

钛合金熔模铸造型壳面层制备 真空浸浆工艺研究

孙 冰, 杨 光, 孙宏喆, 乔海滨, 刘雅心

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南洛阳 471000)

摘要: 在微小型复杂精密件的钛合金熔模铸造中, 薄壁浇不足与表面钛珠和夹渣是亟待解决的关键问题。本研究针对熔模精铸型壳面层制备工艺展开深入研究, 系统对比了常压浸浆、负压消泡浸浆及负压浸浆工艺对型壳面层性能的影响。结果表明, $-0.08 \sim -0.1$ MPa 高负压浸浆工艺优势突出, 该工艺借助高负压抽吸作用, 可强化浆料密实度, 促进浆料附着填充, 减少蜡模表面气膜与气泡, 进而提升面层致密度, 所制备的型壳面层平整光洁, 孔隙密度显著降低。同时, 高负压浸浆工艺在增加面层厚度和提高抗弯强度方面效果显著。经蓝牙无线耳机微小型复杂精铸件批量铸造验证, 采用该工艺能够完整成形 $0.7 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 规格的穿线槽与 0.5 mm 壁厚的薄壁壳, 有效改善细孔窄槽中的钛珠和夹渣缺陷, 抑制界面反应污染层的产生, 将表面粗糙度 R_a 值优化至 $1.6 \sim 3.2 \text{ }\mu\text{m}$, 相比常压工艺, 合格率从22%提升至96%。高负压浸浆通过强化浆料渗透与消泡机制, 为微小型薄壁复杂精密件的熔模铸造工艺升级提供了有力的技术支撑。

关键词: 钛及钛合金; 熔模铸造; 真空浸浆; 面层; 负压消泡

中图分类号: TG146.2; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0929-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0119

Study on Vacuum Slurry Dipping Process of Shell Face coat for Titanium Alloy Investment Casting

SUN Bing, YANG Guang, SUN Hong-zhe, QIAO Hai-bin, LIU Ya-xin

(Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Co., Ltd., Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: In the investment casting of titanium alloys for micro-sized complex precision components, the misrun of thin-walled parts and the surface titanium beads and slag inclusions are critical issues to be addressed urgently. This study conducted an in-depth investigation into the preparation process of the investment casting shell surface layer, and systematically compared the effects of atmospheric pressure slurry dipping, negative pressure defoaming slurry dipping, and negative pressure slurry dipping processes on the performance of the shell surface layers. The results show that the high negative pressure slurry dipping process with a pressure range of -0.08 MPa to -0.1 MPa has prominent advantages. Relying on high negative pressure suction effect, this process can enhance the compactness of the slurry, promote the adhesion and filling of the slurry, reduce the air film and bubbles on the surface of the wax pattern, thereby improving the density of the surface layer. As a result, the shell surface layer becomes smoother and cleaner, with a significant reduction in pore density. Meanwhile, the high negative pressure slurry dipping process shows remarkable effects in increasing the thickness of the surface layer and improving the bending strength. Verification through mass casting of micro-sized complex precision castings for bluetooth wireless headphones shows that this process can completely form $0.7 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ wire grooves and 0.5 mm thin-walled shells. It effectively improves the defects of titanium beads and slag inclusions in fine holes and narrow grooves, inhibits the formation of interface reaction pollution layers, and optimizes the surface roughness R_a value to $1.6 \sim 3.2 \text{ }\mu\text{m}$. Compared with the atmospheric pressure process, the qualified rate is increased from 22% to 96%. The high negative pressure slurry dipping provides strong technical support for the upgrading of investment casting processes for micro-sized thin-walled complex precision parts by strengthening the slurry penetration and defoaming mechanisms.

Key words: titanium and titanium alloys; investment casting; vacuum slurry dipping; face coat; negative pressure defoaming

基金项目: 河南省重点研发专项 (251111231300)。

收稿日期: 2026-03-30 收到初稿, 2026-04-28 收到修订稿。

作者简介: 孙冰 (1988-), 女, 硕士, 主要研究方向为高性能钛合金材料及精密铸造技术。E-mail: ice211sun@163.com

引用格式: 孙冰, 杨光, 孙宏喆, 等. 钛合金熔模铸造型壳面层制备真空浸浆工艺研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (8): 929-935.

Sun Bing, Yang Guang, Sun Hongzhe, et al. Study on vacuum slurry dipping process of shell face coat for titanium alloy investment casting [J]. Foundry, 2026, 75 (8): 929-935.

钛合金凭借高强度、低密度、优异的生物相容性、耐腐蚀性及良好的高温稳定性等突出特性,已成为航空航天、医疗等高端领域不可或缺的关键材料^[1-9]。熔模精密铸造技术因其近净成形的独特优势,在复杂薄壁铸件的批量生产中得到广泛应用^[10-12]。然而,含微孔(直径0.5~3 mm、长径比大于5)和窄槽等特殊结构的零件,在铸造过程中极易产生钛珠(豆)、夹杂及浇不足等缺陷^[13-16]。经深入分析,缺陷成因主要为常规面层浆料制备过程中残留的气泡会形成型壳面层的烧结缺陷源,当高温钛熔体与含缺陷的型壳面层接触时,便会生成钛珠或反应夹杂;此外,型壳面层表面的孔隙会阻碍熔体顺利充型至薄壁区域,从而导致浇不足缺陷^[17-19]。当前研究多聚焦于浇冒系统的结构优化,而对面层浆料配方及制备这一源头控制技术的探索尚未取得突破性进展。值得注意的是,钛合金在高温浇注时会对型壳面层产生较大冲击力,因此要求型壳必须具备足够的强度;同时,型壳面层的表面质量直接决定钛合金铸件的品质,故而与浆料接触的面层还需具备良好的粗糙度。

在常规熔模型壳面层的制备过程中,传统常压浸浆工艺普遍存在浆料渗透不均匀、型壳孔隙率高及界面结合力弱等问题,严重影响铸件性能的稳定性。负压浸浆工艺则是在负压环境下促使面层浆料(由惰性氧化物粉体与粘结剂组成)充分渗透至蜡模表面,从而有效消除涂料中的气泡并显著提升涂层密度^[20-21]。本研究针对钛合金的材料特性,系统探索负压浸浆工艺的优化路径,核心目标是解决微孔窄槽区域的铸瘤夹杂及复杂薄壁结构的浇不足等关键缺陷,为高精度复杂钛合金铸件的制备提供创新性技术方案。该技术的突破将有力推动航空航天发动机叶片、医疗骨科植入体等关键构件制造水平的提升,具有重要的工程应用价值。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

以钛及钛合金熔模精密铸造专用面层材料稀土粉(325#氧化钇粉)和醋酸锆分别作为面层耐火材料和面层粘结剂。另外需添加少量助剂,包括助粘剂、消泡剂;面层砂包括80#氧化锆砂。

1.2 试验方法

将醋酸锆粘结剂与氧化钇粉混合,进行第一级搅拌,40~60 min后加入助粘剂,进行第二级搅拌,搅拌过程中加入少量消泡剂,待物料分散均匀后得到面层

浆料。本试验中,采用K512蜡料通过模压成形工艺制备蜡模试样,作为后续陶瓷型壳浸浆的预制件。为提高测试效率,采用“一出四”的蜡模设计,即在一个蜡模中同时成形4个型壳抗弯强度试样。每个试样成形区域(即蜡模模腔)的尺寸为40 mm×20 mm×10 mm(长×宽×高)。蜡模成形后进行表面清洗并在室温下自然风干,以去除表面残留蜡屑,保证浸浆效果。

取500 mL上述面层浆料进行测试,方案见表1,研究不同负压工艺参数对面层浆料性能及型壳面层制备质量的影响。试验设置三类浸浆工艺:

(1)常压浸浆:在大气压下,面层浆料不经过负压处理,蜡模直接浸浆。

(2)负压消泡浸浆:将盛有面层浆料的容器置于真空设备中,密封后启动抽真空装置,使系统压力降至预设负压范围,持续抽真空一段时间完成消泡处理。放气后,将蜡模浸没于经负压消泡的浆料中,在大气压下完成浸浆。

(3)负压浸浆:将蜡模浸没于已负压消泡处理的浆料中,同步启动真空设备进行抽真空操作,使蜡模与浆料在负压环境下充分接触。抽真空一段时间后放气,完成负压浸浆过程。

表1 不同浸浆方案工艺参数
Tab. 1 Process parameters of different slurry dipping schemes

试验方案	编号	负压强度范围	处理时间
常压浸浆	1#	无负压	
	2#	低负压-0.04~-0.06 MPa	3 min消泡
	3#	低负压-0.04~-0.06 MPa	10 min消泡
	4#	高负压-0.08~-0.1 MPa	3 min消泡
	5#	高负压-0.08~-0.1 MPa	10 min消泡
负压浸浆	6#	高负压-0.08~-0.1 MPa	3 min消泡
			3 min浸浆

面层制备完成后,试样依次经淋砂、干燥工序,再通过背层制备工艺形成指定厚度的型壳;最终经脱蜡、焙烧处理获得测试用型壳试样。试验以不同浸浆工艺、负压强度和消泡时间为变量,系统分析工艺参数对浆料性能与型壳质量的作用机制。

试样处理完成后,采用以下方法进行性能测试:以不锈钢挂片沾浆质量 Q 值(g)定量评定浆料涂挂性;通过金相显微镜观测型壳面层微观形貌;采用阿基米德排水法测定孔隙率;通过三点弯曲试验测试室温强度。对于浇注铸件,利用粗糙度标卡目视对比评定其表面纹理;以金相法观察铸件表面氧化层厚度。

2 试验结果与分析

2.1 负压工艺对浆料涂挂性的影响

500 mL面层浆料挂片沾浆质量检测结果如图1所示。与无负压对照组（1[#]，沾浆质量22.8 g）相比，低负压（-0.04~-0.06 MPa）下3 min消泡处理（2[#]，沾浆质量26.4 g）的沾浆质量提升15.8%，表现出显著优势。这是由于短时间消泡过程中，低负压环境通过降低浆料内部气相分压，加速气泡逸出，使浆料体系密实度提高，进而增强对挂片的沾附能力。但当低负压下消泡时间延长至10 min（3[#]，沾浆质量20.6 g）时，沾浆质量反而较对照组下降9.6%。这揭示了长时间消泡过程中低负压的双重负效应：（1）浆料中易溶组分在低负压长时间驱动下发生选择性溶出，破坏胶体稳定性；（2）固体颗粒在长时间低负压环境中发生沉降重构，形成局部团聚，导致浆料分散均匀性下降，最终造成涂挂性恶化。

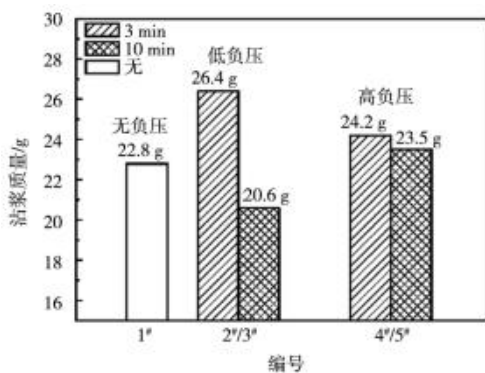


图1 不同浸浆工艺下挂片沾浆质量

Fig. 1 Slurry adhesion quantities for test coupons under different dipping processes

高负压条件（-0.08~-0.1 MPa）下，3 min消泡（4[#]，沾浆质量24.2 g）和10 min消泡（5[#]，沾浆质量23.5 g）的沾浆质量分别较对照组提升6.1%和3.1%。值得注意的是，随着消泡时间从3 min延长至10 min，沾浆质量仅下降约3.0%，远低于低负压组25.4%的降幅。这表明高负压环境对浆料涂挂性的提升具有双重稳定机制：宏观层面，高负压通过压缩浆料内部孔隙空间，显著抑制气泡再生与颗粒沉降，使浆料在挂片表面形成更均匀的附着层；流变层面，高负压增大浆料的表观粘度与屈服应力，降低体系对流变时间的敏感性，从而维持涂挂过程的一致性。

综上，低负压场呈现“短时间促进、长时间抑制”的时间敏感特性，而高负压通过“孔隙压缩-流变调控”的协同作用，实现了浆料涂挂性的高效稳定提升。这一规律为工业浸浆工艺参数优化提供了明确指

导：追求短流程高效生产时，可采用低负压短时间工艺组合；需保障长周期批量生产稳定性时，高负压工艺更具技术优势。

2.2 负压工艺对型壳面层表面形貌的影响

不同浸浆工艺下制备的型壳面层表面形貌对比结果如图2所示。常压浸浆（1[#]）的型壳面层呈通透状，局部可见面层砂外露，孔隙分布密集且存在多处“蚁孔”缺陷，表明其表面致密性极差。负压消泡浸浆对型壳面层孔隙密度的降低效果显著：与常压浸浆相比，低负压下3 min消泡浸浆（2[#]）制备的型壳面层孔隙密度进一步减少；10 min消泡浸浆（3[#]）后虽孔隙率更低，但面层出现透明度升高、面层砂透出现象，这与该工艺对应挂片沾浆质量最低的结果直接关联。其原因主要是低负压长时间消泡导致浆料粘度降低，使得涂挂性下降，进而影响了面层的覆盖效果与致密性。在高负压条件下，3 min消泡浸浆（4[#]）和10 min消泡浸浆（5[#]）面层表观密实度均高于常压和低负压消泡浸浆组；且随着消泡时间从3 min延长至10 min，二者表面形貌差异较小，体现出高负压环境下工艺的稳定性。此外，负压浸浆（6[#]，高负压-0.08~-0.1 MPa）工艺所制备的型壳面层，呈现出更为细腻密实的表观形貌，进一步凸显了该工艺在提升型壳面层光洁度上的优势。

2.3 负压工艺对型壳弯曲强度和显气孔率的影响

不同浸浆工艺对型壳试样抗弯强度与显气孔率的影响规律如图3所示。可以看到，高负压消泡浸浆工艺制备试样（4[#]）的抗弯强度高于低负压消泡浸浆（2[#]）及常压浸浆试样（1[#]），显气孔率则低于后两者，这一现象的本质在于负压强度对浆料渗透与型壳微观结构的调控作用。随着负压强度提升，面层浆料的渗透性增强，促使浆料在蜡模表面快速铺展并形成更致密的粘结结构。微观上，粘结桥的截面积与数量随浆料渗透充分性增加而提升，直接强化了型壳的抗弯承载能力；同时，孔隙被浆料高效填充，使得显气孔率降低。此外，抗弯强度数据显示，高负压浸浆工艺下试样（6[#]）强度离散度更小，表明致密结构提升了力学性能稳定性。

综上，负压浸浆操作通过浆料强化消泡、抽吸填充和促进附着，有效提升了面层致密度，进而同步优化了型壳的抗弯强度与显气孔率；当采用高负压浸浆工艺时，型壳综合性能达到最优，抗弯强度为4.6 MPa，显气孔率为27.3%。

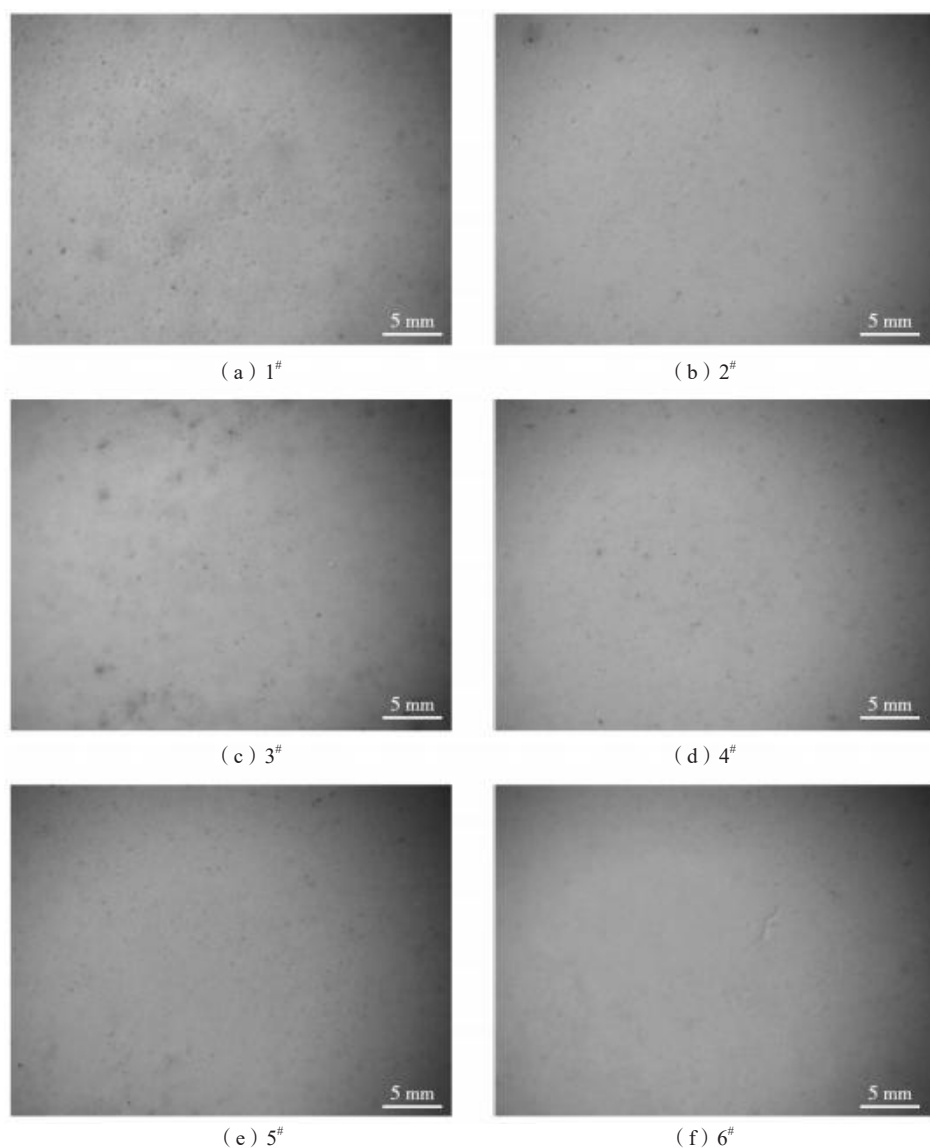


图2 不同浸浆工艺下型壳面层表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of the shell face coats under different slurry dipping processes

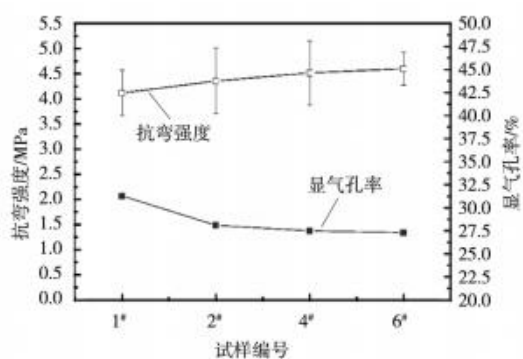
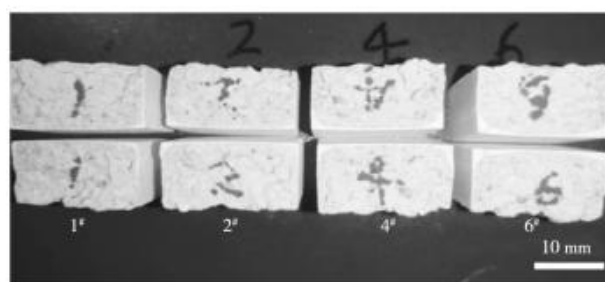


图3 不同浸浆工艺下型壳抗弯强度与显气孔率的变化曲线

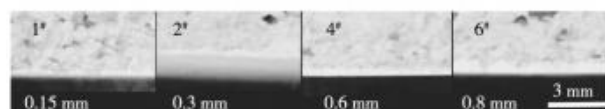
Fig. 3 Variation curves of flexural strength and apparent porosity of the shells under different slurry dipping processes

2.4 负压工艺对型壳面层制备厚度的影响

由图4可知, 常压浸浆时1#试样面层涂层最薄, 在常压环境下, 浆料仅依靠重力与表面张力在蜡模表面



(a) 型壳断面形貌



(b) 型壳面层厚度

图4 不同浸浆工艺制备的型壳断面及面层厚度

Fig. 4 Cross-sections and face coat thicknesses of the shells prepared by different slurry dipping processes

自然铺展,从流体动力学角度,常压下浆料与蜡模的接触角较大,且缺乏外力驱动浆料向蜡模表面渗透,导致有效沉积量有限,最终形成的面层涂层厚度相对较薄。负压消泡浸浆工艺实现了消泡增密的作用,负压抽吸作用破除了浆料内部气泡,提升了浆料密实度,减少了因气泡导致的涂层不连续缺陷。2[#]与4[#]试样对比表明,高负压可深度脱除浆料气泡,进一步放大上述作用,密实度更有利于蜡模浸浆时增厚。负压浸浆工艺具有负压消泡及负压浸浆的协同优势,对于6[#]试样,以高负压完成浆料消泡,获得高密实度均质浆料,再利用高负压驱动密实浆料向蜡模表面深度浸渗,使浆料既在蜡模表面沉积,又渗透至蜡模表面空隙或缺陷中,最终构建的面层涂层厚度达到最大值。致密厚实的面层一方面能够增加陶瓷相的堆积厚度,提升型壳强度及热稳定性;另一方面能够抑制铸造“渗砂”或“粘砂”,减小铸件表面粗糙度,在增强型壳强度、提高表面平整度等方面具有优势,实际应用中需要根据产品需求选择合理的负压浸浆工艺。

3 生产应用

依据上述研究结果,将负压浸浆处理技术应用于制备3C领域无线耳机外壳,该产品具有尺寸微小(0.5~10 mm)、结构精细复杂、超薄壁(<1 mm)等结构特征,具体参数如下:薄壳壁厚仅0.7 mm,穿线槽狭缝宽度0.7 mm、长度约30 mm,背部以1 mm间隔均布 $\Phi 1$ mm的微孔以及 $\Phi 1$ mm尖角特征,同时铸造表面粗糙度 Ra 不超过3.2 μm 。传统熔模铸造技术难以实现该复杂薄壁结构的成形。

3.1 铸件宏观质量

为验证负压浸浆工艺对复杂薄壁铸件成形质量的提升效果,分别采用传统常压浸浆工艺与面层负压

浸浆工艺开展小批量生产试验。针对铸件关键质量指标,包括钛珠、夹渣、充型不良等缺陷发生率,表面粗糙度 Ra 以及污染层厚度等进行量化检测,不同工艺下浇注铸件的缺陷统计结果如表2所示。

表2 浇注铸件缺陷统计结果
Tab. 2 Statistical results of defects for the poured castings

工艺	钛珠发	夹渣发	充型不良	表面粗糙	表面污染
	生率/%	生率/%	发生率/%	度/ μm	层厚度/ μm
常压浸浆	67	95	73	6.3~12.5	50~80
负压浸浆	6.5	25	4	1.6~3.2	

图5为常压浸浆工艺面层制备及清壳后的铸件毛坯外观,可以看出,传统常压浸浆制备工艺下,该类构件成形性显著不足,细线槽与微孔区域易出现钛珠缺陷,且薄边部位充型不良率高达73%。根据前期研究,其成因主要有以下三点:(1)传统面层浆料表面张力较高,对细孔、窄槽类狭缝结构的浸润与填充能力不足,难以实现充分包覆;(2)常压淋浆或浸浆工序中,搅动引入的气泡易滞留于窄槽、微孔及拐角等结构死角,经烧结后型壳表面形成微孔缺陷,后续钛液浇注时,熔液渗入微孔并凝固,最终形成钛珠类冶金缺陷;(3)型壳表面微孔会阻碍熔体流动的完整性,加剧薄壁区域的充型不足问题。

图6为负压浸浆工艺蜡模及浇注清壳后的毛坯外观。与常压浸浆工艺相比,在同等离心浇注条件下,采用负压浸浆工艺制备的型壳,该产品窄槽细孔区域钛珠缺陷率从67%降至6.5%,表面渣孔缺陷减少70%,铸件完整成形的合格率从22%提升至96%。表面粗糙度 Ra 由6.3~12.5 μm 优化至1.6~3.2 μm 。上述缺陷率的显著下降,验证了负压浸浆条件下对浆料的“强化消泡、抽吸填充、促进附着”三重控制,针对性地解决了常



图5 常压浸浆工艺面层制备及清壳后铸件毛坯

Fig. 5 The face coat preparation under atmospheric pressure slurry dipping process and the cleaned casting after shell removal



图6 负压浸浆工艺面层制备及清壳后铸件毛坯

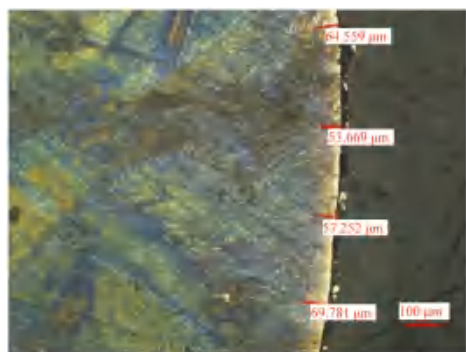
Fig. 6 The face coat preparation under vacuum slurry dipping process and the cleaned casting after shell removal

压浸浆工艺中气泡残留、填充不足和附着不均的三项关键问题。

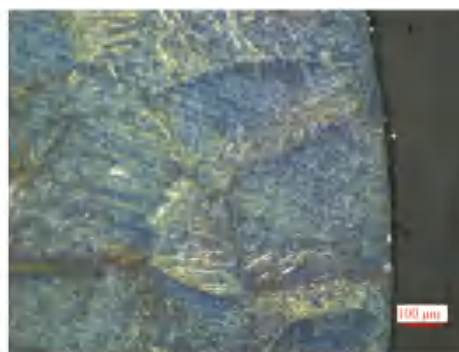
3.2 铸件断面显微形貌分析 (α 污染层厚度)

常规型壳在浇注后, 铸件断面表面污染层厚度达 $60\text{ }\mu\text{m}$, 如图7 (a) 所示, 这是由于常规型壳中的气体附着以及杂质等多种因素, 使得铸造金属表面形成一

层高硬度脆性污染层, 该污染层会降低铸件的力学性能, 尤其是抗疲劳性能。而负压浸浆工艺制备的型壳面层致密度更高, 如图7 (b) 所示, 避免了型壳面层表面微孔内气体和杂质的沉积, 降低了型壳面层与金属液的界面反应, 从而使得铸件金相试样表面更为洁净, 组织更为均匀, 有助于提升铸件的整体质量和性能。



(a) 常压浸浆工艺



(b) 负压浸浆工艺

图7 常压浸浆和负压浸浆工艺下铸件断面微观组织

Fig. 7 Microstructures of the casting cross-sections under atmospheric pressure slurry dipping and vacuum slurry dipping processes

4 结论

针对传统熔模精密铸造型壳面层制备中, 因浆料重力、流动性缺陷导致面层薄厚不均、复杂结构填充不足的问题, 开发了高负压浸浆工艺, 通过负压抽吸浆料强化消泡以及负压浸浆促进填充、附着的技术组合, 达到蜡模表面面层均匀性及复杂结构填充性的同

步提升。通过试验测试及小批量生产验证, 3C领域微小复杂精密件熔模铸造缺陷率锐减, 窄槽细孔区域钛珠缺陷率从67%降至6.5%, 表面渣孔缺陷减少70%; 铸件浇注完整充型的合格率从22%提升至96%; 表面粗糙度 Ra 由 $6.3\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 优化至 $1.6\sim 3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。高负压浸浆工艺避免了铸件表面污染层的产生, 提升了铸件性能的稳定性的。

参考文献:

[1] 吴义舟, 郭爱红. 生物医用钛合金发展和研究现状 [J]. 材料开发与应用, 2010, 25 (2): 81-85.

[2] 程德彬. 船用钛合金与航空钛合金的使用性能差异 [J]. 材料开发与应用, 2012, 27 (3): 60-63.

- [3] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [4] SAE AMS4992D Casting, structural investment, titanium alloy 6Al-4V hot isostatically pressed [S].
- [5] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1304-1311.
- [6] 于宇, 李嘉琪. 国内外钛合金在海洋工程中的应用现状与展望 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33 (3): 111-116.
- [7] 孙建刚, 宋德军. 国内外石油、天然气用钛合金研究及应用概况 [J]. 材料开发与应用, 2019, 34 (6): 96-102.
- [8] Li Yang, Feng Qicheng, Tang Shiyan, et al. Effect of CaTiO_3 on sintering properties of Y_2O_3 -based ceramic shell via extrusion-based 3D printing for titanium alloy casting [J]. Ceramics International, 2023, 49 (11): 19338-19345.
- [9] 程亚珍, 柴自毫, 李渤渤, 等. 一种医用钛合金铸件熔模铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2022, 71 (3): 362-366.
- [10] 程鲁. 复杂薄壁镁合金石膏型精密成形工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [11] SAE AMS4991G Titanium alloy castings, investment 6Al-4V hot isostatic pressed, anneal optional [S].
- [12] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 137-146.
- [13] 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): 1401-1404.
- [14] 孙冰, 韩云飞, 乔海滨, 等. 镶铸法+精密铸造制备钛合金细长孔工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (6): 858-861.
- [15] 孙冰, 乔海滨, 穆建文, 等. 某钛合金油路密封盖细长弯管精铸镶铸工艺 [J]. 铸造工程, 2024, 48 (1): 7-10.
- [16] 程亚珍, 李渤渤, 孙冰, 等. 薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (6): 780-784.
- [17] 孙冰, 杨光, 李渤渤, 等. 薄壁框型钛合金铸件熔模铸造数值模拟及验证 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (10): 925-931.
- [18] 常化强, 孙冰, 孙宏喆, 等. 涂层在钛合金金属型铸造中的应用研究 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (4): 1-4.
- [19] 李成攀. 硅溶胶熔模铸造铸件沟槽铸瘤缺陷的控制 [C]// 2017 重庆市铸造年会暨第十一届全国铸件挽救工程技术交流会论文集, 2017: 155.
- [20] 王富, 李成伟, 杨强, 等. 真空浸渗水玻璃对粘接剂喷射砂型性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (10): 56-65.
- [21] 谢翀博, 徐永东, 王毅, 等. 3D碳纤维预制体中料浆浸渗引入SiC微粉工艺研究 [J]. 航空材料学报, 2008, 28 (4): 88-93.