

 西安交通大学“十一五”规划教材

材料凝固成形方法

高义民 编著
吕振林 审



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 西安交通大学 “十一五”规划教材

材料凝固成形方法

高义民 编著
吕振林 审



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西安 ·

内容简介

本书结合金属凝固的基本理论,较全面地介绍了金属凝固成形技术的原理与方法,以及凝固成形过程中缺陷的形成原因与控制措施,阐述了近代凝固成形技术的最新发展趋势。全书共分6章:第1、2章介绍了金属凝固成形过程中的共性问题,如凝固成形的工艺特点与铸造工艺设计基础;第3章介绍了普通砂型铸造的工艺原理、技术特点与适用范围;第4章较系统地介绍了工程上应用较为成熟的几种特种铸造技术的方法与原理,包括金属型铸造、压力铸造、低压铸造、差压铸造、离心铸造、熔模铸造、连续铸造等;第5、6章分别介绍了代表21世纪材料凝固成形新技术的典型铸造方法,即消失模铸造与半固态铸造的基本原理与工艺特点。各章均附有思考与练习,全书末附有参考文献。

图书在版编目(CIP)数据

材料凝固成形方法/高义民编著. —西安:西安交通大学出版社,2009.5
ISBN 978-7-5605-3087-1

I. 材… II. 高… III. 金属材料-凝固-成型-高等学校-教材 IV. TG39

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第046301号

书 名 材料凝固成形方法
编 著 高义民
责任编辑 屈晓燕

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 西安新视点印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印 张 9.5 字 数 170千字
版次印次 2009年5月第1版 2009年5月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3087-1/TG·27
定 价 20.00元

读者购书、书店添货如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

前 言

凝固成形是将金属材料熔化成液态后浇注入与拟成形的零件形状及尺寸相适应的模型空腔(称为铸型)中,待液态金属冷却凝固后将铸型打开(或破坏)取出所形成的铸件毛坯,清理掉由于工艺需要而添加的部分(如浇口、冒口等)后,即可得到所需的铸件。这种成形方法能够制成形状复杂(特别是具有复杂内腔)的零件,而且其大小几乎不受限制,重量可从几克到上百吨。由于模型制造、金属液的凝固收缩、金属液与铸型表面的相互作用以及工艺需要等方面的原因,往往使得所获得的铸件较实际零件的尺寸、形状有一些差别,因此凝固成形所提供的铸件往往是半成品的坯件,需要进一步进行机械加工。随着制造业的不断进步,凝固成形技术也在不断发展,近年来出现了很多新的精确铸造成形技术。例如,在汽车工业中采用的消失模铸造与压力铸造将是新一代汽车薄壁、高品质铝合金缸体铸件的主要铸造方法,许多研究预测消失模铸造将是“明天的铸造新技术”。定向凝固熔模铸造生产的高温合金单晶体透平叶片也是精确成形铸造技术在航天工业中应用的杰出体现。半固态铸造是一种生产结构复杂、近净成形、高品质铸件的材料半固态加工工艺技术,其主要特征是材料处于半固态时在较高压力下充型和凝固,从而使铸件具有好的表面及内部质量。

本教材为我校“先进材料制备与控制”专业方向设置的专业课程而编写,其主要任务是使学生掌握材料凝固成形技术的原理与方法,了解21世纪材料凝固成形技术的发展趋势。全书共分6章:第1、2章介绍了凝固成形的工艺特点与铸造工艺设计基础;第3章介绍了普通砂型铸造的工艺原理、技术特点与适用范围;第4章较系统地介绍了工程上应用较为成熟的几种特种铸造技术的方法与原理;第5、6章分别介绍了代表21世纪材料凝固成形新技术的典型铸造方法,即消失模铸造与半固态铸造的基本原理与工艺特点,并添加了西安交通大学铸造及耐磨材料

研究所近年来在过共晶高铬铸铁半固态铸造成形方面所取得的最新研究成果。各章均附有思考与练习,全书末附有参考文献,以便于学生个性发展与深入钻研。

本教材由高义民教授规划、编写和定稿,部分内容 by 居发亮硕士编写。

本教材由西安理工大学吕振林教授主审,提出了许多宝贵意见,谨此表示衷心的感谢。

本教材可供材料学科的本科生作为专业教材使用,亦可作为材料工程专业教学参考书及相关技术人员的参考读物。

由于编者水平有限,书中定有许多缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

于西安交通大学,2008 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 凝固成形的工艺特点	(1)
1.1 金属及合金的凝固方式	(1)
1.2 液态金属的充型能力	(5)
1.3 凝固成形过程的收缩特点	(13)
1.4 成形件的凝固组织	(19)
思考与练习	(21)
第 2 章 铸造工艺设计	(22)
2.1 铸件结构设计	(22)
2.2 铸造工艺方案的确定	(29)
思考与练习	(40)
第 3 章 砂型铸造	(41)
3.1 概述	(41)
3.2 粘土砂	(46)
3.3 水玻璃砂	(56)
3.4 有机粘结砂	(60)
3.5 铸造用涂料	(65)
思考与练习	(68)
第 4 章 特种铸造	(69)
4.1 金属型铸造	(69)
4.2 压力铸造	(76)
4.3 低压铸造和差压铸造	(85)
4.4 离心铸造	(90)
4.5 熔模铸造	(92)
4.6 连续铸造	(97)
4.7 凝固成形方法的选择	(103)

思考与练习	(106)
第 5 章 消失模铸造	(107)
5.1 消失模铸造的特点及其适应性	(108)
5.2 消失模铸造工艺原理	(110)
5.3 泡沫塑料模的气化	(114)
5.4 消失模铸造的关键技术	(121)
思考与练习	(125)
第 6 章 半固态铸造	(126)
6.1 半固态金属的特性及半固态铸造	(127)
6.2 半固态金属成形技术的应用和发展趋势	(137)
思考与练习	(141)
参考文献.....	(142)

第 1 章 凝固成形的工艺特点

凝固成形过程中,液态金属或合金的凝固方式、充型能力以及凝固过程中液态金属的收缩问题,是直接导致成形件产生缩孔、缩松、应力、裂纹以及冷隔等铸造缺陷的主要原因。无论采用哪一种凝固成形方法都将面临这些共性问题,同时凝固成形方法的不同,在一定程度上对成形过程的这些工艺特点将会产生不同程度的影响。因此,为了实现对成形件的质量控制,掌握凝固成形过程的工艺特点及其影响因素,是很有必要的。

本章的主要内容是介绍凝固成形的工艺特点和影响因素,以及由这些特点引起的成形件可能产生的缺陷,为使读者更好地掌握凝固成形技术奠定一定的理论基础。

1.1 金属及合金的凝固方式

金属及合金的凝固方式并不唯一地取决于相图,它还由凝固时的温度梯度所决定。下面就这一论题开展较详细的讨论。

金属或合金在铸型中凝固时,可以分为三个典型的区域:即液相区、固液两相区和固相区。凝固的分区情况(如图 1-1 所示)。三个区域中,固液两相区的性质与凝固件最终的健全性关系最为密切。图 1-2 表示了固液两相区宽度对凝固液相补缩的影响。图 1-2(a)为较窄的固液两相区,凝固液相补缩容易,凝固呈现出

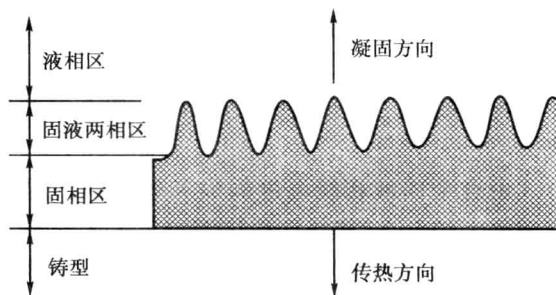


图 1-1 金属或合金凝固区示意图

强烈的逐层凝固特征;图 1-2(b)则表示了较宽的固液两相区凝固的情况,这种情况下,液相补缩困难,逐层凝固的特征也变得不是很明显了。凡是液相补缩困难的凝固,凝固件的致密性就较差,容易出现缩孔、缩松缺陷。

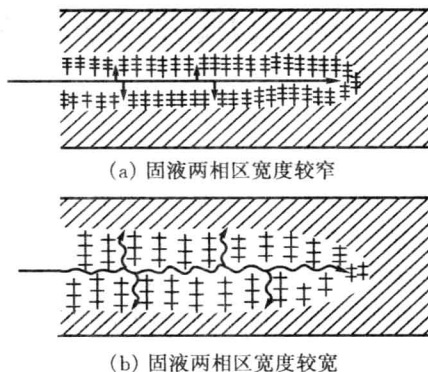


图 1-2 固液两相区宽度对液相补缩的影响

为确定铸件中合金的凝固方式可在铸件横断面各处设置温度传感元件——热电偶,以测量冷却曲线,即温度-时间曲线。根据不同断面的冷却曲线,结合该合金的相图,便可以给出铸件断面液相线、固相线与凝固时间的关系——凝固动态曲线。图 1-3 表示出了凝固动态曲线的绘制方法。

由铸件断面的凝固动态曲线,可以看出合金在铸件中的凝固方式。图 1-3 (b)中有两条曲线,一条曲线表示凝固时的固相边界,也叫“凝固终点波”;另一条曲线表示凝固时的液相边界,也叫“凝固始点波”。图 1-4 为工业纯铝铸件断面的凝固动态曲线。砂型铸造时,固相边界与液相边界的间距很宽,在很长一段凝固时间内,固液共存的两相凝固区几乎贯穿于整个铸件断面,这种凝固方式被称为糊状凝固。而用金属型铸造时,固相边界与液相边界的间距很窄,凝固自始至终仅有很薄一层的两相共存凝固区,凝固壳由表面向中心加厚,这种凝固方式就是逐层凝固。

一般逐层凝固与糊状凝固之间并无明显的界限,把介于两者之间的凝固方式称为中间凝固方式。

铸件的凝固方式由合金固液相线温度间隔和铸件断面温度梯度两个因素决定。一般凝固温度间隔大的合金,其铸件往往倾向于糊状凝固。另一方面,温度梯度对铸件凝固方式的影响也相当显著。当温度梯度很大时,宽结晶温度间隔的合金甚至可以趋于中间凝固或逐层凝固,如工业纯铝在砂型和金属型的凝固方式截然不同(见图 1-4),砂型铸造时原本以糊状凝固方式凝固的铸件,在金属型铸造

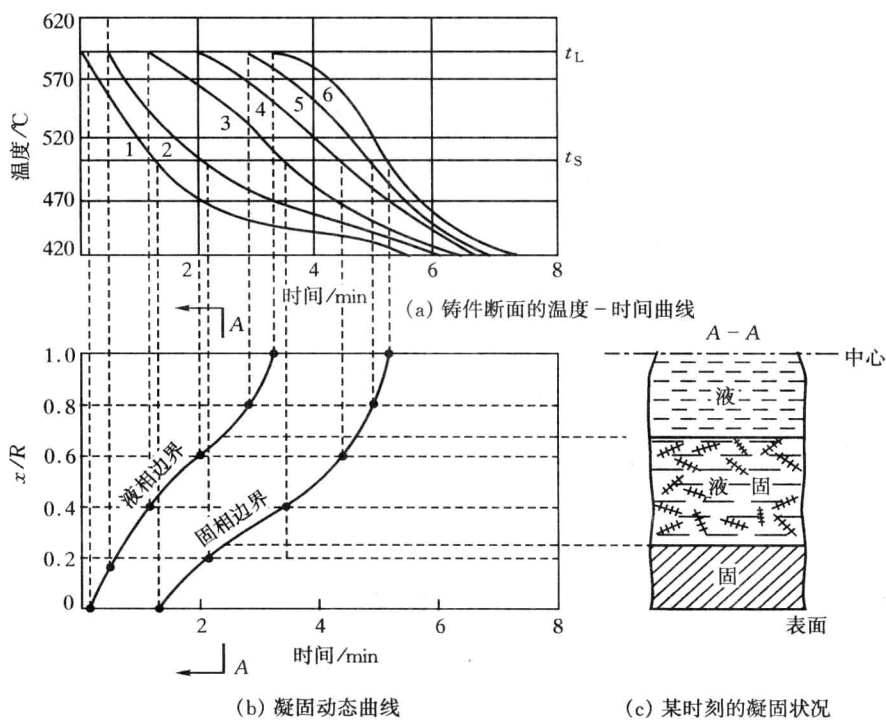


图 1-3 铸件凝固动态曲线的绘制

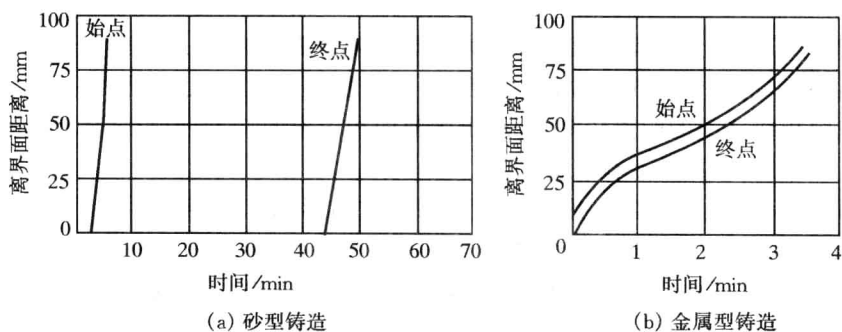


图 1-4 工业纯铝铸件断面的凝固动态曲线

时却以逐层凝固的方式进行。

图 1-5 更详细地表示了各种凝固条件是怎样影响合金凝固方式的过程。冷却能力强的铸型,如金属型,不仅表现为单位体积吸收凝固合金热量大(即比热容值高),而且表现为导热能力强。因此,凝固合金与金属铸型的界面得以维持较低的温度和高的温度梯度,这导致合金的液固两相区窄,趋向于逐层凝固。另一方面,使用冷却能力弱的铸型,如砂型,除吸热少(比热容值低)外,导热能力弱,使凝固合金与砂型界面温度很快升高,接近于合金的熔点,结果使合金的液固两相区较宽,逐层凝固的特征不强(如图 1-5(a))。

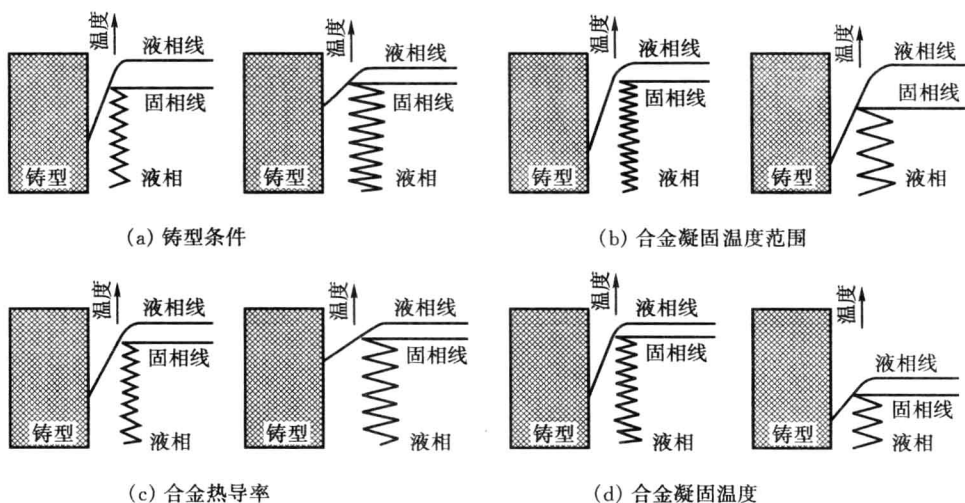


图 1-5 凝固条件对合金凝固方式的影响

如前所述,合金凝固的温度范围大小也影响到凝固的方式。如图 1-5(b)所示,尽管两种情况合金内部的温度梯度是一致的,但凝固温度范围窄的合金,其液相线和固相线之间的距离较短,表现出固液两相区窄的特点,说明合金趋向于逐层凝固。反之,合金则趋于糊状凝固。

图 1-5(c)说明了合金热导率对凝固方式的影响。合金热导率小时,铸件内部温度梯度大,凝固呈典型的逐层凝固方式。反之,合金的热导率大时,热流强度大,铸件内部温度梯度较为平缓,造成逐层凝固不占主导地位的特点。

影响凝固方式的另一个参数是合金本身的凝固温度,如图 1-5(d)所示。凝固合金的温度梯度可以表示成铸型和凝固合金间温度差的函数,如果合金的凝固温度与铸型温度相比,差别不是太大,合金中的温度梯度自然也不会很大,此时合金也就倾向于糊状凝固。反之,如果合金的凝固温度与铸型温度相差较大时,合金中的温度梯度就会很大,此时合金则倾向于逐层凝固。

1.2 液态金属的充型能力

1. 液态金属的充型能力及其影响因素

液态金属的充型过程是铸件形成的第一阶段,在充型不利的情况下,易产生浇不足、冷隔、砂眼、铁豆、抬箱、卷入性气孔和夹砂等铸造缺陷。为了获得优质的铸件,必须首先了解液态金属充填铸型的能力及其影响因素,从而可采取相应措施来提高或改善合金的充型能力,防止一些铸造缺陷的产生,以满足生产合格铸件最基本的要求。液态金属的充型能力(mold-filling capacity)是指液态金属充满铸型型腔,获得形状完整、轮廓清晰的健全铸件的能力,它是一个很重要的铸造性能。液态金属的充型能力首先取决于金属本身的流动能力,同时又受铸型性质、浇注条件、铸件结构等外界条件的影响。因此,充型能力是上述各因素的综合反映。

为了讨论影响液态金属及合金充型能力的因素,以一个水平棒形的流动性试样为例。通过计算金属流动长度 l ,来分析各种因素对充型能力的影响情况(如图1-6所示)。假定金属与铸型接触的表面温度在浇注过程中恒定不变,金属流速恒定,液流横断面温度为常数,热量仅沿垂直于型壁的方向导出。金属液的流动时间 t 可分为过热热量散失时间 t' 和从凝固开始到停止流动时间 t'' 两个阶段:

$$t = t' + t'' \quad (1-1)$$

从图1-6所示的棒形流动通道中选定微元体 dx ,在 dt 时间内该微元体的热平衡关系为

$$h(T - T_m)Pdxdt = -Fdx\rho_L C_L dt \quad (1-2)$$

式中 h —金属与型壁间的传热系数;

T_m —铸型的初始温度;

P —棒横截面的周长;

F —棒的横截面积;

ρ_L —金属液的密度;

C_L —金属液的比热容。

将 $t = \frac{\Delta x}{v}$ (v 为流速)时, $T = T_P$ (浇注温度); $t = t'$ 时, $T = T_L$ 的条件代入上式

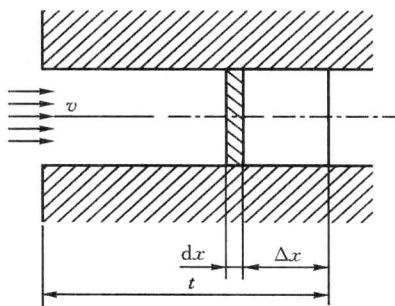


图1-6 计算充型能力示意图

积分得

$$t' = \frac{F\rho_L C_L}{Ph} \ln \frac{T_p - T_m}{T_L - T_m} + \frac{\Delta x}{v} \quad (1-3)$$

金属开始凝固时,其密度 ρ'_L 与比热容 C'_L 都变化了。 $t=t'$ 时, $T=T_L$; $t=t$ 时, $T=T_K$ (T_K 为停止流动时液体的温度),再次用式(1-2),并将式(1-3)代入,可得

$$t = \frac{F}{Ph} \left(\rho'_L C'_L \ln \frac{T_L - T_m}{T_K - T_m} + \rho_L C_L \ln \frac{T_p - T_m}{T_L - T_m} \right) + \frac{\Delta x}{v} \quad (1-4)$$

考虑到金属的充填能力 $l=vt$ 且略去 Δx 项,最后得到

$$l = \frac{vF}{Ph} \left(\rho'_L C'_L \ln \frac{T_L - T_m}{T_K - T_m} + \rho_L C_L \ln \frac{T_p - T_m}{T_L - T_m} \right) \quad (1-5)$$

在铸型表面涂有涂料的条件下,传热系数 h 可按式(1-6)计算如下:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_L} + \frac{x_T}{\lambda_T} + \frac{1}{h_m} \quad (1-6)$$

式中 h_L —液相金属的传热系数;

h_m —铸型的传热系数;

x_T 与 λ_T —涂料层厚度和其热导率。

对 C'_L ,可以近似地取为

$$C'_L = C_L + \frac{\Delta H_m w_s}{T_L - T_K} \quad (1-7)$$

式中 w_s —停止流动时液流前端的固相质量分数(或称固相率)

由式(1-5)~式(1-7)可看出,影响液态金属充型能力的因素是很多的。可将这些影响因素归纳为四类。

(1) 液态金属的流动性

通常把液态金属本身的流动能力称为流动性,它是影响熔融金属充型能力的主要因素之一。一般来说,流动性好的铸造合金,在多数情况下其充型能力强,在浇注后可以获得轮廓清晰、形状完整的薄壁和复杂铸件,同时有利于液态金属中非金属夹杂物和气体的上浮与排除,使合金净化,得到不含气孔和夹杂的铸件。此外,铸件凝固期间的收缩可得到金属液的补缩,在凝固后期因尺寸收缩受阻所出现的热裂纹能及时得到液态金属的充填而弥合,因此有利于这些缺陷的防止。若铸造合金的流动性差,其充型能力就差,铸件容易产生浇不足、冷隔、夹渣、气孔、缩孔和热裂等缺陷。铸造合金流动性的测定方法是:在试样结构、铸型性质和浇注条件等因素固定条件下,将不同的液态合金浇入流动性试样的铸型中,按其填充型腔的长度或充填缝隙的厚薄程度来进行测定,若流过距离长或充填缝隙小,则表示该合金的流动性好。常用螺旋形流动试样来测定合金的流动性(见图 1-7),而且通常

热系数明显降低。但是,有时加入合金元素后,会改变合金的结晶特性,反而会使流动性降低。例如,在 Al 合金中加入少量的 Fe 或 Ni,合金的初晶变为发达的树枝晶,并出现针状 FeAl_3 ,使流动性显著降低;在 Al 合金中加入 Cu,结晶温度范围扩大,也降低流动性。合金的结晶潜热在结晶过程中释放得越多,则凝固进行得越慢,流动性就越好。但是结晶潜热对流动性的良好作用能否发挥,取决于合金的结晶特性。结晶潜热对纯金属、共晶成分合金能充分发挥作用,而对结晶温度范围较宽的合金则影响不显著。液态金属的粘度不仅与其成分有关,而且还与温度、夹杂物的含量和状态有关,通常粘度对流动性的影响表现在充型的最后很短的时间内,由于通道面积缩小或液流中出现液固混合物时,因温度下降而使粘度显著增加,此时粘度对流动性才表现出较大的影响。

②合金的成分。合金的流动性与其成分间的关系可根据合金状态图获得。一般规律是在合金状态图上对应于纯金属、共晶成分和金属间化合物的地方流动性出现最大值,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。合金成分对流动性的影响主要是由于成分不同时合金的凝固方式不同所造成的。纯金属、共晶成分合金和金属间化合物是在恒定的温度下结晶的,由本章第一节的内容可知,其凝固方式为逐层凝固,结晶是从铸件壁面逐层向中心推进,与尚未凝固的液体之间的界面分明,且凝固层内表面较平滑,对尚未凝固的液态合金的流动阻力小,所以其流动性好。对于结晶温度范围较宽的合金,因其凝固方式属于糊状凝固,凝固时在铸件断面上存在着一个较宽的既有发达的树枝晶,又有未凝固液体相混杂的两相区,越靠近液流前端,枝晶数量越多,金属液的粘度增加,流动性降低。此外,由于这类合金在其结晶潜热还只散失一小部分(约 20%)时,晶体就已连成骨架而阻塞流动,致使大部分结晶潜热不能发挥作用,所以流动性差。

图 1-8 所示为铁碳合金的流动性与成分的关系。由图可见,纯铁流动性较好。随碳量的增加,结晶温度范围扩大,流动性降低,在含碳 2% 附近结晶温度范围最大,流动性最差。在亚共晶铸铁中随碳量的增加,流动性升高,共晶成分流动性最好。这是因为随含碳量增加,结晶温度范围减小,初生奥氏体枝晶数量减少,它对铁水阻塞作用相应减小,而且液相线温度降低,故在相同浇注温度下铁水流动性随碳量的增加而迅速提高。在共晶成分时,全部为较细的共晶组织,不仅凝固表面平整,流动阻力小,而且共晶成分铁水的浇注温度低,向铸型散热慢,流动时间也较长,故流动性最好。过共晶铸铁在冷却速度不大时,初晶组织为石墨,它悬浮于铁水中使铁水粘度增加,故流动性下降。铸钢的结晶温度范围虽然一般都比铸铁窄,但是其流动性却比铸铁差,这是由于铸钢的熔点高,钢液的过热度一般都比铸铁小,维持液态的流动时间短。此外,由于钢液的温度高,在铸型中散热速度快,很

快就结晶出一定数量的枝晶,使钢液更快地失去流动能力。在生产中为了保证铸造合金有良好的流动性,获得强的充型能力,应尽量选用共晶成分合金或结晶温度范围较小的合金。

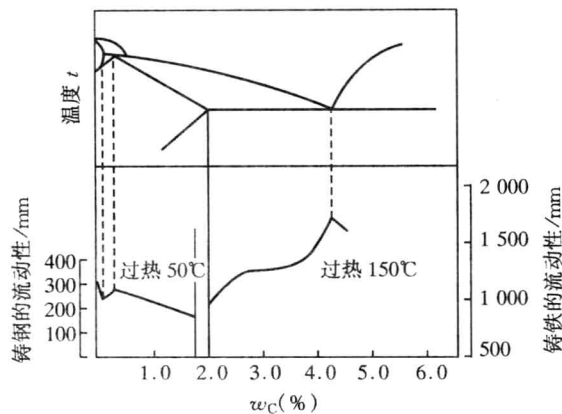


图 1-8 铁-碳合金流动性和相图的关系

合金中的杂质元素对流动性也有影响,其规律是:凡是能形成低熔点化合物,降低液相线温度并能使合金液的粘度和表面张力减小的元素,均能提高合金的流动性。相反,会降低合金流动性。例如,铸铁中的磷可形成 Fe_3P ,并与 Fe 的固溶体、渗碳体形成 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{P}-\text{Fe}_3\text{C}$ 三元共晶,其熔点为 950°C ,大大低于共晶温度,因而磷可显著改善铸铁的流动性。但通常不用增加磷含量来提高铸铁的流动性,因为磷量增加使铸铁变脆,只有对不承受载荷,要求轮廓清楚,花纹清晰的艺术品铸件为使铁水有很好的充型能力,才可适当增加磷含量。而灰铸铁中的硫和锰能形成高熔点(1620°C)的硫化锰,成为固体夹杂物悬浮在铁水中增加铁水的粘度,妨碍铁水的流动。在实际生产中可通过熔炼过程来提高合金的流动性,例如选用纯净的熔炼原材料及炉料,严格控制熔炼操作过程,减少液态金属中的非金属夹杂物和气体。

(2) 铸型的性质

铸型的性质对液态合金的充型能力有重要的影响,这是因为铸型的阻力会影响液态金属的充型速度,铸型与金属的热交换又会影响合金液保持流动的时间。因此,通常通过调整铸型的性质来改善合金的充型能力,也往往取得较好的效果。与充型能力密切相关的铸型物理性质主要有:铸型的蓄热系数(密度 ρ_m 、比热容 C_m 、热导率 λ_m)、铸型的预热温度 T_m 、铸型表面的涂料层厚度 x_T 以及涂料层热导率 λ_T 。

①铸型的蓄热系数。铸型的蓄热系数表示铸型从金属吸取热量并储存于铸型中的能力,它与铸型材料的导热系数、比热、密度有关。铸型的导热系数、比热和密度越大,铸型的蓄热系数就越大,因而铸型的激冷能力就越强,金属液在其中保持液态的时间也就越短,使充型能力降低。相反,铸型的蓄热系数小,金属液在其中保持液态的时间也就越长,使充型能力提高。表 1-1 列出了几种铸型材料的蓄热系数。由表可知,金属型比粘土砂型的蓄热系数大得多,所以液态合金在金属型中的充型能力比在砂型中差,但由于金属型可使液态合金迅速降温,使铸件受到激冷,因此从控制铸件温度分布和凝固或细化晶粒出发,往往要在铸件的局部或整体上采用金属型。砂型的蓄热系数与造型材料的性质、型砂成分的配比和其紧实度等因素有关。在砂型铸造中,利用蓄热系数很小的烟黑涂料以解决大型薄壁铝镁合金浇不足的问题,已在生产中收到较好的效果。

表 1-1 几种铸型材料的蓄热系数

材料	温度/℃	蓄热系数 $\times 10^{-4} / \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$
钢	20	3.67
铸铁	20	1.34
铸钢	20	1.30
粘土砂	20	0.11
粘土砂	900	0.17
湿砂	20	0.23
干砂	900	0.11
锯末	20	0.029 6
烟黑	500	0.007 6

②铸型的温度。预热铸型可以减小液态金属与铸型的温差,减慢合金的散热,从而提高其充型能力。例如,在金属型浇注铝合金铸件时,若将铸型温度由 340°C 提高到 520°C ,在相同的浇注温度 (760°C) 下,螺旋线长度可从 525 mm 增加到 950 mm。用金属型浇注灰铸铁和球墨铸铁件时,铸型的温度不仅影响充型能力,而且还影响铸件是否会产生白口组织,提高铸型的温度可以防止白口的产生。

③铸型的表面状态和铸型中的气体。光滑的铸型壁表面,或在型腔表面涂以导热系数小的涂料均可提高充型能力。如果铸型具有一定的发气能力,能在金属液与铸型之间形成一层气膜,这样就可减小合金充型流动时的摩擦阻力,有利于提高充型能力。例如,湿砂型中含有小于 6% 的水和小于 7% 的煤粉,能提高液态金