

文章编号: 1004-0609(2005)03-0404-06

铸态 Ti-Sc 二元合金的组织特征、相结构和显微硬度^①

刘会群¹, 易丹青¹, 肖来荣¹, 王 斌¹,
卢 斌¹, 黄道远¹, 杨 胜¹, 魏鏊英²

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. School of Technology and Society, Malmö University, Malmö 20506, Sweden)

摘 要: 采用真空电弧熔炼技术制备了 4 种成分的 Ti-Sc 二元合金, 并借助金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X 射线衍射(XRD)技术及显微硬度测试, 对合金的组织形貌、相成分以及不同形貌相的显微硬度进行了分析。结果表明: 合金铸态组织形貌为螺旋状、团簇状片层、双相组织; 金属 Sc 对合金的组织有着明显的细化作用, 在合金中 Sc 与 Ti 形成了固溶体, 不同形貌的相, 其显微硬度差别较大; 当 Sc 含量为 2%~3% 时, Ti-Sc 二元合金的显微硬度达到最高值, Sc 含量高于 2%~3% 时, 合金基体硬度高于片层组织硬度, Sc 含量低于 2%~3% 时, 合金基体硬度低于片层组织硬度, 少量 Sc 对合金性能有所提高, 对 α 相片层组织有强化作用。

关键词: Ti-Sc 二元合金; 显微组织; 相结构; 显微硬度

中图分类号: TG 113.12

文献标识码: A

Microstructure, phase structure and microhardness of as-cast Ti-Sc binary alloys

LIU Hu-qun¹, YI Dan-qing¹, XIAO Lai-rong¹, WANG Bin¹,
LU Bin¹, HUANG Dao-yuan¹, YANG Sheng¹, WEI Liao-ying²

(1. School of Materials and Science Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China;

2. School of Technology and Society, Malmö University, Malmö 20506, Sweden)

Abstract: Four kinds of Ti-Sc binary alloys were prepared by vacuum arc melting technique. Microstructure, phase components and microhardness of different phases were analyzed by optical microscopy(OM), scanning electron microscope(SEM), X-ray diffraction(XRD) and microhardness tester. The results show that scandium plays a significant role on refinement of the microstructure. Solid solution forms in Ti-Sc binary alloys. The measured microhardness of different phases are in significant discrepancy. Microhardness of Ti-Sc binary alloys reaches the maximum value with 2%-3% Sc. When Sc content is higher than 2%-3%, microhardness of matrix is higher than that of plate-like phases, contrary tendency can be seen when Sc content is lower than 2%-3%. Small content of scandium can improve the properties of alloys and strengthen the α plate-like phases.

Key words: Ti-Sc binary alloy; microstructure; phase structure; microhardness

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属^[1], 钛具有两种同素异晶体, 分别以 α 和 β 表示, 钛的同素异晶转变温度为 882.5 °C, 其低温

晶体 α 具有密排六方结构, 在 882.5 °C 以上, 稳定的 β 晶体为体心立方结构。钛有两种晶型: 在标准状态下为六方密排晶格(hcp)的 α Sc, 在高温

① 基金项目: 中瑞政府间科技合作资助项目

收稿日期: 2004-03-17; 修订日期: 2004-12-22

作者简介: 刘会群(1978-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 刘会群; 电话: 0731-8830263; E-mail: lhq_234@163.com

1 337 °C 以上转变为体心立方晶格 (bcc) 的 β Sc。若要形成完全可溶混的固溶体, 组分的结晶结构必须相同, 因此只有具有六方晶格 (hcp) 和体心立方晶格 (bcc) 的金属才能与钪完全溶混。钛能与钪形成连续的固溶体^[2]。钛和钪的金属原子半径分别为 0.145、0.163 nm^[3], 其相对差值小于 14%, 所以钛钪固溶体类型为置换式固溶体^[4]。目前, 国内外对微量金属 Sc 对铝合金组织与性能的影响已作了很多研究, 这些研究表明^[5~9]: 微量 Sc 添加到铝合金中有细化组织、提高强度、提高再结晶温度等作用, 因其在铝合金中形成 Al₃Sc 相, 与基体共格, 产生了显著的共格强化作用。但有关金属 Sc 对钛合金组织与性能的影响报道很少, 金属 Sc 加入到钛合金中对合金的组织与性能的影响目前尚不清楚, 对 Ti-Sc 二元相图的研究也还不充分。所以本文作者从基础工作着手, 选择 Ti-Sc 二元系中若干有代表性的成分, 研究其铸态组织, 以及对 Ti-Sc 二元系的某些不确定方面进行实验研究。

1 实验

根据 Ti-Sc 二元合金相图 (见图 1), 用真空电弧熔炼方法制备了 Ti-37Sc (1 号)、Ti-25Sc (2 号)、Ti-5Sc (3 号) 及 Ti-2Sc (4 号) (质量分数, %) 4 个合金成分的钮扣锭, 并重熔了工业纯钛 TA1 铸锭, 铸锭随炉冷却。实验原料采用工业纯钛 TA1 及纯金属钪 (99.983%)。采用光学金相显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 及 X 射线衍射 (XRD) 观察分析了合金的组织特征、相组成。用 SHIMADZU HMV 显微硬度计测量了合金的显微硬度, 压头类型为维氏, 136°角锥压头, 载荷 0.1 N, 加载时间 10 s。

2 结果及分析

2.1 组织形貌及相分析

图 2 所示为铸态 Ti-Sc 二元合金的显微组织。图 3 所示为合金的 SEM 组织形貌。Ti-37Sc 合金的显微组织与其他 Ti-Sc 合金的组织有着明显的不同, 这是 Sc 含量高所致。由图 2 及图 3 可知, Ti-37Sc 合金 β 晶界内的组织由尺寸约 3 μ m 的螺旋状的相组成, 此类相的成分由表 1 能谱分析结果可知为 $n(\text{Ti}) : n(\text{Sc}) = 8 : 1$; 在 Ti-25Sc 合金中, 结合 Ti-Sc 二元相图, 其铸态组织中存在 β 与 α 相, 沿 β

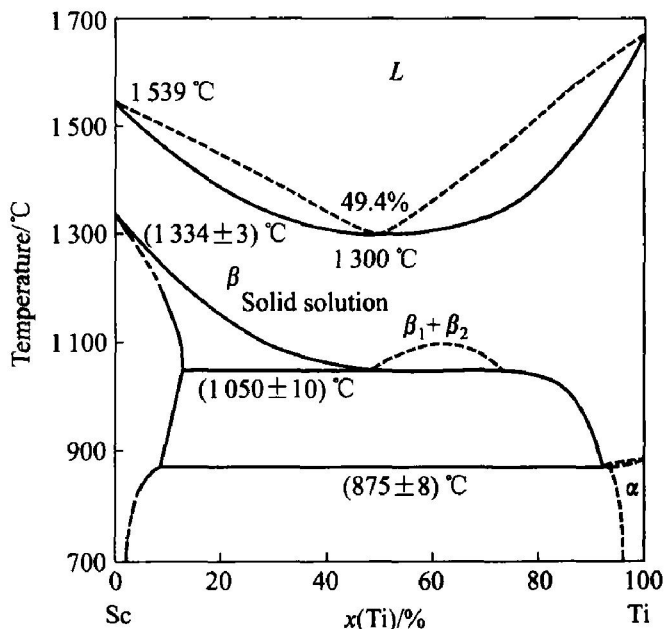


图 1 Ti-Sc 二元合金相图

Fig. 1 Phase diagram of Ti-Sc binary alloy^[10]

晶界分布着向晶内生长的 α 片层组织, 片层宽度约为 2 μ m, β 晶界内的组织具有双相组织的形貌特征, 其相的成分和 β 晶界处 α 片层相的成分均为 $n(\text{Ti}) : n(\text{Sc}) = 8 : 1$, 与 Ti-37Sc 合金的相成分相同; 在 Ti-5Sc 合金中存在着明显的晶界偏析, 其 β 晶界内的组织具有双相组织的形貌特征, 即存在着 β 基体和转变的 β 相 (块状 α 相) 及初生的 α 片层相, 由于溶质元素在晶界相对高的含量, 所以在晶界两侧还存在初生 α 片层组织^[11]。由能谱分析的结果可知, 晶界偏析相的 Sc 含量比 β 晶内双相组织的相的 Sc 含量略低, 其成分均接近于 $n(\text{Ti}) : n(\text{Sc}) = 19 : 1$, 合金成分接近于名义成分; Ti-2Sc 合金的组织类似于 Ti-5Sc 合金的组织, 但要比其细小的很多, 其 β 晶内为双相组织, 由 α 片层与块体组织组成, 其片层相与基体成分为 $n(\text{Ti}) : n(\text{Sc}) = 49 : 1$, 合金质量比接近于名义成分; 从能谱分析的结果看, 4 种合金中金属 Sc 均固溶于 Ti 中。由图 2(e) 和 2(f) 与其他二元合金组织对比可见, 重熔后工业纯钛 TA1 中的 α 片层组织比其他 Ti-Sc 合金的片层要粗大的多, 可见少量的金属 Sc 对合金组织的细化比较明显。

从 X 射线衍射结果 (图 5) 可见, 合金中存在的主要是 α Ti, 由于 Sc 与 Ti 形成了固溶体, 所以未见有金属 Sc 的衍射峰, 未形成 Ti-Sc 金属间化合物。随着 Sc 含量的降低, 在 Ti-5Sc (3 号) 和 Ti-2Sc (4 号) 合金中出现了少量的 β Ti, 可见在其铸态的

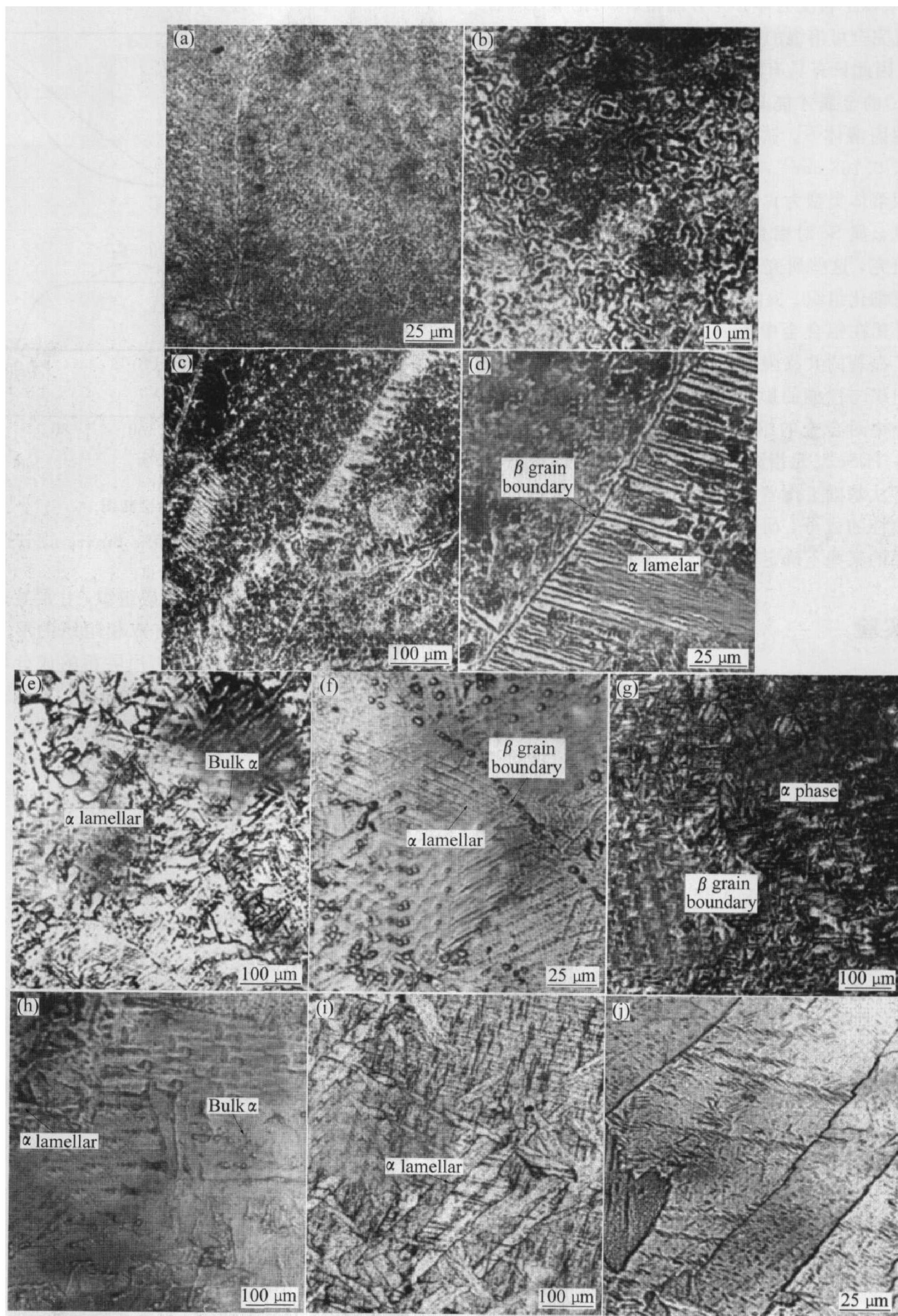


图 2 Ti-Sc 二元合金的铸态显微组织

Fig. 2 As-cast microstructures of Ti-Sc binary alloys

(a), (b) —Ti-37Sc; (c), (d) —Ti-25Sc; (e), (f) —Ti-5Sc; (g), (h) —Ti-2Sc; (i), (j) —Remelted TA1

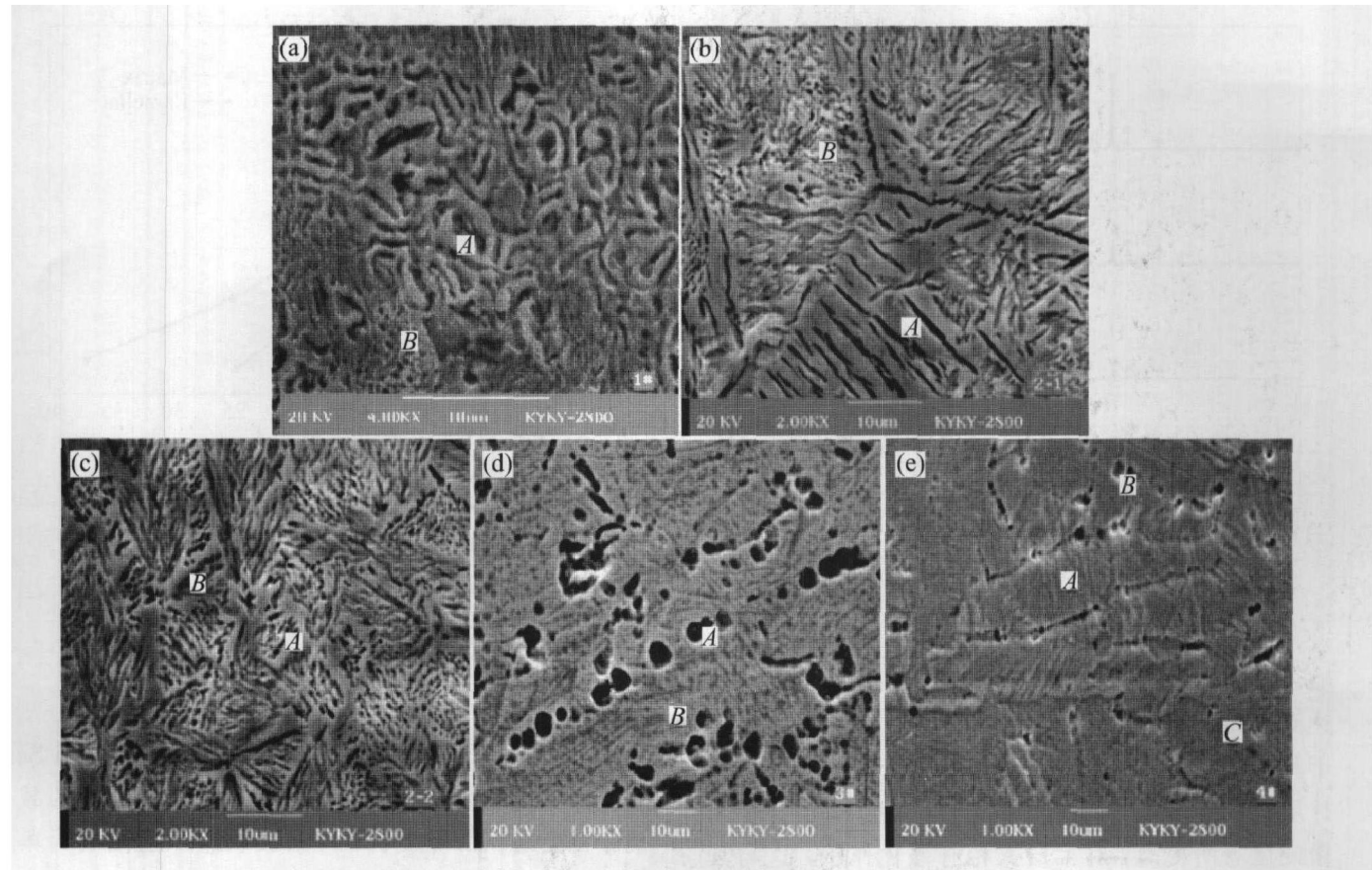


图 3 铸态 Ti-Sc 二元合金的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM morphologies of as-cast Ti-Sc binary alloys
(a) -Ti-37Sc; (b) -Ti-25Sc; (c) -Ti-25Sc; (d) -Ti-5Sc; (e) -Ti-2Sc

表 1 Ti-Sc 二元合金的能谱分析结果

Table 1 EDS results of Ti-Sc binary alloys				
Alloy	Spot	Element	w / %	x / %
Ti-37Sc(No. 1)	A	Sc	10.70	11.32
		Ti	89.30	88.68
	B	Sc	11.20	11.85
		Ti	88.80	88.15
Ti-25Sc(No. 2)	A	Sc	11.16	11.80
		Ti	88.84	88.20
	B	Sc	10.17	10.77
		Ti	89.83	89.23
Ti-25Sc(No. 2)	A	Sc	10.60	11.22
		Ti	89.40	88.78
	B	Sc	10.18	10.77
		Ti	89.82	89.23
Ti-5Sc(No. 3)	A	Sc	4.71	4.79
		Ti	95.29	95.21
	B	Sc	5.00	5.31
		Ti	95.00	94.69
Ti-2Sc(No. 4)	A	Sc	2.39	2.54
		Ti	97.61	97.46
	B	Sc	2.39	2.55
		Ti	97.61	97.45
	C	Sc	2.01	2.14
		Ti	97.99	97.86

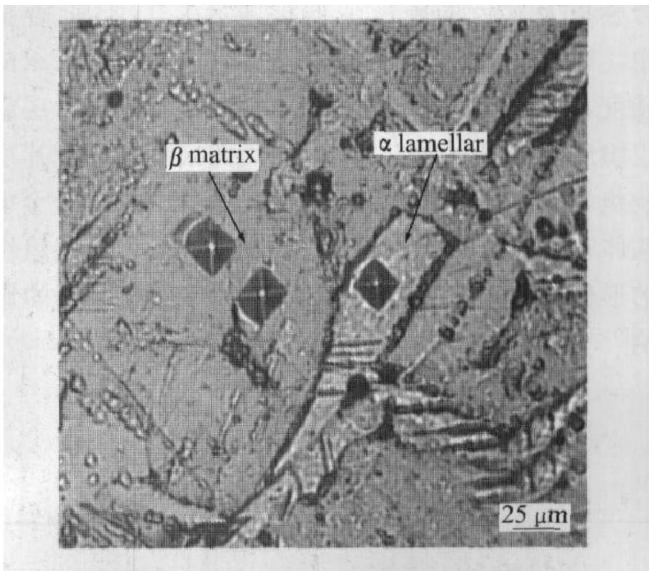


图 4 Ti-25Sc 合金的显微硬度测量示意图

Fig. 4 Schematic sketch of measurement of microhardness in Ti-25Sc alloy

组织中还存在残留的体心立方结构的 β Ti。

2.2 显微硬度分析

表 2 列出了 Ti-Sc 二元合金的显微硬度值, 图 6 所示为 Sc 含量对 Ti-Sc 二元合金显微硬度的影

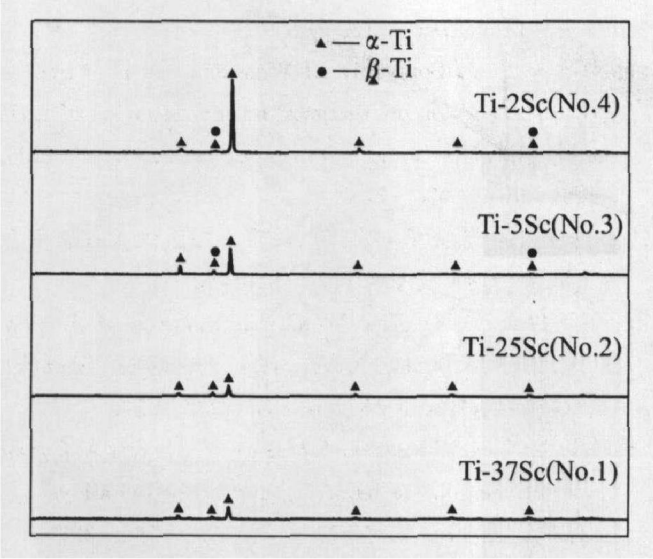


图 5 Ti-Sc 二元合金的 X 射线衍射谱

Fig. 5 XRD patterns of Ti-Sc binary alloys

响。Sc 含量为 2% 时, Ti-Sc 二元合金的显微硬度达到最高值, Sc 含量高于 2% 时, 合金基体硬度高于片层组织硬度, 低于 2% 时, 合金基体硬度低于片层组织硬度, 同时由表 2 可知, 微量 Sc 使合金显微硬度有所提高, 对片层 α 相有强化作用, 这与其组织有着密切的关系。Sc 含量高的合金中, 如 Ti-37Sc 合金, 由于金属 Sc 质地柔软、硬度低以及多数 Sc 固溶于钛中, 使得其硬度值比其他 Ti-Sc 二元合金以及纯钛的硬度值低很多; 在 Ti-25Sc 合金中, 其基体硬度明显高于其晶界两侧的片层组织的硬度, 据 Sauer 等^[11] 的研究, 晶界两侧的 α 片层簇组织形成了合金中的“软区域”, 此区域是导致片层簇组织硬度低的原因。随着 Sc 含量的减少, 合金中基体和片层组织的硬度比较接近。合金中片层组织的形貌、尺寸及分布状态对其性能有着重要的影响^[12-14]。

表 2 Ti-Sc 二元合金的显微硬度

Table 2 Measured microhardness of Ti-Sc binary alloys

Alloy	Microhardness (HV _{0.01})	
	Matrix	Lamellar
Ti-37Sc (No. 1)	79.5	
Ti-25Sc (No. 2)	126.5	72.0
Ti-5Sc (No. 3)	241.5	229.6
Ti-2Sc (No. 4)	308.0	331.0
TA1	193.0	294.0

During measurement of microhardness, indentations are marked exactly on every phase, maybe this process is influenced by different phase boundary, but data is accurate for reference (Fig. 4).

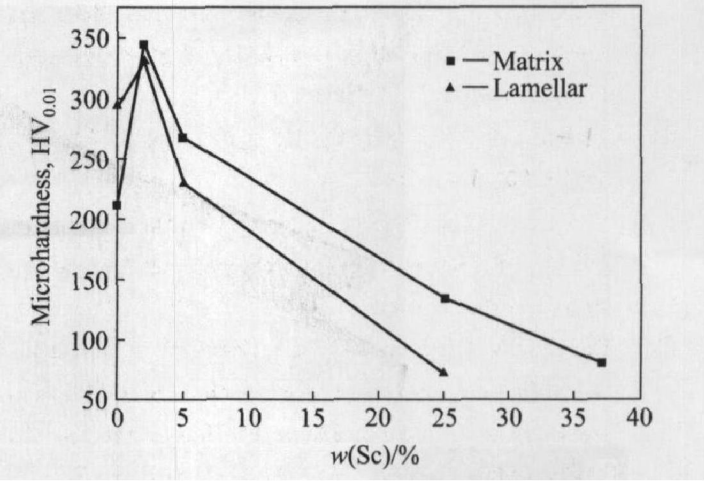


图 6 Sc 含量对 Ti-Sc 二元合金显微硬度的影响

Fig. 6 Effects of Sc content on microhardness of Ti-Sc binary alloys

3 结论

1) 在 Ti-Sc 二元合金中, 不同 Sc 含量的 Ti-Sc 二元合金的组织变化非常明显。随着 Sc 含量的减少, 合金组织由螺旋状、片层簇状组织逐渐变为典型的双相组织, 与工业纯钛组织比较可见, 金属 Sc 对合金的组织有着明显的细化作用。由 SEM 结果可见, 沿晶界向晶内生长的片层组织宽度约为 2 μm 。从 EDS 以及 XRD 结果可知, 在 4 种成分的 Ti-Sc 二元合金中, 金属 Sc 均固溶于 Ti 中, 形成了固溶体, 未形成 Ti-Sc 金属间化合物。

2) Sc 含量为 2% ~ 3% 时, Ti-Sc 二元合金的显微硬度达到最高值; Sc 含量高于 2% ~ 3% 时, 合金基体硬度高于片层组织硬度; Sc 含量低于 2% ~ 3% 时, 合金基体硬度低于片层组织硬度, 少量 Sc 使合金显微硬度有所提高, 对 α 相片层有强化作用, 这与其组织有着密切的关系。

REFERENCES

[1] 刘静安, 吴煌良. 钛合金手册[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1982. 3.
LIU Jing-an, WU Huang-liang. Titanium Alloys Handbook[M]. Chongqing: Science and Technology Literature Press Chongqing Branch Press, 1982. 3.

[2] 易宪武, 黄春辉. 钪稀土元素[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 26.
YI Xian-wu, HUANG Chun-hui. Rare Earth Element Scandium[M]. Beijing: Science Press, 1998. 26.

[3] 潘道皐, 赵成大, 郑载兴. 物质结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 622.

- PAN Dao-ai, ZHAO Cheng-da, ZHENG Zai-xing. Structure of Material[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. 622.
- [4] 胡庚祥, 钱苗根. 金属学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 32-33.
- HU Geng-xiang, QIAN Miao-gen. Physical Metallurgy[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980. 32-33.
- [5] Davydov V G, Rostova T G, Zakharov V V, et al. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A280: 30-36.
- [6] Fuller C B, Krause A R, Dunand D C, et al. Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminium alloy modified by Sc and Zr additions[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, A338: 8-16.
- [7] Kending K L, Miracle D B. Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 4165-4175.
- [8] 张德尧. Al-Zr-Mg-Sc 系热强可焊铝合金[J]. 稀有金属快报, 2001(1): 11-14.
- ZHANG De-rao. Thermal strength and weldable Al-Zr-Mg-Sc aluminium alloys[J]. Rare Metal Research Bulletin, 2001(1): 11-14.
- [9] 余琨, 李松瑞, 黎文献, 等. 微量 Sc 和 Zr 对 2618 铝合金再结晶行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 709-713.
- YU Kun, LI Song-rui, LI Wen-xian, et al. Effect of trace Sc and Zr on recrystallization behavior of 2618 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 709-713.
- [10] 虞觉奇, 易文质, 陈邦迪, 等. 二元合金状态图集[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 551.
- YU Jue-qi, YI Wen-zhi, CHEN Bang-di, et al. Constitution of Binary Alloys[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987. 551.
- [11] Sauer C, Lütjering G. Influence of α layers at β grain boundaries on mechanical properties of Ti alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2002, A319-321: 393-397.
- [12] Ding R, Guo Z X, Wilson A, et al. Microstructural evolution of a Ti-6Al-4V alloy during thermomechanical processing[M]. Mater Sci Eng A, 2002, A327: 233-245.
- [13] Flower H M. Microstructural development in relation to hot working of titanium alloys[J]. Materials Science and Technology, 1990, 6: 1082-1092.
- [14] Ahmed T, Rack H J. Phase transformations during cooling in α + β titanium alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1998, A243: 206-211.

(编辑 陈爱华)