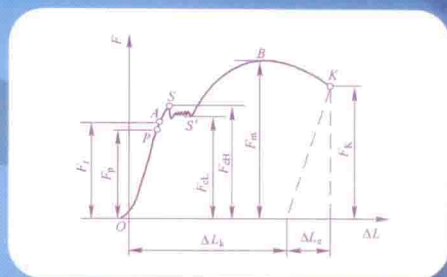
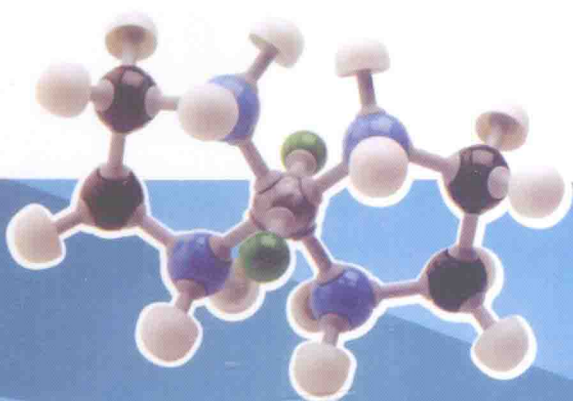


# 材料科学与工程实验系列教材



## 材料成型与控制工程专业实验教程

主编 孙建林

主审 袁 康 郎利辉

荟材料实验之经典

拓学生创新之潜力

数十所高校参与、多家出版社联合打造  
材料科学与工程实验教学研究会倾力推荐

冶金工业出版社  
国防工业出版社

北京大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社

材料科学与工程实验系列教材

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林

总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

# 材料成型与控制工程专业实验教程

主编 孙建林

主审 袁 康 郎利辉

北 京

冶金工业出版社

北京大学出版社

国防工业出版社

哈尔滨工业大学出版社

2014

## 内 容 提 要

本书为“材料科学与工程实验系列教材”之一,是高等学校实验用教材。全书共分为十章,70个实验,内容可分为四个层次:(1)验证性常规基础实验,主要介绍材料成型基础、铸造成型、轧制成型、挤压拉拔、锻造与冲压成型、焊接成型、模具结构分析等金属成型过程实验,培养学生掌握运用实验手段处理问题的基本程序和基本技能;(2)工艺参数测定与控制的相关实验,让学生理解大生产中的工艺控制过程;(3)计算机模拟和虚拟仿真实验,便于学生了解现代化研究手段;(4)创新与研究设计性实验,可培养学生的创新精神和创新能力,提高学生综合素质。

书中每个实验都介绍了实验目的、实验内容、基本原理、实验仪器设备,并且仪器设备均配有实物照片及工作原理,说明了实验步骤与方法,同时提出思考讨论题及对实验报告的要求。本书可作为各类高等院校材料成型与控制工程专业及其他相关专业本科生的教学教材,也可供有关专业的研究生、工程技术人员自学与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料成型与控制工程专业实验教程/孙建林主编. —北京:  
冶金工业出版社, 2014. 5

材料科学与工程实验系列教材

ISBN 978-7-5024-6566-7

I. ①材… II. ①孙… III. ①工程材料—成型—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 093561 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6566-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2014 年 5 月第 1 版, 2014 年 5 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 14.75 印张; 353 千字; 219 页

32.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 《材料科学与工程实验系列教材》

## 总 编 委 会

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林

总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

# 《材料科学与工程实验系列教材》

## 编写委员会成员单位

(按汉语拼音排序)

北方民族大学、北华航天工业大学、北京科技大学、成都理工大学、大连交通大学、大连理工大学、东北大学、东北大学秦皇岛分校、哈尔滨工业大学、河南工业大学、河南科技大学、河南理工大学、佳木斯大学、江苏科技大学、九江学院、兰州理工大学、南昌大学、南昌航空大学、清华大学、山东大学、陕西理工大学、沈阳工业大学、沈阳化工大学、沈阳理工大学、四川大学、太原科技大学、太原理工大学、天津大学、武汉理工大学、西南石油大学、燕山大学、郑州大学、中国石油大学(华东)、中南大学

# 《材料科学与工程实验系列教材》

## 出版委员会

(除出版本书出版社外, 其他出版社按汉语拼音排序)

冶金工业出版社 曹胜利 张 卫 刘小峰

北京大学出版社 杨立范 林章波 童君鑫

国防工业出版社 邢海鹰 辛俊颖

哈尔滨工业大学出版社 黄菊英 杨 桦 许雅莹

## 序 言

近年来,我国高等教育取得了历史性突破,实现了跨越式的发展,高等教育由精英教育变为大众化教育。以国家需求与社会发展为导向,走多样化人才培养之路是今后高等教育教学改革的一项重要内容。

作为高等教育教学内容之一的实验教学,是培养学生动手能力、分析问题、解决问题能力的基础,是学生理论联系实际的纽带和桥梁,是高等院校培养创新开拓型和实践应用型人才的重要课堂。因此,实验教学及国家级实验示范中心建设在高等学校建设上至关重要,在高等院校人才培养计划中亦占有极其重要的地位。但长期以来,实验教学存在以下弊病:

1. 在高等学校的教学中,存在重理论轻实践的现象,实验教学长期处于从属理论教学的地位,大多没有单独设课,忽视对学生能力的培养;

2. 实验教师队伍建设落后,师资力量匮乏,部分实验教师由于种种原因进入实验室,且实验教师知识更新不够;

3. 实验教学学时有限,且在教学计划中实验教学缺乏系统性,为了理论教学任务往往挤压实验教学课时,实验教学没有被置于适当的位置;

4. 实验内容单调,局限在验证理论;实验方法呆板、落后,学生按照详细的实验指导书机械地模仿和操作,缺乏思考、分析和设计过程,被动地重复几年不变的书本上的内容,整个实验过程是教师抱着学生走;设备缺乏且陈旧,组数少,大大降低了实验效果;

5. 整个高等学校存在实验室开放程度不够,实验室的高精尖设备学生根本没有机会操作,更谈不上学生亲自动手及培养其分析问题与解决问题的能力。

这样,怎么能培养出适应国家“十二五”发展规划以及建设“创新型

国家”需求的合格毕业生？

“百年大计，教育为本；教育大计，教师为本；教师大计，教学为本；教学大计，教材为本。”有了好的教材，就有章可循，有规可依，有鉴可借，有路可走。师资、设备、资料（首先是教材）是高等院校的三大教学基本建设。

为了落实教育部“质量工程”及“卓越工程师”计划，建设好材料类特色专业与国家级实验示范中心，实现培养面向 21 世纪高等院校材料类创新型综合性应用人才的目的，国内涉及材料科学与工程专业实验教学的 40 余所高校及国内四家出版社 100 多名专家、学者，于 2011 年 1 月成立了“材料科学与工程实验系列教学研究会”。“研究会”针对目前国内材料类实验教学的现状，以提升材料实验教学能力和传输新鲜理念为宗旨，团结全国高校从事材料科学与工程类实验教学的教师，共同研究提高我国材料科学与工程类实验教学的思路、方法，总结教学经验；目标是，精心打造出一批形式新颖、内容权威、适合时代发展的材料科学与工程系列实验教材，并经过几年的努力，成为优秀的精品课程教材。为此，成立“实验系列教材编审委员会”，并组成以国内有关专家、院士为首的高水平“实验系列教材总编审指导委员会”，其任务是策划教材选题，审查把关教材总体编写质量等；还组成了以教学第一线骨干教师为首的“实验教材编写委员会”，其任务是，提出、审查编写大纲，编写、修改、初审教材等。此外，冶金工业出版社、国防工业出版社、北京大学出版社、哈尔滨工业大学出版社等组成了本系列实验教材的“出版委员会”，协调、承担本实验教材的出版与发行事宜等。

为确保教材品位、体现材料科学与工程实验教材的国家级水平，“编委会”特意对培养目标、编写大纲、书目名称、主干内容等进行了研讨。本系列实验教材的编写，注意突出以下特色：

1. 实验教材的编写与教育部专业设置、专业定位、培养模式、培养计划、各学校实际情况联系在一起；坚持加强基础、拓宽专业面、更新实验教材内容的基本原则。

2. 实验教材编写紧跟世界各高校教材编写的改革思路。注重突出人才素质、创新意识、创造能力、工程意识的培养,注重动手能力,分析问题及解决问题能力的培养。

3. 实验教材的编写与专业人才的社会需求实际情况联系在一起,做到宽窄并举;教材编写应听取用人单位专业人士的意见。

4. 实验教材编写突出专业特色、深浅度适中,以编写质量为实验教材的生命线。

5. 实验教材的编写,处理好该实验课与基础课之间的关系,处理好该实验课与其他专业课之间的关系。

6. 实验教材编写注意教材体系的科学性、理论性、系统性、实用性,不但要编写基本的、成熟的、有用的基础内容,同时也要将相关的未知问题在教材中体现,只有这样才能真正培养学生的创新意识。

7. 实验教材编写要体现教学规律及教学法,真正编写出一本教师及学生都感觉到得心应手的教材。

8. 实验教材的编写要注意与专业教材、学习指导、课堂讨论及习题集等配套教材的编写成龙配套,力争打造立体化教材。

本材料科学与工程实验系列教材,从教学类型上可分为:基础入门型实验,设计研究型实验,综合型实践实验,软件模拟型实验,创新开拓型实验。从教材题目上,包括材料科学基础实验教程(金属材料工程专业);机械工程材料实验教程(机械类、近机类专业);材料科学与工程实验教程(金属材料工程);高分子材料实验教程(高分子材料专业);无机非金属材料实验教程(无机专业);材料成型与控制实验教程(压力加工分册);材料成型与控制实验教程(铸造分册);材料成型与控制实验教程(焊接分册);材料物理实验教程(材料物理专业);超硬材料实验教程(超硬材料专业);表面工程实验教程(材料的腐蚀与防护专业)等一系列与材料有关的实验教材。从内容上,每个实验包含实验目的、实验原理、实验设备与材料、实验内容与步骤、实验注意事项、实验报告要求、思考题等内容。



本实验系列教材由崔占全（燕山大学）、潘清林（中南大学）、赵长生（四川大学）、谢峻林（武汉理工大学）任总主编；王明智（燕山大学）、翟玉春（东北大学）、肖纪美（北京科技大学、院士）任总主审。

经全体编审教师的共同努力，本系列教材的第一批教材即将出版发行，我们殷切期望此系列教材的出版能够满足国内高等院校材料科学与工程类各个专业教育改革发展的需要，并在教学实践中得以不断充实、完善、提高和发展。

本材料科学与工程实验系列教材涉及的专业及内容极其广泛。随着专业设置与教学的变化和发展，本实验系列教材的题目还会不断补充，同时也欢迎国内从事材料科学与工程专业的教师加入我们的队伍，通过实验教材这个平台，将本专业有特色的实验教学经验、方法等与全国材料实验工作者同仁共享，为国家复兴尽力。

由于编者水平及时间有限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

材料科学与工程实验系列教学研究会  
材料科学与工程实验系列教材编写委员会

2011年7月

## 前 言

作为工程实践性很强的学科,实验教学是材料成型与控制工程专业教学中重要的组成部分,对于学生动手实践能力的培养就更为重要。为了适应当前教学改革与创新人才培养的需要,北京科技大学材料国家级实验教学示范中心组织专家教授与实验技术人员编写了本书。

本书内容可分为四个层次。第一层次实验内容主要以全面提高学生实验技能的常规基础实验为主,包括了材料成型基础、铸造成型、轧制成型、挤压拉拔、锻造与冲压成型、焊接成型、模具结构分析等,以加深学生对理论知识的理解与掌握。第二层次是介绍材料成型工艺参数测定与控制的相关实验,这些实验可以让学生掌握材料成型工艺参数测定与控制的相关原理与方法,是第一层次实验内容的延伸。在第一层次和第二层次实验的基础上,编写了一系列利用计算机进行模拟和虚拟仿真实验作为第三层次的内容,与已建立的材料虚拟仿真实验室配套使用。这些实验既可以辅助实验教学,又可以让学生了解现代化的研究手段。为了落实“质量工程”及“卓越工程师”计划的需要,本书最后特意安排了培养学生的创新精神和创新能力的设计性、研究创新性实验为主的第四层次实验。

本书分为十章,共 70 个实验。每个实验由实验目的,实验原理,实验仪器、设备与材料,实验方法和步骤,实验报告要求等组成。书中加入所用相关设备实物照片及应用原理,图文并茂,通俗易懂,既适合作为各类院校材料成型与控制工程专业及其他相关专业本科生的实验教学教材或教学参考书,也可供相关专业研究生、工程技术人员参考。

本书由北京科技大学孙建林教授主编。其中,孙建林编写了各章的“本章要点”及实验 8、实验 19、实验 52~实验 55、实验 62,宋仁伯编写了实验 1~实验 7 及实验 21~实验 23,张鸿编写了实验 9~实验 14、实验 70,李杏娥编写

了实验 15、实验 20，刘德民编写了实验 16 ~ 实验 18、实验 44 ~ 实验 48，朱国明编写了实验 24、实验 60、实验 61，王开坤编写了实验 25、实验 30、实验 64，王会凤编写了实验 26 ~ 实验 29，刘靖编写了实验 31、实验 32、实验 69，张华编写了实验 33 ~ 实验 37、实验 67、实验 68，张永军编写了实验 38 ~ 实验 43、实验 65、实验 66，负冰编写了实验 56 ~ 实验 59，周乐育编写了实验 49、实验 50，张志豪编写了实验 51、实验 63。本书由负冰高级工程师负责统一整理、编排。全书由北京航空航天大学郎利辉教授、北京科技大学袁康教授审定。

本教材的编写得到了“十二五”规划高等学校本科教学质量与教学改革工程建设项目和北京科技大学教材建设经费资助。此外，在编写过程中，中南大学潘清林教授对本书的初稿提出了宝贵的修改意见，本书的出版得到了冶金工业出版社的大力支持，谨此一并深表谢意。

由于编写水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者  
2014 年 2 月

## 冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名                    | 定价(元)  |
|------------------------|--------|
| 轧制工艺润滑原理、技术与应用 (第2版)   | 49.00  |
| 轧钢工艺学                  | 39.00  |
| 金属材料学                  | 36.00  |
| 材料成形设备                 | 46.00  |
| 材料成形的物理冶金学基础           | 26.00  |
| 金属材料工程专业实验教程           | 22.00  |
| 无机非金属材料实验教程            | 30.00  |
| 中厚板生产与质量控制             | 99.00  |
| 中厚板生产实用技术              | 58.00  |
| 中厚板生产知识问答              | 29.00  |
| 中国中厚板轧制技术与装备           | 180.00 |
| 宽厚板轧机概论                | 75.00  |
| 板带冷轧生产——冶金行业职业教育培训规划教材 | 42.00  |
| 板带冷轧机板形控制与机型选择         | 59.00  |
| 高精度板带钢厚度控制的理论与实践       | 65.00  |
| 冷热轧板带轧机的模型与控制          | 59.00  |
| 板带材生产工艺及设备             | 35.00  |
| 中国热轧宽带钢轧机及生产技术         | 75.00  |
| 热轧薄板生产技术               | 35.00  |
| 热轧带钢生产知识问答             | 35.00  |
| 冷轧带钢生产问答               | 45.00  |
| 热轧生产自动化技术              | 52.00  |
| 冷轧薄钢板生产 (第2版)          | 69.00  |

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 材料成型基础实验 .....                | 1  |
| 实验 1 材料拉伸性能检测试验 .....             | 1  |
| 实验 2 材料硬度测试试验 .....               | 6  |
| 实验 3 材料疲劳试验 .....                 | 9  |
| 实验 4 材料冲击韧性试验 .....               | 11 |
| 实验 5 金属薄板塑性应变比 $r$ 值的测定 .....     | 13 |
| 实验 6 金属薄板应变强化指数 $n$ 值的测定 .....    | 15 |
| 实验 7 金属室温压缩时的应力状态研究 .....         | 17 |
| 实验 8 金属塑性变形时摩擦系数测定 .....          | 20 |
| 本章思考讨论题 .....                     | 22 |
| 第二章 铸造成型实验 .....                  | 24 |
| 实验 9 液态合金流动性实验 .....              | 24 |
| 实验 10 凝固温度场的测试实验 .....            | 27 |
| 实验 11 凝固时间的测试实验 .....             | 29 |
| 实验 12 合金定向凝固实验 .....              | 31 |
| 实验 13 合金快速凝固实验 .....              | 33 |
| 实验 14 铸件缺陷分析实验 .....              | 34 |
| 本章思考讨论题 .....                     | 37 |
| 第三章 轧制实验 .....                    | 38 |
| 实验 15 轧制时金属的不均匀变形及其残余应力宏观分析 ..... | 38 |
| 实验 16 最大轧入角和摩擦系数的测定 .....         | 40 |
| 实验 17 宽展及其影响因素 .....              | 42 |
| 实验 18 前滑及其影响因素 .....              | 44 |
| 实验 19 轧制润滑对轧机最小可轧厚度的影响 .....      | 46 |
| 实验 20 轧机弹塑性曲线的测定 .....            | 48 |
| 本章思考讨论题 .....                     | 50 |
| 第四章 挤压拉拔实验 .....                  | 51 |
| 实验 21 Sn-Pb 合金挤压实验 .....          | 51 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 实验 22 挤压变形金属流动规律实验 .....           | 53         |
| 实验 23 拉拔的安全系数及拉伸力的测量 .....         | 54         |
| 实验 24 拉伸试验数值模拟 .....               | 56         |
| <b>第五章 锻造与冲压成型实验 .....</b>         | <b>61</b>  |
| 实验 25 墩粗成型 .....                   | 61         |
| 实验 26 拔长成型 .....                   | 64         |
| 实验 27 冲孔成型 .....                   | 66         |
| 实验 28 冲裁模间隙对冲裁件质量和冲裁力的影响 .....     | 69         |
| 实验 29 板料弯曲成型工艺实验 .....             | 71         |
| 实验 30 拉深成型 .....                   | 74         |
| 实验 31 杯突实验 .....                   | 77         |
| 实验 32 成型极限图 .....                  | 79         |
| 本章思考讨论题 .....                      | 81         |
| <b>第六章 焊接成型实验 .....</b>            | <b>82</b>  |
| 实验 33 气体保护电弧焊工艺 .....              | 82         |
| 实验 34 激光焊接工艺实验 .....               | 85         |
| 实验 35 真空钎焊工艺实验 .....               | 88         |
| 实验 36 搅拌摩擦焊接工艺实验 .....             | 90         |
| 实验 37 焊接接头性能评价实验 .....             | 92         |
| 本章思考讨论题 .....                      | 94         |
| <b>第七章 模具结构分析实验 .....</b>          | <b>95</b>  |
| 实验 38 模锻模结构分析实验 .....              | 95         |
| 实验 39 冲压模具结构分析实验 .....             | 99         |
| 实验 40 拉拔模具结构分析实验 .....             | 101        |
| 实验 41 挤压模具结构分析实验 .....             | 103        |
| 实验 42 压铸模具结构分析实验 .....             | 105        |
| 实验 43 注塑模具结构分析实验 .....             | 107        |
| 本章思考讨论题 .....                      | 110        |
| <b>第八章 塑性成型过程工艺参数测定与控制实验 .....</b> | <b>111</b> |
| 实验 44 电桥特性 .....                   | 111        |
| 实验 45 应变式传感器标定 .....               | 113        |
| 实验 46 电阻应变片的粘贴及技术工艺 .....          | 115        |
| 实验 47 轧制力矩和能耗曲线的测定 .....           | 117        |
| 实验 48 轧制力能参数综合测试 .....             | 119        |
| 实验 49 板带轧制厚度、形状检测与控制 .....         | 122        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 实验 50 板带轧制过程组织性能控制·····           | 127        |
| 实验 51 无模拉拔变形区形状在线测量与控制实验·····     | 130        |
| 本章思考讨论题·····                      | 133        |
| <b>第九章 材料成型虚拟实验·····</b>          | <b>135</b> |
| 实验 52 低碳钢强度及应变硬化指数测定·····         | 136        |
| 实验 53 平面应变断裂韧性 $K_{IC}$ 的测定·····  | 141        |
| 实验 54 系列冲击实验与韧脆转化温度的测定·····       | 146        |
| 实验 55 结构钢的成分、工艺、组织与性能综合热处理实验····· | 150        |
| 实验 56 热连轧带钢工艺、设备、原理综合实验·····      | 157        |
| 本章思考讨论题·····                      | 159        |
| <b>第十章 创新与研究设计性实验·····</b>        | <b>160</b> |
| 实验 57 带孔薄板受均布载荷作用的应力场分析·····      | 160        |
| 实验 58 外表面受热的空心圆柱内部温度场分析·····      | 164        |
| 实验 59 包含焊缝的金属板热膨胀分析·····          | 168        |
| 实验 60 简单轧制数值模拟·····               | 176        |
| 实验 61 三点弯曲数值模拟·····               | 188        |
| 实验 62 不同润滑条件下冷轧板带润滑效果研究·····      | 197        |
| 实验 63 小冲杆实验评价材料的力学性能·····         | 199        |
| 实验 64 铝合金半固态锻挤成型研究·····           | 201        |
| 实验 65 典型锻件模锻工艺设计·····             | 203        |
| 实验 66 板料冲裁、拉深成型工艺实验·····          | 206        |
| 实验 67 典型焊接接头金相组织观察与分析实验·····      | 209        |
| 实验 68 先进材料焊接性实验·····              | 211        |
| 实验 69 低碳钢棒的旋锻工艺研究·····            | 213        |
| 实验 70 结晶过程组织观察实验设计·····           | 215        |
| 本章思考讨论题·····                      | 217        |
| <b>参考文献·····</b>                  | <b>219</b> |

## 第一章

# 材料成型基础实验

### 本章要点

本章针对材料成型过程的基本力学性能设计了8个典型实验,包括材料强度、塑性、摩擦等方面的基本力学性能参数的测试原理和方法。这些基础实验相对简单、易学,通用性强,实验仪器、设备也较为常用,而且实验1~实验6都有对应的国家标准,非常适合材料成型专业基础课的实验课使用。材料成型基础实验有利于加深对材料成型基本理论和基本力学性能的理解和掌握,同时通过基本力学性能测试分析实验训练,为下一步进行成型工艺的综合实验打下实践基础。

## 实验1 材料拉伸性能检测试验

### [实验目的]

- (1) 测定低碳钢(如Q235钢这种典型塑性材料)的下列力学性能指标:下屈服强度 $R_{eL}$ (或屈服极限、屈服点 $\sigma_s$ )、抗拉强度 $R_m$ (或强度极限 $\sigma_b$ )、断后伸长率 $A$ 和断面收缩率 $Z$ ;
- (2) 测定铸铁(典型脆性材料)的抗拉强度 $R_m$ (或强度极限 $\sigma_b$ );
- (3) 观察塑性与脆性两种材料在拉伸过程中的各种现象;
- (4) 比较并分析低碳钢和铸铁的力学性能特点与断口破坏特征。

### [实验原理]

根据GB/T 228—2002和ISO 6892—1998《金属材料室温拉伸试验方法》的基本要求,分别简要叙述如下:

(1) 低碳钢(Q235钢)拉伸实验原理。做拉伸实验时,利用万能材料试验机的自动绘图装置及拉伸过程各特征点的示力度盘读数或电子拉力试验机的 $X-Y$ 函数记录仪,可测绘出低碳钢试样的拉伸图,即图1-1所示的拉力 $F$ 与伸长 $L_u-L_0$ 之间关系曲线。为了使同一种钢材不同尺寸试样的拉伸过程及其特性点便于比较,以消除试样几何尺寸的影响,此曲线称为应力-应变曲线,如图1-2所示。从曲线上可以看出,它与拉伸图曲线相似,更清



晰表征了钢材的力学性能。拉伸实验过程分为四个阶段，如图 1-1 和图 1-2 所示。

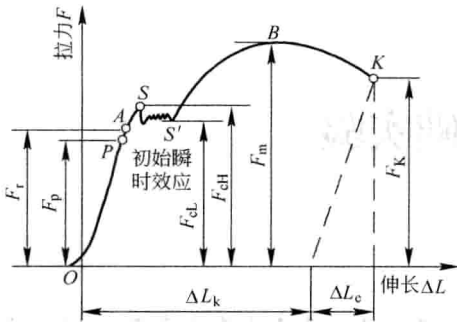


图 1-1 低碳钢试样拉伸图

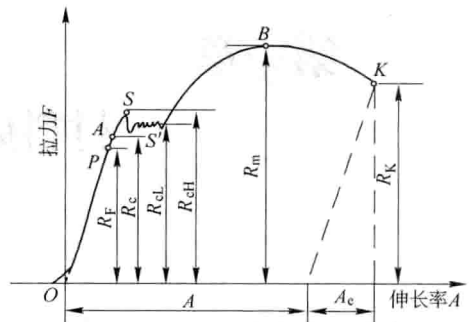


图 1-2 低碳钢应力伸长率图

**弹性阶段 OA：**在此阶段中的  $OP$  段，其拉力  $F$  和伸长  $\Delta L$  成正比关系，表明钢材的应力  $R$  与伸长率（或称应变）为线性关系，完全遵循虎克定律，则  $OP$  段称为线弹性阶段。故点  $P$  对应的应力  $R_F$  称为材料的比例极限，如图 1-2 所示。在此弹性阶段内可以测定材料的弹性模量  $E$ ，它是材料的弹性性质优劣的重要特征之一。实验时如果当应力继续增加达到  $A$  点所对应的应力  $R_e$  时，则应力与应变之间的关系不再是线性关系，但变形仍然是弹性的，即卸除拉力后变形完全消失，这呈现出非线性弹性性质。故  $A$  点对应的应力  $R_e$  称为材料的弹性极限，把  $PA$  段称为非线性弹性阶段。工程上对材料的弹性极限（非线性阶段）和比例极限（线弹性阶段）并不严格区分，而是把拉力卸掉后，用精密仪器测定其不能恢复的塑性应变约为 0.02% 所对应的应力值界定为规定非比例伸长应力（或称条件弹性极限） $R_{e0.02}$ ，它是控制钢材在弹性变形范围内工作的有效指标，在工程上很有实用价值。

**屈服阶段  $AS'$ ：**当应力超过弹性极限继续增加达到锯齿状曲线  $SS'$  时，示力度盘上的指针暂停转动或开始稍微回转并往复运动，这时在试样表面上可看到表征金属晶体滑移的迹线，大约与试样轴线成  $45^\circ$  方向的螺旋线。这种现象表征试样在承受的拉力不继续增加或稍微减小的情况下却继续伸长达到塑性变形发生，这种现象称为试样材料的屈服，其相对应的应力称为屈服应力（或屈服强度）。示力度盘的指针首次回转前的最高应力  $R_{eH}$  称为上屈服强度，在屈服阶段不计初始瞬时效应时的最低应力  $R_{eL}$  称为下屈服强度。由于上屈服强度受试验速率、试样变形速率和试样形式等因素的影响不够稳定，而下屈服强度则比较稳定，故工程中一般要求准确测定下屈服强度  $R_{eL}$  作为材料的屈服极限  $\sigma_s$ 。其计算公式为  $R_{eL}(\sigma_s) = F_{eL}/S_0$ 。如果材料没有明显的屈服现象时，工程上常用产生规定残余伸长率为 0.2% 时的应力  $R_{0.2}$  作为规定残余延伸强度，又称条件屈服极限  $\sigma_{0.2}$ 。屈服强度（或屈服极限）是衡量材料强度性能优劣的一个重要指标。本实验要求准确测定其屈服强度。

**强化阶段  $S'B$ ：**当过了屈服阶段后，试样材料因发生明显塑性变形，其内部晶体组织结构重新得到了排列调整，其抵抗变形的能力有所增强，随着拉力的增加，伸长变形也随之增加，故拉伸曲线继续上凸升高形成  $S'B$  曲线段，称为试样材料的强化阶段。在该阶段中试样随着塑性变形量累积增大，促使材料的力学性能也发生变化，即材料的塑性变形性能劣化，材料抵抗变形能力提高，这种特征称为形变强化或冷作硬化。当拉力增加达到拉伸曲线顶点  $B$  时，示力度盘上的主动针开始返回，而被动针所指的最大拉力为  $F_m$ ，依它