

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

铸 造 工 程 基 础

主 编	魏华胜	
参 编	李远才	吴志超
	蔡启舟	樊自田
主 审	杨佳荣	林汉同
	黄乃瑜	



机械工业出版社

本书为材料成形及控制工程专业主干课程“材料加工工程”的专业方向教材之一。全书涵盖了专业改革前铸造专业的若干门专业课程，去粗取精，整编精简内容，以基础和原理及工业应用为主，删除大量工艺性叙述内容，力求展现国内外铸造技术方面的最新成果及进展，以新世纪现代的风貌来系统介绍铸造行业及生产的各个方面。

内容包括：绪论，铸型（芯）制备技术，铸造工艺设计，铸造合金原理，铸造生产机械装备，非重力铸造技术，铸造生产质量控制。全书在叙述上由浅入深，注重理论联系实际，并且有利于自学。

本书是普通高等学校材料加工工程、材料成形及控制工程、热加工工程等专业的本科生教材，亦可作为研究生参考书和供有关领域的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

铸造工程基础 魏华胜主编 .—北京：机械工业出版社，2002 .2
普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材
ISBN 7-111-09884-6

. 铸... . 魏... . 铸造—高等教育—教材 .TG2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 007009 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：王霄飞 版式设计：张世琴 责任校对：刘志文
封面设计：姚毅 责任印制：付方敏
北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷
1 000mm × 1 400mm B5·12.25 印张·474 千字
0 001—4 000 册
定价：30.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677 - 2527

普通高等教育材料成形及控制工程专业 改革教材编审委员会

主编单位：华中科技大学
策划单位：华中科技大学 机械工业出版社
顾 问：杨叔子 院士
 周 济 院士
 崔 院士
参编单位：西北工业大学 武汉理工大学
 武汉大学 吉林大学
 重庆工业大学 太原理工大学
 湖北工学院 华南理工大学
 太原重型机械学院 武汉科技大学
 大连理工大学 上海交通大学
 湖北汽车工业学院 武汉凯奇公司
 机械科学研究院武汉材料保护研究所
审稿单位：武汉大学 东南大学
 武汉理工大学 山东大学
 合肥工业大学 中国科学院计算所
 西安交通大学 浙江大学
 福州大学 上海交通大学
 （排名不分先后）

序

我国社会主义现代化建设浪潮不断高涨，高等教育与教学改革不断深入发展，长江后浪推前浪。

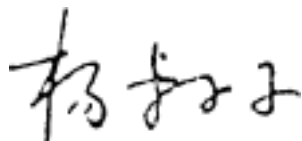
培养基础宽、素质高、能力强、适应面广，具有创新能力的人才，教材建设是一大关键。新的专业目录颁布以来，经过摸索和探讨，对一些改革力度大的专业组建和教材建设，各高校的观点和看法逐渐趋于大同。在这个基础上，编写一套适合于普通高等教育“材料成形及控制工程”专业系列教改教材是适时的，也是非常必要的。

该系列教材内容合理而先进，充分体现了专业重心下移，看重于专业的基础性、共性课程的设置；而反映铸、锻、焊专业方向性的课程，绝大部分作为选修课程设置。其主要特点，一是系列教材覆盖面宽，不仅覆盖了4个老专业近40门专业教材的内容，而且还延伸到材料热加工的最新技术及发展的前沿；二是内容精练，选材新颖，结构合理，12门教材平均每门不足30万字，仅为4个老专业教材篇幅的1/4~1/5，且近一半的内容选自近十余年来的科研成果、国内外文献和国外原版教材；三是12门专业主干教材中，有4门是与计算机和信息技术相结合的教材，突出了计算机和信息技术的学习与应用。

我相信，通过这套专业系列教材的学习，可使材料成形及控制工程专业的学生较为充分地掌握系统的专业基础与共性知识，在先进的材料加工新技术和发展趋势方面较好了解乃至有所掌握，在计算机应用和外语水平方面能形成优势，这有利于培养较高的综合素质和较强的创新能力。

当然，任何事情不能一蹴而就。这套专业系列教材也有待在教学实践中不断修改与完善。好的开始等于成功的一半。我祝愿在著者与读者的共同努力下，这套教材有一个更为美好的明天，谨此为序。

中科院院士



前 言

为了适应国家教育改革形势的发展，根据教育部最新颁布的新的专业目录，全国大部分工科院校已将原热加工专业的铸造、焊接、锻压、热处理四个专业合并为材料成形及控制工程大专业。1998年12月，教育部热加工专业教学指导委员会在哈尔滨召开年会，探讨了专业改造和教材建设的问题。

推行专业改革，为社会培养综合素质高、知识结构全面的栋梁之材，在很大程度上取决于教材建设。教育部颁布新的专业目录已有一段时间，经过这一阶段的摸索和探讨，对材料成形及控制工程专业的改造和教材建设，各高校观点和方法逐渐趋于大同，在这个基础上，编写一套普通高等教育材料成形及控制工程专业系列教改教材是适时的。为此，机械工业出版社教材编辑室成立了以华中科技大学为牵头单位的教改教材编审委员会，共同组织编写材料成形及控制工程专业系列教材。

为适应新专业“材料成形及控制工程”的需要，本书将过去的作为“铸造”一个专业所开设的若干门专业课程，进行整编精简，以基础和原理及工业应用为主，删除大量工艺性叙述内容，使基本内容得到浓缩，大幅度减少教学时数。同时从铸造这一整体的工程体系出发，更新内容、展现国内外铸造技术方面的最新成果及进展，将铸造的近净形化的概念与观点引入本书，介绍了铸造业实现集约化清洁生产的必然途径。全书内容全面详实，资料来源既有编写者与各兄弟学校同仁多年的教学和科研成果，也有生产实际中成熟的科技资料，很多都可直接引用参考。

铸造工程是一门完整的科学，涉及面广，与众多的基础理论和技术有关，由于本书的篇幅和容量所限，无法面面顾及，所以仍以最基本的砂型铸造为主线兼顾其它。铸造是永恒的，但用先进的制造技术和信息技术来武装，则是时代发展和进步的客观要求。

本书是材料成形及控制工程专业“材料加工工程”课程的专业方向教材之一。其教学基本目的是：熟悉铸造生产的基本过程；熟悉砂型铸造铸型的制备技术；熟悉铸造工艺和工装设计的内容、方法和步骤；熟悉铸造合金制备的要求和内容；了解铸造生产基本的机械装备；了解非重力铸造技术的基本方法；了解铸造质量检验及控制的过程和方法。

本书第一章、第七章由魏华胜编写，第二章、第六章由李远才博士编写，第三章由吴志超博士编写，第四章由蔡启舟博士编写，第五章由樊自田博士编写。

全书由魏华胜统稿，由浙江大学杨佳荣教授、华中科技大学林汉同教授、黄乃瑜教授对全书进行了仔细的审阅。

在编写过程中，得到华中科技大学材料科学与工程学院和原铸造教研室各位同仁的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。对所有为本书提供资料及建议的各方人士也表示诚挚的谢意。

由于时间紧迫，难免粗糙，同时因为编者的水平有限，在内容和学术观点方面，有失偏颇和不少的错漏，敬请广大读者指正。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论

- 第一节 现代铸造技术的状况及发展 1
- 第二节 充型及凝固 4
- 第三节 我国铸造行业生产技术的发展方向 8

第二章 铸型（芯）制备技术

- 第一节 粘土湿型 13
- 第二节 水玻璃粘结剂砂型（芯） 36
- 第三节 有机化学粘结剂砂芯（型）概述 50
- 第四节 壳芯（型） 53
- 第五节 热（温）芯盒法 60
- 第六节 自硬冷芯盒法 64
- 第七节 气硬冷芯盒法 71
- 第八节 气化模及铸型制备 76
- 第九节 熔模铸造及壳型制备 85

第三章 铸造工艺设计

- 第一节 铸造工艺方案的确定 94
- 第二节 浇注系统设计 105
- 第三节 冒口、冷铁设计 117
- 第四节 铸造工艺 CAE 129

第四章 铸造合金原理

- 第一节 铸铁的结晶及组织形成 131
- 第二节 常用铸铁 145
- 第三节 特种铸铁 154
- 第四节 铸钢 161
- 第五节 铸造非铁合金 174
- 第六节 液态金属的精炼 192

第五章 铸造生产机械装备

- 第一节 铸造车间概论 206

第二节	粘土砂造型设备	224
第三节	树脂砂与水玻璃砂造型设备及生产线	251
第四节	造型材料处理及旧砂再生设备	253
第五节	铸造熔化设备及控制	274
第六节	落砂、清理及环保设备	279
第七节	铸造生产过程自动化	287
第六章	非重力铸造及金属型铸造技术	
第一节	压力铸造	292
第二节	低压铸造及差压铸造	305
第三节	离心铸造	314
第四节	挤压铸造	323
第五节	金属型铸造	328
第七章	铸造生产质量控制	
第一节	铸造生产过程的质量控制	333
第二节	铸件质量及检验	344
第三节	铸件的缺陷分析	352
第四节	铸造生产的环境保护	358
参考文献	380

第一章 绪 论

第一节 现代铸造技术的状况及发展

一、铸造生产在制造业中的地位

铸造生产通常是指用熔融的合金材料制作产品的方法，将液态合金注入预先制备好的铸型中使之冷却、凝固，而获得毛坯或零件，这种制造过程称为铸造生产，简称铸造，所铸出的产品称为铸件。大多数铸件作为毛坯，需要经过机械加工后才能成为各种机器零件；有的铸件当达到使用的尺寸精度和表面粗糙度要求时，可作为成品或零件直接应用。

在制造业的诸多材料成形方法中，铸造生产具有以下独到的优点：

1) 适用范围广。铸造法几乎不受铸件大小、厚薄和形状复杂程度的限制，铸造的壁厚可达 0.3 ~ 1000mm，长度从几毫米到十几米，质量从几克到 300t 以上。最适合生产形状复杂，特别是内腔复杂的零件，例如复杂的箱体、阀体、叶轮、发动机汽缸体、螺旋桨等。

2) 铸造法能采用的材料广，几乎凡能熔化成液态的合金材料均可用于铸造。如铸钢、铸铁、各种铝合金、铜合金、镁合金、钛合金及锌合金等铸件。对于塑性较差的脆性合金材料（如普通铸铁等），铸造是唯一可行的成形工艺，在工业生产中以铸铁件应用最广，约占铸件总产量的 70% 以上。

3) 铸件具有一定的尺寸精度。一般情况下，比普通锻件、焊接件成形尺寸精确。

4) 成本低廉、综合经济性能好、能源材料消耗及成本为其它金属成形方法所不及。

铸件在一般机器中占总质量的 40% ~ 80%，而制造的成本只占机器总成本的 25% ~ 30%。成本低廉的原因是：生产方式灵活，批量生产可组织机械化生产。可大量利用废、旧金属材料 and 再生资源。与锻造相比，其动力消耗小。有一定的尺寸精度，使加工余量小，节约加工工时和金属材料。

铸造是机械制造工业毛坯和零件的主要供应者，在国民经济中占有极其重要的地位。铸件在机械产品中所占的比例大，如内燃机关键零件（八九种）都是铸件，占总质量 70% ~ 90%，汽车中铸件质量占 19%（轿车）~ 23%（卡车）；机床、拖拉机、液压泵、阀和通用机械中铸件质量占 65% ~ 80%；农业机械中铸件

质量占 40% ~ 70%。矿冶 (钢、铁、非铁合金)、能源 (火、水、核电等)、海洋和航空航天等工业的重、大、难装备中铸件都占很大的比重和起重要的作用。

二、我国铸造技术的发展

我国的铸造技术已有 6000 年悠久的历史，是世界上较早掌握铸造技术的文明古国之一，2500 多年以前 (公元前 513 年) 就铸出 270kg 的铸铁刑鼎。我国是最早应用铸铁的国家之一，我国商朝制造的铜钺具有铁刃，据考证那时的铁刃是用陨铁锻造而成，然后镶铸上铜背。自周朝末年开始了铸铁，铁制农具发展很快，秦、汉以后，我国农田耕作大都使用了铁制农具。如耕地的犁、锄、镰、铧、锹等，表明我国当时已具有相当先进的铸造生产水平，到宋朝我国已使用铸造铁炮和铸造地雷。

我国在商朝起就已创造了灿烂的青铜文化，所谓“钟鸣鼎食”，成了当时贵族权势和地位的标志。1978 年湖北省随县出土的曾侯乙墓青铜器重达 10t，其中有 64 件的一套铜编钟，分八组，包括辅件在内用铜达 5t。钟面铸有变体龙纹和花卉纹饰，有的细如发丝，钟上共铸有错金铭文 2800 多字，标记音名、音律。每钟发两音，一为正鼓音，一为右鼓音。整套编钟音域宽达五个半八度，可演奏各类乐曲，音律准确和谐，音色优美动听。铸造工艺水平极高，可称得是我国古代青铜铸造的代表作，这套编钟的铸造时代是距今 2400 年前的战国初期。

现存于北京大钟寺内的明朝永乐大钟，铸于明永乐 18 年 (公元 1418 ~ 1422 年) 前后，全高 6.75m，钟口外径 3.3m，钟唇厚 0.185m，重 46.5t。据考证钟体铸型为泥范，芯分七段。先铸成钟钮，然后再使钟钮与钟体铸接成一体。化学分析结果为： $w(\text{Cu}) = 80.54\%$ ， $w(\text{Sn}) = 16.4\%$ 及微量的 Zn, Fe, Si, Mg, Ca 等。钟体的内外铸满经文，共约 227000 余字。大钟至今完好，声音幽雅悦耳，距钟 15 ~ 20km 都能听见，是世界上罕见的古钟之一。我国古代的钟、鼎、樽等文物，有不少是熔模铸造的，其工艺复杂，铸工之精湛、铸件之精美，不难看出我国古代熔模铸造工艺已达相当高的水平。

1953 年在河北省兴隆县的古燕国铸冶作坊遗址的发掘中，发现距今 2200 ~ 2350 年的战国时期的铁范 (铁质铸型) 等 87 件，可用于铸造铁锄、铁斧、铁镰、铁凿和车具等，其中锄上有方孔，用于固定穿过的铁芯，范的外侧还留有定位和夹紧的凸台。表明早在战国时期，铸铁件在我国已广泛应用了。现立于河北省沧州的大铁狮，高 5m 多，长近 6m，重达 19.3t，是公元 9 世纪五代后周时铸成的。现立于当阳的铁塔，由 13 层叠成，重 40t，铸于北宋淳熙年间，在公元前 500 年，我国就已成功地运用了叠箱铸造技术来大量生产铸铁件。这些都向世人展现了我国古代铸造工艺的水平和高超技艺。

我国古代铸造技术居世界先进行列。由于过长的封建社会影响了科学技术的发展，阻滞了铸造技术前进的步伐。新中国成立以来的 50 多年中，自 20 世纪 50

年代初至今，几乎从零开始，逐步发展到现在这样的规模，成绩是巨大的。现在铸造在我国是一个很大的行业，产量居世界第二位，达年产 1000 万 ~ 1200 万 t，厂点多达 2 万多个，职工 100 ~ 130 万人，其中工程技术人员约占 3.5%，已经成为了国家重要的基础工业之一。

图 1-1 为我国铸件总产量与美、日、德三国的对比。表 1-1 为我国各用户消耗铸件的数量。

我国的铸造工业生产规模、铸件的产量品种都已处于世界前列。雄厚的工业基础为众多的行业提供着大量的铸件（毛坯和零件）。

改革开放以来，我国开始进出口铸件，近几年来铸件出口增长较

快，已占铸件产量的 10%，创汇稳步增加，出口品种也由简单件进展到要求较高的形状复杂的铸件。表 1-2 为我国铸件出口情况。

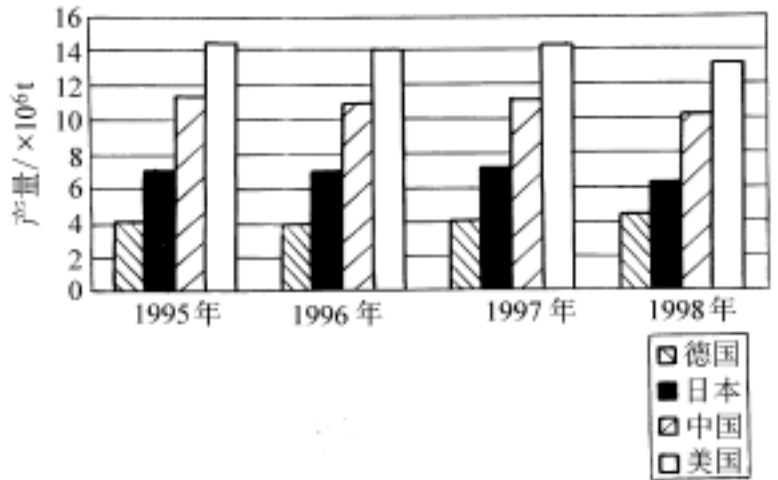


图 1-1 我国铸件总产量与美、日、德三国的对比

表 1-1 我国各用户消耗铸件的数量

(单位: t)

铸件用户	1995 年	1996 年	1997 年
汽车	1178000	1190000	1274600
铁道和铁道车辆	714000	700200	690700
拖拉机、柴油机、农业机械	1940000	1901300	1932200
机床	687000	664000	657600
通用机械	426000	407000	414200
冶金矿山机械	2026000	2005000	1981700
能源设备	374000	358000	349900
纺织机械	200000	123900	110500
铸铁管和管件	1836000	1674000	1715000
建筑工程及其配件	459000	445000	433500
其它	1492000	1434785	1520542
合计	11332000	10903185	11080442

表 1-2 我国铸件出口情况

年度	铸件出口量 t	比前一年增加 (%)	比 1993 年增加 (%)
1993	402915	-	-
1994	553755	37	37
1995	665317	20	65
1996	870811	30	116
1997	1015985	16	152
1998	1041781	3	159

三、我国铸造业的展望

我国铸造行业虽然已进入厂点多、产量大、门类齐全的世界铸造大国行列，但与美、日、德、法等铸造强国相比，还有相当大的差距。我国铸造生产必须走优质、高效、低耗、清洁，可持续发展的道路，才能迅速由大变强。

世纪之交的技术经济特征就是高新技术发展引发知识经济的出现。知识经济的实现方式主要有两种途径：一是高新技术的产业化，二是传统产业高新技术化。我国铸造行业只有实现高新技术化才能面对国内外市场的激烈竞争。

通过不断吸收电子、信息、材料、能源、现代化管理等高新技术成果，与传统铸造技术相结合形成一批先进铸造技术。它们不仅应用于铸件开发及生产，而且也影响到组织管理、营销、售后服务等环节，正显著改变铸造行业的技术面貌，使之以崭新的形象展现在世人面前。

表 1-3 列举了跨世纪的先进制造技术及所形成的先进铸造技术。

表 1-3 知识经济和高新技术对铸造行业的影响

技术特征	跨世纪的先进制造技术	形成的先进铸造技术
精密、优质化	精密成形与加工 近无缺陷成形与加工	精确铸造成形、高比强合金精密铸造金属熔体的纯净化致密化，铸件安全可靠评估
数字、网络化	数字制造 虚拟制造 网络制造	铸造工艺 CAD 铸造模具 CAD CAM 一体化、MRP 及 ERP 在铸造企业的应用 铸造过程宏观模拟及工艺优化、铸件组织微观模拟及性能寿命预测 分散网络化铸造系统
高效、智能化	快速制造 自动化制造系统 智能制造	快速原形及快速制模 铸造过程自动检测与控制、铸造机器人的应用 人工智能在铸造生产中的应用
柔性、集成化	柔性制造 计算机集成制造 快速易重组制造系统	铸造 FMC、FMS 铸造 CIMS 快速换模技术
交叉、综合化	并行制造 复合成形与加工	并行环境下铸造 CAD CAE CAM 一体化 半固态铸造、喷铸技术、复合材料铸造及复合铸造
低耗、清洁化	绿色制造	清洁铸造技术、铸造废弃物的再生回用
精益、快捷化	精益生产 快捷制造	铸造企业精益生产模式 虚拟铸造企业及铸件电子商务

第二节 充型及凝固

一、铸造生产的基本过程

液态金属成形有两个基本过程：充填铸型和冷却凝固。这两个基本过程可在重力场或其它力的作用下完成。充填铸型（亦称浇注）主要是一种运动速度变化

的机械过程，冷却凝固则为结晶和组织变化的热量传递过程。

根据生产的铸件的需要，预先制备好铸型及一定的化学成分液态金属或合金。然后在重力或其它力的作用下将液态合金材料注入铸型，其中充填是否充分、平稳对铸件的最终质量有重要的影响，特别是对于某些形状复杂、壁厚差异大或易氧化的合金显得更为重要。

液态合金材料的结晶与凝固，是铸件形成过程的核心问题，它在很大程度上决定了铸件的铸态组织及某些铸造缺陷的形成，因为材料一旦凝固成固体后，在后续的其它加工中几乎无法使其品质有本质上的改变，所以冷却凝固对铸件质量，特别是铸态力学性能，起着决定性的作用。控制凝固过程以提高铸件质量、获得所要求的组织与性能，是铸造技术的重要内容。

二、液态金属凝固成形的关键问题

液态金属通过冷却凝固最终获得合格的、满足各种使用要求的铸件。下面的关键问题是在生产过程中应予以妥善解决的。

（一）结晶及凝固组织的形成与控制

液体金属的结构，晶核的形成与长大，晶粒的大小、方向和形态等与铸件的凝固组织密切相关，它们对铸件的物理性能和力学性能有着重大的影响。控制铸件的凝固组织的目的是为了获得所希望的组织，欲控制凝固组织，就必须对其形成机理、形成过程和影响因素有全面的了解和深入研究。目前已建立的有效控制组织的方法有变质、孕育、动态结晶、顺序凝固、快速凝固等。

（二）铸件尺寸精度和表面粗糙度控制

现代制造的许多领域，对铸件尺寸精度和外观质量的要求愈来愈高，铸件的近净形化（Near Net Shape Processes）技术改变着铸造只能提供毛坯的传统观念，其目的在于降低物耗、能耗、工耗，并且改善产品的内外质量，争取市场和高效益。然而，铸件尺寸精度和表面粗糙度由于受到诸多因素（如铸型表面的作用、凝固热应力、凝固收缩等）的影响和制约，控制难度很大。铸件是液态成形的，实现近净形化具有独特的优越性，在结构方面铸件的内腔和外形用铸造方法一次成形，使其接近零件的最终形状，使加工和组装工序减至最少；在尺寸精度和表面质量方面，使铸件能接近产品的最终要求，做到无余量或小余量；另一方面，被保留的铸造原始表面有益于保持铸件的耐蚀和耐疲劳等优越性能，从而提高产品寿命。努力提高铸件的尺寸精度和降低表面粗糙度，推进铸件近净形技术的发展是未来的方向。

（三）铸造缺陷的防止与控制

铸造缺陷是造成废品的主要原因，是对铸件质量的严重威胁。由于方方面面的原因，存在于铸件的缺陷五花八门，由于凝固成形时条件的差异，缺陷的种类表现为形态和表现部位不尽相同。如液态金属的凝固收缩会形成缩孔、缩松；凝

固期间元素在固相和液相中的再分配会造成偏析；冷却过程中热应力的集中会造成铸件裂纹和变形。应根据产生的原因和出现的程度不同，采取相应措施加以控制，使之消除或降至最低程度。此外，还有许多缺陷，如有夹杂物、气孔、冷隔等，出现在充填过程中，它们不仅与合金种类有关，而且还与具体成形工艺有关。总之，防止、消除和控制各类缺陷是一个不容忽视的关键问题。

三、液态金属凝固成型的方法

液态金属凝固成型的方法主要是指铸造成形的工艺过程，它是首先制造一个形状、尺寸与所需零件相应的铸型型腔，然后将液态金属充填入型腔，待其冷却凝固后，而获得零件（称为铸件）的方法。

凝固成型的方法很多，根据金属液充填进铸型方法的不同可分为重力铸造（液态金属靠自身重力充填型腔），低压铸造、挤压铸造、压力铸造（液态金属在一定的压力下充填型腔）等。根据形成铸型材料的不同，可分为一次型（如砂型铸造、陶瓷型铸造、壳型铸造）及永久型（如金属型铸造）。对于砂型铸造，根据型砂粘结剂的不同，有粘土砂、树脂砂、水玻璃砂等。根据造型方法不同有手工造型和机械造型。此外，对于一些特殊的凝固成型件，还可采用连续铸造（等截面长铸件）、离心铸造（圆筒形铸件）、实型铸造、熔模铸造等方法。

四、液态金属凝固成型技术的发展

从历史悠久的铸造技术发展今天的现代铸造技术或液态凝固成型技术，这不仅与金属与合金的结晶与凝固理论研究的深入和发展、各种凝固技术的不断出现和提高、计算机技术的应用等有关，而且还与化学工业、机械制造业、现代控制方法和技术的发展密切相关。

（一）凝固理论的发展

结晶与凝固是铸件形成过程的核心，它决定着铸件的组织和缺陷的形成，因而也决定了铸件的性能和质量。近 30 年来，借助于物理化学、金属学、非平衡热力学与动力学、高等数学和计算数学，从传热、传质和固液界面几个方面进行研究，使金属凝固理论有了很大的发展，这不仅使人们对许多条件下的凝固过程和组织特征有了深入的认识，而且促使了许多凝固技术和液态凝固成型方法的提出、发展和生产应用。例如凝固理论已建立了铸件冷却速度和晶粒度以及晶粒度与铸件力学性能之间的一些函数关系，从而为控制铸造工艺参数和铸件力学性能提供了依据。

（二）凝固技术的发展

控制凝固过程是开发新型材料和提高铸件质量的重要途径。近年来，顺序凝固技术、快速凝固技术、复合材料的获得、半固态金属铸造成形技术等等就是集中的代表。

1. 顺序凝固技术 所谓顺序凝固技术，是使液态金属的热量沿着一定的方

向排出，或通过对液态金属施行某方向的快速凝固，从而使晶粒的生长（凝固）向着一定的方向进行，最终获得具有单方向晶粒组织或单晶组织的铸件的一种工艺方法。由于冷却及控制技术的不断进步，使热量排出的强度及方向性不断提高，从而使固液界面前沿液相中的温度梯度增大，这不仅使晶粒生长的方向性提高，而且组织更细长、挺直、并延长了定向区。顺序凝固技术已广泛应用于铸造高温合金燃气轮机叶片的生产中，由于沿定向生长的组织的力学性能优异，使叶片工作温度大幅度提高，从而使航空发动机性能提高。顺序凝固技术的最新进展是制取单晶体铸件，如单晶涡轮叶片，它比一般顺序凝固柱状晶叶片具有更高的工作温度，抗热疲劳强度、抗蠕变强度和耐腐蚀性能。采用这种高温合金单晶叶片的航空发动机，有效地增加了航空发动机的推力和效率，使其性能大幅度提高。

2. 快速凝固技术 即在比常规工艺条件下的冷却速度 ($10^{-4} \sim 10 \text{K s}$) 快得多的冷却条件 ($10^3 \sim 10^9 \text{K s}$) 下，使液态合金转变为固态的工艺方法。它使合金材料具有优异的组织 and 性能，如很细的晶粒（通常 $< 0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ ，甚至纳米级的晶粒），合金无偏析缺陷和高分散度的超细析出相，材料的高强度、高韧性等。快速凝固技术可使液态金属脱开常规的结晶过程（形核和生长），直接形成非晶结构的固体材料，即所谓的金属玻璃。此类非晶态合金为远程无序结构，具有特殊的电学性能、磁学性能、电化学性能和力学性能，已得到广泛的应用。如用作控制变压器铁心材料、计算机磁头及外围设备中零件的材料、钎焊材料等。快速凝固正日益受到多方的重视。

3. 复合材料制备 凝固技术的另一发展是用于复合材料的制备。所谓复合材料，就是在非金属或金属基体中引入增强相或特殊成分，通过控制凝固使增强相按所希望的方式分布或排列的一种具有特殊性能的材料。由于复合材料的基体具有较高的断裂性，加上增强相的存在，故能表现出与普通单相组织材料不同的性能，如高强度、良好的高温性能和抗疲劳性能，目前已发展了多种制取复合材料的工艺方法，如结合顺序凝固技术制备自生复合材料。此领域的应用前景将越来越广。

4. 半固态铸造 半固态金属铸造成形技术经过近 20 多年的研究及发展，目前已进入工业应用阶段。其原理是在液态金属的凝固过程中进行强烈的搅拌（可以采用机械、电磁或其它方式），使普通铸造易于形成的树枝晶网络骨架被打碎而形成分散的颗粒状组织形态，从而制得半固态金属液，它具有一定的流动性，然后可利用常规的成形技术如压铸、挤压、模锻等成形生产坯料或铸件。半固态金属铸造成形克服了传统铸造成形易产生的缩孔、缩松、气孔及尺寸偏差等缺点，具有成形温度低（铝合金至少可降低 120°C ），延长模具寿命，节约能源，改善生产条件和环境，提高铸件质量（减少气孔和凝固收缩），减少加工余量等许多优点。半固态金属成形工艺将成为 21 世纪极具发展前途的近净形化成形技术之一。

第三节 我国铸造行业生产技术的发展方向

世纪之交，中国加入世贸组织（WTO），铸造行业与其它行业一样，将面临新的挑战与机遇。由于我国的铸造行业是劳动、资源相对密集的产业，在劳动力、成本等方面具有优势，入世带来的机遇将大于挑战。我国铸造行业应及时把握机遇，积极开拓新的市场，特别是国外市场，同时利用铸件出口积累的资金，积极引进先进技术与设备，使我国相对落后的铸造装备及原辅材料工业实现升级换代，使铸件质量及生产水平提高档次。从可持续发展和保护环境两方面来看，21世纪需要的将是绿色集约化铸造。

一、发展提高铸件外观质量的技术

（一）造型造芯

造型造芯是铸件形成过程中的关键工序之一，它对铸件质量、制造成本、生产效率、劳动强度和环境污染等各方面都有十分重要的影响。

1. 粘土砂湿砂造型工艺 多年的生产实践表明，具有成本低、污染小、效率高、质量好等优点的射压、气冲造型和静压造型等高度机械化、自动化、高密度湿型造型工艺，将成为我国今后中、小型铸件生产的重要发展趋势。

2. 树脂砂造型造芯工艺 通过开发无或少污染的粘结剂、催化剂、固化剂，研究与之配套的环保处理设备，广泛应用和发展树脂自硬砂、冷芯盒自硬工艺、温芯盒法及壳型（芯）法。

3. 水玻璃砂造型造芯工艺 研究水玻璃的净化及改性以提高其粘结性能，开发新型水玻璃砂旧砂再生回用工艺及设备，进一步推广酯硬化水玻璃砂在中、大型铸钢件上的应用。

4. 铸造涂料 扩大和加强转移涂料、表面合金化涂料的应用领域和机理研究。

（二）特种铸造方法

特种铸造作为一种实现少余量、无余量加工的精密成形技术，将向着精密化、薄壁化、轻量化、节能化方向发展。

特种铸造主要有熔模铸造、压铸、低压铸造。实型铸造（EPC）技术也有广泛的发展前途。

二、发展提高铸件内在质量的技术

随着国民经济各部门对机械装备性能的要求日益提高，为其配套的各类铸件的质量也必须有相应改善，铸件性能的提高是其中的一个主要方面。

（一）铸铁

铸铁件的成本低、工艺性好、重熔再生节省资源和能源，所以这种材料的应

用和发展持久不衰。如研究开发冲天炉——电炉双联熔炼工艺及装备；广泛采用先进的铁液脱硫、过滤技术；薄壁高强度的铸铁件制造技术；铸铁复合材料制造技术；铸铁件表面或局部强化技术；等温淬火球墨铸铁成套技术；采用金属型铸造及金属型覆砂铸造、连续铸造等特种工艺及装备等。

（二）铸钢

铸钢产量相对稳定，而铸钢件的质量、品种、性能以及合金钢、特殊钢的比例不断提高。采用各种精炼工艺和技术，开发新型铸钢材料，可提高材料的强韧性和特殊性能。

（三）铸造轻合金

铸造轻合金由于具有密度小、比强度高、耐腐蚀等一系列优良特性，将更广泛地应用于航空、航天、汽车、机械等各行业。特别是在汽车工业中，为降低油耗提高能源利用率，用铝、镁合金铸件代替钢、铁铸件是长期的发展趋势。其中着重解决无污染、高效、操作简便的精炼技术，变质技术，晶粒细化技术及炉前快速检测技术。为进一步提高材料性能、最大限度发挥材料的潜能，可开发优质铝合金材料，特别是铝基复合材料以满足不同工况的性能要求；加强镁合金熔炼工艺的研究，镁合金压铸与挤压铸造工艺及相关技术的开发研究；完善钛合金熔炼设备及相关技术和工艺的开发研究。

（四）铸造复合材料

复合材料将成为 21 世纪的新型工程材料，铸造复合材料将致力于金属基复合材料母材基体材料和增强强化组元材料的开发研究，加速其应用的开发研究。

三、发展节能和环保的技术

节能和环保是实施绿色铸造生产、实现可持续发展的关键，必须研究和推广适合中国国情的节能、环保新技术和新设备。

（1）以熔化和加热系统为重点，全方位挖掘节能潜力，采用各项新技术，消除对环境的污染，提高熔炼质量、降低废品率。

（2）节约材料资源、开发材料的再生技术、回收利用铸造废弃物、创造最高价值的回用。如采用旧砂回用新技术。

（3）从材料、工艺和设备多方面入手，解决环境污染问题。开发无毒精炼、变质技术，无毒、无味粘结剂及白色铸造辅料，除尘技术，型砂再生技术，无粉尘铸造技术。

（4）加强生产过程的机械化和自动化，提高劳动生产率，实现近、无余量的铸造生产技术。

四、发展计算机的应用技术

计算机的广泛应用正从各方面推动着铸造业的发展和变革，它不仅可以提高生产效率和降低生产成本，同时又能促使新技术和新工艺的不断出现，使铸造生