

# 金属凝固学

〔日〕千叶工业大学教授

工学博士·Ph.D.

大野笃美 著

朱宪华 译

广西人民出版社

# 金属凝固学

(日)千叶工业大学教授

工学博士·Ph·D

大野笃美 著

朱宪华 译

☆

广西人民出版社出版

(南宁市河堤路14号)

广西新华书店发行 桂林漓江印刷厂印刷

\*

开本787×1092 1/32 印张6.125 插页2 字数124,000

1982年3月第1版 1982年3月第1次印刷

印数1—2,400册

书号: 15113·89 定价: 0.67元

## 前 言

本书是根据日本地人书馆出版、大野笃美教授著《新订金属凝固学》1978年新订第二版本翻译的。在译稿完成以后，译者就翻译中遇到的有关问题请教了大野教授。得到了大野教授的直接帮助，并且就书中某些疑点专门对译者进行了解释，因而使本书有可能更接近和表达出作者的原意。但限于译者的水平，加上时间较紧，故肯定尚有许多不妥之处，衷心希望读者批评指正。

大野教授对本书的出版十分关心，而且还特地为中译版写了序言，译者在此致以衷心的感谢！

本书在出版过程中，承西安交通大学铸造教研室陆文华、周庆德同志的指导和校正，刘真同志的具体协助，做了不少工作，得以使本书能很快地和读者见面，在此一并致谢。

译者 朱宪华

1980年8月25日

## 中文版出版序言

在金属材料生产过程中，首先遇到的就是十分重要的凝固问题，但是长期以来，关于金属凝固的机理一直没有搞清。

《金属凝固学》是作者在对金属凝固进行长期研究的基础上写成的，它提出了与原来的概念完全不同的崭新观点，对金属凝固机理及凝固组织的控制等各个方面进行了论述。

本书日文版自1973年出版以来，根据不断获得的新资料进行修订补充，至今已出版到第五版。在日本，得到冶金、铸造、金属材料等领域中的技术人员、大学教师、研究人员及大学生的广泛阅读。

作者曾应国外同行的要求，于1976年出版了英文版，受到西欧、美国、加拿大、澳大利亚等国读者的欢迎；今年春，已由苏联出版社用俄文出版，这样，东欧各国也已能便利地读到本书。

这次，西安交通大学朱宪华先生来日访问，在交流铸造技术的同时，谈到拟将本书译成中文出版。作者对本书能献给中国的金属技术工作者，感到由衷的高兴。

作者非常欢迎中国读者就金属凝固问题直接向作者提出质疑。希望就金属凝固问题与中国读者共同讨论研究，以期

促进金属凝固理论的进一步发展和有利于铸造技术的不断进步。

作者向将本书译成中文而付出辛勤劳动的西安交通大学朱宪华先生表示衷心感谢。

**大野笃美**

1980年6月6日

# 目 录

1. 绪论 .....	1
2. 铸造合金的宏观组织 .....	4
3. 固体与液体 .....	6
4. 凝固温度 .....	9
5. 过冷 .....	13
6. 成核 .....	15
7. 纯金属的凝固 .....	21
8. 平衡状态图 .....	25
8.1 冷却曲线与状态图 .....	25
8.2 完全互溶固溶体合金的平衡凝固 .....	27
8.3 完全互溶固溶体合金的非平衡凝固 .....	29
8.4 共晶合金的平衡凝固 .....	31
8.5 共晶合金的非平衡凝固 .....	33
8.6 包晶合金的平衡凝固 .....	35
8.7 包晶合金的非平衡凝固 .....	36
8.8 形成金属间化合物的合金 .....	37
8.9 液相互不相溶的二元系 .....	38
8.10 液相部分互溶的二元系 .....	39
9. 过冷的减低 .....	41
10. 固溶体合金的凝固 .....	46

<b>11. 树枝状结晶</b>	50
11.1 型壁上树枝状晶的成长	50
11.2 树枝状晶的枝间距	57
<b>12. 激冷层与柱状晶带</b>	63
<b>13. 粒状晶的生成</b>	65
13.1 等轴晶	65
1) 关于等轴晶生成的原来假说	65
2) 等轴晶的沉淀	66
3) 等轴激冷层与自由晶	69
4) 等轴晶生成的机理	73
5) 等轴晶生成的直接观察	74
6) 在型壁上形成根部有缩颈的晶体	81
7) 晶体的游离与沉淀	83
13.2 树枝晶断片	86
13.3 多角形自由晶	89
<b>14. 振动对铸造凝固组织的影响</b>	93
14.1 关于振动作用的旧观点	93
14.2 振动的作用	94
14.3 液面振动	94
14.4 振动的有效时期	96
14.5 搅拌	97
<b>15. 浇注方法与凝固组织的关系</b>	100
<b>16. 铸型的冷却能力与凝固组织的关系</b>	104
<b>17. 晶粒细化剂</b>	109
17.1 晶粒细化剂的作用	109
17.2 细化剂的选择与偏析系数	113
17.3 成核数	116

18. 浇注温度 .....	120
19. 凝固组织的控制 .....	123
19.1 获得等轴晶的条件 .....	123
19.2 异常粗大晶 .....	125
19.3 细小柱状晶组织 .....	127
19.4 获得柱状晶的条件 .....	130
19.5 对流的控制与柱状晶组织 .....	130
19.6 单向凝固与柱状晶 .....	131
19.7 单晶的成长 .....	135
20. 偏析 .....	137
20.1 正偏析 .....	138
20.2 逆偏析 .....	142
20.3 比重偏析 .....	145
20.4 V型偏析及逆V型偏析 .....	145
20.5 带状偏析 .....	149
21. 缩孔 .....	152
22. 铸造裂纹 .....	157
23. 共晶成长与共晶团的生成 .....	160
23.1 成核及成长 .....	160
23.2 共晶团的生成 .....	164
23.3 棒状、层状及粒状共晶的生成 .....	174
24. 焊接组织的控制 .....	177
25. 成分过冷的减低与成分过冷 .....	178



# 1. 绪 论

除了用电铸法及粉末冶金法熔制的金属制品外，几乎所有金属制品均需经过一次熔化及凝固过程。而凝固后金属制品的性能，将受到最初凝固组织的决定性影响，这对于不再加工就使用的铸件固然是如此，即使对要进一步经受塑性加工而制成棒材、板材、线材的情况下往往也是如此。

似乎普遍都认为，存在于铸锭中的缺陷，可用锻造、压延等塑性加工的方法予以消除。但是，在材料的处理上，无视于怎么也无法消除的宏观缺陷，如宏观偏析、缩孔、非金属夹杂、裂纹等的存在，是极其危险的。这些铸锭中的缺陷，即使用塑性加工方法可消除到外观上可以忽略的程度，但这种缺陷往往作为历史的痕迹存留于制品中，给制品性能带来很大影响。

例如，大型钢制桥梁的某个局部处，受到了基因于晶间偏析的腐蚀，此时，即使桥梁的所有其他部位没有任何损伤，这座桥梁钢的晶间偏析缺陷也可能成为葬送行驶于其上的火车、汽车的原因。

一般说来，大多数的微观偏析都可以用热处理方法消

除，但一旦产生了宏观偏析，则不论用热处理或塑性加工方法都无法消除，缺陷的痕迹将一直残留到最终制品。因此，即使在实验室里创造出了多么优良的合金材料，但如果用它制得的铸锭具有不均匀的铸造组织及化学成分，就很难供作高度可靠性的材料。这种说法，并不只限于铸件和铸锭，对于金属的焊接部分也是如此。

造成没有偏析的均质细密的凝固组织或只由柱状晶组成的凝固组织，以及能够自由地控制结晶的形状、大小及分布，一直是冶金工作者长期以来的宿愿。为此，首先必须搞清凝固机理，寻求控制凝固组织的方法。

金属是如何在铸型中进行凝固的这一凝固机理问题，由于无法直接观察到铸型中的金属凝固现象，迄今只能主要根据观察凝固后的组织和根据化学分析的结果加以推断。虽然近来放射性同位素也已用于研究铸型内的金属凝固，但仍然很难确切了解到铸型内结晶的详细行为，一般给予人们的印象是要搞清金属的凝固问题是相当困难的，从而把它看作神秘莫测。

凝固特别使人感到为难的原因之一，是由于一种陈旧的假说所造成，这种假说认为：在铸型内，等轴晶在溶液中过冷最大的型壁处及液面处生成，也会在溶液内部成核而生成。由于偏执于这一概念，使得至今在关于形成铸造组织的解释中存在着许多难于理解的问题。此外，有人在这一概念指导下，为了获得均质细密的铸造组织，一直醉心于寻找晶粒细化剂，进行着所谓成核触媒剂的研究，实际上是徒劳无益的。

凝固使人感到困难的另一重大原因，在于用数学式处理的方法。就是说，在铸型内的结晶生成机理、熔体的运动、熔体中的结晶行为等问题，尚未搞清的情况下，就用单向凝固的方法，根据从高纯度金属的凝固方式中获得的资料（这种凝固方式形成平滑凝固界面而且推进得极为缓慢），使用作了许多假定后推导出来的数学式，企图近似地运用到实际铸锭的凝固中去。而实际铸锭的凝固包含有种种情况，例如树枝晶的晶枝作不规则成长或熔体内的对流是变动的，或者晶体发生游离而上浮或沉淀等等。

必须老老实实地使凝固问题恢复到本来面目，澄清错误看法，重新开始研究。

等轴晶即粒状晶首先在溶液冷却最剧烈的型壁或液面上形成，在生成稳定的凝固壳之前发生游离和沉淀堆积。作者基于这一实验事实，痛感有必要用崭新的观点来重建凝固理论，完全抛弃陈旧的凝固理论，引进凝固界面上“过冷的减低”的概念，作者准备用这一新概念来论证纯金属及合金的凝固、蜂窝状组织、树枝状晶和等轴晶的生成过程，探究各种类型的偏析及铸造缺陷的生成原因，进而归纳出凝固组织的控制方法。

## 2. 铸造合金的宏观组织

金属溶液在铸型中凝固时，根据熔体中含有溶质的种类和数量，铸型性质、大小、形状，浇注温度，浇注方法等的不同，可以得到各种不同的凝固组织。图2.1为用简单形状的铸型制得的铸锭的典型纵剖面宏观组织示意图。

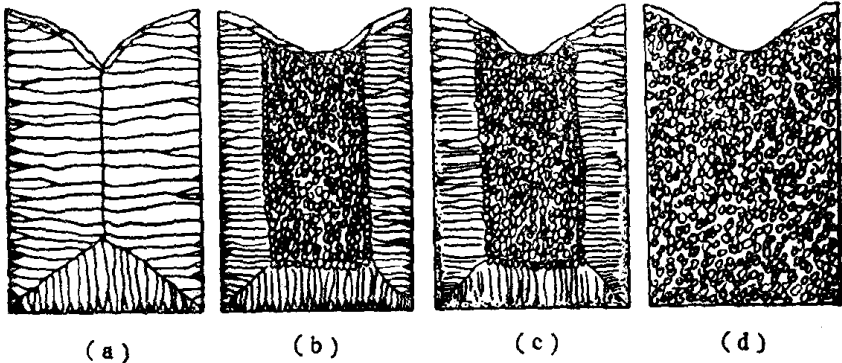


图2.1 铸锭的宏观组织示意图

图2.1(a)为主要在纯度高的金属凝固时，或将合金在高温下浇入金属型之类急冷铸型时，或用人工方法抑制铸型内熔体对流时，经常出现的柱状组织，在其外侧可以看到，由在型壁上成核的具有无规则成长方向的结晶所组成的激冷层。

这种无规则排列的结晶表现出下列倾向：当浇注温度提高时其数量减少，直到看不到明确的激冷层；而且，当急剧冷却时，激冷层变薄，终于在宏观上辨认不出它的存在。

由于柱状晶平行于热流方向成长，故在铸锭的棱角及中心处，产生了自不同方向生长起来的柱状晶相接触而形成的界面。

大家都已知道，气体和杂质容易富集于这种界面上，具有这种组织的铸锭在后续的塑性加工中往往自这种界面处产生裂纹。因此，具有发达柱状晶的铸锭一般不适于进行塑性加工。

图2.1(b)为合金铸锭中最常见形式的组织，表现出柱状晶包围下的等轴晶区域。而且有时先于柱状晶在最外层也存在着如图2.1(c)所示的细密等轴晶，一向将它称之为等轴激冷层或简称激冷层。在图2.1(b)及(c)形式的凝固组织中，按生成等轴晶的方式不同，在凝固过程中将产生种种形式的偏析。大型钢锭中的V型偏析、逆V型偏析、Al-Cu合金及Cu-Sn合金中看到的偏析，就是典型的例子。

合金还会如图2.1(d)所示，凝固成几乎全部由等轴晶组成的组织。这类形式的组织是人们最希望的铸锭组织。因为这种组织较之上面几种形式来，减轻了夹杂物的局部富集，而且等轴晶彼此以杂乱的方向排列，在任何方向上发达程度均等，由于在宏观上的等方向性造成在化学和物理性质上也是最均质的，而且是最容易进行锻造、压延等塑性加工的组织。为了理解如何能造成这种组织，首先从液体与固体的差别开始谈起吧！

### 3. 固体与液体

为了理解金属的凝固现象，必须首先了解固体与液体有什么不同。读者在听到固体与液体这两个词时，大概立刻就会联想起固体象石头般的坚硬，液体则能够象水一样流动。就是说，如图3.1所示，固体能抵抗外来的剪断力，以保持原来的形状；但液体只具有很小的抗剪断力，故其外形随容器的形状而变，而且能够流动。

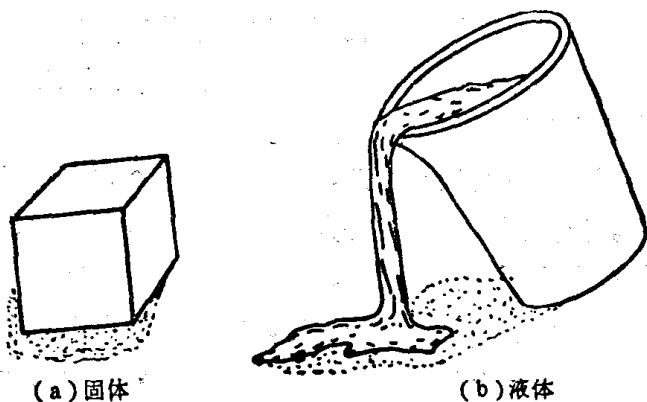


图3.1 固体与液体

这样看来，固体与液体最显著的区别在于对外来剪断力

的抗力不同。若用粘性一词表达，则固体与液体之间的差别达 $10^{20}$ 之多\*。基于固体与液体结构不同而造成的性质差异，还表现在扩散性质上。以Cu为例，比较一下在凝固温度时固体与液体的扩散速度，固体的扩散速度为 $10^{-8}$ 平方厘米/秒，液体则为 $10^{-5}$ 平方厘米/秒\*\*，即液体中的扩散速度远大于固体。

人们对固体的结构已经有了相当清楚的了解，而对液体的结构，特别在接近凝固温度时的液体结构，至今还不太清楚。固体的原子具有长程序的规则排列，原子以其结晶晶格结点为中心进行着运动；但在液体中原子呈现无规则排列。就是说，液体原子的动能比固体大，原子的运动达到十分激烈的地步，以致不能使原子固定于应该作规则排列的结晶晶格结点上。

把如此激烈地运动着的液体原子重新拉回到规则排列上来，这就是凝固的本质。即使使如此激烈运动着的原子作规则排列，其密度并无很大变化，如表3.1所示，绝大部分金

表3.1 金属凝固时的体积变化\*\*\*

金属	Zn	Al	Au	Cd	Ag	Fe	Mg	Sn	Bi	Ga
体积变化%	-6.5	-6.4	-5.2	-4.7	-4.5	-4.4	-4.2	-2.7	+3.3	+3.4

\*\*\* 金属便览(1958)111, 丸善出版。

\* A.H.Cottrell: An Introduction to Metallurgy, §13.2 (1967)

\*\* W.C.Winegard: An Introduction to the Solidification of Metals (1964) 4, The Institute of Metals.

属在凝固温度时的体积变化约在 6 % 以下。这就说明了接近凝固温度的液体具有相当接近于固体的结构，可以认为液体的结构是由短程序排列所构成。



## 4. 凝固温度

现在，如图4.1所示，使用电炉熔化，将测温热电偶插入坩埚中的加热熔化的金属熔体中，一面极其缓慢地降低炉温，一面连续记录金属液的温度变化，就可得到如图4.2所示的冷却曲线。就是说，温度随着时间的延续而下降，达到凝固温度时暂时保持一定的温度，凝固结束后再度开始下降。

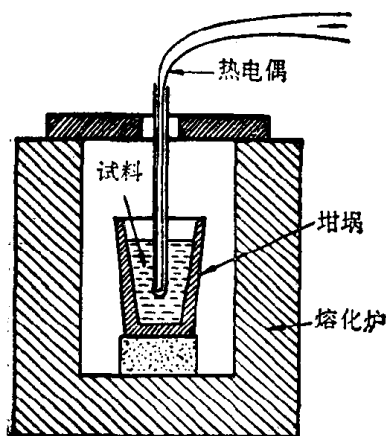


图4.1 热分析装置

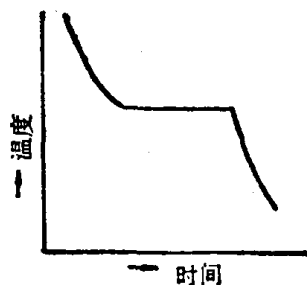


图4.2 纯金属的冷却曲线