DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4100

立式离心浇注精密铸造技术研究进展

王晨旭[1],丁　鑫[1],王新秀[1],张　永[2],于忠军[2],夏　峰[2],方虹泽[1],陈瑞润[1]

(1.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;2.中国航发哈尔滨东安发动机有限公司,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要:离心铸造是将金属液注入高速旋转的铸型内,使其做离心运动充满铸型形成铸件的技术。根据转轴位置的不同,可将其划分为卧式和立式离心铸造。通过离心铸造的方式生产中空筒形和环形铸件及铸管等,生产效率高、成本低,且铸件组织细密。按照旋转轴位置分类,离心铸造可以分为水平(或卧式)离心铸造和立式离心铸造。立式离心铸造相较于卧式离心铸造占地小、操作方便、材料适用性好、工艺灵活性高,已有几十年的历史,最早用于生产火炮弹壳等军事产品。随着立式离心铸造技术的不断发展,已被广泛应用于民用领域。本文从关键技术、数值模拟、典型铸件3个方面,简述了国内外近几年立式离心铸造技术的研究进展,介绍了可铸金属的选择、铸造工艺设计、铸型选择与设计、离心铸造涂料、离心铸造机等的研究成果,呈现了光滑粒子流体动力学(SPH)法、粒子跟踪测速(PTV)法、夹杂物运动规律等方法在立式离心铸造数值模拟方面的应用,列举了双金属复合轧辊、锥段转鼓、大口径厚壁变径管等立式离心铸造技术的典型铸件案例。

关键词:离心铸造;数值模拟;铸造工艺;铸造设备

中图分类号:TG249.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0932-13

Research Progress in Vertical Centrifugal Casting Precision Casting Technology

WANG Chenxu[1], DING Xin[1], WANG Xinxiu[1], ZHANG Yong[2], YU Zhongjun[2], XIA Feng[2], FANG Hongze[1], CHEN Ruirun[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. AECC, Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150001, China)

Abstract: Centrifugal casting involves injecting liquid metal into a high-speed rotating mold so that the liquid metal undergoes centrifugal movement to fill the mold and form a casting. Centrifugal casting can be classified into horizontal centrifugal casting and vertical centrifugal casting. By means of centrifugal casting, hollow cylinder, ring castings and cast pipes are produced with high production efficiency, low production cost and fine casting structure. Compared with horizontal centrifugal casting, vertical centrifugal casting has the advantages of a small footprint, convenient operation, good material applicability and high process flexibility. Vertical centrifugal casting technology has a history of several decades and was first used to produce military products such as artillery shells. With the continuous development of vertical centrifugal casting technology, it has been widely used in civil fields. Researchers have sought to improve the vertical centrifugal casting process to increase production efficiency, reduce costs, reduce scrap rates and improve product quality. In this paper, the research progress in vertical centrifugal casting technology at home and abroad in recent years is summarized in three aspects: key technology, numerical simulation and typical castings. The research results of casting metal selection, casting process design, casting mold selection and design, centrifugal casting coating and centrifugal casting machine are introduced. The applications of the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, particle tracking velocimetry (PTV) method and inclusion movement law in numerical simulations of vertical centrifugal casting are presented. Typical casting cases of vertical centrifugal casting technology, such as bimetal composite rolls, cone section drums and large-diameter thick wall reducers, are listed.

Key words: vertical centrifugal casting; numerical simulation; casting process; casting equipment

收稿日期:2024-05-21

基金项目:国家自然科学基金(52204386);中国博士后科学基金(2021M690819);黑龙江省杰出青年科学基金(JQ2023E003)

作者简介:王晨旭,2000年生,硕士生.研究方向为铝合金复杂构件精密铸造和模拟仿真.Email: wangchenxu_0805@163.com

通讯作者:丁　鑫,1989年生,博士,副教授.研究方向为轻合金复杂构件精密成形和金属储氢材料.Email: dingxin_hit@hit.edu.cn

引用格式:王晨旭,丁鑫,王新秀,张永,于忠军,夏峰,方虹泽,陈瑞润.立式离心浇注精密铸造技术研究进展[J].铸造技术,2024,45(10):932-944.

WANG C X, DING X, WANG X X, ZHANG Y, YU Z J, XIA F, FANG H Z, CHEN R R. Research progress in vertical centrifugal casting precision casting Technology[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 932-944.

中国知网　https://www.cnki.net

离心铸造属于特种铸造,其特点在于通过将金属液浇入旋转的铸型中，在离心力的作用下成形、凝固而获得铸件[1]。离心铸造的早期形式可以追溯到古代。古罗马和古希腊文明时期,人们已经开始使用离心法制作小型铜器。然而,这些早期的应用主要是手工操作,没有现代离心铸造技术的高度精密性。

随着工业革命的兴起,离心铸造开始引起更多关注。在18世纪末和19世纪初,一些先进的机械工程师和制造商开始尝试使用离心力来改进铸造过程。然而,当时的离心铸造仍然是相对简单和初级的。随着技术的进步,离心铸造在19世纪中期逐渐得到改进。这一时期,工程师们开始设计更复杂的离心铸造设备,并将其应用于更广泛的金属与合金中,如铜、铁和铝。在19世纪末,人们开始更系统地研究离心铸造的原理和工艺。

20世纪初,随着科学技术的发展,离心铸造得到了更多的理论支持和实验验证。工业界逐渐采用离心铸造技术,尤其是对于一些特殊形状和大型零部件的制造。在第二次世界大战后,离心铸造在军工、航空航天等领域得到了广泛应用,对于生产复杂零部件具有独特的优势[2]。自20世纪中叶至今,随着金属材料和工艺技术的不断进步,离心铸造的应用范围进一步扩大,逐渐在能源、汽车制造、船舶制造等行业得到广泛应用。总体而言,离心铸造技术经历了漫长的发展历程,已逐渐发展成为一种较为成熟的现代铸造工艺。

与其他的浇注技术比较,离心浇注在一些方面具有明显的优越性：①在不使用砂芯的情况下,可以生产各种口径、长短的空心圆筒、环状铸件,提高了生产效率,降低了生产成本。②在一些铸造工艺中,由于不需要浇冒口,金属的利用率得以提高。③适用于多种合金,特别是高温合金。④利用离心力可使铸件形成致密的结构。在离心力的作用下,轻质熔渣、氧化物等杂质会漂浮出来,停留在熔体的内壁,可以通过机加工去除,以保证气缸套等铸件的质量。⑤在给定的壁厚范围内,可以得到由铸型外壁向铸型内壁方向的定向凝固组织。⑥可以实现外刚内韧、综合性能优良的双金属铸造。

立式离心铸造是在铸造过程中,将金属液浇入绕垂直轴旋转的铸型中,使之在离心力作用下充填铸型并凝固成形的铸造方法(图1)[1]。相较于卧式离心铸造,立式离心铸造可以生产非轴对称铸件[3],并且占用地面空间较小,这对于有限的工厂空间或需要布局灵活的应用场景来说是一个优势。除此之外,立式离心铸造模具相对简单,易于制造和维护,

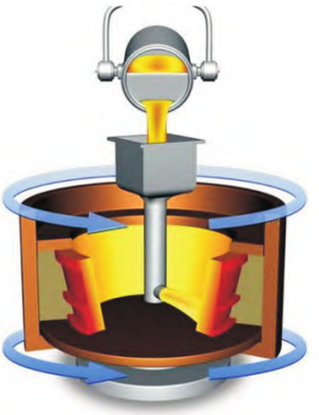


图 1　立式离心铸造示意图

Fig.1　Schematic diagram of vertical centrifugal casting

对于小批量订单,立式离心铸造更为灵活[4]。然而立式离心铸造在其发展过程中仍然面临一些技术挑战,其中包括新型合金适用性、铸造工艺设计、铸型可靠程度、离心铸造涂料、离心铸造机性能、计算机数值模拟准确性及铸件质量控制等。

1　立式离心铸造关键技术

1.1　可铸金属的选择

为了使立式离心铸造合金的一些特性符合工艺要求,需要选择适合立式离心铸造的可铸金属。以下是一些适用于立式离心铸造的合金性能要求。

(1)流动性。离心铸造涉及将熔融金属通过离心力作用浇注到铸型当中，因此金属的流动性是一个关键因素[5]。一些具有较高流动性的合金,能够更好地充填铸型中的细节,形成形状复杂的零件。如果金属的流动性不佳，可能导致铸型中的某些区域充填不足,最终影响零件的完整性。除此之外,不良的流动性可能导致金属在填充过程中产生气孔或其他缺陷,从而降低零件的机械性能和质量。

(2)适中的凝固范围。具有适中凝固温度范围的金属更容易在离心铸造中获得均匀的结构，而过大的凝固范围可能导致组织不均匀。在立式离心浇注口径较大铸件的凝固过程中，由于一些铸型冷却强度低,使金属液很长时间不能凝固,导致在铸件断面还没有完全凝固之前,其内表面已达到凝固点,最后凝固的金属液便在主要凝固层与内孔凝固层之间形成环形心部缩松带(图2),从而降低铸件的力学性能[6]。

当前,在离心作用下,铸件的充型特性已逐渐被人们所了解，金属熔体充填对铸件缺陷的影响也逐渐受到重视[7]。Humphreys等[8]研究了铝合金及钛合金在重力充型和离心条件下充型的区别，指出熔体的流动方向不仅受到离心力的影响，还受到流道变化

中国知网　https://www.cnki.net

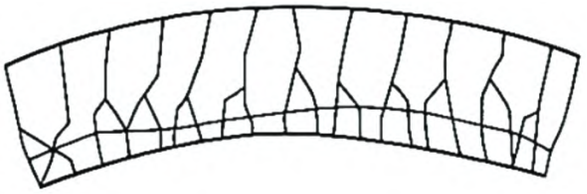


图 2 离心铸管环形中心缩松带[6]
Fig.2 Shrinkage band in the center of the centrifugally cast pipe ring[6]

的影响,因此在熔体流动性差和黏性大的情况下常出现充型不全的现象。Watanabe等[9]对于钛合金离心浇注的研究也表明,金属液在较宽的凝固范围内具有较高的黏度时,金属液无法充满型腔。

郭景杰和盛文斌等[10-11]结合理论与实际,从立式离心铸造的充型与凝固规律2个方面,研究了离心力场作用下钛合金的充型与凝固特性。其针对金属型离心浇注Ti-6Al-4V(Ti-6-4)合金人工骨关节的充型过程进行了理论分析,并得到了熔体在离心充型过程中的层流判据和自由液面倾斜度的变化情况。发现随着旋转平台旋转速度的增加,熔体在离心力场中所能维持的层流长度逐渐减少;熔融物的自由面会出现倾斜,最后趋向于垂直。图3为确定条件下,转台转速不同时,熔体层流段截面面积随充型长度的变化曲线。图4为熔体充型过程中熔体截面倾角随充型长度的变化情况。

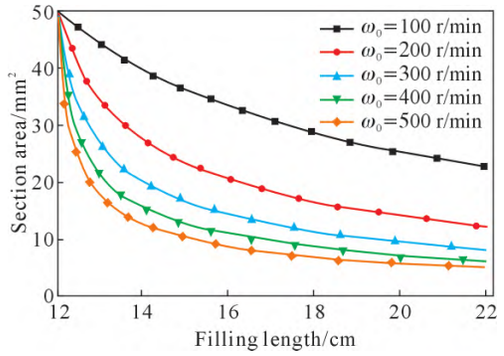


图 3 截面面积随充型长度的变化[10]
Fig.3 Variation in section area with filling length[10]

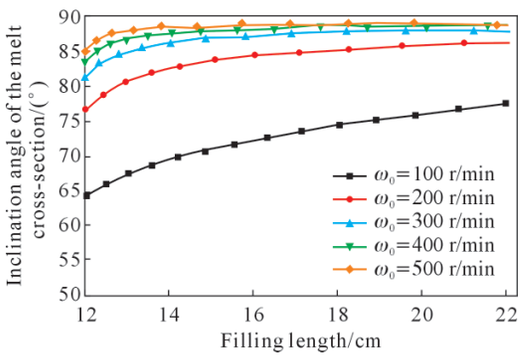


图 4 倾角随充型长度的变化[10]
Fig.4 Variation in inclination angle with filling length[10]

苏彦庆等[12-15]对钛铝合金离心铸造过程进行了理论研究和分析,并建立了计算其溢流阈值的数学模型。郭险峰[7]研究了Ti-43Al-9V钛铝金属间化合物的流动性,并观察其凝固行为和铸态组织。研究表明,在离心铸造条件下,Ti-43Al-9V填充性能良好,可满足1.3 mm厚薄壁构件(图5)的要求,而对于0.8 mm厚的构件,其充型能力存在一定局限性。

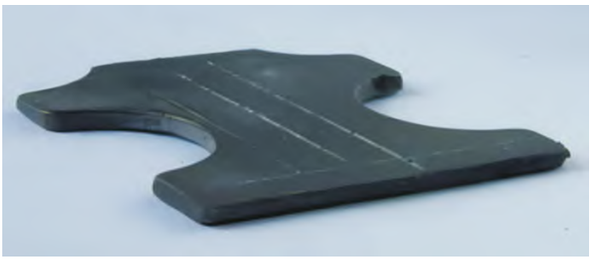


图 5 Ti-43Al-9V 填充 1.3 mm 薄壁件[7]
Fig.5 Thin-walled parts (1.3 mm thick) filled with Ti-43Al-9V[7]

周同金[16]通过试验研究与仿真分析,对凝固变形条件下液态金属的流动特性及微观结构演变进行了深入研究。结果表明,在离心力场中,随着模数增加,颗粒的平均粒度逐渐减小(图6)。

近年来,由于航空航天领域的迅速发展,关于立式离心铸造技术在钛合金和铝合金成型应用方面的研究逐渐增多。徐琴等[17]采用CAFE数值模拟与实验相结合的方式研究了不同工艺参数下ZL205A铝合金的凝固组织,发现在立式离心铸造生产条件下,ZL205A铝合金铸件的凝固组织大部分为均匀细小的等轴晶,并且随着离心转速的增加,晶粒尺寸逐渐减小。时俊克等[18]以等效液面下降法为基础,研究了ZTA15钛合金立式离心铸造的冷却凝固过程,并实现了对该合金凝固缺陷的精准预测。

综上所述,在立式离心铸造条件下,金属液的流动性和凝固范围直接影响了其流动行为和凝固行为,进而影响了铸件的组织和性能。因此,选择流动性好、凝固范围适中的金属作为立式离心铸造的可铸金属十分必要。

1.2 铸造工艺设计

立式离心铸造工艺设计主要包含铸型浇注系统设计、转速确定、浇注温度选择等[19]。

立式离心铸造的浇口位置比较固定,一般由旋转轴中心浇入(图7),并且常需进行补缩,这时,浇口、直流道为主要的补缩来源,其容积要大于需要补缩的金属液量。对需要补缩的铸件,内浇口位置通常设在铸件厚壁上[4],并应将铸件、内浇口、横浇道和直浇道的模数逐步提高,形成封闭的浇注系统。

立式离心铸造利用铸模转动时的离心力,将注入模具中的液态金属填充到铸模中,并在离心力作

中国知网 https://www.cnki.net

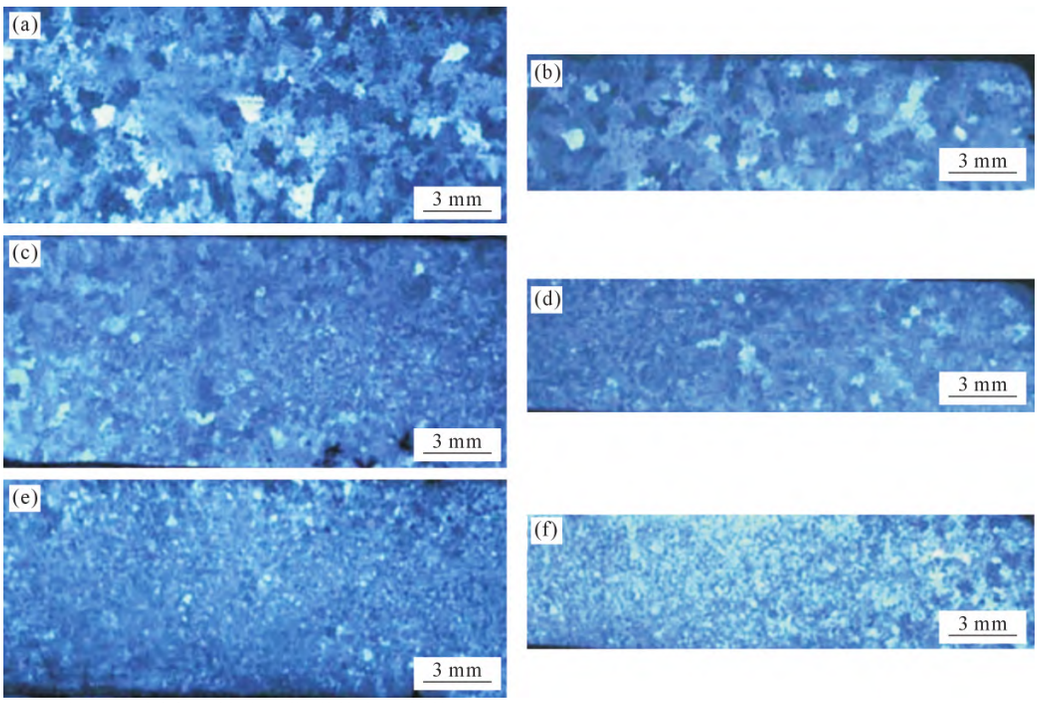
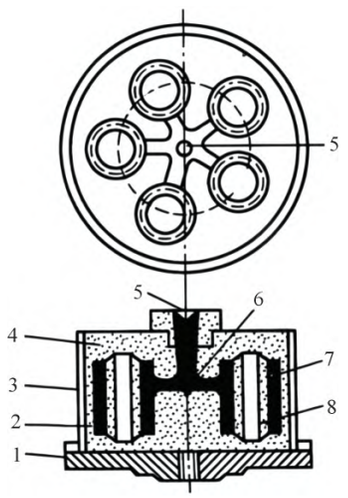


图 6 不同离心转速下楔形件宏观晶粒对比：(a, b) 0 r/min; (c, d) 200 r/min; (e, f) 300 r/min[16]

Fig.6 Comparison of macrograins of wedges at different centrifugation speeds: (a, b) 0 r/min; (c, d) 200 r/min; (e, f) 300 r/min[16]



1- 旋转台；2- 下型；3- 砂箱；4- 上型；5- 中心浇道；6- 补缩道
7- 铸件；8- 砂芯

图 7 立式离心铸造工艺示意图[4]

Fig.7 Schematic diagram of the vertical centrifugal casting process[4]

用下凝固成型。为了增加液态金属的充型能力，模具需要有一个合理的旋转速度，如果速度过小，则产生的离心力不够，会造成铸件充型不佳；过高的转速则会增加能源消耗，对铸型及离心机的设计制造也提出了更高的要求，而且金属液更容易偏析。所以，在确定离心铸型转速时，应以保证铸型质量为原则，选择最小的转速。除此之外，立式离心铸造多选用流动性较好的金属，并且离心力能增加金属的充型能力，因此离心铸造时的浇注温度可较重力浇注时低5~10 ℃[1]。

姜骏声[20]在对异型铸件立式离心浇注技术及应用进行探讨时，提出了立式离心浇注工艺的设计原则：①要确立从外到里的顺序凝固过程；②要有充足的液态金属，使其铸造过程中始终受到离心力的补偿。梁作俭等[21]在开展γ-TiAl涡轮成型研究时发现，采用熔融模壳离心铸造方法制备的γ-TiAl涡轮叶片，模量比、冒口与铸件体积之比等因素对其凝固及收缩缺陷有显著影响，模数差异越大，体积比值越大，对减小收缩缺陷，提高内部品质越有利。在此基础上，其进一步研究了离心速度对铸造充型性能的影响，认为特定钛铝合金涡轮精密铸造的最佳离心速度为600~900 r/min。郭险峰[7]研究了Ti-43Al-9V钛铝金属间化合物凝固收缩行为与浇注温度的关系，结果表明，Ti-43Al-9V系合金在铸造过程中出现了明显的收缩现象，且随浇注温度的提高，其受阻收缩减小。王冀恒等[22]在对自制钛基复合材料的铸造、微观结构及力学性能研究中发现，离心速度越快，充型时间越短，充型向离心力方向的趋势越明显，且在离心速度大于300 r/min以后，流动变得更加平稳。张华等[23]在研究483Q发动机排气阀的铸造过程时，设计了2因素3水平正交试验表，分析了浇注温度、铸型温度的变化对铸件质量的影响。研究表明，当铸型温度和离心转速保持不变时，随着浇注温度的升高，充型时间几乎没有改变，但凝固时间有所增加。同时，随着浇注温度的升高，熔体内部的温度梯度也随之增加，这对顺序凝固和减少缺陷的发生具有重要意义。Liu等[24]研究了厚度为2.5 mm的316L钢片在不同转速下的熔体流动状态和冷却凝固缺陷，发现转速从

中国知网　https://www.cnki.net

150 r/min增加到900 r/min的过程中，在600 r/min时熔体充型时间最短，孔隙体积最小，这说明在使用立式离心铸造生产壁厚较薄的钢片时存在最佳转速。

由此看来，立式离心铸造的铸造工艺设计直接影响铸件的组织和性能。合理的铸造工艺设计，可以确保金属液在充型及凝固过程中平稳充型，并得到充分补缩，进而避免气孔、氧化夹渣、缩孔缩松等缺陷的产生，提高铸件质量。除此之外，合理地设计离心铸造工艺还可以提高生产效率，减少生产成本，并且降低能源消耗，提高生产的环保性。

1.3 铸型选择与设计

在立式离心铸造中，铸型在浇注时要高速旋转，同时要承受金属液的冲击力和热冲击。因此，离心铸造和砂型重力铸造相比，对铸型有更严格的要求。

选择铸型材料时，一般使用砂型、石膏型及熔模铸造型壳等一次性铸型，也可以使用石墨型、金属型等永久型。立式离心铸造中使用的一次性铸型与普通重力铸造的制造方法相同，但使用时需要注意：①由于离心力的作用，砂型应有更高的紧实度，防止冲砂，砂芯应注意使用芯铁增加强度；②不能使用无箱造型，即使是无箱或组芯造型也要放在铰接的砂箱或套箱中浇注；③砂型和砂芯表面最好应用涂料，防止被冲刷或粘砂；④设计时要确保旋转平衡，任何不平衡引起的振动都会导致铸件壁厚不匀；⑤要使用专用底板以便和离心机固定。在永久型的使用中，石墨型具有工作效率好、灵活性高、冷却速度高及耐热性能优良等特点，因此很多立式离心铸件选择石墨型进行浇注。但是，在使用石墨型时，操作者不小心提取铸件有时会严重损坏铸型甚至报废，所以操作时需要严格按照工艺规程。

随着计算机技术与智能化的发展，三维设计、模拟仿真、CAD/CAE/CAM集成等已逐步应用到了铸型的设计、研发和生产中，铸型的选择与设计能力由此得到了极大提升。然而，我国现阶段的铸型产业仍然呈现出“低端混战、高端缺乏”的竞争格局。由于高端铸型设计制造的能力较弱，铸造产业发展会在一定程度上被限制。因此，铸型设计制造的精密化、大型化、自动化和智能化亟待发展。

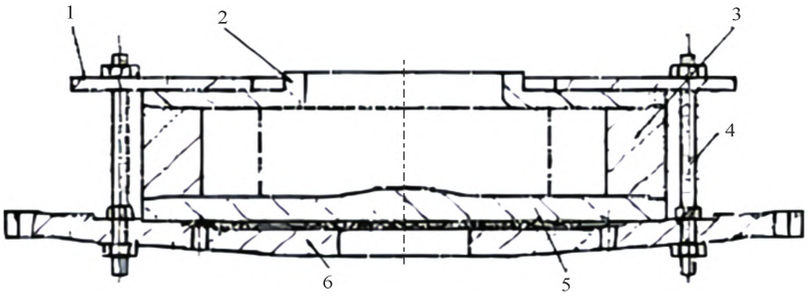
近年来，由于3D打印砂型技术的进步，无箱或组芯造型的使用越来越多。在立式离心铸造生产条件下，无箱或组芯造型要放在铰接的砂箱或套箱中浇注，因而套箱是立式离心铸造的关键组成部分。套箱的设计和制造需要精确，以确保铸件的精度和质量[25]。杨为勤等[26-28]发明了离心铸型筒套拉应力计算、离心铸型最高温度估算、常用离心铸型材料许用应力确定等方法，解决了大型离心铸型金属筒套强度校核难题，为离心铸型的安全设计及金属筒套失效分析提供了理论依据。其发明的大型立式离心机顶盖笼栏式整体定位锁紧结构及该锁紧结构的强度校核方法(图8)，避免了金属液顶喷等大型离心铸造易发事故，显著提高了立式离心铸造生产的安全性及可靠性[29]。除此之外，杨为勤[30]还发明了立式离心铸型的系列化、模板化设计方法，以及铸型预设温度控制技术等，使生产成本大幅度降低，生产效率显著提高。

1.4 离心铸造涂料

在立式离心铸造过程中，对铸件刷涂料是一个重要的工艺。涂料的功能主要有：减小温度对模具的影响；通过对冷却速率的控制，使其结构与性能达到最优；改善铸件表面质量。

立式离心浇注涂层是一种由耐火粉料、载液、黏结剂、悬浮剂及一些提高性能的助剂构成的一种分散体系[31]。相对于一般的砂型，离心铸造对涂层有特别的要求：①具有良好的保温性能，从而减小对模具的热影响，改善铸件的品质；②具有较低的发气量，降低铸件中产生气孔的可能性。

离心浇注法的排气性能较差，就黏结剂而言，应该尽量减少或不使用有机悬浮剂。目前使用较广的黏结剂为水玻璃，其发气量小，可满足常规生产需



1- 花形压板；2- 盖板；3- 金属筒套；4- 锁紧螺栓；5- 底板；6- 离心机底盘

图 8 立式离心机铸型、压板及锁紧装置的装配示意图[29]

Fig.8 Assembly diagram of the vertical centrifuge mold, pressure plate and locking device[29]

中国知网 https://www.cnki.net

要。近年来,对于离心铸造用耐火材料的研究逐渐增多,其中最受大家关注的耐火材料是硅藻土。硅藻土是古代硅藻遗体经过生物演化而成的硅质沉积岩,不同地区的硅藻土性质差别很大,常与黏结剂、悬浮剂等混合制成水基涂层。立式离心铸造所用的硅藻土耐火材料不仅需要高的二氧化硅含量、低发气量外,而且要保证其微孔隙结构的完整性,才能获得优良的隔热与储气性能。王念康等[32]的研究表明(图9),影响金属型离心铸造涂料发气量的主要因素是硅藻土,当其发气量高于一定值时,铸件中将会产生无法消除的针眼缺陷。除此之外,刘志明等[33]对国内隔热耐火材料用硅藻土的矿物成分和物化性质进行了系统的试验与分析,探索了焙烧过程和破碎方式对硅藻土颗粒尺寸、微观组织的影响,并提出将硅藻土作为隔热耐火材料时,需通过高温焙烧除去结合水和有机物,降低其发气量。利用气流破碎技术可以将硅藻土颗粒磨细,达到技术指标,同时保持了硅藻土的微孔隙结构和优异的隔热性能。冯永星等[34]通过对不同硅藻土和同一硅藻土比例的铸造工艺研究,发现相同的硅藻土,在不同比例的配方下,其涂层的性能会发生变化,对铸件品质有很大影响。当硅藻土的吸水率及堆积密度不一样时,同样的配方配制出来的涂层性能也会有差异,在实际生产中需要进行试配,以确定合适的涂层配合比。由此可见,通过高温焙烧、气流破碎技术及合理的涂料配比,硅藻土可以在维持其微孔隙结构的情况下拥有较低的发气量。

1.5　离心铸造机

离心铸造机种类众多,不同种类的离心铸造机适用于生产不同铸件。选择铸造机时需要综合考虑铸件特点、工艺要求等方面。

随着离心铸造技术的发展,其应用范围也在不断拓宽,对离心铸造设备的承载能力提出了新的要求:①离心机的实际转速与给定转速的符合性要好。由于受到离心力的作用,离心铸造金属液在凝固过程中会发生偏析,利用这一特点,严格控制铸型的转速,可以生产化学成分与力学性能从内向外呈梯度分布的结构材料[35],这就要求离心机实际转速与给定转速的符合性要好。②离心机调速控制的灵敏性要好。一般的离心铸造采用固定转速,而在离心浇注金属液凝固过程中,即在固液两相金属共存状态下,在一定限度内,以一定的规律升高或降低铸型转速,通过旋转速度变化,加速作用在晶体前端的晶枝形成切向力,改变液态金属流动状态,使晶枝断裂、脱落,进而实现对晶粒形貌的调控。因此,离心铸造机的调速控制信号响应要灵敏,才能控制转速改变的时机,进而达到较好的效果[36]。③离心机运行的平稳性要好。离心铸造机的机械结构应当具备足够强度,以承受高速旋转和高温铸造过程中的应力和振动[37]。离心机运行的平稳性不仅会直接影响到铸件的产量和质量,而且会对设备本身和周围环境造成较大影响。因此,离心机运行的平稳性是保证铸件质量、减少设备维修的关键。

焦建波[38]对离心机振动问题提出了相应的对策。他指出,在使用立式离心铸造机时,存在着一个问题,即在液态金属凝固末期,离心机振动显著增加,严重时会导致离心机剧烈摇晃,地脚螺栓松动,油管脱落,密封件损坏,轴承磨损失效,影响周围设备的正常运转。在此基础上,结合离心机的结构和工作原理,对离心机结构、设备刚度、转动件质量与转速、转动件质量偏心率等进行了分析。他建议从结构设计方面,如增加离心机刚度和减振装置,并适当选用轴承等来改善离心机的抗振性能。在制造方面,通过控制模具质量和安装精度、温度和减速等措施来缓解离心机的振动(图10)。

在立式离心铸造中,铸型围绕竖直轴线转动,熔体在离心力的作用下,在铸型内部产生空心圆筒状自由曲面,无需型芯即可完成空心零件的成形[39]。但该工艺在成形大轴直径铸件时,易产生壁厚偏差。付学敏等[40]分析了中空结构低熔点合金铸件在立式

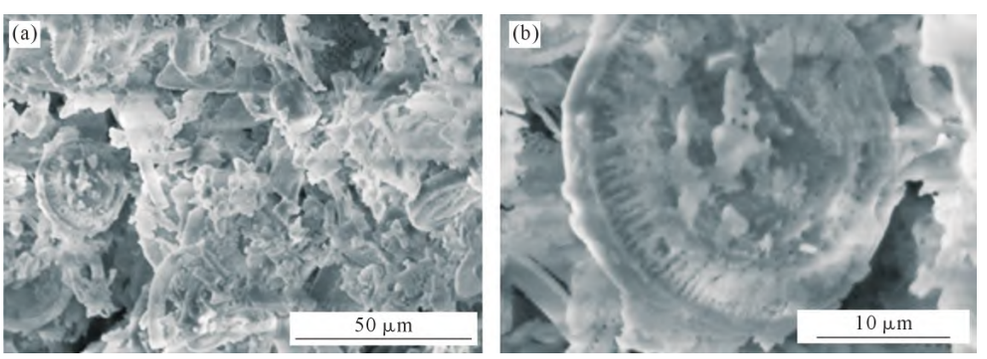
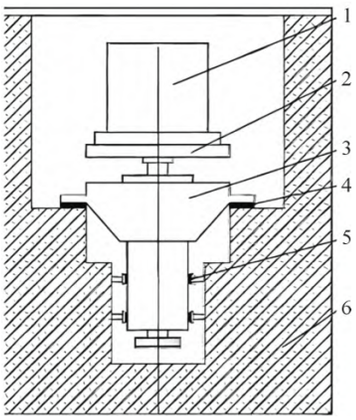


图 9　硅藻土显微结构:(a) 国产;(b) 国外[32]

Fig.9　Microstructure of diatomite: (a) domestic product; (b) foreign product[32]

中国知网　https://www.cnki.net



1- 离心模具；2- 工作盘；3- 机座；4- 纵向减振；5- 水平减振
6- 设备基础

图 10 立式离心机结构示意图[38]
Fig.10 Structural diagram of the vertical centrifuge[38]

离心铸造过程中质点的受力状态，指出了立式离心铸造过程中出现壁厚不均现象(图11)的根本原因是在立式离心铸造工艺中，液态金属既受到离心力场的影响，又受到重力场的影响[40-41]。

该曲线方程为：

$$z=r_1^2 w_1^2/2g \tag{1}$$

式中，w_1为离心转速；r_1为制品内壁半径。

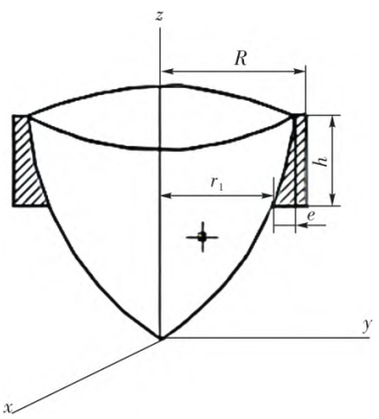
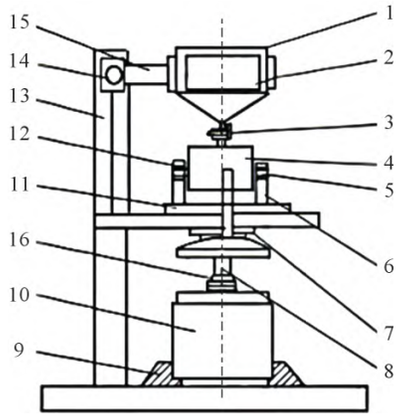


图 11 离心成形时液态金属表面形貌[40]
Fig.11 Surface morphology of liquid metal in centrifugal forming[40]

付学敏等[40]提出在旋转过程中融入摆动运动，改善壁厚不均现象的方法是通过振动来降低重力场对铸件的影响，并通过振动作用促进液体锡充型。在旋转时，其主要受到铸型表面和液态金属之间的摩擦力；在铸型中，摩擦力产生的正压由离心力作用在铸型上产生，当液体向上移动，摩擦力与重力相等时，重力作用将减弱。在分析了该方法的可行性及相关工艺参数优化后，其设计了一种装置(图12)，该装置采用空间凸轮机构，使铸造模具上下摆动。工作原理是将变速电机装在电机架上，使电机通过联轴器带动转轴旋转，转轴上装有一转盘，而在该中间



1- 熔化炉；2- 加热器；3- 开关阀；4- 铸型块；5- 铸型转轴
6- 铸型支架；7- 空间凸轮；8- 离心转轴；9- 电机架
10- 变速电机；11- 铸型转台；12- 轴承；13- 机座
14- 高度调节手轮；15- 支撑架；16- 联轴器

图 12 摆动离心成型机结构简图[40]
Fig.12 Structural diagram of swing-type centrifugal casting equipment[40]

架上则装有一空间凸轮，随着推杆沿空间凸轮旋转带动铸型转动。研究表明，设备经过改进增加摆动后，使管坯铸件壁厚差显著减小。

2 数值模拟

随着计算机技术的不断发展，数值模拟技术在铸造工艺设计及优化中展现出了显著优势。立式离心铸造时熔体的受力和运动状况较为复杂，铸造过程的预测比常规重力铸造要困难得多，因此需要采用先进的数值模拟技术[41-42]。

张新平等[43]采用有限差分法模拟了二维柱坐标下离心力场中的金属凝固过程，为研究颗粒浓度场奠定了基础。吴士平等[44]在模拟基础上分析了离心铸造过程中缺陷形成机理及其控制措施，采用数值模拟技术，对TiAl基合金排气阀的金属型离心铸造过程进行了研究，取得了一定进展。曾兴旺等[45]通过对离心铸造过程中液态金属流动与传热的分析，提出了一种基于 Visual C++6.0的离心铸造数值模拟方法。实际应用表明，可以达到验证现有方案、优化铸造工艺的目的。杨闯[46]发展和完善了离心力场下的Navier-Stokes微分方程组，结合相似物理仿真和Navier-Stokes微分方程，构建了离心力场作用下的微尺度离心流场相似判据。国内其他科研人员也对离心铸造模拟进行了一定研究，包括SPH法、PTV法及对夹杂物运动规律的探讨，为理解和预测立式离心铸造过程提供了重要的理论基础。

2.1 光滑粒子流体动力学法

光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydro dynamics, SPH)是一种数值模拟方法，目前广泛应用

中国知网 https://www.cnki.net

于流体动力学、固体力学和多物理场耦合问题的研究[47]。主要特点是通过将连续介质划分为一系列“光滑粒子”，来离散化模拟物质的运动和相互作用,而不需要固定网格[48]。赵静雨等[49]采用SPH法(光滑粒子流体动力学)对立式离心铸造充型过程进行了数值模拟研究,通过建立基于SPH方法的数学模型,并结合水力学算例对其进行了验证。其将该数学模型应用于铸造充型工艺仿真，并与ProCAST仿真结果进行了比较，进一步验证了所建立数学模型和开发程序的实用性。需要注意的是,SPH法的应用需要适当的数值稳定性和精度控制，以及合适的参数设置。自由表面解析解与SPH数值解的对比见图13,它的准确性和计算效率取决于问题的特性和模拟的细节[49]。因此,在使用SPH法进行数值模拟时,需要仔细验证和调整模型以确保结果的可靠性。

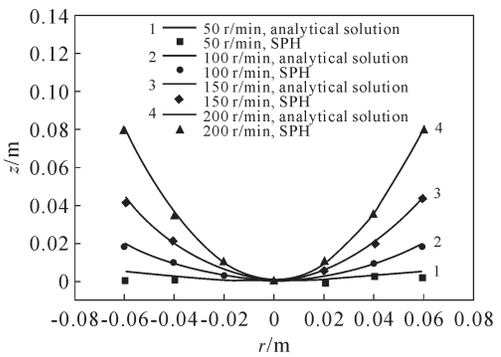


图 13　自由表面解析解与 SPH 数值解对比[49]

Fig.13　Comparison of free surface analytical solutions and SPH numerical solutions[49]

2.2　粒子跟踪测速法

粒子跟踪测速法 (particle tracking velocimetry, PTV)是一种用于测量和分析流体中速度场的实验方法[50]。通过在流体中注入或跟踪微小颗粒(通常是追踪粒子或颗粒示踪剂),使用成像技术跟踪这些颗粒的运动,从而获取流场中的速度信息[51]。肖艮等[52]采用PTV法(粒子追踪测速技术)对钛合金立式离心铸造过程中的流速进行了定量表征，通过设计试验模具和配置常温相似流体，进行了不同转速和浇注速度参数的物理模拟试验。另外,其利用PTV法获得了粒子随流体运动的瞬态速度，并对流体运动特征进行了分析(图14)。结果表明,在离心铸造过程中，示踪粒子会沿着与旋转速度相对的型腔壁面运动。在低转速条件下,适当提高离心转速和减小浇注速度有利于流体的平稳充型。

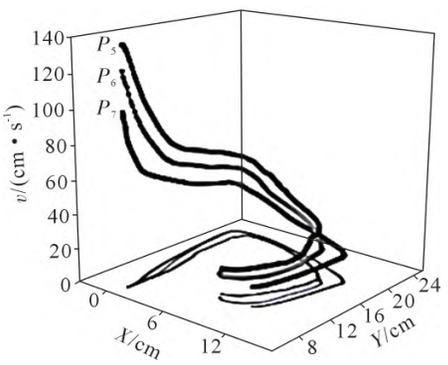


图 14　不同离心转速下粒子位移–速度[52]

Fig.14　Particle displacement-velocity map at different centrifugal rotation speeds[52]

2.3　夹杂物运动规律

夹杂物运动规律的数值模拟通常涉及到流体力学、离散元素方法(discrete element method, DEM)及它们的耦合[53]。这种模拟旨在研究流体中悬浮、沉积的颗粒及其他夹杂物的运动行为[54]。肖艮[55]通过物理模型试验，对不同离心速度下的流动特性和夹杂物移动进行了系统研究(图15),并且在华铸CAE软件的基础上，构建了钛合金立式离心铸造充型过程中夹杂物的运动轨迹计算模型，进而研制了相应的数值仿真平台。利用所建立的仿真模型,对某钛合金零件进行仿真分析，实现了对夹杂物流动规律的准确预测。

3　典型铸件

立式离心铸造适合于生产套筒、管类等圆柱形或近似圆柱形的铸件。由于铸型在离心力作用下形成中空的圆柱形自由表面，使此类铸件的生产过程

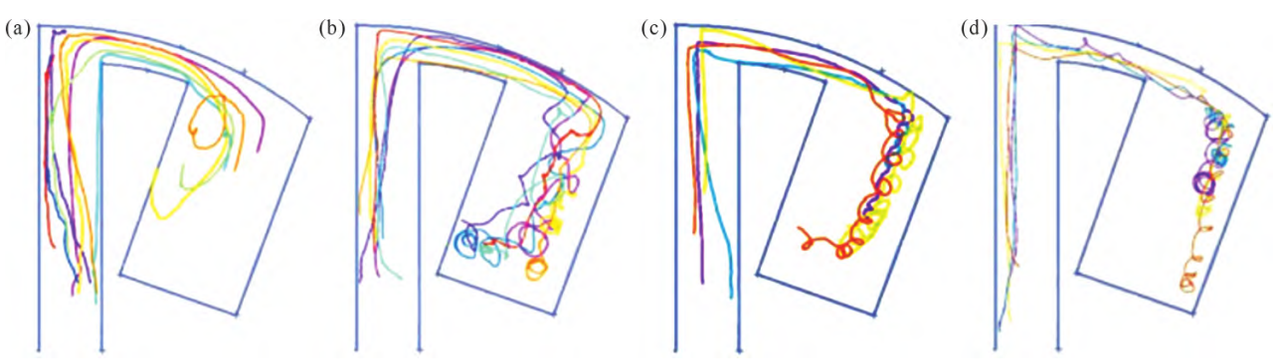


图 15　不同转速下夹杂物示踪粒子运动轨迹:(a) 0 r/min; (b) 30 r/min; (c) 45 r/min; (d) 60 r/min[55]

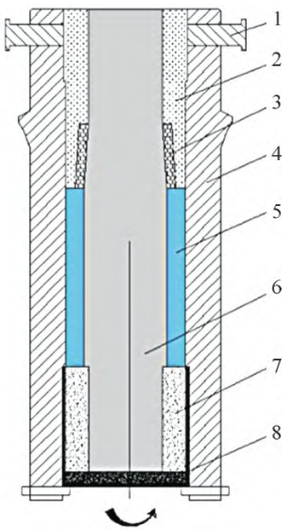
Fig.15　Trajectories of inclusion tracer particles at different rotational speeds: (a) 0 r/min; (b) 30 r/min; (c) 45 r/min; (d) 60 r/min[55]

中国知网　https://www.cnki.net

得以简化。另外，其可以处理多种材料，包括耐磨合金、高温合金等，并且对于双金属套筒类铸件，离心铸造是当前最重要的生产方法，而且成本最低、产品稳定性最好。

3.1 双金属复合轧辊

双金属复合轧辊是金属轧制的重要工具，通常用于冷轧、热轧和带钢轧制等工艺[56]，特点是由两种不同性质的金属材料组成，一种材料用于轧制辊的核心，另一种用于轧制辊的工作表面，以兼顾高强度和耐磨性[57]。生产双金属复合轧辊工艺复杂，需要高度专业的立式离心铸造技术。冯喜锋等[58]进行了双金属复合轧辊的立式离心铸造技术研究，采用金属型铸造辊身，砂型铸造辊颈，结合耐磨合金外层和芯部球墨铸铁双层复合的生产工艺，通过3次立式离心浇注实现(图16)。在浇注外层钢液时，需要根据液面抛物线方程和康氏公式计算离心机的转速。此外，中间层铁液的浇注温度、浇注时机及外层内表面的防氧化保护等因素对内外层的冶金结合起着至关重要的作用。

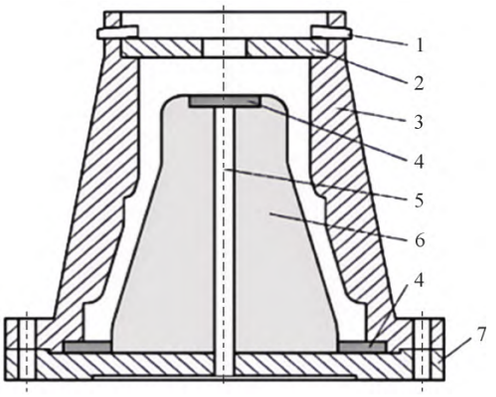


1- 吊耳；2- 树脂砂；3- 陶瓷环；4- 冷型；5- 外层；6- 内层；7- 黏土砂
8- 底板

图 16 辊身冷型及辊颈造型整体示意图[58]
Fig.16 Overall schematic diagram of roll body cooling and roll neck modelling[58]

3.2 锥段转鼓

锥段转鼓，也称为锥形滚筒，是一种工业设备，常用于物料的分级、筛选、输送和处理。外形呈锥形，具有一段较大直径的上部和一段较小直径的下部[59]。锥段转鼓通常由金属制成，应用于挖掘、采矿、建筑、冶金、化工、食品加工等领域[60]。于宏斌等[61]对传统的立式离心铸造锥段转鼓在生产过程中出现的气孔、夹砂和缩孔等问题进行了分析，利用在传统立式离心铸造中添加砂芯的办法对其进行改进(图17)。实践证明，加入砂芯后，锥段转鼓的加工余量得到了有效控制，所研制的产品无气孔、夹砂、缩孔等缺陷，无焊缝，能满足特定工况下锥段转鼓的无缝化加工需求。

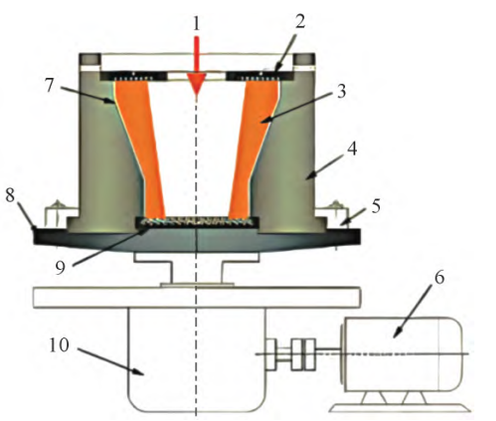


1- 销子；2- 挡板；3- 金属型筒；4- 耐火砖；5- 芯骨；6- 砂芯；7- 底板

图 17 改进型立式离心铸造用铸型结构示意图[61]
Fig.17 Schematic diagram of the improved vertical centrifugal casting model structure[61]

3.3 大口径厚壁变径管

大口径厚壁变径管是一种特殊设计的管道构件，通常用于工业领域高压、高温或特殊工艺要求的管道系统中[59]。这些管道的直径在一段长度内变化，从而能够满足管道系统中不同部位的需求。江克等[62]研究了大口径厚壁变径管的制造技术，采用立式离心铸造工艺，浇注材质为ZG40Ni35Cr25Nb的变径管(图18)，并对各部位化学成分进行取样分析，研究变径管在常温拉伸、高温短时和高温持久性能方面的表现，结果均符合标准要求。通过分析变径管径向截面的低倍金相组织分布规则，检查各截面的渗透检测情况，未发现超标缺陷。结果表明，采用离心铸造技术可以制造出满足使用要求的大口径厚壁变



1- 钢液入口；2- 模具盖板；3- 铸型；4- 模具；5- 模具卡环
6- 离心机电机；7- 高温涂料；8- 托盘；9- 模具底垫板；10- 离心机主机

图 18 变径管立式离心浇注装置示意图[62]
Fig.18 Schematic diagram of the vertical centrifugal casting device for reducing pipes[62]

中国知网 https://www.cnki.net

径管。

3.4 大型厚壁护套

出口的大型高锰铝青铜厚壁护套是船用螺旋桨上的重要部件，质量要求高。杨达飞等[63]研究了该产品的离心铸造工艺，提出了一种计算内圆缩凹深度的方法。在立式离心铸造工艺中，由于铸型、底板和盖板等3个侧面的激冷效应，铸件的内圆会产生缩凹现象，这是设计工艺余量时必须考虑的问题。通过多年实践，得出了大、中型立式离心铸件在离心转速调节因子β=1.2~1.4的情况下，铸件壁厚与内圆缩凹深度之间的关系，见表1[63]。

表1 铸件壁厚与铸件内圆缩凹深度的关系[63]

Tab.1 Relationships between the casting wall thickness and inner shrink depth[63]

Wall thickness/mm	Shrink depth/mm
100～120	4.5～6
120～140	6～8
140～160	8～10
160～180	10～12
180～200	12～14

立式离心铸造条件下，在设计铸件内圆加工余量时，除了要考虑铸件内圆的上、下端半径差，还要注意铸件内圆表面的缩凹深度，在取两者中的最大值的基础上设计加工余量[63]。图19为大型厚壁护套实物。

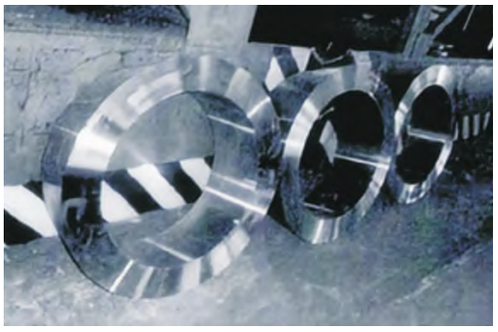


图 19 大型厚壁护套实物[63]

Fig.19 Large thick wall sheath casting[63]

4 结语与展望

立式离心铸造的铸件具有组织致密、机械性能好、生产效率高等特点，在军事与民用领域得到广泛应用。虽然立式离心铸造技术已发展得较为成熟，但是在世界科技革命和产业变革潮流下也面临着新的挑战。

(1)随着工业发展和工业需求的演变，合金的高温性能、耐腐蚀性等将成为满足未来工业和科技需求的重要因素。随着对材料性能要求的提高，需要不断改进离心铸造工艺，以满足制造业对材料成型各方面的要求。

(2)一些离心铸造生产机构可能尚未充分整合数字化、智能化技术，限制了生产的灵活性、效率和质量控制。

(3)传统的离心铸造过程中可能会产生废气、废水和废渣等环境污染物，研究及应用更环保的生产方式及处理产生的废弃物质是一个重要的课题。

未来立式离心铸造的发展应从智能化与材料创新等方面考虑。

(1)制备具有梯度结构的功能材料。立式离心铸造技术可以在铸型转动过程中利用离心力将密度不同的增强体和基体合金分离，从而形成一种或多种组分的梯度变化。通过改变旋转速度、晶粒尺寸、时间、温度及密度等参数，可以调控合金组分的梯度分布，实现高密度、大尺寸梯度材料的制备。

(2)提高生产的数字化程度。使用计算机辅助设计和计算机辅助工程等工具进行模具设计和仿真，有助于优化模具结构，提高产品质量，并减少生产过程中的试错成本。同时，部署传感器和实时监控系统，实时监测生产过程中的关键参数(如温度、压力、浇注速度等)，实现对生产过程的精细控制，提高产品一致性和质量。

(3)推进计算机数值模拟技术的应用。数值模拟在立式离心铸造中的应用已经取得显著的进展。通过数值模拟，可以更好地理解和优化离心铸造过程，提高产品质量，降低生产成本。未来，数值模拟可以向多物理场模拟的集成、高性能计算的应用、材料微观结构数值模拟和智能化数值模拟等方向继续发展。

(4)推动绿色发展制造。可以选择可再生造型材料和环境影响性较低的合金，减少生产过程中产生的废弃物，并优化废弃物的回收和再利用过程，以减少对环境的负面影响。

参考文献：

[1] 张伯明. 离心铸造[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[2] 唐萌政. 离心铸造概述[J]. 铸造机械，1974(1): 84-94.
TANG M Z. Overview of centrifugal casting[J]. Foundry Machinery, 1974(1): 84-94.

[3] 李锡年. 异型铸件立式离心铸造的工艺技术和应用[J]. 特种铸造及有色合金，2000(5): 30-32.
LI X N. Technology and application of vertical centrifugal casting for special-shaped castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000(5): 30-32.

[4] 李锡年. 立式离心铸造技术及其应用[J]. 铸造技术，1999, 20(1): 10-13.
LI X N. Vertical centrifugal casting technology and its application

中国知网 https://www.cnki.net

[J]. Foundry Technology, 1999, 20(1): 10-13.

[5] 曾兴旺. 离心铸造充型过程数值模拟的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2004.
ZENG X W. Simulation to practical flowing process of centrifugal casting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

[6] 苏仕方. 铸造手册[M]. 北京：机械工业出版社，2023.

[7] 郭险峰. Ti-43Al-9V金属间化合物铸造性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007.
GUO X F. Research on the casting properties of Ti-43Al-9V intermetallic compounds[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[8] HUMPHREYS N J, MCBRIDE D, SHEVCHENKO D M, CROFT T N, WITHEY P, GREEN N R, CROSS M. Modelling and validation: Casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal casting processes[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37 (14-15): 7633-7643.

[9] WATANABE K, MIYAKAWA O, TAKADA Y, OKUNO O, OKABE T. Casting behavior of titanium alloys in a centrifugal casting machine[J]. Biomaterials, 2003, 24(10): 1737-1743.

[10] 郭景杰，盛文斌. Ti-6-4合金熔体离心铸造过程中流态分析[J]. 特种铸造及有色合金，2000(4): 13-16.
GUO J J, SHENG W B. Analysis of the flow status for Ti-6Al-4V alloy melt during the centrifugal casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000(4): 13-16.

[11] 盛文斌， 霍红亮. Ti-6Al-4V合金异形铸件离心力场下的充型与凝固[J]. 特种铸造及有色合金，2005, 25(7): 391-393 .
SHENG W B, HUO H L. Analysis of overflow critical value for TiAl base alloy melt during centrifugal casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2005, 25(7): 391-393.

[12] 苏彦庆，刘畅，毕维升，郭景杰，贾均. TiAl基合金杆形件铸造缺陷与铸造方法的关系[J]. 特种铸造及有色合金，2002(5): 11-12.
SU Y Q, LIU C, BI W S, GUO J J, JIA J. Relationship between casting defects and casting methods of TiAl-based alloy rods[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2002(5): 11-12.

[13] 盛文斌，郭景杰，苏彦庆，丁宏升，贾均. TiAl基合金排气阀金属型离心铸造过程内部缺陷分析[J]. 航空材料学报，2000, 20(2): 40-44.
SHENG W B, GUO J J, SU Y Q, DING H S, JIA J. Analysis on inner defects in TiAl based alloy exhaust valve during the centrifugal foundry process in permanent mold[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(2): 40-44.

[14] 苏彦庆，郭景杰，贾均，丁宏升，崔红保，柳松青. TiAl基合金涡轮熔模型壳离心精密铸造[J]. 稀有金属材料与工程，2002, 31(4): 295-298.
SU Y Q, GUO J J, JIA J, DING H S, CUI H B, LIU S Q. Centrifugal investment casting of a TiAl-Based turbine blade[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(4): 295-298.

[15] 盛文斌，郭景杰，苏彦庆，丁宏升，贾均. TiAl 基合金离心铸造过程中的层流临界值分析[J]. 航空材料学报，1999, 19(3): 1-6.
SHENG W B, GUO J J, SU Y Q, DING H S, JIA J. Analtsis of laminar flow critical value for TiAl based alloy during centrifugal casting process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1999, 19(3): 1-6.

[16] 周同金. Al-4.5%Cu合金离心铸造工艺实验研究及有限元分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.
ZHOU T J. Experimental investigation and finite element analysis on centrifugal casting of Al-4.5% Cu alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[17] 徐琴，王星，何石磊，张兰权. 立式离心铸造ZL205A铝合金薄壁铸件的凝固组织[J]. 材料研究与应用，2018, 12(3): 196-199, 209.
XU Q, WANG X, HE S L, ZHANG L Q. Solidified structure of ZL205A aluminum alloy thin-walled castings under vertical centrifugal casting process[J]. Materials Research and Application, 2018, 12(3): 196-199, 209.

[18] 时俊克，廖敦明，陈宇豪，陈涛，顾建华. 钛合金立式离心熔模铸造凝固缺陷数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2022, 42(11): 1360-1365.
SHI J K, LIAO D M, CHEN Y H, CHEN T, GU J H. Numerical simulation of solidification defects in titanium alloy by vertical centrifugal investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(11): 1360-1365.

[19] 徐荣华. 铝加热盘的立式离心铸造工艺[J]. 铸造，1995(6): 28-29.
XU R H. Vertical centrifugal casting process of aluminum heating plate[J]. Foundry, 1995(6): 28-29.

[20] 姜骏声，葛建中. 谈离心铸造[M]. 北京：机械工业出版社，1983.

[21] 梁作俭，许庆产，李俊涛，李世琼，张继，柳百成，仲增墉. γ-TiAl增压涡轮近净形铸造过程实验研究[J]. 稀有金属材料与工程，2002(5): 353-357.
LIANG Z J, XU Q C, LI J T, LI S Q, ZHANG J, LIU B C, ZHONG Z Y. Experimental research on the near net shape casting process of camma titanium aluminide turbochargers[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002 (5): 353-357.

[22] 王冀恒. 原位自生钛基复合材料的铸造、组织和性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2015.
WANG J H. Research on microstructure, meshanical properties and casting technology of in-situ titanium matrix composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[23] 张华，雷文理. 排气阀立式离心铸造模拟及工艺优化[J]. 热加工工艺，2015, 44(11): 98-101.
ZHANG H, LEI W L. Vertical centrifugal casting simulation of exhaust valve and its process optimization[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(11): 98-101.

[24] LIU L B, HU C H, ZHANG Y H, SONG C J, ZHAI Q J. Melt flow, solidification structures, and defects in 316 L steel strips produced by vertical centrifugal casting[J]. Advances in Manufacturing, 2023, 11(4): 636-646.

[25] NOUR A, SANIEE F. Effects of mold rotation speed and cast thickness on the microstructure and mechanical properties of AZ80 prepared by centrifugal casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 16(2): 1-15.

[26] 杨为勤. 离心铸型金属筒套截面中拉应力的计算方法[J]. 特种铸造及有色合金，2013, 33(9): 829-832.
YANG W Q. Calculation of drawing stress for cross section of metal sleeve in centrifugal casting mould[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(9): 829-832.

[27] 杨为勤. 离心机铸型预设温度的控制方法[J]. 铸造，2013, 62(10): 987-990.
YANG W Q. Control method of presetting temperature for casting

中国知网 https://www.cnki.net

mould of centrifugal machine[J]. Foundry, 2013, 62(10): 987-990.

[28] 杨大韬，杨为勤. 离心铸型金属筒套拉应力计算公式的误差修正[J]. 铸造，2016, 65(10): 1003-1006.
YANG D T, YANG W Q. Error revision of formula of pulling stress in metal barrel casing in centrifugal casting[J]. Foundry, 2016, 65(10): 1003-1006.

[29] 杨为勤. 大型立式离心机铸型定位与锁紧方式的优化设计[J]. 铸造，2013, 62(4): 305-308.
YANG W Q. Optimum design of mold location and locking mode for large vertical centrifugal machine [J]. Foundry, 2013, 62(4): 305-308.

[30] 杨为勤. 大型立式离心铸造铸型的系列化设计[J]. 特种铸造及有色合金，2013, 33(7): 608-611.
YANG W Q. Design of seriate large scale vertical centrifugal casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(7): 608-611.

[31] 许卫东，苏恒渤. 离心铸造涂料的特点与应用[A]. 第三届有色合金及特种铸造国际会议论文集[C]. 北京：中国铸造协会，2003. 4.
XU W D, SU H B. The characteristics and application of centrifugal casting coatings[A]. Proceedings of the 3rd international conference on nonferrous alloys and special castings[C]. Beijing: China Foundry Association, 2003. 4.

[32] 王念康，靳玉春，侯华，赵宇宏. 离心铸造涂料的研究与展望[J]. 热加工工艺，2014, 43(9): 9-11.
WANG N K, JIN Y C, HOU H, ZHAO Y H. Research and prospects on centrifugal casting paint[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(9): 9-11.

[33] 刘志明，张鸿俭，李巨文，张佳伟. 硅藻土及其在铸造绝热涂料中应用的研究[J]. 铸造，1999 (2): 11-16.
LIU Z M, ZHANG H J, LI J W, ZHANG J W. Investigation of diatomites and T heir applicat ion in insulating cast coatings[J]. Foundry, 1999 (2): 11-16.

[34] 冯永星，任巨良，陈瑞强，郜俊雪，崔向明. 离心铸造的涂料研究[J]. 现代铸铁，2018, 38(2): 56-58, 64.
FENG Y X, REN J L, CHEN R Q, GAO J X, CUI X M. Research on centrifugal casting coatings[J]. Modern Cast Iron, 2018, 38(2): 56-58, 64.

[35] 宋广. 离心铸造装置设计及充型凝固过程实验研究与数值模拟[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.
SONG G. Design of centrifugal casting apparatus, experimental investigation and numerical simulation of mold-filling and solidification process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[36] 李建平，刘秀玲. 大型离心铸造机的控制系统设计[J]. 中国铸造装备与技术，2008(5): 53-55.
LI J P, LIU X L. Design of control system of large centrifugal casting machine[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2008 (5): 53-55.

[37] 张军，高建华，段汉桥. 汽缸套立式离心铸造机试验研究[J]. 中国铸造装备与技术，1997(2): 25-26.
ZHANG J, GAO J H, DUAN H Q. Trial research of vertical centrifugal casting machine for producing cylinder sleeve [J]. China Foundry Machinery & Technology, 1997(2): 25-26.

[38] 焦建波. 浅谈立式离心机振动产生的原因及处理措施[J]. 中国铸造装备与技术，2015(3): 34-35.
JIAO J B. Talk shallowly causes and treatment measures of vertical centrifuge vibration[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2015(3): 34-35.

[39] 张泽磊，杨刚，杨屹. 离心铸造研究现状[J]. 铸造技术，2010, 31 (11): 1517-1521.
ZHANG Z L, YANG G, YANG Y. Development status of centrifugal casting[J]. Foundry Technology, 2010, 31(11): 1517-1521.

[40] 付学敏，罗纲，杜碧华，曹选平. 立式离心铸造的铅锡合金铸造机结构改进设计[J]. 铸造技术，2016, 37(2): 359-361.
FU X M, LUO G, DU B H, CAO X P. Improved design on structure of vertical centrifugal casting machine for Pb-Sn alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(2): 359-361.

[41] 徐达鸣，安蕴，李鑫. 离心力场下铸造充型行为数值模拟[J]. 机械工程学报，2003, 39(3): 146-150.
XU D M, AN Y, LI X. Numerical simulation of moldfilling behaviors under centrifugal forces [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 146-150.

[42] 孙逊，安阁英，苏仕方，王君卿. 铸件充型凝固过程数值模拟发展现状[J]. 铸造，2000(2): 84-89.
SUN X, AN G Y, SU S F, WANG J Q. Recent developments in numerical siumulation of mold filling and solidification processes of castings[J]. Foundry, 2000(2): 84-89.

[43] 张新平，于思荣，孟长生，何镇明. 离心加速条件下金属凝固过程及缩孔缺陷数值分析[J]. 铸造，2000(10): 785-788.
ZHANG X P, YU S R, MENG C S, HE Z M. Numerical analysis of metal solidification process and shrinkage cavity defects in the centrifugal accelerate Field[J]. Foundry, 2000(10): 785-788.

[44] 吴士平，郭景杰，贾均. TiAl基合金排气阀立式离心铸造充型及凝固过程数值模拟[J]. 金属学报，2004, 40(3): 326-330.
WU S P, GUO J J, JIA J. Numerical simulation of mold filling and solidification of Tial base alloy exhaust valve in vertical centrifugal casting process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(3): 326-330.

[45] 曾兴旺，陈立亮，刘瑞祥. 离心铸造数值模拟技术的研究与开发[J]. 铸造，2004, 53(4): 310-313.
ZENG X W, CHEN L L, LIU R X. Study of the numerical simulation of the centrifugal casting[J]. Foundry, 2004, 53(4): 310-313.

[46] 杨闯. 微熔模精铸过程微尺度成形及充型流动规律研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.
YANG C. Research on forming and filling flow law in microscale for micro precision casting process based on investment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[47] GMOHAMMAND Z S, KRIMI A, KHELLADI S, BEDEL M, MOHAMED E M. 3D numerical simulation and experimental validation of resin-bonded sand gravity casting: Filling, cooling, and solidification with SPH and ProCAST approaches[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47: 102329

[48] FENG S J, GAO H Y, GAO L, ZHANG L M, CHEN H X. Numerical modeling of interactions between a flow slide and buildings considering the destruction process [J]. Landslides, 2019, 16 (10): 1903-1919.

[49] 赵静雨，宋振亮，阎佩雯，牛晓峰，黄华贵. 基于SPH法立式离心铸造充型过程三维数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39 (12): 1341-1344.

中国知网 https://www.cnki.net

ZHAO J Y, SONG Z L, YAN P W, NIU X F, HUANG H G. Three dimensional numerical simulation of filling process of vertical centrifugal casting based on SPH method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(12): 1341-1344.

[50] MCMACKIN P M, ADAM J A, RILEY F P, HIRSA A H. Single-camera PTV within interfacially sheared drops in microgravity [J]. Experiments in Fluids, 2023, 64(9): 22-24.

[51] HAN Y K, PAN C, CHANG Z P, XU Y. A PTV-based feature-point matching algorithm for binocular stereo photogrammetry[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(12): 12-14.

[52] 肖艮,沈旭,殷亚军,李振涛,计效圆,周建新. 基于PTV的钛合金离心铸造物理模拟流速表征[J]. 特种铸造及有色合金,2020, 40(4): 404-408.
XIAO G, SHEN X, YIN Y J, LI Z T, JI X Y, ZHOU J X. Physical simulation flow velocity characterization of titanium alloy centrifugal casting based on PTV[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(4): 404-408.

[53] 寻梦华,骆合力,韩少丽,李尚平,张继. 卧式离心铸管充型过程中夹杂物运动规律数值模拟研究及应用[J]. 稀有金属材料与工程,2023, 52(7): 2559-2564.
XUN M H, LUO H L, HAN S L, LI S P, ZHANG J. Numerical simulation and application of inclusion movement in horizontal centrifugal casting pipe flling process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(7): 2559-2564.

[54] 郤喜望,肖艮,殷亚军,张美娟,南海,周建新. 立式离心铸造中夹杂物运动规律数值模拟研究与应用[J]. 铸造技术,2020, 41(12): 1165-1169.
QIE X W, XIAO G, YIN Y J, ZHANG M J, NAN H, ZHOU J X. Numerical simulation of inclusion movement in vertical centrifugal casting and its application[J]. Foundry Technology, 2020, 41(12): 1165-1169.

[55] 肖艮. 钛合金立式离心铸造过程夹杂物运动规律研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
XIAO G. Study on motion law of inclusions in vertical centrifugal casting of titanium alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[56] 符寒光,邢建东. 高速钢轧辊制造技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
FU H G, XING J D. Manufacturing technology of high speed steel roll[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

[57] 朱林林,刘金池,董金龙,王忠辉. 高铬铸铁/钢离心铸造复合工艺设计及研究[J]. 特钢技术,2020, 26(2): 1-5.
ZHU L L, LIU J C, DONG J L, WANG Z H. Process research on centrifugal compound casting process for high chromium cast iron/steel[J]. Special Steel Technology, 2020, 26(2): 1-5.

[58] 冯喜锋,邵黎军,周勤忠,奚国仙. 双金属复合轧辊的立式离心铸造技术研究[A]. 第十九届中国铸造协会年会论文集 [C]. 北京:中国铸造协会,2023: 100-104.
FENG X F, SHAO L J, ZHOU Q Z, XI G X. Research on vertical centrifugal casting technology of bimetal composite roll[A]. Proceedings of the 19th annual meeting of China Foundry Association [C]. Beijing: China Foundry Association, 2023: 100-104.

[59] 王小军, 张应龙. 双相不锈钢转鼓用管的离心铸造生产工艺[J]. 钢管,2015, 44(1): 46-50.
WANG X J, ZHANG Y L. Centrifugal-casting process for manufacturing dual phase stainless steel tube for drum-making[J]. Steel Pipe, 2015, 44(1): 46-50.

[60] 李文辉,龚俊,刘永平. 离心卸料离心机锥形转鼓筒体有限元分析与强度计算[J]. 机械制造,2012, 50(7): 18-20.
LI W H, GONG J, LIU Y P. Finite element analysis and strength calculation of conical drum of centrifugal discharge[J]. Machinery, 2012, 50(7): 18-20.

[61] 于宏斌,王小军,张应龙. 锥段转鼓的立式离心铸造工艺[J]. 钢管,2016, 45(6): 35-39.
YU H B, WANG X J, ZHANG Y L. Vertical centrifugal casting process for coned drum[J]. Steel Pipe, 2016, 45(6): 35-39.

[62] 江克, 周钦凯. 大口径厚壁变径管立式离心浇铸制造技术研究[J]. 石油化工设备技术,2016, 37(6): 54-57, 6-7.
JIANG K, ZHOU X K. Research on the manufacturing technology of reducing pipe with large diameter and thick wall in vertical centrifugal casting[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2016, 37(6): 54-57, 6-7.

[63] 杨达飞,谢帮灵,杨为勤. 大型厚壁护套的离心铸造工艺及铸型强度校核[J].铸造,2016, 65(5): 459-462.
YANG D F, XIE B L, YANG W Q. Vertical centrifugal casting technology of large thick wall sheath and strength check over casting mould[J]. Foundry, 2016, 65(5): 459-462.

中国知网 https://www.cnki.net