

钛合金铸造用金属铸型研究

陈晓明¹, 张爱博¹, 侯 斌², 闫 平¹, 崔亚迪¹, 张立龙¹, 李嘉伟¹, 梅新民¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 克瑞集团中国采购中心, 上海 200031)

摘要: 金属型工艺因具有模具加工污染小、可多次反复使用、生产效率高、批量生产时铸件成本低, 以及铸件尺寸稳定、精度高等特点, 被认为是钛合金铸件生产中最具潜力的工艺之一。然而, 金属型工艺的激冷作用较强, 导致成形的钛合金铸件表面含有冷隔、流痕等缺陷, 且金属型工艺的使用寿命较短, 限制了该工艺的广泛应用。经研究表明, 在铸型内腔涂敷一层涂层可以有效地解决上述问题。基于此, 本文结合钛合金用金属型铸型材料的界面导热特性, 研究了涂层制备工艺及其对钛合金铸件表面质量的影响。最终确定了最佳的钛合金金属型铸造工艺, 显著地提高了钛合金铸件的批量生产。

关键词: 铸造钛合金; 金属型铸造; 等离子喷涂涂层

钛合金因具有高比强度、高比刚度、低密度、良好的生物相容性、优异的耐腐蚀性能和断裂韧性等综合性能, 被广泛用于航空航天、石油化工、生物医疗等领域。精密铸造技术可实现复杂结构一次近净成形, 是钛合金经济高效成形的首选。但在实际铸造过程中, 由于钛合金在高温熔融状态下具有高化学活性的特点, 因此钛合金对铸型材料提出了较高的要求。目前, 常用的钛合金铸型材料主要包括石墨和氧化钇等稀土氧化物材料, 上述铸型材料近年来成本持续上涨, 造型成本已占到铸件成本的30%以上, 导致铸件成本长期居高不下^[1]。石墨型在浇注过程中容易损坏, 使用寿命普遍较短, 不利于钛铸件的批量生产; 熔模陶瓷型工艺过程复杂, 涉及模具设计和型壳多层涂挂、干燥与焙烧, 一定程度上增加了钛铸件的生产周期^[2]。因此, 如何针对不同铸件选择合适的工艺方法和铸型材料成为钛合金铸造高质量、低成本、高效率、批量生产的关键。

金属型工艺由于具有模具加工简单、加工污染小、模具可多次反复使用、生产效率高、批量生产时铸件成本低和铸件尺寸稳定、精度高等特点, 在非复杂钛合金产品领域具有很广阔的应用前景。美国普惠公司实践研究表明, 当钛合金采用金属型工艺进行浇注成形时, 与熔模陶瓷型工艺相比, 成本降低约40%, 铸件的综合力学性能更为优异, 目前已应用金属型铸造技术制造了F119发动机的第4、5级高压压气机阻燃钛合金导流叶片^[3]。美国EMTEC所开展了钛合金排气阀的金属型铸造工艺研究, 分别采用金属型和陶瓷型浇注了试样, 金属型浇注的试样的抗拉强度和屈服强度均相对较好^[4]。但金属型工艺铸型具有复杂度低, 铸件表面易产生流痕和冷隔、 α 脆性层等缺陷, 厚大钛铸件易与铸型发生熔焊粘结, 铸型的使用寿命低等特点, 极大限制了其广泛使用。

为了提高金属型的使用寿命及消除因金属型的激冷作用导致的钛铸件表面的冷隔、流痕和激冷层等缺陷, 本文从金属型的涂层工艺设计与铸件表面质量分析等方面开展研究, 为钛合金铸造高质量低成本批量生产奠定基础。

1 试验材料及方法

1.1 金属铸型材料选择

目前可用于铸型材料的金属主要包括铸铁、铸钢、铸铜以及部分难熔金属, 其

作者简介:

陈晓明(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事钛合金精密铸造研究。E-mail: cxming2000@126.com

中图分类号: TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)10-1289-06

基金项目:

国家重点研发计划(2020YFB2008300)。

收稿日期:

2022-05-01 收到初稿,

2022-09-08 收到修订稿。

主要物理性能见表1^[5]。

表1 几种金属材料的主要物理性能
Table 1 Main physical properties of several metal materials

材料	熔点/°C	密度 (g·cm ⁻³)	抗拉强 度/MPa	线膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /°C ⁻¹	热导率(20 °C)/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
铸铁	1 220	6.8~7	≥150	13	54~59
铸钢	1 525	7.8	≥400	13.92	58
铜	1 082	8.9	≥150	16.92	390
钛	1 668	4.5	≥350	8.5	15
钨	3 400	19.3	-	4.5	174
钼	2 625	10.2	-	5.2	146
钽	3 000	16.6	-	6.6	54
铌	2 468	8.6	-	7	52

适用于钛合金的金属型铸型材料应满足几方面的要求^[6]。

(1) 具有较高的熔点: 钛合金熔点高, 为避免在凝固过程中铸型熔化变形, 致使铸型与钛铸件发生粘结。因此, 铸型材料需具有较高的熔点。

(2) 具有适当的导热能力: 铸型导热能力强有利于提高钛液冷却能力, 可显著细化钛铸件内部组织, 提高钛铸件的力学性能, 但过高的导热能力不利于钛液充型, 易产生冷隔、流痕、微裂纹等缺陷。因此, 金属铸型的导热能力要适中。

(3) 具有较高的硬度、室(高)温强度、良好的机械加工及补焊性能, 抗热疲劳性能好、在反复冷热循环下的尺寸稳定性好等特点。

(4) 铸型材料成本及造价低廉。

综上, 对比金属材料的物理性能, 并综合考虑成本因素, 选择铸钢作为铸型材料, 具体材质为4Cr5MoV1Si模具钢。

1.2 金属铸型涂层工艺选择

基于其他金属的金属型铸造实践表明, 在金属型内腔涂覆涂层可以有效地解决该铸造工艺所带来的铸件缺陷^[7], 而钛合金在高温熔融状态下具有较高的化学活性, 几乎能与所有铸型材料发生界面反应, 因此在钛合金铸型内腔表面涂覆一层稳定的陶瓷涂层更显得尤为重要。

选择涂层材料的主要原则是: 粉末材料要具有较高的耐火度、抗热震性和良好的保温性或良好的导热性, 与钛液发生较小的界面反应, 因此, 从常用的铸钛用耐火氧化物中选取涂层材料。难熔氧化物结合自由能与温度关系见图1。由图可知, 各种氧化物材料按其熔融钛合金的化学稳定性由低到高排列的顺序为: SiO₂、MgO、Al₂O₃、ZrO₂、CaO、ThO₂、Y₂O₃^[9]。

因此, 试验选择Y₂O₃作为陶瓷涂层材料。

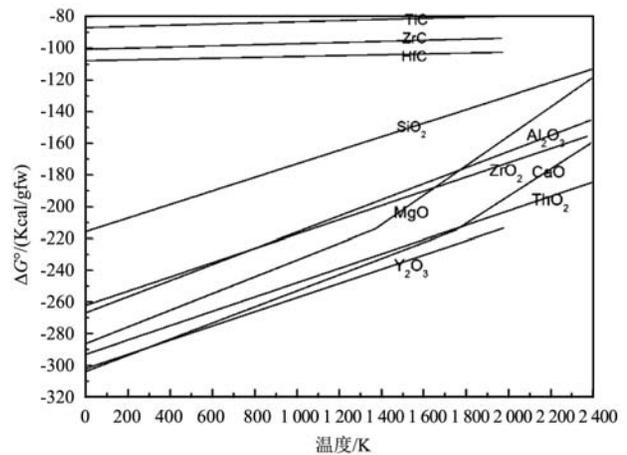


图1 各种氧化物结合自由能与温度的关系

Fig. 1 Correlation of binding free energy and temperature of several oxides

项目选择两种涂覆工艺进行金属型涂层对比试验, 分别是人工涂刷和等离子喷涂。人工涂刷是将氧化钇粉料和粘结剂混合制成涂料, 采用毛涂刷刷在铸型表面, 并经过真空高温焙烧, 形成具有一定结合强度的涂层, 其优点是操作简单, 但制备的涂层表面毛刷痕迹明显。等离子喷涂是采用等离子喷涂机在离子电弧加热下将氧化钇粉末以熔融状态喷射于金属表面形成涂层^[10], 为了增强结合强度, 在氧化钇涂层与金属基体之间增加了Ni/Al合金粉末金属粘结层, 该工艺与人工涂刷相比较复杂, 但涂层厚度易于控制, 并具有较好的表面光洁度, 试验设计的等离子喷涂工艺如表2所示。项目设计了钛合金试样金属铸型, 每个试样大小为80 mm × 20 mm × 20 mm, 采用上述两种制备工艺将涂层涂覆于金属铸型表面(图2), 涂层厚度约为0.3 mm, 浇注时, 采用真空自耗电极电弧凝壳熔炼炉

表2 等离子喷涂铸钛金属型试样工艺参数
Table 2 Process parameters of plasma sprayed metal mold specimens for the titanium casting

电流 /A	电压 /kV	主气 N ₂ /格	流量 计/格	喷射 距离/mm	喷涂 时间/s	喷射 方向
530	77~80	100	43	50~120	210	垂直喷射

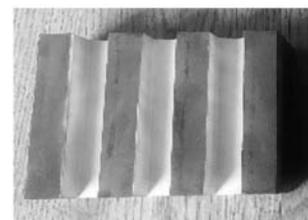


图2 涂覆涂层的金属铸型

Fig. 2 Coated metal casting mold

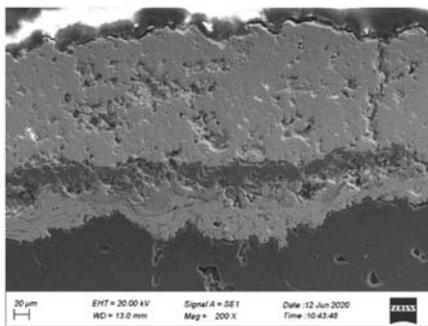
并以离心方式（150 r/min）浇注了钛合金试样，钛合金材质为Ti-6Al-4V。

试样浇注后采用电火花线切割方法切取试样，之后镶嵌于酚醛塑料粉中并进行适当的磨光抛光，分析试样时，采用扫描电子显微镜进行铸型表面和试样表层形貌观察，使用其自带的EDS能谱仪进行成分分析，并试验浇注了金属铸件。

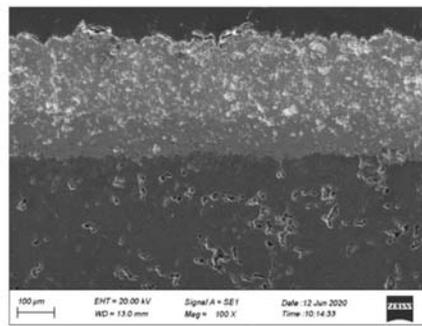
2 金属铸型涂层微观形貌分析

图3为金属铸型表面不同涂层工艺的纵向金相组织形貌，图3a为采用人工涂刷方法制备的涂层，可以看出，陶瓷层与金属基体界限明显，局部有分离的现象，这主要是由于人工涂刷制备的涂层通过物理方式结合，经过高温烧结后，涂层陶瓷化产生应力收缩，与金属基体发生不匹配现象。陶瓷内部纵向衬度变化

明显，这是由于涂料反复涂刷，涂刷方向、凝固时间及微观固相含量不一致所导致。陶瓷层内分布着孔隙和纵向微裂纹，孔隙的形成主要是因为涂料在涂刷时卷吸溶解在涂料中的环境气体未能及时完全溢出，这些气体留在了干燥的涂层层状结构中，形成了大量的孔隙，纵向微裂纹由于焙烧过程中陶瓷涂层释放大量的热应力造成的。微观孔隙和裂纹是涂层中的应力集中区，极易造成裂纹的产生并加速裂纹的扩展，成为金属基体元素扩散的通道，加速涂层与金属基体受到的化学侵蚀，进而降低涂层强度，加速氧化物的生长，最终导致涂层的失效。图3b为采用等离子喷涂方法制备的涂层，可以看出，陶瓷层与粘结层、粘结层与金属基体之间的界面处结合都比较好，没有明显的裂纹存在，涂层组织较为致密。



(a) 人工涂刷



(b) 等离子喷涂

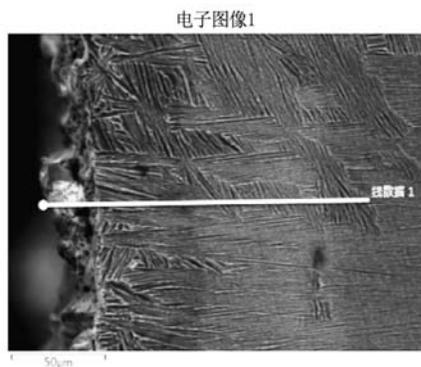
图3 不同工艺金属铸型纵向截面金相组织

Fig. 3 Metallographic microstructure of longitudinal direction of the metal casting molds with different processes

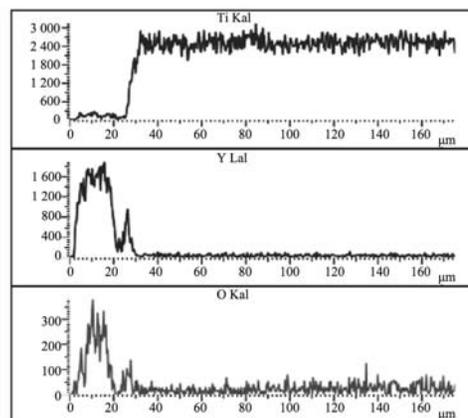
3 金属铸型与钛合金界面反应分析

为了分析涂层金属型工艺对钛试样表面质量的影响，对试样表面污染层进行了扫描电镜线扫描分析，如图4和图5所示。由图可知，人工涂刷涂层的金属型浇注的钛合金试样表层出现了一定程度的Y元素和O元

素的扩散，扩散厚度约10 μm，这主要是由于人工涂刷涂层结合性和稳定性较差，孔隙和微观裂纹部位易与钛液发生反应，导致钛液被污染。而采用等离子喷涂涂层的金属型浇注的钛合金试样表面未出现Y元素和O元素的扩散。上述分析表明，等离子Y₂O₃涂层可以较



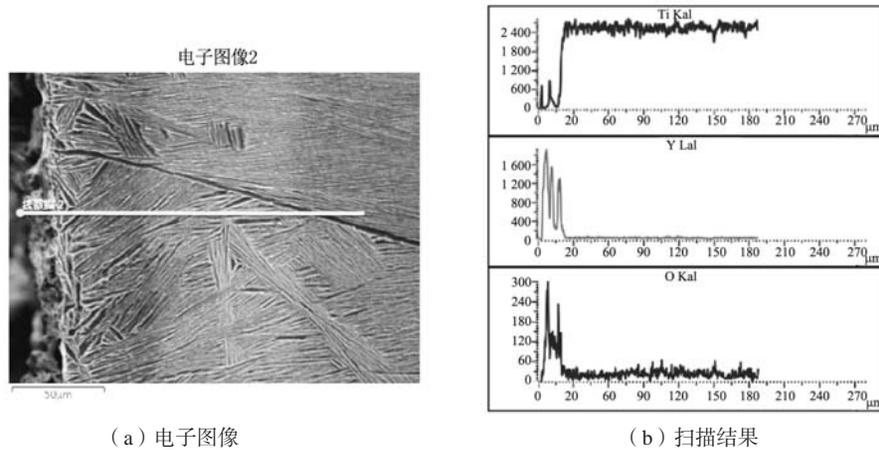
(a) 电子图像



(b) 扫描结果

图4 人工涂刷涂层金属型浇注的钛合金试样表层线扫描结果

Fig. 4 EDS Line scan results of the surface layer of the titanium alloy samples cast by the artificially brushed coated metal molds



(a) 电子图像

(b) 扫描结果

图5 等离子喷涂涂层的金属型浇注的钛合金试样表层线扫描结果

Fig. 5 EDS Line scan results of the surface layer of the titanium alloy samples cast by the plasma spraying coated metal molds

好的阻隔金属材料与熔融钛液发生化学反应。

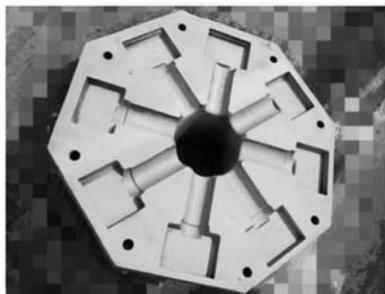
4 典型钛合金铸件试制

4.1 金属铸型制备

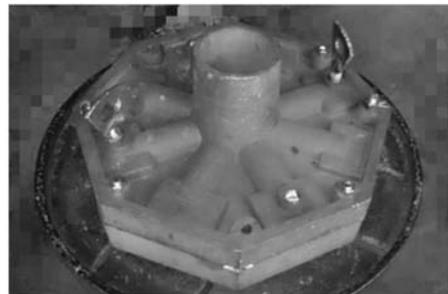
本试验采用上述涂层工艺浇注制备了舵轴铸件，金属铸型分成两块组装而成，主体材料选用4Cr5MoV1Si热作模具钢，鉴于该铸件结构不太复杂，尺寸不大，未采用镶块、底座和导轨结构，模具紧固采用45#钢螺栓紧固，金属型模具见图6。为了增强金属

基底与涂料之间的结合强度，对金属型进行除锈、除油处理后，吹16~24目的棕刚玉砂，吹砂时间5 min，以保证涂层和基体的良好结合。铸造充型离心转速为250 r/min，浇注的铸件进行清型、切割浇冒系统、喷砂处理和HIP处理后进行了质量分析。

图7为浇注后的舵轴铸件，图8为喷砂处理后的舵轴铸件。由图可知，人工涂刷涂层后的金属铸型浇注的铸件表面有很多流痕和“钛豆”，表面凹凸不平，某些部位表面还有微裂纹，表面质量较差。涂覆涂层



(a) 金属型内腔结构



(b) 组装后的金属铸型

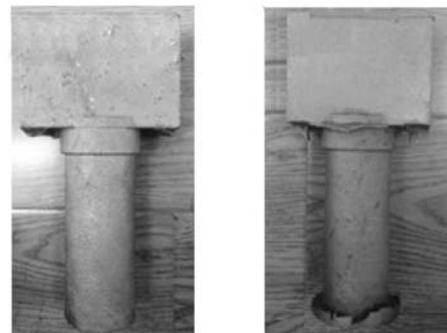
图6 涂覆涂层后的金属铸型

Fig. 6 Metal molds with coating



图7 浇注后的铸件

Fig. 7 Castings after pouring



(a) 普通金属铸型

(b) 涂覆涂层的金属铸型

图8 喷砂状态舵轴铸件

Fig. 8 Sandblasted rudder shaft castings

后的金属铸型浇注的铸件表面则比较光滑，铸件表面没有明显的流痕和裂纹，说明涂层工艺可以明显改善铸件表面的光洁度。

图9为两件舵轴铸件的荧光照片对比图，左边是人工涂刷涂层金属铸型浇注的铸件，右边是等离子涂层金属铸型浇注的铸件。由图可知，左边铸件有明显的

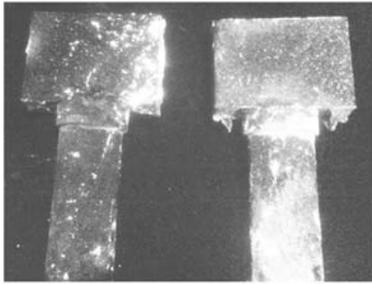


图9 舵轴铸件荧光对比

Fig. 9 Comparison of fluorescent results of the rudder shaft castings

线性缺陷，是表面的微裂纹。右边的铸件表面质量则较好，没有明显缺陷。

研制的铸件经最终X射线和荧光渗透检验，质量符合产品技术要求，见表3，表面质量优于同类采用机加石墨型铸造的铸件。

取浇注的舵轴铸件附铸试样进行力学性能和化学成分检验，结果见表4和表5，均达到GJB2896A—2007中相关要求。

表3 X光检测和表面着色检查结论
Table 3 Conclusions of the X-ray test and surface coloring test

检测项目	铸件X射线检验	铸件渗透检验
检验标准	GJB1187A—2001	GJB2367A—2005
铸件状态	HIP	吹砂酸洗
结论	合格	合格

表4 试制铸件（ZTA15）化学成分检测结果
Table 4 Test results of chemical compositions of the trial casting（ZTA15）

项目	主要成分					杂质含量						$w_B / \%$
	Ti	Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	
要求值	基	5.5~6.8	0.8~2.5	0.5~2.0	1.5~2.5	≤0.30	≤0.15	≤0.13	≤0.05	≤0.01	≤0.16	
实测值	余量	6.36	2.33	1.43	1.93	0.16	0.01	0.020	0.017	0.002 5	0.082	

表5 试制铸件（ZTA15）力学性能检测结果
Table 5 Test results of mechanical properties of the trial casting（ZTA15）

项目	R_m / MPa	$R_{p0.2} / \text{MPa}$	$A / \%$	$Z / \%$	状态
要求值	≥885	≥785	≥5	≥12	热等静压
实测值	942	835	14.0	25	热等静压

5 结论

(1) 本试验采用模具钢4Cr5MoV1Si作为金属铸型，对比分析了采用人工涂刷和等离子喷涂两种方式制备的涂层微观形貌，人工涂刷涂层质量相对较差，出现局部分离，且内部存在微观孔隙和裂纹，而等离

子喷涂涂层质量较好，涂层组织较为致密，结合性好。

(2) 涂覆人工涂刷涂层金属型浇注的钛试样表面发生了界面反应，涂层材料扩散到试样表面，并且浇注的舵轴铸件表面粗糙度低、微裂纹严重；而涂覆等离子涂层金属型浇注的钛试样表面几乎没有发生界面反应，铸件表面光滑平整，没有出现明显的流痕和裂纹缺陷。

(3) 采用等离子涂层工艺制备金属型较为理想，可以实现简单小型钛铸件在批量生产过程中降低成本和提高表面质量的目的。

参考文献:

- [1] 张新, 刘鸿羽, 车昶, 等. 钛合金低成本成形技术研究进展 [J]. 铸造, 2021 (10): 1141-1148.
- [2] 姜延亮, 刘鸿羽, 马志毅, 等. 钛合金金属型铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (5): 454-458.
- [3] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况 [J]. 航空科学技术, 2005 (4): 3-6.
- [4] 郭景杰, 盛文斌, 贾均. 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 (1): 129-131.
- [5] 谢成木. 钛及钛合金铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 103.
- [6] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第6卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 196-321.

- [7] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1994: 204-298
- [8] 叶升平, 罗吉荣. 金属型涂料绝热与强度性能的测试与评价 [J]. 特种铸造及有色合金, 1994 (2): 12-14.
- [9] MCDEAVITT S M, BILLINGS G W, INDACOCHEA J E. High temperature interaction behavior at liquid metal-ceramic interfaces [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002 (11): 392-401.
- [10] 赵力东, Erich L, 李新. 热喷涂技术的新发展 [J]. 中国表面工程, 2003 (3): 5-8.

Research on Metal Mold Technology for Titanium Alloy Casting

CHEN Xiao-ming¹, ZHANG Ai-bo¹, HOU Bin², YAN Ping¹, CUI Ya-di¹, ZHANG Li-long¹, LI Jia-wei¹, MEI Xin-min¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Crane Co. China Sourcing, Shanghai 200031, China)

Abstract:

The metal mold casting is considered to be one of the most potential titanium alloy castings processes because of its multiple advantages, such as low pollution, reusability, high production efficiency, low casting cost during batch production, stable casting size, and high precision. However, with the strong chilling effect of the permanent type process, the titanium alloy castings have some surface defects including cold insulation and flow marks, besides, the short service life of the permanent mold limits the application scope of the process. The studies show that the above problems can be effectively solved by adding a coating layer. Therefore, combining with the interfacial thermal conductivity properties of permanent mold casting materials for the titanium alloys, this paper studied the coating preparation process and its influence on the surface quality of the titanium alloy castings. The optimum titanium alloy permanent mold casting process was finally determined, which significantly improved the mass production of the titanium alloy castings.

Key words:

casting titanium alloys; permanent mold casting; plasma spray coating
