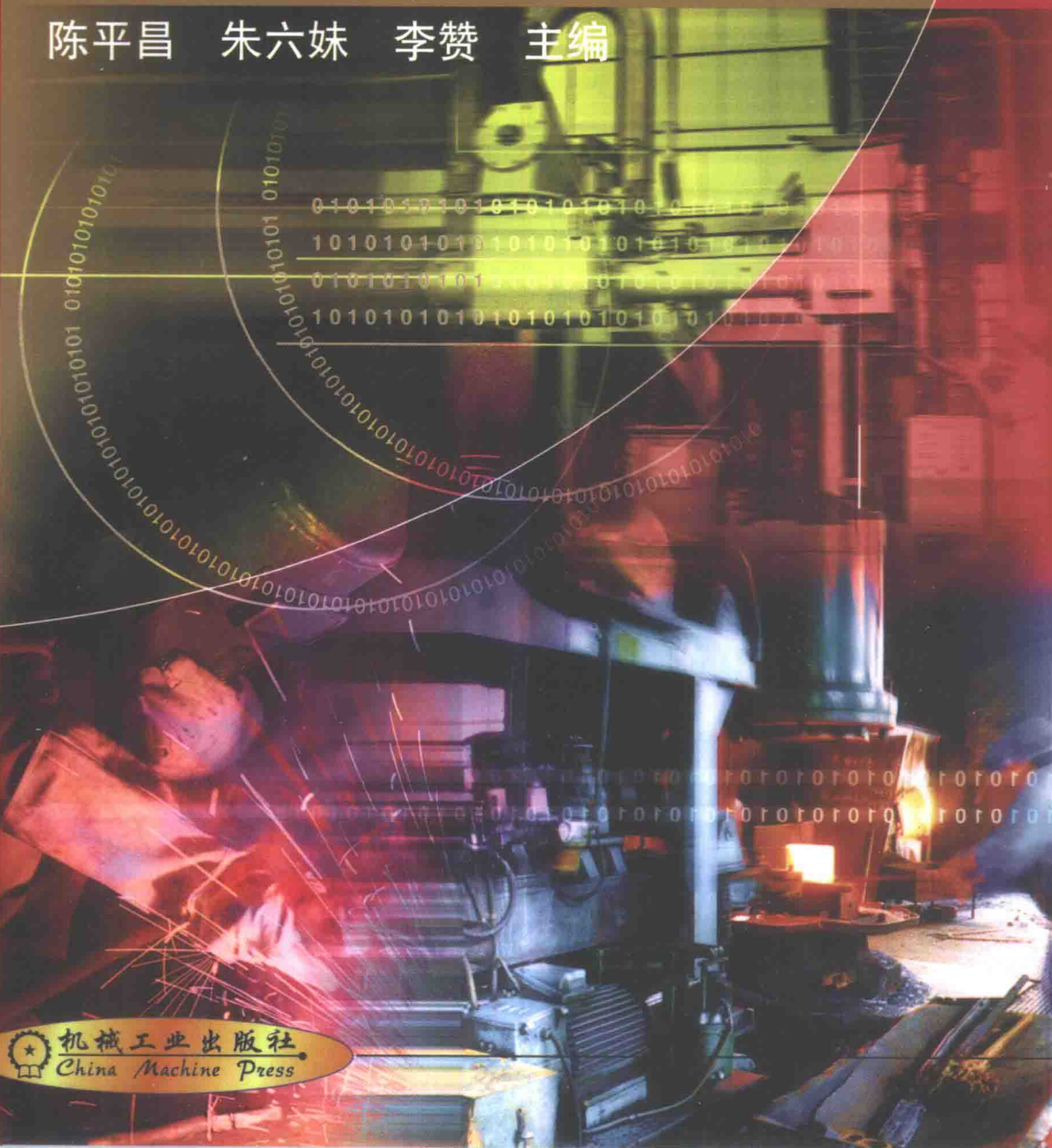


普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

材料成形原理

陈平昌 朱六妹 李赞 主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材

材 料 成 形 原 理

主编 陈平昌 朱六妹 李 赞
参编 刘耀辉 任振安 于思荣
 周小平 温 彤
主审 黄志光 常志华



机 械 工 业 出 版 社

本教材是“材料成形及控制工程”专业的理论基础教材,本教材包括原《铸件成形理论》、《金属塑性成形原理》和《金属焊接冶金原理》的基础内容,同时引入了近代有关的新成果。学生学完本课程后,对材料成形过程及其基本原理有实质性的深入理解,为研究新材料、新工艺技术奠定理论和实践基础。本教材主要包括液态金属凝固学、材料成形过程中的化学冶金学及质量控制、金属的塑性成形力学等。本教材的主要读者对象为工科高等院校材料成形及控制工程专业及机械类本科生和教师。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理/陈平昌等主编. —北京:机械工业出版社, 2001.8

普通高等教育材料成形及控制工程专业改革教材
ISBN 7-111-09113-2

I. 材... II. 陈... III. 液态金属—凝固理论—高等学校—教材 IV. TG111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 051460 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王霄飞 季顺利 版式设计:霍永明 责任校对:张佳
封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·11.75 印张·457 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

普通高等教育材料成形及控制工程专业 改革教材编审委员会

主编单位：华中科技大学

策划单位：华中科技大学 机械工业出版社

顾问：杨叔子 院士

周济 院士

崔崑 院士

参编单位：西北工业大学

武汉大学

重庆工业大学

湖北工学院

太原重型机械学院

大连理工大学

湖北汽车工业学院

机械科学研究院武汉材料保护研究所

审稿单位：武汉大学

武汉理工大学

合肥工业大学

西安交通大学

福州大学

(排名不分先后)

武汉理工大学

吉林大学

太原理工大学

华南理工大学

武汉科技大学

上海交通大学

武汉凯奇公司

东南大学

山东大学

中国科学院计算所

浙江大学

上海交通大学

序

我国社会主义现代化建设浪潮不断高涨，高等教育与教学改革不断深入发展，长江后浪推前浪。

培养基础宽、素质高、能力强、适应面广、具有创新能力的人才，教材建设是一大关键。新的专业目录颁布以来，经过摸索和探讨，对一些改革力度大的专业组建和教材建设，各高校的观点和看法逐渐趋于大同。在这个基础上，编写一套适合于普通高等教育“材料成形与控制工程”专业系列改革教材是适时的，也是非常必要的。

该系列教材内容合理而先进，充分体现了专业重心下移，着重于专业的基础性、共性课程的设置。而反映铸、锻、焊、热处理专业方向性的课程，绝大部分作为选修课程设置。其主要特点，一是系列教材覆盖面宽，不仅覆盖了4个老专业近40门专业教材的内容，而且还延伸到材料热加工的最新技术及发展的前沿；二是内容精炼，选材新颖，结构合理，12门教材平均每门不足30万字，仅为4个老专业教材篇幅的1/4~1/5，且近一半的内容选自近10余年来的科研成果、国内外文献和国外原版教材；三是12门专业主干教材中，有4门是与计算机和信息技术相结合的教材，突出了计算机和信息技术的学习与应用。

我相信，通过这套专业系列教材的学习，可使材料成形与控制工程专业的学生较为充分掌握系统的专业基础与共性知识，在先进的材料加工新技术和发展趋势方面较好了解乃至有所掌握，在计算机应用和外语水平方面能形成优势，这有利于培养较高的综合素质和较强的创新能力。

当然，任何事情不能一蹴而就。这套专业系列教材也有待于在教学实践中不断修改与完善。好的开始等于成功的一半。我祝愿在著者与读者的共同努力下，这套教材有一个更为美好的明天，谨此为序。

中科院院士 杨叔子

2000年8月

前 言

为了适应国家教育改革形势的发展,根据教育部最新颁布的新的专业目录,全国大部分工科院校已将原热加工专业的铸造、焊接、锻压、热处理四个专业合并为材料成形及控制工程大专业。1998年12月,教育部热加工专业教学指导委员会在哈尔滨召开年会,探讨了专业改造和教材建设的问题。

推行专业改革,为社会培养综合素质高、知识结构全面的栋梁之材,在很大程度上取决于教材建设。经过摸索和探讨,对材料成形及控制工程专业的改造和教材建设,各高校观点和方法逐渐趋于大同,在这个基础上,编写一套普通高等教育材料成形及控制工程专业系列教改教材是适时的。为此,机械工业出版社教材编辑室成立了以华中科技大学为牵头单位的系列教改教材编审委员会,共同组织编写材料成形及控制工程专业系列教材。

《材料成形原理》是“材料成形及控制工程”专业的理论基础教材,着重运用所学的基础理论及专业基础理论知识阐明液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)和连接成形(焊接)等基本材料成形技术的内在规律和物理本质,突出共性,同时也兼顾个性,既包括原教材《铸件形成理论》、《金属塑性成形原理》和《金属焊接冶金原理》的基础内容,又尽可能引入近代有关的新成果。学生学完本课程后对材料成形过程及其基本原理有实质性的、深入的理解,为研究新型材料、开拓新型的材料成形技术及提高材质、成形产品的数量和质量奠定坚实的理论基础和实际知识。

本书共分为三篇,第一篇 液态金属凝固学;第二篇 材料成形过程中的化学冶金学及质量控制;第三篇 塑性成形力学。

本书由华中科技大学陈平昌、朱六妹、李赞主编。参加编写的有吉林大学刘耀辉、任振安和于思荣,湖北工学院周小平,重庆大学温彤。编写分工如下:第一~七章由陈平昌编写,第八章由刘耀辉编写,第九章由任振安编写,第十章由于思荣编写,第十一、十二章由朱六妹编写,第十三~十五章由周小平编写,第十六~十八和第二十一章由李赞编写,第十九、二十章由温彤编写。

本书由华中科技大学黄志光教授、武汉理工大学常志华教授主审。上海交通大学黄良余教授、武汉大学施再湘教授和中南大学彭大暑教授从不同角度提出了宝贵的意见,在此致谢。

本书可供大学本科生和研究生作为教材或参考书;也可供相关专业的工程技术人员参考。

由于本书编者的水平有限，时间紧迫，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

序

前言

第一篇 液态金属凝固学	1
第一章 导论	1
第一节 液态金属凝固学的研究对象	1
第二节 液态金属凝固学的发展	2
第三节 凝固学与材料成形	3
第二章 液态金属的结构和性质	5
第一节 固体金属的加热、熔化	5
第二节 液态金属的结构	6
第三节 液态金属的性质	10
第四节 液态金属(合金)的流动性及充型能力	17
第五节 合金的流变性及流变成形	20
第三章 液态金属(合金)凝固热力学和动力学	27
第一节 液态金属(合金)凝固热力学	27
第二节 均质形核	30
第三节 异质形核	32
第四节 纯金属晶体长大	35
第四章 液态金属(合金)凝固过程中的传热、传质及液体流动	41
第一节 凝固过程中的传热	41
第二节 凝固过程中的传质	53
第三节 凝固过程中的液体流动	59
第五章 单相合金的凝固	64
第一节 液态合金凝固过程中的“成分过冷”	64
第二节 “成分过冷”对单相合金凝固过程的影响	67
第六章 多相合金的凝固	74
第一节 共晶合金的凝固	74
第二节 偏晶合金和包晶合金的凝固	86
第七章 金属基复合材料的凝固	88

第一节	概述	88
第二节	金属基人工复合材料的凝固	89
第三节	自生复合材料的凝固	92
第八章	铸件凝固组织的形成及控制	97
第一节	铸件宏观凝固组织的特征及形成机理	97
第二节	铸件宏观凝固组织的控制	102
第九章	焊缝及其热影响区的组织和性能	108
第一节	焊接及其冶金学特点	108
第二节	焊缝金属的组织与性能	111
第三节	焊接热影响区的组织与性能	118
第十章	液态金属在特殊条件下的凝固及成形	124
第一节	快速凝固	124
第二节	微重力凝固	127
第三节	超重力凝固	129
第四节	定向凝固	130
习 题		136
参考文献		140
第二篇	材料成形过程中的化学冶金学及质量控制	143
第十一章	材料成形过程中的化学冶金学	143
第一节	导 论	143
第二节	液态金属与气体界面的反应	146
第三节	液态金属与熔渣的反应	158
第四节	液态金属与铸型界面的反应	172
第五节	合金化	175
第六节	工艺条件对冶金反应的影响	177
第十二章	应力、变形及裂纹	181
第一节	内应力	181
第二节	变 形	191
第三节	裂 纹	199
第十三章	气孔与夹杂	226
第一节	气孔的种类	226
第二节	气孔的形成机理	226
第三节	影响气孔的因素及防止措施	229
第四节	夹杂物	231

第十四章 缩孔与缩松	238
第一节 缩孔与缩松的种类	238
第二节 缩孔与缩松的形成机理	244
第三节 影响缩孔与缩松的因素及防止措施	247
第十五章 化学成分的不均匀性	252
第一节 概 述	252
第二节 微观偏析	252
第三节 宏观偏析	255
第四节 焊接接头中熔合区的化学成分不均匀	261
习 题	262
参考文献	264
第三篇 塑性成形力学	265
第十六章 运动与变形	267
第一节 笛卡儿张量的定义及其代数运算	267
第二节 二阶张量	271
第三节 运动的描述	274
第四节 应变张量	277
第五节 应变速率张量、应变增量张量	280
第十七章 应力分析	284
第一节 柯西应力张量	284
第二节 主应力和主方向、剪应力的极值	286
第三节 应力偏张量、等效应力	288
第四节 动力学基本方程	290
第五节 虚功原理与虚功率原理	292
第十八章 屈服准则	295
第一节 初始屈服准则	295
第二节 真实应力—应变曲线与材料模型	298
第三节 后续屈服准则(加载函数)	301
第十九章 塑性应力—应变关系(本构方程)	304
第一节 弹性应力—应变关系	304
第二节 塑性变形时应力—应变关系的特点	306
第三节 塑性变形的增量理论(流动理论)	307
第四节 塑性变形的全量理论(形变理论)	310
第五节 最大塑性功原理	311

第二十章 金属的塑性	313
第一节 塑性与塑性指标	313
第二节 影响金属塑性的因素	315
第三节 提高金属塑性的主要途径	329
第四节 金属的超塑性	330
第二十一章 塑性力学的应用	340
第一节 金属塑性加工中的摩擦	340
第二节 主应力法及其应用	341
第三节 塑性成形问题的滑移线解法	345
第四节 求解塑性成形问题的上限法	351
习 题	359
参考文献	365

第一篇 液态金属凝固学

第一章 导 论

第一节 液态金属凝固学的研究对象

什么是凝固？就宏观意义而言，物质从液态转变成固态的过程称为凝固。从微观意义上说是激烈运动的液体原子回复到规则排列的过程称为凝固。凝固现象在自然界和工程领域广为存在。从水的结冰到火山岩浆的固化；从材料的成形如液态成形(铸造)、焊接成形和激光处理等材料加工技术，到半导体、功能材料及微晶、非晶等新材料的研制，都经历凝固过程。人类使用的大部分金属制品必须经历过一次或多次的熔化和凝固过程。

液态金属凝固学就是研究液态金属(合金)转变成固态金属(合金)这一凝固过程的理论及技术，定性地特别是定量地揭示其内在联系和规律，发现新的现象，探求未知参数，开拓新的凝固技术和工艺。凝固学不仅是材料成形技术的基础，同时也是近代新型材料开拓和制备的基础。

液态金属凝固学的理论基础是物理化学、金属学、传热学、传质学和动量传输学等，在此基础上，阐述液态金属的结构和性质、晶体的生核及长大、宏观组织及其控制等内容。

影响液态金属凝固过程的主要因素是化学成分，不同的成分具有不同的凝固特性。依照相图可以对凝固特性进行预测。冷却速率是影响凝固过程的主要工艺因素，对凝固组织有着举足轻重的影响。如普通工业条件下的冷却速率为 $10^{-3} \sim 10^2$ °C/s，获得晶体组织；特殊条件下，冷却速率可达 $10^6 \sim 10^9$ °C/s，可获得非晶态组织。此外，液态合金的结构和性质、冶金处理(如孕育处理、变质处理、微合金化等)及外力(如电磁力、重力、离心力、压力、机械力等)的作用，对液态金属的凝固也具有重要影响。

第二节 液态金属凝固学的发展

据对出土文物考证,我国冶铸技术已有 5000 多年的历史:前 3000 年为青铜器时代,后 2000 年为铁器时代。铜器和铁器的制造是一个典型的熔化、凝固过程。商朝“钟鸣鼎食”是权贵的象征。1978 年湖北随县出土的曾侯乙青铜器编钟,64 件共分 8 组,可演奏中外名曲,音律准确和谐,音色优美动听。它们是距今 2400 多年前战国初期铸造的。北京大钟寺的永乐大钟,是明永乐 18 年(公元 1418~1422 年)铸造的,重 46t,高 5.84m,外径 3.3m,内径 2.9m。钟体内外铸满笔划清晰的经文约 22700 个文字。其钟声幽雅悦耳,可传数十里,堪称世界之最。由此可见,当时对青铜的化学成分和凝固过程的控制已达到很高的水平。

尽管如此,在古代对液态金属的凝固控制只是停留在经验的基础上。近代凝固理论大约经历了以下几个阶段:20 世纪 60 年代前诞生了经典的凝固理论。该理论认为凝固首先是成核,接着是核心长大直至成为固态。在多伦多大学 B. Chalmers 的指导下,许多著名的凝固学家脱颖而出。他们在对凝固界面附近溶质分析求解的基础上,总结出“成分过冷”理论,并提出了可操作性的成分过冷判据;首次将传热和传质耦合起来,研究其对晶体生长方式和形态的影响。Flemings 等从工程的角度出发,研究了两相区内液相流动效应,提出了局部溶质再分配方程等理论模型,推动了凝固学的发展。捷克的 Chvorinov 通过对大量铸件凝固冷却曲线的分析,引入了铸件模数这一概念,建立了求解铸件凝固层厚度和铸件凝固时间的数学方程,导出了著名的平方根定律。该定律仍是今日铸造工艺设计的重要理论依据之一。20 世纪 60 年代后的较长一段时间内,研究的重点放在经典理论的应用上,以提高材料的质量,降低产品的成本,以使用低的消耗获得优质产品。同时,出现了快速凝固、定向凝固、等离子熔化技术、激光表面重熔技术、半固态铸造、扩散铸造、调压铸造等先进的凝固技术和材料成形方法,累积了大量的凝固过程参数,为凝固学的进一步发展奠定了基础。近代,凝固学的发展进入了新的历史时期。其显著的特点是,对凝固过程的认识逐渐从经验主义中摆脱出来,对经典理论的局限性有进一步认识。日本的大野笃美在总结前人经验的基础上,做了大量的试验研究,提出了晶粒游离和晶粒增殖的理论,从而使人们从以前用静止的观点发展到用动态的观点来研究和分析凝固过程。特别令人感兴趣的是,由于计算机和计算技术的发展,能定量的描述液态金属(合金)的凝固过程,可以对凝固组织和凝固缺陷进行预测,以便能合理地控制凝固过程,大幅度节约材料和能源,以低的价格获得优质产品。如大型电站水轮机主轴、转子、叶片等类铸件,性能要求高、质重件大,若报废,将带来重大损失。采用对凝固过程的数学模拟和计算机辅助设计的方法能有效地控制凝固过程,以最小的

投入，获得大的产出。在此基础上，出现了许多新的凝固理论和模型。它们将温度场、应力场、流动场耦合起来进行研究，其结果更接近于实际。国际上已出现了许多商品化的凝固模拟软件，它们在科研和生产中发挥着重要作用。国内紧随其后，研究开发的凝固模拟软件，在科研和实际生产中得到了较广泛的应用。

国内学者近年来在凝固学方面取得了很大的进展，中国已成为国际凝固过程研究的重要成员之一。西北工业大学凝固技术重点实验室，发现了凝固组织形态选择的时间相关性和历史相关性的现象，并用实验证实了一定条件下枝晶生长间距也不是唯一的。中国科学院沈阳金属研究所快速凝固及非平衡合金国家重点实验室，在超高压条件下，研究非晶的形成规律时，发现了新的亚稳定相和具有分形结构的自组织。

现代凝固学的发展，在近代材料成形技术和新材料的研制与开发中发挥着重要的作用。随着近代科学技术的不断发展，对新材料和新的材料成形技术提出了更高的要求，反过来又推动着凝固学的发展。凝固学，特别是金属凝固学是一门不断向前发展的新学科，有许多的奥秘和规律尚待去揭开。

第三节 凝固学与材料成形

液态成形(铸造)、连接成形(焊接)、塑性成形(锻造)、粉末成形(粉末冶金)及切削成形仍是现代材料成形的主要方法。凝固学在这些材料成形技术中起着直接或间接的作用。

液态成型是将液态金属浇入铸型后，经凝固和冷却后获得具有一定形状和性能的铸件和铸锭的加工方法。如前所述，凝固过程对铸件的质量起着关键的作用。

连接成形方法有熔化焊、压焊、钎焊及钎焊。熔化焊，包括近代的激光焊，是当代主要的焊接方法。熔化焊是在极短的时间内将金属熔化并随后凝固而形成接头的一种加工技术。焊接的质量在很大程度上由焊缝的凝固特性来决定，研究焊缝的凝固规律已成为重要的理论课题。

塑性成形是金属(合金)在热态或冷态时，于外力作用下使其产生塑性变形而达到具有一定形状的产品的加工方法。它虽与液态金属凝固无直接关系，但有重要的间接关系。塑性加工所用的坯料都是经过熔化和凝固而获得的。凝固组织，特别是凝固过程中形成的夹杂、裂纹、偏析等对塑性成形会造成严重的后果。再说近代的新型的材料成形技术，如喷射锻造与凝固学直接联系在一起。

粉末成形是冶金学的一个分支，是将金属粉末或非金属粉末经模压烧结而成产品的加工方法，粉末是经熔化和凝固而成的。粉末的生产方式，如雾化、凝固的方式决定着粉末的质量，从而影响粉末冶金产品。

金属切削成形所用的坯料，都是熔化和凝固后的产品。例如，铸铁件在现代工程中仍占有很大比例，如果铸铁件在凝固过程中缺乏合理控制，凝固速度过快，铸件组织中会出现较多的渗碳体(Fe_3C)，至使铸件切削困难；反之，凝固速度太慢，铸件组织将会粗大化，切削后粗糙度达不到要求。更为重要的是，合理的凝固过程与产品的性能及其使用安全性和寿命是紧密联系在一起。

材料成形的最终目的是高效、低耗、无污染地制造出高性能的符合人类不断增长要求的产品。一次性地形成“净终形”产品越来越引起人们的重视，而这种现代最新的材料成形方法与凝固学的关系极其密切。可以预料，凝固学的发展将孕育和产生更符合社会需要的材料成形技术和性能更优异的新型材料和产品。

第二章 液态金属的结构和性质

凝固是液态金属转变成固态金属的过程，因而液态金属的特性必然会影响凝固过程。研究和了解液态金属的结构和性质，是分析和控制金属凝固过程必要的基础。

近代用原子论方法研究液态金属，并采用经典液体统计力学的各种理论探讨它，对液态金属结构有了进一步的认识，在一定范围和程度上能定量地描述液态金属的结构和性质。

第一节 固体金属的加热、熔化

物质是由原子构成的，原子之间存在着相互作用力，即库仑引力和库仑斥力，如图 2-1 所示。当原子间的距离为 R_0 时，原子受到的引力与斥力相等，故处于平衡状态。而向左和向右运动都会受到一个指向平衡位置的力的作用。于是原子在平衡位置附近做简谐振动，维持晶体的固定结构。当温度升高时，原子振动能量增加，振动频率和振幅增大。以双原子模型为例，假设左边的原子被固定不动而右边的原子是自由的，则随着温度的升高，原子间距将由 $R_0 \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4$ ，原子的能量也不断升高，由 $W_0 \rightarrow W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow W_4$ ，即产生膨胀，如图 2-2 所示。显然，原子在平衡位置时，能量最低；而两边能量较高，这称之为

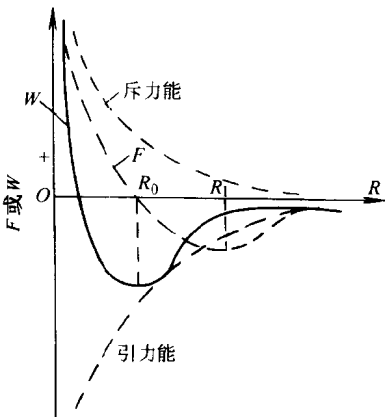


图 2-1 原子间的作用力

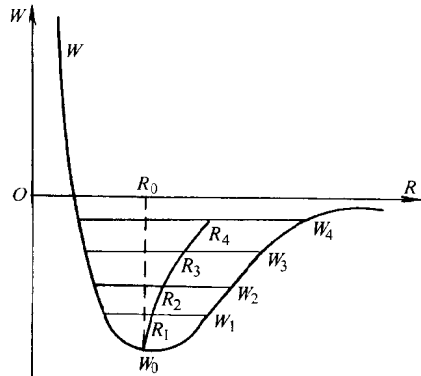


图 2-2 加热时原子间距和原子势垒的变化

势垒。势垒的最大值为 Q ，称之为激活能（也称结合能或键能）。势垒之间称之为势阱。原子受热时，若其获得的动能大于激活能 Q 时，原子就能越过原来的势垒，进入另一个势阱。这样，原子处于新的平衡位置，即从一个晶格常数变成另一个晶格常数。晶体比原先尺寸增大，即晶体受热而膨胀。

若对晶体进一步加热，则达到激活能值的原子数量也进一步增加；当这些原子的数量达到某一数量值时；首先，在晶界处的原子跨越势垒而处于激活状态。以致能脱离晶粒的表面，而向邻近的晶粒跳跃，导致原有晶粒失去固定的形状与尺寸。晶粒间可出现相对流动，称为晶界粘性流动。此时，金属处于熔化状态。金属被进一步加热，其温度不会进一步升高，而是晶粒表面原子跳跃更频繁。晶粒进一步瓦解为小的原子集团和游离原子，形成时而集中，时而分散的原子集团、游离原子和空穴。此时，金属从固态转变为液态。金属由固态变成液态，体积膨胀约 3% ~ 5%。而且，金属的其他性质，如电阻、粘性也会发生突变。在熔点温度的固态变为同温度的液态时，金属要吸收大量的热量，称为熔化潜热。

固态金属的加热熔化完全符合热力学条件。外界提供的热能，除因原子间距增大体积膨胀而做功外，还增加体系的内能。在恒压下存在如下关系式

$$E_q = d(U + pV) = dU + p dV = dH \quad (2-1)$$

式中， E_q 为外界提供的热能； U 为内能； $p dV$ 为膨胀功； dH 为热焓的变化，即熔化潜热。

在等温等压下由式(2-1)得熔化时熵值的变化为

$$dS = \frac{E_q}{T} = \frac{1}{T}(dU + p dV) \quad (2-2)$$

dS 值的大小描述了金属由固态变成液态时，原子由规则排列变成非规则排列的紊乱程度。

第二节 液态金属的结构

从固态金属的熔化过程可看出，在熔点附近或过热度不大的液态金属中仍然存在许多的固态晶粒，其结构接近固态而远离气态，这已被大量的试验数据所证实。以下从几方面给以阐述，并在此基础上提出液态金属的结构模型。

一、液态金属的热物理性质

金属的汽化潜热远大于其熔化潜热，某些金属的物理性质如表 2-1 所示。以铝为例，其汽化热是熔化热的 27 倍，铁约 22 倍。这意味着固态金属原子完全变成气态比完全熔化所需的能量大得多。即对气态金属而言，原子间结合键几乎全部被破坏，而液态金属原子间结合键只破坏了一部分。