

吸铸 TiAl 基合金排气阀内部气孔缺陷产生原因分析

韩宝帅, 骆良顺, 孟宪宇, 薛祥, 王亮, 苏彦庆, 郭景杰

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过比较不同工艺参数下吸铸成形的 TiAl 基合金排气阀内部孔洞缺陷形貌与分布状态, 确定了缺陷的种类为气孔。结合数值模拟计算吸铸过程中合金熔体流动形态的结果, 得到排气阀内部气孔缺陷形成的原因。通过优化真空吸铸过程的工艺参数, 可以成功消除排气阀铸件内的气孔缺陷。

关键词: TiAl 基合金; 真空吸铸; 排气阀; 气孔; 工艺参数

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1631-06

近年来, 由于能源消耗、环境污染等问题日益严重, 轻量化已经成为航空、航天、汽车等行业发展的主要趋势。实现轻量化可以从材料、结构、工艺等多方面考虑, 其中最根本的方法就是选用合适的轻质材料。与其它轻质合金相比, TiAl 基合金^[1,2]具有耐高温、高温抗氧化能力强、弹性模量高等优异特点, 同时还具有良好的抗蠕变性能和耐磨性。因此, TiAl 基合金具有非常广泛的应用范围, 能满足零部件在特定高温条件下的工作要求, 成为近年来在航空、航天、汽车等材料轻量化领域最具研究前景的材料之一。

TiAl 基合金是具有本征脆性的金属间化合物, 低温变形能力差, 塑性加工的方法成形难度大^[3,4]; 并且 TiAl 基合金流动性差, 收缩率大, 在常规铸造方法成形过程中极易产生缩松、缩孔等缺陷^[5,6]。这些问题的存在, 使得 TiAl 基合金的成形受到了极大限制。因此, 解决 TiAl 基合金的工程化应用的首要问题就是开发一种简便易行的成形方法。

底漏式真空吸铸是一种适用于 TiAl 基合金小型件成形的新型铸造方法^[7]。该方法结合了真空非自耗电弧熔炼、金属型铸造和熔模精密铸造等工艺, 能大幅度的提高 TiAl 基合金的流动性, 减弱缩松缩孔的产生倾向, 具有工艺简便、实用性强、成本低等优点。本实验采用真空吸铸方法开发汽车用 TiAl 基合金排气阀的成形工艺, 结合数值模拟和工艺试验, 分析和探索铸造过程气孔缺陷产生的原因, 优化成形工艺, 探索制备形状完整、内部质量良好的小型 TiAl 基合金铸件的方法。

1 实验

真空吸铸的原理如图 1 所示: 将 TiAl 基合金放置在水冷铜坩埚中, 在氩气的保护下, 采用非自耗电弧熔炼法熔炼 TiAl 基合金。由于表面张力的作用, 合金熔体不会从吸口中流下。待 TiAl 基合金完全熔化, 并加大电流持续熔炼 1 min, 保证合金熔体具有一定的过热度, 然后启动机械泵, 打开吸铸阀, 将模具内的气体抽走, 合金熔体在气体压力和重力的共同作用下通过坩埚底部的吸口进入铸型, 充填型腔, 得到 TiAl 基合金铸件。

结合前期的研究工作^[8-10], 本实验所选的 TiAl 基合金为 Ti-47Al-2Cr-2Nb, 排气阀模具材质为 3Cr2W8V 热作模具钢, 吸铸过程中最大熔炼电流 600 A, 吸铸启动电流 800 A, 吸铸压差 0.03~0.05 MPa, 吸口直径 3~4 mm。

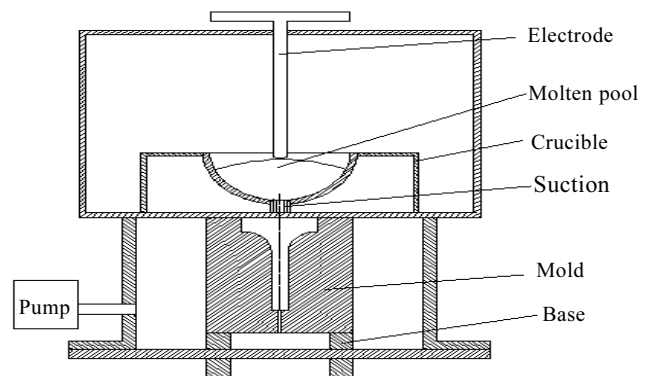


图 1 底漏式真空吸铸示意图

Fig.1 Schematic of bottom vacuum suction casting

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51425402, 51671073, 51331005)

作者简介: 韩宝帅, 男, 1985 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418415, E-mail: hbshhit@126.com

2 结果及分析

2.1 工艺参数对排气阀缺陷分布的影响

TiAl 基合金排气阀铸件结构与尺寸如图 2 所示。排气阀质量为 50 g, 考虑到加工余量和浇冒口等重量, 铸件质量约为 70 g。在本部分吸铸探索实验过程中, 放料量设定为 100 g, 吸铸过程中最大熔炼电流 600 A, 吸铸启动电流 800 A, 吸铸压差 0.04 MPa, 吸口直径 4 mm。

吸铸得到的 TiAl 基合金排气阀如图 3a 所示。这些排气阀外观完整, 表面光滑, 具有金属光泽。将排气阀剖开后, 发现在排气阀杆部位置存在管状封闭空腔, 如图 3b 所示; 空腔内壁光滑, 前端呈锥状, 轮廓清晰, 靠近排气阀杆部底端, 还存在一些尺寸较小的封闭孔洞, 这些孔洞表面光滑, 近似呈圆球状, 沿杆部中轴线分布, 如图 3c 所示; 空腔与排气阀菌部致密

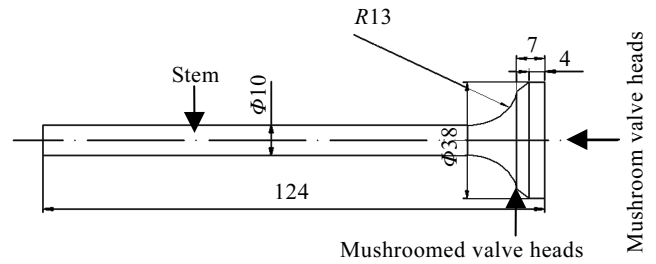


图 2 排气阀铸件图

Fig.2 Casting drawing of exhaust valve

处存在过渡区域, 过渡区域的芯部与侧壁部位存在明显的焊合痕迹, 并且芯部前端金属呈半球状, 与液流前端的形貌相似, 如图 3d 所示。

为了消除上述缺陷, 研究不同吸铸工艺对排气阀内部质量的影响, 通过优化工艺参数来消除缺陷。具体工艺见表 1, 对应工艺下制备的排气阀铸件如图 4~6 所示。

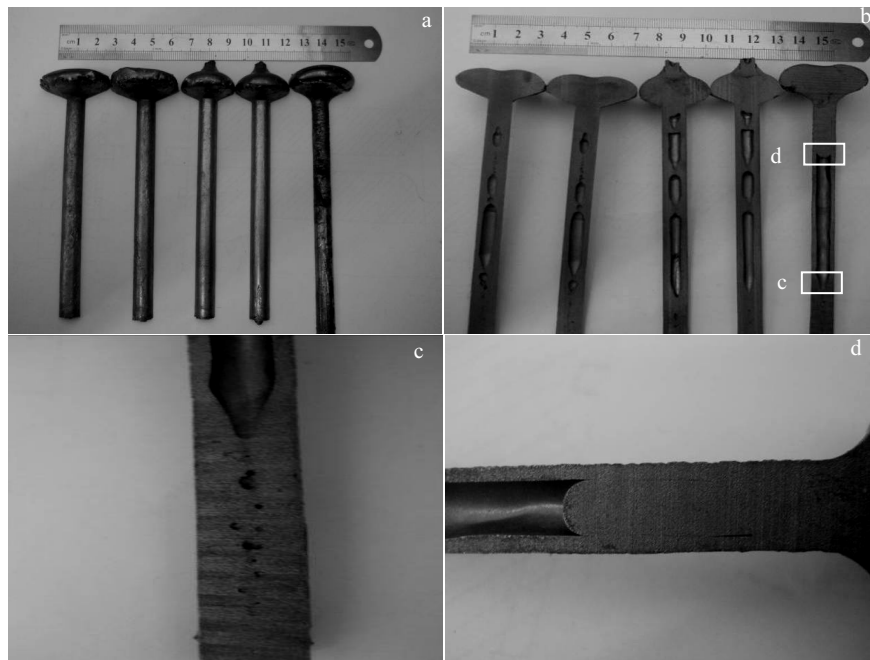


图 3 真空吸铸 TiAl 基合金排气阀

Fig.3 Morphologies of exhaust valve formed by vacuum suction casting: (a) external morphology, (b) internal morphology, and (c, d) local amplification

表 1 吸铸实验工艺参数

Table 1 Parameters of vacuum suction casting

Sample	Metal mass/g	Suction diameter/mm	Differential pressure/MPa
I	200	4	0~0.05
II	200	3	
III	300	3	

利用工艺 I 制备的 TiAl 基合金排气阀铸件如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 增加合金熔体的质量可以明显改善排气阀内部质量。相对于图 3, 排气阀内部的孔洞尺寸减小, 数量减少, 孔洞分布位置上移。这种位置的改变有益于改善排气阀内部质量, 缺陷位置越靠近上部, 越接近铸件的浇冒口, 可以在浇冒口处得到补缩并排出气体, 减少孔洞的产生。

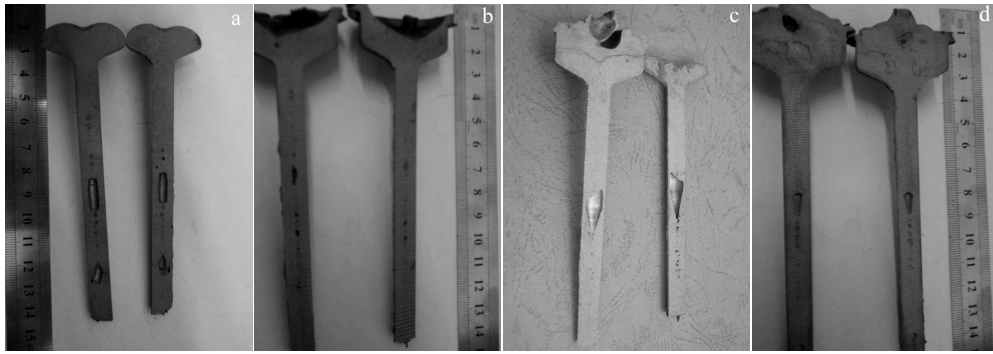


图 4 不同压力下制备工艺 I 的 TiAl 基合金排气阀

Fig.4 Exhaust valve I with various differential pressures: (a) 0 MPa, (b) 0.03 MPa, (c) 0.04 MPa, and (d) 0.05 MPa

利用工艺 II 制备的 TiAl 基合金排气阀铸件如图 5 所示。在保持工艺 I 的加料量的前提下，减小吸口直径对排气阀内部质量改善具有明显的作用。图 5 中的排气阀内部气孔尺寸减小，气孔的位置上移，分布规律也由集中变得分散。尽管减小吸口直径有利于改善排气阀内部质量，但是不可以继续降低吸口直径。当吸口直径低于 3 mm 时，合金熔体的流动通道缩小，流动难度加大，不利于成形完整的排气阀，进一步降

低吸口直径已经不可行。

利用工艺 III 制备的 TiAl 基合金排气阀铸件如图 6 所示。工艺 III 在工艺 II 的基础上进一步增加了合金熔体的质量，这种工艺下制得的排气阀件内部基本无明显孔洞，沿排气阀杆部轴线处的呈直线状排列的微小孔洞是杆状铸件常见的芯部线性显微缩孔，通过热等静压处理可以消除，不影响排气阀的正常使用。

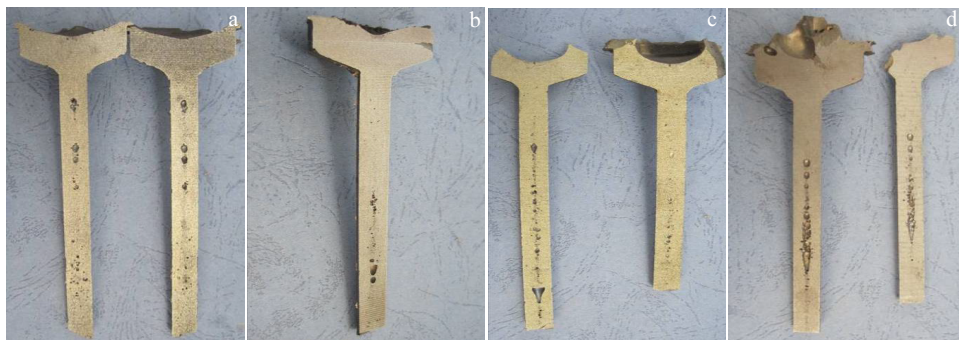


图 5 不同压力下制备工艺 II 的 TiAl 基合金排气阀

Fig.5 Exhaust valve II with various differential pressures: (a) 0 MPa, (b) 0.03 MPa, (c) 0.04 MPa, and (d) 0.05 MPa

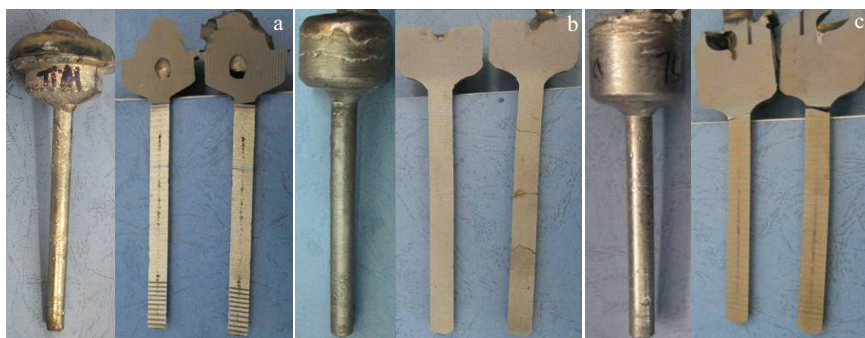


图 6 不同压力下制备工艺 III 的 TiAl 基合金排气阀

Fig.6 Exhaust valve III with various differential pressures: (a) 0.03 MPa, (b) 0.04 MPa, and (c) 0.05 MPa

2.2 缺陷产生及消除原因分析

2.2.1 缺陷种类与产生原因

铸件内部孔洞缺陷包括缩孔、气孔等。缩孔通常在铸件最后凝固的区域产生,由于凝固过程中液态金属体积的收缩得不到补缩而形成。缩孔的形状极不规则,表面粗糙,分散在铸件的热节处。分散度比较高的微小缩孔群也被称作缩松。气孔是浇注过程中合金熔体内部包裹的气体在凝固前没有排出,残留在铸件内部形成的孔洞。气孔表面光滑,无夹杂物质,形状近似于球形,分布位置随机。从排气阀内孔洞缺陷产生的位置及形貌来看,排气阀内部的孔洞可以被认定为是气孔。

产生气孔的气体的来源主要有^[11]: (1) 合金熔体与铸型发生反应,放出气体;(2) 合金熔体中溶解气体,凝固过程中因气体溶解度减小而析出;(3) 熔炼中合金熔体裹挟气体,凝固过程中气体来不及排出;(4) 铸型内气体残留,合金熔体快速充型后卷入铸件内。

从图 3 中可以看出,铸件表面光滑,无反应性气孔,并且合金钢模在 Ti 及 TiAl 基合金铸造工艺中得到广泛使用^[12],已被大量实验证实不会与合金熔体发生放气反应,因此可排除合金熔体与铸型产生反应气孔。此外,合金熔炼在高纯惰性气体氛围下进行,排除合金熔体内溶解可析出气体的可能,熔炼过程与充型过程中裹挟气体的可能性不能排除。考虑到铸件内气孔的特殊形状和合金熔体流动过程的特殊情况,真空吸铸状态下排气阀内部孔洞产生原因可能更为复杂。

综上所述,排气阀铸件内的小孔判断为卷入气孔,中部的大孔产生原因比较复杂,需进一步分析确定。

2.2.2 吸铸过程金属流态分析

在吸铸实验中,存在液流不连续、多股液流充填铸型的现象,铸件内部的气孔可能与合金熔体的这种流动状态有关。

根据伯努利方程^[13]:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$$

式中, z 为该点所在高度, p 为流体中某点的压强, ρ 为流体密度, g 为重力加速度, v 为流体该点的流速, const 是一个常量。流体的位能,压力能与动能之和为一固定常量。在真空吸铸过程中,上式中的压力主要取决于熔炼室内的气压,在气体进入模具之前气体压力的变化很小,熔池内各处所承受压力近似相等。流体外表面附着在坩埚侧壁上,不能自由流动,速度近似为 0,中轴线处流体可自由流动,速度最大。因此,附着在坩埚壁处的 TiAl 基合金熔体动能最低,位能最高;坩埚中心轴线处底部合金熔体动能高,位能最低。流动过程中,熔池液面高度由外侧向中心降低,流动过程形成凹坑。

图 7 为采用 Fluent 软件模拟的在 0.03 MPa 气体压力作用下,气液两相流流动过程。蓝色区域代表 TiAl 基合金熔体,红色区域代表气体,中间过渡的颜色区域代表不同比例的气液两相混合,如图 7a 所示。模型采用简单两相流模型,计算过程未考虑温度对流动的影响。

从模拟结果可以得出,在两相流的流动过程中,熔池中部的熔体流动最快,两侧的熔体流动缓慢,因此在熔池的中部会出现一个凹坑,如图 7b 所示;这个凹坑的深度随着流动的进行持续增加,如图 7c 所示;当凹坑延伸至吸口时,气体随同熔体一起进入型腔,并对已进入铸型的合金熔体有强烈的冲击作用,如图 7d 所示;后续过程中,合金熔体与气体一起进入铸型,形成复杂的气液两相流,如图 7e 所示。在实际实验过程中,熔池的变化过程与模拟结果相似。

图 8 为 3 种不同加料量情况下气体开始进入铸型坩埚中金属分布的情况。增加坩埚内金属的加料量会增加熔池的高度,减小坩埚内气体所占据的体积,增加第一股进入铸型的金属质量,延缓气体进入铸型。当加料量足够大,仅仅依靠第一股进入铸型的液流就可以充满型腔,这样形成的铸件内部不会有气孔产生。这种情况,对比前期探索实验方案与优化后的实验方案,可以得到比较好的验证。

吸口是连接熔炼室与模具的通道,气体在合金熔体充型的过程中经吸口进入模具室,形成气孔。吸口直径增大,增加了单位时间内进入铸型的合金熔体的质量,使得坩埚中心处流速较大的合金熔体更快速的进入铸型,坩埚内各部分熔体速度差别增大,气体进入铸型的时间更为提前。

本实验分别计算吸口直径为 3, 4, 5 mm 3 种情况下, TiAl 基合金熔体在 0.03 MPa 压差作用下,气体开始进入铸型的时间,如图 9 所示。随着吸口直径的

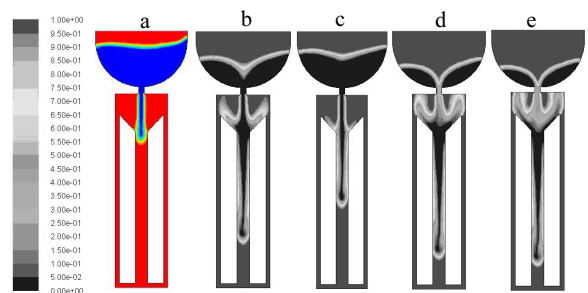


图 7 0.03 MPa 压差作用下 TiAl 基合金熔体不同时间的流动状态

Fig.7 Flow state of TiAl based alloy melt under 0.03 MPa differential pressure for different time: (a) 0.03 s, (b) 0.08 s, (c) 0.15 s, (d) 0.1 s, and (e) 0.2 s

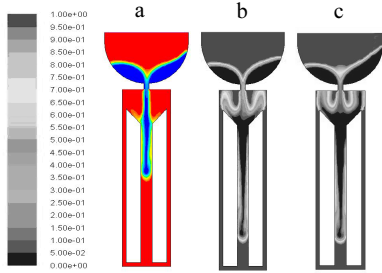


图 8 不同加料量在 0.03 MPa 压差作用下气体开始进入铸型时坩埚内金属分布

Fig.8 Metal distribution in crucible with different metal mass when gas enters the mold under 0.03 MPa differential pressure: (a) 100 g, (b) 200 g, and (c) 300 g

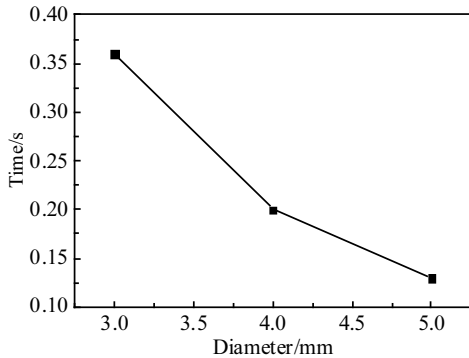


图 9 0.03 MPa 压差, 不同吸口直径条件下气体进入铸型的时间
Fig.9 Time of gas entering into mold with different diameters of the suction hole under 0.03 MPa differential pressure

增大, 合金熔体的流动更加紊乱, 气体更早进入铸型, 铸件内气孔产生的位置向下移动。结合试样 I 与试样 II 的结果比较, 在保证合金熔体顺利流动的前提下, 适当的减小吸口直径, 有利于控制气孔缺陷的尺寸与形貌。

在数值模拟和实验观测中都发现了多股液流充填铸型的情况, 并且多股液流之间伴随有气体进入铸型。为方便比较, 单股液流充填铸型的情况对探索气孔产生原因有着至关重要的作用。

在加料量为 100 g 的吸铸实验中, 当第一股液流进入铸型后立即关闭电源, 停止试验, 避免后续液流进入铸型。得到的排气阀如图 10 所示, 排气阀上半部出现尺寸非常大的空腔, 孔洞前端区域与图 3b 前端区域类似, 均呈圆锥形, 且内壁光滑; 空腔不封闭, 与外界连通, 与图 3 相比缺少过渡区域和菌部致密区域。对比前文的排气阀结构, 可以认为, 单股液流可成形排气阀部分结构, 如图 10 所示, 杆部中心位置和菌部位置的成



图 10 0.03 MPa 压差作用下单股液流吸铸成形排气阀
Fig.10 Exhaust valve formed by single strand liquid flow under 0.03 MPa differential pressure

形主要由后续液流来形成, 在真空吸铸过程中, 由于液流间隙有气体进入, 在排气阀内部形成气孔。

2.3 气孔缺陷产生原因

本部分根据数值模拟分析和试验验证对吸铸过程中铸件内气孔产生原因进行分析。由伯努利方程分析得出, 在未考虑温度分布状态下, 半球形坩埚内合金熔体在流动过程中速度分布有明显的差别。在实际过程中, 由于铜坩埚的冷却作用, 合金熔体的温度分布也有着很大的差别。熔池中部温度最高, 合金熔体流动性最好, 熔池边缘温度低, 合金熔体流动性差。这种不均匀的温度分布进一步导致了充型过程中合金熔体流动的不均匀性, 加剧了熔池液面的不稳定性, 在流动过程中, 液面中部会出现非常明显的“凹坑”。并且电弧本身对熔池有冲击作用, 熔池上的凹坑更容易形成, 如图 11a 所示。熔池中部合金熔体在气体压力、重力以及电弧的冲击作用下流入模具, 形成第一股液流, 如图 11b、11c 所示。先进入模具的熔体不足以形成完整的铸件, 坩埚内残余的熔体在电弧和气压的作用下继续充填模具, 形成后续液流, 并快速凝固; 由于液流流动的不连续性, 前期进入的气体和模具内部分残留的气体极易进入铸型并被封闭在熔体内, 随着液态金属的快速凝固形成气孔, 如图 11d、11e 所示。由于气体对金属的冲击作用, 气孔前端呈锥形; 如果充型的液流大于两股, 铸件内部则封闭了多股气体, 形成如图 3a 所示的竹节状的结构。

在排气阀内较大气孔的前方, 还存在一些细小、呈圆球状的小气孔, 如图 3c 所示。不同于大气孔的形成原因, 这些小气孔是第一股液流裹挟的气体而形成的。在熔炼过程中, 合金熔体在电极压力的作用下, 以电极作用点为中心旋转流动, 将气体卷入合金熔体中; 在吸铸时这部分气体随第一股液流充填铸型, 若没有及时排除, 在铸件内形成气孔。由于这部分卷入的气体远少于被液流交汇封闭住的气体, 因此这部分气孔的尺寸都比较小。

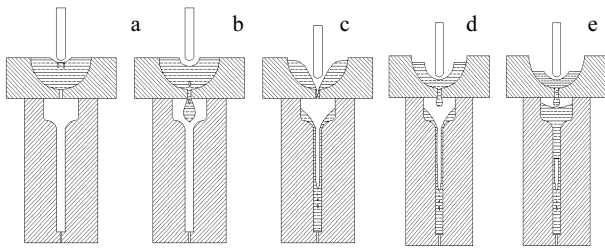


图 11 吸铸过程气孔产生示意图

Fig.11 Schematic of blowhole generation mechanism in vacuum suction casting process

3 结 论

1) 采用底漏式真空吸铸法可以制备出外观完整, 表面光滑的排气阀铸件, 但在铸件内部容易产生气孔等缺陷。

2) 增加坩埚内金属的质量、减小吸口直径的尺寸都可以减小气孔的产生。本实验选取 3 mm 直径的吸口和 300 g 加料量的组合最终吸铸出形状完整、内部组织致密的排气阀。

3) 气孔按产生原因分为两种: 一种是卷入性气孔, 在熔炼过程中, 合金熔体快速旋转, 将熔炼室内的气体卷入到金属液内, 充型时气体随合金熔体一起充填铸型, 并在冷却时析出, 形成气孔; 一种是由于液流不连续, 熔炼室气体和模具内残留的气体被后续的液流封闭在铸型内形成的气孔。通过选取合理的工艺参数, 可以消除气孔缺陷, 制备出内部质量良好的 TiAl 基合金排气阀件。

参考文献:

- [1] Huang Boyun (黄伯云). *Intermetallic of Titanium Aluminides* (钛铝基金属间化合物)[M]. Changsha: Central South University Press, 1998: 217
- [2] Leyens C, Peters M. *Titanium and Titanium Alloys*(钛与钛合

金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 125

- [3] Deng Zhihai(邓志海), Li Jinshan(李金山), Zhang Tiebang(张铁邦) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1356
- [4] Sauthoff G. *Intermetallics*[J], 2000, 8(9): 1101
- [5] Chen Yuyong(陈玉勇), Chen Yanfei(陈艳飞), Tian Jing(田 竞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2009, 38(3): 554
- [6] Su Yanqing(苏彦庆), Guo Jingjie(郭景杰), Jia Jun(贾 均) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2002, 31(4): 295
- [7] Su Yanqing(苏彦庆), Ye Xicong(叶喜聪), Guo Jingjie(郭景杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2009, 38(9): 1505
- [8] Su Yanqing(苏彦庆), Liu Weiqiang(刘卫强), Luo Liangshun(骆良顺) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(1): 115
- [9] Luo Liangshun(骆良顺), Han Baoshuai (韩宝帅), Wang Liang (王 亮) *et al. Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2013, 21(4): 76
- [10] Ye Xicong(叶喜聪), Su Yanqing(苏彦庆), Guo Jingjie(郭景杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2011, 40(2): 247
- [11] An Geying(安阁英). *Casting Formation Theory*(铸件形成理论) [M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 26
- [12] Zhou Yanbang(周彦邦). *The Introduction of Titanium Alloy Casting*(钛合金铸造概论)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 129
- [13] Lin Bonian(林伯年), Wei Zunjie(魏尊杰). *Transfer Principle of Metal Hot Forming*(金属热态成形传输原理)[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000: 25

Generation Reason and Elimination of Blowhole in Vacuum Suction Cast TiAl-based Alloy Exhaust Valve

Han Baoshuai, Luo Liangshun, Meng Xianyu, Xue Xiang, Wang Liang, Su Yanqing, Guo Jingjie
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The generation mechanism of blowhole defects in TiAl-based alloy exhaust valve during the vacuum suction casting process was analyzed. By comparing the morphology and distribution of void defects in TiAl-based alloy exhaust valve fabricated with different process parameters, the type of void defects was identified as blowhole. The reason for the blowhole formation was determined by calculating the fluid state of the alloy melt during the suction casting process with the aid of numerical simulation. By optimizing the casting parameters in the process, the blowhole can be ultimately eliminated.

Key words: TiAl-based alloy; vacuum suction casting; exhaust valve; blowhole; process parameters

Corresponding author: Luo Liangshun, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86413910, E-mail: luols@hit.edu.cn