

不同离心浇注方式对 TiAl 合金涡轮成型的影响

胡海涛^{1,2,3} 左家斌^{1,2,3} 黄 东^{1,2,3} 丁贤飞^{1,2,3} 南 海^{1,2,3}
(1.中国航发北京航空材料研究院铸造钛合金技术中心; 2.北京市先进钛合金精密成型
工程技术研究中心; 3.北京航空材料研究院有限公司)

摘 要 基于 ProCAST 软件研究了离心浇注方式对 TiAl 合金涡轮成型的影响,并根据熔体充型特征和充型温度,对顶注、侧注和底注式离心铸造 TiAl 合金涡轮的成形过程进行了分析。结果表明,离心顶注由于熔体充型稳定性较好,气体可全部排出涡轮型腔,充型过程温度下降较小,最有利于 TiAl 合金涡轮成形。离心侧注熔体充型稳定性较好,但由于气体被排至不易开排气孔的叶片尖端,且最后充型位置熔体温度较低,不同叶片间熔体充型温度相差较大,不利于 TiAl 合金涡轮成形。离心底注由于熔体充型稳定性最好、气体被排至易于开排气孔的涡轮顶端,且不同叶片间熔体充型温度较低但相差较小,在更高浇注温度或型壳预热温度条件下适合于 TiAl 合金涡轮成形。最终,采用顶注式离心铸造进行实际浇注试验,获得了完整成形的 TiAl 合金涡轮。

关键词 TiAl 合金; 涡轮; 离心铸造; 数值模拟

中图分类号 TG244⁺.2; TG249.4; TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Different Centrifugal Casting Methods on TiAl Alloy Turbocharger Forming

Hu Haitao^{1,2,3}, Zuo Jiabin^{1,2,3}, Huang Dong^{1,2,3}, Ding Xianfei^{1,2,3}, Nan Hai^{1,2,3}
(1.Cast Titanium Alloy Research and Development Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials;
2.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology;
3.Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd.)

Abstract: Numerical simulation was utilized to investigate the influence of different centrifugal casting methods on TiAl alloy turbocharger forming, and the formation of TiAl alloy turbocharger with centrifugal top injection, centrifugal side injection and centrifugal bottom injection was analyzed according to the melt filling characteristics and melt filling temperature. The results indicate that centrifugal top injection has a better melt filling stability, and gas is discharged completely from the turbocharger cavity, and temperature decrease is less during filling, which is the most conducive to the formation of TiAl alloy turbocharger. The melt filling stability of centrifugal side injection also has a better melt filling stability, however, the gas is vented to the tip of the blade where the vent is difficult to open, meanwhile the melt temperature is lower at the last filling position, and the melt filling temperature difference between different blades is high, which is not conducive to TiAl alloy turbocharger formation. The centrifugal bottom injection has desirable melt filling stability, and the gas is discharged to the top of the turbocharger where the vent is easy to open, and the melt filling temperature is lower while the temperature difference between different blades is slight, which is suitable for TiAl alloy turbocharger formation under higher pouring temperature or shell preheating temperature. Well-formed TiAl alloy turbochargers were manufactured by actual casting test with centrifugal top injection.

Key Words: TiAl Alloy, Turbocharger, Centrifugal Casting, Numerical Simulation

采用 TiAl 合金制备车用发动机增压器涡轮,可以显著提高发动机的性能,且节能、减排效果明显,对提升车用发动机技术具有重要意义^[1,2]。精密铸造具有近净成形、成本低、可批量化等特点,适合于难变形合金复杂构件成形,是 TiAl 合金涡轮主要的成形工艺。

由于 TiAl 合金具有熔体流动性差^[3]、静压头小^[4]等特点,且涡轮叶片为异形薄壁曲面复杂结构,采用常规重力铸造,难以实现 TiAl 合金涡轮完整成形^[5]。为

收稿日期:2021-11-17;修改稿收到日期:2021-12-17
第一作者简介:胡海涛,男,1989 年出生,工程师,北京(100095),E-mail:huhaitaotial@163.com
通信作者:丁贤飞,男,1980 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:24908633@qq.com
引用格式:胡海涛,左家斌,黄东,等.不同离心浇注方式对 TiAl 合金涡轮成型的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(7):797-804.
HU H T, ZUO J B, HUANG D, et al. Effects of different centrifugal casting methods on TiAl alloy turbocharger forming[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):797-804.

此,大同特殊钢公司开发了一种 LEVICAST 工艺,采用真空反重力铸造方法制备出直径为 53 mm 的 TiAl 合金涡轮^[6]。真空吸铸熔体充型平稳性显著优于重力铸造和离心铸造,是 TiAl 合金涡轮较理想的成形工艺^[7]。但由于要求高的差压和充型速率,真空反重力铸造和真空吸铸工艺并不适用于铸造更大尺寸的 TiAl 合金涡轮。离心铸造以其能够大幅提高熔体充型能力而成为 TiAl 合金涡轮重要的成形工艺之一。按照熔体进入铸件的方向与离心力方向的关系,借鉴重力铸造顶注、侧注和底注的定义,将熔体进入铸件的方向与离心力方向一致的方式称为离心顶注,将熔体进入铸件的方向与离心力方向垂直的方式称为离心侧注,将熔体进入铸件的方向与离心力方向相反的方式称为离心底注。由于在离心铸造过程中,熔体具有正向快速充填和反向压力充填的特点,而涡轮为由薄壁叶片和厚大轮毂组成的轴对称结构,离心铸造对 TiAl 合金涡轮成形特征影响显著。因此,为实现较大尺寸 TiAl 合金涡轮的铸造成形,研究离心浇注方式对 TiAl 合金涡轮成形的影响十分必要。

本课题基于 ProCAST 软件,对顶注、侧注和底注浇注方式对 TiAl 合金涡轮的离心铸造过程进行计算。

通过评价熔体在涡轮中的流动特征和充型温度,分析 3 种浇注方式对 TiAl 合金涡轮成形的影响,并进行了实际生产验证,旨在为 TiAl 合金涡轮的生产提供参考。

1 试验方法

采用 Pro/E 软件建立涡轮浇注系统三维模型,见图 1。涡轮外径为 140 mm,高为 90 mm,排气边叶尖厚为 0.8 mm,3 种浇注系统轮廓直径均为 500 mm,中心浇道均为 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,横浇道直径均为 60 mm,顶注、侧注、底注横浇道长分别为 100、160、380 mm。将三维模型导入 ProCAST 中划分网格并进行前处理,由 ProCAST 系统数据库、实际测量及有关文献^[7~11]获得的 TiAl 合金及 Y_2O_3 型壳的主要热物性参数见表 1。采用的铸造工艺参数:浇注温度为 1 600 $^{\circ}\text{C}$,型壳预热温度为 600 $^{\circ}\text{C}$,离心转速为 300 r/min,计算时,型壳沿浇道中心轴线顺时针方向旋转。考虑到离心旋转具有方向性,涡轮或横浇道不同的放置方位也会对熔体充型特征产生影响,因此,对于离心侧注方式,以正视图视角,涡轮又分为上、下、前、后 4 种放置方位。对于底注方式,以俯视图视角,横浇道又分为顺时针、逆时针 2 种放置方位。对于计算结果,通过描述熔体在涡轮

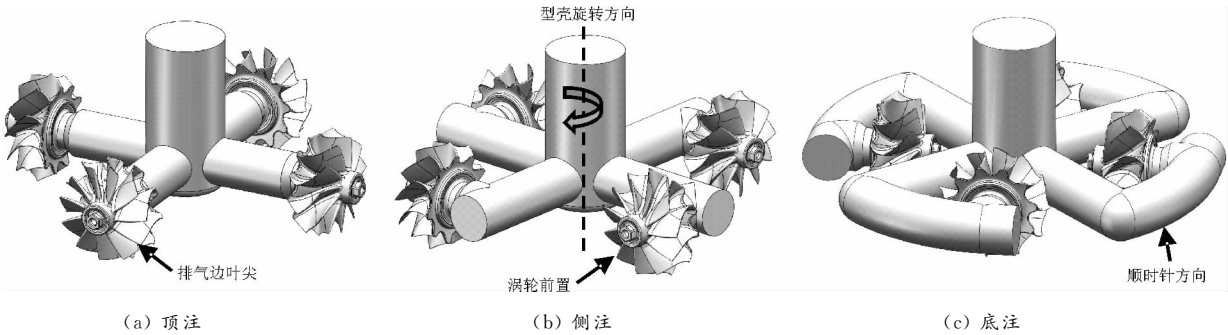


图 1 涡轮 3 种浇注方式浇注系统三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of gating system for turbocharge by different pouring methods

表 1 TiAl 合金及 Y_2O_3 型壳的主要热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of TiAl alloy and yttrium oxide shell							
材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	潜热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝固区间/ $^{\circ}\text{C}$	粘度/ ($\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	界面传热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
TiAl 合金	3 450~3 872	15~28 ^[8]	0.61~0.78 ^[8]	400 ^[8]	1 468~1 523	4.2~5.4 ^[10]	1 500 ^[11]
Y_2O_3 型壳	4 200 ^[7]	2.1~2.4 ^[9]	0.7~1.0 ^[9]	—	—	—	—

中的流动特征以及统计熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处的温度,分析顶注、4 种方位侧注和 2 种方位底注方式对 TiAl 合金涡轮成形的影响。

2 试验结果与分析

2.1 TiAl 合金涡轮顶注充型特征

TiAl 合金涡轮顶注充型温度场见图 2。可以看出,

TiAl 合金熔体进入涡轮型腔后首先充填位于迎流面的叶片,依次流经轮毂、进气边和排气边,随后到达涡轮顶端。熔体充满涡轮顶端后,以反向压力充填方式继续充填涡轮叶片和心部,此时熔体呈近平面状态,直至完成充型。对于顶注方式,TiAl 合金涡轮整体充填稳定性较好,且涡轮型腔中的气体可以有序排出至横浇道中,从而减小熔体的充填阻力,有利于涡轮完整成形。

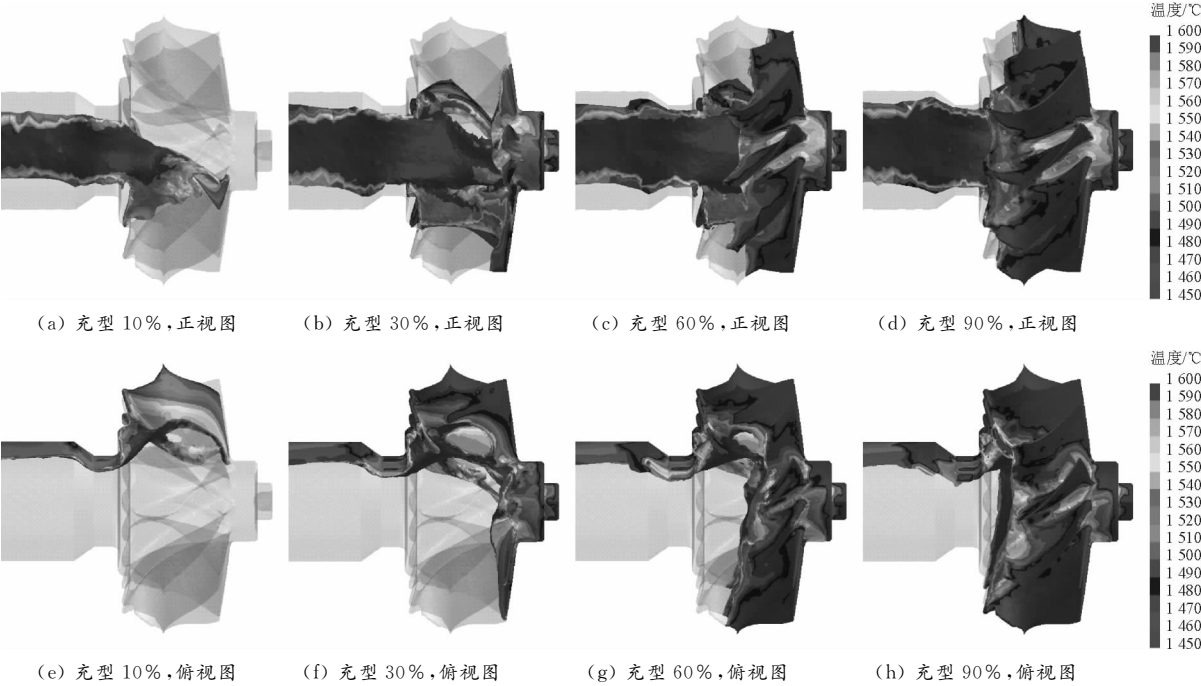


图2 离心顶注 TiAl 合金涡轮充型温度场

Fig.2 Filling temperature field of TiAl turbocharge castings with centrifugal top injection

2.2 TiAl 合金涡轮侧注充型特征

侧注涡轮前置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场见图 3。可以看出,TiAl 合金熔体沿迎流面正向充填至横浇道远端后,以反向压力充填方式充填横浇道背流面。当充填至 TiAl 合金涡轮时,熔体沿涡轮轴部远离中心浇道的一侧进入涡轮型腔,并以正向充填方式充填远离中心浇道的叶片,依次流经轮毂、进气边和排气边,随后到

达涡轮顶端。之后,熔体以反向压力充填方式呈近平面状态充填横浇道以及涡轮心部和叶片,直至完成充填。对于侧注涡轮前置方式,TiAl 合金涡轮整体充填稳定性较好,但涡轮型腔中的气体最终被压缩至靠近中心浇道的叶片,增大了熔体充填该部分叶片的阻力,不利于涡轮完整成形。

侧注涡轮后置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场见

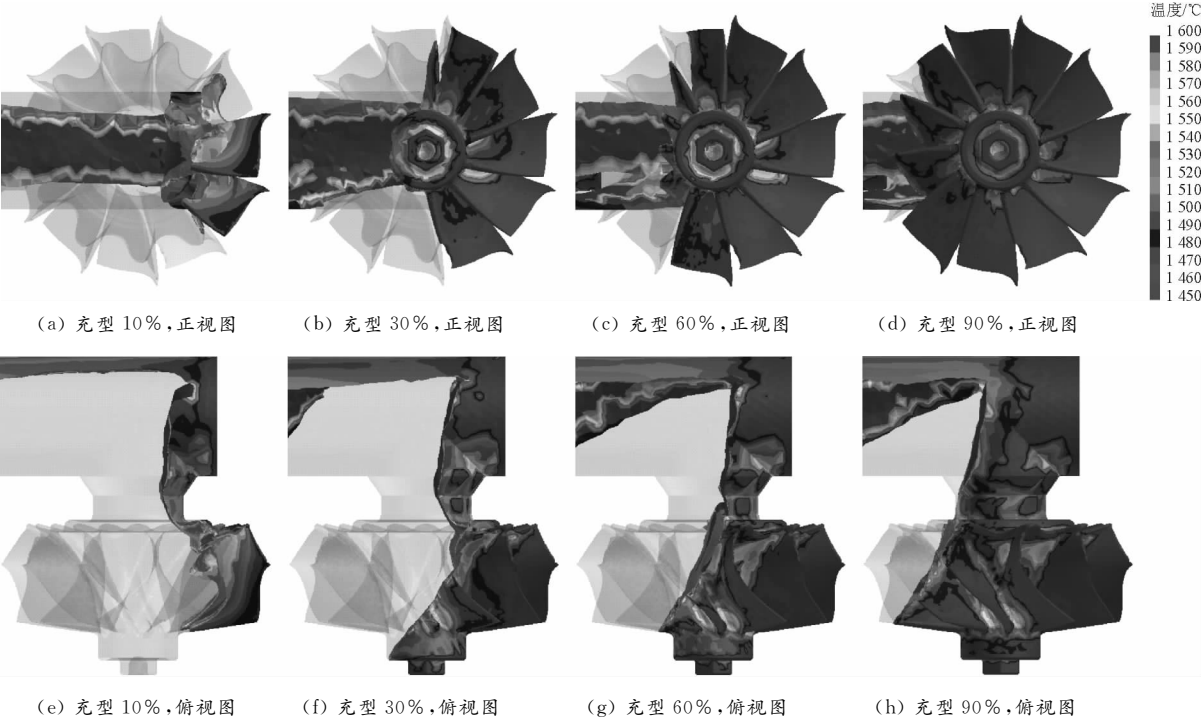


图3 侧注涡轮前置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场

Fig.3 Filling temperature field in front position of TiAl turbocharge castings with centrifugal side injection

图 4。可以看出,TiAl 合金熔体在横浇道中沿迎流面正向充填至涡轮时,经涡轮轴部和涡轮心部,流向涡轮叶片排气边根部,随后向涡轮顶端和叶片进气边方向蔓延。之后,随着熔体不断正向充填涡轮心部,涡轮心部的熔体以反向压力充填涡轮叶片和心部,并逐渐在涡轮和横浇道中呈近平面状态持续充填,直至充型完成。对于离心侧注涡轮后置,由于首股熔体正向快速冲击涡轮

型腔,紊流倾向较大,因而 TiAl 合金涡轮整体充型稳定性较差。而且,涡轮型腔中的气体最终被压缩至靠近中心浇道的叶片,增大熔体充填该部分叶片的阻力,不利于涡轮完整成形。

侧注涡轮上置方位和下置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场分别见图 5 和图 6,可见两种方位 TiAl 合金涡轮的充型特征均与涡轮前置方位基本一致。TiAl 合金

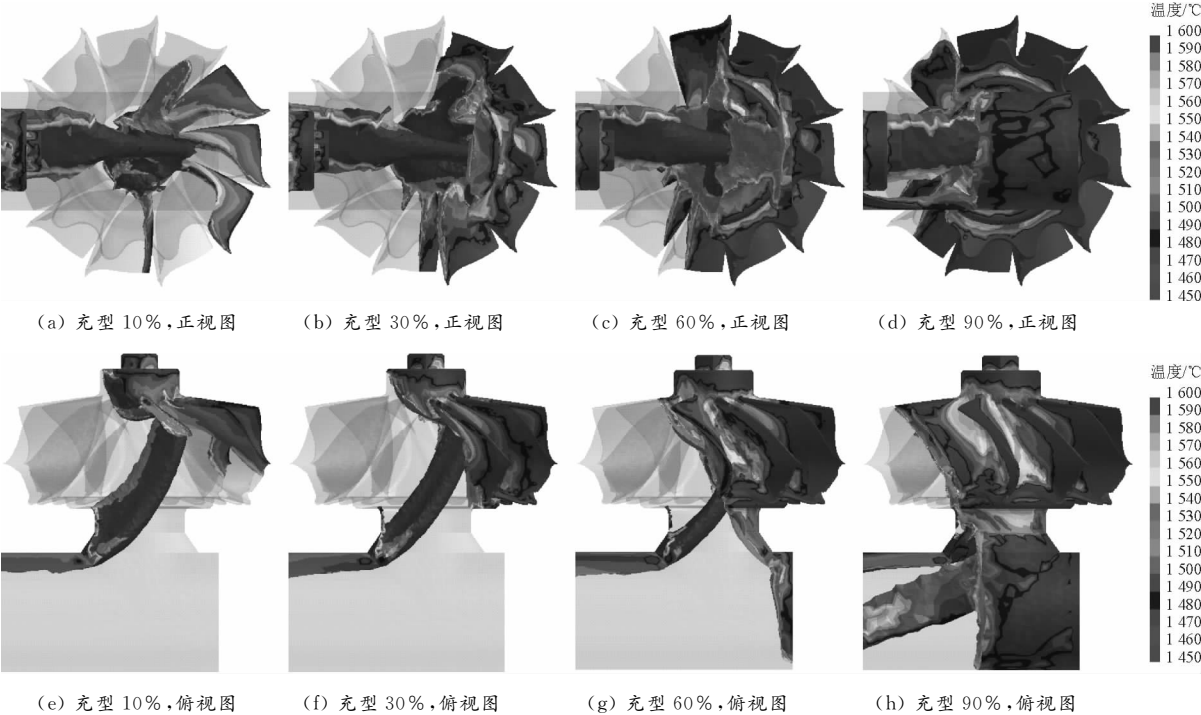


图 4 离心侧注涡轮后置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场

Fig.4 Filling temperature filed in rear position of TiAl turbocharge castings with centrifugal side injection

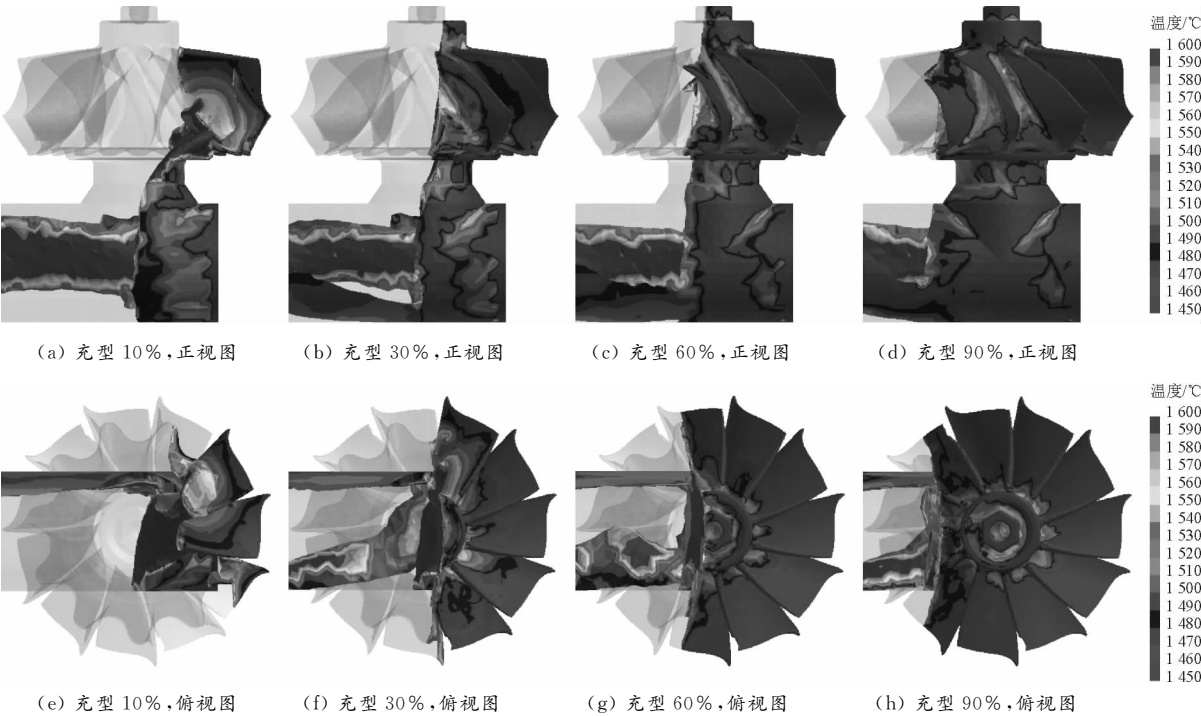


图 5 离心侧注涡轮上置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场

Fig.5 Filling temperature filed in upper position of TiAl turbocharge castings with centrifugal side injection

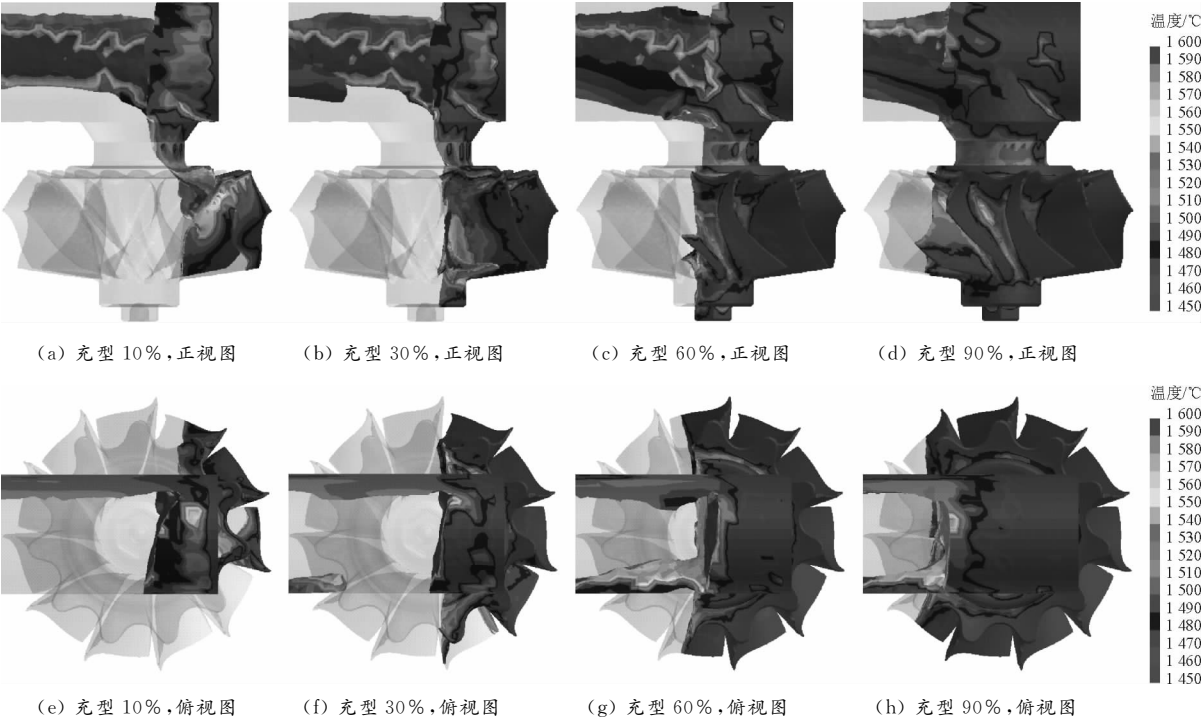


图 6 离心侧注涡轮下置方位 TiAl 合金涡轮充型温度场

Fig.6 Filling temperature filed in lower position of TiAl turbocharge castings with centrifugal side injection

熔体沿迎流面正向充填至横浇道远端后,以反向压力充填方式充填横浇道背流面。当充填至涡轮时,熔体沿涡轮轴部远离中心浇道的一侧进入涡轮型腔,并以正向充填方式充填远离中心浇道的叶片,依次流经轮毂、进气边和排气边。之后,熔体以反向压力充填方式呈近平面状态充填横浇道以及涡轮叶片、心部和顶端,直至完成充型。在离心侧注涡轮上置或下置方位下,TiAl 合金涡轮整体充填稳定性较好,但涡轮型腔中的气体最终被压缩至靠近中心浇道的叶片,增大熔体充填该部分叶片的阻力,不利于涡轮完整成形。

综合分析 4 种涡轮放置方位离心侧注 TiAl 合金涡轮的熔体充型特征可知,4 种涡轮放置方位的共同特点是涡轮型腔中的气体最终均被压缩至靠近中心浇道的叶片,造成这部分叶片成形困难。其中,涡轮前置、上置

和下置方位,TiAl 合金熔体在涡轮中的充型顺序基本一致,熔体始终与型壳壁接触,并表现出正向快速充填远端叶片,反向压力充填涡轮其他部分的特点,整体充型稳定性较好。而涡轮后置方位,TiAl 合金熔体在涡轮中的充型顺序与其他 3 种涡轮放置方位有较大不同,正向快速充填的熔体进入涡轮型腔后脱离型壳壁流动,并冲向远端叶片,以蔓延方式充填涡轮远端部位后再反向压力充填涡轮其他部位。在整个充型过程中,几乎始终可见正向快速充型的熔体冲击反向压力充型的熔体液面的情况,从而导致整体充型稳定性较差。

2.3 TiAl 合金涡轮底注充型特征

底注横浇道顺时针放置和逆时针放置 TiAl 合金涡轮充型温度场分别见图 7 和图 8。可见两种横浇道放置方向 TiAl 合金涡轮的充型特征基本一致,均为

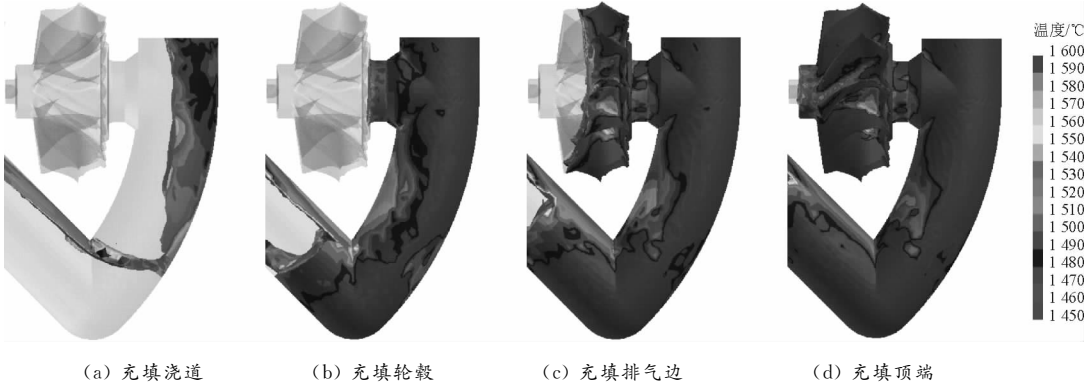


图 7 底注横浇道顺时针放置 TiAl 合金涡轮充型温度场(俯视图)

Fig.7 Filling temperature filed of TiAl turbocharge castings with centrifugal bottom injection lateral runners placing clockwise

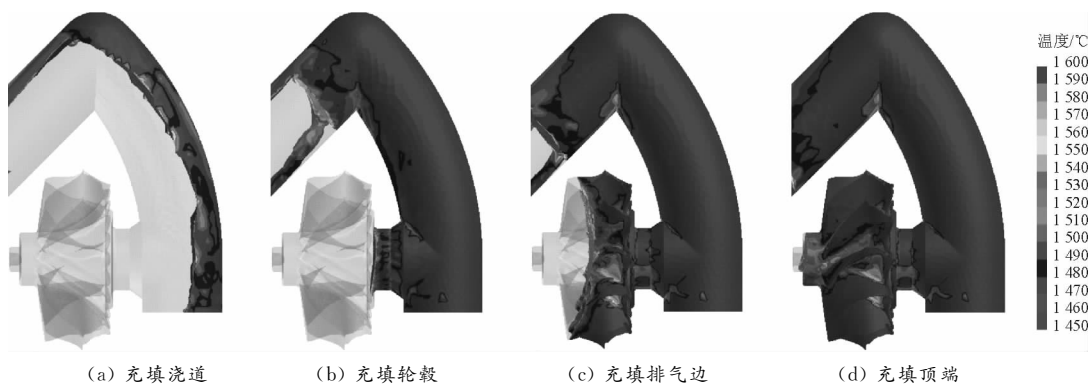


图 8 底注横浇道逆时针放置 TiAl 合金涡轮充型温度场(俯视图)

Fig.8 Filling temperature filed of TiAl turbocharge castings with centrifugal bottom injection lateral runners placing counter clockwise

熔体以近平面状态经横浇道依次充填涡轮轮毂、叶片进气边、叶片排气边和涡轮顶端,区别仅在于横浇道顺时针放置时,熔体以正向充填与涡轮相连接的横浇道,而发生一定程度的紊流。相比之下,横浇道逆时针放置时,熔体以反向压力充填与涡轮相连接的横浇道,从而使紊流程度显著降低。对于离心底注, TiAl 合金涡轮整体充填稳定性很好,但涡轮型腔中的气体最终被压缩至涡轮顶端,而增大熔体充填阻力,只不过与离心侧注涡轮型腔中的气体被压缩至靠近中心浇道的叶片相比,由于涡轮顶端壁厚较大且易于加工,涡轮顶端处的气体有望通过型壳自身或者借助人工开的排气孔全部排出,从而保证涡轮的完整成形。

2.4 3 种浇注方式下 TiAl 合金涡轮充型温度对比

以 TiAl 合金熔体充填到的第一个排气边叶尖的叶片为 1 号叶片,正对涡轮顶端按顺时针方向对叶片进行编号,统计 3 种浇注方式熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处的温度,结果见图 9。可见顶注方式熔体充填至涡轮各个叶片排气边叶尖处的温度总体处于较高水平,且呈较为明显的 W 型分布,温度最高的叶片为 1 号叶片,熔体温度为 1 585 ℃,温度最低的叶片为 3 号,熔体温度为 1 545 ℃。离心侧注的 4 种涡轮方位 TiAl 合金熔体充填至各个叶片排气边叶尖处的温度总体处于中等水平,且呈较为明显的 V 型分布,即先充填的 1~2 号、10~11 号叶片的排气边叶尖温度明显高于后充填的 5~8 号叶片。其中,涡轮前置方位,温度最高的为 1 号叶片,熔体温度为 1 576 ℃,温度最低的为 5 号叶片,熔体温度为 1 528 ℃。涡轮后置方位,温度最高的为 1 号叶片,熔体温度为 1 585 ℃,温度最低的为 9 号叶片,熔体温度为 1 527 ℃。涡轮上置方位,温度最高的为 1 号叶片,熔体温度为 1 581 ℃,温度最低的为 7 号叶片,熔体温度为 1 525 ℃。涡轮下置方位,温度最高的为 10 号叶片,熔体温度为 1 583 ℃,温度最低的为 3 号叶片,熔体温度为 1 532 ℃。但需注意的是,对于涡轮上置方位 6 号叶片和涡轮下置方位 9 号叶片,熔体并未充填至

排气边叶尖,因而未能采集到温度数据。离心底注方式两种横浇道放置方位 TiAl 合金熔体充填至涡轮各个叶片排气边叶尖处的温度总体处于较低水平,且呈现出不太明显的 W 型分布。其中,横浇道顺时针放置方位,温度最高的为 1 号叶片,熔体温度为 1 558 ℃,温度最低的为 7 号叶片,熔体温度为 1 531 ℃。横浇道逆时针放置方位,5 号叶片温度最高,熔体温度为 1 540 ℃,7 号叶片温度最低,熔体温度为 1 525 ℃。

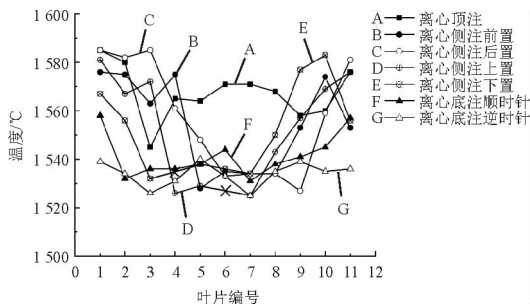


图 9 3 种离心铸造方式 TiAl 合金熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处的温度

Fig.9 Temperature at which TiAl melt is filled to the tip of exhaust edge of turbocharge blade by different centrifugal casting methods

对 3 种浇注方式 TiAl 合金熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处的最高温度、最低温度和平均温度进行统计,结果见图 10。可以看出,顶注熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处温度的平均值最高,侧注次之,离心底注最低。顶注熔体充填至排气边叶尖处温度的最低值最高,超出 TiAl 合金液相线温度 22 ℃,侧注和底注熔体充填至排气边叶尖处温度的最低值相当,超出 TiAl 合金液相线温度 2~9 ℃。这表明,顶注 TiAl 合金熔体温度降低较小,熔体充型能力较强,涡轮叶片出现浇不足的概率较小,而侧注和离心底注 TiAl 合金熔体温度降低较大,熔体充型能力较弱,涡轮叶片出现浇不足的概率较大。计算 TiAl 合金熔体充填至排气边叶尖处温度的最高值与最低值之差,离心侧注最大,为 48~58 ℃,顶注次之,为 40 ℃,离心底注最小,为 15~27 ℃。由于

熔体过热度不同会导致凝固温度梯度不同,进而会引起 TiAl 合金凝固组织的差异^[12],因此可以推测,在涡轮叶片组织的一致性方面,离心底注最好,离心顶注次之,离心侧注最差。

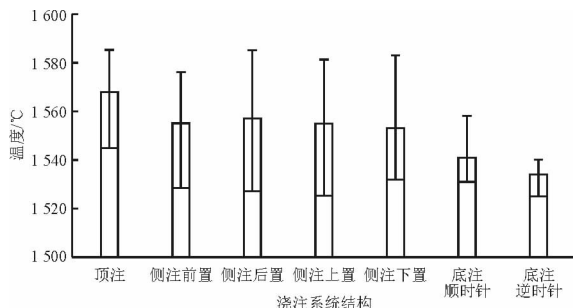


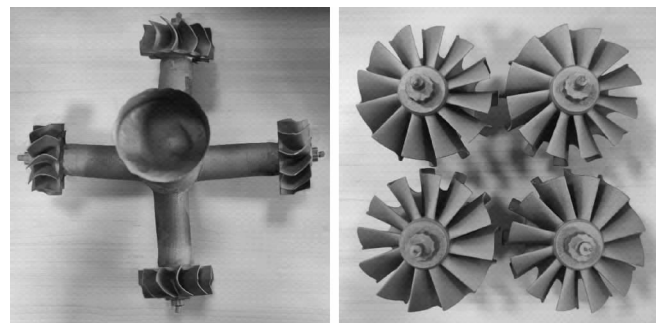
图 10 3 种浇注方式 TiAl 合金熔体充填至涡轮叶片排气边叶尖处的温度统计

Fig.10 Temperature statistics at which TiAl melt is filled to the tip of exhaust edge of turbocharger blade by different pouring methods

综合分析 3 种浇注方式下熔体稳定性、涡轮型腔排气和熔体充型温度,认为顶注由于熔体充型稳定性较好、气体可全部排出涡轮型腔、熔体充型温度最高,最有利于 TiAl 合金涡轮铸造成形。侧注由于气体被排至不易开排气孔的叶片尖端、熔体充型温度较低、不同叶片间熔体充型温度相差最大,而不利 TiAl 合金涡轮铸造成形。底注由于熔体充型稳定性最好、气体被排至易于开排气孔的涡轮顶端、不同叶片间熔体充型温度相差较小,在更高浇注温度或型壳预热温度条件下适合于 TiAl 合金涡轮铸造成形。

2.5 TiAl 合金涡轮离心铸造试验

分析可知,顶注和底注离心铸造适合于 TiAl 合金涡轮铸造成形,但考虑到实际条件下,浇注温度和型壳预热温度提升困难,采用离心底注,TiAl 合金涡轮存在浇不足问题^[13],因此浇注试验采用离心顶注方式。熔炼功率为 550 kW,型壳预热温度为 600 ℃,离心转速为 300 r/min,浇注后的 TiAl 合金涡轮浇注系统及涡轮铸



(a) 涡轮铸件浇注系统 (b) TiAl 合金涡轮铸件

图 11 离心顶注方式 TiAl 合金涡轮铸造结果

Fig.11 Casting results of TiAl alloy turbochargers with centrifugal top injection

件见图 11,可见涡轮铸件均基本完整成形。除个别叶片存在排气边叶尖夹杂缺陷,并无浇不足、冷隔等缺陷。这表明,数值模拟研究得到的工艺方案是可行的。

3 结 论

(1)在熔体充型稳定性方面,离心底注为熔体全部反向压力充填涡轮,充型稳定性最好,离心顶注以及离心侧注涡轮前置、上置和下置方位为熔体正向充填迎流面叶片,反向压力充填涡轮剩余部分,充型稳定性较好,离心侧注涡轮后置方位为熔体正向充填涡轮,充型稳定性较差。

(2)在涡轮型腔排气方面,离心顶注将气体排至浇道,离心顶注将气体排至易开排气孔的涡轮顶端,有利于涡轮完整成形,离心侧注将气体排至不易开排气孔的涡轮叶片尖端,不利于涡轮完整成形。

(3)在熔体充型温度方面,离心顶注熔体充型至排气边叶尖的温度最高,离心侧注和离心底注熔体充型至排气边叶尖的温度相当,但在各叶片之间充型温度的一致性上,离心底注温差最小,离心顶注次之,离心侧注温差最大。

(4)综合考虑熔体充型稳定性、涡轮型腔排气和熔体充型温度,离心顶注最有利于 TiAl 合金涡轮成形,离心侧注不利于涡轮成形,离心底注在更高浇注温度或型壳预热温度条件下适合于 TiAl 合金涡轮成形。

(5)采用离心顶注方式,在型壳预热温度为 600 ℃,离心转速为 300 r/min 工艺条件下进行涡轮实际浇注试验,获得了完整成形的 TiAl 合金涡轮铸件。

参 考 文 献

- [1] TETSUI T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A(329-331): 582-588.
- [2] 张继,仲增镛. TiAl 金属间化合物工程实用化研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(2): 9-13.
- [3] 李胜,姜明智,王新英,等. TiAl 合金反重力铸造用陶瓷型壳的调整[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 27-29.
- [4] 陈玉勇,陈艳飞,田竟,等. TiAl 基金属熔模精密铸造技术的发展现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 554-558.
- [5] 杨亮,张来启,林均品,高 Nb-TiAl 增压器涡轮熔模铸造过程数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(19): 72-74.
- [6] NODA T. Application of cast gamma TiAl for automobile[J]. Intermetallics, 1998(6): 709-713.
- [7] 王建国,周中波,王一川,等. TiAl 合金铸造工艺数值模拟及分析[J]. 铸造技术, 2009, 30(8): 1 054-1 057.
- [8] SUNG S Y, KIM Y J. Modeling of titanium aluminides turbocharger casting[J]. Intermetallics, 2007, 15: 468-474.
- [9] 潘利文,高永,高文理,等. 基于 ProCAST 的 TiAl 叶片缩孔缩松预测及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(6): 504-508.

激光增材制造纯钨及钨铜复合材料的组织与性能

邓 澄¹ 蒋梦龙¹ 周圣丰^{2,3}

(1.华南理工大学机械与汽车工程学院; 2.暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院;
3.华中科技大学武汉光电国家研究中心)

摘 要 采用激光增材制造技术制备了纯钨及钨铜复合材料,通过光学显微镜、扫描电镜和维氏硬度测量仪等表征了其表面形貌、微观结构和硬度,系统分析了粉末特性、激光功率、扫描速率以及铺粉厚度等参数对纯钨制件的组织形貌和力学性能的影响,以及对钨铜复合材料界面结合的影响。通过优化激光功率和扫描速率等加工参数,制备了致密度最高达 97.66%,硬度(HV)高达 486.23 的纯钨制件,以及界面结合良好的钨铜复合材料制件。

关键词 激光增材制造;纯钨;钨铜复合材料;微观组织;性能

中图分类号 TB333.1⁺2;TG249.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of Pure Tungsten and Tungsten Copper Composites by Laser Additive Manufacturing

Deng Cheng¹, Jiang Menglong¹, Zhou Shengfeng^{2,3}

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology;

2.Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistance and Functional Materials, Jinan University;

3.Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO), Huazhong University of Science and Technology.)

Abstract: Pure tungsten and tungsten copper composites were fabricated by laser additive manufacturing. The surface morphology, microstructure and hardness were characterized by optical microscopy, scanning electron microscope and Vickers hardness tester. The influence of parameters, including powder characteristics, laser power, scanning speed and layer thickness on the microstructure and mechanical properties of pure tungsten parts, as well as the interface bonding of tungsten copper composites were systematically analyzed. Pure tungsten parts with relative density up to 97.66% and hardness up to 486.23 HV were produced, and tungsten copper composites with desirable interface bonding were obtained by optimizing the processing parameters.

Key Words: Laser Additive Manufacturing, Pure Tungsten, Tungsten Copper Composites, Microstructure, Properties

钨及其合金具有高熔点、高密度、低热膨胀系数、高强度、高硬度等特性,在航空航天、电子、化工、核工业及其他极端环境领域具有重要应用^[1~6]。钨铜复合材料是由高熔点、高硬度的钨和高导电、高热导率的铜所构成的假合金,具有良好的耐电弧侵蚀性、抗熔焊性、高强度和高硬度等特性,被广泛地用作电触头材料,电阻焊、

收稿日期:2022-03-07
基金项目:广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2020A1515110699);国家自然科学基金重大研究计划资助项目(92166112);华中科技大学武汉光电国家研究中心开放基金资助项目(2021WNLKF010);桂林电子科技大学广西信息材料重点实验室开放基金资助项目(211003-K);国家金属材料近净成形工程技术研究中心、金属材料高效近净成形技术与装备教育部重点实验室(B类)开放基金资助项目(2020003)
第一作者简介:邓澄,男,1986 年出生,博士研究生,广州(510640),E-mail: dengcheng@scut.edu.cn
通信作者:周圣丰,男,1977 年出生,教授,广州(510632),E-mail: zhousf1228@163.com
引用格式:邓澄,蒋梦龙,周圣丰. 激光增材制造纯钨及钨铜复合材料的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):804-809.
DENG C, JIANG M L, ZHOU S F. Microstructure and properties of pure tungsten and tungsten copper composites by laser additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):804-809.

[10] XIONG C, MA Y C, CHEN B, et al. Modeling of filling and solidification process for TiAl exhaust valves[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(1): 33-48.

[11] LU D A. Thermophysical properties necessary for advanced casting simulation[J]. International Journal of Thermophysics, 2002, 29(5): 1 131-1 146.

[12] 胡海涛,张熹雯,朱春雷,等.铸造 TiAl 合金凝固组织的截面尺寸效应[J]. 稀有金属, 2017, 41(7): 751-758.

[13] 苏彦庆,郭景杰,贾均,等. TiAl 基合金涡轮熔模型壳离心精密铸造[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(4): 295-298.

(编辑:刘晨辉)