

钛合金消失模覆壳-精密铸造技术及应用研究

李渤渤 程亚珍 杨 光 乔海滨 刘茵琪 杨学东
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司)

摘 要 国内钛及钛合金铸件主要采用机加工石墨型和熔模精密铸造两种工艺方法生产,但受制于技术,实际生产过程中并不能完全满足客户对产品高品质、低成本、短交期的发展需求,因此有必要推进铸造新技术的研发及应用,与现有技术形成互补。消失模铸造具有其他铸造方法所不具备的优势,在钢铁、铝等铸件中已获得广泛应用,但在钛合金中应用报道较少。主要对钛合金消失模覆壳铸造优势、技术方案及应用前景进行了综述。

关键词 钛合金;铸造;消失模

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Technology and Application Research of Titanium Alloy Lost Foam Cladding Casting

Li Bobo, Cheng Yazhen, Yang Guang, Qiao Haibin, Liu Yinqi, Yang Xuedong
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd.)

Abstract: Domestic titanium and titanium alloy castings are mainly produced by machined graphite and investment precision casting. However, the actual production process can hardly meet the requirement of high quality, low cost and short delivery time subject to technical limitations. Therefore, it is necessary to promote research and application of new casting technology to form a complement with the existing technologies. Lost foam casting has superior advantages, which has been widely used in metal castings such as steel, aluminum, etc., while rarely reported in titanium alloys. The advantages, technology schemes and application prospects of titanium alloy lost foam cladding casting were mainly introduced.

Key Words: Titanium Alloy, Casting, Lost Foam

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀、无磁性、生物相容性好等特点,可显著降低装备质量,提高装备寿命及性能,广泛应用于航空航天、石油化工、舰船、海洋工程等领域^[1]。与其他成形工艺相比,钛合金铸造能够生产各种形状复杂构件,减少生产工序,提高金属利用

率。据中国有色金属工业协会统计,2017 年我国钛铸件产量为 417 t^[2],受军工及高端民品等钛铸件强劲需求拉动,2019 年钛铸件产量达到 782 t^[3],预计 2020 年中国钛铸件实际产量可达 1 000 t,市场规模为 10~20 亿元。

收稿日期:2021-06-28;**修改稿收到日期:**2021-08-10
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300,2020YFB2008302)
第一作者简介:李渤渤,男,1987 年出生,高级工程师,河南洛阳(471000),E-mail:libobo0816@126.com
引用格式:李渤渤,程亚珍,杨光,等. 钛合金消失模覆壳-精密铸造技术及应用研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):125-128.
LI B B, CHENG Y Z, YANG G, et al. Technology and application research of titanium alloy lost foam cladding casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):125-128.

该方案连同压铸件生产厂家对发动机涉及机油通道和冷却液通道所有压铸铝件进行了梳理,取得了非常好的成果。

3 结 语

从压铸生产的全过程总结了如何避免压铸件内部缩孔和表面拉伤。以某铝压铸缸体为例,使用该方案进行梳理后,铸造厂内部粗加工后试漏合格率提高至 99.7%,在主机厂精加工后试漏合格率提高至 99.8%。

参 考 文 献

[1] 廖敦明,陈立亮,周建新,等. 压铸过程模拟仿真技术的应用[A].第五届中国国际压铸会议论文集[C]. 上海, 2006.
[2] 姜银方 顾卫星. 压铸模具工程师手册[M].北京:机械工业出版社, 2009.
[3] 王悦民. 压铸模点试冷却法[J].模具工业,2000(7):1-2.
[4] 卢宏远,董显明,王峰. 压铸技术与生产[M].北京:机械工业出版社,2008.

(编辑:张正贺)

Ti具有高化学活性,易与 SiO_2 、 Al_2O_3 等常规铸型材料发生反应,只能选择价格昂贵的石墨、 ZrO_2 、 Y_2O_3 等作为面层材料,并逐渐发展形成机加工石墨型和熔模精密铸造两种工艺^[4,5]。但受钛原材料价格高,钛合金铸造难度大、生产流程长、装备及工艺复杂、铸型材料昂贵等因素影响,限制了钛铸件推广应用,导致其市场规模仍然较小。此外,机加工石墨型铸造存在充型能力差,表面留痕、冷隔缺陷严重问题;同时,熔模精密铸造生产大规格钛铸件生产周期长。因此,非常有必要进行钛合金铸造新技术的开发,与现有技术形成互补,促进钛合金铸造技术发展及钛铸件应用推广。

1 消失模铸造技术发展历史及特点

20世纪50年代发明采用聚苯乙烯(EPS)泡沫板加工模样代替木模,并用含粘结剂的型砂充填制造金属零件,随后Hartman公司与WITTEMOSER于1962年合作将该技术推广应用在工业生产上^[6,7]。该工艺方法生产简便易行,采用该项技术生产铸铁、铸钢、铝合金等金属部件技术已非常成熟,广泛应用于汽车发动机缸盖、缸体、电机壳体、箱体、进气歧管等形状复杂部件的生产中。

消失模铸造是一种近无余量、精确成形的铸造工艺。与其他铸造技术相比,具有如下优点^[8]:①铸件表面粗糙度低,尺寸精度高;②铸件结构设计灵活,采用泡沫塑料制作模型,无分型面及型芯,也可采用分片方法制造泡沫模样,后经粘合制备整体模型,因此原来由多个零件加工组装的复杂构件,采用消失模铸造工艺可整体铸出,设计灵活度大;③生产操作简便,尺寸误差小,无毛刺飞边,不用取模、修型、下芯、合箱,简化了工序,缩短了生产周期,同时还能减少由于型芯块组合及分型合箱而造成的尺寸误差,且铸件无飞边毛刺,易清理打磨,劳动强度低。

但是,消失模铸造技术劣势也比较明显,主要是:①铸件表面品质和材质性能易受泡沫模样气化裂解产物的影响而恶化,造成铸件表面碳缺陷和铸钢件增碳及渣气孔等问题;②消失模铸造生产薄壁平板类件时,容易变形,表面粗糙度及尺寸精度与精密铸造相比略差。

2 钛合金消失模技术应用前景及优势

钛合金化学性质活泼,需要在真空下熔炼及浇注,因此传统消失模铸造工艺不能直接应用于钛铸件的生产。消失模覆壳技术,可充分发挥消失模铸造优势,同时与熔模精密铸造技术相结合,制备模样后,利用其模

型制备氧化陶瓷型壳并焙烧,再进行真空浇注生产钛铸件,可获得接近于熔模铸造的精度和表面品质。

与铸钢、铸铁等金属大规模批量化生产不同,钛铸件普遍为单件定制或中、小批量生产。现有技术,钛铸件单件定制或小批量生产时,一般采用光敏树脂或机加工石墨型铸造,对于中等或大型尺寸铸件光敏树脂价格十分昂贵,同时近年来受环保等因素影响,石墨料价格由原来1~1.5万元/t涨至3万元/t以上,石墨料成本占钛铸件总成本的30%~60%,对于大型复杂框架式结构铸件占比更高。此外,石墨型铸造无法生产壁厚 $\leq 4\text{ mm}$ 的薄壁钛铸件,且表面流痕、冷隔、裂纹等缺陷严重,后序打磨、补焊工作量大,生产成本低,同时面临环保淘汰或限制退出风险;中小型钛铸件批量生产时,一般采用熔模精密铸造,但对于中大型铸件单件或小批量生产时,大型金属模具制作费用高昂,且加工周期长,同时大型射蜡机及制壳线投资较大、产能利用率低。消失模覆壳铸造具有上述两种铸造方法所不具备的优点,可有效降低钛铸件生产成本,简化生产工序,缩短生产周期,并提高铸件品质。

与机加工石墨型铸造相比,消失模覆壳铸造可降低机加工石墨型铸件成本30%以上,同时显著改善表面品质及交货期。钛合金消失模覆壳铸造具有优势为:①设计灵活,采用整体模型覆壳制备铸件,显著提高了铸件设计的自由度,同时通过模型切边组合,可生产结构高度复杂钛铸件;②氧化陶瓷型壳导热系数低、退让性好,型腔内表面光滑,可解决石墨型钛铸件流痕、冷隔及裂纹等问题,使充型性能与表面粗糙度达到或接近熔模铸造水平;③无需型芯,可避免机加工石墨型型芯位置不准确或合型错位导致的壁厚不均问题,尺寸精度高;④消失模模型价格便宜、易加工,可显著降低钛铸件成本,缩短生产周期;⑤生产现场干净,无石墨粉尘污染,可满足清洁化生产要求。

与钛合金熔模铸造技术相比,消失模模型比光敏树脂模型成本降低80%以上,且在中大型尺寸铸件单件或小批量生产时,无需投资大型射蜡机及金属模具,即可实现生产,成本交期优势尤为突出。

3 钛合金消失模覆壳铸造技术应用研究

3.1 工艺流程

钛合金消失模覆壳铸造工艺,首先选择泡沫坯料,然后机加工成铸件模型,随后经挂浆撒砂、干燥、焙烧,获得陶瓷型壳,在焙烧过程中,铸件模型气化消失,最终经过浇注获得合格尺寸、表面及内部品质好的铸件,具体工艺流程见图1。

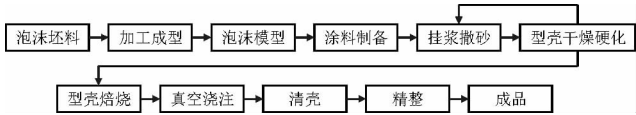


图 1 钛合金消失模覆壳铸造工艺流程图
Fig.1 Flow chart of titanium alloy lost foam cladding casting

3.2 型壳制备及浇注

某产品结构见图 2,材质为 ZTC4 钛合金,尺寸精度为 CT4,外观及性能符合 GB/T 6614 要求。选择一种消失模模型材料,其抗拉强度 ≥ 2 MPa、抗弯强度 ≥ 8

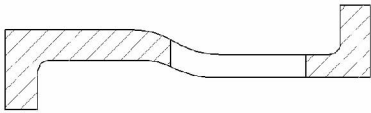


图 2 钛合金铸件
Fig.2 Titanium alloy castings

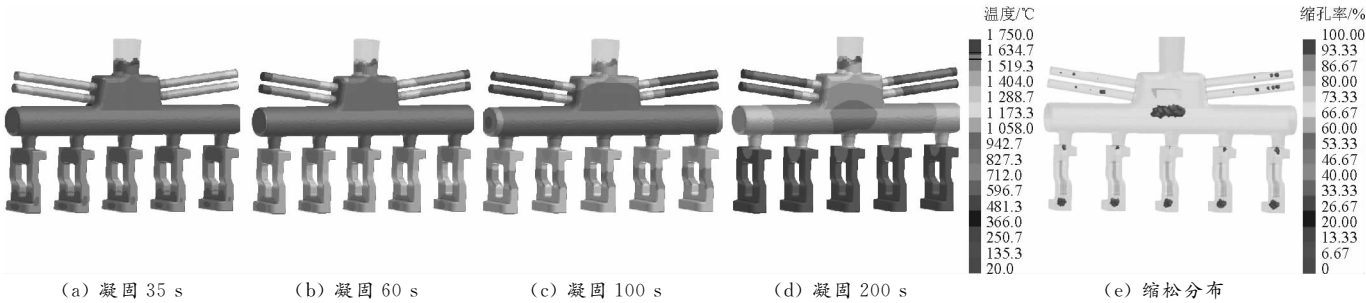


图 3 钛铸件温度场及缩松分布
Fig.3 Temperature field and shrinkage porosity distribution of titanium alloy castings

3.2.2 钛合金铸件的生产

采用整体加工成型的方法,用数控加工机床加工铸件模样,排气试块采用粘结剂粘结(见图 4),并用浸蜡工艺改善表面粗糙度。面层采用醋酸铅制壳工艺,面层材料为醋酸铅、稀土粉、铅砂,面层的流杯粘度控制在 33~38 s,背层采用硅溶胶制壳,背层材料为硅溶胶+莫来粉、莫来砂,背层 1~背层 2 的粘度控制在 21~27

MPa、耐热性及尺寸稳定性 ≥ 80 °C,同时高温下可热解气化,能够满足制壳支撑强度及尺寸稳定性要求。

3.2.1 浇注系统的设计与模拟

利用 ProCAST 模拟软件设计浇注系统,由于按照消失模覆壳铸造工艺生产,型壳的焙烧温度为 1 100 °C,型壳焙烧后消失模气化获得型壳。钛合金消失模覆壳铸造的模拟过程与熔模铸造的模拟过程相似;按照熔模铸造的模拟过程进行模拟。钛合金铸件的温度场分布见图 3,铸件的壁厚比较均匀,在凝固过程中铸件的温度场分布比较均匀,温度差为 200 °C。通过温度场分布判断铸件中间区域优先凝固,铸件顶部、底端为热节部位,易产生孤立的固相区,顶注式浇注系统对顶部的热节进行补缩,能消除缩松,底端热节区域因补缩不足而产生缩松。

s,背层 3~最后 1 层的粘度控制在 13~20 s。重复挂浆撒砂、型壳干燥硬化工序,完成面层、背层制备,再将型壳直接焙烧,焙烧时实施阶梯式升温,防止型壳裂纹。首先升温至 300 °C,焙烧炉开始通风,消失模开始气化,然后缓慢升温至 700 °C,保温 0.5 h,消失模气化完毕,最后升温至 1 100 °C,保温 5 h,获得型壳(见图 5)。采用真空静止浇注 ZTC4 钛合金,获得铸件毛坯(见图 6),

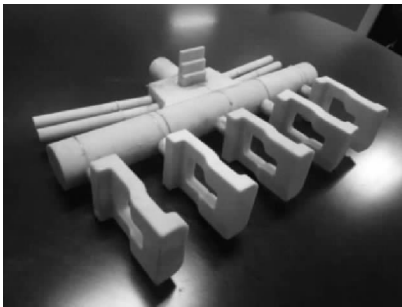


图 4 消失模模型
Fig.4 Lost foam model



图 5 型壳
Fig.5 The mold shell



图 6 铸件毛坯
Fig.6 Casting blank

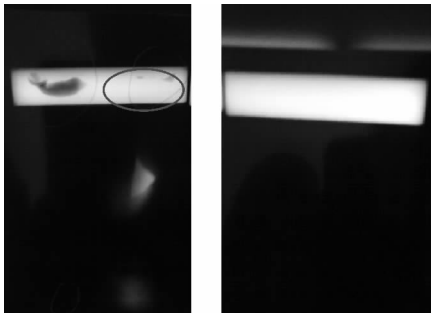
经热等静压、探伤及精整修磨后获得铸件。

3.3 检测结果与分析

采用消失模覆壳铸造生产的钛合金铸件,热等静压前内部探伤结果见图 7。可以看出,铸件底部有缩松,

实际缺陷比数值模拟的结果要少 50%,缩松位置与数值模拟的结果基本相同,消失模覆壳铸造的实际结果与按钛合金熔模铸造模拟的结果基本一致,可见消失模覆壳铸造工艺可以按钛合金熔模铸造的工艺进行。铸件

经热等静压后,内部缺陷消除,见图 7,达到 GB/T 6614 标准要求,满足 II 类 B 级探伤要求。表面的污染层厚度为 44 μm ,用酸洗工艺去除,且表面未发现夹杂缺陷,钛合金铸件的表面见图 8,表面粗糙度 R_a 为 6.3 μm 。对铸件本体力学性能进行检测,见表 1,符合 GB/T 6614 标准要求;同时,对铸件组织进行检测,未发现夹杂等冶金缺陷及组织异常。



(a) 静压前 (b) 静压后
图 7 钛铸件等静压前后探伤照片

Fig.7 Inspection photos of titanium castings before and after static pressing



图 8 铸件毛坯
Fig.8 Casting blank

表 1 钛合金铸件力学性能

Tab.1 Mechanical properties of titanium castings

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
GB/T 6614	≥835	≥765	≥6
退火态	930	833	15

4 结 语

设计选型适用于钛合金铸造的消失模模型材料,并采用合理的消失模覆壳铸造技术,获得了内外部品质、组织力学性能合格的钛合金铸件。消失模覆壳铸造技术适用于生产单件小批量中大型钛合金铸件,无需开金属模具,可有效解决光敏树脂模型价格昂贵、石墨铸型成本高的问题,经济效益显著。钛合金消失模覆壳铸造技术可采用钛合金熔模精密铸造的数值模拟技术进行模拟,有效提高工艺生产的合理性,浇注系统可与铸件采用整体式加工的方法,提高了生产效率。

参 考 文 献

[1] 霍东兴,梁精龙,李慧,等. 钛合金研究及应用进展[J].铸造技术, 2016, 37(10): 2 065-2 066.

[2] 贾翊,逯福生,郝斌,等. 2017 年中国钛工业发展报告[J].中国钛业,2018(2): 3-11.

[3] 贾翊,逯福生,郝斌,等. 2019 年中国钛工业发展报告[J].钛工业进展,2019, 37(3): 33-39.

[4] 沈选金,贺同正,罗国军,等. 钛及其合金的熔模精密铸造[J].铸造技术,2015, 36(7): 1 876-1 878.

[5] 史兴利,郑子樵. 钛及钛合金铸造用石墨型的制造[J].铸造,1998, 47(3): 37-39.

[6] LIU J, RAMSAY C W, ASKELAND D R. Effects of foam density and density gradients on metal fill in the LFC process[J]. AFS Transactions, 1997(105): 435-442.

[7] BROWN J R. The lost foam casting process[J]. Metals Mater., 1992(8): 550-555.

[8] 樊自田,蒋文明. 消失模铸造技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012 (6): 1 072-1 075.

(编辑:刘卫)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和技術信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

《特种铸造及有色合金》杂志社



地址:武汉市江岸区江大路 26 号
邮编:430019
电话:027-85358206,85486024
传真:027-85358127
投稿网址:www.special-cast.com
邮箱:tzzz@special-cast.com

