



全国高等院校“十二五”特色精品课程建设成果

压铸工艺与模具设计

(第2版)

◎主 编 齐卫东



YAZHU GONGYI YU
MUJU SHEJI



全国高等院校

青品课程建设成果

压铸工艺与模具设计

(第2版)

常州大学图书馆
藏书 主编 章卫东



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书从实用的角度出发,对压铸技术作了全面、系统的介绍。全书共分10章,主要内容包括压铸合金及压铸件设计;压铸工艺;压铸机;压铸模的分型面设计、浇注系统及排溢系统设计、成形零件设计、侧向抽芯机构设计、推出机构设计和压铸模总体设计等。本书理论联系实际,有较强的实用性。

本书可作为高等院校、成人高校模具、材料成型与控制、机械类等专业的教材,也可供有关科技人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

压铸工艺与模具设计 / 齐卫东主编. —2版. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 7

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6459 - 4

I. ①压… II. ①齐… III. ①压力铸造 - 生产工艺 - 高等学校 - 教材
②压铸模 - 设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TG249. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 179696 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京市通州富达印刷厂

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 268 千字

版 次 / 2012 年 7 月第 2 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 1500 册

定 价 / 39.00 元

责任编辑 / 李秀梅

张慧峰

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



出版说明

北京理工大学出版社为了顺应国家对机电专业技术人才的培养要求，满足企业对毕业生的技能需求，以服务教学、立足岗位、面向就业为方向，经过多年的大力发展，开发了近 30 多个系列 500 多个品种的高等教育机电类产品，覆盖了机械设计与制造、材料成型与控制技术、数控技术、模具设计与制造、机电一体化技术、焊接技术及自动化等 30 多个制造类专业。

为了进一步服务全国机电类高等教育的发展，北京理工大学出版社特邀请一批国内知名行业专业、高等院校骨干教师、企业专家和相关作者，根据高等教育教材改革的发展趋势，从业已出版的机电类教材中，精心挑选一批质量高、销量好、院校覆盖面广的作品，集中研讨、分别针对每本书提出修改意见，修订出版了该高等院校“十二五”特色精品课程建设成果系列教材。

本系列教材立足于完整的专业课程体系，结构严整，同时又不失灵活性，配有大量的插图、表格和案例资料。作者结合已出版教材在各个院校的实际使用情况，本着“实用、适用、先进”的修订原则和“通俗、精炼、可操作”的编写风格，力求提高学生的实际操作能力，使学生更好地适应社会需求。

本系列教材在开发过程中，为了更适宜于教学，特开发配套立体资源包，包括如下内容：

- 教材使用说明；

- 电子教案，并附有课程说明、教学大纲、教学重难点及课时安排等；
- 教学课件，包括：PPT 课件及教学实训演示视频等；
- 教学拓展资源，包括：教学素材、教学案例及网络资源等；
- 教学题库及答案，包括：同步测试题及答案、阶段测试题及答案等；
- 教材交流支持平台。

北京理工大学出版社



Qianyan

前 言

20 世纪 90 年代以后, 中国的压铸工业取得了令人惊叹的发展, 已发展为一个新兴产业。目前, 铝合金压铸工艺已成为汽车用铝合金成形工艺中应用最广泛的工艺之一, 在各种汽车成形工艺方法中占 49%。

中国现有压铸企业 3 000 家左右, 压铸件产量从 1995 年的 26.6 万吨上升到 2005 年的 87 万吨, 年增长率保持在 20% 以上, 其中铝合金压铸件占有所有压铸件产量的 3/4 以上。中国压铸件产品的种类呈多元化, 包括汽车、摩托车、通讯、家电、五金制品、电动工具、照明、玩具灯等。随着技术水平和产品开发能力的提高, 压铸产品种类和应用领域不断扩宽, 其压铸设备、压铸模和压铸工艺都发生了巨大的变化, 得到了快速发展。

本书从实用的角度出发, 广泛吸收了国内外压铸技术的先进经验, 对压铸工艺及模具作了全面、系统的介绍。全书共分 10 章, 主要内容包括压铸合金及压铸件设计; 压铸工艺; 压铸机; 压铸模的分型面设计、浇注系统及排溢系统设计、成形零件设计、侧向抽芯机构设计、推出机构设计和压铸模总体设计等。本书理论联系实际, 有较强的实用性。

本书可作为高等院校模具、材料成型与控制、机械类等专业的教材, 也可供有关科技人员参考。

本书由天津理工大学齐卫东教授任主编。在编写过程中, 得到了许多高等院校模具专业教师和相关企业同行的支持和帮助, 在此一并表示感谢。

编者



目 录

第 1 章 绪论	1	步骤	64
1.1 压铸成形过程	1	4.3 压铸机	67
1.2 金属充填铸型的形态	4	第 5 章 压铸模分型面设计	82
1.3 压铸的特点及应用范围	10	5.1 分型面的基本部位	82
1.4 压铸技术的发展	12	5.2 分型面的基本类型	83
第 2 章 压铸合金及压铸件设计	14	5.3 分型面的选择原则	86
2.1 压铸合金	14	第 6 章 压铸模浇注系统及排溢系统设计	96
2.2 压铸件设计	17	6.1 浇注系统设计	96
第 3 章 压铸工艺	32	6.2 排溢系统设计	110
3.1 压力	32	第 7 章 压铸模成形零件设计	116
3.2 速度	36	7.1 成形零件的结构形式	116
3.3 温度	38	7.2 成形零件的尺寸计算	127
3.4 时间	44	7.3 成形零件的常用材料	136
3.5 压室充满度	46	第 8 章 压铸模侧向抽芯机构设计	139
3.6 压铸涂料	47	8.1 侧向抽芯机构的分类及组成	139
3.7 压铸合金的熔炼与压铸件的后处理	49	8.2 抽芯力与抽芯距的	
3.8 压铸新技术	55		
第 4 章 压铸模与压铸机	62		
4.1 压铸模的基本结构	62		
4.2 压铸模的设计依据与			

确定	141	9.4 推管推出机构	189
8.3 斜销侧向抽芯 机构	144	9.5 推件板推出机构	191
8.4 弯销侧抽芯机构	157	9.6 其他推出机构	192
8.5 斜滑块侧抽芯 机构	162	9.7 推出机构的复位与导向	196
8.6 齿轮齿条侧抽芯 机构	167	第 10 章 压铸模总体设计	198
8.7 液压侧抽芯机构	172	10.1 模体的基本类型 ...	198
8.8 其他抽芯形式	174	10.2 结构零部件的 设计	201
第 9 章 压铸模推出机构设计 ...	178	10.3 压铸模的冷却	210
9.1 推出机构的组成 与分类	178	10.4 压铸模模体的常用 材料	218
9.2 推出机构的设计 要点	179	10.5 压铸模典型实例 ...	218
9.3 推杆推出机构	181	参考文献	223



第1章 绪 论

压力铸造（简称压铸）属于特种铸造的范畴。它是在普通铸造技术基础上发展起来的一种先进工艺，已有很长的历史。压铸是一种将熔融状态或半熔融状态的金属浇入压铸机的压室，在高压力的作用下，以极高的速度充填在压铸模（压铸型）的型腔内，并在高压下使熔融或半熔融的金属冷却凝固成形而获得铸件的高效益、高效率的精密铸造方法。压铸的分类方法很多，常见的压铸分类方法如表1-1所示。

表1-1 常见的压铸分类方法

压铸的分类方法			说明	压铸的分类方法		说明
按压铸材料分	单金属压铸		目前主要是 非铁合金压铸	按压铸机分	热室压铸	压室浸在保温坩埚内
	合金压铸	铁合金压铸		按合金状态分	冷室压铸	压室与保温炉分开
		非铁合金压铸			全液态压铸	常规压铸
		复合材料压铸			半固态压铸	一种压铸新技术

1.1 压铸成形过程

压铸成形的过程是将熔融的金属液注入压铸机的压室，在压射冲头的高压作用下，高速度地推动金属液经过压铸模具的浇注系统，注入并充满型腔，通过冷却、结晶、固化等过程，成形相应的金属压铸件。

压铸成形过程以卧式冷压室压铸机为例加以说明，如图1-1所示。

压铸模闭合后，压射冲头1复位至压室2的端口处，将足量的液态金属3注入压室2内，如图1-1（a）所示。压射冲头1在压射缸中压射活塞的高压作用下，推动液态金属3通过压铸模4的横浇道6、内浇口5进入压铸模的型腔。金属液充满型腔后，压射冲头1仍然作用在浇注系统，使液态金属在高压状态下冷

却、结晶、固化成形,如图1-1(b)所示。压铸成形后,开启模具,压铸件脱离型腔,同时压射冲头1将浇注余料顶出压室,如图1-1(c)所示。之后在压铸机顶出机构的作用下,将压铸件及其浇注余料顶出,并脱离模体。压射冲头同时复位。

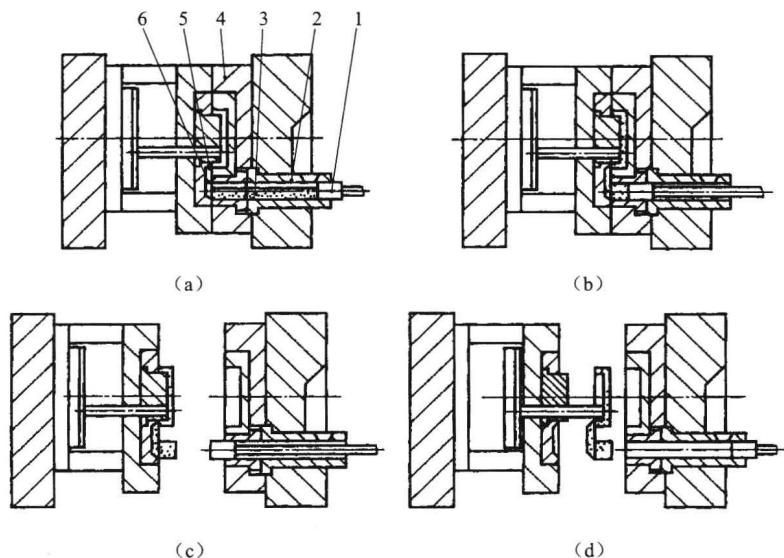


图 1-1 金属压铸成形

(a) 合模—金属液倒入压室; (b) 压射—金属液填充型腔;

(c) 开模—冲头推出余料; (d) 推出铸件—冲头复位

1—压射冲头; 2—压室; 3—金属液; 4—压铸模; 5—内浇口; 6—横浇道

在压铸成形过程中,压射填充是在一个极短的时间内完成的,但却是一个极其重要的环节。在压铸压射和金属液固化成形的整个过程中,始终有压力的存在,这是压铸方法区别于其他铸造方法的主要特征,因此压铸成形又称作压力铸造。

在压铸压射过程中,随着压射冲头的移动速度和位移的变化,压力也随之发生变化。图1-2所示为一个压射循环周期内,压射冲头的位移量 S 、移动速度 v 与压射压力 p 的变化关系示意图。

为研究方便,现将压铸压射过程分以下几个阶段加以分析。

(1) 准备阶段。将熔融的金属液注入压铸机的压室内,准备压射。这时,压射冲头的位移量 $S_0 = 0$, $v_0 = 0$, 压射压力 $p_0 = 0$, 即金属液静止在压室内,如图1-2(a)所示。

(2) 慢速封口阶段。压射冲头以低速 v_1 移动 S_1 , 并封住浇注口, 熔融的金属液受到推动, 以较慢的速度向前堆集。这时, 推动金属液的压力为 p_1 , 它的作用仅仅是克服压射缸内活塞移动时的总摩擦力以及压射冲头与压室内表面之间的

摩擦力,如图1-2(b)所示。

在这个阶段,采用较低的冲头速度是为了在推动状态中,使金属液保持一个稳定的液面,防止金属液在推进时产生冲击而出现液面波动,使其越过压室浇注口而溅出。同时使压室中的气体在平稳状态下,顺利排出,以减少气体卷入金属液的概率。

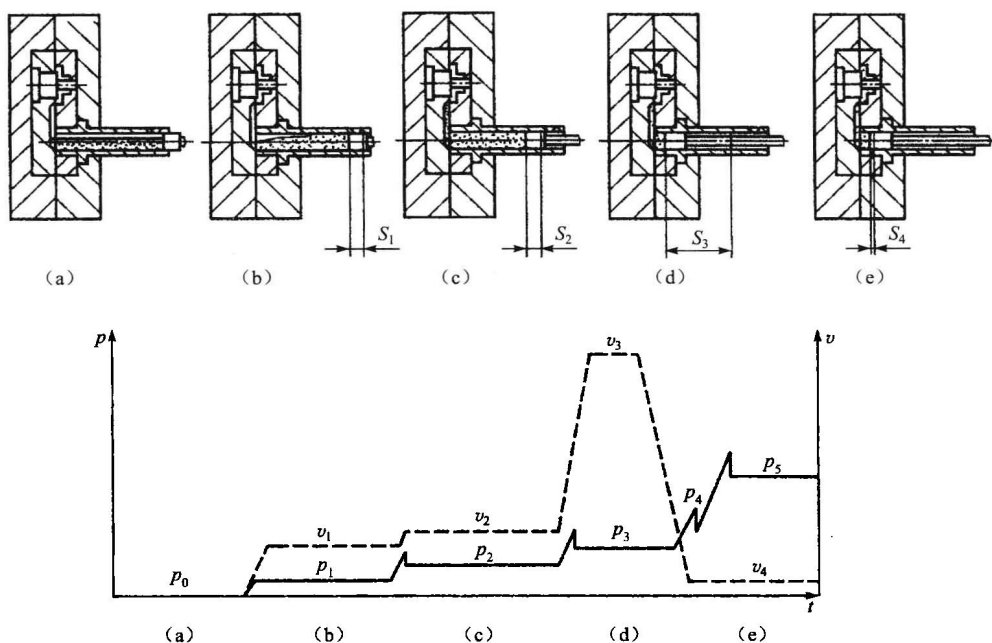


图1-2 压铸压射过程有关参数变化关系

S —冲头位移; v —冲头移动速度; p —压射压力; t —时间

(3) 堆聚阶段。压射冲头以略高于 v_1 的速度 v_2 向前移动,与速度相应的压力升到 p_2 。当冲头移动距离为 S_2 时,由于内浇口截面积最小,即阻力最大,所以熔融金属在压室、横浇道和内浇口前沿堆聚,如图1-2(c)所示。由于在这个阶段,压射冲头的速度不大,故金属液在向前移动时,所包卷的气体量不大。

(4) 填充阶段。压射冲头以最大的速度 v_3 向前移动,在内浇口的阻力作用下,使压射压力升到 p_3 ,它推动金属液突破内浇口而以高速度(即内浇口速度)填充到模具型腔。在充满型腔时,压射冲头移动的距离为 S_3 ,如图1-2(d)所示。

(5) 增压保压阶段。在填充阶段,虽然金属液已充满型腔,液态金属已停止流动,但还存在疏散和不实的组织状态。特别是液态金属在冷却过程中,由于收缩会在局部区域产生缩孔、气孔及缺料等现象。为提高压铸件的力学性能,获得密实的组织结构,在金属液填充之后,再增大压射压力 p_4 ,并在增压机构的作

用下, 压射压力由 p_4 升至 p_5 , p_5 即为压射过程的最终压力。增压保压过程是个补缩的过程, 补充因冷却出现的空间。在一定的保压时间内, 金属液在最终压力下边补缩, 边固化, 把可能产生的压铸缺陷减小到最低程度, 得到组织致密的压铸件。在这个过程中, 压射冲头的位移 S_4 的实际距离是很小的, 如图 1-2 (e) 所示。

保压时间的长短直接影响着压铸件最后凝固部位的补缩效果。它是由压铸件的凝固时间确定的。如果保压时间小于压铸件的凝固时间, 则压铸件在尚未完全凝固时, 就失去了保压作用, 影响以后收缩所需要的补缩, 显然, 这样整体的补缩效果较差; 而保压时间过长, 则会产生较大的塑性变形, 加大压铸件对成形零件的包紧力, 同时还消耗不必要的能源。因此, 确定适当的保压时间是非常重要的。

1.2 金属充填铸型的形态

压铸过程中, 金属液充填压铸模型腔的形态与铸件的质量(致密度、气孔、力学性能、表面粗糙度等)有着很大的关系, 长期以来, 人们对此进行了广泛的研究。

在压铸过程中, 金属液充填压铸模型腔的时间极短, 一般为百分之几或千分之几秒, 在这一瞬间内, 金属液的充填形态是极其复杂的。它与铸件结构、压射速度、压力、压铸模温度、金属液温度、金属液黏度、浇注系统的形状和尺寸大小等都有着密切的关系。因而金属液充填形态对铸件质量起着决定性的作用, 为此, 必须掌握金属液充填形态的规律, 了解充填特性, 以便正确地设计浇注系统, 获得优质铸件。

1.2.1 金属充填理论

金属液充填压铸模型腔的过程是一个非常复杂的过程, 它涉及流体力学和热力学的一些理论问题。研究充填理论的目的在于运用这些理论以更好地指导选择合理的工艺方案和工艺参数, 从而消除压铸生产中出现的各种缺陷, 以获得优质的压铸件。充填过程主要有以下 3 种现象。

(1) 压入。压射系统有必需的能量, 对注入压室内的金属液施加高压力和高速度使熔液经压铸模的浇口流向型腔。

(2) 金属液流动。熔液从内浇口注入型腔, 而后熔液流动并充填型腔的各个角落, 以获得形状完整、轮廓清晰的铸件。

(3) 冷却凝固。熔液充填型腔后冷却凝固, 此现象在充填过程中自始至终地进行着, 必须在完全凝固前充满型腔各个角落。

为了探明压铸时液态金属充填型腔的真实情况, 许多压铸工作者进行了一系

列的实验研究工作，提出了各种充填理论。国内外压铸工作者对金属液充填形态提出的各种不同观点归纳起来有3种：喷射充填理论、全壁厚充填理论、三阶段充填理论。

1. 喷射充填理论

这是最早提出的一种金属充填理论，它是由弗洛梅尔（L. Frommer）于1932年根据锌合金压铸的实际经验并通过大量实验而得出的。实验铸型是一个在一端开设浇口的矩形截面型腔。通过研究，人们认为金属液的充填过程可以分为两个阶段，即冲击阶段和涡流阶段。在速度、压力均保持不变的条件下，金属液进入内浇口后仍保持内浇口截面的形状冲击到对面的型壁（冲击阶段）。随后，由于对面型壁的阻碍，金属液呈涡流状态，向着内浇口一端反向充填（涡流阶段）。这时，铸型侧壁对此回流金属流的摩擦阻力以及此金属流流动过程中温度降低所形成的黏度迅速增高，使此回流金属流的流速减慢。与此同时，一部分金属液积聚在型腔中部，导致液流中心部分的速度大于靠近型壁处的速度。图1-3所示为金属液在型腔内的充填形态。

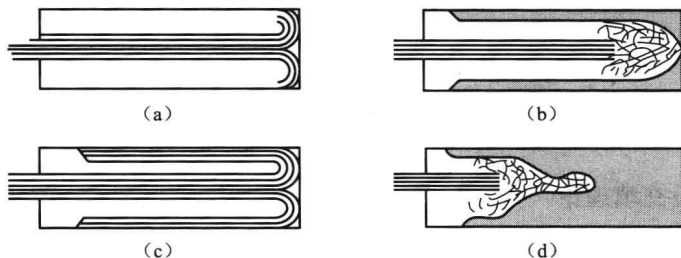


图1-3 金属液在型腔内的充填形态

(a) 冲击型壁；(b) 回流；(c) 积聚在型腔远端；(d) 积聚在型腔中部

大量的实验证实，这一充填理论适用于具有缝形浇口的长方形铸件或具有大的充填速度以及薄的内浇口的铸件。

根据这一理论，金属液充填铸型的特性与内浇口截面积 A_g 和型腔截面积 A_1 的比值有关，压铸过程中应采用 $A_g/A_1 > (1/4 \sim 1/3)$ ，以控制金属液的进入速度，从而保持平稳充填。在此情况下，应在内浇口附近开设排气槽，使型腔内的气体能顺利排除。

2. 全壁厚充填理论

该理论是由布兰特（W. G. Brandt）于1937年用铝合金压入试验性的压铸型中得出的。实验铸型具有不同厚度（0.5~2 mm）的内浇口和不同厚度的矩形截面型腔。内浇口截面积与型腔截面积之比 A_g/A_1 在0.1~0.6的范围内，用短路接触器测定金属液在型腔内的充填轨迹。

该理论的结论如下。

(1) 金属液通过内浇口进入型腔后,即扩展至型壁,然后沿整个型腔截面向前充填,直到整个型腔充满金属液为止。其充填形态如图1-4所示。

(2) 整个充填过程中不出现涡流状态,在实验中没有发现金属堆积在型腔远端的任一实例,凡是远端有欠铸的铸件,在浇口附近反而完全填实。因此认为喷射充填理论是不符合实际情况的,并且推翻了喷射充填理论所提出的将复杂铸件看成若干个连续矩形型腔的说法。同时认为,无论 A_g/A_1 的值大于或小于 $1/4 \sim 1/3$,其结果并无区别。

按这种理论,金属的充填是由后向前的,流动中不产生涡流,型腔中的空气可以得到充分的排除。至于充填到最后,在进口处所形成的“死区”,完全符合液体由孔流经导管的水力学现象。

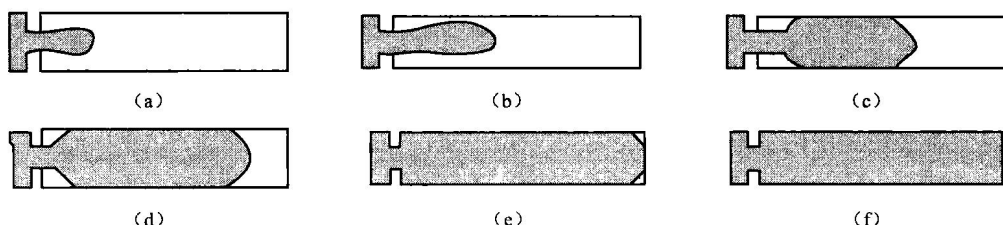


图1-4 全壁厚充填理论的充填形态

(a) 进入型腔; (b) 开始扩展; (c) 扩展至型壁; (d) 向前充填; (e) 充至型壁; (f) 充满型腔

3. 三阶段充填理论

此充填理论是巴顿(H. K. Barton)于1944—1952年提出的。

按三阶段充填理论所做的局部充填试验表明,其充填过程具有3个阶段,如图1-5所示。

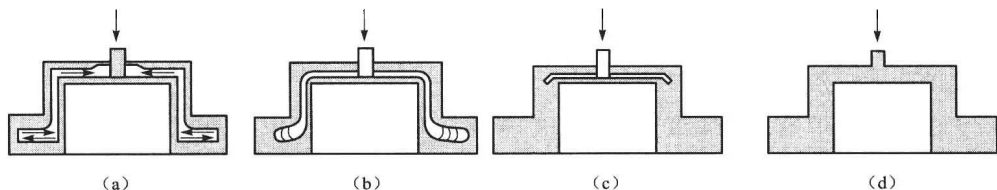


图1-5 三阶段充填理论的充填形态

(a) 形成薄壳层; (b) 继续充填; (c) 即将充满; (d) 充满型腔后形成封闭水力学系统

第一阶段:金属液射入型腔与型壁相撞后,就相反于内浇口或沿着型腔表面散开,在型腔转角处,由于金属液积聚而产生涡流,在正常均匀热传导下,与型腔接触部分形成一层凝固壳,即为铸件的表层,又称为薄壳层。

第二阶段:在铸件表层形成壳后,金属液继续充填铸型,当第二阶段结束时,型腔完全充满,此时,在型腔的截面上,金属液具有不同的黏度,其最外层

已接近于固相线温度，而中间部分黏度很小，还处于液态。

第三阶段：金属液完全充满型腔后，型腔、浇注系统和压室是一个封闭的水力学系统，在这一系统中各处压力是相等的，压射力通过铸件中心还处于液态的金属继续作用。

在实际生产中，大多数铸件（型腔）的形状比充填理论试验的型腔要复杂得多。通过对各种不同类型压铸件的缺陷分析和对铸件表面流痕的观察可知，金属在型腔中的充填形态并不是由单一因素决定的。例如，在同一铸件上，工艺参数的变动也会引起充填形态的改变；在同一铸件上，其各部位结构形式的差异亦可能产生不同的充填形态。至于采取哪种形态，则是由金属流经型腔部位的当时条件而定的。

上述3种充填理论，在不同的工艺条件下都有其实际存在的可能性，其中，全壁厚充填理论所提出的充填形态是最理想的。

1.2.2 理想充填形态在三级压射中的获得

压铸件的气孔、冷隔、流痕等缺陷都是由金属充填型腔时产生的涡流和裹气所引起的。涡流和裹气现象又是金属液高速射向型壁或两股金属流相对碰撞的结果。因此，理想充填形态的获得，应保证在金属液充满型腔的条件下，以最低的充填速度及浇注温度，使金属流形成与型腔基本一致的金属液柱，从一端顺利地充满型腔，排出气体。

但这一形态的获得，即使在适宜的浇注系统中使金属液起到较完善的整流和定向作用，若没有其他工艺条件的配合，亦难达到充填过程中各阶段的要求。

三级压射速度的定点压射是改善充填形态的有效方法。所谓三级压射速度定点压射是指压射缸在压射过程中，按充填各阶段的要求，分为三级压射速度，每一级压射的始终位置均有严格的控制。

在第一级压射时，压射冲头以较慢的速度推进，以利于将压室中的气体挤出，直至金属液即将充满压室为止。

第二级压射则是按铸件的结构、壁厚选择适当的流速，以在充满型腔过程中金属液不凝固为原则，用糊状金属把型腔基本充满。

第三级压射是在金属液充满型腔的瞬间以高速高压施加于金属液上，增压后使铸件在压力的作用下凝固，以获得轮廓清晰、表面质量高、内部组织致密的优质铸件。

由上述充填过程可知，三级压射可避免一般充填中所发生的裹气和涡流现象。在第二级压射中，金属液流进内浇口后，温度有所下降，黏度相应提高；同时，金属液在流入型腔后，因容积突然增大，向外扩张，当金属液接触到型壁后，金属液流随型腔而改变形状，此时由于金属液对型壁有黏附性，更使它的流动性降低。这样，在型腔表面形成一层极薄的表皮，随后按金属流向逐步充填铸

型。因此，在适当的铸型温度及金属液温度下，第二级压射形成了金属流端部的金属柱后，即使再增加压射速度，亦不致有产生涡流的危害。所以，第二种充填形态的获得有利于避免气孔，特别对厚壁铸件功效更大。

1.2.3 金属液在型腔中的几种充填形态

图 1-6 所示为在某一压力下金属的充填形态。当改变内浇口截面积与铸件截面积之比时，充填所需的时间也不同，当 $A_g/A_1 = 1/3$ 时，充填所需时间最短。

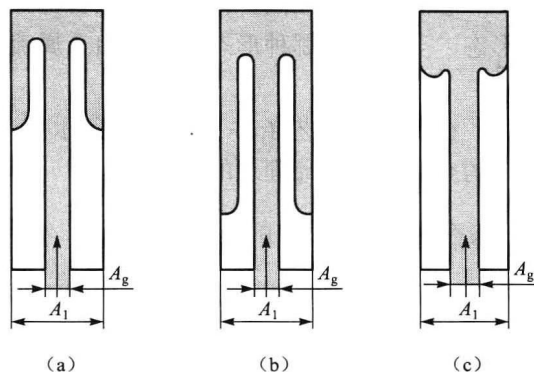


图 1-6 不同内浇口截面积厚度的充填形态

(a) $A_g/A_1 \approx 1/4 \sim 1/3$; (b) $A_g/A_1 = 1/3$; (c) $A_g/A_1 > 1/3$

图 1-7 所示为在一般压力下，内浇口在型腔一侧时的充填形态。

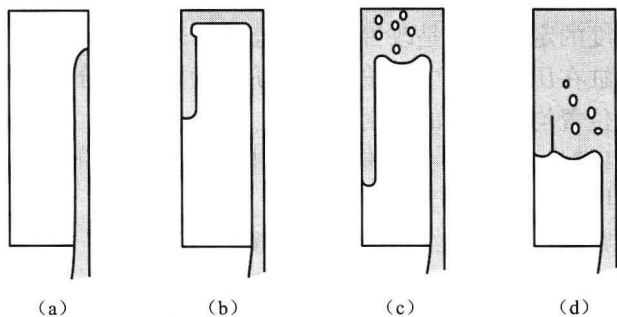


图 1-7 内浇口在型腔一侧时的充填形态

(a) 进入型腔; (b) 回流; (c) 继续充填; (d) 全壁厚充填

图 1-8 所示为型腔特别薄时（对锌合金可以薄到 0.4 mm）的充填形态。金属流厚度接近于型腔，故金属流入型腔后，即与型腔的一侧或两侧接触（见图 1-8 (a)、(b)）。与型腔接触的金属因冷却而温度降低，中间的金属从凝固金属层 1 上面滑过去，又与前方的型腔壁接触，而新的金属液 2 从两侧逐渐冷却凝固的金属层中通过（见图 1-8 (c)、(d)）。

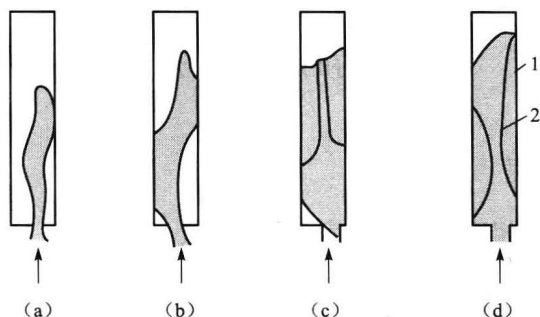


图 1-8 薄壁型腔充填形态

(a) 一侧接触；(b) 两侧接触；(c) 从冷凝金属层上滑过；(d) 新金属从冷凝金属层中通过
1—冷凝金属层；2—金属液

图 1-9 所示为金属流在型腔转角处的充填形态。金属液流入型腔转角处会产生涡流（见图 1-9 (b)），基本上没有向前流动的速度，在型腔垂直部分充满以前向左移动甚慢（见图 1-9 (c)），在垂直部分充满以后，后面的金属推动前面的金属向左流动（见图 1-9 (d)）。

图 1-10 所示为型腔表面是一圆弧面时的金属充填形态。金属液有靠近外壁流动的趋势，因此，靠近内壁处的空气无法排出，易产生缺陷。

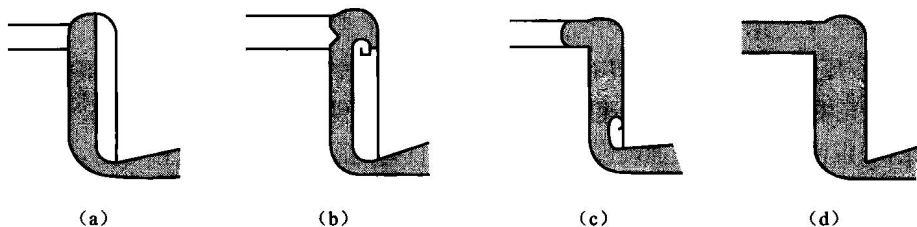


图 1-9 金属流在型腔转角处的充填形态

(a) 进入型腔；(b) 在转角处产生涡流；(c) 充填垂直部分；(d) 向左充填

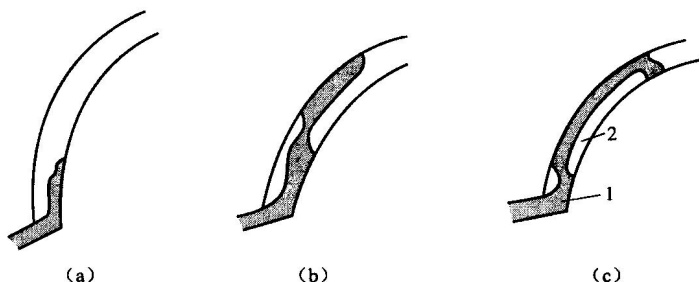


图 1-10 金属液在圆弧面处的充填形态

(a) 进入型腔；(b) 流向外型壁；(c) 靠近外型壁流动
1—金属液；2—无法逸出的空气