

金属凝固学

〔日〕 大野篤美

JINSHU NINGGU XUE

机械工业出版社

金属凝固学

〔日〕 大野篤美

唐彦斌 张正德 译

宁德仁 校



机械工业出版社

本书是以作者对钢锭凝固现象的研究成果为素材，并从作者收集的有关凝固学资料中，选取最新资料加上作者的见解写成的。书中贯穿“过冷减小”这一新凝固理论，阐述纯金属及合金的凝固、树枝晶及等轴晶的生成过程、晶粒细化剂的作用和控制凝固组织的方法，以及产生各种铸造缺陷的原因和防止措施。

本书可做为大专院校铸造专业和材料专业的教材，也可供从事铸造的科技人员参考。

新訂金属凝固学

千葉工業大学教授

工学博士・Ph. D

大野篤美 著

株式会社

地人書館

1977年4月第二版

* * *

金属凝固学

〔日〕大野篤美 著

唐彦斌 张正德 译

宁德仁 校

*

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 850×1168¹/₃₂·印张 4³/₄·插页 2·字数 121千字

1983年12月北京第一版·1983年12月北京第一次印刷

印数 0,001—7,100·定价 1.05元

*

统一书号：15033·5525

译者的话

为获得优质铸件，控制凝固组织是非常重要的。关于专门论述金属凝固的书籍较少。为了更好地掌握金属凝固学的知识，广大铸造科技工作者都迫切希望能得到金属凝固的书。为此，特译本书供参考。

作者直接观察金属凝固现象后，发现从前的凝固理论是错误的。并提出“过冷减小”这一新凝固理论。其要点：随着凝固的进行，在凝固界面上出现溶质偏析，从而该处金属熔液的凝固温度降低。伴随成分的变化，金属熔液预先具有热的过冷在凝固界面附近减小，在“过冷减小”得最小的地方优先生成晶核。等轴晶即粒状晶首先在金属熔液最冷的型壁面上或液面上形成，而在形成稳定凝固壳之前出现晶粒游离、沉积。

作者大野篤美是日本千葉工业大学教授、工学博士、著名的冶金学家，他理论与实际相结合，系统、简明扼要地归纳了金属凝固机理。对于读者理解金属凝固机理会有很大启发，同时，对控制铸件凝固组织和提高产品质量也将会起到极大的促进作用。

由于译者水平有限，错误难免，诚恳地希望广大读者批评指正。

译者

一九八一年十二月

前 言

金属凝固对于获取均质材料和控制铸造组织是非常重要的。但是，在金属学中，它却是最晚着手研究的领域，所以，有关凝固方面的系统著作不多，而要求出版此类书籍的呼声却一直很高。本书就是为了迎合这种迫切期待，特为初学者编写的有关最新凝固知识的专著。

作者第一次感到凝固是一门有趣的科学，是在1960年在多伦多大学听瓦因加德（W. C. Winegard）博士讲授《物理冶金学》的时候，当时，作者在罗斯（H. U. Ross）教授的指导下，研究钛渣。完全没有料到将来要研究凝固问题。然而，多伦多大学以查默斯（B. Chalmers）博士作为教授，曾经为社会培养出了许多著名的凝固学家，如瓦因加德博士、温伯格（F. Weinberg）博士、杰克逊（K. A. Jackson）博士、蒂勒（W. A. Tiller）博士、路透（J. W. Rutter）博士、奥斯特（K. T. Aust）博士和博林（G. F. Bolling）博士等。在作者的周围还有霍姆斯（E. L. Holmes）博士和考勒（G. S. Cole）博士等许多年青的研究人员在从事凝固研究，作者也就自然地置身于良好的研究气氛之中。

但是，直接使作者有机会从事研究凝固问题，是由于受到中川義隆博士所著《大型钢锭的偏析》论文的影响，该文曾获日本“钢铁协会”论文奖。由该论文得知，对于大型钢锭偏析的生成机理这样极其重要的问题，还尚未解释清楚，有待继续研究。

关于实际凝固的研究方法，是从在伦敦大学任教的理查森（F. D. Richardson）博士那里得到启示。

1964年，为了提出自己有关具体研究方案和设想，作者旅游了欧洲。在访问理查森博士的研究室时，对研究室内林立的透明容器感到惊讶和兴趣，其情景在脑子里留下了深刻的印象。归途

中，在北大西洋上空，在从飞机窗口眺望浮游于海面之上无数冰山之际，作者决意利用水溶液模型进行动态观察，开始研究钢锭的凝固现象。

用氯化铵水溶液观察玻璃铸型内晶粒的沉积过程，在看到晶粒的V形堆积，和伴随堆积层下沉而产生的倒V形偏析的时候，仿佛看到了钢锭的凝固情景。

作者采用铝合金和锡合金进行实验，并在铸型内设置过滤网，通过这样的方法，作者确认，在金属铸锭中也存在晶粒沿型壁面沉积。通过从动态直接观察锡合金的凝固现象后，又进一步确知等轴晶在型壁上生成游离。

从动态直接观察金属的凝固现象是非常困难的，而且需要有耐心。助理研究人员茂木徹一君参与并发现了等轴晶产生游离现象，将其摄制成电影。

根据这种直接观察结果可以明确指出：关于凝固的传统理论是完全错误的。同时作者也深感需要建立完全新型的凝固理论。为了说明这种凝固现象，作者导入了“过冷减小”这一概念，即确立了新的凝固理论：随着凝固界面出现的溶质偏析而引起的“过冷减小”，抑制了凝固界面的推进，在凝固界面上偏析程度小的地方，优先进行凝固。并以这一理论来论述有关凝固的各种问题。

本书就是基于这一理论和研究成果，把作者在大学、公司和研究所讲课时的讲义汇集成教科书的形式，所有的说明皆以“过冷减小”这一概念为基础。本书取材于当前有关凝固的最新情报，并加进了作者的观点而写成的。也许将来有一天，由于最新凝固理论的出现，本书的阐述也就变为陈旧。但是，如果本书能为科学的如此进步作出微弱的贡献，作者也就感到荣幸。

在本书出版之际，作者要对给予各方面帮助的许多人士表示感谢。首先对堀口貞雄博士关于铸造是最迟的未开化领域，建议作者向这方面进军，给予推荐引路；再就是对给作者提供良好研究环境，使作者开始对凝固发生兴趣的多伦多大学和经常给予作

者热情帮助和鼓励的罗斯教授、皮金 (L. M. Pidgeon) 博士、瓦因加德博士等，在此致以诚挚的谢意。

此外，在作者进行研究和编写本书时，承蒙千葉工业大学教授箕杏洲博士提出宝贵意见；福特汽车公司的考勒博士对本书提供了许多珍贵的研究资料，又对原稿进行了仔细的校阅；秋田大学宇佐見正副教授提供了铸铁树枝晶的金相照片，在此致以谢意。

还有，对协同作者进行了许多实验，出版时又协助进行制作照片及图片的茂木徹一君，协同进行研究工作的早田博、吉江茂樹、松原陽等，以及作者研究室的各位同学，也一并表示感谢。

大野篤美

1973年2月7日

修订补充版出版说明

《金属凝固学》系根据作者自己的凝固理论编写而成。自1973年6月初版问世以来，它一直被作为大学和企业技术学习的教材。

因而，经常听到这样一些评论和议论：“汇集的资料都是作者喜欢的”，“象小说那样有趣”。的确，本书是作者写的有关金属凝固的“私人小说”。全书贯穿了作者有关金属凝固的基本观点：凝固经常始于熔液内过冷度最大的某一局部表面。热散失使晶粒长大，而凝固界面的溶质偏析抑制了晶粒的生长。在溶质偏析程度最小的液固相界面，晶粒优先生长。

自初版问世以来，作者得到了在钢铁和有色金属部门，以及国内许多企业、研究所和大学进行讲学的机会。同时，1974年，在美国麻省理工学院（MIT）和加拿大的多伦多大学；1975年，在英国的剑桥大学、牛津大学、伯明翰大学、谢菲尔德大学；德国的亚琛工业大学、柏林工业大学；瑞士的洛桑工业大学；法国的多曼大学进行了有关于金属凝固的讲学。并且通过讨论，更加确信了作者理论的正确性。

继初版之后，1975年5月出版了本书的第二版。其中有一部分书籍远渡重洋，到了国外。而且从国外获悉，迫切期待出版英文和俄文译本。这次作者首先出版了英文版的《金属凝固学》。

金属凝固学第二版已没有库存，急需印刷第三版。借此机会，决定增添一些新的图片和资料，做为修订补充。

有关金属凝固学的研究是无止境的，这次只着重于内容和资料的增补，有关凝固的详细叙述留待以后另寻机会介绍。作者尽力使本书保持简明扼要。

作者承蒙多伦多大学的路透教授、日本钢管株式会社的川和

高穗博士、株式会社神戸制钢所的铃木章博士、東北大学金属材料研究所的松本昇博士、阿根廷原子能研究所的比洛尼 (H. Biloni) 博士和澳大利亚的莱克兰 (K. D. Lakeland) 博士等提供珍贵资料，借此书修订补充版出版之际，特表示感谢。同时，在作者的研究工作中曾得到金属材料技术研究所郡司好喜博士和大阪大学教授岡本平博士对作者不遗余力地热情帮助和提供良好建议，千葉工业大学教授旗杏洲博士以及该校副教授雀部实博士等给作者提出了宝贵意见，在此一并致以谢意。

大野篤美

1977年4月10日

目 录

1. 绪言	1
2. 铸造金属的宏观组织(铸锭组织)	3
3. 固体和液体	5
4. 凝固温度	7
5. 过冷	10
6. 晶核的形成	12
7. 纯金属的凝固	17
8. 平衡图	20
8-1 冷却曲线和平衡图	20
8-2 无限固溶体合金的平衡凝固	21
8-3 无限固溶体合金的不平衡凝固	23
8-4 共晶合金的平衡凝固	25
8-5 共晶合金的不平衡凝固	26
8-6 包晶合金的平衡凝固	27
8-7 包晶合金的不平衡凝固	27
8-8 形成金属化合物的合金	28
8-9 在液态互不相溶的二元系合金	29
8-10 在液态时有有限溶解度的二元系合金	29
9. 过冷减小	31
10. 固溶体合金的凝固	35
11. 树枝晶	38
11-1 树枝晶在型壁上的生长	38
11-2 树枝晶的枝间距	44
12. 激冷层和柱状晶带	49
13. 粒状晶的形成	50
13-1 等轴晶	50
1) 有关等轴晶形成的几种传统理论	50
2) 等轴晶的沉淀	51

3)	等轴激冷层和游离晶	53
4)	等轴晶形成的主要原因	56
5)	对等轴晶形成过程的直接观察	57
6)	颈缩晶粒在型壁上形成	63
7)	晶粒的游离与沉淀	64
13-2	枝晶破碎	67
13-3	角形游离晶	69
14.	振动对铸造凝固组织的影响	72
14-1	关于振动作用的传统理论	72
14-2	振动的作用	72
14-3	液面振动	73
14-4	振动的有效期间	74
14-5	搅拌	75
15.	浇注方法和凝固组织	77
16.	铸型的冷却能力和凝固组织	80
17.	晶粒细化剂	84
17-1	晶粒细化剂的作用机理	84
17-2	晶粒细化剂的选择和偏析系数	87
17-3	形核质点数	89
18.	浇注温度	93
19.	凝固组织的控制	95
19-1	获得等轴晶的条件	95
19-2	异常粗大晶粒	96
19-3	微细的粒状组织	97
19-4	获得柱状晶的条件	99
19-5	对流的控制和柱状晶组织	100
19-6	定向凝固法和柱状晶	101
19-7	单晶体的长大	103
20.	偏析	105
20-1	正常偏析	105
20-2	反偏析	108
20-3	比重偏析	110

20-4 V形及倒V形偏析	119
20-5 带状偏析	113
21. 缩孔	116
22. 铸造裂纹	120
23. 共晶的生长和共晶晶粒的长大	122
23-1 晶核的形成和长大	122
23-2 共晶晶粒的长大	125
23-3 棒状、薄片状和粒状共晶组织的形成	130
24. 焊接组织的控制	132
25. 成分过冷减小和成分过冷	133
索引	135

1. 绪 言

除电熔铸法或粉末冶金法生产的特殊金属制品以外，大部分金属制品必须经过一次熔化和凝固过程。而初生凝固组织往往对产品的性能有决定性的影响。这一点对于凝固后直接作铸件使用是不言而喻的，而对于尚需经过塑性加工以制成棒材、板材、线材等制品时，也是如此。

普遍认为，通过锻造、轧制等塑性加工，一般就能消除钢锭中存在的缺陷。然而，忽视了怎么也不能消除的宏观缺陷，即宏观偏析、缩孔、非金属夹杂物、龟裂等。这在材料应用时是非常危险的。铸锭中的这些缺陷，即使经过塑性加工，表面看来缺陷已经消除，可以忽略，但它仍作为残迹留存在制品中，对制品的性能有很大影响。

例如，在大型钢制桥梁的某个局部，当晶界偏析受腐蚀时，即使桥梁的其他所有部分完全完好，该桥梁也会因此而使运行在桥上的列车或汽车坠桥。

一般通过热处理能够消除大部分微观偏析。可是如果出现了宏观偏析，即使用热处理或塑性加工也不能消除，而偏析残迹存留于最终成品之中。因而，即使是在实验室研制成功的任何优质合金材料，只要其铸锭有不均匀的铸造组织或化学成分，就难以把它作为可靠性高的材料使用。这种情况不只限于铸件或铸锭，可以说，对于金属的焊接部分也是这样。

制作无偏析的、有均匀微细的凝固组织，或由单一柱状晶粒组成的凝固组织，并能自由地控制晶粒的形状、尺寸和分布，一直是冶金技术人员多年来的愿望。为此，必须首先弄清楚凝固的机理，然后找出控制凝固组织的方法。

关于金属在铸型内怎样凝固的机理问题，从前不能直接观察

金属在铸型内的凝固现象，主要是根据对凝固组织的观察和化学分析的结果进行推论。近来，已经采用放射性同位素研究金属在铸型内的凝固情况。虽然如此，想要准确地了解晶粒的生成机理和晶粒在铸型内的详细动态仍是困难的。关于金属凝固问题，一般给人们的印象是一个复杂而神秘的问题。

对凝固问题之所以感到复杂，其原因之一是由于按照旧有的观点，一直认为，无论是在铸型内熔液有最大过冷度的型壁上或是在除液面以外的熔液内部，都是由晶核生成等轴晶。因为坚持了这个旧概念，所以使以前对铸造组织形成的解释，留下了许多难于理解的问题。并且，为了得到理想的、均匀细小的铸造组织，一直在象炼金术士那样努力探求晶粒的细化剂，即研究形核的催化剂。

其另一个主要原因是用数学公式来处理凝固问题。也就是说，在对铸型内晶粒生成的机理、金属熔液流动和金属熔液内的晶粒动态尚不清楚的情况下，将高纯度金属用定向凝固法，以极缓慢的速度形成光滑的液固相界面，并使液固相界面向前推进。根据如此方式凝固所得到的资料，再穿插许多假设推导出数学公式。应用这样的数学公式，似乎是能解释实际铸锭的凝固，即树枝状晶的分枝呈不规则地生长，熔液内的对流变化，晶粒的游离、上浮或沉降等，这就是原因所在。

对凝固问题，必须回过头来，从新认识。

作者根据如下实验事实：“等轴晶即粒状晶首先在金属熔液最冷的型壁面上或液面上形成，而在形成稳定凝固壳之前就已出现晶粒游离、沉积”。深深感到必须由新的观点来改变以前的凝固理论。作者完全脱离了以前的凝固理论，引进了凝固界面“过冷减小”这一新的概念，并以此来论述纯金属及合金的凝固、胞状组织、树枝晶和等轴晶的生成过程，各种偏析或铸造缺陷产生的原因，以及控制凝固组织的方法。

2. 铸造金属的宏观组织（铸锭组织）

金属溶液在铸型内凝固时，由于金属溶液中含有溶质的种类和数量、铸型的性质、大小、形状、浇注温度和浇注方法等不同，可以得到种种不同的凝固组织。图 2-1 表示用简单形状铸型浇注的铸锭的典型纵断面宏观组织示意图。

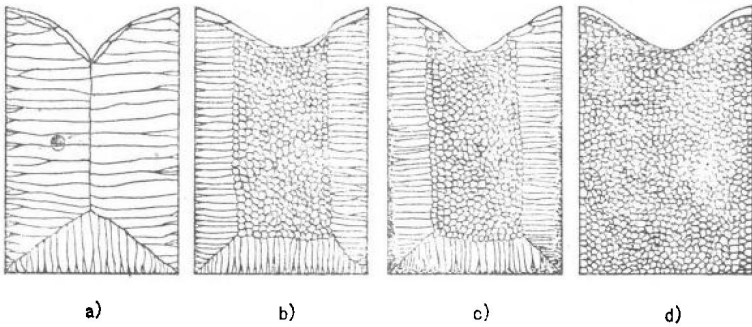


图2-1 铸锭的宏观组织示意图

图 2-1 a，主要是纯金属的凝固，或者是由高温浇入到类似金属型的激冷铸型中的合金，或者用人工方法抑制金属溶液在铸型内的对流时，所常见到的柱状组织。在其外侧可以看到形核于铸型壁上、沿杂乱方向生长的晶粒所组成的激冷层。

随着浇注温度的提高，这种杂乱排列的晶粒数量减少，不能呈现明显的结晶层，激冷时则形成更薄的结晶层，以致从宏观上不能看出。

由于柱状晶平行于热流方向生长，所以在铸锭的转角或中心部，由不同方向生长的柱状晶相遇形成晶界面。

众所周知，在这些晶界面上容易集聚气体和杂质，带有这种组织的铸锭，在以后的塑性加工过程中，往往由晶界面上产生裂

纹。因此带有发达柱状晶组织的铸锭，一般忌避把这种钢锭再进行塑性加工。

图 2-1 b 是在合金铸锭中通常所看到的典型组织，等轴晶区被柱状晶区所包围。而且往往在柱状晶区的最外层，如图 2-1 c 所示也出现细小的等轴晶，从前把这种细小的等轴晶层一直称做等轴激冷层，或简称激冷层。在图 2-1 b 和 c 的典型凝固组织中，由于所生成的等轴晶的形态的不同，在凝固过程中形成各种类型的偏析，如大型铸锭中的 V 偏析、倒 V 偏析和负偏析以及 Al-Cu 合金或 Cu-Sn 合金中的偏析，就是其最好的例子。

合金的凝固组织几乎也完全是由等轴晶组成的（如图 2-1 d 所示），而且最理想的铸锭组织就是这种类型的组织。因为这种组织的局部杂质富集要比上述类型组织的低得多，而且各个等轴晶沿杂乱方向排列，沿各方向等量生长，从宏观上看具有等向性，化学性能和物理性能方面都很均匀，是最容易进行锻造、轧制等塑性加工的铸造组织。为了解如何制取这种组织，首先说明一下液体和固体的不同点。

3. 固体和液体

为了解金属的凝固现象，首先必须知道固体和液体有什么不同。读者在听到固体和液体这个词时，立刻就会想到，固体象石头那样硬，液体象水那样可以流动。即如图 3-1 所示，固体能够抵抗来自外部的剪切力，并能自己保持其原有形状，而液体只能抵抗很小的剪切力，其外形取决于容器形状，而且可以流动。

也就是说，固体和液体最显著的不同，是抵抗来自外部剪切力的能力。如把这种能力用粘性这个词来表示，那么固体和液体间的最大差值可达到 $10^{20}\ominus$ 。由于固体和液体在构造上的不同而引起的性质上的变化，也表现在扩散性方面。例如，以铜为例，如果比较一下在凝固温度时，固体和液体的扩散速度，则可以看出，固体的扩散速度是 10^{-9} 厘米²/秒[⊖]，液体的扩散速度比固体的要大得多。

我们对固体的构造已有相当了解，而对液体的构造特别是在凝固温度附近时的液体构造还不太了解。固体的原子具有远程有序排列，原子以其晶格点阵为中心运动。但是在液体中原子呈杂乱排列。即液体原子的动能比固体原子的要大，原子运动激烈，不能使原子固定于应该规则排列的晶格点阵上。

使激烈运动的液体原子，回复到规则排列就是凝固。使激烈运动的原子按规则排列，密度也不会有很大变化。大部分金属在凝固温度时的体积变化如表 3-1 所示，约为 6% 以下。它表明靠近凝固温度的液体，具有与固体非常近似的构造，而液体的构造是由近程有序排列组成的。

⊖ A. H. Cottrell; An Introduction to Metallurgy. § 13.2 (1967), Edward Arnold Ltd London.

⊖ W. C. Winegard; An Introduction to the Solidification of Metals (1964) 4, The Institute of Metals.