

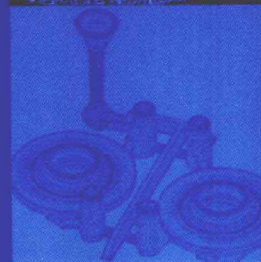
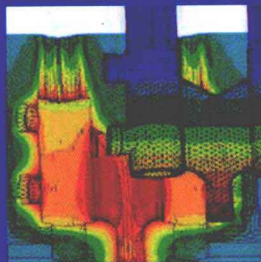


国际机械工程先进技术译丛

铸造过程 解析方法

**CASTING:
AN ANALYTICAL APPROACH**

(美) Alexandre Reikher Michael R. Barkhudarov 著
熊守美 康进武 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

铸造过程解析方法

(美) Alexandre Reikher Michael R. Barkhudarov 著
熊守美 康进武 译



机械工业出版社

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高速发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等。
- 资源加工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等。
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、定制化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便习惯,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方

法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

序 言

本书是作者在铸造及流体动力学领域 40 年经验的结晶，全书从解析的角度概述了铸件设计及工艺开发。

早在 19 世纪，流体动力学和静力学即得到了很大的发展，但迄今工艺开发仍在很大程度上停留于试错法。本书将重点介绍材料的强度和流体动力学，它们是铸造产品和工艺开发的基础。

本书为从事铝合金铸造的产品设计人员和工艺工程师提供了对策和设计工具。它结合了产品和工艺开发的诸多因素，包括静力学和流体动力学，以及完全开发好的应用程序，可以解决工艺开发过程中各阶段的问题。

本书包括五个部分：铸造工艺概述；流体动力学；材料的强度；砂型铸造、金属型铸造及压铸工艺设计；质量控制。

本书将铸件工艺设计中遇到的实际问题与基于 MATLAB[®]和 Visual Basic 编写的界面友好的应用程序相结合。文后附录 A 是单位换算的内容，可供工程师及开始学习机械工程的学生参考。本书也适合于产品设计师和工艺工程师。

完全开发好的工艺设计应用程序将有助于工艺工程师充分利用计算机和软件带给工程的能力。产品工程师也可以详细了解工艺开发过程以及铸造工艺开发过程中所使用的控制方程。

书中的实例要借助于 MATLAB[®]函数、Visual Basic 应用程序以及通用的流体力学软件 FLOW-3D[®]进行求解。所有 MATLAB[®]函数、图片以及 Visual Basic 应用程序均由作者开发。同时，适当引用了通用的方程和理论。

作者为避免出版错误作了很大努力。感谢读者对本书的错误或不足之处提出意见及改进建议。

Alexandre Reikher, Milwaukee, Wisconsin, 美国, 2007 年 4 月

Michael R. Barkhudarov, Los Alamos, New Mexico, 美国, 2007 年 4 月

译 者 序

铝合金铸件具有密度小、比强度高等特点，在汽车、航空航天、高速列车、电力装备等方面得到广泛应用，发展极为迅速。铝合金可采用传统的砂型铸造、金属型铸造，还采用高压铸造、低压铸造、消失模铸造和挤压铸造等方法，尤其压铸技术推动了铝合金铸造的快速发展。因此在铸造生产中，铝合金铸造产品设计和铸造工艺设计显得尤其重要。

这是一本关于铝合金铸造产品设计和铸造工艺设计的译著。近三十年来铸件凝固过程数值模拟技术发展突飞猛进，现在铸件数值模拟技术及软件已经在大型铸造企业普遍应用，新产品基本都要进行数值模拟，并在此基础上进行工艺优化。但是铸件凝固过程数值模拟技术离不开昂贵的软件，前处理工作量大，计算相对复杂。而本书中作者根据在机械及流体动力学领域 40 年的工作经验，从解析的角度建立了产品及工艺开发工具。本书的特点是根据推导的公式采用解析算法进行分析，采用 MATLAB[®]和 Visual Basic 编写相关程序，提供了相应的计算实例，为从事铝合金铸造的产品设计人员和工艺工程师提供了设计资料和工具。该工具计算简便，可以解决工艺开发过程中每一阶段的问题。本书是对铸件凝固过程数值模拟的一个有益补充。

本书主要包括 5 个部分：铸造工艺概述、流体动力学、材料的强度、砂型铸造、金属型铸造及压铸工艺开发和质量控制。铸造产品设计部分主要分析了基本受力情况与强度计算，铸造工艺设计部分重点分析了压铸的充型流动和型腔气体的排除。本书还介绍了轻合金铸造、力学和流体动力学以及质量管理的一些基本理论和基础知识。

本书适合从事铝镁轻合金压铸的研究人员、产品设计人员和工艺设计人员阅读，具有一定的参考价值。

熊守美 康进武

目 录

译丛序言

序言

译者序

第 1 章 轻金属铸造	1
1.1 铸造工艺	1
1.2 砂型铸造	1
1.2.1 浇注系统	1
1.2.2 冒口和冷铁	2
1.3 金属型铸造	3
1.3.1 重力金属型铸造	3
1.3.2 低压金属型铸造	3
1.3.3 差压金属型铸造	4
1.4 压力铸造	4
1.4.1 压铸工艺	4
1.4.2 压铸模具	7
1.4.3 浇注系统	7
1.4.4 压铸模具的型腔	8
1.4.5 排气系统	9
1.4.6 排气块	9
第 2 章 流体力学介绍	10
2.1 基本概念	10
2.1.1 压力	10
2.1.2 粘度	11
2.1.3 温度和焓	13
2.2 运动方程	14
2.3 边界条件	16
2.3.1 内壁处的速度边界条件	16
2.3.2 内壁处的热交换边界条件	16

2.3.3 自由表面边界条件	16
2.4 有用的无量纲数	18
2.4.1 定义	19
2.4.2 Reynolds 数	19
2.4.3 Weber 数	20
2.4.4 Bond 数	20
2.4.5 Froude 数	20
2.5 伯努利方程	21
2.6 可压缩流动	22
2.6.1 状态方程	22
2.6.2 气体运动方程	23
2.6.3 比热容	24
2.6.4 绝热过程	25
2.6.5 声速	25
2.6.6 马赫数	27
2.6.7 气体的伯努利方程	27
2.6.8 最大速度	27
2.7 计算流体力学 (CFD)	28
2.7.1 计算网格	28
2.7.2 数值近似	30
2.7.3 几何重构	31
2.7.4 自由表面追踪	32
2.7.5 小结	34
第3章 产品设计	35
3.1 轻金属铸件设计	35
3.2 静态分析	35
3.2.1 静矩	35
3.2.2 惯性矩	36
3.3 加载	37
3.4 应力分量	38
3.4.1 线性应力	39
3.4.2 平面应力	39
3.4.3 莫尔圆	40
3.5 胡克定律	42

3.6	圣维南原理	43
3.7	失效准则	43
3.7.1	韧性材料的失效理论	44
3.7.2	脆性材料的失效理论	44
3.8	梁的受力分析	44
3.8.1	受力图	51
3.8.2	反作用力	51
3.9	弯曲	52
3.10	弯曲应力	54
3.10.1	弯曲中的正应力	54
3.10.2	切应力	56
3.11	圆筒上的应力	57
3.12	压配合分析	61
3.13	热应力	63
3.14	扭矩	64
3.15	应力集中	67
3.16	疲劳	68
3.17	本章用到的 MATLAB®函数	69
第4章	工艺设计	70
4.1	无量纲数的求解	70
4.1.1	重力浇注	70
4.1.2	压铸: 慢速压射	71
4.1.3	压铸: 快速压射	71
4.2	粘性边界层中的流动	72
4.3	伯努利方程	74
4.3.1	滞止、动力以及总压力	74
4.3.2	受重力影响的流动	74
4.3.3	浇注系统中的液体流动	75
4.3.4	充型速度	77
4.4	压室中流体的流动	79
4.5	排气系统	86
4.6	排气块	92
4.7	Little 方程	92
4.8	泊松过程和指数分布	93

4.9 冷却	97
4.9.1 分块—温度模型	97
4.9.2 半无限大介质中的热流	102
4.10 CFD 模拟	105
4.10.1 压铸	105
4.10.2 重力砂型铸造	113
第5章 质量控制	116
5.1 质量控制的基本概念	116
5.2 质量的定义	116
5.3 控制的定义	117
5.4 统计过程控制	117
5.5 数据的表格型汇总	118
5.6 数值型数据的汇总	118
5.6.1 正态概率分布	119
5.6.2 泊松概率分布	119
附录	121
附录 A 单位换算	121
附录 B 词头	128
参考文献	129

第 1 章 轻金属铸造

1.1 铸造工艺

生产轻金属零件的铸造方法有多种，其中最常用的包括：砂型铸造、金属型铸造和压力铸造（压铸）。

通常，在选用具体的铸造工艺时，经济性是考虑最多的因素。对于砂型铸造而言，在模具方面的前期投资是最少的，但是生产出来的铸件尺寸精度较低，需要进行额外的机械加工，这将会提高零件的生产成本。

金属型铸造需要对模具进行前期投资，生产出来的铸件尺寸精度较高，机械加工量较小。相对砂型铸造而言，金属型铸造的冷却速度很快，因此铸件的生产周期大大缩短。

压铸工艺需要对模具作大规模的前期投资，由于在生产过程中采用很高的压力，因此生产出来的铸件尺寸精度很高。在以上三种铸造方法中，用压铸工艺生产的铸件机械加工量最少。

1.2 砂型铸造

在生产近净形零件的各种方法中，砂型铸造方法是最古老的。砂型铸造的铸型（见图 1.1）一般用湿型砂或树脂砂。湿型砂铸型使用天然砂和粘土或者人工合成砂的混合物。典型的砂型铸造用铸型包括浇注系统、冒口和冷铁。

1.2.1 浇注系统

浇注系统的主要功能就是让金属液流入型腔。好的浇注系统的设计需要用到液体流动的基本原理。为了避免空气的卷入及确保铸件最薄区域充填的完整性，金属液充填型腔的流量应当尽可能地降低。典型的浇注系统包括浇口杯、直浇道、横浇道和内浇口。

为了避免缩孔缩松缺陷，铸件的厚大区域在凝固过程中要进行补缩，这也是为什么实际生产中会将浇口设置在铸件较厚大区域的原因。

浇注系统的设计需要遵循以下几条基本准则：

1) 浇口杯与直浇道的直径比应使整个浇注系统在充型过程中处于充满状态。

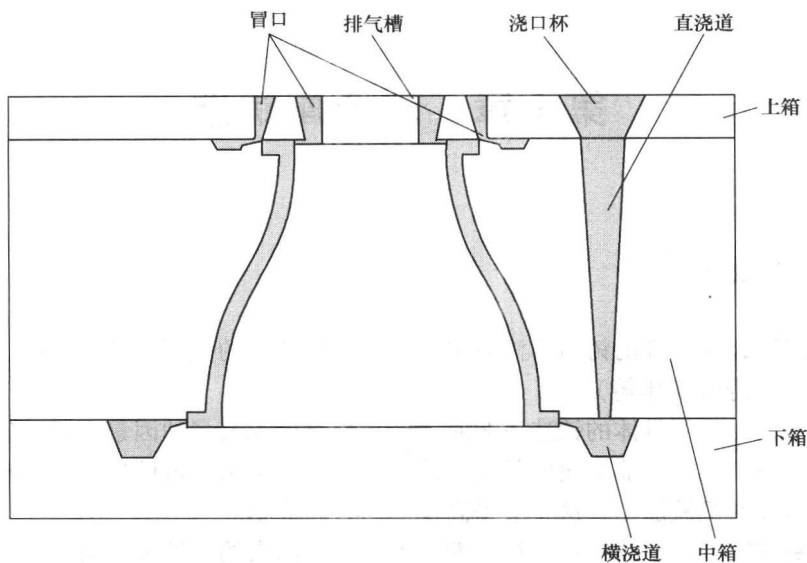


图 1.1 砂型铸造铸型

- 2) 浇注系统的设计需要确保铸件的顺序凝固。
- 3) 对于浇注系统的设计，应该尽量避免流动方向及截面的剧烈突变。
- 4) 浇注系统应当在保证金属液流速最小的基础上，实现流量的最大化。这将有利于避免金属液的紊态流动以及减少气体的卷入。
- 5) 如果铸件有多个厚薄不同的截面，需要考虑采用多个浇注系统的设计。这种设计同样适用于浇注大型铸件，以缩短充型时间和避免浇道处型砂过热。
- 6) 应当避免将内浇口放置在砂芯或者型壁的正对面。这种设计会引起金属液的飞溅和气孔。

1.2.2 冒口和冷铁

在凝固过程中，金属液的密度增加，相应地铸件的体积会缩小，这会使处于凝固过程中的铸件内部压力减小。铸件内部不同部位存在的压差会迫使金属液从还未凝固的“热节”区域流向温度更低的、正在凝固收缩的区域。在某一时刻，金属液会达到所谓的临界固相率。当处于这种状态时，金属液不能再流动以弥补收缩的体积，从而形成了缩孔缩松缺陷。冒口应放置在铸件最后凝固的区域，为铸件厚大的、凝固缓慢的部位补充金属液。铸件中某些区域被薄壁截面分开，在凝固过程中会阻碍补缩金属液，典型的例子就是从薄壁延伸出来的凸台。当出现这种情况时，可使用冷铁来加速凝固，减少或消除缩孔缩松缺陷的形成。对于形状复杂的铸件，可以考虑设置多组冒口和冷铁，以实现铸件的顺序凝固。

1.3 金属型铸造

金属型铸造的特点是铸件在取出的过程中不会破坏铸型，铸型可以重复使用，生产大量相同的铸件。同砂型铸造相比，金属型铸造生产的铸件拥有更细的晶粒组织和更高的力学性能。压铸件中的主要缺陷——气孔，在金属型铸件中则几乎难以找到。

金属型模具主要由以下几个部分构成：

- 1) 浇注系统，可以使金属液以特定的速度进入型腔。
- 2) 补缩系统，对凝固过程中铸件的较厚区域进行补缩。
- 3) 冷铁与补缩系统组合使用，加速铸件较厚区域的凝固速度。
- 4) 排气系统，在金属液充型过程中排出型腔中的气体。

一般而言，金属型铸造与砂型铸造在操作上非常类似，采用重力方式浇注铸件。为了确保铸件的合理浇注，需要设置足够的浇冒口。浇注系统、冒口、冷铁的位置设置都是为了满足顺序凝固的需要，使铸件首先从远离浇冒口的位置开始凝固，然后逐渐向浇冒口方向过渡。浇注系统如果设计和设置得不合理，将会导致铸件产生浇不足和缩孔缺陷。补缩系统和冷铁如果设计不当，将导致过多的缩孔疏松缺陷和过长的闭模时间。排气系统的尺寸和位置不当将会使铸件中产生过多的气孔缺陷。

目前有三种主要的工艺采用金属型来生产铸件，它们包括：重力铸造、低压铸造和差压铸造。

1.3.1 重力金属型铸造

重力铸造采用重力的方式使金属液充填型腔，是一种基本的铸造方法。这种铸造工艺可以用来生产几何形状比较简单的铸件，但是这种铸件不能在高应力或者对密封性有严格要求的场合下使用。

1.3.2 低压金属型铸造

低压金属型铸造采用施加压力的方式使金属液充填型腔。采用这种工艺生产的铸件具有更高的密度和更少的孔洞缺陷。熔融的金属液在一定的压力下（0.5~0.8Bar）通过升液管从模具底部进入型腔，这种方法的优点是：

- 1) 整个过程可以实现自动化，可以控制金属液的充填速度，抑制金属液的紊态流动，进而减少铸件中的卷气缺陷。
- 2) 采用的密封炉可以尽量避免金属液的氧化，防止产生夹杂。
- 3) 金属液是从储液坩埚的底部流出，这样可以确保进入铸型型腔的金属液更加洁净。
- 4) 低压铸造可以实现顺序凝固，升液管可以不断地补充金属液直到整个铸

件完全凝固，从而减少了缩孔缩松的数量。

5) 这种工艺可以生产高质量的薄壁铸件。

1.3.3 差压金属型铸造

差压金属型铸造与低压金属型铸造非常类似，也是采用较低的压力使金属液从模具底部充填铸型型腔，然后在压力下结晶凝固。当金属液充满型腔以后，压力不断增加来抑制氢气的析出。差压金属型铸造通过型腔加压的方法来抑制缩孔缩松的产生，可以生产具有最高力学性能的铸件，而且不需要使用冒口。

1.4 压力铸造

采用压力注射来代替重力浇注，这种压铸工艺方法最早可以追溯到 19 世纪中叶。1849 年，Sturges 用人工操作的机器压铸出了印刷字体，从而获得了该项专利。在以后的 20 年里，这种工艺一直局限于制作印刷字体，直到 19 世纪末期，制作对象的形状和样式才开始慢慢增多。到 1892 年，这种工艺开始被用作商业化生产照相机和收音机的零部件。到 20 世纪早期，压铸工艺的应用范围得到了进一步的推广，生产规模也越来越大。

第一种压铸合金是不同成分组合的锡铅合金，到 1914 年，随着锌合金和铝合金的出现，锡铅合金的应用开始减少。镁合金和铜合金也很快出现，到 20 世纪 30 年代的时候，市场上开始出现许多目前仍在应用的合金系列。

压力铸造工艺经历了从最初的低压注射方法到 4500 lbf/in^2 压力的高压铸造、挤压铸造和半固态铸造的发展历程，这些现代化的铸造工艺可以生产出表面光洁、形状完整、近净成形的高质量铸件。

目前，压铸工艺使用最多的合金包括铝合金、铜合金、镁合金和锌合金。

铝合金作为一种轻金属材料，具有非常良好的尺寸稳定性、力学性能、切削加工性、导热性和导电性。

铜合金是一种具有高强度和高硬度的材料。这种合金材料具有很高的力学性能、尺寸稳定性和耐磨性。

镁合金是目前最轻的铸造用合金。它大约比钢轻 4 倍，比铝轻 1.5 倍。它比某些钢铁材料以及铝合金具有更高的强重比。

锌合金是最容易铸造的合金，它可以用来生产只有 0.5mm 壁厚的铸件。

1.4.1 压铸工艺

压力铸造在工业领域应用非常广泛，压铸零件的主要优点包括：

- 1) 重量轻，力学性能高。
- 2) 导热性好。
- 3) 良好的切削加工性。

- 4) 耐腐蚀性高。
- 5) 近净成形性。
- 6) 尺寸精度高。
- 7) 废品率低。

压铸是一种高精度的制造工艺，金属液在高速高压的状态下充填金属型腔，压铸可分为两种基本的工艺：热室压铸工艺和冷室压铸工艺。

在热室压铸机中（见图 1.2），压射系统浸没在液态金属内部，其优点是：

- 1) 压铸的生产周期最短。
- 2) 液态金属经过的路程短，温降小。

热室压铸工艺只适合于熔点较低的合金（铅合金、锌合金），熔点较高的合金则会对浸没在金属液中的压射系统造成侵蚀。

热室压铸工艺过程一般有以下几个步骤：

- 1) 液压缸将压力传递给冲头（见图 1.2）。
- 2) 冲头推动压室中的液态金属前进，通过浇注系统进入型腔（见图 1.3a）。
- 3) 铸件在很高的压力下凝固。
- 4) 凝固过程结束后，开启铸型（见图 1.3b）。
- 5) 从型腔中顶出铸件（见图 1.3c）。

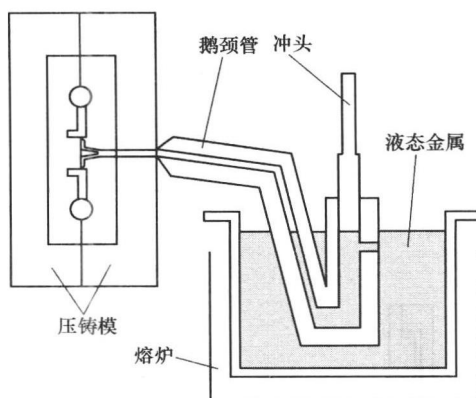


图 1.2 热室压铸机

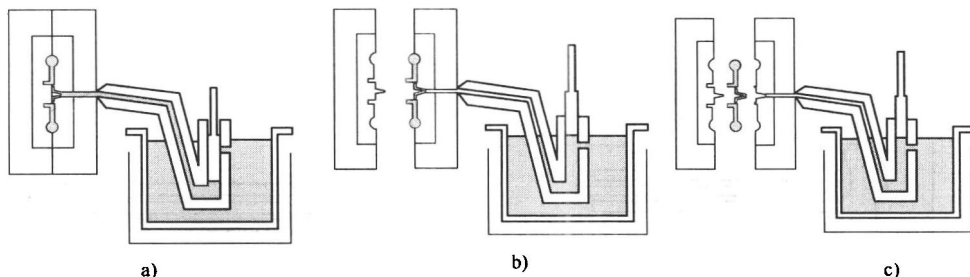


图 1.3 热室压铸工艺步骤

- a) 冲头推动压室中的液态金属前进，通过浇注系统进入型腔
- b) 凝固过程结束后，开启铸型 c) 从型腔中顶出铸件

冷室压铸工艺适合于熔点较高的合金（铝合金、铜合金）。在冷室压铸机中

(见图 1.4)，金属液与压铸机的压射系统接触时间很短。典型的冷室压铸工艺过程包含以下几个步骤（见图 1.5）：

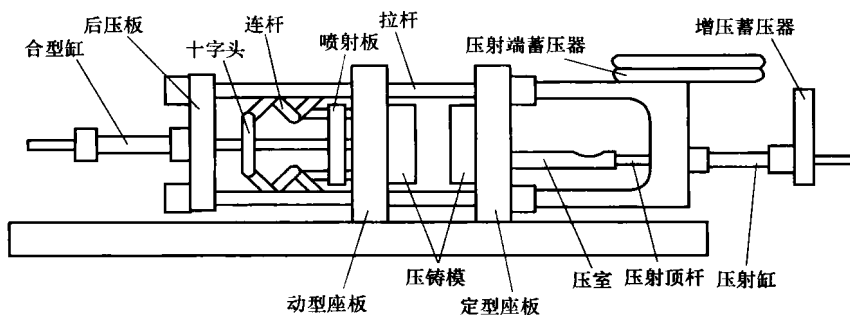


图 1.4 冷室压铸机

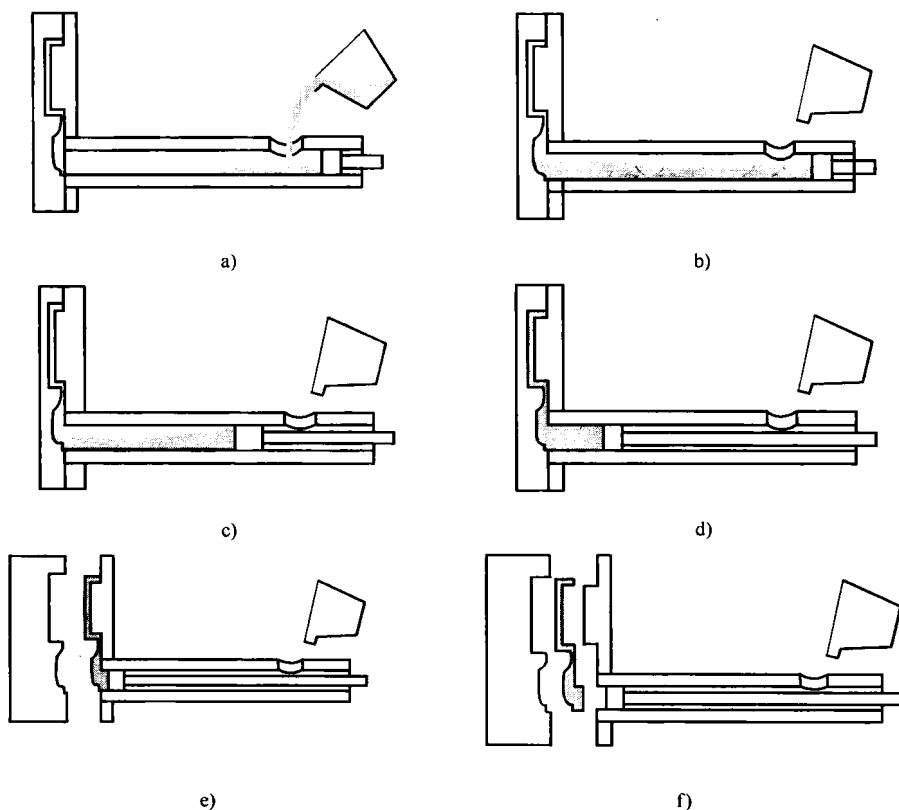


图 1.5 冷压室压铸工艺步骤

- a) 用铸勺将金属液倒入压室 b) 液压缸将压力传递给冲头
c) 冲头推动压室中的液态金属前进，通过浇注系统进入型腔 d) 铸件在高压下凝固
e) 凝固过程结束开启铸型 f) 从型腔中顶出铸件