

钛合金壳体铸件石墨陶瓷复合型铸造工艺研究

张 洋¹ 梁润孜² 于宗溟¹ 王 磊² 王 亮³ 吴东辉¹ 苏彦庆³ 刘振军¹

[1.航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司; 2.蓝箭航空间科技股份有限公司;
3.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院]

摘 要 为满足钛合金壳体铸件对流道表面品质的要求,选用石墨陶瓷复合铸型来保证铸件流道表面品质。同时,利用 ProCAST 铸造仿真软件对铸件浇注系统进行优化设计,避免大尺寸缩孔缺陷的产生,以提升铸件内部品质,并结合软件计算及理论分析,阐明陶瓷材料提升铸件流道表面品质的机理。

关键词 钛合金铸件;石墨陶瓷复合铸型;浇注系统;铸造仿真

中图分类号 TG146.2⁺3 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Casting Process of Graphite Ceramic Composite Mold for Titanium Alloy Shell Castings

Zhang Yang¹, Liang Runzi², Yu Zongming¹, Wang Lei², Wang Liang³, Wu Donghui¹,
Su Yanqing³, Liu Zhenjun¹

[1.Aerospace Hiwing (Harbin) Titanium Industry Co., Ltd.; 2.Land Space Technology Co., Ltd.;
3.School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology]

Abstract: In view of the technical difficulties that the titanium alloy shell castings had high requirements for the surface quality of the runner, the graphite ceramic composite mold was selected. Meanwhile, the casting simulation software was utilized to optimize the design of gating system to avoid the generation of large-scale shrinkage defects, and to improve the internal quality of castings. Moreover, the mechanism that ceramic materials improve the surface quality of castings was clarified combined with software calculation and theoretical analysis.

Key Words: Titanium Alloy Castings, Graphite Ceramic Composite Mold, Gating System, Casting Simulation

钛及钛合金具有比强度高、耐高温、耐腐蚀等一系列特点,在航空航天、船舶工程等得到广泛应用。为了

收稿日期:2021-09-23;修改稿收到日期:2021-11-10

基金项目:黑龙江省重点研发计划资助项目(GY2021ZB0194)

第一作者简介:张洋,男,1991 年出生,工程师,哈尔滨(150029),E-mail:hyht201@casic.com.cn

引用格式:张洋,梁润孜,于宗溟,等. 钛合金壳体铸件石墨陶瓷复合型铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 581-1 584.

ZHANG Y, LIANG R Z, YU Z M, et al. Casting process of graphite ceramic composite mold for titanium alloy shell castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 581-1 584.

内部夹杂缺陷数量较未水洗铸件下降了 20%~40%,
因此型壳水洗的烘干工艺适用于生产。

3 结 语

(1)采用面层为稀土粉+锆胶+锆砂,背层是锆粉+硅溶胶+莫来砂(1 号胶系)制作的型壳不适合进行水洗,而采用面层为稀土粉+中性胶+锆砂,背层为莫来粉+硅溶胶+莫来砂(2 号胶系)制作的型壳可以进行水洗。

(2)型壳水洗后的最佳烘干工艺为随炉升温至 200℃、保温 1 h。

(3)型壳水洗优化后,铸件表面和内部质量明显提升,表面和内部缺陷数量平均下降 20%以上。

参 考 文 献

[1] 王新英,黄东,赵嘉琪,等.钛合金熔模精密铸造中常见缺陷及其预防措施[J].材料工程,2003(z1):235-242.
[2] 朱伟杰,潘玉洪.熔模铸件砂眼缺陷分析[J].铸造技术,2020,41(3):267-272.
[3] 中国铸造协会.熔模铸造手册[M].北京:机械工业出版社,2000.
[4] 谢成木.钛及钛合金铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.
[5] 沈昀,郑功,冯辰铭,等.熔模精密铸造技术研究进展[J].精密成形工程,2019,11(1):54-62.
[6] 郭馨,吕志刚,李培杰.钛合金熔模铸造二醋酸锆-氧化钪型壳的溶解及影响[J].稀有金属材料及工程,2016,45(2):303-308.
[7] 许云祥,鲁蕊,李磊,等.硅溶胶的胶团结构和干燥凝胶过程[J].特种铸造及有色合金,2004(2):52-54.

(编辑:刘卫)

拓展其应用范围,在普通合金的基础上,通过降低间隙元素的含量,得到了超低间隙元素(Extra low interstitial, ELI)钛合金,在强度降低的同时韧性得到显著提高,被广泛应用于低温工程、医疗、海洋工程等重要领域^[1~3]。

TC4ELI 钛合金就是在 TC4 合金的基础上,通过控制间隙元素 C、N、O 及杂质元素 Fe 的含量而获得的^[4]。图 1 为某商业航天装备低温使用的关键构件——钛合金壳体铸件,其材质为 TC4ELI 钛合金。该铸件的流道具有流体力学型面,为保证壳体的设计性能,对表面品质要求很高。由于结构限制,只能通过铸造方法实现近净成形,同时要避免出现表面缺陷,一旦出现超标缺陷,将无法进行修复。采用石墨陶瓷复合型工艺方法,获得了内部和表面品质、尺寸精度、理化性能均满足要求的壳体铸件。

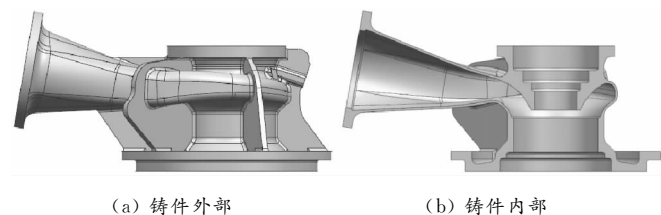


图 1 钛合金壳体铸件

Fig.1 Titanium alloy shell castings

1 铸造工艺方案

1.1 方案选择

钛合金壳体铸件轮廓尺寸为 585 mm×386 mm×291 mm,流道为不规则变截面,基本壁厚仅为 4 mm,流道的表面粗糙度要求不高于 3.2 μm 。结合铸件结构特点,可采用熔模铸造和机加石墨型两种工艺,熔模铸造需要分别制备金属模具和水溶型芯,虽能保证流道表面粗糙度,但蜡模的尺寸精度较难保证,在成本及周期上不具有优势。机加石墨型工艺采用的是电极石墨材料,通过机械加工再组合装配成铸型的方式,优点是分型多样,可实现铸型的快速制备,缺点是石墨材料导热速率快,退让性差,铸件表面易出现冷隔、流痕、裂纹等缺陷^[5,6],严重影响铸件流道表面品质。针对这个问题,采用石墨陶瓷复合铸型,外模选用电极石墨,内芯选用陶瓷材料,陶瓷的导热速率远低于石墨^[7],可极大地降低铸型激冷效应,这样就可以保证铸件流道表面粗糙度,同时,陶瓷还具有易溃散性,相较于石墨,浇注后铸型的清理难度大大降低,有利于保证流道的表面品质。

1.2 浇注工艺设计

根据铸件的结构特点,采用底注式浇注系统,通过均匀分布的筋板实现铸件的完整充型。使用 ProCAST

铸造仿真软件对浇注系统进行模拟,发现有缩孔,主要集中在出口法兰端面、上法兰端面、中间法兰 3 处,见图 2。受铸件本身结构限制,铸件在充型过程是先流经窄截面区,再充型厚截面区,导致铸件在厚大法兰区域形成独立热节,凝固时形成缩孔。

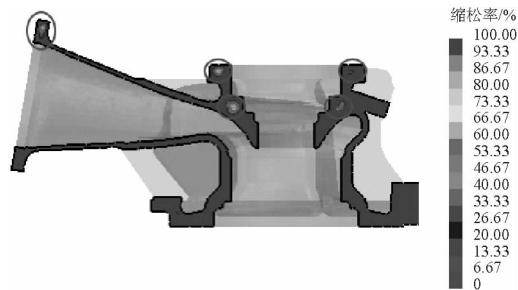


图 2 优化前铸件缩孔位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the position of shrinkage cavities in the casting before optimization

针对上述情况,对浇注系统进行优化,在出口法兰处设置冒口,同时增设工艺筋,形成更稳定的铸件结构,提高充型品质的同时可减小出口法兰的变形倾向;从铸件上、中法兰结构看,中法兰的缩孔处为独立的热节区,即使在上法兰处设置冒口也无法完全解决中法兰处的缩孔问题,因此需要增设补缩通道,使上法兰处的冒口可以对中法兰进行补缩,同时在靠近浇口处增加充型通道,使金属液能实现快速充型,见图 3,补缩通道及充型通道在热压之后通过机加工方式去除。优化后的浇注系统见图 4。

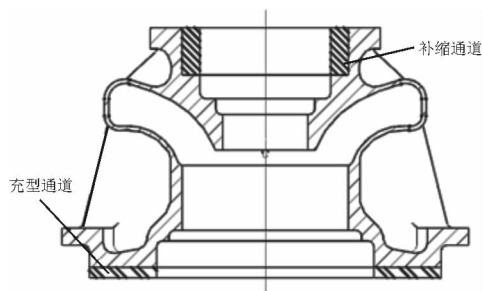


图 3 铸件充型和补缩通道示意图

Fig.3 Schematic diagram of casting filling and feeding channel

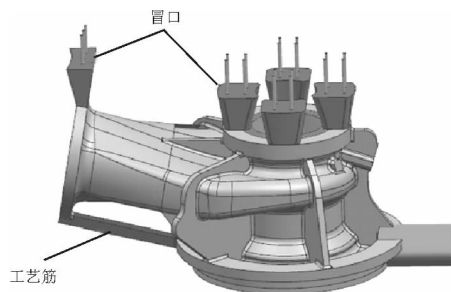


图 4 优化后壳体铸件浇注系统

Fig.4 Gating system of shell castings after optimization

对优化后的浇注系统重新进行模拟仿真,边界条件

与优化前相同,结果发现上述 3 处的缩孔缺陷完全集中在冒口处,铸件中的缩孔缺陷得以消除,见图 5。

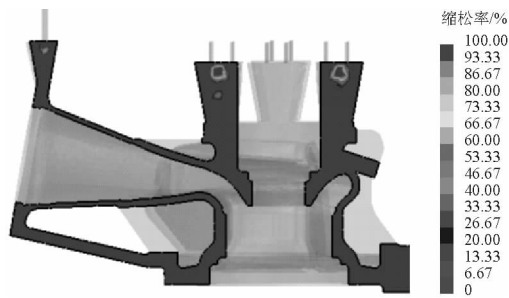
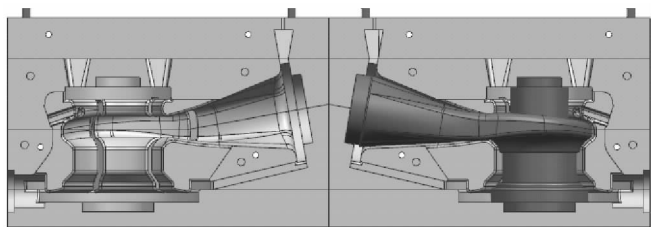


图 5 优化后铸件缩孔位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the position of shrinkage cavities in the castings after optimization

1.3 铸型设计及制备

铸型整体为左右分模的形式,见图 6。左、右外模为机加石墨型,中间型芯为陶瓷型,陶瓷型芯与石墨型之间为间隙配合,配合精度为 0~0.05 mm,石墨型之间采用定位销、耐热钢制螺杆等材料进行装配定位,以确保铸件尺寸精度。



(a) 左侧处模 (b) 右侧处模+陶瓷型芯

图 6 铸型设计模型

Fig.6 Model of the designed mold

陶瓷型芯的面层由 Y_2O_3 制成, Y_2O_3 陶瓷与活性较高的钛合金熔液几乎不发生反应,可减少铸件表面的 α 粘污层厚度,能最大限度提高铸件表面品质,陶瓷型芯见图 7。



图 7 陶瓷型芯

Fig.7 The ceramic core

2 方案验证

2.1 熔炼浇注

铸型组装完成后,按工艺进行整体预热,预热温度

为 $350 \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$,保温 2 h 以上,确保铸型充分预热,以提高金属液的充型能力,减少铸件冷隔、流痕、裂纹等缺陷的可能性。浇注的铸件见图 8。可以看出,成形品质良好,符合预期。



图 8 壳体铸件(清壳后)

Fig.8 The poured shell castings

2.2 内部品质检测

铸件经过热等静压处理后,按照 GJB2896A-2007 标准 B 级要求对铸件内部品质进行检测,结果表明,铸件的法兰处不存在大尺寸缩孔缺陷,优化后的浇注方案符合预期,有效减少了铸件缺陷,提高了铸件品质。

2.3 表面品质检测

按照 GJB2896A-2007 标准 B 级质量要求对铸件表面品质进行检测,检测方法为荧光渗透,结果表明,铸件流道内无超标荧光缺陷。经与粗糙度样块比对,流道内的表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\text{ }\mu\text{m}$,满足技术要求。

为进一步分析石墨材料和陶瓷材料对铸件表面品质的影响,在金属液与铸型内芯接触的面随机选取 6 点,位置见图 9。使用软件分别计算出使用石墨材料和陶瓷材料时金属液冷却速率的曲线,见图 10。可以看出,当型壳分别选用石墨和陶瓷时,在刚浇注完成瞬间,金属液冷却速度均较快,随后石墨型壳的铸件凝固速率明显快于陶瓷型壳的铸件,当浇注完成后 20 s 时,两种金属液温度分别为 $1\text{ }100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上和 $1\text{ }250\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,主要原因是石墨材料的导热速率明显大于陶瓷材料,导致了金属液凝固速率不同,这也是表面品质存在差异的原因。同时,在图 10 中发现,靠近浇道附近的点 6 由于金

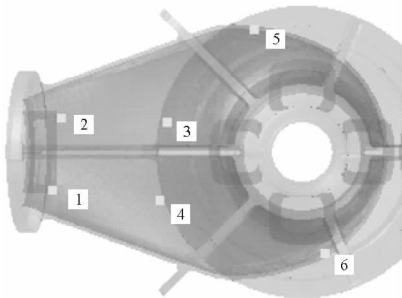


图 9 选点位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of point selection

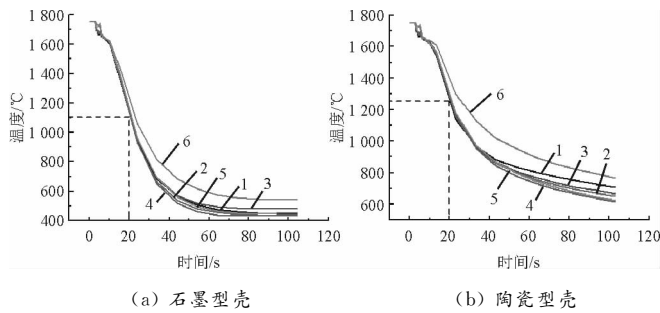


图 10 石墨与陶瓷型壳对金属液冷却速率的影响
Fig.10 Influence of graphite and ceramic materials on metal liquid cooling rate

属液的持续过热作用,其凝固速率明显慢于其他位置。陶瓷型铸件表面品质好于石墨型的主要原因为金属液在流动过程中,前端在铸型壁遇冷而发生凝固,但陶瓷相较于石墨导热速率低,金属液凝固速度慢,部分已形成的凝固层被后续的过热金属重新熔化,见图 11,导致流痕、冷隔等表面缺陷少,表面粗糙度值更低,其中流道内的表面品质见图 12。

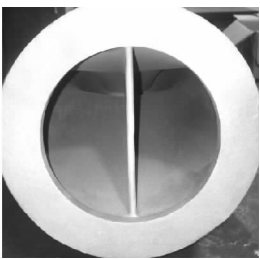
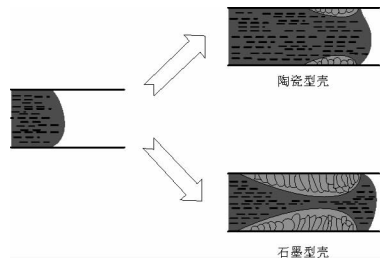


图 11 金属液充型和冷却过程示意图
Fig.11 Schematic diagram of liquid metal filling and cooling process

图 12 壳体铸件流道表面品质
Fig.12 Runner surface quality of shell castings

2.4 尺寸检测

使用三维激光扫描设备(HandySCAN700)对铸件进行尺寸外形检测,结果见图 13。对比可以看出,铸件与理论模型 3D 符合度较好,流道等非加工部位与理论模型偏差在±0.2 mm 公差允许范围内,符合要求。

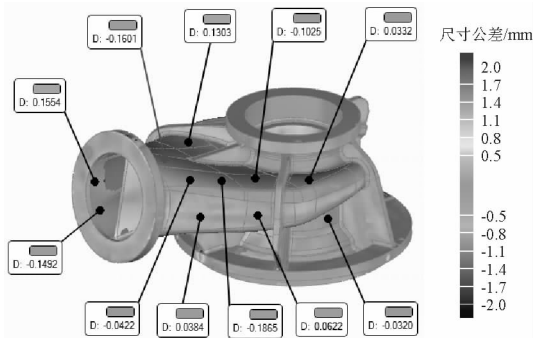


图 13 铸件三维扫描对比结果
Fig.13 Comparison results of 3D laser scanning of castings

2.5 理化性能检测

取热等静压+退火状态的附铸试样对铸件的理化性能进行检测,化学成分检测参照 GB/T 4698,室温力学性能参照 GB/T 228.1-2010。技术指标及实测数据见表 1 和表 2,实测数据完全满足技术指标要求。

表 1 钛合金的化学成分

Tab.1		Chemical composition of Ti alloy								%
		w_B								
		主要成分			杂质成分(不大于)					
		Ti	Al	V	Fe	Si	C	O	N	H
标准	余量	5.5~6.8	3.5~4.5		0.15	0.15	0.08	0.13	0.05	0.012 5
实测	余量	6.6	3.9		0.12	0.05	0.01	0.10	0.01	0.002 6

表 2 钛合金铸件的室温力学性能

Tab.2 Mechanical properties of Ti alloy at room temperature				
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
标准	800	700	≥5	≥12
实测 1	903	814	13	27
实测 2	897	803	12.5	24

3 结 论

- (1)采用石墨陶瓷复合铸型生产钛合金壳体铸件,可有效减少流道的表面冷隔、流痕、裂纹等缺陷,保证产品非加工区域的表面品质。
- (2)借助 ProCAST 铸造仿真软件能准确判别出铸件缩孔等缺陷位置,通过优化浇注系统设计,增加充型、补缩通道及冒口,能有效减少铸件内部缺陷。
- (3)通过软件计算和理论分析,陶瓷型壳与石墨型壳相比,导热速率更低的陶瓷型壳更能有效保证铸件表面品质。

参 考 文 献

[1] 王海,魏芬绒,崔文俊,等. 超低间隙 TC4 钛合金形变热处理工艺[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(1): 52-55.

[2] 孙洋洋,常辉,方志刚,等. TC4 ELI 钛合金显微组织对低周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(5): 1 623-1 628.

[3] 吕逸帆,张毅,景宝全,等.固溶时效对 TC4 ELI 钛合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 616-619.

[4] 刘清华,惠松骁,叶文君,等. 不同组织状态 TC4 ELI 钛合金动态力学性能研究[J]. 稀有金属, 2012, 36(4): 517-522.

[5] 赵军,张建中,金磊,等. 钛合金石墨型铸造用 ZrO₂ 涂层性能研究[J]. 铸造, 2017, 66(6): 563-567.

[6] 赵亮,高婷,杜宇,等. 大型钛合金叶轮的铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(9): 955-957.

[7] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

(编辑:刘卫)