

● 今日铸造 Today Foundry ●

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.6016

高压柱塞泵关键摩擦副构件铸造技术进展

王哲¹, 董毅飞^{2,3}, 冉兴^{1,4}, 王雨琤^{2,3,5}, 唐诚江¹, 滕海山⁵, 卢小江⁵, 刘雪波⁵, 周青^{2,3,5}

(1. 中航重机股份有限公司, 贵州 贵阳 550005; 2. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 3. 西北工业大学先进润滑与密封材料研究中心, 陕西 西安 710072; 4. 中航工业先进航空锻铸技术创新中心, 贵州 贵阳 550005; 5. 中航力源液压股份有限公司, 贵州 贵阳 550018)

摘要: 高端装备的效能与服役寿命, 在很大程度上取决于其核心基础部件的性能。高压柱塞泵作为液压系统的核心, 其关键摩擦副组件在极端工况下的长寿命、高可靠性制造, 是我国实现高端装备自主可控所面临的共性技术瓶颈之一。本文系统综述了适用于柱塞泵关键组件的砂型铸造、熔模铸造、压力铸造及半固态铸造等主流与前沿工艺的工作原理、技术特征与适用范围。探讨了如何通过多工艺融合设计与过程数字化模拟等先进策略, 实现对铸件凝固路径的精准调控与内部缺陷的主动抑制, 从而显著提升组件的力学、摩擦学性能及服役寿命。对比分析了相关技术路径, 对关键摩擦副组件铸造工艺向智能化、绿色低碳以及结构与功能一体化方向发展进行了展望, 并提出了高压柱塞泵的性能跨越发展的解决方案。

关键词: 柱塞泵; 液压系统; 摩擦副组件; 铸造

中图分类号: TG356.16

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)09-1038-13

Progress in Casting Technology for Key Friction Pair Components of High-pressure Piston Pumps

WANG Zhe¹, DONG Yifei^{2,3}, RAN Xing^{1,4}, WANG Yuzheng^{2,3,5}, TANG Chengjiang¹,
TENG Haishan⁵, LU Xiaojiang⁵, LIU Xuebo⁵, ZHOU Qing^{2,3,5}

(1. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. AVIC Advanced Aviation Forging and Casting Technology Innovation Center, Guiyang 550005, China; 5. AVIC Liyuan Hydraulic Co., Ltd., Guiyang 550018, China)

Abstract: The efficiency and service life of advanced equipment largely depend on the performance of its core basic components. As the heart of the hydraulic system, the high-pressure piston pump relies on key friction pair components. Achieving long life and high reliability in the manufacturing of these components under extreme working conditions is a major technical challenge. This is one of the common bottlenecks China faces in achieving autonomy and controllability in advanced equipment. This paper systematically reviews both mainstream and cutting-edge processes suitable for key piston pump components. These processes include sand casting, investment casting, pressure casting, and semisolid casting. Their working principles, technical characteristics, and application scopes are discussed. How to precisely control the casting solidification path and actively suppress internal defects is explored. This is achieved through advanced strategies such as multiprocess integration design and digital simulation. These methods can significantly improve the mechanical and tribological properties and service life of components. By comparing and analysing relevant technical paths, the paper looks forward to the development of casting processes for key friction pair components. This development is moving toward intelligence, green low-carbon practices, and structural and functional integration. A solution for the development of

收稿日期: 2026-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(52471093); 凝固技术全国重点实验室开放课题(2025-QZ-03); 中航重机创新基金(ZJQT-2025-05)

作者简介: 王哲, 1987年生, 博士, 正高级工程师。主要从事航空材料制造技术方面的工作。Email: tianchenzhe@163.com

通信作者: 冉兴, 1968年生, 博士, 正高级工程师。主要从事航空材料制造技术方面的工作。Email: ranxingavic@163.com;

周青, 1988年生, 博士, 教授。研究方向为表面涂层与防护技术。Email: zhouqing@nwpu.edu.cn

引用格式: 王哲, 董毅飞, 冉兴, 王雨琤, 唐诚江, 滕海山, 卢小江, 刘雪波, 周青. 高压柱塞泵关键摩擦副构件铸造技术进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(9): 1038-1050.

WANG Z, DONG Y F, RAN X, WANG Y Z, TANG C J, TENG H S, LU X J, LIU X B, ZHOU Q. Progress in casting technology for key friction pair components of high-pressure piston pumps[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1038-1050.

high-pressure piston pumps is proposed.

Key words: piston pump; hydraulic system; friction pair component; casting

高端装备的效能与服役寿命,关键在于其核心基础部件在高压、高速、剧烈磨损等极端耦合工况下的性能可靠性^[1-2]。以航空发动机叶片,液压柱塞泵摩擦副为代表的复杂内腔构件,其高性能制造是我国实现高端装备自主可控的共性技术瓶颈。本文以技术成熟度高,应用广泛的高压柱塞泵关键摩擦副为研究对象,系统梳理其铸造技术进展,旨在提炼出一条适用于此类复杂关键构件高性能精密成形的技术路径。柱塞泵作为液压系统的核心组件,其缸体、柱塞、配流盘等零件结构复杂,制造难度大^[3],铸造技术因其在成形复杂性,性能优化与成本控制方面的优势,成为首选工艺。然而,铸件内部易产生缩松、气孔、裂纹等缺陷,且尺寸精度与组织均匀性难以精确控制,制约了零件的耐磨性与疲劳寿命,成为我国实现柱塞泵自主制造的主要瓶颈^[4-5]。因此,掌握高性能铸件制造技术,对提升我国基础零部件产业能力、保障高端装备发展具有重要战略意义。本文将围绕柱塞泵核心组件的铸造工艺,对比主流铸造方法及其原理,探讨先进铸造技术与智能化控制策略的融合,并对未来发展方向进行展望。

1 铸造工艺

柱塞泵作为液压系统的核心动力元件,其高工作压力、高容积效率与精准的变量控制等性能的可靠性与耐久性,直接决定了整个液压系统乃至主机装备的作业效能与服役寿命^[6]。在柱塞泵的制造体系中,铸造工艺为缸体、配流盘、柱塞等关键组件提供了成形基础,其质量水平从根本上决定了零部件的内在组织结构、力学性能以及工作寿命。

在柱塞泵的关键零部件中,缸体与配流盘通常选用高强度铸铁、球墨铸铁及特种合金钢等材料制成,以期适应长期周期性高压的严苛工作环境。此类零件结构复杂,往往集成有异形流道、精密孔系等特征,并在高压、高速及交变载荷作用下运行,服役条件极其恶劣。因此,铸件不仅需要具备严格的几何尺寸以保证装配精度,更需具备致密均匀的微观组织,从而赋予材料所需的高强度、高疲劳抗力和优良的耐磨性能^[7]。在采用砂型铸造等传统方法制造柱塞泵组件时,普遍面临致密度偏低、尺寸精度稳定性不足及内部缺陷难以精确控制等问题。此类缺陷往往成为疲劳裂纹的萌生起点,最终引发组件在极端工况下的早期失效^[8]。为突破上述桎梏,熔

模铸造^[9]与压力铸造^[10]等先进工艺逐步引入高性能柱塞泵的生产体系。这些工艺通过精确调控金属凝固过程、增强金属液充型能力并提高补缩效率,显著提升铸件的综合性能。系统开展柱塞泵关键零部件的精密铸造技术的研究,对于增强我国高端液压基础件的自主设计与制造能力,打破国外技术壁垒,具有重要的理论价值与工程现实意义。

1.1 砂型铸造

砂型铸造主要适配柱塞泵高强度铸铁、球墨铸铁材质的中高压泵体、风电系统大型泵壳等复杂结构组件,此类零件多集成异形流道、精密孔系,砂型铸造凭借材料兼容性广、复杂结构成型能力强,可满足多油路腔体的成型需求^[11]。然而,在柱塞泵关键零件的制造过程中,砂型铸造也面临着诸多挑战。细长油道成型时砂芯易发生断裂、漂移或变形,导致铸件尺寸精度难以保证。厚壁区域因冷却速率较慢容易产生缩松缺陷,影响材料整体致密性^[12]。为应对这些技术难题,业界采用“平做立浇”工艺与离心集渣浇注系统,优化金属液流动与补缩,同时借助数值模拟技术精确控制铸件的凝固过程,有效提升产品的内部质量与尺寸精度^[13]。

为提升钛合金铸件质量,Zhang等^[14]将增材制造技术与砂型铸造的融合,采用激光粉末床熔融技术精确成形无机黏结剂砂型(图1)。该砂型在高温下仍保持高强度,结合氧化钇涂层,实现了对钛合金铸件 α -case层的有效控制。图1展示了通过数字化设计(a)与增材制造(b)制备的精密砂型,为具有复杂内腔的钛合金构件提供了一条全新的高性能制造路径,凸显了该模式在突破传统砂型精度与复杂度极限方面的核心价值。在另一项研究中,Guo等^[15]采用AnyCasting、ProCAST两款主流软件,核心采用有限体积法构建热-动量传递耦合模型数值来模拟薄壁铸件中的凝固和流体动力学,并与实验验证相结合的方法,系统探讨了浇注温度、砂型预热温度及充型时间对Al-7Si-0.5Mg合金薄壁铸件流动性与孔隙缺陷的影响。实验验证表明,模拟预测的缺陷位置与实际铸件探伤结果吻合度达90%以上,缩松体积分数模拟值与切片测量值相对误差控制在 $\pm 8\%$ 以内,尺寸精度预测偏差小于 ± 0.3 mm,为工艺优化提供了精准的量化依据。结果发现,提高浇注温度虽有助于增强熔体流动性,但也会加剧气孔形成的倾向。砂型预热温度的提升可缓解激冷效应、改善充型完整

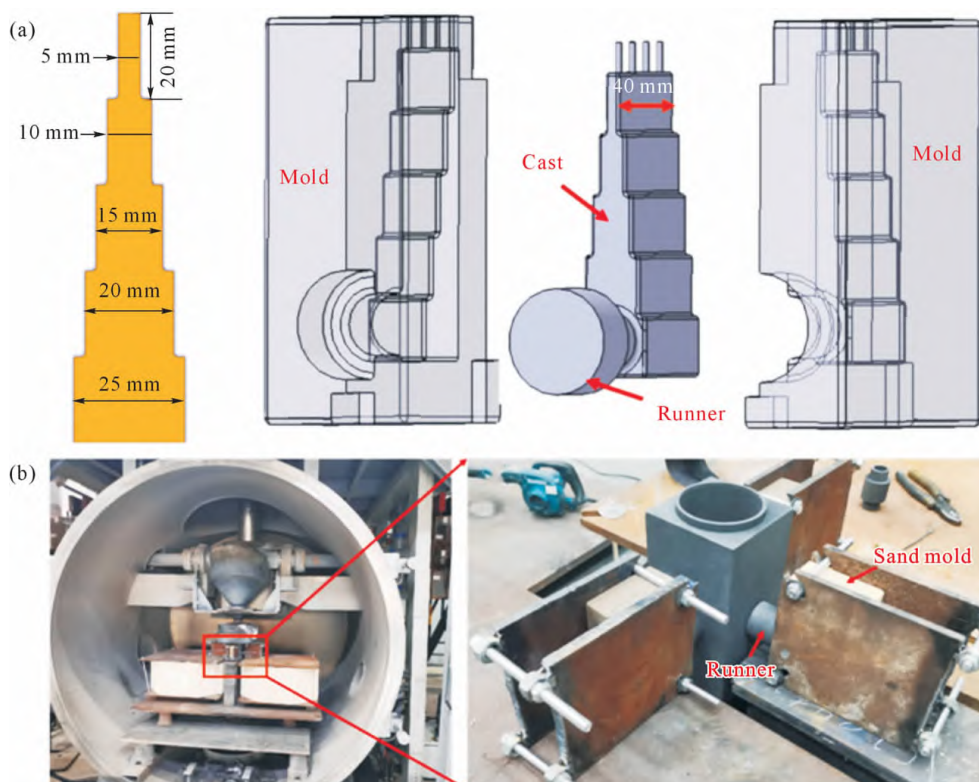


图1 砂型铸造工艺:(a)铸件和砂型3D模型;(b)钛合金浇注准备和砂型组装^[14]

Fig.1 Sand casting process: (a) 3D model of the cast part and sand molds; (b) preparation for titanium alloy pouring and sand mold assembly^[14]

度,但同时会轻微增加疏松风险。而缩短充型时间则有利于减少热损失,防止浇不足缺陷的产生,揭示了孔隙形成的主要机制。

1.2 熔模铸造

熔模铸造是特种合金钢,铜基耐磨合金材质的航空航天高端柱塞泵体、深海探测设备精密油路部件、配流盘等核心精密组件的首选工艺,此类零件对尺寸精度、表面质量及组织致密性要求极高,熔模铸造有效避免砂型铸造的砂芯断裂、铸砂残留问题,能满足柱塞泵精密摩擦副的装配与服役要求^[16]。然而,当熔模铸造技术面对性能与可靠性要求极高的柱塞泵关键零部件制造时,仍面临一系列技术挑战。型壳的强度与透气性需实现精密平衡,以避免型壳变形或金属液渗透。蜡模材料的收缩行为若控制不当,将直接影响铸件的最终尺寸精度。而在浇注高温合金时,薄壁与厚壁过渡区域极易形成疏松缺陷,进而显著降低零件的耐压强度与疲劳寿命^[17]。为此,业界通过优化模料、应用定向凝固技术、开发复合型壳等手段进行改进。其中,结合数值模拟对铸造过程中的温度场与应力场进行精确调控,是实现缺陷主动抑制,提升铸件内部质量的关键数字化赋能策略^[18]。尽管熔模铸造存在工艺流程复杂、制造成本较高等局限,但其在高端柱塞泵精密构件制造所提供的高性能保障与几何自由度,使其成为突破

性能瓶颈、推动高端装备自主化进程的关键工艺。

Li等^[19]开发并优化混合熔模铸造工艺,采用熔融沉积成型与立体光刻制备牺牲模,结合氩气脱气系统,用于制备具有复杂几何形状的格栅结构。铸造工艺如图2所示,将Plasticast® Investment与水混合以生产熔模浆料。将脱气的浆料倒入每个打印图案中。在此过程中,模具经过除水、热转变和图案去除阶段,并具有受控斜坡,以确保从模具中完全去除聚合物。展示了将现代增材制造技术与传统熔模铸造相结合,通过精密控制模具制备、脱气处理与凝固冷却,实现对铸件表面粗糙度、孔隙率及微观组织均匀性的协同优化,为高性能复杂构件的精密成形提供了可复制的技术方案。

Rosa等^[20]开发了一种适用于数字光处理(digital light processing, DLP)的光固化二氧化硅基浆料,并通过优化打印支撑结构与热处理工艺,实现了具有悬垂结构、薄壁特征及三维扭转的复杂型芯的无缺陷成形。与传统注射成型材料相比,DLP制备的烧结并渗透处理后的材料在保持完全浸出性的同时,具有更高的机械强度和更低的孔隙率,展现了该技术在制造具有严格尺寸公差的高性能复杂陶瓷型芯方面的巨大潜力。

1.3 压力铸造

压力铸造仅适配柱塞泵铝合金低熔点有色金属

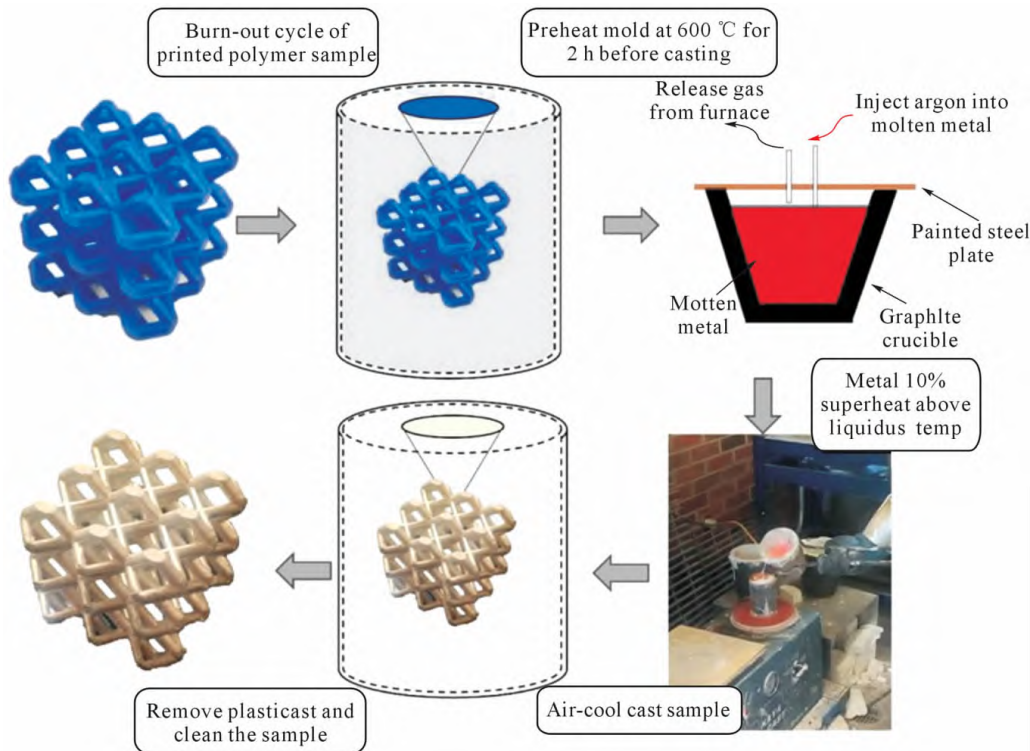


图2 混合熔模铸造工艺^[19]
Fig.2 Hybrid investment casting process^[19]

材质的薄壁泵壳,新能源汽车、无人机用柱塞泵壳体。铸铁、不锈钢等高熔点黑色金属因工艺特性无法适配该成形方式。铝合金柱塞泵壳体追求轻量化与规模化生产,压力铸造可实现薄壁构件一次精密近净成形,且铸件组织致密,能满足中低压工况下的结构强度要求^[21]。但传统压力铸造工艺长期面临内部气孔缺陷与微观组织不均匀性两大核心问题。同时,在快速凝固条件下常出现外部凝固晶粒(external solidified crystals, ESCs)与共晶富集带等微观组织缺陷,导致材料的力学性能下降。为应对上述挑战,近年来发展了真空辅助压铸、浇注温度与压力曲线的精确调控等先进方法。这些技术通过有效

抑制气体卷入、优化凝固过程,显著提升了铸件的内部质量与性能一致性。

Qin 等^[22]探究了浇注温度对真空辅助高压压铸(high pressure die casting, HPDC) AlSi9MnMg 合金中富共晶带的分布特征与形成机制的影响。实验在模具表面温度达到准稳态的条件下进行,采用真空系统完成约 15 次有效压铸循环。每次压铸前均在模具表面施加脱模剂,以有效防止铸件粘连。图 3 展示了包含浇注系统、铸件本体、溢流口与排气口的模具整体结构,其中铸件部分由两根圆棒试样、两块平板试样及一件 S 形试样共同构成^[22]。研究结果表明在较低浇注温度下,大量 ESCs 的形成显著提高熔体

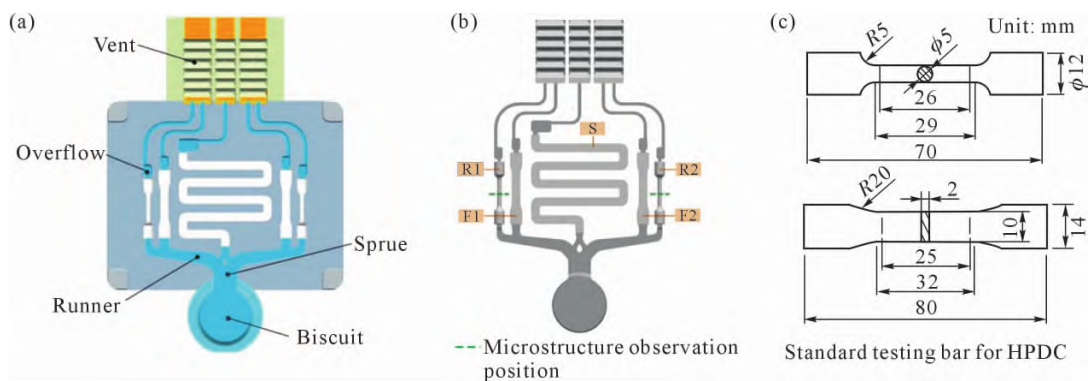


图3 真空辅助高压压铸中模具和铸件的配置:(a) HPDC 模具的动模;(b) HPDC 铸件,包括两根圆棒(标记为 R1、R2)、两块平板(标记为 F1、F2)和一个 S 形样品(标记为 S);(c) HPDC 标准测试样品的尺寸^[22]
Fig.3 Configuration of the die and casting in vacuum-assisted high-pressure die casting: (a) moving die of the HPDC die; (b) HPDC casting including two round bars (marked as R1 and R2), two flat plates (marked as F1 and F2) and one S-shaped sample (marked as S); (c) dimensions of the standard HPDC^[22]

黏度,抑制其向铸件中心区域的迁移,从而阻碍富共晶带的形成。随着浇注温度升高,ESCs数量减少,富共晶带向中心区域移动。通过对比不同浇注温度下的微观组织,直观揭示了ESCs数量与分布如何受温度调控,从而影响富共晶带的形成位置与机制,为如何通过工艺参数优化抑制压铸微观缺陷提供了直接的实验证据。在另一项研究中,Xie等^[23]重点探讨了增压压力对高压压铸AE81镁合金显微组织、孔隙缺陷及力学性能的影响。研究发现提高增压压力可显著细化晶粒、降低ESCs面积分数与孔隙体积分数,并有效消除网状缩松和气缩孔等缺陷。实验揭示了合金力学性能与ESCs及孔隙的空间分布呈显著负相关。

1.4 半固态铸造

半固态铸造是深海高压柱塞泵体、柱塞、配流盘等高性能摩擦副组件的核心制造工艺,此类零件服役于超高压、强磨损工况,在制造高耐磨性、高可靠性及综合力学性能优异的部件方面展现出独特优

势^[24]。相较于完全液态的传统铸造工艺,该技术同时具备液态成型的高灵活性与固态金属的致密组织特征,所得铸件不仅尺寸精度优良,更表现出组织均匀,缺陷稀少以及力学性能接近锻件水平的特点。在柱塞泵耐磨部件的具体制造中,传统铸造方法常因Sn、Pb等合金元素的偏析倾向,导致网状脆性相的形成与宏观偏析现象,严重损害材料的服役性能。而半固态挤压铸造技术通过采用冷却斜槽法等先进浆料制备手段,结合精确的工艺控制,能够有效解决上述问题。

该技术路径的价值不仅在于提供了一套完整的半固态成形工艺流程,更在于直观呈现了如何通过精确调控固相分数,浆料制备与挤压成形过程,主动构建出具有特定核壳双相组织的微观结构。Wang等^[25]的研究系统阐释了这一过程。其采用冷却斜槽法制备半固态浆料,并在严格控制温度与压力的条件下进行挤压成形,最终在铅锡青铜中获得以贫锡 α -Cu为核、富锡 $\text{Cu}_{13.7}\text{Sn}$ 为边缘的核壳双相微观结构。图4展示了从浆料制备到成形的全流程(a~g)及

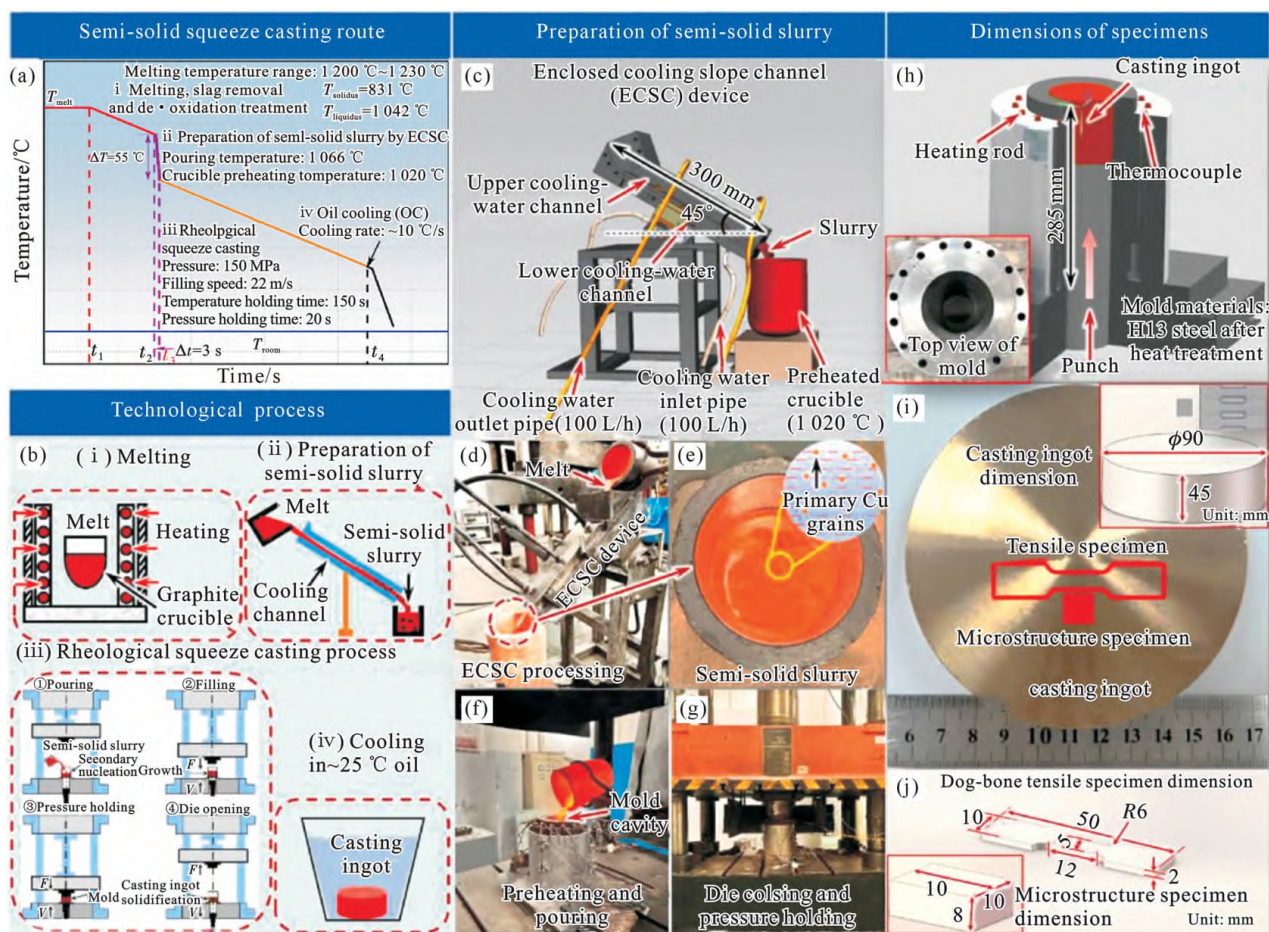


图4 半固体浆料制备,流变挤压铸造工艺,试样尺寸和取样位置表征:(a)半固体挤压铸造工艺路线;(b)工艺过程示意图;(c)制备半固体浆料;(d~g)实验的实际操作过程;(h)挤压模具三维示意图;(i)宏观形貌、铸锭尺寸和表征试样的取样位置;(j)拉伸和显微组织试样尺寸^[25]

Fig.4 Semisolid slurry preparation, rheological squeeze-casting process, and characterization of sample dimensions and sampling locations: (a) semisolid squeeze-casting process route; (b) schematic of the technological process; (c) preparation of semisolid slurry; (d~g) practical operation process of the experiment; (h) three-dimensional schematic of the squeeze mold; (i) macroscopic morphology, dimensions of the cast ingot, and sampling locations for characterization specimens; (j) tensile and microstructure specimen dimension^[25]

微观组织取样方法(i和j),清晰揭示了“工艺参数—微观结构—宏观性能”之间的内在关联。研究表明,该核壳结构有效缓解了Sn与Pb元素的晶界偏析,并通过多种强化机制的协同作用,实现了材料强度与塑性的同步提升。这一结果证实通过对半固态成形过程的精确主动控制,可以实现特定微观组织的可控制备,从而定向优化材料的服役性能。尽管该工艺对过程控制要求极高,但其在通过微观结构设计提升关键部件性能方面展现出巨大潜力。

Feng等^[29]通过调控半固态压铸过程中的充型长度,系统研究了Al6Si3Cu0.4Mg合金的偏析行为,显微组织演变与力学性能相应。研究指出较短的充型长度导致液相分数分布差异增大,促使 θ -Al₂Cu相变的更加细小弥散。揭示了充型长度通过调控液相分布与第二相形貌进而影响合金强塑性匹配的关

键机制。半固态铸造为高性能柱塞泵零件提供了兼具优良力学性能与低缺陷率的成形方案,但其工艺复杂、设备成本高,适用场景较为特定。半固态铸造通过固液两相协同成形,有效解决了传统铸造的疏松、偏析缺陷,其优异的力学性能与低缺陷率,特别适配对耐磨、抗疲劳要求严苛的核心运动副。

1.5 铸造工艺对比与选型指南

为科学指导柱塞泵关键组件的工艺选型,本节聚焦砂型铸造、熔模铸造、压力铸造与半固态铸造4种核心工艺,围绕柱塞泵主流材质、典型组件及服役工况,从材料适配性、核心性能匹配度、生产效率与成本控制等维度进行针对性对比,量化呈现各工艺的技术边界与应用优势(表1)。后续章节将结合各组件的核心性能需求与制造难点,系统阐述最优工艺适配逻辑并辅以典型实践案例,形成从工艺特性到

表1 铸造工艺综合对比
Tab.1 Comprehensive comparison of casting processes

Comparison dimensions	Sand casting	Investment casting	Die casting	Semi-solid casting
Core compatible materials	High-strength cast iron, ductile iron	Special alloy steels, copper-based alloys	Aluminium alloys, magnesium alloys	Copper-based alloys, high-performance aluminium alloys
Typical plunger pump components	High-pressure pump bodies, large casings for wind power yaw systems, multi-oil-path cavity components	Aerospace high-end pump bodies, precision distribution plates for deep-sea exploration, complex oil-path components	New energy vehicle, UAV thin-walled pump casings, lightweight casings	Deep-sea high-pressure cylinder blocks, plungers, high-performance distribution plates, core moving parts
Process window width/°C	±50	±20	±15	±10
Dimensional accuracy (CT grade)	CT10~CT13	CT4~CT7	CT6~CT9	CT5~CT8
Surface roughness/μm	6.3~25.0	1.6~6.3	3.2~12.5	1.6~6.3
Yield strength/MPa	200~350 (ductile iron)	350~550 (GH4169 alloy)	250~400 (AlSi9MnMg)	300~500 (CuPb20Sn5)
Fatigue life/(10 ⁶ cycles)	1~5 (under 31.5 MPa working condition)	8~20 (under 31.5 MPa working condition)	3~10 (under 21 MPa working condition)	10~25 (under 31.5 MPa working condition)
Relative density/%	90~95	97~99	95~98	98~99.5
Core process advantages	Strong complex cavity forming capability, wide material compatibility, recyclable sand, low single-piece cost	High precision, high surface quality, complex fine structure, one-shot forming, no residual sand	Extremely high production efficiency (suitable for mass production), stable dimensional accuracy, near-net-shape forming reducing machining	Inhibits shrinkage and segregation defects, uniform microstructure, mechanical properties close to forgings, excellent wear and fatigue resistance
Main process limitations	Low surface finish, long production cycle, shrinkage porosity prone in thick-walled sections	Complex process flow, high manufacturing cost, limited casting size	Only compatible with low melting point metals, high-speed filling prone to entrainment, high internal porosity rate	Complex process control, high equipment cost, relatively specific application scenarios
Production batch adaptation	Medium-small batch production, customized production	Small batch, high-precision high-end product production	Large-scale mass production	Medium batch, high-performance product production

组件应用的完整选型链条,旨在为不同需求的柱塞泵组件提供精准的工艺适配依据,避免经验化选型导致的性能冗余或成本浪费。

2 柱塞泵组件的工艺适配性

柱塞泵的性能与寿命由其关键组件共同决定。各组件的结构,功能与服役工况存在显著差异,因此,其铸造工艺的选择必须遵循“性能需求-结构特征-工艺适配”的原则。本节将聚焦泵体与壳体、缸体、柱塞及配流盘四大核心组件,系统阐述其最适用的铸造工艺和选型依据,并结合典型案例剖析通过工艺优化实现性能跨越的具体路径,从而清晰勾勒出“工艺-组件-性能”之间的内在关联。

2.1 泵体与壳体组件

柱塞泵的泵体与壳体承担着压力承载、流体密封与部件支撑等核心功能,其铸造质量直接决定了整泵的承压能力、密封可靠性与服役寿命。根据工况需求,该类组件主要采用两类材质:①铸铁类,高强度灰铸铁和球墨铸铁,适用于中高压泵体及大型复杂结构件,具有优异的抗压与抗变形能力;②铝合金类,适配新能源汽车、无人机等领域对薄壁轻量化泵壳的需求,满足中低压工况下的成型性与轻量化要求。针对上述材质特性,现有成形工艺已形成明确的适配方案。铸铁类组件优先采用砂型铸造;铝合金类组件则以高压压铸为首选,满足薄壁构件规模化生产对尺寸精度和组织致密性的要求。通过合理匹配材质与成形工艺,可实现泵体与壳体组件性能与成本的有效协同。现有工艺在铸造过程中常面临金属液的充型不完整、厚壁区域产生缩松、薄壁部位出现冷隔,以及因紊流引发的气孔缺陷等多重挑战^[27]。为应对这些问题,其核心要求在于保证优异的承压能力、刚度及密封性,同时兼顾轻量化需求。因此,砂型铸造与高压压铸是两种最主流的工艺。其中,通过精确调控浇注温度等关键参数,能够有效优化外部凝

固晶粒的分布状态,从而显著提升铸件的组织均匀性与内部致密性。

为进一步增强该类组件在高压、交变载荷等苛刻工况下的服役性能,刘斌^[28]通过浇注系统优化设计,模型群组化布置及石墨基涂料的应用,有效消除了缩孔、缩松、夹渣与碳缺陷。利用铸铁石墨化膨胀对凝固收缩进行补偿,使综合废品率降至3%,显著提升了铸件表面质量与尺寸精度,满足了高效率流水线生产的要求。冯超等^[29]针对铝合金柱塞油泵壳体铸造过程中合格率较低的问题展开研究,发现缺陷主要表现为缩松与气孔。缩松集中于法兰盘凸台区域,该部位凝固时间晚于暗冒口根部,导致补缩通道提前中断。气孔则因金属液在狭小进浇口与大型型腔间产生紊流卷气所致。随后将铸件调整为法兰面朝上布置,设置明、暗冒口系统以增强补缩能力,并选用平缓型腔面作为进浇口以实现平稳充型(图5)。通过AnyCasting数值模拟验证工艺合理性,最终有效消除了厚大部位缩松与充型卷气缺陷,缺陷消除率达95%,模拟与实验的气孔率测量相对误差为 $\pm 5\%$ 。赵颖烈等^[30]开展铸造工艺性分析,完成工艺设计后借助铸造仿真软件对充型与凝固过程进行模拟验证。经实际浇注验证,首批铸件即达到合格标准,超声探伤与切片检测均未发现缺陷,批量生产废品率控制在4%以下。研究强调了系统的前期工艺分析与虚拟仿真能够有效避免重复试制,大幅提升新铸件的研发效率。

2.2 缸体组件

柱塞泵缸体长期承受高压油液周期性冲击及摩擦副剧烈磨损,因此其材料选择需兼顾耐磨性能与结构强度。目前主流采用铜基合金与钢组成的双金属复合结构,其中耐磨层多选用铅黄铜或锡铅青铜,以发挥优异的减摩耐磨特性^[31]。承力层采用45钢等合金结构钢,确保整体抗冲击能力与结构稳定性。在成形工艺方面,双金属复合缸体主要采用融合铸造

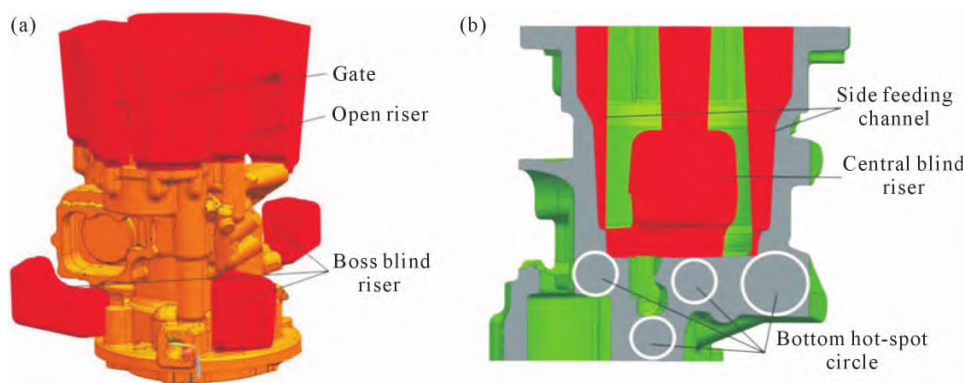


图5 铸造工艺方案:(a)原工艺;(b)改进工艺^[29]

Fig.5 Casting process scheme: (a) original scheme; (b) optimized scheme^[29]

或挤压铸挂成形,前者可实现铜合金与钢基体的冶金结合,后者通过压力作用进一步提升结合面致密度,有效减少缩孔、缩松缺陷。单一球墨铸铁缸体优先选用精密砂型铸造,兼顾复杂结构成形能力与成本经济性。通过合理匹配材质与成形工艺,可实现缸体组件在高承载与耐磨需求下的性能协同。在铸造过程中,由于不同金属材料之间热物性参数的显著差异,容易引发热失衡现象,导致青铜层中 Pb 相发生粗化与聚集,同时缩松缺陷集中分布于功能区域。为克服上述挑战,研究团队开发了融合铸造与热梯度调控的协同工艺策略。通过引入锥形孔结构、热凸台设计与液体收集器的协同布局,并结合多阶段冷却控制技术,成功将凝固缺陷限制在半径 52 mm 范围内的 2 mm 窄带区域内,促进了 Pb 相的球化与弥散分布^[32]。

赵波^[33]研究了柱塞泵转子双金属构件的挤压铸挂成形工艺,重点强调了通过多冲头直接挤压方案与 ProCAST 数值模拟,优化了充型温度、模具温度、

充型速度、压力及保压时间等关键参数,有效提升了铅锡青铜与 45 钢结合面的质量,显著减少了缩孔、缩松缺陷,实现了结合面牢固、组织致密的近净成形。王明杰等^[34]研究以 ZCuPb20Sn5 铜合金与钢基体构成的双金属柱塞泵转子为对象,开展铸造工艺设计,图 6 展示了双金属铸件的装配方式与平稳充型过程,上下端面预留 10 mm 加工余量,采用金属型下盖空冷,以中心孔浇注配合分流口实现铜合金熔液充型,钢基体圆孔兼作冒口,金属型重力铸造全程熔融硼砂保护。并通过数值模拟发现充型平稳无金属液飞溅。基于模拟结果进行试浇,铸件钢-铜界面无夹杂、气孔且结合良好。其核心在于阐明如何通过合理的结构设计与工艺参数匹配,实现异种金属的良好冶金结合,并为数值模拟验证工艺可行性提供了可视化依据。

2.3 柱塞

柱塞是泵内承受最严苛工况的精密摩擦副。通过周期性地改变密封腔室的容积,完成液压油的吸

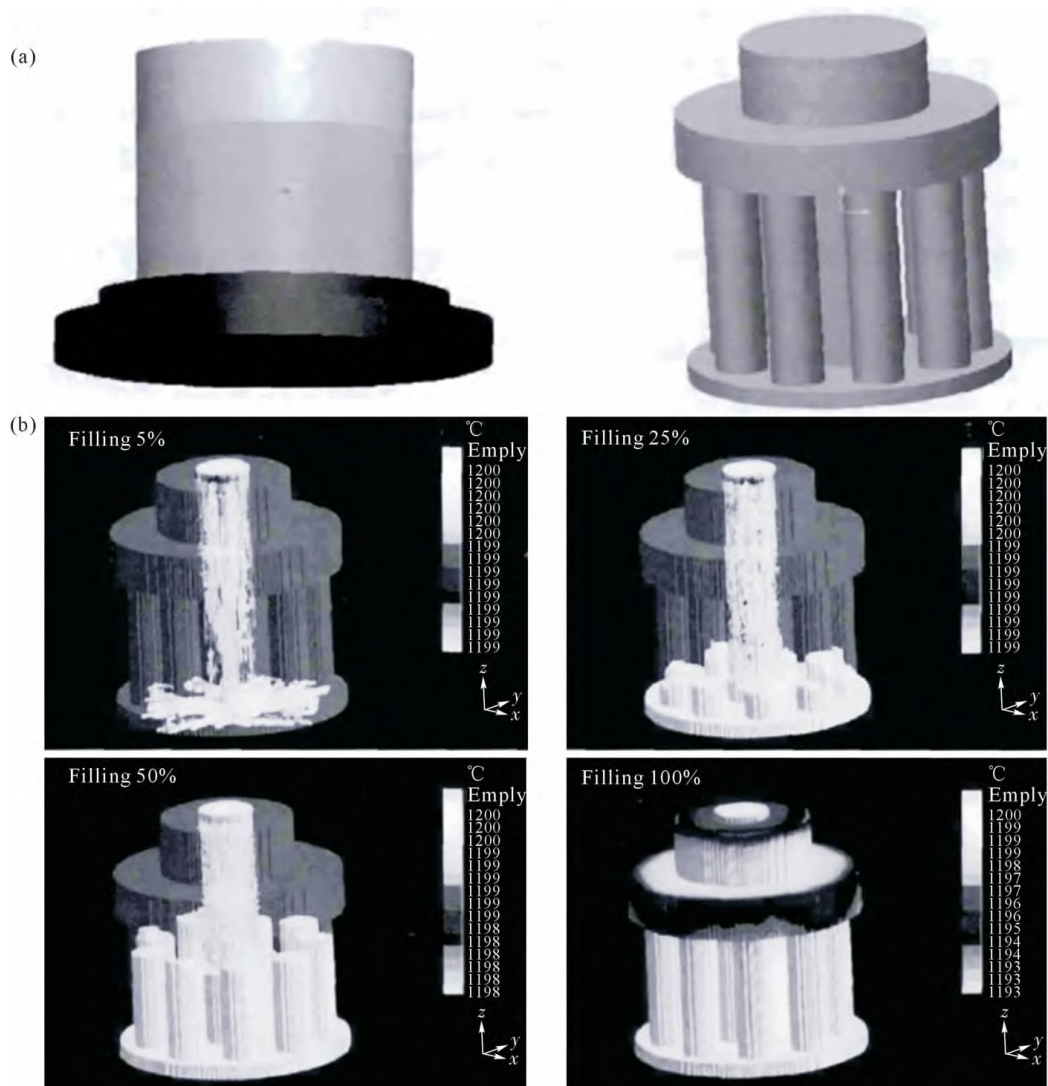


图 6 铸造工艺:(a) 铸件装配图;(b) 充型过程^[34]

Fig.6 Casting process: (a) assembly figure of casting; (b) filling process^[34]

入与排出过程^[35]。其材料选择需兼具表面高耐磨性、本体高强度与轻量化特性。目前主流材质主要分为两类:①铜基合金,因其优异的耐磨性能和致密组织,适用于超高压、深海及航空航天等高端柱塞泵;②颗粒增强铝合金,凭借密度仅为铜基合金 1/3 的显著轻量化优势,适配民用及工程机械领域的中高压柱塞泵。

在高压油液环境下的剧烈摩擦磨损与高频惯性载荷工况下,柱塞需兼具表面耐磨性能,充分的结构强度与良好的轻量化特性^[36]。因此,其制造工艺趋向于本体高性能成形与表面特种强化相结合,半固态铸造或挤压铸造是该类高性能运动副的理想选择,为进一步提升关键摩擦面的耐磨性,通过离心铸造工艺在柱塞头部实现 SiC 颗粒的局部富集,形成具有梯度增强效应的功能层^[37]。而铸造与锻造复合成形技术能有效细化晶粒组织,消除内部缺陷,显著提高材料致密度与疲劳抗力^[38]。这些先进的成形工艺通过协同优化材料的宏观分布与微观组织结构,并辅以 TiSiCN 等硬质涂层的表面改性处理,在保证构件强度的同时,实现了摩擦学性能的跨越式提升。图 7 展示了加工后带凹槽的活塞形貌及其在不同区域老化后的硬度分布与质量损失。该图的核心科学价值在于直观揭示了表面强化处理对关键摩擦副部件硬度梯度与磨损抵抗力的实际影响,为评价和优化柱塞表面性能提供了直接的实验数据支撑^[39]。

2.4 配流盘

配流盘组件是决定整泵工作压力、容积效率及运行稳定性的核心精密部件^[40]。其通过表面精密分布的吸排油窗口、封油区及阻尼槽结构,在缸体旋转过程中实现各柱塞腔油液的平稳吸入、压力过渡与高压排出,同时有效抑制困油冲击与压力脉动^[41]。

配流盘在工作过程中需持续承受高频交变载荷与高速剪切作用,因此对其平面度、表面粗糙度、耐磨性与疲劳强度均提出极高要求^[42]。故熔模铸造是其首选的精密成形工艺,能够一次铸出复杂的油路和精细特征,避免多次机加工带来的应力与变形。为兼顾耐磨性能与整体结构强度,该部件常采用铜基耐磨合金、钢背双金属复合结构或高硅铝合金等材料制造,但随之也面临界面结合强度不足、油压冲击下易发生微观变形,以及因表面磨损导致的密封失效等核心挑战^[43]。针对上述问题,业界采用真空熔覆,半固态浆料精密成形与扩散热处理等先进工艺,以实现耐磨层与基体间牢固的冶金结合,并优化其微观组织结构,有效抑制界面处 Cu-Sn 等脆性相的生成^[44-45]。

尤为重要的是,通过表面织构化引入的微米级几何特征,揭示了改善摩擦副性能的一项共性机理,即微凹坑或微槽可作为微观流体动压轴承,在相对运动界面间产生附加动压效应,从而显著改善润滑状态,提升承载能力并降低摩擦磨损。Zhang 等^[46]选用矩形微凹坑作为 EHA 泵阀板的表面织构方案,具

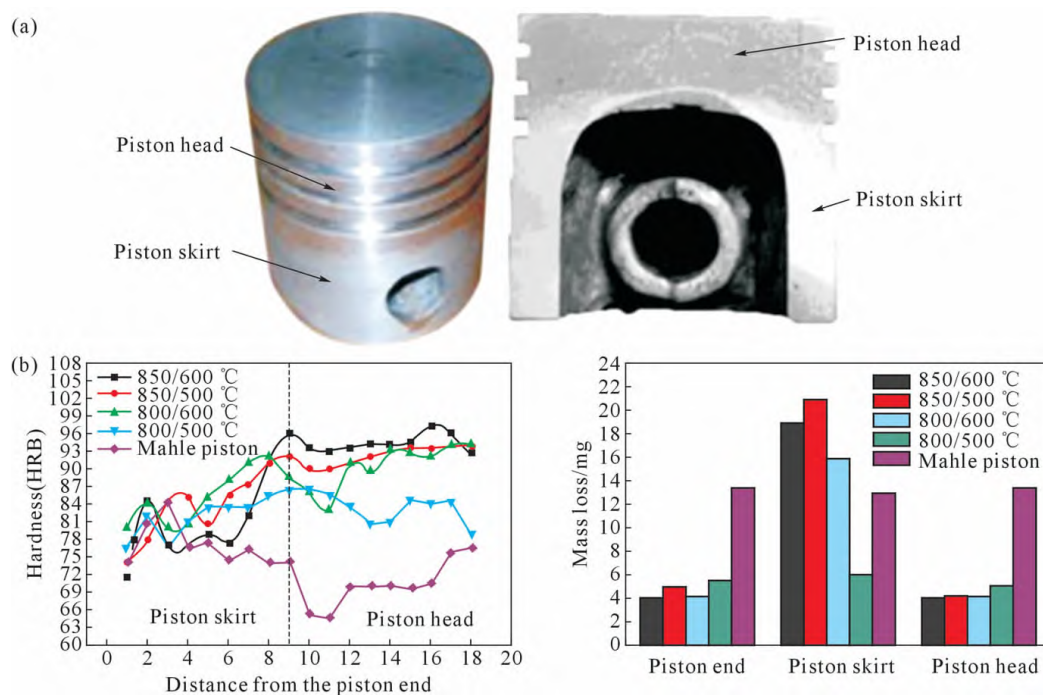


图 7 活塞的形貌和性能:(a) 加工后带凹槽的活塞;(b) 不同区域老化活塞的硬度分布和质量损失^[37]

Fig.7 The morphology and performance of the piston: (a) piston with grooves after machining; (b) hardness distribution of aged pistons and quality loss in various regions^[37]

体尺寸设为 $300\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ 。研究人员通过对阀板表面进行全域织构加工,织构形貌与几何参数如图 8 所示。研究发现,在混合润滑状态下,这些规则排布的微凹坑能够有效储存润滑油并产生额外的流体动压力,从而减小缸体倾斜角、抑制黄铜材料的转移与黏着。是实现“微轴承”效应,在高速高压工况下同步提升泵的机械效率与容积效率的关键物理载体。该研究从机理上说明,表面织构技术通过调控界面润滑介质的行为,显著增强了配流盘的抗冲击疲劳性能与服役寿命,确保其在高压、高频工况下具备稳定的密封性能与长期运行可靠性。未来,随着表面织构处理与表面涂层技术的不断发展,配流盘正朝着轻量化与自适应补偿的方向持续演进。

3 总结与展望

本文以高压柱塞泵缸体、柱塞、配流盘、泵体与壳体等关键摩擦副组件为研究对象,系统梳理并分析了砂型铸造、熔模铸造、压力铸造及半固态铸造 4 种核心工艺在该领域的应用特性、技术难点与优化路径,明确了各工艺与不同材质、不同工况组件的适配逻辑。研究表明,砂型铸造凭借材料兼容性广、复杂型腔成形能力强,成为高强度铸铁、球墨铸铁材质中高压泵体及大型壳体的主流工艺,通过浇注系统优化,可有效抑制缩松、砂芯变形等缺陷;熔模铸造以高精度、高表面质量见长,成为特种合金钢、铜基合金材质制造航空航天高端泵体及精密配流盘的首选工艺,结合增材制造与数字化模拟,实现了复杂精细结构的无缺陷成形;压力铸造依托高效规模化生产优势,主导铝合金材质薄壁泵壳的制造,真空辅助

压铸技术的应用有效抑制了气孔、共晶富集带等传统缺陷;半固态铸造则通过固液两相协同成形,解决了铜基合金中 Sn、Pb 元素的偏析问题,可制备致密度高、力学性能接近锻件的柱塞及深海高压缸体等核心摩擦副,是实现高压柱塞泵性能突破的关键工艺。4 种工艺各具技术侧重与应用边界,通过精准匹配柱塞泵组件的材质特性、结构功能与服役工况,可实现铸件内部缺陷的主动抑制与凝固路径的精准调控,为提升组件的力学性能、摩擦学性能及服役寿命奠定了工艺基础。

高压柱塞泵作为高端装备液压系统的核心部件,其关键摩擦副构件的铸造技术发展是我国实现高端液压基础件自主可控的重要支撑。未来,该领域将紧扣制造强国与“双碳”战略要求,深度融合新一代人工智能、增材制造等前沿技术,向智能化、绿色低碳、结构功能一体化方向深度演进。

工艺融合与数字化智能化升级,以增材制造与传统铸造的交叉创新为核心,突破激光粉末床熔融砂型、DLP 光固化陶瓷型芯等精密成形技术瓶颈,打破复杂内腔与精细流道构件的成形极限。集成多物理场仿真与机器学习算法,对海量工艺数据进行深度挖掘,实现工艺窗口的自适应优化、铸造缺陷的智能预判及生产过程的自主决策,推动柱塞泵铸造从“经验试错”向“数据驱动、模型预测”的智能模式转变,提升制造过程的可控性与稳定性。

突破单一材料性能瓶颈,开发适配高压、高速、强磨损极端工况的高强韧、耐磨损铸造新材料体系,重点优化铜基合金、颗粒增强铝合金及特种合金钢的成分设计,提升材料的综合力学与摩擦学性能。深

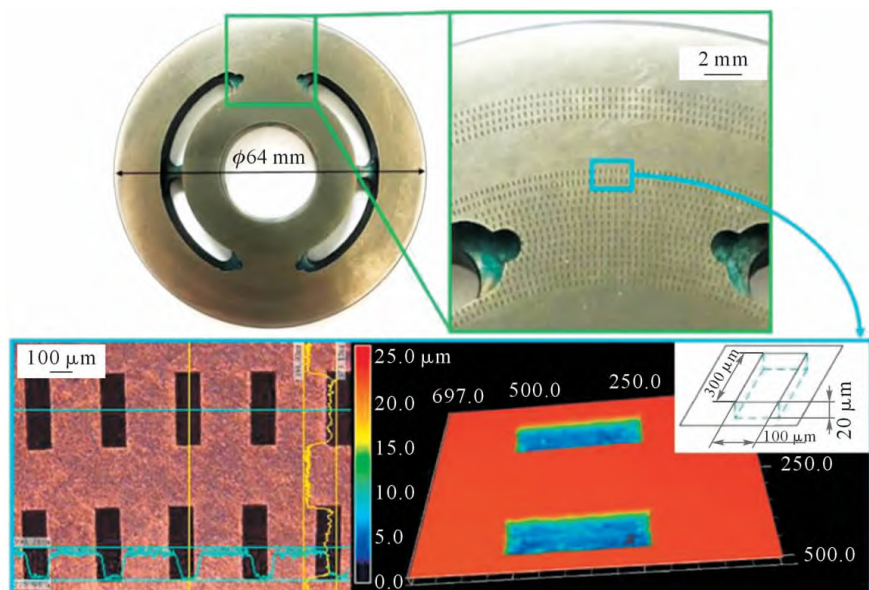


图 8 纹理阀板的照片及其表面凹坑的显微照片^[46]

Fig.8 Photos of the textured valve plate and micrographs of the dimples on its surface^[46]

度融合功能梯度设计理念,在柱塞、配流盘、缸体等核心摩擦副中实现耐磨表层与韧性基体的微观组织精准调控,结合半固态铸造、真空熔覆等工艺实现结构与功能的一体化成形。协同发展表面织构、硬质涂层、微弧氧化等表面工程技术,从材料成分、微观结构及表面改性多维度提升组件的承载能力、抗磨损性能与疲劳寿命,实现构件从“被动适应工况”向“主动设计性能”的跨越。

以全生命周期低碳化为目标,推进柱塞泵铸造工艺的绿色化转型,重点攻克大型无机黏结剂砂型的循环再生、生物基可降解模料的研发应用、熔炼过程余热回收等关键技术,从源头减少原材料消耗与污染物排放。融合轻量化拓扑优化设计,对泵体、壳体等结构件进行减重优化,在保证强度与承压能力的前提下降低材料用量与后续加工能耗。建立铸造全过程的能源管理与排放监控体系,整合绿色熔炼、清洁造型、高效回用等技术环节,构建资源高效、环境友好的绿色铸造体系,实现从原材料制备、生产加工到产品回收的全链条低碳化管理。

综上,高压柱塞泵关键摩擦副构件的铸造技术正迈入工艺、材料与数字技术深度融合的新阶段。未来需以工程实际需求为导向,持续开展工艺优化、材料创新与智能化技术研发,突破高端柱塞泵铸造的核心技术瓶颈,构建适配我国制造业发展的高性能、智能化、绿色化铸造技术体系。这不仅将推动我国高压柱塞泵性能的跨越式提升,打破国外高端液压基础件的技术壁垒,更将为航空航天、工程机械、深海探测等领域高端装备的国产化发展提供核心支撑,助力我国高端装备制造业整体竞争力的全面提升。

参考文献:

- [1] LIN Y, WANG H J, WANG H G, TANG S S, HAO H M, HUANG J H. A novel wear prediction method and wear characteristic analysis of piston/cylinder pair in axial piston pump[J]. *Wear*, 2024, 550-551: 205402.
- [2] MA C J, YAN P, WANG B C, GAO L, LIU S T, DU J L, FENG L Q. Research on dynamic response characteristics and wear mechanism of the slipper of key friction pair in axial piston pump[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 182: 109994.
- [3] LIU S Y, YU C S, AI C, ZHANG W Z, LI Z A, ZHANG Y Q, JIANG W L. Impact analysis of worn surface morphology on adaptive friction characteristics of the slipper pair in hydraulic pump[J]. *Micromachines*, 2023, 14(3): 19.
- [4] TIAN G, YIN C H, MA T, HE J, WANG Z. Defect formation analysis and microstructure-guided process design for large-scale complex thin-walled superalloy double-ring casting boss in investment casting[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 48: 113537.
- [5] 夏利红, 郑江, 刘瑜, 宋江凤, 蒋斌. 热处理对高压铸造 Al-10Si-0.5Mn-0.3Mg 合金梯度结构和变形行为的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(4): 617-629.
XIA L H, ZHENG J, LIU Y, SONG J F, JIANG B. The influence of heat treatment on the heterogenous structure and deformation behavior of a high pressure die-cast Al-10Si-0.5Mn-0.3Mg alloy[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2025, 55(4): 617-629.
- [6] TANG S N, KHOO B C, ZHU Y, LIM K M, YUAN S Q. A light deep adaptive framework toward fault diagnosis of a hydraulic piston pump[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 217: 109807.
- [7] LOMBARDI A, D'ELIA F, RAVINDRAN C, MACKAY R. Replication of engine block cylinder bridge microstructure and mechanical properties with lab scale 319 Al alloy billet castings[J]. *Materials Characterization*, 2014, 87: 125-137.
- [8] SHI J P, SHAN Z D, YANG H Q, HUANG J, YAN D D. Research on frozen sand mold casting technology for complex thin-walled aluminum alloy castings[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110907.
- [9] CHI Y T, LI X C. Nanotechnology-enabled rapid investment casting of high-performance wrought aluminum alloys[J]. *Manufacturing Letters*, 2024, 41: 339-343.
- [10] WU H J, SONG X X, LU J Z, DOU K, WANG W L, ZHANG Y J, FAN Z Y. A machine learning method for predicting the elongation to failure of Al-Si alloy in high pressure die casting combining experiment and modeling[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 39: 2621-2632.
- [11] JIANG R, WU G H, XIE H, TONG X, ZHANG L, QI F Z, LIU W C, GENG Y J, REN G X. Linear contraction of sand casting Mg-9Gd-3Y-0.5Zr alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34(5): 1441-1455.
- [12] LI N, WU Q H, JIANG A L, ZONG N F, WU X Z, KANG J W, JING T. Numerical research of gas-related defects for gray cast iron during sand casting[J]. *Materials Letters*, 2023, 340: 134177.
- [13] 崔希文. 磨床生产中常见液压件的铸造技术[J]. *金属加工(热加工)*, 2024(12): 114-118.
CUI X W. The foundry technology of common hydraulic parts in grinder production[J]. *MW Metal Forming*, 2024(12): 114-118.
- [14] ZHANG S Y, CHEN Q, LI Y, XU Z F, WANG Z T, LU B P. Development of an additively manufactured sand casting mold process suitable for titanium alloy casting[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(21): 34779-34788.
- [15] GUO Z J, LIU D R, BAO H Y, PU Z P, FENG Y C, GUO E J. Process optimization of gravity sand casting process for thin-walled castings of Al-7Si-0.5Mg alloy using a coupled simulation-experiment method[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 432-450.
- [16] AN T, DOURGAPARSAD K, NICARD C, GRUESCU I C, MAGNIER V, CRISTOL A L, JIMENEZ M, BALLOY D. Production of small metallic periodic structures by investment casting: Investigations of the technical limits[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 152: 222-236.
- [17] REN S J, BU K, ZHANG R Y, LIU J, MOU S, QIU F. Effect of constraint removal on single-crystal blade dimensions during investment casting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024,

- 119: 73-86.
- [18] WANG S, PAN J C, CHEN R R, XIONG C, TAN J P, HAO T, ZHU Q J, LIU Y L, WANG X M, GAO Y L, GUO J J. Orthogonal parameter optimization of K435 turbine blades manufactured by investment casting based on physical field analysis and microstructure prediction[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 246: 127106.
- [19] LI Y F, DIAS FILHO J M, DEHGAHI S R, BUTT S U, HENIEIN H, QURESHI A J. Hybrid investment casting of Al-Cu-Sc alloy-based lattice structures: Material and process characterization [J]. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2025, 10: 100160.
- [20] ROSA A, SANTOLIVUDO O, CAMEROTA F, GHADERI R, BARCELLI F, ORTONA A. Highly complex ceramic cores for investment casting applications made possible by additive manufacturing[J]. *Open Ceramics*, 2025, 21: 100748.
- [21] YANG L K, HE J H, LIN Q L, SHEN P. Constructing bioinspired graded metal/ceramic composites through sedimentation-assisted freeze casting and pressure infiltration[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 3080-3086.
- [22] QIN G L, LIN J, LIU X, XIANG H L, XU C C, LI L X. Effect of pouring temperature on distribution characteristics and formation mechanism of eutectic-rich band in vacuum-assisted high pressure die casting AlSi9MnMg alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2025, 345: 119066.
- [23] XIE H C, LI Y F, SONG J F, HU H R, HE D M, LI C Y, JIANG B, XIANG D X, PAN F S. Effect of intensification casting pressure on microstructure and mechanical properties of high pressure die casting AE81 magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 10092-10103.
- [24] LI N Y, MAO W M, GENG X X, ZHANG R S, YAN B D. Microstructure, segregation and fracture behavior of 6061 aluminum alloy samples formed by semi-solid or traditional high pressure die casting[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103418.
- [25] WANG Z J, ZHOU R F, LI Y K, SUN Y J, HUO D D, ZHANG H, LI Y, LI Z Q. Synergistic enhancement of strength and ductility in leaded nickel-tin bronze by constructing a core-rim dual-phase microstructure via semi-solid squeeze casting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 944: 148902.
- [26] FENG J, LIU Z K, LI D Q, ZHU J H, CHEN S, ZHANG F, HAO X C. Evolution of segregation, microstructure and mechanical properties of a semisolid die casting Al-6Si-3Cu-0.4Mg alloy[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2023, 6(2): 245-253.
- [27] ZHANG J H, CHAO Q, XU B. Analysis of the cylinder block tilting inertia moment and its effect on the performance of high-speed electro-hydrostatic actuator pumps of aircraft[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(1): 169-177.
- [28] 刘斌. 柱塞泵体的消失模铸造[A]. 消失模与V法铸造经典论文汇编[C]. 桂林:中国铸造科技工贸联谊活动组织委员会, 2014. 77-80.
- [29] 冯超,唐楨,纪旭辉. 铝合金柱塞泵壳铸造缺陷分析及优化改进[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(10): 1428-1430.
- FENG C, TANG Z, JI X H. Defect analysis and optimization of aluminum alloy plunger pump shell[J]. *Special Casting & Non-ferrous Alloys*, 2024, 44(10): 1428-1430.
- [30] 赵颖烈. 新型柱塞泵盖铸造工艺与研制[J]. *液压气动与密封*, 2022, 42(10): 6-9.
- ZHAO Y L. Casting technology and development of new type piston pump cover[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2022, 42(10): 6-9.
- [31] ZHAO J A, FU Y L, MA J M, FU J, CHAO Q, WANG Y. Review of cylinder block/valve plate interface in axial piston pumps: Theoretical models, experimental investigations, and optimal design [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1): 111-134.
- [32] QI L X, HAN H Y, YANG L X, LI C J, WANG Y, JIANG L A, LI X G. Fabrication of CuSn10Pb10/42CrMoS4 bimetal hydraulic cylinder block by fusion casting[J]. *Materials Letters*, 2025, 399: 139002.
- [33] 赵波. 柱塞泵转子挤压铸挂成形工艺过程仿真优化[D]. 贵阳:贵州大学, 2009.
- ZHAO B. Simulation and optimization of squeeze casting forming process for piston pump rotor[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.
- [34] 王明杰,夏建强,张国伟. 柱塞泵转子铸造工艺研究[J]. *铸造技术*, 2017, 38(6): 1521-1524.
- WANG M J, XIA J Q, ZHANG G W. Casting process for piston pump rotor[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(6): 1521-1524.
- [35] ZHANG H, LU Y, LONG J Z, LIU Z Y, TU F Q. Optimization of micro-texture in thermo plastic elasto-hydrodynamic lubrication for improving the start-up behavior of the piston/cylinder pair in axial piston pump [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2025, 106: 102976.
- [36] LIU L, LIU S H, CAO E, WU Y, LIU D. Combustion-driven wear mechanisms of the piston ring in large-bore low-pressure dual-fuel marine engines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127160.
- [37] HUANG X Y, LIU C M, LV X J, LIU G H, LI F Q. Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(9): 1540-1546.
- [38] KRÜGER L, JENTSCH E, BRUNKE L, KEßLER A, WOLF G, LEHNERT T, SCHUBERT N, WAGNER A, LANDGREBE D. Development of an innovative lightweight piston through process combination “casting-forging”[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 27: 172-176.
- [39] ROYCHOUDHURY A, BANERJEE A, MISHRA P C, KHOSHNAW F. An FEA material strength modelling of a coated engine piston[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 1320-1325.
- [40] 杨华勇,宋月超,徐兵. 复杂工况下柱塞泵流量脉动并行仿真与试验研究[J]. *中国科学:技术科学*, 2012, 42(12): 1463-1471.
- [41] XIA S Q, HUANG C, YE S G, JIAO W X, XIA Y M, ZHU Z M. Study on the running-in tribological performance and mechanism of the valve plate with surface texture for axial piston pumps[J]. *Wear*, 2025, 574-575: 206085.
- [42] LI X G, ZHANG J H, LYU F, FANG Y, WANG D D, ZHANG X L, XU J W, MIAO K F, XU B. Multi-scale topography wear mechanism of the valve plate in axial piston pumps during running-in

- process: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 182: 110058.
- [43] MA H Q, LIU W, WU D W, SHAN H M, XIA S Q, XIA Y M. Modeling and analysis of the leakage performance of the spherical valve plate pair in axial piston pumps[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, 45: 101498.
- [44] XIE F, ZHAI C S, ZHANG X, EMRE A, ZHENG H X, ZHANG X, JIANG S N, LI X C, WU F F, HUA X J. Microstructure, dislocation and high-temperature oxidation behavior of as-cladding NiCoFeCrMo high-entropy alloy coatings: Laser cladding vs vacuum cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1033: 181278.
- [45] GAN R, LIU Z D, KONG Y, CHANG Y R, SHEN Y, LI J X, NING H Q. Preparation and properties of Cu/Cu-Sn alloy cladding layers on titanium alloy by laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1020: 179547.
- [46] ZHANG J H, CHEN Y, XU B, CHAO Q, ZHU Y, HUANG X C. Effect of surface texture on wear reduction of the tilting cylinder and the valve plate for a high-speed electro-hydrostatic actuator pump[J]. *Wear*, 2018, 414-415: 68-78.
- (责任编辑:杨浩雪)