

# 浇注系统对离心铸造 TiAl 合金叶片成形的影响

胡海涛<sup>1, 2, 3</sup>, 左家斌<sup>1, 2, 3</sup>, 黄东<sup>1, 2, 3</sup>, 丁贤飞<sup>1, 2, 3</sup>, 南海<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院 铸造钛合金技术中心, 北京 100095; 2. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095; 3. 北京百慕航材高科技技术有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 采用数值模拟方法研究了浇注系统对离心铸造TiAl合金叶片成形的影响, 并根据熔体充型特征和充型温度对不同离心半径、叶片长度方向与水平方向夹角、叶片弦宽方向与离心力方向夹角的TiAl合金叶片的成形进行了分析。结果表明, 在叶片弦宽方向与离心力方向夹角为90°的条件下, 首股熔体充填叶片进气边, 后续熔体充填排气边并与首股熔体汇合后完成叶片充型。离心半径由100 mm增加至200 mm, 熔体紊流倾向增大, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由1 533 °C提高至1 545 °C。叶片长度方向与水平方向夹角由30°增至60°, 熔体紊流倾向减小, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由1 543 °C降低至1 537 °C。叶片弦宽方向与离心力方向夹角由30°增大至90°, 首股熔体由充填叶片排气边转变为充填进气边, 由不发生汇流转变为发生汇流, 随后完成叶片充型, 熔体紊流倾向增大, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由1 533 °C提高至1 542 °C。采用离心半径为150 mm, 叶片长度方向与水平夹角为45°, 叶片弦宽方向与离心力方向夹角为30°的浇注系统进行了TiAl合金叶片离心浇注试验, 叶片完整成形, 无欠注、冷隔等成形缺陷, 从而验证了数值模拟研究得到的工艺方案的可行性。

**关键词:** TiAl合金; 叶片; 离心铸造; 浇注系统; 数值模拟

## 作者简介:

胡海涛(1989-), 男, 工程师, 博士, 研究方向为TiAl合金铸造工艺。电话: 010-62498495, E-mail: huhaitaotial@163.com

## 通讯作者:

丁贤飞, 男, 高级工程师, 博士。电话: 010-62498385, E-mail: 24908633@qq.com

中图分类号: TG244+.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

09-1054-06

## 收稿日期:

2020-11-17 收到初稿,

2021-04-21 收到修订稿。

采用铸造方法制备的TiAl合金叶片已成功应用于航空发动机低压涡轮末级, 起到良好的结构减重效果<sup>[1]</sup>。为降低TiAl合金叶片制造成本, 有必要发展可近净成形的熔模铸造技术。由于采用传统试错法研究TiAl合金铸件成形工艺成本较高, 借助计算机数值模拟技术具有重要的理论意义和实用价值<sup>[2]</sup>。潘利文等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法研究了浇注温度对重力铸造TiAl合金叶片缩孔、缩松缺陷的影响, 并根据模拟和试验结果优化了散热结构, 消除了叶片内部宏观缩孔、缩松。汪军<sup>[4]</sup>则开展了型壳温度对TiAl合金叶片凝固过程影响的模拟研究, 所得结果与模拟一致。杨亮等<sup>[5]</sup>采用ProCAST软件模拟了不同离心转速下高Nb-TiAl合金叶片的充型特征和缺陷体积, 确定了最佳离心转速。L.Yang等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法研究了相同浇注系统下TiAl合金叶片重力浇注和离心浇注的金属液充型特征, 并预测了缺陷位置, 结果表明, 重力浇注和离心浇注方式下TiAl合金熔体在叶片型腔中的流动特征以及凝固缺陷的位置显著不同。H.Wang等<sup>[7]</sup>开展了TiAl合金叶片倾斜铸造模拟研究, 通过改进算法, 成功预测了导致冷隔、卷气及热节等宏观缺陷产生的条件。N. J. Humphreys等<sup>[8]</sup>针对TiAl合金叶片离心铸造建立了新的计算模型, 结果表明, 该模型能够较为准确地预测合金熔体的流动状态以及气孔和欠注缺陷。

上述研究均表明了铸造模拟在预测TiAl合金叶片成形缺陷方面的准确性, 为本试验开展TiAl合金叶片成形模拟研究奠定了基础。为实现低流动性TiAl合金薄壁细长结构叶片的完整成形, 通常采用可大幅提高熔体充型能力的离心铸造方式。但是, 离心铸造在提高熔体流动速度的同时, 也显著增加了熔体的紊流程度, 从而容易发生局部欠注和冷隔缺陷。因此, 如何实现熔体快速有序充型是TiAl合金叶片能够完整成形的关键之一, 而浇注系统则是影响离心铸造熔体流动特征的重要因素。因此, 有必要开展浇注系统对离心铸造TiAl合金叶片成形影响的数值模拟研究。

本试验采用ProCAST铸造模拟软件,针对不同的离心半径、叶片长度方向与水平方向夹角、叶片弦宽方向与离心力方向夹角,对TiAl合金叶片的离心铸造过程进行计算。通过评价熔体在叶片中的流动特征以及熔体充填至靠近叶冠部位叶身排气边处的温度,分析浇注系统对离心铸造TiAl合金叶片成形的影响。

## 1 试验方法

采用Pro/E软件建立叶片浇注系统三维模型(图1),叶片总长220 mm,弦宽30 mm,排气边厚度1 mm,中心浇道直径100 mm,高度250 mm,横浇道长度50~150 mm,宽度40 mm,高30 mm,叶片长度方向与水平方向夹角 $30^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ ,叶片弦宽方向与离心力方向夹角 $30^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ 。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、实际测量及文献参考等途径获得的TiAl合金及氧化钇型壳的主要热物性参数见表1<sup>[3, 9-11]</sup>。

模拟采用的边界条件为浇注温度 $1\ 600\ ^{\circ}\text{C}$ ,型壳预热温度 $800\ ^{\circ}\text{C}$ ,离心转速300 rpm,浇注速度6 kg/s。对于ProCAST模拟软件,离心力不能施加在型壳上,而只能施加在铸件上,因此为体现型壳沿浇道中心轴线顺时针方向旋转,在叶片铸件上施加沿浇道中心轴线逆时针方向旋转的离心力,此时排气边处于迎流面。本试验通过描述熔体在叶片中的流动特征以及熔体充填至靠近叶冠部位叶身排气边处的温度,分析离心半径、叶片方向与水平方向夹角以及叶片弦宽方向与离心力方向夹角对离心铸造TiAl合金叶片成形的影响。考虑到不同浇注系统叶片相对中心浇道的位置不一致,为了对比出不同浇注系统中TiAl合金熔体在叶片中的流

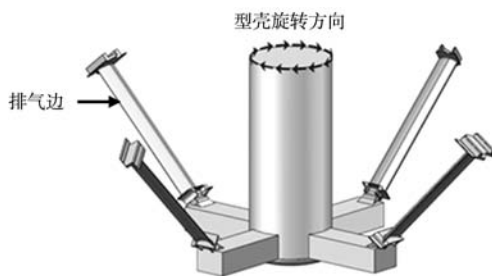


图1 叶片浇注系统三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of blade castings pouring system

动特征,本试验在查看模拟结果时统一将叶背所在面作为观察视图。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 离心半径对 TiAl 合金叶片成形的影响

固定叶片长度方向与水平方向夹角 $45^{\circ}$ ,叶片弦宽方向与离心力方向夹角 $90^{\circ}$ ,改变横浇道长度分别为50 mm、100 mm、150 mm,考虑到中心浇道直径为100 mm,则离心半径分别为100 mm、150 mm、200 mm,浇注系统部分视图如图2所示。计算TiAl合金叶片离心铸造充型过程,得到不同离心半径时,TiAl合金熔体在叶片中的流动特征如图3所示。可以看出,当第一股熔体进入叶片型腔时,并未充填处于迎流面的薄壁排气边,而是优先充填壁厚稍厚的进气边,叶片排气边则由后续熔体进行填充,随后充填进气边与排气边的熔体发生汇合,以一股熔体继续充填叶片型腔。随着充填的继续进行,熔体在位于迎流面的叶片排气边的充填速度加快,排气边充填长度逐渐领先进气边。然而,随离心半径增大,熔体充填叶片进气边的比例增加,导致排气边被充填的时间滞后,即充填进气边与排气边的熔体交汇滞后,造成熔体紊流倾向增大。在后续充填过程中,排气边充填长度领先进气边的幅度减小。

统计TiAl合金熔体充填至靠近叶冠部位叶身排气边处的温度,离心半径为100 mm、150 mm和200 mm时,TiAl合金熔体充填至近叶冠排气边处的温度分别为 $1\ 533\ ^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 542\ ^{\circ}\text{C}$ 和 $1\ 545\ ^{\circ}\text{C}$ 。这表明,随离心半径增大,熔体充型温度逐渐增加。其中,离心半径由100 mm增大至150 mm,熔体充型温度提高 $9\ ^{\circ}\text{C}$ ,而当离心半径由150 mm进一步增大至200 mm时,熔体充型温度仅提高 $3\ ^{\circ}\text{C}$ ,这应与熔体流程增长对熔体温降的作用增大有关。

### 2.2 叶片长度方向与水平方向夹角对 TiAl 合金叶片成形的影响

固定横浇道长度100 mm,即离心半径150 mm,叶片弦宽方向与离心力方向夹角 $90^{\circ}$ ,改变叶片长度方向与水平方向的夹角分别为 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ ,浇注系统部分视图如图4所示。计算TiAl合金叶片离心铸造充型过

表1 TiAl合金及氧化钇型壳的主要热物性参数  
Table 1 Thermal parameters of TiAl alloy and yttria mold

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 / $^{\circ}\text{C}$	粘度系数 / $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	界面换热系数 / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$
TiAl合金	3 450~3 872	15~28	0.61~0.78	400	1 468~1 523	$(4.2\sim 5.4)\times 10^{-3}$	1 500
Yttria型壳	4 200	2.1~2.4	0.7~1.0	—	—	—	—

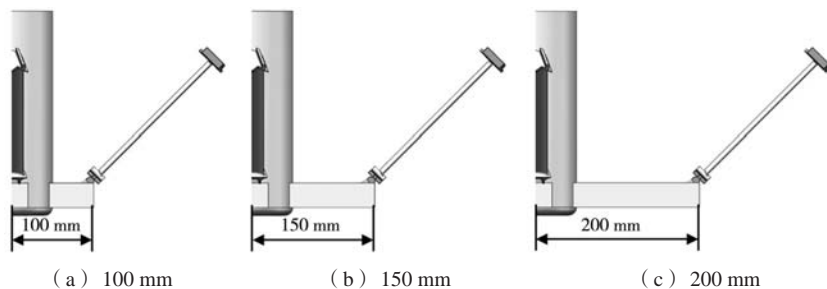


图2 不同离心半径浇注系统部分视图

Fig. 2 Partial view of pouring system with different centrifugal radius

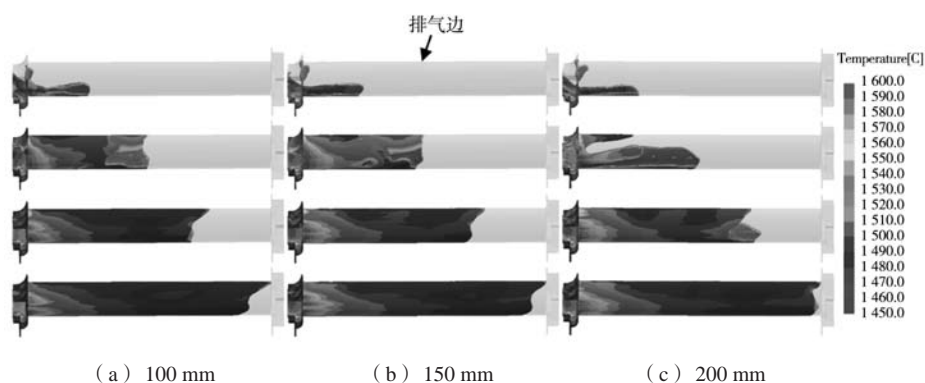


图3 不同离心半径叶片充型温度场

Fig. 3 Filling temperature field of blade casting with different centrifugal radius

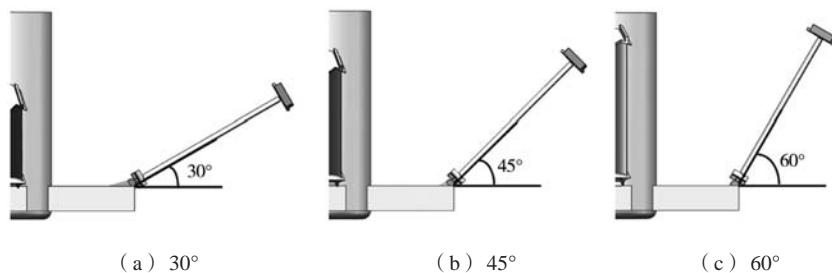


图4 不同叶片长度方向与水平方向夹角浇注系统部分视图

Fig. 4 Partial view of pouring system with different angles between blade length direction and horizontal direction

程, 得到不同叶片长度方向与水平方向夹角时, TiAl合金熔体在叶片中的流动特征如图5所示。可以看出, 第一股熔体进入叶片型腔时也是优先充填叶片进气边, 排气边则由后续熔体进行充填, 充填进气边与排气边的熔体发生汇合后以一股熔体继续充填叶片型腔, 且排气边充填长度逐渐领先进气边。随叶片长度方向与水平方向夹角增大, 充填进气边与排气边的熔体发生汇合的部位提前, 熔体紊流倾向减小。在后续充填过程中, 排气边充填长度领先进气边的幅度减小。

统计TiAl合金熔体充填至靠近叶冠部位叶身排气边处的温度, 叶片长度方向与水平方向夹角为30°、45°和60°时, TiAl合金熔体充填至近叶冠排气边处的温度分别为1 543 °C、1 542 °C和1 537 °C。这表明, 随夹角

增大, 熔体充型温度逐渐降低, 这应与近叶冠排气边离心半径减小、熔体充型速度减慢、散热增多有关。

### 2.3 叶片弦宽方向与离心力方向夹角对 TiAl 合金叶片成形的影响

固定横浇道长度100 mm, 即离心半径150 mm, 叶片长度方向与水平方向夹角45°, 改变叶片弦宽方向与离心力方向的夹角分别为30°、60°、90°, 浇注系统部分视图如图6所示。计算TiAl合金叶片离心铸造充型过程, 得到不同叶片弦宽方向与离心力方向夹角时, TiAl合金熔体在叶片中的流动特征如图7所示。可以看出, 当叶片弦宽方向与离心力方向夹角为30°时, 熔体首先充填叶片排气边, 并始终以一股熔体充填叶片型

腔, 熔体紊流倾向很小, 且排气边充填长度始终领先进气边。当夹角为 $60^\circ$ 时, 进入叶片型腔的第一股熔体沿进气边充填很短距离之后向排气边发生偏移并达到距离榫头 $30\text{ mm}$ 的排气边, 所形成的空间由后续熔体沿排气边进行充填, 第一股熔体与填充空间的熔体汇合成一股熔体, 继续充填叶片型腔。虽然发生了熔体汇流, 但汇流发生在较小的范围内, 因而熔体紊流倾向较小。在整个充填过程中, 排气边充填长度始终领先进气边。当夹角为 $90^\circ$ 时, 第一股熔体充填叶片进气边, 排气边由后续熔体进行充填, 两股熔体发生汇合后以一股熔体继续充填叶片型腔。由于熔体汇流发生在较大的范围内, 熔体紊流倾向较大。在整个充填过程中, 排气边充填长度逐渐领先进气边。

统计TiAl合金熔体充填至靠近叶冠部位叶身排气

边处的温度, 叶片弦宽方向与离心力方向夹角为 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度分别为 $1\ 533\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\ 540\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1\ 542\text{ }^\circ\text{C}$ 。这表明, 随夹角增加, 熔体充型温度逐渐提高, 这是因为夹角较小时, 近叶冠排气边是由靠近排气边的熔体填充, 由于排气边壁厚较小, 熔体温降较大, 因而充填至近叶冠排气边处的熔体温度较低。而当夹角较大时, 近叶冠排气边是由靠近叶身厚壁区的熔体填充, 叶身厚壁区的熔体温降较小, 因而充填至近叶冠排气边处的熔体温度较高。

通过上述的分析可知, 增大离心半径, TiAl合金熔体填充叶片型腔时的紊流倾向增大, 充型温度提高, 增大叶片长度方向与水平方向的夹角, 熔体紊流倾向减小, 充型温度降低, 增大叶片弦宽方向与离心

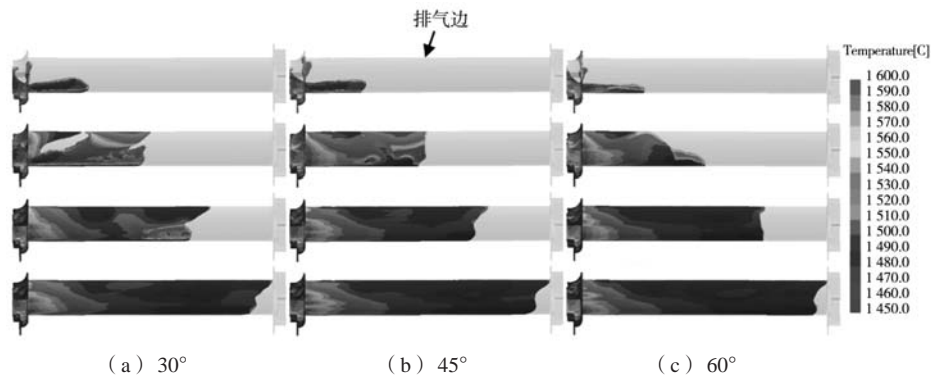


图5 不同叶片长度方向与水平方向夹角叶片充型温度场

Fig. 5 Filling temperature field of blade casting with different angles between blade length direction and horizontal direction

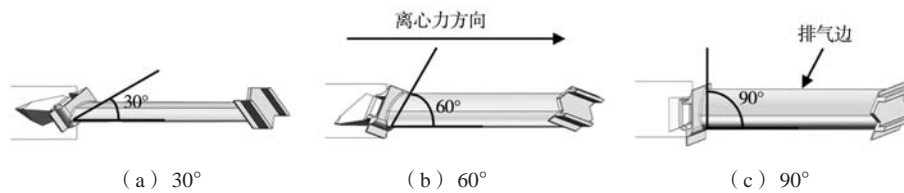


图6 不同叶片弦宽方向与离心力方向夹角浇注系统部分视图

Fig. 6 Partial view of pouring system with different angles between blade chord width direction and centrifugal force direction

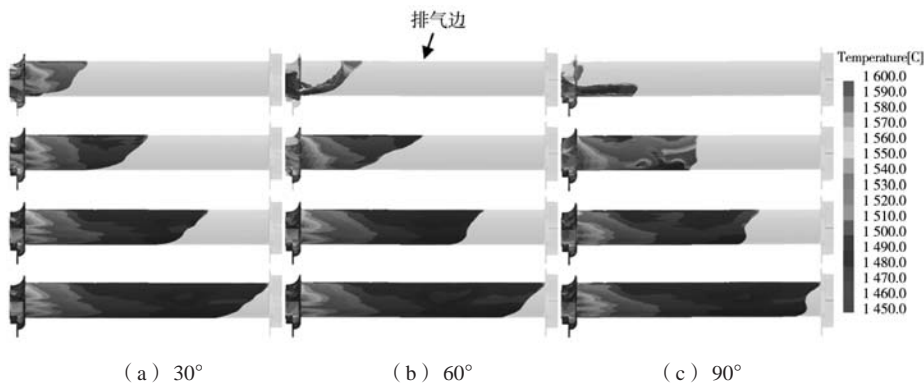


图7 不同叶片弦宽方向与离心力方向夹角叶片充型温度场

Fig. 7 Filling temperature field of blade casting with different angles between blade chord width direction and centrifugal force direction

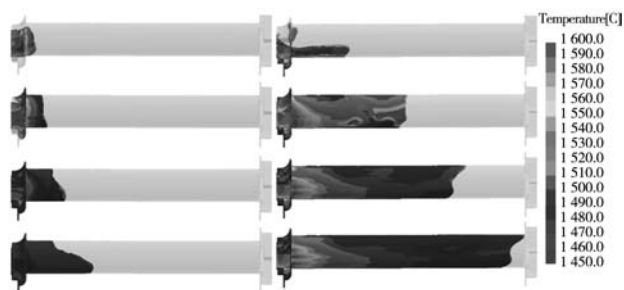
力方向的夹角, 熔体紊流倾向增大, 充型温度提高。为体现离心力对TiAl合金叶片成形的影响, 对比相同浇注系统重力铸造和离心铸造TiAl合金叶片的成形差别。

#### 2.4 重力铸造和离心铸造 TiAl 合金叶片的成形差别

以横浇道长度100 mm, 即离心半径150 mm, 叶片长度方向与水平方向夹角 $45^\circ$ , 叶片弦宽方向与离心力方向夹角 $90^\circ$ 的浇注系统为例, 模拟TiAl合金叶片在不施加离心力, 即重力铸造方式下的熔体充型特征, 并与施加离心力的情况进行对比, 结果如图8所示。结果表明, 在不施加离心力的情况下, TiAl合金熔体刚进入叶片型腔时以近平面的方式充型, 随后由于排气边处熔体温度降低较快, 排气边停止充填, 熔体改向截面较厚的近进气边部位充填, 但由于重力铸造方式下TiAl合金熔体充型缓慢, 温度降低明显, 熔体仅充填较短距离后即停止流动。而在施加离心力的情况下, TiAl合金叶片发生了排气边充填长度赶超进气边的现象, 且由于熔体充型较快, 温度降低较少, 可以完成整个叶片的充填。由此可知, 在相同浇注系统下, 重力铸造和离心铸造TiAl合金叶片的成形情况显著不同。

#### 2.5 TiAl 合金叶片离心铸造试验验证

通过上述的模拟可知, 当离心半径为150 mm, 叶片长度方向与水平夹角为 $45^\circ$ , 叶片弦宽方向与离心力方向夹角为 $30^\circ$ 时, TiAl合金熔体充填叶片型腔时紊流倾向最小, 有利于叶片完整成形, 因此采用该浇注系统进行TiAl合金叶片离心铸造试验, 以验证数值模拟得到的工艺方案的可行性。试验工艺参数为浇注功率550 kW, 型壳预热温度 $800^\circ\text{C}$ , 离心转速300 rpm, 浇注后的叶片模组及叶片铸件如图9所示, 叶片铸件除由



(a) 重力铸造

(b) 离心铸造

图8 相同浇注系统重力铸造与离心铸造叶片充型温度场

Fig. 8 Filling temperature of blade casting by gravity casting and centrifugal casting with the same pouring system

于型壳存在微裂纹导致的进气边少量外渗外, 其他部分均完整成形, 无欠注、冷隔等成形缺陷。这表明, 数值模拟研究得到的工艺方案是可行的。

### 3 结论

通过对离心铸造TiAl合金叶片的充型过程进行模拟, 描述和统计不同浇注系统TiAl合金叶片的熔体充型特征和充型温度, 得出如下结论。

(1) 在叶片长度方向与水平方向夹角为 $45^\circ$ 以及叶片弦宽方向与离心力方向夹角为 $90^\circ$ 的条件下, 首股熔体充填叶片进气边, 后续熔体充填排气边并与首股熔体汇合后完成叶片充型, 离心半径由100 mm增加至200 mm, 熔体紊流倾向逐渐增大, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由 $1533^\circ\text{C}$ 提高至 $1545^\circ\text{C}$ 。

(2) 在离心半径为150 mm以及叶片弦宽方向与离心力方向夹角为 $90^\circ$ 的条件下, 首股熔体充填叶片进气边, 后续熔体充填排气边并与首股熔体汇合后完成叶片充型, 叶片长度方向与水平方向夹角由 $30^\circ$ 增大至 $60^\circ$ , 熔体紊流倾向逐渐减小, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由 $1543^\circ\text{C}$ 降低至 $1537^\circ\text{C}$ 。

(3) 在离心半径为150 mm以及叶片长度方向与水平方向夹角为 $45^\circ$ 的条件下, 叶片弦宽方向与离心力方向夹角由 $30^\circ$ 增大至 $90^\circ$ , 首股熔体由充填叶片排气边转变为充填进气边, 由不发生汇流转变为发生汇流, 随后完成叶片充型, 熔体紊流倾向逐渐增大, 熔体充填至近叶冠排气边处的温度由 $1533^\circ\text{C}$ 提高至 $1542^\circ\text{C}$ 。

(4) 采用离心半径为150 mm, 叶片长度方向与水平夹角为 $45^\circ$ , 叶片弦宽方向与离心力方向夹角为 $30^\circ$ 的浇注系统进行了TiAl合金叶片离心浇注试验, 叶片完整成形, 无欠注、冷隔等缺陷, 从而验证了数值模拟研究得到的工艺方案的可行性。



图9 浇注后的叶片模组及叶片铸件

Fig. 9 Casted blade module and blade casting

## 参考文献:

- [1] CLEMENTS H, KESTLER H. Processing and applications of intermetallic  $\gamma$ -TiAl-based alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2 (9) : 551-570.
- [2] 梁作俭, 许庆彦, 李俊涛, 等.  $\gamma$ -TiAl增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2003, 32 (3) : 164-169.
- [3] 潘利文, 高永, 高文理, 等. 基于ProCAST的TiAl合金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.
- [4] 汪军. 基于ProCAST的TiAl合金叶片精铸数值模拟 [J]. *铸造技术*, 2015, 36 (3) : 706-708.
- [5] 杨亮, 姚谦, 张来启, 等. 基于Procast的高Nb-TiAl低压涡轮叶片离心铸造数值模拟 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 (12) : 2945-2947.
- [6] YANG L, CHAI L H, LIANG Y F, et al. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy [J]. *Intermetallics*, 2015, 66: 149-155.
- [7] WANG H, DJAMBAZOV G, PERICLEOUS K A. Numerical study of crucial parameters in tilt casting for titanium aluminides [J]. *China Foundry*, 2011, 8 (3) : 274-281.
- [8] HUNPHREYS N J, MCBRIDE D, SHEVCHENKO D M, et al. Modelling and validation: Casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal processes [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37 (14-15) : 7633-7643.
- [9] SUNG S Y, KIM Y J. Modeling of titanium aluminides turbo-charger casting [J]. *Intermetallics*, 2007, 15: 468-474.
- [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) : 1131-1146.

## Effect of Pouring System on TiAl Alloy Blade Forming by Centrifugal Casting

HU Hai-tao<sup>1,2,3</sup>, ZUO Jia-bin<sup>1,2,3</sup>, HUANG Dong<sup>1,2,3</sup>, DING Xian-fei<sup>1,2,3</sup>, NAN Hai<sup>1,2,3</sup>

(1. Cast Titanium Alloy R & D Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China; 3. BAIMTEC Material Co., Ltd., Beijing 100094, China)

### Abstract:

Numerical simulation was used to study the influence of pouring system on TiAl alloy blade forming by centrifugal casting. The forming of TiAl alloy blade with different centrifugal radius, angles between blade length direction and horizontal direction, angles between blade chord width direction and centrifugal force direction were analyzed according to melt filling characteristics and filling temperature. The results indicated that under the condition that the angle between blade chord width direction and centrifugal force direction was 90°, the first melt filled the inlet edge of the blade, and the subsequent melt filled the exhaust edge and merged with the first melt to complete the blade filling. When the centrifugal radius increased from 100 mm to 200 mm, the melt turbulence tendency increased, and the temperature at which the melt was filled to the exhaust edge near the blade crown increased from 1 533 °C to 1 545 °C. When the angle between blade length direction and horizontal direction increased from 30° to 60°, the melt turbulence tendency decreased, and the temperature at which the melt was filled to the exhaust edge near the blade crown decreased from 1 543 °C to 1 537 °C. When the angle between blade chord width direction and centrifugal force direction increased from 30° to 90°, the first melt transited from filling the exhaust edge to the inlet edge, from no confluence to confluence, and then completed the blade filling. The turbulence tendency of the melt increased, and the temperature at which the melt was filled to the exhaust edge near the blade crown increased from 1 533 °C to 1 542 °C. A centrifugal casting test of TiAl alloy blades was carried out using a pouring system with the centrifugal radius of 150mm, the angle between blade length direction and horizontal direction of 45°, and the angle between blade chord width direction and centrifugal force direction of 30°. The blades were completely formed without underfilling or cold, thus verifying the feasibility of the process scheme obtained by the numerical simulation study.

### Key words:

TiAl alloy; blade; centrifugal casting; pouring system; numerical simulation