

金属热处理理论

[苏] И.И. 诺维柯夫 著

机械工业出版社

本书原著系苏联非铁和稀有金属专业物理冶金学课程的教材。内容包括：退火、淬火、回火、时效、化学热处理和形变热处理理论。本书系统性强，并利用X射线分析和电子显微分析，对材料的微观结构变化以及所引起的性能变化作了科学的解释。本书可作为工科院校机械系、冶金系的教本，也可供有关科技人员参考。

Theory of Heat Treatment of Metals

I. Novikov

First Published 1978

Revised and translated from the 1974(2nd)

Russian Edition

Mir Publishers, Moscow

• • •

金属热处理理论

〔苏〕И. И. 诺维柯夫 著

王子裕 译

•

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）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•

开本 850×1168 1/32·印张 12 3/4·字数 335 千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,410·定价 3.70 元

•

统一书号：15033·6429

译者的话

本书阐述的金属热处理理论是作者在莫斯科钢铁和合金学院曾对非铁和稀有金属的物理冶金专业学生讲授的课程。

金属热处理的理论对于冶金学家和热学家来说，是一个关键性的课程。在学习本课程之前，学生应具有物理化学、晶体学、物理冶金学以及有关晶体晶格缺陷、金属机械性能和试验方法方面的科学知识。反过来，热处理的理论又构成金属热处理和物理冶金专业课（如合金钢、非铁合金及稀有金属合金等课程）的基础。

最近二十年来热处理理论发展很快。在发展过程中，它越来越多地利用了科学概念和金属物理的试验方法，特别是晶体晶格缺陷理论。其目的在于深入了解金属和合金通过热的作用所引起结构变化及性能改变的本质、机制和动力学。因此，普通金属及合金和新研制出的金属及合金的热处理过程，都在理论上研究得更为详尽了。

现在已不可能用一本书将热处理的一般理论和各种合金的热处理方法全都包括进去。因此作者将本书的第一版加以修订，删去了某些专题，如合金钢、铝、钛和铜合金的热处理等章节。那些内容在另一课程中论述较为合适。实际上，大多数工科院校早已这样做了。

本书的主要内容是分析热作用所引起的金属结构和性能的变化，着重强调再结晶、马氏体转变、固溶体析出和均匀化等。这些都是各种金属和合金热处理中常见的结构变化。

本书使用波奇瓦尔（A.A.Bochvar）院士所建议的热处理类型和经互会标准委员会所推荐的热处理术语和分类法。

本书对退火、淬火、回火和时效的过程论述较透彻，而对化学热处理、形变热处理和表面硬化注意得较少。因为后者经常在专门课程中讨论。

书末附录载有本书中谈到的某些钢种和非铁合金的成分，可供查考。

目 录

绪论	1
第一章 第一类退火	8
1.1 均匀化退火	8
1.1.1 合金的非平衡结晶	8
1.1.2 均匀化退火时合金组织的变化	14
1.1.3 均匀化退火时合金性能的变化	23
1.1.4 加热温度高于非平衡固相线的均匀化退火	25
1.2 再结晶退火与预再结晶退火	29
1.2.1 金属冷塑性加工时组织的变化	29
1.2.2 金属冷塑性加工时性能的变化	33
1.2.3 预再结晶退火时组织结构的变化	36
1.2.4 一次再结晶	44
1.2.5 晶粒长大	58
1.2.6 一次再结晶织构与晶粒长大	63
1.2.7 二次再结晶	68
1.2.8 退火金属中的再结晶晶粒尺寸	74
1.2.9 预再结晶退火与再结晶退火时金属性能的变化	84
1.2.10 退火金属中的各向异性	94
1.2.11 预再结晶与再结晶退火的选择条件	99
1.3 消除应力退火	103
1.3.1 残余应力的出现与作用	103
1.3.2 降低残余应力退火	107
第二章 第二类退火	113
2.1 固态相变的一般定律	115
2.1.1 相变热力学	115
2.1.2 相变中界面结构的作用	124
2.1.3 相的均匀和非均匀成核	127
2.1.4 中间亚稳定相的形成	134
2.1.5 相变动力学	137

2.2 钢的退火	144
2.2.1 加热时奥氏体的形成	144
2.2.2 冷却时奥氏体的扩散转变	152
2.2.3 钢退火的类型	162
2.3 铸铁的退火	173
2.3.1 石墨化退火	174
2.3.2 铸铁的正火	181
2.4 非铁金属与合金的退火	182
2.4.1 非均匀化退火	183
2.4.2 相变退火	187
第三章 淬火	189
3.1 无晶型转变淬火	189
3.1.1 无晶型转变淬火时性能的变化	190
3.1.2 无晶型转变淬火时的加热与冷却	192
3.2 有晶型转变淬火	200
3.2.1 碳钢的马氏体转变	200
3.2.2 马氏体转变热力学	203
3.2.3 马氏体转变机制	212
3.2.4 马氏体硬化合金的显微组织和亚结构	222
3.2.5 马氏体转变动力学	230
3.2.6 马氏体硬化时合金性能的变化	241
3.2.7 贝氏体转变	245
3.2.8 钢的淬透性	255
3.2.9 钢淬火时的加热和冷却	262
第四章 时效与回火	274
4.1 时效	274
4.1.1 固溶体的沉淀析出热力学	277
4.1.2 时效时组织的变化	282
4.1.3 时效时合金性能的变化	312
4.1.4 合金成分对时效的影响	321
4.1.5 时效条件的选择	326
4.1.6 时效硬化合金的逆变	332

4.2 回火	334
4.2.1 回火钢的组织变化	335
4.2.2 回火钢机械性能的变化与回火条件的选择	345
第五章 化学热处理与形变热处理	355
5.1 化学热处理	355
5.1.1 化学热处理时金属成分和组织的变化	355
5.1.2 化学热处理的种类	367
5.2 形变热处理	376
5.2.1 时效合金的形变热处理	377
5.2.2 马氏体钢的形变热处理	387
附录：本书中所述钢和非铁合金的成分	395
本书常用换算因子	398

绪 论

热处理是一种使金属或合金产品通过热作用改变其内部组织结构的过程，用以使产品达到人们所要求的性能。

热处理可与化学处理、形变加工和磁场作用等联合起来进行。

热处理已广泛应用于现代工艺中，以改善金属和合金的性能。在冶金企业和机械工厂内，它是半成品和机器零件制造的主要手段之一。热处理作为中间工序，能改进工件的某些加工性能（如锻造性、车削性等）；若作为最后操作，它能赋予金属和合金以所需的机械、物理和化学等综合性能，保证产品符合规定的质量要求。

热处理理论是物理冶金学的一部分。物理冶金学研究的主要课题之一，是金属和合金的结构与性能的关系。加热和冷却金属，能改变金属的结构，从而改变它的机械、物理和化学特性，并影响金属在加工和使用中的性能。

热处理理论研究金属和合金在热作用下所导致的结构和性能的改变，在热因素停止作用时，这些改变不随之消失。

在影响结构变化的深度和多样性方面，热处理较机械加工或其它处理更为有效。

历史简述

古代人类就使用了热处理。从考古发掘所得的资料可以看出，当时的热处理方法及这些方法出现的时间。

从石器时代进入青铜时代的时候（新石器时代）第一次出现了人造金属器物。它们是用石斧锤击自然金或自然铜而制成的。后来用矿石熔炼出的铜制造器物。

当冷锻时，原始人类遇到形变硬化现象，难以制作薄刀和尖锐箭头。为了使金属再次变软，工匠不得不将冷锻铜放到炉膛加

热。这个方法就是再结晶退火。可靠的证据表明，最早使用这种方法的年代可追溯到公元前四千多年。在南土库曼新石器文化遗迹中，发现熔炼铜锻造而成的工具（如刀等）。再结晶退火是恢复锻造铜片的塑性不可缺少的步骤。以后这种方法用于青铜。在公元前一千多年（青铜时代），经这种处理的青铜片大量用于制作盘碟。

因此，再结晶退火是人类使用得最早的一种热处理方法，它在公元前四千多年就出现了。

淬火出现的时间要晚得多。铁的冶金生产开始于公元前一千多年。当时，用土法吹炼炉直接从矿石制得熟铁。这种铁制武器不能用淬火来硬化，因为它的碳含量太低。在铁器使用初期，淬火是同渗碳一起进行的。古时铁匠偶然发现将坯件放到木炭火炉中加热，热锻后在水中浸淬，就能显著改进铁制武器和工具的性能。

土法熟铁在炉膛内渗碳和随后淬火的发现，是人类历史上最大的成就之一。

对于中欧哈尔希塔特文化遗留之锻制古物的冶金分析表明：铁器（刀和箭头）的渗碳和随后在水中浸淬的方法，在公元前一千多年已为人们所熟知，但是这种硬化热处理方法在当时不经常使用。

钢的硬化热处理在古希腊和罗马就为人们所熟知的事实，可在古代文学作品中找到证明。公元前八至七世纪荷马所作的叙事诗《奥德赛》第九卷中写道：“铁匠把灼热的斧头浸入冷水里，就有狂暴的嘶嘶声响，这实际是一种淬火加回火，它增加了铁的强度……”。亚里斯多德曾经指出：最好的钢能用炉膛多次加热而获得。这种热处理使铁表面增碳，保证淬火后有较高的强度和硬度。他还提到油的油淬。老普林尼（一世纪）曾写过：薄的钢件必须在油中淬火，以防翘曲和开裂。

对欧洲考古发掘实物的冶金分析表明：钢件（渗碳铁）的淬火在公元前四、五世纪就已普遍使用。

铜合金的淬火在公元前就已为人们所知。公元前四、五世纪意大利西北部Etruscan人和公元前四至二世纪伏尔加河 Sarmatian人铸造的高锡青铜镜的现代研究表明：这些物件曾进行过水淬，有马氏体强化，很可能是为了改进抛光后的光泽。

在中世纪有许多种热处理工艺开始使用，如液体淬火；空气喷射硬化；刀片的局部硬化；低温、中温和高温回火等。

对考古发现的数百件俄罗斯古物进行了显微组织研究、X射线分析和显微硬度测定，结果表明：十分之九的工具和武器经过热处理，其中三分之一曾经过淬火，余下的三分之二经过淬火和回火处理。在木炭和有机物中渗碳的方法已广泛用于硬化刀、剑、矛、锉、锯和其它工具。

切割工具和冲刺武器的热处理工艺，在中世纪已有高度发展。例如，著名的大马士革钢刀具有优良的切割和弹性性能。这是由于熔炼、锻造和热处理加工中精心制作的结果。

由于不知道金属内部转变的实质，中世纪工匠把热处理后金属的高性能，用超自然力来解释。钢（尤其是用作武器的钢）的热处理方法，在中世纪文献中有详细的描述。尽管有某些非实质性的细节和迷信色彩，但大多数中世纪文献从近代热学家的立足点来看，还是正确的。

虽然热处理从遥远的古代就已经是一种常用的加工工艺，但是它发展成为一门科学，却还只是在十九世纪中叶才开始。那时，人们的热处理知识已根据许多世纪以来的经验，编制成大批的施工诀窍。这些诀窍往往很有价值，世代相传，甚至有的中途失传而又被后人再次研究出来。然而，金属在热处理过程中的本质仍然是一个秘密。

十九世纪的工业发展，促使热处理从技艺转变成科学。

在十九世纪中期，陆军和海军企图用强度和威力较大的钢制枪炮来代替青铜和铸铁枪炮。钢制枪炮筒身的大量制造开始于1850年。在这个时期，高强度钢制枪炮筒身的可靠性问题急待解决。当时著名的冶金学家们，特别是鄂布霍夫(P.M.Obukhov)，

虽然熟知熔炼和浇铸钢，但是在实际射击中钢制枪炮筒身的爆炸仍经常发生。

1866年普奥战争时，克鲁普厂制造的许多枪炮筒身发生爆炸，而原因不明。因此作为枪炮筒身材料，钢不被信用，而又开始转回用青铜。

1866年契尔诺夫 (D.K.Chernov, 1839~1921) 被请到彼得堡鄂布霍夫钢厂当锻工车间技术员。1868年契尔诺夫在俄国工程学会提出有名的报告：“对于拉夫洛夫先生及卡拉库次基先生所写的《钢及钢制枪炮》论文的评论及契尔诺夫对同一题目的研究”。在这个报告中，他提出自己对钢锻件破裂原因研究的结论。通过用显微镜观察枪炮筒身的显微截面，同时用放大镜研究筒身断裂面结构，契尔诺夫得出结论：钢的结构愈细，它的强度就愈高。他于是开始研究在钢中形成细粒结构的原因。在各种温度下铸造钢件的对比研究表明：“钢结构的变动应归因于温度影响，而不是机械处理本身”。在这以后，对每种有一定碳含量的钢种，确定其结构发生变化的温度，就显得十分重要了。契尔诺夫提出一个光辉的学说，这就是：钢件加热烧红到两个不同颜色的温度，但冷却后，表面很难看到有什么变化。钢性能的差别应归因于钢件内部组织的改变。契尔诺夫用肉眼估计这两个温度，并用温度 a 和温度 b 来标志它们。“一块钢（不论是中碳钢，还是高碳钢），若加热温度低于 a 点，那么不管它冷却得多快，都不能硬化”。要形成细晶粒截面，钢的加热温度必须稍高于 b 点。

这样，在1868年契尔诺夫发现钢内部组织的转变，并且把这些转变与锻造加热条件及热处理技术联系起来。从而这位著名的俄国冶金学者奠定了热处理科学理论的基础。

契尔诺夫的重要报告被译为各种文字。他在钢热处理方面的建议，很快地在许多国家中实现。契尔诺夫在物理冶金和热处理方面所作的工作被普遍承认。美国著名冶金学者索维尔 (A. Sauveur) 曾写信给契尔诺夫说：“你所创立的钢热处理理论是一杰作，而你的追随者对你的基本概念所能添加的是微乎其微”。法

国的波蒂文 (A. Portevin) 对契尔诺夫的活动表达如下: “契尔诺夫是新学派的先驱者和首领。他的早期工作可视为后来炼钢领域惊人进步的基础, 是从实践过渡到科学的一场大革命。”

1886年法国工程师奥斯蒙德 (F. Osmond, 1849~1912) 使用卡特莱尔 (Le-Chatelier) 热电偶进行热分析, 确定钢的临界点。奥斯蒙德的工作证实和发展了契尔诺夫的结论, 从而引起许多冶金学家和化学家对金属内部组织变化的兴趣, 给这个领域广泛试验研究添加了动力。

在十九世纪末和本世纪初的物理冶金学发展中, 多相平衡的热力学理论广泛地应用到金属系统。许多国家已开始系统地描绘合金状态图的工作。这些状态图显示出合金中可能的相变, 因此为各种主要热处理的分析提供了原始数据。

在非铁合金领域中第一次大量的热处理研究工作, 是在本世纪初完成的。1900年巴依可夫 (A. A. Baikov, 1870~1946) 在讨论铜铈合金时曾经指出: 不仅钢的硬化能力是内在的 (这一点已为人们所公认), 而且非铁合金也是这样。1903年德国批准了用加热和淬火的方法改进铝合金性能的第一个专利。采用淬火, 铜铝合金铸件的极限强度能提高1.5倍。

1906年德国工程师威耳姆 (A. Wilm, 1869~1937) 发明了硬铝, 并发现硬铝在淬火后的时效现象。目前, 时效已成为硬化合金的主要方法。1919年美国梅里卡 (P. Merica, 1889~1957) 采用在过饱和固溶体中弥散析出物的形成, 来说明硬铝时效的本性。这是热处理理论方面的最大成就之一: 用标有固态组元变动溶解度的组成图, 就有可能预示有析出硬化能力的合金成分范围。

1920年以后热处理理论的进步, 表现在利用多种物理方法 (主要是X射线结构分析) 来研究固态中结构转变的本质、机制和动力学。在二、三十年间, 取得了温度对金属及合金结构和性能影响规律的大量资料。五十年代末, 衍射电子显微镜广泛应用于热处理亚结构变化的研究上。

在现阶段, 热处理理论广泛地利用金属中晶体晶格缺陷的理

论，因为这些缺陷对结构变化的机制和规律有着强烈的、有时甚至是决定性的影响。

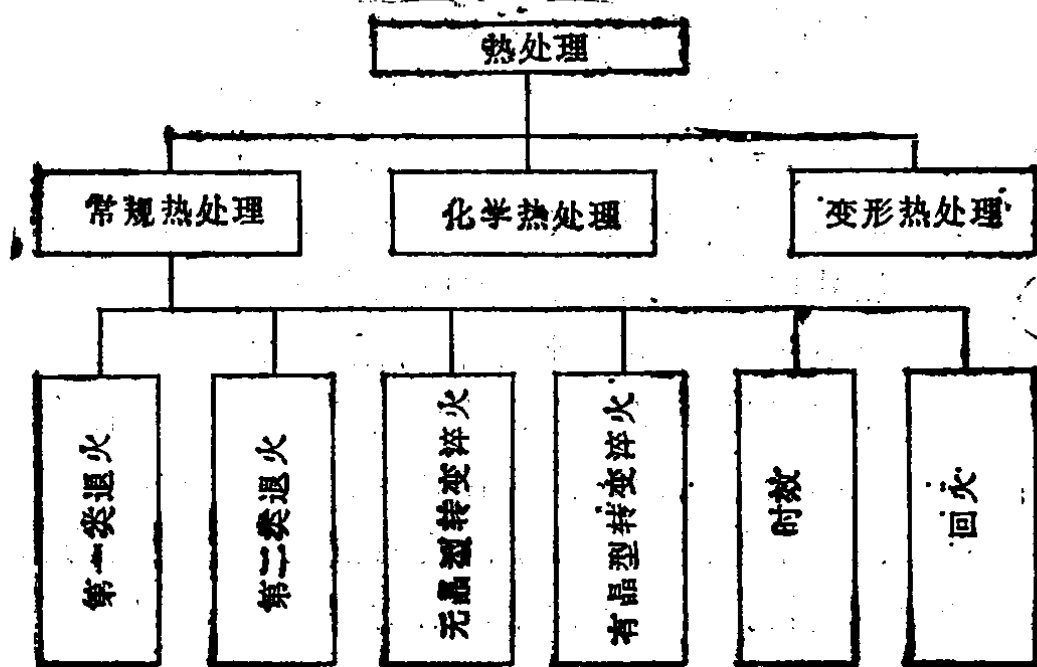
热处理工艺随着理论的发展而进步，改进了常规方法，也找到了新方法，如形变热处理等。新的可硬化合金也有所发展。

大量的金属物理理论研究产生了相应的热处理理论；而热处理理论又为发展热处理新工艺和预定新合金性能奠定了科学基础。

热处理的分类

任何热处理过程都可用曲线来表示温度随时间的变化。这种曲线能用以决定加热温度、加热和冷却所需时间、加热和冷却的平均速度和实际速度、在给定温度下的保持时间和生产周期的总时间。但是曲线的形状不能说明我们采取的热处理种类。热处理的种类是由金属中出现的相和组织结构的变化来决定的，而不取决于时间-温度曲线的形状。据此观点，波奇瓦尔已制定出一种分类法，其中包括铁、非铁金属和合金的各种类型的热处理。

以波奇瓦尔的分类法为基础，经互会的标准委员会已制订出热处理的新分类法和适当的术语。这种分类法示于下图。



金属和合金热处理主要类型

热处理的主要类型如下：第一和第二类型退火、无晶型转变淬火、有晶型转变淬火、时效和回火。所有这些工艺过程都可用于钢、非铁金属和合金。每种加工过程又可按被加工的特殊基体合金再进一步分类。化学热处理和形变热处理的分类将在相应的章节中讨论。

某些热处理现象可视为其它制造过程（如热塑性加工、铸造、焊接等）的从属过程。例如，铸件的快速冷却凝固能引起其全部或部分硬化。研磨时表面过热能使金属回火。焊接时，在焊缝热影响区域可能出现再结晶退火。这些从属的热处理过程有时有利，有时有害（即引起金属组织结构和性能不必要的变化）。

有些热处理工艺在历史上早已有了专门名称。这些名称往往只反映外部特征，而不表示金属和合金内部实际发生的相变本质。这就是为什么同样一个工艺名词却对应于几个物理性能差异很大的热处理类别的原因。例如退火一般被认为是加热到一定温度，再在该温度保持一段时间，然后缓慢冷却的一个过程。但是这种热处理方式，对于冷轧铜，将引起再结晶和晶粒粗化；而对于铸造碳钢却引起相再结晶和晶粒细化。金属加热到高于临界点，在此温度保持一定时间，并在空气中冷却，通常称为正火。碳钢经过这样的处理，会产生属于第二类型退火的相转变。对于合金化程度高的钢，这样的处理能形成马氏体，即产生晶型转变，使钢硬化。而在有些非铁合金中，这种处理实际上是无晶型转变淬火。

这种例子很多，因此当工业上某些名词对有关过程的物理本质表达不清楚时，就应该用热处理科学分类法所确认的适当术语来取代。

参 考 文 献

- Chernov D. K. and the Science of Metals (*D. K. Chernov i nauka o metallakh*). Ed. by N. T. Gudtsov. Moscow, Metallurgizdat, 1950, 563 pp., ill.
 Bochvar A. A., Principles of Heat Treatment of Alloys (*Osnovy termicheskoi obrabotki splavov*). Moscow, Metallurgizdat, 1940, 298 pp., ill.

第一章 第一类退火

铸造、塑性加工、焊接和其它制造过程，可能引起金属和合金内部组织结构的某种不平衡变化。这种变化可用第一类型退火来部分或全部消除。退火过程将促使金属和合金接近平衡状态。第一类型退火按变化消除的情况，可再分为均匀化、预再结晶软化、预再结晶强化、再结晶退火和消除应力退火五类。消除非平衡变化的过程会自发地发生。第一类退火的加热只是为了加速变化而已。

第一类退火的主要参数为加热温度和在此温度下的保持时间，加热速度和冷却速度的作用是次要的。

第一类型退火与第二类型退火不同，第一类型退火没有固态相变。

1.1 均匀化退火

均匀化退火常用于消除铸件的树枝状偏析，较少用于形变合金。

1.1.1 合金的非平衡结晶

假如成分为X(图1-1)的熔融合金有些过冷，则成分相当于点a的固溶体晶体就在熔融合金中首先形成。在结晶温度范围内进一步冷却，这些晶体就会长大。此后任何温度下一系列结晶层次的成分，都可由平衡固相线上的相

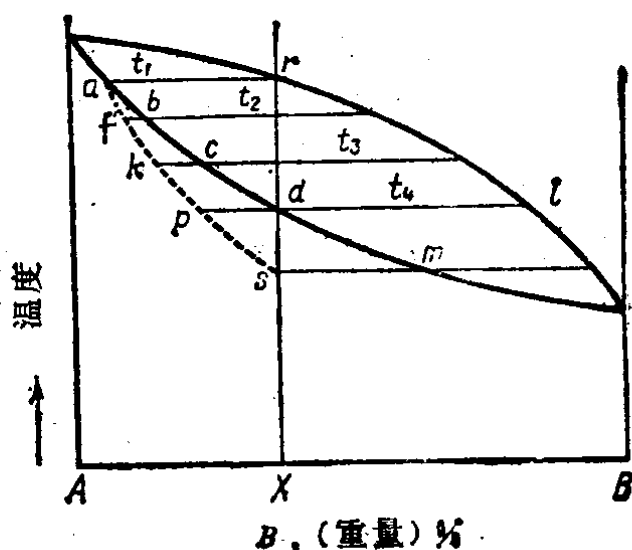


图1-1 非平衡结晶固溶体平均成分的变动 (曲线as)

应点来确定。例如在温度 t_1 为 a 点，在温度 t_2 为 b 点。因此，随着温度的降低，形成的晶体层含有低熔点组元的成分将更多一些。在平衡状态下，在结晶区间的任一温度，固相线上的一个点将决定整个固溶体的成分，而不仅是晶体表面层的成分。例如在温度 t_2 ，固溶体晶体将全部具有相当于 b 点的成分。为了达到这种最终状态，在早期结晶层和后期结晶层之间须发生均匀扩散。但是仅有这种扩散不足以使固相到达平衡。例如一个核心成分由 a 点决定而表面成分由 b 点决定的晶体，在温度 t_2 下均匀扩散，終了时将具有在 b 点左侧的中间成分。

除了均匀扩散外，在固相中还将发生熔融金属和晶体之间的相间作用。组元 B 从熔融金属中转移到固溶体，从而使整个固相成分相当于固相线上的 b 点。

在连续降温的实际结晶情况下，固相中均匀扩散没有时间充分进行。固溶体的非均匀成分组成可以用平均浓度来表达，它在固相线的左侧（图1-1）。例如，在温度 t_2 ，固相的平均成分可由 f 点来决定。在温度 t_3 ，晶体表面层成分由 c 点决定，而整个固相的平均成分应该在 f 和 c 之间的某点，所以在温度 t_3 固相的平均成分可用 k 点来决定。一条通过点 a 、 f 和 k 的曲线说明了在一定冷却速度下非均匀固溶体平均成分的变动情况。

当固溶体的平均成分变得和熔融金属的成分一样时，固溶体的结晶过程就终止了。例如在温度 t_4 ，合金 X 的平衡结晶过程终止于 d 点。在非平衡情况下，这个温度的固溶体平均成分在 p 点，与熔融合金的成分不同。 pd/pl 之比表示在温度 t_4 非平衡液相的相对重量。在温度低于 t_4 时，非平衡结晶过程将继续进行，直到固相的平均成分和 d 点的合金成分相同为止。此刻，晶体表面层将具有 m 点的成分。假如固相中的扩散完全被抑制，则结晶过程将在组元 B 的熔点终止。

在一定的冷却速度下（也就是在一定程度的扩散过程下），任何合金的结晶都可用各自的固溶体平均成分变动曲线来表示；也可用相应的非平衡固相线的固有温度来表示（图1-2）。曲线

$A'bdkB'$ 连接着一个系统所有合金结晶过程的终点，它被称为这个系统的非平衡固相线。

平衡和非平衡固相线不仅在量的方面不同（具有不同的温度点），而且在基本性质方面也不同。平衡固相线具有两个涵义：第一，它是合金结晶过程终了温度点的轨迹；第二，同时它也是在结晶温度范围内固相与液相平衡成分点的轨迹。然而，非平衡固相线却只是在特殊冷却速度下合金结晶过程完成点的轨迹。因此，系统中的非平衡固相线不能用以决定与液相共存之固溶体的平均成分（实用中有时错误地使用了这种方法）。

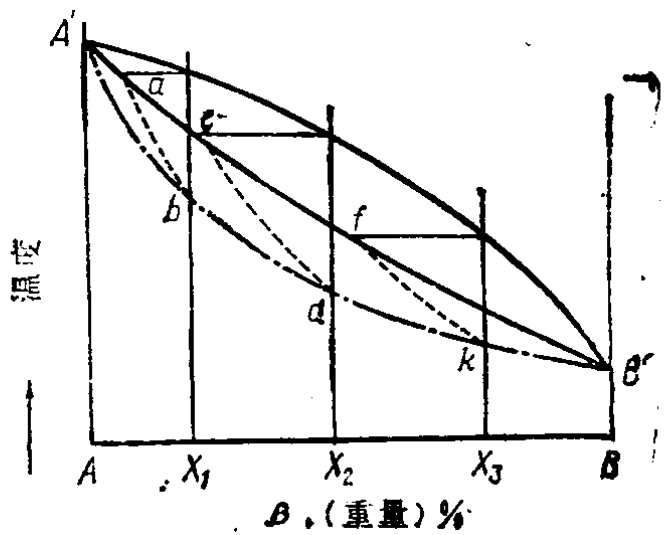


图1-2 一个系统形成连续系列固溶体的非平衡固相线
 ab 、 cd 和 fk ——分别为合金 X_1X_2 和 X_3 的非平衡结晶过程固溶体平均成分变动线
 $A'bdkB'$ ——非平衡固相线
 $A'acfB'$ ——平衡固相线

非平衡固溶体结晶过程产生的晶体，其成分在截面上有变动。固溶体晶体经常长大成树枝晶。在高温形成的树枝晶分枝中富集了高熔点的组元，而在较低温度形成的分枝和中间空间则富集低熔点的组元。在一个晶体中，这些部分的耐腐蚀能力不同，从而腐蚀显微截面可以显示晶粒中的不均匀成分（图1-3 a）。在固溶体晶体中产生非均匀成分的这一过程，在物理冶金学课程中叫做晶内偏析或树枝状偏析。

共晶和包晶系统同形成连续系列固溶体的合金相比，它们的树枝状偏析引起结构的非平衡变化更为显著(图1-4)。在低合金熔体中（如图1-4 a 和图1-4 b 中的 X_1 ），非平衡结晶过程进行得同连续系列的固溶体一样。由于固相中的有限扩散，合金 X_1 的凝固在 c 点完成，也就是固溶体的平衡成分与合金的成分相同。