

精密铸造钛铝系合金特征结构件工艺性能研究

李蕙菊^{1,2} 胡海涛^{2,3} 王湘宁^{1,2} 单彦荣³ 陈玉龙⁴ 左家斌^{2,3} 宗 晓^{2,3} 南海^{1,2} 刘 涵^{1,2} 丁贤飞^{1,2}

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100089; 2. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100089; 3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100089; 4. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610213)

摘 要 研究了型壳预热温度及结构参数对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 及 Ti-22Al-25Nb 合金特征结构元件的充型、收缩率的影响。结果表明, 随着型壳预热温度升高, Ti₂AlNb、TiAl 合金特征结构件充型率呈增大趋势; 钛铝铸件壁厚增加有利于金属液在型壳内流动, 提高铸件的充型率; 当型壳预热温度为 600 °C 时, Ti₂AlNb 合金特征结构件长度方向线收缩率低于 TiAl 合金。采用 600 °C 作为型壳预热温度精密铸造成形较厚的 Ti₂AlNb 合金特征结构元件较为合适, 此温度下既能减少型壳与铸件发生反应, 又可以获得充型率较高且线收缩率较低的铸件。

关键词 钛铝系合金; 预热温度; 铸造性能; 精密铸造

中图分类号 TG146.23; TG249.5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240533

Process and Properties of Characteristic Structural Components of Ti-Al Series Alloy by Investment Casting

LI Huiju^{1,2}, HU Haitao^{2,3}, WANG Xiangning^{1,2}, SHAN Yanrong³, CHEN Yulong⁴, ZUO Jiabin^{2,3},
ZONG Xiao^{2,3}, NAN Hai^{1,2}, LIU Han^{1,2}, DING Xianfei^{1,2}

[1. BAIMTEC Material Co., Ltd., Beijing 100089; 2. Beijing Advanced Titanium Alloy Precision Forming Engineering Technology Research Center, Beijing 100089; 3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100089; 4. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610213]

Abstract: The influence of shell preheating temperature and structural parameters on the filling rate and shrinkage rate of Ti-48Al-2Cr-2Nb and Ti-22Al-25Nb alloy characteristic structural components were investigated. The results indicate that the filling rate of characteristic structural components of Ti₂AlNb and TiAl alloys are increased with the increase of preheating temperature. The increase of wall thickness was conducive to the flow of metal liquid in the shell to improve the filling rate of casting. With the shell preheating temperature of 600 °C, the linear shrinkage rate of characteristic structural components of Ti₂AlNb alloy along lengthwise direction is lower than that of TiAl alloy. It is more suitable to take 600 °C as shell preheating temperature to form thicker Ti₂AlNb alloy characteristic structural components for investment casting, where the reaction between shell and castings can be reduced, and castings with higher filling rate and lower linear shrinkage can be obtained.

Key Words: Titanium-Aluminium Series Alloy, Preheating Temperature, Casting Performance, Investment Casting

钛铝系合金(包括 TiAl 和 Ti₂AlNb 合金)具有较高的高温强度、比强度等特点^[1-4], 可用于制备燃烧室机匣、叶片等航空发动机构件^[5-7], 提高构件可靠性并实现轻量化设计^[8]。精密铸造工艺可实现钛铝系合金复杂构件整体精确成形, 是实现高性能航空发动机热端部件耐高温、减重和整体化成形的重要技术途径。尽管在精密铸造应用研究方面国内已获得一定的进展, 但

目前仍缺乏合金应用设计及工艺基础性数据^[9-10], 因此亟需对钛铝系合金精铸成形工艺进行应用基础研究, 以满足高性能航空发动机重要构件耐高温及轻量化的设计应用需求。

TiAl 和 Ti₂AlNb 合金是典型的钛铝系金属间化合物合金, 具有熔体流动性差、铸造收缩率大等特点, 且熔体活性强, 精密铸造过程中易与型壳发生反应, 复杂

收稿日期: 2024-11-12; 修订日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52371015); 国家科技重大专项资助项目(J2019-VI-0003-0116)

第一作者简介: 李蕙菊, 女, 1997 年出生, 助理工程师, E-mail: lhj18810001958@163.com

通信作者: 丁贤飞, 男, 1980 年出生, 高级工程师, E-mail: xianfei.ding@biam.ac.cn

引用格式: 李蕙菊, 胡海涛, 王湘宁, 等. 精密铸造钛铝系合金特征结构件工艺性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 057-1 063.

LI H J, HU H T, WANG X N, et al. Process and properties of characteristic structural components of Ti-Al series alloy by investment casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 057-1 063.

结构件精密铸造成形工艺难度大。Ti-22Al-25Nb 合金是 Ti₂AlNb 合金的典型代表,熔点约为 1 740 ℃,凝固区间较宽,室温强度为 900~1 400 MPa,室温塑性区间为 2%~10%,长期使用温度为 600~650 ℃,密度为 5.2 g/cm³,兼具镍基高温合金耐高温和钛合金轻质特点^[11],主要应用于先进航空发动机机匣、涡轮盘和先进航天飞行器舱体等^[12]耐高温结构材料。Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金是 TiAl 合金的典型代表,熔点约为 1 480 ℃,凝固区间较窄,室温强度为 400~700 MPa,室温塑性较低^[13],难以进行高精度的机械加工^[14],长时使用温度为 650~750 ℃,密度约为 3.9 g/cm³,主要应用于先进航空发动机涡轮叶片以及燃烧室结构件等。受 Ti₂AlNb 和 TiAl 合金的铸造性能和合金特性的影响,该类合金大尺寸复杂结构铸件在特定的结构部位经常出现缩松、气孔、缩孔、裂纹等缺陷。

铸件的结构及铸造工艺参数是钛铝系合金铸造缺陷形成的重要影响因素,通过改变铸件局部厚度和预热温度等参数,是实现钛铝系合金复杂结构件精密铸造成型的常用手段。增加铸件厚度有助于减小凝固收缩速度从而减少热裂^[15]。升高型壳预热温度能提高金

属液流动性^[16]和铸件的充型率,预热温度改变也会影响铸件的冷却速率,进而影响缺陷分布。当预热温度较高时冷却速率降低,铸件内的气孔主要分布于表面,而预热温度较低时则主要分布于铸件中心线处^[17]。以往研究主要针对不同工艺条件下一典型结构件缺陷形成规律,缺少铸造工艺条件对不同结构件铸造成形缺陷影响规律的系统研究,仍不能满足集成多种结构特征的钛铝系合金复杂结构件精密铸造工艺优化的需要。

本研究选择不同结构特征元件为对象,采用熔模精密铸造底注式重力铸造浇注,在 400、600 和 800 ℃下进行型壳预热,分别研究了型壳预热温度对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 和 Ti-22Al-25Nb 合金特征结构元件的充型率、收缩率的影响,旨在为精密铸造钛铝系合金复杂结构铸件成形工艺提供参考。

1 试验材料与方法

采用 Ti-48Al-2Cr-2Nb 及 Ti-22Al-25Nb 合金进行重力浇注,钛铝系合金具体成分见表 1,具体合金特点与 Ti₂AlNb 合金对比见表 2。

表 1 Ti₂AlNb 和 TiAl 合金铸锭化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti₂AlNb and TiAl alloy ingot

名称	w _B										%
	Al	Cr	Nb	Fe	Si	C	O	N	H	Ti	
TiAl	32.62	2.50	4.82	0.02	0.02	0.006	0.073	0.004	0.000 8	余量	
Ti ₂ AlNb	9.92	—	42.38	0.06	<0.08	0.028	0.064	0.031	<0.001	余量	

表 2 Ti₂AlNb 和 TiAl 合金对比

Tab.2 Comparison of Ti₂AlNb and TiAl alloy

合金名称	熔点/℃	密度/(g·cm ⁻³)	室温强度/MPa
Ti-48Al-2Cr-2Nb	1 480	3.9	400~700
Ti-22Al-25Nb	1 740	5.2	900~1 400

根据航空发动机燃烧室机匣等复杂结构件不同部位结构特征和精密铸造缺陷产生特点,提取复杂结构件的典型结构特征,针对尺寸渐变、厚度突变、过渡处、易产生缺陷、热节等特征位置,设计并划分 8 种不同的特征结构组成特征结构元件,以用于研究不同铸造工艺参数条件下不同结构元件铸造工艺特性和铸造缺陷产生的倾向性。本研究将复杂结构简化为包含板(P_l)、变截面(V_a)、尖角(C_o)、孔(H_o)、过渡弧(T_r)、筋(F_o)、曲面(C_u)、环(R_i)共 8 种特征结构元件,见图 1^[18],具体尺寸见表 3^[18]。采用以上 8 种特征结构元件充型率结果和收缩率结果进行分析,建立不同工艺条件下充型率、收缩率、裂纹等规律与结构参数的耦合关系,通过 Pro-CAST 软件对重力底注 Ti₂AlNb 合金不同结构参数的环形件进行残余应力模拟试验。

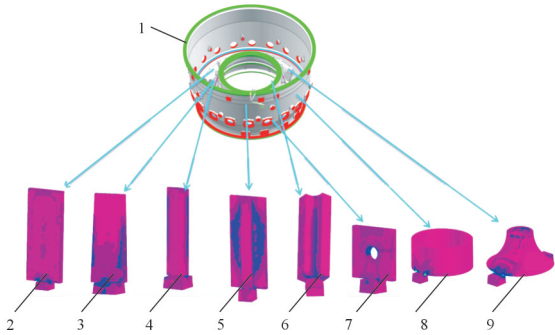


图 1 钛铝构件提取特征结构元件^[18]

Fig.1 Extraction feature structural elements of Ti-Al component^[18]

1. 钛铝铸件 2. 板 P_l 3. 变截面 V_a 4. 尖角 C_o 5. 筋 F_o 6. 过渡弧 T_r 7. 孔 H_o 8. 环 R_i 9. 曲面 C_u

选取 TiAl 合金不同工艺参数的特征结构件长度方向及厚度方向的 3 点数值作为测量值,计算其铸件平均值后与光敏树脂蜡模值求差,将差值与蜡模值之比定为线收缩率;将充型高度与蜡模值之比定为充型率。调控型壳预热温度对特征结构元件进行浇注试验,统计并分析不同铸造工艺参数特征结构元件的充填高度、充型率、收缩率等铸造性能,建立型壳预热温度铸

表 3 典型结构特征参数^[18]

Tab.3 Typical structural characteristic parameters^[18]

类型	名称	长度/mm	高度/mm	特征结构厚度/mm	孔径/mm	类型	名称	长度/mm	高度/mm	特征结构厚度/mm
板 P ₁	P ₁ 2	40	120	2	/	变截面 V _a	V _a 6	20	80	6
	P ₁ 4			4	/		V _a 8			8
	P ₁ 6			6	/		V _a 10			10
尖角 C _o	C _o 30	20	80	4	/	筋 F _o	F _o 2	40	80	2
	C _o 60				/		F _o 4			4
	C _o 90				/		F _o 6			6
过渡弧 T _r	T _r 2	40	80	/	/	环	R _i 2	/	40	2
	T _r 4				/		R _i 4			4
	T _r 6				/		R _i 6			6
孔 H _o	H _o 1005	40	40	5	10	曲面	C _u 30	/	40	顶 30
	H _o 1505			5	15		C _u 40			顶 40
	H _o 1010			10	10		C _u 50			顶 50
	H _o 1510			10	15					

造工艺参数与充型完整性的关系,进而提出可提高 TiAl 及 Ti₂AlNb 合金熔体充型完整性并降低收缩率的铸造工艺。

为研究不同工艺参数对 TiAl 及 Ti₂AlNb 合金特征结构元件铸造性能的影响,采用 TiAl 及 Ti₂AlNb 合金铸锭进行浇注制备特征结构元件。采用底注式重力铸造浇注系统,选择 400、600 和 800 ℃作为型壳预热温度。

图 2 为 TiAl 及 Ti₂AlNb 合金特征结构元件精密铸造流程图,采用聚苯乙烯粉进行 3D 打印制备光敏树

脂特征结构元件蜡模,连接七分流通道进行蜡模组模,组模后的蜡模用蜡模清洗剂及丁酮清洗后静置空冷。采用醋酸锆作为粘接剂、氧化钇作为骨粉,对蜡模进行面层及邻面层涂料涂刷。采用硅酸乙酯及莫来石作为黏结剂及骨粉制备型壳的背层,沾浆后的型壳放置风干。型壳进行电脱蜡后置于焙烧炉中进行焙烧,浇注前需对型壳进行清洗,将型壳放置于预热炉内进行预热,采用 10 kg 凝壳炉进行浇注,对不同工艺参数的试样对比分析铸造性能。



图 2 TiAl 及 Ti₂AlNb 合金特征结构元件精密铸造

Fig.2 Investment casting of TiAl and Ti₂AlNb alloy characteristic structural components

2 试验结果与分析

2.1 型壳预热温度对钛铝系合金铸件充型率的影响

表 4 为 TiAl 合金采用不同型壳预热温度重力浇注板型结构件的充型率,图 3 为不同型壳预热温度下变截面等特征结构件的充型率。可以看出,随型壳预热温度升高,厚度为 4 mm 板形件、筋形件的充型率增大较

为明显;在型壳预热温度由 400 ℃升至 600 ℃时,F_o4 铸件充型率有较为明显的变化。由图 3 可知,在型壳预热温度为 800 ℃时基本可以实现各特征结构件完整充型,提高型壳预热温度提高了合金流动性,此时充型率基本可以达到 97.5% 以上,更适合类似 TiAl 合金这种流动性差的金属进行浇注充型。当特征结构件壁厚增加时,TiAl 合金浇注的结构件充型高度基本呈增大趋势,变截

表 4 不同预热温度下 TiAl 合金板型结构件的充型率
Tab.4 Filling rate of TiAl alloy plate component at different pre-heating temperatures

型壳预热温度/℃	板形件厚度/mm	充型率/%
400	2	33.69
800	2	45.58
400	4	88.30
600	4	94.58
800	4	98.41
600	6	98.18
800	6	98.18

面从上至下发生顺序凝固,成形质量优于板形件。板形件厚度达到 6 mm 时,高预热温度对充型率不敏感。

图 4 为采用不同型壳预热温度重力底注 Ti₂AlNb 合金的部分铸件,仅展示孔形件及变截面铸件。依据全部实际铸件测量分析充型高度,相关数据见图 5。可以看出,随着型壳预热温度升高,如筋、变截面等铸件厚度增大时,特征结构件的充型率逐渐增大至 99% 以上,基本实现完整充型,而尖角等一些结构件则在 600 ℃ 时充型率最高。

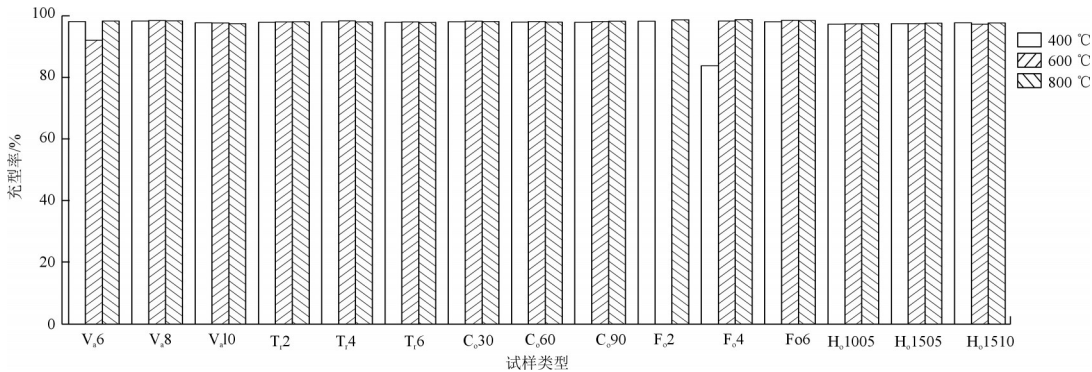


图 3 不同预热温度下 TiAl 合金变截面、尖角、筋、过渡弧、孔型结构件的充型率

Fig.3 Filling rate of variable section, sharp angle, bar, transition arc and hole-type structural components of TiAl alloy at different pre-heating temperatures

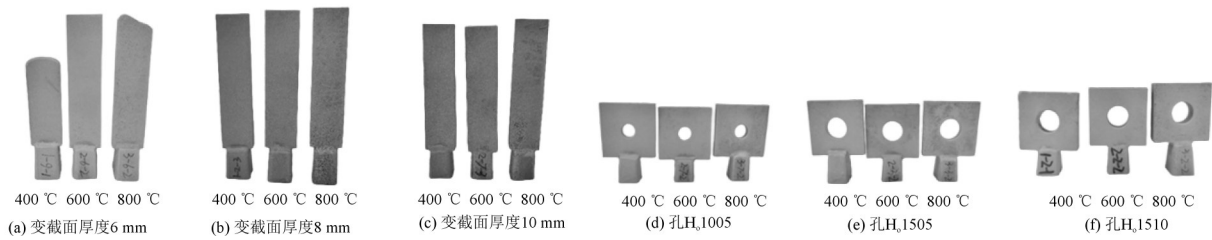


图 4 不同型壳预热温度重力底注变截面及孔铸件

Fig.4 Variable sections and hole casting by gravity bottom injection at different shell preheating temperatures

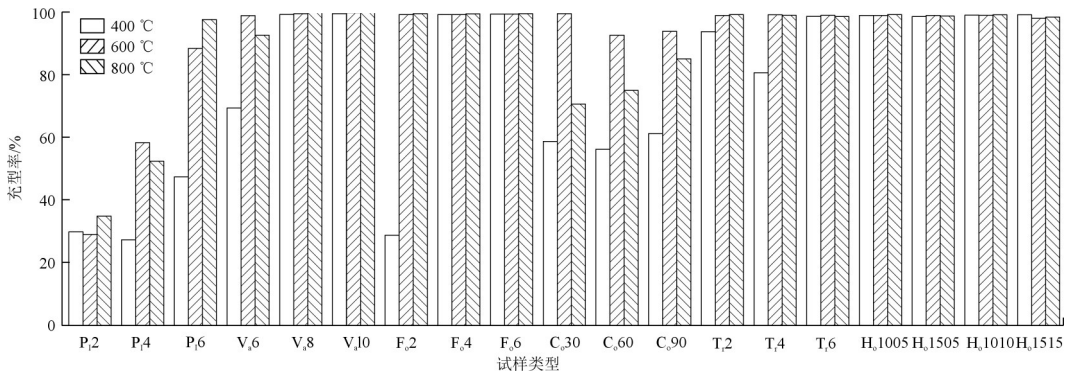


图 5 不同型壳预热温度 Ti₂AlNb 合金各特征结构件充型率

Fig.5 Filling rate of characteristic structural components of Ti₂AlNb alloy at different shell preheating temperatures

随着板厚增加,板形件的充型高度整体呈增大趋势,这是因为当板形件的板厚较薄时浇注冷却速度较快,金属液来不及充分流动就发生凝固,所以充型高度较低;当壁厚增加时,沿厚度方向铸件的温度梯度减小,有利于金属液在型壳内的流动,从而提高铸件的充

型率。但是当型壳预热温度升高至 800 ℃ 时,铸件容易与型壳发生反应,导致内部形成大量缩松及气孔等缺陷。所以从充型率上看,600 ℃ 作为型壳预热温度生产较厚的特征结构元件较为合适,此温度下既能减少型壳与铸件发生反应,又可以获得充型率较高的铸件。

随型壳预热温度升高,底注式重力浇注 TiAl 合金板形件的充型率增大较为明显。当特征结构件壁厚增加时, TiAl 合金浇注的结构件充型高度基本呈增大趋势,变截面成形质量优于板形件。采用底注式重力铸造浇注系统,升高型壳预热温度, Ti_2AlNb 合金筋形件、过渡弧等特征结构件充型率增大;采用 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为型壳预热温度生产较厚的 Ti_2AlNb 合金特征结构元件较为合适,此温度下既能减缓型壳与铸件发生反应,又可以获得充型率较高且线收缩率较低的铸件。

对比两种不同的钛铝系合金充型率数据,可以发现, TiAl 合金板形件、角铸件充型率优于 Ti_2AlNb 合金铸件,当型壳预热温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时充型率相差较大;但预热温度升至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Ti_2AlNb 合金铸件充型率有明

显提升,基本与 TiAl 合金铸件充型率相差不大。此外, Ti_2AlNb 合金变截面、筋形件、孔铸件在不同工艺参数下充型率基本都优于 TiAl 合金。

2.2 型壳预热温度对钛铝系合金铸件收缩率的影响

各结构件的线收缩率见图 6。可以看出,采用型壳预热温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,尖角 C₆₀ 及过渡弧 T₄ 铸件欠注,在长度方向上的线收缩率较高;当型壳预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,各特征结构件线收缩率基本低于 3% 。图 7 为 TiAl 合金在厚度方向不同结构件的收缩率。可以看出,厚度方向上的线收缩率在型壳预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最低,此时特征结构件的尺寸精确度基本优于其他两种温度。

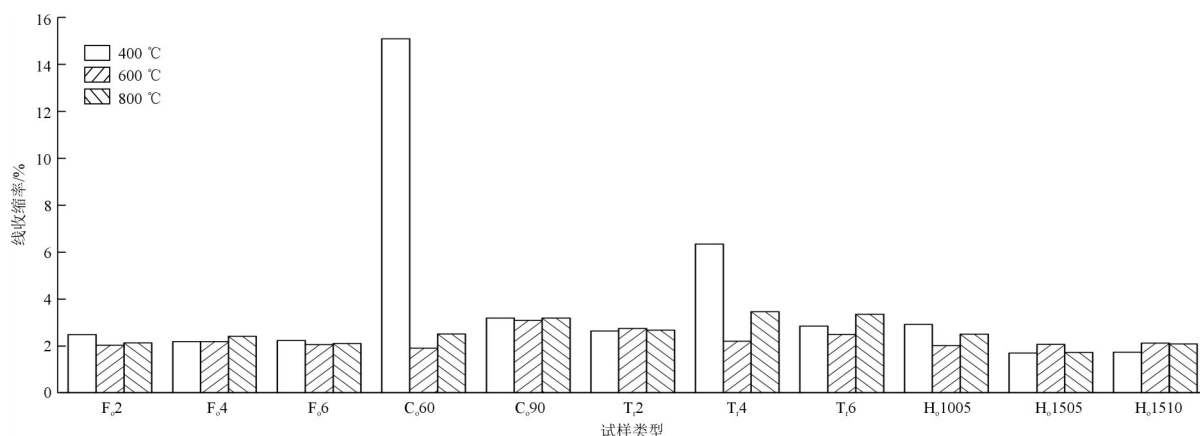


图 6 TiAl 合金长度方向上各结构件的收缩率

Fig.6 Shrinkage rate of each structural part of TiAl alloy in the length direction

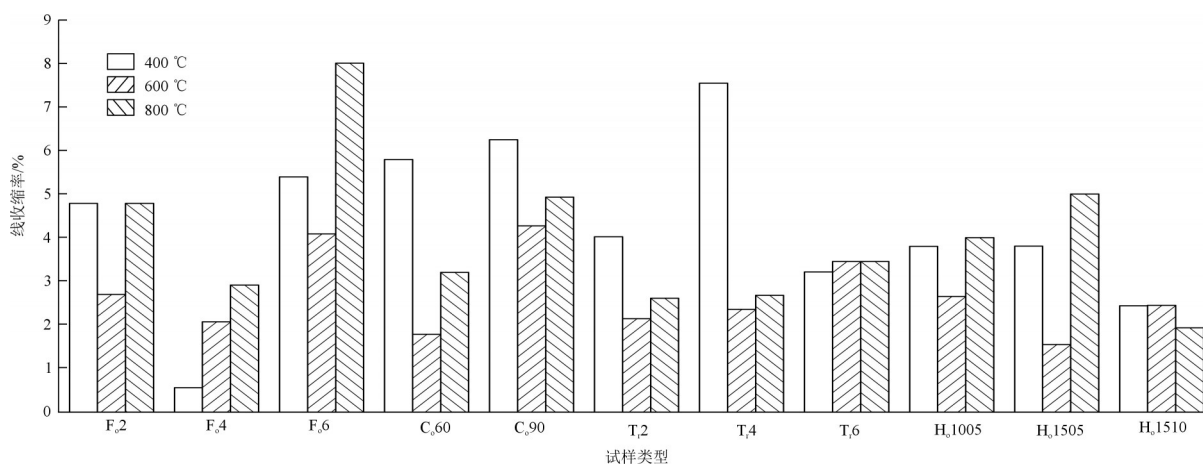
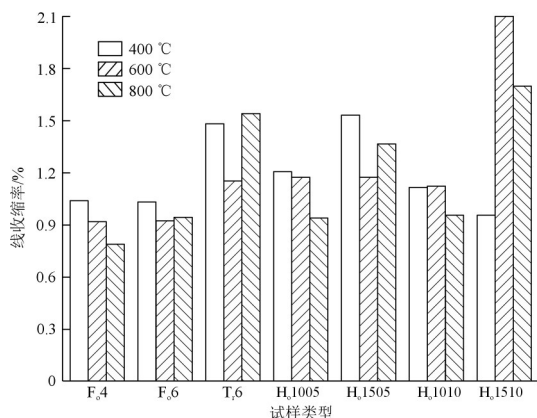
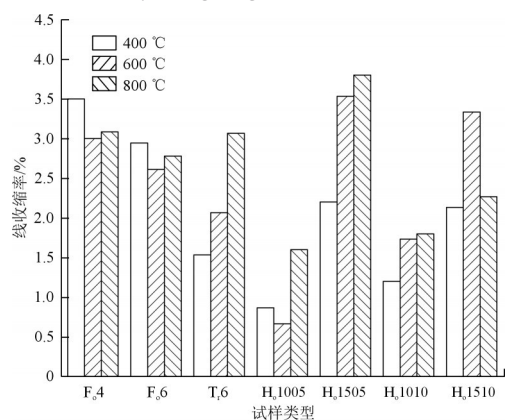


图 7 TiAl 合金厚度方向上各结构件的收缩率

Fig.7 Shrinkage rate of each structural part of TiAl alloy in the thickness direction

图 8 为 Ti_2AlNb 合金长度方向上各结构件的收缩率。可以看出,采用型壳预热温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,厚度为 4 mm 和 6 mm 的筋形件及过渡弧 T₆ 等尺寸较厚的铸件,在长度方向上线收缩率较高,与建模尺寸数据偏差较大;当型壳预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大部分特征结构件在长度方向上线收缩率基本低于 1.5% , Ti_2AlNb 合金

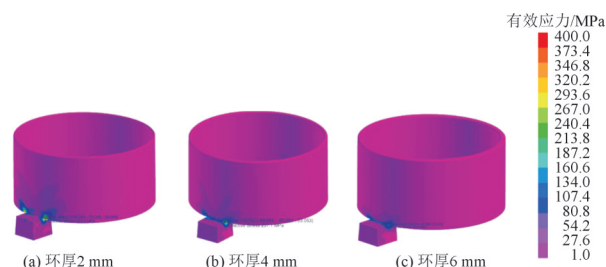
铸件的线收缩率整体低于 TiAl 合金铸件,几何尺寸对 Ti_2AlNb 合金长度方向的收缩率影响较小^[19]。图 9 为 Ti_2AlNb 合金厚度方向上各结构件的线收缩率。可以看出,厚度方向上的筋形件线收缩率在型壳预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最低,厚度方向整体线收缩率高于长度方向,约为 2.3% 。

图8 Ti_2AlNb 合金长度方向上各结构件的收缩率Fig.8 Shrinkage rate of each structural component of Ti_2AlNb alloy along lengthwise direction图9 Ti_2AlNb 合金厚度方向上各结构件的收缩率Fig.9 Shrinkage rate of each structural component of Ti_2AlNb alloy along thickness direction

2.3 不同合金对特征结构件裂纹缺陷影响

采用ProCAST软件对重力底注 Ti_2AlNb 合金环形件进行残余应力模拟试验,型壳预热温度设定为600 °C,见图10。选择其应力集中区域进行取点分析,可见2、4和6 mm厚环形件残余应力分别为422.0、

237.1和144.8 MPa,表明随着特征结构环形件的厚度增大,其残余应力呈下降的趋势。特征结构环形件的厚度为6 mm时,其残余应力值最小;当环形件的厚度为2 mm和4 mm时,其与浇口相接的拐角区域残余应力值较大,此处易发生应力集中,导致后期发生断裂,应注意此连接区域的应力分布。

图10 600 °C下重力底注 Ti_2AlNb 环形件残余应力模拟Fig.10 Residual stress simulation of Ti_2AlNb ring component with gravity bottom injection at 600 °C

选择型壳预热温度为600 °C,采用重力浇注的环形件分析其断裂形貌,见图11。从图11a和图11b可知, TiAl 环形件与浇口连接处存在裂纹,环形件整体的等效应力大于其他结构件,同时环形件与浇口拐角区域应力集中^[20],容易在此处产生裂纹并扩展最终断裂^[21],优化型壳退让性可以改善 TiAl 合金环形件成型质量^[22]。从图11c和图11d可知, Ti_2AlNb 环形件基本实现完整成形。

增大环厚时环内的冷却速度降低,更有利于金属液流动填充,同时及时进行铸件的补缩以减少铸件内部缺陷。另外,提高型壳预热温度也有利于铸件补缩^[23]。 TiAl 合金与 Ti_2AlNb 合金流动性均差,但 Ti_2AlNb 合金环形件的收缩率略低于 TiAl 合金,采用相同工艺参数进行浇注, TiAl 合金环形件更容易产生裂纹缺陷。

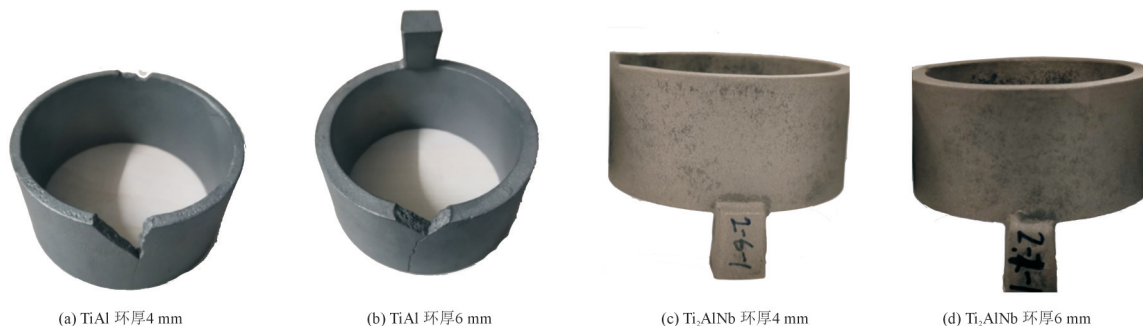


图11 型壳预热温度为600 °C的重力浇注环形件

Fig.11 Gravity casting ring components with shell preheating temperature of 600 °C

3 结 论

(1)在型壳预热温度为800 °C时基本可以实现 TiAl

合金板形件完整充型,充型率基本可达到97.5%以上;当特征结构件壁厚增加时, TiAl 合金变截面从上至下发生顺序凝固,成形质量优于板形件。

(2)当型壳预热温度为600℃时,Ti₂AlNb合金特征结构件在长度方向上线收缩率基本低于TiAl合金铸件,采用此温度预热制备较厚的Ti₂AlNb合金特征结构元件较为合适,既能减少型壳与铸件发生反应,又可以获得充型率较高且线收缩率较低的铸件。

(3)当特征结构件壁厚增加时,沿厚度方向铸件的温度梯度减小,有利于金属液在型壳内的流动,从而提高铸件的充型率。TiAl合金结构件充型高度基本呈增大趋势,Ti₂AlNb合金板形件和筋形件的充型率整体呈增大趋势。

(4)模拟结果显示铸件与浇口连接处易发生应力集中,实际浇注后在此处易产生裂纹扩展断裂,TiAl合金环形件更容易产生裂纹缺陷,Ti₂AlNb合金环形件整体成形优于TiAl合金。

参 考 文 献

- [1] 邵珠彩.Ti₂AlNb合金变形工艺参数优化及环件轧制模拟研究[D].太原:太原科技大学,2021.
- [2] 刘石双,曹京霞,周毅,等.Ti₂AlNb合金研究与展望[J].中国有色金属学报,2021,31(11): 3 106-3 126.
- [3] 王春月.Ti₂AlNb合金与Ti基复合材料扩散连接工艺与机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [4] OZGE G, RAHMI U. Development of gamma titanium aluminide (γ -TiAl) alloys: A review[J].Journal of Alloys and Compounds, 2022, 929:167 262.
- [5] 焦欣洋.高孔隙率多孔TiAl₃金属间化合物的形成机制、组织结构与性能研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2021.
- [6] LARSEN D E. Status of investment cast gamma titanium aluminides in the USA[J].Materials Science & Engineering, 1996, A213(1-2): 128-133.
- [7] 王孟光,孙建科,陈志强.TiAl基合金的熔炼与铸造成形工艺研究现状[J].钛工业进展,2010,27(4): 1-4.
- [8] 周金朝.Ti₂AlNb基合金闭塞式旋转梯度挤压工艺数值模拟研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.
- [9] 沈军,冯艾寒.Ti₂AlNb基合金微观组织调制及热成形研究进展[J].金属学报,2013,49(11): 1 286-1 294.
- [10] 高国富,浮宗霞,王毅,等.Ti-Al系金属间化合物精密加工研究进展[J].稀有金属材料与工程,2021,50(5): 1 867-1 882.
- [11] KOTHARI K, RADHAKRISHNAN R, WERELEY M N. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques[J].Progress in Aerospace Sciences, 2012, 55: 1-16.
- [12] 王子特,郑功,祁志祥,等.TiAl合金结构、组织、性能与应用[J].科学通报,2023,68(25): 3 259-3 274.
- [13] 邹芹,关勇,李艳国,等.TiAl合金及其复合材料的研究进展与发展趋势[J].燕山大学学报,2020,44(2): 95-107.
- [14] 杨亮.铸造高Nb-TiAl合金成分优化及其精密铸造工艺研究[D].北京:北京科技大学,2016.
- [15] 万元彬.TiAl基合金熔模铸造缺陷的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工

业大学,2009.

- [16] SUNG S Y, KIM Y J. Modeling of titanium aluminides turbo-charger casting[J].Intermetallics, 2006, 15(4): 468-474.
- [17] RISHEL L L, BIERY N E, RABAN R, et al. Cast structure and property variability in gamma titanium aluminides[J].Intermetallics, 1998, 6(7): 629-636.
- [18] 张扬晟,胡海涛,左家斌,等.TiAl基合金铸件特征结构及型壳固液比对铸造缺陷影响[J].精密成形工程,2022,14(11): 170-183.
- [19] 刘金虎,丁贤飞,冯新,等.基于正交试验的铸造高Nb-TiAl合金收缩率研究[J].航空制造技术,2019,62(21): 72-78.
- [20] 王宝兵.TiAl合金精密铸造工艺对其组织和性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [21] 胡志力,张嘉恒,华林.TiAl合金热成形技术研究现状与展望[J].材料工程,1-22.
- [22] 周浩.精密铸造TiAl基合金薄壁铸件用型壳退让性的研究[J].铸造,2013,62(8): 781-783.
- [23] 胡海涛,张熹雯,朱春雷,等.工艺参数对离心铸造TiAl合金杆形件缩孔缺陷影响的数值模拟[J].铸造,2018,67(9): 799-804,809.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

