

第 1 章 金属的液态成型

1.1 金属液态成型工艺基础

1.1.1 概述

金属的液态成型又称铸造。它是将固态金属熔炼为液态金属,并将液态金属浇入铸型中,凝固后获得具有一定形状、尺寸和性能金属零件毛坯的成型方法。它是成型毛坯或机器零件的一种重要成型方法,其基本过程如图 1-1 所示。

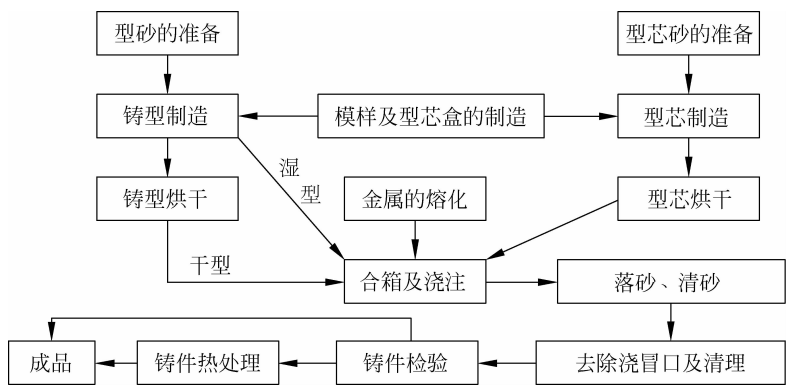


图 1-1 铸造基本过程

铸造的生产方法很多,按铸型材料、造型方法和浇注工艺的不同,可分为砂型铸造和特种铸造。其中,砂型铸造是最基本、应用最普遍的铸造方法。

铸造生产在整个机械产品中占有极其重要的地位,如在机床、内燃机、重型机械结构中,铸件占整机重量的 60%~90%。这是因为铸造具有如下特点:

- (1) 用铸造方法可生产形状复杂的工件,特别是具有复杂内腔的毛坯或零件的成型。如各种箱体、床身、机器、轮等。
- (2) 铸造适应性广,工艺灵活性大。常用金属(如铸铁、碳素钢、合金钢等)均可用于铸造。且铸件大小几乎不受限制,从几克到数百吨均可。
- (3) 铸件生产成本低。铸造所用原材料来源广泛,价格低廉;一般不需要昂贵设备;铸件形状和尺寸与零件相近,能节省金属材料 and 切削加工费用。

但是液态成型铸件组织粗大,偏析严重,所以力学性能差。另外,铸件工艺过程难以精确控制,因此铸件缺陷较多,质量不稳定,废品率较高。但随着铸造技术的发展,这种状况正在得到改善。

1.1.2 合金的铸造性能

铸造用的金属材料大多为合金。根据铸件的工作条件不同,常用的有铸铁、铸钢和非铁金属等。

铸造合金除应具有符合要求的力学性能、物理性能、化学性能外,还应具有良好的铸造性能。合金的铸造性能是合金在铸造生产中所表现出来的工艺性能。它将直接影响铸件质量,主要包括合金的流动性、收缩性、偏析等。

1.1.2.1 合金的流动性

1. 合金的流动性及其试验方法

流动性是指液态金属本身的流动能力,它取决于合金种类、结晶特性、熔点、黏度和热导率等。

合金流动性的好坏,对铸造生产有着重要意义,它决定合金能否充满铸型,得到形状完整、尺寸精确的铸件,而不产生浇不足、冷隔等缺陷。另外流动性的好坏对于铸件中气体的排出、杂质的上浮和凝固时的补缩效果有很大的影响。所以流动性好,不但可以防止浇不足、冷隔等缺陷,还可防止气孔、夹渣、缩孔等缺陷的发生。

流动性的试验方法很多,最常用的是螺旋形试样法。如图 1-2 所示,将合金熔液浇入造好的螺旋形试样铸型型腔中,所得到螺旋形试样长度就代表其流动性大小。常见的合金以灰口铸铁、硅黄铜最好,铸钢最差。

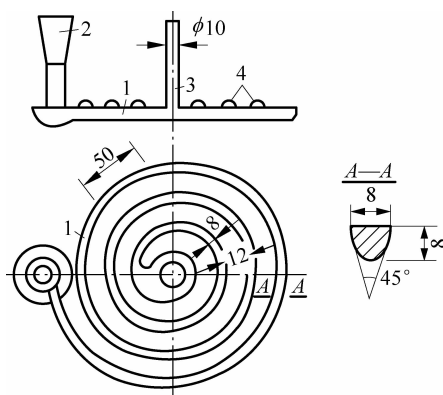


图 1-2 螺旋形试样

1—试样铸件；2—浇口；3—出气口；4—试样凹点

2. 影响流动性的因素

影响流动性的因素很多。凡能影响液态合金在铸型中保持液态时间长短及合金流动速度的因素,均能影响合金流动性。其中主要是化学成分、浇注温度和浇注条件等。

1) 化学成分

不同成分的铸造合金有不同的结晶特点,对流动性影响也不相同。纯金属和共晶合金是在恒温下结晶的。结晶从表层向中心逐层凝固,凝固层表面光滑,对尚未凝固的金属液流动阻力小,因此流动性好,如图 1-3(a)所示。其他成分合金的结晶是在一段温度区间 S 内完成的。在结晶区间中,既有形状复杂的枝晶,又有液体。枝晶不仅阻碍液体流动,而且使

液体金属的冷却速度加快,所以流动性差,如图 1-3(b)所示。

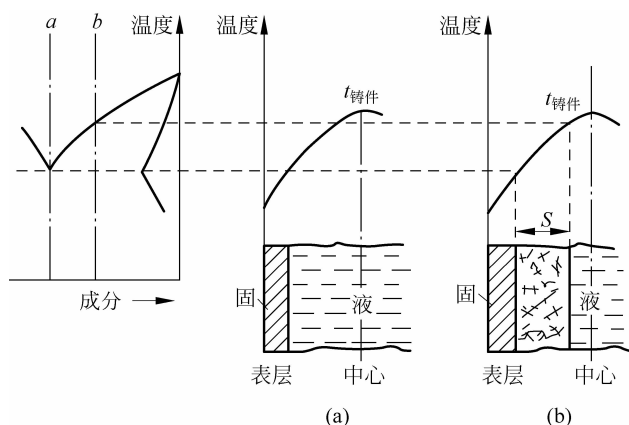


图 1-3 不同成分合金的结晶特点
(a) 纯金属及共晶合金; (b) 其他成分合金

铁碳合金的成分与流动性的关系如图 1-4 所示。从图中可以看出,合金的化学成分(即 C、Si 含量)越接近共晶成分,合金的流动性越好。铸铁中的磷能降低液相线温度,并能使铁水黏度下降,有利于提高流动性;而铁水中锰和硫能使流动性下降。

2) 浇注温度

浇注温度对合金流动性的影响极为显著。浇注温度越高,过热度(即浇注温度与液相线温度差)越大,增加了液体金属含热量,使其保持液态时间长,同时降低了液态金属的黏滞度,这些都可使合金的流动性提高。因此,提高浇注温度,可防止铸件产生浇不足、冷隔、气孔及夹渣等缺陷。但还要指出,浇注温度过高会使合

金收缩增加、吸气、氧化严重,会增加铸件产生缩孔、缩松、黏砂、气孔等缺陷的可能性。因此在保证流动性足够的前提下,浇注温度应尽量低些。所以在生产中常采用“高温出炉,低温浇注”的方法。但对于形状复杂的薄壁件、铸钢件,为了避免产生浇不足、冷隔等缺陷,浇注温度以略高为宜。普通灰铸铁浇注温度为 1250~1400℃,碳素钢为 1500~1600℃,铝合金为 680~780℃。

3) 充型条件

铸型中凡能增加金属流动阻力、降低流速和增加冷却速度的因素,均能降低合金的流动性。例如:内浇口截面积小、型腔狭窄、表面不光滑、直浇口高度过低、铸型透气不好、水分含量过多、铸型导热太快等,都能相应地降低合金的流动性,使铸件易于产生浇不足、冷隔等缺陷。为了改善铸型充型条件,在设计铸件时必须保证其厚度大于“最小壁厚”;在工艺上采取一些措施,如加高直浇口、加压充型、扩大内浇口、减少型砂含水量、增设排气口、采用烘干型等。

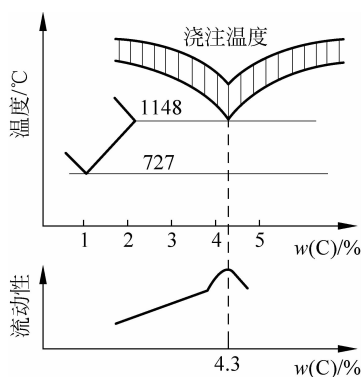


图 1-4 铁水的成分和流动性的关系

1.1.2.2 合金的收缩性

合金熔液在铸型里凝固和冷却过程中,其体积和尺寸减少的现象称为收缩。收缩是合金本身的物理性能,是使铸件产生缩孔、缩松、裂纹、变形和内应力等缺陷的基本原因。为了获得形状和尺寸符合技术要求、内部组织致密的合格铸件,必须掌握收缩的规律性,以便在结构设计和铸造工艺中采取必要的预防措施。

液态合金从浇注温度冷却到室温时是由三个互相联系的收缩阶段组成的,如图 1-5 所示。

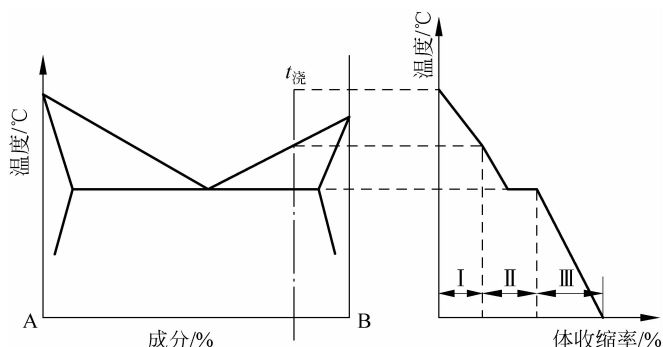


图 1-5 液态合金的收缩阶段

I—液态收缩; II—凝固收缩; III—固态收缩

(1) 液态收缩: 合金从浇注温度冷却到开始凝固温度(液相线温度)的收缩,是产生缩孔的基本原因之一。

(2) 凝固收缩: 合金从液相线温度冷却至固相线温度的收缩。共晶成分合金及纯金属在恒温下结晶,凝固收缩小。结晶温度范围越宽,凝固收缩越大。凝固收缩也是产生缩孔、缩松的基本原因之一。

(3) 固态收缩: 自固相线温度冷却至室温的收缩。表现为铸件各方向上线尺寸的缩小,对铸件的形状和尺寸精度影响最大,是产生铸造内应力、变形和裂纹的基本原因。

液态收缩、凝固收缩表现为合金体积缩小,常称为体收缩;固态收缩引起铸件尺寸变化,常称为线收缩。

在常用铸造合金中,铸钢收缩最大,灰铸铁收缩最小。这是由于灰铸铁中碳大部分以石墨状态存在,石墨比容大,在结晶过程中,析出石墨所产生的体膨胀,可抵消铸铁的部分体收缩。表 1-1 为几种铁碳合金收缩率。

表 1-1 几种铁碳合金收缩率

合金种类	碳的质量分数/%	浇注温度/°C	液态收缩/%	凝固收缩/%	固态收缩/%	总体积收缩/%
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.5	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

1. 影响收缩的因素

影响收缩的主要因素有化学成分、浇注温度、铸件结构和铸型条件等。

1) 化学成分

不同成分合金其收缩率不同。如碳钢随着含碳量增加,凝固收缩增加,而固态收缩略减。在铸件中促进石墨化元素(碳和硅)增加,收缩减小;阻碍石墨化元素(硫和锰)增加,收缩增大。但适当的含锰量可消除硫的有害作用。

2) 浇注温度

合金的浇注温度越高,过热度越大,液态收缩量也越大,故总收缩量增加。通常在满足流动性要求的前提下,应尽量采用低温浇注以减少液态收缩。

3) 铸件结构与铸型条件

铸件在铸型中冷凝时,不是自由收缩,而是受阻收缩,会受到铸件各部位因冷速不同相互制约而产生的阻力及铸型和型芯对收缩产生的机械阻力。因此,铸件的实际线收缩率要比合金的自由收缩率小。所以在设计模样时必须根据合金品种、铸件的形状和尺寸、铸型种类等因素,选取合适的收缩率。

2. 收缩对铸件质量的影响

金属的收缩是铸件产生缩孔、缩松、变形、内应力和裂纹的基本原因。液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔和缩松的基本原因,固态收缩是铸件产生内应力、变形和裂纹等缺陷的主要原因。

1) 缩孔及缩松

(1) 缩孔

液体金属浇注到铸型后,在经过液态收缩和凝固收缩过程后,液体体积要缩减,若其收缩得不到液体金属的补充,则在铸件最后凝固部位形成孔洞,这种孔洞称为缩孔。缩孔形成过程如图 1-6 所示。

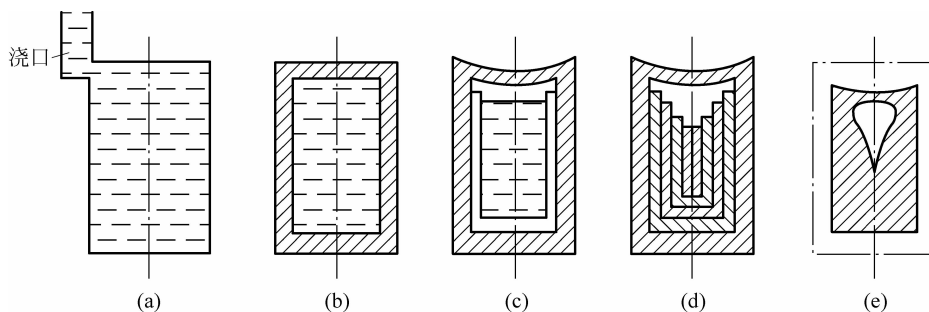


图 1-6 缩孔形成过程

液体金属填满铸型后,随着热量不断散失,合金将产生液态收缩。此时,浇口尚未凝固,故型腔是充满的,如图 1-6(a)所示。由于铸型吸热,铸件表面形成一层硬壳。因浇口凝固,硬壳如一个密闭容器,里面充满金属,如图 1-6(b)所示。温度继续下降,凝固层加厚,内部的剩余液体由于要补充凝固层的收缩和液体本身的液态收缩,体积减小,液面下降,铸件内出现空隙,如图 1-6(c)所示。温度继续下降,外壳加厚,液面不断下降,待金属全部凝固后,则在金属最后凝固的上部形成一个孔洞,即缩孔,如图 1-6(d)所示。铸件完全凝固后,其体积还会因温度下降而不断减少,直到常温为止,如图 1-6(e)所示。

纯金属和共晶成分合金结晶温度范围窄,易于形成集中缩孔。缩孔多集中在铸件上部

或最后凝固部位。其特征是：内部表面粗糙，形状不规则，呈倒锥形。

(2) 缩松

缩松是由于合金的凝固收缩未能得到补充所致，实质是把集中缩孔分散为许多极小的缩孔。其形成过程如图 1-7 所示。

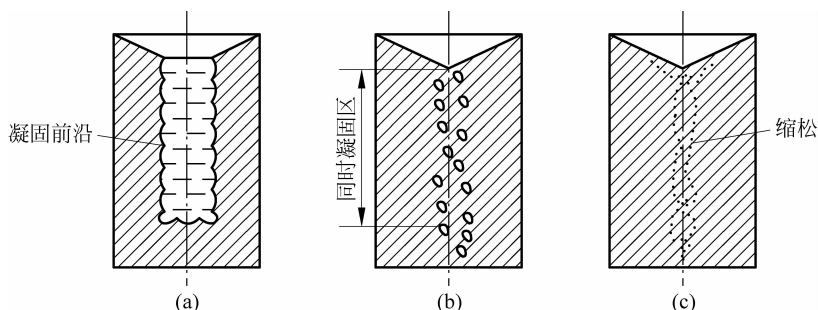


图 1-7 缩松形成过程

具有较宽结晶温度范围的合金凝固时，铸件首先从外层开始凝固，但凝固表面凹凸不平，如图 1-7(a)所示。在凝固后期，铸件截面上一定宽度区域内形成一个同时凝固区。在这个区域内，既有正在长大的枝晶，又有液体合金，彼此互相交错，把液体金属分隔成许多小液体区，如图 1-7(b)所示。在这些封闭区内金属结晶时，得不到液体金属补充，最后形成许多分散的小孔洞，即缩松，如图 1-7(c)所示。

缩孔、缩松使铸件有效受力面积减少，力学性能下降，而且在孔洞部位易于产生应力集中，还影响铸件气密性和物理、化学性能。

(3) 缩孔、缩松的防止

缩孔和缩松都使铸件的力学性能下降，缩松还可使铸件因渗漏而报废。因此，缩孔和缩松都属铸件的重要缺陷，必须根据技术要求，采取适当的工艺措施予以防止。实践证明，只要能使铸件实现“定向凝固”，尽管合金的收缩较大，也可获得没有缩孔的致密铸件。

所谓定向凝固，就是在铸件上可能出现缩孔的厚大部位通过安放冒口(见图 1-8(b))或安放冷铁(见图 1-8(c))等工艺措施，使铸件上远离冒口的部位先凝固，然后是靠近冒口部位凝固，最后才是冒口本身的凝固。按照这样的凝固顺序，先凝固部位的收缩，由后凝固部位的金属液来补充；后凝固部位的收缩，由冒口中的金属液来补充，从而使铸件各个部位的收缩均能得到补充，而将缩孔转移到冒口之中。冒口为铸件的多余部分，在铸件清理时将其去除。

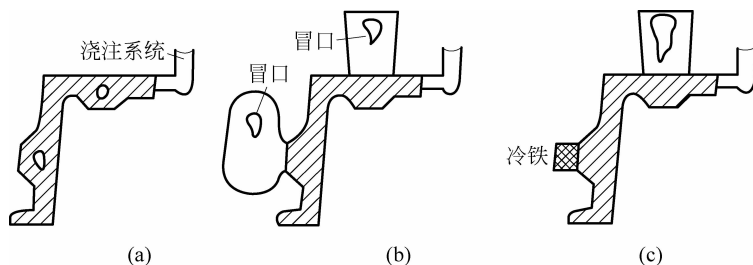


图 1-8 冒口和冷铁安放

冷铁是为了加速局部液体金属冷却而置入砂型或型腔的金属块,冷铁使得这些厚大部位先行凝固,最后冒口凝固,达到补缩目的。安放冷铁还可使铸件结晶组织致密,提高其力学性能。冷铁只是加快了某一部位的冷却速度,本身并不能补缩。冷铁常用钢或铸铁制成。

2) 铸造内应力

在铸件凝固后的继续冷却过程中,将要产生固态收缩。如果固态收缩受阻,即会在铸件内部产生内应力。这是使铸件产生变形和裂纹的基本原因。

(1) 铸造内应力的形成

铸造内应力按其产生原因,可分热应力、固态相变应力和收缩应力三种。热应力是指铸件各部分冷却速度不同,造成在同一时期内,铸件各部分收缩不一致而产生的应力;固态相变应力是指铸件由于固态相变,各部分体积发生不均衡变化而引起的应力;收缩应力是铸件在固态收缩时因受到铸型、型芯、浇冒口、箱挡等外力的阻碍而产生的应力。收缩应力是暂时的,铸件清砂后会自行消失,如图 1-9 所示。但收缩应力与热应力共同作用,可能使铸件某些部位拉应力值增大而产生裂纹。

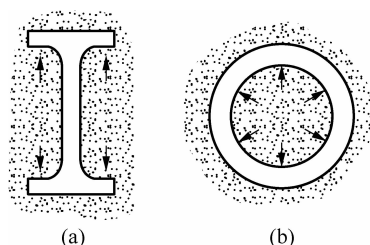


图 1-9 机械应力的形成

(a) 铸型阻碍; (b) 型芯阻碍

下面利用铸造应力框来分析热应力的形成过程。如图 1-10 所示,铸造应力框 I 和杆 II 两部分组成的框形铸件,其中杆 I 较粗,杆 II 较细。当铸件处于高温塑性状态时,虽然两杆因冷却速度不同而收缩不一致,但瞬间的内应力为塑性变形所消除。继续冷却后,由于杆 II 细,冷却快,收缩大,已进入弹性状态,必然压缩杆 I,使杆 I 受压,杆 II 受拉,形成了暂时内应力。此时由于杆 I 仍处于高温塑性状态,在压应力作用下,发生微量塑性变形(压缩),内应力随之消失。当冷却至杆 I、II 均进入弹性状态时,粗杆 I 温度较高,还会进行较大的收缩;细杆 II 温度较低,收缩已近停止。此时杆 I 的收缩必然要受到杆 II 的阻碍,于是在杆 I 中产生拉应力,杆 II 中产生压应力,并保持到室温,形成残余内应力。

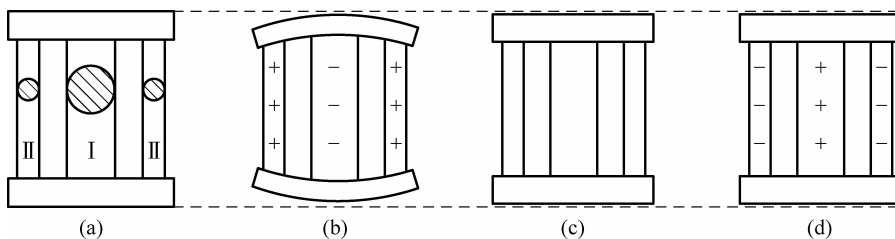


图 1-10 热应力的形成过程

通过以上分析可知,铸件的厚壁或心部受拉伸,薄壁或表层则受压缩。其壁厚差别越大,合金的线收缩越高,弹性模量越大,则铸造后形成的热应力越大。

(2) 减小和消除铸造内应力的方法

采用同时凝固的原则,如图 1-11 所示,通过设置冷铁、布置浇口位置等工艺措施,使铸件各部分在凝固过程中温差尽可能小;提高铸型温度,使整个铸件缓冷,以减小铸型各部分温度差;改善铸型和型芯的退让性,避免铸件在凝固后的冷却过程中受到机械阻碍;进行去应力退火,是一种消除内应力最彻底的方法。

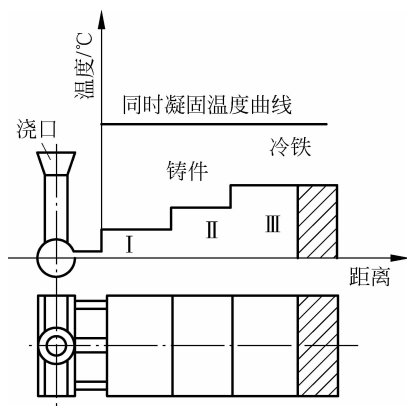


图 1-11 铸件同时凝固的过程

3) 铸件的变形及防止

具有不同壁厚的铸件,在冷却收缩过程中将产生内应力。处于应力状态的铸件是不稳定的,会自发地发生变形来减缓其内应力,从而趋于稳定状态。图 1-12 为车床床身的挠曲变形示意图。较厚的导轨部分受拉应力,较薄的床腿部分受压应力,其变形方向向导轨方向发生弯曲变形。

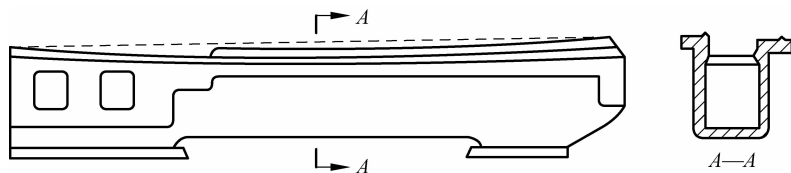


图 1-12 车床床身挠曲变形

防止铸件变形的措施是：①铸件壁厚要尽量均匀,并使之形状对称,如图 1-13 所示；②尽量采用同时凝固原则；③长而容易变形的铸件可采用反变形法,模型制成与铸件变形相反的形状,来抵消铸件产生的变形；④精度要求高不允许发生变形的铸件,必须采用时效处理。时效处理常分为自然时效和人工时效两种。自然时效是将铸件在露天场地放置半年以上,使其缓慢变形而消除内应力的方法。人工时效也称为去应力退火,加热温度是 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。时效处理一般安排在粗加工之后进行,以便同时去除粗加工过程中产生的内应力。

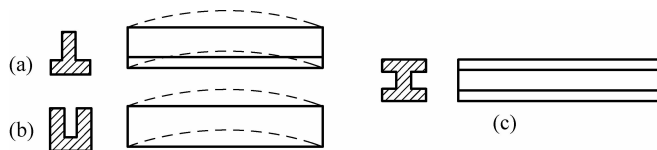


图 1-13 铸件结构对变形的影响

4) 铸件的裂纹及防止

当铸件中的内应力超过其强度极限时,铸件便会产生裂纹。裂纹多会导致铸件报废,必须予以防止。铸件的裂纹分为热裂和冷裂两种。

(1) 热裂。热裂是在铸件凝固末期的高温下产生的裂纹。此时,结晶出来的固态合金

已形成完整骨架,但在晶粒间还有少量液体,其强度和塑性都很低。如果铸件的固态收缩受阻,使收缩应力超过了该温度下金属的强度,则发生热裂。其形状特征是:裂纹短,缝隙宽,形状曲折,缝内呈氧化色。

(2) 冷裂。冷裂是铸件在低温下形成的裂纹。当铸造内应力大于该温度下合金的强度时,则产生冷裂。冷裂多出现在受拉应力的部位,特别是有应力集中的部位(如尖角、缩孔、气孔、夹渣等缺陷附近)。其形状特征是:裂纹细小,呈连续直线形,缝内干净,没有或只有少量氧化颜色。

裂纹的防止:合理设计铸件结构;合理选用型砂和芯砂的黏结剂与添加剂,以改善其退让性;大的型芯可制成中空的或内部添加焦炭;严格限制钢和铸铁中磷的含量;选用收缩率小的合金等。

1.1.3 铸件常见缺陷及检验

1. 铸件主要缺陷

铸件中除了缩孔、缩松、内应力、变形和裂纹等缺陷外,还有一些常见的缺陷,其特征及其产生原因见表 1-2 所示。

表 1-2 常见缺陷及特征

缺陷名称	缺陷特征	预防措施
气孔	在铸件内部、表面或近于表面处,有大小不等的光滑孔眼,形状有圆的、长的及不规则的,有单个的,也有聚集成片的。颜色有白色的或带一层暗色,有时覆有一层氧化皮	降低熔炼时流动金属的吸气量;减少砂型在浇注过程中的发气量;改进铸件结构,提高砂型和型芯的透气性,使型内气体能顺利排出
渣气孔	在铸件内部或表面形状不规则的孔眼。孔眼不光滑,里面全部或部分充塞着熔渣	提高铁液温度;降低熔渣黏性;提高浇注系统的挡渣能力;增大铸件内圆角
砂眼	在铸件内部或表面有充塞着型砂的孔眼	严格控制型砂性能和造型操作;合型前注意打扫型腔
黏砂	在铸件表面上,全部或部分覆盖着一层金属(或金属氧化物)与砂(或涂料)的混(化)合物,致使铸件表面粗糙	减少砂粒间隙;适当降低金属的浇注温度;提高型砂、芯砂的耐火度
夹砂	在铸件表面上,有一层金属瘤状物或片状物,在金属瘤片和铸件之间夹有一层型砂	严格控制型砂、芯砂性能;改善浇注系统,使金属液流动平稳;大平面铸件要倾斜浇注
冷隔	在铸件上有一种未完全融合的缝隙或注坑,其交界边缘是圆滑的	提高浇注温度和浇注速度;改善浇注系统;浇注时不断流
浇不到	由于金属液未完全充满型腔而产生的铸件缺陷	提高浇注温度和浇注速度;不要断流和防止跑火

2. 铸件质量检验

清理完的铸件要进行质量检验,合格铸件验收入库,次品酌情修补,废品剔出回炉。铸件质量的检验包括外观质量检验和内在质量检验。

1) 外观检验

它是检验铸件最普通、最常见的一种方法。铸件表面缺陷(如粘砂、夹砂、冷隔等)在外

观上可直接发现。对于铸件表皮下的缺陷,可用尖头小锤敲击来进行表面检查;还可以通过敲击铸件,听其发出的声音是否清脆,判断铸件是否有裂纹。铸件形状、尺寸偏差,可按规定的标准或划线检查。外观检验法可以逐个地或用抽查的方法进行检验。

2) 内在质量检验

内在质量检验包括磁力探伤、超声波探伤、压力试验、化学分析、金相组织检查、力学性能试验等多种检验方法,可检验铸件表面的微小缺陷、铸件的致密度、化学成分、金相组织和力学性能。

1.2 砂 型 铸 造

砂型铸造是指铸型由砂型和砂芯组成的一种造型方法。它具有操作灵活,设备简单,准备时间短等优点,是实际生产中应用最广泛的一种铸造方法,其基本工艺过程如图 1-14 所示。

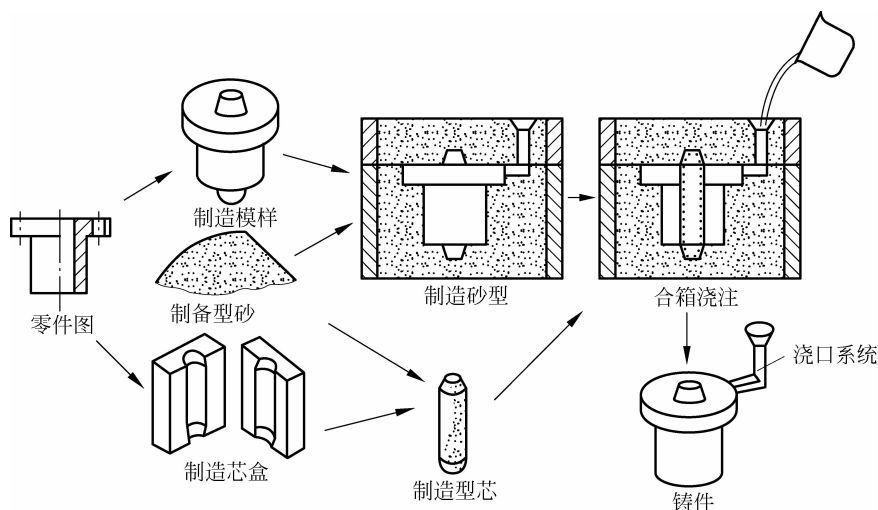


图 1-14 砂型铸造的工艺过程

1.2.1 造型材料

制造铸型用的材料称为造型材料。用于制造砂型的材料称为型砂,用于制造型芯的材料称为芯砂。型砂和芯砂是由原砂、黏结剂、水及特殊附加物组成的混合物。在铸造生产中,铸造质量的高低与造型材料的好坏有着极密切的关系。如造型材料选择不正确,会使铸件大量报废,增加铸件的成本,造成巨大的经济损失;正确地选择造型材料,不但能使铸件的缺陷减少,降低铸件成本,而且可使生产周期缩短,从而提高生产率。

型砂和芯砂应具有可塑性、强度、透气性、退让性及耐火性等。

造型用的原砂主要是指河砂、海砂和山砂。黏结剂除常用的黏土(包括普通黏土和膨润土)外,还有油类黏结剂(如桐油、亚麻仁油、棉籽油、合脂油等),也可以用松香、沥青、纸浆废液、糖浆、水泥、水玻璃及树脂等作为型砂黏结剂。

造型材料中有时还加入一些特殊附加物,如煤粉、焦炭粉、重油、木屑、稻草等,以改善造型材料的退让性和透气性。