

高等学校教学用书

金属工艺学

东北工学院金属工学教研室編



中国工业出版社



5023060

8511822

高等学校教学用书



金属工艺学

东北工学院金属工学教研室编

东北重型	15.78
机械学院	37
图书馆藏书印	

TG-43/2

中国工业出版社



0655546

02
g

D

教

..SCL 1133

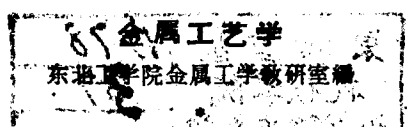


本书系由东北工学院金属工学教研室根据现行采矿、冶金类专业所用45~60学时教学大纲编写而成。

本书特点在取材方面结合专业，内容重点以加工工艺为主，原理、设备次之，并适当介绍一些新的、高生率的加工方法。

本书共分五篇、三十三章，内容包括：金属材料、铸造生产、金属压力加工、金属焊接与切割、以及金属切削加工等五大部分。

本书经冶金工业部教育司推荐作为高等学校采冶类专业教学用书，亦可作为其他非机械类专业的教学参考书，并可供有关工程技术人员参考。



中国工业出版社出版（北京经城南路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张21⁵/₈·插页1·字数483,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数0001-4,637·定价（10—6）2.60元

统一书号：15165 486（冶金—142）

序 言

根据冶金工业部的指示，我們編写了这本适用于采矿、冶金以及与其性质相近的各专业所用“金属工艺学”。

考虑到采冶类多数专业的学生对“金属冶炼”部分已初具常識而且以后还要深入学习“冶金学”，故在本书中将其略去。对“金属学”部分虽然日后也要深入学习，但是为了满足生产劳动和学习金属工艺学其他部分的需要，采取从簡叙述。本书着重介紹鑄造、压力加工、焊接以及切削加工等四个部分。

就本书內容来看，似乎沒有保持“金属工艺学”这门課程的完整性，但我們认为：同整个教学計划和采冶类特点等联系起来考虑，这样处理是合适的，对提高教学质量頗更有益。

在編写过程中，曾就适当地結合专业和适当地反映采冶特点做了一些努力。从內容取材方面，以加工工艺和加工方法为中心，适当地加强了原理部分、相应地介绍了設備构造，突出地闡述了零件的制造工艺性。从工艺方法介紹方面，以单件、中小批生产为主，重点地論述了典型零件和及其基本加工方法，适当地介绍了新的高生产率的加工方法。

目 录

緒論.....	9
---------	---

第一篇 金 属 材 料

概述.....	11
---------	----

第一章 金属及合金的基本理論.....	13
---------------------	----

第一节 金属的結晶.....	13
----------------	----

第二节 合金的基本組織.....	17
------------------	----

第三节 二元合金状态图.....	18
------------------	----

第四节 铁碳合金.....	21
---------------	----

第二章 鋼的热处理.....	23
----------------	----

第一节 热处理的一般概念.....	23
-------------------	----

第二节 鋼加热时的转变.....	23
------------------	----

第三节 奥氏体的分解.....	24
-----------------	----

第四节 热处理工艺.....	25
----------------	----

第三章 常用的金属材料.....	26
------------------	----

第一节 碳素鋼.....	26
--------------	----

第二节 合金鋼.....	29
--------------	----

第三节 有色合金.....	32
---------------	----

第二篇 鑄 造 生 产

概述.....	35
---------	----

第一章 鑄型工艺.....	36
---------------	----

第一节 造型工具及附具.....	36
------------------	----

第二节 模型和型芯盒的制造.....	37
--------------------	----

第三节 造型和造芯材料.....	38
------------------	----

第四节 手工造型.....	40
---------------	----

第五节 机器造型及造型机.....	42
-------------------	----

第六节 型芯及型芯的制造.....	46
-------------------	----

第七节 鑄型和型芯的干燥及合箱.....	48
----------------------	----

第八节 澆注系統.....	50
---------------	----

第二章 金属的熔化及澆注.....	52
-------------------	----

第一节 鑄造車間熔炉种类及应用.....	52
----------------------	----

第二节 冲天炉中鑄铁的熔化.....	53
--------------------	----

第三节 鑄鋼的熔炉及其应用.....	55
--------------------	----

第四节 有色金属的熔炉及其应用.....	58
----------------------	----

第五节 鑄铁、鑄鋼和有色金属鑄造的炉料.....	59
--------------------------	----

第六节 鑄件的澆注、落砂和清理.....	60
----------------------	----

第三章 鑄造生产原理.....	63
第一节 合金的鑄造性质.....	63
第二节 縮孔及其防止方法.....	65
第三节 鑄造应力、变形及裂紋.....	68
第四章 鑄造材料.....	69
第一节 鑄铁的組織及影响組織的因素.....	69
第二节 高强度鑄铁的获得.....	71
第三节 鑄铁的鑄造性质.....	73
第四节 鋼的鑄造性质及鑄造工艺特点.....	74
第五节 有色金属及其合金的鑄造性质及鑄造工艺特点.....	75
第五章 鑄件設計.....	76
第一节 从鑄造工艺考虑对鑄件結構的要求.....	76
第二节 从鑄造合金的性质考虑对鑄件結構的要求.....	79
第六章 特种鑄造.....	83
第一节 金属型鑄造.....	83
第二节 离心鑄造.....	85
第三节 压力鑄造.....	86
第四节 熔模鑄造.....	88
第五节 壳型鑄造.....	89

第三篇 金属压力加工

概述.....	91
第一章 压力加工基本理論.....	92
第一节 变形力及金属变形.....	92
第二节 金属的塑性变形.....	93
第三节 硬化与再結晶.....	94
第四节 热变形对鑄錠組織及性能的影响.....	97
第五节 影响金属塑性及性和变形抗力的因素.....	99
第二章 金属的加热.....	100
第一节 金属加热概述.....	100
第二节 鍛造温度范围.....	100
第三节 加热設備.....	103
第三章 自由鍛造.....	106
第一节 自由鍛造概述.....	106
第二节 自由鍛造的基本工序及所用工具.....	106
第三节 鍛件图的制定及毛坯重量的确定.....	116
第四节 合金鋼、有色金属及其合金压力加工的特点.....	118
第五节 自由鍛造的机械設備.....	118
第六节 鍛造工艺举例.....	125
第四章 模型鍛造.....	130

08/12/27/03

第一节	模型鍛造概述	130
第二节	錘上模鍛	132
第三节	其他機器上模鍛	135
第四节	胎模鍛造	137
第五章	板冲压	139
第一节	板料冲压概述	139
第二节	板冲压工艺	140
第三节	冲模結構	146
第四节	冲压件設計的工艺性	147
第五节	冲压生产机械化和自动化	149
第六章	各种压力加工的特点及今后发展趋势	149
第一节	自由鍛造	149
第二节	模型鍛造	149
第三节	軋压	150
第四节	挤压	152
第五节	拉伸	152
第六节	爆炸成型	153

第四篇 金屬的焊接与切割

概述	154
第一章 电弧焊	155
第一节 焊接电弧	155
第二节 电弧焊设备, 工具及附具	157
第三节 电焊条	160
第四节 手工电弧焊工艺	163
第五节 埋弧自动焊及半自动	168
第六节 碳极电弧焊及气电焊	172
第七节 堆焊及缺陷的焊补	175
第八节 电弧焊的安全技术	177
第二章 气焊及气割	178
第一节 氧——乙炔火焰	178
第二节 气焊设备	179
第三节 气焊工艺	182
第四节 气割	184
第五节 特殊切割法	186
第三章 其他焊接方法	188
第一节 接触焊	188
第二节 电渣焊	193
第三节 钎焊	196
第四章 各种金属的焊接特点	198

第一节	可焊性及合金元素对它的影响	198
第二节	碳钢的焊接	199
第三节	合金钢的焊接	200
第四节	铸铁的焊接	202
第五节	有色金属的焊接	203
第六节	钛及其合金的焊接	204
第五章	焊接结构工艺性	205
第一节	焊接结构的型式及其制造过程	205
第二节	焊接应力和变形	206
第三节	焊接机器(零件)的工艺性	209
第六章	焊接质量检验	212
第一节	焊接缺陷的种类	212
第二节	焊接质量检验方法	213

第五篇 金属切削加工

概述.....	215
第一章 金属切削原理基本知識.....	220
第一节 切削加工的基本方式及基本运动.....	220
第二节 切削用量.....	221
第三节 基本刀具几何形状及刀具材料.....	223
第四节 切屑形成过程和屑片的种类.....	226
第五节 切削力和切削功率.....	227
第六节 切削热及切削温度.....	230
第七节 刀具磨损及耐用度.....	230
第二章 金属切削机床的基本知識.....	232
第一节 机床的分类及编号.....	232
第二节 机床的驱动方式及其选择.....	234
第三节 机床的传动及传动元件的图示符号.....	235
第四节 机床的调速及其机构.....	239
第五节 机床的其他典型机构.....	244
第三章 車削加工.....	247
第一节 車刀及其应用.....	247
第二节 普通車床的构造及其传动.....	251
第三节 車床常用附件及其工作法.....	255
第四节 其他車床及其工作法.....	261
第四章 钻削及镗削加工.....	265
第一节 钻头及其应用.....	265
第二节 钻床种类及其应用.....	268
第三节 扩孔与铰孔.....	270
第四节 镗削加工.....	271

第五章 铣削加工.....	275
第一节 铣刀及其应用.....	275
第二节 铣床种类及其应用.....	279
第三节 分度头.....	283
第四节 铣削加工法.....	286
第六章 刨削加工.....	289
第一节 刨刀及其应用.....	290
第二节 刨床种类及其应用.....	291
第三节 刨削加工法.....	292
第七章 磨削加工.....	295
第一节 砂轮种类及其应用.....	296
第二节 磨削方法及设备.....	297
第八章 齿轮加工.....	301
第一节 圆柱齿轮直齿和螺旋齿的切制.....	301
第二节 圆锥齿轮齿形的切制.....	307
第三节 齿轮精加工.....	308
第四节 热轧齿轮.....	310
第五节 圆弧点啮合齿轮加工.....	311
第九章 拼合加工.....	312
第一节 拼合机床概述.....	312
第二节 拼合机床的用途和分类.....	315
第三节 拼合机床典型部件(积木块).....	316
第四节 拼合加工的工艺举例.....	316
第十章 特种加工.....	318
第一节 电火花加工.....	319
第二节 阳极机械加工.....	320
第三节 超声波加工.....	322
第四节 滚压加工.....	323
第十一章 典型零件的加工工艺.....	325
第一节 工艺规程的编制方法.....	326
第二节 典型零件工艺举例.....	327
第十二章 钳工与装配.....	336
第一节 钳工的基本工序.....	336
第二节 机器的装配.....	340
第十三章 结构工艺性.....	343
第一节 零件结构工艺性.....	343
第二节 机器装配工艺性.....	345

緒 論

金属工艺学是一門研究金属及合金的冶炼方法、性质及其合理加工方法的綜合性科学，它由下列六个部分組成：

1. 金属的冶炼：研究将矿石和废料冶炼成金属及合金的各种方法。
2. 金属学：研究金属及合金的成份、組織和性能之間的关系以及金属及合金在各种不同因素影响下所产生的組織和性能的变化。
3. 鑄造：研究用熔化的液体金属或合金浇注到預先制备好的鑄型內以获得具有一定形状的毛坯和另件的方法。
4. 金属压力加工：研究借外力作用于具有一定塑性的金属或合金使其产生永久变形以制造毛坯或零件的方法。
5. 金属的焊接：研究利用加热或不加热和加压或不加压的方法以及把分离的金属构成不可拆卸的整体結構的方法。
6. 金属切削加工：研究从毛坯上切除一部分金属以获得具有一定尺寸和形状以及所需精度和表面光洁度等給定技术要求的零件的方法。

金属工艺学的知識，对采矿及冶金工程技术人员有着密切的联系：

第一，采矿和冶金工程技术人员要經常运用、维护和修配有关的机器设备和改装設計新产品，来从事科学研究工作。从这个角度出发，具有金属工艺学的知識是十分必要的。特别是随着工业的发展，各个工业部門要广泛采用机械化和自动化生产，使用更多的机械，这样对金属工艺学的知識更应加强。

第二，采矿和冶金工程技术人员，預先知道他們生产的产品（或研究的对象）将进行哪些加工以及以后的加工对他們現在工作的要求，也是十分必要的。而金属工艺学的知識，将在这方面起积极的作用。

金属工艺学的知識与生产实践具有更直接和更加密切的联系。只有实践，才能提供丰富和生动的知識，进而不断充实和加深金属工艺学的研究內容。因此，在开始学习以前和学习过程中，进行有关的工厂劳动和实习，对深入学习这門学科是十分重要的。

金属工艺学是一門技术基础課，它将为学习机械零件及有关专业设备等課程，打下一定的基础。当然，它們的关系是辯証的，后者又会进一步加强对金属工艺学知識的要求，迫使加深金属工艺学的研究。

我国古代劳动人民，在金属工艺学上有过輝煌的成就。早在上古新石器时代，就有了銅。夏商时代，銅的冶炼、鑄造和加工业已相当发达。这从近代发掘的殷墟出土文物可以得到无可爭辯的鉄証。到了周秦时代已經开始了冶鉄工业。战国时代的鑄劍、鍛劍和鍛焊技术已很高明。汉朝时代出現了不少的简单机械，并且有了金属的机件，如湖南衡阳出土的人字齿輪，制作已相当精致并且嚙合很好。明朝宋应星所著“天工开物”一书所載的冶鉄、炼鋼、鑄钟、鍛鉄、淬火、机床加工等各种金属的加工方法，已足以說明远在欧洲工业革命以前，我国在金属冶炼及加工方面，就已取得很高的技术成就。但是由于封建社会制度阻碍了劳动人民的智慧和創造的发挥，再加上近百年来帝国主义的

侵略和压迫，反动派的统治和压榨，致使解放以前我国的科学技术处于极为落后的状态。

解放以后，在党的领导下，经过劳动人民的忘我劳动，现在我国已建成了一系列的新的工业部门。在建设现代的机械工业骨干企业的同时，各地兴办了数以万计的中小型企业，迅速地提高了机械工业的生产能力。

第一篇 金属材料

概 述

本篇内容简略介绍工程上常用金属材料的分类、牌号、用途及其内部组织、性能和热处理时的变化等。

金属及合金之所以在国民经济及国防工业中占有非常重要的地位，是因为其具有优良的机械性能，一定的物理、化学性能以及各种工艺性能等，同时又有较多的储藏量，可以广濶为人们所利用。

一、金属的机械性能

1. 强度：是指金属在受外力作用下抵抗破裂的性能。强度极限是指金属不发生破裂时所能承受的最大应力：

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ 公斤/毫米}^2,$$

式中 P_b ——最大载荷（公斤）；

F_0 ——金属横断面积（毫米²）。

2. 硬度：是指金属对于其它更硬物体压入的抗力。常以布氏硬度试验机上所测得的布氏硬度 H_b 和洛氏硬度试验机上所测得的洛氏 R_c 来表示。

3. 塑性：是指金属产生塑性变形而未引起破裂的性能，常以金属拉力试验中所测得的延伸率 δ %来表示：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 (\%),$$

式中 l_0 ——金属试样原计算长度；

l_1 ——金属试样拉断后长度。

4. 韧性：是指金属在抵抗冲击载荷的作用下而不断裂的性能，常以金属冲击试验中所测得的抗冲击值 a_k 来表示：

$$a_k = \frac{A_k}{F_0} \text{ 公斤} \cdot \text{米/厘米}^2,$$

式中 A_k ——冲击金属试样所消耗的功（公斤·米）；

F_0 ——试样缺口处横断面积（厘米²）。

表1—1中所列为各种合金的机械性能数据。

二、金属及合金的物理性能

金属及合金的物理性能是指比重、体积的膨胀系数、导电性、导热性及熔点等。常用金属及合金的物理性能数据见表1—2。设计零件时应根据零件的技术要求，选择具

有一定物理性能的金属或合金。例如对航空零件需要选择比重小的金属，对耐高温机件应选择熔点高的金属。

表 1-1 常用合金的机械性能

合金名称	抗拉强度极限 (公斤/毫米 ²)	延伸率(%) L=5d	布氏硬度 H _B	用途
工业铁(精铁)	23	30	90	隔膜铁片
灰口铸铁	12—38	到0.25	143—220	铸件
高级铸铁	30—60	0.5—10	170—262	重要铸件
低碳钢(软)	32—70	11—28	100—130	锅炉铁管, 锅炉
中碳钢(中硬)	50—70	12—16	170—200	轴, 连杆, 帆, 钢轨
淬火与回火后的硬钢	110—140	6—9	300—450	冲锻和切削的工具
锡青铜	15—25	3—10	70—80	抗磨和抗锈的机件
铝青铜	40—50	10	120	抗磨和抗锈的机件
一元黄铜	25—35	30—60	42—60	弹壳
二元黄铜	35—45	30—40	—	热模所制成的机件
含硅的铝合金	21—23	1—3	65—100	航空机件
镁合金	24—32	10—16	60—70	航空机件

表 1-2 主要金属及合金的物理性能

金属名称	比重	熔点(°C)	导电性	导热系数 (千卡/米·秒)	线膨胀系数
铝	2.70	658	34.3	0.504	0.0000238
铝合金	2.6—2.9	—	—	0.20—0.42	0.0000210
铁	1.74	650	23.2	0.376	0.0000260
镁合金	1.8—1.81	—	—	0.18—0.32	0.0000264
铜	8.93	1083	57.2	0.938	0.0000269
黄铜	8.5—8.85	—	—	0.25—0.58	0.0000180
铁(纯)	7.86	1530	10.0	—	0.0000093

三、金属及合金的化学稳定性

金属及合金的化学稳定性是指金属及合金在常温或变温时抵抗各种活动介质的化学侵蚀的能力。这种性能对机器制造有重要的意义, 在设计与各种介质接触的零件和仪器时, 应该慎重注意其化学稳定性。即便是一般的零件, 经常受空气中介质的侵蚀, 也会造成严重的锈蚀现象。在工业上金属每年因锈蚀而损失掉的有1%, 这不能不认为是一个巨大的损失, 因此必须对锈蚀现象作斗争, 采取各种防止腐蚀的技术措施, 如在金属表面上涂油漆涂料等。此外, 必要时也可以选择化学稳定性良好的合金, 例如不锈钢以及以铜镍为基础的各种化学稳定的合金。

四、金属及合金的工艺性能

金属及合金的工艺性能是指铸造性、可锻性、可焊性和切削加工(机械加工)性等。

1. 金属及合金的铸造性: 金属及合金的铸造性基本上决定于金属的流动性、收缩性和偏析趋向。流动性是指金属及合金充满铸型的能力。收缩性是指凝固时和冷却时金

属体的收缩。偏析趋向是指金属在凝固时所造成的内部各处化学成分不均匀现象。例如灰口铸铁具有优良的铸造性，即良好的流动性，较少的收缩和偏析；而铸钢的流动性较铸铁较低，其收缩性和偏析趋向较为铸铁严重。各种金属及合金的不同铸造性，对此在进行铸造零件设计时，应加仔细地考虑。

2. 金属及金属的可锻性：金属的可锻性是指金属在受外力作用下变形而不损坏的能力。金属及合金能在热的状态或冷的状态下具有可锻性。例如钢在高温时具有优良的可锻性，黄铜及铝合金在冷的状态下（不加热情况）也具有优良的可锻性，而青铜的可锻性较差，铸铁几乎没有。

3. 金属及合金的可焊性：用局部加热金属的方法，使两块金属接触部分达到熔化或塑性状态，然后加压力或不加压力使它们熔焊在一起，造成坚强的接头。金属及合金的这种性能称为可焊性，低碳钢具有优良的可焊性；铸铁、铜合金和铝合金的可焊性则相当的差。

4. 金属及合金的切削加工性：金属及合金的切削加工性是指金属及合金容易被切削工具进行切削的性质；也即允许以高的切削速度，较低的切削力，加工而得到良好表面光洁度的性质。这与金属及合金的硬度、强度、导热度、晶粒的大小、合金元素的成分以及金属的结晶组织等很多因素有关。铸铁、铜合金、铝合金均有较好的切削加工性，钢则比较困难。

第一章 金属及合金的基本理论

第一节 金属的结晶

一切固体可分为晶体与非晶体。非晶体的特点是原子排列不规则并很紊乱。一切金属及合金均为晶体，即原子按一定的几何形状排列成结晶格子。图1—1表示金属结晶格子原子排列示意图。

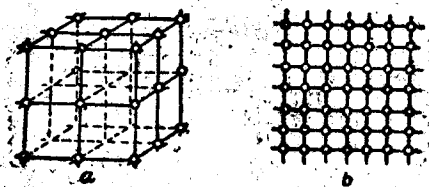


图1—1 金属结晶格子中原子排列位置简图

a—空间立体形状；b—平面形状

一、金属的晶格型式

金属结晶格子有各种不同的形状，其原子排列情况与金属的本性有关。最常见的金属晶格型式有下列三种：

1. 体心立方晶格： α 铁（存在于 910°C 以下和 $1390\sim 1535^{\circ}\text{C}$ 之间时）、锰、铬、钒、钼、钨等金属具有这样的晶格。
2. 面心立方晶格： γ 铁（存在于 $910\sim 1390^{\circ}\text{C}$ 之间时）、铝、铜、铅、金、银等金属具有这样的晶格。
3. 密集六方晶格：锌、镁、镉、钴、铍等金属具有这样的晶格。以上三种晶格的模型如图1—2所示，其上的圆球代表原子。

晶格中原子间的距离，也即晶格中棱边的长度 a ，称为晶格常数。晶格常数的测量单位为埃（ $\text{\AA}$ ）， $\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米。

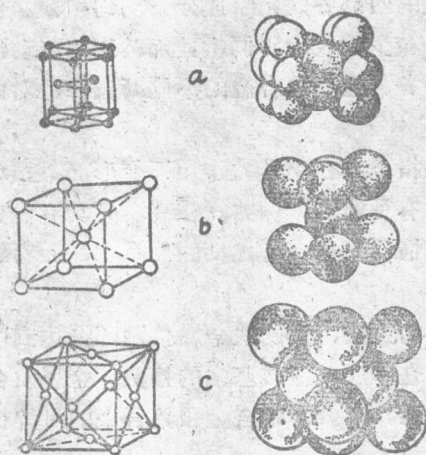


图 1—2 金属晶格模型图

a—体心立方晶格；b—面心立方晶格；

c—密排六方晶格

结晶格子中的原子并不是完全静止不动的，而是按一定的振幅振动着。温度升高，振幅增大，也即原子活动能力增强。这对于金属在高温时组织和性质的变化，有着重大的影响。

二、金属结晶过程

金属由液态转变为固态而形成晶体的过程称结晶。

金属结晶的过程首先是产生一些晶核。这些晶核可能是一些聚集在一起的，按一定几何形状排列的原子所形成的、初生单位晶格（晶胞）；也可能是原来金属中的，或后来加入金属中的一些杂质质点。这些晶核成为结晶过程继续发展的基础。围绕着晶核，金属原子继续地按一定几何形状排列其上，使结晶格子得

以发展长大，形成晶轴，如图 1—3 所示。此后晶轴继续长大，并在轴上形成许多枝芽，晶体发展成树枝状。结晶格子长大的同时，又出现新的晶核，新晶核也在发展长大（如图 1—4，a，b）。这些晶体同时发生不同程度的长大（如图 1—4，c、d）。这样就很自然地，当其扩展到相邻的晶体互相抵触时，继续长大就不可能了，结晶的扩展只得在晶体空隙间继续进行（如图 1—4，e）。当全部晶体均相抵触时，结晶的过程也即终止，而最后形成金属的结晶体（如图 1—4，f）。

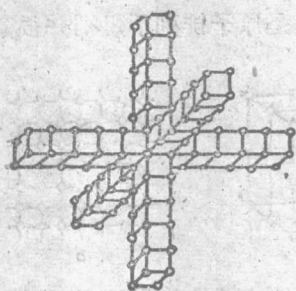


图 1—3 结晶扩展长大的示意图

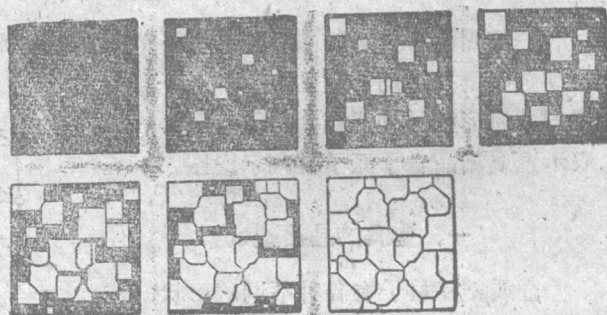


图 1—4 结晶过程示意图

在上述的情况下，所形成的晶体的外形是不规则的，其内部晶格方向排列却是一致的。这种晶体称为晶粒。晶粒之间的接触面称为晶界。固态金属是由大量的大小、形状、晶格排列方向均不相同的晶粒组成的多晶体。图 1—5 表示工业铁（铁素体）的显微组织图，在高放大倍数的金相显微镜下，可以很清晰地看出晶粒和晶界。

在晶界处结晶格子排列方向混乱，互相交错咬合，这样就加强了晶界处的机械阻力。另一方面，晶界是在结晶过程最后阶段形成的，所以在晶界内，由于金属的体积收缩，形成很小的缩孔。此外，金属中常含有若干不溶于液体金属的和熔点较低的杂质，在结晶过程中，受结晶扩展作用的排挤，最后也集中在晶界处。

三、冷却曲线

要研究金属的结晶过程，必须运用热分析法作出液体金属冷却凝固时的冷却曲线（即温度随时间而变的曲线）。热电偶插在液体金属中，然后使金属逐渐冷却，观察温度下降与时间的关系，将测得的温度与时间在时间—温度坐标上作出图形，便得到冷却曲线。

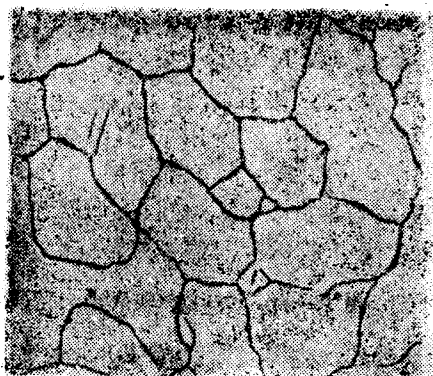


图 1—5 工业铁显微组织图
($C < 0.01\%$) 铁素体 ($\times 400$)

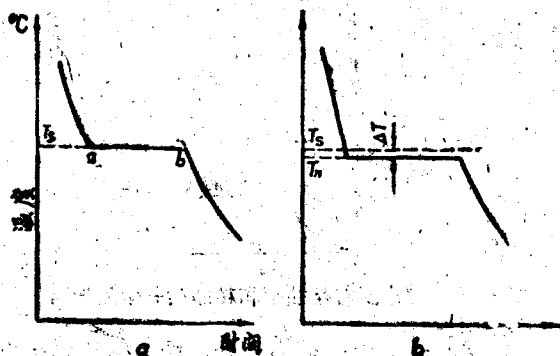


图 1—6 纯金属的冷却曲线

如图 1—6 是纯金属的冷却曲线。图 1—6, a 说明：液体金属冷却时，起初，温度是均匀地下降的。当冷至凝固温度时，液体金属开始结晶，温度不再下降，曲线中出现一段水平线段。这是因为液体金属在结晶过程中放出结晶潜热的缘故。结晶过程由 a 延到 b 点，在 b 点结晶完毕，液体金属全部转变为固态。此后，温度又逐渐下降。

实际上，冷却曲线应如图 1—6, b 所示。液体金属冷却至凝固温度 t_s 时，并未开始结晶，而是冷却至某温度 t_n 时才开始结晶。液体金属全部结晶凝固后，温度又逐渐下降。其中 $t_s - t_n$ 的温度差叫做过冷度。

四、晶粒的粗细及影响因素

单位时间内，在单位体积中所产生的晶核数目称为生核率，其单位为 $\frac{1}{\text{毫米}^3 \cdot \text{秒}}$ 。

围绕晶核扩展的结晶长大速度称为结晶生长率（以分数 $\frac{\text{厘米}}{\text{分}}$ 表示）。液体金属凝固时，如果冷却速度慢，也即过冷度小时（冷却速度常以过冷度 ΔT 表示），则晶核出现数目不多，相对的结晶长大速度较大，因而获得较粗大的晶粒。反之，如果冷却速度很快，也即过冷度大时，晶核出现数目激增，而结晶长大速度仍保持不变，则形成的晶粒较细小。它们的关系如图 1—7 的曲线所示。

晶粒的粗细与金属的机械性质有关。细小的晶粒，晶界较多，连锁力强，因而金属的机械性质较高。相反，粗大晶粒，金属的机械性质较低。

固态下金属的晶粒，如在高温停留，也会继续长大。这是由于在高温作用下，金属原子活动能力增强，促使晶粒互相拼合，这样晶粒逐渐长大。温度愈高，停留时间愈

久，晶粒长大愈严重，晶粒愈粗大，严重地降低其机械性质。

为了提高金属的机械性质，可在熔化的金属液体中加入变质剂，让其起附加(人工)晶核的作用，因而可得到细小晶粒的金属。也可用加速冷却、热处理和压力加工的方法，使固体金属粗大晶粒得到细化。这些具体方法和晶粒细化的理论，将在金属工艺学铸造生产和压力加工两篇中，以及金属学及热处理课程中详加叙述。

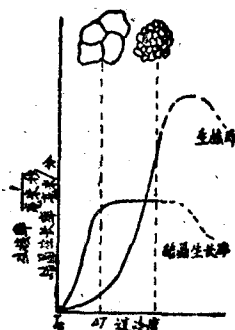


图 1-7 过冷度对生核率和晶体生长率的影响

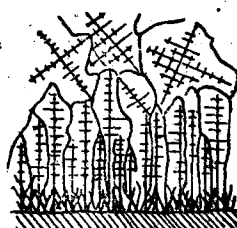


图 1-8 钢锭结晶分布图

在结晶过程中，结晶沿各方向长大的情况是不一致的，主要是沿热传导方向迅速长大，并形成树枝状结晶。图 1-8 为钢锭结晶分布情况，表皮一层由于冷却快形成细晶粒；下一层由于垂直模壁方向传热快形成长轴的柱状晶；而中心则由于冷却较慢，形成等轴的树枝状晶。

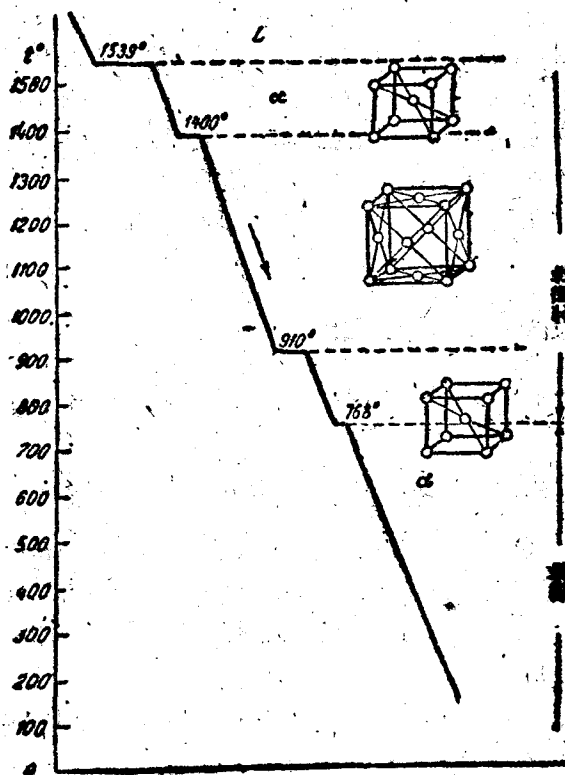


图 1-9 铁的冷却曲线

五、金属的同素异构转变

某一金属在不同温度下具有不同的晶格时叫做同素异构(形)性。由一种晶型转变为另一种晶型的过程叫做同素异构转变。

例如铁在1535°C至1390°C时具有体心立方晶格(δ -Fe)，在1390°C至910°C之间具有面心立方晶格(γ -Fe)，在910°C以下至室温时是体心立方晶格(α -Fe)。图 1-9 是铁的冷却曲线。

在铁的冷却曲线上，770°C时的水平线段不是同素异构转变，而是磁性变化；即铁(α -Fe)加热至770°C以上时，磁性消失，低于770°C时，则有磁性。

发生同素异构转变时，其性能也改变，如 α -Fe是不溶解碳的