

熔模铸造的现状和未来

清华大学* 姜不居**

TGT249.5

摘 要 熔模铸造快速发展,应用范围不断拓宽,其主要原因是技术的进步,能得到更高质量的铸件。

该工艺有着美好的未来。

关键词: 熔模铸造 技术进步 高质量铸件

铸造



Today and Tomorrow of Investment Casting

Jiang Buju

(Tsinghua University)

ABSTRACT Investment casting is rapidly developing and its application range is continuously widening. Those gains were made because of technology progress which ensures high-quality castings. The process indicates a bright future.

Key Words: Investment Casting, Technology Progress, High-quality Castings

1 回 顾

1.1 发展概况

熔模精密铸造(简称熔模铸造)从 40 年代起用于工业生产,在半个世纪中一直以较快的速度发展着。图 1

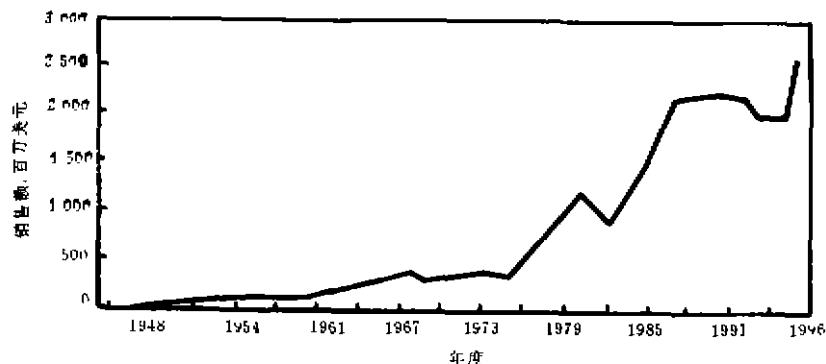


图 1 美国熔模铸造 50 年

Fig.1 USA 50-years history of investment casting

是美国熔模铸造 50 年中销售额变化图,可见除受全球经济衰退影响,在 1967 年后和 1990 年前后各有一段停止和下降外,总体增长速度较快。据报道,1996 年美国熔模铸造产品销售额达 26.1 亿美元。

有资料报道,1996 年世界熔模铸造业(不包括前苏联)销售总值北美占 50%、欧洲 25%、亚洲 20%、其余 5%;而在欧洲,英国占 42%、法国占 26%、德国占 19%、意大利占 7%、其他占 6%。

1.2 市场结构变化

军工产品多年来是熔模铸造的主要市场。表 1 是 1991 年以前一些国家及地区熔模铸造产品销售额分布,军工和航空产品占 50%~70%。

表 1 美、英和欧洲熔模铸造销售额分布

Table 1 Investment casting turnover in USA, UK and Europe %

年 份	美 国		英 国		欧 洲	
	军工 航空	商业	军工 航空	商业	军工 航空	商业
1982 年	50	50	67	33	55	45
1988 年	60	40	70	30	60	40
1991 年	60	40	70	30	55	45

随着冷战时代结束,各国军工产品大幅度减少,使熔模铸造行业原有的一些市场不复存在,行业进入重大结构调整时期。下面介绍除军工外的熔模铸造主要市场:

(1) 民航 除 1991 年外,全世界民航飞机总量呈上升趋势。美国每年上升率约 4%,一些地区和国家上升 5.8%~6.2%。

(2) 工业涡轮发动机 它是熔模铸造有巨大潜力的市场,每年将以 5%~7% 速度增长。

(3) 高尔夫球头 以美国为例,1994 年到 1996 年三年中销售额从 1.5 亿美元增到 3.87 亿美元。

* 清华大学,北京(100084) 收稿日期:1998-04-10

** 姜不居 女,1938 年生,清华大学教授。主要从事特种铸造教学与科研工作。科研项目有“熔模真空吸铸新工艺研究”,“熔模铸造用砂粉粒度优化级配铸件表面质量的影响”,“热模法离心球铁管涂料研制”,“消失模涂料研究”,“微机控制颗粒分析仪”,“压铸 CAD”,“计算机在熔模铸造中的应用”等 40 多项。获省部级科技进步奖 13 项,并享受国务院政府特殊津贴。合著有《铸造测试仪器原理及应用》,《熔模铸造工艺》,《铸件缺陷和对策手册》。在国内外学术刊物上发表论文 129 篇。

(4) 医疗卫生 随着人口老化和各国政府对医疗卫生的重视增加,如换骨骼手术对人造骨骼的需求,该市场可望年增长 5% 左右。

(5) 阀 通用阀市场已呈现饱和,但石油化工和核设施方面的特种合金阀市场仍在不断扩大,每年增长率约 5.6%。

(6) 其他 潜艇构件、环保用具、计算机工业、通用机械、汽车工业等也是重要的市场。

总之,90 年代熔模铸造业开始市场结构变化,进一步转向民用商业领域。

1.3 在与其他工艺的竞争中前进

在与粉末冶金、精锻等近净形化工艺,以及机加工等金属零件制造工艺的竞争中,熔模铸造技术发展较快,下面三方面是值得注意的:

(1) 熔模铸造不仅能生产小件,也能生产较大件,最大轮廓尺寸可达 1.8 m,而最小壁厚却不到 2 mm,最大件重接近 1 000 kg。铸件越来越精确:在 25.4 mm 内公差为 ± 0.254 mm;从 25.4 mm 到 254 mm 每增加 25.4 mm,公差增加 0.076 mm;尺寸大于 254 mm 时每增加 25.4 mm,公差增加 ± 0.127 mm。表面粗糙度 Ra 约 0.63 μm (相当 $\nabla 7 \sim \nabla 8$ 水平)。熔模铸件的力学性能也越来越好。可以用“精密”、“大型”、“薄壁”这几个字来反映发展的趋势,它使得熔模铸造能生产出更精、更大、更强的高价值的产品。

(2) 机械化、自动化的进展打破了“熔模铸造工艺不可能实现机械化”的看法,在日本、英国、前苏联等已成功地将熔模铸造工艺采用流水线来生产低成本的汽车等民用零件。

(3) 近年来熔模铸造又和快速成形新技术结合大大缩短了铸件生产周期。

以上几方面均使熔模铸造应用面得以扩大,竞争力增强。从而在与其他工艺竞争中处于有利地位。熔模铸造应该是最具有发展前景的铸造工艺之一。

2 技术现状

50 多年来,熔模铸造在制模、制壳、熔化浇注、后处理各环节都有长足的进步。对熔模铸造发展有较大影响的新材料、新工艺、新设备很多:如水溶性型芯、陶瓷型芯、金属材质改进、大型熔模铸造技术、钛合金精铸技术、定向凝固和单晶技术、过滤技术、热等静压技术、快速成形技术;计算机在熔模铸造中的应用,机械化自动化等等。这里仅对几个方面加以介绍。

2.1 耐热合金

随着飞机发动机发展,对叶片等零件的耐热性、高温抗蠕变性能要求越来越高。如涡轮叶片,从 60 年代的

1N-100、B1900,发展到 70 年代的 MM247、MM200,80 年代的 PWA1480。为适应不同零件的不同要求已形成钴基、镍基、铁-镍基等完整的超耐热合金材料系列。如 1N700, 1N738LC/C, X-40, X-45, U-710, MA6000, MAR-M002, MAR-M247, MGA2400, MM007, Multi-mel, Nimocast90, Nimomic75, Rene80, RR102, H46, HS25, ECY-768, Fsx-414, GTD222, B1900, DSCM247LC, DSGTD11 等牌号的耐热合金材料。

近年来,随着工业燃气机特别是大型电站用燃气机发展,航空发动机用的耐热合金已被引入工业燃气轮机中,并在继续改进。

2.2 大型熔模铸件技术

大型熔模铸件生产技术和建立在制模、制壳、熔炼等工艺技术水平高度发展,以及材料优良、设备先进的基础上。下面仅就部分内容加以叙述。

为生产大型复杂整体精铸件,各种液态压注模料、填充模料、水溶性模料以及塑料模料都有较大发展。模料收缩更小、强度更高、长期保存不易变形,性能更为优良。如日本研制的适于在 0.7~1.5 MPa 范围内压注成型,甚至可自由浇注成型的水溶性模料。同时出现大型压蜡机,最大合型力达 3 000 kN,如美国 TEM-PCRAFT 生产的 V-3002 型压蜡机。

除改进粘结剂、耐火材料和制壳辅料外,在涂料、制壳工艺方面的研究也取得较大进展,为生产大型型壳打下了基础。如确认大型型壳应有较大的断裂模数 MOE,从结构上不应是整体的而以分层结构为佳。为此,制作大型型壳粘结剂硅溶胶中的 SiO_2 含量应高(当胶粒直径为 14 nm 时, SiO_2 含量应达到 30%)、高聚物 5%,涂料粘度应大些,粉液比高些、制壳干燥时间需长些。在设备上出现提重超过 1 000 kg 的制壳机械人等大型设备。

同时,熔模铸造兴起许多新工艺,如石膏型熔模铸造法、Relicast CS 法等。如美国 TEC-CAST 公司采用真空下浇注的石膏型,铸件最小壁厚仅 0.8~1.5 mm,铸件 < 25 mm 时,尺寸偏差为 ± 0.12 mm,表面粗糙度 Ra 1.25~5.0 μm ,质量 0.45~900 kg 的铝精铸件,像飞机燃油增压泵壳体等零件。又如集消失模、熔模铸造和 V 法(负压造型)诸工艺优点的 Replicast CS 法被用来生产大型精密铸钢件。

整体熔模铸件已开始取代某些锻件、机加工件和板金组装件,取得很好的效果。如用熔模整铸的喷气机应急安全出口架代替原 100 多组件和 900 多固定件组成的组装件,质量从原 8 kg 减到 6 kg,制造周期也大大缩短。又如美国哈梅特公司 Lapott 铸造分部制造出 PW4000 发动机的第 9 级压气机导向器整体精铸件代替原 108 个铸件的组装体。

2.3 钛合金精铸技术

钛合金比强度高,已成为现代工业中一种重要的结构金属。50年代各国就十分重视钛精铸技术研究,经十几年努力达到使用阶段,从70年代末开始了钛合金精铸件生产。现钛精铸件已广泛用于先进的飞行器、飞机、导弹、化工设备等零件上,如飞机发动机中间机匣、压气机机匣、化工泵阀、医疗移入物等。铸件最小壁厚1.2~2 mm,尺寸偏差 ± 0.005 mm/mm,表面粗糙度 $Ra 3.2$ μm 。1992年做的最大钛精铸件铸毂架经焊接加工后重340 kg,直径1.918 m,高0.591 m。钛精铸件发展速度快,仅美国1996年的销售额已达3.69亿美元。

钛合金在高温下具有很高的化学活性,几乎和所有的耐热材料发生化学反应,型壳面层材料研究是钛精铸的一个技术关键。现工业上使用的有石墨型壳、钨面层陶瓷型壳、氧化物陶瓷型壳。其中氧化物陶瓷型壳是一种很有前途的型壳,有取代石墨型壳和钨面层陶瓷型壳的趋势。

钛精铸的另一技术关键是熔炼浇注。目前生产中广泛使用的是真空自耗电极凝壳炉。它是以钛合金制成自耗电极,与水冷铜坩埚间产生电弧,依靠电弧热量将电极熔化。为防止钛液与空气中氧、氮等反应,熔炼在真空中进行。钛密度小,金属静压头小,为获得致密钛件,常采用离心浇注。最大凝壳炉浇注量达1 t多,可浇 $\phi 2.5$ m \times 1.5 m、重900 kg以上的钛精铸件。除真空自耗电极凝壳炉外有真空非自耗凝壳炉,但设备造价较高,投资大,操作维护也比较困难。以等离子和电子束为热源的真空自耗凝壳炉、真空感应熔炼炉尚处于实验室研究阶段。

2.4 定向凝固技术

为提高熔模铸件性能需控制其结晶过程,凝固技术被引入熔模铸造生产中。从疲劳损坏的叶片看,裂纹都是沿着垂直于叶片主应力方向(纵轴向)晶粒边界发生和发展的,定向凝固能让叶片获得平行于轴向的柱状晶,消除横向晶界,使叶片抗疲劳性能大为提高。利用凝固技术还可以生产单晶叶片,性能就更为优越。回顾历史,这就是涡轮叶片从传统的等轴晶(EQ)发展到定向凝固(DS)柱状晶,再到单晶(SC)的过程。

材质改进和凝固新技术应用使熔模铸件质量大为提高。由于材质改进和叶片从传统等轴晶发展到柱状晶、单晶,使其工作温度由980℃提高到1095℃。

定向凝固工艺技术在不断改进和发展中,如为使铸件凝固区有效温度梯度增大,该工艺从功率降低法PD,发展到高速凝固法HRS及液体金属冷却法LMC。近年来,随着定向凝固和单晶大型铸件的需求急剧增加,对其工艺设备又提出新问题,需更大的设备,并要经

济的做到铸件凝固期间有较高温度梯度,有先进的型壳加热和冷却系统,对大而重的型壳操作方便等等,DS/SC工艺和设备仍在继续发展。

2.5 热等静压技术

熔模铸件内部一般都存在着缩松等缺陷,使其力学性能和使用可靠性比锻件低,为获得致密的熔模铸件,热等静压(HIP)技术已被广泛用于涡轮叶片及其他熔模铸件上。

热等静压是利用高温和高压,靠金属蠕变和塑性变形让铸件内部疏松、热裂等缺陷愈合,而形状和尺寸变化很小,通常测不出来。处理后铸件密度可达到金属理论密度,使组织均匀化,从而提高性能,并使性能分散程度下降。热等静压处理可使镍基高温合金、钛合金和铝合金的高温低周波疲劳性能提高3~10倍;使镍基高温合金和钛合金的应力断裂寿命提高2倍;使铝合金的疲劳寿命提高3倍;使铸件性能变化和分散程度降低到原来的1/6。

用热等静压处理熔模铸件,能减少铸件在X射线检查和表面透射检查时的报废率;减少焊接后产生的裂纹;改善熔模铸件性能使之可取代锻件。

英、美许多飞机制造厂已明文规定,热等静压是叶片等关键熔模铸件一道必不可少的工序。欧美许多钛合金铸件厂有相当大数量铸件也经过热等静压处理。如美国哈梅特公司和法国梅塞方道雷达劳迪公司100%钛铸件采用热等静压处理。西德蒂塔尔公司、比利时钛技术公司和美国钛技术公司中,铸件热等静压处理量为20%~80%。

2.6 快速成形技术

80年代出现的快速成形技术RPT已应用在熔模铸造中。如使用RPT的SLA,SLS,LS,FOM或LOM工艺所制塑料、蜡和纸原型代替传统蜡模,或使用DSPC工艺生产的陶瓷型壳作型壳进行熔模铸造生产,大大简化了工序,缩短生产周期。

目前使用最多的RPT工艺仍为SLA法。1993年和1994年推出的SLA-250,SLA-500型机器,有“Quick Cast TM1.0”,“Quick Cast TM1.1”制造成形体系,能快速精确的设计和制造铸造用SLA塑料原型。利用这种原型已成功生产出各种合金的精铸件,如波音747飞机货舱门支架,有六个叶片的叶轮等。一些工厂也已使用SLS的聚碳酸酯原型、FDM的蜡原型和LOM纸原型生产出各种熔模铸件。

澳大利亚对SLA,SLS,LOM,FDM原型生产的熔模铸件进行比较,认为从精度看SLA法最好,从铸件整体表面光洁度看LOM原型最有利。

DSPC工艺是直接利用CAD数据自动制造出熔模

铸造用的陶瓷型壳,将生产周期缩至最短。据报道,Soligen 公司的 DSPC 设备主要用来生产喷气发动机零件和矫形植入件用型壳。但受机器尺寸限制,其有效工作空间为 406 mm×406 mm×406 mm,尚不能生产较大尺寸的熔模铸件。

2.7 机械化自动化

从制模、制壳、熔化浇注到清理熔模铸件各工序的机械化、自动化都有进展。

制模设备机械化、自动化发展迅速,如德国的 SCHOTT 公司、北美 HOWMET TEMPCRAFT 公司、MPI 公司等均有全自动化压蜡机,可通过计算机控制压制参数和生产过程。

制壳单机和流水线应用较普遍。一些制壳流水线使用机器人制壳。据报道,英国机器人提重 350 kg、型壳尺寸达 1 m×1 m,美国新机器人提重超过 1 000 kg。如英国 Deritend 精铸公司使用的高度自动化制壳机器人,能知道每种铸件浇冒系统应装在何处,能制造出极其复杂的精铸型壳。

脱蜡、焙烧采用隧道式连续炉。

快速熔炼、连续浇注,如英国 BLMC 公司长桥工厂用机械手将待浇注型壳浇口向上放入砂箱,自动沸腾埋砂后机械手松开,砂箱推入八工位高频熔炼漏注转盘上等待浇注。

清理自动化也有进展。如 LYNX 高尔夫公司 80 年代末建的自动化清理室可自动完成磨光、擦亮等工作。

熔模铸造机械化、自动化,这是全球的总趋势。对劳力缺乏和人员工资高的国家则更为迫切。据报道,英国 1990 年已有 25% 工厂机械化,占生产销售总量的 70%。日本 1993 年建成的 Daido 精密铸造厂是世界上自动化程度最高的精铸厂之一。该厂压蜡车间使用自动化压蜡机和两个机器人,一个机器人将蜡模取出,此时另一机器人把加热过的浇口棒送到,就地组装模组。组好的蜡模组由传送装置运到上涂料处。压蜡车间大多数工序和组装位置均无人操作。制壳车间有两条自动线。浇注也是高度自动化,有完善的控制和壁式电视屏幕显示出每一个细小的操作情况,该工厂每日生产 4 万个涡轮增压叶轮、打印机零件和工业零件,件重小于 227 g。

3 展 望

3.1 国际熔模铸造展望

为生产更精密的熔模铸件,各国对影响精铸件尺寸精度的因素进行了更深入的研究,明确了做小公差件的控制策略,并制定出新的熔模铸件公差标准。新标准除铸件长度尺寸公差外,还包括几何形状公差等。

随着熔模铸件代替组装件和大型工业涡轮的发展,

对熔模铸件设计、铸件系数选择、大型件工艺和设备等均已开展大量工作,为生产更大、更薄的熔模铸件打下了基础。

钛、铝、镁、高温合金的研究及其熔模铸造工艺也在继续发展中。

展望国际熔模铸造业将继续沿着“精密”、“大型”、“薄壁”、“快速”的方向发展。同时,在扩大市场、降低成本、生产大批量汽车等熔模铸件方面也将取得进展。作为一种近净形工艺,熔模铸造前景光明。

3.2 中国熔模铸造的未来

我国熔模铸造业建于 50 年代,因历史原因存在两种工艺水平的企业:一是采用硅溶胶或硅酸乙酯型壳工艺,二是水玻璃型壳工艺。前类工厂的熔模铸件达国际水平,后类工厂铸件还达不到国际水平,但后类工厂占总厂家数的大多数。第一类工厂主要是原航空航天部的骨干精铸厂及 90 年代新建的合资企业。十年来该类工厂发展迅速,1988 年仅占全国熔模铸造厂数的 6%、产值的 10% 左右,1993 年上升为厂数的 10%、产值的 25%、1997 年更增为厂数的 13%、产值近 50%。现我国熔模铸造厂点数约为 1 500 家、年产 17 万 t 精铸件,产值约 2.8 亿美元。

第一类熔模铸造厂随国内经济和航空航天业的发展,国际市场的开拓,工艺技术和管理水平的提高,原辅材料及设备供应的完善化仍将继续发展。原航天航空骨干厂紧跟国际先进技术,改进管理,更多走向国际市场。工艺稳定,已形成生产规模的出口企业则应提高产品档次,不再停留于主要生产高尔夫球头、五金件、马具和管阀类精度要求较低的产品,而应扩大精度要求较高的机械零件产量。

第二类熔模铸造厂数量过多,已供过于求。随着铸钢、树脂砂工艺的发展,市场竞争将更剧烈。部分企业将被淘汰。建议水平较高、有条件的厂应利用水玻璃型壳快速、价廉的优点,投入少量资金发展硅溶胶水玻璃复合型壳工艺,生产质量比水玻璃型壳高的低成本熔模铸件,以满足国内外汽车、机械制造、仪器、电子通讯设备、食品机械等行业需求。

总之,我国熔模铸造厂点多产量大,但产品达国际水平的还不多,这部分产品的产值仅占国际熔模铸造的 2% 左右。而我国大多数精铸原材料可立足国内,价格较便宜,劳动力充足费用低,技术人员众多、国内市场潜力很大。发达国家因劳动力成本高,能源及环保的限制,其精铸业正逐步向发展中国家转移。这均为我国熔模铸造业提供了机遇和发展的有利条件。熔模铸造同仁们应努力提高企业工艺技术和管理水平,提高产品档次,开拓市场,前景是光明的。中国在 21 世纪有望成为一个熔模铸造大国。

参 考 文 献

- 1 Thierry Thys. North American Investment Casters Experiencing Upward Trend. INCAST, 1997(1,2):10~11
- 2 Gino Baiardi. European Investment Casters Can Expect Upturns in Aerospace, Land-based Turbine Engine, & Nonferrous Sectors; Downturn in Industrial Steel Parts. INCAST, 1997(1,2):18~19
- 3 Thierry N. Thys. "Interesting" Times for Investment Casting Industry Spell Danger, Opportunity. INCAST, 1994(1):10~13
- 4 Ludmila Lusniak-Lech. Investment Casting-Today and Tomorrow. Foundry Management & Technology, 1989(2):58~62
- 5 Jacqueline B. Wahl. Superalloys in Industrial Gas Turbines-An Overview. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,12:1~12:12
- 6 Hugo F. Vacuum Arc and/or Cold-wall Induction Casting of Titanium Golf Club Heads. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,13:1~13:11
- 7 Betz U. Advances in Directional Solidification and Single Crystal Precision Casting Equipment and Process. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,11:1~11:10
- 8 John C. Hebeisen. HIP New Cost Effectiveness Era Prompts Casters to Take a Second Look. INCAST, 1994(7):6~9
- 9 Steven Kennerknecht. Design and Specification of Aluminum Airframe Structural Castings. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,15:1~15:20
- 10 Piwonka T S. Current Japanese Investment Casting Technology. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,27:1~27:9
- 11 Nicolai H P. Investment Casting Process Technology for the Future. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,25:1~25:8
- 12 马福康. 等静压技术. 北京:冶金工业出版社,1992.
- 13 何湘平. 国外熔模铸造发展概述. 特种铸造及有色合金, 1992(3):40~43
- 14 李凤霄. 熔模铸件的近净形化技术及快速制模技术. 特种铸造及有色合金, 1995(3):31~35
- 15 张先波. 国际精铸业近况及展望. 特种铸造及有色合金, 1994(4):23~24
- 16 Riek T. Comparing Rapid Prototyping Patterns for Investment Casting An Australian Experience. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996, 20:1~20:11
- 17 Roberh N. Yancey Rapid Prototyping Techniques to Produce Net-shape Investment Cast Tooling. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,18:1~18:7
- 18 William Roberts O. Rheology Effects on Shell Composition and Strength. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,6:1
- 19 Ronald Doles S. A New Approach to the Characterization and Optimization of Investment Casting Shell Systems. 9th World Conference on Investment Casting. San Francisco, USA. 1996,8:1~8:18
- 20 Investment Casting Institute (USA). Investment Casting Handbook, ICI, 1997.
- 21 佟天夫,陈冰,姜不居. 熔模铸造工艺. 北京:机械工业出版社,1991.

(编辑:张振斌)

第 20 届北美国际压铸会议及展览会将于 1999 年举行

在压铸领域内规模最大、最具影响力的第 20 届北美国际压铸会议及展览会将于 1999 年 11 月在美国俄亥俄州的克利夫兰市召开。本次会议将以当前压铸工业技术发展的前沿技术为焦点,着重于探讨压型设计中的充型、凝固模拟、压铸合金的应

用及发展、压铸工艺控制及改进、挤压铸造及半固态铸造技术的发展,以及压铸设备、压型材料、辅助材料和环保安全等方面的问题。中国铸造学会将再次组团出席本届会议及展览会,组团及征文工作已在进行之中。