

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5179

ZTA15 铸造钛合金的化学成分与高温性能研究

李弘^{1,2}, 刘云超^{1,2}, 高雨龙^{1,2}, 孟泽炎^{1,2}, 程永建^{1,2}, 刘珍君^{1,2}, 孟晓东^{1,2}

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 本文系统研究了 ZTA15 铸造钛合金在不同合金元素质量比条件下的微观与宏观组织特征及其高温力学性能, 并进一步探讨了不同铸造工艺对合金组织与性能的影响机制。通过熔炼与浇注工艺制备了单铸试验试样, 并在完成热等静压及退火处理后, 对试样的化学成分和力学性能进行了系统分析, 从而确定了具有良好综合性能的合金元素配比范围。此外, 对熔模精密铸造与石墨型铸造两种工艺条件下制备的试样进行了对比研究, 明确了铸造工艺对高温力学性能的影响规律。基于实验结果, 确定了 ZTA15 铸造钛合金在 400 °C 高温服役环境下性能最优的合金元素质量比区间及其适配的铸造工艺。

关键词: ZTA15 铸造钛合金; 化学成分; 400 °C 高温拉伸性能; 熔模精密铸造; 石墨型铸造

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0195-11

Research on the Chemical Composition and High-temperature Properties of ZTA15 Cast Titanium Alloy

LI Hong^{1,2}, LIU Yunchao^{1,2}, GAO Yulong^{1,2}, MENG Zeyan^{1,2}, CHENG Yongjian^{1,2},
LIU Zhenjun^{1,2}, MENG Xiaodong^{1,2}

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China; 2. Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The microscopic and macroscopic microstructural characteristics as well as the high-temperature mechanical properties of ZTA15 cast titanium alloys were systematically investigated under various mass ratios of alloying elements. Furthermore, the influence mechanisms of different casting processes on the microstructure and mechanical performance of the alloy were explored. Single-cast test samples were fabricated through melting and casting procedures. Following hot isostatic pressing and annealing, the chemical composition and mechanical properties of the samples were comprehensively analysed to determine the optimal alloying element ratio range that results in superior overall performance. Additionally, a comparative analysis was conducted on samples produced via two distinct casting techniques, investment precision casting and graphite mold casting, to elucidate the specific effects of the casting process on high-temperature mechanical properties. On the basis of the experimental findings, the optimal mass ratio range of alloying elements and the corresponding casting process for ZTA15 cast titanium alloy under high-temperature service conditions of 400 °C are identified.

Key words: ZTA15 cast titanium alloy; chemical composition; tensile performance at 400 °C high temperature; investment precision casting; graphite mold casting

ZTA15 是一种仿制俄罗斯 BT20^[1-2]的铸造钛合金, 其成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。该合金属于高 Al 当量的近 α 型钛合金^[3], 具备 α 型钛合金的优良特性, 如良好的铸造工艺性、焊接性能以及综合力学性能。BT20 是前苏联在美制 Ti-8Al-1Mo-1V 合金基础上自主研发的合金。由于美制 Ti-8Al-1Mo-1V

合金(简称 Ti811)对热应力腐蚀开裂具有较高敏感性, 而高 Al 含量是导致该敏感性的主要因素, 因此 BT20 合金在设计中降低了 Al 含量, 并添加了 2% 的 Zr。Al 与 Zr 均能有效强化并稳定 α 相, 从而提升合金在高温下的强度和抗蠕变能力, 增强其热稳定性, 使其可在 500 °C 以下长期稳定使用。该类合金已

收稿日期: 2025-08-14

作者简介: 李弘, 1976 年生, 硕士, 高工。主要从事钛及钛合金铸造, 主要包括钛合金和高温钛合金材料研发、产品设计与开发、工艺研究与应用等。Email: sevenholly@163.com

引用格式: 李弘, 刘云超, 高雨龙, 孟泽炎, 程永建, 刘珍君, 孟晓东. ZTA15 铸造钛合金的化学成分与高温性能研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(2): 195-205.

LI H, LIU Y C, GAO Y L, MENG Z Y, CHENG Y J, LIU Z J, MENG X D. Research on the chemical composition and high-temperature properties of ZTA15 cast titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(2): 195-205.

在航空航天、船舶制造、生物医疗等领域得到广泛应用^[4-12]。钛合金首次应用于航空领域是在 20 世纪 60 年代的波音 707 飞机上。其在航空航天领域迅速发展的主要原因在于其较高的比强度,密度仅为钢铁材料的 1/2,却具备优异的强度与硬度,同时具有良好的断裂韧性。基于钛合金的优异性能,特别是在多种战斗机、液压系统紧固件及民用客机中应用比例的不断提升,钛合金的应用水平已成为衡量飞行器制造技术水平的重要指标之一。

在 GJB 2896A、HB 5448、GB/T 15073 等钛及钛合金铸造相关标准中,对 ZTA15 铸造钛合金中合金元素的成分要求(质量分数,%):Al(5.5%~6.8%)、Zr(1.5%~2.5%)、V(0.8%~2.5%)、Mo(0.5%~2.0%)。各元素含量的允许范围相对较宽。石峰等^[13]测试了不同温度下 ZTA15 铸造钛合金拉伸性能,并对金相组织和拉伸断口形貌进行了观察;陈红等^[14]对 ZTA15 铸造钛合金在不同热处理状态下的微观组织及室温力学性能进行了研究,并重点分析了热等静压和退火状态下的常温性能;韩云飞等^[15]探讨了铸件壁厚及铸造缺陷对 ZTA15 钛合金组织与性能的影响;张健辉等^[16]研究了该合金的高周疲劳性能及其疲劳断裂的微观机制。然而,关于 ZTA15 铸造钛合金高温力学性能的研究相对较少,相关文献主要由航空材料研究院等科研机构发表^[17-26]。目前,国内在合金体系中各元素具体成分含量与材料最终力学性能参数之间的内在关联机制及影响规律方面的系统性研究仍显不足。尽管部分学者已针对特定合金体系开展了一些成分-性能关系的探索性研究,但这些研究大多局限于单一合金系统或特定性能指标,缺乏对不同合金体系中多种元素协同作用及其对材料综合力学性能(包括强度、硬度、韧性、疲劳性能等)影响的深入分析和理论阐释。尤其在多元复杂合金体系方面,关于各合金元素含量变化与材料宏观力学性能之间的定量关系研究更为稀少,这在一定程度上制约了高性能合金材料的成分设计与性能优化。在实际铸件生产过程中,常观察到力学性

能存在波动现象,表明合金元素含量的微小变化可能显著影响材料的整体力学性能。造成元素含量波动的原因,包括母合金原材料批次间的成分差异,或合金元素在熔炼过程中存在一定程度的偏析等。

本文采用多轮试验与检测相结合的方法,从两个方面系统研究 ZTA15 铸造钛合金的高温性能特征。一方面对 ZTA15 铸造钛合金中的合金成分进行调控,调整 Al、Zr、V、Mo 含量,开展相关性能检测;另一方面,在合金成分完全一致的前提下,采用不同的铸造工艺制备试样,进行性能对比检测。通过对多轮试验综合分析,探讨影响 ZTA15 钛合金高温力学性能的主要因素及其变化规律。

1 实验材料与方法

1.1 合金元素成分调控

1.1.1 原材料选取

制备两批次母合金原材料,分别简称为 P1 和 P2。同一批次的海绵钛配制,并经两次或以上熔炼所得的铸锭,或同一熔炼炉次熔炼并经锻造处理的锻棒,视为一个母合金批次。铸件材料牌号为 ZTA15。用于浇注的合金锭须经不少于两次真空自耗电极电弧炉熔炼,不得含有对重熔过程产生不利影响的内部或外部杂质。原材料的化学成分应符合表 1 和 2 的规定要求。

表 1 中 P1 的化学成分和表 2 中 P2 的成分范围,是根据 GJB 2896A^[27]标准中对 ZTA15 合金成分要求所制定的两个企业内部质量控制标准。以下试验将基于 P1 和 P2 两个批次的母合金原材料制备试样,开展相关研究与分析。

如图 1 所示,该信息是在 GJB 2896A 标准中对 ZTA15 合金成分要求的基础上进行的元素调控。根据 GJB 2896A 的规定,本研究中,Al 元素 P1 组调控为 5.9~6.3,P2 组调控为 6.5~6.8;Zr 元素 P1 组调控为 1.8~2.1,P2 组调控为 2.2~2.5;Mo 元素 P1 组调控为 1.1~1.6,P2 组调控为 1.7~2.0;V 元素 P1 组调控为 1.5~2.0,P2 组调控为 2.1~2.5。将元素含量划分为

表 1 ZTA15合金P1化学成分范围
Tab.1 Chemical composition range of ZTA15 alloy P1

(mass fraction/%)										
Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
5.9~6.3	1.8~2.1	1.1~1.6	1.5~2.0	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	Matrix

表 2 ZTA15合金P2化学成分范围
Tab.2 Chemical composition range of ZTA15 alloy P2

(mass fraction/%)										
Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
6.5~6.8	2.2~2.5	1.7~2.0	2.1~2.5	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	Matrix

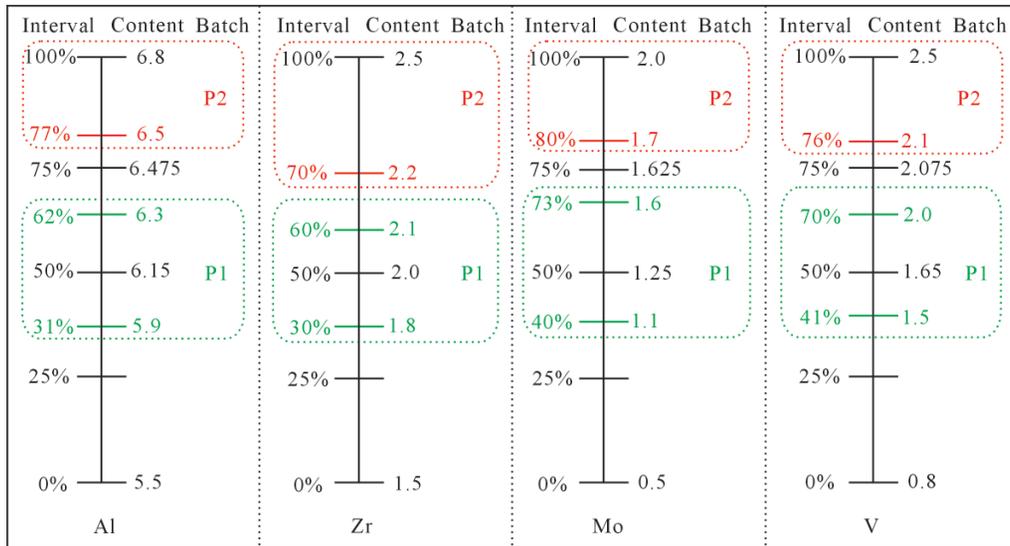


图 1 合金元素调控示意图
Fig.1 Alloying element control diagram

[0-100]区间,其中 P1 组的成分含量位于[30-70]区间,P2 组的成分含量位于[70-100]区间。

1.2 试样制备

1.2.1 浇注系统的设计

以直径 15 mm、长度 130 mm 的圆柱形铸态试样为研究对象,系统开展材料性能与铸造工艺的关联性分析。基于合金的流动性、凝固收缩特性及铸件结构特征,设计了科学合理的浇注系统,旨在实现金属液的平稳充型,有效降低湍流程度并减少卷气现象,控制内部缺陷的形成。该浇注系统在设计中还特别考虑了金属液凝固过程中的补缩能力,以确保试样获得致密且均匀的组织结构。在此基础上,进一步优化模具结构,使凝固过程中的温度场分布更加均匀,从而为后续的微观组织分析和力学性能测试提供实验保障。

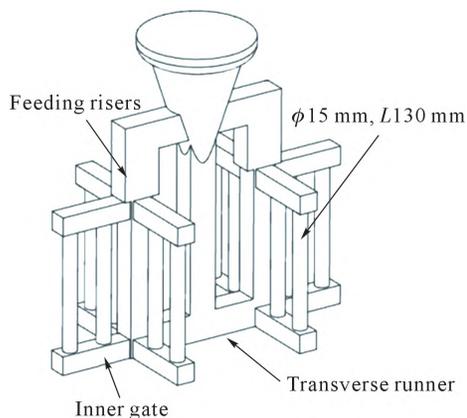


图 2 试样浇注系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of the sample pouring system

1.2.2 铸型制备

在陶瓷型壳工艺中,通常采用由面层和加固层组成的复合型制壳工艺。其中,面层选用具有优异

化学惰性的特殊材料,旨在在高温浇注过程中有效抵御金属液的化学侵蚀,从而减少因材料与金属液发生反应而产生的夹杂物等缺陷。加固层则采用具有良好退让性和透气性的材料,以提升型壳的整体强度和铸造适应性,并在铸件冷却收缩过程中实现适度退让,防止铸件出现裂纹或变形。

该复合结构设计不仅增强了型壳在铸造过程中的稳定性,还显著优化了其综合性能,涵盖型壳的机械强度、退让性及溃散性。通过对上述性能参数的合理调控,可有效降低浇注过程中夹杂、气孔等冶金缺陷的发生率,从而提升铸件的冶金质量。

表3 制壳工艺参数
Tab.3 Parameters of the shell-making process

Serial number	Parameter	Parameter value	Serial number	Parameter	Parameter value
1	Top layer	2	3	Reinforcement layer	7
2	Transition layer	1	4	Sealing paste layer	1

制壳参数如表 3 所示,陶瓷型壳采用了由面层 2 层、过渡层 1 层、加固背层 7 层以及封浆层 1 层构成的制壳工艺。该工艺选用了与钛铸件制壳工艺相同的结构配置,旨在确保型壳在强度、厚度、散热性能、溃散性及透气性等方面保持一致性,从而提升铸造过程的稳定性与铸件质量。

在石墨铸型的制作过程中,通常采用机械加工的方式对石墨材料进行精密加工,以制备符合设计要求的石墨模具。该类模具在铸造工艺中具有关键作用,其几何精度与物理性能直接影响最终铸件的品质。为确保石墨模具在使用过程中具备良好的热稳定性和铸造适应性,必须在浇注前对其进行真空除

气处理。该工艺步骤的主要目的是去除石墨模具内部可能吸附的气体及挥发性杂质,避免在铸造过程中因气体残留而引发气孔、夹杂等铸造缺陷。通过真空除气处理,可显著提升铸件的致密性与表面质量。

真空除气的具体工艺参数见表 4, 制备两种不同工艺的熔炼浇注铸型,图 3a 为陶瓷型壳,图 3b 为石墨铸型。经验证,严格执行该除气工艺不仅有助于提升模具的服役性能,还能有效保障铸造过程的稳定性,提高产品成产率。

表 4 除气工艺参数
Tab.4 Degassing process parameters

Vacuum degassing process	Working temperature	Insulation time	Remarks
≤6.0 Pa	950±10 °C	≥2 h	Heating rate 5~8 °C/min Exit temperature<300 °C

1.2.3 熔炼浇注

本实验设计了三炉浇注试验,分别采用不同原材料与型壳组合进行熔炼浇注。具体方案如下:第一炉采用 P1 批次原材料与陶瓷型壳进行熔炼浇注,所得试样简称为 F1;第二炉采用 P2 批次原材料

与陶瓷型壳进行熔炼浇注, 所得试样简称为 F2;第三炉采用 P2 批次原材料与石墨铸型进行熔炼浇注, 所得试样简称为 F3。F1、F2、F3 三炉试验均采用相同的熔炼浇注工艺。熔炼浇注工艺参数见表 5。

1.2.4 后处理

熔炼浇注后的试样依次进行清壳、切割、打磨和吹砂等预处理工序,去除表面残留的型壳物质、氧化层及微小杂质,提高表面清洁度与光洁度。完成预处理后,试样进入热等静压(hot isostatic pressing, HIP)处理阶段,该工艺利用高温高压下的惰性气体能有效消除内部缩松和气孔缺陷,显著提升材料的致密性与组织均匀性。热等静压的具体工艺参数见表 6。

热等静压处理后的试样需接受 X 射线无损检测,以评估其内部是否存在气孔、缩松等缺陷。经检测合格的试样可进入后续加工工序。随后,试样进入真空退火处理阶段,该工艺旨在消除材料内部因前期加工产生的残余应力,并优化微观组织结构,提升材料的综合力学性能。真空环境可有效防止氧化、氮化及其他形式的表面污染,保障试样在加热过程中的化学稳定性和表面质量。退火工艺参数见表 7^[27]。

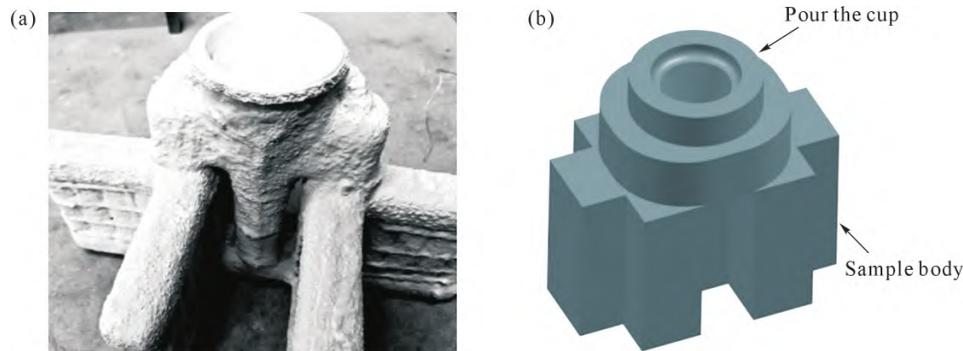


图 3 铸型:(a) 陶瓷型壳;(b) 石墨铸型
Fig.3 Casting mold: (a) ceramic shell; (b) graphite casting mold

表 5 熔炼浇注工艺参数

Tab.5 Smelting and casting process parameters

Serial number	Equipment	Parameter	Parameter values
1	Trolley type resistance furnace	Shell preheating temperature	(350±25) °C
2	Trolley type resistance furnace	Shell holding time	≥2 h
3	Vacuum skull furnace	Degree of melting vacuum	≤1.0 Pa
4	Vacuum skull furnace	Melting current	18 000~22 000 A
5	Vacuum skull furnace	Melting voltage	35~45 V
6	Vacuum skull furnace	Cooling time	≥40 min
7	Vacuum skull furnace	Metal cast	25 kg

表 6 热等静压工艺参数

Tab.6 Hot isostatic pressing process parameters

Temperature /°C	Holding time/h	Holding pressure/MPa	Cooling mode	Exit temperature/°C
920±10	2~2.5	100~140	Furnace cooling	≤300

1.3 实验分析与检测方法

制备完成的试样分别进行化学成分分析、400 °C 高温拉伸性能测试以及金相组织观察,以系统评估材料的化学成分、力学性能及微观组织特征,全面反映其综合性能表现。

(1)化学成分分析 为验证材料成分是否符合设

计规范,试样依据国家标准 GB/T 4698 进行化学成分检测,对试样中的主要合金元素及杂质元素含量进行测定,确保其处于标准允许范围内,为材料性能的稳定性与一致性提供可靠的数据支持。

(2)高温力学性能测试 高温力学性能测试在温度 400 °C 下进行,试样按照 GB/T 228.2:《金属材料拉伸试验 第 2 部分:高温试验方法》的要求进行加工。在加工过程中,采用高精度数控设备进行车削、铣削等操作,严格控制表面粗糙度和几何公差,避免因加工误差引入额外应力或对检测结果造成干扰,通常选用 R5 规格。测试过程中,通过高温试验炉建立稳定的热环境,测定试样在高温条件下的抗拉强度、屈服强度和伸长率等关键力学参数,用于评估材料在高温服役状态下的承载能力与塑性变形特性^[18-22]。

(3)金相组织观察 金相试样经切割、镶嵌、粗磨、细磨、抛光及腐蚀等标准制样流程后,使用 K 氏腐蚀剂(成分为 5%氢氟酸+10%硝酸+85%水)进行表面腐蚀,以清晰显示其组织结构。随后,采用 Olym

pus 金相显微镜对试样进行系统观察,重点分析晶粒尺寸、相组成、析出物分布及其形貌特征。同时,结合能谱仪(EDS)对断口局部元素组成定性定量分析,判断断裂诱因。综合比对力学性能测试数据及金相组织特征,以完整认知材料高温断裂行为。

2 实验结果及讨论

2.1 化学成分分析

对退火后的试样 F1、F2 和 F3 分别进行化学成分检测,每组样本数量为 3 个,检测结果详见表 8。

如表 8~10 所示,F1 试样采用 P1 批次的原材料,F2 和 F3 试样则采用 P2 批次的原材料。根据图 4 可知,各试样的化学成分均处于规定范围之内,且整体波动较小,表现出良好的稳定性。

2.2 高温 400 °C 力学性能检测

从 F1、F2、F3 3 种试样中各随机抽取 5 件样品作为实验样本,进行 400 °C 高温拉伸试验,试验方法依据 GB/T 228.2 标准执行,检测项目包括抗拉强度

表 7 真空退火工艺参数

Tab.7 Vacuum annealing process parameters

Temperature/°C	Holding time/h	Vacuum degree/Pa	Cooling mode	Heating rate/(°C·min ⁻¹)	Exit temperature/°C
725~735	2.5±0.3	<1	Furnace cooling	5	<300 °C

表 8 F1 试样化学成分实测

Tab.8 Measured chemical composition of the F1 sample

Element	(mass fraction/%)										
	Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
Required value	5.9~6.3	1.8~2.1	1.1~1.6	1.5~2.0	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	Matrix
Measured value	6.19	2.04	1.22	2.02	0.15	0.027	0.004 0	0.11	0.00300	0.000 7	
	6.18	1.97	1.22	2.04	0.15	0.014	0.004 0	0.12	0.00400	0.000 8	-
	6.17	2.06	1.16	2.03	0.15	0.01	0.005 7	0.13	0.004 3	0.004 1	

表 9 F2 试样化学成分实测

Tab. 9 Measured chemical composition of the F2 sample

Element	(mass fraction/%)										
	Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
Required value	6.5~6.8	2.2~2.5	1.7~2.0	2.1~2.5	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	Matrix
Measured value	6.60	2.26	1.82	2.22	0.152	0.030	0.006	0.13	0.005	0.003 2	
	6.63	2.24	1.80	2.20	0.152	0.032	0.007	0.15	0.003	0.001 6	-
	6.62	2.20	1.78	2.18	0.147	0.028	0.008	0.15	0.003	0.002 2	

表 10 F3 试样化学成分实测

Tab.10 Measured chemical composition of the F3 sample

Element	(mass fraction/%)										
	Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	O	N	H	Ti
Required value	6.5~6.8	2.2~2.5	1.7~2.0	2.1~2.5	≤0.3	≤0.15	≤0.13	≤0.16	≤0.05	≤0.01	Matrix
Measured value	6.66	2.29	1.81	2.24	0.15	0.023	0.006	0.13	0.009	0.001 9	
	6.62	2.26	1.86	2.25	0.15	0.029	0.006	0.14	0.016	0.001 9	-
	6.61	2.28	1.83	2.24	0.15	0.028	0.008	0.14	0.007	0.001 7	

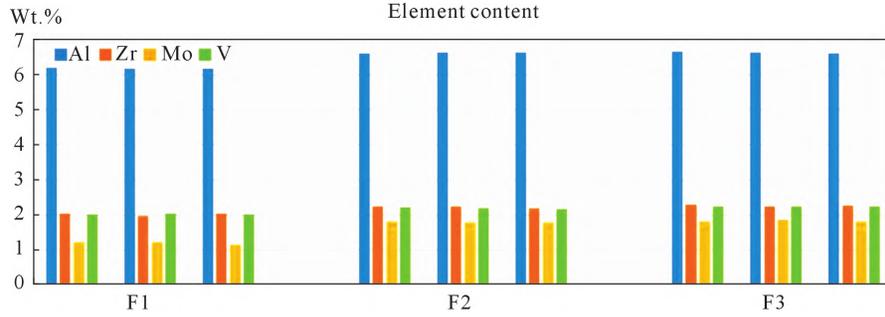


图 4 F1、F2、F3 的元素含量对比分析
Fig.4 Comparative analysis of the element contents of F1, F2 and F3

表 11 400 °C 高温拉伸力学性能
Tab.11 High-temperature tensile mechanical properties at 400 °C

Test temperature/°C	Date type Index	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
		≥622		≥10	
400	F1	605	470	16.0	31.0
		607	465	16.0	28.0
		593	465	16.0	28.0
		602	467	16.0	30.0
		610	470	16.5	29.0
		640	510	12.0	25.5
400	F2	655	510	16.0	30.5
		640	500	12.0	20.0
		640	505	17.0	28.0
		640	490	16.0	39.0
		695	520	16.0	31.5
		675	505	18.0	41.5
400	F3	695	525	18.0	39.5
		715	545	19.5	42.0
		710	515	17.5	37.0

R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 、断后伸长率 A 及断面收缩率 Z 等力学性能指标。表 11 列出了 F1、F2、F3 3 种试样的各项检测结果。

通过对表 11 及图 5 所示数据的分析可知，F1、F2 和 F3 3 种试样在各项性能指标上均表现出较好的一致性与稳定性。根据航空、航天领域对铸件高温拉伸性能的一般要求，抗拉强度 R_m 应不低于 622 MPa，

断后伸长率 A 应不低于 10%；而对屈服强度 $R_{p0.2}$ 和断面收缩率 Z 则无明确要求^[27]。图 5 展示了抗拉强度 R_m 和断后伸长率 A 的柱状图分析，其中红线代表航空、航天标准限值。

由图可知，F1 试样的抗拉强度 R_m 平均值为 603.4 MPa，5 个样本均未达到航空、航天标准^[27]；F2 试样的抗拉强度 R_m 平均值为 643 MPa，所有样本均满足标准要求；F3 试样的抗拉强度 R_m 平均值为 698 MPa，5 个样本也均符合航空、航天标准。在断后伸长率 A 方面，F1、F2、F3 3 种试样的测试结果均满足 $A \geq 10\%$ 的要求。

F1 与 F2 试样均为熔模精密铸造试样，其主要区别在于 ZTA15 合金中金属元素含量不同。F1 试样采用 P1 成分配比，其中 Al、Zr、Mo、V 的含量处于 30~70 区间；而 F2 试样采用 P2 成分配比，上述金属元素含量处于 70~100 区间。实验结果表明，随着金属元素含量的提升，试样的高温(400 °C)拉伸性能显著增强。

F2 与 F3 试样均采用 P2 成分配比，主要区别在于铸造工艺不同。F2 为熔模精密铸造，F3 为石墨型铸造。试验结果显示，F3 试样的高温拉伸性能进一步提升，抗拉强度 R_m 可达 700 MPa 左右，断后伸长率 A 也有所提高(图 6)。

两种材料在弹性、屈服、强化及破坏等力学行为阶段表现出不同程度的差异，这些差异有助于深入

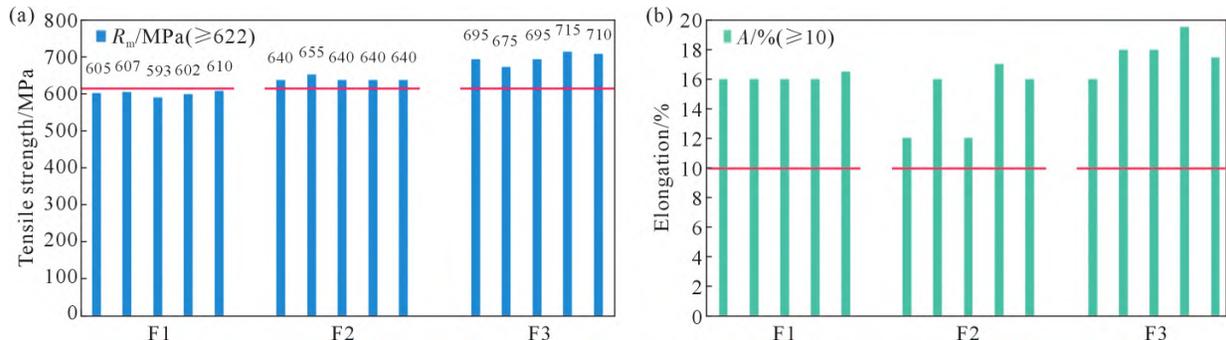


图 5 力学性能:(a) 抗拉强度;(b) 断后伸长率
Fig.5 Mechanical properties: (a) tensile strength; (b) elongation after fracture

理解材料在不同应力条件下所展现出的力学响应特征。

分析表明,铸型材质的差异会对铸件的力学性能产生显著影响。石墨铸型的热导率通常在 $80\sim 150\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间(因石墨种类和纯度不同而有所差异),远高于熔模铸型常用的硅溶胶和陶瓷材料(热导率通常低于 $1\sim 2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。因此,石墨铸型能够更高效地将金属熔体的热量传导至外部,加快冷却速度,同时减小铸型内部的温度梯度,使热量更均匀地扩散至铸型表面,并通过对流和辐射散失至环境中。相比之下,熔模铸型由于热导率较低,热量易在型腔附近积聚,导致散热缓慢。石墨铸型的快速散热特性有助于细化金属晶粒、减少缩松缺陷,但也可能增加铸造应力;而熔模铸型因保温性能较好,适用于薄壁或结构复杂的铸件。因此,在实际应用中应根据冷却速度与铸件质量要求进行合理选择。

2.3 金相检测结果与分析

2.3.1 合金典型组织

对 P2 批次试样进行宏观和微观组织观察,试验试样经热等静压处理后的典型组织有所改善,为典型魏氏组织、片状层组织及等轴组织等混合组织特征。

由图 7 可知,F3 石墨铸型制备的试样晶粒更加细小,表明石墨铸型的热导率高于熔模铸型,其快速

散热特性有助于细化金属晶粒。

F3 试样的显微组织(图 8)由等轴组织与片层状组织共同组成,呈现出典型的混合组织(图 8f)特征。其中,等轴组织(图 8e)分布相对均匀,晶界清晰,有利于提升材料的塑性与韧性;可观察到明显的片层状 α 相,片层状 α 组织平行或交叉分布。在晶界可以观察到明显的片层状 α 相,这些晶界 α 相有的呈连续状,有的呈断续状。这种相互交错得片层状组织在高温条件下能够有效阻碍位错的移动,从而增强材料的强度。该类组织在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 高温环境下仍能保持较好的结构稳定性,展现出优异的热稳定性。上述微观组织的协同效应,使 F3 试样在高温条件下兼具较高的强度与良好的塑性变形能力,为高温结构材料的组织设计与性能优化提供了重要的理论依据。

2.3.2 断口组织

本研究采用 SEM 对在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 高温条件下进行拉伸试验的试样 F2 和 F3 的断口形貌进行了系统表征。分析涵盖宏观与微观两个层面,分别考察断口的整体形貌特征及其微观断裂模式。通过对比 F2 与 F3 试样的断口特征,判断其在高温环境下的失效机理是否具有-致性,并进一步分析材料成分、加工工艺或初始组织状态的差异对断裂行为的影响。

从图 9 所示的宏观断口扫描电镜图像分析可

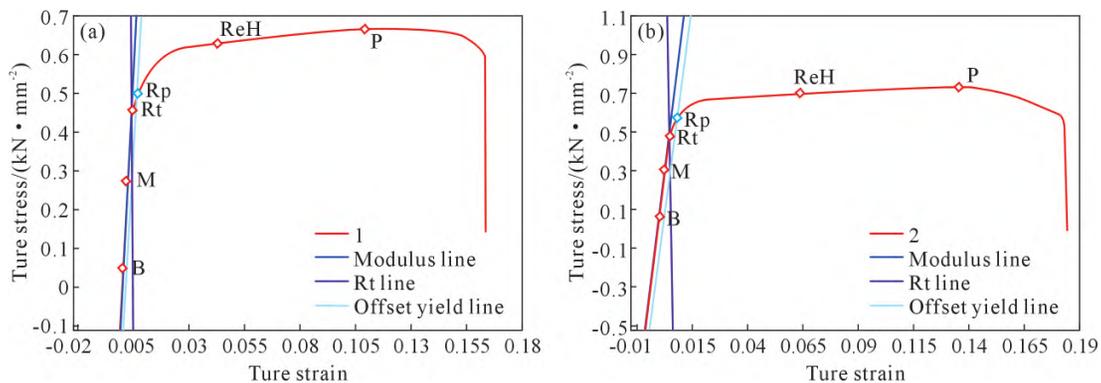


图 6 应力-应变曲线:(a) F2 试样;(b) F3 试样

Fig.6 Stress-strain curve: (a) F2 sample; (b) F3 sample

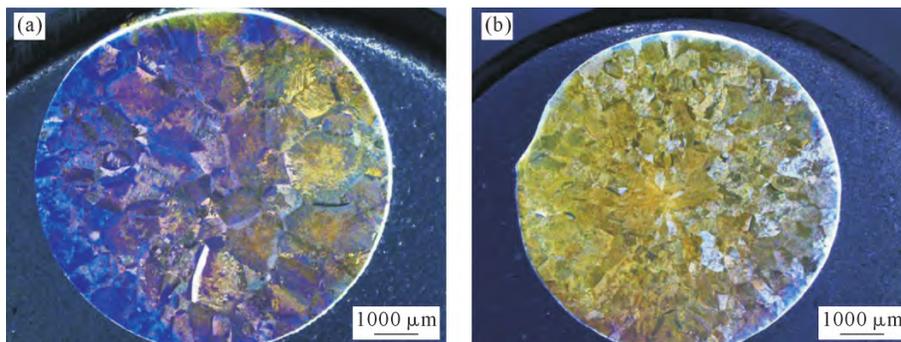


图 7 宏观金相组织:(a) F2 试样;(b) F3 试样

Fig.7 Macroscopic metallographic structure: (a) F2 sample; (b) F3 sample

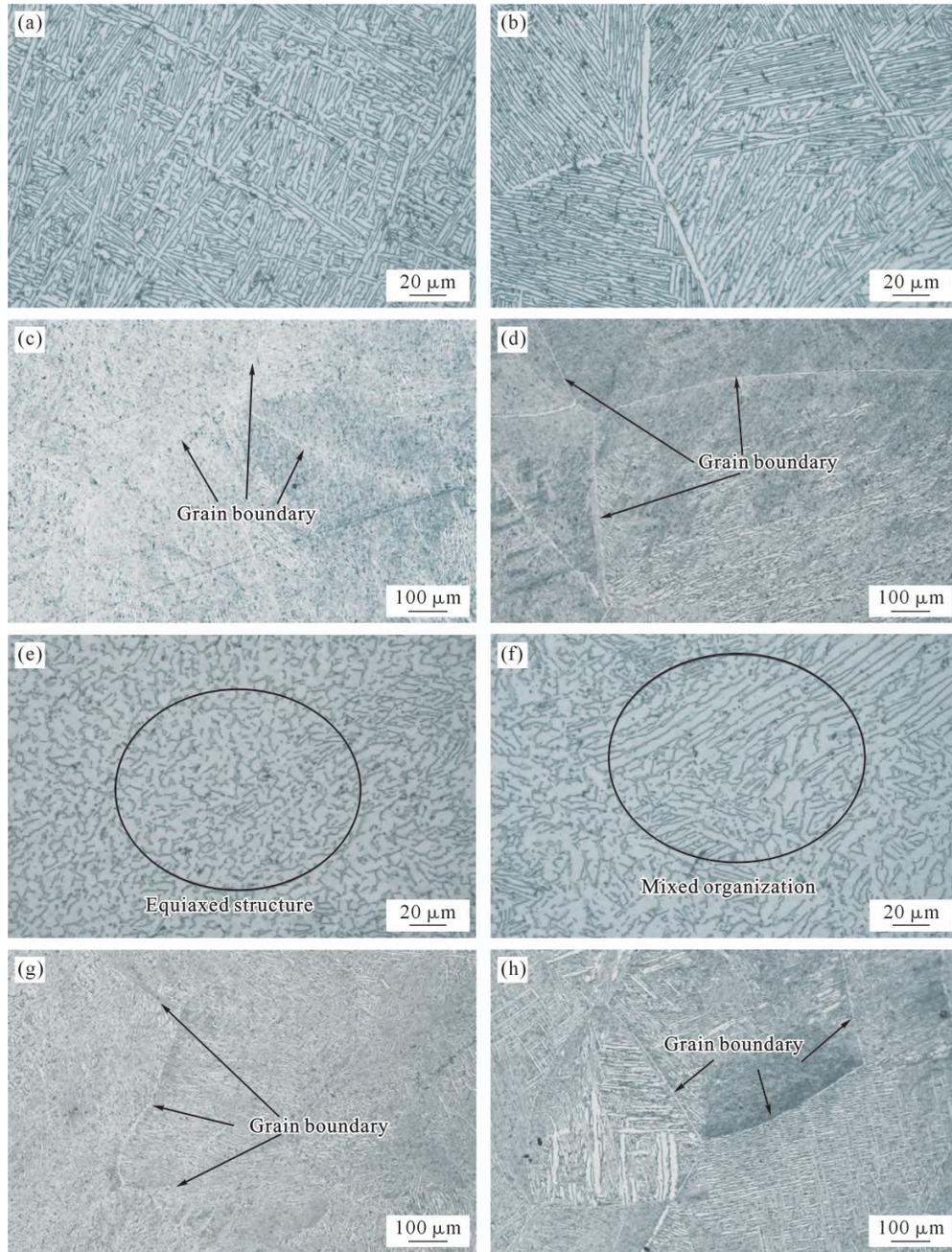


图 8 试样微观组织:(a, c) F2 中心部位;(b, d) F2 边缘部位;(e, g) F3 中心部位;(f, h) F3 边缘部位
Fig.8 Microstructures of the samples: (a, c) F2 central part; (b, d) F2 edge part; (e, g) F3 central part; (f, h) F3 edge part

知, F3 试样在断裂区域周围呈现出明显的缩颈现象, 这是材料在拉伸过程中发生显著塑性变形的典型表征。其断口表面可见清晰的滑移带与流变痕迹, 表明在高温条件(400 °C)下, 材料内部位错运动较为活跃, 晶粒间的相对滑移现象显著, 从而促进了塑性变形能力的提升。该类微观变形机制的显现, 进一步说明 F3 试样在高温拉伸过程中经历了较为充分的塑性变形阶段, 其断裂模式更接近于韧性断裂。综合表面形貌特征与变形机制分析, 可以推断该试样在高温服役环境下具备良好的延展性与变形稳定性。

图 10 为 F2 和 F3 试样断口在不同扫描倍数下的微观组织形貌。对比图 10a 和 b 可知, F3 试样的

断裂特征主要表现为微孔聚集型断裂机制。其断口表面分布着大量尺寸较为均匀、形态接近圆形的等轴韧窝, 这是材料在断裂前经历显著塑性变形的典型微观特征, 尤其在高温(400 °C)条件下表现更为突出。韧窝的较大尺寸与深度表明材料在拉伸过程中发生了明显的塑性流动, 体现出良好的延展性与断裂韧性。

此外, 在断口的局部区域, 特别是在试样边缘区域, 可观察到呈拉长状的抛物线形韧窝。此类韧窝通常与剪切应力作用密切相关, 反映出材料在断裂过程中存在复杂的应力状态。剪切韧窝与等轴韧窝共存的现象进一步表明, F3 试样在高温拉伸过程中不

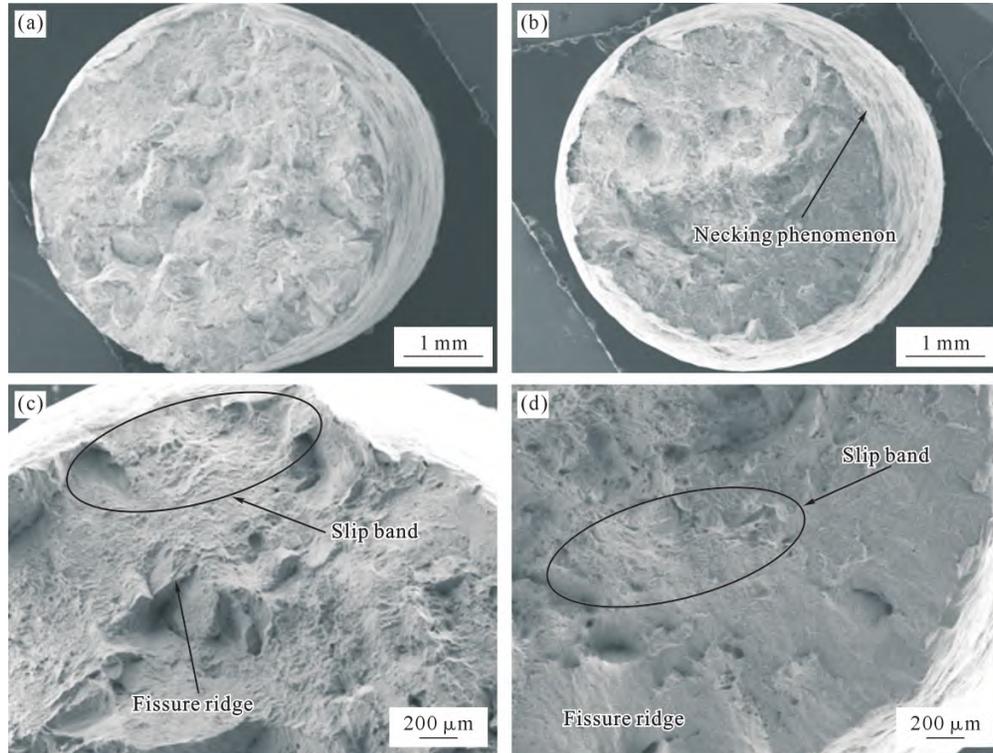


图 9 400 °C 拉伸宏观断口:(a, c) F2 试样;(b, d) F3 试样
Fig.9 Macroscopic tensile fracture at 400 °C:(a, c) F2 sample;(b, d) F3 sample

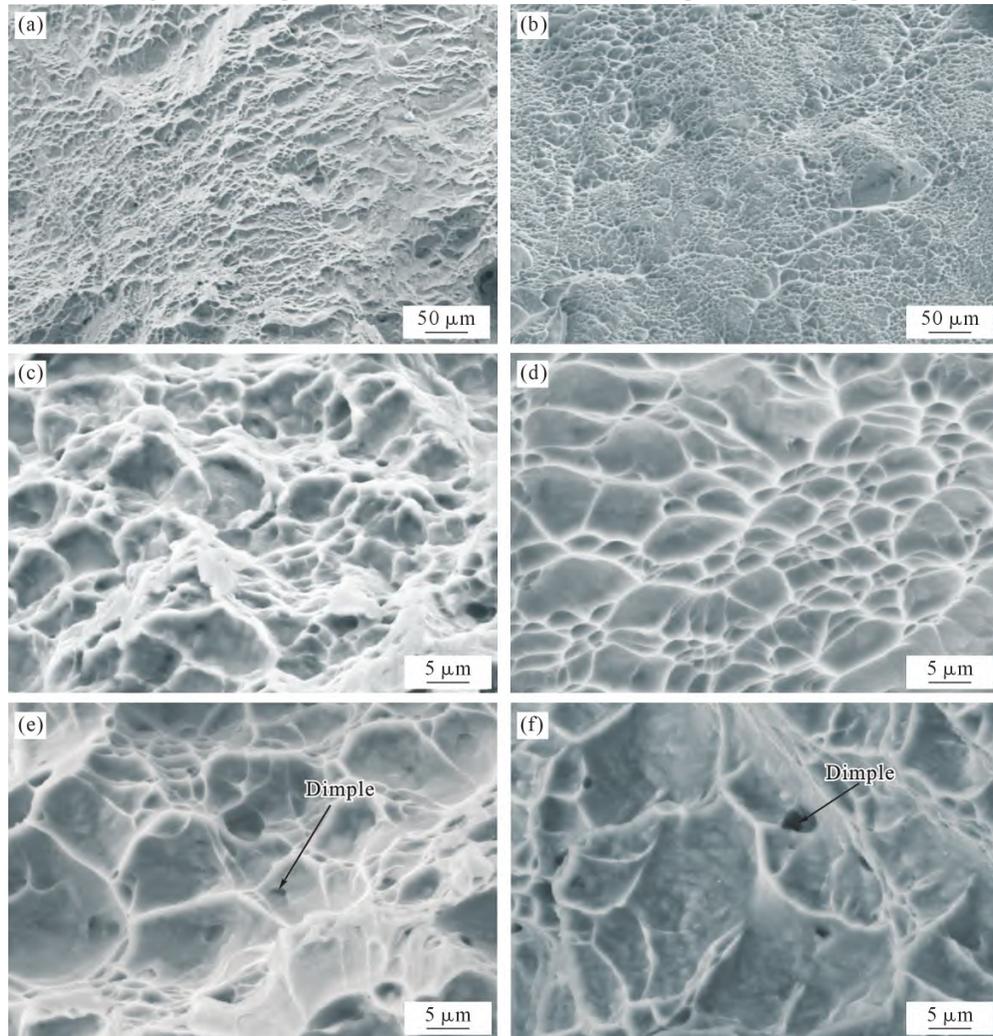


图 10 400 °C 拉伸断口微观组织:(a, c, e) F2 试样;(b, d, f) F3 试样
Fig.10 Microstructure of tensile fracture at 400 °C:(a, c, e) F2 sample;(b, d, f) F3 sample

仅发生了均匀的塑性变形,还伴随有局部剪切滑移行为,断裂机制具有一定的多样性。该类微观特征为深入分析材料在高温环境下的断裂行为提供了重要的实验依据,同时也进一步支持了其在高温工况下具备良好力学性能与结构稳定性的结论。

3 结论

(1)ZTA15合金中Al、Zr、V、Mo等主要合金元素的含量对铸件的高温力学性能具有显著影响。试验结果表明,随着上述元素含量的适当增加,试样的高温抗拉强度和屈服强度均呈现明显提升趋势,表明其对高温性能具有积极的强化作用。4种合金元素含量范围的最优区间取值为:6.5%~6.8%Al;2.2%~2.5%Zr;1.7%~2.0%Mo;2.1%~2.5%V。此区间范围小于GJB 2896A中表1所规定的元素含量范围,满足标准要求。

(2)石墨铸型相较于传统熔模精铸型壳具有更优良的导热性能,能够加快凝固过程中的热量散失,有效细化晶粒组织,从而改善铸件的力学性能与组织均匀性。

(3)针对航空、航天领域中对高温性能要求较高的关键部件,结合铸件结构特点,建议优先采用石墨型铸造工艺。实验数据显示,采用该工艺制备的试样在高温力学性能指标上显著优于相关航空、航天标准的技术要求,具备更高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第4卷 钛合金、铜合金[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
Editorial Committee of China Aeronautical Material Handbook. China aeronautical materials handbook: Titanium alloys, copper alloys[M]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [2] 周彦邦,周士林. 钛合金铸造概论[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
ZHOU Y B, ZHOU S L. Introduction to titanium alloy casting[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [3] 鲍里索娃,著. 钛合金金相学[M]. 陈石脚,译. 北京:国防工业出版社,1986.
БОРИСОВА Е А. Metallography of titanium alloys[M]. CHEN S Q, translate. Beijing: National Defense Industry Press, 1986.
- [4] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
XIE C M. Titanium and titanium alloy casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [5] 李梁,孙健科,孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展,2004(5): 19-24.
LI L, SUN J K, MENG X J. Application state and prospects for titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2004(5): 19-24.
- [6] 张美娟,南海,鞠忠强,高富辉,郝喜望,朱郎平. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报,2016,36(3): 13-19.

- ZHANG M J, NAN H, JU Z Q, GAO F H, QIE X W, ZHU L P. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.
- [7] 黄旭,朱知寿,王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2012: 353.
HUANG X, ZHU Z S, WANG H H. Advanced aeronautical titanium alloys and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 353.
- [8] 周彦邦,甘敬林. 国外钛合金铸造技术的发展[J]. 现代铸造,1981(1): 60-66.
- [9] 王新英,谢成木. 国内外钛合金精密铸造型壳材料的发展概况[J]. 特种铸造及有色合金,2001(3): 40-42.
WANG X Y, XIE C M. Development of shell mold materials for Ti alloy investment casting in domestic and foreign countries[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001(3): 40-42.
- [10] 李俭英. 熔模精密铸造工艺优化及应用研究[J]. 世界有色金属,2023(21): 43-45.
LI J Y. Research on process optimization and application of investment mold precision casting[J]. World Nonferrous Metals, 2023(21): 43-45.
- [11] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报,2014,34(4): 44-50.
ZHU Z S. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.
- [12] 舒群,郭永良,陈子勇,孔凡涛,陈玉勇. 铸造钛合金及其熔炼技术的发展现状[J]. 材料科学与工艺,2004(3): 332-336.
SHU Q, GUO Y L, CHEN Z Y, KONG F T, CHEN Y Y. Development of casting and melting technology of titanium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2004(3): 332-336.
- [13] 石峰,杨国娟,陈冬梅,张健辉,纪志军. 不同温度下ZTA15铸造钛合金的组织 and 性能研究[J]. 铸造工程,2024,48(3): 1-6.
SHI F, YANG G J, CHEN D M, ZHANG J H, JI Z J. Study on microstructures and tensile properties of ZTA15 cast titanium alloy at different temperatures[J]. Foundry Engineering, 2024, 48(3): 1-6.
- [14] 陈红,刘宏宇,苏贵桥,曲玉福,刘时兵,游涛. ZTA15铸造钛合金材料的性能与应用[J]. 铸造,2007(6): 645-647.
CHEN H, LIU H Y, SU G Q, QU Y F, LIU S B, YOU T. Mechanical properties and applicatio of ZTA15 cast titanium alloy materials[J]. Foundry, 2007(6): 645-647.
- [15] 韩云飞,袁兵兵,孙冰,刘义辉,乔海滨,李渤渤. 壁厚和铸造缺陷对ZTA15钛合金组织及性能的影响[J]. 钢铁钒钛,2022,43(6): 84-88.
HAN Y F, YUAN B B, SUN B, LIU Y H, QIAO H B, LI B B. Effects of wall thickness and casting defects on microstructure and properties of ZTA15 titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(6): 84-88.
- [16] 张健辉,纪志军,冯新,陈冬梅,杨国娟. ZTA15铸造钛合金高周疲劳性能研究[J]. 精密成形工程,2022,14(6): 28-35.
ZHANG J H, JI Z J, FENG X, CHEN D M, YANG G J. High-cycle fatigue properties of ZTA15 cast titanium alloy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2022, 14(6): 28-35.
- [17] 赵永庆,陈永楠,张学敏,曾卫东,王磊. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙:中南大学出版社,2012.

- ZHAO Y Q, CHEN Y N, ZHANG X M, ZENG W D, WANG L. Phase transformation and heat treatment of titanium alloys [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
- [18] 贺飞,陈海峰,王玉会. 显微组织对 TA15 合金高温拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2012(2): 13-15, 19.
- HE F, CHEN H F, WANG Y H. Effect of microstructure on high temperature tensile properties of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2): 13-15, 19.
- [19] 隋楠,曹京霞,黄旭,高帆,谭启明. 合金成分对 TA15 钛合金组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 48-54.
- SUI N, CAO J X, HUANG X, GAO F, TAN Q M. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1): 48-54.
- [20] 陈冬梅,黄森森,贺飞,马英杰,雷家峰. Fe 元素对 TA15 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34(2): 14-18.
- CHEN D M, HUANG S S, HE F, MA Y J, LEI J F. Effects of Fe on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2017, 34(2): 14-18.
- [21] 刘高扬,赵文侠,王曦. ZTA15 钛合金铸件异常组织形成及对拉伸行为的影响[J]. 航空材料学报, 2020, 40(4): 45-51.
- LIU G Y, ZHAO W X, WANG X. Abnormal microstructure formation of ZTA15 titanium alloy castings and its influence on tensile behavior[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(4): 45-51.
- [22] 曹京霞,方波,黄旭,李臻熙. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2004(2): 362-364.
- CAO J X, FANG B, HUANG X, LI Z X. Effects of microstructure on properties of TA15 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004(2): 362-364.
- [23] 邹鑫锐. ZTA15 钛合金铸态相成分分布与层片状 α 相厚度预测的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- ZOU X R. Numerical simulation of as-cast phase composition distribution and lamellar α phase thickness prediction in ZTA15 titanium alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [24] 田程,张雪敏,段晓辉,刘宇舟,王少阳. 不同热处理温度对 TA15 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2020(19): 160-161.
- TIAN C, ZHANG X M, DUAN X H, LIU Y Z, WANG S Y. Effects of different heat treatment temperatures on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy [J]. World Non-ferrous Metals, 2020(19): 160-161.
- [25] 孙智,吴国清,纪志军,南海. 薄壁 ZTC4 钛合金铸件表层与心部组织性能分析[J]. 铸造工程, 2022, 46(4): 1-6.
- SUN Z, WU G Q, JI Z J, NAN H. Analysis of surface and central microstructure and properties of a thin-walled ZTC4 titanium alloy casting[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(4): 1-6.
- [26] 周妹. 特殊温度环境下合金金属材料的力学性能研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- ZHOU S. Research on tensile mechanical properties of alloy metal materials at special temperature[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.
- [27] 徐莉,黄东,贾志伟,范世玺. GJB 2896A—2020《钛及钛合金熔模精密铸件规范》解读[J]. 机械工业标准化与质量, 2022(3): 13-17, 24.

(责任编辑:宫文婧)