DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.013

ZTC4 钛合金支板熔模铸造工艺研究

王　非,李伟东
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000)

摘　要:采用陶瓷型芯与熔模精密铸造相结合的方法制备了具有狭小型腔的高品质 ZTC4 钛合金支板铸件。测试了不同材质陶瓷型芯对铸件型腔表面脆性 α 层厚度的影响。开展了包括机械法、碱洗法、水力清洗法等陶瓷型芯去除工艺的应用研究。结果表明,氧化锆陶瓷型芯强度高、惰性好,铸件表面产生的脆性 α 层相对较薄,可作为成型钛合金铸件狭小型腔部位的主要材质。机械法及碱洗法不能有效去除支板铸件狭小型腔中的氧化锆陶瓷型芯,水力清洗法能够有效去除狭小型腔内的陶瓷型芯,综合效果较为理想。

关键词:ZTC4 钛合金;熔模精密铸造;狭小型腔;陶瓷型芯

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0950-04

Research on Investment Casting Process of ZTC4 Titanium Alloy Supporting Plate

WANG Fei, LI Weidong
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: High quality support plate casting of ZTC4 titanium alloy with narrow cavity was prepared by the method of ceramic core and investment mold precision casting. The influence of ceramic cores of different materials on the thickness of layer on the surface of the casting cavity was tested. The application research of ceramic core removal process including mechanical method, alkaline cleaning method and hydraulic cleaning method was carried out. The results show that the zirconia ceramic core has high strength and good inertness, and the brittle layer on the surface of the casting is relatively thin, which can be used as the main material of the narrow cavity of the titanium alloy casting. The mechanical method and alkaline washing method cannot effectively remove the zirconia ceramic core in the narrow cavity of the casting, but the hydraulic cleaning method can effectively remove the ceramic core in the narrow cavity, and the comprehensive effect is relatively ideal.

Key words: ZTC4 titanium alloy; investment casting; narrow cavity; ceramic core

随着钛合金铸件应用的不断扩大和深入,特别是航空、航天、船舶、电子等高端领域市场对钛合金铸件无论是尺寸精度还是表面光洁度要求越来越高。熔模精密铸件的尺寸精度及表面光洁度较机械加工石墨型铸件均具有较大幅度的提升,熔模精密铸造工艺已然成为高品质钛合金铸件的主要成型方法[1,2]。钛合金熔模精密铸造对型壳用材料要求较高,同时,对型壳制备环境要求较为苛刻且型壳制备工艺流程长,型壳质量的好坏决定了熔模精密铸件的品质。高品质高尺寸精度钛合金熔模精密铸件制备工艺一直是钛合金铸造行业研究的重要方向[3-6]。

一般情况熔模铸造铸件的内腔与外形均通过涂挂涂料、撒砂等工序形成,不用专制型芯。但是当铸件内腔过于狭窄或者形状复杂,常规的涂挂涂料、撒砂等工序无法实施,或者内腔型壳无法干燥硬化时,就必须使用预制的陶瓷型芯来形成铸件内腔,其结构与外型模壳共同保证铸件对空腔的尺寸精度要求。陶瓷型芯通常用于成形形状复杂或不易成形的铸件的型腔,作为简化工艺难度降低成本提高制品合格率的一种特殊的工艺手段[4-6]。

目前陶瓷型芯在高温合金熔模精密铸件的生产中应用较为广泛,如航空发动机叶片、地面燃气轮机叶片等复杂高精度铸件产品。陶瓷型芯在金属浇注过程中凝固过程中的工作状态是十分复杂的。在金属压力作用下型芯承受弯曲力,同时在刚性固定的榫头部位会出现切应力,在浇注时陶瓷型芯的工作表面会受到金属液流的冲击,因此要求陶瓷型芯在高温下具有足够高的强度稳定性[5-8]。

钛合金熔模精密铸造用陶瓷型芯在确保较高强

收稿日期:2020-07-15

作者简介:王　非(1981-),河南洛阳人,博士,高级工程师.主要从事钛合金方面的工作.电话:0379-67256942,E-mail:wfei_81@163.com

度情况下，还要考虑其材质的惰性，以防止陶瓷型芯与钛液发生反应。但是，对于结构复杂的高惰性氧化物陶瓷型芯在型芯去除方面又较为困难[9]。目前，对于具有狭小型腔结构复杂且尺寸精度要求较高的钛合金铸件依然是钛合金铸造行业的难题。

1　ZTC4 支板铸件尺寸结构

熔模精密铸造对于具有尺寸小于 3 mm 的狭小型腔铸件无法采用常规的熔模精密铸造方法成型。狭缝太小对于常规的涂挂涂料、撒砂等工序无法实施，同时狭缝内腔型壳无法干燥硬化，所制备的型壳脱蜡后狭小型腔处型壳较薄无法满足合金浇注的强度要求，因此采用陶瓷型芯成型时优选工艺。图 1 为 ZTC4 支板铸件结构示意图。该铸件狭小型腔部位壁厚 1 mm，型腔宽度 0.7~2.5 mm，型腔深度 18.5 mm，属于典型的狭窄纵深型腔结构，无法采用涂挂浆液与淋砂的方法制备型壳。

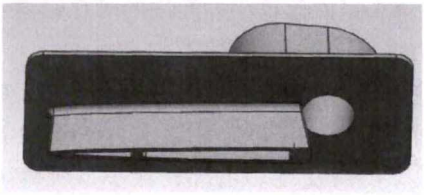


图 1 ZTC4 支板铸件结构示意图
Fig.1 Schematic structure of ZTC4 Ti alloy supporting plate casting

2　实验材料及实验过程

2.1　实验材料

铸造 ZTC4 钛合金支板用陶瓷型芯测试材质分别为氧化硅陶瓷型芯以及氧化锆陶瓷型芯。蜡模材料为 K512 型石蜡，浇注 ZTC4 钛合金支板用材料的化学成分如下表 1，满足 GJB 2896 的要求。

表1 ZTC4钛合金化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ZTC4 titanium alloy

Ti	AL	V	Fe	Si	C	N	H	O
余量	6.20	4.20	0.20	0.08	0.05	0.02	0.01	0.14

2.2　实验过程

根据支板铸件结构及尺寸，制作支板铸件用蜡模模具以及陶瓷芯模具。采用陶瓷芯模具分别制作氧化硅、氧化锆陶瓷型芯。将不同材质陶瓷型芯放入支板蜡模模具中，采用射蜡机压制带有陶瓷型芯的支板蜡模，如图 2。对图 2 所示的蜡模进行蜡模组焊、型壳制备、蒸汽脱蜡、高温焙烧、真空浇注等工序，所浇注的铸件如图 3。

对采用不同陶瓷型芯所制备的支板铸件进行破坏性测试，采用电子显微镜检测不同陶瓷型芯所

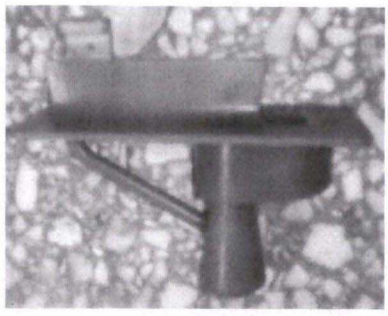


图 2 支板蜡模
Fig.2 Wax pattern of supporting plate

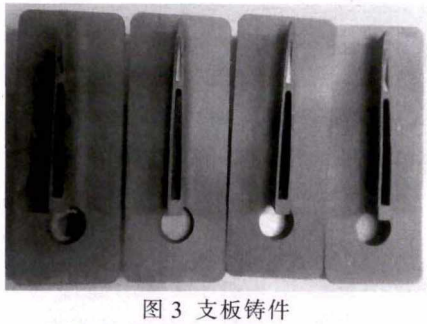


图 3 支板铸件
Fig.3 Supporting plate casting

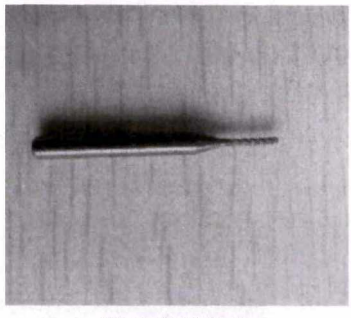


图 4 气钻钻头
Fig.4 Pneumatic drill bit

接触铸件部位的表面脆性 α 层厚度。分别采用机械法（手持气钻钻头 1 mm 部位长为 10 mm，如图 4）、碱洗法（脱芯温度：150 ℃、脱芯压力：0.7 MPa、脱芯时间 20 h、氢氧化钠碱液浓度 40%。脱芯釜设备如图 5）、高压水力清洗法（60 MPa 压力，30 L/min 流量，水力清砂机如图 6）及机械法加高压水力清洗相结合的方法去除支板铸件型腔内的陶瓷型芯。

图 5 脱芯釜
Fig.5 Core-removing kettle

图 6 高压清洗机及工作箱
Fig.6 High pressure waterjet cleaning machine and working box

3 实验结果及分析

3.1 不同材质陶瓷型芯对支板铸件表面脆性 α 层的影响

图 7 为不同材质陶瓷型芯所成型支板铸件表面脆性 α 层厚度。图 7(a)为氧化硅陶瓷型芯所生产铸件表面 α 层测试结果，结果显示脆性 α 层厚度为 0.193 mm，氧化硅易与钛液在高温下发生反应，导致与氧化硅所接触部位的铸件表面脆性 α 层较厚，严重影响了铸件品质；图 7(b)为氧化锆陶瓷型芯所生产铸件表面 α 层测试，结果显示锆基陶瓷型芯所制作铸件无明显 α 层。氧化锆材质陶瓷型芯惰性相对较好，在高温下不与钛液发生明显的化学反应，该材质陶瓷型芯作为钛合金支板熔模精密铸造用较为合适[10]。

3.2 机械法去除陶瓷型芯

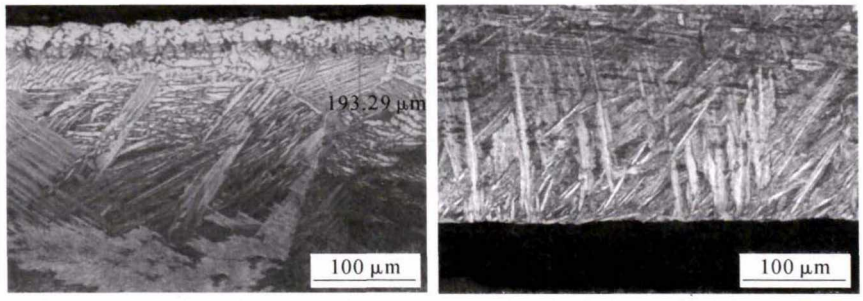
图 8 为采用气钻去除支板铸件型腔中的氧化硅及氧化锆陶瓷型芯，从图中可以发现采用直径 1 mm 长 10 mm 的钻头能够将部分陶瓷型芯去除，但型腔宽 0.7 mm、深 17 mm 最窄最深部位的型芯仍难以用机械方法去除。除此之外，对比发现氧化硅陶瓷型芯材质硬度相对较低，采用气钻可以快速去除部分型芯；对于硬度较高的氧化锆陶瓷型芯，气钻工作效率相对较低。

3.3 碱洗法去除陶瓷型芯

在确保铸件不受腐蚀破坏的情况下，采用 40% NaOH 碱液碱洗工艺去除支板铸件中的陶瓷型芯。图 9(a)显示氧化硅陶瓷型芯能与碱溶液发生化学反应，从而可以不受铸件结构影响，有效地去除支板铸件型腔内的氧化硅陶瓷型芯，获得型腔较为清洁的支板铸件。图 9(b)显示支板铸件型腔内陶瓷型芯依然存在，且没有任何减少的趋势，因此采用 NaOH 碱洗法无法有效去除支板狭小型腔内的氧化锆陶瓷型芯。

3.4 水力清洗去除陶瓷型芯

图 10 为采用水力清洗工艺去除陶瓷型芯前后的铸件图片。图 10(a)为采用水力清洗机清洗前支板铸件型腔内陶瓷型芯情况，狭小型腔缝隙内存在无法用常规的机械方法去除的陶瓷型芯。图 10(b)为采用水力清洗机清洗后支板铸件型腔内陶瓷型芯



(a)氧化硅陶瓷型芯接触面α层　(b)氧化锆陶瓷型芯接触面α层

图 7 不同材质陶瓷型芯铸件接触表面脆性 α 层
Fig.7 Brittle α layer on contact surface of ceramic core with different materials

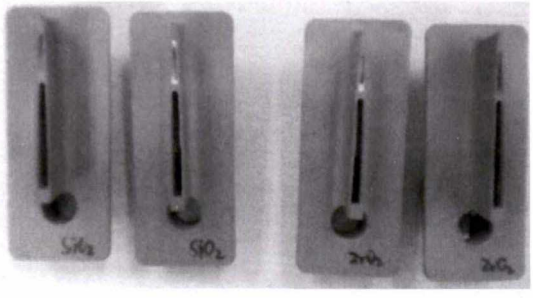
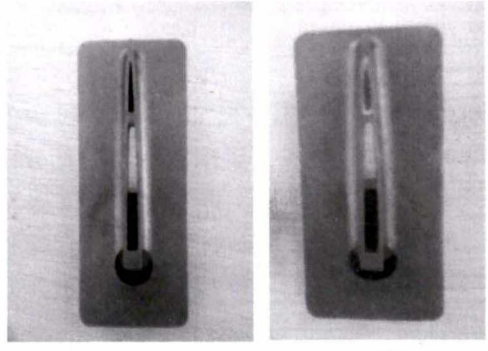
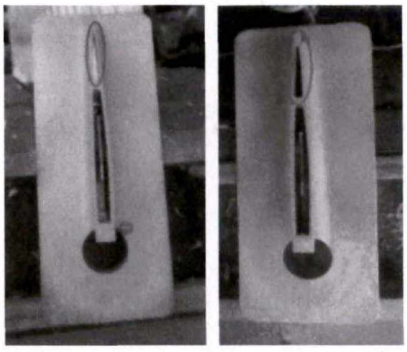


图 8 采用气钻对陶瓷型芯处理后的铸件
Fig.8 Castings before and after removing ceramic core by pneumatic drill



(a)氧化硅陶瓷芯　(b)氧化锆陶瓷芯

图 9 采用碱洗工艺去除陶瓷型芯后的铸件
Fig.9 Castings after ceramic core removed by alkaline solution process



(a)清洗前　　(b)清洗后

图 10 采用水力清洗工艺去除陶瓷型芯前后的铸件

Fig.10 Castings before and after high pressure waterjet cleaning ceramic core

存在情况，高压水力清洗机可以将支板铸件盲孔内的陶瓷芯清除。但由于盲孔较深且孔径较小，需要多次调整喷射角度，才能完全清楚型腔内的陶瓷型芯。清洗后的工件型腔内无肉眼可见陶芯残留，发现型腔内无残留陶瓷型芯的存在。

4 结论

(1)氧化锆陶瓷型芯强度较氧化硅陶瓷型芯高，惰性相对较好。采用氧化锆陶瓷型芯所制备的支板铸件型腔部位无明显 α 层，是作为钛合金熔模精密铸造用陶瓷型芯的优选材料。氧化硅陶瓷型芯所制备的支板铸件型腔处存在较厚的脆性 α 层，不适宜作为钛合金铸造用型芯材料。

(2)采用 NaoH 碱洗法可以有效去除支板型腔内的氧化硅陶瓷型芯，但对于清除氧化锆陶瓷型芯无明显效果。

(3)采用高压、高流量水力清洗机可以有效地将支板铸件型腔内的陶瓷型芯去除。特别对于高压水力清洗机对于具有狭小盲孔型腔铸件内的陶瓷型芯去除效果较为理想。

参考文献：

[1] 樊振中，徐秀利，王玉灵，等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用于发展[J]. 特种铸造机有色合金, 2014, 34 (3): 285-289.

[2] 陈艳飞，陈玉勇，田竞，等. 离心熔模精铸 TiAl 合金与 ZrO_2 型壳的界面反应[J]. 中国有色金属学报，2010, 20(1)：198-202.

[3] 李飞，王飞，陈光，等. 熔模精密铸造 TiAl 基金属间化合物研究进展[J]. 中国材料进展，2010(2)：24-30.

[4] 姚卓，赵成志，谢月，等. 级配改善钛合金精密铸造型壳质量[J]. 热加工工艺，2011, 40(5)：64-67.

[5] 郭景杰，盛文斌，贾军，等. 钛合金金属型铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金. 1999(1):125-127.

[6] 王惠光，田竞，卢玉红，等. 钛合金用氧化物陶瓷型壳的研究[J]. 材料科学与工程，1997, 7(9):128-131.

[7] 梁启如，吴玉胜，刘孝福，等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. 铸造，2018, 67(9)：790-793.

[8] 伍林，何健，曾洪，等. 硅基陶瓷型芯的制造工艺研究进展[J]. 东方汽轮机，2016 (4)：54-56.

[9] 王非，李飞，余建波，等. 空心叶片用陶瓷型芯脱芯工艺研究现状[J]. 中国材料进展，2019，38(3)：264-270.

[10] 于瑞龙，尹绍奎，娄延春. 铸造钛合金用氧化锆掺杂氧化镁陶瓷型芯性能研究[J]. 铸造，2016，165(11)：1037-1044.

《现代铸铁》杂志征订启事

《现代铸铁》杂志创刊于 1981 年，由一汽铸造有限公司主管，无锡一汽铸造有限公司与中国机械工程学会联合主办，双月刊(双月 25 日出版)，国内外公开发行，邮发代号：28-178，国内统一连续出版物号：CN 32-1112/TG，国际标准连续出版物号：ISSN 1003-8345，国际刊名代码：CODEN XZHUEJ。

《现代铸铁》杂志是中国机械工程学会铸造分会会刊，其刊登的主要内容为：有关铸铁的新技术、新工艺、新装备、新材料、绿色铸造、节能环保、先进管理、车间技术改造、计算机应用、国内外情况介绍、检测技术等方面的研究成果和生产经验。

截止目前，《现代铸铁》正以其强大的发行量、深远的行业影响力、雄厚的信息资源优势，面向全国铸造原辅材料、熔炼及浇注设备、除尘设备、造型生产线、型砂检测仪器仪表、炉前质量控制仪器、铸件修复设备、计算机软件等企业拓展广告市场。我们恳切希望能与形象良好、综合实力较强的企业建立长期的合作关系，以使我们双方的事业相辅相成、共同上升。

《现代铸铁》全年 6 期，每册定价 12 元，全年 72 元。读者可在全国各地邮局直接订阅，邮发代号：28-178。

本刊联系地址：江苏无锡惠山经济开发区北惠路 55 号，邮编：214174，电话：0510-85405970，电子信箱：119427423@qq.com、xdzt_wf@wxfawfc.com。