

涂层技术在钛合金石墨型铸造中的应用研究

常化强 姬战利 穆晓辉 孙宏喆 李渤渤

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司)

摘要 研究了涂层技术对石墨型铸造充型能力以及钛合金铸件品质的影响。结果表明,石墨型经过涂层处理后,钛合金液流散更均匀、稳定,充型能力得到提高,可有效减少铸件表面的流痕、冷隔缺陷并改善其表面粗糙度,表面粗糙度由 $12.5\ \mu\text{m}$ 提高至 $6.3\ \mu\text{m}$,能够有效避免铸件表面裂纹的形成且与石墨粘结性好,无掉渣现象。金相组织观察发现,铸件表面扩散层厚度与无涂层的相当,均小于 $0.05\ \text{mm}$ 。

关键词 涂层;石墨型铸造;钛合金

中图分类号 TG146.23;TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Coating Technology on Graphite Casting of Titanium Alloy

Chang Huaqiang, Ji Zhanli, Mu Xiaohui, Sun Hongzhe, Li Bobo

(Luoyang Sunrui Ti Precision Casting Co., Ltd.)

Abstract: The effects of coating technology on filling capacity of graphite casting and the quality of titanium alloy casting was investigated. The results indicate that the liquid dispersion of the titanium alloy is more uniform and stable after the coated graphite mold, and the filling ability of the thin plate is improved, effectively reducing the flow mark and cold shut defects on the surface of castings and improving the surface roughness, which is increased from $12.5\ \mu\text{m}$ to $6.3\ \mu\text{m}$. Surface crack formation of castings is effectively avoided, and good adhesion with graphite is obtained without slag dropping. The metallographic examination demonstrates that the thickness of the diffusion layer on the surface of the casting is equivalent to that of the uncoated one, both of which are less than $0.05\ \text{mm}$.

Key Words: Coating, Graphite Casting, Titanium Alloy

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、线膨胀系数小以及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,广泛应用于石油化工、船舶、航空航天等领域^[1~3]。随着钛铸件市场的不断扩大,对产品品质提出了更高要求。由于 Ti 的高化学活性,其能与多种物质发生化学反应,导致铸造难度较大,目前常用的钛合金铸造工艺有精密铸造和机加工石墨型铸造^[4,5]。精密铸造主要应用于薄壁钛合金铸件的生产,获得的铸件外观品质好,但是采用精密铸造生产大型薄壁钛合金铸件时^[6],在蜡模阶段的变形不易控制,蜡模的变形造成最终铸件尺寸超差,严重时造成铸件报废,且铸件成品率较低。机加工石墨型铸造生产大型薄壁钛合金铸件^[7],在保证铸件充型完整的情况下,其成品率高,但由于石墨型的传热系数高、线膨胀系数低、退让性差,导致获得的铸件表面易产生流痕、冷隔等问题,且充型极限

低。涂刷涂层可改善石墨铸型表面粗糙度,还可以降低铸型的传热系数,减缓钛液的凝固速率,减少铸件表面流痕、冷隔等缺陷,提高铸件表面品质^[8]。

本课题选择 Y_2O_3 粉作为面层材料、硅溶胶作为粘结剂配制涂料,在机加工石墨型表面涂刷厚度约 $0.2\ \text{mm}$ 的涂层,研究涂层对 ZTC4 钛合金铸件充型能力和表面品质的影响,为高品质钛合金铸件的生产提供参考。

1 试验原料

试验用 Y_2O_3 粉粒径中位数为 $15.55\ \mu\text{m}$,粒度分布最高峰在 $18\sim 21\ \mu\text{m}$ 之间,属于 325 目的粉料。涂料用粘结剂为硅溶胶,其中 SiO_2 含量为 $25\%\sim 27\%$,此外还需辅助材料消泡剂(正辛醇)等。石墨铸型材料选用人造石墨,C 含量在 99% 以上,灰分小于 0.5% 。试验

收稿日期:2021-11-02;修改稿收到日期:2021-12-01

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300,2020YFB2008305)

第一作者简介:常化强,男,1988 年出生,工程师,河南洛阳(471000),E-mail:changhuaqiang123@sina.com

引用格式:常化强,姬战利,穆晓辉,等. 涂层技术在钛合金石墨型铸造中的应用研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):652-654.

CHANG H Q, JI Z L, MU X H, et al. Application of coating technology on graphite casting of titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):652-654.

用 ZTC4 合金的化学成分见表 1。

表 1 ZTC4 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZTC4 alloy %

ω_B								
Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	<0.3	<0.15	<0.1	<0.05	<0.015	<0.2	余量

2 试验设计

2.1 涂料调配

将 Y_2O_3 和硅溶胶按照质量比为 1 : 1 混合调配涂料,加入 1~2 滴消泡剂 1~2 次,减少刷涂料时石墨粉累积污染涂料。搅拌棒搅动涂料至出现流动性,再倒入正丁醇稀释液搅拌均匀,得到粘度合适的涂料。标准样块尺寸为 120 mm×80 mm×20 mm,见图 1,按照操作规程进行表面涂层,晾干后保存于干燥通风处,用于石墨型涂刷涂层后对比检验。

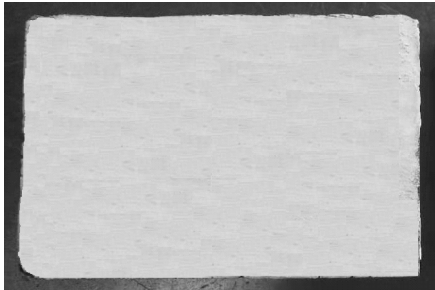


图 1 涂刷涂层后的标准样块形貌
Fig.1 Standard specimen after coating

2.2 充型能力试验

为了验证石墨型表面涂刷涂层对钛液充型能力的影响,设计了 4 块 300 mm×300 mm×4 mm 的薄板模型进行对比,见图 2。在中间分别设计了 $\phi 20$ mm 和 $\phi 30$ mm 的直浇道。图 3 为石墨型图片。白色的为经过涂刷涂料的机加工石墨型,黑色的为未刷涂料的机加工石墨型。

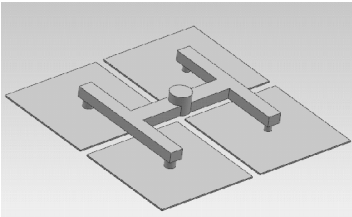


图 2 薄板浇注示意图
Fig.2 Schematic diagram of pouring casting of thin plate



图 3 薄板的石墨型图片
Fig.3 Graphite mold for thin plate

2.3 铸件浇注

设计了薄壁铸件进行测试,见图 4。铸件外型尺寸为 260 mm×170 mm×70 mm,壁厚为 4 mm,中空部分尺寸为 60 mm×50 mm×66 mm。浇注两件,对其

中 1 件石墨型进行涂料涂刷,见图 5。

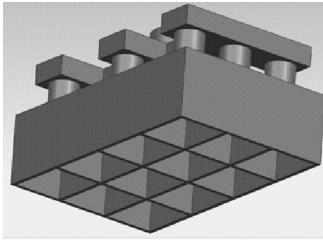


图 4 薄壁铸件设计图
Fig.4 Design diagram of thin-walled casting

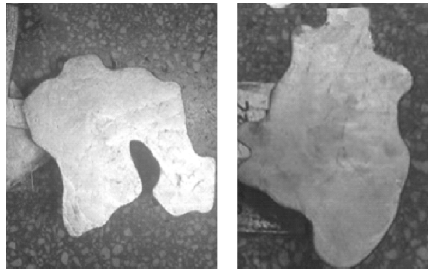


图 5 薄壁铸件的石墨型
Fig.5 Graphite mold for thin-walled casting

3 试验结果及讨论

3.1 充型能力分析

图 6 为薄板充型试验对比。经测量,无涂层充型面积比约为 58%,有涂层充型面积比约为 76%。由此可知,未涂刷涂料的石墨型充型面积相对较小,且石墨型表面钛液出现受阻现象,最终会产生流痕、冷隔、浇不足等缺陷。涂刷涂料后石墨型表面更平整光滑,钛液从浇道出口处向四周流动更均匀、稳定,不易产生冷隔、浇不足等缺陷,且充型面积更大,约为无涂料的 1.3 倍,即涂刷涂料可以改善薄板的充型能力。



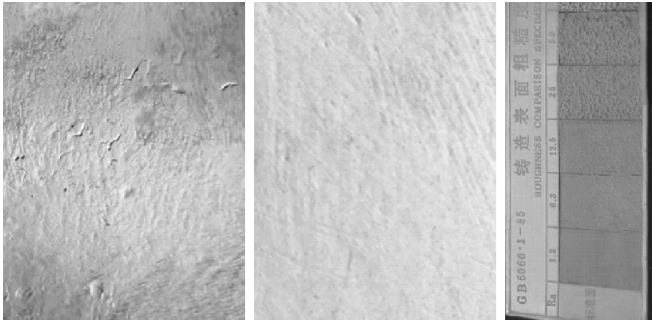
(a) 无涂层 (b) 有涂层

图 6 薄板充型试验对比照片

Fig.6 Comparative of filling test for thin plate

3.2 铸件品质分析

铸件宏观表面形貌见图 7。可以看出,无涂层的铸件表面流痕、冷隔、凹坑明显较多,分布密集,对照铸造表面粗糙度比较样块可知其表面粗糙度约为 12.5 μm ;



(a) 无涂层 (b) 有涂层 (c) 对比样块

图 7 有无涂层铸件表面对比照片

Fig.7 Comparison of casting surface with and without coating

有涂层的铸件表面流痕较少,且表面粗糙度可达6.3 μm。铸件表面的流痕是钛液进入型腔形成较薄而又不完整的金属层后,被后来的钛液补缩后留下的痕迹。由于石墨型的传热系数较大,钛液进入型腔迅速冷却凝固,导致一些部位钛液之间并没有完全熔合而产生流痕以及冷隔。在石墨铸型上刷涂涂层可以降低铸型的传热系数,减缓钛液的凝固速率,可以减少铸件表面的流痕和冷隔缺陷,改善了铸件的表面粗糙度。

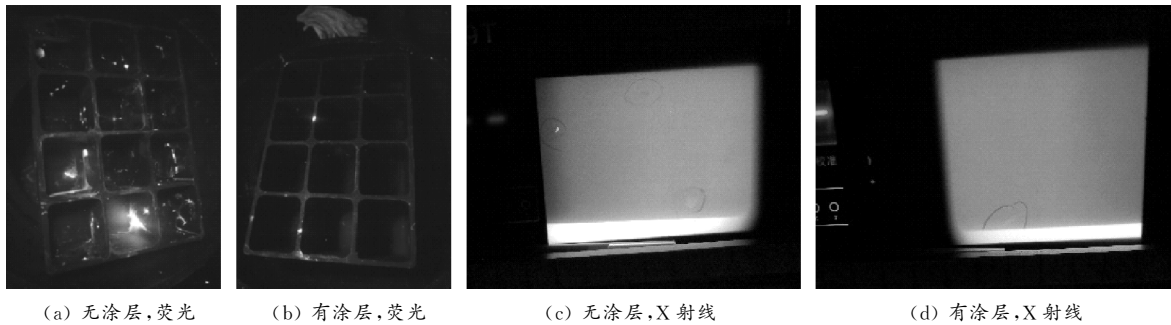


图 8 有无涂层 ZTC4 合金铸件荧光和 X 射线检测对比照片

表 2 铸件的缺陷统计

Tab.2 Defect statistics of castings

铸件	缺陷数量/处	
	荧光裂纹	高密度夹杂、缩孔
无涂层	43	6
有涂层	13	4

内部缺陷。

3.3 表面扩散层分析

为了分析石墨铸型内表面涂刷涂层后与铸件的界面元素扩散情况,在铸件本体上切割试样进行金相组织测试和表面能谱分析。图 9 和图 10 分别为铸件表面扩

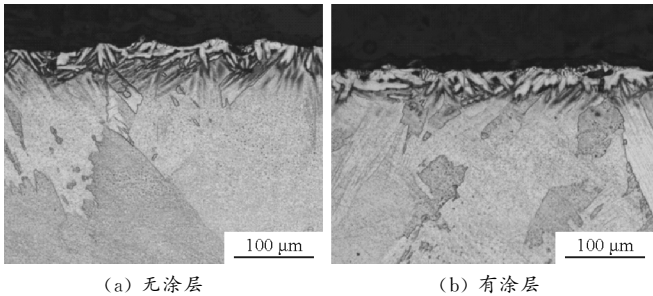


图 9 有无涂层 ZTC4 铸件表面扩散层形貌

Fig.9 Morphologies of surface diffusion layer of ZTC4 alloy castings with and without coating

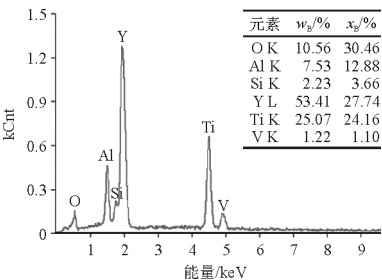


图 10 ZTC4 铸件表面能谱分析

Fig.10 Surface energy spectrum analysis of ZTC4 alloy castings

在铸件热等静压后进行荧光和 X 射线检测,并对缺陷进行统计,见图 8 和表 2。可以看到,无涂层的铸件有明显的线性缺陷,表面的微裂纹共 43 处;有涂层的铸件表面质量较好,没有明显的缺陷,说明涂层可以改善铸件荧光检测质量。铸件经 X 射线检测和缺陷统计发现,无涂层铸件内部的高密度夹杂和缩孔有 6 处,有涂层铸件的高密度夹杂和缩孔只有 4 处,说明涂层与石墨型结合力较好,没有出现涂层掉渣现象,还可以减少

散层形貌及 EDS 分析。由图 9 可以看出,无涂层的试样表面存在厚度为 26.9 μm 的元素扩散层,为 Ti 的氧化物及碳化物。有涂层的试样表面扩散层厚度为 28.4 μm,与无涂层的石墨型铸件相当。由图 10 可知,扩散层为 Y 和 Si 的氧化物,与涂料成分相符。铸件表面的扩散层可以通过喷砂或酸洗等方式进一步去除。

4 结 论

- (1)采用石墨型铸造 ZTC4 合金时,石墨型涂刷涂料后钛液流动更均匀、稳定,提高了薄板的充型能力。
- (2)石墨型铸造钛合金时,石墨型涂层不仅可以有效减少铸件表面的流痕、冷隔缺陷并改善表面粗糙度, Ra 由 12.5 μm 降至 6.3 μm,还能够有效避免表面裂纹,无掉渣现象。
- (3)石墨型铸造钛合金时,石墨型涂层可使铸件表面扩散层厚度与无涂层的相当,均小于 0.05 mm。

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] 朱知寿.我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J].航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.

[3] 南海,谢成木.国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J].中国铸造装备与技术, 2003(6): 1-3.

[4] 肖树龙,陈玉勇,朱洪艳,等.大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J].稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 678-681.

[5] 游涛,吴鹏,姚谦,等.一种钛合金镜筒的石墨型离心铸造工艺[J].铸造, 2012, 61(4): 434-436.

[6] 苏鹏,刘鸿羽,赵军,等.钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J].铸造, 2012, 61(12): 1 401-1 404.

[7] 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.

[8] 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.

(编辑:刘晨辉)