

型壳水洗在钛合金精铸件生产中的应用

乔海滨^{1,2} 韩云飞^{1,2} 刘义辉^{1,2} 袁兵兵^{1,2} 孙宏喆^{1,2} 李渤渤^{1,2}
(1.洛阳双瑞精铸钛业有限公司; 2.中国船舶集团有限公司第七二五研究所)

摘 要 钛合金熔模铸件由于型壳破损和脱落将会导致铸件产生表面掉渣和内部夹杂缺陷。采用水洗型壳可以保证型壳清洁度,可有效降低缺陷。钛合金熔模铸造常用的型壳材料一种是面层为稀土粉+锆胶+锆砂,背层是锆粉+硅溶胶+莫来砂(1号胶系),另一种是面层为稀土粉+中性胶+锆砂,背层为莫来粉+硅溶胶+莫来砂(2号胶系)。通过对1号胶系和2号胶系的型壳进行水洗试验,结果表明,1号胶系的型壳因回溶现象不适合进行水洗,而2号胶体系的型壳能够进行水洗。通过对比不同保温温度和保温时间的烘干效果,经优化了型壳水洗工艺后,表面和内部缺陷数量平均下降20%以上。

关键词 钛合金;精铸件;水洗;型壳

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Water Washing Technology of Mould Shell in the Production of Titanium Alloy Precision Castings

Qiao Haibin^{1,2}, Han Yunfei^{1,2}, Liu Yihui^{1,2}, Yuan Bingbing^{1,2}, Sun Hongzhe^{1,2}, Li Bobo^{1,2}

(1.Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd.; 2.Luoyang Ship Material Research Institute)

Abstract: Mould shell damage and falling off may lead to casting surface slag and internal inclusion defects, which directly affect the product quality. The use of water washing process in production can ensure the cleanliness of mould shell, effectively avoiding the defects. One of shell materials widely used in investment casting of titanium alloy is surface layer of rare earth powder+zirconium glue+zirconium sand with the back layer of zirconium powder+silica sol+Mullite (1# glue), and the other is surface layer of rare earth powder+neutral glue+zirconium sand with the back layer of mullite powder+silica sol +Mullite (2# glue). The water washing testing was conducted on both materials, and the results indicate that the shell of 1# glue is not suitable for washing due to the remelting phenomenon, while the shell of 2# glue can be washed. By comparing the drying effect at different holding temperature and holding time, the amounts of surface and internal defects are decreased by above 20% after optimizing the shell washing process.

Key Words: Titanium Alloy, Investment Castings, Water Washing, Mould shell

钛合金熔模精密铸件广泛应用于航空、航天、船舶等领域,因而对其表面和内部品质的要求日益提高,而表面和内部缺陷的形成与型壳品质有直接关系^[1]。型壳破损和脱落形成的“夹杂物”聚集在浇注系统的底部时会形成表面掉渣缺陷^[2],若随钛液卷入铸件内部时便形成了内部夹杂缺陷^[3],这种缺陷严重影响了铸件品质。在生产中通常从浇注系统设计、制壳控制和型壳清理等方面着手解决夹杂缺陷^[4]。我公司前期型壳清理使用风机对主浇口进行吹风,使夹杂物沿着排蜡孔、排气孔和主浇口等部位排出,该方法对于结构简单的型壳有一定效果。但对于结构复杂,如凹槽多、筋板窄、尺寸

大的型壳,清理不够彻底。为了解决这个问题,采用型壳水洗来减少“夹杂物”。本试验拟对不同面层体系的型壳进行水洗,同时对型壳水洗后的烘干工艺进行研究,以获得最佳的工艺参数,并在此基础上进行工程化应用并验证水洗工艺的效果。

1 研究方法

1.1 不同面层系型壳水洗对比测试

1.1.1 不同面层体系型壳制作工艺

按照胶、粉、砂的不同可以将面层制作分为1号胶

收稿日期:2021-07-11;修改稿收到日期:2021-11-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300;2020YFB2008301)
第一作者简介:乔海滨,男,1987年出生,工程师,河南洛阳(471000),E-mail:qhbnpwu@163.com
通信作者:韩云飞,男,1988年出生,工程师,河南洛阳(471000),E-mail:337668161@qq.com
引用格式:乔海滨,韩云飞,刘义辉,等. 型壳水洗在钛合金精铸件生产中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 578-1 581.
QIAO H B, HAN Y F, LIU Y H, et al. Application of water washing technology of mould shell in the production of titanium alloy precision castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12): 1 578-1 581.

系及 2 号胶系。两种体系各具优缺点^[5]，一般而言，1 号胶系适用于中小型、薄壁铸件的生产；2 号胶体系适用于大型、厚壁铸件的生产。

1 号和 2 号胶系型壳都是面层+背层 9 层制壳工艺，不同的是“粉、胶和砂”有所区别，见表 1 和表 2。1 号胶系型壳面层使用的是稀土粉、锆胶和锆砂，背层使用的是锆粉、硅溶胶和莫来砂；2 号胶体系型壳面层使用的是稀土粉、中性胶和锆砂，背层使用的是莫来粉、硅溶胶和莫来砂；其中锆胶的主要成分为二醋酸锆，呈酸性，中性胶主要成分为 SiO₂，经稳定化处理后呈中性。

表 1 1# 胶体系面层和背层制壳工艺参数和材料

Tab.1 Process parameters and materials of surface layer and back layer of 1# glue system for shell making

面层			背层		
粉液比	密度/ (g·cm ⁻³)	挂浆值 Q/g	粉液比	密度/ (g·cm ⁻³)	挂浆值 Q/g
(2.4±0.2):1	2.8±0.15	10.0±2	(1.0±0.2):1	1.5±0.15	5.0±0.5
稀土粉+锆胶+锆砂			锆粉+硅溶胶+莫来砂		

表 2 2 号胶系面层和背层制壳工艺参数和材料

Tab.2 Process parameters and materials of surface layer and back layer of 2# glue system for shell making

面层			背层		
粉液比	密度/ (g·cm ⁻³)	挂浆值 Q/g	粉液比	密度/ (g·cm ⁻³)	挂浆值 Q/g
(3±0.2):1	5.7±0.15	25.0±2	(2.5±0.2):1	4.6±0.15	20.0±2
稀土粉+中性胶+锆砂			莫来粉+硅溶胶+莫来砂		

1.1.2 试板型壳对比测试

分别使用 1 号和 2 号胶制作型壳试板(150 mm×60 mm×6 mm)若干。测试过程是射蜡-制壳-脱蜡-焙烧-切割-水洗-烘干-观察。结果发现，1 号胶制作的试板型壳，烘干后面层表面有明显的掉粉现象；2 号胶制作的试板型壳，烘干后未出现掉粉现象。

1.1.3 铸件型壳对比测试

分别使用 1 号胶和 2 号胶制作型壳(φ280 mm×150 mm)各 6 件。测试方法是射蜡-制壳-脱蜡-焙烧-水洗-烘干-观察。结果发现，1 号胶制作的型壳在排蜡孔处均有不同程度的面层破损，而 2 号胶制作的型壳，未出现明显的面层破损现象。

1.1.4 测试结果理论分析

1 号胶和 2 号胶中的水分为自由水和固定水，在正常存放时和制壳干燥过程中失去的是自由水，在焙烧过程中才失去固定水，在失水过程中胶粒交联结合形成胶团，见图 1。

1 号胶的胶凝过程化学反应式见式(1)，该过程是可逆的，在采用水洗工艺时二醋酸锆胶团发生吸水反

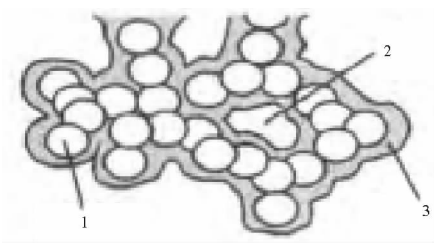
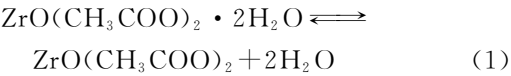
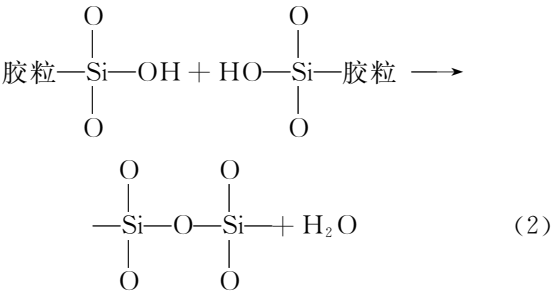


图 1 胶粒的交联结合
Fig.1 Crosslinking of colloidal particles
1.胶核 2.空隙 3.吸附水

应，称为“回溶”^[6]，造成型壳面层强度降低，再次烘干后出现掉粉现象。



2 号胶的胶凝过程见式(2)，该过程也存在一定的可逆现象，但过程非常缓慢^[7]。在实际生产过程中，2 号胶制作的型壳在发生“回溶”前已完成了烘干，因而不会对型壳造成破坏。



分析可知，1 号胶系制作的型壳经水洗后发生回溶现象，导致型壳品质变差，不适用水洗；2 号胶系制作的型壳水洗后未发生异常，适合水洗。目前 2 号胶使用比例逐渐提高，可在 80% 以上的熔模精密铸件上使用。

1.2 烘干工艺研究

1.2.1 测试方法

(1)型壳水洗 选用 2 号胶体系分别制作试板型壳和铸件型壳，在相同工艺参数条件下进行焙烧，冷却至 40 ℃ 以下进行水洗。

(2)型壳烘干 将不同质量的 4 块试板型壳放入干燥炉中，分别随炉升温至 200、300 和 400 ℃ 并保温。

(3)型壳称量 型壳烘干过程中，每隔 10 min 取出后在电子称上称重一次，并记录。

(4)优化工艺参数 根据测试得到的数据进行分析，得到最佳烘干温度。

1.2.2 试板型壳烘干测试结果

图 2 为 4 块试板型壳在 200、300、400 ℃ 时型壳质量随烘干时间的变化。可以看出，4 块试板型壳在 200 ℃ 烘干时，保温约 30 min 后质量不再减少，见图 2a；在 300 ℃ 烘干时，保温约 19 min 后质量不再减少，见图

2b;在 400 ℃烘干,保温 10 min 后质量不再减少,见图 2c。

由此可见,随着保温温度提高,型壳完全失水的保温时间逐渐缩短,甚至未到保温阶段,失水已经基本结

束。为了达到快速的烘干效果,需要在较高的保温温度下进行。但是为了方便现场操作,最终型壳烘干温度为 200 ℃,这样经过较短时间的冷却,即可搬运热型壳进行组型,避免烫伤危险发生。

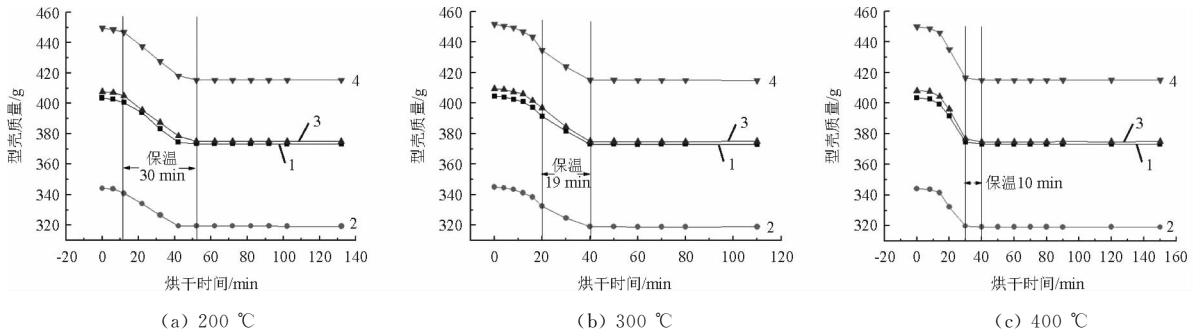


图 2 型壳质量与烘干时间的变化关系
Fig.2 Relationship of mould weight with drying time

1.2.3 铸件型壳烘干测试结果

采用上述测试方法,选取质量及大小具有代表性的铸件型壳放入干燥炉中升温至 200 ℃进行保温,每隔 10 min 取出称量,从而确定铸件型壳在 200 ℃的最佳保温时间。

图 3 为 15 kg 的型壳在 200 ℃下质量随保温时间的变化。可见型壳经过 40 min 的保温后质量不再减少。图 4 为 65 kg 的型壳在 200 ℃时质量随保温时间的变化关系,可见型壳经过 80 min 的保温后质量不再减少。

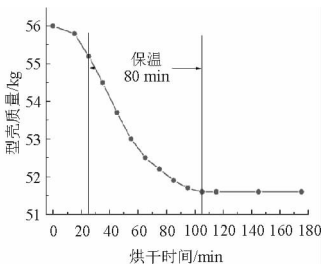
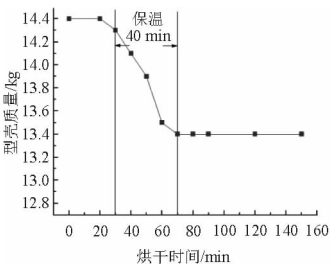


图 3 铸件型壳质量(15 kg)与烘干时间的变化关系
Fig. 3 Relationship of casting mould weight (15 kg) with drying time

图 4 铸件型壳质量与烘干时间(65 kg)的变化关系
Fig.4 Relationship of casting weight (65 kg) with drying time

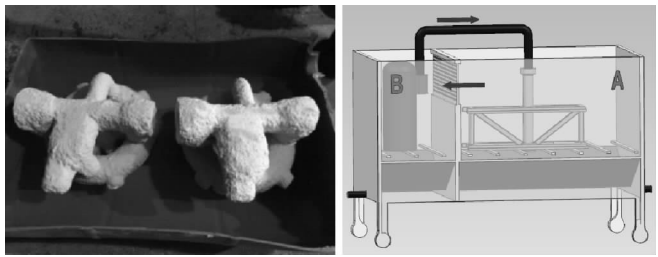
综上可见,随着型壳质量升高,型壳完全失水的保温时间逐渐延长。目前精铸件的型壳质量一般不超过 80 kg,一方面为了保证烘干效果,另一方面在满足实际生产节拍的基础上,最终保温时间确定为 1 h。

经过烘干测试,最终将型壳水洗后的最佳烘干工艺确定为随炉升温至 200 ℃、保温 1 h。

1.3 型壳水洗工装优化结果

前期型壳水洗试验在橡胶槽内进行,操作不便,同时还需要频繁换水,工作效率低,劳动强度大,不利于水

洗工艺的推广。为此,重新优化了水洗工装,见图 5。其基本过程为:水经过滤网由 A 槽进入 B 槽,B 槽内的水泵将水压入导管中,然后流入型壳主浇道后对型壳进行清洗,在此过程中,沉积物沿着排蜡孔、排气孔和主浇口等部位排出沉入 A 槽楔形底部。采用过滤网后,水洗效果良好,同时提高了工作效率,降低了劳动强度。



(a) 改善前 (b) 改善后

图 5 水洗工装
Fig.5 Washing tooling

2 工程化应用

对 8 种典型铸件水洗前后的表面和内部缺陷情况进行了统计,结果见表 3。可以看出,型壳水洗后铸件表面和内部品质得到了明显提高。掉渣问题得到解决,

表 3 水洗效果对比

Tab.3 Comparison of washing effects

产品名称	水洗		未水洗		对比下降比例/%
	表面缺陷	内部缺陷/(个·件 ⁻¹)	表面缺陷	内部缺陷/(个·件 ⁻¹)	
xx 座	无	2	轻度掉渣	3.4	41.1
xx 板	无	0.5	掉渣严重	2.0	75.0
xx 体	无	1.02	轻度掉渣	1.37	25.5
xx 段	无	0.85	掉渣严重	1.12	24.1
xx 盖	无	1.73	掉渣严重	2.27	23.7
xx 群	无	3.21	掉渣严重	4.16	22.8
xx 架	无	2.12	掉渣严重	3.19	33.5
xx 节	无	0.99	掉渣严重	1.37	27.6

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)