DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.015

钛合金砂型铸造工艺研究

王涛亮,李万印,杨　莹,李　曼,赵亚利
(洛阳鹏起实业有限公司,河南 洛阳 471000)

摘　要:以莫来石为主要造型材料、以惰性材料制造面层制备复合砂型,用真空凝壳炉熔炼浇注,成功生产了钛合金壳体铸件。结果表明,铸件表面无化学粘砂、无裂纹、冷隔缺陷。X射线检查,铸件内部无裂纹、夹渣缺陷。铸件的化学成分、力学性能均达到标准要求。该工艺与石墨型铸造工艺相比,铸件表面质量和内部质量得到明显改善,铸造成本降低近50%。

关键词:钛合金;砂型铸造;质量;铸造成本

中图分类号:TG291　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1294-04

Study on Sand Mold Casting Process of Titanium Alloy

WANG Taoliang, LI Wanyin, YANG Ying, LI Man, ZHAO Yali
(Luoyang Pengqi Industrial Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: With mullite as the main molding materials and inert materials as the surface layer to prepare composite sand mold, titanium alloy shell casting was successfully produced by melting and pouring in vacuum shell furnace. The results show that there is no chemical sand, no cracks and no cold separation defects on the surface of the casting. X-ray examination show no cracks or slag inclusion in the casting. The chemical composition and mechanical properties of the casting are up to the standard. Compared with the graphite mold casting process, the surface and internal quality of the casting are obviously improved, and the casting cost is reduced by nearly 50%.

Key words: titanium alloy; sand casting; quality; the casting cost

钛合金具有密度小、比强度高、高温和低温力学性能良好、耐腐蚀性好、生物相容性好等特点,是一种优良的结构和功能材料,已广泛应用于航空、航天、舰船、化工、汽车、体育和生物医学等领域[1-3]。在钛合金结构件成型方法中,钛合金铸造能成形各种形状,具有成本较低、周期短等优点。当前国内外钛合金铸造普遍采用的铸造工艺是机加石墨型铸造、熔模精密铸造,少数场合也用使金属型铸造[4-6]。

钛合金壳体是某飞行器上的重要构件,原采用机加石墨型工艺铸造。由于石墨型激冷能力强、退让性差,常造成铸件表面有裂纹、冷隔、流痕等缺陷,影响铸件质量。此外,随着国家对环境保护的重视,限制了石墨材料的使用,导致石墨材料成本急剧上升,增加铸造成本。

为了应对环保压力、改善铸件质量和降低铸造成本,需要采用一种更为环保、经济的铸造工艺。砂型铸造作为铸造工艺中最经济的方法,其成本低、生产灵活性大,适用范围广,但是国内对于钛合金砂型铸造工艺的研究并不多见。本文主要介绍了钛合金壳体铸件的砂型铸造试验过程,通过开展设计和制备砂型、熔炼浇注、化学成分分析、力学性能试验等工作,完成钛合金壳体砂型铸件的研制。

1　工艺试验

1.1　造型材料

钛合金的砂型铸造与铸钢、铸铝的砂型铸造相似,不同的是采用的造型材料应具有稳定的化学性质、较高的耐火度和较低的膨胀系数,且无毒、无放射性等[1]。钛合金采用砂型铸造需要解决的两个主要难点:①砂型应具有较高强度和较低的膨胀系数,保证钛合金铸造过程不至于发生铸型严重开裂,导致炮火;②砂型应具有比较高的化学惰性,以防化学活性较高的熔融钛合金与耐火氧化物发生剧烈的化学反应。

为此,我们设计了莫来石+硅溶胶体系制备铸型主体部分,以增强铸型强度,防止铸型开裂;设计了与熔融钛接触的惰性层,以避免砂型与钛合金发生反应。

1.2　造型工艺

砂型制备工艺流程如图1,莫来石砂和粉混合

收稿日期:2019-07-30
作者简介:王涛亮(1985-),河南修武人,硕士,工程师.主要从事有色合金精密铸造技术研究方面的工作.
电话:037969967101,E-mail:wtlhenan@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

均匀后，加入硅溶胶进行均匀搅拌，然后填砂造型制备砂型，砂型进行干燥硬化得到砂型坯体。采用喷涂或刷涂的方式进行砂型面层的制备。由于熔融钛合金化学活性非常大，极易与铸型中的水分、有机物及气体发生反应，造成铸件产生气缩孔甚至报废，因此砂型和砂芯必须进行 1 000 ℃以上的高温焙烧，除去铸型内水分、有机物及有害气体。

1.3　铸型制备

钛合金壳体铸型设计如图 2，为了方便砂型造型、砂型脱模、面层制备及表面修整等操作，铸型设计为盖板、上半型、下半型、型芯和底板。

砂型模具采用木质模具，莫来石砂和莫来石粉按比例称取并混合均匀，加入硅溶胶后进行均匀混料，填砂造型制备砂型，干燥硬化后脱模。惰性面层涂料采用钛合金熔模精密铸造用 Y_2O_3 面层涂料，采取刷涂的方式进行面层制备，干燥后在普通台式电阻炉内进行 1 000 ℃以上的高温焙烧。砂型和砂芯实物见图 3，由图可知，砂型和砂芯经过高温焙烧后，没有发生开裂和面层剥落情况，砂型和砂芯质量良好。

1.4　熔铸

熔炼浇注是在 150 kg 真空自耗电极凝壳炉中进行，浇注选用经过两次熔炼的 ZTC4 铸锭。铸型按照要求进行组型和紧固，装炉后进行抽真空，当炉内真空度小于 4 Pa 时开始熔炼，铸件浇注完成后随炉冷却 1.5 h 后出炉，观察浇注后铸型情况，砂型没有发生明显开裂情况。

2　试验结果与讨论

2.1　表面及内部质量

铸型清理和浇注系统切割后，铸件实物见图 4，目视观察，铸件表面光洁，没有发生化学粘砂现象，铸件进行荧光渗透检测，铸件表面无裂纹、流痕、冷隔等铸造缺陷。

浇注后的铸件进行 X 射线透照检查，射线探伤仪型号 XYG-3210/3。如图 5，经 X 射线检查，铸件内部没有发现裂纹、夹渣和大缩孔缺陷，仅在铸件均匀薄区发现有缩松缺陷（见图 5(b)）。铸件进行热等静压（HIP）处理，HIP 后铸件进行了 100%的 X 射线透照检查，检查结果如图 6，X 射线检查结果显示，铸件内部无缩松缺陷。试验表明砂型铸件内部的缩松缺陷可以通过热等静压处理进行消除，不影响铸件质量[7]。

砂型铸件经过荧光渗透检查及 X 光检查，均没有发现裂纹缺陷，与机加石墨型铸件相比，铸件质量有显著改善。砂型铸件铸造用铸型坯体的采用是合成莫来石，合成莫来石与人造石墨的热学性质比对见表 1，相同条件下，合成莫来石的热导率要远小于人造石墨，钛液浇注到砂型中，冷却较慢，铸件表面不会产生流痕、冷隔等缺陷。不仅如此，砂型铸型孔隙率高，退让性好，在铸件浇注过程中凝固收缩的阻力小，可明显减弱铸件表面产生裂纹缺陷的趋势，从

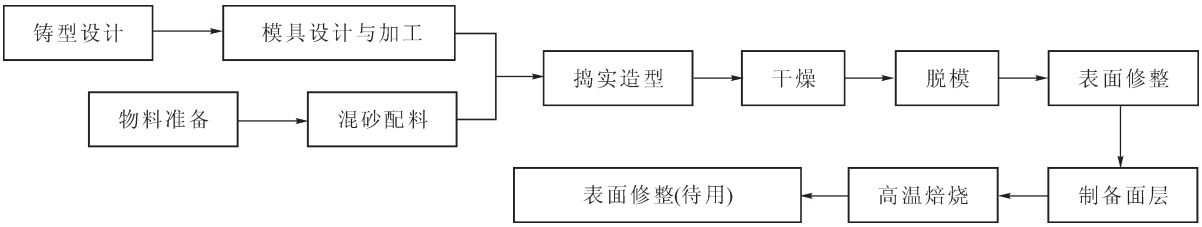


图 1　砂型制备工艺流程图

Fig.1　The flow chart of sand mold preparation process

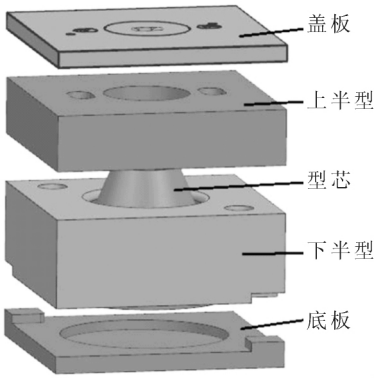


图 2　铸型设计图

Fig.2　Design drawing of mold

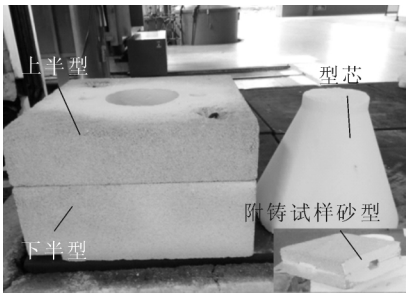


图 3　砂型 / 砂芯实物图

Fig.3　Real products of sand mold and core

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

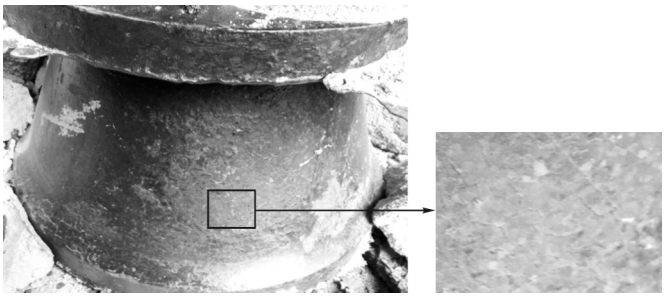
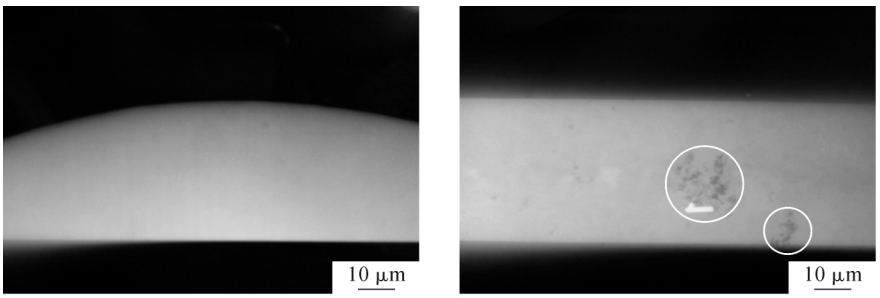


图 4 浇注后铸件实物图
Fig.4 Real products of the casting



(a)厚大区域　　(b)均匀薄区

图 5 浇注后铸件的 X 射线检查结果
Fig.5 X-ray examination results of the casting

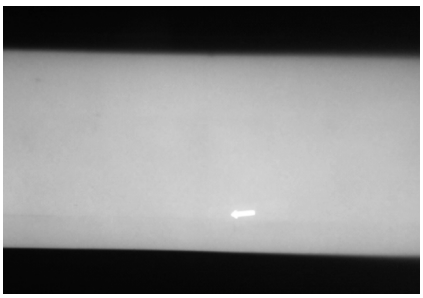


图 6 热等静压后铸件的 X 射线检查结果
Fig.6 X-ray examination results of the casting after HIP

表1 合成莫来石与人造石墨的热学性质
Tab.1 The thermal properties of synthetic mullite and artificial graphite

性能	合成莫来石	人造石墨
热化学稳定性(与熔融钛接触)	剧烈反应	微弱反应
耐火度/℃	1 730～1 800	＞3 000
平均热膨胀系数×10^{-6}(20～1 000 ℃)	5.5～5.8	5.1～5.4
热导率/W·(m·K)$^{-1}$(1 000 ℃)	3.83	60.00
空气中加热氧化	不会氧化	430 ℃开始氧化

而减少铸件后处理的补焊量，铸件质量大幅度提高，降低了铸件后处理成本。此外，人造石墨在空气中加热，温度超过 430 ℃后会发生氧化，限制了机加工石墨型的预热温度，而合成莫来石在空气中加热不会发生氧化，可以通过提高砂型的预热温度，改善薄壁铸件的充型性，这也是该工艺的的应用优势。

2.2 化学成分及力学性能

采用 FOUNDRY-MASTER Xpert 全谱直读光谱仪和 G8 GALILEO ONH 氧氮氢分析仪进行钛合金壳体砂型铸件的化学成分分析，铸件的化学成分结果见表 2。

铸件的力学性能采用同炉的附铸试棒，经过了热等静压后进行测试，附铸试棒的尺寸为 13 mm×13 mm×130 mm，试验设备为 CMT5105 微机控制万能试验机。铸件的室温拉伸、350 ℃高温拉伸性能试验结果见表 3。

上述结果表明，钛合金壳体铸件的化学成分和力学性能符合 GJB2896A-2007 标准要求。试验结果证明，砂型铸造工艺能够保证钛合金铸件的化学成份和力学性能。

2.3 成本分析

经过成本核实和对比分析，采用砂型铸造工艺，能够显著降低钛合金的铸造成本，缩短生产周期。本文中钛合金砂型铸造工艺中砂型主要原料为莫来石和少量 Y_2O_3 粉，造型材料综合价格低，造型工艺简

表2 铸件的化学成分 w(%)
Tab.2 Chemical composition of the casting

ZTC4	主量元素			杂质元素(≤)					
	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
标准值	余量	5.50～6.80	3.50～4.50	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20
实测值	余量	6.41	4.35	0.04	0.02	0.009	0.01	0.001	0.15

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 铸件的拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of the casting

合金牌号	温度	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 A(%)	断面收缩率 Z(%)
ZTC4	22℃	920	828	6.5	19
		933	839	8.0	16
		926	831	7.5	18
	标准值	≥890	≥820	≥5	≥10
	350℃	630	/	/	/
		620	/	/	/
		634	/	/	/
	标准值	500	/	/	/

单，铸型制造成本比机加石墨型低。此外，砂型铸件较石墨型铸件，铸件表面和内部质量得到大幅度改善，进一步降低了后处理成本。综合分析，与机加石墨型铸造工艺相比，砂型铸造成本降低近 1/2。

3　结论

（1）采用砂型铸造工艺，成功完成 ZTC4 钛合金壳体铸件的试制，铸件表面无裂纹、流痕、冷隔等缺陷，铸件内部无裂纹、夹渣、大缩孔等缺陷，铸件质量得到明显改善。

（2）砂型铸件的各项性能指标均满足GJB2896A-2007 的要求，该钛合金砂型铸造工艺可行。

（3）与机加石墨型相比，砂型铸造的生产成本降低了近 1/2。

参考文献：

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

[2] 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)：2065-2066.

[3] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究 [J]. 飞航导弹，2002，7: 50-60.

[4] 沈选金，贺同正，罗国军. 钛及其合金的熔模精密铸造[J]. 铸造技术，2015，36(7): 1876-1878.

[5] 曹运红. 钛合金金属型铸造工艺研究现状 [J]. 特种铸造及有色合金，1999 ，19(s1): 129-131.

[6] 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.

[7] 张满，南海，黄东，等. 钛合金铸造的热等静压和氢处理工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术，2002(5): 1-3.

[8] 王维邦. 耐火材料工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社，2006.

[9] 胡宝玉，徐延庆，张宏达. 特种耐火材料实用技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社，2004.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动，旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式，深度挖掘铸造界人文财富，倾心打造行业精深资讯，进而从独有的精神与文化之角度施力，推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷，《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈，从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事，在第一时间得到启迪与感悟，进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道，必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受，高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处，无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入，是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛，激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染，使人情不自禁地用看似清淡的笔墨，仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端，故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问，科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶，科学是全人类的共同财富，科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年，读者不难发现，所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是，以优秀传统文化底蕴为基石，以高尚道德操守与精神境界为标杆，倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格，倾心为读者朋友打造理性思考的空间，竭力实现被访者—读者的理性与情感的惊人共鸣。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net