

基于铝热还原的低成本 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金制备及 Mo 含量对性能的影响

陈光润^{1,2}, 马 兰^{1,2,3*}, 杨绍利^{1,2,3}, 肖 建^{1,2}, 张 杨^{1,2}, 曾 莉¹

(1. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 钒钛关键战略材料四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 国家钒钛检测重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 钛合金因其高比强度、优异的耐腐蚀性及良好的高温稳定性, 广泛应用于航空航天与海洋工程领域。其传统生产过程能耗高、成本大, 制约了应用的进一步推广。研究以高钛渣和钛白粉为原料, 采用铝热还原法制备钛铝基中间合金, 经精炼调质获得 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 近 α 型钛合金, 系统研究了 Mo 含量 (0、1.5%、3%、4.5%) 对合金组织与性能的影响。结果表明, 该工艺可制备出组织均匀的 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金; 随着 Mo 含量增加, 合金中片层 α 相显著细化并伴随 β 相生成, 硬度与密度相应提高。经热压缩变形后, Mo 含量为 3% 的合金在 850 °C、应变速率 0.01 s⁻¹、形变量 50% 时表现出优良的热加工性能。

关键词: 铝热还原; 低成本; 钛合金; Ti-4.5Al-xMo-2Fe

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0080-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.009

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Preparation of low-cost Ti-4.5Al-xMo-2Fe alloy based on thermite reduction and the effect of Mo content on its properties

CHEN Guangrun^{1,2}, MA Lan^{1,2,3*}, YANG Shaoli^{1,2,3}, XIAO Jian^{1,2}, ZHANG Yang^{1,2}, ZENG Li¹

(1. Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Strategic Materials of Vanadium and Titanium, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. National Key Laboratory for Vanadium and Titanium Testing, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Titanium alloys are widely used in aerospace and marine engineering owing to their high specific strength, excellent corrosion resistance, and good high-temperature stability. However, the conventional production routes are energy-intensive and costly, which limits their broader application. In this study, high-titanium slag and titanium dioxide were employed as raw materials, and a Ti-Al-based intermediate alloy was first produced via aluminothermic reduction. After refining and composition adjustment, a Ti-4.5Al-xMo-2Fe near- α titanium alloy was obtained. The effects of Mo content (0, 1.5%, 3%, 4.5%) on the microstructure and properties were systematically investigated. The results show that this short-process method can successfully produce Ti-4.5Al-xMo-2Fe alloys with uniform microstructures. With increasing Mo content, the lamellar α phase becomes significantly refined and β phase precipitation is promoted, leading to increased hardness and density. After hot compression deformation,

收稿日期: 2025-11-27; 修回日期: 2026-01-07; 接受日期: 2026-01-23

基金项目: 攀枝花市科技局重点项目 (2021CY-G-14); 攀枝花学院研究生创新计划项目 (y2024022)。

作者简介: 陈光润, 2000 年出生, 女, 四川攀枝花人, 硕士研究生, 主要从事钒钛新材料新技术研究, E-mail: 1148077417@qq.com; *通信作者: 马兰, 1972 年出生, 女, 四川资阳人, 教授, 主要从事钒钛新材料新技术及钒钛资源综合利用研究, E-mail: hudie5656@163.com。

the alloy containing 3% Mo exhibits the best hot workability at 850 °C, a strain rate of 0.01 s⁻¹, and 50% deformation.

Key words: aluminothermic reduction; low-cost; titanium alloy; Ti-4.5Al-xMo-2Fe

0 引言

钛合金具有高强度和低密度 (仅为钢的 57% 左右) 的优点, 其比强度 (强度/密度) 远超过其他金属结构材料, 可制作出单位强度高、刚性好、质量轻的零部件^[1], 广泛应用于航空航天、舰船、兵器、核工业等重要的工业领域。根据中国有色金属协会数据统计, 全球钛在航空航天领域的应用占比 50% 左右, 其中美、俄等国航空钛材在整个钛合金应用市场占比超过了 70%。目前, 钛合金的“贵族化”是限制其广泛应用的根本原因之一, 一旦解决了成本问题, 许多行业现有的材料可以被钛合金取代, 钛合金的用量也将会呈几何倍数增加。

利用钛白、钛渣、高钛型高炉渣和钙钛矿等钛原料, 采用金属热还原法制备钛铝合金及钛合金是缩短其工艺流程、降低钛合金成本的有效方法。WANG 等^[2]通过改进的镁热还原法, 直接从中间产物 TiAl₂O₅ 合成 TiAl 合金, 将 TiO₂、Al₂O₃ 和合成的 TiAl₂O₅ 与镁粒按设计的摩尔比混合, 并在高温下进行镁热还原反应制备出钛铝基中间合金。KUN 等^[3]使用 Na₂TiF₆ 和 Al 粉末作为原料, 采用铝热还原法制备了钛铝金属间化合物。WANG 等^[4]以钽钛磁铁矿通过气相还原和熔融分离得到的二氧化钛含量超过 40% 的钛渣为原料, 采用铝热还原法制备了钛铁合金。杨绍利、黄栋^[5]以攀枝花酸溶性钛渣为原料, 在超重力条件下, 采用铝热还原法制备钛铝基中间合金。目前韩国、日本等国家对低成本钛合金进行了大量研究, 他们常用 Mo、Fe、Mn、Zr 和 Cu 这些被认为是低成本合金的元素, 采用电弧熔炼、熔模铸造、粉末冶金、增材制造、扩散偶及热机械加工来制造具有这些元素的钛合金^[6-12]。还有使用 Mo 等元素的合金粉体制备方法^[13], 制备出的合金具有良好的加工性, 在热处理后具有良好的强度、塑性、断裂韧性和抗疲劳性能, 可用于汽车、生物医学、医疗保健等领域。但这些低成本钛合金的制备使用的还是传统工艺, 以海绵钛为主要原料, 用廉价元素代替 V 和 Cr 等昂贵元素的方法来降低成本, 生产流程长、能耗高, 成本降低空间有限。在钛合金的成分设计中, Mo 作为典型的 β 稳定元素, 加入可以显著降低 β 转变温度 (T_β), 提高 β 相稳定性, 从而影响 α/β 相比比例和组织演化^[14]。Mo 含量的变

化不仅会导致合金显微组织形态和晶粒尺度的改变, 还会通过调控热变形过程中动态回复与动态再结晶行为, 显著影响合金的流变特性和热加工性能^[15]。笔者以高钛渣和钛白粉为原料, 采用铝热还原-精炼调制的方法, 开发短流程、低成本的钛合金制备技术, 制备出 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金, 通过系统研究 Mo 含量对合金显微组织和热变形行为的影响, 旨在揭示 Mo 含量对近 α 钛合金的动态再结晶行为及热加工性能的作用机理。该制备技术有效缩短了生产流程, 有望显著降低能耗, 为低成本钛合金的工业化生产提供了一种可行的新工艺。

1 试验材料及研究方法

1.1 试验原料

试验以高钛渣、钛白粉为原料。高钛渣化学成分组成为 TiO₂ 91.26% (以下无特殊说明的, % 均默认为是质量百分数)、FeO 2.50%、MnO 1.6%、CaO 0.29%、MgO 0.93%、SiO₂ 1.66%、Al₂O₃ 1.76%, 钛白粉为锐钛型, TiO₂ 含量为 99.85%, 铝粉 (AR: >99.5%) 为还原剂, 氧化钙 (分析纯, ≥98%) 及氟化钙 (分析纯, ≥98.5%) 作为铝热还原制备钛铝基中间合金的助熔剂。0 级海绵钛 (Ti 含量 99.1% ~ 99.8%)、高纯铝粒 (纯度 Al ≥ 99.999%)、高纯铁粒 (纯度 Fe ≥ 99.99%) 和高纯钼粒 (纯度 Mo ≥ 99.999%) 作为精炼调质制备钛合金的添加剂。

1.2 研究方法

将高钛渣、钛白粉、铝粉、助熔剂、铁粒按照钛渣/钛白粉为 0.125, 铝钛比为 0.72, 碱度为 0.5 的配料计算结果进行准确称量; 充分混合均匀后装入反应容器; 气氛炉以 10 °C/min 的速率升温至 1 550 °C 后, 放入反应容器, 保温 90 min 后取出样品, 渣金直接分离得到钛铝基中间合金和还原渣, 钛铝基中间合金成分为 Ti 68%、Al 20%、Fe 8.8%、Si 1.3%、Mn 0.5%、其它 1.4%。分离后的钛铝基中间合金与海绵钛、钼粒、铝粒和铁粒按照一定比例放入 KDH-1000 微型非自耗真空电弧熔炼炉中, 抽真空度为 2.0×10⁻² Pa, 并通入高纯氩气至真空度为 3.6×10² Pa, 熔炼四次, 其中电磁搅拌两次进行精炼调质, 工艺流程如图 1 所示。制备出 Ti-4.5Al-xMo-2Fe (x=0, 1.5, 3, 4) 合金, 各合金化学成分如表 1 所示。

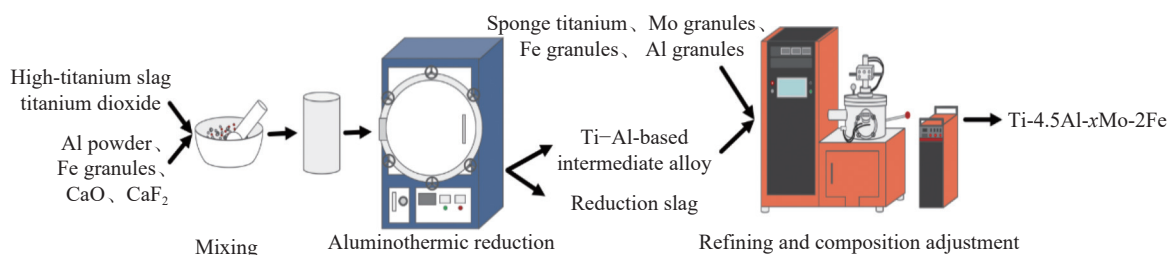


图1 工艺流程
Fig. 1 Process flow

表1 Ti-4.5Al-xMo-2Fe合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of Ti-4.5Al-xMo-2Fe %

Titanium alloys	Ti	Al	Fe	Mo	Others
Ti-4.5Al-0Mo-2Fe	92.88	4.59	2.04	0.00	0.49
Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe	91.52	4.50	2.00	1.50	0.48
Ti-4.5Al-3Mo-2Fe	90.04	4.50	2.00	2.99	0.47
Ti-4.5Al-4.5Mo-2Fe	88.54	4.50	2.00	4.50	0.46

使用DK7740型线切割机将Ti-4.5Al-xMo-2Fe合金切割成10 mm×10 mm×10 mm的正方体和Ø8 mm×12 mm的圆柱试样。正方体试样用于观察显微组织、微观形貌并测试洛氏硬度和密度,圆柱试样用于测试合金的热压缩性能。采用DM400M金相显微镜观察热压缩前后合金的显微组织,EVO 18钨灯丝扫描电子显微镜观察合金表面微观形貌及微区成分,HR-150A洛氏硬度计测试合金硬度,SJ-120GYFT型直读式电子密度计测量合金密度,采用Thermecmastor热模拟试验机测试合金在应变速率为0.01 s⁻¹、变形温度为850℃、形变量为50%下的热变形行为。

2 结果分析与讨论

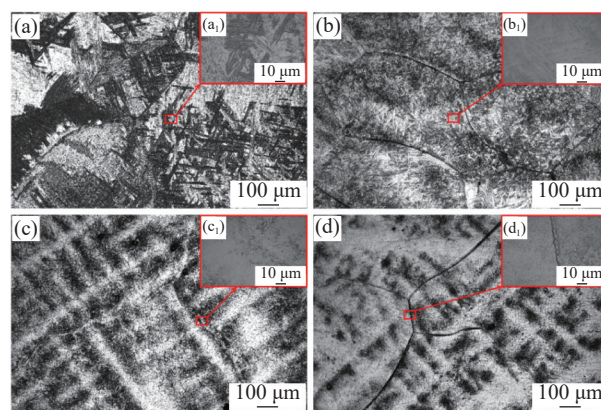
2.1 Mo含量对合金显微组织的影响

Ti-4.5Al-xMo-2Fe合金的显微组织如图2所示。图2(a)(b)中可见显著的针状或板条状结构,交错分布且密度较高,局部晶界清晰,针状长度与宽度存在一定差异。图2(a₁)(b₁)的局部放大图与原图一致,均呈不规则取向的针/板条状形貌。该组织形貌为典型的板条状结构,初步判断为板条马氏体(α')或细片层α相。图2(a₁)中板条间出现亮区,表明局部区域可能发生马氏体分解,形成α+β混合组织。该组织特征表明,不含Mo的合金应具有较高的强度与硬度,但其热稳定性和塑性可能较差。

图2(b)中可见清晰的晶界轮廓,晶粒内部由细密交错的条状结构组成;(b₁)中条状结构长度均匀且排列紧密,表明该组织为片层α+β共析结构。细密片层有助于在强度与韧性之间取得平衡,因此Mo含量为1.5%的合金可能同时具备较高的强度与一定的塑性。

图2(c)中可观察到暗色条带交错形成网状形貌,代表原始β晶粒轮廓。图2(c₁)显示出细化致密的层片α+β组织以及局部球化的α结构。晶粒细化与层片致密化有助于提高强度,而细化组织通常也能改善塑性。因此,Mo含量为3%的合金可能在强度与塑性方面表现出良好的综合性能。

图2(d)中晶界轮廓清晰且呈多边形形貌,α相以点状或细小条状分布于晶界及晶内;图2(d₁)可见晶界及晶粒内部存在暗色细小颗粒,可能为第二相颗粒或析出相,而沿晶的圆形特征可能为腐蚀后产生的凹陷。综合观察结果可认为,Mo含量为4.5%的合金组织中第二相比比例增加,有助于提高强度,但可能使组织均匀性略有下降。



(a) x=0; (b) x=1.5; (c) x=3; (d) x=4.5

图2 Ti-4.5Al-xMo-2Fe合金显微组织
Fig. 2 Microstructures of Ti-4.5Al-xMo-2Fe

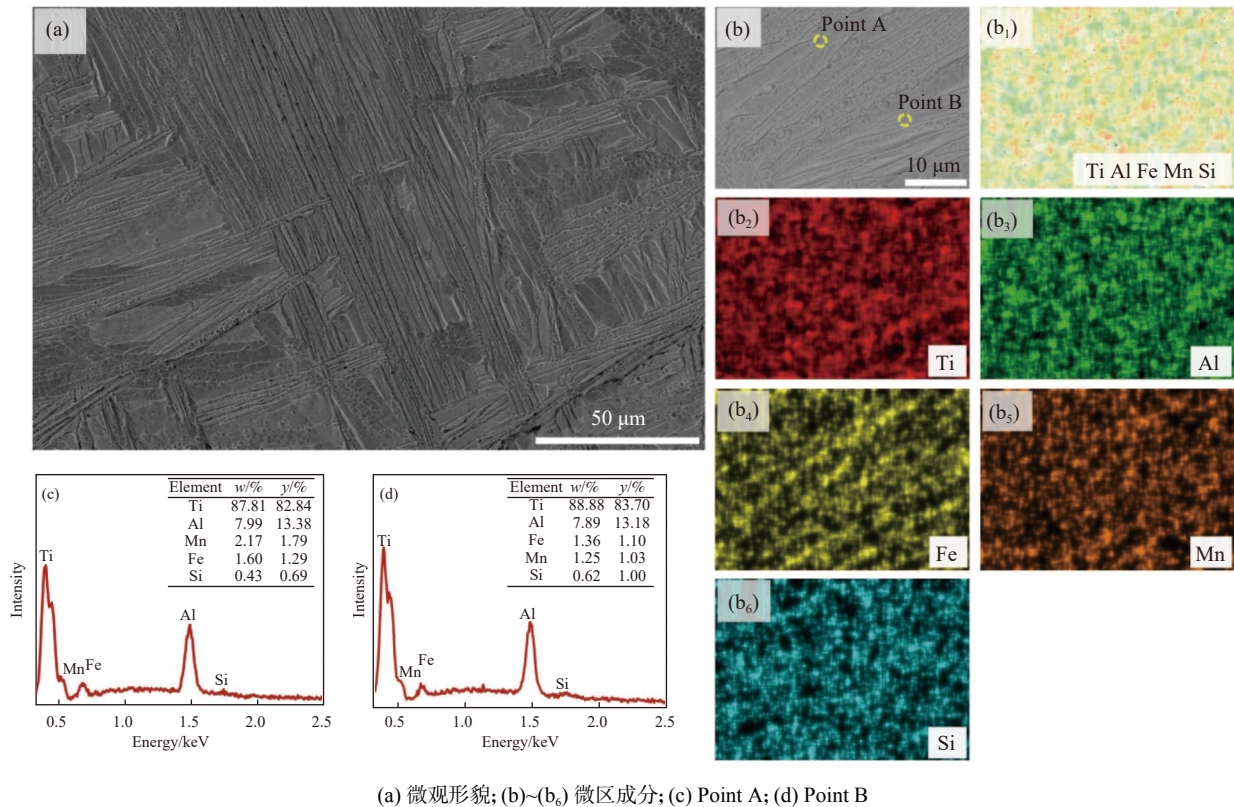
2.2 Mo含量对合金微观形貌及元素分布的影响

如图3所示为Ti-4.5Al-0Mo-2Fe合金的微观形貌及微区成分分析结果。其中图3(a)(b)为微观形貌图,图3(b₁)为多元素面分布图,图3(b₂)~(b₆)为Ti、Al、Fe、Mn、Si的单元元素分布图;图3(c)(d)分别为从图3(b)中选取的Point A和Point B两处进行EDS点分析所得能谱图。

由图3(a)可观察到大量有序且交错分布的粗大条状结构,呈典型的片层状特征。由图3(b₂)~(b₆)可见,Ti与Fe元素主要集中分布于条状区域,而Al、

Mn、Si 元素在扫描范围内分布相对均匀, 没有呈条状分布。EDS 面扫描结果表明, Ti、Al、Fe、Mn 及 Si 元素在显微组织中总体分布均匀, 未见明显的元素偏析。由图 3(c)(d) 的点分析结果可见, Point A

与 Point B 的元素含量差异较小, 说明不同区域间成分分布较为均匀。 α 相稳定元素 Al 与 β 相稳定元素 Fe 的含量变化不显著, 表明该合金中 α + β 相分布差异较弱, 整体组织较为均匀。



(a) 微观形貌; (b)~(b₆) 微区成分; (c) Point A; (d) Point B

图 3 Ti-4.5Al-0Mo-2Fe 合金微观形貌及微区成分

Fig. 3 Microstructures and micro-area compositions of Ti-4.5Al-0Mo-2Fe

如图 4 所示, Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe 合金主要由交错分布的条状结构组成, 组织较不含 Mo 合金更加细化, 条带方向性较弱。由图 4(b) 可见, 组织中存在亮暗两类区域, 分别选取 Point A(暗区) 和 Point B(亮区) 进行能谱分析。

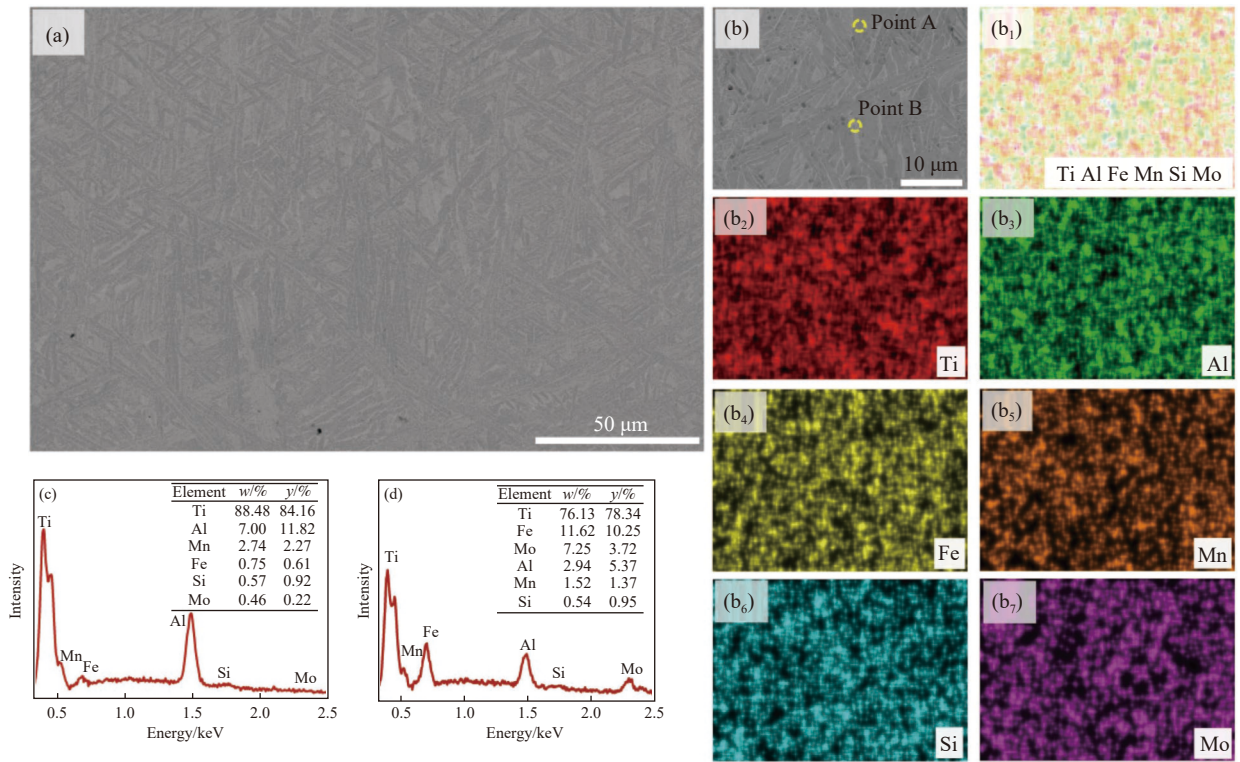
从图 4(c) 可见, Point A 中 Al 含量较高(约 7%), 而 Fe 与 Mo 含量较低(分别为 0.75% 和 0.46%), 说明该区域为 α 相; 图 4(d) 中 Point B 的 Fe 和 Mo 含量显著升高(分别为 11.62% 和 7.25%), 而 Al 含量下降至 2.94%, 表明亮区为 β 相。由此可判定, 合金组织由片层状 α 相与分布其间的 β 相组成。

从图 4(b₁)~(b₇) 的 EDS 面分布结果可见, Ti、Al、Fe、Mn、Si 及 Mo 元素在组织中分布总体均匀, 未出现明显元素偏析。Al 在 α 相区域中略有富集, 而 Fe 和 Mo 在 β 相区域中信号更强, 符合各元素在 α + β 双相钛合金中的典型分布规律。与不含 Mo 合金相比, 1.5% Mo 合金中 β 相数量略有增加, 条状 α 相明显细化且分布更均匀, 说明 Mo 的加入在促进 β 相形成的同时, 有助于组织细化和成分均质化。

如图 5 所示, Ti-4.5Al-3Mo-2Fe 合金的组织较 Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe 合金更加细化, 条状组织分布均匀且方向性减弱。图 5(b) 显示合金中存在亮暗两种区域, 分别选取 Point A(暗区) 与 Point B(亮区) 进行能谱分析。

由图 5(c) 可见, Point A 中 Al 含量为 7.11%, Mo 与 Fe 含量较低(分别为 0.35% 与 1.13%), 说明该区域为 α 相; 图 5(d) 中 Point B 的 Fe、Mo 含量明显升高(Fe 为 10.9%、Mo 为 9.3%), 而 Al 含量下降至 2.42%, 表明亮区为 β 相。由此可见, 合金组织主要由片层状 α 相与分布其间的 β 相组成。

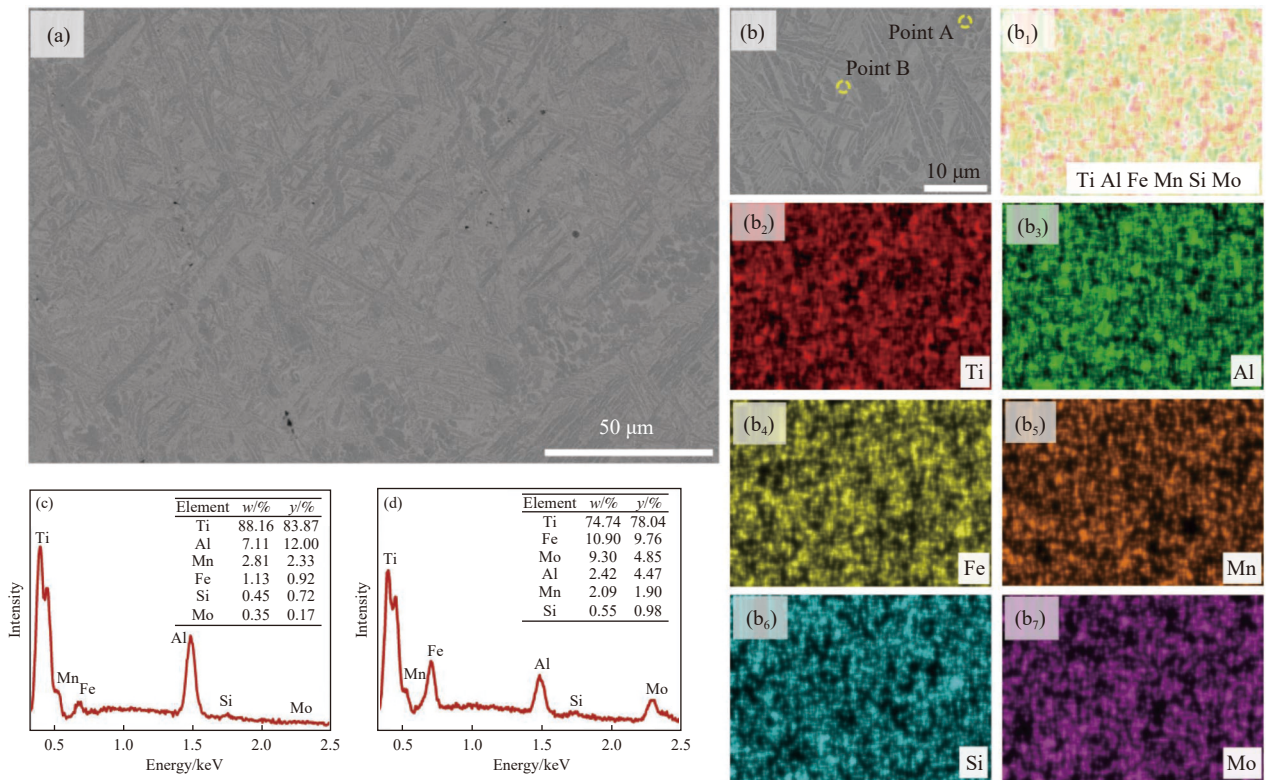
从图 5(b₁)~(b₇) 的 EDS 面分布图可观察到, Ti、Al、Fe、Mn、Si、Mo 元素在整体上分布均匀, 未出现明显元素偏析。Al 在暗区(α 相)中相对富集, 而 Fe 和 Mo 在亮区(β 相)中信号更强, 符合 α 相与 β 相中元素的稳定特征。综合来看, Mo 含量增加至 3% 后, β 相比例进一步提高, α 相条带显著细化, 组织分布更加均匀。



(a) 微观形貌; (b)~(b₇) 微区成分; (c) Point A; (d) Point B

图4 Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe 合金微观形貌及微区成分

Fig. 4 Microstructures and micro-area compositions of Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe



(a) 微观形貌; (b)~(b₇) 微区成分; (c) Point A; (d) Point B

图5 Ti-4.5Al-3Mo-2Fe 合金微观形貌及微区成分

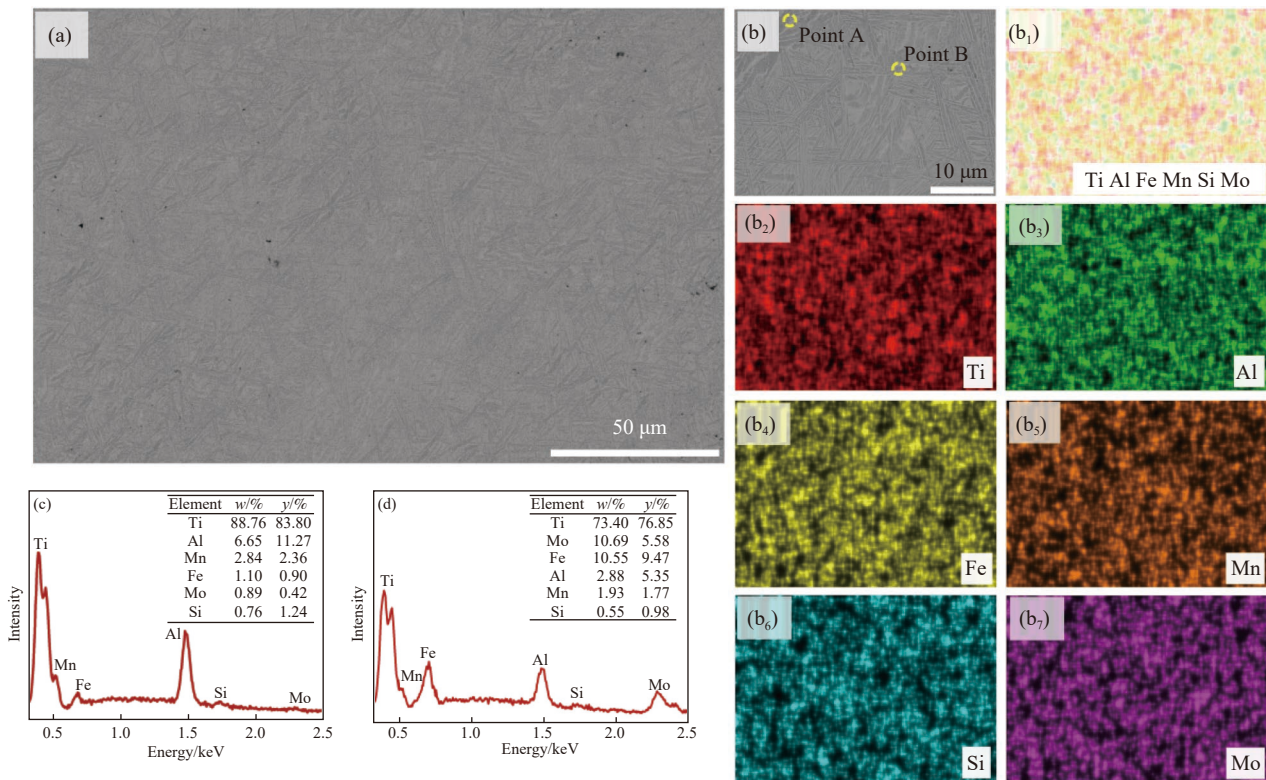
Fig. 5 Microstructures and micro-area compositions of Ti-4.5Al-3Mo-2Fe

如图 6 所示, Ti-4.5Al-4.5Mo-2Fe 合金组织呈细密片层状形貌, α 相条带较前两组进一步细化, β 相分布连续化明显增强。

由图 6(b) 选取 Point A(暗区)与 Point B(亮区)进行能谱分析。图 6(c) 中 Point A 的 Al 含量较高 (6.65%), Mo 与 Fe 含量较低 (Mo 为 0.89%、Fe 为 1.1%), 可判断为 α 相; 图 6(d) 中 Point B 的 Fe 与 Mo 含量分别增至 10.55% 与 10.69%, 而 Al 下降至 2.88%, 表明亮区为 β 相。随着 Mo 含量的进一步增

加, β 相稳定性明显增强, 且在组织中形成连续网络状分布。

EDS 面扫描结果由图 6(b₁)~(b₇) 显示, 各元素在组织中分布均匀, 未出现明显偏析。Ti 与 Al 在暗区信号较强, 而 Fe、Mn、Mo 在亮区分布更为集中。结合能谱分析结果可知, Mo 作为强 β 稳定元素的加入促进了 β 相的形成与稳定, 使合金的 α 相数量明显减少, α 片层呈细小弥散状分布, 组织均匀性进一步提高。



(a) 微观形貌; (b)~(b₇) 微区成分; (c) Point A; (d) Point B

图 6 Ti-4.5Al-4.5Mo-2Fe 合金微观形貌及微区成分

Fig. 6 Microstructures and micro-area compositions of Ti-4.5Al-4.5Mo-2Fe

在不含 Mo 时, β 相稳定性不足, 冷却过程中易形成板条马氏体 α 结构, 组织较粗大。随着 Mo 含量提高至 1.5%, β 相稳定性增强, 组织转变为片层状 $\alpha+\beta$ 双相结构; 当 Mo 含量达到 3% 时, α 相细化明显, β 相连续性增强, 元素分布均匀性提升; 继续增加至 4.5% 时, β 相显著增加, α 相呈细小弥散分布, 组织趋于均匀细密。随 Mo 含量增加, 热压缩前组织中 β 相由不连续分布逐渐转变为更为连续、均匀的形貌, 其相对比例和稳定性明显提高。

Mo 含量对 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金的组织具有显著调控作用: Mo 为 β 稳定元素, 可降低 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变温度, 抑制马氏体 α' 生成, 使组织由单一 α 相逐渐转变为 $\alpha+\beta$ 共存结构; Mo 在 β 相中固溶后引起晶

格畸变, 增强固溶强化效果, 并促进 α 相形核, 显著细化片层组织; Mo 扩散能力较强, 可减少元素偏析, 改善组织均匀性, 稳定相分布。

2.3 Mo 含量对合金硬度及密度的影响

如图 7 所示为 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金硬度及密度折线图, 从图中可以看出硬度与密度随 Mo 含量增加而升高。从图 7(a) 中可以看出 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 钛合金的洛氏硬度值 (HRC) 在 53 ~ 58。从显微组织变化来看, 随 Mo 含量由 0 增至 4.5%, 合金中片层 α 相逐渐细化并伴随 β 相生成与增多, 组织由粗大的针状 α' 向细小均匀的 $\alpha+\beta$ 双相结构转变。Mo 作为 β 稳定元素, 使 β 相在热处理与变形过程中得到稳定, 并显著细化 α 相尺寸。细化后

的 α 片层及连续化 β 相界面均能有效阻碍位错滑移,增加位错密度,从而提高合金的硬度。

从图7(b)中可得, Ti-4.5Al-xMo-2Fe 钛合金的密度值在 4.4 ~ 4.6 g/cm³, Mo 元素的原子质量和密度均高于 Ti 与 Al。随着 Mo 含量上升, β 相中 Mo 的富集及其在合金中的总体比例提高, 使得该合金的密度随之增加。

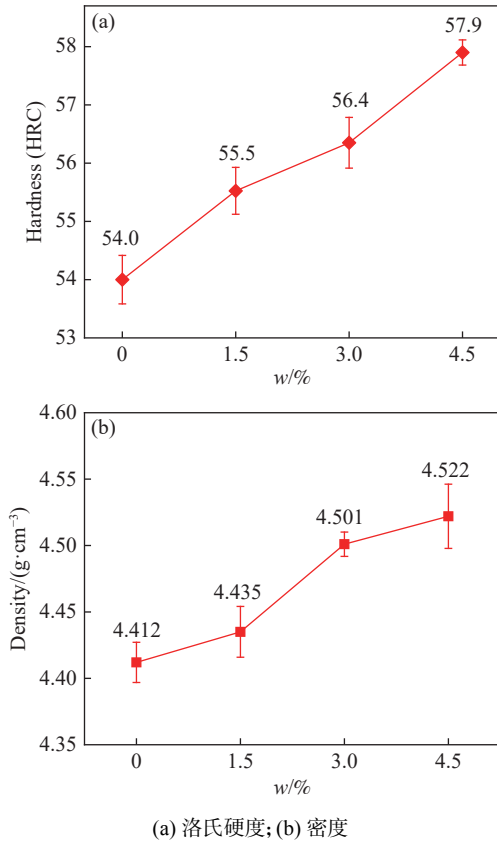


图7 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金硬度及密度
Fig. 7 Rockwell hardness and density of Ti-4.5Al-xMo-2Fe

2.4 Mo 含量对合金热压缩性能的影响

根据 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金热压缩模拟试验数据, 绘制出应力-应变曲线如图8所示。在热加工过程中, DRV(动态回复)和 DRX(动态再结晶)是两种重要的软化机制^[16-17], 在应变速率为 0.01 s⁻¹、变形温度为 850 °C、形变量为 50% 的热变形行为下, Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金表现出明显的 DRX 主导特征。从图中可以看出, 该钛合金的峰值应力及稳态应力随 Mo 含量的增加呈先上升后下降的趋势。在 Mo 含量为 1.5% 时, 合金峰值与稳态应力最高, 主要是因为固溶强化效应与 $\alpha+\beta$ 混合组织的协同强化作用, 使材料在变形初期对位错运动的阻碍作用增强, 从而提高了流动应力水平; 当 Mo 含量继续提高至 3% ~ 4.5% 时, 随着 Mo 含量的增加, 合金的峰值应力和稳态应力明显下降, β 相稳定化显著增强了动

态再结晶行为, 使流变软化机制占主导地位, 从而导致变形应力下降。从应力-应变曲线可见, 3% Mo 合金在峰值应力、稳态应力以及峰后流动平稳性方面均表现出较优的综合性能。其峰值应力较低(约 115 MPa), 稳态阶段应力低且波动小, 表明该成分合金在所研究的热压缩条件下具有更优的热变形性能和良好的高温塑性, 具有较好的热加工潜力。

热压缩后的宏观形变貌如图9所示, 热压缩后合金无明显裂纹。不含 Mo 合金形变不对称, 表现出典型的不稳定流动行为, 热压缩性能差; 1.5% Mo 合金鼓肚较大, 变形能力一般。随着 Mo 含量提高至 3%, 样品鼓肚均匀且形变充分, 未出现局部失稳, 从宏观形变貌上来看也是四组样品中热压缩性能最优的一组。当 Mo 含量进一步增加至 4.5% 时, 样品仍能保持较好的流动稳定性。

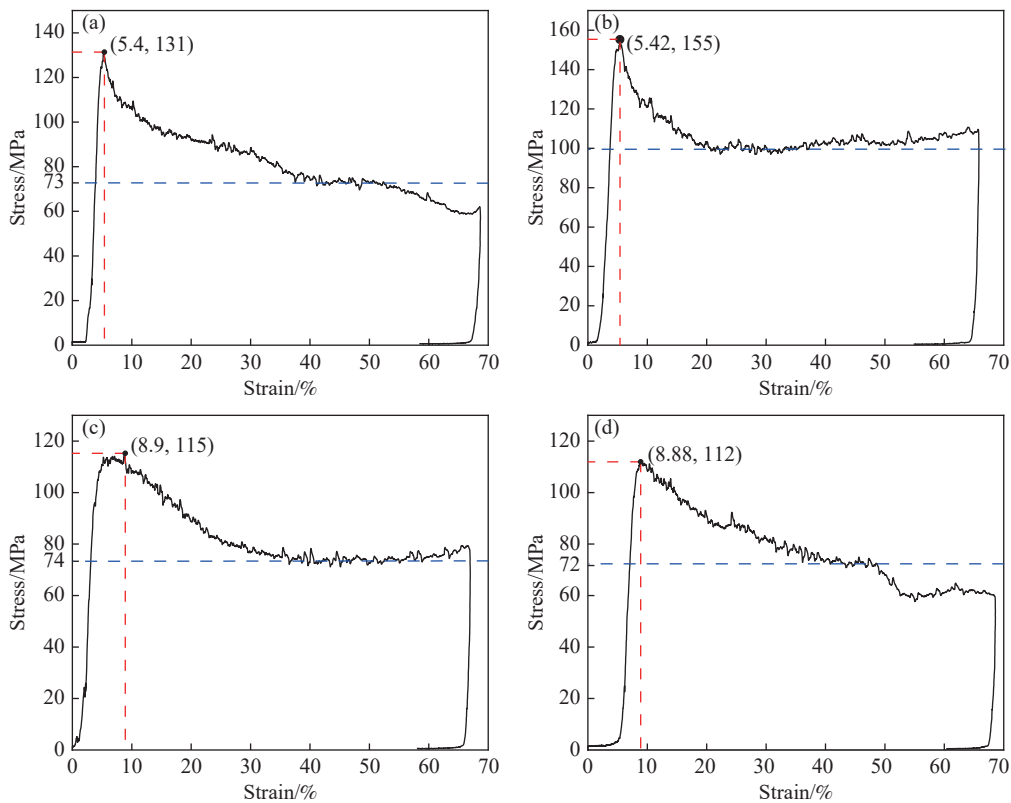
2.5 Mo 含量对合金热压缩后显微组织的影响

如图10所示为 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金在应变速率为 0.01 s⁻¹、变形温度为 850 °C、形变量为 50% 条件下热压缩后的显微组织。图10(a)与图2(a)对比发现, 不含 Mo 合金 α 相与 β 相的分布较为松散, 在经过热压缩之后其组织转变为 α 相与 β 相交织紧密的网篮结构, 且 α 相与 β 相均有被细化, 但等轴晶粒较少。网篮结构能有效分散裂纹扩展路径, 提高钛合金的抗疲劳性能。图10(a₁)~(d₁) 高倍数下显微组织图显示, 随着 Mo 含量的增加, 组织细化。

图10(b)与图2(b)对比发现, Ti-4.5Al-1.5Mo-2Fe 合金热压缩后 α 相与 β 相均被细化, 且热压缩后的组织分布均匀紧密, 等轴晶粒较少; Mo 含量为 1.5% 的钛合金的晶粒更加细小且均匀, 说明其强度和塑性均可能比不含 Mo 的钛合金高。利用显微组织演化特征(如晶粒尺度和组织均匀性变化)来解释力学性能差异, 是金属合金研究中常用且被验证的分析思路之一^[18]。

图10(c)与图2(c)对比发现, Ti-4.5Al-3Mo-2Fe 合金热压缩后 α 相与 β 相均被细化, 且形成了大量细小等轴晶粒, 组织均匀性显著改善, 这主要与 β 相的稳定化作用有关。随着 β 相比例增加, 变形过程中由于 β 相比较高的扩散能力和较低的变形抗力为动态再结晶提供了条件, 促进了再结晶形核与晶粒长大, 从而形成了细小且均匀的再结晶组织。

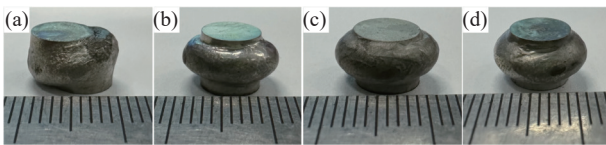
图10(d)与图2(d)对比发现, Ti-4.5Al-4.5Mo-2Fe 合金热压缩后显微组织整体上区别不大, 可能是 Mo 含量为 4.5% 的钛合金中本身含有较高的 β 稳定元素 Mo, 在热压缩后因 β 相的稳定性强, 冷却时仍保留以 β 相为主, 因此显微组织变化不明显。



(a) $x=0$; (b) $x=1.5$; (c) $x=3$; (d) $x=4.5$

图 8 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金热压缩应力应变曲线

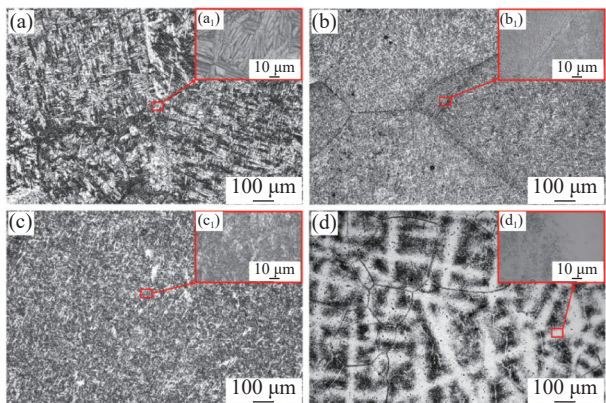
Fig. 8 Hot compressive stress-strain curves of Ti-4.5Al-xMo-2Fe



(a) $x=0$; (b) $x=1.5$; (c) $x=3$; (d) $x=4.5$

图 9 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金热压缩后宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphologies of Ti-4.5Al-xMo-2Fe alloy after hot compression



(a) $x=0$; (b) $x=1.5$; (c) $x=3$; (d) $x=4.5$

图 10 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金显微组织

Fig. 10 Microstructures of Ti-4.5Al-xMo-2Fe alloy after hot compression

3 结论

钛合金因具有比强度高、耐腐蚀性优异及高温稳定性良好等突出综合力学性能,在航空航天、海洋工程等多个关键领域得到广泛应用。笔者以高钛渣与钛白为原料,通过铝热还原工艺制备钛铝基中间合金,经精炼调质处理制得 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 合金。系统分析了 Mo 元素含量分别为 0、1.5%、3% 和 4.5% 合金的显微组织、热压缩性能、微观形貌、微区成分、洛氏硬度及密度,主要得到以下结论:

1) 以高钛渣和钛白为原料,经铝热还原法制备钛铝基中间合金,并通过精炼调质成功制得成分均匀、组织致密的 Ti-4.5Al-xMo-2Fe 近 α 型钛合金,该制备工艺路线稳定可行。Ti-4.5Al-3Mo-2Fe 合金具有最佳综合性能,该合金组织均匀、强度适中、热加工性能优异,兼具经济性与性能优势。

2) 随着 Mo 含量从 0 增加至 4.5%,合金的显微组织由粗大的针状马氏体 α 相逐渐转变为细化的 $\alpha+\beta$ 双相结构,1.5%Mo 时出现片层状 $\alpha+\beta$ 组织,3%Mo 时 α 相进一步细化、 β 相连续分布,组织最均匀;该钛合金洛氏硬度值(HRC)在 53 ~ 58,密度值

在 4.4 ~ 4.6 g/cm³; 该合金的峰值应力及稳态应力随 Mo 含量的增加呈现先增加后减小的趋势, 3%Mo 时峰值应力低、软化最稳定, 变形后样品鼓肚均匀且形变充分, 未出现局部失稳, 晶粒细小均匀, 表现出最佳的热压缩加工性能。

3) 以含钛原料采用铝热还原+精炼调质制备低成本钛合金技术在未来具有广阔的发展空间, 有望推动我国钛合金关键原材料的绿色制造与工程化应用, 实现钛合金从“高性能、高成本”向“可负担、高可靠性”的转变。

参考文献

- [1] XIN S W, LIU X H, ZHANG S Y, *et al.* Research and development of low-cost titanium alloy technology[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(11): 3971-3980.
(辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(11): 3971-3980.)
- [2] WANG Z, SEO M, SOHN I. Sustainable direct synthesis of TiAl alloys through magnesiothermic reduction[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(2): 1-13.
- [3] KUN Z, FENG G. Mechanism and kinetic analysis of vacuum aluminothermic reduction for preparing TiAl intermetallics powder[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 855(P2): 157546.
- [4] WANG Z, ZHANG J, LIU Z, *et al.* Production of ferrotitanium alloy from titania slag based on aluminothermic reduction[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810: 151969.
- [5] HUANG D. Research on the process of preparing titanium-aluminum based multi-element alloys by aluminothermic reduction of titanium slag under high gravity conditions[D]. Chengdu: Xihua University, 2019.
(黄栋. 超重力条件下钛渣铝热还原制备钛铝基多元合金工艺研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.)
- [6] NIINOMI M. Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2003, 4(5): 445.
- [7] GUNAWARMAN B, NIINOMI M, AKAHORI T, *et al.* Mechanical properties and microstructures of low-cost β titanium alloys for healthcare applications[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2005, 25(3): 304-311.
- [8] ZHENG B, DONG F, ZHANG Y, *et al.* Microstructure, mechanical properties and deformation behavior of new V-free low-cost Ti-6Al-xFe-yCr alloys[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(2): 026551.
- [9] GALIH S, ABDUL R R R, IKA K, *et al.* Recent development of low-cost β -Ti alloys for biomedical applications: a review[J]. *Metals*, 2023, 13(2): 194.
- [10] REVERTE E, TSIPAS A S, GORDO E. Oxidation and corrosion behavior of new low-cost Ti-7Fe-3Al and Ti-7Fe-5Cr alloys from titanium hydride powders[J]. *Metals*, 2020, 10(2): 254.
- [11] OH M J, PARK H C, YEOM J, *et al.* High strength and ductility in low-cost Ti-Al-Fe-Mn alloy exhibiting transformation-induced plasticity[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 772: 138813.
- [12] WANG J, QIN Z, XIONG F, *et al.* Design and preparation of low-cost $\alpha+\beta$ titanium alloy based on assessment of Ti-Al-Fe-Cr system[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 732: 63-69.
- [13] DONG F Y, LIU F, SHEN X Y, *et al.* Development status of preparation and applications of high-entropy alloy powders[J]. *China Powder Science and Technology*, 2025, 31(6): 92-106.
(董福宇, 刘峰, 申向阳, 等. 高熵合金粉体制备及应用的发展现状[J]. *中国粉体技术*, 2025, 31(6): 92-106.)
- [14] ZHU J L, CHENG J, CHEN L Y. Research progress on heat treatment of Ti-6Al-4V fabricated by laser powder bed fusion: microstructural evolution and corrosion resistance[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(8): 1393-1402.
(朱金岭, 程军, 陈靓瑜. 激光粉床熔融 Ti-6Al-4V 热处理的研究现状: 微观组织演变和耐腐蚀性能[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(8): 1393-1402.)
- [15] CHENG J. Cold deformation, phase transformation and corrosion behavior of a novel metastable β -Type Ti-B12 biomedical titanium alloy [D]. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Northwestern Polytechnical University, 2021.
(程军. 新型亚稳定 β 型 Ti-B12 医用钛合金冷变形、相变与腐蚀行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.)
- [16] HUANG B, YU Y, YE W, *et al.* Hot deformation behavior and constitutive equation of TA15N titanium alloy[J]. *Materials*, 2025, 18(9): 2067.
- [17] TAO H, LI H, ZHOU R, *et al.* Hot deformation behavior of a layered heterogeneous microstructure TiAl alloy prepared by selective electron beam melting[J]. *Materials Characterization*, 2024, 212: 113986.
- [18] WU W Y, SONG C H, ZHANG Z S, *et al.* Effect of aging treatment on microstructure and properties of as-cast Co-28Cr alloy[J]. *Rare Metals*, 2025, 49(7): 982-990.
(吴文源, 宋成浩, 张振山, 等. 时效处理对铸态 Co-28Cr 合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属*, 2025, 49(7): 982-990.)