

铸造工艺学

〔英〕P.R.比利 著

机械工业出版社

铸 造 工 艺 学

〔英〕 P.R.比 利 著

清华大学 林家骝 张家骏 张卓其 译

太原重机学院 张明之 审校



机 械 工 业 出 版 社

Foundry Technology

P. R. Beeley

Butterworth Scientific 1982

* * *

铸造工艺学

王仁德 等 译

清华大学 林家骥 康家骥 张卓其 译

机械工业出版社 张树之 审校

机械工业出版社出版 (北京惠爱里百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $24^{1/4}$ · 字数 593 千字

1986年9月北京第一版 · 1986年9月北京第一次印刷

印数 0,001—6,100 · 定价 5.75 元

*

统一书号: 15033 · 6364

译 者 的 话

英国 P. R. Beeley 教授编写的“铸造工艺学”，从 1972 年出版后，多次再版，这说明该书是受读者欢迎的。在我国，近几年来，在一些教科书中也经常引用该书的一些内容。

翻译过程中我们初步体会到该书有如下三个特点：

1. 铸造的一般知识与新知识兼备。如引入凝固过程溶质再分配及成分过冷，多工序的新工艺新技术等新成果。

2. 技术与管理并重。该书除了对铸造过程工艺技术作了全面阐述之外，还专门论述铸造质量控制及检验，并把概率统计方法引入铸造过程的质量控制中。

3. 理论紧密联系实际，实例丰富，有深入浅出之功。本书无论是对于大专院校师生，还是对从事铸造生产管理和铸造设计的工程技术人员都是一本很好的参考书。

本书由清华大学林家骊、张家骏、张卓其译，具体分工是张卓其翻译原书序、绪论、1、2、3 章，林家骊翻译 4、5、6、7 章及附录，张家骏翻译 8、9、10 章。太原重型机械学院张明之教授对全书进行了详细的审校。

限于我们的业务水平和外文水平，译本中的谬误与不当之处实属难免，请读者不吝指正。

译 者

1984 年 8 月

原 书 序

本书打算作为研究金属铸造基本原理与其应用在生产和使用工业之间的桥梁,其目的是促进理解铸造生产的现代技术和产品的特征。本书是作者从事铸造生产及随后在里兹大学(University of Leeds)工作期间的产物,在这些地方,作者得以既同工业生产又同科研这一活跃领域保持接触。

本书原想作为大学、其他高等教育部门、以及铸造业管理人员和技术人员的教科书和参考书;但也希望对铸造基本科学知识感兴趣的所有冶金工作者和铸造工作者会有所帮助。本书的部分目的,是帮助工程师和工科学生在设计和选材时能正确理解铸件的作用。

1934年,J. Laing 和 R. T. Rolfe 在他们的《Manual of Foundry Practice》一书的前言中写道:“不可否认,近几年的铸造实践经历了一场根本性的变革,从粗浅的经验为基础,转变为以科学和系统控制为基础”。现在人们提出同样的观点是不奇怪的,因为这是一种连续的转变。对于这点,没有比英国铸造师协会的格言“科学与劳动结合起来”恰更恰当的了。科学技术在提高产品质量的同时,不断在减少体力劳动的劳动量和劳动强度。

本书采用的一般方法是注重实效:对于各种原理的探讨,主要是同铸件在制造和使用时的特定情况相联系。即使必须从工业角度看问题时,从铸造领域基础研究中得出的一些概念,也同样是必需的。希望这种处理有助于加强工业生产和教育科研中心之间的联系。

本书分三个主要部分。前4章论述铸造的中心议题——包括造型和浇注关键阶段金属和铸型的各种现象。在这里,作者设想读者是熟悉这些过程各个环节的。凝固部分是从组织和补缩的观点来论述的;第3章对补缩进行定量探讨。随后的三章主要涉及铸造产品,包括缺陷、质量评价和铸件的设计。第6章概述了无损探伤技术。第7章包括各种铸造合金重要性能的比较数据概要。

最后三章论述铸造生产过程本身。较长的第8章实际上是集三章于一章;但是,为了包括砂型铸造生产顺序各主要环节,把它们保持为一个整体。剩下的两章研究压铸和其它特种铸造技术。

本书在论述边缘课题时,提供给读者的权威性专著不多。虽然给出参考文献,但主要是介绍这些课题与金属铸造有密切相关的部分。虽然本书的目标是包括铸造活动的广泛范围,但涉及更核心的题目时,关系到个别合金的特种冶金和特种问题,则仅限于阐明原理或作一般对比。由于从事工业的读者不需要提供所有铸造活动的商业基础知识,因此,只经常提及所讨论问题的经济影响。

选录的指导性参考文献给出了原始出处。有些刊登在美国铸造师学会(American Foundrymen's Society)和英国铸造师协会(Institute of British Foundrymen)的出版物,其中对学术有重要贡献的还值得特别提及。本书采用的图表实例,本文逐一加以致谢,这样做的目的,是希望这个说明能弥补万一有什么疏忽和遗漏。

作者非常感谢那些给予鼓励和实际帮助的许多朋友和同事,其中包括现任Chairman of the Houldsworth School of Applied Science的Jack Nutting教授,感谢他始终不渝地

支持和帮助在里兹大学进行的金属铸造研究。我尤其必须感谢我的妻子的慷慨帮助；感谢我的父亲——在 Sheffield 的 Edgar Allen & Co. 的已故 A. J. Beeley，感谢他在工业冶金学方面的早期指导。

关于单位的注释。为了与国际单位制 (SI) 的逐步引入相一致，本书有部分单位，首先按引证的原始数据给出数值，随后，在括号里直接给出国际单位制的相应量（完全的国际单位制转换，不仅包括数字转换，还包括逐渐采用围绕国际单位制产生的新标准）。从文献中选取的用以表明一种趋向或相互关系的各种图表，是按其原始形式复制的，并对于可能有用的转换系数加了注解。

P. R. Beeley

本书采用的主要单位与我国法定单位的换算关系

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算关系
	名称	符号	名称	符号	
长度	米	m	英尺 英寸 英里	ft in mile	1 ft = 0.3048 m 1 in = 0.025 m 1 mile = 1609.344 m
面积	平方米	m ²	平方英尺 平方英寸 平方英里	ft ² in ² mile ²	1 ft ² = 0.0929030 m ² 1 in ² = 6.4516 × 10 ⁻⁴ m ² 1 mile = 2.58999 × 10 ⁶ m ²
体积 容积	立方米 升	m ³ L, (l)	立方英尺 立方英寸 英加仑	ft ³ in ³ UKgal	1 ft ³ = 0.0283168 m ³ 1 in ³ = 1.63871 × 10 ⁻⁵ m ³ 1 UKgal = 4.54609 dm ³
质量	千克 (公斤) 吨	kg t	磅 英吨 盎司	lb ton oz	1 lb = 0.45359237 kg 1 ton = 1016.05 kg 1 oz = 28.3495 g
力, 重力	牛顿	N	达因 千克力 磅力	dyn kgf lbf	1 dyn = 10 ⁻⁵ N 1 kgf = 9.80665 N 1 lbf = 4.44822 N
压力, 压强, 应力	帕斯卡	Pa	工程大气压 磅力每平方英尺 磅力每平方英寸	at lbf/ft ² lbf/in ²	1 at = 98066.5 Pa 1 lbf/ft ² = 47.8803 Pa 1 lbf/in ² = 6894.76 Pa
能量, 功, 热	焦耳	J	英马小时 卡 英热单位	hp·h cal Btu	1 hp·h = 2.68452 MJ 1 cal = 4.1868 J 1 Btu = 1055.06 J
功率	瓦特	W	千克力米每秒 英马 每小时英热单位	kgf·m/s hp Btu/h	1 kgf·m/s = 9.80665 W 1 hp = 745.70 W 1 Btu/h = 0.293071 W
速度	米每秒	m/s	英尺每秒 英寸每秒	ft/s in/s	1 ft/s = 0.3048 m/s 1 in/s = 0.0254 m/s
密度	千克每 立方米	kg/m ³	磅每立方尺 磅每立方寸	lb/ft ³ lb/in ³	1 lb/ft ³ = 16.0185 kg/m ³ 1 lb/in ³ = 37979.9 kg/m ³
比容 (比体积)	立方米每千克	m ³ /kg	立方英尺每磅 立方英寸每磅	ft ³ /lb in ³ /lb	1 ft ³ /lb = 0.0624280 m ³ /kg 1 in ³ /lb = 3.61273 × 10 ⁻⁵ m ³ /kg
质量流率	千克每秒	kg/s	磅每秒 磅每小时	lb/s lb/h	1 lb/s = 0.453592 kg/s 1 lb/h = 1.25998 × 10 ⁻⁴ kg/s
动力粘度	帕斯卡秒	Pa·s	磅力秒每平方英尺 磅力秒每平方英寸	lbf·s/ft ² lbf·s/in ²	1 lbf·s/ft ² = 47.8803 Pa·s 1 lbf·s/in ² = 6894.76 Pa·s

目 录

绪论	1
第 1 章 液态金属和铸件的浇注系统	9
第 2 章 凝固 1	
铸造组织的结晶和形成	30
第 3 章 凝固 2	
铸件的补缩	58
第 4 章 造型材料	
性能、制备和试验	98
第 5 章 铸件缺陷	125
第 6 章 检验和质量控制	171
第 7 章 铸件设计	195
第 8 章 生产工艺 (1)	
砂型铸件的制造	233
第一部分 铸型生产	233
第二部分 熔化和浇注	261
第三部分 清理	279
第 9 章 生产工艺 (2)	
壳型、熔模和金属型铸造方法	290
第 10 章 生产工艺 (3)	
其它铸造方法	331
附录	355
索引	358

绪 论

铸件，即金属铸造业的产品，是由液态金属直接铸成，而不需经过诸如辗压或锻造这样的机械压力加工的中间工序。成形铸件因而不同于仅是冶金过程中间阶段的铸锭和其他铸造形式。

这种在所有冶金方法中最直接成形的简单方法，以其广泛的各种各样的产品，为很多工业的增长提供基础。然而，为了对铸造方法有一个正确看法，其特征必须对所有生产金属构件的方法加以比较才能了解。

金属成型的基本方法可分为五类：

(1) 铸造。采用在铸型内浇入熔融金属的方法生产成形铸件。

(2) 机械压力加工。在再结晶温度以上或以下，用固态塑性变形的方法，即热压或冷作，使金属成形。这类加工方法的坯料是铸锭或钢坯，而这些金属必须具有塑性变形的能力。机械压力加工出的许多产品，或是标准的初级产品，或是半成品，诸如杆件、厚板、薄板和零件。这些产品是用轧制或挤压制成，并作为进一步成形加工的坯料。其他的机械压力加工方法，如锻造，生产出的各种形状则更加类似铸件。

(3) 接合加工。把其它方法制成的较小的元件连结起来，生产出各种结构件。所采用的最值得注意的方法是焊接。许多焊接方法是将标准的锻轧坯料切割成元件焊接起来。焊接件在可观的重量范围内直接与铸件竞争，不过，也生产铸焊复合件，以利用这二种方法的彼此优点。焊接也广泛用于很大整体结构件的装配，然而，用这种规模作为现场接合的方法，它不是同铸造竞争，而是同铆接、栓接和其他紧固方法竞争。

(4) 机械切削加工。用机床切削简单形状的坯料或粗成形的坯料，来生产成形零件。虽然一些零件常常全部由坯料切削成形，但是也常常需要采用切削加工作为由其他方法成形的零件的精加工作业，以便形成最后的精确尺寸。

(5) 粉末冶金。用金属模加压和烧结金属粉末，来生产成形零件。

上面的概述表明，这些主要的成形方法，在许多方面是互相补充的。可是，由于它们的能力在很大范围有所交替，因而允许互相取代，并提供以性能和成本作为竞争的基础。铸件除了要与塑料、陶瓷和其他非金属材料竞争外，还必定要与各种各样的锻件、焊接件和粉末冶金件竞争。这些可代替的产品在价格上和工作性能上都能对铸造工作者提出挑战。另一方面，铸件能进入惯常采用其它形式产品的领域。例如某些板状金属构件由压铸件替代，切削加工件由熔模铸造件取代。在工程设计中，价值分析方法，将日益意味着按合理性而不是按长期形成的习惯，来选择材料和产品。

全面地开拓铸造方法，不仅需要仔细地研究它的优点，也要研究它潜在的困难和局限性。下文扼要地介绍决定铸造在工程界的地位的一些主要特征。

设计的多样性

重量范围 铸造几乎不受重量和尺寸的限制，而仅受熔融金属供应量和产品的起重、运输手段的限制。因此，产品的范围大至如图 0-1 所示的重型钢铸件，小至如图 0-2 所示的精

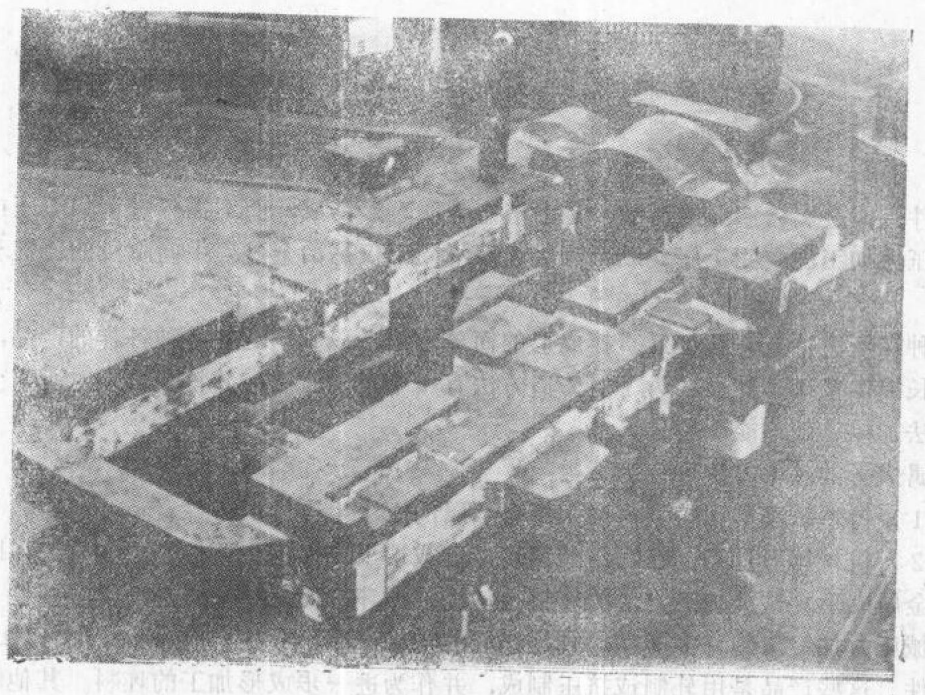


图0-1 铸钢轧机机架，加工后的重量为198 t

密齿状铸件；在制造这些不同铸件时，有着许多相同的基本原理。

形状和复杂性 无论是精巧的轮廓还是错综复杂的清晰度，要用切削加工不是非常昂贵就是根本不可能，因此没有其他方法能制造出同样复杂形状的制品。图 0-3 至图 0-6 所示的一些例子，说明了在这些方面铸造的能力，虽然同其他任何别的加工方法相比，它的形状几乎不受限制，但从一开始，思想上就应精心地结合制造方法来设计，其原理将在第 7 章较全面地研究。不仅极通用的砂型铸造，而且某些更专门的工艺，如压铸和熔模铸造都能用来满足形状和精度的要求。

有些几何形状，如很长和极薄的截面，铸造起来极困难，但幸运的是，恰好可用其他方法既极便宜又有效地制造出来。

材料的成分 采用适宜的铸造工艺时，几乎所有的工程合金都能铸造。几年前，对于非常活泼和难熔的合金还是明显的例外，但即使这样的合金，现在也正在被解决熔炼和铸造困难的特种工艺所克服。某些种类的重要工程合金只能铸造，最明显的例子是铸铁，而铸造业最早就是围绕铸铁发展起来的，并且在铸铁领域里，现在有各种各样性能的材质提供选用。铸造方法对很难加工的硬质或韧性合金特别有利。

一些主要的铸造合金列于表 0-1，该表列出了各种各样的现有成分。虽然几乎可铸造出任何成分的合金，但是，最好的结果是从铸造技术条件获得的，而铸造技术条件是为发挥铸造和工程性能最佳结合而特别研制出来的。

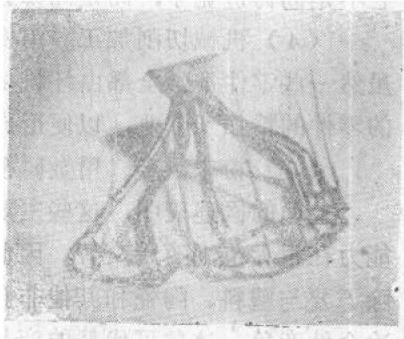


图0-2 用钴-铬合金的牙科镶入物的熔模铸件：加工后重 9 g

工装费用

铸造既适合于单件生产，也同样适合于大量生产。由于铸造模样常由便宜的材料制成，且取阳模形式，其费用比某些其他成形法所需的成形装备费用便宜。这对于单件和小批生产则更是如此，因为通用的造型工艺可用来简化设备要求。大量生产所需的更精密复杂的、经久耐用的组合模样的费用，仍然比其他制造业采用的模具和夹具便宜。用于金属型铸造的较简单的金属型，具有上述相同的优点，不过，压铸需要贵得多的设备，并且为了分摊模具费用必须组织大量生产。

由于模样费用低，铸件在研制和试制阶段也比较容易变更设计或修改尺寸。

铸造组织

铸件在凝固期间具有许多冶金特征。甚至在进一步冷却或随后的热处理过程使主要的组织特征发生变化的情况下，凝固特性仍能对组织和性能起持久的影响。例如晶粒的大小、形状和微观成分的分布等金属基本特征，对铸造条件是敏感的，而偏析和显微疏松可以进一步影响性能。

锻造金属的时候，在制造时的机械变形不仅给出形状，而且使晶粒细化、闭合孔洞并使偏析重新分布；甚至在存在严重缺陷的情况下制造时，机械变形也可能导致断裂。这些特点被认为提供了一种铸件所没有的保险因素。不过，采用已发展至可靠的高水平的无损探伤和

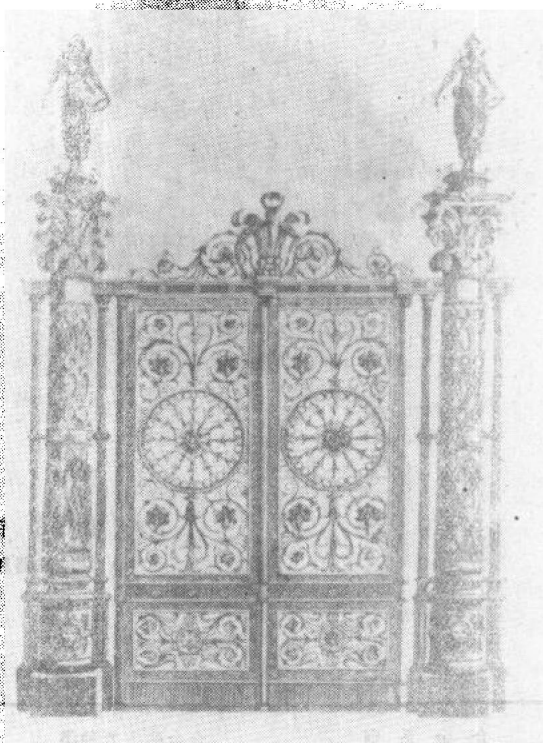


图0-3 装配式铸铁门

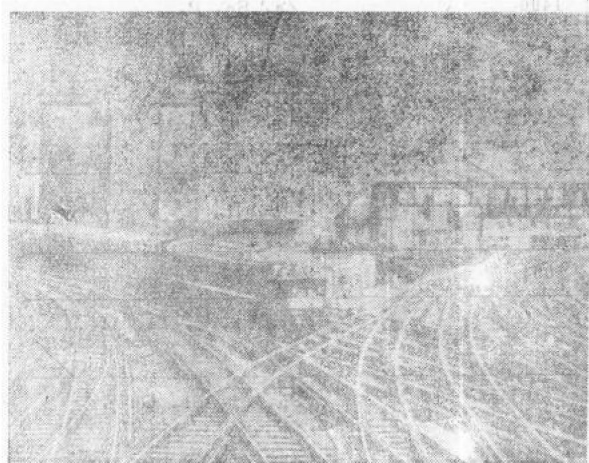


图0-4 锰钢铸造的铁路道叉

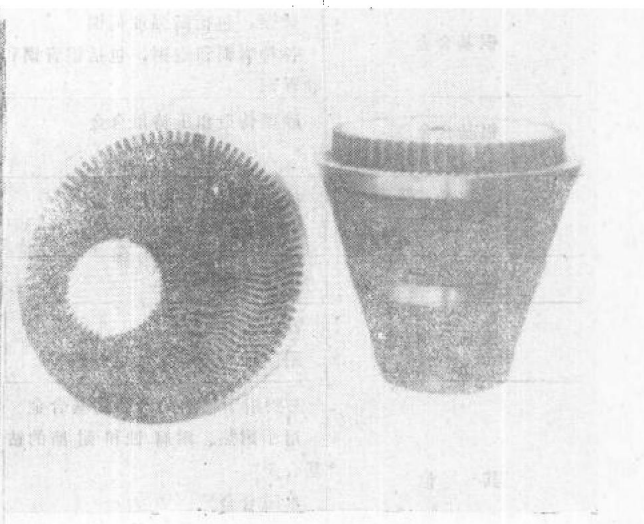


图0-5 造纸厂原料破碎机的两组钢铸件

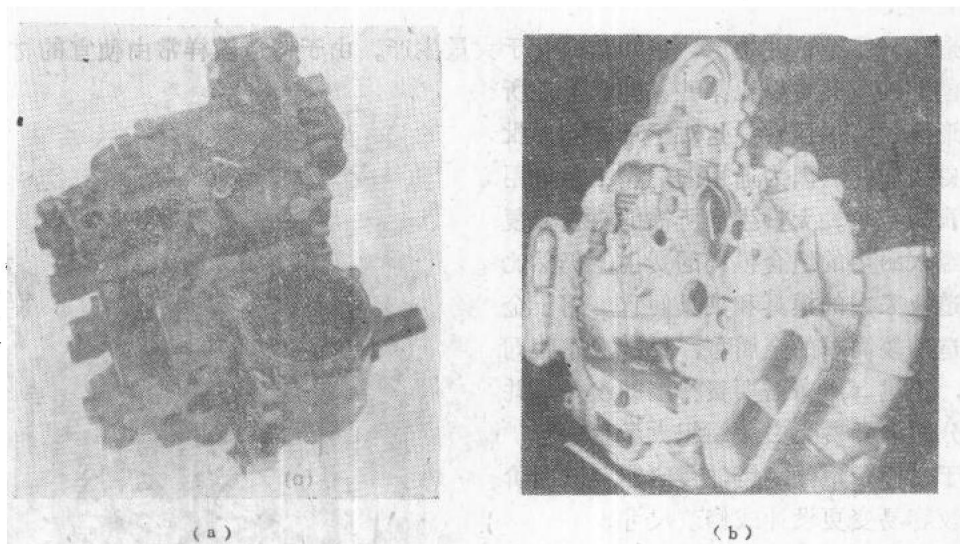


图0-6 镁合金砂型铸件
(a) 泵过滤器和阀 (b) 增压器壳

表0-1 铸造合金

合金系列	合金的主要种类	用于铸件的主要英国标准	一些合金元素
铸铁	灰铸铁 可锻铸铁 球墨铸铁	1452 309, 310, 3333 2789	C, Si, P, Ni, Cr
铸钢	碳钢和低合金钢 高合金钢, 包括不锈钢和耐热钢	3100	C, Mn, Cr, Ni, Mo
铜基合金	黄铜, 包括高强度黄铜 各种青铜和炮铜, 包括铝青铜和硅青铜	1400	Zn, Sn, P, Pb, Ni, Al, Fe, Mn, Si
铝基合金	砂型铸造和压铸用合金	1490	Si, Cu, Mg, Mn, Zn, Ni
镁基合金	砂型铸造和压铸用合金	2970	Al, Zn, Zr, Mn, 稀土金属
锌基合金	压铸合金	1004	Al, Mg, Cu
镍基合金	高温合金 耐腐蚀合金		Cr, Co, C, Ti, Al Cu, Cr, Mo, Si
其他	主要用于轴承的铅和锡基合金 用于耐热、耐腐蚀和耐磨的钴基合金 永磁合金 用于耐高温和耐腐蚀的钛、铬、钼和其他特殊材料		Sn, Pb, Sb, Cu Cr, Ni, Mo, W, Nb Fe, Co, Ni, Al

精确地控制铸造组织，也可提供这种保险。在这些条件下，铸造组织和锻造组织间可进行正确的比较。仅仅在使用的最大性能同工作方向相一致这样的应力模型情况下，锻造的纤维组织才是有利的；在其他情况下，则以铸件的各向同性这一性质为好，不过，不是所有的铸造组织都具有这种性质。

在某些情况下，铸造组织的特征变成了有用的因素。例如，轴承青铜的心部组织，片状石墨组织提高灰口铸铁的减振性，和在高温合金中粗晶有利于抗蠕变等。

工艺的灵活性

同某些其他领域所需的轧钢机、压力机和类似的重型设备比较，生产铸件只需要较小的投资。有可观比例的产品是由小铸造厂（或车间）以传统方式生产，以供应有限的或地区性的需要；铸造厂（或车间）在地区上的广泛分布就说明了这个特点。另一方面，铸造操作的基本环节，使其本身易于机械化和自动化，因此，在较大的铸造厂（或车间），为了大量生产和获得低的单位成本，可以进行大量的投资。近年来，可看到生产量明显地趋向于集中到这些较大的更有效能的工厂里。

历史上的进展和现代工业

古代和中世纪的历史，都提供了制造和使用铸件的实例，表明金属铸造是所有工业中最古老的。大约 5000 年前，人们在敞开的铸型里，浇出形状简单的铜制斧头。在公元前，铸造已发展至能用两个半型和带芯子的铸型，制成精制的青铜塑像¹。到中世纪末，装饰青铜和锡基铸件开始用于欧洲的教堂和家庭生活，而铸铁则做成浅黑外形的炮弹和墓碑。在十六世纪，Biringuccio 写了一篇详细的金属铸造的报导，报导了铸造工人的工作条件和情绪给他留下的印象，即使在今天，这些情况仍没过时。当时就已使用了砂箱和砂子²。

在早期的科学家中，铸造工作者特别感兴趣的，是雷默（Réaumur 1683~1757）的著作。在他的广泛活动范围和经历中，他对铸铁特别感兴趣。他不仅制出可锻铸铁，而且还指出了各种铸铁组织范围和生产白口铸铁、灰口铸铁与麻口铸铁影响因素的明确概念³。铸铁作为工程材料被普遍采用，是 Abraham Darby 在 1709 年成功地在焦炭高炉进行熔化之后；这为随后的工业革命的那些年代，在建筑上大量采用铸铁铺平了道路；这种情况，仅当 Bessemer 于 1856 年研制出转炉，使大量供应便宜的钢成为可能之后，才被改变。

尽管少数早期科学家感兴趣，但金属铸造仍被视为一种艺术，并且，这种观点一直持续到进入本世纪。工业革命后，涌现了许多铸造厂（或车间），绝大多数是生产当时用做结构材料的铸铁。组织起来的铸造工业，围绕着造型和模样工人的技艺发展。这些能工巧匠继承着艺术铸造的前辈师傅的直接传统。他们的熟练技术能制造复杂形状的制品，但是提高冶金质量和健全的产品，是等到后来科学知识和无损探伤的出现才成为可能。

因此，在十九世纪，质量的一般进展与铸铁件的大量生产是不相适应的，从而使铸造产品在工程使用上遇到了危机，而非韧性材料则更为严重。1879 年 Tay Bridge 桥倒塌后，在早已怀疑设计有问题的铸铁柱子里，发现有过多的孔洞，并被胡乱地用腻子补上。这件事表明，当时的结构铸件潜在地被削弱了，诸如 Telford 和有名的 Ironbridge 这样一些幸存的许多宏伟的桥梁，即使当时制造正确，使用恰当，铸铁的质量也是一样的。尽管造型工的技巧可以制造复杂形状，但是，一直到近代有了决定质量因素的更完备知识，和改进过的评价

质量的手段之前，冶金和工程方面的情况几乎没有什么变化。随着过程控制现代技术的发展，操作者的不成熟的判断已让位给客观测量金属的温度、造型材料的性质和别的生产变量；而且能更确切地确定它们的影响。这些改进，不仅已经用于铸铁，而且已经广泛地用于各种铸造合金。

现代工业发展的另一个特点是，既改变操作者也改变管理人员的职责。对于造型工来说，这是很普通的习惯做法：接收模样，决定造型方法，自己配砂、造型和浇注，他甚至可以自己熔化，并清理自己做的铸件。在某些铸造厂（或车间），操作者实际上是把他的产品卖给公司的转包商；唯一的技术控制是由工匠实行的。稍后的进展，是增加车间管理人员决定制造工艺的作用，这种组织形式，促进最优秀的工匠去指导他同事的工作。

然而，铸造业的进一步发展，特别是各种铸造方式大量生产的出现，导致出必然的结果，即专门化。不仅操作人员趋向于被限制于有限的工作任务，而且操作者，常常连同他的直接领导一起，可以从制定生产方法的直接责任里摆脱出来；这部分责任常常落于专门的技术人员身上，他们的唯一职责是制定和记录铸造方法和铸造工艺。除了事先设计铸造方法外，还同时进行着以确定金属成分、金相组织和性能的现代实验室设备为基础的冶金控制。这样，科学的控制就用于从原材料到成品铸件的所有阶段。这些变化，改变了对操作人员的技术要求，因为比较重要的决定，在模样装备到达车间前就已经制定出来了。原来对手艺的依赖，让位于工艺学，并且，必须找出利用车间人员能力和积极性的新出路。

现代铸造业的结构是复杂的。同传统的铸造业直接相关的是单件小批铸造厂，它们具有承揽广泛尺寸范围和不同结构的铸件的能力。它们的生产批量往往很小，即使许多笨重的体力劳动为机械所代替，仍然有一些是靠手工操作。同这种规模的铸造厂成对照的，是专业化的铸造厂，它们或者强调有限品种的大量生产，或者是采用单一的专门铸造方法。许多这样的铸造厂附属于工程公司，公司把铸件装配到它们的成品中。

单件小批生产的铸造厂（或车间），在制造各种结构零件的铸型和确定保证一次成功的健全产品的铸造方法时，总是遇到各种新问题。虽然依靠造型工的技术能适应各种各样的设计，但是，作为铸造方法，或者必须从理解基本的原理开始有系统地逐步研究，或者必须冒提高生产成本的危险而加大安全系数。

相反，大量生产的铸造厂（或车间），强调严密的过程控制，以保持各种材料和各个工序的一致性。有了精致的模样装备就不需要高超的造型技术，因而有机会逐步研究铸造方法，以减小安全系数，并达到最经济的生产。

铸造业的上述这种情况，当然是被简化了。因为许多公司在几个方面同时经营，即同时经营单件生产和大量生产，传统的和高度专业化的生产。同时，虽然大多数铸造厂（或车间）把它们的活动限于有限的合金范围，例如灰口铸铁或者钢，铜基合金或者压铸合金，但另一些公司则同时生产几种这些材料。

铸造工艺学

铸造方法包括金属型铸造、压铸、熔模铸造和离心铸造等。但是，按照传统造型的砂型铸造生产这一中心议题，能很方便地介绍铸造的一般特点。从设计到成品顺序的基本步骤，总括在图 0-7 的流程图中。稍加修改的类似顺序图，可用于各种铸造法。主要的例外是压铸，在这里，模样和一次铸型的原理被永久性阴模的金属型所代替。这两种体系的个别特点，在本书的正文里将详细讨论。

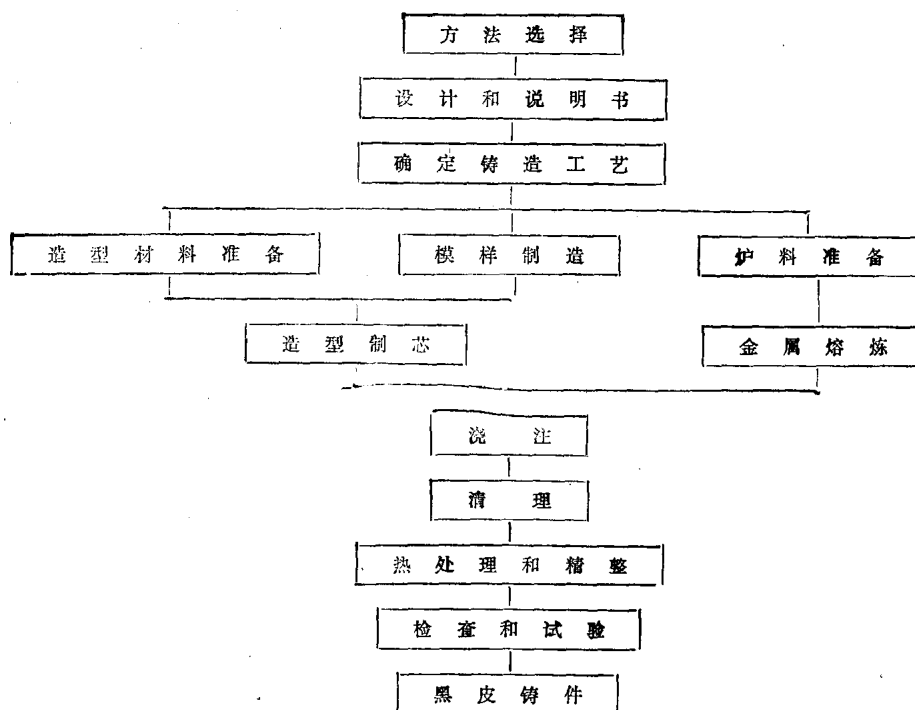


图0-7 铸造生产流程图

在金属铸造中遇到的各种不同的技术问题，主要起因于合金的物理性质和成分的不同，各种各样的过程温度就是例子：表 0-2 列举了各种重要铸造合金母体金属的熔点。其它重要的差别，包括化学活泼性和气体溶解度、凝固方式以及收缩特性。这些因素影响金属流动、铸型稳定性、补缩、无应力冷却和铸造材质的组织与性能等这样一些问题。因此，要求适合于这种合金独特条件的单独工艺。

表0-2 一些金属的熔点

金 属	铁	镍	铜	铝	镁	锌	铅	锡
熔点℃	1573	1453	1083	660	650	420	327	232

一旦制定出主要的铸造工艺，铸件质量就由为数众多的工艺过程变量所影响。其中一些变量仅能在狭小范围里调整。例如，虽然从更广的意义上讲，铸造过程的需要会影响铸造合金技术条件的选用范围，但是，金属成分则常被技术条件所限制：这就说明了常用合金接近于共晶合金的原因，共晶合金有很好的流动、补缩和防热裂等有利特性。然而，用很小量的某些元素的孕育处理，既能强烈地影响铸造特性，也能影响铸造组织，同时也可以通过造型材料的性质，熔炼操作、浇注温度和浇注速度加以控制。这些变量，同浇冒口工艺和冷铁一起，可用来控制整个冷却型式。这就是控制成品铸件组织和质量的关键。

可通过各种形式的观察和测量实行控制。在某些情况下，直接测量温度、时间、成分或性能是有用的；同时，一些别的经验性试验，则与某些铸造特性，如金属的流动性、铸型发气性或结疤倾向有特殊关系。这些方法，不管是用于实验室还是铸造厂（或车间），形成了金属铸造科学管理结构的一部分。这种科学管理结构也依靠无损探伤和冶金检验作出的对铸

造产品的系统评价, 依靠它与生产变量的相互关系。在这方面, 统计方法和质量控制系统能起重要的作用。

铸造的应用科学, 也研究铸造和铸造材料的基础。它包括研究液态金属的流动和凝固现象, 研究合金和造型材料的高温应力—应变关系, 和研究各种形式缺陷的根源。因为它对金属铸造的进一步发展有极大关系, 经常有文献对此进行研究。

或许, 调查研究的最重要领域, 是铸造材料的过程—组织—性质之间的关系。现代工程的要求, 包括高应力和严酷的使用条件, 所以必须有更严格的质量和可靠性的标准与之相适应。除了发展新的铸造合金和改进无损探伤技术外, 能够控制组织, 就可以对铸件中的真正性能和名义值或试棒值之间, 提供更确切的相互关系。这种探讨, 表现为“优质”铸件 (‘premium’ castings) 这一概念, 这种铸件有高的和保险水平的内部性能。似乎, 这种探讨终将形成铸件设计的正常基础。

其他主要的活动, 放在发展铸造方法和生产管理方面。关于铸造方法方面的工作, 直接指向更高的精度标准和更高的材料质量标准, 并且包括推广压铸、熔模铸造工艺以及全新的铸造技术。生产管理方面的挑战, 主要是在经济上, 同时, 对于中等批量铸件的生产则是如何把大量生产的原理和铸造方法的灵活性结合起来, 从而降低单位成本。这与上文谈到的摆脱技艺和手工技艺的倾向, 而强调在任务下达车间之前搞好模样装备和铸造工艺的设计, 从而走向技术管理, 有着密切的联系。

铸造生产问题的性质, 是同设计特点紧密相关的, 因此, 在准备阶段, 设计人员和生产人员间的预先通力合作, 能使铸造生产的任务大为简化。除了个人联系外, 这些年来, 已经建立了工程师在设计铸件时必须采用的许多原则。恰当的交流, 能确保铸造过程最经济, 确保采用正确的技术, 并能确保正确评价铸造同整个金属生产的关系。现代铸造一定会以通用和可靠的行业这样的评价出现在人们的面前。

参 考 文 献

- 1 SINGER, C. J., HOLMYARD, E. J. and HALL, A. R. *A History of Technology*, Clarendon Press, Oxford, (1954-8)
- 2 BIRINGUCCIO, V. *de la pyrotechnia*, Venetia (1559). Translation C'S. Smith and M. T. Gnudi, New York, *A.I.M.M.E.* (1942)
- 3 DE REAUMUR, R. A. F. *Memoirs on Steel and Iron*, Paris (1722). Translation A. G. Sisco, Chicago, University of Chicago Press (1956)
- 4 AITCHISON, L. *A History of Metals*, Macdonald and Evans, London (1960)
- 5 AGRICOLA, G. *de re metallica*, Basel (1556). Translation H. C. Hoover and L. H. Hooyer, New York, Dover Publications (1950)
- 6 ROXBURGH, W. *General Foundry Practice*, Constable, London (1910)
- 7 COGHLAN, H. H. *Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World*, Pitt Rivers Museum, Oxford (1951)
- 8 GALE, W. K. V. 'Some notes on the history of ironfounding', *Br. Foundrym.* 56, 361 (1963)

第1章 液态金属和铸件的浇注系统

熔融金属浇入铸型是铸造的关键步骤之一，因为金属液的特性及其随后的凝固和冷却，决定了铸件的形状是否正确，内部是否健全，是否没有缺陷。

成功的浇注工艺，部分取决于金属本身的某些性质，例如，影响流动的金属成分和温度；部分取决于铸型的性质和铸型的设计，包括造型材料的性质和把金属引入型腔的浇注系统工艺。当金属处于液态时，铸造工作者也关心作用于铸型上的力，及冷却至凝固温度期间产生的体收缩。这些方面，首先从铸造条件下液态金属的流动性开始，将分别加以研究。

一、液态金属的流动性

虽然其它名词如可铸性 (castability)，已用来描述流动特性的某些方面，但是，人们却更广泛地公认流动性这一术语。广义的说，流动性可以定义为液态金属的这种性质，即：使液态金属流经浇注系统并充满型腔的所有空隙，以获得轮廓清晰并真实反映出各设计细节。因此，流动性差可能是铸件浇不足或表面轮廓清晰度差的一种原因。流动性不能理解为像密度、粘性一样单纯的物理性质，而是与铸型内特定条件有关的一种复杂性质。

在考察影响流动的诸因素时，粘度被认为是最重要的。粘度的定义是，使单位表面积以单位速度流动，通过一相等的平行表面的单位距离所需的力。因此，粘度是液体传递动态剪应力能力的一种度量。当液体在封闭式通道流动时，液体的粘度将决定通道壁所施加的阻力传递给整个液体的程度。因此，这种阻力将影响流动速度。人们发现，流动速度同粘度有着简单的反比关系。在液体自身压头作用下，与液体流动能力关系更直接的是运动粘度。运动粘度是绝对粘度除以密度。

进一步的研究表明，在铸造条件下，确定有关金属充型能力时，上述性质不是决定性的。虽然液体有粘度，液体的基本特性之一是，任何液体经过一段时间后都能符合所盛容器的形状。在液态金属处于恒温的情况下，由于液体金属的粘度非常小，上述充填情况会很快出现。在铸造条件下，型腔充不满不是由于粘度高，而是由于过早地凝固。因此，热条件和凝固型式是金属液停止流动的关键因素。流动性的概念考虑了这些方面因素。

1. 流动性的检测

由于流动性不能从个别的物理性质评定出来，人们用经验性的试验来测定这种综合的特性。这些试验的条件，以类似在铸造车间浇注金属时的条件为基础，并且，以熔融金属在标准化的封闭沟槽系统里停止流动前充填的总长度作为流动性的大小。这些试验的另一参数是流动时间或液体延续存在的时间。

Clark^{1, 2}和 Krynitsky³详细地考察了许多较早的流动性试验工作。早期采用直的流动沟槽⁴，其缺点是过长，且对角度敏感，因而已被淘汰而采用各种不同的螺旋型试验(如文献5~7所列举的)。图 1-1 是一种典型的螺旋流动性试验装置。各种不同的螺旋型试验，主要是与获得真正标准的流动条件有关。处理这个问题是通过设计不同的贮槽系统，以获得稳定压头和恒定的浇注速度，保证金属液以均匀的速度流入试验装置⁸。由于流动性的检测对铸型的热性质和表面特性的微小变化也敏感，因此，一些研究人员采用石墨型和金属型，以此试图