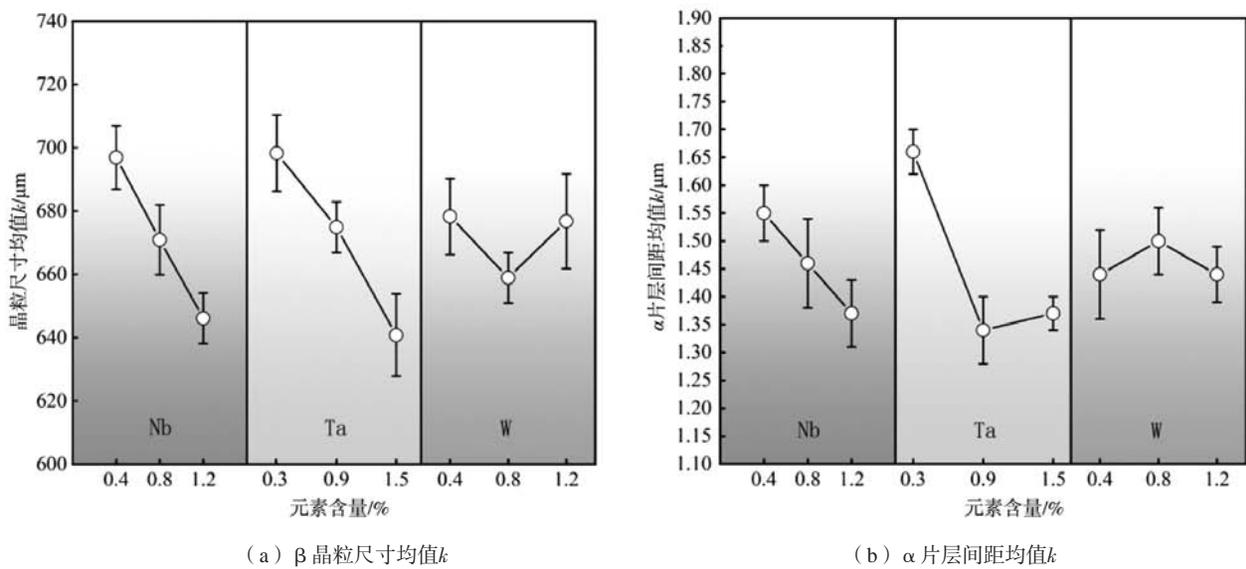
(a) - (i) 分别对应合金1[#]-9[#]

图3 试验合金的扫描电镜图

Fig. 3 SEM images of the experimental alloys

图4 合金元素对 β 晶粒尺寸均值 k 及 α 片层间距均值 k 的影响
Fig. 4 Influences of alloying elements on the mean spacing k of α layer and the mean grain size k of β grains

Nb、Ta和W对 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响大小顺序为：Ta>Nb>W。根据正交分析结果可知，Ta与Nb

元素的细化效果远大于W元素。从原子半径考虑，是由于Ta和Nb原子半径要比W原子半径大，进而在晶格

中造成的扰动大,阻碍晶界运动,细化 β 晶粒及 α 相更显著;从原子扩散速率考虑,有相关研究表明^[18],Ti-Nb与Ti-Ta体系的扩散激活能要小于Ti-W,激活能越低,扩散速率越快,因此Nb和Ta元素的扩散速率要大于W元素,这也是Ta与Nb元素的细化效果远大于W元素的原因。

2.2 Nb、Ta和W对合金力学性能的影响

2.2.1 Nb、Ta和W对合金室温力学性能的影响

图5为合金元素对室温拉伸性能的影响。由图5可知,随着Nb或W元素含量的升高,合金室温抗拉强度及屈服强度呈现上升的趋势,而室温伸长率及断面收缩率则呈现下降的趋势。这主要由于Nb和W元素的加入会产生固溶强化效果,增加了晶格畸变,阻

碍了位错的运动,进而使得室温强度升高;此外Nb元素的加入细化了合金组织,会产生一定的细晶强化效果,使得抗拉强度及屈服强度升高,然而随着Nb和W含量的升高,合金位错受阻严重,难以通过滑移交滑移释放应力,进而使得合金塑性下降,随着Ta元素含量的升高,室温抗拉强度及屈服强度呈现下降的趋势,而室温伸长率及断面收缩率则呈现上升的趋势。有研究表明,Ta的掺杂会使得Ti-Ta键强度下降约5%,这会削弱晶格对位错的阻力,会使得强度下降^[19],但是随着Ta含量的升高,晶粒不断细化,此时细晶强化起到主要作用,进而出现强度升高现象。然而由于Ta明显地细化组织的效果且较强的 β 相稳定作用,会产生细晶强化作用,且Ta对 α 片层的细化效果最明显,细化的 α 相是提高韧性的的重要因素, α 相

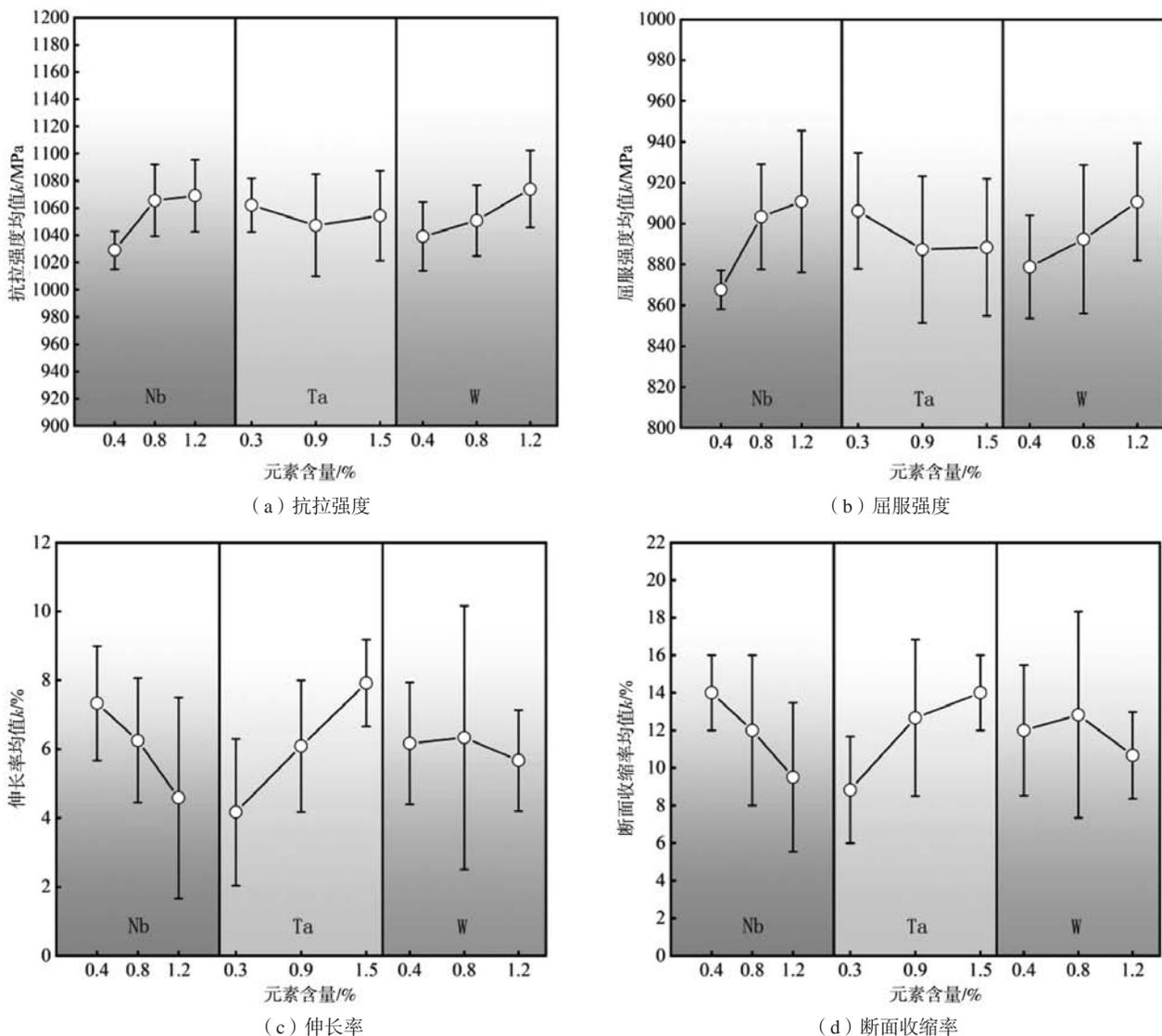


图5 合金元素对合金室温下拉伸性能的影响

Fig. 5 Influences of alloying elements on tensile properties of the alloys at room temperature

和 β 相交错排列,形成了强结构。层状 α 相阻碍位错的运动,导致位错在 α/β 相界面处聚集,产生较高的峰值应力。断裂发生时,微裂纹与 α 晶层相遇。预先存在的密集位错结构和大量亚稳相促进了纳米 α 相的析出,从而适应塑性变形,延缓裂纹萌生^[20-21],使得塑性提升。

根据正交极差分析可知,不同Nb、Ta和W元素含量下合金室温抗拉强度极差 Δk 分别为:40 MPa、14.83 MPa和37.83 MPa;室温屈服强度极差 Δk 分别为:43.17 MPa、18.83 MPa和31.83 MPa;室温伸长率极差 Δk 分别为:2.75%、3.75%和0.67%;室温断面收缩率极差 Δk 分别为:4.5%、5.17%和2.17%。因此对比极差 Δk 可知,合金元素Nb、Ta和W对室温抗拉强度及屈服强度的影响大小顺序为:Nb>W>Ta;对室温伸长

率及断面收缩率的影响大小顺序为:Ta>Nb>W。

2.2.2 Nb、Ta和W对合金高温力学性能的影响

图6为合金元素对合金700℃下拉伸性能的影响。根据正交极差分析可知,不同Nb、Ta和W含量下合金700℃高温抗拉强度均值 Δk 分别为:20.50 MPa、2.17 MPa和25.83 MPa;合金700℃高温屈服强度均值 Δk 分别为:6.17 MPa、4.67 MPa和4.17 MPa;合金700℃高温伸长率均值 Δk 分别为:0.67%、0.42%和1.33%;合金700℃高温断面收缩率均值 Δk 分别为:0.5%、0.5%和1.83%。因此对比极差 Δk 可知,合金元素Nb、Ta和W对700℃下高温抗拉强度及伸长率的影响大小顺序为:W>Nb>Ta;对700℃下高温屈服强度的影响大小顺序为:Nb>Ta>W;对700℃下高温断面收

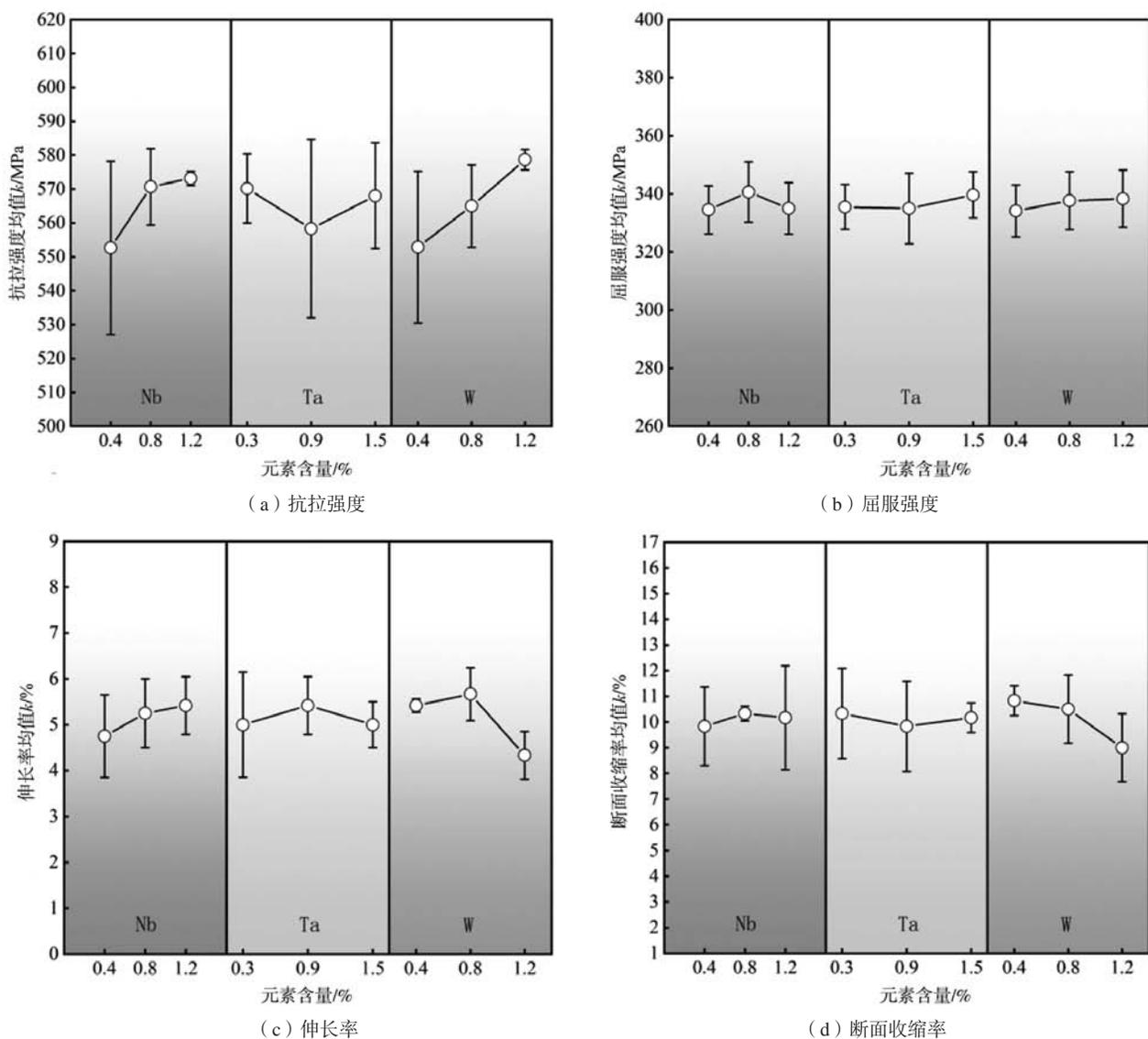


图6 合金元素对合金700℃下拉伸性能的影响

Fig. 6 Influences of alloying elements on tensile properties of the alloys at 700 °C

缩率的影响大小顺序为： $W > Nb = Ta$ 。

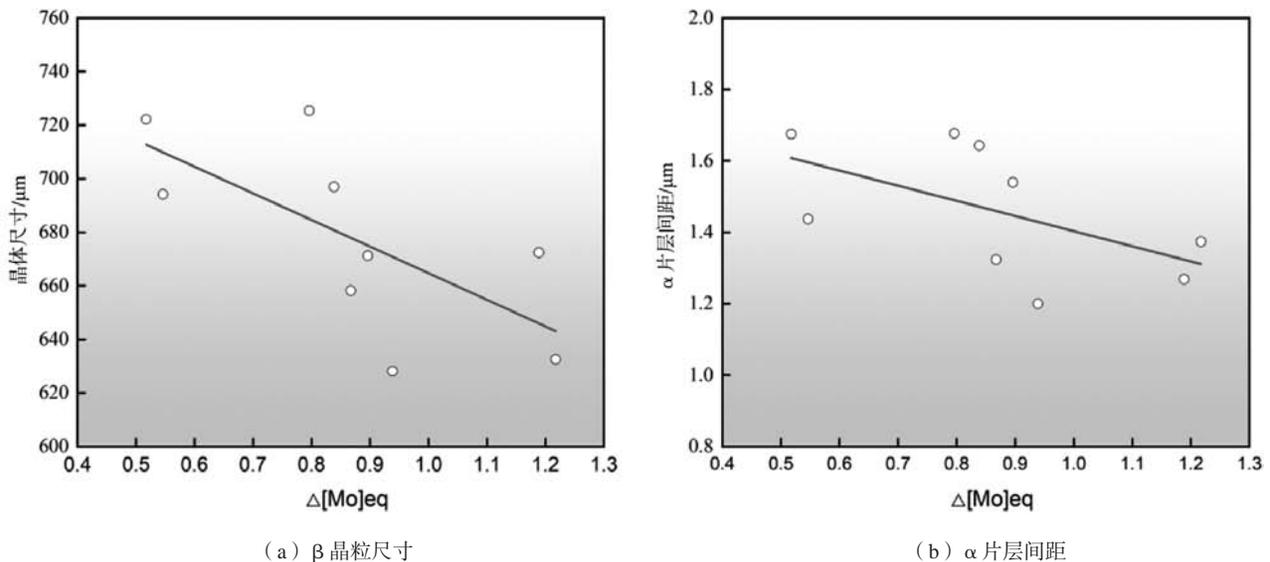
随着Nb和W元素含量的升高，合金700℃抗拉强度呈现上升的趋势，Nb元素主要起到固溶强化作用，使得高温下合金强度升高、塑韧性下降。W元素对抗拉强度的影响最大；随着W元素含量的升高，合金700℃高温伸长率则呈现下降的趋势。这是由于W元素的高温强化效果大于Nb和Ta，W元素熔点高（3422℃），使得其在高温下仍然能够保持较好的强化效果，W元素的自扩散系数低，可以有效地抑制原子的迁移，且W会在 α/β 相界面偏聚，能进一步提高热稳定性，但是W元素的偏析会削弱晶界结合力，进而使得塑性下降。Ta元素对合金高温抗拉强度呈现先下降后上升的趋势，与室温下效果一致。但是当1.5wt.%的Ta元素添加时，高温伸长率呈现下降趋势，主要因为在高温下会提高Ta元素的扩散速率，Ta倾向于晶界处偏聚，进而降低晶界的结合能，当Ta元素提

高至1.5wt%时，合金伸长率呈现下降趋势。

2.3 $\Delta[Mo]_{eq}$ 对合金组织性能的影响

上文运用正交分析的方法研究了Nb、Ta和W元素对组织及性能的影响大小，能够基本确定合金元素的最优组合，但是合金设计除了考虑各 β 稳定元素（Nb、Ta和W）的作用外，还需要考虑元素总添加量（用 $\Delta[Mo]_{eq}$ 值来表征）对合金组织与性能影响，综合确定合金元素的最优搭配。

图7为 $\Delta[Mo]_{eq}$ 对合金 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响，如图可知，随着 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的增加，合金 β 晶粒尺寸及 α 片层间距均呈现下降的趋势。 $\Delta[Mo]_{eq}$ 表征的是Nb、Ta和W元素对钼当量的增量， $\Delta[Mo]_{eq}$ 越大，则Nb、Ta和W元素的综合含量就会越高，因此随着 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的升高， β 晶粒尺寸及 α 片层间距整体上均呈现下降的趋势。



(a) β 晶粒尺寸

(b) α 片层间距

图7 $\Delta[Mo]_{eq}$ 对合金 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响

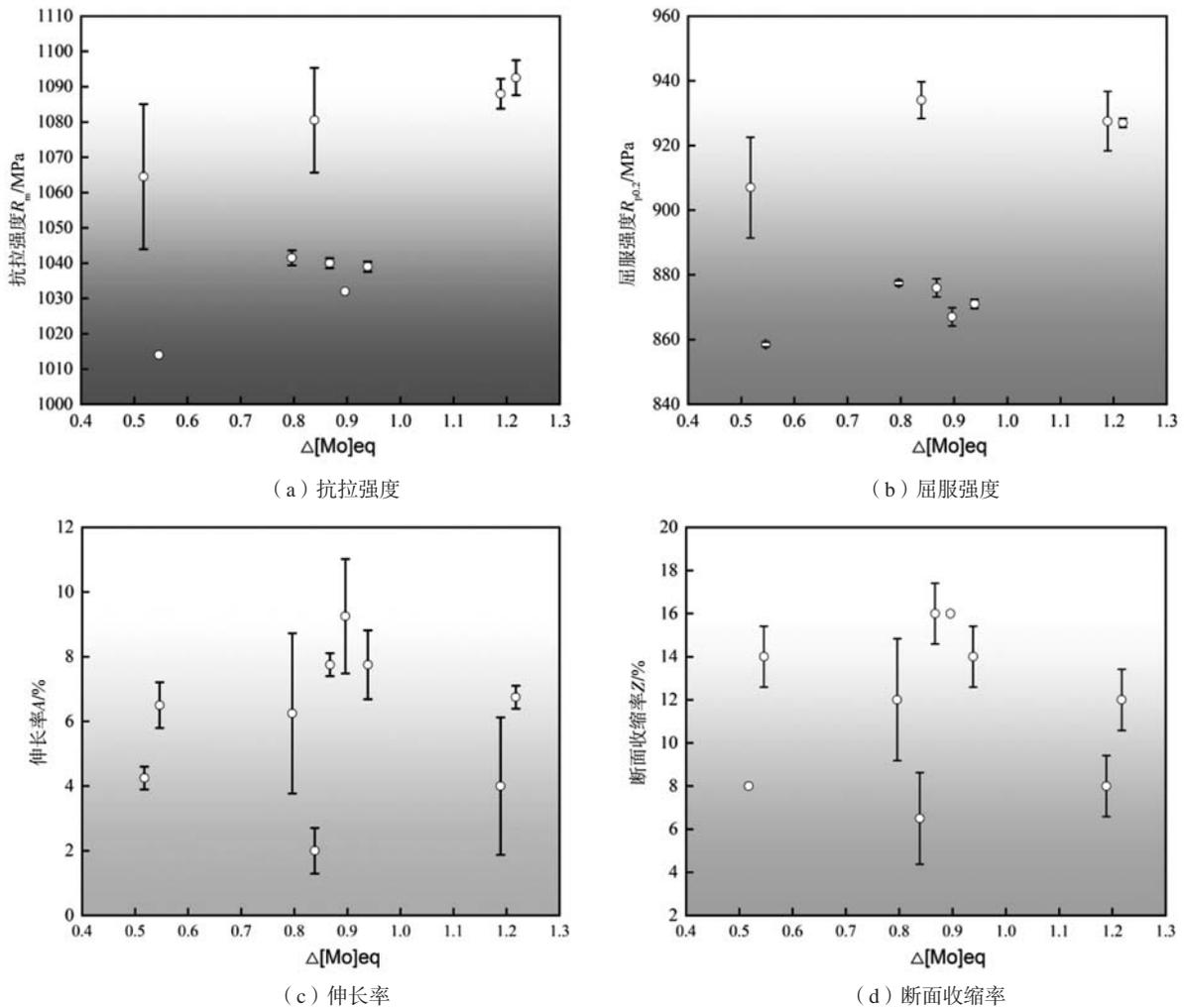
Fig. 7 Effect of $\Delta[Mo]_{eq}$ on β grain size and α layer spacing of the alloy

图8为 $\Delta[Mo]_{eq}$ 对合金室温下拉伸性能的影响。由图可知，在室温下，从整体来看，随着 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的增加，合金的室温抗拉强度和屈服强度随之呈现上升的趋势。然而伸长率及断面收缩率在一定范围内呈现回归变化，当 $\Delta[Mo]_{eq}$ 在0.8到1.0范围内合金展现了相对较好的室温塑性。

图9为 $\Delta[Mo]_{eq}$ 对合金700℃下拉伸性能的影响。由图可知，在700℃下，从整体来看，随着 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的增加，合金的700℃下抗拉强度及屈服强度随之呈现上升的趋势，然而700℃下伸长率及断面收缩率，随着 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的增加，则呈现下降的趋势。当

$\Delta[Mo]_{eq}=0.84$ 时，对应7[#]合金，其 $R_m=572.5$ MPa、 $R_{p0.2}=333.5$ MPa、 $A=6\%$ 和 $Z=12\%$ ；当 $\Delta[Mo]_{eq}=0.87$ 时，对应5[#]合金，其 $R_m=571.5$ MPa、 $R_{p0.2}=349$ MPa、 $A=6\%$ 和 $Z=10\%$ ；当 $\Delta[Mo]_{eq}=0.94$ 时，对应9[#]合金其 $R_m=571.5$ MPa、 $R_{p0.2}=344.5$ MPa、 $A=5.5\%$ 和 $Z=10.5\%$ 。综上所述，初步给出 $\Delta[Mo]_{eq}$ 的优选范围应该在0.8~1.0之间。

综合前文相关研究，基本确定5[#]合金为最优配比，因此最终确定该体系中Nb、Ta和W元素的优选含量配比分别为0.8wt.%、0.9wt.%及0.8wt.%，其室温性能为： $R_m=1\ 040$ MPa、 $R_{p0.2}=876$ MPa、 $A=7.75\%$ 、

图8 $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ 对合金室温下拉伸性能的影响Fig. 8 Effect of $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ on tensile properties of the alloy at room temperature

$Z=16\%$ ；700℃高温性能为： $R_m=571.5\text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2}=349\text{ MPa}$ 、 $A=6\%$ 和 $Z=10\%$ 。展现了良好的综合力学性能。

4 结论

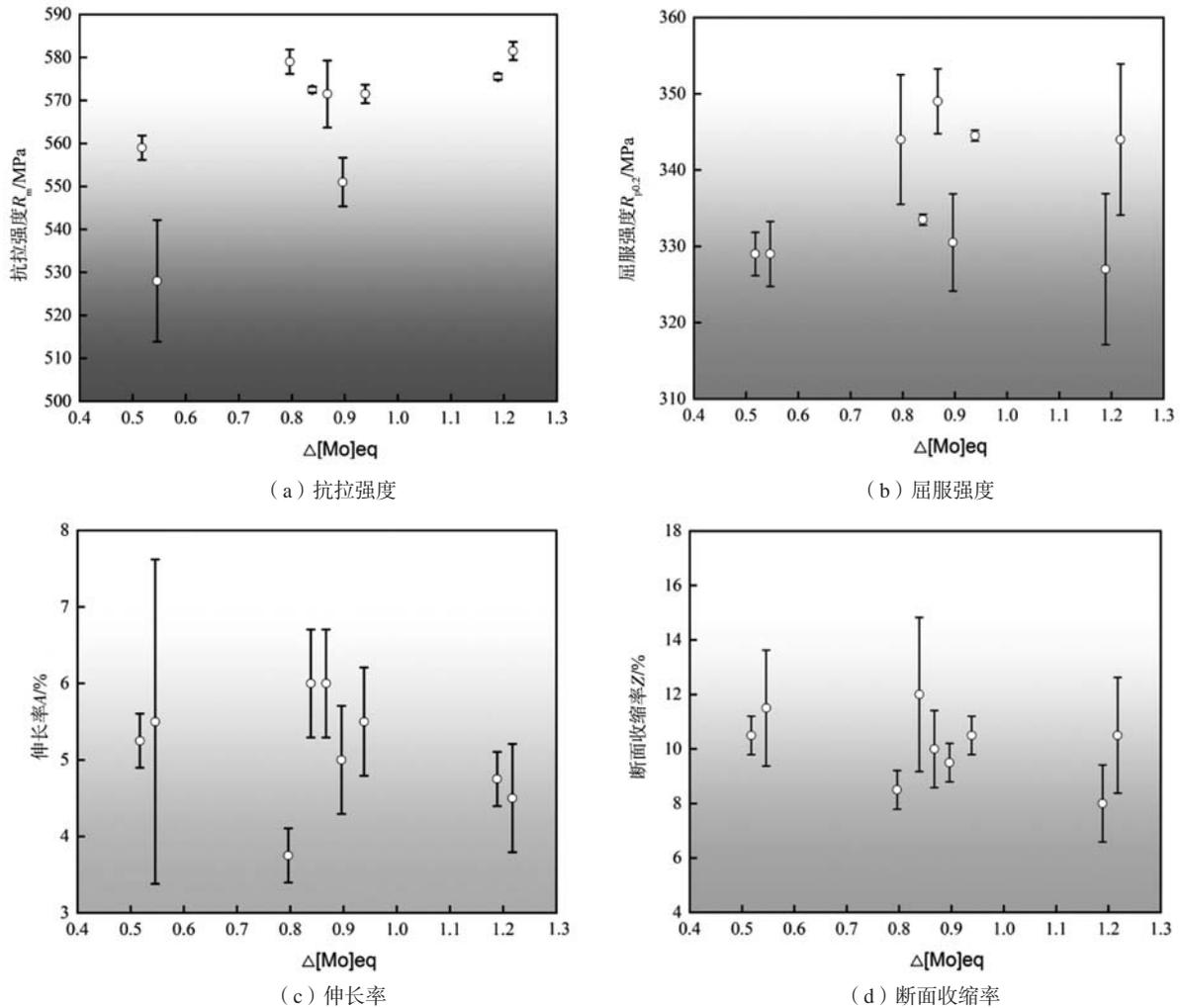
(1) Nb、Ta和W元素对合金组织均具有细化效果，随着 $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ 的升高， β 晶粒尺寸及 α 片层间距呈现下降趋势，Nb、Ta和W对 β 晶粒尺寸及 α 片层间距的影响大小为：Ta>Nb>W。

(2) Nb、Ta和W元素对室温抗拉强度及屈服强度的影响大小为：Nb>W>Ta；室温伸长率及断面收缩率的影响大小为：Ta>Nb>W，随着 $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ 的增加，合金的室温抗拉强度和屈服强度随之呈现上升的趋势。然而伸长率及断面收缩率在一定范围内呈现回归变

化。

(3) Nb、Ta和W元素对700℃下高温抗拉强度及伸长率的影响大小顺序为：W>Nb>Ta；对700℃下高温屈服强度的影响大小顺序为：Nb>Ta>W；对700℃下高温断面收缩率的影响大小顺序为：W>Nb=Ta。随着 $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ 的增加，合金的700℃下抗拉强度及屈服强度随之呈现上升的趋势，然而700℃下伸长率及断面收缩率，随着 $\Delta[\text{Mo}]_{\text{eq}}$ 的增加，则呈现下降的趋势。

(4) 最终确定该体系中Nb、Ta和W元素的优选含量配比分别为0.8wt.%、0.9wt.%及0.8wt.%，其室温性能为： $R_m=1\ 040\text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2}=876\text{ MPa}$ 、 $A=7.75\%$ 和 $Z=16\%$ ；700℃高温性能为： $R_m=571.5\text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2}=349\text{ MPa}$ 、 $A=6\%$ 和 $Z=10\%$ 。展现了良好的综合力学性能。

图9 Δ [Mo]eq对合金700 °C下拉伸性能的影响Fig. 9 Effect of Δ [Mo]eq on tensile properties of the alloy at 700 °C

参考文献:

- [1] ZHANG X, CHEN Y, HU J. Recent advances in the development of aerospace materials [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [2] 张新, 刘鸿羽, 车昶, 等. 钛合金低成本成形技术研究进展 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1141-1148.
- [3] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用 [J]. 铸造, 2014, 63 (11): 1114-1117.
- [4] 萧今声, 许国栋. 提高高温钛合金性能的途径 [J]. 中国有色金属学报, 1997 (4): 100-108.
- [5] 霍东兴, 梁精龙, 李慧, 等. 钛合金研究及应用进展 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (10): 2065-2066, 2080.
- [6] 刘奇先, 刘杨, 高凯. 钛合金的研究进展与应用 [J]. 航天制造技术, 2011 (4): 45-48, 55.
- [7] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景 [J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 1-26.
- [8] 武朋辉, 焦海峰, 汪国栋, 等. β/α 转变温度附近恒温处理对铸造Ti65合金显微组织的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (12): 1680-1685.
- [9] 卢斌, 杨锐. 热处理对650 °C短时用Ti650板材显微组织和力学性能的影响 [J]. 宇航材料工艺, 2007, 37 (6): 77-81.
- [10] 陈子勇, 刘莹莹, 靳艳芳, 等. 航空发动机用耐650 °C高温钛合金研究现状与进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (19): 22-30.
- [11] 王小翔, 王伟琪, 马鸿海. 700 °C时高温高强BTi-6431S合金的组织与力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (S1): 792-795.
- [12] 王敏, LU Liming, 王长浩, 等. 添加铌和钽对TiMoZr合金变形机制和拉伸性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2022, 46 (1): 14-18.
- [13] LI J, CAI J, XU Y, et al. Influences of thermal exposure on the microstructural evolution and subsequent mechanical properties of a near- α high temperature titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 774: 138934.

- [14] JIA W, ZENG W, LIU J, et al. Influence of thermal exposure on the tensile properties and microstructures of Ti60 titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530: 511–518.
- [15] XU Y, FU Y, LI J, et al. Effects of tungsten addition on the microstructural stability and properties of Ti-6.5Al-2Sn-4Hf-2Nb-based high temperature titanium alloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 93: 147–156.
- [16] FU B, WANG H, ZOU C, et al. The effects of Nb content on microstructure and fracture behavior of near α titanium alloys [J]. *Materials & Design (1980–2015)*, 2015, 66: 267–273.
- [17] LI Y, FANG H, CHEN R, et al. Microstructure evolution and strength-toughness synergy mechanism in as-cast Ti-7Mo-4Al-3Nb-2Cr-2Zr-xTa alloy [J]. *Materials Characterization*, 2023, 201: 112919.
- [18] WANG K, LIU X, LIU T, et al. Investigation on diffusion kinetics of Ti-X binary systems at 1 300–1 500 °C [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 1684–1695.
- [19] KITASHIMA, T, KAWAMURA T. Prediction of oxidation behavior of near- α titanium alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2016, 124: 56–58.
- [20] QIU D, SHI R, ZHANG D, et al. Variant selection by dislocations during α precipitation in α/β titanium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2015, 88: 218–231.
- [21] LI P, SUN Q, XIAO L, et al. Tuning the morphology of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr alloy: From brittle to ductile fracture [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 769: 138487.

Influences of Nb, Ta and W Elements on the Microstructure and Properties of Cast High-Temperature Titanium Alloy

MAO Jun-jian^{1,2,3}, ZHAO Jun^{2,3}, TAN Yi¹, LIU Shi-bing^{2,3}, SHI Kun^{2,3}, ZHANG Zhi-yong^{2,3}, LIU Tian-yu^{2,3}, YAN Ping^{2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Equipment Casting Technology, Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd., China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd., China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Based on the Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-W cast high-temperature titanium alloy system, this paper explored the influences of Nb, Ta and W elements on the microstructure and properties of the alloy through orthogonal experiments. It can be known from the orthogonal experimental analysis results that the Nb, Ta and W elements all had refinement effects on the alloy microstructure. The order of their influence on the β grain size and the α lamination spacing was: Ta>Nb>W. In addition, the influence laws of Nb, Ta and W elements on the tensile properties at room temperature and high temperature were further discussed. Combined with the variation trend of the alloy with molybdenum equivalent, it was finally determined that the preferred content ratios of Nb, Ta and W elements in this system were respectively 0.8wt.%, 0.9wt.% and 0.8wt.%. It shows good comprehensive mechanical properties at 700 °C, with $R_m=571.5$ MPa, $R_{p0.2}=349$ MPa, $A=6\%$, and $Z=10\%$.

Key words:

cast high-temperature titanium alloy; orthogonal experiment; as-cast microstructure; tensile properties
