



Ti-Al-Mo-V-Cr体系关键四元系 700 °C和800 °C相平衡的实验研究

乔 慧¹, 张 宇¹, 胡 标¹, 李 凯², 刘树红², 杜 勇²

(1. 安徽理工大学 材料科学与工程学院, 淮南 232001;

2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 本文通过配置72个四元合金, 利用X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM/EDS)测定了高强 β 型钛合金Ti-Al-Mo-V-Cr体系中关键四元系Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr和Ti-Al-V-Cr含20% Al(摩尔分数)时700和800 °C的相平衡关系。实验结果表明: Ti-Al-Mo-V体系存在3个两相区(AlTi_3 +BCC_A2、 AlMo_3 +BCC_A2、BCC_A2#1+BCC_A2#2)和1个单相区(BCC_A2); Ti-Al-Mo-Cr体系存在1个四相区(AlMo_3 +BCC_A2#1+BCC_A2#2+Laves_C14)、2个三相区(AlMo_3 +BCC_A2+Laves_C14、 AlTi_3 +BCC_A2+Laves_C14)、3个二相区(AlTi_3 +BCC_A2、 AlMo_3 +BCC_A2、Laves_C14+BCC_A2)和1个单相区(BCC_A2); Ti-Al-Cr-V体系存在1个三相区(AlTi_3 +BCC_A2+Laves_C14)、3个两相区(AlTi_3 +BCC_A2、 AlMo_3 +BCC_A2、Laves_C14+BCC_A2)和1个单相区(BCC_A2)。根据实验结果, 本文构筑了这些四元系含20% Al时700和800 °C的等温截面, 为设计新型 β 钛合金提供重要的理论指导。

关键词: Ti-Al-Mo-V-Cr; 钛合金; 相平衡; 相图; 实验测定

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2620-13

中图分类号: TG146

文献标志码: A

引文格式: 乔 慧, 张 宇, 胡 标, 等. Ti-Al-Mo-V-Cr体系关键四元系700 °C和800 °C相平衡的实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2620–2632. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42500

QIAO Hui, ZHANG Yu, HU Biao, et al. Experimental investigation of phase equilibria in Ti-Al-Mo-V-Cr key quaternary systems at 700 °C and 800 °C [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2620–2632. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42500

钛合金因具有比强度高、耐蚀性好、耐热性高和生物相容性好等优点, 已广泛应用于航空、航天、兵器、石油、化工和医疗等领域^[1-2]。与 α 型和(α + β)型钛合金相比, β 型钛合金具有良好的冷/热成型性能、弹性模量值低、耐磨耐腐蚀性优异且强度-塑性匹配度良好等特点, 近年来受到国内外学者的广泛关注^[3-6]。 β 型钛合金中加入的Mo、V、Cr等 β 稳定型元素能提高合金的强度, 使合金保持良好的塑性。V和Mo与(β Ti)属于同晶元素, 具有 β

稳定化作用, 能提高钛合金的热稳定性, 是Ti合金中广泛应用的合金元素。Cr的强化效果好, 稳定 β 相的能力强且密度比Mo小, 是高强亚稳 β 型钛合金的主要添加剂^[7]。Al是工业上应用最广泛的元素, 同时也是钛合金中最主要的强化元素, 具有显著的固溶强化作用。Ti-5553(Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr)是一种极具吸引力的亚稳 β 钛合金^[8], 与Ti-6Al-4V相比, 该合金具有更高的硬度, 并且能承受高温拉伸应力, 在航空航天和国防应用中逐渐取代了Ti-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071002); 安徽省自然科学基金资助项目(2008085QE200)

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2021-11-11

通信作者: 胡 标, 教授, 博士; 电话: 0554-6601194; E-mail: hubiao05047071@163.com

6Al-4V^[9]。

由于钛合金在凝固过程中的显微偏析现象会影响钛合金的组织 and 性能, 所以精准地预测钛合金凝固过程中的相变序列就显得尤为重要。Ti-Al-Mo-V-Cr 体系是高强 Ti 合金中关键的合金体系^[10], 也是目前 β 型钛合金研究的热点。在设计 Ti-Al-Mo-V-Cr 新型钛合金成分时, 需要相关相平衡数据。目前, 尚未见 Ti-Al-Mo-V-Cr 五元系及其关键四元系相平衡数据的报道。基于边际二元系、三元系和四元系实验数据的文献评估, HU 等^[11]采用 CALPHAD(Calculation of Phase Diagrams)方法对 Ti-Mo-V-Cr 体系进行了热力学计算。本文对 Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-V-Cr 和 Ti-Al-Mo-Cr 四元系的实验相平衡数据进行文献评估, 通过设计关键实验, 研究了 Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-V-Cr 和 Ti-Al-Mo-Cr 四元系的相平衡关系, 为今后模拟多组元钛合金中某些合金在平衡和非平衡条件下凝固过程中的相变序列以及设计新型 Ti-Al-Mo-V-Cr 钛合金提供实验数据。

1 实验相图数据评估

1.1 边际三元系

HUANG 等^[12]采用扩散偶和平衡合金法测定了 Ti-Al-Mo 体系 800、900、1000、1100 和 1200℃等 5 个等温截面, 发现在 1100~1150℃之间存在一个三元化合物 $\alpha(\text{Al})$ 。Al 在 BCC_A2 相的溶解度从 800℃时的 39.9%(摩尔分数)增大到 1000℃时的 49.0%。Ti 在 AlMo_3 相的溶解度从 800℃时 20.8%增大到 1000℃时 25.4%。WITUSIEWICZ 等^[13]基于文献报道的相平衡数据, 配置了 18 个合金样品, 采用 XRD、SEM/EDS、差热分析(DTA)和差示扫描量热(DSC)等方法分析了铸态和退火态合金的显微组织、相组成、相成分以及相变温度, 并用 CALPHAD 方法对 Ti-Al-Mo 三元系进行了热力学计算, 计算了一系列的等温截面、垂直截面、液相面投影图, 并构筑了希尔反应图。

HAYES^[14]通过对 Ti-Al-V 体系进行文献评估, 构筑了该体系 800、1000、1100、1200 和 1400℃等 5 个等温截面和液相面投影图, 发现 Ti-Al-V 三元系在 1200 和 1400℃不存在 TiAl_3 相。LU 等^[15]基于对 Ti-Al-V 三元系的文献评估, 采用 CALPHAD 方法对该体系进行了热力学计算。ZHANG 等^[16]通过配

置 50 种合金, 采用 XRD、SEM、电子背散射衍射(EBSD)和电子探针分析(EPMA)等方法研究了 Ti-Al-V 体系 1300℃的相平衡关系, 确定了 Ti-Al-V 三元系在 1300℃的相边界。

CHEN 等^[17]采用 XRD、SEM/EDS 和 DTA 等方法测定了 Ti-Al-Cr 体系 900℃成分小于 75% Al 和 600℃成分大于 75% Al 的固相平衡, 构筑了成分大于 40% Al 的液相面投影图和希尔反应图, 并用 CALPHAD 方法对 Ti-Al-Cr 体系进行了热力学计算。XU 等^[18]采用 XRD、SEM 和 EPMA 等方法研究了 Ti-Al 和 Ti-Cr 二元系以及 Ti-Al-Cr 三元系在 1000℃的相平衡关系, 发现 Ti-Al-Cr 体系在 1000℃存在 7 个三相区。

Ti-Mo-V 体系中只有两个固溶体相 BCC_A2 和 HCP_A3, 不存在三元化合物。TAYLOR^[19]在 Ti-Mo-V 体系整个成分范围内配置了 70 种合金, 借助 XRD 方法确定了固溶体相 BCC_A2。KOMJATHY^[20]采用合金法制备了 9 种三元合金, 将合金在 900℃下退火 170 h, 发现 Ti-Mo-V 体系只有固溶体相, 没有析出第二相。KORNILOV 等^[21]在 Ti-Mo-V 体系整个成分范围内设计了 50 种三元合金, 采用热分析法构筑了八个垂直截面(10%~80% V, 质量分数)和固相面投影图。

ELLIOTT 等^[22]在 Ti-Mo-Cr 体系中 40%~100% Ti(摩尔分数)成分范围内配置了 60 个三元合金, 采用 XRD、SEM 和非接触式热分析测定了 Ti-Mo-Cr 体系 600、650 和 700℃等温截面, 以及 4% Mo、8% Mo、4% Cr、8% Cr、70% Ti 和 90% Ti(摩尔分数)垂直截面。GRUM-GRIZHIMAILO 等^[23]在 600、900 和 1200℃等温截面配置了 39 种合金, 研究了 Ti-Mo-Cr 体系的相平衡。发现当温度处于固相线温度以下时, Ti、Mo 和 Cr 形成连续的固溶体。

GHOSH^[24]基于实验相平衡数据, 使用两个亚点阵模型描述了 Ti-V-Cr 三元系中 Laves_C14、Laves_C15 和 Laves_C36 相并对该体系进行了热力学优化, 获得了描述该体系的一套热力学参数。他通过计算发现, Ti-V-Cr 三元系在 500 和 600℃时 BCC_A2 相存在溶解度间隙。

SPERNER^[25]测定了 Al-Mo-V 体系 630、675、715、750、1000 和 1200℃的等温截面, 发现随温度的降低, Mo 和 V 的溶解度逐渐减小。RAMAN^[26]在 Al-Mo-V 体系 1000℃的等温截面制

备了20种三元合金,并进行了实验测定,发现Al-Mo和Al-V的边际二元化合物稳定存在。HU等^[11]基于文献报道的实验相平衡数据,采用CALPHAD方法对Al-Mo-V体系进行了热力学计算,获得描述该体系的热力学参数。

Mo-V-Cr体系相图较简单,仅含液相和BCC_A2相。目前,文献中没有关于该体系相平衡实验数据的相关报道。Al-Mo-Cr和Al-V-Cr体系的实验相平衡数据也没有相关文献报道。

1.2 边际四元系

MIURA^[27]采用合金法制备了成分为48%~52% Al、8%~20% Cr、8%~20% Mo和20%~24% Ti的10种Ti-Al-Mo-Cr四元合金。样品分别在950和1350℃退火18~48和24 h,采用XRD、SEM、波长色散X射线光谱学研究了相平衡并确定了相变温度。在研究的成分和温度范围内,BCC_A2相的成分范围为 $\text{Al}_{42-47}\text{Cr}_{9-20}\text{Mo}_{17-20}\text{Ti}_{21-25}$, TiAl_3 相的范围为 $\text{Al}_{62-63}\text{Cr}_{2-3}\text{Mo}_{11-12}\text{Ti}_{21-24}$ 。MIURA等^[27]推测了可能存在(BCC_A2+AlMo₃+TiAl₃)三相平衡和(BCC_A2+AlMo₃+TiAl₃+Ti(Al,Cr)₃)的四相平衡。随后,RAGHAVAN^[28]对Ti-Al-Mo-Cr四元系进行了文献评估,发现较低温度下Ti(Al,Cr)₃相的成分为 $\text{Al}_{61}\text{Cr}_9\text{Mo}_4\text{Ti}_{26}$,BCC_A2、TiAl₃和Ti(Al,Cr)₃相中Ti含量几乎相同,均为25%(摩尔分数)。

LI等^[29]采用中子衍射和透射电镜方法研究了Al对 β -Ti-V-Cr合金有序性的影响。WANG等^[30]基于文献评估,采用CALPHAD方法对Ti-Al-V-Cr四元系的有序相B2进行了热力学描述,并计算了Ti-15Cr-(25%、30%、32%、37%)V-xAl($x=0\sim 60\%$,质量分数)等4个垂直截面。

目前,文献中尚没有Ti-Al-Mo-V体系相平衡实验数据的相关报道,仅报道了Ti-Al-Mo-Cr和Ti-Al-V-Cr四元系部分等温截面或垂直截面的计算,这些实验数据尚不能很好地指导多元Ti合金的设计,因此需要对Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr和Ti-Al-V-Cr四元系的相平衡进行进一步的实验研究,完善其实验数据。因此,本工作基于Ti-Al-Mo-V-Cr五元系中边际三元系和四元系的文献评估,对Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr和Ti-Al-V-Cr四元系进行实验测定和相平衡研究。

2 实验

为确保制备的合金具有均匀稳定的成分,所涉及到的元素原料必须要有较高的纯度,本工作以纯金属Ti(99.995%,质量分数)、Al(99.996%)、Mo(99.95%)、V(99.99%)和Cr(99.95%)(质量分数)为原材料,在Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr和Ti-Al-V-Cr四元系成分为20% Al(摩尔分数),700和800℃两个等温截面上分别设计12种四元合金样品,每种合金样品质量约1.5 g。根据所设计的合金成分,用FA2204B电子天平称量出各组分的质量,标准称量误差为 ± 0.0001 g。样品称量完成后,在高纯氩气(99.999%)的保护下,使用WK-I型非自耗真空电弧熔炼炉对样品进行熔炼。熔炼前,需要对炉腔进行洗气,即先将炉腔抽真空,然后向炉腔内通入高纯氩气,该操作反复重复3次以去除炉腔内的氧气。为了防止炉腔内可能残留的氧气与样品发生反应,首先对放在炉腔中间坩埚的纯Zr进行熔炼,然后对样品进行熔炼。为使合金成分均匀,每个样品至少熔炼4次。熔炼结束后,对样品进行称量,确保其质量损失均在0.5%之内。为防止合金与石英管反应,将合金用高纯钼丝进行缠绕。采用MRVS-1002真空封管机将样品真空封入石英管中,放入KSL-1200X型箱式炉中在700和800℃分别进行均匀退火21 d和14 d,随后快速取出并放入冷水中进行淬火。使用SYJ-150低速金刚石切割机将热处理后的样品切割成两块。其中一块制成粉末样品,加入少量的Si粉作为内标,用Rigaku D-max/2550型X射线衍射仪进行粉末测量。另一块样品在经过镶嵌、研磨、抛光等处理后,使用JXA-8800R型扫描电子显微镜观察合金的微观组织形态,用能谱仪分析合金中各相的化学成分。

3 结果与讨论

3.1 Ti-Al-Mo-V体系

图1所示为Ti-Al-Mo-V体系合金 $\text{Al}(\text{Ti}_{60}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{V}_{10})$ 在700℃退火21 d后的XRD谱和SEM/EDS实验结果。从图1可以看出,XRD谱分析结果和扫描电镜图显示的结果一致。根据测得的XRD谱,样品A1中包含 AlTi_3 和BCC_A2相的衍射峰。从扫描

电镜图中, 可以发现出两个明显的衬度, 通过对该衬度区域EDS成分分析, 可以确定黑色区域为 AlTi_3 相和灰色区域是BCC_A2相。通过对二元相图进行分析, 发现 AlTi_3 和BCC_A2相存在溶解度, 即形成了 AlTi_3 和BCC_A2相。同样在三元和四元相图中 AlTi_3 和BCC_A2相也存在溶解度。因此, 可以确定样品A1位于 AlTi_3 +BCC_A2两相区。对其进行分析, 发现 AlTi_3 相的成分(摩尔分数)为60.14% Ti, 21.79% Al, 1.94% Mo和16.13% V; BCC_A2相的成分为64.30% Ti、14.20% Al、7.01% Mo和14.49% V。图2所示为Ti-Al-Mo-V体系合金B1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{V}_{10}$)在800℃退火14 d后的XRD谱和SEM/EDS测试分析结果。根据测得的XRD谱, 样品B1中包含 AlTi_3 和BCC_A2相的衍射

峰。从图2中可以看出, X射线衍射谱图分析结果和扫描电镜图显示的结果一致。从图2(b)中可以看出, 可以显现出两个明显的衬度, 通过对该衬度区域EDS成分分析, 可以确定黑色区域为 AlTi_3 相和灰色区域是BCC_A2相。因此, 可以确定样品B1位于 AlTi_3 +BCC_A2两相区。对其进行分析, 发现 AlTi_3 相的成分(摩尔分数)为66.56% Ti、21.26% Al、2.72% Mo和9.46% V; BCC_A2相的成分为67.31% Ti、20.01% Al、2.78% Mo和9.90% V。

类似地, 本工作对合金样品A2~A12和B2~B12的实验结果进行了分析, 表1所示为Ti-Al-Mo-V体系合金样品A1~A12和B1~B12在700和800℃分别退火21 d和14 d的XRD谱及SEM/EDS实验分析结果。通过分析, 确定了每个合金样品所

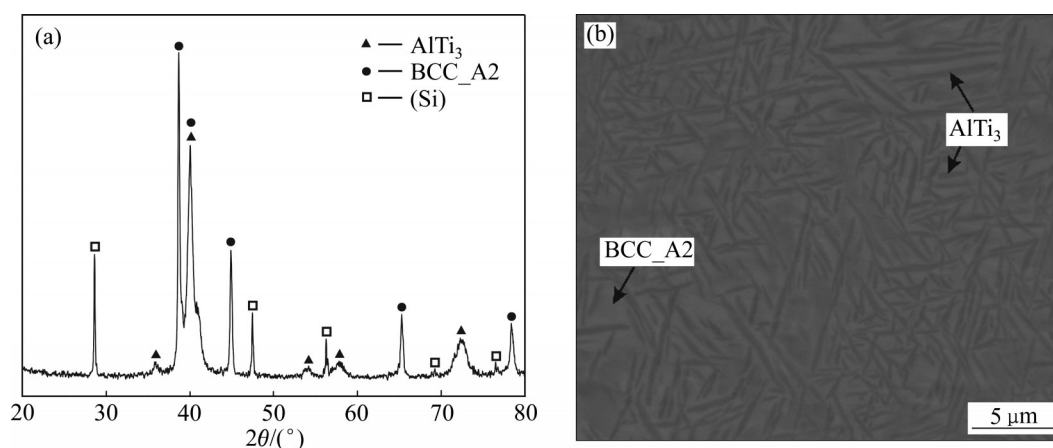


图1 Ti-Al-Mo-V体系合金A1($\text{Ti}_{60}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{V}_{10}$)在700℃退火21 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 1 XRD pattern (a) and SEM image (b) for Ti-Al-Mo-V system alloy A1($\text{Ti}_{60}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{V}_{10}$) annealed at 700℃ for 21 days

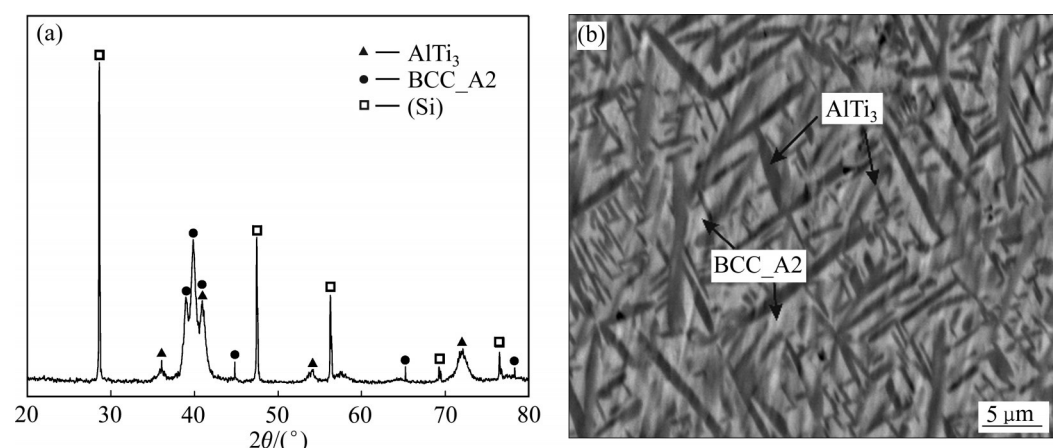


图2 Ti-Al-Mo-V体系合金B1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{V}_{10}$)在800℃退火14 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 2 XRD pattern (a) and SEM image (b) for Ti-Al-Mo-V system alloy B1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{V}_{10}$) annealed at 800℃ for 14 days

在的相区、相成分,并计算了各相的晶格常数。其中,测定的合金 A10、A11 的 BCC_A2 相以及 B10~B12 的 BCC_A2#2 相的成分误差较大,本工作并未采用。从表 1 中可以看出,样品 A2、A3、A6、A7、A8、A9、A10、A11、B2、B3、B4、B5 和 B8 处于 BCC_A2 单相区;样品 A1、A5、B1 处于 AlTi_3 +BCC_A2 两相区;样品 A4、B6、B7 和 B9 处

于 AlMo_3 +BCC_A2 两相区;样品 A12 和 B10、B11 和 B12 处于 BCC_A2#1+BCC_A2#2 两相区。

根据 XRD 和 SEM/EDS 的分析结果并结合 Ti-Al-Mo、Ti-Al-V 和 Ti-Mo-V 边际三元系的相平衡数据,构筑了 Ti-Al-Mo-V 四元系 700℃ 和 800℃ 的等温截面,如图 3 所示。各个合金成分点所在相区与实验分析结果一一对应。

表 1 Ti-Al-Mo-V 合金在 700 和 800℃ 退火 21 和 14 d 的实验结果

Table 1 Experimental results of Ti-Al-Mo-V alloys annealed at 700 and 800℃ for 21 and 14 days

Sample No.	Nominal composition, x/%				Phase	Lattice parameter/Å			Phase composition, x/%			
	Ti	Al	Mo	V		a	b	c	Ti	Al	Mo	V
A1	60	20	10	10	AlTi_3	5.7847	5.7847	4.6478	60.14	21.79	1.94	16.13
					BCC_A2	3.1474	3.1474	3.1474	64.30	14.20	7.01	14.49
A2	40	20	30	10	BCC_A2	3.1551	3.1551	3.1551	45.29	17.14	25.35	12.22
A3	30	20	40	10	BCC_A2	3.1468	3.1468	3.1468	37.39	18.96	29.52	14.13
A4	15	20	55	10	AlMo_3	4.9447	4.9447	4.9447	16.83	16.45	52.19	14.53
					BCC_A2	3.1361	3.1363	3.1361	15.27	14.90	55.59	14.24
A5	55	20	5	20	AlTi_3	5.7438	5.7438	4.6246	60.78	21.81	1.93	15.48
					BCC_A2	3.1537	3.1537	3.1537	54.98	20.41	2.98	21.63
A6	40	20	20	20	BCC_A2	3.1548	3.1548	3.1548	44.98	21.98	12.70	20.34
A7	25	20	35	20	BCC_A2	3.1385	3.1385	3.1385	32.66	25.29	21.41	20.64
A8	35	20	15	30	BCC_A2	3.1422	3.1422	3.1422	41.94	21.21	14.38	22.47
A9	10	20	40	30	BCC_A2	3.1384	3.1384	3.1384	12.02	21.49	34.12	32.37
A10	30	20	10	40	BCC_A2	3.1454	3.1454	3.1454	—	—	—	—
A11	10	20	30	40	BCC_A2	3.1460	3.1460	3.1460	—	—	—	—
A12	10	20	20	50	BCC_A2#1	3.7799	3.7799	3.7799	13.16	24.44	17.90	44.50
					BCC_A2#2	3.1458	3.1458	3.1458	9.29	17.78	29.53	43.40
B1	65	20	5	10	AlTi_3	5.7835	5.7835	4.6152	66.56	21.26	2.72	9.46
					BCC_A2	3.1483	3.1483	3.1483	67.31	20.01	2.78	9.90
B2	40	20	30	10	BCC_A2	3.1535	3.1535	3.1535	48.05	24.08	16.60	11.27
B3	40	20	20	20	BCC_A2	3.1550	3.1550	3.1550	44.54	21.88	12.75	20.83
B4	40	20	10	30	BCC_A2	3.1468	3.1468	3.1468	42.48	20.91	6.73	29.88
B5	30	20	10	40	BCC_A2	3.1318	3.1318	3.1318	31.61	21.42	6.26	40.71
B6	20	20	50	10	AlMo_3	4.9609	4.9609	4.9609	22.65	20.07	45.46	11.82
					BCC_A2	3.1388	3.1388	3.1388	28.39	27.00	32.52	12.09
B7	10	20	60	10	AlMo_3	4.9396	4.9396	4.9396	11.31	17.25	60.71	10.73
					BCC_A2	3.1458	3.1458	3.1458	13.56	21.28	53.55	11.61
B8	20	20	40	20	BCC_A2	3.1382	3.1382	3.1382	21.45	20.33	36.03	22.19
B9	5	20	50	25	AlMo_3	4.9450	4.9450	4.9450	4.46	15.22	47.70	32.62
					BCC_A2	3.1445	3.1445	3.1445	6.62	20.56	38.45	34.37
B10	10	20	40	30	BCC_A2#1	3.7896	3.7896	3.7896	11.95	19.01	22.53	46.51
					BCC_A2#2	3.1444	3.1444	3.1444	—	—	—	—
B11	5	20	35	40	BCC_A2#1	3.7882	3.7882	3.7882	7.21	17.59	21.75	53.45
					BCC_A2#2	3.1434	3.1434	3.1434	—	—	—	—
B12	5	20	20	55	BCC_A2#1	3.7862	3.7862	3.7862	6.86	16.04	9.02	68.08
					BCC_A2#2	3.1468	3.1468	3.1468	—	—	—	—

3.2 Ti-Al-Mo-Cr体系

图4所示为Ti-Al-Mo-Cr体系合金C1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Cr}_5$)在700℃退火21 d后的XRD谱和SEM像。从图4可以看出, XRD谱分析结果和扫描电镜图显示的结果一致。由图4(a)可知, 样品C1中包含 AlTi_3 和BCC_A2相的衍射峰。图4(b)中可以看出两种明显的衬度, 通过对该衬度区域EDS成分分析, 可以确定黑色区域为 AlTi_3 相和灰色区域是BCC_A2相。因此, 可以确定样品C1位于 AlTi_3 +BCC_A2两相区。对其进行分析发现, AlTi_3 相的成分(摩尔分数)为64.22% Ti、20.62% Al、10.33% Mo和4.83% Cr; BCC_A2相的成分为69.48% Ti、21.46% Al、6.10% Mo和2.96% Cr。图5所示为Ti-Al-Mo-Cr体系合金D1($\text{Ti}_{70}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{Cr}_5$)在800℃退

火14 d后的XRD谱和SEM像。由图5(a)可知, 样品D1中包含 AlTi_3 和BCC_A2相的衍射峰。从图5(b)可以看出, XRD谱分析结果和SEM像显示的结果一致。从图15(b)中可以看出两种明显的衬度, 通过对该衬度区域EDS成分分析, 可以确定黑色区域为 AlTi_3 相和灰色区域是BCC_A2相。因此, 可以确定样品D1位于 AlTi_3 +BCC_A2两相区。对样品D1进行分析, 发现 AlTi_3 相的成分(摩尔分数)为72.43% Ti、21.83% Al、2.32% Mo和3.42% Cr, BCC_A2相的成分为67.68% Ti、18.52% Al、5.68% Mo和8.12% Cr。

类似地, 本工作对合金样品C2~C12和D2~D12的实验结果进行了分析, 表2总结了Ti-Al-Mo-Cr体系合金样品C1~C12和D1~D12在700和

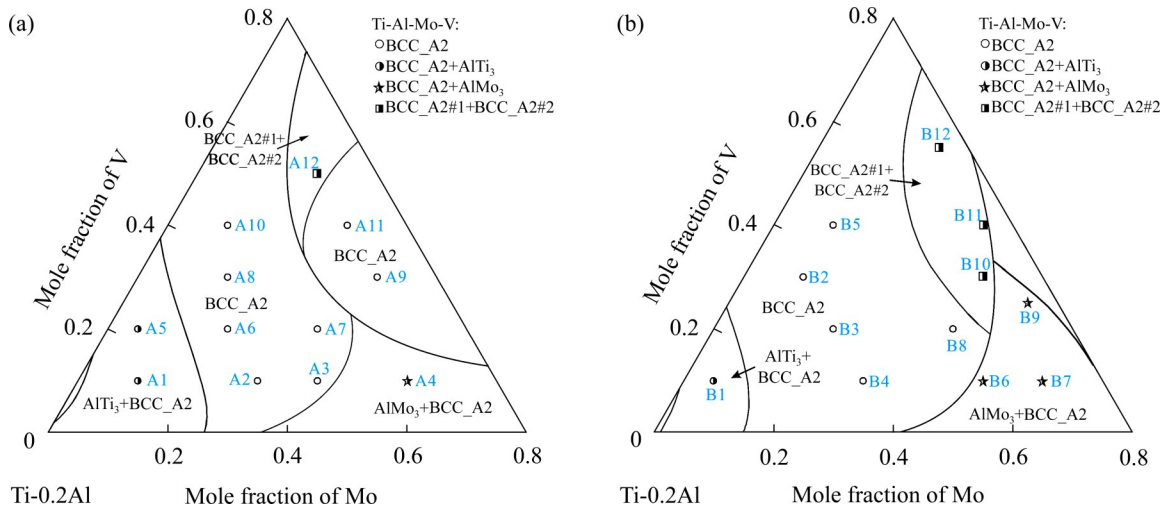


图3 Ti-Al-Mo-V 四元系含20% Al时在700℃和800℃的等温截面

Fig. 3 Constructed isothermal sections of Ti-Al-Mo-V quaternary system at 20% Al and at 700℃ (a) and 800℃ (b) in present work

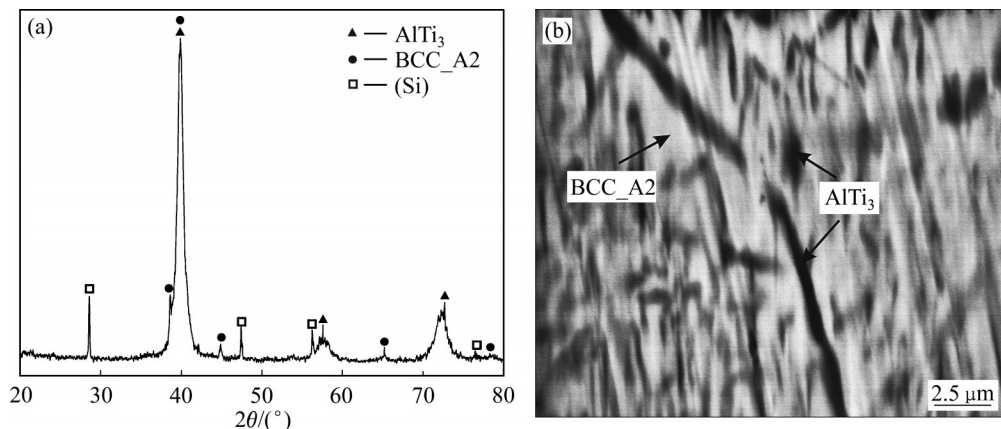


图4 Ti-Al-Mo-Cr体系合金C1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Cr}_5$)在700℃退火21 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 4 XRD pattern(a) and SEM image (b) for Ti-Al-Mo-Cr system alloy C1($\text{Ti}_{65}\text{Al}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Cr}_5$) annealed at 700℃ for 21 days

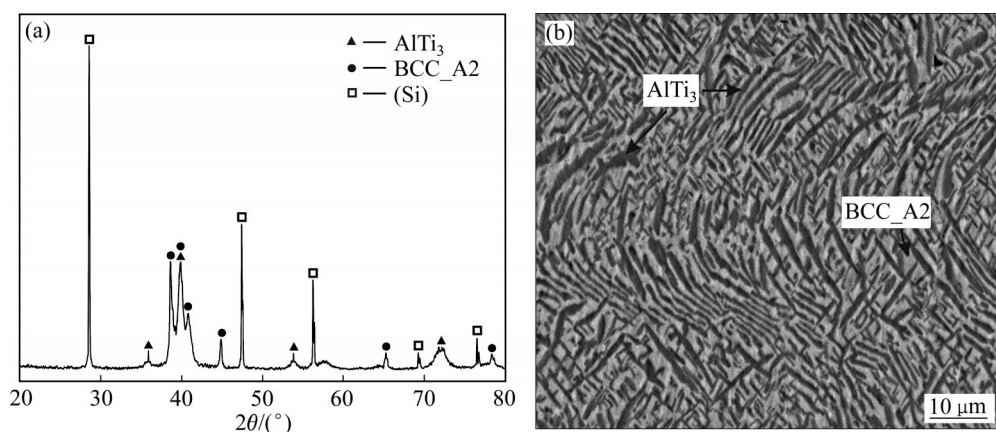


图5 Ti-Al-Mo-Cr体系合金D1($\text{Ti}_{70}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{Cr}_5$)在800 °C退火14 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 5 XRD pattern (a) and SEM image (b) for Ti-Al-Mo-Cr system alloy D1($\text{Ti}_{70}\text{Al}_{20}\text{Mo}_5\text{Cr}_5$) annealed at 800 °C for 14 days

表2 Ti-Al-Mo-Cr合金在700和800 °C退火21和14 d的实验结果

Table 2 Experimental results of Ti-Al-Mo-Cr alloys annealed at 700 and 800 °C for 21 and 14 days

Sample No.	Nominal composition, x/%				Phase	Lattice parameter/Å			Phase composition, x/%			
	Ti	Al	Mo	Cr		a	b	c	Ti	Al	Mo	Cr
C1	65	20	10	5	AlTi ₃	5.7618	5.7618	4.6134	64.22	20.62	10.33	4.83
					BCC_A2	3.1458	3.1458	3.1458	69.48	21.46	6.10	2.96
C2	50	20	25	5	BCC_A2	3.1588	3.1588	3.1588	52.01	20.69	22.64	4.66
					AlMo ₃	4.9396	4.9396	4.9396	34.19	15.80	46.49	3.52
C3	35	20	40	5	BCC_A2	3.1482	3.1482	3.1482	41.29	23.38	29.34	5.99
					BCC_A2	3.1431	3.1431	3.1431	47.61	21.25	15.77	15.37
C4	45	20	20	15	Laves_C14	7.8485	7.8485	4.3822	48.31	21.71	16.47	13.51
					AlMo ₃	4.9314	4.9314	4.9314	—	—	—	—
					BCC_A2	3.1404	3.1404	3.1404	30.82	23.70	28.15	17.33
C5	25	20	40	15	Laves_C14	7.8821	7.8821	4.2943	31.35	24.54	25.15	18.96
					BCC_A2	3.1476	3.1476	3.1476	—	—	—	—
C6	55	20	5	20	AlMo ₃	4.9589	4.9589	4.9589	6.47	18.48	56.37	18.68
					BCC_A2#1	3.1410	3.1410	3.1410	5.88	15.93	62.02	16.17
C7	5	20	55	20	BCC_A2#2	4.0388	4.0388	4.0388	7.89	24.41	38.96	28.74
					Laves_C14	7.8524	7.8524	4.3078	6.69	19.98	52.58	20.75
					BCC_A2	3.1487	3.1487	3.1487	40.87	20.54	9.79	28.80
C8	40	20	10	30	Laves_C14	7.8472	7.8472	4.2983	41.47	21.02	6.16	31.35
					AlMo ₃	4.9368	4.9368	4.9368	—	—	—	—
C9	30	20	20	30	BCC_A2	3.1501	3.1501	3.1501	34.98	16.69	14.36	33.97
					Laves_C14	7.8505	7.8505	4.3062	38.21	18.15	4.88	38.76
					AlMo ₃	4.9413	4.9413	4.9413	—	—	—	—
C10	10	20	30	40	BCC_A2	3.1481	3.1481	3.1481	11.23	16.95	24.24	47.58
					Laves_C14	7.8636	7.8636	4.3007	15.49	20.63	12.18	51.70
C11	20	20	10	50	BCC_A2	3.1454	3.1454	3.1454	19.99	13.58	7.49	58.94
					Laves_C14	7.8619	7.8619	4.2980	26.54	16.47	3.27	53.72
C12	10	20	5	65	BCC_A2	3.1469	3.1469	3.1469	—	—	—	—
					Laves_C14	7.8542	7.8542	4.3115	—	—	—	—

(To be continued)

(Continued)

Sample No.	Nominal composition, x/%				Phase	Lattice parameter/Å			Phase composition, x/%			
	Ti	Al	Mo	Cr		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Ti	Al	Mo	Cr
D1	70	20	5	5	AlTi ₃	5.7836	5.7836	4.6393	72.43	21.83	2.32	3.42
					BCC_A2	3.1439	3.1439	3.1439	67.68	18.52	5.68	8.12
D2	55	20	20	5	BCC_A2	3.1481	3.1481	3.1481	55.89	21.45	16.76	5.90
D3	45	20	30	5	BCC_A2	3.1483	3.1483	3.1483	44.73	18.74	32.14	4.39
D4	35	20	40	5	AlMo ₃	4.9333	4.9333	4.9333	35.86	17.86	42.31	3.97
					BCC_A2	3.1479	3.1479	3.1479	42.91	25.11	24.73	7.25
D5	58	20	2	20	AlTi ₃	5.7796	5.7796	4.6356	63.80	21.58	1.36	13.26
					BCC_A2	3.1474	3.1474	3.1474	56.47	16.78	1.19	25.56
					Laves_C14	7.8478	7.8478	4.4218	58.72	22.33	1.73	17.22
					BCC_A2	3.1502	3.1502	3.1502	46.20	13.60	4.08	36.12
D6	50	20	10	20	Laves_C14	7.8526	7.8526	4.3062	51.90	21.04	6.76	20.30
					AlMo ₃	4.9347	4.9347	4.9347	40.47	13.88	32.56	13.09
D7	20	20	40	20	BCC_A2	3.1424	3.1424	3.1424	44.07	18.00	18.35	19.58
					AlMo ₃	4.9321	4.9321	4.9321	—	—	—	—
D8	40	20	10	30	BCC_A2	3.1432	3.1432	3.1432	41.71	20.12	8.69	29.48
					AlMo ₃	4.9363	4.9363	4.9363	11.15	21.99	51.48	15.38
D9	10	20	55	15	BCC_A2	3.1483	3.1483	3.1483	15.43	27.57	31.86	25.14
					AlMo ₃	4.9376	4.9376	4.9376	—	—	—	—
					BCC_A2	3.1461	3.1461	3.1461	24.48	23.85	7.98	43.69
D10	20	20	20	40	Laves_C14	7.8574	7.8574	4.3152	20.89	21.06	16.35	41.70
					BCC_A2	3.1415	3.1415	3.1415	5.77	22.98	4.49	66.76
D11	15	20	5	60	Laves_C14	7.8490	7.8490	4.2719	7.17	25.07	3.88	63.88
					BCC_A2	3.6104	3.6104	3.6104	5.80	19.89	4.44	69.87

800℃分别退火 21 和 14 d 后的 XRD 谱和 SEM/EDS 实验分析结果。通过分析, 确定了每个合金样品所在的相区、相成分, 并计算了各相的晶格常数。其中, 测定的合金 C5、C9、C10、D8 和 D10 的 AlMo₃相、合金 C6 和 C12 的 BCC_A2 相以及 C12 的 Laves_C14 相的成分误差较大, 本工作并未采用。从表 2 可以看出, 样品 C2、C6、D2、D3 和 D12 处于单相区 BCC_A2; 样品 C1 和 D1 处于 AlTi₃+BCC_A2 两相区; 样品 C3、D4 和 D7~D9 处于 AlMo₃+BCC_A2 两相区; 样品 C4、C8、C11、C12、D6 和 D11 处于 BCC_A2+Laves_C14 两相区; 样品 C5、C9、C10 和 D10 处于 AlMo₃+BCC_A2+Laves_C14 三相区; 样品 D5 处于 AlTi₃+BCC_A2+Laves_C14 三相区; 样品 C7 处于 AlMo₃+BCC_A2+1+BCC_A2#2+Laves_C14 四相区。

根据 XRD 和 SEM/EDS 的分析结果并结合 Ti-Al-Mo、Ti-Al-Cr 和 Ti-Mo-Cr 边际三元系的相关数

据, 构筑了 Ti-Al-Mo-Cr 四元系 700 和 800℃的等温截面, 如图 6 所示。各个合金成分点所在相区与实验结果一一对应。

3.3 Ti-Al-V-Cr 体系

图 7 所示为 Ti-Al-V-Cr 体系合金 E1(Ti₇₀Al₂₀V₅Cr₅) 在 700℃退火 21 d 后的 XRD 谱和 SEM 像。从图 7 可以看出, XRD 谱分析结果和 SEM 像显示的结果一致。由图 7(a)可知, 样品 E1 中包含 AlTi₃、BCC_A2 和 Laves_C14 相的衍射峰。从图 7(b)中可以看出两种明显的衬度, 通过对该衬度区域 EDS 成分分析, 可以确定白色、灰色和黑色的区域分别是 AlTi₃、BCC_A2 和 Laves_C14 相。因此, 可以确定样品 E1 位于 AlTi₃+BCC_A2+Laves_C14 三相区。对其进行分析, 发现 AlTi₃ 相的成分为 67.25% Ti、21.77% Al、4.13% V 和 6.85% Cr; BCC_A2 相的成分(摩尔分数)为 69.61% Ti、15.58% Al、7.76% V 和

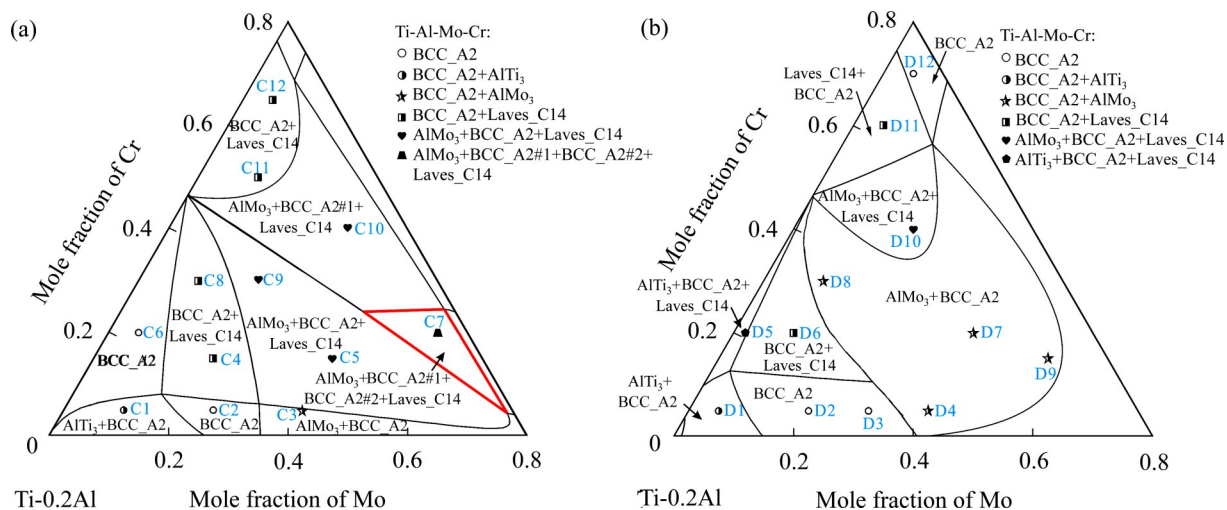


图6 本工作构筑的Ti-Al-Mo-Cr四元系含20%Al时在700和800℃的等温截面

Fig. 6 Constructed isothermal sections of Ti-Al-Mo-Cr quaternary system at 20% Al and at 700 (a) and 800 °C (b) in present work

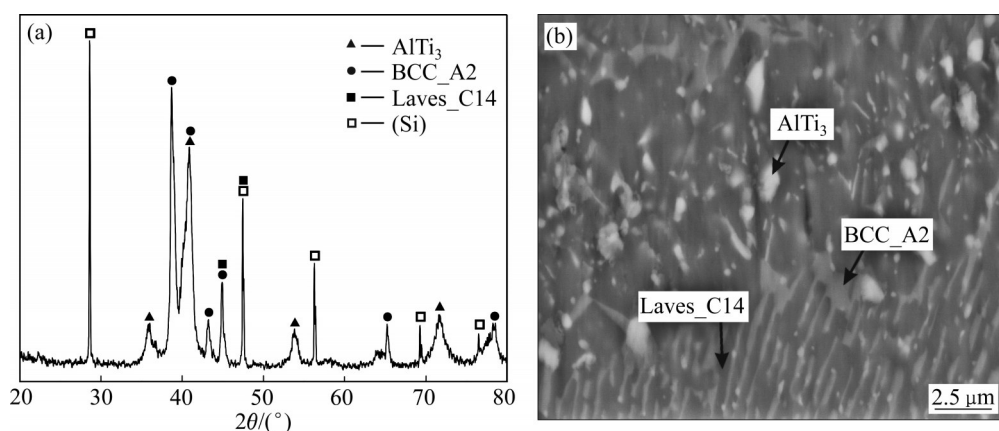


图7 Ti-Al-V-Cr体系合金E1(Ti₇₀Al₂₀V₅Cr₅)在700℃退火21 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 7 XRD pattern (a) and SEM image (b) for Ti-Al-V-Cr system alloy E1(Ti₇₀Al₂₀V₅Cr₅) annealed at 700 °C for 21 days

7.05% Cr; Laves_C14 相的成分为 71.65% Ti、22.48% Al、2.81% V 和 3.06% Cr。图 8 所示为 Ti-Al-V-Cr 体系合金 F2(Ti₆₅Al₂₀V₁₀Cr₅) 在 800 °C 退火 14 d 后的 XRD 谱和 SEM 像。根据测得的 XRD 谱, 样品 F2 中包含 AlTi₃ 和 BCC_A2 相的衍射峰。从图 8 可以看出, XRD 谱分析结果和样品 F2 显示的结果一致。从图 8(b) 中可以看到两种明显的衬度, 通过对该衬度区域 EDS 成分分析, 可以确定黑色区域为 AlTi₃ 相, 灰色区域是 BCC_A2 相。因此, 可以确定样品 F2 位于 AlTi₃+BCC_A2 两相区。对样品 F2 进行分析, 发现 AlTi₃ 相的成分(摩尔分数)为 69.84% Ti、24.13% Al、4.54% V 和 1.49% Cr; BCC_A2 相的成分为 61.29% Ti、16.94% Al、

14.04% V 和 7.73% Cr。

类似地, 本工作对 Ti-Al-V-Cr 其他合金样品的实验结果进行了分析, 表 3 总结了 Ti-Al-V-Cr 合金样品 E1~E12 和 F1~F12 在 700 和 800 °C 分别退火 21 和 14 d 的 XRD 谱和 SEM/EDS 实验分析结果。通过分析, 确定了每种合金样品所在的相区、相成分, 并计算了各相的晶格常数。其中, 测定的合金 F10 和 F11 的 Laves_C14 相的成分误差较大, 本工作并未采用。样品 E4、E7、E11、E12、F3、F4 和 F8 处于 BCC_A2 单相区; 样品 E3、F1 和 F2 处于 AlTi₃+BCC_A2 两相区; 样品 E6、E8、E9、F6、F7 和 F9、F10、F11 和 F12 处于 BCC_A2+Laves_C14 两相区, 样品 E1、E2、E5、E10 和 F5 处于 AlTi₃+BCC_A2+Laves_C14 三相区。

根据 XRD 和 SEM/EDS 的分析结果并结合 Ti-Al-V、Ti-Al-Cr 和 Ti-V-Cr 边际三元系的相平衡数据, 构筑了 Ti-Al-V-Cr 体系 700 和 800℃的等温截

面, 如图9所示。从图9可以看出, 除合金 E12 存在偏差外, 其余合金成分点所在相区与实验结果一一对应。

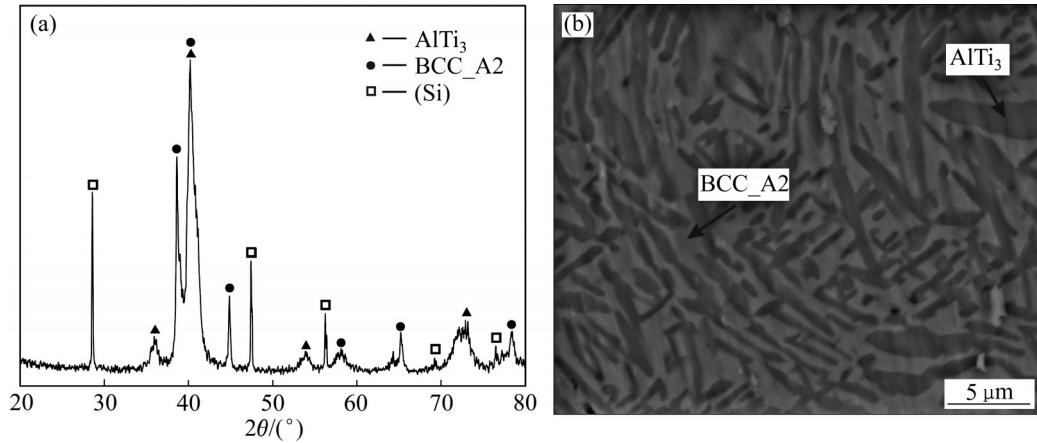


图8 Ti-Al-V-Cr体系合金F2(Ti₆₅Al₂₀V₁₀Cr₅)在800℃退火14 d后的XRD谱和SEM像

Fig. 8 XRD pattern (a) and SEM image (b) for Ti-Al-V-Cr system alloy F2(Ti₆₅Al₂₀V₁₀Cr₅) annealed at 800℃ for 14 days

表3 Ti-Al-V-Cr合金在700和800℃退火21和14 d的实验结果

Table 3 Experimental results of Ti-Al-V-Cr alloys annealed at 700 and 800℃ for 21 and 14 days

Sample No.	Nominal composition, x/%				Phase	Lattice parameter/Å			Phase composition, x/%			
	Ti	Al	V	Cr		a	b	c	Ti	Al	V	Cr
E1	70	20	5	5	AlTi ₃	5.7739	5.7739	4.6422	67.25	21.77	4.13	6.85
					BCC_A2	4.0391	4.0391	4.0391	69.61	15.58	7.76	7.05
					Laves_C14	7.8392	7.8392	4.2621	71.65	22.48	2.81	3.06
E2	65	20	10	5	AlTi ₃	5.7779	5.7779	4.6371	67.33	20.70	3.35	8.62
					BCC_A2	4.0388	4.0388	4.0388	67.26	19.62	9.25	3.87
					Laves_C14	7.8497	7.8497	4.2651	65.27	20.31	5.19	9.23
E3	55	20	20	5	AlTi ₃	5.7829	5.7829	4.6368	60.83	21.79	14.27	3.11
					BCC_A2	4.0454	4.0454	4.0454	54.66	20.75	4.80	19.79
E4	25	20	50	5	BCC_A2	4.0384	4.0384	4.0384	25.83	20.21	4.75	49.21
					AlTi ₃	5.7811	5.7811	4.6430	47.83	17.77	21.34	13.06
E5	50	20	15	15	BCC_A2	4.0445	4.0445	4.0445	44.94	13.36	30.98	10.72
					Laves_C14	7.8635	7.8635	4.3565	54.14	19.89	13.79	12.18
					BCC_A2	4.0488	4.0488	4.0488	42.54	19.43	18.42	19.61
E6	40	20	20	20	Laves_C14	7.8842	7.8842	4.2964	39.63	20.12	20.62	19.63
					BCC_A2	4.0491	4.0491	4.0491	20.80	20.07	19.54	39.59
E8	52.5	20	2.5	25	BCC_A2	4.0429	4.0429	4.0429	54.20	19.77	1.94	24.09
					Laves_C14	7.8478	7.8478	4.3019	52.15	20.34	2.11	25.40
E9	47.5	20	2.5	30	BCC_A2	4.0415	4.0415	4.0415	53.34	15.88	2.70	28.08
					Laves_C14	7.8709	7.8709	4.3042	51.13	15.01	2.11	31.75
					AlTi ₃	5.7887	5.7887	4.6409	44.72	15.35	10.26	29.67
E10	40	20	10	30	BCC_A2	4.0396	4.0396	4.0396	43.84	12.01	9.23	34.92
					Laves_C14	7.8509	7.8509	4.2991	47.45	14.30	10.50	27.75
E11	20	20	30	30	BCC_A2	4.0437	4.0437	4.0437	24.60	15.07	29.01	31.32
E12	20	20	10	50	BCC_A2	4.0393	4.0393	4.0393	22.62	15.88	8.79	52.71

(To be continued)

(Continued)

Sample No.	Nominal composition, x/%				Phase	Lattice parameter/Å			Phase composition, x/%			
	Ti	Al	V	Cr		a	b	c	Ti	Al	V	Cr
F1	70	20	5	5	AlTi ₃	5.7610	5.7610	4.6177	72.02	24.31	2.20	1.47
					BCC_A2	4.0423	4.0423	4.0423	67.42	16.45	6.71	9.42
F2	65	20	10	5	AlTi ₃	5.7819	5.7819	4.6374	69.84	24.13	4.54	1.49
					BCC_A2	4.0359	4.0359	4.0359	61.29	16.94	14.04	7.73
F3	45	20	30	5	BCC_A2	4.0404	4.0404	4.0404	45.88	20.75	28.43	4.94
F4	25	20	50	5	BCC_A2	4.0430	4.0430	4.0430	26.08	20.74	48.54	4.64
F5	60	20	5	15	AlTi ₃	5.7731	5.7731	4.6509	67.07	22.56	3.14	7.23
					BCC_A2	4.0449	4.0449	4.0449	47.81	10.71	5.39	36.09
					Laves_C14	7.8562	7.8562	4.3782	56.72	20.97	7.51	14.80
F6	40	20	20	20	BCC_A2	4.0419	4.0419	4.0419	41.39	20.07	19.76	18.78
					Laves_C14	7.8524	7.8524	4.2917	38.55	18.60	21.56	21.29
F7	50	20	5	25	BCC_A2	4.0434	4.0434	4.0434	45.65	12.51	4.60	37.24
					Laves_C14	7.8537	7.8537	4.3149	53.70	25.45	4.94	15.91
F8	5	20	50	25	BCC_A2	4.0425	4.0425	4.0425	6.14	20.53	48.33	25.00
F9	35	20	15	30	BCC_A2	4.0361	4.0361	4.0361	35.89	13.38	17.75	32.98
					Laves_C14	7.8557	7.8557	4.3001	37.11	14.27	16.76	31.86
F10	20	20	30	30	BCC_A2	4.0427	4.0427	4.0427	20.07	13.12	32.79	34.02
					Laves_C14	7.8481	7.8481	4.3640	—	—	—	—
F11	10	20	30	40	BCC_A2	4.0437	4.0437	4.0437	10.85	13.71	32.65	42.79
					Laves_C14	7.8530	7.8530	4.3822	—	—	—	—
F12	20	20	10	50	BCC_A2	4.0477	4.0477	4.0477	16.81	12.06	12.32	58.81
					Laves_C14	7.8593	7.8593	4.3015	27.76	19.07	6.46	46.71

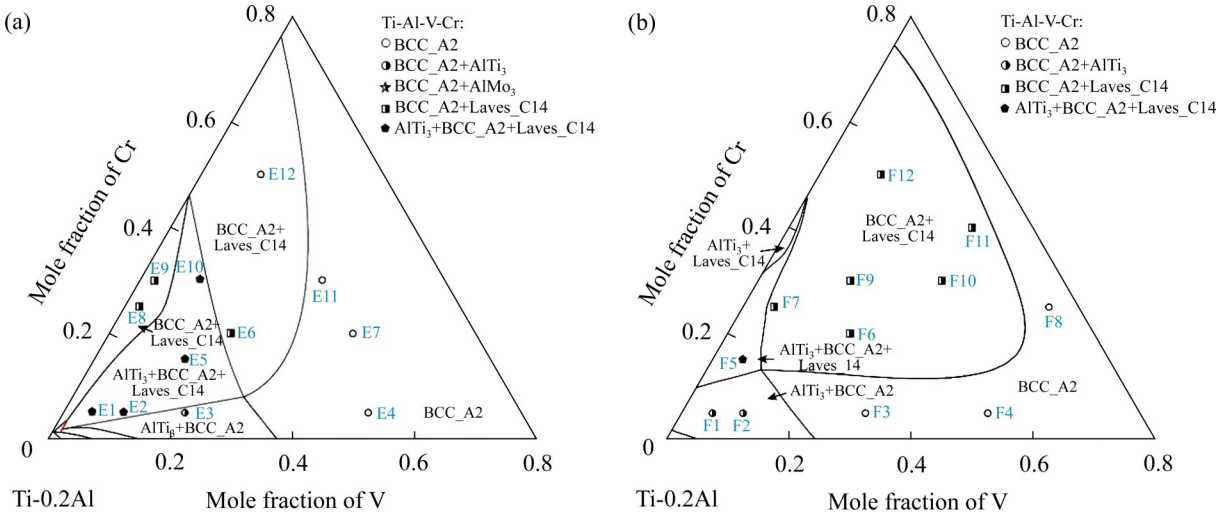


图9 Ti-Al-V-Cr四元系含20%Al时在700和800℃的等温截面

Fig. 9 Constructed isothermal sections of Ti-Al-V-Cr quaternary system at 20% Al and at 700 (a) and 800 °C (b) in present work

4 结论

1) 对 Ti-Al-Mo-V-Cr 体系中边际三元系和四元系进行了严格的文献评估，配置了 72 种合金，采

用 XRD 和 SEM/EDS 测试手段系统地研究了 Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr 和 Ti-Al-V-Cr 四元体系含 20% Al 在 700 和 800 °C 的等温截面。

2) Ti-Al-Mo-V 体系存在 3 个两相区和 1 个单相区，Ti-Al-Mo-Cr 体系存在 1 个四相区、2 个三相

区、3个二相区和1个单相区, Ti-Al-Cr-V体系存在1个三相区、3个两相区和1个单相区。本工作构筑的 Ti-Al-Mo-V、Ti-Al-Mo-Cr 和 Ti-Al-V-Cr 四元体系6个等温截面为进一步热力学描述 Ti-Al-Mo-V-Cr 五元体系和设计新型钛合金提供了关键实验数据。

REFERENCES

- [1] 赖敏杰, 李金山. 亚稳 β 钛合金的变形孪晶和应力诱发相变[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2185–2191.
LAI Min-jie, LI Jin-shan. Deformation twinning and stress-induced phase transformation of metastable β titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2185–2191.
- [2] 贺 峰, 杨双平, 曹继敏, 等. 冷轧时效对新型 Ti-Nb-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 42–48.
HE Feng, YANG Shuang-ping, CAO Ji-min, et al. Effect of cold rolling aging on microstructure and properties of new Ti-Nb-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 42–48.
- [3] HU B, SRIDAR S, HAO L, et al. A new thermodynamic modeling of the Ti-V system including the metastable ω phase[J]. Intermetallics, 2020, 122: 106791.
- [4] 程 军, 于振涛, 牛金龙, 等. 时效处理对近 β 型钛合金 TLM 组织与性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45(6): 54–58, 80.
CHENG Jun, YU Zhen-tao, NIU Jin-long, et al. Effect of aging treatment on the growth of near-infrared ray β effect of Ti on microstructure and properties of TLM[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2017, 45(6): 54–58, 80.
- [5] WU Chuan, ZHAN Mei. Effect of solution plus aging heat treatment on microstructural evolution and mechanical properties of near- β titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(5): 997–1006.
- [6] 李明兵, 王新南, 商国强, 等. 双态组织 TC32 钛合金的抗弹性能及损伤机制[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 365–372.
LI Ming-bing, WANG Xin-nan, SHANG Guo-qiang, et al. Bullet resistance and damage mechanism of TC32 titanium alloy with bimodal structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 365–372.
- [7] 葛 鹏, 吴 欢, 赵永庆. Mo, V, Cr 对钛合金 β 相的合金化效应[J]. 中国材料进展, 2016, 35(10): 795–798.
GE Peng, WU Huan, ZHAO Yong-qing. Alloying effect of Mo, V, Cr on β phase of titanium alloy[J]. China Material Progress, 2016, 35(10): 795–798.
- [8] ZHAO Q Y, YANG F, TORRENS R, et al. Comparison of hot deformation behaviour and microstructural evolution for Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr alloys prepared by powder metallurgy and ingot metallurgy approaches[J]. Materials & Design, 2019, 169: 107682.
- [9] PARIDA A K, MAITY K. Analysis of some critical aspects in hot machining of Ti-5553 superalloy: experimental and Fe analysis[J]. Defense Technology, 2019, 15(3): 344–352.
- [10] NYAKANA S L, FANNING J C, BOYER R R. Quick reference guide for titanium alloys in the 00s[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14: 799–811.
- [11] HU B, WANG J, WANG C, et al. CALPHAD-type thermodynamic assessment of the Ti-Mo-Cr-V quaternary system[J]. CALPHAD, 2016, 55: 103–112.
- [12] HUANG X M, ZHU L L, CAI G M, et al. Experimental investigation of phase equilibria in the Ti-Al-Mo ternary system[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(4): 2270–2284.
- [13] WITUSIEWICZ V T, BONDAR A A, HECHT U, et al. Thermodynamic re-modelling of the ternary Al-Mo-Ti system based on novel experimental data[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 1071–1091.
- [14] HAYES F H. The Al-Ti-V (aluminum-titanium-vanadium) system[J]. Journal of Phase Equilibria, 1995, 16(2): 163–176.
- [15] LU X, GUI N, QIU A, et al. Thermodynamic modeling of the Al-Ti-V ternary system[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(9): 4155–4164.
- [16] ZHANG H, LIN J, LIANG Y, et al. Phase equilibria of Ti-Al-V system at 1300 °C[J]. Intermetallics, 2019, 115: 106609.
- [17] CHEN L Y, QIU A T, LIU L J, et al. Thermodynamic modeling of the Al-Ti-V ternary system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 1936–1946.
- [18] XU S, ZHANG H, YANG G, et al. Phase equilibria in the Ti-Al-Cr system at 1000 °C [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 826: 154236.
- [19] TAYLOR J L. Beta phase parameters in the system Ti-V-Mo[J]. Journal of Metals, 1956, 206: 959–961.
- [20] KOMJATHY S. The constitution of some vanadium-base binary and ternary systems and the ageing characteristics of selected ternary alloys[J]. Journal of the Less-Common Metals, 1961, 3(6): 468–488.
- [21] KORNILOV I I, POLIAKOVA R S. Melting diagram for the titanium-vanadium-molybdenum ternary system[J]. ARS Journal, 1961, 31(5): 694–697.
- [22] ELLIOTT R P, LEVINGER B W, ROSTOKER W. System titanium-chromium-molybdenum[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1953, 197(11): 1544–1548.
- [23] GRUM-GRIZHMAIL N V, GROMOVA V G. Phase

- diagram of the Ti-Cr-Mo system at 1200, 900 and 600 °C [M]// Titanium and its Alloys. Moscow: Akad Nauk SSSR, 1962: 35–42.
- [24] GHOSH G. Thermodynamic and kinetic modeling of the Cr-Ti-V system[J]. Journal of Phase Equilibria, 2002, 23(4): 310–328.
- [25] SPERNER F. The dual-material system aluminium-molybdenum[J]. International Journal of Materials Research, 1959, 50(10): 588–591.
- [26] RAMAN A. X-ray investigations in some T-T⁵-Al-system[J]. International Journal of Materials Research, 1966, 57(7): 535–540.
- [27] MIURA S, FUJINAKA J, MORI T. Microstructural control of Al₃Ti-based alloys designed by multi-component phase diagrams[C]//SRIVATSAN T S, VARIN R A. Processing and Fabrication of Advanced Materials X, Indianapolis, IN, United States: [s.n.], 2001: 287–300.
- [28] RANGHAVAN V. Al-Cr-Mo-Ti(aluminum-chromium-molybdenum-titanium) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2005, 26: 369.
- [29] LI Y G, BLENKINSOP P A, LORETTO M H, et al. Effect of aluminium on deformation structure of highly stabilized β -Ti-V-Cr alloys[J]. Materials Science and Technology, 1999, 15(2): 151–155.
- [30] WANG H, WARNKEN N, REED R C. Thermodynamic assessment of the ordered B2 phase in the Ti-V-Cr-Al quaternary system[J]. CALPHAD, 2011, 35(2): 204–208.

Experimental investigation of phase equilibria in Ti-Al-Mo-V-Cr key quaternary systems at 700 °C and 800 °C

QIAO Hui¹, ZHANG Yu¹, HU Biao¹, LI Kai², LIU Shu-hong², DU Yong²

(1. School of Materials Science and Engineering,

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Seventy-two quaternary alloys were prepared to investigate the phase equilibria of the Ti-Al-Mo-V, Ti-Al-Mo-Cr and Ti-Al-V-Cr systems at 700 and 800 °C with 20% (mole fraction) Al in the high strength β titanium alloy Ti-Al-Mo-V-Cr system by combining X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS) in the present work. The results show that there are three two-phase regions (AlTi₃+BCC_A2, AlMo₃+BCC_A2, BCC_A2#1+BCC_A2#2) and one single-phase region (BCC_A2) in Ti-Al-Mo-V system, one four-phase region (AlMo₃+BCC_A2#1+BCC_A2#2+ Laves_C14) and two three-phase regions (AlMo₃+BCC_A2+Laves_C14, AlTi₃+BCC_A2+Laves_C14), three two-phase regions (AlTi₃+BCC_A2, AlMo₃+BCC_A2, Laves_C14+BCC_A2) and one single-phase region (BCC_A2) in Ti-Al-Mo-Cr system, and one three-phase region (AlTi₃+BCC_A2+Laves_C14), three two-phase regions (AlTi₃+BCC_A2, AlMo₃+BCC_A2, Laves_C14+BCC_A2) and one single-phase region (BCC_A2) in the Ti-Al-V-Cr system at 700 and 800 °C. The isothermal sections of these quaternary systems at 700 and 800 °C with 20% (mole fraction) Al are constructed, which are provided important theoretical guidance for designing new β titanium alloys.

Key words: Ti-Al-Mo-V-Cr; titanium alloy; phase equilibria; phase diagram; experimental determination

Foundation item: Project(52071002) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2008085QE200) supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province, China

Received date: 2021-10-08; **Accepted date:** 2021-11-11

Corresponding author: HU Biao; Tel: +86-554-6601194; E-mail: hubiao05047071@163.com

(编辑 龙怀中)