• 工艺技术 Technology •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.009

精密组芯造型工艺的应用及展望

乐 豹[1,2],盛晓波[1,2]

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省先进金属材料高技术研究重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘 要:随着树脂自硬砂的发展,传统组芯造型工艺在大型、复杂铸件生产中得到大量应用。采用三乙胺冷芯盒法的自动化精密组芯造型生产线已成功应用于汽车零件铸造,如整铸式铸铝冷凝换热器,发动机缸体、缸盖等尺寸精度要求高、工艺复杂的中小铸件的批量生产。综述了三乙胺冷芯盒法的精密组芯造型工艺的发展及其应用,该工艺是砂型铸造实现绿色化、智能化生产的重要途径之一。进一步提高原材料和设备的国产化率,强化生产中的环保措施,无机粘结剂及相关设备的研制与工艺开发是今后发展的方向。

关键词:精密组芯造型;冷芯盒;三乙胺;铸造装备

中图分类号:TG242 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)03-0237-07

Application and Prospect of Precision Core Assembly Molding Technology

YUE Bao[1,2], SHENG Xiaobo[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Metallic Materials, Nanjing 211189, China)

Abstract: With the development of self-hardening resin sand, the traditional core molding process had been widely used in the production of large and complex castings. The automatic precision core molding production line using triethylamine cold core box method had been successfully applied to automobile parts casting, such as the whole casting aluminum condensing heat exchanger, engine cylinder block, cylinder head and other size accuracy requirements, complex process of small and medium-sized casting batch production. The development and application of the precision core molding process of triethylamine cold core box method was reviewed. This process was one of the important ways to realize green and intelligent production of sand mold casting. Further the rate of domestic production of raw materials and equipment is improved, the environmental protection measures in production is strengthened, the development of inorganic binder and related equipment and process development is the future development direction.

Key words: precision core assembly molding; cold box; triethylamine; casting equipment

铸造是熔炼金属,制造铸型(芯),并将熔融金属浇入铸型,凝固后获得具有一定形状、尺寸和性能金属零件毛坯的成形方法,是获得机械产品毛坯和零部件的主要方法之一,生产的产品称为铸件。铸件广泛应用于航空、航天、汽车、石化、冶金、电力、造船、纺织等支柱产业,对提高装备主机性能至关重要,是机械行业的基础制造工艺。

1 砂型铸造的地位

使用砂型生产铸件的方法称为砂型铸造。钢、铁和大多数非铁合金铸件都可用砂型铸造获得。由于砂型铸造所用的造型材料价廉易得,铸型制造简便,对铸件的单件生产、成批生产和大量生产均能适应,因此,长期以来一直是铸造生产中的最基本工艺。在世界范围内,现代铸造生产中应用砂型铸造生产的铸件占其总产量的80%以上,是铸造行业应用最多的工艺。

目前,我国铸造企业数量为2万余家,其中采用砂型铸造的企业数量约1.8万家,占比达80%以上。随着铸造技术的不断发展,砂型铸造在材料、工艺、装备方面也在不断发展进步,预计未来10~20年内,砂型铸造仍为我国最主要的铸件生产方式。

砂型铸造离不开相应的专用装备,我国砂型铸

收稿日期:2020-02-13

作者简介:乐 豹(1997-),江苏溧阳人,硕士生.研究方向:精密铸造方面的研究.电话:15850502532,
E-mail: 1640960830@qq.com

通讯作者:盛晓波(1962-),安徽枞阳人,博士,副教授.主要从事铸造工艺、造型材料方面的研究.电话:13951601210,
E-mail: shengxiaobo@seu.edu.cn

造装备(造型、制芯)行业市场规模2018年约50亿元(不含熔炼/砂处理/清理等),企业数量100余家。随着工艺技术的升级发展,预计到2035年,砂型铸造装备(造型、制芯)行业市场规模将达到100亿元,经过优胜劣汰,企业数量将减少至50家左右。

传统砂型铸造主要采用粘土砂造型,这种方法铸造合金的种类、铸件的大小和重量不受限制,它的生产机动性大,生产准备时间短,受产品类型变更的影响小,可广泛适应机械化大批量生产、单件小批量生产、新产品试制等不同的生产纲领。它的缺点是铸件尺寸精度低及表面粗糙度高,形成气孔和缩松倾向较大,内部质量差,采用手工生产时效率低,劳动强度大,对环境的影响也大。

随着对铸件尺寸精度、表面质量要求的提高,新型的砂型铸造工艺得到开发和应用。一方面是采用新型生产设备和工艺,如应用气冲、高压、射压和挤压造型等高度机械化、自动化的生产设备,制造高密度湿砂型生产中小型铸铁件,这些工艺可提高铸型强度、刚度、硬度和精度,减少金属液浇注和凝固时型壁的移动,提高铸件工艺出品率,降低金属消耗,减少缺陷和废品。另一方面是采用化学粘结剂,应用树脂自硬砂造型、制芯工艺生产铸件,这类铸型具有高强度、高精度、高溃散性和低造型、制芯劳动强度的特点,可明显提高铸件的内、外质量。然而,现有技术也还存在明显的不足,气冲、高压、射压和挤压造型等设备体积庞大,其占地面积、能源消耗、生产噪声都大,而树脂自硬砂更适合单件、小批量中大型铸件的生产。

消失模铸造技术的发展,砂型增材制造等技术的兴起,在某些领域有替代传统砂型铸造的潜力,但砂型铸造仍是未来相当长时期内最主要的铸件生产方式。此外,砂型铸造生产的装备与工艺也在顺应时代的发展,处于不断改革和创新过程中。一方面,改进和提高现有砂型铸造装备的性能,提高控制系统的功能和辅机配套水平,提高砂处理系统的技术水平和处理能力,开发先进、高效、低耗、实用、且具有自主知识产权的砂型铸造装备产品。另一方面,挖掘、发展新型铸造工艺并推广应用,形成新的增长点,如近年来采用冷芯盒技术发展起来的"精密组芯造型技术",就是现有工艺拓展的典型之一。该工艺具有粘土砂型机械化生产、树脂自硬砂生产所不具备的优势,可以批量生产壁厚仅有2.5 mm的发动机缸体、缸盖、排气歧管等复杂铸件,可应用于不同的合金,是对传统砂型铸造方法的革新,为不同合金高精度复杂铸件的生产创出了一条新路,未来将有望成为砂型铸造发展的一个重要方向。

2 精密组芯造型工艺发展概况

2.1 组芯造型工艺

铸造技术经过了漫长的发展岁月,目前实际应用的工艺种类繁多,可按不同的特点进行分类。若按铸造的生产方法分类,可分为砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造又可以根据所用粘结剂的不同,分为粘土砂型、水玻璃砂型、树脂砂型和负压硬化造型(V法、消失模)。

在砂型铸造中,用砂型来形成铸件的外轮廓形状和尺寸,用砂芯来形成铸件的内腔形状和尺寸。铸件的形状和尺寸由砂型/砂芯组成的型腔来形成,砂型/砂芯的质量极大影响铸件的质量。为了提高砂型/砂芯制造的质量和速度,特别是使各种形状的模样能够从砂型中顺利地起出,砂型铸造生产中发展了多种造型方法,有砂箱造型、脱箱造型、地坑造型、叠箱造型、劈箱造型、组芯造型等。在实际生产中,即使同一个铸件,也可采用不同的造型方法生产,这要根据铸件的结构特点、尺寸大小、生产批量及企业的生产条件等选定。

在小批量生产外形复杂,内腔形状和尺寸要求也高的铸件时,从生产的便利性和成本考虑,其内外部形状可以全部采用砂芯的组合来形成,这种全部用砂芯来成形的方法称为组芯造型。应用组芯造型工艺生产铸件,铸型使用与砂芯相同的造型材料,这种工艺在我国古代的铸造生产中就得到大量的应用。用砂芯组成的铸型生产小型铸件时,装配后可用夹具来紧固。对于较大的铸件,为了使其能承受较大的合金液压力,组芯常在通用砂箱或特制的金属框架内装配及紧固,装配后需在箱壁与砂芯的空隙间用型砂填实。对大型铸件的组芯造型,组芯工作常在地坑内进行,装配紧固后就地浇注,目前,随着树脂自硬砂的推广应用,大量大型和特大型铸件的生产中都采用了组芯造型工艺[1-7]。

由于组芯造型操作比较烦锁,生产效率低,通常认为其不适合大批量生产。但随着现代造型、制芯方法的进步,这种观念正在发生转变。

2.2 冷芯盒法组芯造型的发展与应用

CO_2气硬水玻璃砂工艺是较早的气体硬化化学粘结剂砂造型、制芯工艺,至今仍在铸造生产中广泛应用,也是目前能满足大气环保排放要求的造型、制芯工艺方法之一。但CO_2硬化水玻璃砂存在溃散性

差、旧砂回用困难等问题，使它的应用范围受到一定限制[8]。

随着化学工业的发展，自1960年以来，各种树脂砂工艺不断涌现，满足了铸造生产优质、高效、节能的要求。其共同特点是，硬化速度快、制芯效率高、芯砂可使用时间长、砂芯尺寸精度高及节约能源等，且适合大批量复杂砂芯的生产[9,10]。

树脂砂固化时需要加热的工艺称为热芯盒法，它是用专用设备把配制好的热芯盒树脂砂射入预热至180～260 ℃左右的芯盒里使树脂受热硬化，经几分钟后，就可获得强度足够的树脂砂芯。随后将砂芯取出，砂芯内部这时还处于塑性状态，利用它本身的余热和树脂在固化反应时放出的热量，使砂芯进一步硬化。

树脂砂固化时不需要加热，而是用气体或气雾催化剂（或固化剂）在室温下催化树脂砂瞬时固化的工艺方法称为冷芯盒法。由于它在常温下固化，无需外界加热，芯砂在芯盒内成形并自行硬化，故它除了具有壳型、热芯盒射芯等工艺的优点之外，还可采用铝合金，塑料芯盒或木质芯盒等，自发明应用以来得到快速发展。按气体或气雾催化剂（或固化剂）的不同，可将冷芯盒法分为三乙胺法、SO_2法、CO_2法和β-set法[9]。

在冷芯盒法工艺中，三乙胺法是20世纪60年代末，美国Ashland化学公司的L. J. Toriello等，根据Bayer在1947年发现的含有活性氢的物质与异氰酸脂通过聚合形成高分子化合物这一反应开发的工艺。由于对该工艺研究开发较早，因而在工艺的成熟性与设备配套的完善性上占有明显优势，更易推广应用。此外，该工艺对生产设备及工装的腐蚀较轻，催化剂散发的刺激性气味也较小。在工业发达国家中，该工艺约占全部冷芯盒法制芯的90%[9]。

我国引进ASHLAND公司冷芯盒树脂生产专利在20世纪80年代中期，到20世纪80年代末90年代初期，国内大概有20家左右大型企业的铸造厂开始应用冷芯盒单机制芯工艺，但冷芯盒工艺的应用发展缓慢。一直到了20世纪90年代末，经过多年对冷芯盒工艺的消化、吸收、应用，以及国产冷芯盒树脂性能的提高，冷芯盒制芯工艺在国内进入成熟期，广泛得到铸造界同仁的认可和喜欢；另外一个重要原因是，在引进国外先进的冷芯盒射芯机设计及制造技术的基础上，我国铸造装备生产企业自主开发了适合国内铸造企业、性价比较高的各种国产现代化冷芯盒射芯机，冷芯盒制芯工艺在中国得到了蓬勃发展，成为主流的制芯工艺，并在组芯造型生产中得到应用。

采用冷芯盒组芯造型的生产工艺较为灵活多样，可以选择单机生产或者组线生产方式，也可以选择小批量生产，还可以选择大批量生产，可以采用多种分型方式，其设备也仅需要较小的使用场地。相对于目前常用的砂型铸造机器造型工艺，冷芯盒组芯造型工艺不需要复杂的建筑基础要求，生产效率高，每台射芯机每小时可以制造超过50型的砂型或砂芯，另外还有用砂量少、能耗低、设备维护成本低等特点。

经过多年的技术研发与积淀，以三乙胺冷芯盒组芯造型工艺开发为代表，我国冷芯盒组芯造型的生产工艺得到了长足发展，相关铸件产品已成功销往欧美国家等国际市场。冷芯盒组芯造型生产系统由单一制芯机发展到制芯中心，再通过与机器人等智能生产设备集成形成冷芯盒精密组芯造型自动化生产线（图1），大幅提高了组芯造型生产的效率和精度。生产实践进一步表明，与传统工艺相比，采用冷芯盒的新型精密组芯造型生产线体现出布线简便多样、浇注工艺灵活、铸件尺寸精度高、生产效率高、旧砂再生可达95%、经济环保等优势，是一种具有广泛发展空间、可提升铸件质量且绿色环保的铸造技术[11-13]。



图1 某企业冷芯盒精密组芯造型自动化生产线

Fig.1 Automatic production line of cold box precision core assembly molding in an enterprise

3 精密组芯造型工艺的应用

3.1 工艺特点

冷芯盒精密组芯造型工艺是采用三乙胺冷芯盒制芯工艺，精确制造出铸件的外模砂型和内腔砂芯，然后进行精确组芯、合型，由多块冷芯盒砂芯精确组装而成铸型。该工艺可适用于高精密、高品质、近净形中小尺寸铸件的大批量生产，如汽车发动机缸体缸盖、变速箱壳体、进排气管、底盘件、工程机械液压件、火车制动阀体、空调压缩机机体、燃气锅炉热交换器等。在铸件材质方面，冷芯盒组芯造型工艺可生产铸钢件、球墨铸铁件、合金灰铸铁件、铝铸件、镁铸

件等。由于采用该工艺生产的铸件具有较高的尺寸精度，故特称为冷芯盒精密组芯造型工艺。

3.2 冷凝式热交换器生产中的应用

热交换器属于间壁式换热器，它是两种冷热流体介质通过“壁”进行热量交换而又互不相混的结构。普通的燃气热水器由于排烟温度较高，无法利用水蒸气中的潜热，同时较高的排烟温度又带走了显热，降低了热效率，冷凝式燃气热水器通过进一步降低排烟温度，使烟气中的水蒸气冷凝，充分利用了烟气中几乎全部显热和部分水蒸气潜热，节能效果明显[14]。

采用冷凝式热交换器的壁挂炉具有较高的热效率，能节约大量能源，同时排出的烟气对环境污染低，在国外得到了大量的研发和应用，欧美在 20 世纪 70 年代初就已经开始使用。上述这些优点，近年来也逐渐被国人认识，受到越来越多的关注。随着人民生活水平的提高，可用于供应热水、居家取暖的壁挂炉巨大的国内市场将逐步释放[15]。2010 年以来，全球壁挂炉行业市场规模年均增长率达到 15%，2018 年市场规模达到 300 亿，产量约为 300 万台。随着工艺提升及环保重视程度的提高，冷凝式壁挂炉应用将更加广泛，市场规模将保持 8%~10%的持续增长。预计到 2035 年，全球市场规模将达到 700 亿，产量达到 550 万台[16]。

冷凝式热交换器是冷凝式燃气壁挂炉的核心部件，对强化热交换器传热，提高传热效率，提高热水器的能效具有至关重要的作用。早期用于燃气热水器热交换器的材料是铜合金，其优良的导热性能、易成形加工性能，一度在热交换器中受到亲睐。但由于其耐腐蚀性能较差，被具有良好耐腐蚀性能的不锈钢代替。但在应用中发现，不锈钢的加工性能和导热性能都不及铝合金，因此，又逐渐被具有性价比高、回收性好、重量轻、能效优等特性的铝合金制冷凝热交换器所取代。铝的导热系数是不锈钢的 8 倍以上，故铸铝热交换器比传统的不锈钢热交换器效果更好[15, 17, 18]。

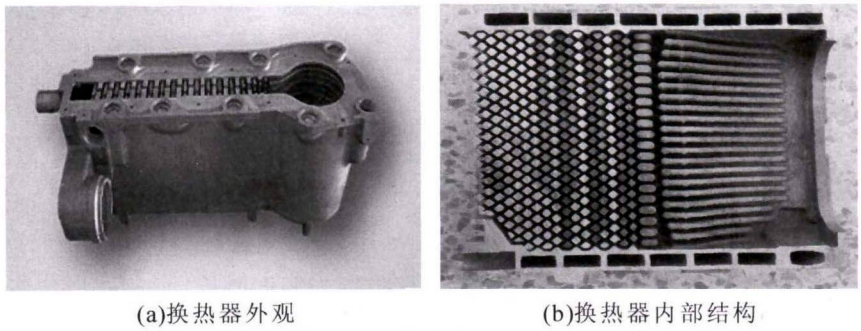
采用铸造工艺生产的铸铝热交换器为整体式结构，采用全水冷设计，水道环绕燃烧室布置。在使用中，水流自下而上沿水道蜿蜒上行，高温烟气自上而下流动，逆向运行以保证充分的热交换。在此过程中，烟气温度逐渐下降，烟气中的水蒸气达到露点温度以下而凝结成液态水，同时带走燃烧产物中的部分 CO 和 NO 等有害物质，从而真正达到高效、节能、环保的目的。为实现上述目标，在换热器的烟气通道表面规则分布着大量的导热柱，水道内表面设有筋条(图 2)，一方面可有效增加换热面积，另一方面，通过对烟气和水流的扰动强化对流传热，优化换热效果，这样可缩小产品的体积，节省安装空间。

采用普通砂型铸造生产这种整体式铸铝热交换器，成品率较低。随着壁挂炉市场的扩大，其生产与需求的矛盾日益凸显。改用冷芯盒精密组芯造型工艺生产，克服了普通砂型铸造人工组芯、装配产生的误差，显著提高了产品的精度，明显降低了普通砂型铸造易产生的渗漏问题，大幅提高了铸件的生产效率和质量。

3.3 汽车发动机缸体、缸盖生产中的应用

汽车发动机缸体是一种非常典型的薄壁复杂铸件，缸体中遍布着油孔、出砂孔和多种安装孔，对气缸体的铸造工艺有很高的要求。传统的湿型砂铸造工艺受到了很多限制，已不能满足气缸体铸件的要求。目前，国内大多数铸造企业生产缸体时采用底注/阶梯式卧浇和立浇工艺；外模采用湿型砂静压线、派普(Pepset)树脂砂和呋喃树脂砂造型；砂芯采用呋喃树脂砂冷芯盒或覆膜砂热芯盒工艺，下芯多采用手工方式，生产中存在尺寸超差、夹渣、浇不足等缺陷[13, 19]。

某企业生产的铝合金 V6 发动机，其气缸采用 90°V6 排列，左右缸水套为开放式，水套上下都有环状的油道，前端有水泵水道和长油道，顶面有水腔和回油道，缸套为后压入式。分析铸件结构，由于其顶面和周边存在着许多油道和水道，如果采用金属型重力和低压铸造，必须大量采用吊芯、粘芯等方式，



(a)换热器外观　(b)换热器内部结构

图 2 整铸式铸铝换热器外观和内部结构

Fig.2 Appearance and internal structure of integral cast aluminum heat exchanger

尺寸精度不能保证，也不利于批量化生产。如果采用高压压铸，不光在上述成型问题上基本上不能实现，压铸件也不能满足 T6 热处理的要求。改用精密组芯造型工艺制造铸型，并结合低压浇注工艺方案，生产的铸件不仅外观饱满、内部组织致密、无缩孔缩松缺陷、力学性能良好，而且满足了自动化大批量生产的要求，工艺出品率在 80%以上，一次成品率在 95%以上[20,21]。

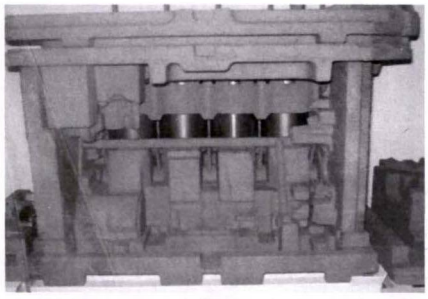


图 3 三乙胺冷芯盒法组芯造型发动机缸体型芯部分组装
Fig.3 A cores package of engine cylinder block by triethylamine cold box core assembly molding

图 3 是用三乙胺冷芯盒法组芯造型工艺制造一种四缸发动机缸体时组装后的型芯部分，与普通砂型工艺不同，精密组芯造型工艺是在型芯组装完成后，再组装外型砂芯，更易保证铸件尺寸精度。冷芯盒精密组芯造型工艺可以高质量生产发动机缸体和缸盖等复杂结构件，缸体和缸盖尺寸精确度可以达到 CT7-8 级以上。冷芯盒精密组芯造型生产出的复杂结构铸件表面粗糙度低，可满足国内外市场对发动机缸体、缸盖等核心高精薄壁铸件的需求。

3.4 应用于其它高端铸件

某企业给外企生产的大型机床工作台，外轮廓尺寸 7 400 mm×3 500 mm×485 mm，底面为平面，壁厚 80 mm，并开设多条 T 型槽。上表面被多条导轨分成高度不等的平面，平面上分布着 8 排尺寸不同的毛坯孔。内腔被加强筋分成多个小腔，相互间有孔相连，铸件毛重 36 t，浇注重 40 t，材质为 HT300。由于外廓尺寸大，内腔芯子多，浇注时抬箱力大，铸造困难。用户对产品质量要求高，导轨面不允许产生气孔、夹渣缺陷，非加工面不允许有明显的铸造缺陷。分析铸件特点，在生产中采用地坑组芯造型生产了 4 件产品，均一次浇注成功。铸件清理后外观质量、尺寸精度、性能完全达到客户要求，并一次验收通过[6]。

空气压缩机壳体是压缩机的核心部件，是典型的复杂结构件，其制造方式、经济性和加工质量直接决定企业的市场竞争力。传统铸造方式采用外模实样和砂芯形成铸件型腔，起模及下芯需要多个分型面，导致外模模型支离破碎，且壁厚尺寸在配箱过程中无法测量和无法调整控制，存在的主要质量问题有尺寸波动大、废品率高、高压腔渗漏泄压、流道粘砂多肉不平滑等。采用冷芯盒精密组芯造型工艺，在组合配箱过程中可测量并可调整下芯位置精度，有效解决了上述问题，获得表面光滑、尺寸准确的优质铸件[22]。

4 精密组芯造型工艺铸造装备的发展

早期的组芯造型应用泥型(芯)用于工艺品的制作，注重铸件的表面质量，如精致的表面文字与雕饰图案，但其产量很小。近现代工业生产中，应用多种造型材料，如烘干粘土砂芯、水玻璃砂芯、树脂砂芯组芯造型生产铸件，解决了一些复杂铸件的生产难题，但也存在普遍为手工操作，产量低，铸件尺寸偏差大的不足。

随着铸造原辅材料的发展，采用树脂砂组芯工艺可以生产尺寸精度更高的铸件，组芯造型工艺在行业中得到重新认识。与其它工艺相比，冷芯盒技术具有砂芯尺寸精度高，劳动生产率高的优点，是继 20 世纪 40 年代的壳型工艺，20 世纪 50 年代的 CO_2 自硬化工艺，20 世纪 60 年代的热芯盒工艺之后在铸造技术上的又一次突破，又一次飞跃。冷芯盒技术满足了用户对铸件质量日益提高的苛刻要求，同时又满足了铸件生产企业低成本的要求，在国内外铸造行业普遍受到欢迎，特别是大批大量生产的汽车、拖拉机、内燃机行业。

进入新世纪，随着对大型柴油机机体、机床床身、汽车桥壳、工程机械及矿山机械底盘等大型铸件的砂芯质量及铸件质量要求的提高，以及大批量生产的需求，对制芯工艺也提出了更高的要求。国内企业在三乙胺冷芯盒制芯工艺方面进行了大量的研究、开发工作，大大促进了冷芯盒工艺在国内的发展。冷芯盒制芯设备从最初普遍使用 10～65 L 小型射芯机，完成小型铸件类和辅助类砂芯的制作，到 100～200 L 中型射芯机，用于上下外模、缸体缸筒砂芯等中型砂芯的生产，还建成自动化生产线[23]。

射芯机是采用冷芯盒精密组芯工艺的核心装备，随着冷芯盒制芯工艺技术以及制芯用粘结剂材料的发展，冷芯盒将得到更广泛的应用，对射芯机的市场需求也将持续旺盛。据统计，2010 年以来，全球射芯机行业市场规模年均增长率达到 10%，2018 年市场规模达到 20 亿元，产量约 2 000 台。同期，我国射芯机行业市场规模年均增长率达到 15%，2018 年市场规模达到 10 亿元，产量约为 1 200 台。随着工

艺技术改革以及环保监管趋严，落后的、重污染的生产工艺将被淘汰，手工制芯将逐渐被机器制芯取代，冷芯盒工艺、无机工艺及精密组芯造型工艺将得到快速推广。预计到2035年，全球射芯机市场规模将达到70亿元，产量达到3 500台，我国射芯机的市场规模将达到40亿元，产量达到2 500台。

射芯机结构复杂、体积较大、系统集成度高、制作周期长，属于技术含量最高的铸造装备之一，行业集中度较高，具备规模化生产能力的企业较少。全球范围内，规模较大的制芯装备制造企业主要包括德国兰佩、西班牙Loramendi、苏州明志科技，3家企业合计占有全球高端射芯机的主要市场份额，是制芯装备的领军企业。其中，苏州明志科技凭借持续的技术创新，已发展为国内制芯装备企业的佼佼者。

5 冷芯盒精密组芯造型工艺发展展望

以射砂成型并在芯盒中硬化的制芯工艺发展起来的制芯工艺，能制造表面光洁、尺寸精确的砂芯，可得到光洁度高、尺寸精度高的铸件。三乙胺冷芯盒精密组芯造型工艺的型砂和芯砂采用相同的材料和工艺，因此设备总台套数减少，砂处理工艺得到简化，能提高生产效率，降低成本，改善劳动条件，尤其适用于具有一定批量且铸件内腔复杂的铸件生产。该技术能组建机器人自动化生产线，集成信息化系统，提升智能控制水平，最终实现智能化的铸造生产，具有良好的发展前景。冷芯盒精密组芯造型工艺的发展，还需解决以下问题。

(1)提高原材料和设备的国产化率。我国目前在非汽车行业的制芯生产中采用较多的仍是热芯盒法，冷芯盒所占制芯总量的比重还很小(不到10%)，而发达国家达到60%以上。因此，在我国继续发展和推广冷芯盒制芯工艺具有重要意义。要立足国内资源，进一步提高国内相关树脂材料的生产技术水平，结合国内生产需要，增加对国内龙头企业的宣传推介力度，进一步丰富冷芯盒制芯相关设备的产品系列，发展冷芯盒工艺并扩大其应用范围。

(2)进一步加大环保技术的研发与应用。冷芯盒与其它树脂砂一样，虽然有很多优点，但不可置疑的是也给环境带来了有害气体。推行清洁生产，开发新型工艺，严格设备和操作管理，应在降低三乙胺气体的泄漏，减少残留的同时，强化对三乙胺气体的回收。逐步降低现有工艺材料中有毒成分含量，开发新型无毒、无公害、绿色高效制芯材料及工艺装备。

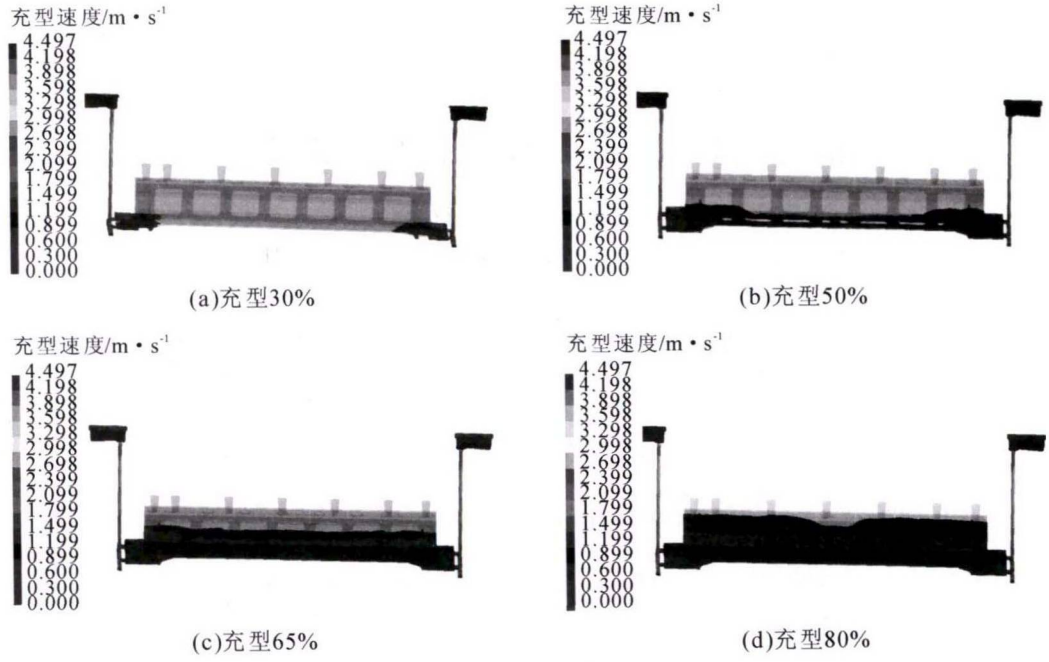
(3)加快冷芯盒用无机粘结剂及相关设备和工艺的研发。采用无机粘结剂代替树脂粘结剂，生产过程中无毒、无味，劳动条件好，工作环境得到很大改善，还能消除由粘结材料引起的如皮下气孔、增碳、增硫及球铁球化不良等铸造缺陷，提高铸件品质。但目前，采用无机粘结剂还存在砂芯强度低，存放性能差，浇注后溃散性不理想等不足，以及相关生产设备，如旧砂再生设备不配套等问题。应加快相关方面的研发工作，早日实现冷芯盒用无机粘结剂的大量推广和应用，改善工人工作环境，降低环境保护负担。国内已有企业开展无机粘结剂及相关冷芯盒射芯设备的研发，随着环境保护力度的逐渐加大，铸造企业对高质量装备的需求也增加，相关冷芯盒材料和装备的市场空间也将进一步增加。

(4)采用精密组芯造型工艺是砂型铸造生产实现绿色化、智能化生产的重要途径之一。精密组芯造型智能生产线设备占地面积小，生产灵活，型、芯用同一种砂，砂处理工艺简单，具有显著的经济、社会效益，有较强的示范作用，目前已被重庆机电、南京马自达、天津新伟祥等国内知名企业选择使用。

参考文献：

[1] 熊六一，胡美华，孔祥翔，等. 温硬化组芯工艺生产铁路缓冲器箱体的方法[J]. 铸造技术，2019，40(9): 957-960.
[2] 陈敏，林金忠，林昌，等. 大型水阀铸造工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金，2018，38(5): 508-510.
[3] 李伟华，陈成，黄美静. 特大型后艇轴架的铸造工艺设计[J]. 铸造，2018，67(2): 171-174.
[4] 汤彦，徐雷，魏来，等. 大型鼓风机机壳的稳定生产[J]. 铸造技术，2019，40(7): 691-695.
[5] 杨家财，李屹，郑赐荣. 减速器箱体砂型铸造工艺设计及其模拟[J]. 热加工工艺，2017，46(11): 90-92.
[6] 刘树谭，刘平，马吉芳，等. 采用地坑组芯造型生产大型机床工作台[J]. 中国铸造装备与技术，2002，37(2): 47-48.
[7] 郭春和. 采取组芯造型生产大型机床床身的实践 [J]. 铸造设备研究，2001(4): 46-47.
[8] 吉祖明. 我国冷芯盒制芯(型)技术的现状及其发展前景[J]. 柴油机设计与制造，1999(4): 40-43.
[9] 戴斌煌. 冷芯盒法的现状与展望[J]. 铸造，2002，51(5): 273-276.
[10] 齐亚平，李克强，韩志流. 三乙胺冷芯盒制芯工艺的应用与探索[J]. 中国铸造装备与技术，2006，41(3): 66-68.
[11] 杜在均，邱壑. 冷芯盒精密组芯造型工艺灵活生产高品质铸件及节能减排效应 // 重庆市机械工程学会铸造分会、重庆铸造行业协会. 2010重庆铸造年会论文集[C]. 重庆：重庆市机械工程学会铸造分会，2010: 291-294.
[12] 杜在均，邱壑. 节能减排的冷芯盒组芯造型线技术[J]. 铸造设备研究，2008(4): 1-3, 44.
[13] 阎顺祥，谢正茂，温攀勇，等. 冷芯盒组芯造型缸体铸造工艺实践[J]. 铸造技术，2018，39(1): 70-72.
[14] 黄丹君. 全预混燃烧及冷凝换热技术在锅炉上的研究与应用[J]. 上海节能，2018(3): 185-187.

(下转第251页)



(a)充型30%　(b)充型50%

(c)充型65%　(d)充型80%

图 6 充型速度场优化方案

Fig.6 Optimization scheme of filling velocity field



图 7 优化方案铸件缺陷分布

Fig.7 Optimization scheme of casting defect distribution

铸造工艺设计提供技术参考。

致谢：感谢“永冠杯”第十届中国大学生铸造工艺设计大赛组委会提供铸件图纸。

参考文献：

[1] 王猛. HLH-2040 激光切割机结构分析与优化设计 [D]. 南京：东南大学, 2015.

[2] 金俊尉. 横梁倒挂式激光切割机的结构优化设计[D]. 南京：南京航空航天大学, 2015.

[3] 李远才，董选普. 铸造造型材料实用手册[M]. 北京：机械工业出版社，2015.

[4] 李有佳. 铝合金铸造工艺及缺陷研究[D]. 武汉：华中科技大学，2009.

[5] 单忠德. 无模铸造[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[6] 刘丽敏，单忠德，兰盾，等. 基于无模铸造精密成形技术砂型坎合组装方式研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(2):354-359.

[7] 李晨希. 铸造工艺及工装设计[M]. 北京：化学工业出版社，2014.

[8] 赵成志，张贺新. 铸造工艺设计与实践[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

(上接第 242 页)

[15] 付晋津. 欧洲冷凝式燃气采暖热水炉的典型结构和特点 [J]. 煤气与热力，2016，36(5): A23-A26.

[16] 朱禹韬. 2019 年小型商用壁挂炉市场稳步发展 [J]. 现代家电，2019(20): 56-57.

[17] 邢凡，楼英. 浅谈铸铝式冷凝锅炉换热器[J]. 中国建设信息供热制冷，2010(4): 44-45.

[18] 胡刚，徐蔚春. 铸铝冷凝换热器在燃气热水器的应用 // 中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会，2012 年年会论文集 [C]. 昆明，中国土木工程学会，2013: 207-212.

[19] 赵小军，黄渊. 冷芯组芯造型下 QSNT 缸体渗漏缺陷成因研究 [J]. 铸造技术，2018，39(5): 1004-1007.

[20] 王冬，周军，张兵，等. 重庆机电集团发动机铸铁缸体缸盖冷芯盒精密组芯造型线 [J]. 机械工业标准化与质量，2016(10): 31-35.

[21] 刘永跃，施良才，郑敏. V6 发动机 Al 合金缸体组芯低压铸造[J]. 现代铸铁，2010(2): 44-47.

[22] 王丽君. 大型离心式空压机机壳铸造组芯造型技术 [J]. 机械制造技术，2013，40(增): 67-69.

[23] 林志庆，杜在均，顾海兵，等. 国内最大射砂量冷芯盒射芯机的开发 // 重庆市机械工程学会铸造分会、重庆铸造行业协会. 2013(第 23 届)重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆，重庆市机械工程学会铸造分会，2013: 326-329.