



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级精品课程“材料加工”系列教材

清华大学材料加工系列教材

# 材料加工系列实验 (第2版)

## Materials Processing Experiments 2nd Edition

主 编 邹贵生

副主编 黄天佑 李双寿

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级精品课程“材料加工”系列教材

清华大学材料加工系列教材

# 材料加工系列实验 (第2版)

# Materials Processing Experiments 2nd Edition

主 编 邹贵生

副主编 黄天佑 李双寿

清华大学出版社  
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

材料加工系列实验/邹贵生主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2011.6  
(清华大学材料加工系列教材)

ISBN 978-7-302-26037-0

I. ①材… II. ①邹… III. ①工程材料—加工—实验—高等学校—教材  
IV. ①TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 120785 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:15 字 数:308 千字

版 次:2011 年 6 月第 2 版 印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

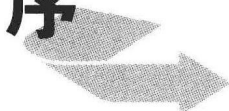
印 数:1~3000

定 价:32.00 元

---

产品编号:026917-01

# 序



为适应新时期科学技术的发展和经济建设的需要,培养基础宽、素质高、适应性强和具有开拓创新能力的复合型人才,将早期的铸造、锻压、焊接和金属材料及热处理四个热加工专业合并为材料成形及控制工程专业。经过十几年的探索和教学实践,“材料成形原理”和“材料成形工艺”两门理论课程逐渐演变成本专业的主干专业课程。

在学习上述两门理论课程之前,学生已修完“机械制造工艺基础”、“材料力学”,以及“工程材料”等相关课程,亦修完“机械制造实习”(原“金工实习”)课程,经历过铸造、锻压、焊接等各种热加工方法的实际操作,并进行了金属材料力学性能方面的相关实验,具备了一定的实际工艺知识并初步体验了创新实践。但总体来说,上述实习、实验所涉及的加工工艺不够全面,不够深入,也不够系统,从而在一定程度上影响到理论课程的教学效果。为了使理论更好地联系实际,进一步深化学生对材料成形的感性认识,拓宽知识视野,提高工程实践能力,培养创新意识,有必要配合上述两门理论课程开设内容更丰富、针对性更强的系列实验。

尽管完成上述工作所涉及的知识覆盖面宽,综合性强,难度大,但为了提高培养质量,清华大学利用机械工程系最新的科研设备和研究成果,以及基础工业训练中心近年引进的先进教学设备,编写了《材料加工系列实验》教材,并开设出相关课程。该课程由 30 个实验构成,其内容涵盖了目前材料加工领域的主要研究方向和部分最新科研成果。更为重要的是,该课程重视实验中正确思维方法的引导和培养,推行在教师指导下学生独立操作、自行设计实验,多个小组实现数据共享,对实验结果进行综合分析、处理的教学方法。学生在观察现象的基础上,深入探究科学原理,提高分析和解决问题的能力、研究型学习的能力以及创新思维能力。

在多层实验教学的基础上,主编组织本领域的专家、教授和实验技术人员一起,编写出与上述两门理论课程密切配合的第一版教材。经过五年多的教学实践,该教材删除了其中不够适时的内容,完善了如等离子和超音速火焰喷涂、残余应力测定等

## II 材料加工系列实验(第2版)

实验,增补充实了基础实验如凝固界面形态演化与成分过冷、电弧焊熔滴过渡和板料拉伸实验,还有学科前沿实验如搅拌摩擦焊、碳纳米管制备、熔模精密铸造等,使该系列实验具有基础性、综合性和研究型的明显特色。而从整体看,修订后的教材也更具独立性、实用性、深入性、系统性和前沿性。另外,教材中的每个实验附有与之相关的知识,便于学生预习和加深对实验的了解。相信通过编者和读者的共同努力,本教材将为材料加工成形及控制工程专业以及与材料相关的专业的教学发挥出更重要的作用,达到提高教学质量的目的。

傅水根

清华大学教授

2010年8月

# 前言



实践性课程“材料加工系列实验”与理论课程“材料加工原理”和“材料加工工艺”共同构成了材料成形及控制工程专业的主干专业课。“材料加工系列实验”课既必须紧密配合两门理论课的相关内容,又应具有其独立性和特殊性。本书是在 2005 年 3 月清华大学出版社出版的《材料加工系列实验》基础上,为总结材料加工领域的最新成果并适应其发展趋势而进行修订的。本书在内容方面,除少量与材料加工密切相关的材料性能测试新方法的实验外,主要包含了铸造、金属塑性成形、焊接、粉末冶金和金属材料及热处理等典型的材料成形方法和材料表面工程等新技术的原理和工艺。在新版实验教材的内容策划与编排过程中,一方面,基于两门理论课的教学目标,首先设置“材料加工原理与基础实验”和“材料加工工艺与综合实验”两大部分。其中前一部分是材料成形及控制工程领域最基础最根本的实验;与此同时,在各部分实验内容的编排中,又按照铸造、金属塑性成形、焊接、金属材料及热处理、材料表面工程和粉末冶金等材料成形研究方向的实验进行分模块排序,以达到内容编写的系统性。另一方面,根据各种成形方法的特点和研究现状,以及目前的主要研究方向和设备条件,在重视基础实验的同时,又兼顾研究型 and 具有工业应用背景的综合实验。每个实验的指导书由实验目的、概述(主要阐述该实验的原理)、实验内容、实验步骤与注意事项、实验报告要求、思考题和参考文献组成,必要时配以附录。

新版实验教材在编写实验内容时,特别重视与各种成形方法相关的原理性和基础性实验,同时也采用最新的科学研究设备作为实验手段,以反映当前材料成形及控制工程领域的主要发展方向。据此,在对 2005 年版教材中的部分内容进行删减的同时,又增加或完善了一些更基础性的实验(如实验 2、3、5、8、10)和材料制备与加工的新工艺方法(如实验 17、18、19、21、24、25、29、30)。另外,实验指导书中还提出了综合性较强具有一定难度的思考题,并列出了相应的参考书。通过查阅参考书及完成思考题,撰写实验报告,可提高学生文献查阅和综述、数据分析和独立思考的能力,为今后的学习和科学研究打下良好的基础。本书可作为“材料成形及控制工程”专业及其他相关专业,如“材料科学与工程”专业专科生、本科生的必修课教材,也可作为相

#### IV 材料加工系列实验(第2版)

关专业教师、研究生和工程技术人员的实验研究参考书。

学生可以有选择性地参加本书所列的实验。通过材料加工原理和基础实验,认识材料成形典型方法的一般规律,加深和巩固“材料加工原理”基本知识,训练实验技能,提高实验观察和动手能力,培养科学研究的作风。通过参加材料加工工艺、研究型 and 具有工业应用背景的综合实验,学生能更加深刻地认识典型材料成形原理和工艺的本质,学习并掌握材料成形现象和材料性能的先进测量方法,了解先进成形技术及其在国民经济中的应用,接触科学研究的前沿,拓宽知识面,提高自主设计实验的能力,培养创新意识。

本书所列实验共 30 个,每个实验为 4 学时。“材料加工系列实验”课程可开设 32 学时、48 学时甚至 64 学时。学生可根据需要,在教师指导下,在本书所列的众多实验中选择 32 学时、48 学时或 64 学时。

三十几位多年从事教学和科研的清华大学机械工程系和清华大学基础工业训练中心的教师参加了本书的编写。各实验指导书的编写人员分别为

实验 1、13: 陈祥,李言祥

实验 2: 刘源,朱跃峰,李言祥

实验 3: 李双寿,汤彬

实验 4、6、20: 初晓,姚启明

实验 5、21: 方刚,张欣

实验 7、18: 邹贵生,白海林,王庆

实验 8、22、25: 都东,王力,张骅

实验 9、10: 蔡志鹏,赵海燕

实验 11: 吴建军,梁吉

实验 12: 钟敏霖,马明星,张红军

实验 14: 李双寿,黄天佑

实验 15: 李双寿,黄天佑,胡永沂

实验 16: 李培杰,何良菊,吴荣

实验 17: 吕志刚,崔旭龙

实验 19: 方刚,白海林

实验 23: 姚启明,初晓

实验 24: 史清宇

实验 26: 张旭东,张红军

实验 27: 钟敏霖,刘文今,马明星,张红军

实验 28: 庄大明,张弓

实验 29: 张人佶

实验 30: 韦进全,王昆林,吴德海

本书由邹贵生教授任主编、黄天佑教授和李双寿教授任副主编。全书由邹贵生

教授统稿,白海林老师对全书的文、图和表格进行了校对和排版。

本书由清华大学曾大本教授审实验 1、2、3、13、14、15、16、17,清华大学姚可夫教授审实验 11、12、27、28、29、30,清华大学单际国教授审实验 7、8、9、10、18、22、23、24、25、26,清华大学雷丽萍副教授审实验 4、5、6、19、20、21。

清华大学机械工程系的都东、梁吉、吴爱萍三位教授和清华大学基础工业训练中心的李而立老师在材料加工系列实验课程的开设、筹备以及本书的编写过程中提出了许多建设性意见,特此表示感谢。

本书的出版得到清华大学出版社出版基金和清华大学“985”教材项目的资助。

由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,敬请各界读者批评指正并提出宝贵意见。

邹贵生

2010 年 8 月于北京·清华园



# 目录

|              |   |
|--------------|---|
| 实验室安全守则与注意事项 | 1 |
| 学生实验守则       | 2 |

## 第一部分 材料加工原理与基础实验

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 实验 1 铝硅合金的细化与变质处理            | 5  |
| 实验 2 凝固界面形态演化与成分过冷           | 17 |
| 实验 3 铸造合金流动性测定               | 24 |
| 实验 4 金属板材成形的应变测定及成形极限图 (FLD) | 32 |
| 实验 5 板料拉伸实验及冲压性能分析           | 38 |
| 实验 6 圆环压缩法测定金属塑性成形的摩擦系数      | 42 |
| 实验 7 热循环对材料组织与性能的影响          | 46 |
| 实验 8 熔化极气体保护电弧焊熔滴过渡          | 61 |
| 实验 9 电阻点焊                    | 67 |
| 实验 10 残余应力的测量                | 80 |
| 实验 11 铁基粉末冶金                 | 87 |
| 实验 12 激光熔覆                   | 93 |

## 第二部分 材料加工工艺与综合实验

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 实验 13 液态金属质量表征与识别方法 | 101 |
| 实验 14 铸造残余应力的测定     | 112 |
| 实验 15 消失模铸造         | 120 |
| 实验 16 先进压铸技术        | 133 |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 实验 17 | 熔模精密铸造 .....                   | 139 |
| 实验 18 | 金属高温强度和塑性及其测定 .....            | 149 |
| 实验 19 | 金属热变形流动应力的测定与分析 .....          | 158 |
| 实验 20 | 金属薄板的弯曲实验 .....                | 162 |
| 实验 21 | 板料拉深实验及分析 .....                | 166 |
| 实验 22 | 工业机器人运动编程及自动弧焊 .....           | 171 |
| 实验 23 | 脉冲 TIG 焊 .....                 | 176 |
| 实验 24 | 搅拌摩擦焊实验 .....                  | 183 |
| 实验 25 | 脉冲 Nd:YAG 激光切割 .....           | 188 |
| 实验 26 | CO <sub>2</sub> 激光焊接成形实验 ..... | 195 |
| 实验 27 | 激光相变硬化 .....                   | 202 |
| 实验 28 | 功能薄膜的制备方法以及光电学性能测试实验 .....     | 208 |
| 实验 29 | 等离子和超音速火焰喷涂涂层的制备与观测 .....      | 212 |
| 实验 30 | 单、双壁碳纳米管制备及其显微分析 .....         | 221 |

# 实验室安全守则与注意事项

材料加工实验室中,许多设备在运行过程中涉及到高温环境和力;有的化学试剂易燃、易爆,甚至还有腐蚀性和毒性。所以进行实验时,必须特别注意安全问题,绝对不能麻痹大意。为此,实验前应认真听辅导教师讲解并掌握实验注意事项,实验过程中必须严格遵守安全守则,避免事故的发生。

安全守则和注意事项如下:

1. 应保持安静有序,严禁在实验室内跑、跳、打闹等。应避免震动,以免影响仪器精度及测量准确度。
2. 进入各实验室做实验时,必须穿长裤,不允许穿拖鞋和露脚凉鞋。
3. 未经辅导教师允许,不准随意挪动重要仪器和设备。
4. 未经辅导教师的检查同意,不允许擅自接通和使用实验室的各种电源。
5. 实验前要做好各项准备工作,如接好电路中除电源外的线路,安装好各种卡具、试样,编好实验程序等。经辅导教师检查后,才能正式进行实验。
6. 注意仪器的冷却水系统。仪器开动前按规定通冷却水,实验完成后必须关闭冷却水。
7. 离开实验室前认真检查电、水、门窗等,并经辅导教师检查后方可离开。
8. 实验完成后,必须由辅导教师检查实验数据或其他结果,再拆相应的装卡具和线路等,整理好实验仪器和还原,并将实验现场收拾整齐、清洁。

# 学生实验守则

1. 实验前必须认真预习,明确实验目的和全部实验内容,了解实验有关操作技术和注意事项,设计实验方案和实验数据记录表格,并写出实验预习报告。经辅导教师检查合格后,方可做实验。没有预习或预习不合格者,辅导教师有权不让他参加本实验。

2. 进入实验室后,首先熟悉实验室环境、布置和各种实验设施的位置。听从辅导教师的安排,严肃认真,以主人翁态度爱护所有仪器和工具。

3. 进行实验操作时,要集中思想,细致观察,如实记录,开动脑筋。根据各实验的特点,独立地或与小组其他成员合作完成实验任务。

4. 用完公用工具后,应立即归还原处。不许动用非本实验用的其他仪器设备。使用的仪器设备,如有损坏遗失,要立即报告辅导教师,并将详细情况进行登记,事后按有关规定处理。

5. 实验完成后应认真撰写实验报告,基本要求如下:

(1) 报告一律用 A4 纸,竖放横书。

(2) 实验报告封面填好班级、姓名、学号、同组人姓名、实验日期、完成报告时间、教师审阅等项。

(3) 报告的项目完整,内容简单明了,书面整齐清洁,计算过程清晰,各种图表规范。

(4) 每个实验的实验报告具体要求见各实验指导书。

(5) 在撰写有些实验的实验报告时,需要多个实验小组的原始数据共享,但数据处理必须独立完成。

(6) 严格按相关实验辅导老师的要求交实验报告。

希望同学们在实验过程中和撰写报告时,培养严谨、求实的科学精神,发扬自强不息的独创精神。

# 第一部分 材料加工原理 与基础实验



# 实验1

## 铝硅合金的细化 and 变质处理

陈 祥 李言祥

### 1. 实验目的

- (1) 熟悉铸造铝硅合金的熔炼、精炼、细化 and 变质处理过程。
- (2) 掌握铸造铝硅合金精炼、细化 and 变质处理的基本原理 and 常用方法。
- (3) 掌握细化剂 and 变质剂对铸造铝硅合金组织的影响。

### 2. 概述

铝是地壳中蕴藏量最多的金属元素,其总储量约占地壳重量的 7.45%。铝及铝合金的产量在金属材料中仅次于钢铁材料而居第二位,是有色金属材料中用量最多、应用范围最广的材料。纯铝是很柔软的金属,具有高导热性、导电性、抗蚀性和低密度等优点;其工艺性能十分优良,易于铸造、切削及加工成形;在合金化以后,铝合金有高的比强度、比刚度、断裂韧性和疲劳强度,同时保持良好的成形工艺性能 and 高的耐腐蚀性能,用其代替钢铁材料可大大减轻零构件的重量,增加结构的稳定性。因此,铝及铝合金在各种工业领域具有广泛的用途,是一种重要的工程结构材料。

在制造形状复杂、比强度、比刚度要求高的零部件时,广泛采用铝合金。目前液体导弹、运载火箭、各种航天器、飞机的主要结构材料大多采用铝合金,装甲、坦克、舰艇的制造也离不开铝合金。在机械、船舶、电子、电力、汽车、建筑 and 日常生活用具等生产行业,铝合金也同样有广泛的应用。常用的铸造铝合金有 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系 and Al-Zn 系四大类。Al-Si 系合金是应用最广的铸造铝合金,其中亚共晶铝硅合金由于具有优异的铸造性能、良好的机械性能 and 力学性能以及物理化学性能(良好的耐蚀性、耐磨性和耐热性能),在铝合金铸件中所占比重越来越大,占铝合金铸件总产量的 80%以上。

图 1-1 为铝硅二元相图,共晶成分含 Si 量为 11.7%,共晶温度为 577℃。本实验所用铸造铝硅合金含 7% 的 Si,属于亚共晶铝硅合金,铸态组织为初生铝基固溶体( $\alpha$ -Al)相 and  $\alpha$ -Al 与粗大的块状或片状共晶硅的共晶体组成(图 1-2),由于共晶硅严

重地割裂基体,降低合金的强度和塑性,因此合金的机械性能不高,为此通常对二元铝硅合金进行细化 and 变质处理。

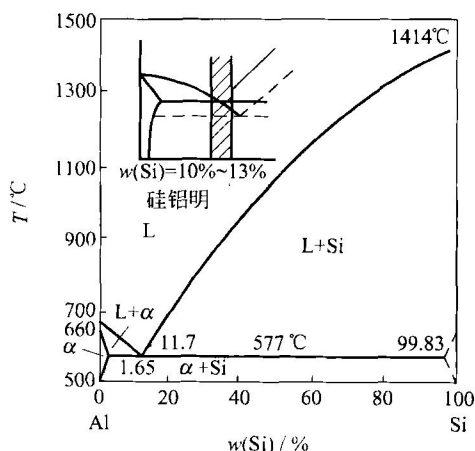


图 1-1 Al-Si 二元相图

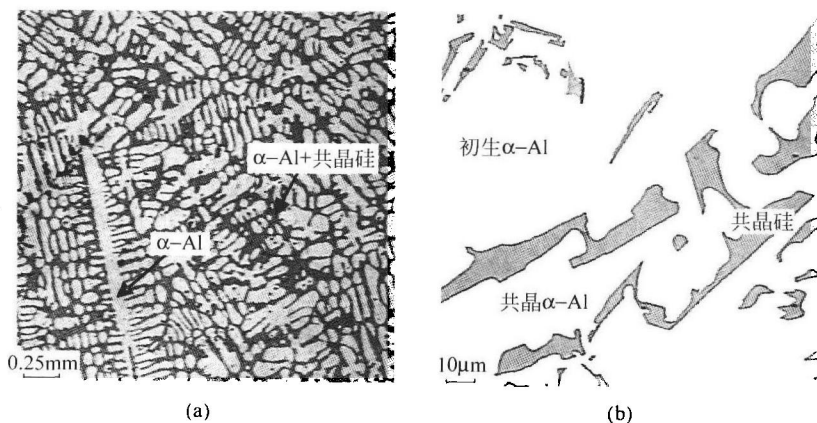


图 1-2 亚共晶铝硅合金的铸态低倍显微组织(a)与高倍显微组织(b)

对熔体晶粒细化和变质处理的大量研究表明,晶粒细化和变质处理可显著地提高铸件的综合性能,解决某些铸造缺陷。这是因为:①晶粒细化和变质处理使合金组织发生变化,改变晶粒度的大小和共晶硅的形状和分布;②提高铸件的致密度;③使铸件中的气孔、缩孔和夹杂物弥散分布,减小它们对铸件基体的不良影响;④降低铸件凝固过程中产生热裂的倾向;⑤提高延伸率;⑥改进热处理性能;⑦改善熔体的流动性等。

细化处理和变质处理是目前改善铝硅合金组织、提高其性能的最常用也是最有效的手段。



### 1) 铸造亚共晶铝硅合金的细化处理

铝硅合金细化处理的主要目的是细化合金的  $\alpha$ -Al 晶粒。晶粒细化是通过控制晶粒的形核和长大来实现的,其最基本原理是促进形核,抑制长大。对晶粒细化剂的基本要求是:①含有稳定的异质固相形核颗粒,不易溶解;②异质形核颗粒与固相  $\alpha$ -Al 间存在良好的晶格匹配关系;③异质形核颗粒应非常细小,并在铝熔体中呈高度弥散分布;④加入的细化剂不能带入任何影响铝合金性能的有害元素或杂质。

晶粒细化剂一般采用中间合金的方式加入。常用晶粒细化剂有:二元 Al-Ti 合金、Al-B 合金和三元 Al-Ti-B 合金、Al-Ti-C 合金以及稀土金属中间合金,它们是工业上广泛应用的最经济、最有效的铝合金晶粒细化剂。这些合金加入到铝熔体中时,会与 Al 发生化学反应,生成  $\text{TiAl}_3$  或  $(\text{Ti}, \text{B})\text{Al}_3$ 、 $\text{TiB}_2$ 、 $\text{AlB}_2$  或  $(\text{Al}, \text{Ti})\text{B}_2$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$  等金属间化合物相,这些金属间化合物相在铝熔体中以高度弥散分布的细小异质固相颗粒存在,可以作为  $\alpha$ -Al 形核、长大的核心,从而增加反应界面和晶核数量、减小晶体生长的线速度,起到晶粒细化的作用。

晶粒细化剂的加入量与合金种类、化学成分、加入方法、熔炼温度以及浇注时间等有关,加入量过大,则形成的异质形核颗粒会逐渐聚集,由于其密度比铝熔体大,因此会聚积在熔池底部,丧失晶粒细化能力,产生细化效果衰退现象。

晶粒细化剂加入合金熔体后要经历孕育期和衰退期两个时期。在孕育期内,中间合金完成熔化过程并使起细化作用的异质形核颗粒均匀分布并与合金熔体充分润湿,逐渐达到最佳的细化效果。此后,由于异质形核颗粒的溶解而使细化效果下降;同时异质固相颗粒会逐渐聚集而沉积在熔池底部,出现细化效果衰退现象。当细化效果达到最佳值时进行浇注是最为理想的。随合金的熔炼温度和加入的细化剂的种类的不同,达到最佳细化效果所需的时间也有所不同,通常存在一个可接受的保温时间范围,即工艺窗口。

合金的浇注温度也会影响最终的细化效果。在较小的过热度下浇注可以获得良好的细化效果;随着过热度的增大,细化效果将下降。通常存在一个临界温度,低于该温度时温度变化对细化效果的影响并不明显,而高于此温度时,随着浇注温度的升高,细化效果会迅速下降。该临界温度与合金的化学成分和细化剂的种类以及加入量有关。

图 1-3 为铸造亚共晶铝硅合金细化处理前后的显微组织,由粗大的初生  $\alpha$ -Al 枝晶转变为等轴晶。

### 2) 铸造亚共晶铝硅合金的变质处理

铸造铝硅合金中, Si 相在自然生长条件下会长成块状或片状的脆性相,它严重地割裂基体,降低合金的强度和塑性,因而需要将它改变成有利的形态。变质处理使共晶硅由粗大的片状变成细小纤维状或层片状,从而提高合金性能。

图 1-4 为铸造亚共晶铝硅合金变质处理前后的显微组织。

变质处理一般在精炼之后进行,变质剂的熔点应介于变质温度和浇注温度之间,