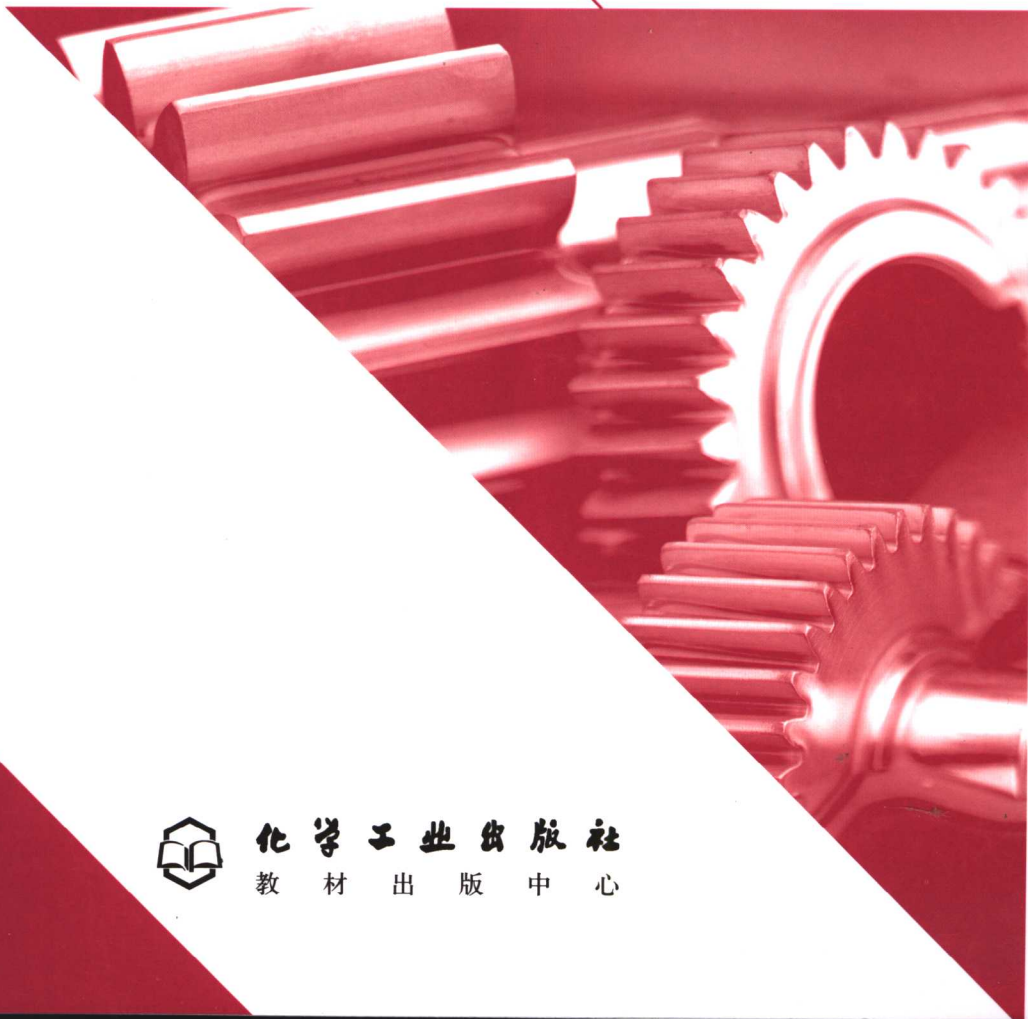


高等学校教材

金属材料 成型原理

雷玉成 汪建敏 贾志宏 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

金属材料成型原理

雷玉成 汪建敏 贾志宏 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

《金属材料成型原理》是高等学校“材料成型与控制工程”专业的技术基础课教材之一。本书系统阐述金属材料加工中液态成型、塑性成型、焊接成型三大成型过程的基本原理。涉及液态成型基础、液态金属的结晶、结晶组织的形成与控制、凝固缺陷的产生及其控制,金属的塑性及变形抗力、金属塑性成型中的基本定律以及塑性变形特点、金属塑性变形的力学基础、塑性成型过程的力学分析方法,熔化焊的热过程、熔化焊的冶金过程、熔化焊接头的组织与性能、焊接冶金缺陷等内容。本书以金属材料的铸造、锻压、焊接等成型方法为主线,力求在阐述其基本原理的同时做到理论联系实际。全书重点突出,具有很强的科学性、新颖性和实用性。

本书是高等学校“材料成型与控制工程”专业和机械类本科生的通用教材,也是相关专业研究生及工程技术人员开卷有益的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料成型原理/雷玉成,汪建敏,贾志宏主编.
北京:化学工业出版社,2006.7
高等学校教材
ISBN 7-5025-8769-1

I. 金… II. ①雷…②汪…③贾… III. 金属材料-
成型 IV. TG39

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第072730号

高等学校教材

金属材料成型原理

雷玉成 汪建敏 贾志宏 主编

责任编辑:杨菁 陈丽

文字编辑:余纪军

责任校对:宋玮

封面设计:潘峰

*

化学工业出版社
出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 558千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8769-1

定价:36.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

材料是现代人类物质文明的基础，它支撑着其他新技术的发展，已成为现代经济发展的支柱。随着航空、航天、海洋工程、生物工程和环境保护工程等技术的发展，传统材料的性能不断得到完善，大量新材料也不断涌现。但材料必须经过可靠的加工成型才能成为工程构件。因此，材料加工成型是工程结构材料应用的前提。

1998年，教育部对本科专业进行了调整，将原来的“铸造工艺与设备”、“锻压工艺与设备”、“焊接工艺与设备”等专业合并为“材料成型与控制工程”新专业。此后，各高校相应地都对教学计划进行了调整。《金属材料成型原理》一书是为适应新形势下“材料成型与控制”专业的教学改革需要而编写的，它作为一个专业的技术基础课教材来使用，能使学生对材料成型过程及其原理有较深入的理解，为后续专业选修课程奠定扎实的理论基础。

本书主要阐述金属材料加工成型中的液态成型（铸造）、塑性成型（锻压）、连接成型（焊接）过程中的铸件形成原理、塑性成型原理及熔焊原理。在内容安排上，以金属材料的成型技术原理为主线，分别用若干章来阐明铸造、锻压、焊接的基本原理，并在论述中力求做到理论联系实际。

全书十二章。第一至四章讲铸造原理，内容包括：液态金属的结构和性质、液态金属的充型能力及其影响因素、金属凝固过程中的传热和流动；液态金属的结晶、凝固过程中的溶质再分配现象及成分过冷；铸件宏观结晶组织的形成及其影响因素、等轴晶组织的获得和细化及定向凝固、快速凝固等先进凝固技术；偏析、气孔、非金属夹杂物、收缩、应力等凝固缺陷及控制。第五、六、七、八这四章讲锻压原理，内容包括：金属的塑性及变形抗力；金属塑性成型时的摩擦及摩擦定律、金属塑性成型过程中的流动规律及变形特点、金属塑性变形的加工硬化、软化及变形分类、金属塑性变形对组织与性能的影响及控制；塑性变形过程中的应力、应变分析、平面问题和轴对称问题、屈服准则及本构方程等金属塑性变形的力学基础；数学解析法、主应力法、滑移线法、上限法等塑性成型过程的力学分析方法。第九、十、十一、十二这四章讲焊接原理，内容包括：焊接热源、热循环及熔池形成等熔化焊的热过程分析；焊接气体及与金属的相互作用、焊接材料与焊接熔渣、焊接化学冶金反应等熔化焊接化学冶金过程；焊接金属及焊接热影响区的组织与性能；气孔、焊接裂纹等焊接冶金缺陷。

本书由江苏大学材料学院组织相关教师编写，其中第一章至第四章由贾志宏编写，第五章至第八章由汪建敏编写，绪论、第九章至第十二章由雷玉成、梁申勇、朱强编写，全书由雷玉成统稿。

由于作者水平所限，书中不当、错误之处在所难免，敬请读者批评指正，以便修订完善。

编者
2005年9月

目 录

绪论	1
第一章 液态成型基础	5
第一节 液态金属的结构和性质	5
一、液态金属的结构	5
二、黏滞性及其对成型过程的影响	10
三、表面张力及其对成型过程的影响	13
第二节 液态金属的充型能力及其影响因素	16
一、充型能力的概念及与流动性的测定	16
二、影响充型能力的因素及提高充型能力的措施	17
第三节 金属凝固过程中的传热	20
一、数学解析法	21
二、不同界面热阻条件下的温度场	24
三、铸件温度场的测定及动态凝固曲线	25
四、铸件的凝固方式	27
五、铸件的凝固时间	30
第四节 液体金属的流动	32
一、自然对流	32
二、强迫对流	33
思考题	33
第二章 液态金属的结晶	34
第一节 液态金属结晶过程的热力学条件	34
第二节 液态金属的形核过程	35
一、均质形核	35
二、非均质形核	35
第三节 晶体的生长	38
一、晶体生长中固-液界面处的原子迁移	38
二、固-液界面的微观结构	39
三、界面的生长方式和生长速度	41
第四节 凝固过程中的溶质再分配现象	43
一、溶质再分配现象的产生	43
二、平衡分配系数与界面平衡假设	44
三、平衡结晶时的溶质再分配	44
四、非平衡结晶时溶质再分配	45
第五节 单相合金的结晶	51
一、成分过冷的产生	51
二、界面前方过冷状态对结晶过程的影响	54
思考题	59

第三章 结晶组织的形成和控制	61
第一节 铸件宏观结晶组织的形成及其影响因素	61
一、铸件宏观组织特征	61
二、晶粒游离的产生	61
三、表面细晶粒区的形成	63
四、柱状晶区的形成	64
五、内部等轴晶区的形成	64
第二节 等轴晶组织的获得和细化	64
一、合理控制热学条件	65
二、孕育处理	66
三、动态晶粒细化	68
第三节 定向凝固	68
一、定向凝固原理	69
二、定向凝固工艺	69
三、单晶制备	72
四、连续单向凝固技术	72
第四节 快速凝固	73
一、快速凝固原理	73
二、快速凝固制备技术	75
第五节 其他特殊条件下的凝固技术	78
一、微重力凝固	78
二、超重力凝固	78
三、超高压下的凝固	79
思考题	79
第四章 凝固缺陷及控制	80
第一节 化学成分的不均匀性	80
一、微观偏析	80
二、宏观偏析	82
第二节 气孔	84
一、气孔的种类	84
二、气泡的析出	84
三、析出性气孔的形成机理	85
四、反应性气孔的形成机理	86
五、影响气孔的因素及防止措施	87
第三节 夹杂物	88
一、夹杂物的来源及分类	88
二、初生夹杂物的形成及防止措施	89
三、二次氧化夹杂物的形成及防止措施	90
四、偏析夹杂物	90
第四节 缩松与缩孔	92
一、金属的收缩	92
二、铸件的收缩	95
三、缩孔与缩松的形成机理	95

四、灰铸铁和球墨铸铁铸件的缩孔和缩松	97
五、影响缩孔与缩松的因素及防止措施	98
第五节 应力	99
一、应力的形成	99
二、控制应力的措施	101
思考题	101
第五章 金属的塑性及变形抗力	103
第一节 变形及变形的表示方法	103
一、金属的变形	103
二、变形的表示方法	103
三、真变形与相对变形的比较	104
四、变形速率	106
第二节 金属塑性的概念及测定方法	107
一、金属塑性、变形抗力的基本概念	107
二、金属塑性指标测定的方法	107
第三节 影响金属塑性和变形抗力的因素以及提高塑性的主要途径	109
一、金属的自然性质对塑性及变形抗力的影响	110
二、变形温度——速率对塑性及变形抗力的影响	112
三、变形力学条件对塑性及变形抗力的影响	115
四、其他因素对金属塑性的影响	117
五、提高金属塑性和降低变形抗力的基本途径	118
第四节 金属的超塑性	119
一、超塑性的概念和种类	119
二、细晶超塑性的特征	121
三、影响细晶超塑性的主要因素	123
四、超塑性变形时组织的变化和对力学性能的影响	124
五、超塑性成型在金属加工方面的应用	125
思考题	126
第六章 金属塑性成型过程中的流动规律及变形特点	128
第一节 金属塑性成型时的摩擦及摩擦定律	128
一、金属塑性成型中摩擦作用与特点	128
二、摩擦机理与摩擦定律	129
三、影响摩擦系数的主要因素	131
四、塑性成型中的润滑	133
第二节 金属塑性成型过程中的基本规律	134
一、体积不变定律	134
二、最小阻力定律	135
三、不均匀变形	135
四、残余应力	138
第三节 金属塑性变形的加工硬化、软化及变形分类	139
一、加工硬化及硬化曲线	139
二、单向拉伸时的塑性失稳	143
三、金属塑性变形的软化过程	144

四、金属塑性变形分类	148
第四节 金属塑性变形对组织与性能的影响	149
一、冷变形对金属组织与性能的影响	149
二、热变形对金属组织与性能的影响	151
第五节 塑性成型后的组织与性能控制	154
一、原材料及塑性成型过程中常见的缺陷类型	154
二、塑性成型件中的晶粒度	155
三、塑性成型件中的空洞和裂纹	159
四、塑性成型中的折叠	162
思考题	166
第七章 金属塑性变形的力学基础	167
第一节 应力分析	167
一、外力和应力	167
二、坐标系及应力分量	169
三、应力平衡微分方程	170
四、点的应力状态及应力边界条件	172
五、主应力、应力张量不变量	173
六、主切应力及最大切应力	175
七、应力偏张量和应力球张量	177
八、八面体应力和等效应力	178
第二节 应变分析	179
一、单元体的位移分量和应变分量	179
二、点的应变状态和应变张量	183
三、点的应变状态与应力状态比较	183
四、应变增量和应变速率张量	185
第三节 平面问题和轴对称问题	187
一、平面问题	187
二、轴对称问题	188
第四节 屈服准则	189
一、塑性条件的概念	189
二、屈雷斯加 (H. Tresca) 屈服准则	190
三、米赛斯 (Von. Mises) 屈服准则	191
四、屈服准则的几何表示	193
五、两个屈服准则的比较	195
六、加工硬化材料的屈服准则	195
第五节 塑性变形时应力-应变关系 (本构方程)	197
一、弹性变形时应力-应变关系	197
二、塑性变形时应力-应变关系	198
思考题	200
第八章 塑性成型过程的力学分析方法	203
第一节 应力平衡微分方程与塑性条件联解的数学解析法	203
一、求解的一般步骤与原则	204
二、求解可能性的讨论	204

三、举例	204
第二节 主应力法及其应用	206
一、主应力法的基本原理	206
二、主应力法在塑性成型中的应用举例	206
第三节 滑移线解法及其应用	210
一、基本假设和基本概念	210
二、滑移线场特性	211
三、塑性区应力边界条件	213
四、常见滑移线场的类型	214
五、变形区的速度场	215
六、应用实例	217
第四节 上限法及其应用	218
一、虚功原理与基本能量方程式	218
二、最大散逸功原理	219
三、上限法定理	221
四、上限法在塑性成型中的应用	222
思考题	226
第九章 熔化焊的热过程	228
第一节 熔化焊热源及温度场	228
一、焊接热源	228
二、焊接温度场	230
第二节 焊接热循环	237
一、焊接热循环	237
二、焊接热循环的影响因素	240
第三节 熔化焊接头的形成	241
一、焊接熔池的形成	241
二、焊接接头的形成	243
思考题	244
第十章 熔化焊接化学冶金过程	245
第一节 焊接气体及与金属的相互作用	245
一、焊接区的气体	245
二、氢与金属的作用	248
三、氮与金属的作用	252
四、氧与金属的作用	254
第二节 焊接材料与焊接熔渣	256
一、焊接材料	256
二、焊接熔渣	260
第三节 焊接化学冶金反应	266
一、焊接化学冶金反应区的特点	266
二、焊接冶金反应过程	267
三、焊接金属化学成分的控制	272
思考题	273
第十一章 熔化焊接头的组织与性能	275

第一节 焊接金属的组织与性能	275
一、焊接金属的结晶	275
二、焊缝金属的相变	279
三、焊缝金属性能的控制	283
第二节 焊接热影响区的组织与性能	287
一、焊接热影响区的组织转变	287
二、焊接热影响区的组织分布	289
三、焊接热影响区的性能	294
思考题	301
第十二章 焊接冶金缺陷	302
第一节 气孔	302
一、形成气孔的条件	302
二、气孔类型及其形成原因	303
三、气孔的防止	305
第二节 焊接裂纹	307
一、焊接热裂纹	307
二、焊接冷裂纹	316
三、焊接裂纹的分析与判断	327
思考题	329
参考文献	330

绪 论

能源、信息和材料被认为是现代经济发展的三大支柱。其中材料更是现代人类物质文明的基础，它支撑着其他技术的发展。从这个意义上说，没有先进材料，就没有先进的工业、农业和其他科学技术。

根据材料的组成，可以将材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料（聚合物）和复合材料。它们被称为材料的四大家族。根据材料的物性和用途，材料可分为结构材料（以力学性能为主要指标，用于制造承受一定载荷的设备、零部件等）和功能材料（以特殊物理性能为主要指标，用于制造电子器件、光敏元件和绝缘材料等）两大类。随着航空航天、海洋工程、生物工程和环境保护等工程技术的发展，大量新材料也不断涌现。

材料科学是研究材料的组织结构与性能的关系，从而发展新材料，并合理有效地使用材料。但材料要能商品化，必须经过一定的经济合理的生产工艺和制造技术才能实现，这就是材料工程。材料加工的任务就是把材料加工成型，得到可供使用的产品。因此，材料加工成型实质上就是材料工程。材料科学与材料加工成型是相辅相成、不可分割的。所以人们往往把“材料科学”与“材料工程”相提并论，并称为“材料科学与工程”。

材料加工成型与材料的工艺性能紧密相连。所谓材料工艺性能是指材料对各种加工工艺手段所表现出来的特性，即材料的可加工性。其中包括铸造性能、锻造性能、冲压性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。材料的加工成型与选材原则密切相关。一般说来，合理选材应考虑四项基本原则。

(1) 使用性能 材料的使用性能是材料使用时应首先考虑的问题。对所选材料使用性能的要求是在对构件工作条件及失效分析的基础上提出的，满足使用性要求的材料才能达到产品质量的目的。

(2) 工艺性能 对构件加工成型的主要方法有铸造、锻造、冲压、焊接，热处理及切削加工等工艺。工艺性能的好坏直接影响生产效率和产品的合格率。因此，选用的材料应具有好的工艺性能。

(3) 经济性 选材时应考虑材料的价格、加工费用和国家资源等情况，以降低产品的成本。

(4) 环境性能 选材时还应考虑材料在制造和加工使用过程中对环境保护的影响。

材料加工成型过程必须统筹考虑材料构件的使用性能、工艺性能、经济性和环保性能。通过对比分析、系统考虑后，找出解决实际工程要求的方法和途径，这是材料加工成型的基本原则。

材料的发展非常迅速，除了传统的金属材料、无机非金属材料、高分子材料外，复合材料、电子材料、光电材料、超导材料及纳米材料等的发展也非常迅速。但是传统材料如金属材料、塑料等的使用面广量大，从数量上占材料总量的95%以上。尽管传统材料的生产工艺已很成熟，材料品种也已形成了自己的体系。但对传统材料性能的提高与生产流程、加工成型原理的改进应该给予更大的重视，因为我国传统材料性能的研究和应用与国际先进水平相比，存在很大的差距，制约了我国机电工业、汽车工业及建筑工业的发展。而我国的先进材料或新型材料的研究与国际上的差距不太大，并且还有所创新。因此，重点介绍使用面广

量大的金属材料在加工成型过程中的基本原理是本书的主要任务。

金属材料成型原理是材料成型与控制工程专业的技术基础课，着重阐述金属材料加工成型过程的基本原理。内容包括：液态成型基础、液态金属的结晶、铸件宏观组织的形成与控制、铸造缺陷的产生及其控制、金属的塑性及变形抗力、金属塑性成型中的基本定律以及塑性变形特点，金属塑性变形的力学基础，塑性成型过程的力学分析方法，熔化焊的热过程，熔化焊的冶金过程，熔化焊接头的组织与性能，焊接冶金缺陷。本教材以材料成型加工方法中的铸造、锻压、焊接为主线，力求在阐述其基本原理的同时做到理论联系实际。

液态成型技术是将熔融金属或合金在重力场或其他外力场作用下注入铸型型腔中，待其冷却凝固后获得与型腔形状相似铸件的一种成型方法，这种成型方法通常称为铸造。

液态成型方法有几千年的发展历史，它之所以经久不衰，是因为有其突出的特点，适应性强。对任何大小的零件，从几克重到几十、成百吨的零件；从仅 0.2mm 的薄壁零件，到数米厚度零件；从小到几毫米，大到几十米零件；从形状简单到任意复杂的零件都可以通过液态成型工艺制造出来。对任何可熔化的金属与合金材质也都可进行液态成型，特别是对脆性材料（如铸铁等材料），液态成型技术几乎是唯一的途径。所以说，液态成型技术的广泛适应性是其他任何金属成型方法所无法比拟的。

据出土文物考证和文献记载，中国的铸造技术已经有 5000 年的悠久历史，其成就推动了农业生产、兵器制造、人民生活以及天文、医药、音乐、艺术等方面的进步。我国在商、周两代创造了灿烂的青铜文化。在青铜器鼎盛时代，所谓“钟鸣鼎食”是当时贵族权势和地位的象征，如当时铸造的司母戊大方鼎（875kg）、马踏飞燕、四羊尊、龙虎尊、随县编钟等器物。古文献《周礼考工记》中还出现了世界上最早的合金配方，《天工开物》中记载了失蜡法的工艺过程。

随着熔炼技术的发展，公元前 6 世纪左右就发明了生铁和铸铁技术，战国时期开始有了铁制工具的使用，大大提高了农业生产效率，并出现铁范（金属型）工艺。隋唐以后，随着社会经济的进一步发展，铸造技术向大型和特大型铸件发展。如公元 10 世纪五代十国时期铸造的河北沧州大铁狮，高 5 米多，长近 6m，重约 50t；北宋时期铸造的当阳铁塔，由 13 层叠成，重约 50t。

当然，现代的凝固理论和技术的迅速发展开始于工业革命以后，到 20 世纪 60 年代，形成了完整的经典凝固理论，主要包括 20 世纪 20 年代 Kossel 和 Stranski 提出的完整晶体生长的微观理论；20 世纪 40 年代 Frank 发展了晶体缺陷生长理论；Chalmers、Tiller、Jackson 和 Rutter 等在对凝固界面附近溶质再分布规律求解的基础上，提出了著名的“成分过冷”理论；Jackson 和 Hunt 提出了枝晶和共晶合金凝固过程扩散场的理论解，并在此基础上获得枝晶及共晶间距与凝固条件的关系；Flemings 等从过程的角度出发，进一步考虑了凝固过程两相区内的液相流动效应，提出局部溶质再分配方程等理论模型，推动了凝固理论的发展；Chvorinov 引入铸件模数概念，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等。

到 20 世纪 60 年代以来，研究的重点在于对经典凝固理论的应用上。通过大量的实验研究，Chalmers 及大野笃美等人提出“激冷等轴晶游离”理论，Jackson、Southi 等提出“枝晶熔断”及“结晶雨”理论，从而使人们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，以此为指导有效地控制了结晶过程和凝固组织。在此基础上，机械及超声波振动、机械及电磁搅拌、孕育处理、变质处理等技术得以发展与推广并仍在不断改进和完善中。半固态铸造、定向凝固、高能束表面重熔技术、快速凝固技术在这期间也发展起来。

在最近二三十年中，主要由于计算机技术的应用及极端条件和特殊条件下凝固的研究推

动了凝固理论的发展。人们认识到经典凝固理论的局限性，在凝固理论方面提出了快速凝固理论、凝固过程组织形态选择的时间相关性和历史相关性理论、复合材料凝固特性及枝晶间距选择的容许范围等。在凝固技术方面，也有了长足进展。定向凝固技术从传统功率降低法、高速凝固法到液态金属冷却法，区域熔化液态金属冷却法等新工艺的不断完善。其典型应用就是铸造高温合金涡轮发动机叶片，单晶涡轮发动机叶片具有更高的工作温度、抗热疲劳强度、抗蠕变强度等优良性能，大大促进了航空技术的发展。快速凝固技术、铸造方法制备金属基复合材料等凝固技术也逐步应用到社会生活中来。此外，随着计算机的应用和发展，也使定量描述液态金属和合金的凝固过程得以实现。在对温度场、力场、热物理性能研究的基础上，实现凝固过程模拟，对凝固组织和缺陷进行预测，工艺进行优化，以便能更合理地控制凝固过程，降低生产成本，节约资源消耗。如在大型电站水轮机主轴、转子、叶片等性能要求高、质重件大的铸件上已经有成熟的应用。

金属塑性成型又称为塑性加工，它是金属材料加工成型的基本方法之一。塑性成型是利用金属的塑性，通过外力而获得所需形状、尺寸与内部性能制品的一种加工方法。由于塑性加工一般是在外力且多在压力作用下进行的，所以过去又称为金属压力加工。根据加工时金属受力和变形特点的不同，塑性加工可分为体积成型和板料成型两大类。前者的典型加工方法有锻造、轧制、挤压和拉拔等；后者则有冲裁、弯曲、拉深和成型等。根据加工温度的不同，塑性加工又可分为热加工和冷（温）加工。在生产实际中，这些加工方法可以单独使用，也可组合使用；并且通过各种加工方法的相互渗透和合理组合，开发出许多新的塑性加工方法，例如连铸连轧、液态模锻、等温锻造和超塑性成型等，使塑性成型的应用范围进一步扩大。塑性加工与其他加工方法（如金属的切削加工、铸造、焊接等）相比，有如下特点。

(1) 组织、性能好。金属材料在塑性成型过程中，其内部组织发生显著的变化。例如钢锭，其内部组织疏松多孔、晶粒粗大且不均匀等许多缺陷，经塑性成型使其结构致密、组织改善、性能提高。因此，凡是重要的结构件及工具、模具都要经过塑性加工，才能达到零件及工具、模具所需的性能。

(2) 材料利用率高。金属塑性成型主要是靠金属在塑性状态下的体积转移来实现的，不产生切屑，因此只有少量的工艺废料，并且流线分布合理。

(3) 尺寸精度高。许多成型方法由于应用了先进的生产技术和设备，已达到少或无切削的要求。例如，精密模锻的锥齿轮，其齿形部分可不经切削加工而直接使用；精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度。

(4) 生产效率高，适合于大批量生产。随着塑性加工工具和设备的改进及机械化、自动化程度的提高，生产率会进一步得到提高。例如，高速冲床的行程次数已达 1500~1800 次/min；在 12000×10kN 热模锻压力机上锻造一根汽车发动机用的六拐曲轴只需 40s；在双向拉深压力机上成型一个汽车覆盖件仅需几秒钟。

(5) 几乎所有的薄壁零件，尤其是大、中型板壳零件，例如汽车覆盖件，只能采用塑性加工的方法来制造。

由于金属塑性加工具有上述特点，因而它在冶金工业、机械制造工业等部门中得到广泛应用，在国民经济中占有十分重要的地位，它也是衡量一个国家机械加工工业水平的一个重要标志。

但是，塑性加工也有不足的地方，主要表现在以下几点。

(1) 同其他加工方法相比，塑性加工的投资大，尤其是大、中型覆盖件的成型模具制造过程的经费多和时间长，这常常是制约新产品迅速投产的一个瓶颈。

(2) 对环境会产生一定的污染。

(3) 工件的形状不能太复杂，沿模具的作用方向，相对于分模面工件的形状必须是完全外凸的，否则工件不能从模具中取出来。

焊接是指通过适当的手段（加热、加压或两者同时采用）使两个分离的固态物体产生原子（分子）间的结合而成为一体的连接方法。被连接的两个物体可以是同类或不同类的金属（钢、铁及非铁金属），也可以是非金属（石墨、陶瓷、塑料、玻璃等），还可以是金属与非金属。迄今为止，金属材料仍然是焊接的主要对象，在中国焊接研究与发展的重点仍然是金属材料。

焊接是现代金属加工中最重要的方法之一，它和金属切削加工、压力加工、铸造、热处理等其他金属加工方法一起构成的金属加工技术是现代一切制造业包括汽车、舰船、飞机、航天、原子能、石油化工、电力、电子等工业部门的基础生产工艺。随着国民经济的高速发展和科学技术的不断进步，工业大型结构将进一步采用焊接方法，“锻焊结合”、“铸焊结合”也将会得到日益广泛的应用。

焊接是一种新兴而又古老的加工技术，大约在公元前 3000 年的我国古代就有铜-金、铅-锡焊接的应用。1885 年俄国人发现气体放电电弧，为电弧焊提供了可靠的能源，1930 年前后出现了涂药焊条电弧焊，此后相继出现了埋弧焊、钨极氩弧焊及熔化极气体保护电弧焊等焊接方法。1886 年发明电阻焊，并逐步完善为电阻点焊、缝焊和对焊方法，几乎与电弧焊同时推向工业应用。20 世纪现代焊接技术的发展十分迅速，继几种主要的电弧焊技术出现后，20 世纪 50 年代出现了电渣焊、电子束焊；20 世纪 60 年代出现了等离子弧焊和激光焊接；20 世纪 70 年代出现了脉冲焊和窄间隙焊接；20 世纪 80 年代开始太空焊接。近年来出现的表面张力过渡焊、搅拌摩擦焊、激光和电弧复合加热焊等显示了新的焊接技术仍在不断发展之中。

焊接技术是机械制造工业中的关键技术之一，在制造工业中发挥了举足轻重的作用。展望 21 世纪，全世界钢产量的 50% 将要通过焊接方式制成产品，焊接技术仍将在制造业中起着极其重要的作用。

先进制造技术的发展将带动焊接技术的发展，焊接技术将不断吸收其他高新技术的成果，如信息、材料、能源、电力、电子技术及管理等方面的成果，适应和推动现代先进制造技术的发展。根据先进制造技术的发展方向，结合焊接技术自身的特点，未来焊接技术的发展趋势是：焊接成型精确化，焊接生产自动化和过程控制智能化，优质、高效的焊接工艺将不断涌现，特殊材料及特殊环境下焊接技术，焊接过程计算机模拟技术将得到不断发展和应用，同时焊接技术也不断向材料科学与工程的新兴领域渗透和拓展。

金属材料成型原理是一门实用性很强的课程，它是包含了多门基础学科知识的综合性学科，同时金属材料成型原理是材料科学与工程工作者需要掌握的基本技能，也是从材料研究到材料应用的桥梁。

学习本课程的目的就是为了将来研究和解决金属材料成型加工中的具体问题打下扎实的理论 and 实践基础，为制定合理的金属材料成型加工工艺路线，探索提高加工成型质量的新途径，开发新的加工成型技术提供理论依据。

第一章 液态成型基础

第一节 液态金属的结构和性质

液态成型（铸造）是将熔化成液态的金属浇入铸型后一次制成需要形状和性能的零件。金属由液态→固态的凝固过程中的一些现象，如结晶、溶质的传输、晶体长大、气体溶解和析出、非金属夹杂物的形成、金属体积变化等都与液态金属结构及其物理性质有关。因此，了解液态金属的结构及其性质，是控制铸件形成过程的必要基础。

一、液态金属的结构

人们对液态金属结构的认识滞后于固体金属，这是因为它是液体这样一个无序体系作为研究对象。近年来，利用 X 射线、电子和中子衍射及同步辐射技术得到液态金属及合金直接的结构信息，促进了液体金属物理研究的不断深入。通过两种方法可以研究金属的液态结构。一种是间接方法，即通过固→液态、固→气态转变后一些物理性质的变化判断液态的原子结合状况，另一种是较为直接的方法，即通过液态金属的 X 射线或中子线的结构分析研究液态的原子排列情况。在了解液态金属的结构之前，有必要对金属晶体的原子结合、加热膨胀及熔化过程加以阐述。

1. 金属晶体中的原子结合、加热膨胀、熔化

晶体的结构和性能主要决定于组成晶体的原子结构和它们之间的相互作用力与热运动。各种不同的晶体其结合力的类型和大小是不同的。但是在任何晶体中，两个原子间的相互作用力或相互作用势能与它们之间距离的关系在性质上是相同的，如图 1-1 所示。图 1-1(a) 表示原子间相互作用力 F 随原子间距离 R 的变化规律。当两个原子相距无穷远时，相互作用力为零，当两原子靠近时，原子间产生吸引力 ($F < 0$)，并随距离的缩短而增大。随着距离的继续缩短，到达 $R = R_1$ 时，吸引力最大。距离再缩短时，吸引力又逐渐减小，到 $R = R_0$ 时，相互作用力等于零 ($F = 0$)，此时达到平衡， R_0 为平衡距离。当距离小于平衡距离 R_0 时，出现排斥力 ($F > 0$)，并随距离的继续缩短而迅速增大。作用力 F 是由引力和斥力构成的合力。吸引力是异性电荷间的库仑引力；排斥力是同性电荷之间的斥力和。两个原子的相互作用势能 $W(R)$ 的曲线如图 1-1(b) 所示，可见在 $R = R_0$ 时，对应于能量的极小值，状态稳定。这说明，原子之间倾向于保持一定的间距，这就是在一定条件下，金属中的原子具有一定排列的原因。

晶体中每个原子皆在平衡位置附近振动（即所谓热振动），温度升高时振动能量增加，振动频率和振幅加大。以双原子为模型（图 1-2），假设左边的原子在坐标原点被固定，而右边的原子是自由的。当温度升高时，右边自由

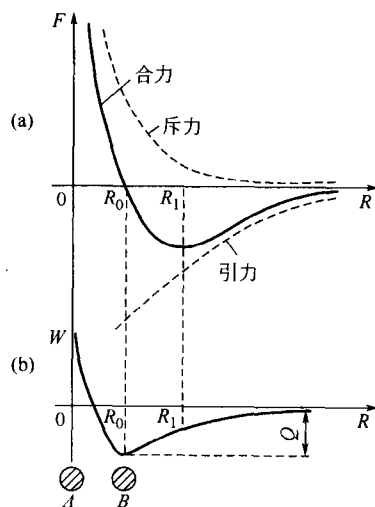


图 1-1 A、B 原子作用力 F 和势能 W 与原子间距 R 的关系

振动原子的振幅增大，此时，若该原子以 R_0 为原点作简谐振动，则其平衡位置仍是 R_0 ，这样就不会发生膨胀。但势能曲线向右是水平渐近线，向左是垂直渐近线，是极不对称的。这就意味着当温度升高，能量从 $W_0 \rightarrow W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \rightarrow W_4$ 时，其间距（振幅中心位置）将由 $R_0 \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4$ 。也就是说，原子间距离将随温度的升高而增加，即产生热膨胀。另一方面，空穴的产生也是物体膨胀的原因之一。由于能量起伏，一些原子则可能越过势垒跑到原子之间的间隙中或金属表面，而失去大量能量，在新的位置上作微小振动（图 1-3）。有机会获得能量，又可以跑到新的位置上。如此下去，它可以在整个晶体中“游动”，这个过程称为内蒸发。原子离开点阵后，留下了自由点阵——空穴。空穴的产生使局部地区能垒降低，邻近的原子则进入空穴位置，造成空穴的移动。温度愈高，原子的能量愈大，产生的空穴数目愈多，从而使金属膨胀。在熔点附近，空穴数目可达原子总数的 10%。

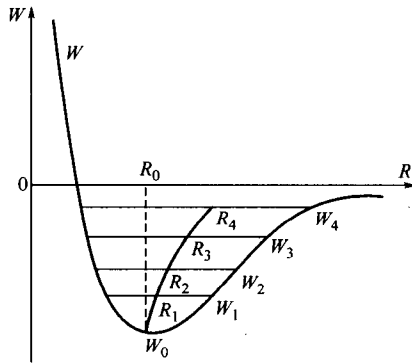


图 1-2 加热时原子间距的变化

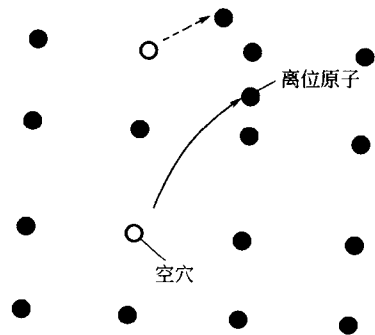


图 1-3 空穴形成示意图

当把金属加热到熔点时，会使金属的体积突然膨胀 3%~5%。这个数值等于固态金属从热力学温度零度加热到熔点前的总膨胀量。除此之外，金属的其他性质如电阻、黏性等在该温度下发生突变。同时，这种突变还反映在熔化潜热上，即金属在此时吸收大量热量，温度却不升高。这些突变现象是不能仅仅用离位原子和空穴数目的增加加以解释的。因为空穴数目的增加不可能是突变的。因此，对于这种突变，应当理解为金属已熔化，已由固态变为液态，发生状态改变造成的。从图 1-1 可以看出，假设在熔点附近原子间距达到了 R_1 ，原子具有很高的能量，很容易超过势垒而离位。但是在相邻原子最大引力作用下，仍然要向平衡位置运动。虽然此时离位原子和空穴大为增加，金属仍表现为固体性质。若此时从外界供给足够的能量——熔化潜热，使原子间距离超过 R_1 ，原子间的引力急剧减小，从而造成原子结合键突然破坏，金属则从固态进入熔化状态。熔化潜热使晶粒瓦解，液体原子具有更高的能量，而金属的温度并不升高。从热力学角度，在恒压时，外界所供给的潜热，除使体积膨胀做功外，还增加系统的内能，如式(1-1)所示。在等温等压下，熵值的增量如式(1-2)所示。

$$\delta_q = d(V + pV) = dU + pdV = dH \quad (1-1)$$

式中 δ_q ——外界供给的能量；

U ——内能；

pdV ——膨胀功；

H ——热焐。

$$dS = \frac{\delta_q}{T} = \frac{1}{T}(dU + pdV) \quad (1-2)$$

系统熵值增加表示原子排列发生紊乱。因此，熔化过程就是金属从规则的原子排列突变

为紊乱的非晶态结构的过程。

2. 液态金属的结构

(1) 从物质熔化(汽化)过程对液态金属结构的认识 如表 1-1 所示, 金属物质熔化时的体积一般仅增加 3%~5%, 即原子平均间距仅增加 1%~1.5%, 熔化时的熵值变化量远小于加热膨胀过程。表明液体的原子间距接近固体, 在熔点附近其系统的混乱度只是稍大于固体而远小于气体的混乱度。表 1-2 为一些金属的熔化潜热和汽化潜热。如果说汽化潜热(固→气)是使原子间的结合键全部破坏所需的能量, 则熔化潜热只有汽化潜热的 3%~7%, 即固→液时, 原子的结合键只破坏了百分之几。因此, 可以认为液态和固态的结构是相似的, 金属的熔化并不是原子间结合键的全部破坏, 液体金属内原子仍然具有一定的规律性, 特别是在金属过热度不太高(一般高于熔点 100~300°C)的条件下更是如此。需要指出的是, 在接近汽化点时, 液体与气体的结构往往难以分辨, 说明此时液体的结构更接近于气体。

表 1-1 某些金属的熵值变化

金属	晶体类型	从 25°C 到熔点熵值变化 (ΔS)/(J/K)	熔点时的熵值变化(ΔS_m) (J/K)	$\Delta S_m/\Delta S$	熔化过程的体积变化/%
Zn	h. c. p.	5.45	2.55	0.47	4.08
Al	f. c. c.	7.51	2.75	0.37	6.9
Mg	h. c. p.	7.54	2.32	0.31	2.95
Cu	f. c. c.	9.79	2.30	0.24	3.96
Au	f. c. c.	9.78	2.21	0.23	5.19
Fe	f. c. c./b. c. c.	15.50	2.00	0.13	0.4~4.4

表 1-2 几种金属的熔化潜热与汽化潜热的比较

金属	Zn	Fe	Cr	Mn	Al	Cu
$Q_{熔}/(J/mol)$	6657	14905	16955	14445	10467	13028
$Q_{汽}/(J/mol)$	121515	393578	368456	309838	211443	347521
$Q_{熔}/Q_{汽}$	5.5%	3.8%	4.5%	4.7%	5.0%	3.7%

(2) 从 X 射线衍射分析对液态金属结构的认识 可以用衍射结构参数(偶分布函数)特征来描述液态物质的结构(如图 1-4 所示)。对于粒子数 N , 体积 V 的体系中, 偶分布函数 $g(r)$ 的物理意义是距某一参考粒子 r 处找到另一粒子的概率。即表示离开参考原子(处于坐标原点 $r=0$) 距离 r 位置的数密度 $\rho(r)$ 对于平均数密度 ρ_0 ($\rho_0 = \frac{N}{V}$) 的相对偏差。若 $g(r)=1$, 则表示该位置的原子数密度等于整体液体系统的平均数密度 ρ_0 。对于气体, 由于其粒子的统计分布的平均性, 其偶分布函数 $g(r)$ 在任何位置均相等, $g(r)=1$ 。晶态固体因原子以特定方式周期排列, 其 $g(r)$ 以相应规律呈孤立的若干尖锐峰。液体的 $g(r)$ 出现若干渐衰的钝化峰直至几个原子间距后趋向 $g(r)=1$, 表明液体的原子集团(短程有序的局域范围)半径只有几个原子间距大小。非晶固体的 $g(r)$ 与液体相似。对于液体, 对应于 $g(r)$ 第一峰的位置, $r=r_1$ 表示参考原子至其周围第一配位层各原子的平均原子间距, 由于衍射所获得的 $g(r)$ 具有统计平均意义, r_1 也表示某液体的平均原子间距。

对应 $g(r)$, 通常将 $4\pi r^2 \rho_0 g(r)$ 称为径向分布函数(RDF), 它表示在 r 和 $r+dr$ 之间的球壳中原子数的多少。图 1-5 为按 X 射线衍射数据经过整理而得到的, 液态铝的径向分布函数, $4\pi r^2 \rho_0$ 为 $g(r)=1$ 时的曲线。该曲线第一峰下的积分面积, 为液体的配位数 N_1 , 即 $N_1 = \int_{r_0}^{r_m} 4\pi \rho_0 g(r) r^2 dr$, 表示参考原子周围最近邻(即第一壳层)原子数。