

钛合金薄壁弯管熔模铸造工艺研究

张荣强, 王 琳, 刘鑫霞, 薄 煜, 潘煜曜, 葛学伟

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 通过对钛合金薄壁弯管的结构进行分析, 利用三维软件UG对其进行几何建模, 采用ProCAST软件对顶注式、雨淋式和底注式三种浇注方案熔模铸造工艺进行了数值模拟, 研究对比其在三种浇注方案下铸件的充型及可能出现缺陷的情况。得出在底注式浇注工艺方案下铸件的整体质量最优的结论, 并对其进行了试验验证, 获得无疏松和夹杂等缺陷的优质铸件。

关键词: 钛合金; 薄壁弯管; 浇注方案; 熔模铸造工艺; 数值模拟

钛合金因具有密度低, 比强度高, 膨胀系数小, 塑韧性好, 耐热性高以及优异的生物相容性等优点, 越来越广泛的应用于军用以及民生等领域, 例如, 在航空、航天、船舶、化工和医疗保健等^[1-2]。因钛合金活泼性较高, 不能使用砂型铸造工艺进行铸造, 只能通过石墨型和熔模精密真空铸造进行铸造。采用熔模精密真空铸造, 铸造出的钛铸件表面质量优异, 尺寸精度高, 同时能够实现大批量生产, 其正在被广泛使用^[3-5]。采用ProCast有限元分析软件分析的手段多样且模拟结果非常明显直观, 能够辅助工艺人员对铸件进行设计, 经过少量的试验完成工艺的优化, 提高产品的合格率, 缩短产品设计和试制周期, 降低成本^[6-10]。

作者以某型号钛合金弯管为研究对象, 通过利用ProCAST软件对顶注式、雨淋式和底注式三种浇注方案熔模铸造工艺进行了数值模拟分析, 并对底注式浇注方案进行了试验, 获得了高精度优质的钛合金薄壁弯管铸件。

1 试验材料及铸件结构分析

本次试验材料选用ZTC4, 材料的化学成分如表1所示。利用三维造型软件UG对其进行几何建模, 构建模型如图1所示。铸件外形轮廓尺寸为322 mm × 193 mm × 306 mm, 体积约为424 196 mm³, 质量为1.9 kg, 属于中小型薄壁结构件, 具有典型的尺寸精度要求高、易变形、热节多、补缩困难、容易产生夹渣、冷隔、疏松、气孔、缩裂等缺陷特征。铸件壁厚分布示意图如图2所示, 铸件法兰位置和凸台位置壁厚较大, 最厚处壁厚为25 mm, 浇注时容易产生铸造缺陷, 其余部位壁厚均为3 mm, 铸造时容易产生浇不足的风险。

作者简介:

张荣强(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为轻质合金铸造模拟研究。电话: 13483413135, E-mail: 905014177@qq.com

通讯作者:

王琳, 女, 硕士。电话: 18832023705, E-mail: 272548050@qq.com

中图分类号: TG146.2;
TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)
10-1447-06

收稿日期:

2023-09-18 收到初稿,
2023-11-01 收到修订稿。

表1 ZTC4化学成分表

Table 1 Chemical composition of ZTC4

w_B/%

主要元素									杂质含量≤	
Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	其他元素	
									单一	总和
基体	6.1	3.8	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40



图1 弯管几何模型

Fig. 1 Geometric model of bending pipe

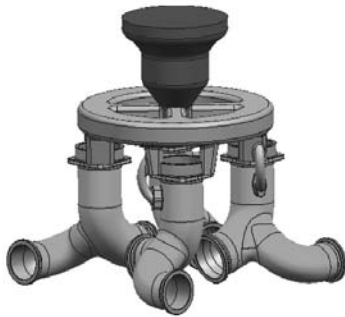


图2 铸件壁厚分布示意图

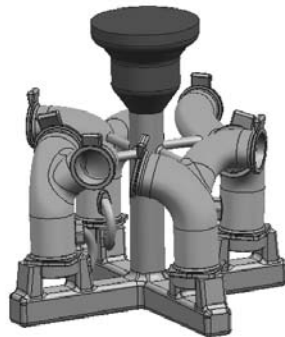
Fig. 2 Schematic diagram of casting wall thickness distribution



(a) 顶注式浇注系统



(b) 雨淋式浇注系统



(c) 底注式浇注系统

图3 浇注工艺方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pouring process scheme

3 数值模拟

利用Procast软件对以上三种浇注系统进行模拟仿真,分析铸件在不同浇注系统下的充型性能及可能存在的铸造缺陷。设置铸件的浇注温度为 $1\ 750\ ^\circ\text{C}$,型壳预热温度为 $450\ ^\circ\text{C}$,型壳与铸件的换热系数为 $20\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,合金的热物性参数如图4所示。

3.1 充型分析

充型指的是液态合金填充铸型的过程。图5-图7为

2 浇注工艺方案

根据对铸件进行的结构分析结果,可知铸件薄壁及法兰位置为关键部位,因此在铸造时采用竖直摆放方式。这样既可以保证弯管圆周方向具有较高的尺寸精度,又可以保证合金液的充型流动和制备型壳的均匀性,同时可以使其不发生严重的变形且能具有优良的组织性能。

根据该铸件的壁厚分析和熔模铸造的特点,该铸件浇注系统的设计方案大致可分为顶注式和底注式,考虑到铸件为薄壁结构件,以及高温钛合金在充型的过程中流动性较差的特点,设计普通顶注式和雨淋式浇注系统,雨淋式浇注系统充型过程更加平稳。浇注工艺方案具体结构如图3所示。

顶注式和雨淋式浇注系统具有内浇道受热轻,界面反应弱和易充型等优点,在凝固时通常为自下而上的顺序凝固方式,在一定程度上内浇道起到补缩的作用,但容易造成金属液飞溅,对型壳冲刷严重等缺点。相比之下,底注式充型具有充型平稳和型腔中的气体容易顺序排出等优点。但通常不按照顺序凝固的方式进行凝固,内浇道受热严重,导致晶粒粗大和疏松缩孔等缺陷。

三种不同浇注系统的充型模拟结果。

由以上充型模拟结果可得:①顶注式浇注系统刚开始沿铸件形壁注入,左右两端铸件充填速度不一致,随着充型的进行,左前端和右后段铸件均充填完毕,但右前段和左后段铸件均未充填完毕;造成此现象的原因可能是浇注位置未在浇口杯中心,充型过程不平稳。另一方面,浇道和浇口杯有暗冒口的作用,对铸件能够进行及时补缩。②雨淋式浇注系统刚开始也沿铸件型壁注入,充型过程也不平稳,对形壁存在

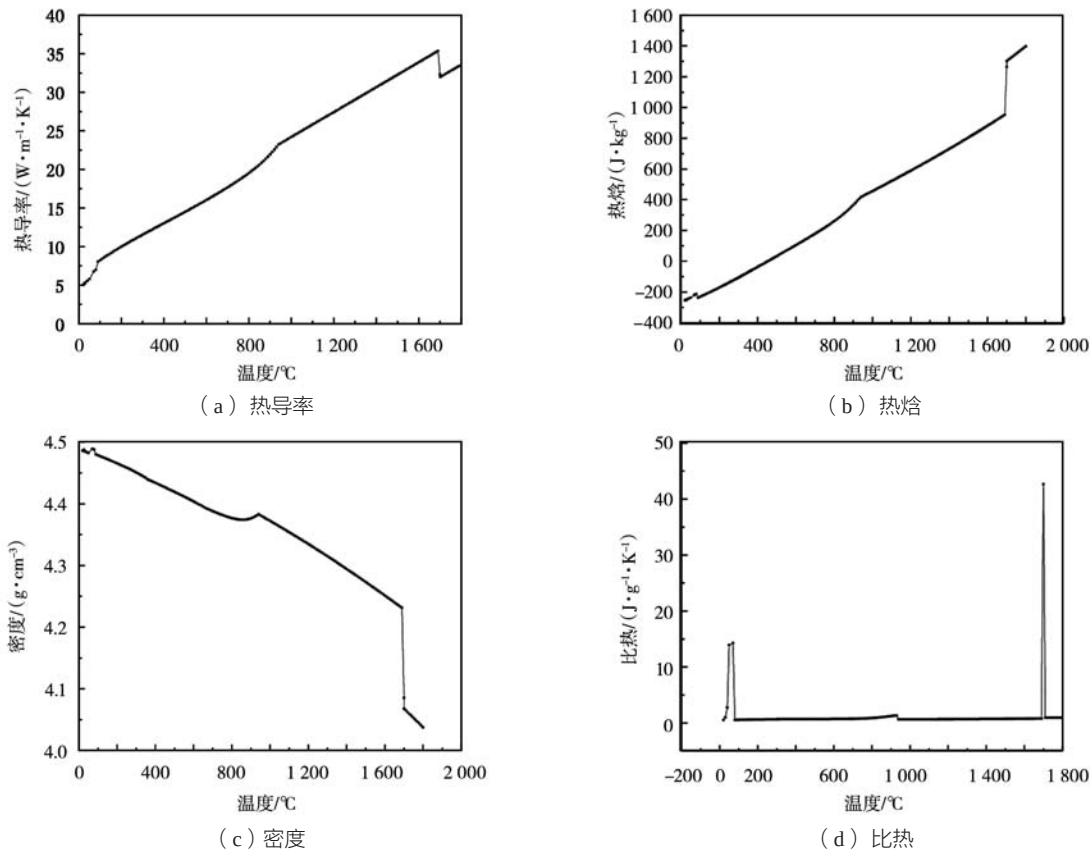


图4 ZTC4合金的热物性参数
Fig. 4 Thermophysical parameters of ZTC4 alloy



图5 顶注式浇注系统充型模拟结果
Fig. 5 Filling simulation results of top pouring pouring system

冲刷作用，但随着充型的进行，充型过程逐渐平稳。
③底注式浇注系统先充型浇道，随着充型的进行，金属液平缓地进入铸件型壁，对型腔基本没有冲刷作用，并且有利于铸件气体的排出。

3.2 孤立液相区分析

孤立液相区能定量地预测铸件缩孔和缩松缺陷，图8为不同浇注系统下铸件孤立液相区分布示意图。
由图8可见，在不同浇注系统下铸件孤立液相区位置保持一致，均在凸台位置存在孤立液相区。实际铸

造时，凸台位置可能产生缩孔或缩松缺陷。

3.3 疏松分析

图9-图11分别为不同浇注系统下铸件疏松分布示意图。

由图9-图11可知，在疏松判比为3%时，在底注式浇注系统下铸件疏松体积最小，为0.57 cm³；在雨淋式浇注系统下铸件疏松体积最大，为6.13 cm³；在顶注式浇注系统和雨淋式浇注系统下铸件疏松的位置和体积基本一致。



图6 雨淋式浇注系统充型模拟结果

Fig. 6 Filling simulation results of rain shower pouring system



图7 底注式浇注系统充型模拟结果

Fig. 7 Filling simulation results of bottom pouring system



图8 不同浇注系统下铸件孤立液相区分布示意图

Fig. 8 The distribution diagram of isolated liquid zone of castings under different pouring systems

综上所述，选用底注式作为浇注系统是最合理的。

4 试验验证

根据模拟选用的试验方案，对底注式浇注工艺方案进行了蜡模模具设计，利用蜡模模具进行压制蜡模，然后进行模组组焊、型壳制备、脱蜡焙烧、熔炼

浇注、清壳切割、热处理、精修打磨、检验和包装发货等工序。铸件经X光检查后内部无裂纹和缩松等缺陷，如图12所示，铸件实物如图13所示，全部满足相关技术协议的规定。采取上述工艺方案浇注后，获得了优质的弯管铸件。



图9 顶注式浇注系统疏松模拟结果

Fig. 9 Simulation results of porosity in top pouring system

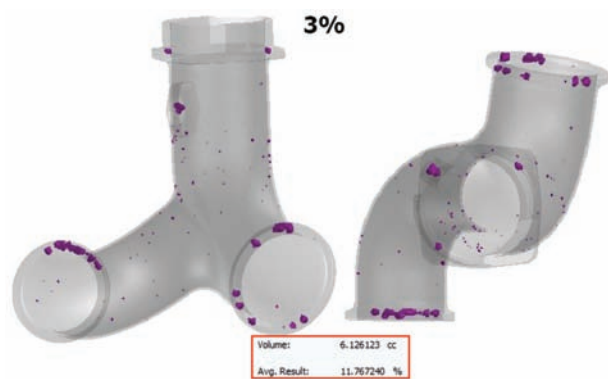


图10 雨淋式浇注系统疏松模拟结果

Fig. 10 Simulation results of the rain pouring system

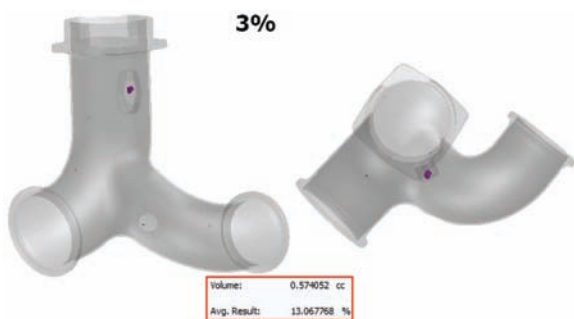


图11 底注式浇注系统疏松模拟结果

Fig. 11 Simulation results of porosity in bottom pouring system



图12 铸件X光示意图

Fig. 12 X-ray diagram of casting



图13 铸件实物图

Fig. 13 Physical picture of casting

5 结论

利用三维造型软件UG对弯管进行几何建模，通过ProCast软件对三种铸造工艺方案进行模拟分析，对铸件进行了充型分析、孤立液相区分析和疏松分析，得到在底注式浇注工艺方案下铸件的质量最优，并通过试验对其进行了验证，得到无疏松和夹杂等缺陷的铸件。

参考文献:

- [1] 游涛, 吴鹏, 姚谦, 等. 一种钛合金镜筒的石墨型离心铸造工艺 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 434-436.
- [2] 苏鹏, 刘鸿羽, 赵军, 等. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1401-1404.
- [3] 谢华生, 刘时兵, 苏贵桥, 等. 我国钛合金精铸件铸造技术的发展及应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (增刊1): 462-464.
- [4] LINDRANI S, TAMIRISAKANDLA S M, MIRACLE D B, et al. Micro-structural effects on the mechanical behavior of B-modified Ti-6Al-4V alloys [J]. Acta Materialia, 2007, 55 (15): 4983-4993.
- [5] 南海, 谢成木, 魏华胜, 等. 大型复杂薄壁类钛合金精铸件的研制 [J]. 中国铸造装备与技术, 2001 (2): 7-9.

- [6] 吴士平, 张军, 徐琴, 等. 钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究 [J]. 中国体视学与图像分析, 2010 (2): 134-140.
- [7] 刘其涛. Ti48Al2Cr2Nb合金铸件应力和变形的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 朱勇, 龚伟, 白朝中, 等. 基于ProCAST的进气管砂型铸造的充型凝固数值模拟 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (8): 1859-1862.
- [9] 袁焕龙, 曹喜彪, 黄挺挺. 铝合金缸盖倾转铸造数值模拟及优化研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (10): 1068-1071.
- [10] 江长, 向思雨. 基于Pro CAST的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (5): 40-43.

Research on Investment Casting Process of Thin-Wall Bending Tube of Titanium Alloy

ZHANG Rong-qiang, WANG Lin, LIU Xin-xia, BO Yu, PAN Yu-yao, GE Xue-wei
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract:

Through analyzing the structure of the titanium alloy thin-wall bend pipe, 3D software UG was used to conduct geometric modeling, and ProCAST software was used to numerically simulate the investment casting process of three pouring schemes, top pouring, rain pouring and bottom pouring, to study and compare the filling and possible defects of the castings under the three pouring schemes. It concluded that the overall quality of castings under the bottom casting process was the best, and it was verified by experiments, and the high-quality castings without porosity and inclusion were obtained.

Key words:

titanium alloy; thin-wall bend pipe; pouring scheme; investment casting process; numerical simulation
