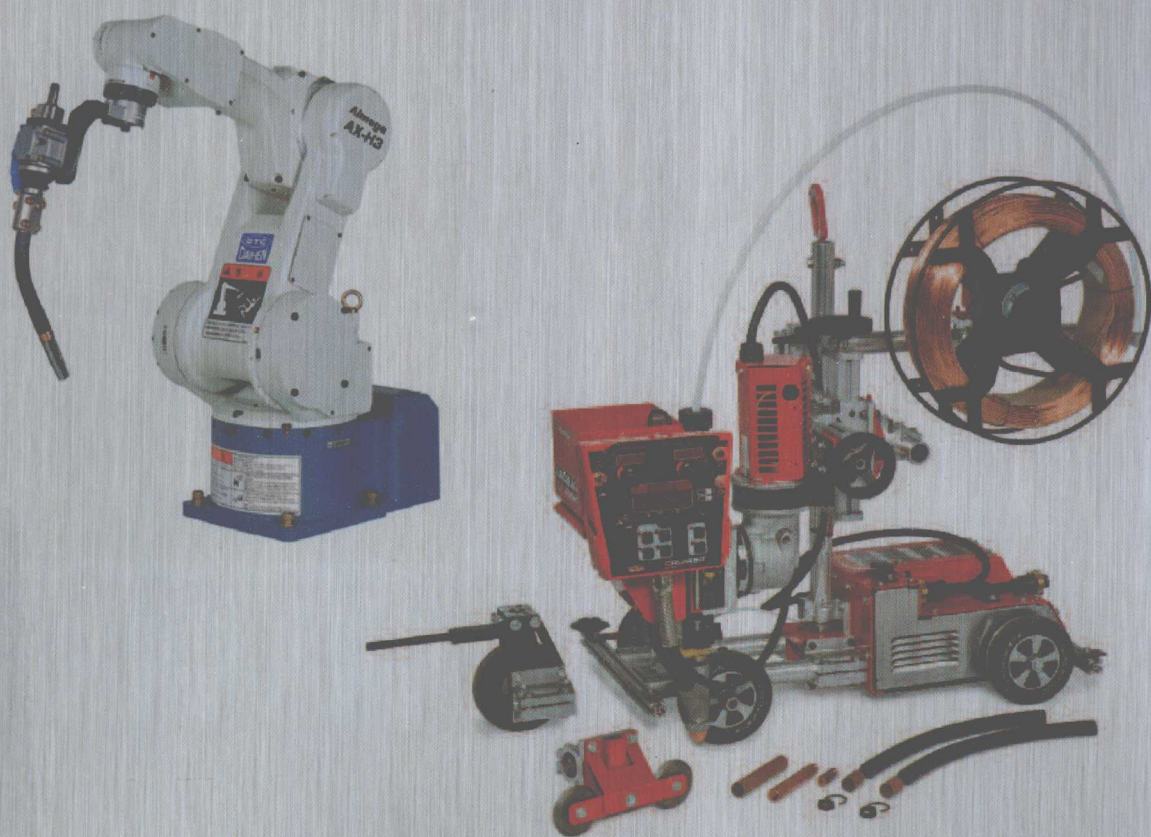


高等学校材料成形类专业规划教材

材料加工工程

CAILIAO JIAGONG GONGCHENG

常庆明 陈长军 编



化学工业出版社

高等学校材料成形类专业规划教材

材料加工工程

常庆明 陈长军 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共分三大章, 主要介绍液态金属的成型工艺、金属焊接成型和材料表面处理工程。具体包括: 液态金属的工艺性能、砂型铸造、铸造工艺设计、铸造工艺 CAD/CAE、电弧的特性、焊丝的熔滴过渡、焊缝成形、埋弧焊、氩弧焊、二氧化碳气体保护焊、等离子弧焊、热喷涂、气相沉积、激光表面工程技术等。各章还附有复习思考题。

本教材特别注意理论联系实际, 突出重点, 并特别注意反映目前最新的进展。

本书可以作为高等院校材料成型与控制工程、材料学、材料加工工程以及相近专业学生的教材或参考书, 也可以供科研单位和厂矿企业的有关工程技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工工程 / 常庆明, 陈长军编. —北京: 化学工业出版社, 2010.1

高等学校材料成形类专业规划教材

ISBN 978-7-122-07236-8

I. 材… II. ①常… ②陈… III. 工程材料-加工-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 226034 号

责任编辑: 陶艳玲

装帧设计: 周 遥

责任校对: 王素芹

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 357 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料加工技术是先进制造技术的重要组成部分，铸造、焊接和表面工程技术在国民经济的发展和国家建设中发挥着重要的作用。

本教材的编写是在教育部“厚基础、宽口径”的人才培养模式的背景下，为了满足“突出特色、分类指导”的原则，结合焊接、铸造等专业并入材料科学与工程、材料成型及控制工程专业的需要而编写的，涵盖了材料成型及控制工程专业人才培养方案所要求的基本内容，同时兼顾相近和相关专业学生学校的需要。教材强调专业知识与基础历练的结合，同时兼顾最新技术的发展，将对适应新形势下材料加工人才的培养起到促进作用。

全书共分三大章，主要介绍液态金属的成型工艺、金属焊接成型和材料表面工程。具体包括：液态金属的工艺性能、砂型铸造、铸造工艺设计、铸造工艺 CAD/CAE、电弧的特性、焊丝的熔滴过渡、焊缝成形、埋弧焊、氩弧焊、二氧化碳气体保护焊、等离子弧焊、热喷涂、气相沉积、激光表面工程技术等。各章还附有复习思考题。本书的第 1 章由常庆明编写，第 2 章、第 3 章由陈长军编写，全书的统稿由常庆明负责。

本教材特别注意理论联系实际，突出重点，并特别注意反映目前最新的进展。

本书可以作为高等院校材料成型与控制工程、材料学、材料加工以及相近专业学生的教材或参考书，也可以供科研单位和厂矿企业的有关工程技术人员学习、参考。

本书得到武汉科技大学教材出版基金的资助，在此表示感谢。

本书的体系和内容将在本书使用的过程中不断地改进与完善，由于作者水平有限，书中难免有疏漏和欠妥之处，恳请各位老师、学生和读者提出宝贵的意见，以便再版时改进和不断地完善。

编者

武汉科技大学钢铁冶金与资源利用省部共建教育部重点实验室

2009 年 10 月

目 录

第0章 绪论	1	1.6.6 离心铸造	101
0.1 铸造概述	1	复习思考题	102
0.2 焊接概述	1	第2章 金属焊接成型	105
0.3 表面工程概述	2	2.1 引言	105
0.4 课程性质、任务及内容	3	2.1.1 焊接技术的发展历程	106
第1章 液态金属的成型工艺	4	2.1.2 焊接技术的分类	107
1.1 概述	4	2.1.3 焊接技术的发展趋势	110
1.1.1 铸造技术的历史及发展	4	2.2 焊接电弧理论基础	111
1.1.2 铸造生产的工艺过程	5	2.2.1 焊接电弧的物理基础	111
1.1.3 铸造生产的特点及应用	5	2.2.2 焊接电弧的产生	118
1.2 液态金属的工艺性能	6	2.2.3 焊丝的加热与熔化	141
1.2.1 液态金属的充型能力	6	2.2.4 熔滴上的作用力	143
1.2.2 铸造合金的收缩	9	2.2.5 熔滴过渡的主要形式及其特点	144
1.2.3 铸造应力、变形和裂纹	14	2.2.6 熔滴过渡中的损失及飞溅	150
1.2.4 铸件中的偏析	16	2.2.7 熔池受到的作用力	153
1.2.5 铸件中的气孔	17	2.2.8 焊接参数和工艺因素对焊缝成形的影响	154
1.3 砂型铸造	18	2.2.9 焊缝缺欠	160
1.3.1 砂型铸造的分类	18	2.3 典型焊接电弧设备	161
1.3.2 黏土砂型的制造	20	2.3.1 焊条电弧焊	161
1.3.3 化学黏结剂砂型(芯)的制造	27	2.3.2 埋弧焊	164
1.4 铸造工艺设计	35	2.3.3 CO ₂ 电弧焊	168
1.4.1 概述	35	2.3.4 熔化极氩电弧焊	170
1.4.2 铸件结构的工艺性	38	2.3.5 钨极氩弧焊	171
1.4.3 铸造工艺方案的确定	43	2.3.6 等离子弧焊	174
1.4.4 铸造工艺参数的确定	55	复习思考题	177
1.4.5 浇注系统设计	57	第3章 材料表面处理工程	178
1.4.6 冒口、冷铁及补贴	70	3.1 绪论	178
1.5 铸造工艺 CAD/CAE	80	3.2 表面技术的发展历程	178
1.5.1 铸造工艺 CAD	80	3.3 表面技术的目的及分类	179
1.5.2 铸造工艺 CAE	86	3.4 表面技术的应用与发展	180
1.6 特种铸造	95	3.5 激光表面加工技术	181
1.6.1 熔模铸造	95	3.5.1 激光表面处理的原理及特点	181
1.6.2 金属型铸造	96	3.5.2 激光器的种类	181
1.6.3 压力铸造	98	3.5.3 激光淬火	182
1.6.4 低压铸造	99	3.5.4 激光合金化	183
1.6.5 实型铸造	100		

3.5.5 激光熔敷	183	3.7.4 热喷涂装置和设备	194
3.5.6 激光气相沉积	185	3.7.5 热喷涂涂层后处理和涂层性能 的检验	197
3.5.7 激光表面非晶化	185	3.8 其它表面处理技术	198
3.5.8 激光冲击硬化	186	3.8.1 电镀技术	198
3.5.9 激光表面清洗技术	187	3.8.2 化学镀技术	205
3.6 气相沉积技术	188	3.8.3 表面化学热处理技术	206
3.7 热喷涂技术	190	3.8.4 电子束与离子注入表面处理技术	213
3.7.1 热喷涂技术的种类和特点	191	复习思考题	217
3.7.2 热喷涂的预处理	192	参考文献	218
3.7.3 热喷涂材料	193		

第 0 章 绪 论

铸造、焊接与表面工程技术均属于材料加工工程中应用范围比较广的工程技术，在国民经济生产和生活的各个部门均可以看到铸造、焊接和表面工程应用的实例。在学习了材料加工原理之后，本书就主要讲述铸造、焊接和表面工程技术等内容。

0.1 铸造概述

铸造是历史上最悠久的一种工艺，但现代铸造是在 20 世纪才发展起来的。发展的基础是需求，正是 20 世纪一些新兴产业的发展，促进了现代铸造业的发展与形成，不仅铸件产量巨幅增长，铸造技术也得到了飞速的发展。

在材料成型工艺发展过程中，铸造是液态金属直接成型的主要方法。铸造成型工艺几乎不受零件大小、厚薄和复杂程度的限制，适用范围广，可以铸造壁厚范围为 0.3~100mm、长度从几个毫米到几十米、质量从几克到几百吨的各种铸件。目前我国铸件年产量已超过 1000 万吨，但由于历史原因，长期以来，我国的铸造生产处于较落后状态。与当前世界工业化国家先进水平相比，我国的铸造生产的差距不是表现在规模和产量上，而是集中在质量和效率上。

铸造在机械制造业中占有十分重要的地位。在机械产品中，铸件所占比重很大。例如，在机床、内燃机、重型机器中，铸件约占 70%~90%；在风机、压缩机中约占 60%~80%；在拖拉机中约占 50%~70%；在农业机械中约占 40%~70%；在汽车中约占 20%~30%。没有铸造业的创新，就没有机械制造业的发展。

但是，铸造成型的工序多，生产过程中工艺控制较困难，因而铸件的质量不够稳定，废品率较高。与同种材料的其它成型方法相比，铸件因晶粒粗大，内部常有缩孔、缩松、气孔、砂眼、夹渣等缺陷，其力学性能较差。此外，铸造成型的劳动强度大，条件差，环境污染严重。特别是我国铸造生产技术更为落后，生产铸件的能耗高出发达国家一倍以上，铸件厚大笨重，污染物的排放量也显著高于发达国家，而清理部分的劳动条件与清洁生产的要求相距颇远。技术发展对铸造业的要求是：①成为短交货期优质高效生产系统，这就是要求与产品设计相结合，实现柔性化生产，实现“净形”或“近净形”铸造，提供经切削加工的零件或经组装的部件；②环境友好的生产技术，实现节能，降低材料消耗，减少污染排放及实现材料的再生循环使用等。

近年来，随着铸造新技术、新工艺、新设备、新材料的不断采用，以及电子计算机在铸造生产中的应用，使铸件的质量、尺寸精度、力学性能和生产率有了很大的提高，表面粗糙度值降低，劳动条件得到改善，使铸造的应用范围更加广泛。21 世纪的铸造产品将朝着轻量化、高强度、高精度、低消耗的方向发展，铸造行业将致力于减员增效、节能降耗、专业化、自动化的可持续发展。

0.2 焊接概述

在现代工业中，金属是不可缺少的重要材料。高速行驶的汽车、火车、载重万吨至几十

万吨的轮船、耐腐蚀耐压的化工设备以至宇宙飞行器等都离不开金属材料。在这些工业产品的制造过程中, 需要把各种各样加工好的零件按设计要求连接起来制成产品, 焊接就是将这些零件连接起来的一种理想的加工方法。据不完全统计, 目前全世界年产量 45% 的钢和大量有色金属, 都是通过焊接加工形成产品的。

特别是焊接技术发展到现在, 几乎所有部门(如机械制造、石油化工、交通能源、冶金、电子、航空航天等)都离不开焊接技术。因此可以这样说, 焊接技术的发展水平是衡量一个国家科学技术先进程度的重要标志之一, 没有现代焊接技术的发展, 就不会有现代工业和科学技术的今天。

焊接技术是 21 世纪将有重大发展的连接技术。许多新材料和新器件(如高技术领域的陶瓷、单晶材料、蜂窝材料等), 特别是几种材料的焊接, 如传感器用金属与陶瓷件、铝-铜冷却管, 采用焊接技术进行的连接的优越性非常明显。特别是激光焊接的应用呈现出日新月异的发展趋势。

0.3 表面工程概述

物体的相互作用首先是通过物体表面进行的。表面及表面层的结构与性能在科学、技术和日常生活中的重要性是不言而喻的。工程中常见的三大失效形式——磨损、腐蚀和断裂, 前两者是因表面破坏而失效, 即使是疲劳断裂, 也往往是从受力最大的表面开始而逐渐向内部发展。失效破坏导致零部件报废, 设备停产, 给国民经济造成巨大的损失。表面工程学能直接针对许多贵重零部件的失效原因, 实行局部表面强化或修复, 对零部件进行预保护或重新恢复其使用价值, 它的最大优势是能够以多种方法制备出优于本体材料性能的表面功能薄层, 这层表面材料与制作部件的整体材料相比, 厚度薄, 仅占工件整体厚度的几百分之一到几十分之一, 但却能赋予基体材料表面原来没有的特殊性能, 从而满足工程上对材料表面性能的要求。因此, 开展表面工程学的研究, 改善材料的表面性能, 对于提高零件的使用寿命和可靠性; 对于改善机械设备的性能、质量, 增强产品的竞争能力; 对于推动高新技术的发展; 对于节约资源、美化人类生活, 减少环境污染等方面都具有重要意义, 其经济效益和社会效益是显而易见的。

开展表面工程学的研究, 不仅在于其经济意义, 还在于其具有重要的学术价值。表面工程研究的目的是赋予材料表面具有原来没有的特殊性能。

① 物理性能 包括电磁特性(导电性、绝缘性、半导体性、磁性、电磁屏蔽性)、光学特性(吸光性、反光性、光导、光电效应)、热特性(热传导性、耐热性)、声特性及防辐射等;

② 化学性能 包括腐蚀防护性、催化特性等;

③ 力学性能 包括加工性、密封性、抗疲劳性、强度、硬度、韧性等;

④ 摩擦学性能 包括减摩性、耐磨性、自润滑性、浸润性等;

⑤ 装饰性 包括色彩、光泽性和可修饰性。

表面工程技术以其高度的实用性和显著的优质、高效、低耗的特点在制造业、维修业中占领了日益增长的市场, 在航空航天、电子、汽车、能源、石油化工、矿山等工业部门得到了越来越广泛的应用, 可以说几乎有表面的地方就离不开表面工程。

0.4 课程性质、任务及内容

《材料加工工程》是材料成型及控制工程专业教学中比较重要的一门专业课，为了培养学生解决实际问题的能力，本书在简要介绍基本理论的基础上重点阐述该理论是如何应用与实践的，力求突出材料加工工程的科学性、先进性和新颖性、实用性。

本教材编写的目的是为了培养学生了解和掌握与科技发展密切相关的铸造成型、焊接成型和表面加工技术，为学生将来从事材料成型及控制、材料加工（焊接、铸造、表面工程）或其它相关学科领域的工程技术和科研工作打下坚实的专业基础。

本教材涉及的技术种类比较多，如铸造成型一章中包含液态金属的工艺性能、铸造合金的收缩、铸造应力、变形和裂纹、铸造气孔、偏析、砂型铸造、铸造工艺设计以及计算机在铸造中的应用等内容。焊接成型中则有焊接电弧的基本理论、焊丝的熔化和熔滴过渡、焊缝成形、埋弧焊、钨极气体保护焊、二氧化碳气体保护焊、等离子束焊等内容。在表面工程一章中则介绍了激光表面处理技术、气相沉积技术、化学镀、电镀等内容。

在学习的时候首先要深刻理解基本概念，时刻关注科学进步，最终目的是为了将其应用于工程和科研实践。

第 1 章 液态金属的成型工艺

1.1 概述

金属材料的液态成型是将金属材料加热到高温熔化成液态，然后注入一定的型腔（铸型）中使之凝固、冷却而形成具有一定形状和尺寸的金属制件，这种成型方法又可称为铸造成型。这种制造金属制品的生产过程称为铸造生产，简称铸造，所铸出的金属制件称为铸件。大部分铸件一般均用作毛坯，需经机械加工后才能成为各种机器零件；少数铸件当达到使用的尺寸精度和表面粗糙度时，可直接作为零件或产品使用。

1.1.1 铸造技术的历史及发展

现存最早的铸造零件——铜制武器和崇拜偶像来自中东和印度。它们的历史可以追溯到公元前 3000 年。金属铸造使用的模具技术可能源于中东。然而，有证据表明这一技术是在中国和印度发展起来的。

我国的铸造技术已有 6000 年悠久的历史，是世界上较早掌握铸造技术的文明古国，2500 多年以前就铸出了 270 kg 的铸铁刑鼎，被世界公认为是最早应用铸铁的国家之一。我国在商朝（约公元前 16 世纪～公元前 1066 年）时期就开始使用铸铜技术，并创造了灿烂的青铜文化；周朝开始有了铸铁，发展了铁制农具。战国时期的青铜编钟、明朝的永乐大钟、五代后周时期的大铁狮等不仅反映了我国悠久的铸造历史，还显示出了精湛的铸造工艺技术水平，见图 1-1。

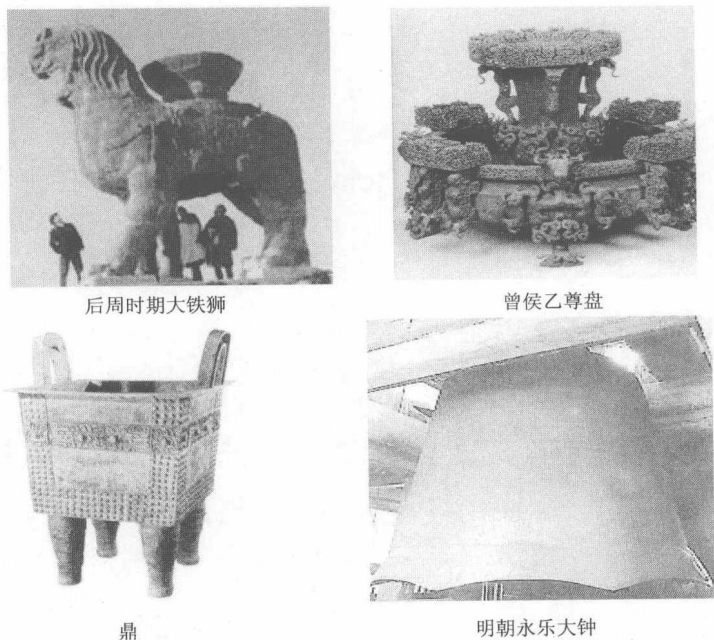


图 1-1 中国古代铸造技术

据统计, 2004 年, 我国铸件的产量已达 2700 万吨左右, 约占我国钢铁总产量的 1/10, 占世界总产量 30%, 居世界第二位, 为机床、汽车、拖拉机、机车、飞机、船舶、电力、冶金、化工和重型机器制造业等提供了各类铸件。在铸造技术水平方面, 我国已铸出了 315 t 重的大型厚板轧机的铸钢机架, 重 260 t 的大型铸铁钢锭模, 还铸出了 30×10^4 kW 的水轮机转子等形状复杂、尺寸要求严格的铸件, 其尺寸精度达到了国际电工协会规定的标准。近几年, 我国的许多铸件已进入国际市场。这些均标志着我国的铸造技术水平正在向国际水平接近。

1.1.2 铸造生产的工艺过程

根据生产的铸件的需要, 预先制备好铸型及一定的化学成分液态金属或合金, 然后在重力或其它力的作用下将液态合金材料注入铸型, 其中, 充填是否充分、平稳对铸件的最终质量有重要的影响, 特别是对于某些形状复杂、壁厚差异大或易氧化的合金更为重要。

一个铸件到底选择什么铸造方法来制造, 必须根据这个铸件的合金种类、重量、尺寸精度、表面粗糙度、批量、铸件成本、生产周期、设备条件等方面的要求综合考虑才能决定。在各种铸造方法中, 砂型铸造是应用最广的方法, 大约占世界铸造总产量 60%, 我国的情况也大致如此。所以, 本书只重点介绍砂型铸造的工艺, 对消失模铸造、熔模铸造、金属型铸造、低压铸造、重力铸造和离心铸造等各种方法, 只作简单介绍。

以铸造用型砂为主要原材料制作铸型, 使液态金属完全靠重力充满整个铸型型腔并形成铸件的方法称为砂型铸造。如图 1-2 所示为齿轮毛坯的砂型铸造简图。

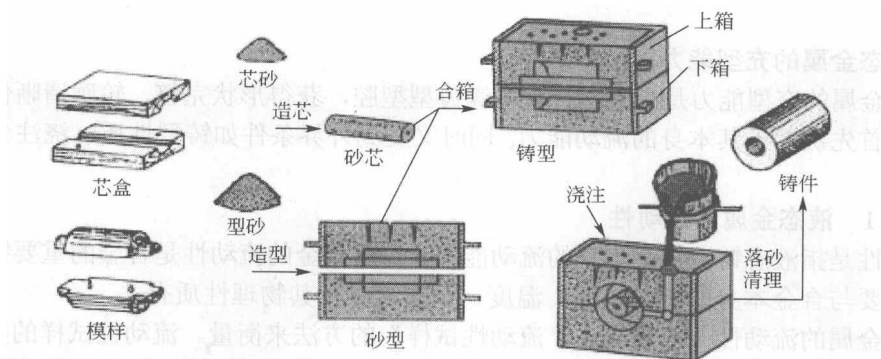


图 1-2 齿轮毛坯的砂型铸造简图

1.1.3 铸造生产的特点及应用

铸造生产因具有鲜明的特点被广泛应用, 概括起来, 铸造生产具有以下特点。

(1) 适用范围广

铸造方法受零件的尺寸、重量和复杂程度的限制较少, 适用范围广, 可以铸造壁厚范围为 0.3~100mm、长度从几个毫米到几十米、质量从几克到几百吨的铸件, 铸件的形状可以非常复杂, 尤其是具有复杂的内腔的零件, 例如机车柴油机的机体和缸盖。

(2) 可用于铸造的合金种类多

用铸造方法可以生产铸钢件、铸铁件、各种铝合金、铜合金、镁合金、钛合金及锌合金等铸件。尤其对于脆性或难加工的金属及合金, 如铸铁、高锰钢, 铸造是唯一可行的成型加工方法。

(3) 铸件的尺寸精度高

一般来说, 铸件的尺寸比锻件、焊接件的尺寸精确, 可节约大量金属材料和机械加工工时。

(4) 成本低廉

铸件在一般机器生产中占总质量的 40%~80%, 而成本只占机器总成本的 25%~30%。其成本低廉的原因是: ①容易实现机械化生产; ②可大量利用废、旧金属料; ③与锻件相比, 其动力消耗低; ④尺寸精度高, 加工余量小, 节约加工工时和材料。另外, 由于在原材料、劳动力等方面的成本较低, 我国的铸造生产成本比国外发达国家的铸造生产成本低很多, 铸件出口已成为我国铸造生产的重要领域。

铸造成型在工业生产中处于基础性地位, 是各类机器、装置最主要的毛坯生产途径。随着工业化进程的深入, 对铸造成型工艺也提出了更高的要求, 零件的近精确和精确成型已经成为铸造成型工艺发展的一个重要方向。同时, 利用计算机模拟及仿真技术对工艺进行优化及精确控制也是今后研究和应用中需要解决的重大课题。

1.2 液态金属的工艺性能

合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能, 常称为铸造性能, 通常是指流动性、收缩性、吸气性和偏析等。合金的铸造性能是影响铸件质量的重要因素, 在进行铸件的结构设计时必须考虑。

1.2.1 液态金属的充型能力

液态金属的充型能力是指液态合金充满铸型型腔, 获得形状完整、轮廓清晰健全铸件的能力。它首先决定于其本身的流动能力, 同时又受到外界条件如铸型性质、浇注条件等方面的影响。

1.2.1.1 液态金属的流动性

流动性是指液态铸造合金本身的流动能力。铸造合金的流动性是合金的重要铸造性能之一, 它主要与合金本身的化学成分、温度、杂质含量及其物理性质有关。

液态金属的流动性一般用浇注“流动性试样”的方法来衡量。流动性试样的类型很多,

有螺旋线形、球形、U 形、楔形及真空试样等。但在生产和科研中应用最多的仍是螺旋线形试样, 如图 1-3 所示。在测试时, 在相同铸型条件和浇注条件下浇注螺旋形试样, 以试样长度的长短来评价该合金流动性的优劣。

影响流动性的因素有很多, 如合金的种类、成分和结晶特征及其它物理量等。

(1) 合金的种类

不同种类的合金, 具有不同的螺旋线长度, 即具有不同的流动性, 如表 1-1 列出了一些常用铸造合金的流动性值。其中灰铸铁的流动性最好, 硅黄铜、铝硅合金次之, 而铸钢的流动性最差。

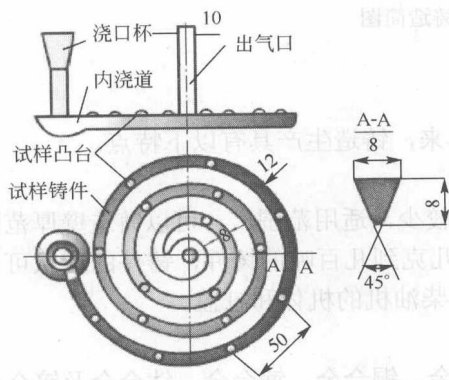


图 1-3 螺旋线形试样

表 1-1 常用合金的流动性值（砂型，试样截面 8mm×8mm）

合金种类	铸型种类	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
铸铁 $w(C+Si)=6.2\%$	砂型	1300	1800
$w(C+Si)=5.9\%$	砂型	1300	1300
$w(C+Si)=5.2\%$	砂型	1300	1000
$w(C+Si)=4.2\%$	砂型	1300	600
铸钢 $w(C)=0.4\%$	砂型	1600	100
铝硅合金（硅铝明）	金属型（300℃）	680~720	700~800
镁合金（含 Al 及 Zn）	砂型	700	400~600
锡青铜 [$w(Sn)\approx 10\%, w(Zn)\approx 2\%$]	砂型	1040	420
硅黄铜 [$w(Si)=1.5\%\sim 4.5\%$]	砂型	1100	1000

(2) 合金的化学成分和结晶特征

合金的成分和结晶特征对流动性的影响最为显著。共晶成分的合金，其结晶同纯金属一样，是在恒温下进行的。从铸型表面到中心，液态合金逐层凝固，如图 1-4（a）所示，由于已凝固层的内表面光滑，对液态合金的流动阻力小，而且，共晶成分合金的凝固温度最低，相同浇注温度下其过热度最大，延长了合金处于液态的时间，故流动性最好。

宽结晶温度范围的合金，初生树枝晶比较发达，在其已凝固层和纯液态区之间存在一个液固两相共存的区域，使得已凝固层的内表面粗糙，如图 1-4（b）所示。所以非共晶成分的合金流动性变差，且随合金成分偏离共晶点愈远，其结晶温度范围愈宽，流动性愈差。

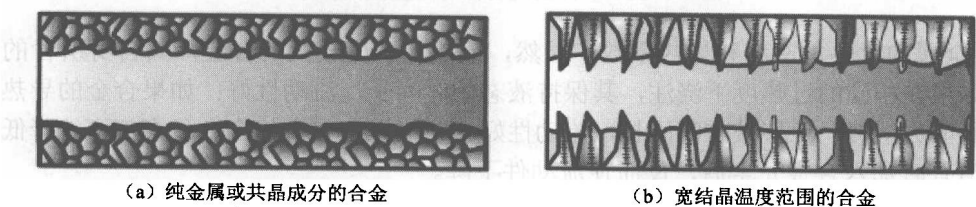


图 1-4 不同结晶特征下的流动性

图 1-5 为 Fe-C 合金流动性与含碳量的关系。从图 1-5 中可见，纯铁的流动性比较好；而亚共晶成分的铸铁，成分愈接近共晶，其流动性愈好，在共晶成分处流动性最好。尽管铸铁的结晶温度范围一般比铸钢宽，但实际上铸铁的流动性比铸钢好。这是因为，一方面铸钢的熔点高，所以钢液的过热度较小，维持液态流动的时间短；另一方面，由于铸钢的浇注温度较高，在铸型中散热快，迅速结晶出的树枝晶会使钢液很快失去流动能力。

铸铁中的其它合金元素也影响流动性。例如，增加磷的含量，铸铁的流动性增大，这主要是由于液相线温度下降，黏度下降。同时由于磷共晶增加，固相线温度也下降。但是含磷量增加使铸铁变脆，因此，通常不用增加含磷量的方法提高铸铁的流动性。对于艺术品铸件，因其不承受载荷，只要求轮廓清楚、花纹清晰，为保证铸铁液具有很好的流动性，可适当地增加含磷量。

铸铁中硅的作用和碳相似，硅量增加，液相线下降。因此，在同一过热温度下，铸铁的流动性随硅量的增加而提高。

(3) 合金的物理性质

① 合金的结晶潜热 结晶潜热约占液态金属热含量的 85%~90%。在合金的结晶过程中，释放出的潜热愈多，则合金保持液态的时间就愈久，流动性就好。但由于合金的结晶特

点不同, 潜热对流动性的影响大小也不同。对于纯金属或共晶成分的合金, 结晶潜热提高流动性的作用能够比较充分地发挥, 结晶潜热的影响较大: 如果释放的潜热越多, 凝固进行得越慢, 其流动性越好。然而对于结晶温度范围较宽的合金, 金属液在其散失部分潜热后, 发达的树枝晶就已连成网络而停止流动, 而大部分的结晶潜热对流动性的影响没有发挥作用, 因而对流动性的影响不大。

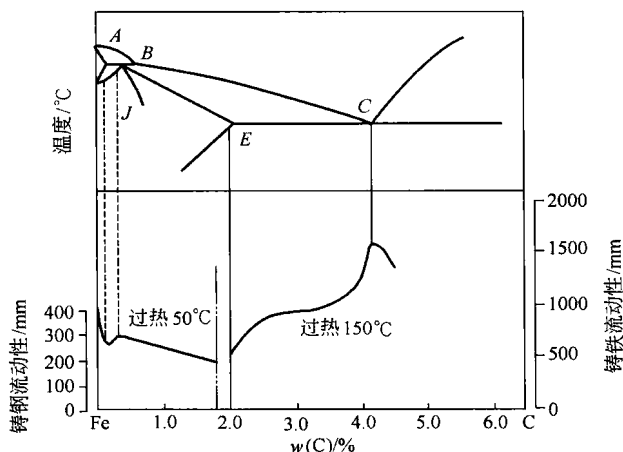


图 1-5 Fe-C 合金流动性与含碳量的关系

② 金属的比热、密度和导热系数 显然, 比热和密度较大的合金, 其自身所含的热量较多。如果在相同的过热度下浇注, 其保持液态的时间长, 流动性好; 如果合金的导热系数小, 热量散失就慢, 保持液态时间长, 流动性好。一般在金属中的合金元素都可能降低导热系数。但有时加入合金元素后, 反而使流动性下降。

③ 液态金属的黏度 一般黏度愈大, 流动性就愈差, 而黏度愈小流动性就愈好; 黏度对层流流动的影响较大, 而对紊流流动的影响不大, 实际上金属在浇注系统及型腔中的流动属于紊流流动, 因此, 黏度对流动性的影响不明显。

1.2.1.2 液态金属的充型能力

液态金属的流动性是金属本身的属性, 不随外界条件的改变而变化, 而液态金属的充型能力不仅和金属的流动性相关, 而且也受外界因素的影响。

(1) 铸型的特点

铸型对充型能力的影响与其冷却条件、蓄热能力和对合金的流动阻力有关。

铸型材料的导热速度大, 蓄热能力强, 会使合金液的冷却速度加快, 从而使充型能力变差; 铸件较复杂, 壁厚较薄, 会增加合金流动的阻力, 并使铸件冷却表面积相对增加, 反而会降低合金的充型能力。因此, 在设计铸件时, 其壁厚尽量大于规定的最小壁厚, 并且形状力求简单。

铸型的透气性差或含水量大, 有机物含量多, 使浇注过程中产生的气体量增多而又不能及时排出, 造成型腔内气体压力增大, 从而阻碍合金的流动。因此, 提高型砂的透气性, 尽量减少型砂的水分和有机物 (如煤粉、渣油等) 的含量, 多设出气口等, 有利于合金充型能力的提高。

(2) 浇注条件

这主要表现在浇注温度、充型压力及浇注系统的特点。

浇注温度对合金充型能力的影响极为显著。在一定范围内,提高液态合金的浇注温度能改善其流动性,因而提高其充型能力。因为浇注温度高,液态合金的过热度大,在铸型中保持液态流动的能力愈强,且使液态合金的黏度及其与铸型之间的温度差都减小,从而提高了流动性。因此,对薄壁铸件或流动性较差的合金可适当提高浇注温度,以防产生浇不足和冷隔。但是浇注温度过高,又会使液态合金吸气严重,收缩增大,反而易使铸件产生其它缺陷,如气孔、缩孔、缩松、粘砂和晶粒粗大等。故在保证液态合金流动性足够的前提下,浇注温度应尽可能低。通常灰铸铁浇注温度为 $1200\sim 1380^{\circ}\text{C}$;铸钢为 $1520\sim 1620^{\circ}\text{C}$;铝合金为 $680\sim 780^{\circ}\text{C}$ 。薄壁复杂件取上限温度值,厚件则取下限。

充型压力是指直接施加在液态金属表面的静压力。液态合金在流动方向上所受压力愈大,其充型能力愈好。砂型铸造时,是由直浇道高度提供静压力作为充型压力,所以直浇道的高度应适当。

浇注系统的结构越复杂,流动阻力越大,在静压头相同的情况下,充型能力越低。因此,在设计浇注系统时,必须合理地布置内浇道在铸件上的位置,选择恰当的浇注系统结构和尺寸。否则,即使金属液有较好的流动性,也会产生浇不足和冷隔等缺陷。

(3) 铸件的结构

铸件的壁愈薄,结构形状愈复杂,液态合金的充型能力愈差。应采取适当提高浇注温度、提高充型压力和预热铸型等措施来改善其充型能力。

1.2.2 铸造合金的收缩

1.2.2.1 金属凝固过程中的收缩现象

液态金属浇入铸型后,由于铸型的吸热,金属温度下降,空穴数量减少,原子间距离缩短,液态金属的体积减小。温度继续下降时,液态金属凝固,发生由液态到固态的状态变化,原子间距离进一步缩短;金属凝固完毕后,在固态下继续冷却时,原子间距离还要缩短。铸件在液态、凝固态和固态的冷却过程中,所发生的体积减小现象称为收缩。因此,收缩是铸造合金本身的物理性质。

收缩是铸件中许多缺陷如缩孔、缩松、热裂、应力、变形和冷裂等产生的基本原因。因此,它是获得符合要求的几何形状和尺寸以及致密优质铸件的重要铸造性能之一。

任何物体的体积皆与其温度和施于其上的压力有关。在一般铸造条件下,压力的变化可以忽略不计,铸件尺寸的变化,仅取决于温度的变化(如不考虑物态的和同素异形体的变化)。金属从液态到常温的体积改变量称为体收缩。金属在固态时的线尺寸改变量,称为线收缩。

在实际中,通常以相对收缩量表示金属的收缩特性,此相对收缩量称为收缩率。

当温度由 $t_0 \rightarrow t_1$ 时,金属的体收缩率 ε_v 和线收缩率 ε_l 为

$$\begin{aligned}\varepsilon_v &= \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = a_v(t_0 - t_1) \times 100\% \\ \varepsilon_l &= \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% = a_l(t_0 - t_1) \times 100\%\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中 V_0, V_1 ——金属在 t_0 和 t_1 时的体积;

l_0, l_1 ——金属在 t_0 和 t_1 时的长度;

a_v, a_l ——金属在 $(t_0 - t_1)$ 温度范围内的体收缩系数和线收缩系数。

ε 是某一温度区间的相对收缩量,是 a 与温度差的乘积。因此, ε 既与金属的性质有关,又与温度区间的大小有关。

任何一种液态金属注入铸型以后,从浇注温度冷却到常温都要经历三个互相联系的收缩阶段(图 1-6):①液态收缩阶段(I);②凝固收缩阶段(II);③固态收缩阶段(III)。

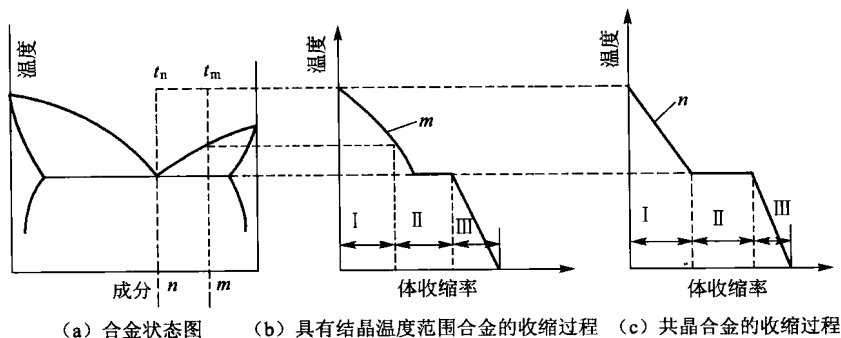


图 1-6 铸造合金收缩过程示意图

(1) 液态收缩

充满铸型瞬间,液态金属所具有的温度 T_L 冷却至开始凝固的液相线温度 T_L 的体收缩为液态收缩。由于在此阶段中,金属处于液态,因此体积的缩小仅表现为型腔内液面的降低。液态收缩率用下式表示

$$\varepsilon_{vL} = a_{vL}(T_P - T_L) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 ε_{vL} ——液体收缩率;

a_{vL} ——金属的液态收缩系数;

T_P ——液态金属的浇注温度;

T_L ——液相线温度。

从式中可以看出,提高浇注温度 T_P ,或因合金成分改变而降低 T_L ,都使 ε_{vL} 增加。影响液态收缩系数 a_{vL} 的因素很多,如合金成分、温度、气体和夹杂物含量等。

(2) 凝固收缩

对于纯金属和共晶合金,凝固期间的体收缩只是由于状态的改变,而与温度无关,故具有一个定值。具有一定结晶温度范围的合金由液态转变为固态时,收缩率既与状态改变时的体积变化有关,又与结晶温度范围有关。

有一些合金,在凝固过程中体积不但不收缩,反而膨胀,如某些 Ga 合金, Bi-Sb 合金,故凝固收缩率为负值。

液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔和缩松的基本原因。液态收缩和凝固收缩愈大,缩孔、缩松的容积就愈大。

(3) 固态收缩

金属的固态体收缩率用下式表示

$$\varepsilon_{vs} = a_{vs}(T_s - T_0) \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 ε_{vs} ——金属的固态体收缩率;

a_{vs} ——金属的固态体收缩系数;

T_s ——固相线温度;

T_0 ——室温。

在固态收缩阶段,铸件各个方向上都表现出线尺寸的缩小。因此,这个阶段对铸件的形

状和尺寸的精度影响最大。为方便起见,常用线收缩率表示固态收缩,即

$$\varepsilon_{\text{ls}} = a_{\text{ls}}(T_{\text{s}} - T_0) \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 a_{ls} ——金属的线收缩率;

a_{ls} ——金属的固态线收缩系数。

金属的线收缩是铸件中产生应力、变形和裂纹的根本原因。

1.2.2.2 缩孔和缩松

液态金属在凝固冷却过程中,其液态收缩和凝固收缩如不能得到补偿,则在铸件最后凝固处会形成孔洞,容积大而集中者称为缩孔,小而分散者称为缩松。

(1) 缩孔的形成

缩孔常产生于铸件的厚大部位或上部最后凝固之处,有时也会在上表面产生凹坑,即缩凹。缩孔的形状不规则,常呈倒锥形,内表面较粗糙。缩孔的形成过程如图 1-7 所示。

合金充满型腔后,如内浇道尚未凝固,液态收缩量可从浇注系统得到补充,型腔内是充满的[图 1-7 (a)]。随着铸型的吸热,合金液温度下降,靠近型腔表面的金属凝固成一层硬壳,如内浇道已凝固,这层硬壳就像一个内部充满合金液的密封容器[图 1-7 (b)]。随着温度的下降,密封容器内的液态合金产生液态收缩,并进一步产生凝固收缩和硬壳的固态收缩。由于液态收缩和凝固收缩远大于硬壳的固态收缩,又得不到额外的补偿,故硬壳内液面下降并脱离硬壳顶面,产生了空隙[图 1-7 (c)]。温度继续下降,硬壳随凝固不断加厚,液面不断下降,直到最后完全凝固,则在铸件上部形成缩孔[图 1-7 (d)]。此后的冷却直到室温属于固态收缩,只减小铸件的外廓尺寸[图 1-7 (e)]。

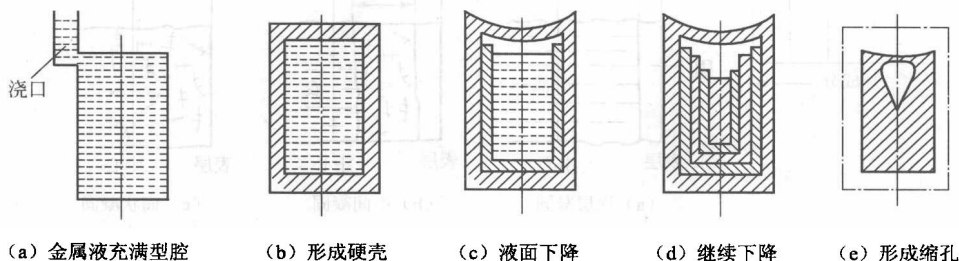


图 1-7 缩孔的形成过程

纯金属、共晶合金以及凝固温度范围窄的合金属于这种凝固方式,易于形成集中缩孔。

(2) 缩松的形成

凝固温度范围宽的合金易形成缩松,其形成的基本原因与缩孔一样,也是由于铸件最后凝固区域得不到补偿而造成的。不同之处在于,合金的结晶温度范围较宽时,树枝晶发达,合金液几乎同时凝固,液态和凝固收缩所形成的细小、分散孔洞得不到外部液态金属的补充造成缩松。如图 1-8 所示。

缩松按其分布形态可分为宏观缩松和显微缩松两类。前者用肉眼或放大镜可观察到,它多分布于缩孔的下方或铸件截面中心轴线处;后者分布于树枝晶间或晶内,体积微小,需用显微镜才能观察到。

1.2.2.3 合金的凝固方式

铸件凝固过程中,在其断面上存在三个区域,即已凝固的固相区、液固两相并存的凝固区和未开始凝固的液相区。其中凝固区的宽窄对铸件质量影响较大,如图 1-9 中 S 区,其宽