

Si元素掺杂对AlTiV轻质多主元合金 微结构及硬度的影响

翟高阳,张子鉴,李鹏飞,开明杰,操振华*

(南京工业大学材料科学与工程学院,江苏 南京 210009)

摘要:采用真空感应熔炼技术制备了 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金。利用X射线衍射仪、扫描电子显微镜、透射电子显微镜和显微硬度计等表征合金的微观结构与力学性能,研究了Si元素掺杂以及均匀化退火对合金微观组织结构及显微硬度的影响。结果表明:铸态合金为单相BCC结构,并且晶粒粗大;退火后,有序B2相从合金基体中析出,提高了合金的硬度;Si元素的加入,促使合金晶粒尺寸减小,抑制了B2相长大。合金显微硬度最高为587 HV,比强度达到 $430 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。分析表明,合金的高显微硬度主要来源于合金的固溶强化、第二相沉淀以及高点阵阻力。

关键词: $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{40}\text{V}_{40}$ 轻质多主元合金; Si掺杂; 退火; 微观组织; 显微硬度

中图分类号: TG139

文献标志码: A

引文格式: 翟高阳,张子鉴,李鹏飞,等. Si元素掺杂对AlTiV轻质多主元合金微结构及硬度的影响[J]. 材料研究与应用, 2022,16(2):262-268.

ZHAI Gaoyang, ZHANG Zijian, LI Pengfei, et al. Effect of Silicon Element Doping on the Microstructure and Microhardness of AlTiV Lightweight Multi-Principal Element Alloys[J]. Materials Research and Application, 2022,16(2):262-268.

近年来,轻质多主元合金成为轻质材料的一个热点研究方向^[1-4]。多主元合金最初由Yeh等^[5]提出,其由5种或5种以上元素以等原子比构成。由于多主元合金拥有较高的混合熵,导致系统吉布斯自由能较低,能够抑制金属间化合物的产生,促进单相固溶体的形成^[5-7]。随着合金体系的不断拓展,多主元合金不再局限于由等原子比五元及五元以上元素构成,而近等原子比合金以及三元、四元多主元合金被提出,它们同样展现出单相的固溶体结构以及优异的力学性能^[8-9]。同时,多主元合金具有高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应及鸡尾酒效应,使得多主元合金具有更高的强度、良好的耐蚀性及较好的高温稳定性等优异的性能^[6,10-14]。因此,人们倾

向于从多主元合金的角度设计高强度、低密度的轻质合金。

目前,轻质多主元合金主要选用一些轻质元素(如Al、Ti、Mg、Li、Ca、Si等)结合一些过渡元素(如V、Mn、Zr、Cr、Nb等)进行设计^[4]。其中,基于Al和Ti两种轻质元素设计并制备多种轻质多主元合金,如 $\text{Ti}_{60}\text{Al}_x(\text{VCrNb})_{40-x}$ ^[15]、 $\text{Ti}_x(\text{AlCrNb})_{100-x}$ ^[16]和 $\text{Ti}_x(\text{AlCrVNb})_{100-x}$ ^[17]等。与单主元合金不同的是,轻质多主元合金为了保证单相固溶体的微观组织结构及抑制析出相的生成,通过大范围调控元素的含量来调控性能。而单主元合金通过掺杂少量元素及调整热处理工艺,来调控有利的析出相,改善合金的性能^[18]。如Al合金中通过掺杂Li、Cu、Mg等

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52071176)

作者简介: 翟高阳(1997-),男,江苏高邮人,硕士研究生,主要研究方向为轻质高熵合金的制备及其力学性能的研究, E-mail: 201961203132@njtech.edu.cn。

通信作者: 操振华(1979-),男,安徽怀宁人,博士,教授,主要从事纳米金属复合薄膜与高熵合金的基础与工程应用研究, E-mail: zhenhuacao@njtech.edu.cn。

微量元素,经固溶时效等处理后在合金基体中析出 Al_3Li 、 Al_2CuLi 和 Al_2Cu 等沉淀相,有效地提高了合金的力学性能^[19-20]。将微量元素掺杂入多主元合金中,同样能有效提高多主元合金的力学性能。Huang等^[18]在AlTiVCr轻质多主元合金中掺杂了少量的C、Si、B元素,在合金中形成TiC、 Ti_5Si_3 、TiB等析出相,有效地提高了合金的显微硬度。但微量元素的添加及热处理工艺对合金微观组织及力学性能的影响,仍需要进一步的研究。

以 $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{40}\text{V}_{40}$ 轻质多主元合金为研究对象,采用水冷铜模真空感应熔炼炉制备了 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$)轻质多主元合金。重点研究了Si元素的掺杂以及退火对合金微观组织与显微硬度的影响,并分析多主元合金高显微硬度的内在强化机制。

1 实验部分

1.1 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的制备及热处理

实验以纯度为99.97%的Al、Ti、V和Si为原料,采用水冷铜模真空感应熔炼炉在高纯氩气(纯度为99.999%)环境下制备了成分为 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$)的轻质多主元合金铸锭,样品分别命名为Si0和Si0.7。每个样品重复熔炼5次来保证铸锭的均匀性。铸态合金在高真空管式炉中1200℃下进行24h的均匀化退火,冷却和加热速率均为 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.2 微观组织的表征

采用电火花线切割从铸锭中切取规格为 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的试样。试样经碳化硅砂纸(240~2000号)粗磨后,使用金刚石膏对试样进行抛光。合金试样的晶体结构采用X射线衍射仪(XRD)进行表征,扫描角度从 $35^\circ\sim 80^\circ$,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$ 。使用腐蚀剂($\varphi(\text{HF}):\varphi(\text{HNO}_3):\varphi(\text{H}_2\text{O})=1:2:50$)浸蚀试样1 min,采用金相显微镜观察腐蚀后样品的金相组织。采用配备有能谱仪的(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)对合金进行元素分布及含量的测定。利用透射电子显微镜(TEM)对退火态合金沉淀相结构特征进行表征,透射电镜试样经砂纸研磨至厚 $10\text{ }\mu\text{m}$,随后采用离子束减薄制备成最终的TEM样品。

1.3 密度与显微硬度

根据阿基米德原理测定合金的实际密度,每种样品测试5次并取其平均值。采用维氏硬度测试仪测定合金的维氏硬度,测定载荷为500 g,保压时间为15 s,每个样品先经抛光,抛光后合金表面弥散测试10个有效点并取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

图1为 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$)轻质多主元合金的XRD图谱。从图1可见:铸态合金的特征峰为BCC结构,根据布拉格方程计算合金的晶格参数为 $3.157\text{ }\text{\AA}$;均匀化退火后,合金主峰位置未发生改变;在均匀化退火后的Si0合金中,分别在 50° 和 67° 处观察到有序B2相(BCC结构的有序相)(111)面和(210)面的衍射峰;在退火后的Si0.7合金中,没有观察到明显的有序B2相的衍射峰。

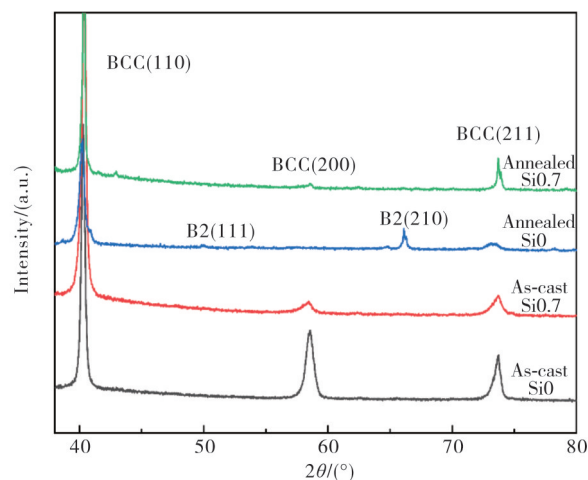
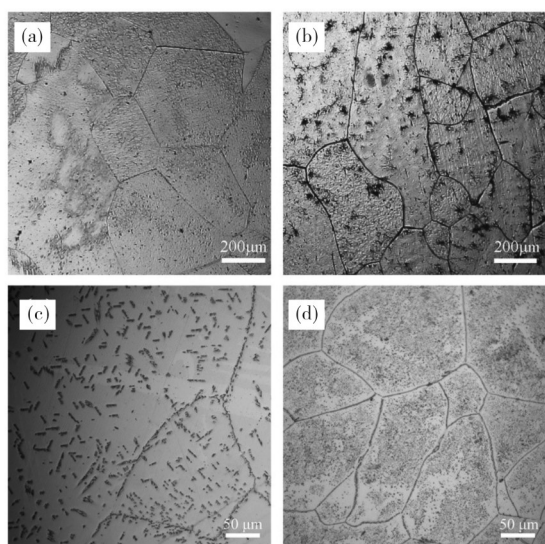


图1 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$)轻质多主元合金铸态及退火态的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys

图2为铸态及退火态合金铸锭显微组织的金相图。图2(a)和图2(b)为铸态合金的金相图,可以看出,合金的晶粒较为粗大,采用截线法估算出Si0合金及Si0.7的合金平均晶粒尺寸分别为500和 $220\text{ }\mu\text{m}$ 。图2(c)和图2(d)为退火态的高倍金相图,可以看出,退火后Si0合金中观察到明显微米级针状析出相,Si0.7合金中析出相对较小但更密集。



(a) 铸态 Si0 合金; (b) 铸态 Si0.7 合金; (c) 退火态 Si0 合金; (d) 退火态 Si0.7 合金。

(a) as-cast si0 alloy; (b) as-cast Si0.7 alloy; (c) annealed Si0 alloy; (d) annealed Si0.7 alloy.

图2 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的金相图

Fig. 2 The Optical Microscope imagines of $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys

利用能谱仪对合金元素分布进行了分析,图3为1200℃下退火24h后Si0.7合金的扫描能谱图。从图3可见,合金中各元素分布均匀,并没有观察到偏聚现象。合金中各元素含量列于表1。

为了进一步揭示合金的组织结构,利用透射电子显微镜对合金的微观组织结构进行了研究。图4为退火后 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的透射电子显微镜图。从图4(a)可以看出:Si0合金中出现颗粒状析出相,析出相大小为1μm左右;右上角附图为Si0合金的基体相电子衍射图, Si0合金基体相呈现BCC结构,同时在两行明亮的衍射斑点之间观察到微弱的B2相的暗衍射斑点。图4(b)为颗粒状析出相的放大图。析出相的电子衍射图如图4(c)所示,根据衍射斑点判断析出相为有序B2相。从图4(d)Si0.7合金透射图可见,与Si0合金类似, Si0.7合金中出现颗粒状析出相,同时观察到500nm左右的析出相。基体合金衍射斑点如图4(d)右上角所示, Si0.7合金基体相为BCC结构。图4(e)为颗粒状析出相的放大图。从图4(f)析出相的电子衍射图可判断,析出相为有序B2相。虽然未从Si0.7合金XRD结果中观察到B2相衍射峰,但TEM结果进一步证明了退火后Si0.7合金基体中析出B2结构有序相。

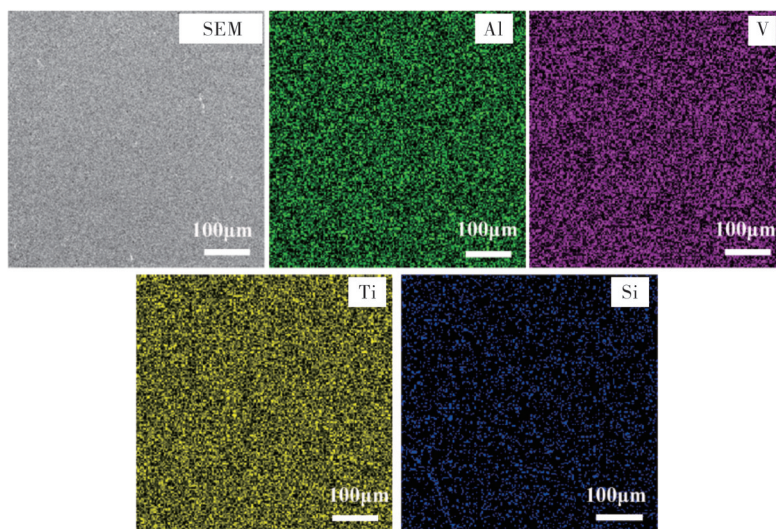


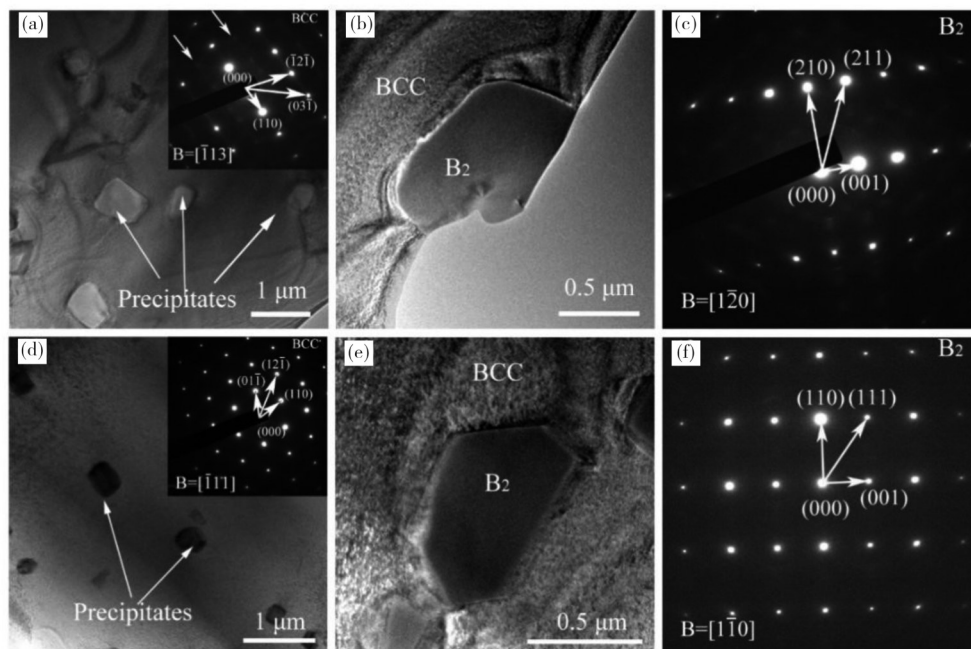
图3 Si0.7合金退火后元素分布图

Fig. 3 Elemental distribution of the annealed Si0.7 alloy

表1 SEM-EDS测得均匀化处理后 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金各元素含量

Table 1 Chemical compositions of different atomic percentages of homogenized $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys derived from SEM-EDS

合金	元素含量(at.)/%				
	Al	Ti	V	Si	total
$\text{Al}_{20}\text{Ti}_{40}\text{V}_{40}$	20.1 ± 0.2	38.3 ± 1.0	41.6 ± 1.2	—	100
$\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{79.3}\text{Si}_{0.7}$	19.9 ± 0.1	39.4 ± 0.4	40.0 ± 0.5	0.7 ± 0.1	100



(a) Si0 合金明场图 (基体的衍射斑点插入在右上角); (b) Si0 合金中沉淀相的放大图; (c) Si0 合金中沉淀相的选区电子衍射花样图; (d) Si0.7 合金明场图 (基体的衍射斑点插入在右上角); (e) Si0.7 合金中沉淀相放大图; (f) Si0.7 合金中沉淀相的选区电子衍射花样图。

(a) bright field TEM images of Si0 alloy, the inset is the selected area electron diffraction (SAED) corresponding to the matrix; (b) bright field TEM images of high magnification precipitate in Si0; (c) the SAED corresponding to precipitate in Si0.7, the inset is the SAED corresponding to the matrix; (d) bright field TEM images of Si0.7; (e) bright field TEM images of high magnification precipitate in Si0.7; (f) the SAED corresponding to precipitate in Si0.7.

图 4 退火后 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的透射电子显微镜图

Fig. 4 TEM images of the annealed $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys

2.2 密度及显微硬度

根据阿基米德原理测定了合金的实际密度。结果表明, $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的密度与钛合金 ($4.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[21] 相近, Si 元素的加入使合金密度由 $4.50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降至 $4.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 同时测得的实际密度与合金的理论密度相近。合金的理论密度主要根据混合原则进行计算, 具体公式如下^[18]。

$$\rho = \frac{\sum c_i M_i}{\sum c_i V_i} \quad (1)$$

式(1)中 c_i 、 M_i 和 V_i 分别是元素的摩尔百分比、摩尔质量和元素的摩尔体积。

图 5 为铸态和均匀化退火后 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的显微硬度。从图 5 可见: 合金整体表现出较高的显微硬度, 硬度高于 520 HV; 同种合金退火后的显微硬度高于铸态合金, 硬度最高达到 587 HV。结果表明, 退火后产生的 B2 相提高了合金的硬度, 而 Si 元素的加入并没有使合金硬度发生明显变化。

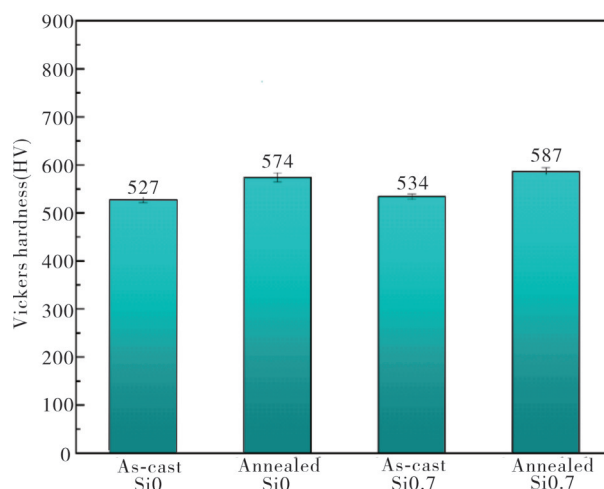


图 5 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的维氏硬度图

Fig. 5 Vickers Hardness of $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys

将制备 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金与传统的轻质合金及其他的轻质多主元合

金^[3,18,22-29]进行对比。 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金及报道的部分多主元轻质合金的强度是根据公式 $\text{HV}=3\sigma_f^{[30]}$ 转换而来, 其中 HV 是合金显微硬度, σ_f 为合金屈服强度。

图 6 为合金屈服强度与密度的关系图。从图 6 可以看出, $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金强度最高达到 1917 MPa, 与密度相近的钛合金

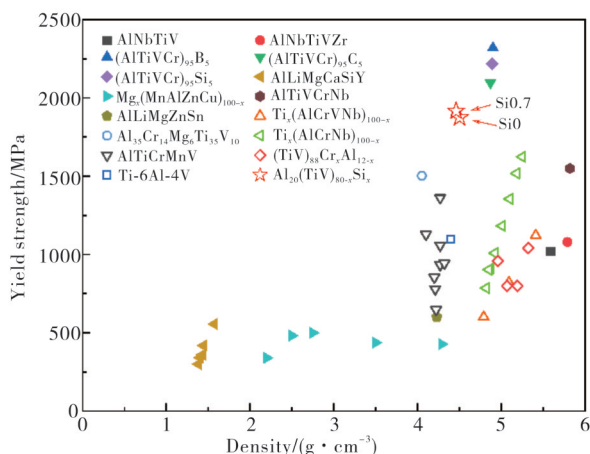


图 6 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金与其他轻质合金屈服强度与密度对比图

Fig. 6 Yield strength versus Density of the $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys and other lightweight alloys

表 2 轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 的热力学参数

Table 2 Physical, and thermodynamic properties of the $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys

多主元合金	$\Delta H_{\text{mix}}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S_{\text{mix}}/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\delta/\%$	VEC	理论密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
$\text{Al}_{20}\text{Ti}_{40}\text{V}_{40}$	-16.0	8.8	4.8	4.2	4.68
$\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{79.3}\text{Si}_{0.7}$	-17.2	9.1	5.0	4.2	4.67

退火以及 Si 元素掺杂对轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 的微观组织产生重要影响。由于 Si 元素掺杂量较少, 而且 Al、Ti 及 V 元素对于 Si 元素在一定温度下最大固溶度分别为 1.5%、0.5% 和 4.8%^[32], 而 Si 元素作为溶质原子能够完全固溶于合金基体中, 同时铸态合金在熔炼时降温速度较快, 使合金内部保持着过饱和的固溶状态, 故铸态合金为单相 BCC 结构。铸锭合金经过 1200 °C 及 24 h 充分的退火后, 原子得以有序化调整, 合金从不稳定的过饱和固溶体向平衡态转变。因此, 退火后的合金中观察到明显的有序 B2 相析出相, 并且 Si 元素的加入有利于细化合金的晶粒。随着 Si 元素的加入, 多主元合金的晶粒尺寸从 Si0 的 500 μm 减小到 Si0.7 的 220 μm 。同时, Si 元素的加入有利于合金对析出相的控制。退火后, Si0 合金中析出粗大的针状组织, 而 Si0.7 合金中析出相明显

(Ti-6Al-4V) 及其他轻质多主元合金相比, 其拥有更高的强度; $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金的比强度超过大多数的轻质多主元合金, 达到 430 $\text{MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

3 分析与讨论

3.1 合金的微观结构

多主元合金的设计指导法已经从最初的 Hume-Rothery 原理发展到多种设计参数共同考虑的指导法, 例如混合熵 (ΔS_{mix})、混合焓 (ΔH_{mix})、原子半径参数 (δ) 与价电子浓度参数 (VEC) 等。根据这些参数总结出多主元合金中单相固溶体形成的规律, 当 $-20 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 5$ 、 $0 \leq \delta \leq 6.4$ 及 $12 \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 17.5$ 时, 多主元合金倾向于形成简单固溶体^[1]。同时, 可以根据价电子浓度来确定形成固溶体合金的结构。统计分析结果表明^[31], 当 $\text{VEC} \geq 8.0$ 时多主元合金倾向于形成单相 FCC 结构, 当 $\text{VEC} \leq 6.87$ 时多主元合金容易形成单相 BCC 结构, 当 $6.87 < \text{VEC} < 8.0$ 时, 合金更容易形成 BCC+FCC 双相结构。根据计算的轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 热力学参数 (表 2), 与前人的总结规则进行了比较, 结果表明轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 倾向于形成单相 BCC 结构, 这与实验结果一致。

细化, 说明少量的 Si 元素掺杂能够抑制析出相的长大。

3.2 合金的显微硬度

轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 具有较高的显微硬度, 这种高强度与多种强化机制有关。一般来说, 合金的强化机制主要有晶界强化、固溶强化、第二相强化和位错强化^[33]。

轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 通过水冷铜模感应熔炼制备, 并在 1200 °C 下退火 24 h, 结果表明合金具有粗晶粒 (大于 220 μm) 和低位错密度特征。因此, 晶界强化以及位错强化所带来的强度贡献几乎可以忽略^[17]。

在 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 轻质多主元合金中, 由于合金元素本身原子半径以及弹性模量的差异, 当三种元素固溶在一起时, 导致合金产生晶格

畸变,提高了合金的强度,这也是合金主要的强度来源,该结果已在其他类似轻质多主元合金 $\text{Ti}_x(\text{Al-VCrNb})_{100-x}$ ^[17] 和 $\text{Ti}_{60}\text{Al}_x(\text{VCrNb})_{40-x}$ ^[15] 中得到证实。

合金中第二相的强度主要取决于第二相的尺寸和体积分数。第二相尺寸越小,含量越高,第二相强化越明显^[34]。在轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 中,合金的第二相主要是在退火后产生,退火后合金显微硬度有一定提升,这主要是由于第二相强化。除此之外,合金在变形过程中位错运动的阻力首先来自于点阵阻力,即派-纳力,由于BCC结构合金位错宽度较窄,故派-纳力较大,导致合金的显微硬度提高^[10]。由此可知,轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 的高显微硬度主要来源于合金的固溶强化、第二相沉淀及高点阵阻力。

4 结论

采用真空感应熔炼制备了轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$), 并对其铸态及退火态的微观组织及显微硬度的变化进行了研究。

(1) 轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 经 1200 °C 及 24 h 的均匀化退火后, 有序 B2 相从单相 BCC 基体中析出, 而 Si 元素的加入可以细化晶粒并抑制析出相的长大。

(2) 随着有序 B2 相的析出, 轻质多主元合金的显微硬度得到提高, 最高可达 587 HV, 比强度达到 430 MPa·cm³·g⁻¹。

(3) 轻质多主元合金 $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) 具有的高显微硬度, 主要来源于合金的固溶强化、第二相沉淀及高点阵阻力。

参考文献:

- [1] KUMAR A, GUPTA M. An insight into evolution of light weight high entropy alloys: A Review [J]. *Metals*, 2016(6):199.
- [2] MAULIK O, KUMAR D, KUMAR S, et al. Structure and properties of lightweight high entropy alloys: A brief review [J]. *Materials Research Express*, 2018(5): 052001.
- [3] JIA Y F, JIA Y D, WU S W, et al. Novel ultralight-weight complex concentrated alloys with high strength [J]. *Materials*, 2019, 12: 1136.
- [4] 李萌, 杨成博, 张静, 等. 轻质高熵合金的研究现状 [J]. *材料导报*, 2019, 34: 21125-21134.
- [5] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloy with multiple principal elements: Novel alloy design concept and outcomes [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004(6): 299-303.
- [6] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts [J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511.
- [7] MIAO J, SLONE C E, SMITH T M, et al. The evolution of the deformation substructure in a Ni-Co-Cr equiatomic solid solution alloy [J]. *Acta Materialia*, 2017, 132: 35-48.
- [8] 吕昭平, 雷智锋, 黄海龙, 等. 高熵合金的变形行为及强化 [J]. *金属学报*, 2018, 54: 1153-1156.
- [9] YAO H, QIAO J, GAO M, et al. MoNbTaV medium-entropy alloy [J]. *Entropy*, 2016, 18: 189.
- [10] GEORGE E P, CURTIN W A, TASAN C C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms [J]. *Acta Materialia*, 2020, 188: 435-474.
- [11] CAO Z H, ZHAI G Y, MA Y J, et al. Evolution of interfacial character and its influence on strain hardening in dual-phase high entropy alloys at nanoscale [J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 145: 103081.
- [12] CAO Z H, MA Y J, CAI Y P, et al. Nanolamellar medium entropy alloy composites with high strength and large plasticity [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 873: 159775.
- [13] CAO Z H, MA Y J, CAI Y P, et al. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable nanolayer thickness [J]. *Scripta Materialia*, 2019, 173: 149-153.
- [14] CAI Y P, WANG G J, MA Y J, et al. High hardness dual-phase high entropy alloy thin films produced by interface alloying [J]. *Scripta Materialia*, 2019, 162: 281-285.
- [15] LIAO Y C, YE W T, CHEN P S, et al. Effect of Al concentration on the microstructural and mechanical properties of lightweight $\text{Ti}_{60}\text{Al}_x(\text{VCrNb})_{40-x}$ medium-entropy alloys [J]. *Intermetallics*, 2021, 135: 107213.
- [16] LIAO Y C, LI T H, TSAI P H, et al. Designing novel lightweight, high-strength and high-plasticity $\text{Ti}_x(\text{AlCrNb})_{100-x}$ medium-entropy alloys [J]. *Intermetallics*, 2020, 117: 106673.
- [17] ZHANG X K, HUANG J C, LIN P H, et al. Microstructure and mechanical properties of $\text{Ti}_x(\text{AlCrVNb})_{100-x}$ light weight multi-principal element alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 831: 154742.
- [18] HUANG X, MIAO J, LUO A A. Lightweight AlCrTiV high-entropy alloys with dual-phase microstructure via microalloying [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 54: 2271-2277.
- [19] 刘振振, 李劲风, 宁红, 等. 一种高 Mg 含量 Al-Cu-Li 合金的力学性能与微观组织演化 [J]. *材料研究与应用*, 2020, 14: 274-280.
- [20] 李睿, 李劲风, 宁红, 等. Zn, Ag 在 Al-3.3Cu-1.1Li-0.4Mg-0.1Zr 铝锂合金中的微合金化作用 [J]. *材料研究与应用*, 2019, 13: 187-194.
- [21] 费有静. 钛及钛合金材料的应用分析 [J]. *新材料产*

- 业, 2017(3): 15-18.
- [22] LI D, DONG Y, ZHANG Z, et al. An as-cast Ti-V-Cr-Al light-weight medium entropy alloy with outstanding tensile properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 877: 160199.
- [23] LIAO Y C, CHEN P S, LI C H, et al. Development of novel lightweight dual-phase Al-Ti-Cr-Mn-V medium-entropy alloys with high strength and ductility [J]. *Entropy*, 2020, 22: 74.
- [24] CHAUHAN P, YEBAJI S, NADAKUDURU V N, et al. Development of a novel light weight $\text{Al}_{35}\text{Cr}_{14}\text{Mg}_6\text{Ti}_{35}\text{V}_{10}$ high entropy alloy using mechanical alloying and spark plasma sintering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820: 153367.
- [25] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SKIBIN D V, et al. Structure and mechanical properties of the $\text{AlCr}_x\text{NbTiV}$ ($x=0, 0.5, 1, 1.5$) high entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 652: 266-280.
- [26] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SHAYSULTANOV D G, et al. Effect of Al on structure and mechanical properties of $\text{Al}_x\text{NbTiVZr}$ ($x=0, 0.5, 1.0, 1.5$) high entropy alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31: 1184-1193.
- [27] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, SALISHCHEV G A, et al. Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy [J]. *Materials Letters*, 2015, 142: 153-155.
- [28] YANG X, CHEN S Y, COTTON J D, et al. Phase stability of low-density, multiprincipal component alloys containing aluminum, magnesium, and lithium [J]. *Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 2014, 66: 2009-2020.
- [29] LI R, GAO J C, FAN K. Study to microstructure and mechanical properties of Mg containing high entropy alloys [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 650: 265-271.
- [30] ZHANG P, LI S X, ZHANG Z F. General relationship between strength and hardness [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 529: 62-73.
- [31] GUO S, NG C, LU J, et al. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 103505.
- [32] GOODALL R. Data of the maximum solid solubility limits of binary systems of elements [J]. *Data Brief*, 2019, 26: 104515.
- [33] KANG B, KONG T, RYU H J, et al. Superior mechanical properties and strengthening mechanisms of lightweight $\text{Al}_x\text{CrNbVMo}$ refractory high-entropy alloys ($x=0, 0.5, 1.0$) fabricated by the powder metallurgy process [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 69: 32-41.
- [34] GLADMAN T. Precipitation hardening in metals [J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 15: 30-36.

Effect of Silicon Element Doping on the Microstructure and Microhardness of AlTiV Lightweight Multi-Principal Element Alloys

ZHAI Gaoyang, ZHANG Zijian, LI Pengfei, KAI Mingjie, CAO Zhenhua*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In this work, $\text{Al}_{20}(\text{TiV})_{80-x}\text{Si}_x$ ($x=0, 0.7$) lightweight multi-principal element alloys were fabricated by induction melting. The microstructure and mechanical properties of the alloys were characterized by X-ray diffractometer, scanning electron microscope, transmission electron microscope and microhardness tester, and the effects of Si doping and homogenization annealing on the microstructure and microhardness of the alloys were investigated. The results show that the as-cast alloys are single BCC phase with coarse grains. After annealing, the ordered B2 phase precipitates from the matrix of alloys, which improves the microhardness of the alloys. The doping of silicon elements reduces the grain size of the alloys and restrains the precipitation of B2 phase. The microhardness of the alloys were tested up to 587 HV, and the specific yield strength reaches $430 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. According to the analysis, the high microhardness of the alloys mainly comes from the solid solution strengthening, second phase precipitation and lattice resistance of the alloys.

Key words: $\text{Al}_{20}\text{Ti}_{40}\text{V}_{40}$ lightweight multi-principal element alloys; silicon doped; annealing; microstructure; microhardness

(学术编辑:李艳辉)