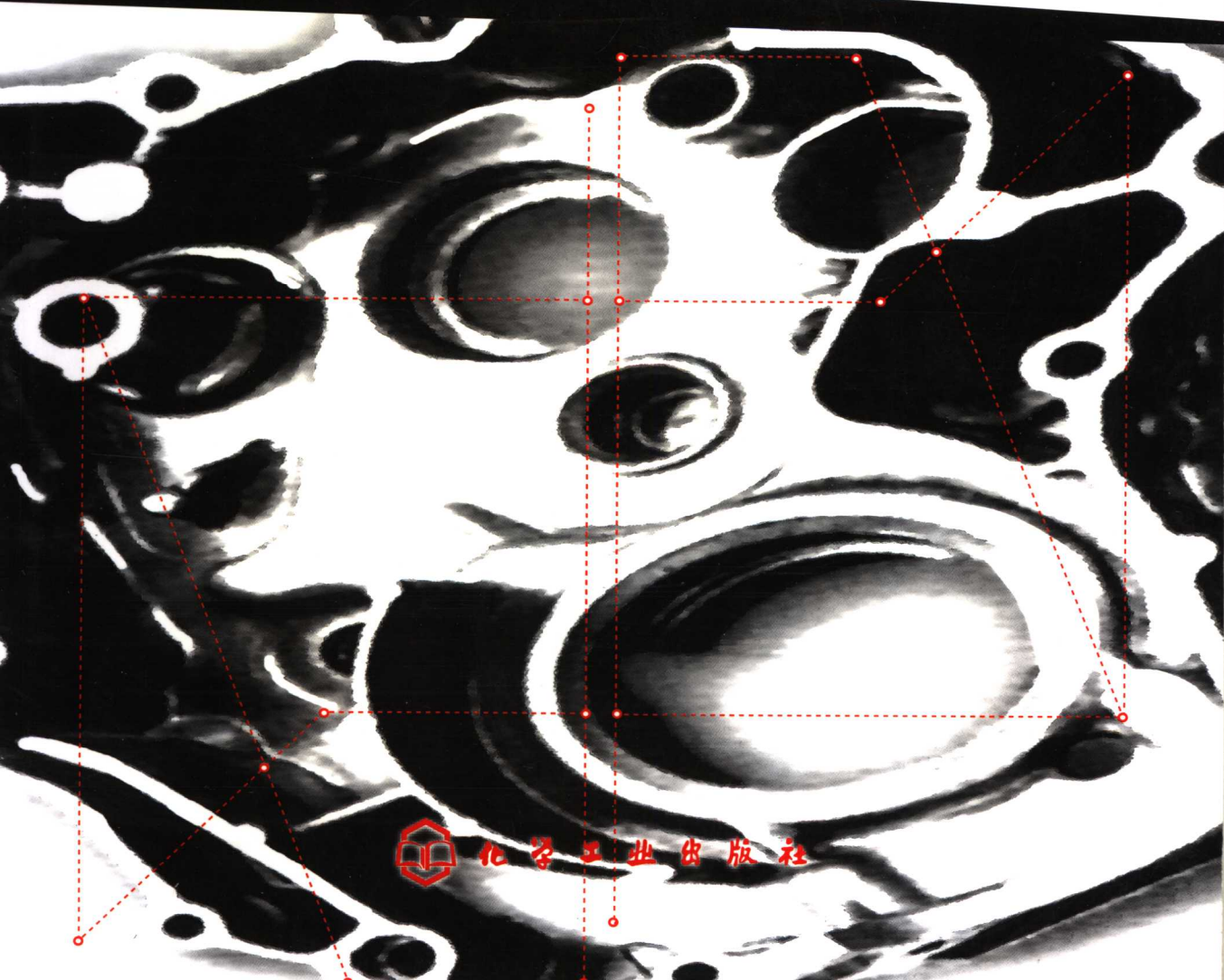


YOUSE HEJIN XIAOSHIMO ZHUZAO YUANLI YU JISHU

有色合金

消失模铸造原理与技术

陶杰 刘子利 崔益华 编著



化学工业出版社

有色合金消失模铸造原理与技术

陶 杰 刘子利 崔益华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从有色合金消失模铸造基本原理出发,论述了有色合金充型特征以及在负压条件下的各种影响因素,结合编著者多年的研究探索以及消失模铸造技术的推广实践,介绍了铝合金、镁合金等消失模铸造过程中的凝固及组织控制,分析了产生铸件缺陷的原因。同时,本书还阐明了消失模模样材料及其热解和气化特征以及用于有色合金铸件的消失模专用涂料的组成与配方。在介绍了消失模铸造一般工艺之后,着重给出了铝合金、镁合金铸件消失模制备的工艺关键。

本书可供铸造、机械、化工、轻工、材料等行业的工程技术人员、科技人员和大专院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

有色合金消失模铸造原理与技术/陶杰,刘子利,崔益华编著

北京:化学工业出版社,2006.11

ISBN 978-7-5025-9730-6

I. 有… II. ①陶…②刘…③崔… III. 有色合金-精密铸造
IV. TG29

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 144448 号

责任编辑:杨 菁

文字编辑:闫 敏

责任校对:洪雅姝

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数248千字 2007年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

由南京航空航天大学承担的国家科技部十五重点推广项目——消失模铸造技术，经过多年的推广实践，国内越来越多的企业开始接触、认知并采纳。在国内许多研究学者和同仁们的大力推动下，在许多相关铸造设备厂家、原材料厂家以及铸件生产企业的共同努力下，消失模铸造技术正在中国健康而稳步地发展着。

我国的消失模铸造技术虽然与发达国家相比还有一定的差距，主要表现在设备的自动化、产品的复杂程度和质量水平方面，不过其推广应用是成功的。在生产方式上也由过去的单件、大中型铸件、小批量中小铸件发展到以大批量各类铸件的生产为主；在技术上已逐渐成熟，并在实践中得到发展，目前已达到较高水平，如解决不锈钢铸件表面增碳，解决浇注大平面和复杂结构大件时出现塌箱等方面都已探索出相应的较成熟的工艺技术，已有部分消失模铸造产品进入国际市场。

从近几年我国消失模铸造产量分析可以看出，我国消失模铸造的生产主要集中在铸铁、铸钢件上，而铝合金等轻合金材质的消失模铸造的生产处于刚刚起步阶段。在技术水平上，产学研的结合及专业化分工协作程度不高，同时在消失模铸造的基础研究上尤其是轻合金材料的研究上还不够深入，与国外消失模铸造水平的差距较大。

在此背景下，编著者根据多年的有色合金消失模铸造的研究经历，结合国内外最近的研究成果，编著了此书。本书从有色合金消失模铸造基本原理出发，论述了有色合金充型特征以及在负压条件下的各种影响因素，介绍了铝合金、镁合金等消失模铸造过程中的凝固及组织控制。同时，本书还阐明了消失模模样材料及其热解和气化特征以及用于有色合金铸件的消失模专用涂料的组成与配方。最后，本书在介绍了消失模铸造一般工艺之后，着重给出了铝合金、镁合金铸件制备的工艺关键。

本书由南京航空航天大学陶杰、刘子利和崔益华等教授编著。其中，陶杰编写了第1章、第5章和第6章，刘子利编写了第2章、第3章和第7章，崔益华编写了第4章和附录。于华、周冰、张雪凤、王文靖、任赫、陈谊谊等参与了大量的实验工作，编著者在此谨致诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2006年10月于南京

目 录

| | |
|--|----|
| 第 1 章 有色合金消失模铸造技术概论 | 1 |
| 1.1 消失模铸造工艺发展历史 | 1 |
| 1.2 中国消失模铸造工艺的发展 | 3 |
| 1.3 有色合金消失模铸造的适用性与经济性 | 3 |
| 1.3.1 消失模铸造的适用性 | 3 |
| 1.3.2 消失模铸造的经济性 | 4 |
| 1.4 有色合金消失模铸造技术应用现状 | 6 |
| 1.4.1 国际上应用消失模铸造技术的情况 | 6 |
| 1.4.2 国内消失模铸造技术的应用情况 | 7 |
| 1.4.3 中国消失模铸造存在的问题 | 7 |
| 1.4.4 消失模铸造技术的发展趋势 | 8 |
| 参考文献 | 9 |
| 第 2 章 有色合金消失模铸造充型过程的理论基础 | 10 |
| 2.1 有色合金消失模铸造的充型能力 | 10 |
| 2.1.1 合金种类与成分对流动性的影响 | 10 |
| 2.1.2 模样材料对流动性的影响 | 10 |
| 2.1.3 涂料对流动性的影响 | 11 |
| 2.1.4 真空度对流动性的影响 | 12 |
| 2.1.5 浇注条件对流动性的影响 | 13 |
| 2.1.6 模样的几何形状对流动性的影响 | 17 |
| 2.2 有色合金消失模铸造的充型形态 | 18 |
| 2.2.1 消失模铸造的充型过程 | 20 |
| 2.2.2 真空度对流动形态的影响 | 21 |
| 2.2.3 浇注方式对流动形态的影响 | 21 |
| 2.3 有色合金消失模铸造的充型速度 | 22 |
| 2.3.1 不抽真空时消失模铸造的充型速度 | 22 |
| 2.3.2 负压消失模铸造的充型速度 | 23 |
| 2.4 有色合金消失模铸造充型机制 | 27 |
| 2.4.1 不抽真空消失模铸造的充型机制 | 27 |
| 2.4.2 负压消失模铸造的充型机制 | 28 |
| 2.4.3 其他工艺因素对充型速度的影响 | 29 |
| 2.4.4 充型过程与消失模铸造缺陷的关系 | 30 |
| 参考文献 | 33 |
| 第 3 章 有色合金消失模铸造的凝固特性与组织特点 | 36 |
| 3.1 有色合金消失模铸造充型和凝固过程中铸件的冷却过程 | 36 |
| 3.2 工艺因素对消失模铸造传热的影响 | 38 |
| 3.3 消失模铸造充型过程中的传热 | 42 |
| 3.3.1 不抽真空时消失模铸造充型过程中的传热 | 42 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 3.3.2 抽真空时消失模铸造充型过程中的传热 | 42 |
| 3.4 消失模铸造凝固过程中的传热 | 43 |
| 3.4.1 不抽真空时消失模铸造凝固过程中的传热 | 43 |
| 3.4.2 抽真空时消失模铸造凝固过程中的传热 | 44 |
| 3.5 消失模铸造凝固过程对微观组织的影响 | 45 |
| 3.5.1 消失模铸造铸件显微组织的特点 | 45 |
| 3.5.2 铸造工艺对铸件显微组织的影响 | 46 |
| 3.5.3 消失模铸造工艺因素对铸件显微组织的影响 | 47 |
| 参考文献 | 50 |
| 第4章 有色合金消失模铸造的模样材料 | 51 |
| 4.1 概述 | 51 |
| 4.1.1 有色合金消失模铸造对模样材料的要求 | 51 |
| 4.1.2 模样材料种类、性能 | 51 |
| 4.1.3 模样材料的发展 | 52 |
| 4.2 模样材料的热分解特性 | 52 |
| 4.2.1 EPS的热分解特性 | 52 |
| 4.2.2 EPMMA的热分解特性 | 60 |
| 4.2.3 StMMA的热分解特性 | 63 |
| 4.2.4 EPS热解产物的传输 | 63 |
| 4.3 有色合金消失模铸造模样材料的热分解 | 65 |
| 4.3.1 有色合金充型前沿模样的热分解产物 | 65 |
| 4.3.2 模样材料的热分解产物对铸造质量的影响 | 66 |
| 4.3.3 分解产物对有色合金铸件表面质量的影响 | 68 |
| 参考文献 | 68 |
| 第5章 有色合金消失模铸造用涂料 | 70 |
| 5.1 表面耐火涂料 | 70 |
| 5.1.1 涂料的作用与技术要求 | 70 |
| 5.1.2 涂料的种类与组成 | 72 |
| 5.1.3 常用涂料配方 | 79 |
| 5.1.4 涂料的配制 | 80 |
| 5.2 泡沫塑料模表面光洁涂料 | 81 |
| 5.3 涂料的性能检测与控制 | 82 |
| 5.3.1 耐火涂层的透气性 | 82 |
| 5.3.2 涂料的悬浮性 | 84 |
| 5.3.3 涂料的流变特性 | 85 |
| 5.3.4 涂料的触变性 | 86 |
| 5.3.5 涂料的滴滴性 | 86 |
| 5.3.6 涂料的发气性 | 87 |
| 5.3.7 涂料的易剥离性 | 88 |
| 5.3.8 涂料的抗裂性 | 89 |
| 5.3.9 涂料其他性能指标 | 89 |
| 5.4 改性膨润土对涂料性能的影响 | 91 |
| 5.4.1 硅溶胶改性钙基膨润土 | 91 |

| | | |
|------------|----------------------------------|------------|
| 5.4.2 | 正硅酸乙酯改性膨润土的研究 | 94 |
| 5.4.3 | 膨润土对涂料性能的影响 | 99 |
| 5.4.4 | 自研涂料与亚士兰涂料性能的比较 | 102 |
| 5.5 | 不同耐火骨料对涂料性能的影响 | 103 |
| 5.5.1 | 不同耐火骨料对悬浮性的影响 | 103 |
| 5.5.2 | 不同耐火骨料对透气性的影响 | 104 |
| 5.5.3 | 不同耐火骨料对流变性的影响 | 104 |
| 5.5.4 | 不同耐火骨料对触变性的影响 | 105 |
| 5.5.5 | 小结 | 105 |
| 5.6 | 涂料的涂挂方法及干燥 | 106 |
| 5.6.1 | 涂料的涂挂方法 | 106 |
| 5.6.2 | 涂料涂挂方法选择 | 108 |
| 5.6.3 | 干燥方法的选择 | 108 |
| 5.6.4 | 涂挂与烘烤工艺控制规范 | 109 |
| | 参考文献 | 109 |
| 第6章 | 消失模铸造工艺分析 | 111 |
| 6.1 | 消失模铸造结构工艺设计 | 111 |
| 6.2 | 消失模铸造浇注系统设计 | 111 |
| 6.2.1 | 消失模浇注系统的设计原则 | 111 |
| 6.2.2 | 浇注位置设计 | 112 |
| 6.2.3 | 浇道的结构与形状 | 114 |
| 6.2.4 | 浇注系统各单元截面积的比例 | 114 |
| 6.2.5 | 内浇口位置、数量和形状的确定 | 115 |
| 6.2.6 | 冒口设计 | 115 |
| 6.3 | 造型技术 | 116 |
| 6.3.1 | 模型吃砂量 | 116 |
| 6.3.2 | 填料操作 | 116 |
| 6.3.3 | 冷铁的使用 | 117 |
| 6.3.4 | 振动、振幅和振动时间 | 118 |
| 6.3.5 | 真空度控制 | 118 |
| 6.4 | 浇注技术 | 119 |
| 6.4.1 | 浇注温度的控制 | 119 |
| 6.4.2 | 浇注速度的控制 | 119 |
| 6.4.3 | 停泵时间 | 120 |
| | 参考文献 | 120 |
| 第7章 | 铝合金、镁合金消失模铸件制备的关键技术 | 121 |
| 7.1 | 合金的熔炼与浇注 | 121 |
| 7.1.1 | 铝合金的熔铸技术 | 122 |
| 7.1.2 | 镁合金的熔铸技术 | 126 |
| 7.2 | 铝合金和镁合金消失模铸造工艺设计要点 | 130 |
| 7.2.1 | 消失模铸件设计 | 130 |
| 7.2.2 | 消失模铸造工艺设计 | 131 |
| 7.2.3 | 浇注系统的确定原则 | 131 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 7.2.4 消失模铸件的浸渗技术..... | 132 |
| 7.3 镁合金进气歧管消失模铸造的工艺实践 | 134 |
| 7.3.1 试验方法及过程..... | 134 |
| 7.3.2 试验结果..... | 135 |
| 参考文献 | 136 |
| 附录 | 138 |
| 附件1 消失模铸造常用词汇（中英对照） | 138 |
| 附件2 消失模铸造行业相关机构 | 147 |

第 1 章 有色合金消失模铸造技术概论

1.1 消失模铸造工艺发展历史

随着塑料、化工和机械工业的发展，消失模铸造经历了实型铸造法、干砂实型铸造、磁型铸造以及负压实型铸造等发展阶段。

所谓实型铸造法就是用泡沫聚苯乙烯塑料模代替铸模进行造型，模样不取出，呈实体铸型，浇入金属液，模样气化，而得到理想铸件的一种铸造方法。美国人 H. F. 施洛耶于 1956 年最早发明了该方法（简称 F 法），并于 1958 年获得了专利。早期较成功的艺术铸件是麻省理工学院的青铜铸件——柏伽索斯天马神像（150g）和球墨铸铁钟架（3500kg）。虽然施洛耶发明的目的是生产工艺品，但该方法受到了铸造业的高度重视，经过随后几年的应用研究，德国亚琛工业大学教授 A. 维特莫赛与两家塑料公司及几家铸造厂于 1961 年推出了用于普通铸件的实型铸造技术并开始工业生产。由此在英、美、法、日等发达国家引发了实型铸造热潮，如：1963 年美国用 F 法生产的铸件达 1.2 万吨，单件最大重 15t。到 20 世纪 60 年代中期，西方国家的 150 余个铸造企业组织了“国际实型铸造协会”，年产达 30 万件以上；到 70 年代，“国际实型铸造协会”发展到 200 家以上的企业，仅美国 1970 年用 F 法就生产了 40 万吨铸件。

德国的 H. Nellen 和美国的 T. R. Smith 于 1964 年申请了无黏结剂干砂生产铸件技术的专利。由于无黏结剂，在浇注过程中经常发生坍塌现象，所以在此基础上，美国一项专利提出了用磁场作为“黏结剂”来“黏结”粒状铁磁性材料的造型方法。德国的 R. 霍夫曼进一步提出了“磁性材料造型的方法和设备”的专利，即磁型铸造，简称 M 法。随后，德国 A. 维特莫赛于 1968 年 GIFA 展览会上、在第 35 届和第 38 届世界铸造年会上公布了 M 法工艺及设备。至此，实型铸造在各国掀起了一个应用 M 法的热潮。BBC 公司在 1973 年第 40 届铸造年会上，展出了 M 法铸造线，并在 1974 年 GIFA 展览会上又展出了带有自动浇注装置的大型 M 法铸造线。然而，因磁型铸造自身工艺的局限——磁型造型机限制了产品的大小和形状以及制模和模样的装配组合与上涂料等工序较复杂，难以实现自动化生产。尤其是泡沫塑料模热分解产物的黑烟所造成的环境污染限制了其推广应用。

为解决磁型铸造自身存在的问题，20 世纪 60 年代末期，德国的两位技术人员首先将真空技术引入实型铸造，并获得美、英专利。其原理是：先将压缩空气通入砂箱，使造型材料沸腾起来呈流态，然后放入泡沫聚苯乙烯模型；切断气源，型料沉积模型四周，抽真空后浇注。1972 年，日本人植田昭二等发明减压燃烧式铸造法，这是负压实型铸造的另一种工艺形式；1974 年，美国人 R. A. 奥尔生为负压实型铸造批量生产设计了专用装置。中国科学院光电所在国内首先提出了负压实型铸造的新设想，于 1977 年成功浇注了一批铸铝、铸铜、铸铁和铸钢件。并在 1981 年开展了负压实型铸造基础试验研究，包括液态合金充填铸型的能力、铸造成型机理的研究以及铸型强度性能和工艺方法对铸件力学性能的影响等。

此外，日本秋田株式会社和长野县工业试验所于 1969 年发明了真空密封造型法，简称 V 法。V 法与传统铸造法制备空型腔相一致。其基本原理是在特制的砂箱内填入无水无黏结剂的干石英砂，用塑料薄膜将砂箱密封后抽成真空，借助铸型内外的压力差使型砂紧实和

成形。其工艺过程如下。

- ① 根据铸件的结构特点，制造带有抽气箱和抽气孔的模板以及特殊结构箱。
- ② 通过抽真空，使塑料薄膜紧紧贴附在模板上并使其成形。
- ③ 将带有过滤抽气管的特制砂箱放在已覆盖塑料薄膜的模板上。
- ④ 往砂箱里填入没有黏结剂的干石英砂，并微振紧实、刮平。
- ⑤ 在砂型上面安放密封塑料薄膜，打开抽气阀门抽去型砂中的空气，使铸型内外存在 2.94~3.92kPa 的压力差。

- ⑥ 去除模板内的真空，然后起模，但铸型内要继续抽真空，直到铸件全部凝固为止。
- ⑦ 依照上述方法制造另一半型。
- ⑧ 下芯、合箱、浇注。
- ⑨ 待金属全部凝固后，停止对铸型抽真空，使铸型内的压力逐渐与铸型外的压力相近，铸型就自行溃散，可方便地取出铸件。

与其他的造型方法比较，真空密封造型方法具有以下的特点。

- ① 铸件的尺寸精度高和表面粗糙度值较低。
- ② 工序简化，设备、材料省。型砂中可不必添加黏结剂、水分及附加物，简化了型砂处理工作，铸件的落砂清理方便，旧砂只要过筛去除杂质、冷却后去除细粉即可回用。
- ③ 金属利用率高。能够铸出 3mm 左右的薄壁件，可以减薄铸件的设计壁厚；铸型硬度高、冷却慢，有利于金属液补缩铸件，可以减小冒口尺寸，提高工艺成品率。
- ④ 工艺装置寿命长。V 法造型脱模力很小，模型不受振击，不受高温高压；型砂很易溃散，落砂时不受锤击。
- ⑤ 操作条件大为改善。由于造型、浇注一直用真空泵向外抽气，空气污染少。铸件清理后无需处理大量废砂。
- ⑥ 生产便于组织和管理。V 法生产周期短、工艺简便、操作容易。
- ⑦ 适用范围广。既适用于手工操作的单件小批量生产，也适用于机械化生产。铸件的尺寸规格大小仅受砂箱尺寸和真空泵抽气率的限制，比湿砂型铸造技术上的限制要小。
- ⑧ 造型操作比较复杂，小铸件的造型生产率不易提高。
- ⑨ 塑料薄膜的伸长率和成形性的限制，影响该法进一步扩大应用范围。

综合 F 法、M 法、V 法这三种方法各自的优点，一种以实型的泡沫塑料模，干砂法或磁力造型采用的无黏结剂干燥的造型材料，与 V 法的抽真空措施相结合的新的造型方法——实型真空（或负压）造型法（简称 FV 法）应运而生。这种利用泡沫塑料模和干砂（包括干燥的、无黏结剂的石英砂，铁丸或钢丸），借助重力、磁力或真空负压等物理方法紧实铸型的造型方法，称之为消失模铸造法。

20 世纪 70 年代中期，美、日、英、德、意等相继建造了消失模铸造生产线、专业车间和专业厂。在推动和发展消失模铸造法的过程中，国外的塑料、化工和机械行业皆做了大量的工作。自动发泡成形机、机械手装配模样和耐火涂料的自动涂装设备相继诞生，这都为大量生产消失模铸件提供了方便，也是推广这项新技术必不可少的重要条件。

在成功地应用实型铸造的基础上，结合其他新材料、新技术的试验研究，进而发展形成了实型空腔法、实型精密铸造、实型陶瓷型铸造等方法。实型空腔法就是用泡沫塑料模进行造型呈实体铸型，此后用物理或化学的方法除去泡沫塑料模以形成空腔铸型，浇入金属液后得到实型铸件。实型精密铸造或实型陶瓷型铸造就是用泡沫塑料模代替熔模铸造中的蜡模或代替原陶瓷型铸造中的金属模（或塑料模或木模），然后在铸型焙烧和浇注前气化消失，最

后浇入金属液的一种铸造方法。这些方法，从造型法上都没有改变原实型铸造、原熔模铸造和原陶瓷型铸造的造型特点。

1.2 中国消失模铸造工艺的发展

中国对实型负压造型法的研究和开发几乎与国外同步，而且在20世纪70年代末已具备试生产条件，直至80年代末才初具生产规模。上海机械制造工艺研究所于1966年取得了工艺试验的初步成功，于同年底制得我国第一个大型（11t）铸钢件，继而在1967年和1971年分别投入了铸钢和铸铁件的生产应用；1970年和1974年又浇注成功了我国最大的重为50t的铸钢件和32.5t铸铁件；1974年，一机部二院和上海新华铸钢厂协作进行试验研究；1976年以来，华中理工学院与武汉工程机械厂、解放军3604厂与武汉重型机床厂、上海钢琴厂等相继进行了试验，均取得了成功并以手工或简单机械操作投入小批量生产；1978年，在武汉召开了一机部系统铸造行业负压实型工艺经验交流会议；1984~1986年，江南机械厂研究试验V法铸造军品铸件亦获得成功。初期，由于塑料薄膜（EVA）和机械化配套设备没有供应厂商，致使我国V法推广和应用受到影响；直至1988年10月，由沈阳重型机械厂和机电部济南铸锻机械研究所合作研制的第一条生产线投产，这对推动V法在我国的深入研究和广泛应用都起到了重要作用。

我国研究和发展的消失模铸造法的历程与国外基本相似。在泡塑模样的加工与制造、涂料等方面已接近或达到国外先进技术水平。20世纪80年代后，有多家制造可发性聚苯乙烯预发泡机和发泡成形机等系列产品的专业厂，数家专业机模厂和生产泡沫塑料黏结剂的专业厂，5~7家工厂采用消失模铸造法生产大批量铸件，十余家工厂生产中大型单件小批量铸件，有5~7家从事消失模铸造研究的单位。

在消失模铸造方面所生产的铸件已从早期的磨球、衬板、管状铸件逐步发展到生产曲轴、箱体、阀门、缸体类铸件，近几年又进而发展到生产汽车和柴油机部件，如制动盘、排气歧管和缸盖等较复杂铸件。

我国的消失模铸造虽与工业先进国家相比还有一定差距，但在应用上是成功的；在生产方式上也从单件大中型铸件、大批量中小铸件并举发展，进而转向以大批量消失模铸造为主；在技术上已日趋成熟，并具有一定水平；已有部分产品，如管状铸件、制动盘、机体箱、翼（飞）轮和排气管等铸件进入国际市场。

目前，国际市场对我国铸件出口需求量与日俱增，这无疑给适宜采用负压实型铸造的我国广大中小企业带来极好的机遇；可以预料，EPS技术不仅可在我国汽车、柴油机等行业的大中型企业中得到较快发展，而且将在我国广大乡镇和私营中小铸造厂获得广阔的发展前景。这已成为当前中国负压铸造领域发展的一大特色。

1.3 有色合金消失模铸造的适用性与经济性

1.3.1 消失模铸造的适用性

每种新的铸造方法出现都有它一定的使用范围，消失模铸造方法也不例外。

(1) 对铸型材质的适用性

理论上，凡是可铸造的金属都可以采用消失模铸造法，在这一点上其适应性甚至超过

砂型铸造。例如，普通砂型铸造不能用于钛合金铸造，但采用 SiC 砂的消失模铸造法可以用来浇注钛合金。从生产实践来看，目前用消失模铸造浇注过的铸件材质有普通铸钢、耐热合金钢、不锈钢、铁镍合金、普通铸铁、合金铸铁、球墨铸铁、铸铝合金和铸铜等。一般来说，铸造车间常用的金属材料都可用消失模铸造来浇注。

生产实践还表明，用该法浇注铸钢件、球墨铸铁件等熔点高的铸件材质时，表面较少粘砂，无飞边毛刺，容易清理，铸件的表面质量明显地优于砂型铸件。

(2) 对铸件大小的适用性

砂箱大小直接决定消失模铸件的大小，因此，消失模铸造对铸件大小的适用性要广泛得多，可以在同一振动工作台上旋转同尺寸的砂箱，因而可以十分方便地生产出各种大小的铸件。不过，由于泡沫塑料模型的强度低，加上埋型操作时填料不可能绝对均匀，模型容易变形，这就给浇注轮廓大、壁薄的铸件带来了一定困难。因此，从方便操作和现有工艺水平考虑，消失模铸造以浇注 2t 以下，尤其是 1t 以下的铸件为宜。

(3) 对铸件生产批量的适用性

最佳的生产批量必须考虑生产塑料模所需的模具成本，对于那些不需要模具（塑料模由机械加工成型）或模具费用很低的铸件，可以不考虑生产批量问题。但对于必须采用价格高昂模具或模具数量必须很多的铸件，计算一个最佳批量是必要的，以确保铸件生产成本不会太高。

(4) 对铸件结构的适用性

消失模铸造从工艺特点出发，特别适合于具有复杂结构（尤其是具有复杂内腔）、模样分型困难、造型困难的铸件。因而，消失模铸造为多品种、单件小批量及大批量铸件生产、为几何形状复杂的中小型铸件提供了新的生产途径。

1.3.2 消失模铸造的经济性

对于消失模铸造工艺的合理经济评估是非常困难和复杂的，正如其他传统铸造工艺一样，有一些类型的铸件非常适合于消失模工艺的生产，继而充分体现了其高度的经济价值，而另一些类型的铸件则可能并不适合这一工艺的应用。

下面仅就运用不同铸造工艺从事于同种铸件大批量工业化生产前提下，对消失模铸造工艺做一个经济性评估和分析。

1.3.2.1 消失模铸造工艺与传统的铸造工艺的经济性比较

对于同一种铸件应用不同的铸造工艺生产时，其经济价值优劣受到诸多因素的影响，而每种因素又由铸件的性能所确定。

表 1-1 对消失模工艺在应用于大规模工业化铸铝件生产时分别与传统的金属重力铸造工艺作了较详细的经济性比较。

表 1-1 消失模工艺与重力铸造工艺生产铸铝件的经济性比较

| 工艺过程 | 优点 | 缺点 |
|------|-------------------------------|-----------------------|
| 制模 | 简化工厂工程设计 取消砂芯 砂子可完全重复使用 | 增加了模型胶合面 模型仅能一次性使用 |
| 浇注 | 节约了金属合金用量 取消设置冒口 | 延长了铸件冷却时间 |

续表

| 工艺过程 | 优点 | 缺点 |
|------|--|----------------------|
| 铸件清理 | 无需去除冒口 减轻对铸件表面清丸工作量 消除铸造毛刺 | |
| 铸件质量 | 无需砂芯涂料 | 易出现变形引起几何尺寸的缺陷 |
| 机加工 | 减少了模具传统制造设备量 维修简易 因磨损少而使模具拥有长期寿命 | 因设计复杂和周期长而引发的初始模具高成本 |
| 投资 | 工厂设计水平高度灵活 总体具有经济规模 | 制模自动化程度降低 |

1.3.2.2 典型铸件的产品成本分析比较

下面是针对欧洲一些著名的汽车部件铸造公司在生产不同类型的铸铝件和铸铁件时所进行的分析比较。

表1-2是由一家意大利铸造公司在1994年对应用消失模工艺与金属型重力铸造工艺同时生产铝进气歧管所做的实际经济性比较。

表1-2 轿车发动机铝进气歧管铸造实际生产的经济性分析

| 工艺过程 | 消失模铸造 | 金属型重力铸造 | 工艺过程 | 消失模铸造 | 金属型重力铸造 |
|--------|-------|---------|--------|-------|---------|
| 相对可变成本 | | | 相对固定成本 | | |
| 合金材料 | 100 | 115 | 专项折旧 | 100 | 91 |
| 人力 | 100 | 204 | 总体折旧 | 100 | 100 |
| 能源 | 100 | 99 | 总费用 | 100 | 100 |
| 其他可变成本 | 100 | 63 | 总成本 | 100 | 117 |
| 模具维修 | 100 | 394 | | | |
| 模具折旧 | 100 | 173 | | | |
| 总的可变成本 | 100 | 127 | | | |

表1-3是最近做成的应用消失模工艺生产发动机铝缸盖与其他铸造工艺的经济性比较可行性预测。

表1-3 典型铝缸盖铸造生产经济性预测

| 工艺过程 | 相对成本 | | 工艺过程 | 相对成本 | |
|---------|-------|---------|-------------|-------|---------|
| | 消失模铸造 | 金属型重力铸造 | | 消失模铸造 | 金属型重力铸造 |
| 合金熔化及处理 | 90 | 100 | 投资(工厂与环保) | 100 | 100 |
| 砂型/模型 | 75 | 100 | 模具工装(制造和维修) | 55 | 100 |
| 浇铸 | 60 | 100 | 总成本 | 76 | 100 |
| 清理 | 91 | 100 | | | |

1.4 有色合金消失模铸造技术应用现状

1.4.1 国际上应用消失模铸造技术的情况

近年来消失模铸造技术在欧洲和美国得到迅速发展。汽车工业应用消失模铸造工艺的工厂在欧美越来越多，在其他行业的应用也不断扩大（见表 1-4）。

表 1-4 汽车零件应用消失模铸造的情况

| 铸 件 | 金 属 | 国 家 | 铸 件 | 金 属 | 国 家 |
|-------|-----|-----------|--------|-----|-----------|
| 轿车汽缸体 | 铝 | 美国、德国、意大利 | 进气管 | 铝 | 美国、德国、意大利 |
| 轿车汽缸体 | 灰铁 | 法国、德国 | 风冷闸盘 | 灰铁 | 法国、印度、意大利 |
| 轿车汽缸盖 | 铝 | 美国、德国、意大利 | 卡车托架 | 球铁 | 德国、瑞士 |
| 卡车汽缸盖 | 灰铁 | 英格兰、中国 | 柴油机泵体 | 铝 | 法国 |
| 曲轴 | 球铁 | 美国 | 轿车支架 | 铝 | 德国、意大利、美国 |
| 差速器 | 球铁 | 美国 | 汽车驱动系统 | 铝 | 德国 |

通用汽车公司于 20 世纪 70 年代开始消失模铸造技术的研究，于 1980 年在纽约州的 Massena 建立了一条小批量试验生产线，在 1981 年建成用于大批量生产 Oldsmobile 汽车的铝制引擎盖生产线。这是第一条真正意义上的工业用消失模铸造生产线。Massena 的消失模铸造生产线经过扩建至今仍然在运行。差不多同一时间福特汽车公司也在进行消失模铸造技术的开发，试制工作集中在位于俄亥俄州的克利夫兰市（Cleveland）的铸造厂，在 1981 年建成试验生产线。在欧洲，菲亚特（Fiat）也于 1983 年建成铸铝、1985 年建成铸铁消失模生产线，这些生产线于 21 世纪初归于 Teksid 名下并仍在运行。标致汽车公司在 20 世纪 80 年代于 Souchax 也建成了铸铁消失模生产线。1993 年德国宝马汽车公司开始建设一条年产 20 万只各种规格铝合金汽缸盖的消失模生产线，到 1995 年 5 月正式投产，成品率在 90% 以上，每天生产 1500 个铝合金汽缸盖。

1986 年通用汽车公司在 Massena 建成另一条大批量的消失模制模和浇注生产线，为 Chevrolet 生产铝合金缸体缸盖。随后通用汽车公司在肯塔基州的 Greenfield 建成为 Saturn 配套的消失模铸造生产线，生产铝合金缸体缸盖、球铁曲轴和壳体件。通用汽车公司还在密歇根州的 Saginaw 和俄亥俄州的 Defiance 分别建立了两处消失模铸造基地，为轻型卡车生产铝合金缸体缸盖。从此通用汽车公司确立了在世界上作为消失模铸造技术的龙头老大的地位。

福特汽车公司于 1984 年建成消失模铸造线大批量生产进气歧管并持续到 20 世纪 90 年代早期，随后福特汽车公司决定停止消失模铸造线的运行，进气歧管从外部供应商处采购，原消失模铸造线所占用的场地转而用于半永久模生产活塞头，从此福特汽车公司退出了消失模铸造工艺使用者的行列。

在美国消失模铸造技术的发展中另一个重量级的公司是 Mercury Marine，在 20 世纪 80 年代初期就介入了该技术的工业应用，该公司于 1984 年在威斯康星州 Fond du Lac 建立了消失模铸造线生产船用发动机铝合金缸体缸盖替代模铸工艺，于 2000 年在新址又建立了更新的消失模铸造线。

应用消失模铸造技术很成功的还有位于阿拉巴马州的 Citation Foam, 该公司从 20 世纪 80 年代末开始采用消失模铸造技术, 随后在 90 年代逐渐用消失模铸造完全取代了砂型铸造工艺, 产品涵盖铸铁和铸铝, 为汽车、卡车、电机等提供配套件。同样位于阿拉巴马州的 Mueller Corp. 也是消失模铸造技术的先驱和受益者, 拥有多条消失模铸造生产线, 生产消防栓及阀门部件。其他成功应用消失模铸造技术但规模相对不很大的有位于宾夕法尼亚州的 Advanced Cast Products (铸铁)、位于印第安纳州的 General Aluminum (铸铝)、位于阿拉巴马州的 American Foamcast (铸铝), 位于华盛顿州西雅图的 Irish Foundry 除了铸铝外, 是为数不多的使用消失模铸造技术生产铸铜件的。

消失模生产的铸件量近年来在美国持续增长。University of Alabama at Birmingham (UAB) 根据珠粒的销售量估计北美 (主要是美国) 在 2003 年使用消失模生产的铸件总量为: 铸铝 20 万吨, 占铸铝市场总量的 8.9%; 铸铁 30 万吨, 占铸铁市场总量的 3.3%。而在 2000 年, 这些数据则为: 铸铝 8 万吨, 占铸铝市场总量的 4.1%; 铸铁 9 万吨, 占铸铁市场总量的 0.9%。

日本久保田公司于 1987 年投产消失模铸造生产线, 虽生产面积不到 1000m², 但白区和黑区的设备布局十分紧凑、合理, 空间面积得到充分利用, 其主要产品为建筑用各种型号的异型管件, 其特点是壁薄和外形复杂, 但其产品表面质量 (包括泡沫模) 很好, 十分光洁和漂亮。

衣川铸铁株式会社和古久根株式会社, 消失模铸造生产规模皆不大, 月产分别在 90~170t, 但其共同的特点是生产效率高、铸件质量好。他们使用的白模材料有: 三菱油化公司的 EPMMA 和积水化工公司的 EPS; 涂料 (均为外购) 有: 高透气性的黄色涂料和低透气性的蓝色涂料。涂料均是浸涂一层, 厚度为 0.8~1.0mm, 另外, 涂料在浸涂和烘干时因不带有浇注系统, 从而提高了浸涂工序效率和烘房的利用空间。日本消失模铸造企业通常使用专业厂家特制的胶带纸实施模片组合, 该胶带纸薄而有韧性, 浇注后铸件表面几乎看不到有结合的痕迹。他们采用的造型用砂一般比我国细一个型号, 为 40~70 目, 有利于提高铸件表面光洁程度。

1.4.2 国内消失模铸造技术的应用情况

1965 年上海机械制造工艺研究所就开始研究消失模铸造技术。中国是较早开始研究消失模工艺的国家。消失模铸造技术自 20 世纪 90 年代开始在我国进入工业化应用, 经过十几年的发展, 我国的消失模铸造工业具有了一定的规模, 成为铸造工业的重要组成部分。消失模铸造技术也被国家重点推广而成为改造传统铸造业应用最广泛的高新技术。

20 世纪 90 年代后期, 部分厂家开始从国外引进整条消失模生产线或关键设备, 如第一汽车厂轻型发动机厂、全椒柴油机总厂、长沙发动机总厂、赤峰富龙集团铸业有限公司和合力叉车集团铸锻厂。这些厂家消失模生产线的建立提高了我国消失模铸造整体水平。我国干砂消失模铸件产量, 1997 年为 2 万吨, 1999 年为 4 万吨, 2001 年达 6 万多吨, 2003 年达 12 万多吨。

1.4.3 中国消失模铸造存在的问题

从 2003 年消失模铸件产量分析可以看出 (表 1-5), 中国消失模铸造的生产主要集中在铸铁、铸钢件上, 而铝合金等轻合金材质的消失模铸造的生产处于刚刚起步阶段。在技术水平上产学研的结合及专业化分工协作程度不高, 同时在消失模铸造的基础研究上尤其是轻合

金属材料的研究上还不够深入，与国外消失模铸造的差距是很大的。这主要表现为如下。

表 1-5 2003 年中国消失模铸件产量

| | 铸 铁 | 铸 钢 | 铸 铝 等 | 总 产 量 |
|-------|--------|-------|-------|--------|
| 产量/t | 113700 | 11840 | 60 | 125600 |
| 百分比/% | 90.5 | 9.4 | 0.1 | 100 |

(1) 基础理论研究工作薄弱

国外自 20 世纪 60 年代就开始针对消失模铸造的原辅材料及关键设备和技术，对不同的模样珠粒材料预发、发泡成形模样质量的影响，涂料工艺性能和工作性能的评定和控制，造型时干砂的充填和模样尺寸变化规律，不同浇注合金的充型和传热传质特点和对铸件质量的影响，旧砂回用与环保以及计算机数值模拟等方面均从不同角度做了大量、深入细致和系统的理论研究，这是国外应用 LFC 技术生产上虽遇挫折但仍取得如此大成绩的前提和保障。如美国铝合金消失模铸造技术的发展离不开 Alabama, Missouri, WPI, Tennessee 等大学大量系统的基础研究工作。我国自 20 世纪 80 年代末开始，由于研究院所和高校的介入和重视，做了一定的基础理论研究工作，对我国 EPC 铸造的发展起了有益作用。但是消失模铸造技术的基础研究还不够系统深入（如在轻金属消失模铸造技术上仅有几家研究单位），同时交叉学科参与研究的融合度不高，基本上是铸造技术人员进行研究，并且与生产应用厂家的联系不够紧密，这与国外相比差距是十分悬殊的。

(2) 分工协作与商品化配套程度差

国外从原辅材料到各种专用设备和全自动生产线的生产和供应方面均已实现了系列化和专业化配套。我国在消失模铸造的原辅材料和专用系列设备的国产化方面虽取得了较大进步，但质量和技术水平与国外相比仍有很大差距。

(3) 生产规模小、铸件的质量和复杂程度较低

国外自 20 世纪 80 年代中后期至今已采用高度自动化生产线大批量生产缸体和缸盖等复杂铸件，我国因基础研究的薄弱和关键技术的掌握不够，绝大多数生产企业是手工简易型生产，产品多为中等难度以下的黑色合金铸件。

1.4.4 消失模铸造技术的发展趋势

消失模铸造技术发展到今天，已日趋完善，理所当然地受到国内外企业的普遍重视。目前，欧洲、美国、日本等主要工业国家已广泛用于工业生产；我国一些科研院所、大专院校对此项技术进行了大量研究，有相当多的企业已建立了国内设计、国内制造的消失模铸造生产线，并皆取得优良的经济效益和社会效益。我国消失模铸造技术还有许多需要探索 and 研究的课题。例如：“白区”涉及到模具的 CAD/CAM、高分子预发泡材料和成形发泡工艺以及相关的预发、成形、胶合设备等多个方面；创建先进实用的模具 CAD/CAM/CAE 系统，开发高精度、高效率的制模机和粘合机，实现制模机和粘合机的系列化。又如：有色合金的消失模专用涂料，解决铝合金铸件针孔、疏松缺陷，建立更多轻金属合金（铝合金、镁合金等）铸件的消失模铸造生产线等。

美国铸造协会（AFS）的专家认为，消失模技术从发明至 1990 年经历艰苦漫长的“技术革新期”，此后经过技术的“成长壮大期”，其生产规模和技术水平迅猛提升，在 2010 年前后达到技术成熟期。笔者认为，今后消失模铸造技术的发展将主要集中在以下方面。

(1) 深入理解消失模铸造规律，建立可量化的消失模铸造生产标准管理体系

消失模铸造与其他传统空腔铸造工艺的主要区别在于金属液浇注前型腔中存在泡沫塑料模样，消失模铸造的各个工序和最终消失模铸件的质量均与此密切相关，要深入理解消失模铸造的规律必须对消失模铸造进行全面深入的研究。通过对模样材料、模具—模样—铸件整个过程的规律性认识，在生产中对白模质量、涂料性能和涂敷控制、造型和浇注过程建立量化的标准化管理体系，提供消失模铸造的质量和管理水平。

(2) 原辅材料和专用设备的技术水平更为发达

随着产品精密化、轻量化、集成化要求的发展，对应开发新型高强度、低残留、低发气量、低密度的轻合金消失模铸造专用模样材料、涂料和涂敷设备将极为关键。据报道，美国 StyroChem 公司开发的含溴化添加剂的 EPS 原料已在铝合金消失模铸造中推广应用。开发消失模与其他工艺方法（如低压铸造）的复合工艺方法将有利于消失模铸件的质量和生产效率的提高。

参 考 文 献

- 1 上海机械制造工艺研究所. 实型铸造技术资料选编. 上海: 上海科学技术出版社, 1986
- 2 梁光泽. 实型铸造. 第三版. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
- 3 马幼平, 许云华, 贾刘卡. 负压实型铸造及铸件质量. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- 4 陶杰. 消失模铸造方法与技术. 南京: 江苏科学技术出版社, 2003
- 5 黄天佑, 黄乃瑜, 吕志刚. 消失模铸造技术. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 6 董秀琦, 朱利娟. 消失模铸造实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2005
- 7 袁子洲, 张劲松, 陈秀娟. 消失模精密铸造工艺研究. 特种铸造及有色合金, 2003, (4): 46
- 8 叶升平, 吴志超. 北美和欧洲消失模铸造发展现状. 特种铸造及有色合金, 2004, (2): 58
- 9 梁光泽. 我国消失模铸造的现状. 机械工人, 2001, (12): 7
- 10 黄乃瑜. 对我国消失模铸造技术进一步发展的若干建议. 铸造技术, 2002, (5): 265
- 11 梁光泽, 黄卉, 范绍均. 对日本消失模铸造现状的考察. 特种铸造及有色合金, 2006, (4): 255
- 12 李伟. 消失模工艺在艺术品铸造中的应用. 特种铸造及有色合金, 2006, (5): 302