

金属的凝固

理论、实践及应用

〔日〕 大野篤美 著

机械工业出版社

金属的凝固

理论、实践及应用

〔日〕大野篤美 著

邢建东 译

周庆德 校



机械工业出版社

金属の凝固

結晶の生れてゆく姿をみつけるまでとその後の記録

昭和 59 年 8 月 10 日 初版第 1 刷発行

著 者 大野篤美

発行者 株式会社地人書館

* * *

金属的凝固

理论、实践及应用

〔日〕大野篤美 著

邢建东 译

周庆德 校

*

责任编辑：王海峰 版式设计：冉晓华

封面设计：方 芬 责任校对：张 媛

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 5 · 字数 107 千字

1990 年 8 月北京第一版·1990 年 8 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,680 · 定价：3.90 元

*

ISBN 7-111-02177-0 / TG · 558

序

还是在 1964 年夏天，在北大西洋看到无数浮游着的冰山的时候，促使我开始研究金属凝固的机制问题。

1970 年，我的导师宫田進先生收到了从东京轻合金制作所小松二郎社长那里寄来的一封信。在这封信中，附上了“金属材料”杂志中登载的大型发动机工业公司铸造研究课长佐佐木五真男写的题为“铝凝固理论的发展”一文的复印件。

在这篇文章中，他非常详细地以名著的方式介绍了我的研究成果。他在写到我“驳倒了传统理论，打开了铸造技术者心灵的窗户”后继续写道：“这些研究成果作为铸件质量健全化基础理论的进展，是很值得铸造技术工作者们重视的。”

小松社长发出一封想让我到他那里去进行讲演的邀请信。在同宫田先生一起到埼玉县行田市的株式会社东京轻合金制作所时，他对我说：“你的理论我至今为止只听到一些片断，但想听听完整的。”

显然，在讲演会上，我所说的“我已经亲眼观察到了凝固现象”的话给宫田教授留下了深刻的印象。他劝我说：“今天的讨论如果只是停留在讲演上的话，则太可惜了。一定要把它写成书”。这样，在 1973 年，出版了我的第一版《金属凝固学》。

1975 年，我到德国的亚琛工业大学讲演，在那里我受到了从新日铁来的留学生平岡照祥的招待，他特意把我所著的《金属凝固学》带到了德国。他把此书放在我前面，要求

EA-60107

我给他写几句话。我写了我平时经常作为座右铭的一句话：“要适应所给予你的环境”。

这时，平岡又对我说：“请先生一定把您最初的想法以及研究的经历写出来，我深信这对年青人来说是非常有用的”。因此，这一次的《金属的凝固》一书就是应平岡的这一要求而产生的。在我的脑海里至今为止仍回荡着平岡那时热切的话语和我们干杯时玻璃杯发出的清脆悦耳的声音。

在这以后，我不仅在美国、欧洲，而且在中国、南美和澳大利亚等国外许多大学和企业进行过多次讲演。在这过程中，我一直记着平岡要我出版一本新书的要求。因此，在每次讲演中我都不断地对原稿进行修改。

1980年，这个原稿的一部份在“铸锻造及热处理”上以“铸造组织的控制原理”为题，作为连载讲义登载出来。在该讲义中，我从为什么进行金属凝固研究开始，讨论了所提出的结晶游离论，以及基于这个理论来控制铸造组织的原理。

在这以后，我出乎意料地得知这份连载讲义的读者比原来预想的要多得多。许多大学和企业把它复印后发给学生和技术工作者。

因此，我就产生了在这份连载讲义的基础上再进一步把结晶游离论的应用加进去，整理成书这个想法。这样，在随后的讲演中，我又对原稿进行了修改。我想：怎样才能使读者更好地理解结晶游离论，以及怎样解释才能使它能够更有效地应用到实际的铸造过程中去呢？于是，我把讲演后别人提出的问题作为一个宝贵材料，把这些问题的答案充实到书的内容中来。

最近，我应用结晶游离论开发了使凝固从铸锭内部先进行，在中心部位没有孔洞和偏析等缺陷的而且完全没有等轴

晶只有单向凝固组织的连续铸造法。这种完全没有等轴晶，表面呈镜面状的光滑长铸锭的出现，使我感到结晶游离论能够被理解的时候终于到来了。

从原稿开始着手至今已经5年了，每次阅读都不断地进行修改。为了最后检查我的原稿，我到曾给与我的研究工作影响最大的加拿大多伦多大学进行访问，在那里一个星期中，终于渐渐地趋于脱稿了。

当我将要脱稿的时候，我想向不仅对于许多曾使我得到很多启发的人们，以及曾给我许多协助的共同研究者和学生们，而且对于提出许多反对意见的人们表示深深的感谢。我所进行的金属凝固的研究，象下象棋一样，正是因为有了高明的对手，反而使我的研究成为一件非常有趣的事情。

1983年6月5日于多伦多

大野篤美

中文版出版序言

随着电子工业的急速发展，带来了工程中各种机械向着小型化发展的倾向。因而也就强烈地需要我们去开发一些新的铸造方法以生产那些没有铸造缺陷、没有晶界等的优质金属材料。本书 1984 年 8 月用日语出版，就是为了响应这一时代的要求，以能够对金属的凝固技术给于丰富的启示为目的。本书出版后，马上就引起了许多生产金属材料的企业的关注，并被用来作为有关人员的教材。

著者确信，和在日本一样，本书对于世界各国铸造技术的进步将会做出大的贡献。因此已经进入英语及俄语版的出版准备工作。现在著者听说由邢建东先生翻译的中文版将要得到出版，这无疑是一件非常高兴的事。

邢建东先生从 1983 年 9 月开始到 1985 年 3 月在著者的研究室里从事金属凝固方面的研究工作，他是第一位在凝固初期实际观察到结晶游离现象的中国学者。因此，著者对于在中国，由著者的凝固理论的最优秀的理解者邢建东先生来翻译出版此书感到由衷的高兴。

著者希望此书能够在中国的大学中流传，让更多的学生有机会阅读，以便对中国的工业发展作出更大的贡献。

大野篤美

1989 年

目 录

引言	1
1. 铸造宏观组织的形成	3
1.1 铸造金属的宏观组织	3
1.2 结晶游离论	6
i 等轴晶生成的主因	6
ii 研究的动机	8
iii 晶粒沿着型壁的沉淀	12
iv 凝固现象的直接观察	15
v 等轴晶带的形成	21
vi 结晶游离论和自由激冷晶论	23
vii 由于液面冷却而产生的雨淋晶粒的起源	30
viii 结晶游离论的证实	36
1.3 等轴晶生成的起源	38
1.4 等轴晶的生成和游离	44
i 晶粒在型壁上的成长	44
ii 根部颈缩状晶粒的生长	48
iii 晶粒的游离和增殖	49
2. 铸造金属宏观组织的控制	53
2.1 等轴晶组织	53
i 晶粒细化剂	54
细化剂的作用	54
细化剂的选择	60

ii	铸型的冷却能力	64
iii	铸型的性质	70
iv	振动	77
	振动的作用	77
	液面振动	78
	有效振动的场所	84
	有效振动的时间	85
v	搅拌	86
	铸型回转	89
	电磁搅拌	91
	撞击作用	96
vi	浇注温度	99
2.2	柱状晶组织	100
	单方向凝固法	101
3.	结晶游离论的应用	105
3.1	共晶系合金宏观组织的形成	106
i	初晶的分布和等轴共晶晶粒	106
ii	共晶领先相	117
iii	等轴共晶晶粒的细化	119
iv	共晶晶粒从型壁的游离	119
3.2	铸铁的凝固和反白口组织的形成	121
3.3	球墨铸铁和结晶游离论	129
3.4	结晶游离论和宏观偏析	133
i	正偏析	134
ii	逆偏析	135
iii	线状偏析	138
iv	带状偏析	139

v	比重偏析	141
3.5	结晶游离论和 O.C.C.法	141
	结束语	148

引 言

在这 20 多年来，我以直接观察金属凝固现象的方法入手，一直对熔融的金属在铸型中是怎样凝固的，以及怎样去控制金属的凝固组织这些问题进行着持续不断的研究。

熔融的金属在铸型中是怎样凝固的问题，由于金属的不透明性，其内部是看不见的，因此就成为一个很有意思的问题。另外，不仅如此，弄清金属的凝固机制，对于生产符合时代所要求的金属材料方面也是非常重要的。

我们通常所接触的金属制品，除一小部分外，大部分首先都要经过最初的熔化、凝固过程，成为铸件和铸锭，而后再进行各种不同的加工，热处理或表面处理。

众所周知，在最初的凝固过程中所形成的组织和铸造缺陷将直接影响到以后的制品质量，然而，或许因为金属是不透明的原因，这种金属制品必须经过的“凝固”这样一个非常重要的第一阶段也没有彻底弄清，而只是作为一个困难的问题而遗留下来了。但是，随着最近对金属材料质量要求的不断提高，使人们认识到：“必须首先弄清凝固现象”这一问题了。

在这本《金属的凝固》中，我想从我研究金属凝固的动机开始，历史性地按照我的研究过程讨论“结晶游离论”及其应用，最后介绍我最近开发的只有单方向伸展着的结晶组织，而无内部缺陷的金属材料的连续铸造法——O.C.C.法。

根据我自己的研究工作，我曾在 1973 年出版了《金属

凝固学》这本书。1976 年该书的英文版出版。1980 年，苏联莫斯科冶金出版社出版了该书的俄文版。前一段时间我访问了中国，了解到在中国该书也出版了中文版，并在有些大学作为教材使用。

由于以前所出的《金属凝固学》是以教科书的形式出版的，因此比较生硬和简洁。这次我想不以这种方式，而以完全自由的方式详细介绍关于凝固机制和控制铸造组织的试验和结果以及关于它们的讨论。

1. 铸造宏观组织的形成

1.1 铸造金属的宏观组织

在开始讨论前，首先来看一看下面的铸锭。

图 1.1a 是 Al99.8% 铸锭。它是把熔融的金属铝注入如图 1.2 所示的箱形金属型中使之凝固所得到的。上部的凹陷是由于凝固时的收缩而产生的缩孔。

在铸锭的表面由于覆盖着铝的氧化膜，因此，如图那样呈银白色。如果把它浸入 Cu_2Cl 溶液中，而后再用硝酸清洗，就得到了图 1.1b 那样清晰的表面。可以看到许多晶粒。



图 1.1 铝铸锭表面及纵断面的宏观组织

现在，再把这个铸锭从正中间切开，看其纵断面的宏观组织。图 1.1c 就是其纵断面组织，在它的外周是从表面向

中间并排伸展着的柱状晶。这一区域称为柱状晶区。

在柱状晶区所包围着的中央部分被称为等轴晶区。

由于柱状晶具有各向异性，而等轴晶却没有，因此，由等轴晶组成的铸锭比起由铸锭表面向中间伸展着的柱状晶组成的铸锭在锻造和压延等塑性加工过程中都要优越得多。

这里让我们来看一个例子：图 1.3 是由只

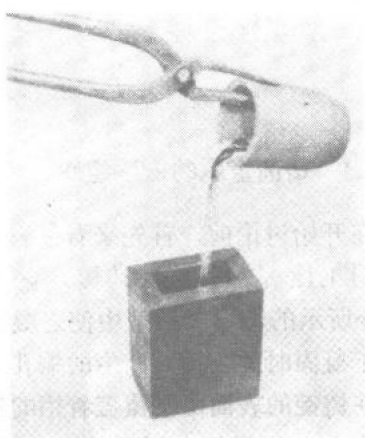


图 1.2 铸锭的铸造

有等轴晶或只有柱状晶组织组成的，同一成分的铝铸锭所制

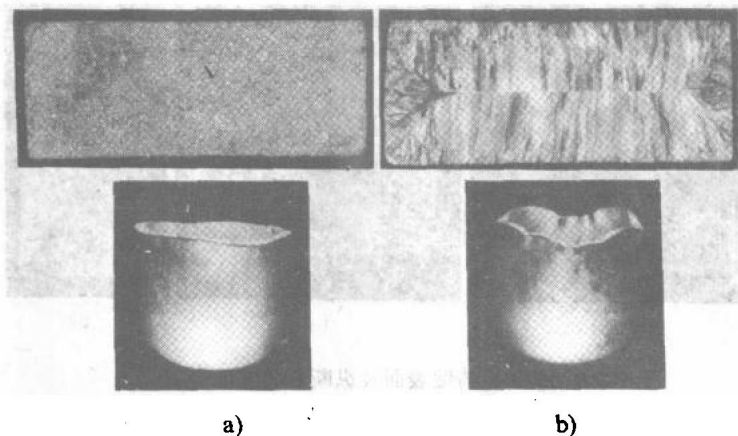


图 1.3 铸锭的宏观组织以及由它们所制成的板的加工性

成的板，把它们切成圆形后，如图 1.4 那样，把此圆板深冲后所得到的杯子。

由此可以看出，只由等轴晶组织组成的铸锭比起基本由垂直于铸锭表面成长着的柱状晶组织组成的铸锭，在随后的塑性加工方面要优越得多。

但是，由等轴晶组织组成的铸锭也并非总是好的。例如：磁性材料，高温用的燃气轮机叶片等就不希望有等轴晶组织，而要求只是柱状晶的单向组织。

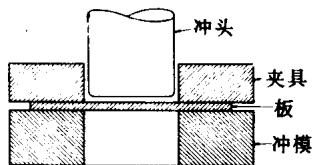


图 1.4 板的深冲装置

组成铸锭的晶粒，如前所说只有柱状晶和等轴晶两种类型。根据它们的分布形式，铸锭的组织可以大致分为象图 1.5 那样。

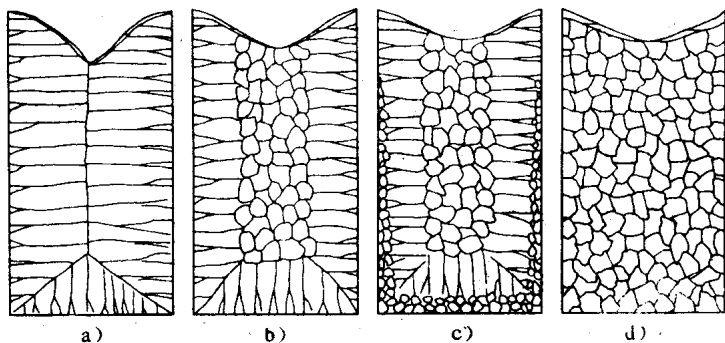


图 1.5 铸锭宏观组织示意图

图 1.5a 是全部为柱状晶组织的铸锭。图 1.5b 为柱状晶区包围着等轴晶区的铸锭。在铸锭组织中经常有象图 1.5c 那样，在柱状晶的外侧也有等轴晶存在。它们被称为等轴激

冷晶。图 1.5d 则是全部为等轴晶组织的铸锭。

铸造组织的广义分类，大致如上所述。而一般不纯物（包括杂质和添加元素——译者注）越多，浇注温度越低，则越易形成等轴晶。相反，浇注温度越高，则易形成柱状晶。

铸型的冷却能力也对组织有很大影响。如果铸型的冷却能力过大，组织就成为柱状晶。另外，如果铸型内的熔液在静止状态下凝固，则易形成柱状晶，相反如果使凝固时熔液激烈地运动，则可能产生等轴晶。

铸造金属的宏观组织大致是由柱状晶，等轴晶或者这二者的混合物组成。

在铸型内熔液凝固时，如果在型壁上形核的晶粒与相邻的晶粒接触而形成了稳定的凝固壳的话，则象图 1.6 那样，就形成了柱状晶区。这一点是比较容易想象的。但是，在柱状晶前面的等轴晶是什么时候、在什么地方、以什么方式生成的呢？也就是图 1.5c 中的等轴晶的生成机制问题。只要弄清了这一点，就应该可以控制铸造金属的组织，也就可以生产出单纯是等轴晶组织的铸锭，或者是完全没有等轴晶而只有无限伸展着的柱状晶组织的铸锭了。

1.2 结晶游离论

i 等轴晶生成的主因

我至今为止所要进行的主要工作就是弄清楚铸锭中等轴晶区的晶粒是什么时候形成、在什么地方和怎样产生的这些问题。

我认为，铸锭中的等轴晶是象图 1.7 那样，“在型壁上形核的晶粒，由于溶质的偏析，使其根部的成长受到了抑制，

这样，在稳定的凝固壳形成以前产生游离。”即我所提倡的“结晶游离论”。

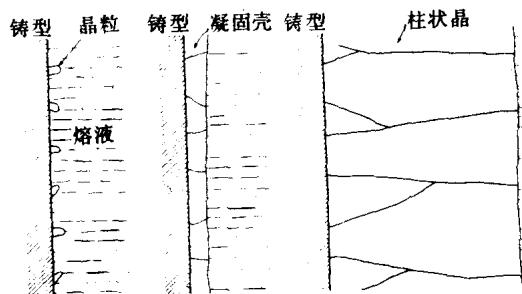
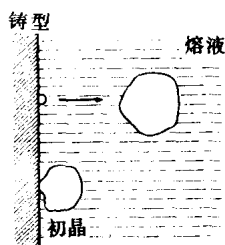


图 1.6 铸锭在型壁上的形核和成长

但是，因为我说过在图 1.5b 中“中央存在着的等轴晶先生成，而后才产生外周的柱状晶”，因此，对于那些在头脑中已经形成了柱状晶区生成后再生成等轴晶这样一种老概念的人们来说是很难接受这个观点的。

我在加拿大多伦多大学初学凝固学时，Winegard 教授是这样讲述的：“铸锭外周的结



晶成长以后，在它们固液界面前方的液体中产生了等轴晶的晶核。”我毫不怀疑地相信了这一点。对于这个问题由于很早以前就一直认为是首先在铸锭外周产生了柱状晶，而后在柱状晶包围着的残液中产生了新的晶核，最终形成了等轴晶。因此，听了这样的说明后，一点也没有产生任何怀疑的想法。

我想这可能是由于以前曾在学校学了合金平衡状态图的