

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5265

基于成分优化的高抗拉、抗氧化性 Ti₂AlNb 基合金流动性改善

吴韵桀¹, 张鹏飞^{1,2}, 孙 峰³, 周 瑜³, 杨浩雪¹, 王 军^{1,3}

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室 陕西 西安 710072 2. 中国航发贵州黎阳航空发动机有限公司, 贵州 贵阳 550014 3. 西北工业大学重庆科创中心 重庆 401135)

摘 要:通过相图计算与机器学习建模,研究了多种合金元素对 Ti₂AlNb 基合金铸造性能与服役性能的影响。通过相图软件计算 Ti₂AlNb 基合金影响合金流动性的热物性参数,结合机器学习建模分析元素对合金抗氧化性能与力学性能的影响,筛选出有利于提升合金铸造性能与服役性能的成分,并通过流动性实验进行验证,最终探讨了合金流动性改善的机理。结果表明, Ti₂AlNb 基合金熔体的止流机理是具有较宽结晶温度范围的合金的特征,流动性提高的原因在于合金熔体凝固点降低,合金熔体过热度提高;添加的微量元素作为合金的晶粒细化剂,减小了合金铸造晶粒尺寸,细小晶粒阻止了树枝晶向发达树枝晶网络的生长,降低了合金熔体的流动阻力。

关键词: Ti₂AlNb 基合金; 成分优化; 流动性; 凝固机理

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)07-0775-08

Fluidity Improvement of Ti₂AlNb-based Alloys with Enhanced Tensile Strength and Oxidation Resistance through Composition Optimization

WU Yunjie¹, ZHANG Pengfei^{1,2}, SUN Feng³, ZHOU Yu³, YANG Haoxue¹, WANG Jun^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AECC Guizhou Liyang Aero Engine Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: Phase diagram calculations combined with machine learning modelling were used to investigate how multiple alloying elements influence the castability and service performance of Ti₂AlNb-based alloys. The thermophysical parameters associated with melt fluidity were calculated via phase diagram software, and machine learning models were developed to assess the effects of alloying elements on the oxidation resistance and mechanical properties. On the basis of the integrated analysis, alloy compositions that improve both castability and service performance were identified and further validated through fluidity experiments, and the mechanisms underlying the increase in melt fluidity were also investigated. The results indicate that the stopping-flow behavior of Ti₂AlNb-based alloy is typical of alloys exhibiting a wide solidification temperature range. The improved fluidity mainly results from a reduced solidification temperature, which increases melt superheating and promotes melt flow. In addition, microalloying elements serve as effective grain refiners, resulting in significant reductions in the grain size. The refined grains suppress the development of an extensive dendritic network during solidification, thereby reducing the flow resistance in the semisolid region. Overall, the combined effects of thermodynamic optimization and microalloying offer a viable strategy for enhancing the castability and service performance of Ti₂AlNb-based alloys.

Key words: Ti₂AlNb-based alloy; composition optimization; fluidity; solidification mechanism

收稿日期: 2025-12-02

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0618602)

作者简介: 吴韵桀, 2002 年生, 硕士生. 研究方向为钛合金铸造. Email: wuyj@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 王 军, 1984 年生, 博士, 教授. 研究方向为凝固科学与技术. Email: nwpuwj@nwpu.edu.cn

引用格式: 吴韵桀, 张鹏飞, 孙峰, 周瑜, 杨浩雪, 王军. 基于成分优化的高抗拉、抗氧化性 Ti₂AlNb 基合金流动性改善[J]. 铸造技术, 2026, 47(7): 775-782.

WU Y J, ZHANG P F, SUN F, ZHOU Y, YANG H X, WANG J. Fluidity improvement of Ti₂AlNb-based alloys with enhanced tensile strength and oxidation resistance through composition optimization[J]. Foundry Technology, 2026, 47(7): 775-782.

随着航空发动机部件向高温、高比强及高可靠性方向发展,要求航空发动机结构设计轻量化、整体化及复合化,对先进发动机材料和制造技术提出更高的要求^[1-2]。 Ti_2AlNb 基金属间化合物在 $650\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 之间表现出高比强度高比弹性模量、高温抗蠕变及抗氧化能力强等优势,被视为在该温度区间最具应用潜力的轻质高温结构材料之一^[3-5]。在传统的锻造工艺生产合金产品时,因其加工量大且材料利用率低,导致生产成本高昂且周期漫长,精密铸造制备合金铸件可以实现零件的近净成形,减少加工量,缩短生产周期且降低生产成本^[6]。然而,现有 Ti-22Al-25Nb 合金流动性较差,在铸造过程中容易出现浇不足、缩松等铸造缺陷,生产工艺优化难以弥补其流动性差的问题。因此有必要从合金本征角度出发,优化 Ti_2AlNb 基合金的流动性。

影响合金流动性的因素包括液相线温度、固相线温度、凝固区间宽度、密度、结晶潜热等^[7]。当工艺条件一定时,这些因素受合金成分影响^[8]。因此,合金成分优化设计是提升 Ti_2AlNb 基合金流动性的有效方法。目前已有诸多学者报道了合金元素对 Ti_2AlNb 基合金力学性能或抗氧化性能的影响,通过 Mo 、 Zr 、 W 、 V 等元素的添加提高了 Ti_2AlNb 基合金的综合服役性能^[9-12]。相比之下,关于借助合金化手段改善 Ti_2AlNb 基合金流动性的相关研究报道则较为鲜见。张健等^[13]通过数值模拟与实验验证发现降低 $1\%\text{Nb}$ (原子分数,下同)并添加 $0.1\%\text{B}$,能提高合金的过热度 and 结晶潜热,降低熔体黏度和导热性,改善 Ti_2AlNb 基合金的流动性;张熹雯等^[14]通过 Si 元素的少量添加降低了合金的熔点、黏度和表面张力,有益于 Ti_2AlNb 基合金流动性的提高。在 Ti_2AlNb 基合金中,通过调整 Al 和 Nb 元素的含量并添加其他微量合金元素,可以改善合金熔体的流动性,同时保持甚至提升合金的力学性能与高温抗氧化性能^[15]。然而,传统的成分优化方法依赖于经验与试验试错,成本高、实验周期长,随着材料基因工程的快速发展,相图计算与机器学习成为合金成分设计、性能判断的重要方法。相图计算技术已经在不锈钢^[16]、钛合金^[17]、高温合金^[18]等多种材料体系中得到应用,指导多种合金体系设计;基于数据驱动的机器学习具有高效处理高维物理量之间复杂非线性关系的能力,以较低的实验/计算成本快速预测材料性能并显著加速材料与合金的发现与优化^[19-20]。Yang 等^[21]使用 5 个描述符作为与铸造态高熵合金硬度相关的关键特征,合成的新成分合金硬度比原始数据集中的最高硬度高出 24.8% ;Sohail 等^[22]设计具有异质结构的

FeNiCoAlTa 高熵合金,实现了屈服强度 1.8 GPa 和伸长率 25% 。

本文通过 Thermo-Calc 热力学计算软件计算合金成分对液相线温度、固相线温度、凝固温度区间宽度的影响,以此反应对合金流动性的影响;结合机器学习模型寻找高抗拉性能与抗氧化性能的合金成分体系,筛选出有利于提高合金综合性能的合金成分,并对优化后的合金并进行流动性验证试验,探讨合金元素对合金流动性的影响机理。

1 实验材料与方法

在 Ti-22Al-25Nb 合金的基础上进行成分优化方案设计,综合考虑主要元素含量 Al 、 Nb 以及添加多种合金元素对合金性能的影响。采用 Thermo-Calc 相图计算软件计算合金在 $0\sim 2\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的热物性参数,选用了 Thermo-Calc 提供的 Ti 基合金专用数据库中的热力学数据库,所选数据库涵盖 Ti-Al-Nb 体系及其常见合金化元素,计算参数主要包括固、液相线温度及凝固温度区间,以此反映合金熔体的流动性;基于文献整理的合金拉伸性能与氧化性能数据库开展机器学习,机器学习模型采用 Anaconda 软件建模,模型训练前使用 PCA 算法清除异常点,将数据归一化处理后进行训练,Autogloun 算法包自动调参并使用五折交叉验证,构建合金成分空间并进行预测,最终结合模拟结果对机器学习预测的成分空间进行筛选,最终得到兼具综合性能与工艺性能的预测成分。

母合金锭通过 20 kg 级真空感应悬浮熔炼炉(宝鸡华煜鼎尊材料技术有限公司)制备,经二次熔炼重力浇铸流动性试样,多次实验熔炼与浇铸条件一致,流动性试样三维模型使用 CATIA 建模(图 1a),精密铸造型壳面层为氧化钇,背层为铝矾土(图 1b)。浇铸后记录合金熔体在流道的填充长度,作为合金流动性

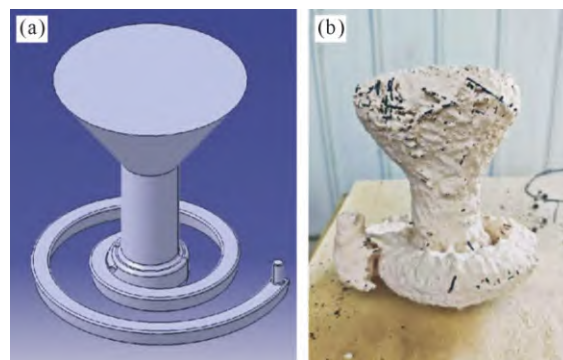


图 1 流动性验证试验中使用的 3D 模型及陶瓷型壳:(a) 流动性模型;(b) 陶瓷型壳

Fig.1 3D model and ceramic shell used in the fluidity validation experiments: (a) fluidity test model; (b) ceramic shell

指标。使用线切割在合金流道横截面的位置取样,样品经砂纸细磨与电解抛光后,使用TESCAN-MIRA扫描电子显微镜观察样品的显微组织形貌。随后对金相样品表面进行化学腐蚀,腐蚀液配比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:3:7$,使用 OLYMPUS 光学显微镜观察合金组织。

2 实验结果及讨论

2.1 合金元素影响对流动性的影响

合金元素对合金熔体的影响主要来源于合金成分差异导致凝固温度以及凝固温度区间差异^[23-24]。合金的凝固特性取决于凝固温度区间宽度;在熔炼与浇铸条件一定时,合金凝固温度的差异导致合金熔体的过热度不同。综上,本文相图计算主要聚焦于合金的液相线/固相线温度及凝固区间宽度。

图2展示了 Ti_2AlNb 基合金中主要元素 Al 和

Nb 对液相线/固相线温度的影响,如图2a和b所示。可以观察到随着 Nb 元素含量的减少,合金液相线温度降低,凝固温度区间减小,每减少 1%Nb 液相线温度降低约 7.36°C ;随着 Al 元素含量的增加,合金液相线温度降低,凝固温度区间基本不变,每增加 1%Al 液相线温度降低约 2.63°C 。因此通过增加 Al 元素含量并降低 Nb 元素含量,可以降低合金熔体液相线温度,同时略微减少熔体凝固温度区间,从而提高熔体过热度,对流动性的改善有利。

虽然 W 与 Ta 元素的添加有助于提高 Ti_2AlNb 基合金的力学性能^[12,25],但是由于 W 与 Ta 的熔点过高,其加入会明显增高合金液相线温度,对合金流动性不利,因此在相图计算时未考虑二者。图3展示了微量合金元素 Mo、V、Zr、Si 的添加对 Ti-22Al-25Nb 合金液相线/固相线温度的影响,在 Mo、V 元素添加时相应降低了 4%Nb 与 2%Nb。本文在成分改性时遵

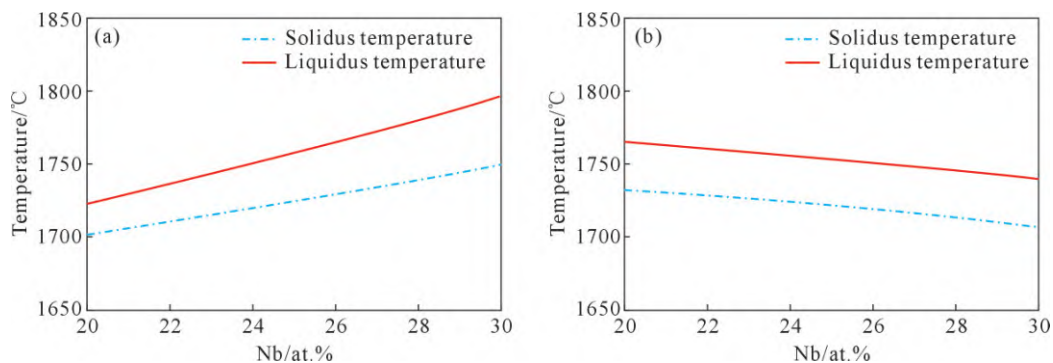


图2 主要元素 Nb 和 Al 对 Ti_2AlNb 合金液相线/固相线温度的影响:(a) Ti-22Al-xNb; (b) Ti-25Nb-xAl

Fig.2 Effects of major alloying elements Nb and Al on the liquidus and solidus temperatures of Ti_2AlNb alloys: (a) Ti-22Al-xNb; (b) Ti-25Nb-xAl

循了与 Hagiwara^[26]相同的准则,在合金改性时合金中元素的 β 稳定性总和对应基准 Ti-22Al-25Nb 合金,使改性合金的相图与基准合金的相图相似,可以获得相同的相组成,有益于后续的工艺路线设计。表1为各 β 稳定元素的临界浓度,可以看到 Mo 的 β 相稳定能力是 Nb 的 4.25 倍。因此,合理认为添加原子分数为 1% 的 Mo 可替换原子分数为 4.25% 的 Nb,以此控制了 Mo 与 V 的加入时合金中 β 稳定元素的相对含量。图3可以看到加入 Mo 会略微增加合金的液相线温度与凝固温度区间,其对合金流动性的恶化与 Nb 元素含量的降低基本相互抵消;加入 V 虽然降低了合金的液相线温度,但是大幅增加了凝固温度区间,对流动性更为不利。Zr 元素对合金流

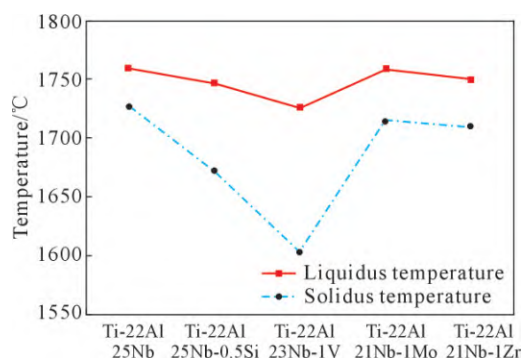


图3 添加元素 Mo、V、Zr、Si 对 Ti_2AlNb 合金液相线/固相线温度的影响

Fig.3 Effects of Mo, V, Zr, and Si addition on the liquidus and solidus temperatures of Ti_2AlNb alloys

动性的影响较小。Si 元素虽然在相图上表现出较大增加了合金凝固温度区间,略微减少了液相线温度,表现出不利的趋势,但是此前的报道表明 Si 元素的少量加入可以减少高温熔体表面形成的氧化膜含量,细化铸态晶粒,细小的晶粒可以阻碍粗大树枝晶的竞争生长,综合提升合金铸造性能。

表1 β 稳定元素的临界溶度

Tab.1 Critical solubility of β -stabilizing elements

(atomic fraction/%)

Mo	Nb	W	V	Fe
5.3	22.5	6.7	14.2	3.0

2.2 合金元素对合金抗氧化性能与力学性能的综合影响

收集了 114 条元素含量、氧化温度及氧化时间关于合金氧化增重质量(mg)的原始数据。通过 PCA 算法清除数据异常点后剩余 110 条有效数据;收集了 87 条元素含量、制备工艺、测试温度关于合金抗拉强度(MPa)的原始数据,通过 PCA 算法清除数据异常点后剩余 81 条有效数据。对两个数据集分别建立机器学习模型,分离数据集 80%用于训练和五折交叉验证,20%用于测试,模型选择与超参数调整由 Autogloun 算法包完成。如图 4a 和 b 分别为合金氧化增重与抗拉强度的训练结果,模型均实现了较好的拟合结果,训练集 R^2 分别达到了 0.82 与 0.93,测试集 R^2 分别达到了 0.78 与 0.76。

在两个数据集中合金成分特征一致,均包含 8 个成分特征:Ti、Al、Nb、Mo、Si、Zr、V、W。基于上述训练结果,为进一步探讨各合金元素及工艺参数对模型预测结果的具体贡献,本文对两个数据集分别进行了 SHAP 特征重要性分析,结果如图 5 所示。根据 SHAP 特征贡献分析结果,氧化增重与抗拉强度对应的特征重要性呈现出显著差异。图 5a 对应氧化增重的模型显示,氧化温度(Temp)是影响氧化行为的最主要变量,表明温度升高会显著促进氧化增重。Ti、Nb 元素的 SHAP 分布呈现明显的正负双向

特征,说明在不同含量区间 Ti 和 Nb 对氧化行为具有抑制或加速的双重作用。少量添加 Zr 元素可以明显增强合金抗氧化性能,但是较高的 Zr 含量的抗氧化作用减弱;Mo 的添加略微减弱合金的抗氧化性能;Al、Si、W 的 SHAP 值波动幅度较小,表明在当前数据空间中它们对氧化增重的整体贡献较弱。图 5b 对应抗拉强度模型,合金元素中 Mo、Nb、Ti 在抗拉强度模型中显示出最高的重要性。此外,制备工艺参数(Method)及热处理相关变量(temp1、time1、temp2、time2)对强度的影响同样显著,表明其在显微组织调控中的重要作用,拉伸实验温度(temp)的提高会显著降低合金的抗拉强度。与氧化增重模型相比,抗拉强度的 SHAP 分布呈现更多的非对称性特征,反映出力学性能对成分与加工条件的非线性耦合效应更为显著。

从图 5 所示的 SHAP 特征重要性分布以及前期的相图计算可以进一步观察到,尽管 W 在降低氧化增重方面展现出一定的优势,但 W 本身的高熔点特性会显著提高合金的液相线温度,从而降低合金熔体的流动性;而 V 元素不但会大幅提高合金氧化增重,且对合金抗拉强度几乎没有贡献,V 元素的加入会大幅提高合金凝固温度区间,降低合金流动性。结合 SHAP 分析所揭示的元素贡献规律以及相图计算结果,本文在机器学习候选成分空间阶段将 W 和 V

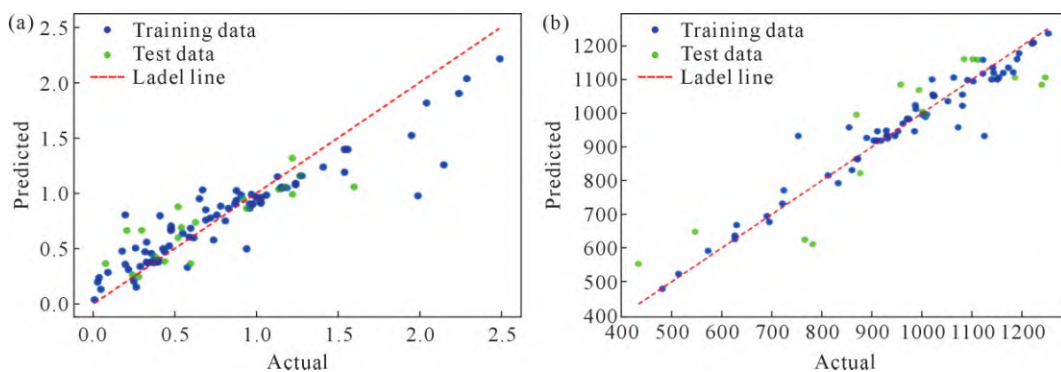


图 4 Autogloun 机器学习训练结果:(a) 氧化增重模型;(b) 抗拉强度模型

Fig.4 Autogloun machine learning training results: (a) oxidation weight-gain model; (b) tensile-strength model

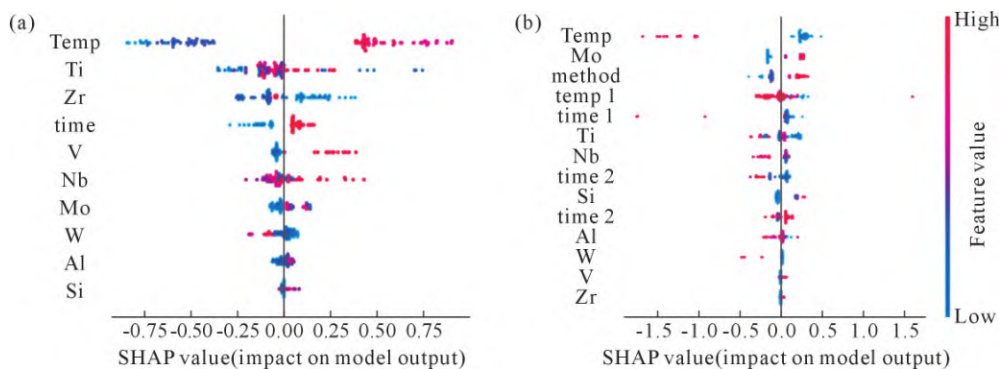


图 5 各模型特征 SHAP 分析:(a) 氧化增重模型;(b) 抗拉强度模型

Fig.5 SHAP feature analysis for the machine learning models: (a) oxidation weight-gain model; (b) tensile-strength model

元素从成分空间中剔除。最终在两类数据集中共同的 8 种合金成分特征基础上,构建了由 Ti、Al、Nb、Mo、Si、Zr 共 6 个元素组成的成分空间用于合金性能预测。最终经模型预测与结合前期相图计算的规律筛选,得到两个合金成分,如表 2 所示,将同 Ti-22Al-25Nb 合金一起进行后续流动性实验验证。

表2 合金成分筛选结果

Tab.2 Results of the alloy composition screening

(atomic fraction/%)

Element	Ti	Al	Nb	Mo	Si	Zr
①	49.5	24	25	0	0.5	1
②	52.5	24	21	1	0.5	1

2.3 合金流动性优化试验验证与讨论

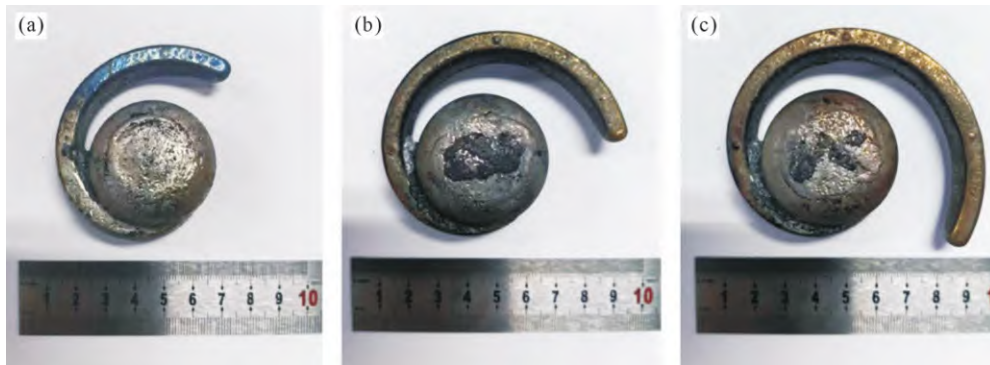
为验证所选合金流动性提升的实际效果,制备了 3 种 Ti_2AlNb 基合金铸锭,并开展流动性验证。流动性验证试验结果如图 6 和表 3 所示。图 6 展示了 3 种合金的流动性测试试样。根据样品螺旋长度数据,3 种合金的实际填充长度见表 3。由于相图计算数据的局限性,因此实际填充长度与模拟计算规律会具有差距。从表 3 可以看出,Ti-22Al-25Nb 合金的螺旋长度为 123 mm,Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr 合金的螺旋长度为 151 mm,比基体合金增加了 22.8%。测试验证结果与前期模拟规律一致,表明在原有合金的基础上,增加 Al 元素含量并添加 Si 元素对提高合金流动性有明显效果。在 Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr 合金中,使用原子分数为 1%Mo 替换原子分数为 4% Nb 后,该合金的流动性更好,这与相图计算结果规律不一致。

表3 Ti_2AlNb 基合金实际充型长度Tab.3 Actual filling lengths of the Ti_2AlNb -based alloys

Alloy composition/at.%	Length/mm	Increment/%
Ti-22Al-25Nb	123	0
Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr	151	22.8
Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr	183	48.8

Flemings 提出了合金熔体在窄凝固温度区间和宽凝固温度区间内的止流机理^[27]。合金在窄凝固温度区间内的宏观组织为柱状晶,柱状晶从边缘向中心生长,在接近熔体前沿时相互接触,从而阻断熔体流动通道,使熔体流动停止。而具有宽凝固温度区间的合金宏观结构呈等轴晶,且离浇口越远晶粒越细。熔体流动停止的机理是熔体前端冷却最快并率先结晶,当晶体数量达到临界固相率时,会形成连续的树枝晶网络,从而阻断熔体流动通道^[28]。部分学者也报道了 Ti 基合金熔体的止流机理^[29]。 Ti_2AlNb 基合金流动终止机制显示为宽温度范围熔体停止机制,如图 7 所示,3 种成分 Ti_2AlNb 基合金显示出海绵状具有明显凝固缺陷特征的凝固前沿,这是由于凝固前沿树枝晶网络使残余熔体流动困难,当铸件进一步凝固产生体积收缩时,熔体难以穿过被树枝晶网络部分堵塞的通道抵达凝固前沿,导致补缩受阻,最终形成缩孔或缩松等典型缺陷。通过切割线法测量了模具填充流道中不同位置的晶粒尺寸,如图 8 所示。结果显示,晶粒尺寸随着距凝固前沿距离的增大而增大,符合宽凝固温度区间合金凝固特征,经过成分改性的 Ti_2AlNb 基合金的晶粒尺寸明显减小。

在本文制备的 Ti_2AlNb 基合金中,Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr 合金说明提高合金中 Al 含量,并添加 Si 元素能提高合金熔体流动性。Al 含量的增加能降低合金凝固温度,提高合金熔体过热度;适量添加 Si 元素降低了合金的熔点、黏度和表面张力,并且可以减少高温熔体表面形成氧化膜含量,细化铸态晶粒,细小的晶粒阻碍了粗大树枝晶的生长,尽管 Si 元素的添加增加了合金凝固区间,但是依旧综合提升了合金的铸造性能。Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr 合金在前者的基础上以 1%的 Mo 替换 4%的 Nb,尽管少量添加高熔点的 Mo 元素,但是降低了合金中难熔合金元素的含量,同时 Mo 的加入会使合金晶粒细

图 6 Ti_2AlNb 基合金流动性验证结果:(a) Ti-22Al-25Nb; (b) Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr; (c) Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1ZrFig.6 Fluidity validation results of Ti_2AlNb -based alloys: (a) Ti-22Al-25Nb; (b) Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr; (c) Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr

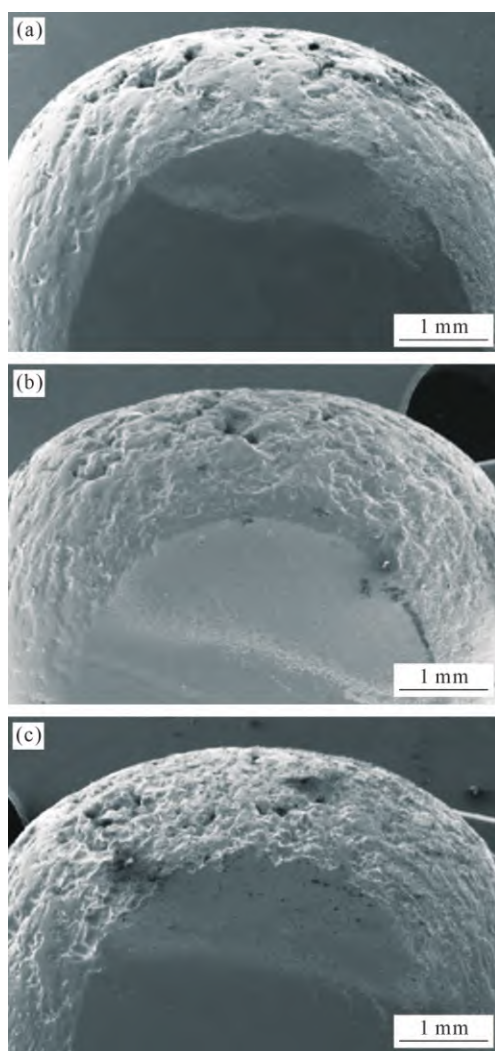


图7 Ti_2AlNb 基合金浇道前沿: (a) Ti-22Al-25Nb; (b) Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr; (c) Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr
Fig.7 Solidification front of the Ti_2AlNb -based alloy in the mold runner: (a) Ti-22Al-25Nb; (b) Ti-24Al-25Nb-0.5Si-1Zr; (c) Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr

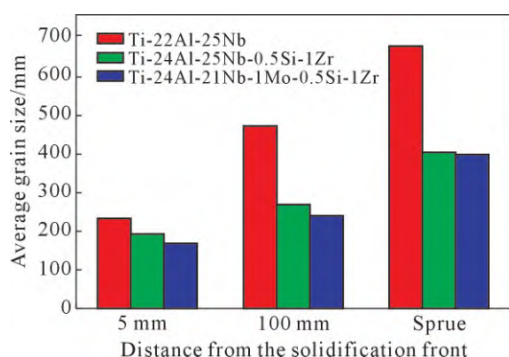


图8 Ti_2AlNb 基合金浇道不同位置平均晶粒尺寸
Fig.8 Average grain size at different positions in the mold runner of the Ti_2AlNb -based alloys

化^[30], 细化的晶粒会阻止枝晶生长形成发达的枝晶网络, 抑制凝固区间宽度增加对流动性的不利影响, 并降低液态金属的流动阻力, 从而进一步改善合金的流动性。

综上所述, 在相同的浇铸条件下, 通过改变合金

成分, 降低合金熔体凝固点, 提高合金熔体过热度; 适量加入晶粒细化剂, 通过细化的晶粒阻止枝晶生长形成发达的枝晶网络, 降低液态金属的流动阻力, 从而改善 Ti_2AlNb 基合金的铸造性能。

3 结论

(1) 热力学计算结果表明, 减少合金中的 Nb 元素, 提高 Al 元素含量有助于提高合金流动性, 添加 Si 元素有利于提高流动性, Zr 元素对合金流动性的影响不大, V 的添加会较大降低合金流动性, 而 Mo 的添加会略微降低合金的流动性, 但是流动性实验与热力学计算结果出现差异, 新成分合金因 Mo 的替换添加具有更高的流动性。

(2) 机器学习结果表明, Zr 元素的添加有助于提高合金抗氧化性, Mo、Si 的添加有助于提高合金抗拉性能。结合热力学计算结果, 设计出新的 Ti_2AlNb 基合金成分。流动性实验验证结果说明, Ti-24Al-21Nb-1Mo-0.5Si-1Zr 合金的流动性最佳。

(3) Ti_2AlNb 基合金在浇道不同位置的组织均为等轴组织, 合金凝固前沿具有明显铸造缺陷, 表明 Ti_2AlNb 基合金熔体的止流机理是具有较宽结晶温度范围的合金的特征。

(4) 基于 Ti-22Al-25Nb 合金, 新成分合金流动性提高的原因在于合金熔体凝固点降低, 合金熔体过热度提高; 添加的微量元素作为合金的晶粒细化剂, 减小了合金铸造晶粒尺寸, 细小晶粒阻止了树枝晶向发达树枝晶网络的生长, 抑制了凝固区宽度增加对流动性的不利影响, 并降低了液态金属的流动阻力。

参考文献:

- [1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 1-5.
LIU D X. One generation of new material, one generation of new type engine: Development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10): 1-5.
- [3] KUMPFERT J. Intermetallic alloys based on orthorhombic titanium aluminide[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3: 851-864.
- [4] 刘泽栋, 杨劼人, 陈瑞润, 杜赵新. Ti_2AlNb 基金属间化合物: 研究进展、挑战及展望[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(12): 4039-4058.
LIU Z D, YANG J R, CHEN R R, DU Z X. Ti_2AlNb -based intermetallic compounds: Research progress, challenges and prospects [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(12): 4039-4058.

- [5] FU Y Q, SU Z M. Elemental composition, phase diagram, microstructure, fabrication processes, and mechanical properties of Ti_2AlNb alloy: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(23): 12819-12846.
- [6] 骆晨,张寅,王新英,梁晓波,张建伟. 热处理对铸造 Ti_2AlNb 合金组织和力学性能的影响[J]. 航天制造技术, 2020(2): 18-20.
LUO C, ZHANG Y, WANG X Y, LIANG X B, ZHANG J W. Effect of heat treatment on microstructure and properties of cast Ti-22Al-25Nb alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2020(2): 18-20.
- [7] 周伟,刘林,介子奇,黄太文,张琰斌,张军,傅恒志. 硼对 K4169 高温合金流动性及缩松的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3082-3088.
ZHOU W, LIU L, JIE Z Q, HUANG T W, ZHANG Y B, ZHANG J, FU H Z. Effect of element B on fluidity and microporosity of K4169 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3082-3088.
- [8] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
LI Q C. Fundamentals of casting formation [M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [9] 张明达,刘英飒,郑真,曹京霞,黄旭. 合金元素复合化对 Ti_2AlNb 合金高温抗氧化性能影响[J]. 材料工程, 2022, 50(1): 93-100.
ZHANG M D, LIU Y S, ZHENG Z, CAO J X, HUANG X. Effect of compound alloying on high temperature oxidation resistance property of Ti_2AlNb alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(1): 93-100.
- [10] 刘子儒,郭乾应,张虹雨,刘永长. V 添加对 Ti_2AlNb 合金组织演变及硬度的影响[J]. 金属学报, 2025, 61(6): 848-856.
LIU Z R, GUO Q Y, ZHANG H Y, LIU Y C. Effects of V on the microstructure evolution and hardness enhancement of Ti_2AlNb alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(6): 848-856.
- [11] LI X, LIU S S, ZHOU Y, HUANG X. Effect of peak stress and dwell time on the fatigue damage behavior of Ti-22Al-23Nb-2(Mo, Zr) alloy with lamellar microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175535.
- [12] TANG F, NAKAZAWA S, HAGIWARA M. Creep behavior of tungsten-modified orthorhombic Ti-22Al-20Nb-2W alloy[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(12): 1065-1070.
- [13] ZHANG J, ZHANG X W, WANG H W, WU M W, MA X, LIANG X B, ZHANG J W, LIU R P, SUN Z M, ZHANG J. Study on the composition optimization method for improving the fluidity of cast Ti_2AlNb alloy and its mechanism[Preprint]. arXiv. 2023, (2025-12-19). <https://arxiv.org/abs/2301.09499>
- [14] 张熹雯,王红卫,马雄,张建伟,梁晓波,骆晨,张健. 铸造用 Ti_2AlNb 基金及其制备方法和铸件:CN202111616147.X[P]. 2022-01-28.
ZHANG X W, WANG H W, MA X, ZHANG J W, LIANG X B, LUO C, ZHANG J. Ti_2AlNb -based alloy for casting, its preparation method and castings: CN202111616147. X[P]. 2022-01-28.
- [15] GERMANN L, BANERJEE D, GUÉDOUJ Y, STRUDEL J L. Effect of composition on the mechanical properties of newly developed Ti_2AlNb -based titanium aluminide[J]. Intermetallics, 2005, 13(9): 92-94.
- [16] 俞占扬,信瑞山,曹晨星,王建强,姚斌,王利伟,赵吉庆. 高强度奥氏体不锈钢中析出相的热力学计算与试验分析[J]. 金属热处理, 2025, 50(4): 89-94.
YU Z Y, XIN R S, CAO C X, WANG J Q, YAO B, WANG L W, ZHAO J Q. Thermodynamic calculation and experimental analysis on precipitated phase in high-strength austenitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(4): 89-94.
- [17] 李强,杨颖,陈今良,王英虎. Nb 掺杂对 TC4 钛合金相图和力学性能的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2025, 62(5): 1217-1223.
LI Q, YANG Y, CHEN J L, WANG Y H. Effect of Nb doping on phase diagram and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2025, 62(5): 1217-1223.
- [18] 杨舒宇,蒋敏,王磊. 相图热力学计算在新型钴基高温合金设计中的应用[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(4): 278-282.
YANG S Y, JIANG M, WANG L. Applications of thermodynamic calculations of phase diagram to new - type Co - based superalloy design[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(4): 278-282.
- [19] BUTLER K T, DAVIES D W, CARTWRIGHT H, ISAYEV O, WALSH A. Machine learning for molecular and materials science [J]. Nature, 2018, 559: 547-555.
- [20] JAIN A, ONG S P, HAUTIER G, CHEN W, RICHARDS W D, DACEK S, CHOLIA S, GUNTER D, SKINNER D, CEDER G, PERSSON K A. Commentary: The materials project: A materials genome approach to accelerating materials innovation [J]. APL Materials, 2013, 1: 011002.
- [21] YANG C, REN C, JIA Y F, WANG G, LI M J, LU W C. A machine learning-based alloy design system to facilitate the rational design of high entropy alloys with enhanced hardness[J]. Acta Materialia, 2022, 222: 117431.
- [22] SOHAIL Y, ZHANG C L, XUE D Z, ZHANG J Y, ZHANG D D, GAO S H, YANG Y, FAN X X, ZHANG H, LIU G, SUN J, MA E. Machine-learning design of ductile FeNiCoAlTi alloys with high strength[J]. Nature, 2025, 643: 119-124.
- [23] 杨闯,李邦盛,任明星,傅恒志,白世鸿,王红红. Ti 基金合金熔体停止流动机理研究[J]. 铸造, 2008, 57(10): 1072-1075.
YANG C, LI B S, REN M X, FU H Z, BAI S H, WANG H H. Flow cessation mechanism of titanium based alloys melt[J]. Foundry, 2008, 57(10): 1072-1075.
- [24] 叶荣茂,蒋烈光,蒋祖龄,王惠光. 液态金属停止流动机理的探讨[J]. 金属科学与工艺, 1983, 2(4): 44-50.
YE R M, JIANG L G, JIANG Z L, WANG H G. A study on the cessation mechanism of flow for molten metals[J]. Materials Science and Technology, 1983, 2(4): 44-50.
- [25] ZHOU X, FU L, GE H L, MAO Y. Enhancement of tensile properties of Ti_2AlNb alloy added with Ta element[J]. Materials Letters, 2022, 329: 133233.
- [26] HAGIWARA M, EMURA S, ARAOKA A, KONG B O, TANG F. Enhanced mechanical properties of orthorhombic Ti_2AlNb -based intermetallic alloy[J]. Metals and Materials International, 2003, 9: 265-272.
- [27] RAVI K R, PILLAI R M, AMARAMATHAN K R, PAI B C, CHAKRABOITY M. Fluidity of aluminum alloys and composites:

- A review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 456(1-2): 201-210.
- [28] DAHLE A, KARLSEN S, ARNBERG L. Effect of grain refinement on the fluidity of some binary Al-Cu and Al-Mg alloys[J]. International Journal of Cast Metals Research, 1996, 9(2): 103-112.
- [29] 黄宏,左家斌,李峰,丁贤飞,赵轶群,王红,南海. Ti4822 合金熔体停止流动机理研究[J]. 铸造,2022, 71(11): 1349-1352.
HUANG H, ZUO J B, LI F, DING X F, ZHAO Y Q, WANG H, NAN H. Analysis on flow cessation during investment casting of Ti4822 alloy[J]. Foundry, 2022, 71(11): 1349-1352.
- [30] CHEN Y Y, DU Z X, KONG F T, XIAO X L, ZHANG Z X. Effect of Mo addition on microstructures and mechanical properties of Ti₂AlNb alloy [J]. Advanced Materials Research, 2011, 308-310: 142-145.

(责任编辑:宫文婧)