

Ti-75 合金的正交设计与强化机制

那晓菲¹, 王卫民², 李雷²

(1. 西部金属材料开发有限公司, 西安 710016; 2. 西安赛特金属材料开发有限公司, 西安 710016)

摘要: 采用正交设计的方法, 通过测定试验合金的力学性能、点阵常数、弹性模量, 系统研究了 Ti-Al-Mo-Zr 合金系中单一合金元素 Al、Mo、Zr 和 Al-Mo、Al-Zr、Mo-Zr 合金元素之间的交互作用对力学性能和显微组织的影响, 并给出了合金成分与力学性能间的定量关系式。

关键词: Ti-75 合金; 正交设计; 强化机制

中图分类号: TF 804.3 文献标志码: A

Orthogonal design and strengthening mechanism of Ti-75 alloy

NA Xiao-fei¹, WANG Wei-min², LI Lei²

(1. West Metal Material Co., Ltd., Xi'an 710016, China; 2. Xi'an Saite Metal Material Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The mechanical properties, lattice constant and elastic modulus of alloys were measured by using orthogonal experiment. The effects of Al, Mo, Zr elements and interactions of Al-Mo, Al-Zr and Mo-Zr on microstructure and mechanical properties of alloys were also studied. At last, equation between alloy constituent and mechanical properties was set up.

Key words: Ti-75 alloy; orthogonal design; strengthening mechanism

Ti-75 合金是一种 Ti-Al-Mo-Zr 系近 α 型钛合金, 是专门为舰船动力装置研制的中强、高韧、耐蚀、可焊的重要结构材料。Ti-75 的综合性能优于 TA5, 其板材、锻件的力学性能: R_m 700 MPa, $R_{p0.2}$ 630 MPa, A 13%, Z 35%, W_f 590 kJ/mm², 海水浸泡腐蚀率、缝隙腐蚀率、动态海水腐蚀率(流速 3 m/s)均为 0 mm/a; 焊接系数大于 0.9, 与船体钢电偶效果为 1.33。合金成型性好, 可以生产各种规格板材、锻件、管材和丝材, 用于换热设备中管、泵、阀等各种装备^[1]。本研究采用正交设计方法系统研究 Al、Mo、Zr 元素的强化作用和它们间的交互作用对合金力学性能与显微组织的影响规律, 给出合金成分与力学性能间的定量关系式, 并以此为依据优化设计合金成分。

1 实验

原材料选用二级海绵钛、一号纯铝, 原子级海绵锆以及含钼量为 58.5% 的铝-钼中间合金。按设计名

成分配制, 在 2H-25 真空自耗电弧炉两次熔炼而成。合金铸锭化学成分见表 1。

合金铸锭经 β 相区开坯锻造, 两相区终锻成 d18

表 1 合金铸锭的化学成分

Table 1 Chemical compositions of alloys (mass fraction, %)

Alloy No.	Al	Mo	Zr	Ti
0	—	—	—	Bal.
1	2.98	—	—	Bal.
2	—	3.10	—	Bal.
3	—	—	3.01	Bal.
4	2.95	3.08	—	Bal.
5	2.99	—	2.78	Bal.
6	—	3.00	2.89	Bal.
7	2.98	3.10	2.97	Bal.
8	1.98	2.12	2.08	Bal.
9	3.05	2.10	2.03	Bal.

8 号合金是为验证成分与性能的关系而设计的合金; 9 号合金是根据正交设计成分与性能关系式最终确定的 Ti-75 合金成分。

mm 棒材, 试样的热处理在电炉中进行。测试了棒材在室温下的拉伸性能、弹性模量、点阵常数等。点阵常数测试采用荷兰菲利普 APO-1700 自动 X 射线衍射仪, 用光学显微镜进行样品的组织观察, 室温拉伸性能在 MTS810 拉伸机上完成。

2 结果与分析

2.1 Al、Mo、Zr 元素对合金力学性能的影响

为了研究合金成分与力学性能之间的关系, 采用正交设计的方法, 选定 7 种合金进行试验, 正交设计试验及合金性能测试结果见表 2。

由表 1 铸锭化学分析结果可以看出: 所有试验合金主成分偏差均在允许范围之内, 故其成分波动对力学性能的影响可以忽略不计。回归处理时, 试验合金主成分含量直接采用了表 1 中的数据。对表 1、表 2 的数据进行回归处理, 得出以下成分—性能关系式:

$$R_m = 375.6 + 87.2X_1 + 84.6X_2 + 30.6X_3 - 12.4X_2X_1 - 6.8X_1X_3 - 2.1X_2X_3 + 2X_1X_2X_3 \quad (1)$$

$$R_{p0.2} = 278.5 + 104.5X_1 + 94.2X_2 + 36.3X_3 - 18.1X_2X_1 - 10.2X_1X_3 - 5.8X_2X_3 + 4.8X_1X_2X_3 \quad (2)$$

$$A = 35.4 - 5.5X_1 - 3.8X_2 - 1X_3 + 1.3X_2X_1 + 0.3X_1X_3 + 0.03X_2X_3 - 0.06X_1X_2X_3 \quad (3)$$

$$Z = 76.7 - 8.5X_1 - 2.5X_2 - 3.5X_3 + 2.6X_2X_1 + 1.3X_1X_3 + 1.1X_2X_3 - 0.4X_1X_2X_3 \quad (4)$$

$$W_f = 176.4 - 27.49X_1 - 1.96X_2 - 4.9X_3 + 7.84X_2X_1 + 2.94X_1X_3 + 4.9X_2X_3 - 2.94X_1X_2X_3 \quad (5)$$

将表 1 中 8、9 号合金成分代入式(1)~(5)中, 计算结果见表 3, 表 3 中也同时列出对比合金性能的实测值。

从表 3 可以看出, 计算得到的性能结果与实测结果基本一致, 表明在 Ti-Al-Mo-Zr 系合金中, 加入 Al、Mo、Zr 合金元素(都在 3%(质量分数)以内)对力学性能的影响可以用式(1)~(5)作出定量的估算。

2.2 Al、Mo、Zr 元素对合金显微组织的影响

图 1(a~h)显示了 Al、Mo、Zr 合金元素在单一和交互作用下对显微组织的影响。因为 Al 是强 α 稳定化元素, Zr 属于中性元素^[2], 所以 Ti-3Al(图 1(c))、Ti-3Al-3Zr(图 1(d))保持了单一的等轴 α 组织。但由于 Zr 的作用, Ti-3Al-3Zr 合金显微组织得到了明显的细化。Mo 是强 β 稳定元素, 由于 Mo 元素的加入, 使 Ti-3Mo 和 Ti-3Mo-3Zr 合金的显微组织(图 1(a)和(e))由单一的 α 组织转变为 $\alpha + \beta$ 双相组织。添加强 α 稳定化元素的 Al 和强 β 稳定元素的 Mo 的 Ti-3Al-3Mo 合金, 由于 Al、Mo 元素的交互作用, 合金的显微组织为 $\alpha + \beta$ 细晶组织(图 1(g))。

表 2 正交设计与性能试验结果

Table 2 Orthogonal design and mechanical properties of alloy

Experiment No.	Al (X_1)	Mo (X_2)	Zr (X_3)	AlMo (X_1X_2)	AlZr (X_2X_3)	MoZr (X_1X_3)	AlMoZr ($X_1X_2X_3$)	Mechanical property			
								R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	635.5	592.5	19.0	51.0
2	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	630.0	561.0	24.0	69.0
3	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	467.5	387.5	32.2	66.5
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	738.9	671.3	18.7	68.2
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	667.5	610.0	18.5	52.0
6	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	702.5	617.5	21.5	68.5
7	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	845.0	807.5	17.5	65.5

表 3 以 8、9 号合金名义成分计算得出性能与实测性能比较

Table 3 Calculated and testing results of mechanical properties for No.8 and No.9 alloys

Alloy No.	Calculated result					Testing result				
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	W_f /(J·cm ⁻²)	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	W_f /(J·cm ⁻²)
8	719.4	658.97	20.6	64.9	148.57	727.4	670.9	18.5	66	140
9	750.86	727.34	18.1	62.6	129.57	755	718.3	18	61	137.7

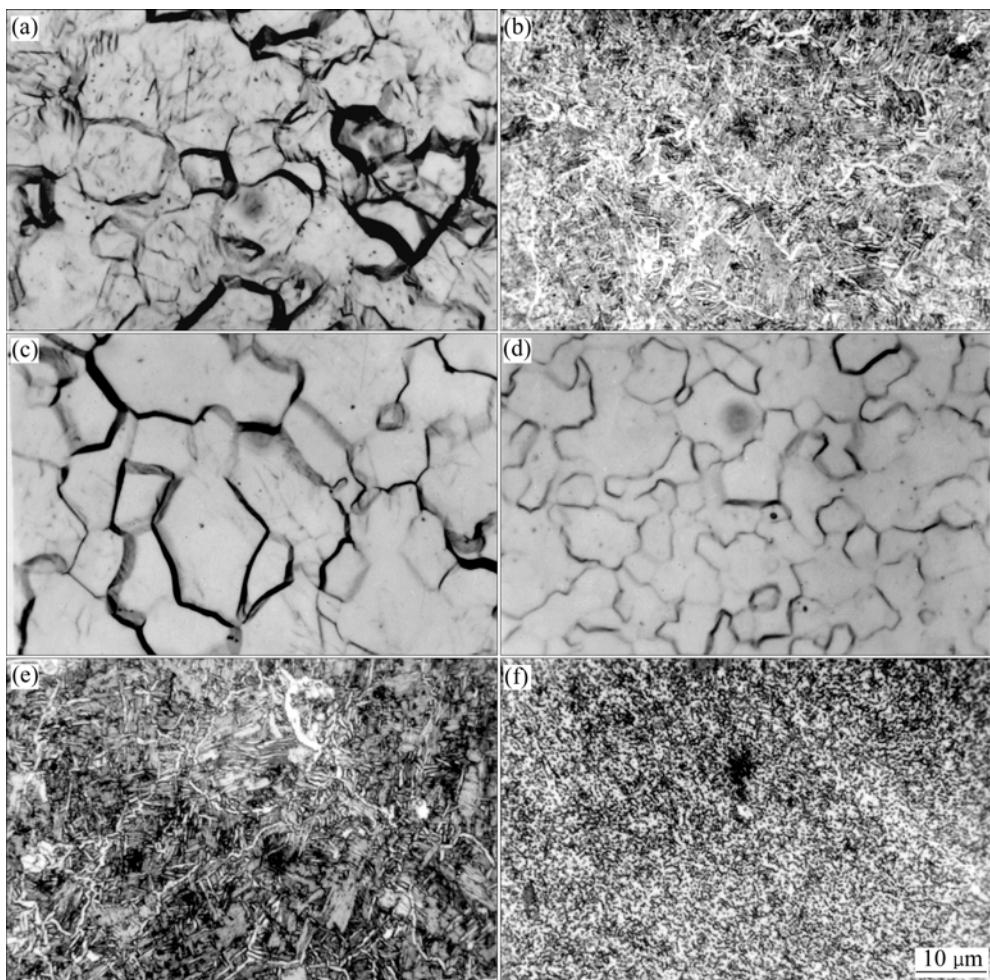


图 1 Al、Mo、Zr 合金元素对合金显微组织的影响

Fig.1 Effects of elements Al, Mo and Zr on microstructure of alloys: (a) Ti-3Zr; (b) Ti-3Mo; (c) Ti-3Al; (d) Ti-3Al-3Zr; (e) Ti-3Mo-3Zr; (f) Ti-3Al-3Mo

2.3 Al、Mo、Zr 元素对晶格常数和弹性模量的影响

2.3.1 晶格常数

试验所用 7 种合金晶格常数测定结果见表 4。一般来说, 合金的固溶强化是由于多方面作用的结果, 主要有溶质原子和位错间的弹性交互作用, 电交互作用和化学交互作用等, 弹性交互作用是主要作用之一^[3]。弹性交互作用是溶质原子造成的点阵畸变应力场和位错应力场发生弹性交互作用并阻碍位错的运动的结果, 因此, 测定合金的晶格常数就可以反映出合金的晶格畸变的程度和强化效应。从表 4 中的测试结果可以看出, 与未添加合金元素的纯钛相比, 单一 Al、Mo、Zr 合金元素引起 Ti-3Al、Ti-3Mo、Ti-3Zr 合金晶格常数畸变量的顺序从大到小为: Al, Mo, Zr, 表明单一合金元素固溶强化作用以 Al 最强, Mo 次之, Zr 最弱, 其结果与试验合金力学性能结果及性能-含量关系式(1)、(2)中强化系数结果完全一致。比较纯 Ti 和

Ti-3Al-3Zr、Ti-3Mo-3Zr、Ti-3Al-3Mo 合金的晶格常数, Al-Zr、Mo-Zr、Al-Mo 合金元素每两组元加入相对于未添加合金组元的纯 Ti 引起晶格常数畸变量可视为交互作用的结果, 其畸变量顺序从大到小为: Mo-Zr, Al-Zr, Al-Mo。晶格常数的相对变化量反映合金元素引起合金点阵结构畸变的程度, 也反映了合金的固溶强化效应。通过比较分析, Al-Zr、Mo-Zr、Al-Mo 两种合金元素交互作用时, 晶格常数变化越大, 引起点阵畸变量越大, 进而造成的点阵结构发生变化, 降低了对位错运动的阻力, 增加了滑移系, 改善了合金的塑性和韧性, 使合金获得良好的综合性能。

2.3.2 弹性模量

试验所用 7 种合金的弹性模量测试结果见表 5。合金弹性模量属于结构不敏感参数, 它直接决定于材料内部原子间的作用。从表 5 可以看出: 单一元素合金弹性模量从大到小的顺序为: Al, Mo, Zr; 两组元

表4 Al、Mo、Zr 元素对合金晶格常数的影响

Table 4 Effects of elements Al, Mo and Zr on crystal constants of alloys

Alloy No.	Nominal composition	Crystal constant			Difference between alloy and pure Ti		
		$a/\text{\AA}$	$c/\text{\AA}$	c/a	$a/\text{\AA}$	$c/\text{\AA}$	c/a
0	Ti	2.9518	4.6907	1.5891	—	—	—
1	Ti-3Al	2.9423	4.6920	1.5948	-9.5×10^{-3}	1.6×10^{-3}	5.7×10^{-3}
2	Ti-3Mo	2.9560	4.6855	1.5851	4.2×10^{-3}	-4.0×10^{-3}	-4.2×10^{-3}
3	Ti-3Zr	2.9578	4.6952	1.5874	6.0×10^{-3}	4.5×10^{-3}	-1.7×10^{-3}
4	Ti-3Al-3Mo	2.9419	4.6561	1.5827	-9.9×10^{-3}	-3.46×10^{-2}	-6.4×10^{-3}
5	Ti-3Al-3Zr	2.9433	4.7525	1.6147	-8.5×10^{-3}	6.18×10^{-2}	-4.55×10^{-2}
6	Ti-3Mo-3Zr	2.9640	4.5751	1.5136	1.22×10^{-2}	-1.156×10^{-1}	-2.46×10^{-2}
7	Ti-3Al-3Mo-3Zr	2.9450	4.6717	1.5863	-6.8×10^{-3}	-1.90×10^{-2}	-2.8×10^{-3}

表5 钛及其合金的弹性模量

Table 5 Elastic modulus of pure Ti and Ti alloys

Alloy No.	Nominal composition	Elastic modulus/MPa
0	Ti	110.81
1	Ti-3Al	114.30
2	Ti-3Mo	112.73
3	Ti-3Zr	112.62
4	Ti-3Al-3Mo	115.11
5	Ti-3Al-3Zr	115.20
6	Ti-3Mo-3Zr	113.85
7	Ti-3Al-3Mo-3Zr	116.28

弹性模量为室温测试的 2 个试样的平均值。

交互作用合金弹性模量变化从大到小的顺序是: Al-Mo, Al-Zr, Mo-Zr; 而三组元添加元素 Ti-Al-Mo-Zr 合金的弹性模量值最高。此结果与表 2 设计的试验合金力学性能结果及性能—含量关系式(1)、(2)结果一致。这种近 α 型合金固溶强化取决于添加交互作用元素的弹性模量和原子尺寸间的不一致性^[2], 对单一元素来说, 原子半径差别越大, 弹性模量越小, 强化效应越大; 而在交互作用的情况下则相反, 原子半径差别越大, 弹性模量越大, 合金元素的强化效应越弱。

3 讨论

在设计的 Ti-Al-Mo-Zr 系合金中, 合金元素的强化作用从式(1)、(2)中的强化系数得到了很好的反映。每分别添加 1% 的 Al、Mo、Zr 元素, 可使试验合金的抗拉强度分别提高 87.2、84.6、30.6 MPa; 屈服强度可分别提高 104.5、94、36.3 MPa。3 种元素对抗拉强度和屈服强度强化效果趋势一致, 以 Al 最大, Mo 次之, Zr 最小。这种现象与合金的强化机制有关, 结合

晶格常数、弹性模量的变化可以给出较好的解释。Al 和 Ti 相比, 原子半径差异较大, 引起点阵畸变较大, 弹性模量也较大, 这表明其强化作用显著, 式(1)~(5)中的强化系数也证明了这一点。文献[4]中提出: Al 含量在 3% 时, 对合金的焊接接头塑性几乎没有影响; 高于 3% 时, 塑性开始持续降低; Al 含量超过 6.5%~7% 时, 其组织不可避免地出现 α' 相, 使合金脆化。所以, 在设计 Ti-75(Ti-Al-Mo-Zr 系合金)合金时, Al 元素控制在 3% 以内。Mo 强化作用则不同, Mo 属于 β 稳定元素, 但它在 α -Ti 中有一定的固溶度, 其溶解度随 Al 含量的增加而提高。因此, 在合金中 Mo 不显著强化马氏体, 对 α -Ti 只有较强的固溶强化作用; 在添加量不大的情况下, Mo 对 α' 的富化作用不大, 弥散强化效果不明显, 对塑性的降低和冲击韧性也不明显, 式(1)~(5)中也表明了这一点, 其强化系数与 Al 的相当, 对塑性指标降低程度比 Al 小得多。Zr 和 Ti 在元素周期表中属于同族元素, 原子结构基本一致, 室温下均为密排六方结构, β 相为体心立方结构, 无论是体心立方结构还是六方结构, 都属于无限固溶体, 引起的晶格畸变最小。因此, Zr 对 α -Ti 固溶强化作用不大。式(1)~(5)中也显示: Zr 对抗拉强度和屈服强度的贡献没有 Al、Mo 的大, 但它在使合金强度增加的同时, 使合金塑性指标降低很小。另外, 式(1)~(5)中还显示了 Zr 对 Ti-Al-Mo-Zr 系合金的冲击韧性降低较明显, 因此在新合金设计中 Zr 元素的添加含量也被控制在 3% 左右。

Al、Mo、Zr 同时加入 Ti 基体时, 他们之间存在一定的交互作用, 这种交互作用对合金显微组织、弹性模量、晶格常数的影响规律也可以通过式(1)~(5)得到很好的说明。合金元素的交互作用使合金的强度稍有降低, 但使该合金塑性提高。以 Ti-3Al 合金中分别添加 Zr, Mo 元素为例说明其原理。Ti-3Al 合金中添

加 Zr 后, α 相形态和尺寸发生了变化, 由于显微组织细化, 改善了合金的力学性能; Mo 元素的添加增加了合金中 β 相的数量, 更进一步细化组织, 并产生固溶和弥散强化作用, 提高合金的强度, 从而使合金具有良好的综合力学性能。

4 结论

- 1) 在 Ti-Al-Mo-Zr 系合金中添加 Al、Mo、Zr(各在 3% 以内)元素对力学性能的影响可以定量估算。
- 2) Al、Mo、Zr 元素均对合金具有强化作用, 单一元素的影响顺序从大到小为: Al, Mo, Zr。强化机理以固溶强化为主, 主要是溶质原子位错的交互作用。
- 3) Al-Mo、Al-Zr、Mo-Zr 元素的交互作用使合金强化效应降低, 其顺序从大到小为: Al-Mo, Al-Zr, Mo-Zr。
- 4) Zr 元素虽对合金的塑性有较好的作用, 但显著降低了合金的冲击韧性, 故在合金中添加量不宜超过 3%。

REFERENCES

- [1] 孙建科, 孟祥军, 陈春和, 刘茵琪. 我国船用钛合金研究、应用现状[J]. 金属学报, 1999, 38: 36.
SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun, CHEN Chun-he, LIU Yin-qi. Research, application and development of ship-building titanium alloys in China [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 38: 36.
- [2] 鲍利索娃 E A. 钛合金相学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 106.
BOPMCYBA E A. Titanium alloys geography [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1980: 106.
- [3] 胡庚祥. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
HU Geng-xiang. Materials science foundation [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [4] ONODERA H, RO Y, YAMAGATA T, YAMAZKI M. Design of titanium alloys [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Titanium. Munich, 1986: 18.

(编辑 杨 兵)