

第3章

铸造成形技术与工程应用

将液态金属浇注到与零件形状、尺寸相适应的铸型型腔中,待其冷却凝固,以获得毛坯零件的生产方法,称为铸造。

铸造是历史最为悠久的金属成形方法,直到今天仍然是毛坯生产的主要方法。在机器设备中铸件所占比例很大,如机床、内燃机中,铸件占总质量的70%~90%,压气机中占60%~80%,拖拉机中占50%~70%,农业机械中占40%~70%。铸造之所以获得如此广泛的应用,是因为它有以下优越性。

(1) 可制成形状复杂,特别是具有复杂内腔的毛坯,如箱体、气缸体等。

(2) 适应范围广,如工业上常用的金属材料(碳素钢、合金钢、铸铁、铜合金、铝合金等)都可铸造。其中广泛应用的铸铁件只能用铸造方法获得。铸件的大小几乎不限,从几克到数百吨;铸件的壁厚可由1 mm到1 m左右;铸造的批量不限,从单件、小批量,直到大量生产。

(3) 铸造可直接利用成本低廉的废机件和切屑,设备费用较低。同时铸件加工余量小,节省金属,减少切削加工量,从而降低制造成本。

在铸造生产中,最基本的工艺方法是砂型铸造,用这种方法生产的铸件占总产量的90%以上。此外,还有多种特种铸造方法,如熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、离心铸造等,它们在不同条件下各有其优势。

3.1 铸造成形技术的原理基础

铸造生产过程复杂,影响铸件质量的因素颇多,废品率一般较高。铸造废品的产生不仅与铸型工艺有关,还与铸型材料、铸造合金、熔炼、浇注等密切相关。现先从与合金铸造性能相关的主要缺陷的形成与防范加以论述,为合理选择铸造合金和铸造方法打好基础。

3.1.1 液态金属的充型能力

液态金属填充铸型的过程,简称充型。液态金属充满铸型型腔,获得形状完整、轮廓清晰铸件的能力,称为液态金属的充型能力。在液态金属的充型过程中,有时伴随着结晶现象。若充型能力不足,在型腔被填满之前,形成的晶粒将充型的通道堵塞,金属液被迫停止

流动,于是铸件将产生浇不足或冷隔等缺陷。充型能力首先与合金本身的流动性有关,同时也受到外界条件,如铸型性质、浇注条件及铸件结构等许多因素的影响。

1. 金属的流动性

液态金属本身的流动能力称为金属的流动性,是金属主要铸造性能之一。金属的流动性越好,充型能力越强,越便于浇铸出轮廓清晰、薄而复杂的铸件。同时有利于非金属夹杂物和气体的上浮与排除,还有利于对金属冷凝过程所产生的收缩进行补缩。流动性试样种类很多,有螺旋形、U形、楔形、球形、真空试样等,各有特点。在生产和科研中广泛运用的是螺旋形试样,如图 3.1 所示。主要优点是灵敏度较高,操作简便。显然,在相同的浇注条件下,金属的流动性越好,所浇出的试样越长。表 3.1 列出常用铸造金属的流动性,其中灰口铸铁、硅黄铜的流动性最好,铸钢的流动性最差。

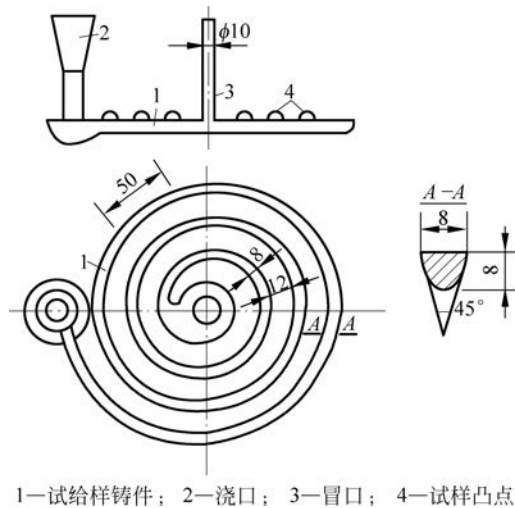


图 3.1 金属流动性试样

表 3.1 常用金属的流动性

金 属	造型材料	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm	
灰口铸铁	砂型	1300	C+Si=6.2%	1800
			C+Si=5.9%	1300
			C+Si=5.2%	1000
			C+Si=4.2%	600
铸钢(0.4%C)	砂型	1600	100	
		1640	200	
镁合金(Mg-Al-Zn)	砂型	700	400~600	
锡青铜(9%~11%Sn+2%~4%Zn)	砂型	1040	420	
硅黄铜(1.5%~4.5%Si)	砂型	1100	1000	
铝合金(硅铝明)	金属型(300℃)	680~720	700~800	

影响金属流动性的因素很多,但以合金成分的影响最为显著。一般情况下,对应着纯金属、共晶成分(和金属间化合物)的地方出现流动性的最大值,而有结晶温度范围的地方流动性下降,且在最大结晶温度范围附近出现最小值。合金成分与流动性的这种对应关系,主要

是不同成分合金的结晶特点不同决定的。如图 3.2 所示为 Fe-C 合金的流动性与成分的关系。显然,合金成分越远离共晶点,结晶温度范围越宽,流动性越差。亚共晶铸铁随含碳量的增加结晶温度范围减小,流动性提高。铸铁的结晶温度范围一般比铸钢的宽,但铸铁的流动性比铸钢的好。这是由于铸钢的熔点高,钢液的过热度一般比铸铁的小,保持液态流量的时间就要短;另外,由于钢液的温度高,在铸型中的散热速度快,很快就析出一定数量的枝晶,使钢液失去流动能力。高碳钢的结晶温度范围虽然比低碳钢的宽,可是由于液相线温度低,容易过热,所以实际流动性并不比低碳钢差。

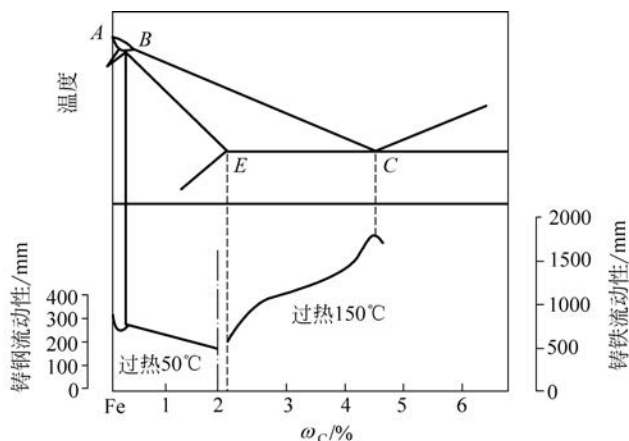


图 3.2 Fe-C 合金流动性与成分的关系

2. 铸型性质

液态金属充型时,铸型阻力将影响金属的流动速度,而铸型与金属间的热交换又将影响金属保持流动的时间。所以铸型性质方面的因素对金属液的充型能力有重要的影响。

(1) 铸型的蓄热系数

铸型的蓄热系数($b_2 = \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}$, 式中, λ_2 、 c_2 、 ρ_2 分别为铸型的导热系数、比热容、密度),表示铸型从金属中吸取热量并将其储存于自身中的能力。蓄热系数越大,铸型的激冷能力就越强,金属液于其中保持液态的时间就越短,充型能力下降。如金属型铸造较砂型铸造容易产生浇不足和冷隔缺陷。

(2) 铸型温度

预热铸型能减小金属与铸型的温差,从而提高其充型能力。如金属型铸造、压力铸造和熔模铸造时,铸型被预热到数百摄氏度,由于减缓了金属液的冷却速度,故使充型能力得到提高。

(3) 铸型中的气体

铸型具有一定的发气能力,能在金属液与铸型之间形成气膜,可减小流动的摩擦阻力,有利于充型。湿砂型比干砂型发气量大,所以流动性好。但是铸型的发气量过大时,如果铸型的排气能力小或浇注速度太快,型腔中的气体压力增大,则阻碍金属液流动,甚至有可能使金属液浇不进去,或者在浇口杯、顶帽口中出现翻腾现象,并可能飞溅出来伤人。为了减小气体的压力,除了应设法减少气体的来源,还应使铸型具有良好的透气性,并在远离浇口的最高部位开设出气口。

3. 浇注条件

(1) 浇注温度

浇注温度对金属的充型能力有着决定性影响。提高浇注温度,合金的黏度下降,流速加快,还能使铸型温度升高,金属在铸型中保持流动的时间长,从而大大提高金属的充型能力。但浇注温度过高,吸气多,氧化严重,充型能力的提高幅度减小,且铸件容易产生缩孔、缩松、黏砂、气孔、粗晶等缺陷,故在保证充型能力足够的前提下,浇注温度应尽量降低。

(2) 充型压力

液态金属在流动方向上所受的压力越大,充型能力越好。如压力铸造、低压铸造和离心铸造时,因充型压力较砂型铸造提高甚多,所以充型能力较强。但是金属液的静压头过大或充型速度过高时,不仅会发生喷射或飞溅现象,使金属氧化和产生“铁豆”缺陷,而且型腔中气体来不及排出,反压力增加,易造成浇不足或冷隔缺陷。

(3) 浇注系统的结构

浇注系统的结构越复杂,流动阻力越大,在静压头相同的情况下,充型能力越低。

在设计浇注系统时,必须合理地布置内浇道在铸件上的位置,选择恰当的浇注系统结构和各组元(直浇道、横浇道和内浇道)的截面积。否则,即使金属液有较好的流动性,也会产生浇不足和冷隔等缺陷。

4. 铸件结构方面

衡量铸件结构特点的因素是铸件的模数和复杂程度。

(1) 模数(或称当量厚度、折算厚度)

铸件的模数 $M = \text{铸件体积} \div \text{铸件散热表面积}$ 。如果铸件的体积相同,在同样的浇注条件下,模数大的铸件,由于与铸型的接触表面积相对较小,热量散失比较缓慢,则充型能力较高。铸件的壁越薄,模数越小,越不容易充满。

铸件壁厚相同时,铸型中的垂直壁比水平壁更容易充满。因此,对薄壁铸件应正确选择浇注位置。

(2) 铸件的复杂程度

铸件结构复杂,流动阻力大,铸型的充填就困难。

3.1.2 液态金属的凝固

液态金属在充满铸型和凝固过程中,与铸型发生热的、物理的、化学的和机械的作用。由于这些作用,铸件可能产生夹砂、砂眼、气孔、黏砂、表面氧化或脱碳等铸造缺陷。特别是金属与铸型之间的热交换特点,会对铸件的凝固过程和结晶组织发生关键性的作用。

合金从液态转变为固态的状态变化,称为一次结晶或凝固。一次结晶和凝固虽然指的是同一个状态变化过程,但是一次结晶主要是从物理化学的观点出发,研究液态金属的形核、长大、结晶组织的形成规律;而凝固是从传热学的观点出发,研究铸件与铸型的传热过程,铸件断面上凝固区域的大小、凝固方式与铸件质量的关系等。许多铸造缺陷,如缩松、缩孔、热裂、偏析、气孔、夹杂物等都产生在凝固期间。

1. 凝固方式

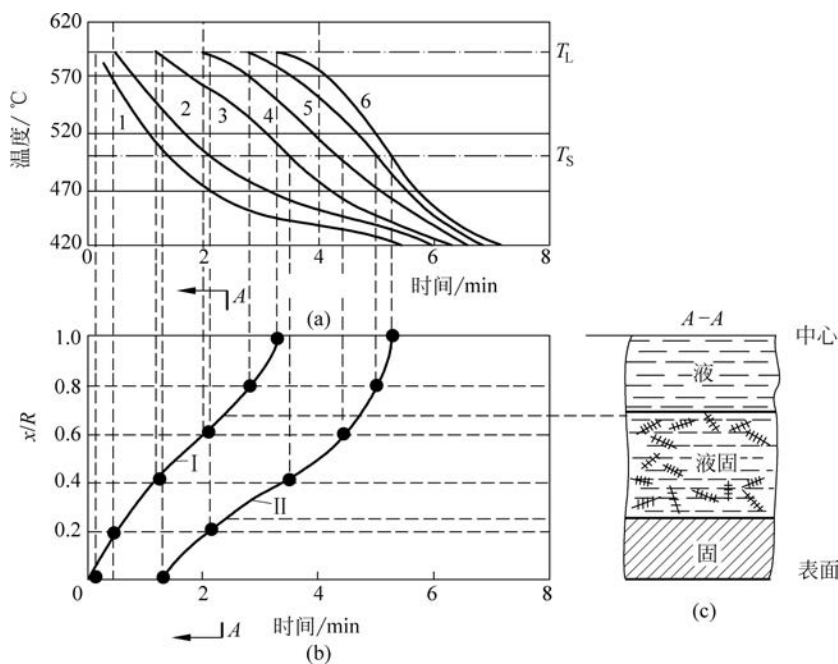
1) 凝固动态曲线

在浇注后,液态金属充满铸型,铸件的温度随时间、位置的不同而变化,形成了温度场。

沿铸件长度方向的温度场分布影响铸件的凝固顺序,垂直铸件长度方向分布的温度场影响铸件的凝固方式,控制铸件的凝固顺序和凝固方式对获得高质量的铸件非常重要。

(1) 凝固动态曲线的绘制

可用多点测温仪来测定铸件温度:将一定数量热电偶的测温端按一定间隔均匀地布置在铸件表面到铸件中心,热电偶的另一端连接多点测温仪,各测温点温度随时间变化的曲线可被自动绘制。根据测温仪的温度-时间曲线,绘制铸件在不同时刻开始凝固的位置和凝固结束的位置,并将凝固开始和凝固结束的所有点分别依次连接,得到铸件的凝固动态曲线,如图 3.3 所示。



x —铸件表面向中心方向的距离; R —铸件壁厚之半或圆柱体和球体半径;

I—液相边界; II—固相边界。

图 3.3 铸件的凝固动态曲线

(a) 铸件断面的温度-时间曲线; (b) 凝固动态曲线;

(c) 某一时刻的凝固状况,1,2,⋯,6 对应于 $x/R=0,0.2,\dots,1.0$

(2) 凝固动态曲线的分析与意义

如图 3.3 所示为铸件的凝固动态曲线,是根据温度-时间曲线绘制的。曲线 I 与铸件断面上各时刻的液相线等温线相对应,称为液相边界。曲线 II 与固相线等温线相对应,称为固相边界。液相边界从铸件表面向中心移动,所到达之处凝固就开始;固相边界离开铸件表面向中心移动,所到达之处凝固完毕。因此也称液相边界为凝固始点,固相边界为凝固终点。除了纯金属和共晶成分合金,凝固过程中,铸件断面上一般都存在三个区域,即固相区、凝固区和液相区。它们按凝固动态曲线所示的规律向铸件中心推进。

由凝固开始线处至铸件中心的合金处于液相区,凝固终了线至铸件表面的合金处于固相区,两线之间是液固两相区,这两条曲线表示铸件断面上液相和固相等温线由表面向中心推移的动态过程。

2) 铸件凝固方式

铸件断面的凝固方式一般可分为三种类型：逐层凝固、糊状凝固(体积凝固)和中间凝固。凝固方式取决于凝固区域的宽度。

(1) 逐层凝固方式

逐层凝固方式如图 3-4(a)所示,从图中可以看出,铸件温度梯度较大,而合金的结晶温度范围较窄,固液两相区的宽度较小,固相界面逐层向铸件中心推进。逐层凝固方式铸件组织致密,铸件质量好,但在最后凝固的位置会形成集中缩孔。可通过在铸件最后凝固部位设置冒口,使缩孔产生在冒口中,从而消除铸件中的缩孔。纯金属、共晶合金等结晶温度范围窄的合金一般通过控制铸件温度场使铸件形成逐层凝固方式,并在最后凝固部位设置冒口清除铸件中的缩孔。

(2) 糊状凝固方式

糊状凝固或体积凝固方式对结晶温度范围较宽的合金,如果铸件温度梯度较小,则在从铸件表面到中心的范围内几乎全部为液固两相区,即整个铸件体积内几乎同时结晶,如图 3-4(b)所示。宽结晶温度范围的合金在小的温度梯度下易形成糊状凝固方式。糊状凝固方式使铸件在整个体积内几乎同时结晶,许多同时凝固的最终部位因没有补缩金属液而形成分散的缩孔,使铸件的力学性能降低。对宽结晶温度范围的合金,可通过控制使铸件形成较大温度梯度,铸件以逐层凝固方式凝固消除缩孔,从而提高铸件质量。

(3) 中间凝固方式

一般情况下,以中间凝固方式凝固的合金具有一定的结晶温度范围,铸件温度梯度具有一定数值,铸件凝固过程中存在固相区、液相区和固液两相区,固液两相凝固区具有一定宽度又没有占满整个铸件断面,如图 3-4(c)所示。

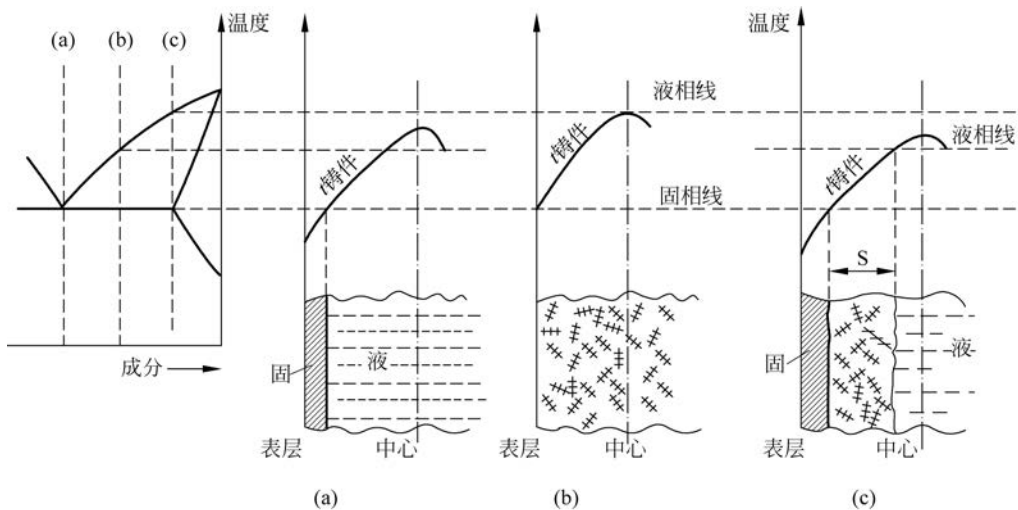


图 3.4 铸件断面的三种凝固方式

(a) 逐层凝固; (b) 糊状凝固; (c) 中间凝固

合金的结晶温度范围是由合金本身性质决定的。当合金成分确定后,合金的结晶温度范围即确定,铸件断面上的凝固区域宽度则取决于温度梯度。通常铸件的凝固就是通过控制温度梯度得以实现的。

3) 影响凝固方式的因素

综上所述,铸件断面凝固区域的宽度是由合金结晶温度范围和断面上的温度差(或温度梯度)两个量共同决定的,因而也决定了铸件的凝固方式。凝固区域较窄的情况下,倾向于逐层凝固;凝固区域较宽的情况下趋向于糊状凝固。

(1) 在温度梯度较近情况下,凝固区域宽度随合金结晶温度范围增大而增大。

(2) 在合金结晶温度范围确定的情况下,凝固区域宽度随断面温度差(或温度梯度)增大而减小。

凡是影响温度梯度的因素都对凝固区域宽度起作用。其中主要因素为合金热扩散率、铸型蓄热系数和金属凝固温度(或合金的液相线温度)。合金热扩散率大、铸型蓄热系数小以及金属凝固温度低,都使温度梯度减小(温度分布曲线平坦),导致凝固区域加宽。

4) 合金的凝固方式与铸件质量的关系

(1) 窄结晶温度范围的合金

这类合金包括纯金属、共晶成分合金和其他窄结晶温度范围的合金,其中一些较重要的合金见表 3.2。在一般铸造条件下,这类合金倾向逐层凝固方式,其凝固前沿直接与液态金属接触。

表 3.2 几种窄结晶温度范围的合金

纯金属	共晶类合金	其他窄结晶温度范围合金
工业用铜	共晶成分合金	低碳钢
工业用锌	近共晶成分合金	铝青铜
工业用锡	—	结晶温度范围小的青铜

当液体凝固成为固体而发生体积收缩时,可以不断得到液体的补充,产生分散性缩松的倾向性小,在铸件最后凝固的部位留下集中缩孔。由于集中缩孔容易消除,因而补缩性能良好。由于收缩受阻而产生晶间裂纹时,也容易得到金属液的充填,使裂纹愈合,故铸件的热裂倾向性小。在充型过程中发生凝固时,也具有较好的充型能力。

(2) 宽结晶温度范围的合金

表 3.3 为常用宽结晶温度范围的合金。这类合金倾向糊状凝固方式,其液态金属的过冷度小,容易发展成为树枝发达的粗大等轴晶组织。当粗大的等轴晶相互连接以后(固相大约 70%),便将尚未凝固的液体分割为一个个互不沟通的小“熔池”,最后在铸件中形成分散性的小缩孔,即缩松。采用普通冒口消除缩松很困难,常需采用其他措施以增加铸件的致密性,如增加帽口的补缩压力、加速铸件冷却等。

表 3.3 常用宽结晶温度范围的合金

铝合金、镁合金	铜合金	铁碳合金
铝铜合金	锡青铜	高碳钢
铝镁合金	铝青铜	球墨铸铁
镁合金	结晶温度范围大的黄铜	—

由于粗大的等轴晶比较早地连成骨架,在铸件中产生热裂的倾向性很大,这是因为等轴晶越粗大,高温强度就越低。此外,当晶间出现裂纹时,也得不到液态金属的充填使之愈合。

这类合金在充填过程中发生凝固时,其充型能力也很差。

(3) 中等结晶温度范围的合金

这类合金在工业上常用的有中碳钢、高锰钢、一部分特种黄铜和白口铸铁等。它们倾向于中间凝固方式,其补缩特征、热裂倾向性和充型能力介于逐层凝固方式和糊状凝固方式之间。

3.1.3 铸件的结晶组织及其控制

1. 铸件的结晶组织

一般情况下,随着成分过冷的形成和增大,晶体由平界面向胞状晶、柱状晶、树枝状晶和等轴树枝晶形貌发展。

纯金属和合金的固溶体相,在通常的凝固条件下结晶时,生长成为树枝状晶。如果枝晶的一次晶枝(主干)在某一特殊方向延伸生长,最后形成的晶粒呈长条状,称为柱状树枝晶(简称柱状晶)。如果枝晶和次晶枝在各个方向均匀生长,最后形成等轴状晶粒,称为等轴树枝晶(简称等轴晶)。图 3.5 是几种可能的铸件宏观组织示意图。

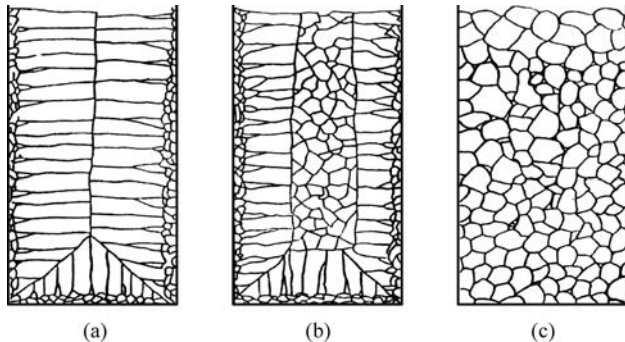


图 3.5 几种可能的铸件宏观组织示意图

(a) 表面细等轴晶+内部柱状晶; (b) 表面细等轴晶+内部柱状晶+中心粗等轴晶; (c) 全部等轴晶

2. 铸件结晶组织的控制

柱状晶就其形成条件,有利于液体的补缩,减少显微缩松,但晶界上富聚杂质和缺陷,故横向性能差。粒状晶的晶界长,杂质和缺陷较分散,各向性能差异小,且细粒状晶的抗疲劳性能较好,故一般希望铸件为细粒状晶组织。

1) 等轴晶组织的控制

使金属液中同时或不断产生新晶核,即能阻止晶体单向延伸长大,获得等轴晶组织。晶核越多,则晶粒越小。获得细等轴晶的措施如图 3.6 所示。

获得等轴晶组织的原则是使液态金属中同时或不断产生新晶核,以阻止柱状晶的生长。晶核越多,形成等轴晶的晶粒就越细。

(1) 降低浇注温度

降低浇注温度是缩小柱状晶区、扩大等轴晶区并细化柱状晶的有效措施。机理是在低的温度下浇注,液态金属与型壁接触时会结晶出大量晶体,并自型壁脱落而游离,游离的小晶体在随后的漂移中重新熔化的可能性减少,就会成为晶核生长成等轴晶。结晶游离越多,等轴晶数量越多,晶粒就会越细。

降低温度的方法,一般在生产中很少采用,因为那样会严重降低合金流动性,使充型困

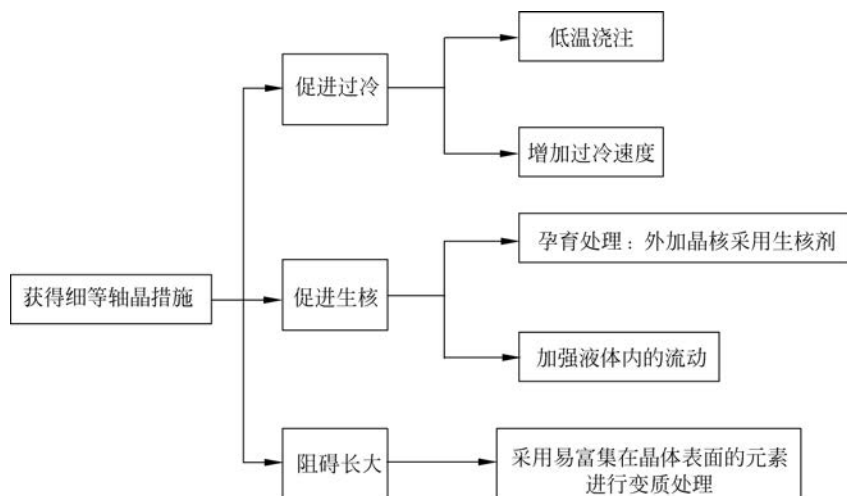


图 3.6 获得细等轴晶的措施

难。对于形状复杂的铸件,会获得细等轴晶组织,也不宜采取降低浇注温度的工艺措施。

(2) 孕育处理

在液态金属中加入孕育剂,促进液态金属内部形核,从而获得细等轴晶的方法称为孕育处理。加入液态金属中的孕育剂本身,在大多数情况下,并非就是非自发晶核,但它能与液态金属中的某些元素发生反应,形成高熔点化合物,并在液态金属中弥散分布。

这些化合物与欲细化相之间符合界面共格对应原则,可作为欲细化相的非自发晶核,进而起到细化作用。例如钛以 Al-Ti 中间合金或钛盐形式加入铝液中,钛与铝形成 $AlTi_3$,它与欲细化相 Al 之间符合界面共格对应原则,故可作为铝结晶时的非自发晶核,从而细化铝的晶粒。又如钢中加入 V、Ti 等,形成 VN、VC、TiC 等高熔点化合物,细化钢的晶粒。这些孕育剂起着形核作用,故又称为形核剂。

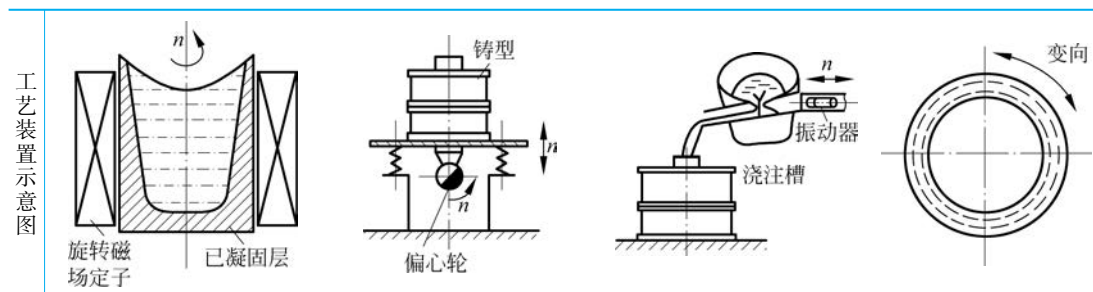
(3) 提高冷却速度

采用冷铁和金属型铸造等工艺措施,可以加快液态金属的冷却速度,使金属液在较大的过冷度下结晶,提高形核率,细化晶粒。同时较快的冷却速度还可以使晶粒内的树枝状结构得以细化,但对导热性较差的合金或是较厚的铸件,效果并不明显。

(4) 加强金属液在凝固期间的流动

增加液体内部流动促使已凝固层晶粒的脱落和树枝分枝的折断,并卷入液体内部,使晶粒细化,其方法见表 3.4。

表 3.4 增强液体内部流动以细化粒状晶的方法



续表

原理	用旋转磁场使液体金属旋转	用偏心轮使铸型产生惯性振动或振击	金属流经振动的浇注槽或浇口杯,再进入铸型	铸型变速转动或间隙地变向转动
工艺参数	调节旋转磁场的电压,使液体的转速 $n > 40$ r/min	$n = (5 \sim 50)$ r/min	用风动或电磁振动器使浇注槽或浇口杯振动	—
用途	铝、镁、铜及钢等固溶体型合金的初生相细化	同左,并可减少铸件缩孔和缩松	细化固溶体型合金的初生相	细化固溶体型合金的初生相
备注	采用薄壳砂型或非铁磁性的金属型	应用砂型时应待浇注铸型后再振动,以免砂型损坏	浇注温度应控制,以免脱落的晶体重新熔化	变速及变向的频率由具体情况决定

(5) 采用少量能强烈降低金属熔点的元素,其在金属液中溶解度大而在固态金属中溶解度极小。它们在结晶过程中被排挤出来,富集在晶体表面,阻碍晶体的生长,并促使树枝分出枝杈,因而既细化晶粒,也细化晶粒内的树枝状结构。

2) 柱状晶组织的控制

柱状晶一旦形成,要促使其继续正常生长,首先要保证铸件单向散热、定向凝固的条件,使其不出现侧向分枝,或者柱状树枝晶的侧向分枝短小,一次主轴挺直。另外,必须防止形成新的晶核,避免固-液界面前沿液相中出现新晶体而阻碍柱状晶的单向长大。控制措施就是提高金属的纯净度,削弱外来质点的形核作用。

3) 共晶型合金结晶组织的控制

共晶型合金组织中的非金属相脆(渗碳体和硅相)、弱(石墨),其形貌、分布和大小对合金的性能起着决定性作用,必须对其进行控制。

控制共晶型合金的结晶组织,主要是细化共晶晶粒(共晶团)和初生相,改善其结晶形貌,获得所要求的共晶组织。生产中针对不同的合金类型,可采用不同的工艺方法。例如,采用孕育处理工艺,促进灰铸铁和球墨铸铁中石墨的形核,防止和消除渗碳体的析出,并细化石墨和共晶团;采用球化处理或蠕化处理工艺,使石墨生长成球状或蠕虫状;采用变质处理工艺,使 Al-Si 合金中的初晶硅由粗大的针状、板片状生长成细小的粒状,最终达到提高力学性能和使用性能的目的。为了提高上述处理的效果,往往需要对合金液的成分,例如对铸铁的碳当量、硅锰比及杂质元素的含量加以限制,对铝硅合金的硅合金加以控制,必要时应对合金进行脱气和脱除有害元素的处理。调整铸型的热导率和蓄热系数,以改变共晶型合金的凝固速度,也是控制共晶型合金结晶的常用方法。

3.1.4 铸件的收缩及收缩类缺陷

金属从液态冷却到室温,要经历三个相互联系的收缩阶段:

液态收缩 从浇注温度到凝固开始温度(液相线温度)间的收缩。

凝固收缩 从凝固开始温度到凝固终止温度(固相线温度)间的收缩。

固态收缩 从凝固终止温度到室温间的收缩。

铸件在冷却过程中,其体积或尺寸缩减的现象,称为收缩,它是铸造合金的物理本性。收缩给铸造工艺带来许多困难,是多种铸造缺陷(缩孔、缩松、裂纹、变形等)产生的根源。

金属的液态收缩和凝固收缩表现为金属体积的缩小,使型腔内金属液面下降,通常用体