

高等学校試用教科書

鑄造合金原理

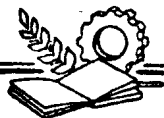
南京工学院鑄冶教研組編

內部教材



中国工业出版社

高等学校試用教科書



鑄造合金原理

南京工学院鑄冶教研組編

中国工业出版社

本书是按照高等工业学校鑄工专业的教学计划和教学大纲编写的。内容主要包括液态金属结构及性质，鑄件形成理论基础和合金鑄造性能三大部分。本书对合金鑄造性能，如流动性、收缩、内应力等都做了比较详尽的叙述。对鑄件中常见的某些缺陷，如气孔、偏析、缩孔和裂缝等也在形成机理和影响因素方面做了比较全面的分析并提出了防止的方法。在选材方面注意到理论与实际的结合，并尽量介绍了一些国内外最新成就。

本书可作为高等工业学校试用教科书，也可供鑄造工程技术人员参考。

鑄造合金原理

南京工学院鑄冶教研组編

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10 \frac{1}{8}$ · 字数 234,000

1961年7月北京第一版·1961年7月北京第一次印刷

印数 0,001—3,333 · 定价(10-6) 1.25 元

統一书号: 15165 · 303(一机-35)

前 言

这本书是根据南京工学院鑄工专业鑄造合金原理一課的讲义并在教学革命和教学檢查过程中吸取了师生的改进意見修改补充以后写成的。由于近年来鑄造科学技术发展很快，有关鑄造合金理論也日益充实提高，为了让学生获得的知識范围能基本上与現代科学技术发展相适应，曾增添了一些新内容。

鑄造生产实践虽然已有几千年的丰富經驗，但在系統理論的創立方面，还只能說是刚开始。因此，在鑄造合金原理中，对于許多現象的解釋及原理的闡述各方面还存在相当分歧的意見，有待于进一步討論，希望使用者能以分析批判的态度来进行讲解和学习，并把意見随时告訴我們，使本书能进一步得到充实和提高。

鑄造合金原理是鑄鋼、鑄鐵和有色金屬合金熔炼等課程的基础理論課。因此，本书着重說明各种合金的液态金屬性质，鑄造合金結晶过程，鑄件凝固原理，各种鑄造性能以及某些鑄造缺陷的一般規律和共性問題。在做理論叙述时，为了力求联系实际，也举某些合金做为实例。但考虑到避免与以后課程重复，故例举的面較广。我們认为这样做对于本課有关理論的理解以及对以后課程的学习都是有利的。

讲授本課的时间共50学时，其中实验課8学时，課堂讲授42学时。我們建議在讲授本課时，安排一至二次現場教学，結合課堂討論讲解和分析某些鑄造缺陷，如气孔、縮孔、裂縫、撓曲变形等的形成原因和防止方法。这样可以帮助同学对本門課程做比較全面深入的理解并初步培养同学研究解决实际問題的能力。

由于我們知識水平和教学經驗都很不够，本书付印時間又比較仓促，故书中缺点和錯誤在所难免，我們衷心希望讀者給本书提出批評和意見。

本书由舒光冀同志执笔編写并經鑄冶教研組鑄造合金小組集体审閱。

南京工学院鑄冶教研組

一九六一年四月

目次

前言	3	6-2-2 气体在金属中的溶解度	81
第一章 概论	5	6-2-3 金属中气体的析出	82
1-1 铸造合金及熔炼对铸造生产的意义	5	6-2-4 金属表面氧化膜	83
1-2 对铸造合金的要求	5	第三节 气孔	84
1-3 应用于机器制造的铸造合金	6	6-3-1 气孔形成的机理	84
第二章 液态金属	7	6-3-2 铸件中气孔的各种形式	86
第一节 基本概念	7	6-3-3 防止铸件中产生气孔的方法	89
2-1-1 金属的热膨胀	7	第四节 非金属夹杂物	91
2-1-2 金属的熔化	11	6-4-1 基本概念	91
2-1-3 液态金属结构	13	6-4-2 铸件中非金属夹杂物的来源	91
第二节 液态金属性质	15	6-4-3 各种铸造合金中的基本非金属夹杂物	93
2-2-1 液态金属的基本物理性质	15	6-4-4 非金属夹杂物对铸件质量的影响	94
2-2-2 液态金属及合金的粘性	17	6-4-5 消除液态金属中非金属夹杂物的方法	95
2-2-3 液态金属及合金的表面张力	22	第七章 铸造合金的收缩	97
2-2-4 液态金属的蒸汽压	25	第一节 基本概念	97
第三章 铸件形成的理论基础	27	7-1-1 概说	97
第一节 铸造合金的结晶化	27	7-1-2 金属凝固及冷却过程中体积的改变	97
3-1-1 晶核的形成和结晶能力	27	7-1-3 铸件在铸型中的收缩	103
3-1-2 结晶的生长和继生长速度	32	7-1-4 合金收缩对铸件质量的影响	105
3-1-3 结晶能力与继生长速度对晶粒粗细的影响	35	7-1-5 测定金属体积收缩和线收缩的方法	105
第二节 铸造合金在铸型中的凝固	36	第二节 缩孔和缩松的形成	108
3-2-1 合金在铸型中的凝固次序	36	7-2-1 概说	108
3-2-2 金属在铸型内的凝固时间	40	7-2-2 铸件中缩孔的形成	110
3-2-3 研究铸件凝固过程的试验方法	42	7-2-3 缩孔的容积	112
3-2-4 铸件的初晶组织及其对铸件质量的影响	43	7-2-4 缩孔位置的确定	114
第四章 铸造合金的流动性	43	7-2-5 缩松的形成	117
第一节 基本概念	43	7-2-6 微缩孔的形成	117
4-1-1 铸造合金流动性的意义及其对铸件质量的影响	43	7-2-7 集中缩孔和微缩孔的分配	120
4-1-2 测定合金流动性的方法	47	第三节 防止铸件中产生缩孔和缩松的方法	121
第二节 影响铸造合金流动性的因素	53	7-3-1 概说	121
4-2-1 金属性质对流动性的影响	54	7-3-2 铸件凝固方向的控制	121
4-2-2 造型工艺特点对流动性的影响	59	7-3-3 冒口尺寸的确定	123
4-2-3 浇注条件的影响	60	7-3-4 补缩条件	125
4-2-4 提高合金流动性的工艺方法	61	第八章 铸造应力和裂纹	131
第五章 偏析	63	第一节 热裂	131
第一节 概说	63	8-1-1 热裂的意义及其对铸件质量的影响	131
5-1-1 关于偏析的基本概念	63	8-1-2 热裂形成的温度范围及形成机理	131
5-1-2 偏析的几种形式	63	8-1-3 热裂的试验研究方法	136
5-1-3 偏析对铸件质量的影响	64	8-1-4 影响热裂形成的因素	139
第二节 各种偏析的形成机理及防止方法	65	8-1-5 防止铸件中产生热裂的方法	141
5-2-1 晶内偏析	65	第二节 铸造应力	144
5-2-2 区域偏析	66	8-2-1 铸造应力的意义及其对铸件质量的影响	144
5-2-3 比重偏析	70	8-2-2 铸件在冷却过程中所产生的热应力	145
第六章 铸件中的气体和非金属夹杂物	72	8-2-3 铸件在冷却过程中所产生的相变应力	150
第一节 铸件中的气体	72	8-2-4 铸件在冷却过程中产生的收缩应力	151
6-1-1 铸件中气体的来源	72	8-2-5 测定内应力的方法	152
6-1-2 铸件中气体存在的形态	74	8-2-6 防止铸件中产生内应力及消除铸件中残留应力的方法	155
6-1-3 气体对铸件质量的影响	75	第三节 冷裂和挠曲	157
6-1-4 测定金属中气体含量的方法	76	8-3-1 铸件的挠曲	157
第二节 金属中气体的吸收和析出	79	8-3-2 冷裂	157
6-2-1 金属吸收气体的过程	79	8-3-3 防止铸件产生挠曲和冷裂的方法	159
		参考文献	162

第一章 概 論

1-1 鑄造合金及熔煉對鑄造生產的意義

金屬及合金，目前被廣泛地應用於日常生活中，離開它就不可能進行現代化生產和發展科學。幾乎所有機器和很多日常生活用品都採用金屬或合金。它們之所以能獲得這樣廣泛的應用，是因為它們具有特殊的物理、化學和機械方面的性能，可以用各種方法獲得在質量上滿足人們要求的制品並有較長的使用壽命。自然界中，許多金屬都有豐富的蘊藏量，而且金屬制品用壞以後，一般都可以重熔再用。因此，金屬及合金乃成為人們生產和生活不可缺少的材料。

用金屬製造鑄件作為機器零件或日常生活用品，有其不可代替的優越性，如可以用最迅速而低廉的方法來製造，可以獲得形狀非常複雜的零件，加工裕量可以大大減少，金屬廢料（澆口、冒口等）很容易再度利用等等。

鑄造合金的選擇和熔煉工藝是鑄造生產中一個非常重要的過程。為了保證鑄件有一定的物理、化學和機械性能，以及為了保證液態金屬能夠充滿鑄型，製出完好的鑄件，除去造型和澆注工藝以外，必須正確的選擇合金及控制熔煉過程，否則就會使鑄件容易產生缺陷或性能不符合要求。

鑄造合金的熔煉工藝，也是鑄造生產過程中比較複雜的一道工序，它包括著金屬的狀態改變（固體→液體）和複雜的物理化學反應（如金屬、熔渣、氣體之間的反應）以及熱交換過程。只有掌握了這些變化的規律，制訂正確的工藝規程，才能得到優質鑄件。

熔煉所需要的設備（如熔爐、鼓風機、裝料機構、運輸設備等）和所用材料類型比較多（以鑄鐵為例：要生鐵、焦炭、石灰石……等），熔煉時材料消耗比較大，而且金屬融液的質量往往影響著成批鑄件的質量，所以這一過程對鑄件成本的影响很大。

在選擇合金種類、成分及制訂熔煉工藝過程時，還要充分考慮本國以至本地區的資源條件。只有這樣，才能使鑄造生產得到迅速的發展。如我國目前為了更合理地使用有色金屬或其他貴重金屬，就應該盡量選擇代用品。各個地區所煉生鐵由於礦石資源及設備條件不同，成分有時差別很大，就需要採用特殊的熔煉及熱處理工藝，以保證獲得優質鑄件。

總之，鑄造合金的選擇和熔煉工藝，是鑄造生產中基本過程之一，作為一個鑄造工作者來說，應該在這方面具有足夠的知識，並能不斷創造改進，以促進其發展。

1-2 對鑄造合金的要求

我們選擇鑄造合金，不只是希望它能給我們以質量合格的鑄件，而且要求它能夠有相當高的生產率和最低的成本。因此提出下面一些要求：

1. 地球上應有豐富的蘊藏量。
2. 從礦石中提煉（或金屬塊的重新熔化）工藝應較簡單，熔點尽可能低。
3. 液態有良好的流動性，可以順利地充滿鑄型。
4. 盡量使鑄件中少產生氣孔、夾雜、偏析、裂紋等缺陷，以獲得完善的鑄件。

5. 具有符合要求的物理、化学和机械性能。

6. 在选择鑄造合金时，还要考虑鑄件的制造成本和地区资源条件，应该尽量少采用价貴而不易获得的合金。

一般情况下，鑄造合金的选择，是設計工程师根据某些性能的要求加以确定的，但鑄造工作者也可以根据多快好省的原则，提出自己的意見，而且可以創造新的合金材料，或通过改进熔炼和热处理工艺来提高某特定材料的性能，建議設計工程师加以采用。

鑄造性能严重地影响着合金和鑄件的质量，而所謂鑄造性能，其内容随着鑄造生产科学技术的发展而不断丰富。这些后面将加以說明。

1-3 应用于机器制造的鑄造合金

用于制造成形鑄件的鑄造合金，一般可以分为六組。

一、碳素鋼及合金鋼：除去应用得最多的碳素鋼以外，合金鋼也应用日广，但对于一般結構鋼鑄件而言，常用低合金鋼，一些有特殊用途的零件則用高合金鋼（如高錳鋼、18-8 鎳鉻鋼等）。低合金鋼的鑄造工艺一般与碳素鋼差別不大，高合金鋼則比較复杂。

二、鑄鉄：具有片状及球状石墨的灰鑄鉄、可鍛鑄鉄、馬口鉄、白口鑄鉄和合金鑄鉄。馬口鉄很少直接用来制造鑄件；合金鑄鉄有低合金及高合金鑄鉄，前者主要做为結構材料，后者則用来做有特殊要求的构件，如要求耐热、耐蝕、防磁等等。

三、銅合金：有青銅及黃銅。青銅中除錫青銅外，还有所謂无錫青銅，主要是銅与其他元素的合金，如硅青銅、鋁青銅、鎳青銅、鉍青銅……等。黃銅主要是 Cu-Zn 合金，此外还有所謂特殊黃銅如硅黃銅、錳黃銅、鉛黃銅、鋁黃銅等等。銅合金一般称为重有色金属合金。

四、鋁合金：鑄造用的鋁合金，主要有 Al-Si 合金（含 Si>5%）、Al-Cu 合金（含 Cu>5%）、Al-Si-Cu 合金（Si<6%，Cu<8%）、Al-Mg 合金（Mg>5%）及其他含多种元素的复杂鋁合金。鋁合金鑄件广泛用于航空工业，在其他机器制造工业部門有时也加以采用。

五、鎂合金：鑄造用的鎂合金主要有 Mg-Si 合金（Si 1~1.5%）、Mg-Mn（Mn 1~2%）及 Mg-Al-Zn 合金（Al 2.5~11%，Zn 0.5~2.0%，Mn 0.10~0.50%）。鋁合金和鎂合金都称为輕金屬合金，而其中鎂合金是工业用合金中最輕的一种，主要应用于航空工业。

六、錫基、鉛基及鋅基合金：这些合金主要用以制造成形鑄件和軸承。

以上六組合金中，鑄造上应用最多的是鉄碳合金（鋼、鑄鉄）。其主要原因是：鉄在地球上蘊藏量較多（占金屬中的第二位），从天然矿石中提取鉄比較容易，可以利用比較简单的方法使鉄合金的性质在較广泛的範圍內变动，例如在鉄碳合金中加入一些合金元素、进行孕育处理或通过热处理等等，都会使机械性能有很大改变，有些还会大大改变其物理化学性能（如防蝕、防磁等）。

根据历史記載，这些合金中，应用得最早的是銅合金。我国远在 4000 年以前就已经能制造出精美的青銅鑄件，鑄鉄件的生产也比欧洲国家要早得多。

第二章 液态金属

第一节 基本概念

铸造生产过程主要是将熔化了了的金属浇入特定的铸型以后，经凝固，冷却而得成形铸件的过程。铸件质量与液态金属结构和性质有很密切的关系。因此，我们在讨论合金铸造性能和铸件形成过程以前，必须对液态金属的微观和宏观结构以及有关物理性质有一个基本的了解。

铸造合金的熔炼，在大多数情况下，是将固态金属原料，在一定熔炉中，按一定配合比例，加热熔化。因此，对于金属及合金本身来说，往往要经历加热、熔化、过热、凝固及冷却等等阶段。金属的结构在各阶段中都要发生很大的变化。其中加热熔化对于液态金属结构和性质都有直接的关系。

2-1.1 金属的热膨胀

金属的原子结构和其他非金属一样，是由荷正电的原子核与环绕其周围的负电子所组成的。原子核外围的电子分成若干层，各层电子沿一定轨道，环绕原子核做不间断的运动。最外层的电子数目往往少于该层达到〔饱和点〕时应有的电子数目，因此这些电子是不稳定的。外层电子称为价电子。金属原子结合成晶体，主要是依靠原子外层价电子的作用。

金属和其他物质一样，随着温度和压力的不同，原子间距离亦异。当原子间距离小于某一定值时，处于凝聚状态（液体或固体），表现出金属的特性（如导热、导电等）；原子间距离大于某一定值时，则处于气态，不能显示出金属的特殊性能（例如气态金属也是绝缘体）。如两原子间距离（ $2R$ ）大于两个原子半径之和（ $2r$ ），即 $2R > 2r$ ，气态金属原子间有相互吸引的力，称为范德瓦尔斯（Van der Waals）力，其值与原子间距离的7次方成反比，故随着距离的加大，引力逐渐减小终至实际上为零。因此，当两原子间距离很远，各原子的外层电子的运动实际上不受另一原子的影响时，则相互间作用力极其微弱。当原子彼此相距够近（而不是太近）时，例如 $2R$ 接近于 $2r$ （但仍大于 $2r$ ），此时这些原子的价电子运动只受到微小的扰乱，还未有根本的改变，原子之间存在有范德瓦尔斯作用力。假如两原子间距离更近（例如 $2R < 2r$ ），则各原子外层的价电子的运动，就会发生根本的变化。以氢原子为例，每一个氢原子有一个价电子，为简单起见，先假定两个原子核（质子）之间只留下一个电子，也就是说，只考虑一个氢原子的价电子，在其本身及另一原子的质子作用下的运动情况。

设有甲乙两原子，甲原子上的价电子围绕其原子核运动至甲乙原子中心联线上时，由于与乙原子核的距离比与甲原子核的距离还要短些，在引力的作用下，跳到乙原子的轨道上围绕乙原子核运动，环绕一周至联线上时，即又跳到甲原子轨道上，如此周而复始。价电子的运动实际上是 ∞ 形（如图2-1）。以前也有人认为，上述价电子运动至甲乙原子中心联线后，即围绕垂直联线的轨道运动（如图2-2），不管价电子运动轨道是属那一种模型，

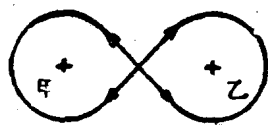


图2-1 公有电子 ∞ 形运动
轨道示意图。

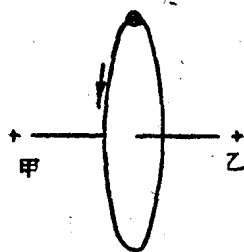


图2-2 公有电子陀螺形运动
轨道示意图。

它們都已不是那一原子所私有，而是公屬於甲乙两个原子了，这就叫做电子的公有化。我們在这里把公有电子的运动軌道，描述成 ∞ 形或陀螺形，只是为了便于理解，实际情况，当然要比这复杂得多。

实际上，金屬中有很多原子，每一个原子也往往不止一个价电子而这些价电子在凝聚状态下已不屬於某一个別原子，而是为全体原子所共有，这就好像許多正离子（失去部分或全部外层电子的原子）飄浮在电子云中一样。所以在固态及液态金屬中，原子的結合是建筑在外层电子公有化的基础上的，与一般离子鍵或共价鍵等有所不同。金屬最典型的特性——导电性——就是这个概念的直接論証。浸溺在电子云中的正离子，受到周圍电子吸引力的作用相当于受到外界均匀的压力，故总想分布得最紧密，大多数固态金屬的晶格，都是密集的六方晶格和面心立方晶格，便可能是由于这种〔压力〕条件所造成的。

金屬中的公有电子，做連續而无一定規則的运动，这一点与气体中分子热运动相类似，但也有所不同。电子的运动速度实际上与溫度无关。在絕對零度时，热运动停止，而公有电子运动則不能停止。不但如此，并且可以說，当金屬蒸汽冷凝时，公有电子的运动速度，还会有所增加。这是因为在冷凝以前，每一个价电子都从屬於一定的离子，冷凝后，价电子同时受若干离子的吸引，吸力增加，电子运动的平均速度也随之增加，因而动能也有所增加。

如前所述，固态金屬中，原子間有一定相互位置，在一定溫度下，有一定距离，也就是說，固态晶体有一定的几何图形結構，原子或正离子就在这結構中依严密的順序排列在一定的位置上。当然这并不是說，原子或正离子严格地固定在晶格的某一〔結节点〕上，而是这些〔結节点〕只是原子或正离子比較可能的重心位置，原子或正离子在与絕對零度不同的任何溫度下，都处于热运动状态，它們以平衡位置为中心，作三維微弱振动，振动能是固体微粒蓄能的主要組成部分，其大小的变化决定于加热的程度。

在凝聚状态下(固态和液态)，金屬本身是荷正电的离子与荷負电的电子的綜合，这些正离子同时劫持着迅速运动中的电子云。原子与原子之間有一定的作用力和能量的平衡关系存在。原子間的作用力包括正离子与公有电子間的庫倫引力，正离子相互之間以及电子相互之間的庫倫斥力和由公有电子运动所引起的慣性力(离心力)。在一定溫度下，原子間相互作用力的大小与原子間距离有关，如图 2-4 上虛綫所示。当原子間距离为 R_0 时（相当于該溫度下原子的平衡位置）作用力等于零，原子間的引力和斥力相等，处于平衡状态。

由于原子与原子之間有相互作用力，一个原子相对于另一个原子就有势能 W ，当原子間距离 R 增加 dR 时，力 F 就靠减小原子間的势能来作外功 FdR ，所以

$$-dW = FdR,$$

或

$$F = -\frac{dW}{dR}$$

由此可見，要決定 F 與 R 的關係，就等於要決定 W 與 R 的關係。總能量 $W(R)$ 可用下式表示之，其中負值項表示引力能，正值項表示斥力能。

$$W(R) = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n} \quad (2-1)$$

式中 a 和 b 都是常數，而且 $m < n$ 。各種晶體的結合鍵不同， a 、 b 、 m 、 n 之值都會有所不同，從 $m < n$ 的條件可以看出，斥力隨 R 的改變比引力隨 R 的改變要快。在 R 之值比較小時，斥力的改變走在引力的前面。反之，當 R 之值較大時，斥力的改變落在引力的後面。

引力能量、排斥能量以及總能量與 R 的關係如圖 2-3 所示。從該圖可見：當 R 數值很大時，例如在氣態情況下，兩原子間實際上沒有相互作用，故可認為其間能量為一常數並等於零。當其間距離減小時，即產生引力（或同時產生斥力）。吸引能量的絕對值大於排斥能量的絕對值，故此時 F 為負數值，而 W 之值因 R 減小而減小。當 $R = R_0$ 時，引力與斥力相等， $F = 0$ ， W 達最小值 W_0 。如再減小 R ，則斥力大於引力， F 為正值， W 即隨 R 的減小而增加。當 $R \rightarrow 0$ 時 F 和 W 都增加到無窮大。 R_0 即兩原子處於平衡位置時的距離。當二原子間距離 $R < R_0$ 時，二相鄰原子間作用力以斥力為主，使原子分開，當 $R > R_0$ 時，以

引力為主，使原子接近。故不論原子距離如何變動，原子間作用力總使之保持一定距離 R_0 ，即該溫度下的原子間的平衡距離。

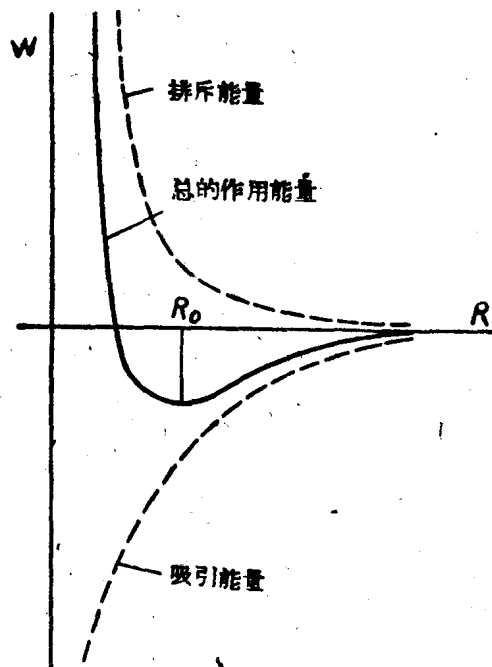


圖2-3 原子間能量與距離的關係曲線。

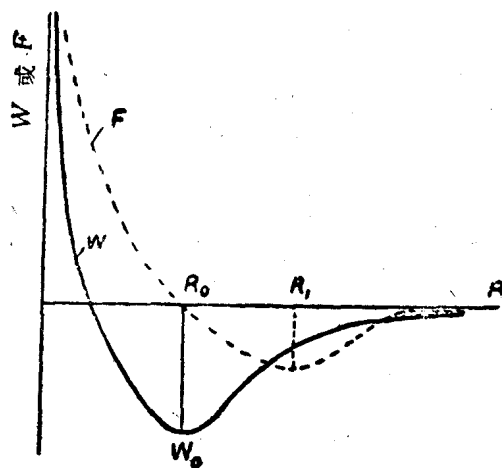


圖2-4 原子間能量，作用力與距離關係的比較示意圖。

金屬被加熱時，體積脹大（由於相變的原因除外），是謂之熱膨脹。

前面提到過，金屬晶格的原子（或正離子）處於熱運動的狀態。而固體中的熱運動，就是每一原子在某平衡位置附近所做的振動和不很頻繁的部分離子移動，金屬的溫度愈高，原子所具有的動能愈大，振動得愈激烈。如在某溫度 T_0 時，原子 A 和 B 的平衡位置間距離為 R_0 （圖 2-5）并各做自 1 至 2 的振動， R_0 就決定着金屬在該溫度的比容積。

如果把溫度從 T_0 提高到 T_1 （ $T_1 > T_0$ ），則原子的振幅要加大。假如保持原子於平衡狀

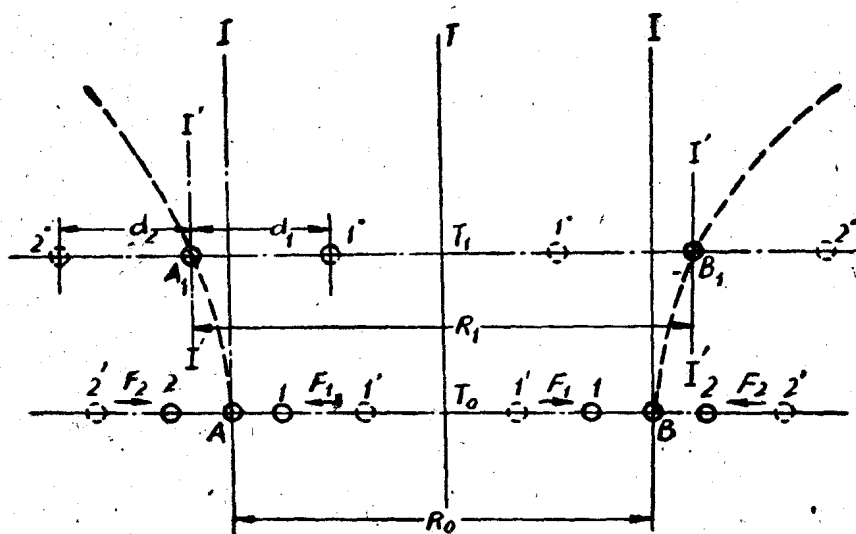


图2-5 热膨胀示意图。

态的力与原子离开平衡位置的位移成正比，也就是说，原子的振动是简谐运动，就不会发生热膨胀。因为由于加热的结果，虽然使振幅增大，但原子自位置1~2移动至1'~2'，还是对称于其平衡位置，故金属的平均尺寸，还是保持不变。事实上，使原子保持于平衡状态的力并不是位移的直线函数，而是较复杂的，同时已是非对称性的函数（参阅图2-4）。结果在温度 T_1 时，原子A及B的振动，不对称于其平衡位置，也就是 $\alpha_1 < \alpha_2$ 。所以它们新的平衡位置已不再是I—I而是I'—I'。原子间的距离也从 R_0 加大至 R_1 ，这样就使金属的比容加大，也就是产生了热膨胀。

原子间保持于平衡位置的力和向该位置两侧摆动距离不对称的原因可以解释如下：两原子在平衡位置时，其间距为 R_0 。当距离小于 R_0 时，原子间的作用合力将为斥力，而在距离大于 R_0 时，则为引力。当离开平衡位置的距离较小时，可以近似地认为原子是在力 $F = -f(x)$ 作用之下产生运动（式中 x ——离开平衡位置的距离）。但是当两原子接近时，从图2-4可见，作用于其间的斥力大于两原子彼此离开时所产生的引力，亦即原子接近时斥力的增加要超过拉开时引力的增加，结果使原子两侧振幅不相等（非对称性的），在增加二原子距离的方向上（由于斥力）位移较大，而在减小振幅的方向上（由于引力）的位移较小，乃使两原子平衡位置之间的距离 R 增加（从 $R_0 \rightarrow R_1$ ）。金属受热愈多，温度愈高，原子振幅愈大，其平衡位置偏移愈甚，乃使温度与位移的关系如图2-5上曲线所示。这就是金属热膨胀的基本原理。

热膨胀改变原子间的距离，但不改变它们在晶格中的相对位置。

以上所讨论的金属热膨胀，主要是指理想晶体而言，实际情况往往要比较复杂得多。下面将讨论一些其他现象（如扩散、蒸发、离位原子和缺位等）。

金属晶体中，原子绕一定平衡位置的振动，只构成问题的一个方面。实际上，原子还可能逾越平衡位置，做较大的迁移。这从下面一些现象可以看出：当两种不同性质的固体（例如金与铜）互相接触时，则会发生互相扩散的现象。显然，假如金与铜原子的热运动只是限制在平衡位置附近的微小振动，亦即每个原子的四邻保持不变，则金的原子不可能进

入銅原子的範圍，同時銅原子也不可能進入金原子的範圍內。又如大家知道，物體在固態常溫下也有組織改變現象（如时效硬化，常溫回火等）。而晶體內部有些原子並不是正確地處於其平衡位置，有些晶格〔結節點〕上並沒有原子存在，所有這些現象都說明固體中原子的熱運動，並不只是它們在平衡位置附近的振動，而且還有原子的移動。

根據既適用於氣體也適用於固體的馬克斯威爾（Maxwell）定律，我們已經知道，晶體內的原子都具有一個平均動能，其值與溫度有關：

$$\tilde{E}_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT, \quad (2-2)$$

式中 $\tilde{E}_k$ ——平均動能；

v ——原子平均運動速度；

m ——原子質量；

k ——波爾茨曼（Boltzmann）常數；

T ——絕對溫度。

具有這樣平均動能的原子，所占的比例數與 $e^{-\frac{\frac{1}{2}mv^2}{kT}}$ 成正比。

金屬中往往有一定數量的原子，即使在較低溫度下原子平均動能比較小時，也會由於鄰近原子的作用而獲得較大的動能。實際上，物體中每一個原子，都可能在不同的時刻，有比平均動能大任意倍的動能。當原子在某一瞬間獲得較大的能量後，就會從自己原來的平衡位置移動至另一新的位置。旅程中，該原子失去了多餘的動能，而在新的位置附近做微弱的振動。經若干時間後，又獲得足夠的能量，轉移到其他新位置上去。這樣一步一步地移動，就是所謂〔原子內蒸發〕現象。金屬表面層的原子，獲得很大的多餘能量時完全有可能脫離晶體而飛入空間，這就是固體物質在低溫下也能蒸發（或稱升華）的原因。兩個不同性質的物體，在固態下互相接觸時，其所以會產生互相擴散的現象，也可以用這個道理來解釋。

實際上，原子不會占滿物體的整個體積，它們之間總有一些自由空隙，也就是由於這些空隙，原子才能振動。當某一原子獲得多於平均動能的能量後，可以從晶格的〔結節點〕上跑出來，並填入晶格的間隙中去。這樣，在晶格中便產生了〔缺位〕和〔離位原子〕。因此，實際的晶體，乃是一種〔固溶體〕，其中除了位於〔結節點〕的主要組元以外還有〔離位原子〕和〔缺位〕。

離位原子和缺位的數目，隨溫度的升高而加多，在熔點時達最大值。理論上，溫度接近於熔點時，〔缺位〕不超過原子數的1%。但即使是這樣的數目，已足以保證金屬原子有較大的遷移率，使整個金屬體積內所有原子都有移動的可能性。用這樣的理論就可以解釋金屬和合金在高溫下組織易於改變的許多現象。

2-1.2 金屬的熔化

關於金屬熔化的機理，還存在着各種不同的說法。我們這裡根據弗倫克耳（Я. И. Френкель）的三原子模型說明如下：

前面討論過，金屬的溫度升高，原子間距離要加大，產生熱膨脹現象。這時晶格中原子的相互位置，（除去由於原子內蒸發而產生的離位原子和缺位以外），基本上沒有改

变的。

将金属加热至熔点时，一方面产生移动的原子增多，离位原子和缺位的数目也相应地增加，同时，金属体积也大大增加，乃使组织的规律遭到严重的破坏。将金属从绝对零度加热至熔点时，金属体积膨胀约为原尺寸的3%，使原子距离加大1%。金属熔化时，其体积也增加3%，也使原子间距离相应地增加1%，因此其总的距离增加2%。由于原子间距离有这样大的改变，乃使晶格的稳定性突然消失，原子间作用力迅速减小使结合键迅速断裂，这就说明了熔化过程突然发生的原因。

为了说明晶格的稳定性问题，我们可以采用由三个原子组成的最简单的固体模型（图2-6及2-7）。

假定A、C两个原子不动，而中间原子B可以在AC联线上自由移动，在低温平衡状态下，B正好处于AC的中点，即 $AB = BC$ 。这是实际晶体中原子排列的特征，其中所有原子间距离都是一样的，为晶体熔化前的正常情况。假如做出势能与原子间距离的关系曲线如图2-7（1），B原子相对于A和C原子都有最小的势能（作用力 $F = 0$ ）（参阅图2-4）故在该位置上最为稳定。

当温度升高时，AC间距离加大，此时，虽然 $AB = BC$ ，但可以看出，B原子相对于A、C原子的势能并非最小值（图2-7，2、3），稳定性便较差。如温度接近于熔点，A、C距离更大，如AB仍等于BC，从图2-7（4）可见，B原子的势能已非最小值而为该区域的最大值。这时B原子

就很不稳定，要向A或C原子接近。当向A原子接近时，B的势能可以达最小值，但与C原子失去联系，终至断裂。熔化即可能从此处开始。这就说明了晶体熔化现象突然发生的原因。熔化所需的能量，就消耗在这种键的断裂上。

原子间结合键断裂以后，固体转变为液体。这并不会造成液体的完全断裂，相反地，液体在外观上仍是连续的。这是因为一原子虽然与另一原子失去联系，其间产生了小裂缝，但仍与其他原子保持着键的联系。这种原子间的联系和小裂缝的位置在液体状态下也不是一成不变的，而是原子间不断改变着键的关系，小裂缝也不断在一处消失在另一处形成。这样便可以设想液体实际上是由许多原子集团和小裂缝（或称[空穴]）组合而成的，由于

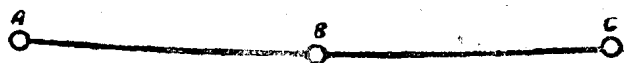


图2-6 三原子晶体模型示意图。

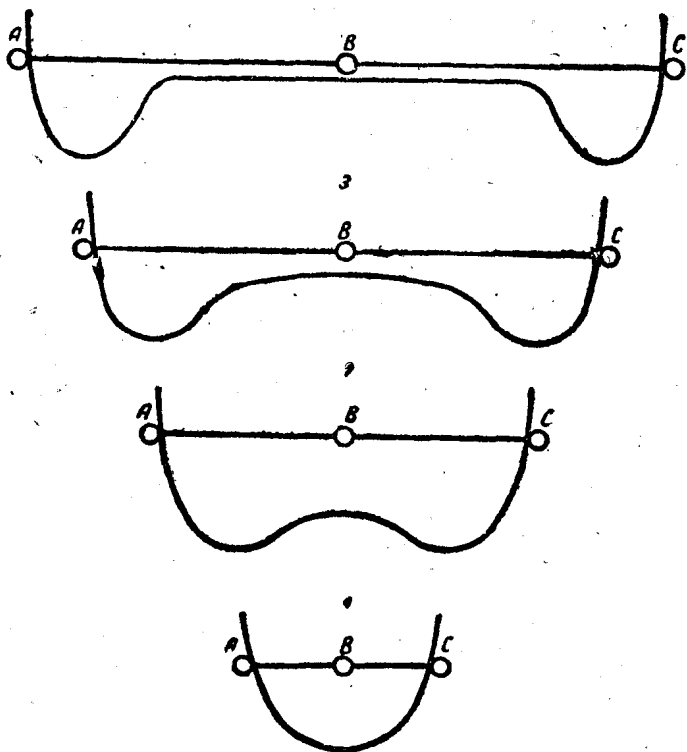


图2-7 势能曲线的变化和原子间距离的关系
(1、2、3、4表示原子间不同的距离)。

二者不断改变着位置，乃使液体在外觀上仍然保持着連續性。原子集团仍然保持晶体的特性。这样的熔化有时称之为一次熔化，如溫度繼續升高（例如，純鉄加热到2000°C以上），原子移动更为頻繁，而在某一平衡位置上振动周期更短，則原子間便实际上沒有一定的排列，也就是由晶体轉变为非晶体，这时便称为二次熔化。生产实践中的許多現象，如金屬及合金的遺傳性問題，液态金屬过热对鑄件內部晶粒粗細的影响問題等，就可能用这样的概念来加以解釋。

2-1.3 液态金屬結構

我們已經知道，固态晶体中原子有一定排列并在晶格結节点上做微弱振动和在晶体內部移动。气体中原子或分子沒有一定的位置，而且运动杂乱。液体則介乎气体与固体之間。大約在30年以前，一般认为液体的結構和性质与气态极为相似，而与固体則有很大的差別。近来的研究确定：液态是固态与气态之間的中間态，在高溫及比容积較大（压力較小）时，接近气态，而当低溫及較小的比容积时則接近固态，对于一般鑄造用金屬及合金而言，其熔点与沸点差別很大，而澆注溫度則多与熔点相近（例如鉄的熔点为1535°C，而沸点为3000°C，极低碳鋼的澆注溫度則为1600~1650°C；又如銅的熔点为1084°C，沸点为2310°C，但銅及銅合金的澆注溫度則为1000~1250°C），因此鑄造合金在熔炼及澆注时的結構和性质應該与固体更为相似，而与气体則差別更大。（有一些非金屬物质也表現这样的特性。）这从以下几点可以得到証明。

一、上面提到过，固体在較低溫度下也有蒸发现象，两个固体互相接触时，也可以經由扩散作用而互相滲合，这一点便和液体相似。同时，固体在較高溫度下，受到較大的外力作用后，也可以产生晶体的流动。此种流动性与液体的流动性实际上只有量的差异，并无质的区别。

二、当固体溫度接近于熔点时，其强度非常微小。而液体也还是有一定的强度。例如远在1911年馬义耳（Майер）已經可以把水銀（液态）拉伸1.47%而不断裂。

三、熔化时体积增加不大，对于金屬約为3%，而一般物质也不超过10%，可見熔化时粒子間距离增加得很有限，而气化时則增加得很多。

四、具簡單結晶构造的物质，其热容量与熔化后热容量差別很小（一般有些增加，見表2-1），而同一物质在气态时的热容量，便有本质上的不同（通常小几倍）。

表2-1 某些物质在邻近于熔点时固态及液态的热容量

热 容 量	Na	K	Ag	Zn	Hg	Al	Pb	Bi	Fe	S	H ₂	HCl	CH ₄	Cl ₂
C _p (卡/克分子)-固态	7.6	7.1	7.1	7.2	6.7	6.14	7.2	6.4	10	6.3	11.3	12.27	10	14.0
C _p (卡/克分子)-液态	8	7.6	8.1	7.9	6.7	6.25	7.7	7.4	10.8	7.6	13.1	14.73	13.5	16.2

五、一般熔化热与蒸发热相較，其值甚小。

金 屬 名 称	熔 化 热 (卡/克原子)	蒸 发 热 (卡/克原子)
Zn	1800	27730
Pb	1170	46000
Hg	560	14200
Na	630	23330

六、大部分金屬在熔化时，电阻率約增加 2 倍，以后再加热，电阻繼續增大，但仍有导电性。金屬蒸汽則是絕緣体。

七、苏联达尼諾夫 (В. И. Данилов) 院士，在最近几年所做的 X 射綫研究指出：溫度接近熔点的液体，其粒子所居位置与其結晶后的正确位置相类似。

由上可見，在冶炼和鑄造生产过程中所遇到的液体金屬，其結構和性质基本上和固体相近，而与气体差別很大。因此有人称这种液体为「准固态液体」。

前面討論过金屬在气态及凝聚状态下（液态和固态）原子間結合力的大小和特性差別很大，而液体与固体間差別很小。

按照苏联科学院院士弗侖克耳的意見，在液体中和在固体中一样，粒子不能像气体那样自由运动，而只在某平衡位置附近振动，液体和固体不同之处只在于：固体中粒子在平衡位置停留的时间，大于其振动周期几百万倍，而液体中粒子在完成几千次振动后，就要轉移到新的位置。

理想的液态金屬，不含有气体或非金屬夹杂物，或其他悬浮物质，称之为「物理性透明的液体」。对于这种液体的結構，也有各种不同的观点。一般可以用空穴理論来解释：这就是如前面所提到的，液体金屬本身在溫度接近于熔点时，是由許多保持晶体特性的原子集团与許多小裂縫（这里称为「空穴」）所組成的。若干个原子在某时某处組合在一起而成原子集团，很快又会分散，但同时其他地方，又有新的原子集团形成。几乎在任何时期内，都不断产生这种分散和集合的現象。空穴也是一样，不断地在一个地方消失，又在另一个地方出現。这样，实际上原子集团不受任何无定形介质的隔离，而好像是始終互相接触着的。当然，集团之間还有「空穴」，但「空穴」位置并不是固定的，所以并不影响液体的連續特性。

由于液体溫度不同，原子集团的大小和集团内部原子間距离可以不一样，集团的分散和集合頻率也有所不同，「空穴」的体积和数量也因溫度而异。

液态金屬合金，具有某些結構上的特性。在能产生共晶体和在固态下溶解度有限的金屬合金中，即使溫度远高于熔点，也还能保持每种組成的原子集团。

实际液态金屬中有以悬浮状态存在的各种气体和非金屬夹杂物。它們在液态金屬中的溶解度因合金成分、溫度、金屬上气体的压力等等而有所不同。当它們以各种形式从溶解状态分离出来以后，就使液态金屬内「物理性透明」的理想液体变为非均质的实际液体。

在鑄造合金中往往含有多种元素，有些是金屬的，有些是非金屬的。当非金屬元素和溶液中另一种金屬元素之間的結合力的合力大大超过非金屬元素离子之間和与溶剂金屬离子之間的結合力的合力时，就会形成新的組成物（例如鋼中的 Al_2O_3 、 MnS 、 CO 、 TiN 等）。非金屬元素与溶剂本身也可能有类似的組成物（如鋼中的 FeS 、 FeO 等）。在这种情况下，溶剂的个别离子即从原子集团中分离出来。

由于这些离子組合物（組成物）能做为形成新相的晶核，因而它們在表面力的影响下能集合或凝聚起来，而成为在显微鏡下或甚至用肉眼可以看得出来的夹杂物或气泡。

这些新組成物的形成，使液态金屬結構在內容上比理想液体要复杂得多。实际上在一般冶炼情况下，液态金屬中总有一些气体或非金屬夹杂物，其来源很多，对合金的鑄造性能、金屬結晶时晶核的形成以及对鑄件质量的影响很大，以后将专章叙述之。

第二节 液态金属性质

2-2.1 液态金属的基本物理性质

铸件形成的过程主要是将液态金属浇入特定铸型凝固冷却的过程，因此液态金属的物理性质，对熔炼浇注操作及铸件质量的关系很大，铸造工作者对之应有比较深入的了解。

表 2-2 提供一些常用铸造金属及合金的基本物理性质数据。

表 2-2 金属在熔融状态下的基本物理性质

金属及合金	熔点或凝固 温度范围 (°C)	熔化热 (卡/克)	密度 (克/厘米 ³)	凝固时体 积收缩 (%)	沸 点 (°C)	蒸发热 (卡/克)
Al	660.2	93	2.40	(6.0)	(2500)	2570
Al+4% Mg	579~641					
Al+10%Mg	499~621					
Al+5%Si	577~629					
Al+12%Si	574~584					
Al+4%Cu	549~645	(93)				
Sb	630.5	39	6.55	-0.95	1635	298
Be	1280	262			(3000)	5910
Bi	271.3	12.4	10.1	-3.35	1560	196
Cd	320.9	13.6	8.0	4.75	798	211
Cr	1845	90			(2330)	1370
Cu	1083	48.5	8.3	4.15	(2500)	1250
Cu+40%Zn	904					
Cu+10%Sn	845~1050					
Fe	1535	64.5	6.9	3	(2900)	1570
Pb	327.4	5.7	10.3	3.5	1750	210
Pb+6%Sb	248~285			3.1		
Mg	650	85.2	1.57	4.1	1103	1310
Mn	1260	64		1.7	(2150)	1100
Ni	1455	72			(3100)	1390
Si	1440	393			(2600)	2600
Ag	960.5	25.2	9.4	3.8~5.0	2180	555
Sn	231.9	14.2	6.98	2.8	(2400)	660
Sn+7.5Sb+3.5Cu 轴承合金	241~354			3.0		
Ti(99.9+)	1725				>3000	
Zn	419.5	26.2	6.7	4.2	907	438
Zr	(1860)					

一、熔点和熔化热

各种純金屬的熔点差别很大，如Sn为232°C，Cr为1845°C。純金屬在一定溫度下凝固及熔化，但大部分合金則有一个凝固（或熔化）溫度範圍，其範圍大小，决定于合金种类和合金的化学成分。凝固範圍决定着鑄件凝固的机理，及宏观組織的特性，因而也影响鑄件质量。

各种純金屬的熔化热差别也很大，如Si为393卡/克而Pb只有5.7卡/克。对于合金而言，熔化热这一名词很难严格地加以应用。因为它们有一个熔化溫度範圍，熔化时所吸收的热量包括真正的熔化热和从固相線溫度上升至液相線溫度所吸收的热量。后者与合金的比热有关，并因溫度上升时由于液、固二相的化学成分的不断改变而不断发生变化。

二、比热

金屬及合金的比热，在表2-2中并未列出，但根据許多文献可知，对于許多金屬而言，其液态的比热可以从下式計算出来，

$$\text{比热} = \frac{7.15}{\text{原子量}} \text{卡/克}^\circ\text{C}。$$

由上式算出的数值，約比同一金屬固态时的比热大20%。

液态比热（或热容量）較高的金屬，在澆注过程中，流过澆注系統时，受激冷的程度較小，因此即使澆注溫度較低，也比較容易澆滿整个鑄型。另一方面，比热及熔化热愈低，鑄件截面上溫度梯度愈大，因此需要补縮的程度愈大。

三、沸点和蒸发热

各种金屬的沸点差别也很大。沸点与熔点之間并无直接关系。如：

金 屬	熔 点 $^\circ\text{C}$	沸 点 $^\circ\text{C}$
Sn	231.9	2400
Zn	419.5	907

从沸点高低，可以約略估計金屬蒸发損耗較为严重时的溫度。

蒸发热远高于熔化热（这也說明液体金屬的結構和特性与固态較为接近而与气态相差較远）各种金屬的蒸发热也不相同，按照特魯頓和皮克特（Trouton and Pictet）法則，所有物质的蒸发热約为一常数（22卡/克分子 $^\circ\text{C}$ ）。

四、凝固时体积的收縮和液态金屬的密度

一切金屬（除Sb、Bi和Si外），凝固时都要縮小体积，此性质对于鑄造工作者來說非常重要。Al的体积收縮为+6%，而Bi为-3.35%（即膨脹）。合金的凝固收縮往往比基本金屬要大一些。但这种增加实际上是与凝固溫度範圍內固相的固态收縮有关，而不是加入合金元素后对液体收縮有什么直接影响。假如金屬中有气体存在，便会改变这种收縮特性。

一切正常金屬的密度，在液态时都比固态时要小些，这与熔化时体积膨脹的特性是吻合的。应用前面所提到的金屬热膨脹和熔化的一些基本原理，可以很好地解釋这种現象。在三种熔化时收縮的金屬（Bi、Sb、Si）中，其液态密度只有Sb和Bi是已經知道的，它們的液态密度都比固态时要大些。

、液态金屬凝固时的体积收縮和密度与鑄造工艺性质也有关系，以后会常常提到。