



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

无模铸造

单忠德 著



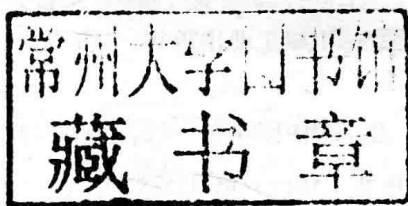
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家科学

出版社

无模铸造

单忠德 著



机械工业出版社

本书提出了无模铸造方法,给出了无模铸造的定义及成形原理。论述了无模铸造技术的背景、现状及发展趋势,无模铸造复合成形制造方法、算法及特点。总结了无模铸造数字化设计与数值模拟、铸型剖分与坎合组装、工艺数据库、型砂材料与复合铸型、自适应切削工艺等关键工艺技术。列举了砂型柔性挤压成形机、数字化无模铸造精密成形机、砂型切削打印一体化成形机、砂型/砂芯及铸件检测系统、砂型/砂芯柔性组装机械手和熔铸一体化成形机等复杂金属件复合成形关键设备,以及复杂铸件无模铸造复合成形应用案例。

本书适合从事铸造生产的技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生以及科研院所的科研人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

无模铸造/单忠德著. —北京:机械工业出版社, 2017.3

ISBN 978-7-111-56115-6

I. ①无… II. ①单… III. ①特种铸造 IV. ①TG249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 032683 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍

责任校对:肖琳 责任印制:常天培

封面设计:路恩中

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12.25 印张·232 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-56115-6

定价:89.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

高质量复杂铸件是航空航天、动力机械等高端装备的重要支撑。传统砂型铸造需要木模、金属模等模具的成形工艺,存在工序多、流程长、形性精确控制难、资源浪费、质量稳定性差等世界性难题,无法满足多品种、小批量、短周期、高精度、高性能的迫切要求,亟须新的铸造成形方法及装备。为此,在国家自然科学基金、国家 973 计划、国家科技支撑计划、国家 04 重大专项等项目支持下,提出了一种无须刚性模具的无模铸造精密成形方法。

历经 10 年,突破了复杂铸件高效率、高性能、高精度无模成形关键技术,取得了工艺方法、复合铸型、系统装备三个方面创新。提出了砂型/砂芯曲面柔性挤压近成形、切削净成形的无模铸造精密成形方法,开发了复杂砂型/砂芯曲面柔性挤压近成形技术、切削净成形技术及其复合成形工艺,研究出了形性可控的复合铸型技术及其型砂材料,研制出了复杂铸件无模成形数字化柔性挤压、切削成形系列装备。实现了复杂铸件无模化、高精度、高效率制造。制造周期缩短 50%以上,成本降低 30%以上。发动机缸体缸盖铸件废品率从 5%~10%降至 2%~4%,减重 10%~20%。铸件精度提高了 2~3 个等级,可达 CT8。

本书从无模铸造工艺方法、复合铸型及型砂材料、软件系统及装备等方面,系统总结了无模铸造技术的最新科研成果及典型应用案例。全书以大量实验数据为依据,以广西玉柴机器股份有限公司、一汽铸造有限公司、第一拖拉机股份有限公司等企业典型案例,对无模铸造关键技术及装备进行了论述与总结,推动铸造行业向数字化、绿色化和智能化方向发展。

本书由单忠德著。在本书编写过程中,得到了刘丰、战丽、梁清延、李锋军、边庆月、李克锐、任永新、张敏等的帮助,刘丽敏、李艳征、张帅、张飞、孙福臻、侯明鹏、董晓丽、徐继福、顾兆现、兰盾、郭智、赵洪锋、张密兰、陈少凯、宋祥宇、李杰、周梁坚、杨永泉、邵星海等整理了资料,广西玉柴机器股份有限公司、一汽铸造有限公司、第一拖拉机股份有限公司等企业提供了典型案例,在此向上述个人与单位表示深切谢意!

本书适合从事铸造生产的技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生以及科研院所的科研人员学习参考。

由于时间仓促和水平有限,书中内容不恰当之处敬请读者批评和指正。

单忠德

目 录

前言

第1章 引言	1
1.1 铸造行业背景	1
1.2 传统有模铸造技术	2
1.2.1 基于木模、金属模的传统铸型制造技术	2
1.2.2 传统有模铸型制造技术的优缺点	4
1.3 直接铸型快速制造技术发展现状	5
1.3.1 基于激光的选区烧结成形技术	5
1.3.2 基于微滴喷射的砂型/砂芯增材制造技术	8
1.3.3 挤压-切削一体化无模铸造复合成形技术	10
1.4 无模铸造技术的发展趋势	12
第2章 无模铸造复合成形制造	13
2.1 无模铸造成形技术的方法及原理	14
2.2 复杂砂型无模铸造复合成形算法及评价数学模型	16
2.2.1 基于随机增量算法的型腔位置求解方法	16
2.2.2 数字化挤压砂型优化目标数学建模	18
2.2.3 无模铸造复合成形多轴联动加工成形数学建模	18
2.2.4 无模铸造多轴联动加工方法	20
2.2.5 无模铸造成形过程路径优化数学模型	25
2.3 无模铸造技术的特点及优越性	28
2.3.1 无模铸造技术的特点	28
2.3.2 无模铸造技术的优越性	29
第3章 无模铸造数字化设计与数值模拟	31
3.1 铸件/铸型一体化数值模拟	31
3.2 铸造模拟仿真与工艺优化	32
3.2.1 传动箱壳体的铸造模拟仿真及工艺优化设计方法	33
3.2.2 铝合金横梁的铸造模拟仿真及工艺优化设计方法	34
3.3 复杂铸型无模铸造评价方法	37
3.3.1 复合铸型成形方式选择与加工效率评价	37
3.3.2 复合铸型复杂度评价	38
3.4 复杂铸件剖分	39
3.4.1 铸型的剖分原则	39
3.4.2 铸型剖分实例分析	40

3.5 铸型坎合组装技术	42
3.5.1 砂型坎合组装方式结构设计	42
3.5.2 砂型坎合组装方式有限元分析	44
3.5.3 砂型坎合组装方式实验研究	47
3.5.4 复合铸型坎合组装原则	49
第4章 无模铸造复合成型型砂材料及其配方	50
4.1 型砂热物性性能及型砂抗拉强度实验	50
4.1.1 型砂热物性性能实验	50
4.1.2 型砂抗拉强度实验	52
4.2 型砂切削机理及性能	58
4.2.1 型砂切削机理	58
4.2.2 型砂切削性能	62
4.2.3 型砂目数对刀具磨损的影响	62
4.3 型砂铸造工艺性能	63
4.3.1 碱性酚醛树脂砂铸造工艺性能	64
4.3.2 呋喃树脂砂铸造工艺性能	65
4.3.3 覆膜砂铸造工艺性能	66
4.3.4 水玻璃砂铸造工艺性能	67
4.4 多材质自适应复合铸型工艺	69
4.4.1 铸型材料对铸铁件温度场、金相组织及力学性能的影响	69
4.4.2 不同造型材料对铸铁件尺寸精度的影响	74
第5章 无模铸造复合成型工艺	75
5.1 加工参数对加工精度、切削力及切削温度的影响	75
5.1.1 加工参数对加工精度的影响	75
5.1.2 加工参数对切削力的影响	78
5.1.3 加工参数对切削温度的影响	83
5.2 砂型加工切削工艺参数优化	85
5.2.1 基于高加工精度的工艺参数优化	85
5.2.2 基于低切削力的工艺参数优化	86
5.2.3 薄壁砂型加工切削工艺参数优化	88
5.3 自适应加工及切削/打印一体化工艺	91
5.3.1 自适应加工原理	91
5.3.2 砂型高速高精自适应加工模糊控制	91
5.3.3 砂型切削/打印一体化工艺	92
第6章 复杂金属件复合成型成套关键设备	94
6.1 砂型数字化柔性挤压成形机	94

6.1.1 柔性挤压成形机的数字化阵列触头	95
6.1.2 砂型数字化挤压成形机控制系统	96
6.1.3 砂型数字化柔性挤压成形机	100
6.2 数字化无模铸造精密成形机	102
6.2.1 主体结构设计与优化	102
6.2.2 运动系统轻量化设计与优化	104
6.2.3 成形机专用五轴头结构设计与优化	106
6.2.4 多喷嘴随动排砂及吸尘、防尘系统开发	107
6.2.5 无模铸造砂型切削专用刀具	109
6.2.6 无模铸造精密成形机专用软件系统	113
6.2.7 系列化无模铸造精密成形机	117
6.3 砂型切削/打印一体化成形机	118
6.3.1 主体结构设计	119
6.3.2 数控系统	119
6.4 砂型/砂芯及铸件检测系统	122
6.4.1 砂型/砂芯智能检测系统	122
6.4.2 铸件智能检测系统	123
6.5 砂型/砂芯柔性组装机机械手	126
6.6 熔铸一体化成形机	127
6.6.1 熔铸一体化成形设备结构设计	127
6.6.2 熔铸一体化成形设备控制系统开发	128
6.6.3 熔铸一体化成形机技术参数	129
第7章 复杂铸件无模铸造复合成形应用案例	131
7.1 典型案例	131
7.1.1 缸体类零件的无模铸造	131
7.1.2 缸盖类零件的无模铸造	140
7.1.3 复杂薄壁壳体件的无模铸造	148
7.1.4 工艺品金属件的无模铸造	152
7.1.5 新工艺的快速验证	155
7.2 应用领域	161
7.2.1 汽车、舰船发动机关键零部件	161
7.2.2 轨道交通、水利电力领域关键零部件	167
7.2.3 农机装备等关键零件	170
7.2.4 模具、机床等行业关键零部件	177
参考文献	183

第1章

引言

1.1 铸造行业背景

铸造是人类掌握比较早的一种金属热加工工艺,迄今已有约 6000 年的历史,是机械行业铸、锻、焊、机加工四大主流成形制造技术之一,在制造业中占据着很大比例,在整个国民经济中占有重要的地位和作用,是制造业的重要组成部分。铸造是机械产品毛坯的主要提供者,从汽车、机床到航空航天、国防军工及日常生活均需铸件,例如汽车的“心脏”——发动机的关键零件,如缸体、缸盖、进排气管等八大件几乎全部由金属铸件构成;航空航天的重、大、难装备中,金属铸件都占很大比重并具有重要作用。目前,汽车铸件超过 24%,机床、液压泵阀和通用机械铸件占 65%~80%。铸件在机械产品中所占的质量大致为:在机床、内燃机、重型机械中占 70%~90%;在风机、压缩机、动力机械中占 60%~80%;在农业机械中占 40%~70%;在交通、运输车辆中占 15%~70%。

目前,我国是世界上最大的铸件生产国,铸件产量连续 15 年世界第一。据统计,2015 年我国各类铸件总产量 4560 万 t,我国铸造企业约 2.6 万余家,200 多万人从业。我国每年铸件出口总量占铸件总产量的 5%左右,2015 年中国各类铸件出口量为 194.43 万 t,铸件出口总金额为 28.86 亿美元。

然而,我国铸造工艺落后,劳动强度大,周期长,成本高,数字化水平非常低,污染物排放是发达国家的 3~5 倍。我国铸造行业的能耗占机械工业能耗的 23%~62%,消耗的能源主要是焦炭、煤、电、氧气、水等,目前我国铸造行业的能源利用率仅为 17%,铸造生产的综合能耗是发到国家的 2 倍,节能潜力很大。据统计,中国制造业铸件生产过程中材料和能源的投入约占产值的 55%~70%。每生产 1t 合格铸铁件的能耗为 550~700kg 标煤,国外为 300~400kg 标煤;每生产 1t 合格铸钢件的能耗为 800~1000kg 标煤,国外为 500~800kg 标煤。工业发达国家铸造技术的发展目标是降低能耗,保护环境,减少污染。传统铸造造型需要借助模样/模具,存在劳动强度大、制模周期长、废弃物排放多、数字化制造水平低等问题,且产品设计一经改动,模样/模具就需要重新制造,严重影响新产品开发速度和成本,造成资源重复浪费,难以满足其

制造精度高、质量高、周期短、性能优等要求。

随着铸造零件向集成化、精确化、轻量化发展,金属铸件结构日趋复杂化和大型化,增加了新型铸件研发的难度。采用有模铸造进行汽车发动机、航空发动机、导弹发射架等复杂铸件的开发,存在着投入高、质量差、效益低等问题,尤其是涉及国防军工、航空航天等关系到国家安全的内外结构复杂金属件成形制造关键技术及装备,成为我国重大工程建设和行业发展的瓶颈。高质量铸件需要高质量的铸型,铸型的制造周期、加工质量、尺寸精度、砂型性能直接影响到铸件的质量和交货周期,如何高速高效、智能化、绿色化制造高质量铸件,一直是国内外技术研究的热点和难点。

我国在大型复杂金属件单件、小批量制造和自主开发中,还存在着较大的差距:缺乏新产品自主开发技术和装备,制约汽车等行业自主研发步伐;有模制造周期长、成本高,难以满足汽车等小批量、个性化发展需求;铸型制造工艺落后、加工余量大,导致铸件原材料浪费、成品率低;国外技术垄断和产品壁垒,使国内以航空发动机等为代表的复杂高质量铸件制造受制于人。

1.2 传统有模铸造技术

铸造技术主要分为砂型铸造、金属型铸造和特种铸造等。砂型铸造工艺具有原材料丰富,生产工艺简单,应用合金种类广泛等特点。目前世界上大部分的铸件仍由砂型铸造方法获得。对于传统的砂型铸造工艺,模样、芯盒等模具的设计和加工制造是一个多环节的复杂过程,其加工方式受制于模具的复杂程度,使得产品的研发和定型周期变长且成本提高,不适合进行单件、小批量产品的研发与生产制造。

1.2.1 基于木模、金属模的传统铸型制造技术

传统的铸造工艺包括了铸型的制备、合金熔炼及浇注、落砂清理等几个相对独立的工艺过程。传统的砂型铸造工艺流程如图 1-1 所示。首先根据金属件的 CAD 模型设计铸型和制造铸型所用的模具,通过手工或数控加工等方式制造木模、金属模、塑料模等模具,然后通过翻模得到砂型和砂芯,再合箱浇注出金属件。在砂型铸造过程中,砂型用来形成铸件的外轮廓形状和尺寸,砂芯用来形成铸件的内腔形状和尺寸。其中,制造砂型的过程简称造型,制造砂芯的过程简称制芯。

铸型是砂型和砂芯组合的统称。铸型一般由上型、下型、型芯、型腔和浇注系统等部分组成,如图 1-2 所示。上型与下型间的接合面称为分型面。铸型中造型材料所包围的空腔部分,即形成铸件本体的空腔,称为型腔。液态金属

通过浇注系统流入并充满型腔，产生的气体从出气口、砂型、砂芯等处排出铸型。造型、制芯是铸型制备过程中复杂而又重要的工序，铸件缺陷的 30%~60% 都是由造型和造芯所造成的。

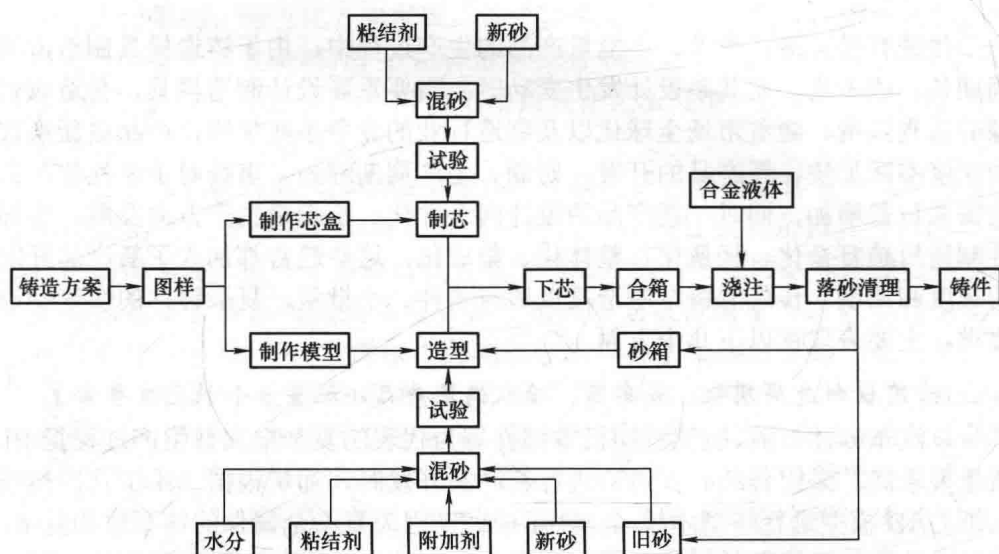


图 1-1 传统砂型铸造工艺流程

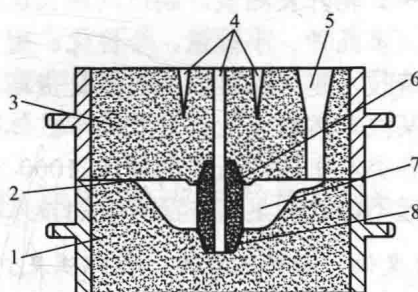


图 1-2 铸型装配图

1—下型 2—分型面 3—上型 4—排气孔 5—浇注系统 6—砂芯 7—型腔 8—砂芯座

目前，传统的造型方法通常分为手工造型和机器造型两大类。手工造型是由人来完成紧实与起模。手工造型操作灵活，工装简单，但劳动强度大，生产率低，常用于单件和小批量生产。机器造型是指机器全部完成或至少完成紧实和起模操作的造型工序。该方式主要采用模底板进行两箱造型。模底板是将模样、浇注系统沿分型面与底板联结成一个整体的专用模具。造型后，底板形成分型面，模样形成铸型空腔。机器造型生产效率高，劳动条件好，铸件精度高，表面质量较好，但设备投资较大，对产品变换的适应性较差。机器造型适用于

大批量生产各类铸件。

1.2.2 传统有模铸造型制造技术的优缺点

传统有模铸造在单件、小批量产品的生产过程中，由于铸造模具制造占用周期长、成本高，尤其是设计发生变动时，需要重新设计制造模具，会造成资源的重复浪费。随着市场全球化以及制造行业的竞争不断加剧，产品更新换代的速度不断加快，新产品的开发、研制、生产周期缩短，市场对于个性化产品的需求日益增加。同时，新产品的的设计向个性化、小批量生产方向发展，零部件制造日趋复杂化、轻量化、整体化、集成化，这些趋势都加大了新产品开发的难度和周期。传统的铸型制造难以适应单件、小批量、复杂铸件的快速制造要求，主要表现在以下几个方面。

1. 有模制造周期长、成本高，难以满足产品小批量、个性化发展需求

以汽车缸体缸盖、航空发动机零部件等为代表的复杂金属件生产过程复杂，质量要求高。采用传统有模铸造进行新产品开发时，都是根据二维工艺图样或三维 CAD 模型进行铸型木模/金属模的加工，因为复杂金属件的铸型结构复杂，模具设计和加工周期长，需要多套模具，若形状发生变动则需重新开模。例如发动机缸体、缸盖开发，传统工艺至少需要 3~6 个月，需要 10~15 套模具，发动机定型至少需要 3~5 轮开发测试，制造周期长达数月甚至一年以上。随着市场竞争的日趋激烈，多品种、小批量、个性化、短周期的发展趋势变得日益明显，传统的有模制造技术越来越难以应对短交货期、高精度、低成本铸件制造的迫切需求。例如某汽车铸造企业年开发汽车缸体、缸盖、进排气管、曲轴、桥壳、变速器壳体各类汽车铸件新产品就达 1000 余种，采用以往的产品开发技术和手段已经远远不能够满足新产品开发的技术、质量和速度要求。

2. 传统有模铸造精度低、材料浪费大，难以满足产品快速制造的高精度、低成本要求

在汽车、航空航天、船舶等关键铸件的研发中，对铸造产品质量要求越来越高，除强调少、无余量铸造以外，还要求铸件结构的整体化与集成化，使铸件的结构日趋复杂化和大型化。采用传统有模铸造，整个过程环节较多，人为影响因素大，存在精度损失，难以制造出高精度、表面质量好的铸型。传统铸型生产方法的不确定性和复杂性制约了其铸件尤其大型复杂铸件的快速生产。

3. 传统有模铸造浪费木材、金属模具等材料，加工余量大，实现绿色铸造难

在大型零部件的设计制造中，大都为是单件、小批量生产，传统的铸造方法采用木模、金属模等造型，消耗了大量的木材，且铸件加工余量大，原材料消耗多；缩松、缩孔、裂纹等缺陷多，焊补修复量大，加工余量和模具数量的

减少将使能源消耗和材料消耗大幅度降低。此外,传统铸造加工环境的开放,粉尘污染大,实现清洁化生产制造难。

目前 80%以上铸件依靠木模、金属模等翻砂铸造。随着铸造零件向集成化、精确化、轻量化、绿色化方向发展,铸件制造难度大幅度提升,如航天器、核电机组等大型结构复杂铸件,砂型铸造至少需 10~12 套模具,耗时 2~3 个月,成本 90 万~120 万元;甚至一些好的结构设计无法造型,严重阻碍我国汽车、航空航天等工业自主创新。

如何解决我国铸造成形制造中存在尺寸精度低、表面质量差、性能稳定性差和资源消耗大等问题?如何制造高质量铸型及高性能复杂铸件等问题?本书作者提出了复杂铸件无模铸造复合成形制造方法,率领团队与企业合作研制出无模铸造复合成形关键技术与装备,相关研究获得国家杰出青年科学基金(项目编号:51525503)、国家“高档数控机床与基础制造装备”重大科技专项《大型数字化无模铸造精密成形关键技术及装备》(项目编号:2012ZX04007011)、科技部 973 计划《金属件无模数字化成形技术及设备基础研究》(项目编号:2010CB736001)、北京市科技计划《大型五轴无模铸造数控成形机开发》(项目编号:Z121100001612004)等国家和地方科技计划资助。与广西玉柴机器股份有限公司(简称广西玉柴)、中国第一汽车集团公司(简称中国一汽)、中国一拖集团有限公司(简称中国一拖)、东风汽车股份有限公司(简称东风汽车)、江苏理工学院等合作研究,并进行了应用推广。复杂铸件无模复合成形方法,具有数字化、速度快、精度好、资源节省等特点,实现了复合造型,拓展了成形制造方法、理论及装备,为解决大型复杂高质量铸件制造瓶颈及铸造行业绿色发展提供了重要方法及途径。

1.3 直接铸型快速制造技术发展现状

以数控加工、增材制造为代表的数字化制造技术为快速铸造尤其是砂型的快速制造提供了更加便捷、更加柔性的手段。按照使能技术,砂型的快速制造技术主要分为三大类:基于激光的选区烧结成形技术(SLS)、基于微滴喷射的砂型砂芯增材制造技术和挤压-切削一体化无模铸造复合成形技术。上述三类技术都是采用三维 CAD 模型驱动,实现了数字化设计和数字化制造的无缝连接。

1.3.1 基于激光的选区烧结成形技术

SLS(Selective Laser Sintering)工艺称为选择性激光烧结,由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C.R. Dechard 于 1989 年研制成功。该方法已被美国 DTM 公司商品化,推出了 SLS Model125 成形机。SLS 技术的出现为快速制造铸造砂型提供了解决方案,主要技术是覆膜砂 SLS 技术,也有直接烧结硅砂技术。但由

于直接烧结硅砂成形速度慢,制造周期长且对设备的要求高,因而该技术并未广泛应用。覆膜砂 SLS 技术是指烧结覆在原砂表面的热塑性粘结剂,使其固化粘结砂型。常用的粘结剂是酚醛树脂粘结剂,由于其固化温度不高,对激光器的功率要求低,但同时由于其粘结的初始强度低,成形件的孔隙较多,需经过进一步的后处理,进行二次固化,固化温度一般控制在 $200\sim 280^{\circ}\text{C}$ 。常用的固化方法主要有热等静压 (HIP) 法、液相烧结 (LPS) 法、高温烧结法和熔浸法。

比利时鲁汶大学对 SLS 的粘结机理进行了深入的研究,认为烧结机理主要包括固体颗粒的直接烧结、化学作用诱导的烧结及含有粘结剂颗粒熔融液相烧结。固体状态的烧结使固体颗粒之间形成烧结颈连接彼此,如图 1-3 所示。化学作用诱发的烧结是指例如 SiC 固体颗粒高温分解成 Si 原子和 C 原子, Si 原子遇到 O_2 生成 SiO_2 , 构成了熔点相对较低的烧结体系。液相烧结是指细小的低熔点的固态粘结剂颗粒均匀分布在砂粒之间,当激光作用时,固态粘结剂熔化成液体,粘结剂液体浸润砂粒引起砂粒的重新分布,后处理使粘结剂发生固化粘结砂粒。

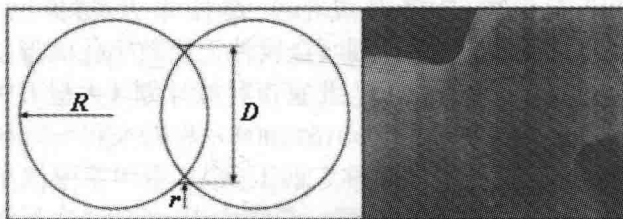


图 1-3 固体颗粒烧结颈的模型

新加坡国立大学的 X.H.Wang、J.Y.H.Fuh 等人研究了直接 SLS 无模精密砂型制造技术。他们研究了砂粒的粘结机理,利用能量色散 X 射线光谱仪分析了砂粒,研究认为砂粒中钙、镁、铝及含氯量构成了低熔点共熔体,在 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$ 发生部分熔化,熔化的液相将部分砂粒彼此粘结。研究了激光功率和扫描速度这两个主要参数对成形线宽、成形层厚、成形砂型强度及表面质量的影响规律,以及改善成形砂型密度、强度、表面质量的方法,通过在砂型表面渗透硅酸钠水溶液后加热固化成形最终砂型,可以获得强度高、表面质量好的砂型。

华中科技大学史玉升、李杰、沈其文等人对选择性激光烧结宝珠覆膜砂的固化特性进行了研究,揭示了不同的后处理工艺对成形砂型标准试样的抗拉强度和发起量的影响规律,研究了选择性激光烧结 Al_2O_3 覆膜砂的固化特性及后处理工艺,分析了原砂配方、粘结剂含量、后处理工艺参数对成形砂型的强度和发起量的影响规律。 Al_2O_3 覆膜砂颗粒的球形度要好于石英覆膜砂,因而总的粘结表面积要小于石英覆膜砂,在粘结剂含量相同的情况下,颗粒表面粘结剂层要比石英覆膜砂的厚,因而成形砂型强度高于石英覆膜砂。表面后处理过程中添加支撑材料会在一定程度上提高砂型的抗拉强度。南昌航空大学的李偲偲、徐志锋等人研究了应用 SLS 烧结覆膜砂用于镁合金铸造过程的阻燃机理,研究了喷涂涂料法和添加复合阻燃剂两种镁合金铸造阻燃试验,阻燃剂材料主要由碳粉、硫铁矿粉、硼酸组成,镁合金精炼处理后,重力浇注得到镁合金铸

件, 添加阻燃剂得到的镁合金铸件表面光滑, 无粘砂现象。

目前, 国内外制造 SLS 设备的公司主要是德国 EOS 公司、我国的北京隆源自动成形系统有限公司以及武汉滨湖机电技术产业有限公司等单位, 它们分别推出了各自的 EOSINT、AFS 和 HRPS 的 SLS 工艺成形机。德国 EOS 开发的砂型砂芯激光选区烧结 EOSINT S750 成形机, 据报道目前最大成形尺寸为 $720\text{mm} \times 380\text{mm} \times 380\text{mm}$, 堆积速度为 $2500\text{cm}^3/\text{h}$, SLS 工艺用于制造铸型型壳, 若选用粒度较细的陶瓷粉和覆膜砂、较小的分层厚度, 可以得到表面质量较好的铸型 (图 1-4)。北京隆源自动成型系统有限公司于 1994 年成功开发出第一台激光快速成形机, 其开发的大型激光烧结成形机 LaserCore-7000 (图 1-5), 采用 100W 射频 CO_2 激光器、动态聚焦高精度扫描振镜, 成形缸空间为 $1400\text{mm} \times 700\text{mm} \times 500\text{mm}$, 扫描速度为 6000mm/s , 可以烧结塑料、精铸模料、覆膜砂等材料。武汉滨湖机电技术产业有限公司依托华中科技大学快速制造中心开发了 SLS 工艺的系列化 3D 打印成形机, SLS 工艺成形机可以成形聚合物、覆膜砂、陶瓷等多种成形材料。HRPS-VIII 成形机 (图 1-6), 其成形空间为 $1400\text{mm} \times 1400\text{mm} \times 500\text{mm}$, 扫描速度为 7000mm/s , 成形层厚为 $0.08 \sim 0.3\text{mm}$ (可调), 成形精度为 $\pm 0.2\text{mm}$ ($L \leq 200$)。

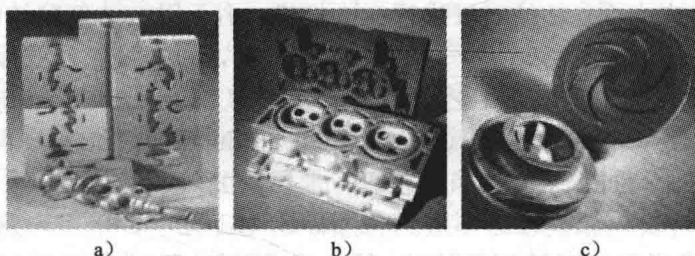


图 1-4 德国 EOS 公司基于 SLS 工艺的快速铸造产品

a) 曲轴 b) 缸体 c) 叶轮

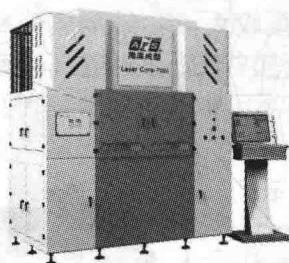


图 1-5 北京隆源 LaserCore-7000 成形机



图 1-6 武汉滨湖 HRPS 系列成形机

基于激光选区烧结可以直接快速制造砂型/芯, 也可以通过制造蜡模、消失模后间接制造铸型/铸芯。激光选区烧结成形的材料若是改性聚苯乙烯粉末颗粒或者蜡粉, 通过层层铺粉, 激光逐层选区烧结成形, 进行熔模铸造。激光烧结砂型成形主要是适用于热固性覆膜砂, 可用于制造特别复杂的砂型、砂芯, 已经得到广泛应用。但受成形设备成形空间和成形速度的限制, 一般适合中小尺

寸、复杂砂型制造，存在成形后需加热强化砂型/砂芯强度，加热后砂型/芯尺寸易变形，砂型制造成本高、透气性较差，浇注过程中发气量较大等问题。

1.3.2 基于微滴喷射的砂型/砂芯增材制造技术

近年来，砂型/砂芯冷打印技术在欧洲获得了快速发展，基于微滴喷射的砂型/砂芯增材制造技术采用将固化剂或者粘结剂中的一种与原砂预混，然后逐层铺设预混砂粒，再采用阵列打印喷头受控喷射另一组分，实现每一层砂的打印成形，层层打印直至成形砂型/砂芯。在 CAD 环境中，直接将零件模型转换为壳型，再配以浇冒口系统。3DP (Three Dimensional Printing) 工艺称为三维印刷，采用逐点喷洒粘结剂来粘结粉末材料的方法制造原型。该工艺最早由美国 MIT 研究成功，Soligen、Z Corp. 等公司将其商品化。3DP 工艺与 SLS 工艺类似，采用粉末材料成形，如陶瓷粉末、金属粉末。所不同的是材料粉末不是通过烧结连接起来的，而是通过多通道喷头用粘结剂（如硅胶）将零件的截面“印刷”在材料粉末上面，粘结时只进行一次扫描，由于用粘结剂粘结的强度较低，还必须将其置于加热炉中，进一步地固化或烧结，以提高粘结强度。目前应用于铸型制造的典型快速成形工艺主要包括 PCM (Patternless Casting Modeling) 无木模铸型制造工艺、DSPC (Direct Shell Production Casting) 直接壳型铸造工艺和德国 GS (Generis sand) 工艺等。主要情况如下：

PCM 是将快速原型理论引进到树脂砂造型工艺中，采用轮廓扫描喷射固化工艺，实现了无模型铸型的快速制造。该工艺由清华大学研制成功，并推出了商品化机型。该工艺采用传统树脂砂工艺中的水洗砂、树脂和固化剂，原材料的准备过程与传统工艺相同，铸型强度高，无须特殊的后处理，尤其适合制造大中型铸件。但该工艺对树脂砂的用量较大，粘结剂成分高，进而导致成形精度不高，且成形获得的铸型透气性差，不适合对透气性要求高的大型铸件的制造。

美国 Soligen 公司根据 3DP 原理开发了 DSPC，该技术使用陶瓷粉末为造型材料，粘结材料选用硅溶胶。由于陶瓷粉末颗粒尺寸在 $75\sim 150\mu\text{m}$ ，DSPC 工艺造型的表面质量较高，但这种硅酸盐水溶液分层粘结起来的陶瓷铸型强度较低，必须经过焙烧之后才能用于浇注金属，如果是大型铸件的铸型就需要价格高昂、体积庞大的加热设备，所以 DSPC 工艺不适合大中型铸件的生产。图 1-7 为采用该工艺制造的铸型。

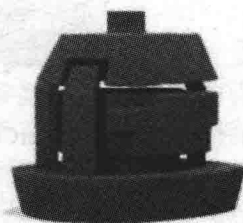


图 1-7 直接壳型制造的铸型

GS (Generis sand) 工艺由德国 Generis 公司开发，其工艺路线是将砂粒铺

平之后,先用多通道喷头向砂床均匀喷洒树脂,然后由一个喷头依据轮廓路径喷射催化剂,催化剂遇树脂后发生胶联反应,使铸型层层固化堆积成形,该工艺砂箱尺寸可达 $1500\text{mm} \times 750\text{mm} \times 750\text{mm}$,分层厚度可达 0.3mm ,可用于制造大中型铸型,但其缺点十分明显,由于树脂喷洒在整个砂床表面,铸型制作完毕后是在含有树脂的砂包围之中,这样给后续取砂型时清砂带来困难,需特殊处理工序,同时也影响砂型的精度和表面质量。图 1-8 为 GS 工艺设备及其制造的铸型及铸件。

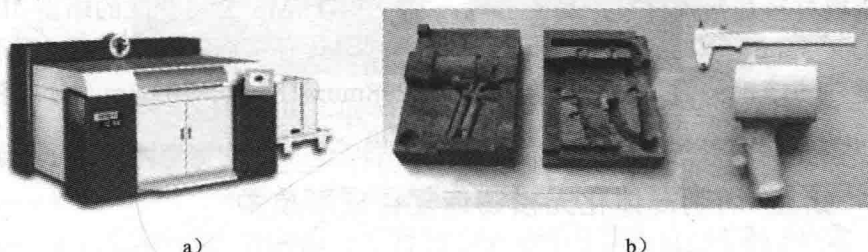


图 1-8 GS 工艺设备及其制造的铸型及铸件

a) GS 工艺设备 b) 铸型及铸件

由于采用阵列喷头,与激光烧结技术相比,打印效率比较高。德国 Voxelijet 公司和美国 EXOne 公司利用 GS 工艺原理,开发出大型砂型喷墨打印成形机,如图 1-9 所示。德国 Voxelijet 公司开发的大型砂型喷墨打印成形机 VX4000,成形尺寸达到 $4000\text{mm} \times 2000\text{mm} \times 1000\text{mm}$,分层厚度为 $120/300\mu\text{m}$,打印效率为 $123000\text{cm}^3/\text{h}$,采用 HP 阵列喷头,拥有 26560 个喷嘴,XY 打印分辨率为 600dpi。美国 EXOne 公司开发的大型砂型喷墨打印成形机 S-Max™ Furan,可以直接喷墨打印砂型和砂芯,成形尺寸为 $1800\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 700\text{mm}$,成形速度为 $60000 \sim 85000\text{cm}^3/\text{h}$,分层厚度为 $0.28 \sim 0.50\text{mm}$ 。砂型喷射打印成形主要适用于树脂砂,打印出来的砂型需要加热强化处理等,加热后砂型/砂芯尺寸易变形,并且树脂含量控制难,浇注过程同样存在发气量问题,尺寸精度相对低,设备昂贵,维护成本高。

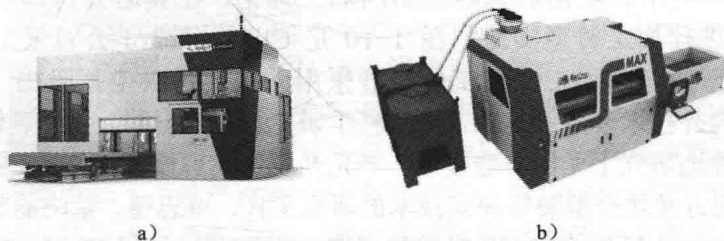


图 1-9 国外砂型 3D 打印设备

a) Voxelijet 公司砂型 3D 设备 b) ExOne 公司砂型 3D 打印设备

以微滴喷射和激光烧结为代表的堆积成形工艺在进行砂型制造时能够同时成形内外表面复杂的铸型，近年来在小型复杂金属件试制等方面取得一定进展，但是由于采用激光等使能技术运行和维护成本高，尤其是烧结或者粘结的铸型强度不足，如果增加粘结剂含量会导致发气量过大，此外还要进行长时间的加热固化等后处理，大型砂型和砂芯会出现变形，所以在实际大型、复杂金属件快速开发应用中受到了很大限制。

采用微滴喷射方式受控于喷射打印材料，层层打印得到成形蜡模，支撑材料和蜡模材料是两种材料，易于去除。3D SYSTEMS 公司开发的蜡型 3D 打印机 ProJet®3500CPXMax 就是采用上述技术打印具有精细结构的蜡模，用于小型复杂零件的熔模铸造，最大打印尺寸为 298mm×185mm×203mm，分层精度为 16~33μm，成形精度可达 0.025~0.05mm/in[⊖]。

1.3.3 挤压-切削一体化无模铸造复合成形技术

本书提出的数字化挤压-切削一体化无模铸造复合成形技术是快速成形、数控切削、数字化设计、精密铸造、特种刀具等技术的集成创新，是一种新的直接铸型快速制造方法，为传统的铸造行业提供了一种新的绿色、快速制造方法，给装备制造业零件及模具制造技术带来了革命性的变化。

目前德国、英国、西班牙等发达国家正在开展铸型切削加工成形研究，并尝试采用加工金属的数控机床直接进行铸型加工。西班牙 TECNALIA 研究院、巴斯克大学等人采用机械科学研究总院研制的无模铸造精密成形机，深入研究了数控加工砂型的方法，从铸件的三维实体经过反求工程 (Reverse Engineering, RE) 技术得到铸型的三维数字模型，再经过后处理得到铸型砂型的三维数字模型，制订加工路径加工出所需砂型。德国 AcTech 公司、METROM GmbH 公司等积极开展砂型切削加工技术研究，由欧洲共同体提供的研究基金资助、欧洲 14 个单位参加，英国谢费尔德的铸造开发中心也进行了铸型切削加工实验研究，由于省掉模型的加工与保管，所需时间由过去的数周缩减到数日，并提高了铸件精度。德国奥迪汽车股份有限公司与芬兰技术开发研究所，正在研究砂型切削加工理论，在奥迪公司车身试制中心的铸造车间进行加工铸型实验。图 1-10 是 Clinkenbeard 公司采用普通三轴铣床进行铸型的切削加工，加工的废砂采用人工手持吸尘器吸出。

结合国内外技术发展及需求，机械科学研究总院从材料、工艺、软件、装备等方面系统性地研究了无模铸造技术，率先开展了成形设备、刀具、排砂、成形工艺、砂型配方及坎合组装等关键技术的研究工作。单忠德、董晓丽等人研究了不同型砂配方的砂型强度和固化时间的规律，不同刀具材料加工型砂时刀具的磨

⊖ 1in=0.0254m。