

总主编 曹茂盛 蒋成禹 田永君

总主审 吴 林 马莒生 方洪渊

材料科学与工程系列教材(二)

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

蒋成禹 胡玉洁 马明臻 主编

张 涛 侯跃永 审

材料加工原理

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书是高等学校材料科学与工程类专业的技术基础课教材,主要阐述材料加工的主要工艺方法及加工过程的基本原理。内容包括:液态金属凝固原理,金属塑性加工原理,粉末冶金材料加工原理,无机非金属材料、复合材料和高分子材料加工原理,材料连接加工原理,材料切割加工原理,现代材料加工新技术及原理。

本书以材料加工方法为主线,力求在阐述其基本原理的同时做到理论联系实际。本书为高等学校材料科学与工程类各专业本科生的通用教材,也可作为有关专业科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工原理/蒋成禹主编.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.8

材料科学与工程系列教材(二)

ISBN 7-5603-1649-2

I.材... II.蒋... III.工程材料-高等学校-教材 IV.TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 048654 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451—6414749

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 23.75 字数 548 千字

版 次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1649-2/TB·19

印 数 1~3 000

定 价 25.00 元

序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的大型系列教学丛书,其中第一系列、第二系列教材已分别被列为国家新闻出版总署“九五”、“十五”重点图书出版计划。第一系列教材 9 种已于 1999 年陆续出版。编写本系列教材丛书的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向 21 世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个较为广泛的知识平台的原则,并根据培养目标,确定书目、编写大纲及主干内容。为确保图书品位,体现较高水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。在此基础上,聘请了国内一批知名的专家,对本系列教材书目和编写大纲审查认定,最后确定各册的体系结构。经过全体编审人员的共同努力,第二系列教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等学校材料工程类专业教育改革发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。
2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。
3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。
4. 注重协调材料科学与材料工程的关系,既加强材料科学基础的内容,又强调材料工程基础,以满足培养宽口径材料学人才的需要。
5. 坚持体现教材内容深广度适中、够用的原则,增强教材的适用性和针对性。
6. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本系列教材编审工作的单位有:清华大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学、哈尔滨工程大学、北京化工大学、燕山大学、哈尔滨理工大

学、华东船舶工业学院、北京钢铁研究总院等 22 所院校 100 余名专家学者,他们为本系列教材的编审付出了大量心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。此外,编审委员会特别鸣谢中国科学院院士肖纪美教授、中国工程院院士徐滨士少将、中国工程院院士杜善义教授,感谢他们对本系列教材编审工作的指导与大力支持。

限于编审者的水平,疏漏和错误之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

材料科学与工程系列教材编审委员会

2001 年 7 月

前 言

《材料加工原理》是高等学校材料科学与工程类专业的技术基础课教材。

本书阐述材料加工的主要工艺方法及加工过程的基本原理,内容包括液态金属凝固原理,金属塑性加工原理,粉末冶金材料加工原理,无机非金属材料、复合材料和高分子材料加工原理,材料连接加工原理,材料切割加工原理,现代材料加工新技术及原理。

本书在内容安排上,以材料加工方法为主线,力求在阐述其基本原理的同时做到理论联系实际。本书为高等学校材料科学与工程类各专业的本科生通用教材,也可供有关专业科技人员参考。

本书由华东船舶工业学院、燕山大学、青岛化工学院、齐齐哈尔大学四校联合编写。参加本书编写的作者有孙振国(第一章),官英平(第二章),朱海涛、吴肇齐(第三章),马明臻(第四章),胡玉洁(第五章),邹家生(第六章),李敬勇(第七章),陈铮(第八章)。全书由蒋成禹、胡玉洁、马明臻主编,由张涛、侯跃永审。

限于编者的水平,本书难免有错误和不妥之处,欢迎使用本书的读者批评指正。

编 者

2001年7月

来信请寄:哈尔滨工业大学出版社 杨桦(收)

地 址:哈尔滨市南岗区教化街21号

邮 编:150006

目 录

绪 论	1
0.1 材料科学与工程	1
0.2 材料加工	3
0.3 材料加工原理的任务与内容	4
第一章 液态金属凝固原理	6
1.1 金属凝固的温度场	6
1.2 金属的凝固方式	16
1.3 金属的凝固时间	23
1.4 金属结晶组织和凝固缺陷的控制	28
本章小节	42
复习思考题	42
参考文献	43
第二章 金属塑性加工原理	44
2.1 应力分析	44
2.2 应变分析	53
2.3 屈服准则	63
2.4 塑性应力应变关系	65
2.5 塑性变形力的工程解法	69
本章小结	92
复习思考题	92
参考文献	94
第三章 粉末冶金与无机非金属材料加工原理	95
3.1 概述	95
3.2 粉体的制备与处理	96
3.3 成型原理	105
3.4 烧结原理	118
3.5 烧结体性能	135
3.6 陶瓷的精加工	139

3.7 陶瓷表面改性	149
3.8 陶瓷的连接	150
本章小结	158
复习思考题	158
参考文献	159
第四章 复合材料加工原理	160
4.1 复合材料的种类与特点	160
4.2 复合材料的界面	169
4.3 纤维增强复合材料的制备工艺	176
4.4 颗粒增强复合材料的制备工艺	187
本章小结	195
复习思考题	195
参考文献	196
第五章 高分子材料加工原理	197
5.1 概述	197
5.2 高分子材料的口模成型	209
5.3 高分子材料的模塑和铸塑	227
5.4 高分子材料的压延成型	252
5.5 高分子材料的二次成型	260
本章小结	276
复习思考题	276
参考文献	277
第六章 材料连接加工原理	278
6.1 熔化焊连接原理	278
6.2 钎焊连接原理	303
6.3 扩散连接原理	310
6.4 其他连接原理	317
本章小结	322
复习思考题	322
参考文献	323
第七章 材料切割加工原理	324
7.1 氧气切割原理	324
7.2 等离子弧切割原理	331
7.3 激光切割原理	338

7.4 水射流切割法	343
7.5 其他切割方法原理	347
本章小结	349
复习思考题	350
参考文献	350
第八章 材料加工新技术及其原理	351
8.1 定向凝固和单晶铸造	351
8.2 快速凝固技术和材料	352
8.3 纳米技术与纳米材料	354
8.4 氧化物弥散强化与机械合金化	356
8.5 金属纤维	358
8.6 表面改性	359
8.7 金属雾化喷射沉积	362
8.8 金属半固态加工	364
8.9 晶体生长技术	365
本章小结	368
复习思考题	368
参考文献	368

绪 论

《材料加工原理》一书是高等学校材料科学与工程类专业的技术基础课教材。材料科学与工程是一门综合利用现代的先进科学技术成就、多学科交叉、知识密集、投资量大的一门科学。根据其基本组分,材料科学可归纳为金属材料(Metallic Materials)、无机非金属材料(Inorganic Non-metallic Materials)、高分子材料(Polymer Materials)、先进复合材料(Advanced Composite Materials)四大类。而材料加工是实现材料在工程中应用的主要工艺过程。本书阐述了材料加工的主要工艺方法及加工过程的基本原理。

0.1 材料科学与工程

材料是用于制造有用物件的物质。在人类历史发展进程中,一直把材料作为人类进步的里程碑。20世纪60年代,人们把材料、信息与能源誉为当代文明的三大支柱,70年代又把新材料、信息技术和生物技术作为新技术革命的主要标志。材料的发展与社会的文明进步有着十分密切的关系,无论是计算机技术、航空航天技术,还是海洋工程技术、能源技术,所有技术的发展都与材料科学的发展密切相关,都是以材料为基础而发展起来的。近年来,生物工程材料、超导材料、纳米材料、环境工程材料等的发展受到全世界的关注,成为工业先进国家优先发展的领域。这些材料的发展将拓宽人类对未来各种科学领域的认识,将会展示出人类以往历史上无法探知领域的开发和应用。因此,材料是一切科学技术发展的物质基础,也是人类提高生活质量所必须的前提。

就材料整体来说,认为它已构成一门科学,是近30多年的事。20世纪60年代初,美国科学家首先提出材料科学这个名词。材料的获得、质量的改进及如何使材料成为人们可用的物件,这些都离不开生产工艺和制造技术等工程知识,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”。所谓材料,它包括金属材料、陶瓷材料(无机非金属材料)、有机高分子材料以及由几种材料组合在一起的复合材料。将这些原来分属不同学科的知识融为一体,形成新的学科,已成为世界各国材料界、教育界的共识,这是因为:①各类材料的研究可以互相借鉴、互相促进,如金属材料中的缺陷类别及其行为的理论、各种力学测试方法和性能指标都是研究陶瓷和高分子材料所不可缺少的。同样,陶瓷与高分子材料在许多方面也为研究金属材料提供参考,如材料的制备过程等。②对不同材料类型的深入了解,为材料的相互代用及最佳选材创造了条件。例如某些陶瓷材料已部分代用高温合金。③有利于开发复合材料,如玻璃钢便是以无机非金属材料玻璃纤维与有机材料树脂的复合,金属基复合材料主要是用无机非金属纤维或颗粒(SiC , Al_2O_3 等)等与金属复合而成的一类材料。④各类材料所用制备、加工(例如粉末冶金和陶

瓷制备工艺),特别是性能与结构的测试设备往往是通用的,即使是专用的,相互之间也有参考价值。⑤有益于人才培养。由于扩大了专业知识面,使学习本专业的青年专家增加了开发新课题的应变能力。

材料科学与工程是多学科交叉的新兴学科,从发展历史看,对于每一类材料来说,各自都可以是一门学科,如金属材料的物理冶金与冶金学,有机高分子材料传统上是有机化学的一个分支,陶瓷材料是无机化学中的一部分,它们都积累了丰富的专业知识和基础理论。材料科学与许多基础学科还有着不可分割的关系,如固体物理学、电子学、光学、声学、固体化学、量子化学、有机化学、无机化学、胶体化学、数学与计算科学等。作为大力发展的生物材料,与生物学及医学有着紧密的联系。因此,材料科学的边界不十分固定,其范围随科学技术的发展而不断变化,研究对象的内涵也在变化。作为材料科学工作者要有广阔而坚实的基础知识,也要有因需要而变更研究课题的能力和素质。一个本科生,乃至硕士生和博士生很难固定一个研究方向,随着工程上的需要,可能需要不断地变换自己的研究课题,建立新的研究方向。因此教育更重要的是培养坚实的基础,掌握材料科学与工程方面的广泛的基础知识,以适应未来工作的需要。材料科学与工程技术有着不可分割的关系。材料科学研究材料的组织结构与性能的关系,从而发展新型材料,并合理有效地使用材料,但要使材料工程化及商品化,要经过一定经济合理的工艺流程,这就是材料工程。反之,科学的发展,也需要研制出新的材料才能实现。因此材料科学与工程是相辅相成的。材料科学与工程有很强的应用目的和明确的应用背景,这和材料物理有重要区别。研究材料中的基本规律,目的在于为新型材料提供新途径、新技术、新方法或新流程;或者为更好地使用已有材料,充分发挥其作用,进而能对使用寿命作出正确的估算。因此材料科学与工程是一门应用基础科学,它既要探讨材料的普遍规律,又有很强的针对性。材料科学研究往往通过具体材料的研究找出带普遍性的规律进而促进材料的发展和推广使用。根据学科性质,我国著名材料科学家师昌绪院士把材料科学与工程定义为“关于材料组成(成分)、结构、合成与加工、性能及使用性能相互关系的科学。”可用图 0.1 表示。

一定的成分,经过确定的合成与加工的工艺手段表现出材料的一定的性能,材料性能指对电、磁、光、热、机械载荷的反应,而这些主要取决于材料的成分和结构。而使用性

能是材料在使用状态下表现出的行为,它与设计、工程环境密切相关。有些材料的实验室性能很好,但在复杂的使用条件下,如在氧化与腐蚀、疲劳及其他复杂载荷条件下,就不令人满意,甚至失效,这一点在材料科学与工程的研究中显得特别的重要。合成与加工过程其内容很丰富,既包括传统的冶炼、铸锭、制粉、压力加工、焊接等,也包括各种新发展的真空溅射、气相沉积等新工艺;从微观水平到宏观制品,从制取高纯单一元素到多种材料的复合,各种化学的、物理的、机械加工的方法均应综合利用。这对新材料的生产应用往往

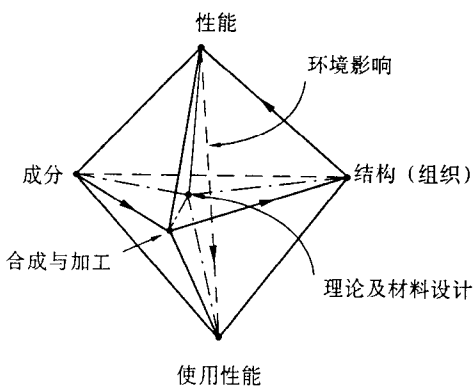


图 0.1 材料科学与工程的内涵示意图

起决定性的影响。实际上,一种新工艺的出现必将促进一系列新型材料的产生。

综上所述,大量的基础学科的知识指导材料成分、结构与性能的研究,也指导了合成与加工的发展,通过合成与加工生产出可供人们使用的工程材料,而工程材料在使用过程中所暴露的问题,再反馈到成分、结构和性能的研究,进而改进材料的合成和加工,得到更为合适的工程材料(包括结构材料与功能材料)。如此反复,使材料不断改进而更加成熟,这就是材料科学与工程全面内涵,也是材料科学与工程的内容与任务。

0.2 材料加工

材料必须经过加工才能成为工程构件,材料加工是工程结构材料应用的前提。材料的合成与加工又是材料科学与工程的五大要素之一。

材料加工与材料的工艺性能紧密相连,所谓的材料工艺性能,系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、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。材料的加工与选材原则又密切相关,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,满足使用性能要求的材料才能达到产品质量的目的。

(2) 工艺性能。对构件加工的主要方法有铸造、锻造、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合格率。因此,选用的材料应具有良好的工艺性能。

(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) 环保性能。材料在制造和加工使用过程中对环境保护的影响。

材料加工过程必须统筹考虑材料构件的使用性能、工艺性能、环保性能及经济承载力,经过对比分析、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、光电子材料、超导材料及纳米材料等发展也非常迅速。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、加工原理的改进应该给予更大的重视,因为我国传统材料的研究和应用和国际先进水平相比,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。

本着上述观点,重点介绍使用面广量大的传统材料在加工制造中的基本原理是本书的主要任务。

0.3 材料加工原理的任务与内容

材料加工原理课是材料工程类专业的技术基础课,着重阐述材料加工的主要加工方法及加工过程的基本原理,内容包括:液态金属凝固原理,金属塑性加工原理,粉末冶金加工原理,无机非金属材料、复合材料和高分子材料加工原理,材料连接加工原理,材料切割加工原理,现代材料加工新技术原理等。本书以材料加工方法为主线,力求在阐述其基本原理的同时做到理论联系实际。

液态金属凝固原理。金属材料以铸造工艺进行零件加工的主要理论基础。通过对金属凝固的温度场、凝固方式、凝固时间、金属凝固后产生的结晶组织及其可能产生的凝固缺陷的学习,可基本上掌握材料的成分、铸造方法及冷却条件对铸件性能的影响。必须指出,材料连接机理也与液态金属凝固原理密切相关,通常所说的焊接过程(熔化焊方法)即为“小铸造过程”。

金属塑性加工原理。金属材料冷热成型、锻造的基本理论。通过对金属材料屈服条件和强化条件、塑性本构关系、塑性平面应变问题及滑移线场理论的学习,可以清楚认识材料在冷热成型及锻造过程的基本理论。

粉末冶金原理。某些特殊构件制造过程的主要方法,如刀具、模具的制造,特殊条件下使用的耐磨、耐高温件的制造等,都普遍采用这种加工制造方法。通过对粉末冶金的一般知识、粉末的制取、粉末的成型、烧结过程等的学习,可基本掌握粉末冶金加工方法的基本理论。

无机非金属材料加工原理。陶瓷材料具有一般金属材料所不具备的特殊性能,如耐磨、耐高温性能等,因而广泛用于航天航空及机电行业。通过对陶瓷材料的概述、陶瓷材料的制备工艺、陶瓷材料的力学性能、陶瓷材料的韧化、陶瓷材料的连接等的学习,可基本掌握陶瓷材料特性及加工原理、可能存在的主要问题及研究思路。

复合材料加工原理。复合材料是两种及两种以上材料相互复合,它具有单一材料所不具有的特殊性能。介绍了对颗粒及纤维增强复合材料的复合原理的探讨和树脂基复合材料、金属基复合材料及其他类复合材料的加工原理。

高分子材料加工原理。由于高分子材料具有特殊的性能,如密度小、易成型、应用广等,被广泛应用到国民经济各个领域。鉴于高分子材料的结构特点及力学性能,介绍了高分子材料加工基本原理,特别是成型模具选取的基本原则。

材料连接加工原理。长期以来,人们一直应用“焊接”这个名词。随着科学技术的发展,人们把焊接(熔化焊、钎焊、扩散焊、电阻焊等)、粘接、胶接、扩散连接,统称为“连接技术”,连接技术是金属材料加工的主要手段之一。主要介绍连接方法的基本原理。

材料切割加工原理。切割工艺是由材料到产品的中间工艺过程。介绍了普通气体气切、等离子切割、激光切割、水切割等目前最常用的加工方法及原理。

现代材料加工新技术及原理。随着工业技术的进步,现在发展起来一系列新的加工技术。这些加工技术突破了传统加工方法的理论和实践。这些新方法的出现,带来了许

多奇妙的材料的物理及化学特性,限于篇幅,在着重讲述传统加工方法的同时,概要地阐述目前国际上研究的几种热点材料的加工方法及基本原理,达到使学生能跟踪现代技术发展及掌握在将来工作中从事和开发、发展这些领域所需的基本知识和基本技能的目的。这包括超细金属颗粒、金属纤维、氧化物弥散强化与机械合金化、金属的超塑性及超塑性成型、人工晶体生长等新的加工技术及原理。

材料加工原理是一门实用性很强的学科,它是包含多门基础学科知识的综合性学科,同时材料加工原理是材料科学和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。通过学习可以掌握材料科学和材料工程结合的最佳切入点。

第一章 液态金属凝固原理

凝固是指从液态向固态转变的相变过程,广泛存在于自然界和工程技术领域。从水的结冰到火山熔岩的固化,从钢铁生产过程中铸锭的制造到机械工业领域各种铸件的铸造,以及非晶、微晶材料的快速凝固,半导体及各种功能晶体的液相生长,均属凝固过程。金属在焊接时,焊缝中的金属也要发生凝固。几乎一切金属制品在生产流程中都要经历一次或一次以上的凝固过程。由于金属凝固后通常是晶体,所以又将液态金属向固态金属的这一转变过程称之为结晶。结晶和凝固这两个术语虽然指的是同一个状态变化过程,但有人认为它们在含义上是有区别的。结晶主要是从物理化学的观点出发,研究液态金属的生核、成长、结晶组织的形成规律;而凝固则是从传热学的观点出发,研究铸件与铸型的传热过程、铸件凝固方式与铸件质量的关系、铸件的凝固时间以及金属结晶组织和凝固缺陷的控制等。关于金属的结晶问题已在“材料科学基础”课程中作过介绍,本章仅讨论液态金属的凝固规律。

认识液态金属的凝固规律,研究凝固过程的控制途径,对于防止产生凝固缺陷、改善铸件组织、提高铸件的性能有着十分重要的意义。

1.1 金属凝固的温度场

在实际生产中,液态金属通常是在铸型(铸模)中凝固,而后得到铸件(铸锭)。液态金属接触铸型以后,液态金属和铸型间便发生了传热过程,结果,液态金属的温度不断下降,铸型温度不断上升。液态金属和铸型各部分的温度在不断地发生变化,即温度场在不断地变化。

1.1.1 温度场的概念

在某一瞬间,物体各点温度分布的情况称为温度场。图 1.1 所示为 80mm 厚的板形钢铸件在浇注后不同瞬间测定的铸件截面上的温度分布情况。可以看出,在铸件截面上某一点,不同时刻,其温度是不同的。如在离铸件外表面 15mm 处,浇注后 24min,温度为 1460℃;而在浇注后 26min 时,该处温度下降为 1450℃。可见铸件截面某一点的温度 t 是浇注后时间 τ 的函数。在同一瞬间,铸件截面上各点的温度也不同。如在浇注后 26min,距离铸件外表面为 5mm 及 15mm 处的温度,分别为 1440℃和 1450℃。可见在同一瞬间,铸件截面上各点温度 t 是各点空间坐标 x, y, z 的函数。

综合上述,可知温度 t 是坐标 x, y, z 和时间 τ 的函数,所以温度场的数学表达式为

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1.1)$$

这种随时间 τ 而改变的温度场称为不稳定温度场。图 1.1 中每根曲线表示在相应瞬间铸件内的温度场,可见该铸件内的温度场为不稳定温度场。反之,不随时间 τ 而改变的温度场称为稳定温度场,其数学表达式为

$$t = f(x, y, z) \quad (1.2)$$

当物体各部分温度不同时,就有热量从温度较高的地区向温度较低的地区传递,使各处温度逐步趋于均匀。如果要阻止物体温度自发地趋于均匀这一趋势,则一定要从外界不断地向温度较高的那部分补充热量,还必须不断地从温度较低的那部分取走所传递的热量。欲保持物体内部的稳定温度场,则要求补充的热量等于被取走的热量。从式(1.1)可知,在某一瞬间,温度场是由空间三个坐标 x, y, z 所决定,这称为

三维温度场,若温度场仅与两个或一个坐标有关,则分别称为二维或一维温度场。一维不稳定温度场的数学表达式为

$$t = f(x, \tau)$$

一维稳定温度场具有最简单的数学表达式,即

$$t = f(x)$$

在同一瞬间,温度场中温度相同点所组成的面(或线)称为等温面(或等温线),它可以是平面(或直线),因为在温度场中,每一点不可能同时具有两个不同的温度,因此代表不同温度的等温面(或等温线)就不能相交。

物体内部温度场通常用画等温面来表示,物体断面的温度场通常用不同瞬间的温度分布情况来表示。在某些有规则的物体上,容易找到其等温面。如有一个面积很大、材料均匀的等厚度平板,只要它两个表面的温度都是均匀的,即一个表面的温度为 t_1 ,另一个表面的温度为 t_2 ,则它的等温面就是平行于表面的平面,如图 1.2(a)虚线所示。如果物体为长圆管,且内外壁面温度各自均匀,管壁内部的等温面则为同轴圆柱面,如图 1.2(b)虚线所示。对于不规则的物体,它内部的等温面一般需通过温度的实际测定方能得到。图 1.3 为某铸件在砂型中凝固时测出的砂型温度场分布。

绘出物体内的等温面,可以直观地了解物体内部温度分布情况。在实际生产当中尤其是铸造生产上,这对于判断铸件凝固顺序,找出复杂铸件中缩孔分布的位置有重要意义。

在同一等温面上,各处的温度是相同的,所以没有热量传递。热量只能由温度场的高温等温面向低温等温面传递,且热量的传递方向只能是沿着等温面的法线方向。温度场中单位长度上的最大温度变化率是在等温面的法线方向 n 上。通常把温度场中任意点的温度沿等温面法线 n 方向的增加率称为该点的温度梯度 $\text{grad} t$,且

$$\text{grad} t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\Delta t / \Delta n) = \partial t / \partial n \quad (1.3)$$

因为 n 是矢量,所以温度梯度是表示温度变化强度的一个矢量,通常把温度增加的方向

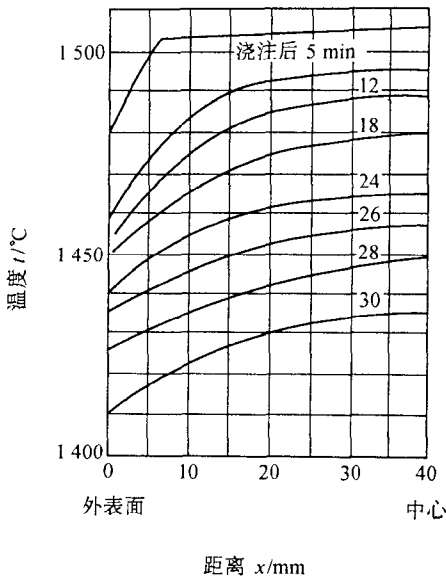


图 1.1 不同瞬间铸件截面上温度分布情况

作为温度梯度矢量的正方向。这样,由于热流朝着温度降低的方向,所以热流方向与温度梯度方向相反。温度场中,温度梯度也是时间和空间的函数。对于稳定温度场,其温度梯度仅仅是空间坐标的函数,与时间无关。对于一维稳定温度场,其温度梯度

$$\text{grad } t = dt/dx \quad (1.4)$$

在同一瞬间,温度场中等温线密集处温度梯度较大,等温线稀疏处温度梯度较小。

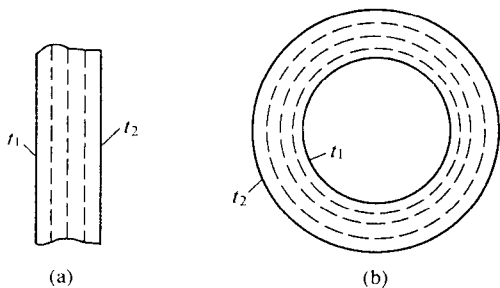


图 1.2 平板及长圆管的等温面
(a) 平板 (b) 圆管

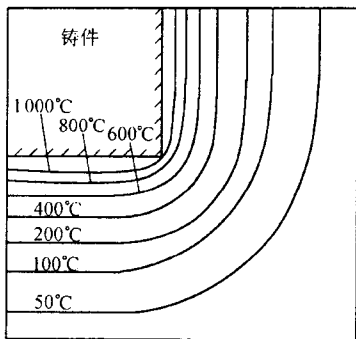


图 1.3 浇注 15min 后砂型中的温度场

1.1.2 凝固过程中传热的方式与特点

液态金属凝固过程的传热符合传热的普遍规律,包括传导、辐射和对流三种基本传热方式。图 1.4 示出了典型金属凝固过程中的主要传热方式。从图中可以看到,铸件与铸型之间的传热主要是传导传热,而铸型的外表面向周围环境中散失热量则是以辐射和对流的形式进行的。

在传导传热中,傅里叶(J. B. Fourier)实验结果表明,单位时间内,通过单位截面面积所传递的热量(称为比热流量)与温度梯度成正比,即

$$q \propto \text{grad } t \quad (1.5)$$

或

$$q = -\lambda \partial t / \partial n \quad (1.6)$$

式(1.6)为傅里叶定律的数学表达式,也称为傅里叶导热方程式。式中, q 为比热流量,单位是 W/m^2 ,负号表明导热的方向永远沿着温度降低的方向;比例系数 λ 称为导热系数,单位为 $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$,在数值上等于物体单位距离上温度降低 1°C 时的比热流量,所以导热系数表示了物质导热能力的大小。

铸件凝固期间与铸型的热交换,主要是将液态金属的显热(即过热热量)和凝固潜热通过一系列热阻(热交换系统中某组元的厚度与该组元导热系数之比称为该组元的热阻)传给铸型乃至环境。从图 1.4 中可以看出,凝固过程的热阻应包括以下几部分:液态金属的热阻、已凝固金属的热阻、中间层的热阻以及铸型的热阻等。各部分的热阻随着铸造条件的不同而异,这样,在热交换过程中起决定作用的热阻也要随铸造条件的改变而改变,从而导致了不同铸造条件下具有不同的热交换特点。下面简要介绍四种典型的热交换情

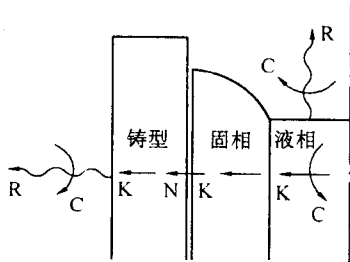


图 1.4 金属凝固过程中的主要传热方式

K—传导传热 C—对流传热
R—辐射传热 N—牛顿换热

况。

1. 铸型热阻起决定作用

砂型铸造属于这类情况。由于砂型的导热系数远远小于金属铸件的导热系数,铸件在砂型中凝固冷却时冷却缓慢,其断面上的温差($\delta_1 t$)很小。由于同样的理由,铸型内表面被铸件加热至很高的温度,而其外表面仍处于较低的温度,断面上的温差($\delta_2 t$)很大。铸件和铸型断面上的温度分布如图 1.5 所示。可见,铸件和中间层断面上的温差($\delta_3 t$)与铸型的温差相比是相当小的,甚至可以忽略不计。在这种情况下,热交换过程主要由铸型热阻起决定作用,亦即铸件的冷却强度主要取决于铸型的热物理参数。

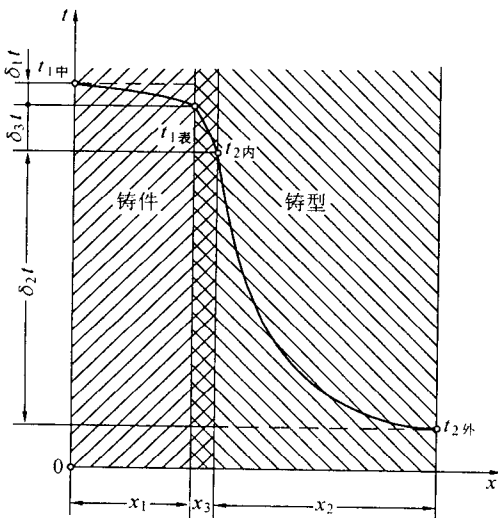


图 1.5 铸型热阻起决定作用时的温度分布

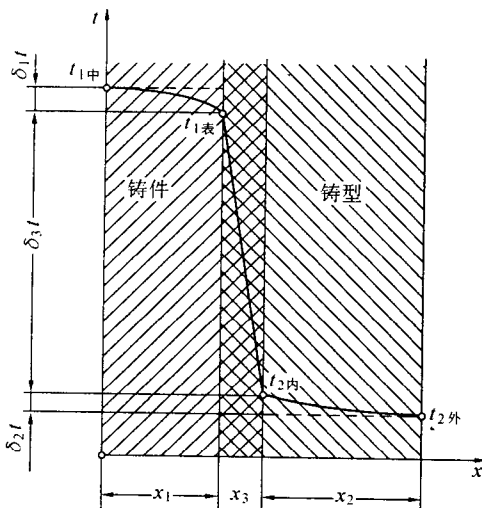


图 1.6 中间层热阻起决定作用时的温度分布

2. 中间层热阻起决定作用

铸件在金属型中凝固且型腔内表面有隔热涂料时属于这种情况。由于型腔内表面涂有较厚的涂料,加之可能在铸件与铸型之间形成的间隙,使得这种间隙和涂料兼而有之的中间层热阻很大。在这种情况下,铸件、中间层和铸型断面上的温度分布如图 1.6 所示。可见,大部分温度降在中间层。其传热特点是,铸件断面上的温差和铸型断面上的温差与中间层的温差相比,显得很小,可以忽略不计。此时,对铸件与铸型之间的热交换起决定作用的是中间层的热阻。

3. 金属凝固层热阻起决定作用

液态金属在水冷金属型中凝固时,金属型的冷却能力远大于金属凝固层的导热能力。当液态金属浇入型腔之后,金属的表面温度便由熔点突然降至很低温度,造成铸件断面上的温度差很大。相反,在金属型的断面上温度差则很小。在这种情况下,铸件和铸型断面上的温度分布如图 1.7 所示。其传热特点是,中间层和金属铸型断面上的温差很小,可以忽略不计。传热过程主要取决于铸件本身的热阻。

4. 金属凝固层热阻和铸型热阻共同起决定作用

在非水冷厚壁金属型铸造的情况下,铸件和铸型断面上的温度分布如图 1.8 所示。