

高等学校教材

CAILIAO CHENGXING YUANLI

# 材料成型原理

陈玉喜 主编 侯英玮 陈美玲 副主编

中国铁道出版社

高等学校教材

材料成型原理

陈玉喜

侯英玮 陈美玲 副主编  
方大成 李明典 主审

中国铁道出版社

2002年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书分三篇十七章。第一篇主要介绍液态金属成型原理,第二篇主要介绍液态金属和合金成型过程中的化学冶金及成型缺陷,第三篇主要介绍金属塑性成型原理。本书作为大学材料成型及控制工程专业的教材,也可供有关的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成型原理/陈玉喜主编. —北京:中国铁道出版社,2002.1

ISBN 7-113-04498-0

I. 材… II. 陈… III. 材料-成型-高等学校-教材 IV. TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 098924 号

书 名: 材料成型原理  
作 者: 陈玉喜  
出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)  
责任编辑: 程东海  
编辑部电话: 路电(021)73135,市电(010)51873135  
封面设计: 冯龙彬  
印 刷: 北京市兴顺印刷厂  
开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 482千  
版 本: 2002年3月第1版 2002年3月第1次印刷  
印 数: 1~3000册  
书 号: ISBN 7-113-04498-0/TF·1  
定 价: 26.70元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:路电(021)73169,市电(010)63545969

# 前 言

本教材是为适应教育改革的需要,根据材料成型及控制工程专业教学大纲而编写的。本教材在将原铸造、塑性成型工艺及设备 and 焊接工艺及设备三个专业的《冶金原理》、《铸件形成理论》、《金属塑性成型原理》和《焊接冶金》等课程内容在融汇的基础上,按照材料成型及控制工程专业该课程教学内容要求和重点编写。

全书分为三篇十七章。第一章介绍液态金属及合金的结构和性质;第二章主要介绍液态金属和合金的凝固;第三章介绍液态金属及合金的结晶;第四章着重阐述金属结晶组织及其凝固控制;第五章介绍液态金属和合金的化学冶金过程;第六章介绍制品的应力、变形和裂纹;第七章主要介绍化学成分的不均匀性;第八章至第十章分别介绍液态金属和合金凝固过程中产生的缩孔与缩松、气孔和非金属夹杂物;第十一章至第十三章主要阐述金属塑性变形时的力学基础理论,包括应力应变分析、屈服准则和本构方程;第十四章介绍真实应力应变曲线;第十五章着重介绍金属的塑性与变形及其影响因素;第十六章主要介绍金属塑性成型问题的数值及工程解法的基本原理及其应用;第十七章介绍有限元模拟技术。

参加本教材编写的有陈玉喜(绪论,第一章,第二章的一、二、四、五节),李中原(第三章,第七章,第八章),刘书华(第四章的一、二、三、六节,第九章),陈美玲(第四章的四、五节,第五章,第十章),丁成钢(第二章的第三节,第六章),运新兵(第十一、十二、十三章),米小珍(第十四章,第十五章二、三节),侯英玮(第十五章第一节,第十六章,第十七章)。由陈玉喜任主编,侯英玮、陈美玲任副主编,侯英玮做了文字规范方面的工作。

本教材由大连理工大学方大成教授和大连铁道学院李明典教授主审。两位专家对书稿提出了许多修改意见,谨此表示衷心的感谢。

本教材在编写过程中,参考了大量的文献资料,在此对文献资料的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中定有许多缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2001年7月

## 目 录

绪 论	1
<b>第一篇 液态金属成型原理</b>	6
<b>第一章 液态金属及合金的结构和性质</b>	7
第一节 固体金属的加热膨胀及熔化	8
第二节 液态金属和合金的结构	10
第三节 液态金属和合金的性质	13
第四节 流变铸造	24
<b>第二章 液态金属和合金的凝固</b>	30
第一节 傅立叶(Fourier)导热微分方程	30
第二节 铸件的温度场	32
第三节 焊接温度场	44
第四节 铸件的凝固方式	49
第五节 凝固时间的计算	55
<b>第三章 液态金属及合金的结晶</b>	59
第一节 概 论	59
第二节 生核过程	61
第三节 晶体生长过程	66
第四节 单相合金的结晶	73
第五节 共晶合金的结晶	84
<b>第四章 金属结晶组织及其凝固控制</b>	90
第一节 金属的结晶组织	90
第二节 结晶组织的形成及性能	92
第三节 细化晶粒的措施	94
第四节 定向凝固技术	98
第五节 快速凝固技术	100
第六节 焊接热影响区的组织特性	103
<b>第二篇 液态金属和合金成型过程中的化学冶金及成型缺陷</b>	108
<b>第五章 液态金属和合金的化学冶金</b>	108
第一节 液态金属和合金——气体界面反应	108
第二节 液态金属和合金——熔渣反应	113
第三节 焊接化学冶金过程的特点	129
第四节 金属净化机理	130
<b>第六章 制品的应力、变形和裂纹</b>	137
第一节 内应力的形成	137

第二节	变形和裂纹	139
第三节	防止变形和裂纹的措施	147
第七章	化学成分的不均匀性	153
第一节	微观偏析	153
第二节	宏观偏析	156
第八章	缩孔与缩松	161
第一节	缩孔与缩松的概念	161
第二节	缩孔与缩松的形成机理	163
第三节	影响缩孔与缩松的因素及防止措施	166
第九章	气    孔	170
第一节	金属中气孔形成机理	170
第二节	析出性气孔	173
第三节	反应性气孔	174
第四节	影响生成气孔的因素及防止措施	175
第十章	非金属夹杂物	179
第一节	非金属夹杂物的生成、长大、分布和形状	179
第二节	减少和排除夹杂物的途径	184
第三篇	金属塑性成型原理	186
第十一章	应力和应变	186
第一节	求和约定及张量	186
第二节	应力分析	189
第三节	应变分析	201
第十二章	屈服准则	208
第一节	屈雷斯加屈服准则	208
第二节	米塞斯屈服准则	209
第三节	屈服准则的几何表达	210
第四节	中间主应力的影响	213
第五节	应变硬化材料的屈服准则	214
第十三章	本构方程	216
第一节	塑性应力应变关系	216
第二节	塑性变形的增量理论	218
第三节	塑性变形的全量理论	220
第十四章	真实应力—应变曲线	222
第一节	拉伸试验曲线	222
第二节	压缩试验曲线	229
第三节	变形温度、速度对真实应力—应变曲线的影响	230
第十五章	金属的塑性和塑性变形	232
第一节	金属的塑性及其影响因素	232
第二节	金属的流动及其影响因素	240
第三节	金属塑性成型中的摩擦和润滑	248

---

第十六章	塑性成型问题的解法	255
第一节	主应力法及应用	255
第二节	滑移线法及应用	259
第三节	上限法及应用	273
第四节	变形功法及应用	280
第十七章	金属塑性成型过程的数值模拟	285
第一节	概 述	285
第二节	有限元的基本原理	286
第三节	刚塑性有限元法及其应用	294
参考文献		299

# 绪 论

任何机器或设备,大至船舶、飞机、铁道机车车辆、汽车,小至仪器、仪表都是由许许多多的零件组装而成。这些零件所用的材料有金属材料,也有非金属材料,制造方法也是多种多样。对于金属材料零件的传统生产过程一般是:材料冶炼→材料成型→切削加工→热处理。材料成型是为切削加工零件提供毛坯。因此材料成型加工业在机械、冶金、造船、航空、航天、铁路、交通、石油、化工、国防等许多工业及国民经济中占有极为重要的地位,对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的水平影响非常大。材料成型技术的主要任务是解决材料的成型及其内部组织性能的控制,以获得所需几何形状、尺寸和质量的毛坯件。材料成型的工艺方法通常有液态金属成型(铸造)、塑性成型(压力加工)、连接成型(焊接)及粉末成型(粉末冶金成型)等方法。每种成型工艺都有其各自的特点,因此在选择成型工艺方法时,需要综合考虑材料的种类、性能、零件的形状尺寸、工作条件及使用要求、生产批量和制造成本等多种因素,以达到技术上可行,质量可靠和成本低廉。

## 一、材料成型概念及特点

### 1. 液态金属成型

铸造是液态金属直接成型的主要方法。液态金属成型是将金属加热到液态,并使其具有足够的流动性,然后浇入到铸型的型腔中,液态金属在重力场和外力场(压力、离心力、电磁力、振动惯性力等)的作用下充满铸型型腔,在铸型中冷却并凝固成具有型腔形状的毛坯件,称此毛坯件为铸件。随着科学技术的进步,少余量和无余量铸造方法的发展,有许多种铸件无需切削加工就能满足对零件精度和表面粗糙度的要求,可以直接使用。液态金属成型的特点是:

(1)适应性强。对于制品的大小、重量、形状及合金种类等几乎都不受限制,这是其他任何成型方法都无法做到的。

(2)制品的形状,尺寸更接近于零件。

(3)液态成型制品成本低廉。

(4)易于实现生产机械化。

因此,液态金属成型在国民经济,尤其是在工业生产中具有非常重要的地位。但是,铸件也存在缺点,如铸件尺寸均一性差,内在质量比锻件差,工作环境差等。

### 2. 塑性成型

塑性成型是利用金属的塑性——金属产生塑性变形的能力,使金属在外力作用下成型的一种成型方法。因而也称为金属塑性加工或金属压力加工。其成型特点是:

(1)由于坯料经过了塑性变形和再结晶,粗大的树枝晶组织被破碎,疏松和孔隙被压实、焊合,内部组织和性能得到了较大改善和提高。例如铸锭必须通过锻造、轧制或挤压才能使其结构致密、组织改善、性能提高。

(2)塑性成型主要是靠金属在塑性状态下的体积转移,而不是靠部分地切除体积,因而制件的材料利用率高,流线分布合理,提高了制件的强度。



(3)可以达到较高的精度。近年来,由于应用了先进的技术和设备,有些零件可以达到少切削甚至达到无切削。例如精密锻造的伞齿轮,其齿形部分可不经切削加工直接使用。

(4)具有较高的生产率。尤其是金属材料的轧制、拉丝、挤压等工艺更为明显,随着科学技术的发展,制品的生产率也有很大提高,例如在 120 000 kN 压力机上,锻造汽车用的六拐曲轴仅仅需要 40 s。

但是,塑性成型耗能较高,并且不适宜加工形状特别复杂的制品及不能加工脆性材料。

### 3. 焊接成型

焊接成型是用加热或加压等工艺,使两个分离的表面,产生原子间的结合与扩散作用,从而形成不可拆卸接头的材料成型方法。焊接成型的特点是:

- (1)可将大而复杂的结构分解为小而简单的坯料拼焊,简化了工艺,降低了成本。
- (2)可实现不同材料间的连接成型,可优化设计,节省贵重材料。
- (3)可实现特殊结构的生产。
- (4)焊接结构重量轻。

但是,焊接结构是不可拆卸的,更换修理部分的零部件不便;焊接易产生残余应力;焊缝易产生裂纹、夹杂、气孔等缺陷引起应力集中,降低承载能力,缩短使用寿命,甚至于造成脆断。因此,应特别注意焊接质量。

### 4. 粉末成型

粉末成型是制取金属粉末或以金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)为原料,通过成型、烧结和必要的后续处理,制成各种金属或金属-非金属材料的一种成型工艺方法。因为粉末冶金与陶瓷生产有许多相似之处,也可称为金属陶瓷法。其成型特点是:

- (1)粉末冶金能够生产许多用其他成型方法所不能生产的材料和制品。如许多难熔材料,至今还只能用粉末冶金成型工艺来生产;有特殊性能的材料,如由互不溶解的金属或金属与非金属组成的假合金(铜-钨、银-钨、铜-石墨等)。
- (2)可以制造多孔材料或制品。通过控制其孔隙率、孔径大小获得需要的使用特性等等。
- (3)可以制取最终尺寸和形状的零件,节省大量金属材料和加工工时,具有很好的经济效益。

但是,粉末的成本高,而且粉末冶金制品的尺寸和形状也受到限制等。

## 二、材料成型技术的发展

人类的文明史是以材料划分的,它经历了石器时代、青铜器时代和铁器时代,现在进入了人工合成材料时代。石器时代经历了大约 200 万年到 300 万年。人类进入文明社会是以使用金属材料开始的。人类为了生存,在适应自然,改造自然与自然进行斗争的过程中,通过对材料的使用,了解材料的性能、加工方法和用途,经过实践—认识—再实践—再认识的漫长过程,逐渐形成了材料成型技术这门科学。

材料成型技术是既古老又年轻的一门科学,从地球上出现人类起,材料的利用与加工在人类的生活中就占据着非常重要的地位。早在石器时代,人类就利用岩石、骨骼、兽皮、贝壳、木材等制作工具和武器等,从而认识到大自然中的材料是可以加工,并且可以用来为人类的生存服务。

人类使用金属材料,至今大约有 6 000 年的历史。世界上最早的文明古国都曾先后进入了青铜器时代。早在公元前 4 000 年,古埃及人便掌握了炼铜技术。根据文献记载和实物考

证,我国早在公元前 3200—公元前 2300 年,就掌握了用矿石炼铜、铜及青铜的精炼技术,用铸造方法制造各种工具和武器。商周时期是我国青铜器时代的鼎盛时期,发展冶炼技术,形成了灿烂的商周青铜文化,重达 8.75 kN 的“司母戊”大方鼎,就是那个时期的有代表性的青铜器。湖北随县出土的青铜器总重达 100 kN 左右,其中 64 件编钟铸造的极为精巧,音色优美;青铜尊,纹饰繁美,玲珑剔透,是迄今为止传世和出土的青铜器中最复杂和最精制的文物,已达到很高的工艺水平。与此同时,由于制造装饰品、农具和武器的需要,锻造和钎焊也发展起来。从公元前 2500 年美索不达米亚的美斯卡拉德库王子墓中出土的刀鞘,是用锻造与钎焊结合的方法制造的;公元前 1700 年时的金垂饰,是用铸造与钎焊结合的方法制造的。在公元前 500 年,春秋时期我国就已应用锻造方法制造生产工具和各类兵器,并已达到了较高的技术水平。例如,在秦始皇陵兵马俑坑出土的三把合金钢制的宝剑,其中一把至今仍光彩夺目,锋利如昔。公元前 200 年,我国制造的青铜马车艺术品,四匹马挺然而立,加工极其精美复杂,其中马鞍、马具都以金银装饰,并与车轴的金具铸焊而成。

在青铜器时代铁比铜宝贵,这是因为当时炼铜比炼铁容易。人类最早使用的铁是陨石铁。古埃及在公元前 3000 年以前的前王朝时期,曾用陨石铁制成铁珠。从美索不达米亚出土的文物证明,在公元前 3000 年就有了铁器,公元前 2000 年左右就知道了铸铁技艺,尽管古希腊人和罗马人在很有限的范围知道铸铁的技艺,但是他们早期对铸铁的应用,远不能和中国古代所掌握的铸铁技术和发展应用相比。我国在公元前 600 多年,就发明了生铁和铸铁技术。据《左传》记载,公元前 513 年就铸造了重达 2.7 kN 的铸铁刑鼎。出土的春秋晚期的江苏六合程桥楚墓的铁丸,长沙楚墓的铁鼎,以及战国时期的韧性铸铁工艺制品和铁范(即金属型)等表明中国生产铸铁制品大概要比其他国家早许多个世纪。在战国中期,用铸铁制造的农具,手工工具已取代了青铜而成为主要的生产工具,使社会生产面貌发生了很大变化。由于社会对铸铁工具的大量需求,发明了铸铁金属型,在河北兴隆燕国冶铸作坊曾出土战国铁范有 87 件,可以用来铸造铁锄铁斧铁镰铁凿和车具。隋唐以后,铸造技术向大型和特大型铸件发展。现在河北沧县的大铁狮子,其高达 5 m 多,长近 6 m,重约 500 kN,是五代后周时期铸造的。中国在战国、秦、汉时期就将铁器的冶铸技术不断向外传播,战国时期传到朝鲜,汉代时期传到日本。可以说,中国在铁器时代对人类的文明做出了很大贡献。铸铁的历史经历了漫长的岁月,到了瓦特发明蒸汽机以后,由于在铁轨、蒸汽机、铸铁管的制造中的大量应用,才真正得到迅速发展,在此之前,铸铁只用来制作祭器、艺术品、兵器和农具。

人类进入 15 世纪以后,炼铁高炉在欧洲得到迅速发展,到了 17 世纪已出现高 9 m,日炼铁约 1 t 左右的高炉。炼钢技术则是在蒸汽机出现(1755 年),能够提供鼓风和动力之后才得以发展。1856 年,贝塞麦(H. Bessemer)发明了酸性转炉炼钢;1864 年马丁(P. E. Martin)发明了平炉炼钢;1879 年托马斯(S. G. Thomas)发明了碱性转炉炼钢技术;1899 年赫鲁特(P. L. T. Heroult)发明了电弧炉炼钢。从而,奠定了近代钢铁工业的基础。

钢铁工业只是到了 19 世纪后半叶才得到了迅速发展,特别是进入 20 世纪 50 年代,由于氧气顶吹法(LD 法)炼钢技术在钢的生产中得到了广泛的应用,使人类进入了文明生产的现代化社会。

无论是铸造,锻造还是焊接,在 18 世纪前这些成型方法基本上还都是工匠的手工艺,只是到了欧洲产业革命以后,由于社会大生产的发展需要,才真正走上工业发展的道路。使这些技艺才逐渐成为成型技术。

从 1885 年至 1907 年欧美发明了电弧焊接,电阻焊接以及气焊等。1907 年瑞典人 Osker

kerberg 开发了覆有涂料的电焊条之后,将其应用于结构件的焊接。1920 年左右欧洲(Flagger 号)及日本开始建造全焊接钢船。1930 年开发了脉冲弧焊。1951 年至 1953 年前苏联电气焊研究所开发了电渣焊和扩散焊。1955 年日本的関口春次郎开发了二氧化碳气体保护焊。1959 年至 1962 年前苏联又开发了摩擦焊和爆炸焊。1965 年研究使用激光进行焊接。

我国由于长期的封建统治,生产力长期处于停滞状态。解放前,我国的机械制造业非常落后,铸造、锻造、焊接基本上是采用手工操作,连一条生产线都没有,工人的劳动条件极为恶劣。新中国成立后,我国的机械制造业,包括铸造、锻造、焊接等行业可以说是从无到有,从小到大的发展起来了。随着我国工业体系的建立,在很多大、中型企业都建立了用近代设备装备起来的铸造、锻造、焊接生产车间。经过 50 多年的奋斗,我国的材料加工工业得到了突飞猛进的发展,材料成型技术达到了较高的水平,并且积极进行材料成型的理论研究工作,科研院所和生产企业不断研究开发推广应用新材料、新工艺和新技术,逐步向工业现代化迈进。

但是,我国的材料成型技术和材料加工业的生产水平与先进发达的国家相比,还有一定差距,主要表现在:

1. 我国铸造、锻造及焊接加工生产,虽然也建成投产了很多国产和引进国外先进的成套设备或生产线,但是在数量和规模上还远远少于工业发达国家,而且机械化、自动化的水平也较低。因此,生产效率仍较低。

2. 我国在合金的精炼技术水平与先进国家还有较大差距,因此有一些精密、重要的航空产品以及特殊行业用的材料以及一些精锻件、大型自由锻件还常常需要从国外进口。

3. 在计算机辅助设计和辅助制造方面,一些发达国家已进入实用阶段。在新产品的研制开发时,可以通过计算机模拟,如铸件的试浇来优化工艺,获得最佳优化工艺参数,然后用计算机进行辅助工艺工装设计,辅助制造工艺装备,再进行实际浇注试验。这样可以大大提高设计质量并缩短试验周期。在这个领域我国虽然起步较晚,但发展速度很快。近 20 多年来,在铸造、锻造、焊接等技术领域积极开展数值模拟,计算机辅助设计和计算机辅助制造等方面的研究,已取得了非常可喜的成果,有些已经达到实用化,并应用于生产。但是,我们的普及应用面还不够广泛,应用的水平还只能说是刚刚起步。

材料成型技术的发展总趋势:

1. 材料成型技术发展的总趋势是:在加强成型技术基础理论研究的同时,不断研制开发和完善精密成型新技术及新设备,使制品的形状、尺寸和表面质量最大限度地与产品零件相接近,以达到少切削,无切削的目的,从而可以节省大量金属材料,节省加工工时。

2. 为了提高制品的质量、精度以及适应大批量生产的需要,应发展专业化的连续生产线,建立区域性的专门化生产中心,积极实现制品生产过程的机械化、自动化。减少公害,节约能源,降低成本,以增强产品在国际市场上的竞争力。

3. 为适应新产品开发,缩短研制周期,应积极发展柔性加工技术和 CAD/CAM 技术。

### 三、本课程的性质和任务

《材料成型原理》是材料成型及控制工程专业的主要专业课程之一,本课程的任务是阐明液态成型(铸造)、塑性成型(锻造)、连接成型(焊接)等近代材料成型技术中共同的基本规律及物理现象的本质;阐述各种成型技术的成型基本原理和理论基础;揭示材料成型过程中影响材质和制品性能的因素及缺陷形成的机理。通过本课程的学习使学生对材料成型过程及其成型原理有深入的实质性的理解;能从本质上认识和分析材料成型过程中所产生的实际问题和提

出解决问题的途径;为今后学习成型技术的具体工艺方法、设备控制等课程;为开发新材料、新的成型技术奠定坚实的理论基础。

本课程的理论基础是数学、物理、化学、物理化学、金属学及热处理、工程力学、流体力学、冶金传输原理等基础理论。在此基础上阐述材料成型过程中的物理冶金、化学冶金及传热、传质、流动等现象。因此,物理冶金、化学冶金和三传现象就构成了材料成型原理的理论体系。

#### 四、本课程与其他课程的分工

本课程的重点在于阐述材料成型技术的基本理论、基本原理和分析问题的方法,而不涉及具体的成型技术工艺及参数。各种具体成型工艺方法、成型过程及其控制等将在后续课程中学习。

#### 五、本课程的基本要求

学习完本课程后,在专业基本理论和实际知识方面达到如下要求:

1. 了解液态金属和合金的结构、性质,掌握液态金属与合金的凝固、结晶的基本规律及过程、结晶过程中伴随的现象、冶金处理对凝固组织和制品性能的影响规律。
2. 掌握塑性成型力学基础理论、塑性成型过程中的基本原理及分析方法。
3. 掌握材料成型过程中的物理、化学冶金现象、缺陷产生的机理、规律及分析问题和解决问题的方法。

## 第一篇 液态金属成型原理

液态金属成型工艺有铸造、液态冲压和液态模锻等多种方法。但是,其历史最悠久、应用最广泛的还是铸造。

在绪论中已介绍了液态成型的概念和成型特点。铸造是液态金属成型生产制品的主要工艺方法之一。作为铸造生产的制品,大多数是作为毛坯用的铸件,这些铸件一般都需经机械加工才能成为各种机器零件。铸造生产的另一种制品就是铸锭,即是将液态金属浇注到锭模中,凝固和冷却后则成为铸锭。对于可以进行塑性加工的铸锭,可以进一步进行塑性加工,使之成为更加致密的性能更好的毛坯件。

液态模锻是把液态金属直接浇入金属模内,然后,在一定时间内,以一定的压力作用于液态(或半液态)金属上,使之成型,并在此压力下结晶和塑性流动。其实质是铸造与锻造的组合工艺。

众所周知,金属具有很大的变形阻力,制作成所需要的形状是很困难的。但是,液态金属成型方法可以将变形阻力大的固态金属熔化,使其成为变形阻力很小的液态金属,浇入到铸型后“自动”形成需要形状的制品,因此说铸造成型方法是一种非常聪明的金属加工方法。

铸造这种液态金属直接成型方法,在工业生产中占有非常重要的地位。各行各业中铸件都占有很大的比重。例如机床、内燃机、重型机械中占 70%~90%;风机、压缩机中大约占 60%~80%;拖拉机、农业机械中占 40%~70%;汽车中占 20%~30%;铁路机车车辆中占 40%~50%。此外,铸件在仪表、航空航天、船舶、化工、国防等工业中也有广泛应用。

但是,铸造也存在缺点:铸件尺寸均一性差;内在质量比锻件差;工作环境粉尘多,温度高,劳动强度大等。因此,提高铸件质量,改善铸造的生产条件,是每个材料加工工作者的历史责任。

焊接成型虽然并不完全属于液态成型范畴,但是,熔化焊中有焊接熔池,而焊接冶金和焊缝液态金属的凝固及结晶的基本规律;焊接过程中产生的气孔、偏析、夹杂及裂纹等焊接缺陷的形成机理,与铸造成型的规律基本相同或相近,因此,有关焊接成型的相关内容,将与铸造成型融合在一起讨论。

本篇主要讨论液态金属成型过程中的基本规律及内在联系;阐明液态金属的结构及其物理性质;分析液态金属充填铸型后与铸型间的热交换特点,铸件温度场和焊接温度场分布规律及影响因素;阐述液态金属结晶的基本规律,铸件结晶组织的形成、焊接热影响区组织的特点及控制途径等。

# 第一章 液态金属及合金的结构和性质

铸造是使金属的状态按着“固态→液态→固态”过程而成型的。金属由液态转变为固态的凝固过程中产生很多现象,例如生核,晶体长大,溶质的传输,金属体积变化等等,都与液态金属的结构及性质有关。因此,学习凝固和铸造,最好先从讨论液态金属开始,了解液态金属的结构及其性质,对研究铸件形成过程是非常重要的基础。

科学上对物质液体状态的认识,远远落后于对气体状态和固体状态的认识。由于18及19世纪科学的发展,对于气体状态已能比较清晰地用数学表达式来表示。认为理想气体中的分子,基本上像是一些弹性球,在低压和中压下,这些分子运动距离的平均值,与其分子自身尺寸相比是很大的,故各分子之间的相互作用,可以忽略不计;在高压下,由于分子间的相互作用已不容忽视,而且各分子本身所占据的体积也不能忽略,因而研究遇到了困难。对此,许多学者曾做过许多探讨,其中最著名的是范德瓦耳(Vander Waals)公式,即气体状态方程式

$$PV = RT \quad (1-1)$$

式中  $P$ ——压力;

$V$ ——克分子体积;

$R$ ——气体常数;

$T$ ——热力学温度。

直到20世纪初,衍射技术才清楚确定在晶体物质结构中,原子在空间上是按规则的几何图形排列的。在此之前,要认识固体状态是非常困难的。

对液态结构的研究则遇到了困难,因为相邻原子间的相互作用,必须予以考虑,但是原子间的相互位置不能明确确定。关于液态结构的理论,归纳起来,有3种理论,即凝聚理论、点阵理论及几何理论。

## 一、凝聚理论

凝聚理论把液体看作是浓缩的气体。它从气体运动论观点出发,通过修正气体状态方程式,来修正浓缩气体中原子或分子之间的作用力的影响。博尔恩(Born)及格林(Green)提出了一组适于描述液体运动论的分子分布函数。由于这组方程在数学上是很复杂的,所以在实际应用方面也没有多大成效。

## 二、点阵理论

点阵理论把液体看作是无序的固体。该理论的出发点,是将缺陷引入晶体点阵中,其中绝大多数学者认可的有3种理论。

### 1. 晶格理论

晶格理论认为固体的原子排列是有序的,原子在点阵位置上不停地作三维热振动。被熔化的液体是从固态的有序排列转变到液态的无序排列,原子仍被限制在点阵位置附近,但是可以独自作随机振动。

## 2. 空穴或空洞理论

空穴理论把液体看作是有大量空位的一种伪点阵。

## 3. 有效结构理论

根据这种理论,液体状态可用似晶组分与似气组分之间的配分关系来表示。

## 三、几何理论

几何理论的观点是,把液体看作是原子的某种“堆积物”。这个理论是由 J. D. Berna 和 S. V. King 提出的。该理论认为,液体是原子紊乱的密集球堆积的,或者更确切地说,液体是均质的,互相粘着的,本质上为不规则的原子集合体。为此,把几千个钢球装入一个球形袋中,进行摇动并使之紧实,这样就得到了紊乱排列的密集球堆积。此后,浇入油漆使钢球彼此粘结在一起。根据此模型,对单个钢球与周围最相邻接触的钢球的数量进行计算,就可以确定结构的平均配位数。

对钢球模型研究时,发现在紊乱的密集球堆中,存在着称为“伪晶核”的高密度区,当讨论液—固转变中的生核过程时,在液相中出现有序的似晶区域,这种“似晶区”就是液态转变为固态时的晶胚,也就是说,在液态原子紊乱的密集球堆积中,在局部区域存在着这些伪晶核或有效结构理论中的似晶组分,从而可以说明原子呈“近程有序”的规则排列。

液态金属结构尚有其他理论,这里不再一一论述。

# 第一节 固体金属的加热膨胀及熔化

## 一、金属中的原子结合

金属原子的构造特点是它的最外层电子即价电子数目少,与原子核的联系很弱,因而价电子很容易脱离原子核而成为自由电子,并为整个金属原子所公有,称之为电子云。原子失去电子成为离子,正离子按一定的次序在空间有规则的排列。金属原子就是依靠金属正离子和自由电子之间的静电引力而牢固地结合在一起。金属的这种结合方式称为金属键。金属键的结合强弱主要取决于组成金属晶体的原子结构及它们之间的相互作用力和热运动。由于不同的晶体其原子结构不同,所以金属原子之间结合力的类型和大小是不同的。然而无论哪种晶体,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,在本质上是相同的,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  $R$  的变化规律。由图可知,当  $R \rightarrow \infty$  时,作用力为零;当两个原子靠近时,原子间产生引力 ( $F < 0$ ),并随距离  $R$  的缩短而增大;当  $R < R_0$  时,斥力大于引力,此时合力表现为斥力 ( $F > 0$ ),两原子将分开;当

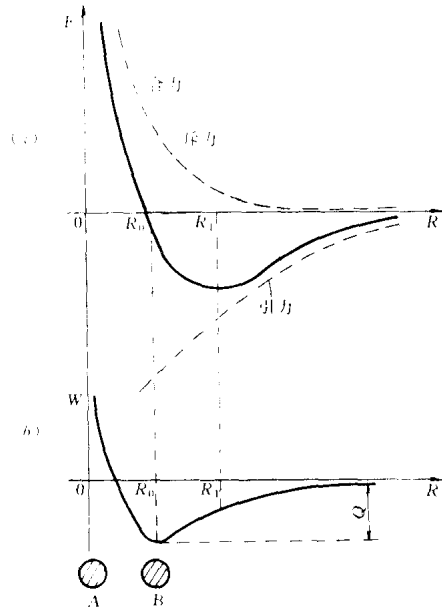


图 1-1 A、B 原子作用力  $F$  和势能  $W$  与原子间距  $R$  的关系

$R > R_0$  时,引力大于斥力,此时合力为引力( $F < 0$ ),两原子趋向于靠拢;当  $R = R_0$  时,合力  $F = 0$ ,此时两原子既分开也不靠拢而达到平衡。

图 1-1(b)所示为两个原子间的相互作用势能  $W(R)$  的曲线。从图可见,当  $R = R_0$  时,在  $W(R)$  曲线上对应于能量曲线的极小值,原子处于最稳定状态, $R_0$  称为平衡距离。当  $R > R_0$  时,势能  $W$  增大;当  $R < R_0$  时,势能  $W$  也增大。可见对  $R_0$  位置的任何偏离,都会使原子的势能增大,从而使原子处于不稳定状态,原子就有力图回到势能最低的位置并使原子之间保持一定距离的倾向。这就是在一定条件下,金属晶体中的原子具有规则排列的重要原因。

## 二、金属的加热膨胀

首先来讨论金属加热膨胀的微观本质。众所周知,金属中原子只要温度高于热力学温度零度,每个原子皆在空间点阵中的平衡位置附近进行三维热振动。随着温度的升高其振动能量增加,振动频率和振幅加大。现在以双原子为模型(图 1-2),假设左边的原子在坐标原点静止不动,右边的原子作自由振动。当温度升高时,右边自由振动的原子的振幅增大。假若该原子以  $R_0$  为原点作简谐振动,则其平衡位置仍是  $R_0$  位置,就不会发生膨胀。但是图中势能曲线  $W(R)$  向右是水平渐近线,向左是垂直渐近线,是极不对称的,原子在作热振动时,一旦偏离其平衡位置,就必然引起势能的增高动能的降低。然而,由于势能曲线是极不对称的,向左振动时,动能很快就全部转化为势能,原子偏离平衡位置的距离小;而向右振动时,则需要偏离较大距离,动能才全部转化为势能,所以当温度升高时,振动加剧,势能按  $W_0 \rightarrow W_1 \rightarrow W_2 \rightarrow W_3 \dots$  变化时,其原子平衡位置将按  $R_0 \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \dots$  变化,可见原子间平衡距离随温度的升高而增加,即发生膨胀。但是,这种膨胀只改变了原子间的间距,并不改变原子排列的相对位置。

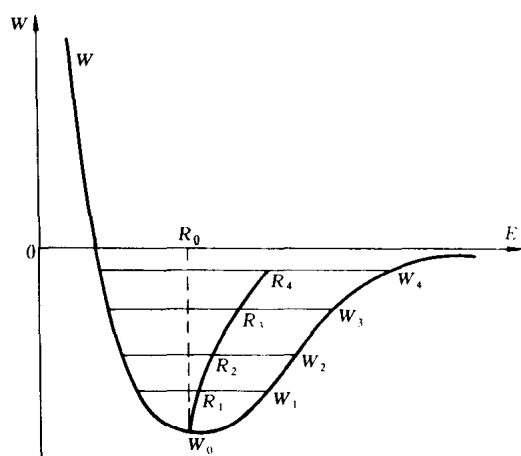


图 1-2 加热时原子间平衡距离的变化示意图

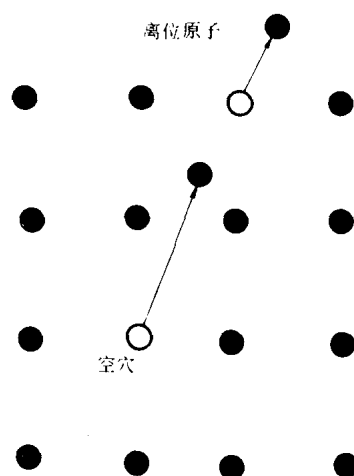


图 1-3 空穴形成示意图

另外,金属中原子的热振动方向是杂乱无章的,振动中可能与周围相邻的原子发生相互碰撞,进行能量交换。在碰撞中有的原子可能失去部分能量,有的原子则可能获得部分能量。因而,在任何时刻都可能有一些原子的能量超过该温度下原子的平均能量,而另一些原子的能量则可能小于原子平均能量。把这种原子之间能量的不均匀性称其为“能量起伏”。

随着温度的升高必将产生更大的能量起伏,其中一部分能量大的原子有可能越过势垒跳到周围原子之间的间隙中,把周围的原子挤开或者跳到金属表面。当部分原子跳离平衡位置后,原来的位置则成为空穴。空穴的产生引起周围区域势垒降低,邻近的原子便可能移进空穴



位置,就好比空穴在点阵中移动。可见,实际金属中,除了有按一定规律排列的原子外,还有部分离位原子和空穴。空穴首先从金属表面产生,再从表面向内部扩散。温度越高,能量起伏就越大,离位原子和空穴数量也越多。当温度接近熔点时,空穴数量大量增多。可见空穴的产生,也会使金属发生膨胀。空穴形成的示意图如图 1-3 所示。

综上所述,金属加热时,由于原子间距增大和空穴的产生是造成膨胀的根本原因。

### 三、金属的熔化

金属的熔化首先是从晶界开始的。这是因为,晶界上原子排列的相对不规则性,许多原子偏离平衡位置,具有很高的势能。当金属被加热到熔点附近时,离位原子数大为增加。在外力作用下,这些原子作定向运动,造成晶粒之间的相对滑动。在晶粒内部,也有大量的原子频繁跳跃,离位原子和空穴大量增多。当温度接近熔点时,晶界上的原子便可能脱离其晶粒表面,跳入邻近的晶粒表面,使晶粒逐渐失去原有形状。当金属温度达到熔点时,金属的晶粒逐渐被瓦解,金属的体积也突然膨胀;这时,金属进一步吸收大量热能即熔化潜热,但金属的温度并不升高。金属的这种突变现象,就是由于金属已由固态转变为液态发生相变而造成的,熔化潜热使金属晶体内的部分金属键进一步破坏,使液态金属原子具有更高的能量,而金属液的温度并不升高。

金属的熔化潜热也可以用热力学定律表示,即外界所给的潜热,一部分用来使体积膨胀做功,另一部分用来增加系统的内能。在恒压下可以写成

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

式中  $\delta q$ ——外界供给的潜热;

$U$ ——内能;

$p dV$ ——膨胀功;

$H$ ——热焓。

在等温等压下,熵值的增量为

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{1}{T} (dU + p dV) \quad (1-3)$$

由式(1-3)得知,系统熵值增加表示原子排列发生紊乱。可见,熔化的本质就是金属从固态的有规律性的长程有序排列转变为液态的紊乱而无序的非晶体结构的过程。

## 第二节 液态金属和合金的结构

结晶是在液态金属中发生的,液态金属的结构对金属的结晶必然有密切的关系。那么液态金属的结构究竟是怎样的呢?以前,人们常常把液态和固态金属对立起来,而把液态看成和气态相似,即认为液态中原子间的作用力很弱,都在无规律地运动着。到本世纪初,在对金属固态、液态和气态的物理性质进行了仔细研究以后,特别是用 X 射线分析对液态金属的结构进行研究以后,证明了上述关于液态金属结构的概念是不正确的。恰恰相反,认为液态金属的结构与固态金属的结构相近。

### 一、一些物理性质的变化

#### 1. 熔化时体积的变化