

消除大尺寸石墨型铸造钛合金铸件中线性缺陷的工艺方法探究

丁 雪, 张 洋, 吴东辉, 张 凯, 白雪松

(航天海鹰(哈尔滨) 钛业有限公司, 黑龙江哈尔滨 150000)

摘要: 本研究旨在解决大尺寸石墨型铸造钛合金铸件中常见的线性缺陷问题。结合工艺优化和数值模拟, 探索了一种消除线性缺陷的有效工艺, 即通过改变金属液流路径, 避免由于金属液紊流引起的冷隔等缺陷, 最终达到消除线性缺陷的目的。本研究结果对于相关领域的应用具有实际意义和指导价值, 为提高铸件质量、降低废品率和延长使用寿命、推动大尺寸石墨型铸造钛合金技术的发展提供了重要参考。

关键词: 大尺寸石墨型铸造; 钛合金; 线性缺陷; 数值模拟

钛合金凭借其高强度、低密度和良好的耐腐蚀性等优异性能, 被广泛应用于航空航天、船舶、能源和汽车等领域^[1-5]。随着航空航天和船舶等领域的发展, 对大型复杂钛合金铸件的需求也日益增加。石墨型铸造技术可以满足生产大型铸件的要求, 减少了焊接和加热处理的次数, 提高了制造效率。因此钛合金石墨型铸造成为一种常用的制造大尺寸钛合金铸件的工艺方法^[6-10]。然而, 大尺寸石墨型铸造钛合金在其铸造过程中经常会遇到线性缺陷问题, 如图1所示的铸件, 在铸造过程中就常常出现线性缺陷。线性缺陷通常是指在材料或结构中由于材料内部的缺陷、裂纹或不均匀性而导致的线性应力集中现象。而本文提到的这些线性缺陷通常以冷隔的形式出现, 缺陷分布见图2所示, 图3为产品排除缺陷后的示意图, 这种线性缺陷严重

作者简介:

丁雪(1997-), 女, 助理工程师, 主要从事钛合金及高温合金铸造工艺研究工作。电话: 19917625499, E-mail: dingxuehit@163.com

通讯作者:

吴东辉, 男, 高级工程师。电话: 15045089002, E-mail: wudonghui56@163.com

中图分类号: TG146.2;
TG241

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)
10-1435-05

收稿日期:

2023-09-12 收到初稿,
2023-12-01 收到修订稿。

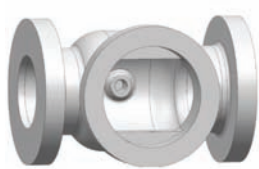


图1 阀体铸件

Fig. 1 Valve body casting

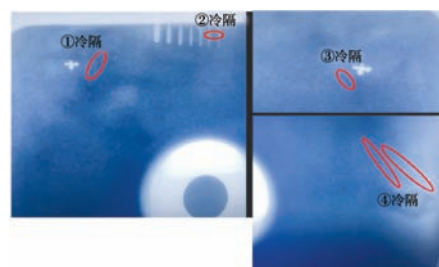


图2 铸件线性缺陷分布图

Fig. 2 Distribution of linear defects in castings



图3 铸件排缺后示意图

Fig. 3 Schematic diagram of castings after defect removal

影响铸件的质量和可靠性。线性缺陷会导致零部件的强度降低、断裂风险增加，并可能引发零部件在使用过程中的失效。因此为解决大尺寸石墨型铸造钛合金中存在的线性缺陷问题，从而提高铸件的质量水平，降低零部件在使用过程中的失效风险，延长其使用寿命，有必要探究大尺寸石墨型铸造钛合金铸件中线性缺陷发生的可能原因，从而有效避免该类问题，为相关行业的发展做出积极贡献。

为此本文将通过对铸件结构及铸造工艺的分析，探究该类大型钛合金铸件产生线性缺陷的原因，并通过改进浇注系统设计及工艺仿真优化及试验验证的方式，验证消除该类大尺寸石墨型铸造钛合金铸件中线性缺陷的工艺方法是否可行。

1 铸件结构及铸造工艺分析

本试验中阀体材料选用ZTi60合金，表1是合金的化学成分。

通过计算，得出相关物性参数如图4所示。

阀体铸件的结构如图1所示，铸件结构较为复杂，整体为空腔结构，轮廓尺寸为450 mm × 310 mm × 290 mm，铸件理论重量为46 kg。以往这类阀体铸件采用如图5所示的侧注式浇注系统，为保证铸件成形，特设计三股内浇道；为避免在厚大法兰处产生大体积缩孔，在法兰处设置冒口，以便消除缩孔缺陷；为减少气孔的产生，设置四个排气孔，以便气体顺畅流出。金属液从铸型顶部进入，经过直浇道流经横浇道后分流进入三股内浇道，随后金属液进入石墨型腔，充型结束。但铸件成形后经无损检测分析发现，铸件内部存在多处线性缺陷。

为探究线缺陷可能产生的原因，结合ZTi60合金的化学成分以及热物性参数等，利用华铸CAE数模模拟软件，对原浇注系统下的阀体铸件的充型过程进行数值模拟。图6为阀体铸件的网格划分示意图，铸件部分的网格尺寸为5 mm，浇注系统部分网格尺寸为8 mm，总的网格数量为96 736个。采用重力浇注，浇注温度设

表1 ZTi60合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of ZTi60 alloy

主要成分					杂质成分					w _B /%
Ti	Al	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	
基体	3.46	2.02	1.22	0.020	0.016 0	0.010 0	0.003 1	0.001 4	0.104	

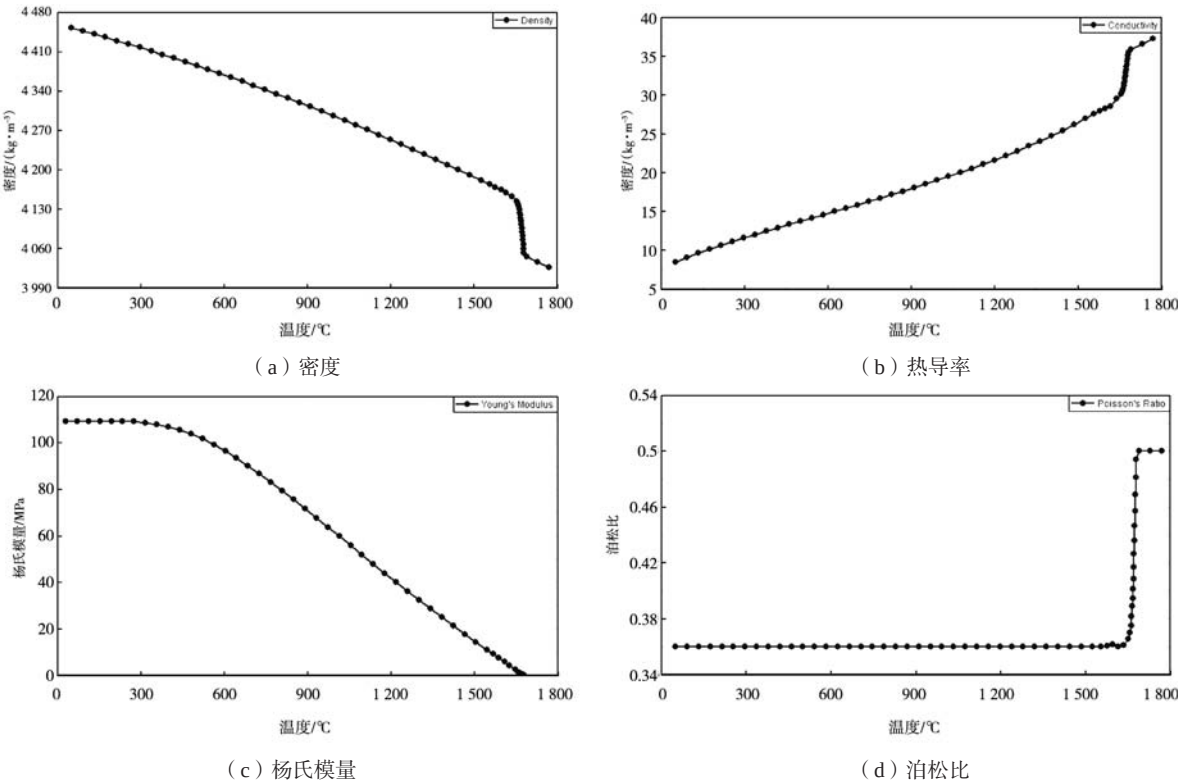


图4 ZTi60的物性参数
Fig. 4 Physical parameters of ZTi60

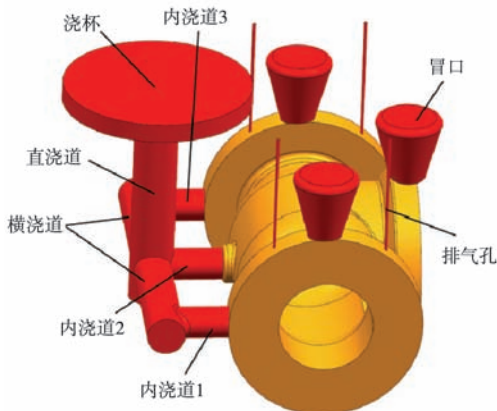


图5 阀体的原浇注系统

Fig. 5 Original pouring system of valve body



图6 阀体的网格划分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of grid division for valve body

为1 700 ℃，浇注速度为7 kg/s。铸造方式采用石墨型铸造，石墨型壳厚度设为23 mm，型壳预热温度为250 ℃，铸型与金属液之间的换热系数设定为450 W/(m²·℃)。

阀体的充型过程如图7所示。可以看出，浇注开始时，金属液从浇杯进入直浇道、横浇道，经横浇道分流进入三股内浇道，约在 $t=0.7$ s时金属液进入型腔； $t=2$ s时，金属液开始进入铸件两端的法兰，此时流经三股内浇道的金属液完全隔离开来，在 $t=3$ s时，三股

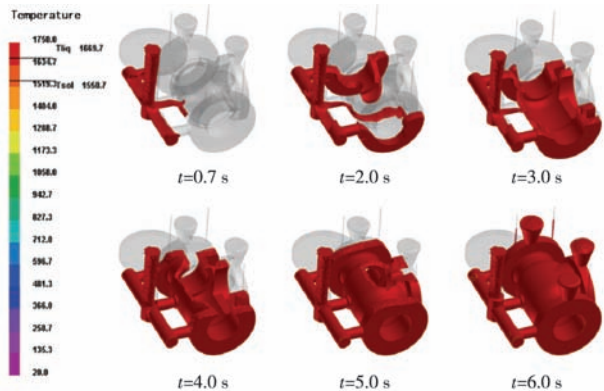


图7 原浇注系统的充型过程

Fig. 7 Filling process of the original pouring system

金属液汇合，开始整体逐层向上充填；直到 $t=6$ s时，金属液完全充满型腔。整个充填过程较为平稳。此时，铸件没有出现明显的温度梯度，无浇不足风险。

按照此方案铸造出的阀体铸件的线缺陷多存在于内浇道2与铸件连接口的上部区域。初步推测是该处金属液流速过大、出现紊流导致的线性缺陷。为此，需要特殊分析一下该部位的金属液流速情况，如图8所示。从图8中可以看出，内浇道2处的金属液流速明显高于内浇道1和3见图5中有标注处的金属液流速，而金属液高速冲击充填型腔时，可能会造成金属液与石墨铸型壁之间的冷却速度不均匀。这种不均匀冷却会导致铸件收缩不均匀，最终导致耦合缩孔类的线性缺陷。



图8 原浇注系统中金属液流速

Fig. 8 Flow rate of molten metal in the original pouring system

由于铸件产生的线性缺陷尺寸较大，修复难度大，一方面由于焊接修复降低了产品本身质量；另一方面延长生产周期的同时也提高了加工成本。为此，需要进行工艺优化，尽量减小甚至消除该处存在的线性缺陷，保证铸件高质量成形。

2 铸造工艺仿真优化及试验验证

针对以上分析的线性缺陷，对阀体铸件的浇注系统进行优化设计。由于是内浇道2处金属液流速过大导致的线性缺陷，因此，改进方法一是加大内浇道2的浇道直径，减小金属液流速；方法二是直接去除内浇道2，其他不变。如果此方案可行，一方面提高了铸件的金属利用率，降低生产成本；另一方面也可验证金属液流速过大对铸件成形的影响。故本研究对方法二进行探究。

对优化后的浇注系统进行数值模拟计算，优化的浇注系统充型过程如图9所示，金属液流速如图10所示，从图中可以看出，两个内浇道的金属液流速几乎是同步的，充填较为平稳。 $t=1$ s时，金属液从内浇道进入阀体两端的厚大法兰； $t=3$ s时，流经法兰两端的金属液完全汇合，金属液流动比较顺畅，后续实现逐层充填，整体充填过程平稳。

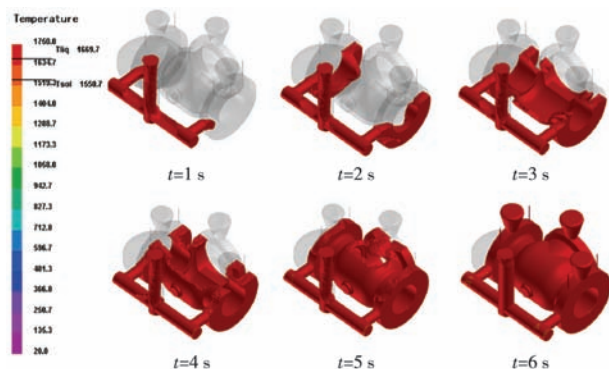


图9 优化浇注系统的充型过程

Fig. 9 Filling process of optimized pouring system

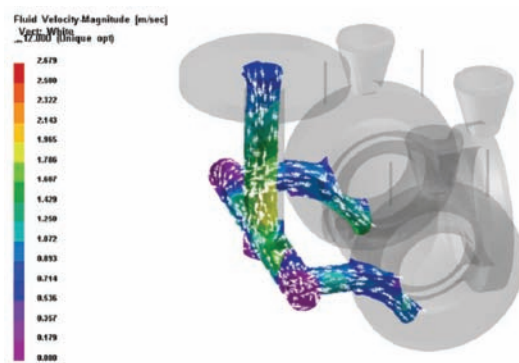


图10 优化浇注系统中金属液流速

Fig. 10 Flow rate of molten metal in optimized pouring system

从凝固仿真过程可以发现，铸件壁薄且远离浇冒系统的位置先进行冷却，而铸件厚大部位及浇冒口附近金属液降温速度慢，最后凝固，如图11所示。铸件整体基本满足顺序凝固的条件，凝固过程中出现的多数孤立液相区均处在铸件厚大部位，且周围温度较高，面积较小。随着凝固的推进，绝大多数孤立液相区得到补缩，浇注系统能够有效保证铸件完整成形，

浇不足风险较低。

由于阀体中存在较为厚大的法兰，所以在阀体上设置了冒口，以改善铸件的补缩条件，消除铸件中的缩孔缺陷。通过仿真模拟发现铸件的缩孔分布状态如图12所示，利用模拟计算出冒口处缩孔1的体积为 3.45 cm^3 ，缩孔2的体积为 1.23 cm^3 。从图中可以看出，缩孔2的体积是铸件本体中最大的缩孔，而缩孔2可以

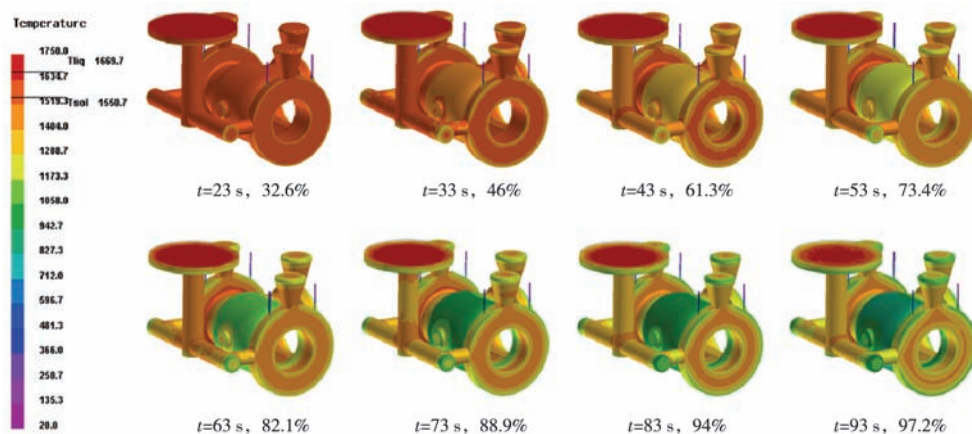


图11 优化浇注系统的凝固过程

Fig. 11 Solidification process of optimized pouring system

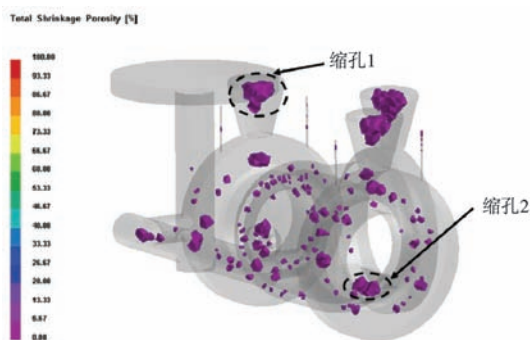


图12 优化浇注系统下铸件缩孔的分布状态

Fig. 12 Distribution of shrinkages in castings under optimized pouring system

通过热等静压的方式进行消除，由于缩孔体积均较小，也不会铸件热等静压时产生不可控的局部变形。

基于以上分析，选择优化的浇注系统进行了浇注试验，成形后的铸件如图13所示，表面无严重缺陷。经无损检测后的X光底片如图14所示，底片未显示超标缺陷，冷隔等线性缺陷完全消除，产品内部质量良好。

3 结论

(1) 浇道直径小、流程短，导致金属液流动速度过快引起紊流，而与之连接的壁厚又小，就会在铸件



图13 成形阀体铸件

Fig. 13 Formed valve body casting

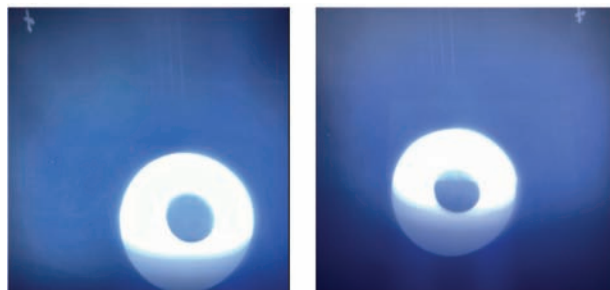


图14 成形阀体铸件内部质量示意图

Fig. 14 Schematic diagram of internal quality of formed valve body castings

表面形成冷隔和流痕，最终铸件形成线性缺陷。

(2) 在保证成形的情况下，去除铸件薄壁处连接的浇口，可以消除线性缺陷，有效提高铸件的成形质

量。

(3) 数值模拟结果与实际试验浇注结果差距较小，可以有效地指导铸造的生产工作。

参考文献：

- [1] NICHOLSON J W. Titanium alloys for dental implants: a review [J]. Prosthesis, 2020, 2 (2): 100–116.
- [2] FASHU S, LOTOTSKYY M, DAVIDS M, et al. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys [J]. Mater. Design, 2020, 186: 108295.
- [3] DUTTA B, (SAM) FROES F H. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys [J]. Met. Powder Rep., 2017, 72(2): 96–106.
- [4] 李重阳, 白志宇, 刘时兵, 等. 钛合金铸造用支撑座砂芯改性工艺研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (8): 980–985.
- [5] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology [J]. Acta Mater., 2013, 61 (3): 844–879.
- [6] 赵军. 钛合金石墨型铸造技术国内外发展现状及趋势 [C]//2019中国铸造活动周论文集, 2019.
- [7] 王彦鹏, 伞晶超, 姚谦, 等. 钛合金泵体石墨型铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2014, 63 (8): 828–830.
- [8] 余国康, 范李鹏, 王宝兵, 等. 大型薄壁钛合金头罩铸造工艺设计及应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (8): 918–920.
- [9] 刘艳磊, 孟磊, 周含宣. 大型复杂钛合金底座铸造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2022 (19): 69–72.
- [10] 范李鹏, 王宝兵, 姬艳硕, 等. 大型复杂圆台型钛合金铸件的铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2): 182–184.

Exploration of Process Method to Eliminate Linear Defects in Large-Size Graphite Mold Cast Titanium Alloy Castings

DING Xue, ZHANG Yang, WU Dong-hui, ZHANG Kai, BAI Xue-song
(Aerospace HIWING (Harbin) Titanium Industry Co., Ltd., Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract:

This study aims to address the common linear defects in large-sized graphite cast titanium alloy castings. Combining process optimization and numerical simulation, an effective process for eliminating linear defects was explored, which involved changing the flow path of the metal liquid to avoid defects such as cold shuts caused by turbulent flow of the metal liquid, ultimately achieving the goal of eliminating linear defects. The results of this study had practical significance and guiding value for the application in related fields, providing important reference for improving casting quality, reducing scrap rate, extending service life, and promoting the development of large-sized graphite cast titanium alloy technology.

Key words:

large-sized graphite mold casting; titanium alloy; linear defects; numerical simulation