

普通高等教育精品教材  
“互联网+”立体化教材

# 工程材料 及成形工艺基础

主编 张忠诚 张双杰 李志永

(含微课)

GONGCHENG CAILIAO  
JI CHENGXING  
GONGYI JICHU

航空工业出版社

普通高等教育精品教材

“互联网+”立体化教材

# 工程材料及成形 工艺基础

主编 张忠诚 张双杰 李志永

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书根据教育部制定的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》编写,在精选与整合传统知识内容的基础上,吸收了新材料、新工艺、新技术等方面的研究成果。全书共十章,包括金属材料的性能、金属的晶体结构、铁碳合金相图、钢的热处理、机械工程材料、铸造成形、锻压成形、焊接成形、非金属材料成形和3D打印成形技术等内容。

本书可作为普通高等院校材料类及机械类专业学生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程材料及成形工艺基础 / 张忠诚, 张双杰, 李志永主编. — 北京: 航空工业出版社, 2019. 2  
ISBN 978-7-5165-1867-0

I. ①工… II. ①张… ②张… ③李… III. ①工程材料—成型—工艺—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第029573号

## 工程材料及成形工艺基础 Gongcheng Cailiao ji Chengxing Gongyi Jichu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

三河市祥达印刷包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2019年2月第1版

2019年2月第1次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 17.5

字数: 404千字

印数: 1—2500

定价: 38.00元

# 前言

材料是人类生产和生活的物质基础。工程材料的创新发展推动工业水平不断提高,使社会经济发生了巨大的变化。工程材料在工业生产的各个行业中都有广泛应用,近年来不断涌现出大量的新材料和新工艺,促进了社会经济的稳定发展。

“工程材料及成形工艺”是机械类和材料类相关专业的基础课程,为适应社会发展的需要,编者对本课程进行了深入的探索与研究,并结合多年的教学经验,精心编写了本书。具体来讲,本书具有以下几个特点。

## 1. 内容精炼, 结构合理

本书有机整合了材料科学基础理论(第一~三章)、热处理工艺原理(第四章)、机械工程材料(第五章)和材料成形工艺(第六~十章)四大部分的相关知识,内容准确精炼,结构科学合理,便于教师讲授及学生理解。

## 2. 贯彻标准, 知识前沿

本书涉及的材料性能试验和各种工程材料的牌号、成分及性能等,均采用了最新的国家标准或行业标准。例如,本书采用的《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法》是2018年12月1日实施的最新标准。本书还注重知识的更新,重点吸纳了新材料、新工艺、新技术等方面的研究成果。例如,本书紧跟时代发展趋势,增加了“3D打印成形技术”章节。

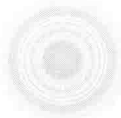
## 3. 图表丰富, 模块精彩

本书配有海量的精美图片和实用表格,将内容生动系统地展示出来,力求为学生营造一个更加直观的认知环境。此外,书中还穿插有“拓展阅读”“知识链接”“提示”“注意”等小模块,既能提高学生的学习兴趣,又能拓宽学生的知识面。

## 4. 随堂微课, 轻松学习

本书为部分重点、难点内容设置了微课视频,学生可通过移动终端扫描二维码进行观看。随堂微课不但丰富了教学方式,使授课更高效,而且增加了学生的学习途径,使学习更轻松。

本书由张忠诚、张双杰、李志永担任主编,李军霞、魏胜辉、王会霞、么春霞、王勇参与编写。具体分工为:第一章和第四章由李志永编写;第二章和第三章由李军霞编写;第五章由魏胜辉编写;第六章由张忠诚编写;第七章由张双杰编写;第八章由王会霞编写;



第九章由么春霞编写；第十章由王勇编写。

在编写过程中，我们参考了大量有关工程材料及成形工艺的相关资料，并从 Internet 中获取了部分信息和图片，在此向这些资料的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏与不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

本书配有丰富的教学资源包，读者可到北京金企鹅联合出版中心网站([www.bjjqe.com](http://www.bjjqe.com))下载。

编 者

2019年1月

# 本书编委会

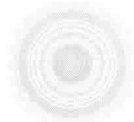
主 编 张忠诚 张双杰 李志永

参 编 李军霞 魏胜辉 王会霞

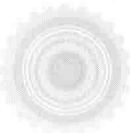
么春霞 王 勇

# 目 录

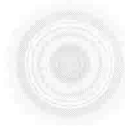
|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 金属材料的性能 .....         | 1  |
| 第一节 金属材料的力学性能 .....       | 1  |
| 一、强度 .....                | 1  |
| 二、塑性 .....                | 4  |
| 三、硬度 .....                | 5  |
| 四、冲击韧性 .....              | 7  |
| 五、疲劳强度 .....              | 10 |
| 第二节 金属材料的物理、化学及工艺性能 ..... | 11 |
| 一、物理性能 .....              | 11 |
| 二、化学性能 .....              | 11 |
| 三、工艺性能 .....              | 11 |
| 复习思考题 .....               | 12 |
| 第二章 金属的晶体结构 .....         | 13 |
| 第一节 纯金属的晶体结构 .....        | 13 |
| 一、晶体与晶格 .....             | 13 |
| 二、实际的金属晶体结构 .....         | 17 |
| 三、金属的结晶与铸锭组织 .....        | 20 |
| 第二节 合金的晶体结构 .....         | 26 |
| 一、合金的基本概念 .....           | 26 |
| 二、合金的相结构 .....            | 27 |
| 第三节 二元合金相图 .....          | 28 |
| 一、二元合金相图的建立 .....         | 28 |
| 二、二元合金相图的分析 .....         | 29 |
| 复习思考题 .....               | 32 |
| 第三章 铁碳合金相图 .....          | 33 |
| 第一节 铁碳合金的组元与基本组织 .....    | 33 |
| 一、铁碳合金的组元 .....           | 33 |
| 二、铁碳合金的基本组织 .....         | 33 |



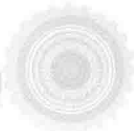
|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第二节 铁碳合金相图分析 .....        | 34 |
| 一、相图中的特性点 .....           | 35 |
| 二、相图中的特性线 .....           | 36 |
| 三、铁碳合金的结晶过程 .....         | 37 |
| 四、铁碳合金成分、组织和性能之间的关系 ..... | 42 |
| 第三节 铁碳合金相图的应用 .....       | 44 |
| 一、在选材方面的应用 .....          | 44 |
| 二、在铸造方面的应用 .....          | 44 |
| 三、在锻造方面的应用 .....          | 44 |
| 四、在焊接方面的应用 .....          | 44 |
| 五、在热处理方面的应用 .....         | 45 |
| 复习思考题 .....               | 45 |
| 第四章 钢的热处理 .....           | 46 |
| 第一节 热处理的基本原理 .....        | 47 |
| 一、钢在加热时的转变 .....          | 47 |
| 二、钢在冷却时的转变 .....          | 50 |
| 第二节 钢的整体热处理 .....         | 56 |
| 一、钢的退火 .....              | 56 |
| 二、钢的正火 .....              | 58 |
| 三、钢的淬火 .....              | 59 |
| 四、钢的回火 .....              | 62 |
| 第三节 钢的表面热处理 .....         | 64 |
| 一、表面淬火 .....              | 64 |
| 二、化学热处理 .....             | 66 |
| 第四节 热处理新技术简介 .....        | 68 |
| 一、激光热处理 .....             | 68 |
| 二、电子束热处理 .....            | 68 |
| 三、可控气氛热处理 .....           | 69 |
| 四、真空热处理 .....             | 69 |
| 五、形变热处理 .....             | 69 |
| 六、复合热处理 .....             | 70 |
| 复习思考题 .....               | 70 |
| 第五章 机械工程材料 .....          | 72 |
| 第一节 钢材 .....              | 72 |
| 一、钢的分类与牌号 .....           | 72 |
| 二、钢中的残存元素和合金元素 .....      | 74 |
| 三、非合金钢 .....              | 79 |



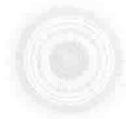
|                  |     |
|------------------|-----|
| 四、低合金钢           | 84  |
| 五、合金钢            | 86  |
| 第二节 铸铁           | 102 |
| 一、概述             | 102 |
| 二、常用铸铁           | 103 |
| 三、特殊性能铸铁         | 110 |
| 第三节 有色金属及其他材料    | 111 |
| 一、铝及铝合金          | 111 |
| 二、铜及铜合金          | 113 |
| 三、粉末冶金材料         | 116 |
| 四、高分子材料          | 118 |
| 五、陶瓷材料           | 120 |
| 六、复合材料           | 121 |
| 七、其他新材料          | 122 |
| 复习思考题            | 124 |
| 第六章 铸造成形         | 125 |
| 第一节 铸造成形基础       | 125 |
| 一、合金的流动性         | 126 |
| 二、合金的收缩性         | 128 |
| 第二节 砂型铸造         | 134 |
| 一、造型材料           | 135 |
| 二、造型方法           | 136 |
| 三、砂型铸造的工艺设计      | 141 |
| 第三节 特种铸造         | 145 |
| 一、熔模铸造           | 145 |
| 二、金属型铸造          | 146 |
| 三、压力铸造           | 147 |
| 四、低压铸造           | 148 |
| 五、离心铸造           | 148 |
| 第四节 铸件的结构设计      | 149 |
| 一、铸造工艺对铸件结构的要求   | 149 |
| 二、合金铸造性能对铸件结构的要求 | 153 |
| 第五节 铸造新技术简介      | 155 |
| 一、铸造过程数值模拟技术     | 155 |
| 二、消失模铸造技术        | 156 |
| 三、半固态成形技术        | 157 |
| 四、定向结晶技术         | 159 |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 复习思考题 .....                   | 161        |
| <b>第七章 锻压成形 .....</b>         | <b>163</b> |
| <b>第一节 塑性变形基础 .....</b>       | <b>163</b> |
| 一、金属的冷塑性变形 .....              | 163        |
| 二、回复、再结晶与晶粒长大 .....           | 164        |
| 三、冷变形和热变形 .....               | 165        |
| 四、锻造流线与锻造比 .....              | 165        |
| 五、金属的可锻性 .....                | 166        |
| <b>第二节 锻造工艺 .....</b>         | <b>169</b> |
| 一、自由锻 .....                   | 169        |
| 二、模锻 .....                    | 172        |
| 三、锻造工艺比较 .....                | 180        |
| <b>第三节 冲压工艺 .....</b>         | <b>181</b> |
| 一、冲压工艺的特点 .....               | 181        |
| 二、冲压的基本工序 .....               | 181        |
| 三、冲模 .....                    | 187        |
| <b>第四节 锻造和冲压零件的结构设计 .....</b> | <b>189</b> |
| 一、锻件的结构工艺性 .....              | 189        |
| 二、冲压件的结构工艺性 .....             | 191        |
| <b>第五节 锻压新技术简介 .....</b>      | <b>193</b> |
| 一、精密模锻 .....                  | 193        |
| 二、精密冲裁 .....                  | 193        |
| 三、轧制成形 .....                  | 194        |
| 四、超塑性成形 .....                 | 196        |
| 五、高速高能成形 .....                | 198        |
| 复习思考题 .....                   | 199        |
| <b>第八章 焊接成形 .....</b>         | <b>201</b> |
| <b>第一节 焊接成形基础 .....</b>       | <b>202</b> |
| 一、焊接电弧 .....                  | 202        |
| 二、焊接接头 .....                  | 204        |
| 三、焊接化学冶金 .....                | 206        |
| 四、焊接应力与变形 .....               | 207        |
| 五、焊接缺陷 .....                  | 213        |
| <b>第二节 常用焊接工艺 .....</b>       | <b>216</b> |
| 一、焊条电弧焊 .....                 | 216        |
| 二、埋弧焊 .....                   | 218        |
| 三、钨极氩弧焊 .....                 | 220        |



|                     |     |
|---------------------|-----|
| 四、熔化极气体保护焊 .....    | 222 |
| 五、电阻焊 .....         | 224 |
| 六、摩擦焊 .....         | 226 |
| 七、钎焊 .....          | 227 |
| 第三节 常用金属材料的焊接 ..... | 228 |
| 一、金属的焊接性 .....      | 228 |
| 二、常用材料的焊接 .....     | 229 |
| 第四节 焊件的结构设计 .....   | 233 |
| 一、焊接结构材料的选择 .....   | 233 |
| 二、焊接工艺的选择 .....     | 233 |
| 三、焊接接头的工艺设计 .....   | 234 |
| 第五节 焊接新技术简介 .....   | 238 |
| 一、真空电子束焊 .....      | 238 |
| 二、激光焊 .....         | 239 |
| 三、等离子弧焊 .....       | 240 |
| 四、搅拌摩擦焊 .....       | 241 |
| 复习思考题 .....         | 242 |
| 第九章 非金属材料成形 .....   | 243 |
| 第一节 塑料的成形 .....     | 243 |
| 一、注射成形 .....        | 243 |
| 二、挤出成形 .....        | 244 |
| 三、压制成形 .....        | 244 |
| 四、吹塑成形 .....        | 245 |
| 五、压延成形 .....        | 246 |
| 第二节 橡胶的成形 .....     | 246 |
| 一、压制成形 .....        | 246 |
| 二、传递成形 .....        | 247 |
| 三、注压成形 .....        | 247 |
| 第三节 陶瓷的成形 .....     | 248 |
| 一、注浆成形 .....        | 248 |
| 二、压制成形 .....        | 250 |
| 三、注射成形 .....        | 250 |
| 第四节 复合材料的成形 .....   | 251 |
| 一、树脂基复合材料的成形 .....  | 251 |
| 二、金属基复合材料的成形 .....  | 253 |
| 三、陶瓷基复合材料的成形 .....  | 253 |
| 复习思考题 .....         | 254 |



|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第十章 3D 打印成形技术     | 255 |
| 第一节 3D 打印的基本原理    | 255 |
| 一、3D 打印的原理        | 255 |
| 二、3D 打印的实现过程      | 256 |
| 三、3D 打印的特点        | 257 |
| 第二节 3D 打印的主要工艺    | 258 |
| 一、熔融沉积 3D 打印      | 258 |
| 二、光固化 3D 打印       | 259 |
| 三、选择性激光烧结         | 260 |
| 四、激光近净成形          | 261 |
| 五、三维打印            | 262 |
| 六、分层实体制造          | 263 |
| 第三节 3D 打印的应用和发展趋势 | 265 |
| 一、3D 打印的应用        | 265 |
| 二、3D 打印的发展趋势      | 266 |
| 复习思考题             | 267 |
| 参考文献              | 268 |

# 第一章 金属材料的性能

工程材料主要是指工业生产中所使用的材料，主要包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。

- **金属材料**：包括金属和以金属为基的合金，它具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、用途最广泛的工程材料。其中，钢铁材料在 2014 年的年产量已达 14 亿吨，占机械用材总量的 60% 以上。
- **无机非金属材料**：包括水泥、玻璃、陶瓷和耐火材料等，它具有不可燃性、高耐热性、高化学稳定性、不易老化等特点，在建筑、医疗等行业应用广泛。
- **高分子材料**：又称有机合成材料，主要包括塑料、橡胶和纤维等，在传统工业和新兴工业中均有广泛应用。
- **复合材料**：是由两种或两种以上不同材料复合而成，它具有密度低、弹性好和强度高特点，主要用于电子信息、航空航天等新兴产业。

金属材料是最重要的工程材料，它具有一定的力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能，可以满足不同使用条件下对工件的要求，不仅是国民经济和日常生活中必不可少的基础材料，还是国防工业和科技发展中至关重要的战略物资。

## 拓展阅读

材料是人类赖以生存的物质基础。人类使用材料的历史，从远古的石器时代，到公元前的青铜器时代和铁器时代，经历了漫长的岁月，金属的使用标志着人类文明社会的到来。18 世纪钢铁时代的来临，引发了世界范围的工业革命；1950 年硅材料的广泛使用，开启了信息技术革命的新时代；20 世纪 90 年代又迎来了新材料时代的蓬勃发展。

## 第一节 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在受外力作用时所反映出来的性能，它是衡量金属材料性能的重要指标，是选择、使用金属材料的重要依据。金属材料的力学性能主要有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等。

### 一、强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。按照作用力性质的不同，强度可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等。工程上常用的强度指标是抗拉强度和屈服强度，它们都由拉伸试验测定。

## (一) 拉伸试验和拉伸曲线

拉伸试验根据《金属材料 拉伸试验 第一部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)进行。试验时，首先将金属材料制成标准试样，如图 1-1 (a) 所示；然后将标准试样装夹在材料试验机上，对其两端施加轴向静拉力，缓慢拉伸使试样产生变形，如图 1-1 (b) 所示；随着拉力增大，变形量增加，试样局部出现缩颈，如图 1-1 (c) 所示；最后试样被拉断，如图 1-1 (d) 所示。在试验过程中，试验机自动绘制出拉力  $F$  与其相对应的变形量  $\Delta L$  之间的关系曲线，称为拉伸曲线。低碳钢的拉伸曲线如图 1-2 所示。

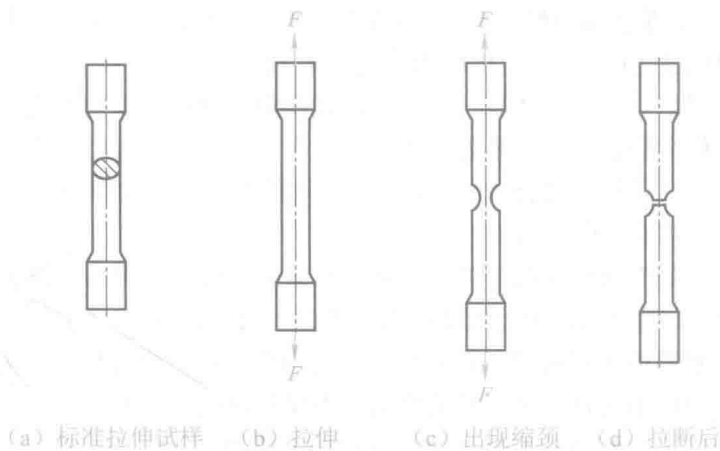


图 1-1 拉伸试样

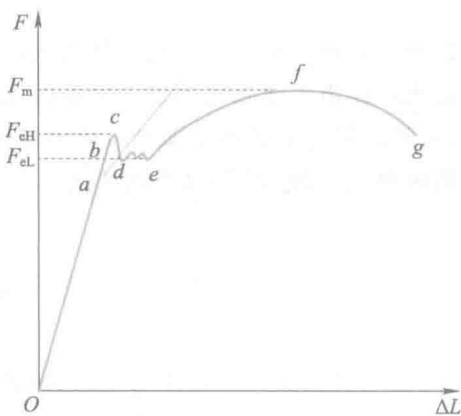


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

从图 1-2 中可以看出，低碳钢试样的拉伸过程可以分为弹性变形阶段、屈服阶段、均匀塑性变形阶段和缩颈阶段。

- 弹性变形阶段 ( $ob$  阶段)：在  $oa$  阶段，试样发生弹性变形，拉力与变形量呈正比例关系。去掉拉力后，试样能完全恢复到原来的形状和尺寸。在  $ab$  阶段，试样发生滞弹性变形，即弹性变形中的非线性阶段，试样的变形仍为弹性变形，但外力与变形量不呈线性正比例关系。



- 屈服阶段 (*bc* 阶段): 在 *bc* 阶段, 试样发生连续均匀的微小塑性变形, 若将拉力去掉, 试样的伸长变形不会完全消失。在 *cde* 阶段, 试样发生较大的塑性变形, 开始时由于屈服变形的不连续导致拉力突然下降; 随后试样伸长急剧增加, 拉力却在小范围内波动。如果忽略波动, 此时拉力不变而变形量却在继续增加, 这种现象称为屈服。宏观上, 这可以看作是金属材料从弹性变形过渡到塑性变形的一个明显标志。
- 均匀塑性变形阶段 (*ef* 阶段): 在 *ef* 阶段, 必须进一步增加拉力才能使试样继续被伸长。同时, 随变形量的增加, 材料不断被强化, 这种现象称为应变强化 (加工硬化)。宏观上, 试样产生了均匀的塑性变形。
- 缩颈阶段 (*fg* 阶段): 在 *fg* 阶段, 试样开始发生局部收缩, 称为缩颈。此时变形所需的拉力逐渐降低, 但由于缩颈部位的面积迅速减小, 实际应力仍在不断增加, 缩颈部位的材料被拉长, 直至被拉断。

## (二) 抗拉强度

材料出现局部塑性变形的开始点 *f* 所对应的力  $F_m$  为试样在拉伸过程中所能承受的最大外力。材料屈服后、断裂前单位面积上所能承受的最大载荷称为抗拉强度, 用  $R_m$  表示, 即

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中:  $R_m$  ——抗拉强度 (MPa);  
 $F_m$  ——最大外力 (N);  
 $S_0$  ——试样原始横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

## (三) 屈服强度

屈服强度用来表征材料抵抗塑性变形的能力。对于有明显屈服现象的金属材料, 可以测定其上屈服强度  $R_{\text{ch}}$  和下屈服强度  $R_{\text{cl}}$ 。在拉伸曲线上的 *cde* 屈服阶段, 拉力值首次下降前的最大力为上屈服力 (*c* 点对应的力), 用  $F_{\text{ch}}$  表示; 不计初始瞬时效应时的最小力为下屈服力 (*e* 点对应的力), 用  $F_{\text{cl}}$  表示。用测得的上、下屈服力除以试样的原始横截面积, 便得到上、下屈服强度, 即

$$R_{\text{ch}} = \frac{F_{\text{ch}}}{S_0}$$

$$R_{\text{cl}} = \frac{F_{\text{cl}}}{S_0}$$

式中:  $R_{\text{ch}}$  ——上屈服强度 (MPa);  
 $R_{\text{cl}}$  ——下屈服强度 (MPa);  
 $F_{\text{ch}}$  ——上屈服力 (N);  
 $F_{\text{cl}}$  ——下屈服力 (N)。

有些金属材料,如高碳钢、铸铁、铜、铝等,没有明显的屈服现象,拉伸曲线上没有小锯齿状平台,通常规定试样产生 0.2%塑性变形时的应力作为其规定非比例延伸强度,用  $R_{p0.2}$  表示。如图 1-3 所示,用常规平行线法测  $R_{p0.2}$  时,首先在该材料的拉伸曲线的横轴上取点  $C$ ,并使  $OC = 0.2\%L_0$  ( $L_0$  为拉伸试样的原始标距),沿  $C$  点作一条与拉伸曲线的弹性变形阶段相平行的直线  $CA$ ,则  $A$  点对应的力  $F_p$  就是材料产生 0.2%塑性变形时所受的外力,用该力除以试样的原始横截面积  $S_0$ ,便得到规定非比例延伸强度,即

$$R_{p0.2} = \frac{F_p}{S_0}$$

式中:  $R_{p0.2}$ ——规定非比例延伸强度 (MPa);

$F_p$ ——试样产生 0.2%塑性变形时所受的外力 (N)。

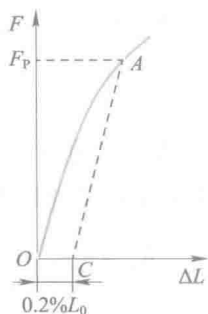


图 1-3 常规平行线法测  $F_p$

**注意**

抗拉强度和屈服强度是设计机械零件时评定和选择金属材料的重要依据。机械零件不能在超过其抗拉强度的条件下工作,否则将导致机件的损坏。由于多数机械零件工作时不允许出现明显的塑性变形,所以材料所受的应力不能超过其屈服强度。

## 二、塑性

金属材料在外力作用下,产生不可逆永久变形而不被破坏的能力称为塑性。常用的塑性指标有断面收缩率和断后伸长率。

### (一) 断面收缩率

将拉断后的试样的断裂部位仔细地对接在一起,使其轴线处于同一直线上,在缩颈最小处相互垂直的方向上多次测量直径,以其算术平均值为直径计算出最小横截面积  $S_u$ 。试样的原始横截面积  $S_0$  与最小截面积  $S_u$  之差,再除以  $S_0$  得到的百分率为断面收缩率  $Z$ ,即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$



## (二) 断后伸长率

将拉断后的试样的断裂部位仔细地对接在一起,使其轴线处于同一直线上,测得断后标距  $L_u$ 。断后标距  $L_u$  与原始标距  $L_0$  之差,再除以  $L_0$  得到的百分率为断后伸长率  $A$ ,即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

材料的  $Z$  或  $A$  越大,说明其塑性越好。

## 三、硬度

硬度是指材料表面抵抗局部塑性变形、压痕或划痕的能力,是衡量材料软硬程度的指标。硬度测试应用最广的是压入法,即在一定载荷作用下,用比工件更硬的压头缓慢压入被测工件表面,使材料局部塑性变形而形成压痕,然后根据压痕面积大小或压痕深度来确定硬度值。从这个意义来讲,硬度反映材料表面抵抗其他物体压入的能力。工程上常用的硬度指标有布氏硬度和洛氏硬度等。

### (一) 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1-4 所示。测量时,用一定直径的硬质合金球做压头,在一定的静载荷下压入试样表面,保持压力  $F$  至规定的时间后卸载,测量试样表面压痕直径  $d$ ,求得压痕表面积  $S$ 。布氏硬度值的计算方法为

$$\text{布氏硬度} = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中:  $F$  —— 试验力 (N);

$S$  —— 压痕表面积 ( $\text{mm}^2$ );

$D$  —— 球体直径 (mm);

$d$  —— 压痕平均直径 (mm)。

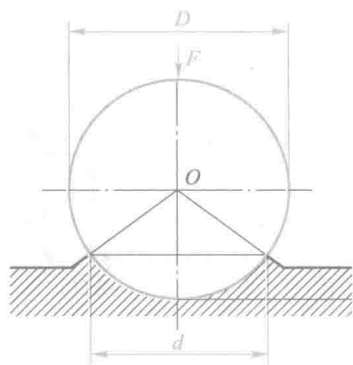


图 1-4 布氏硬度试验原理图

在实际测定中,  $F$  和  $D$  是根据被测材料按国家标准选定的,只需用刻度放大镜测量出压痕直径  $d$ ,然后直接查表即可求得硬度值。