

# 铸造金属典型显微组织

---

〔英〕英国铸造协会 主编

赵忠义 郑振声 齐大中 沈嘉猷 唐朝瑛 译

国防工业出版社

# 铸造金属典型显微组织

〔英〕英国铸造协会 主编

赵忠义 郑振声 齐大中 沈嘉猷 唐朝瑛 译

BX/10/25

国防工业出版社

**B** 736622



### 内 容 简 介

本书收集了近四百余幅铸造金属显微组织照片,以说明各种铸造金属及合金的典型显微组织。书中除用两章专述金属学及冶金学基础及试样制备技术外,对每类合金又分述了组织结构特点、技术规格、典型机械性能、化学成分及其应用等。由于精选的实例很有典型性,因此本书不但适用于生产技术人员与科研人员,也适用于高等院校及技术学校的教学实践。

TYPICAL  
MICROSTRUCTURES OF  
CAST METALS

The Institute of British  
foundryman

1981

\*

铸造金属典型显微组织

[英]英国铸造协会 主编

赵忠义 郑振声 齐大中 沈嘉猷 唐朝瑛 译

\*

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新时代出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 15 344 千字

1990 年 10 月 第 一 版 1990 年 10 月 第 一 次 印 刷 印 数 : 0, 001—2, 000 册

ISBN 7-118-00382-4/TG·48 定价:9.40 元

## 译者的话

本书是英国铸造协会(IBF)的一本重要出版物。后经修订再版,对内容及金相组织进行了优选,原文金相组织照片清晰,富有典型性,国内没有影印本。

铸造金属的显微组织与成分性能有一定的关系。国内外普遍将通过观察显微组织推测成分、性能的方法用于科研、生产及教学实践,因此典型的金属显微组织照片成了重要的科研生产工具。本书内容虽非国家标准,但内容全面,叙述精炼,原作者在精选显微组织照片时又照顾了国际通用性,因此相信本书将是国内铸造界的一本实用的工具书。

此外,本书在修订过程中增加了金属学及铸造合金的基本知识,并把冶金过程,凝固过程和显微组织特点结合在一起,再加上本书金相组织照片的典型性,因此可以相信本书是国内高等学校及各类技术学校不可少的教学参考书。

目前我国铸造金属标准不够全面,现行标准的发行与应用也还存在某些问题,本书的出版将会对这些方面有弥补与参考的价值。

本书序言及第三、五章由赵忠义翻译,第二、四章由郑振声翻译,第一章由齐大中翻译。全书由沈嘉猷先生和唐朝瑛校阅。

本书缺点错误在所难免,乞望各界同仁指正,万分感谢。

## 序 言

英国铸造工作者学会曾于1957年以此题出版过一书,1966年又再版。这次与进一步再版不同,组织了一个工作组,以便在修改及翻新的问题上加以论证。修改方案业已获得同意,因而工作组目前已完成了它本身所拟订的任务。

推荐修改的原因主要有三:

第一点,也是最重要的,就是感到必须增加书的教育价值。当然,并未打算写一本有关凝固的教科书,新的修订宗旨在于达到合适的基本知识水平。本着上述前提,目的要把本书写成既适用于技术人员又适用于高校学生,从而对增强铸造金属科学与工艺的研究和生产两者之间的联系作出贡献。这就指出了本书的重新修订以及把冶金和凝固在“冶金学基础”这一章内相互结合的意义。希望修订的结果将有益于教学,并对专业领域内的现有教材起充实作用。

第二点,就是感到必须尽可能地使之成为国际通用书籍,因为目前还没有合适地可与之相比的出版物,并且铸造的显微组织显得与所处的地区毫无关系。这就导致更加强合金成份,而其次才强调国家标准。当涉及到这些时,就对现行的英国标准产生某些偏见,但也希望个别海外读者能以他们自己的经验联系这些情况。本书事实上,主要是涉及化学成份和铸造实践的组织图谱,其次才涉及规格。

第三点,就修改情况而论,使早期的内容加以翻新似乎是适宜的,并在排版和布局上尽可能标准化。为了商业应用的利益,也在显微组织和最终应用密切联系的地方抓住机会提供信息,当然,也提供了试样制备技术的基本数据。同时,工作组深知电子显微镜分析的重要性,但在此只包括了少数电子显微镜的例子,显然是由于铸造金属工业长期依赖传统光学显微镜之故。

不可避免,关于“典型”一词的含义将有很多疑义。这问题至今未能解决,而我们只能说,我们已经做了很多努力来尊重统一意见和专家意见。把所有显微组织的各单元予以定义,特别是涉及到被认为是缺陷的组织,或者甚至像缩孔、热裂、气孔和非金属夹杂物等这些众所周知的铸件缺陷,都是不可能的。本书不是这些缺陷的图谱,假使是的话,则篇幅大约至少增加一倍,售价亦相应增加。同样也不可避免的是,或多或少地有重大的遗漏。我们对此谨致歉意。而现在,即使可供利用的资料尚不完善,但已到了非停笔不可的时候了。

作为工作组的主席,我自己的贡献与直接参加具体工作者相比,是很小的。最初我们得到了英国有色金属工艺中心的约翰·豪博士的帮助。对“冶金学基础”一章,我们特别感谢里兹大学的彼得·贝里博士;在“铸铁”一章,特向英国铸铁研究协会的兰·胡费先生致谢,对“铸钢”一章,应向吉姆·杰克逊博士及其在铸钢件研究学会技术协会的同事们致谢,在“有色金属”一章,谨向伯明翰大学的吾亚·康也克博士致谢,对这一章又再次感谢杰克逊博士的帮助。上述先生们为新版付出了大量的时间,他们和英国铸造工作者学会常设机构的成员们,以及约翰·瑞特先生和他在铸钢件研究学会技术协会复制组的同事们

应该在最终的成果中得到荣誉。然而,我们还准备向给予巨大恩惠的其余各位协助者,以及承担了创订第一版繁重劳动的人们多致谢意。

英国铸造工作者学会 P9 工作组主任  
J. A. 瑞纳兹

# 目 录

第一章	冶金学基础.....	1
第二章	微观检验试样的制备 .....	13
第三章	铸造有色金属 .....	23
第四章	铸 铁 .....	68
第五章	铸钢和耐热合金.....	150

# 第一章 冶金学基础

## 一、铸件及铸造过程

将液体金属浇入铸型的过程一般用于生产异形铸件和作为生产锻件的第一步。用重力或连续铸造法所生产的金属锭大多数做为锻压生产的毛坯材料,因此大部分金属加工的第一步都是进行铸造。而且随铸造条件之不同,其显微组织有多种变化,所以铸件和铸造条件有关。

由液体金属铸造成形是零件成形的最直接的方法,其尺寸最接近设计者的要求。对某些合金,例如那些缺乏塑性和机械加工性能的材料不能使用其他加工方法,铸造是唯一的成形法。这些材料包括了许多重要的抗磨、耐热、耐腐蚀的合金,也包括了整个的铸铁家族。但在许多情况下铸造与锻造之间可进行工艺选择。选择的原理是经济条件。理想情况下应是根据最终产品的总的成本效果来考虑。选用工艺的经济原则不仅用于铸造与锻造两种工艺类型之间,而且也用于每一种工艺内部的各种工艺变化,也适用于产品零件的全部工艺选择范畴,其综合简图示于图 A 中。

无论重力法还是连续法生产的铸锭,它们本身都是铸件,但是形状比较简单。因为它们此后还要承受强烈的塑性变形,这就减少了它们铸态显微组织的重要性。在许多情况下,铸锭铸态的致密度对最后获得高的金属生产率(可售金属与熔炼金属重量之比)影响不大。相反,在异形铸件中,设计者所要求的性能主要取决于原始铸件的致密度和显微组织。即使对某些铸造合金,其显微组织可经过随后的热处理而有所改变,情况也是如此。因而获得致密铸件及控制好铸态显微组织就成为金属铸造工艺的中心问题。

本书主要阐述了各种成形铸件的显微组织,及与各种铸造金属使用要求对应的合金成分。但在将进行机械加工的形状相似的原始铸件中常常具有相似的显微组织。

金属铸造的基本原理和较详细的铸造过程及技术可以从本章末所附之参考文献简目中查阅。下面为了更仔细地检验那些控制和影响显微组织发展的因素,有必要先回顾一下铸件生产过程的主要步骤。

绝大多数铸件是把液态金属浇入只能用一次的耐火材料铸型中。这些铸型是用与所需要的铸件形态基本相同的模型生产出来的。最通用,最灵活,最简单的铸造过程是砂型铸造,它是用以砂子为主的造型材料制成的型腔,这种造型材料要有足够的耐火度以抵抗浇注金属的温度。造型材料中通常加有粘土或其他化学粘结剂以便产生适当的强度,保持模型遗留下的型腔。但在一些现代的造型工艺中,比如 V 法造型(也叫真空负压造型)过程中使用的是不加粘结剂的造型材料。另一不同种类的耐火材料铸型是用细粉和浆料制成的,通常用于熔模铸造。这种工艺的特点是使用蜡料制成的一次模型,在型壳凝结以后将蜡模熔失,留下成型型腔。



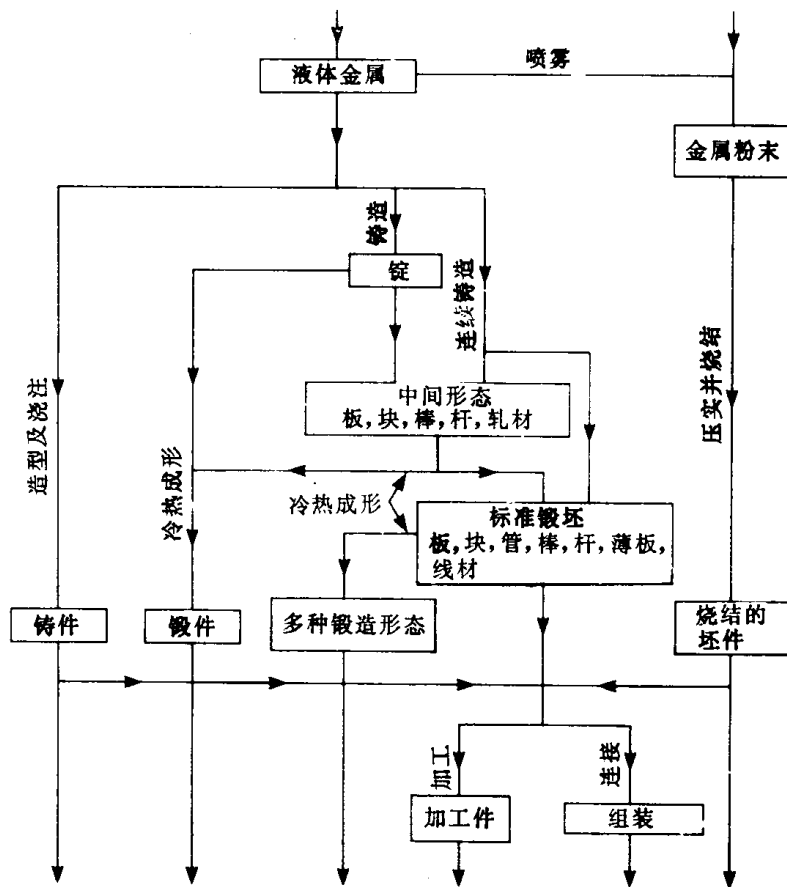


图 A 生产机器零件的主要方法

另一类重要的铸造工艺是金属型铸造和压力铸造。这种工艺是将液态金属直接浇入具有一定型腔形状的金属铸型中,从而取消了大部分铸造方法作为长期工具模型。这类铸造工艺与通常的耐火材料铸型相比,其工装费用较高,对铸件的形状限制较多,对铸造合金成分的限制也较多,但对于大批量较小铸件的快速生产是十分有利的。此外,压铸工艺对锌合金及铝合金铸件的生产尤为重要。

更专门化的铸造方法,例如多用于生产空心圆筒及轧辊的离心铸造及双金属铸造,它们把砂型铸造或压铸的特点同它们本身的工艺特点结合起来。本书也收集了这类产品显微组织的一些实例。

生产铸件的完整工序包括:熔炼成份及质量合格的液体金属;制备具有完整浇注系统及补缩系统的砂型或金属型;金属的浇注;铸件在铸型中的凝固和冷却;清砂等工序。清砂一般包括铸件的落砂,去除浇冒口,清理及精整,有时还包括热处理等。根据特殊的产品设计要求,可以继续机械进行机械加工、表面处理或其他的辅助工序。

以上生产过程中有几道工序影响到具有一定成分规格的铸件的显微组织。金属熔化

条件、炉料的情况和处理等都对凝固时显微组织的发展有重大的影响。铸件显微组织更受到金属在铸型中冷却速度的影响,而这又是取决于铸件的大小及铸型材料的特性。因此可以肯定对于同一合金用砂型铸造和压力铸造所得产品在显微组织上是不同的,本书也收集了许多这方面的金相实例。

铸件凝固时期显微组织的发展是同一些重要的补缩条件相关的,补缩条件决定了铸件的致密度。铸件补缩良好可以消除集中缩孔及分散缩松。由此可知铸件的致密度和显微组织是密切相关的。

许多铸造合金在铸型中凝固后的冷却期或随后的热处理过程中,都会由于固态相变或原子扩散而产生显微组织的进一步的发展。因此最终的显微组织是金属铸造全过程的结果,也就是从炉料熔化直至完成铸件的总的结果。

铸件显微组织的重要意义在于铸件的一些性能与铸件显微组织有很敏感的关系。铸件的这些性能和生产成本一起影响着特定成分的铸造合金的选用。但是必须强调指出,虽然通过调整几个参数可以在一定程度上控制显微组织,但显微组织也分别受其他一些不易控制的因素影响。因此对一个特定显微组织的选用自由度是受限制的,但这种自由度在承受热处理的铸造合金中是有所提高的。

## 二、工艺过程所要求的铸造合金

虽然大部分合金既可做铸造产品也可以做锻压产品,但两种工艺方法所选用的合金成分还是有重大差别的,这说明必须建立各自的技术规范。这些差别部分地是由于铸造工艺的特殊需要而引起的。一种合金对铸造条件的反应,部分地是由其成分所决定,特别是在这些条件影响到它的凝固方式时更是如此,但在某些情况下铸件的显微组织本身决定于生产条件。在进一步研究显微组织在铸造材料中的发展之前,我们将简单地回顾一下铸造过程中合金成分的作用。

铸造工厂中对铸造合金的要求是和铸造过程三个连续的阶段相关联的。在浇注时金属要有良好的流动性以便能很好地充填铸型并复制出铸型表面的细微轮廓,同时避免冷隔和较差的清晰度。第二阶段是铸件整体的凝固过程,此时对铸造合金的要求是能在初始铸态组织发展中使铸件内部致密。补缩问题及组织特性大多取决于合金的凝固特性。通过一些热力学条件可以进行凝固过程的某些控制,虽然这些条件也决定于铸件的重量和形状以及与此工艺有关的造型材料的性能。铸造过程的第三阶段包括凝固的完成及冷却到室温。整个凝固过程都在进行补缩,但在后二阶段铸件产生了内聚力,而且重点转为铸件材料在承受应力时的性能上了。此时铸件作为一个连续的整体进行收缩,并且在受到铸型阻力及由于铸件各部分冷却不一致所产生的收缩阻力时,仍能保持其内聚力。如果收缩应变在金属-铸型系统中不能被吸收的话,则铸件就会产生裂纹或热裂。对一个给定的铸型,在冷却阶段的合金的情况主要决定于其收缩率,以及温度递降时组织和机械性能之间的关系。

合金的基本结构是与上述三阶段的各个要求相关的。可以看到一个合金的窄的凝固范围是重要的性能,它可以说明为什么合金成分接近共晶点时铸造质量总是比较好的。成分接近共晶点铸造质量较好这个特性是与流动性有规则的变化相一致的,这是因流动性

与合金在铸型中的凝固方式密切相关的。在液相线之上一个恒定的过热,对于纯金属和接近共晶成分的合金通常具有最好的流动性,而对一个凝固范围比较宽的合金通常要求一个大得多的过热度才能有满意的铸型充填性。

合金的补缩性能同样与凝固方式有关。顺序凝固或定向凝固是最理想的补缩条件,因为它可以保证液体金属不断地传送给液-固相界面的补缩部位。这一点对凝固范围比较窄的合金是很容易达到的。凝固过程由致密的表皮逐渐延伸到位于冒口中的热节处。相反,凝固范围比较宽的合金易于在凝固过程中形成浆糊状态,多在一个相当宽的凝固范围中存有晶粒间残留的液体金属。在这种情况下补缩金属的传送严重受阻,除非产生相当大的温度梯度,则有发生分散性缩孔的趋势。这类合金对低熔点组分的偏析也是很敏感的,因为凝固时富含杂质的残留液体在收缩及对流作用力的影响下,将在晶粒间移动。

大部分铸造合金根据它们的凝固范围总是符合上述两类合金中某一类,但是各种有石墨的铸铁是重要的例外,因为它们在凝固过程有膨胀阶段。这种合金的凝固包括两个相的析出,即奥氏体和石墨,它们将根据成分、温度及在铸件中的部位而同时或顺序地析出。随着奥氏体的生长而产生的收缩被低密度石墨相的析出而造成的膨胀所抵消,因而减少了外部补缩的需要。但是这种自我补缩又是和需要承受膨胀压力的铸型刚度密切联系的。除含铋或锑的特殊合金之外,含石墨的铸铁是凝固时产生膨胀的唯一的工业应用合金。

总之,一个铸件承受收缩阻力而不产生热裂的能力仍是与这种合金的凝固温度范围休戚相关的。在这种情况下关键因素仍是一个凝固温度范围的宽度,在这个温度范围中铸造合金已产生了固体金属的内聚力,但却还保留了部分液体金属。这就形成了在铸件断面上累加起来的总的线收缩,此时铸造合金正处于一种脆弱情况下。因此合金的窄的凝固范围还是最有利的,虽然这不是唯一的应注意的因素。

虽然合金成分在靠近共晶点时铸件质量好,但通过对铸件设计及铸造技术的改进,使其他类型的合金也得到广泛和成功的应用。

### 三、生产过程中显微组织的重要性

铸件金相组织经常是由于许多物理条件限制的结果,而这些条件又是为了用来满足铸造工艺的某些需要。举例说,能帮助补缩的定向凝固也可能产生柱状结晶体区,虽然对这种组织经常进行再结晶处理,但原来显微组织形貌仍会遗留于最终材料中,从而产生不同程度的各向异性。另一方面,凝固过程的糊状形态通常易于产生等轴的宏观组织。经常设法使凝固时晶粒细化,这不仅为了使各显微组织分布得好,也是为了在糊状凝固阶段能更容易地得到补缩;热裂趋势也由于延迟产生内聚力及消除位于多量残留液体处的应变而大为减少。由于这预先的晶粒细化减少所需要的临界原子扩散距离而使热处理时间也大为缩减。

在另一些情况下,为了得到铸件最好的机械性能,铸造生产条件主要对着控制铸件的显微组织。因此一般认为铸造工艺和铸件性能是通过铸件的宏观和微观组织互相联系着的。

## 四、铸造合金分类

虽然铸造合金可以用不同方法分类,例如按照显微组织类型、性能或应用范围分类,但生产组织却是跨越这种分组的;铸造行业主要由铸铁、钢、轻合金和铜合金等专业单元组成(有几个少量范围的重叠)。本书也是用同样方式,亦即根据铸造合金的标准分类进行编写的。本前言的部分目的就是着重强调各个合金组之间或其内部的特点和对比关系来把各章节融汇在一起的。

本书图示的金相组织中凡是有特殊技术要求的材料都在注释中说明,必要时,可从参考文献中的技术说明。对于铸铁来讲除高合金类型外,化学成分不作正式规定:灰口铸铁是针对不同的断面厚度而以其抗拉强度来分类的;对球墨铸铁,则联合抗拉强度与延伸率一起来进行分类;对于钢和有色合金,成分范围是正式规定的,但大部分技术规格中也给出机械性能数据,包括抗拉强度、试验应力或屈服应力、冲击强度、弯曲强度、硬度及其他需用的数值。总的项目包括了各种不同的检验和试验程序及质量要求,为此又列出了多个个别技术规格。有关这方面的详细情况可以参见《英国标准年鉴》《美国材料试验协会标准的年度索引》及其他资料。

## 五、铸造显微组织的某些特性

各种铸造合金有自己不同的显微组织,而关系到特殊性能及应用范围的特性则又是随合金类型而大有变化。但是,对成分相差比较大的合金,某些组织上的特征也常是相同的,因此可以进行总的论述。

宏观特征包括了不同晶粒区组织的对照,例如柱状晶区与等轴晶区就经常为了钢锭的下一步加工而进行研究讨论。也常遇到几种不同形式的宏观偏析,它们大多是由几个不同的或复合的机理所形成。有时伴随着这些特征还产生各向异性或局部性能变异。用于某些特殊铸件(例如轧辊)的双重组织展示了在同一铸造材料中可能产生不同组织的应用实例。这些不同形式的宏观组织通常用肉眼或低倍放大镜可以看见,并且可以用来检验某些金相组织。

经常用宏观或微观的检验来进行显微组织观察。这些显微组织可以是由凝固时形成的一次结晶晶粒组成,或在另一些情况下由固态相变组织组成。多相系统的特点是在主要晶粒组织的周围或内部,不同程度地分布着各种离析相。如果这些离析相是固态相变形成的,则其组分的分布仍保持着早期阶段的特征,如图 279 及 281 所示。图中表示经过相变的钢仍分别保持了凝固的特征及高温固体阶段的特征。

和铸造合金特别有关的两个重要特征都是起因于枝晶的成长和共晶成长,这将在后面进行详细讨论。在实际晶粒中这些特征是显微组织的主要特点。

在晶粒范围或其内部亚结构范围之内还经常产生偏析:合金元素的枝晶偏析在固溶体中是作为晶内偏析存在的,而在更复杂的系统中则以特殊的第二相形态存在。几个实例将在后面涉及铸造合金显微组织成长的部分中重点说明。

热处理所形成的组织特点不仅限于铸造合金,而对各种高强度铸造结构材料都是特

别重要的。它们包括马氏体相变的产品以及固溶处理后析出过程的产品。必须强调指出，通过热处理产生的一些最重要的组织特点无法用光学显微镜分辨，而需用更高放大倍率的电子显微镜观察。典型实例见图 41 及图 42。还应说明的是电子显微镜在显示铸造显微组织特点方面的作用不只限于放大倍率较高，还包括能显示某些组分的三维特征，如图 53、54、92、及 390 所示的扫描电子显微镜照片。

铸造合金显微组织的另一些特点包括有非金属夹杂物。属析出类型的非金属夹杂物主要来自熔炼过程，并与原始炉料的纯净程度有关。钢中硫化镁夹杂物即属此种类型，其形态对钢的性能起重要影响，也对脱氧操作中微小的变异很敏感，如图 373、374 及 375 所示。外源夹杂物，一般比较大，主要来源于炉子、浇包及铸型的耐火材料。也经常看到由于气体析出或收缩造成的显微疏松。铸件中夹杂物和孔隙度的产生情况及允许限度一般在有关铸件缺陷的文献中详细论述。

为了适当了解显微组织及其变化，需经常参阅合金状态图。这方面资料刊载于所列参考书目的正文中，尤其详见于 Chadwick 所写的“相变金属学”一书 (Metallography of Phase Transformations)，也散见于更广泛的金属学专著中。

## 六、铸件显微组织的发展

前面已强调过合金熔炼条件对铸件初始显微组织发展的重要影响，并且得知熔炼的主要影响在于其对凝固过程的作用。大部分显微组织特征是在凝固阶段建立的。已经表明，即使在此后冷却及热处理过程中由于相变而改变组织的情况下，凝固组织特征仍发挥着残余影响。锻件同样也从液体金属开始，虽然在这种情况下铸造组织激烈地被此后的机械加工所变动，但初始铸态显微组织各组分的大小和分布以及偏析，仍能深刻地影响着此后的均匀化及热处理的结果。

融熔合金溶液的结晶过程包括了晶核的形成及生长两个阶段。成核的位置及晶核生长的速度既影响着总的凝固进程，又影响着初始凝固组织的特性。成核是初始步骤，而且一般认为在液体金属中外基质上的非均匀成核对商业铸件说是正常发生的事。作为晶核核心的微粒必须能很容易地为液体金属所润湿。一个密切的晶体取向外延关系是很有利的，凡晶格参数和合金晶格参数密切匹配的物质都能满足此要求。虽然合金中一些固有晶核尚须进一步研究，但在各合金中可以成为结晶核心的共性原则已被建立。

可以起作用的晶核数量是与铸造金属中初生晶粒数量直接相关的，但在共晶成分的合金中，举例来讲把初生晶粒看作是一个多相单元是既合理而又方便的。在这样一个单元中两个独立的相从一个单独中心联合生长起来。虽然许多这种双重组织能在以后由枝状组织发展起来，而这样的单元必须至少含有两个起始的结晶核心。

在这个阶段重要的问题是注意铸造合金中的晶粒大小不仅与初生晶粒有关而且还与某些特征，如树枝晶轴的间距，或者还与合金中固态相变的晶粒有关。

成核过程可以自发产生于原已存于熔体中的颗粒上，可由外加的成核剂或孕育剂的诱导而开始成核。使用这种添加剂是用于控制铸件组织的最通常的方式。非均匀成核的现象也说明了熔化条件决定铸造合金显微组织的重要意义，并且还说明了当合金成分有微小变动时显微组织也随即改变的敏感性原因。可利用的核心种类决定于金属中所存在

的夹杂物,它们来自炉料、熔渣、耐火材料、熔剂及周围气体,也决定于熔炼过程,包括保温时间及过热度。这些条件影响了成核化合物在接近合金液相线温度时的形成、融熔及析出。

一俟成核,初生晶粒的结构即决定于成长过程。根据合金构成及热力学条件,有两种主要的晶粒成长模式。它们是和铸件出现的两种主要的宏观组织区相符合的,实例见图 25 至 28 及图 239 至 242 的铝及钢的组织图。晶粒成长过程,至少从宏观上看是一个近乎单方向发展的过程。这在有相当温度梯度的情况下从铸型表面凝固前沿的推进可以看出。这些条件有利于一个柱状晶区的形成,其特点在于择优结晶取向。某些晶粒成长过程已在一些近似的但更理想的可控定向凝固条件下进行了研究。

此外,晶粒的生长也可以从过冷液体的内部自发核心开始(从各个核心沿径向地生长)而形成初生晶粒。这些自由的晶粒可以通过几种方式起始。它们可以从一些独立的核心成长,也可以从一些由其他区域来的已经形成的晶体碎片上成长。小的晶粒也可以起始于较冷的铸型表面或液体金属的上自由表面。形成的晶体随后由于重力、涡旋或对流而进入液体金属的内部。这些晶粒是近似等轴的,没有方向性的并再次在宏观组织中形成特性区。作为控制组织的办法,可以往金属液中加入成核剂和生长抑制剂等措施,从而得到非常细小的等轴晶粒。

在不同的铸件中随着合金及凝固条件的不同,宏观组织可以全部是柱状晶,如图 25 及 240,此时晶粒的生长直到碰上对面型壁生长过来的柱状晶为止;它们也可以全部都是等轴晶粒,如图 28 及 242(c)所示,或者两种类型都有,如图 239 及 242(b)所示。除了上述的陡的温度梯度之外,高的浇注温度,低的合金含量都促进全部柱状晶组织的形成。纯金属铸件便是全部柱状晶组织。在某些特殊情况下,可以控制凝固,使柱状晶单向生长贯穿整个铸件,甚至形成一个单晶体。根据这个原理形成的一个燃气轮机叶片铸件见图 380。

在图示的这些宏观组织中,应注意到所用的放大倍数都很低。在检验显微组织所用的高倍率放大中,枝晶的,共晶的及其他一些组织特点占主导地位,但还是很好地显示了重迭的宏观组织,虽然在这种条件下是不易观察到的。

无论宏观组织生长模式是单向的还是多向的,实际的晶界面可能是光滑的并且是非晶形的,也就是视具体情况可以是平的或球面的,晶界面特点还可以在晶粒生长时,以晶粒的凸出部分或超前相形式表征的结晶不规则性来表示。由于在铸造合金中晶粒生长现象主要决定了两种最常见的显微组织,它们是同枝晶凝固或共晶凝固相关联的,因此下面简述生长界面特性及对显微组织的影响。

一个光滑平整的界面仅在温度梯度相当大而晶粒生长速度又比较低时才可得到。在合金中晶界处,由于存在一个因不均匀凝固所形成的富含溶质的液体微区(其凝固温度比液体本体低),而使更多固体均匀的析出受到阻碍。在这种情况下已有的晶粒凸出部分变得稳定并且优先生长了,因为凸出部分接触的液体金属将在一个比毗连晶界面层的温度高的情况下凝固。这就促使逐步转变为六角蜂窝形的结晶。但是在大多数商用铸件生产条件下,结晶都进一步发展成枝晶生长。初生枝晶臂随着热传导方向生长,次生枝晶臂随后根据相似机理横向生长:整个骨架组织在每一个晶粒内部发展成为杆或板,并且经常可以在铸造宏观或显微组织中看到,在某些情况下是作为主要的组织,在另一些情况下是作

为残留显微偏析或晶内偏析产生的“记忆”的结果。显微组织中枝晶特点的实例见图 52、128、176、279、337 及其他许多试样。枝晶晶粒可以由于定向凝固而长成柱状或者由于从许多独立核心而长成等轴晶粒。

如上面简述的，在固溶体合金中能导致晶体生长模式逐步转变的条件综合示于图 B 中，并且类似的转变也发生于共晶凝固中。

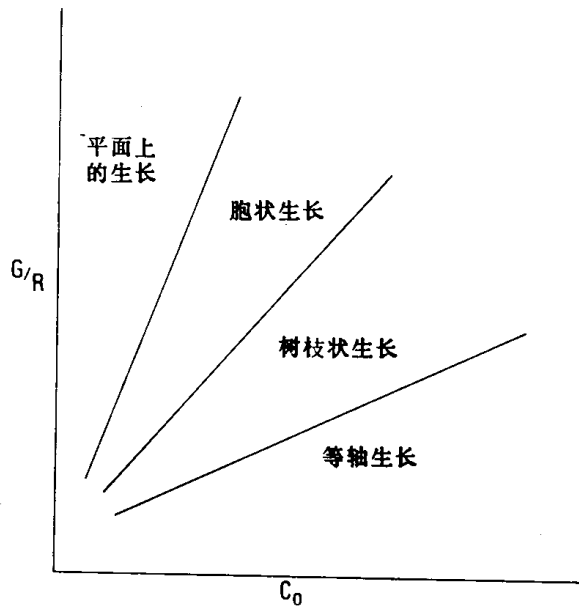


图 B 温度梯度  $G$ ，凝固速度  $R$  及溶质浓度  $C_0$  对合金凝固形态学的影响

共晶凝固的主要特点是从一个共同的起始点有两个相联合地生长并形成双重晶粒，经常称之为“共晶团”。这种共晶晶粒组织可以在经过适当侵蚀的灰铸铁中观察到，其实例见图 89。共晶晶粒中各相的形态取决于它们单独的和相比较的生长特性以及铸件的热力学和化学条件。共晶系统中的对比形态学可再次用石墨化铸铁作实例，在这里石墨片型式的变化及在更特殊铸造条件下形成的全然不同的球形石墨皆可见于下列各图的显微组织中：图 103 至图 106，图 115 至图 117，图 118 至图 121，及图 191 至图 193。还应注意到在球墨铸铁情况下，许多共晶团是对应于各石墨球的，这点与片状石墨铸铁不同，后者是一个晶粒（或晶胞）含有许多互相联结的石墨片。铝硅合金系统进一步提供了许多由于凝固方式改变而引起组织变化的实例；冷却速度、液态金属处理都对这些合金的共晶组织产生重要的影响如图 49 至图 54 所示。

在亚共晶或过共晶铸造合金中经常可以看到枝晶组织和共晶组织同时并存。这种并存组织如图 11、图 51 及图 52 所示。

由上述可知合金的宏观组织、显微组织的重要枝晶及共晶特点以及与之相联系的偏析特点皆起源于凝固过程。

凝固状态的后期变化对显微组织发展的影响可见于贯穿本书的许多实例中。最通常的情况是钢及铸铁中的奥氏体转变。不同聚集形式的铁素体及渗碳体,包括共析成分的珠光体,经常是这两种铸造材料经过完全凝固后自然冷却的组织特点。

在多相显微组织中,组分的特殊分布经常由固态冷却条件所决定。铸造材料中常遇到的一个特有的形式就是魏氏组织。当原生组织比较粗糙时魏氏组织产生于从一个单相区到两相区的冷却过程这种组织在铸态铸钢中是很典型的,如图 244 及图 290 所示。但在铜基合金,诸如黄铜及铝青铜中,也可以遇到,如图 65 及图 82 所示。铸铁中一般不产生魏氏组织。

另一方面次生相也可以沿初生相晶界析出。这种分布可以通过热处理,如铸钢件的正火,进行纠正:选用这种热处理是为了细化奥氏体晶粒,再通过奥氏体的相变得到一定分布的铁素体-珠光体组织,如图 252 所示。

通过热处理所达到的许多基本变化在很多铸造铝合金、铸钢及可锻铸铁中都已典型化。在可以热处理的铝合金中铸态组织通常含有重要的次生组分枝晶间的微粒:它们在固溶处理阶段全部或部分地溶解,淬火时以过饱和形式留存于组织中,时效时以超细基体弥散相再析出。从铸态到热处理后状态的典型组织变化见图 35 至 42:最佳机械性能在强化相可以用光学显微镜看见之前的 $\theta'$ 阶段。

钢中充分热处理后的组织大部分是马氏体回火产物。马氏体是由于奥氏体经过快速冷却,低温相变而形成的。无扩散切变相变产生了如图 269 及图 270 所示的那种类型的显微组织;这种马氏体逐渐由于重新加热而析出的回火碳化物所改变,此时条状马氏体逐渐消失并形成均匀碳化物弥散相,如图 272 及图 274 所示。

作为生产可锻铸铁所必须的热处理工序是用来分解原始白口铸铁组织中的渗碳体并使石墨析出:因此它包括了金相组织特性的根本改变。这种变化可从比较图 152~图 167 和图 136~图 137 的显微组织观察出来,并且还可以观察到石墨形态和通常的片状石墨明显地不同,它更加近似于直接从液体铸铁生产的球状石墨的外廓。

## 七、铸造条件及显微组织的控制

前已说过就铸件宏观组织区的性质、初生晶粒的大小及晶粒内部的结构特点而论,凝固阶段是决定铸件显微组织的关键。考虑到先前讨论过的两种主要组织类型,枝晶组织是用初生晶粒大小及枝晶臂间距大小来表示其特征的。枝晶组织控制了显微偏析以及次生组元的形成和分布,无论它们是凝固期间析出还是凝固后析出。枝晶间隔也能影响到晶粒大小及其他从初生组织通过固态相变所演变来的一些特性,也影响到由热处理来完成变化所需要的时间。最终显微组织中组元的弥散对机械性能有显著的影响。初生组织对次生组元的分布和形态的影响分别详示于图 13、14 及图 57 至 60 的轻合金对比的显微组织中。

共晶组织也是部分地由初生晶粒的大小(与晶粒数正好相反)决定其特征,也部分地由亚结构表示特征,在此种情况下即是共晶组元相的形态及间距。机械性能和热处理对这些特征是非常敏感的。这些特征之间有一定程度的互相依存性。

工艺参数是用于控制铸件显微组织和性能的主要方面,它们大多可由前面关于凝固



的综述推断而来。现简述其主要可变参数如下：

### 1. 熔体状态

前面已强调过熔体状态对结晶组织的重大影响,并且可以认为这就是熔体化学成分的微小变化对显微组织非常敏感的原因。使用这些影响对组织的实际控制将在后面的“晶粒细化”、“变质处理”等部分里讨论。熔体状态的另外方面是关于过热及温度的影响。这是通过它对结晶核心存留数的影响而起作用的。除镁基合金外,高的过热度将使晶粒粗化;在铸铁中过热增加了产生白口及激冷组织的趋向,而不易石墨化。

浇注温度本身也产生影响,低的浇注温度促进了金属在接触冷的铸型表面时大量生核,而且也减少了各晶粒的生长时间,因此促进了细化显微组织。

### 2. 冷却速度

高的冷却速度无论对初生晶粒还是亚结构组织都有细化作用。对初生晶粒的影响主要是由于冷却速度高而产生的过冷度大,因此有效核心数也增加,也由于在交界面前面的浓度梯度而产生的对晶粒生长的限制。亚结构组织的细化则是由于枝晶轴或共晶相的生长速度快而分支频率也高之故。在这两种情况下晶间间距都符合关系式:

$$d \cdot r^a = c$$

式中  $d$ ——晶间间距;

$r$ ——冷却速度;

$a$  及  $c$ ——两个适当的常数。

应当注意到冷却速度对固态相变产生的组织形貌也有类似的及直接的影响。例如,铸钢件中显示的铁素体晶粒大小及珠光体晶间间距等。在这种情况下,冷却速度由于顺序的两个相变而对最终的显微组织产生了双重影响。铸铁中的基体组织,包括珠光体的数量和形式,也同样取决于在比较低的温度范围所得到的冷却速度。

冷却速度的明显的影响可以分别由下列各图的对比显微组织看到:图107与图108,图117与图119,图191与图192,图292与图293。而在一个单一铸件中,冷却速度变化的影响在从离心铸管得到的试样中可以看得很明显,如图185~图188和图189及图190所示。冷却速度的影响在某些铸造合金中,主要引起了机械性能的断面敏感性及在砂型和金属型铸件中间所形成的组织及机械性能的差别。从英国标准1452的1977年品级260所给出的灰口铸铁的组织及性能范围中可以直接看到断面尺寸的影响,如图103至图106所示,同时对大量的有色合金也作出了金属型与砂型铸造之间的比较,如图51至图52及图63至图64所示。

冷却速度除了对显微组织的晶粒大小有影响外,还有其他更强有力的影响。由于激冷使铸铁中的石墨形态的变化和增加化合碳比例的趋势都会促使麻口组织的形成,如进一步加大激冷则形成白口组织,如图136、图137及图138所示。在某些铸钢和合金白口铸铁中,相似的激冷条件可能在铸态组织中产生马氏体。

除了铸型材料变化很大,例如改用冷铁及陶瓷壳型之外,在凝固阶段的冷却速度只是在一定程度上是可控的,因此作为控制组织的参数而论其价值是有限的。晶粒细化可以用降低浇注温度来达到,而且避免过大的冷却速度还可以防止一些不良的组织变化。在要求铸造过程中组织有重大变革的情况下,常使用的方法是添加孕育剂或改变化学成分。

在有固态相变的合金中,凝固后的热处理是很有利的,并且是强有力的,在许多情况下它是影响合金最终组织及性能的关键技术。