

压铸工艺方法、特点及应用

压力铸造(简称压铸)是液态合金在较高的压力作用下以较高的速率充填型腔,并在压力下凝固成型而获得铸件的一种铸造工艺方法。

1.1 压铸工艺方法发展概况

一般认为最早的压铸机械出现在 19 世纪初期,当时广泛用于压铸印刷的铅字在 19 世纪中叶已有专利提出。1885 年默根瑟勒(O. Mergenthaler)研究了以前专利,发明了印字压铸机。1905 年多勒(H. H. Doehler)研制了活塞式压铸机,1907 年瓦格内(V. Wagner)设计了鹅颈式气压压铸机,用于铝合金的压铸。1927 年捷克工程师波拉克(J. Polak)发明了坩埚与压室分离的立式冷压室压铸机,可显著地提高压射压力,克服了热压室压铸机的不足,使之更适合工业生产的要求,将压铸生产技术向前推进了一大步,使得铝、镁、铜等合金可采用压铸进行生产。随着对铸件质量、产量要求的不断提高和压铸工艺应用范围的扩大,人们对压铸设备不断地提出新的、更高的要求,而新型压铸机的出现以及新工艺、新技术的采用,又促进了压铸生产更加迅速地发展。例如,为了消除铸件内部的气孔、缩孔(松),改善铸件的质量,1958 年真空压铸在美国获得专利;1966 年美国 General Motors 公司提出了精、速、密压铸法,出现了双冲头(或称精、速、密)压铸;1969 年美国人爱列克斯提出了充氧压铸的无气孔压铸法。为了压铸带有镶嵌件的铸件及实现真空压铸,出现了水平分型的全立式压铸机。为了提高压射速度和实现瞬时增加压射力以便对液态金属进行有效的增压,提高铸件致密度,人们开发了三级压射系统的压铸机。又如在压铸生产过程中,除装备自动浇注、自动取件及自动润滑机构外,还可以通过安装成套测试仪器,对压铸过程中各工艺参数进行检测和控制,如压射力、压射速度显示监控装置和合型力自动控制装置以及计算机的应用等。

当前国外压铸技术发展的趋势是:压铸机向系列化、大型化及自动化发展;计算机在压铸生产中应用日益增多;压铸工艺不断采用新技术以及开展延长压铸模服役寿命研究等。

压力铸造在我国起始于 20 世纪 40 年代,1947 年上海就有人利用热室压铸机生产锌铝合金挂锁,也有的工厂用旧式冷室压铸机生产电风扇上的铝件。但在工业上大量生产压铸件始于 20 世纪 50 年代,即在 1958 年以后。在这时期引进了捷克的 Polak 系列立式压

铸机和苏联 рив-прнетис 卧式压铸机,在汽车、电工和仪表行业中大批量生产压铸件,从此压铸工艺得到迅速发展。在这以后的 10 年中,我国的压铸技术取得了一定的成就,自行设计制造了压铸模,除掌握了常规压铸生产工艺外,还对一些新工艺,如真空压铸和黑色合金压铸进行了探讨,压铸件的应用范围扩展到农机、机床、办公用品、军工等领域。至 20 世纪 90 年代,我国的压铸技术达到一定水平,已自行设计和制造出成系列的性能良好的压铸机。国产压铸机从一般小型到 5000kN、6300kN、8000kN、10000kN、12500kN 及 16000kN 的大型压铸机均有生产,并且 20000~30000kN 的压铸机也已研制成功并批量生产,这标志着我国大型压铸机的设计、制造技术已具备国际水平。同时,我国还对压铸工艺参数测试技术与装置进行了探讨和研制,开展了压铸基础工艺参数对合金性能影响的研究,建立了新的压铸合金系列并拓展了新牌号的压铸合金。我国还研制成水基脱模剂,采用从国外引进的大型压铸机,生产出了大型压铸件,并开始在压铸工艺和模具设计中应用计算机技术。更重要的是在这一时期,我国已建立了自己的压铸技术队伍,培养出一批具有一定水平的压铸技术人才,已有能力在压铸技术与生产领域的各个方面进行开拓性的工作。近年来,压铸的飞速发展得力于汽车和摩托车、电子通信、家用电器等行业的高速发展,这几个行业是压铸件的主要用户。迄今,我国压铸技术已经形成了自己的体系,并正在稳步发展之中。

1.2 压铸工艺过程

压铸工艺过程是由压铸机来完成的。压铸机根据压室的工作条件分为热压室压铸机和冷压室压铸机两大类,而冷压室压铸机又根据压室的布置形式分为卧式和立式两类。

各种压铸机的压铸基本过程都为合模、压射、增压—保压、开模。图 1-1 所示为热压室压铸机压铸过程,图 1-2 所示为卧式冷压室压铸机压铸过程,图 1-3 所示为立式冷压室压铸机压铸过程,图 1-4 所示为升举压室压铸机压铸过程。

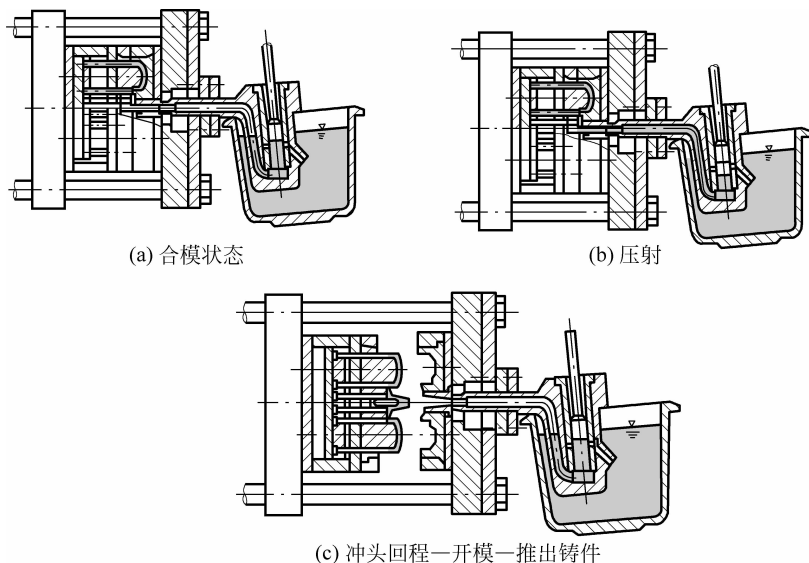


图 1-1 热压室压铸机压铸过程示意图

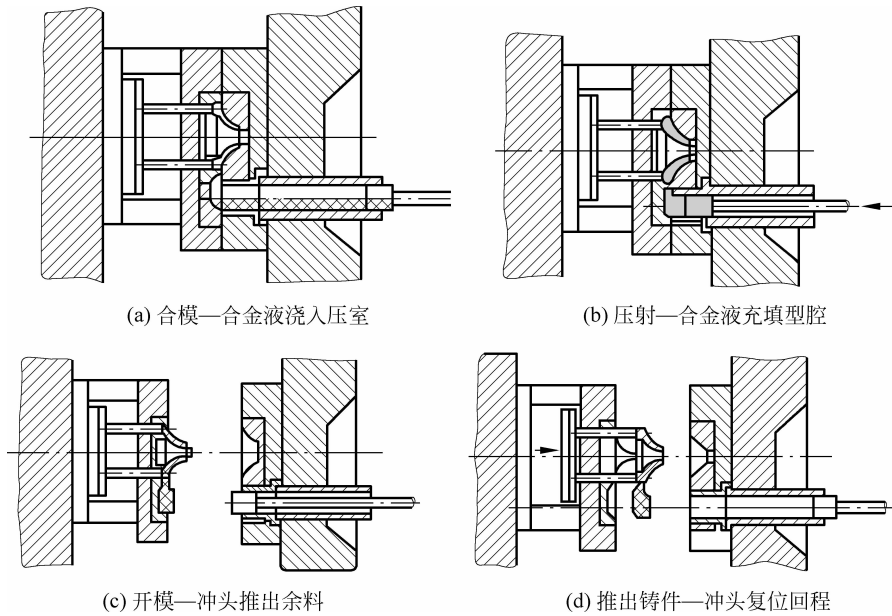


图 1-2 卧式冷压室压铸机压铸过程示意图

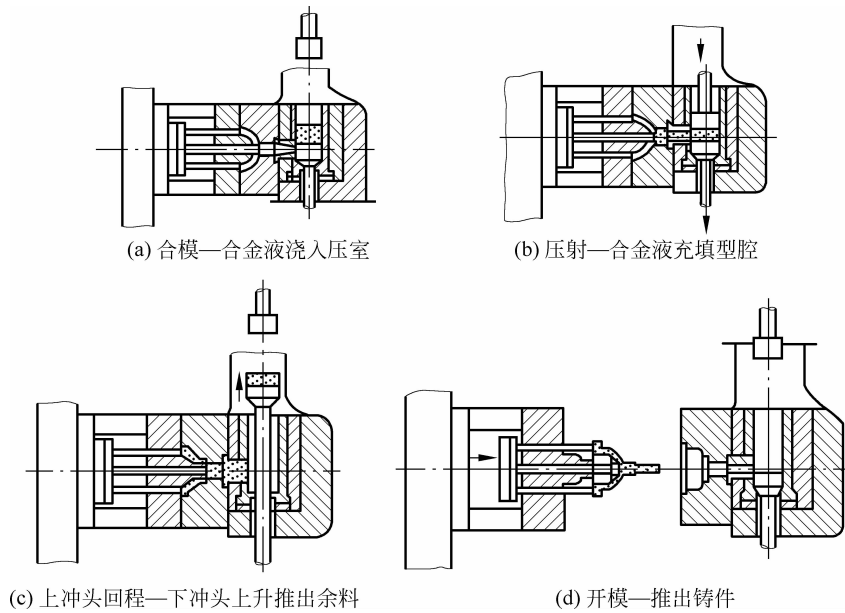


图 1-3 立式冷压室压铸机压铸过程示意图

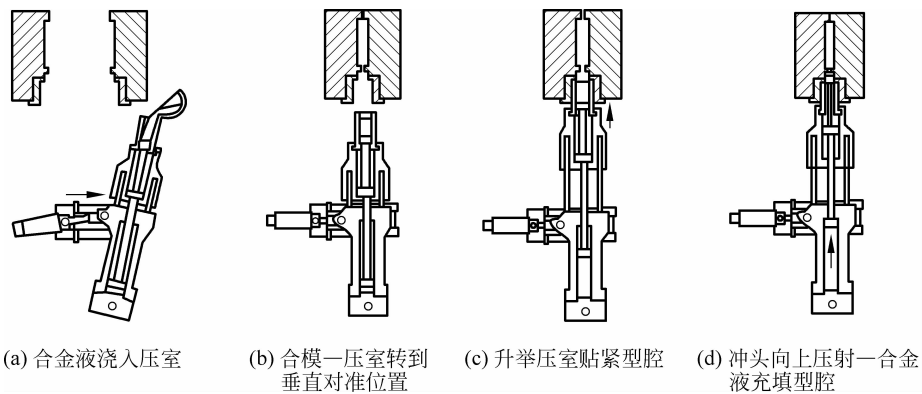


图 1-4 升举压室压铸机压铸过程示意图

1.3 压铸工艺原理

从本质上来说,压铸过程与其他各种铸造过程一样都是液态合金的流动与传热过程和凝固过程,也就是动量传递、质量传递和能量传递过程及相变过程,都是基本物理过程,都遵循自然界中关于物质运动的动量守恒原理、质量守恒原理和能量守恒原理及相变原理。所以压铸过程中液态合金的流动与传热问题和凝固问题也都可以由建立在动量守恒、质量守恒和能量守恒定律基础上的动量方程、连续方程、能量方程及相变(凝固)理论来描述。但是,压铸过程又有其特殊之处,这就是压铸过程是在高压、高速条件下进行的,这使得液态合金充填型腔时的形态与其他铸造方法的充填形态具有很大的差别,因而理解压力和速度在压铸过程中的作用和变化对液态合金流动(充填)形态的影响是必要的。

1.3.1 压铸压力和压铸速度

1. 压铸压力

压铸压力是压铸过程中的主要参数之一,通常用压射力和压射比压来表示。

(1) 压射力

压射力可分为充填压射力和增压压射力。

充填压射力指充填过程中的压射力,其值由式(1-1)进行计算,即

$$F_y = P_g A_D \quad (1-1)$$

式中: F_y ——充填压射力, kN;

P_g ——压铸机液压系统的管路工作压力, kPa;

A_D ——压铸机压射缸活塞截面积, m^2 。

增压压射力则是指增压阶段的压射力,其值由式(1-2)进行计算,即

$$F_{yz} = P_{gz} A_D \quad (1-2)$$

式中: F_{yz} ——增压压射力, kN;

P_{gz} ——压铸机压射缸内增压后的液压压力, kPa。

(2) 压射比压

压射比压是指压室内与压射冲头接触的金属液在单位面积上所受到的压力,它也可分为压射比压和增压比压。

充填时的比压称为压射比压。压射比压由式(1-3)计算,即

$$P_b = \frac{F_y}{A_c} \quad (1-3)$$

式中: P_b ——压射比压, kPa;

F_y ——充填压射力, kN;

A_c ——压射冲头截面积, m^2 。

增压时的比压则叫做增压比压。增压比压由式(1-4)计算,即

$$P_{bz} = \frac{F_{yz}}{A_c} \quad (1-4)$$

式中: P_{bz} ——增压比压, kPa;

F_{yz} ——增压压射力, kN。

由式(1-3)、式(1-4)可见,压射比压与压铸机的压射力成正比,而与压射冲头的截面积成反比。所以压射比压可以通过改变压射力和压射冲头直径(压室内径)来调节。

需要注意的是,压铸过程中,作用在液态金属上的压射比压并非一个常数,而是随着压铸过程的不同阶段而变化。通常,压铸过程中液态金属在压室与压铸模中的运动可分成4个阶段,不同阶段液态金属所受压力(比压)如图1-5所示。

阶段Ⅰ: 慢速封孔阶段。压射冲头以缓慢的速率推进,液态金属在较低的压力 P_0 作用下缓慢通过压室浇孔而被推向压室前部。采用低的压射速率是为了防止液态金属在越过压室浇孔时溅出,并有利于压室中气体的排出,尽量避免液态金属卷入气体。此时 P_0 仅用于克服压室与液压缸对运动活塞的摩擦阻力。

阶段Ⅱ: 合金液堆聚阶段。压射冲头以较阶段Ⅰ稍快的速率推进,液态合金在相应的压力 P_1 作用下充满压室前部和整个流道空间而堆聚于内浇口处。

阶段Ⅲ: 充填阶段。在此阶段压射冲头以设定的最大速率推进,对于压铸来说,通常内浇口总是整个浇注系统的控流部位,即内浇口处的流动阻力最大,故此阶段压力跃升至 P_2 。液态合金在 P_2 压力作用下高速通过内浇口充满整个型腔。

阶段Ⅳ: 增压—保压阶段(也称压实阶段)。在充型结束(液态合金充满整个型腔)的瞬间,合金液停止流动,压射动能转变为冲击压力,压力升高至 P_3 。与此同时,如果压射系统具有增压机构,则增压机构开始工作而使压力进一步上升至 P_4 ,并保持至铸件完全凝固为止。这一压力(P_4 或 P_3)称为压实压力(compression pressure),也称为最终压力。由增压器开始工作至压力达到压实压力 P_4 的时间谓之增压响应(增压建压)时间,一般为 $0.02 \sim 0.04s$,现代压铸机的最短增压响应时间已小于 $0.002s$ 。

上述过程就是所谓的四阶段(四级)压射过程。需要指出的是,由于各种压铸机压射机构的工作特性各不相同,铸件结构形状不同,液态合金充填状态及工艺操作条件不同,实际压铸过程中的压力变化曲线会有很大的差别。

由上述可知,压铸过程中作用在液态合金上的压力呈现两种不同的形式和作用。

①合金液流动过程中的流体动压力,其作用是完成充填和成型过程。②充填结束后,以流

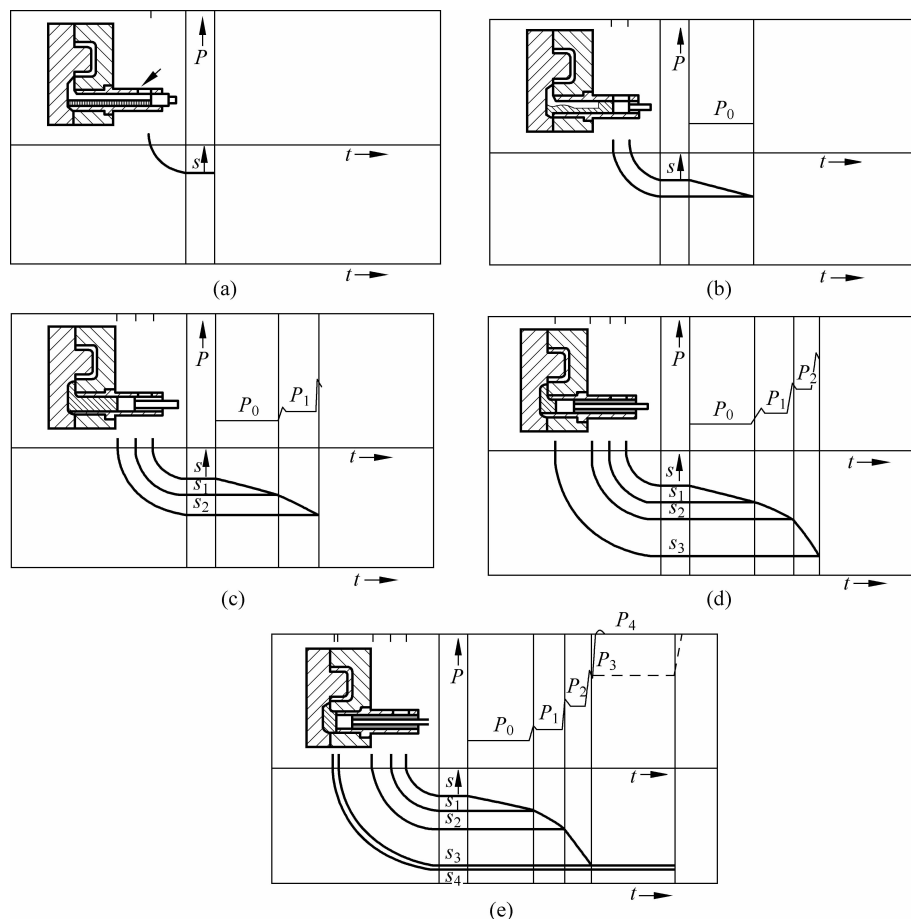


图 1-5 压铸过程不同阶段作用在液态金属液上的压力示意图

P —压射压力； s —冲头移动距离； t —时间

(a)→(b) 封口；(b)→(c) 堆积；(c)→(d) 充填；(d)→(e) 压实

体静压力形式出现的压实压力,其作用是对凝固过程中的合金进行“压实”。压实压力的有效性除与合金的性质和铸件结构特点有关外,还与内浇口的形状、大小及位置有关。

2. 压铸速度

压铸速度(速率)是压铸工艺中另一个主要参数,压铸速度又分为压射速度与充填(充型)速度两个不同的概念。压射速度是指压室内压射冲头的推进速度,而充填速度指的则是内浇口处液态合金的流动速率,即内浇口速度。

速度与压力是互相影响,紧密相关的两个物理量。为讨论方便起见,不妨设液态合金是不可压缩的,且压铸过程中合金液在压室内冲头所处位置到内浇口处这一段路径中的流动视为稳态流动。

首先,由质量守恒原理可得

$$A_n v_n = A_c v_c \quad (1-5)$$

即

$$v_n = \frac{A_c}{A_n} v_c = \frac{\pi d_c^2}{4 A_n} v_c \quad (1-6)$$

式中： v_n ——内浇口速度，即充填速度，m/s；
 A_n ——内浇口截面积，m²；
 v_c ——压射冲头速度，即压射速度，m/s；
 A_c ——压射冲头截面积，m²；
 d_c ——压射冲头直径，即压室直径，m。

式(1-5)说明，不可压缩流体稳态流动时，其流速(严格来讲是其平均流速)与流道截面积成反比。即截面积大的地方流速小，截面积小的地方流速大。由于冲头(即压室)截面积总是远大于内浇口截面积，所以内浇口速度远大于压射速度，其原理即在于此。由式(1-6)可知，合金液充填速率可以通过改变 d_c 、 v_c 和 A_n 的数值来调节。其中压室直径的变化既可以较显著地改变充填速度，也同时使压射比压的数值随之变化。而通过改变内浇口的截面积来调整充填速度则是不太方便的，这是因为压铸模上的内浇口截面积在修整时通常是扩大容易、缩小困难。压射速度的调节可通过调节压铸机上的压力阀来实现。在实际生产中究竟如何调整则应根据具体情况和条件来确定。

其次，假设液态合金是理想流体(即忽略液态合金的黏性，其动力黏度 $\mu=0$)，由此应用伯努利(Bernoulli)方程可得

$$gz_c + \frac{P_b}{\rho} + \frac{v_c^2}{2} = gz_n + \frac{P_n}{\rho} + \frac{v_n^2}{2} \quad (1-7)$$

伯努利方程式(1-7)实质上是理想不可压缩流体稳定流动状态下能量守恒的数学表达，即单位质量流体所携带的总能量在其流经的路程上任何位置保持不变，但其势能、压力能和动能可以互相转换。对于压铸过程，重力(势能)的作用显然可以忽略，于是式(1-7)简化为

$$\frac{P_b}{\rho} + \frac{v_c^2}{2} = \frac{P_n}{\rho} + \frac{v_n^2}{2} \quad (1-8)$$

式中： P_b, P_n ——压射比压和内浇口处液态合金所受的压力，Pa；
 ρ ——液态合金密度，kg/m³。

式(1-8)以十分简单的形式清楚地给出了理想不可压缩流体稳定流动状态下，流体流动速度与所受压力之间的关系。即流速大的地方压力小，流速小的地方压力大。对于实际黏性流体，在考虑了沿程损耗后，依然可以得出同样的结论。

由式(1-8)可得充填速度为

$$v_n = \sqrt{2\left(\frac{P_b - P_n}{\rho} + v_c^2\right)} \quad (1-9)$$

注意到压射开始时 $v_c=0$ ，而压射比压 P_b 为表压(流体的相对压力，即流体的绝对压力与大气压力的差值。压力表测量到的就是此值，故通常叫做表压)， $P_n = P_{atm}$ (大气压力)，于是式(1-9)可简化为

$$v_n = \sqrt{2\frac{P_b}{\rho}} \quad (1-10)$$

对于实际液态金属流体，其动力黏度 $\mu \neq 0$ ，流动过程中由于流体与边界的摩擦、流体与流体间的摩擦而产生阻力，因此流体流动过程中沿流动方向总能量是逐步减少的。对

此,可引入流量系数(或称阻力系数) η 而将式(1-10)修正为

$$\eta = \sqrt{2 \frac{P_b}{\rho}} \quad (1-11)$$

式中: η ——流量系数(阻力系数)。

由式(1-11)可知,压射压力 P_b 越大,充填速率 v_n 越大;反之亦然。

1.3.2 液态合金流动(充填)形态有关理论

压铸过程中,液态合金充填型腔时的流动(充填)形态是非常复杂的,涉及流体力学、传热学和热力学等多学科理论问题,且与诸如液态合金的密度、黏度、表面张力、凝固温度范围以及铸件的形状尺寸、内浇口形状尺寸与位置、压射比压、压铸温度等液态合金的物理性质和压铸工艺参数有关。

为了揭示压铸充填过程中液态合金的流动形态,长期以来人们进行了大量的实验研究,但是到目前为止尚未有完整的充填理论。早期虽提出了一些充填理论,但其论点都是在特定的实验条件下得到的,有较大的局限性,在实际压铸生产中直接应用这些理论还存在很多问题,这已为生产实践所证实。

早期典型的压铸充填理论归纳起来主要有以下3种。

1. 喷射充填理论

喷射充填理论是由弗洛梅尔(Frommer)于1932年提出的。弗洛梅尔认为:当液态合金在压力作用下通过内浇口喷射进入型腔,射流在撞击对面型壁之前保持其初始方向及截面形状,撞击型壁后,部分液态合金在该处聚集并形成涡流和扰动,继续充填则扰动更加明显。而另一部分被称为“前流”的液态金属则在增长着的聚集区前面沿型壁向内浇口方向折返。“前流”部分的液态合金量与射流截面的大小、速度及金属液的黏度有关。由于“前流”对型壁的摩擦及热量损耗而使流速减慢,以致聚集区追上“前流”。在折返充填型腔的过程中,产生剧烈的涡流现象。这一充填过程如图1-6所示。

当内浇口截面积与型腔截面积之比($A_{内}/A_{腔}$) $> 1/3$ 且充填速度较低时,除液态合金聚集区的前沿部分稍有扰动外,其余部分则相当稳定,而且随着聚集区增长,充填过程越来越平稳。反之,当($A_{内}/A_{腔}$) $< 1/3$ 且充填速度较高时,整个充填过程中,聚集区发生激烈扰动。在聚集区追上“前流”之前,型腔被液态合金填充部分的长度与液态合金填充速度和温度、型腔的形状以及压铸模的温度等因素有关。充分的排气是减小涡流和铸件内卷入气体的重要条件。

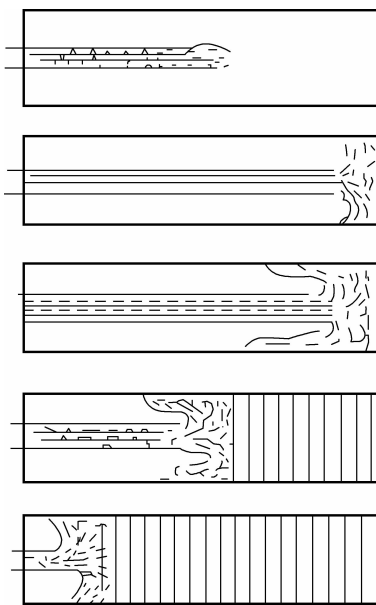


图 1-6 喷射充填理论的流动形态示意图

2. 全壁厚充填理论

全壁厚充填理论是勃兰特(Brandt)于1937年提出的。他用一个矩形截面的压铸模压铸铝合金压铸件,并在型腔内布置了一些与仪器和记录装置连接起来的电触点,以揭示液体合金在型腔内的充填情况。根据实验结果认为:液体合金压入型腔后,随即扩展至型壁,如图1-7所示,然后沿着整个型腔截面向前流动,直至型腔全部被液体合金充满为止。并且该理论认为,无论内浇口截面积与型腔截面积之比的大小如何,流动形态均不受影响。由于液体合金是以“全壁厚”形态向前推进,犹如“液态活塞”,充填时不产生涡流现象并且型腔中的气体很容易得到充分的排除。

3. 三阶段充填理论

三阶段充填理论是巴顿(Barton)在1944年提出的。巴顿认为,在整个压铸过程中有温度梯度的影响,还有液态合金内部和靠近金属——模具界面的金属层的速度的差异。合金液流过型腔表面的方式在很大程度上决定了铸件表面粗糙度、流痕、搭接等。在此基础上,巴顿提出了他的理论,认为液体合金充填铸型的过程是一个包含着力学、热力学和流体动力学的复杂过程,充填过程大致可分为3个阶段,如图1-8所示。

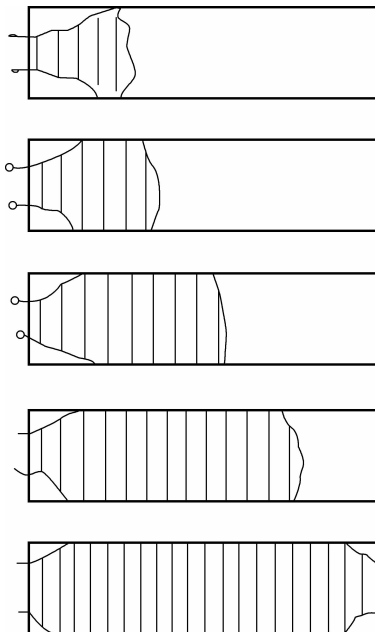


图1-7 全壁厚充填理论的流动形态示意图



图1-8 三阶段充填理论的流动形态示意图

第一阶段:液体合金以近似内浇口的形状进入型腔,首先冲击对面的型壁,并沿型壁向型腔四周扩展流向内浇口。在合金流过的型壁上形成铸件的外壳,又称薄壳层。

第二阶段:随后进入的液体合金进行薄壳层内空间的充填,直至充满。

第三阶段:在型腔完全充满的同时,压力通过尚未凝固的中心部分作用在铸件上,型腔内的金属得到压实。

巴顿还认为,充填过程的3个阶段对铸件质量所起的作用是不同的:第一阶段是铸件的表面质量;第二阶段是铸件的硬度;第三阶段是铸件的强度。

以上就是早期的3种典型充填理论。由于压铸充填过程是在极短时间内完成的,并且铸型是不透明的,因而直接观察铸型内的充填形态极其困难,几乎是不可能的。此外,充填形态还与压射工艺参数、铸件和内浇口的形状以及内浇口截面积与型腔截面积之比、压铸合金的性能等因素有关。因此,学术界对充填理论一直存在着不同的看法。

弗洛梅尔的充填理论为许多实验所证实,故能为大多数人所接受。例如,柯斯特和戈

林曾设计了一副形状和尺寸与勃兰特实验时相似的压型,其两侧镶以抗热玻璃,通过高速摄影拍下充填过程的流动形态,结果却与弗洛梅尔充填理论基本相符,从而否定了勃兰特理论。他们认为勃兰特的错误结论是因实验时的失误造成的。充填时,由于液态金属飞溅致使型腔内电触点过早地闭合,因而反映了偶然的不确实的情况。实际上勃兰特的充填情况只有在低压力和低的合金温度下才有可能出现。

科普夫(Kopf)曾在压铸机上安装测试仪器,通过示波器显示压铸过程中压力和速度的变化,并将其拍摄下来。对示波器图像进行分析后,科普夫所得结论为:进入型腔内的液态合金的动能决定着充填形态。如果内浇口处的液态合金的动能大于型腔内的流动阻力,则按弗洛梅尔理论充填;反之,则按勃兰特理论充填。

现在人们已经清楚地意识到,认识液态合金充填过程对正确确定排气道的位置及基本压铸工艺参数是非常重要的。

1.4 压铸工艺特点与应用范围

1.4.1 压铸工艺特点

压铸过程中液态合金始终处于高压的作用下,由此也就形成了压力铸造有别于其他铸造方法的一系列特点。

(1) 压铸件的尺寸精度高,表面粗糙度低。其尺寸精度可达 IT13~11 级,甚至可达 IT9 级,表面粗糙度达 $Ra3.2\sim0.8\mu\text{m}$,甚至达 $Ra0.4\mu\text{m}$,产品互换性好。

(2) 压铸件组织致密,具有较高的强度和表面硬度。因为液态合金是在压力下凝固的,又因充填时间很短,冷却速度极快,所以在压铸件上靠近表面的一层金属晶粒较细,组织致密,使表面硬度提高,并具有良好的耐磨性和耐蚀性。压铸件抗拉强度一般比砂型铸造提高 28% 左右,但伸长率有所下降。表 1-1 所示为不同铸造方法时铝合金和镁合金的力学性能。

表 1-1 不同铸造方法时铝合金和镁合金的力学性能

合金	力学性能								
	压力铸造			金属型铸造			砂型铸造		
	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长 率 A/%	布氏硬 度 HBW	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长 率 A/%	布氏硬 度 HBW	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长 率 A/%	布氏硬 度 HBW
铝硅合金	200~250	1.0~2.0	84	180~220	2.0~6.0	65	170~190	4.0~7.0	60
铝硅合金 ($w_{\text{Si}}: 0.8\%$)	200~230	0.5~1.0	85	180~220	2.0~3.0	60~70	170~190	2.0~3.0	65
铝合金	200~220	1.5~2.2	85	140~170	0.5~1.0	65	120~150	1.0~2.0	60
镁合金 ($w_{\text{Al}}: 0.8\%$)	190	1.5	—	—	—	—	150~170	1.0~2.0	—

(3) 压铸工艺可以制造形状复杂、轮廓清晰、薄壁深腔的金属零件。因为液态合金在高压高速下可保持高的流动性,因而能够获得其他工艺方法难以加工的金属零件。例如,锌合金压铸件最小壁厚可达 0.3mm; 铝合金铸件可达 0.5mm; 最小铸出孔直径为