

# 熔模精密铸造的研究与发展

第一汽车集团公司精密铸造厂 蒋书彬

**【摘要】**对国内外熔模铸造的现状与发展趋势做了较全面论述,对我国精铸业的发展提出了建议。

**【Abstract】** The current status and developing trend of investment casting technologies both at home and abroad are described in detail and some suggestions for developing the precise casting industry in our country are put forward in this paper.

**叙词:**熔模铸造 研究 发展

**Related terms :** Investment casting Research Development

## 1 前言

近年来,国内外熔模铸造发展迅速,技术会议较多,其内容多是围绕着提高熔模铸件质量、缩短生产周期、降低成本。在制模、制壳、高温合金及复合材料、定向凝固、检测技术等方面均有了大幅度提高,应用计算机CAD/CAM技术快速生产模型,铸件凝固模拟、缺陷分析均已达到了实用阶段。

熔模精铸业为提高质量、降低价格,研究出许多新技术,如能降低价格的快速制壳法;降低成本、提高铸件质量、提高尺寸精度的SOP法;降低成本的CLA/CLV/CADIC法;降低大型精铸件成本的CS法及扩大应用范围提高铸件质量的DS法等。这些新技术已广泛应用于国内外精铸行业。

## 2 国内外精密铸造近况及发展动态

### 2.1 国外精铸技术的发展概况

#### 2.1.1 市场情况

1990年后受全球经济衰退的影响,精铸业不断缩小。1993年精铸业市场(不包括前苏联、中国和东欧)为34.2亿美元,其中北美为19.7亿美元、欧洲为8.5亿美元、亚洲5.5亿美元,其他0.5亿美元。北美市场中美国占95%、加拿大占3%、墨西哥占2%。欧洲市场中英国占40%、法国占20%、德国占19%,其他占21%。在亚洲市场中日本占60%、中国台湾占28%、韩国占7%,其他占5%。

#### 2.1.2 市场结构变化与分析

越来越多的证据表明,为适应多变的市场,精铸行业正处于重大结构调整时期。多年来,军事产品的主要市场美、英、欧洲的精铸业销售额50%~70%为航空和军工产品。以美国为例,军事曾使精铸业获得大量的发展资金,但是美国防部的预算表明,军事产品大幅度下降。

#### 2.1.3 工业与民用主要市场分析

a. 民用航空业 民航受到全球经济萧条影响已进入到第四个不景气年头,但库存部件已所剩无几,在以后的几年中这类零部件购买量可能上升。另外,除1991年外全世界飞机的总量仍呈上升趋势,因此民航仍是有希望的市场。

b. 工业空气涡轮发动机 工业空气涡轮发动机发展很快,每年将以5%~7%速度增长,是具有巨大潜力的市场。

c. 高尔夫球头 高尔夫球头产量最大的地区是中国台湾,美国球头产量也急剧上升,由1992年的5千万支到1993年的1.5亿支,其价格高于其他地区产品,达22美元/支,而其他地区则为12美元/支。这种市场和价格仍有增长势头。

d. 医疗卫生 预计精铸在这一领域将获得5%的年增长率。

e. 其他 潜艇构件、环保用具、通用机械、计算机、汽车行业等市场也增长较迅速。

总之,随着市场的变化,精铸业面临着调整产业结构、转向民用商业领域的一个重要

阶段。

#### 2.1.4 最新技术发展状况

精铸业产品已商品化、国际化。为提高产品竞争能力,近几年来各国在缩短生产周期、扩大产品领域、提高产品质量、降低成本、改善环境等方面技术发展较快。

a. 快速铸造 FAST CAST法的研究及应用。激光快速成型技术集中了现代数控技术、CAD/CAM技术、激光技术和新型材料科学成果,突破了传统的加工模式,在微机的控制下,用一特定的光束,几小时就可得到高精度的塑料模作为蜡模,或直接制造出陶瓷型壳(DSP法),从而大大简化了熔模铸造工序,缩短了生产周期。

用CT扫描病人需更换的骨骼,在快速成像系统上做出骨骼图形,制出塑料模,然后用熔模铸造制出金属植入件,前后只需5h。该技术也被用来生产工业零件。

以往的浇注方法有重力铸造法、翻转加压铸造法、吸抽铸造法、离心铸造法等。CLV法和CLA法是与上述诸方法完全不同的特殊浇注方法。在大气条件下熔化的称为CLA、在真空条件下熔化的称为CLV。这两种方法是在金属液凝固完全时,可将冒口的金属液再流回熔化炉内,其铸件回收率高于一般方法的2倍左右,而且不需切除浇口,成本明显降低。

直接生产出陶瓷壳的DSP法使工厂收到订货单后一周内发出铸件,其熔模铸件在质量、价格和交货周期上均可与其他铸造方法相比,为精铸在900亿美元的整个铸造市场竞争中提供了新的机遇。

b. 新技术的应用拓宽了精铸件生产领域。如大型精铸件生产、铝合金整体精铸件、钛合金铸件的生产等等。

以大型精铸件为例,80年代出现的Replicast CS工艺,是将消失模、熔模铸造和负压铸造结合的新工艺,它用塑料模代替蜡模,使用高强度薄壳,干砂振动造型,真空负压浇注工艺,可生产480kg的大型精铸件。

近年由于表面质量和尺寸精度的不断提高,人们也采用消失模法、壳型填铁丸法生产汽车发动机曲轴和凸轮轴,并在壳型填丸方法基础上又发展了80年代用冷芯盒法生产,使铸件表面质量和尺寸精度达到了精铸件的水平TC5~TC6级。

c. 加强控制和采用新技术提高铸件质量。原材料及工艺控制、铸件检测及设备自动化保证了铸件高质量。

值得强调的是,在生产控制方面已研制出一整套精铸在线自动控制和质量检测系统,优化生产管理的自动控制系统,并对铸件实现在线无损检测,按技术要求自动进行X射线照像检查等。

很多精铸现场已使用统计过程控制SPC,根据美熔模铸协1989年对116个工厂调查表明,有88%的工厂正在使用SPC法。90年代统计学将成为精铸业的一个标准管理模式。同时一些新技术进一步提高了合金熔炼质量,如电子束冷炉精炼EBCHR、精炼Ni基超合金。又如SPAL工艺是在液态氩或氮气保护下熔炼,减少了合金中氢含量、氧气夹杂和一些元素的烧损,提高了铸件质量。

d. 模拟技术、计算机应用及快速成型。近年国外在这方面进行了大量研究。美国国家实验室开展了FAST CAST(快速铸造)研究,将实验室技术及计算机技术综合运用到了熔模铸造工艺中,达到了很高水平。英国工贸部发展和提高了熔模铸造凝固过程模拟技术,保持领先地位。一些有代表性的研究有:用判据函数预测熔模合金铸造气孔、熔模铸件凝固分析、用模拟方法优化熔模铸造工艺、熔模铸件有限元分析的快速网络划分、应用于熔模铸件设计及分析的计算力学、运用计算机辅助设计工艺CAD/CAM、快速制造模型到制造操作一体化。

#### 2.1.5 精铸工艺过程的发展动态

a. 国外通常有模料专业公司,所生产的铸造蜡模收缩小、热稳定性好、针入度高等好而稳定的性能。表1是国外某专业厂生产的

多元模料,由于是特制配方,不会出现皂化反应,因此节省了有害处理过程。

表 1

型号	成型条件			特性值					
	射蜡温度	射蜡压力MPa	加压时间s	熔点	凝固点	针入度	灰分%	密度 $g \cdot cm^{-3}$	线收缩率%
SI-19	55~80	2~5	5~需要	78.8	55	1.3	<0.01	0.948	1.3
SR-88	52~80	2~5	5~需要	87.2	52	1.6	<0.01	0.932	1.4

在经济和环保同样重要的今天,再生蜡的使用已成当今熔模铸造行业的热门。一些公司对旧蜡再生技术反复研究指出:为使旧蜡再生,原蜡料应不粘稠、抗氧化;模料应以某一种蜡料为主;再生时要去除水和杂质,并添加新材料;进行严格的质量检测和控制,再生费用约为蜡料费用的25%,可用于宇航各行业熔模铸件的生产中。

b. 改进射蜡机,提高蜡模精度与效率。国外射蜡机采用液压,特点是射蜡压力高,普通双头射蜡机压力可达2~8 MPa,而高压射蜡机的射蜡压力高达12~20 MPa。显而易见,所射制的蜡模水平是很高的。这些射蜡机可根据用户的需要,具有不同的性能,自动化程度也不同。蜡模保温、冷却、起模方式都有独特设计。国外还生产了大型液态模料压注机。

在制造厚断面蜡模时,为减少收缩可加入冷蜡块,但制模时间和费用都会增加。改进压蜡机,用双层蜡调节保存缸,能进行液态蜡传输及糊状蜡压射充填,提高制模效率。

用计算机控制压蜡机,使其在提供制模工艺参数时实现全自动化,能够对压蜡过程中压力和流动的影响进行分析,并使用振动剪切应变仪测定蜡凝固区域液/液、液/固蜡的变形分析来指导压蜡生产。

c. 高质量的模壳是获得优质铸件的最主要条件,而型壳的质量与粘结剂、耐火材料的选择是关键。快干型壳和提高型壳质量是研究的中心。硅酸乙酯型壳费用高,其乙醇挥发物等影响环境。Remasol Adbond B 粘结剂是1992年用于熔模铸造背层型壳的,在使用任何标准耐火材料时,制壳干燥均能与硅酸乙酯型壳相比。国外普遍采用硅酸乙酯和硅

溶胶作为粘结剂,是因为用该两种粘结剂生产的型壳性能好,质量优良。硅溶胶粘结剂一直因风干时间过长而影响生产周期。美国提出了用一种附加物来缩短硅溶胶型壳的风干时间。欧洲和美国正以一种新观点来看待熔融石英硅溶胶涂料。由于新的环保标准的规定,使原采用硅酸乙酯的厂家受到限制,因此广泛采用硅溶胶/熔融石英、硅溶胶/硅酸锆。

国外耐火材料一般表面层用锆英粉或熔融石英,加固层通常采用莫来石的铝硅系材料。 $Al_2O_3$ 的含量一般在42%~72%,其余为 $SiO_2$ 杂质。选择表面层耐火材料时重点要考虑高温强度及其高温下的化学稳定性,而加固层耐火材料的选用还要考虑耐火度、热膨胀性、透气性、溃散性等。一般认为最稳定的耐火材料应是莫来石( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )。国外用作型壳面层材料的有锆英石、电熔刚玉、熔融石英、莫来石合成材料等。用作加固层的材料为莫罗卡特、莫来石、雷马斯等耐火材料,近年来还有使用氧化镁、氧化钙等作为耐火材料。

制壳设备国外正朝着机械化、自动化方向发展。工业机器人广泛应用于精铸生产中的涂料、撒砂、铸件清理、浇冒口切割等工序中,特别是机器人制壳发展很快。美国开发的自动组模机器人,被称为精铸中的柔性制造系统(FMS),为精铸生产自动化创造了条件。

d. 脱蜡和焙烧。国外常用蒸汽脱蜡,焙烧一般采用燃油焙烧炉。

e. 国外中小型精铸厂常采用90~100 kg中频无芯感应熔化炉,功率为160~175 kW,熔化一炉钢水20 min左右。

随着不可加工精铸件的出现,国外正在修正和改进合金成分。近年来开发了金属基复合材料熔模铸造的宇航零件,充分研究了复合材料专用的熔化和铸造工艺及浇注系统设计。

## 2.1.6 规模与技术水平

a. 据不完全统计,精铸业发达和较发达国家精铸工厂数量及规模见表2。

表 2

国家及地区	工厂数量	规 模
美国	415	大多数是有10年以上厂史的小厂,73%的厂家雇员在100人以下,仅10%的厂家雇员超过300人
英国	55	工厂平均人数为100~110人
日本	100	大多数为100人以下的小企业,超过100人的仅3家,40人以下的占64%
苏联		除高尔基汽车厂精铸车间年产4800t和卡马河汽车厂精铸车间年产7000t外,其余规模小,力量分散
中国台湾	150	大多数生产高尔夫球杆头,职工人数为100~250人,规模最大的为700人
韩国	15~20	规模最大的年产800t,年产200t以上的有5家,多数工厂为100人以下

b. 近年来,国外在精铸生产技术理论研究、检测方法、产品品种、产品质量、产品结构以及应用范围的扩大等方面均有了显著的发展和提高,进入一个精铸业的崭新阶段,都非常注重工艺、材料、设备等技术的先进性,其铸件质量不断提高,表面粗糙度和尺寸精度都达到了一定的水平,使其应用范围不断扩大,产品越来越精,经济效益不断提高。

### 2.1.7 特点

a. 专业化程度高。如苏联卡马河汽车厂是年产7000t精铸件的专业厂。当今世界精铸的热点——高尔夫球杆头,80%以上的产量来源于中国台湾。

b. 机械化自动化程度高。国外机器人和大规模机械化流水作业线的应用是最明显的标志,不仅减轻了工人的劳动强度,而且还显著提高了生产率和精铸的应用范围。

c. 产品不断向“精、大”发展,提高了价值和竞争力。机器人、大型高压射蜡机压铸成型、瑞士SUP法等新技术的应用为精铸产品向大型化、复杂化、整体化方向发展提供了先决条件。如美国生产精铸件最重达1000kg以上,模组重90~250kg,完全改变了精铸只能生产1kg以下小件的局面。

d. 不断应用新技术,提高了技术水平和管理水平,生产“高精尖”产品。目前,精铸生产发展的趋势是“精密大型”,除利用开发机器人等手段减轻劳动强度和作业环境外,还致力于推广“接近最后形状的铸造技术”

(NNSC)。也就是“少、无加工余量铸造”。但NNSC不仅只包含上述意思,更突出地强调结构的整体化含义,即把原来由几个零件组装而成的一个组件或部件,用一个铸件代替。因此,NNSC法不但节省了大量机械加工,而且省去了焊接等组装工序,同时更加优化了整个部件的结构和性能。

e. 产值(生产率)高。宏观上看精铸件的产值高、效益好。

f. 铸件质量好,废品率低。精铸件尺寸精度与表面粗糙度情况见表3。如中国台湾生产的高尔夫球头,表面质量要求很高,质量偏差 $\pm 2\mu\text{m}$ ,废品率控制在3%以下。

表 3 国内外精铸件比较

类别	国内民用精铸件	国 外
尺寸精度	CT8级	CT4~6级
表面粗糙度 $Ra$	6.3~12.5 $\mu\text{m}$	0.8~3.2 $\mu\text{m}$

g. 产品结构突出了航空航天业所需耐热合金等欧美等国航空航天和兵器产品占精铸件总销售额的一半以上。美国耐热合金精铸件占总销售额的一半,而普通碳钢铸件占不到20%,充分发挥了精铸工艺的优势与长处。

h. 降低了成本,提高了竞争能力。同等质量的产品竞争能力的强弱主要取决于成本和价格。

## 2.2 我国精铸业发展的近况

### 2.2.1 发展过程

建国初期,受前苏联的影响,熔模精密铸造作为一种少、无切削加工的新工艺起步于

50年代。我国精铸工艺的发展经历了3次较大的发展变化,即在60年代经过我国科技人员的努力,使水玻璃粘结剂型壳的精密铸造成熟地应用到了机械制造业和汽车的生产中,形成了一批专业的精铸车间和工厂,对我国民用机械业和兵器工业的发展起了很大作用。一汽的精铸也在这时起步。到了70年代,由于航空工业发展的需要,促使航空精铸生产在原有硅酸乙酯粘结剂制壳的基础上,引进了西方国家的先进射蜡设备和专利技术,从而生产出高质量水平的航空精铸件,使我国精密铸造技术靠近了国际的先进水平。进入90年代,主要是中国台湾精铸设备和生产工艺技术进入了大陆,硅溶胶粘结剂型壳精铸生产不锈钢零件的工艺得以建立和发展,并使我国一般精铸件达到国外水平,为开创精铸件出口创造了条件。经过40年的发展,熔模铸造已成为我国机械、汽车制造业中不可缺少的基础工艺,并形成了一个独特的行业。

### 2.2.2 现状

由于我国精铸生产发展的历史背景,使精铸生产形成了3种不同的工艺水平。

a. 生产一般碳钢和低合金钢机械零件精铸毛坯的水玻璃型壳的精铸生产工艺。主要用石蜡硬酯酸模料,用低压压制蜡模,以水玻璃粘结剂、石英和硅铝系耐火材料制造型壳,采用水溶脱蜡方式,具有设备投资少,材料低廉,生产周期短等特点,但铸件的质量水平相对较低,主要用于生产质量不高的小型碳钢毛坯铸件。

b. 生产不锈钢、合金钢的小型商品零件的硅溶胶粘结剂型壳的精铸生产工艺。以中温模料在中压射蜡机上制造蜡模,用硅溶胶粘结剂、锆英和铝硅系耐火材料制成型壳,用高压蒸汽脱蜡。铸件质量水平和生产成本比水玻璃粘结剂型壳的精铸件要高。主要用于生产不锈钢接头、小型阀门、五金零件、马具和高尔夫球头,以及合金钢的小型精密零件(如汽车、自行车、军械、小型机械上精密复

杂零件)。

c. 生产高合金钢、高温合金、钛合金零件为主的硅酸乙酯粘结剂精铸生产工艺。在这类生产中,水平较高的是用高压射蜡机,将液态的中温蜡射入精密的模具中制造蜡模,采用陶瓷型芯做复杂内腔,用水解硅酸乙酯粘结剂(近年来也有少数厂部分采用硅溶胶)和刚玉、莫来石等耐火材料制造型壳。在高压蒸汽中脱蜡,其中要求高的零件还采用了真空熔炼和浇注。因此,不但铸件的粗糙度低、尺寸精度高,而且冶金质量也高,主要集中在航空部门。

### 2.2.3 我国精铸企业的经济效益分析

在我国3种精铸工艺水平的企业中,水玻璃型壳精铸厂约占90%,产量约占95.5%,产值约占79%,目前仍是我国精铸生产中的主体。

## 3 对我国精铸业提出几个问题

a. 在年产量高的企业中,亏损企业少,即有规模才能有效益。但目前水玻璃型壳的厂点多,供大于求,且质量差,废品率高(ISO标准规定精铸件尺寸精度应为CT4~CT6级,而国内最高只能达到CT6级)。

b. 我国精铸产品多是以小型普通碳钢为主的机械零件。欧美等国航空航天和兵器产品占精铸件总销售额的50%~70%,而普通碳钢铸件还不到20%。水玻璃型壳精铸生产,由于市场饱和,质量档次低,提高精铸产品水平是当务之急。

c. 铸件销售额低,产品技术含量低,人均效益低。

d. 国内硅溶胶型壳和硅酸乙酯型壳精铸工艺两者产量仅占4.5%,但产值却占21%,产品单价每吨达4.5万元左右,这在国际市场上是有竞争力的。

e. 各大汽车厂面临大量生产轿车的形势,而轿车上精铸件数量少。所属精铸厂面临产品市场萎缩的严峻考验。

## 4 提高我国精铸业在国际市场竞争能力的几点建议

a. 提高产品质量、工作质量。解决“精铸不精”的当务之急是提高产品质量。提高工作质量可降低废品率和减少表面缺陷,同时采取必要的工艺和技术措施可以提高产品质量,使尺寸精度、表面粗糙度和内部质量都达到相当技术标准。这样可显著提高产品适应市场的应变能力,满足国际市场的需求。

b. 提高管理水平。管理水平的高低是影响竞争能力的极为重要因素,企业的兴衰关键在管理。

c. 调整产品结构。我国精铸业产值极低,主要原因之一就是产品结构不合理,民用品多,军用品少,中高档产品比例小,低档产品多,因此很难打入国际市场。必须通过调整产品的结构,改变目前状况。

d. 提高技术水平。主要应从两方面入手,一是不断研究和开发新成果;二是将开发出的成果尽快用于生产。重视模料研究,开发适应不同要求铸件的蜡料和中、高压压力压蜡机。

研制或引进仿制制壳机器人,围绕提高机械化、自动化程度进行技术改造。针对产品的不同工艺要求配备与之相匹配的设备。熔化设备应重点放在提高熔化速度及与焙烧设备的能力平衡上。

开发制壳材料。有条件的厂家应尽快摒弃水玻璃粘结剂工艺,引导好优质的精铸用原、辅材料的专业生产,改用硅溶胶。为了降低成本,面层可采用硅溶胶与锆英粉,加固层可选用煤矸石作为复合模壳,要求特别高的铸件可以采用全部硅溶胶模壳工艺,以生产出高质量的精铸件。

提高模具设计与加工精度。精铸件尺寸精度不高的重要原因之一是模具尺寸精度差,要想保证铸件尺寸精度,模具型腔尺寸设计至少要高两个级别,这样铸件尺寸精度才能达到 CT5 级。

广泛开展计算机的应用推广工作。计算机在我国精铸业的应用刚刚开始,计算机模拟工作基本空白,但其应用潜力非常巨大。

提高检测技术。发达国家用于检测的投资约占工厂固定资产的 30%左右,而我国一般在 5%以下,个别工厂能达到 10%。因此,增加检测手段的投入是打开国际市场的匙。

认真抓好贯彻国际标准,按 ISO9000 标准的要求认真整改,不断发展。

## 5 结束语

迄今为止,国内汽车行业的精铸厂生产的汽车用精铸件基本都采用石蜡-硬脂酸、水玻璃模壳工艺,材质多数为普通低碳钢。其产量大,废品率高,表面质量差,效益低。随着国内轿车的大批量投产,而轿车精铸件又特别少,精铸厂面临着严重的产品萎缩局面。这样,就要提高工艺水平,扩大精铸范畴,开发同属精铸类的新工艺,保持不败之地。

a. 在原来工艺基础上改善蜡质量,开发硅溶胶、锆英粉作面层涂料与水玻璃高铝砂(或煤矸石)作加固层的复合模壳工艺,以此提高精铸件表面质量,使产品尽快打入国际市场。

b. 开发消失模工艺,能用消失模工艺生产的零件,均转为用消失模工艺生产,降低铸件成本。一汽精铸厂正开展用消失模工艺生产红旗 7220 轿车组合支架的试验工作。

c. 开发用冷芯、壳型或金属型工艺生产无芯而表面又要求高的铸件,扩大精铸工艺范畴生产汽车铸件。目前,一汽精铸厂已开展了用壳型填铁丸铸造法生产 EA327 发动机曲轴、凸轮轴的试制工作。

d. 开发各种高精度件特种工艺的综合生产能力,其关键是提高各精铸厂在国内外精铸件市场竞争能力和综合的市场适应性,拓宽工艺范畴,使精铸件少、无切削特点真正得到发展。

1998 - 02 - 10 收稿 (责任编辑 方舟)