

轮机金属材料

# 轮机金属材料

大连海运学院

《轮机金属材料》编写组编

人民交通出版社  
U668.2

人民交通出版社

1657.2  
D05

180157

# 轮机金属材料

Lunji Jinshu Cailiao

大连海运学院

《轮机金属材料》编写组编



人民交通出版社

1983

**轮机金属材料**

大连海运学院

《轮机金属材料》编写组 编

人民交通出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售  
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092<sub>1/16</sub> 印张：12.75 字数：302 千

1983年11月 第1版

1983年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,700册 定价：2.35元

## 内 容 提 要

本书是为轮机管理和船舶机械专业的技术人员及学生编写的，内容包括金属学和热处理的基本理论，碳钢、合金钢、铸铁及有色金属等材料的基本知识，以及船用柴油机主要零件的选材和热处理等。本书附录中还附有中、外轮机员金属材料试题选录。

本书供轮机员和船厂的技术人员参考，也可作为大专院校的有关专业的教学用书。

DV 10/18

# 前 言

本书是为轮机管理和船舶机械专业的技术人员及学生编写的。通过本书可以使读者获得关于金属材料的成分、组织与性能之间相互关系的知识，以便正确选用金属材料；了解热处理的基本理论及工艺，以便发掘金属材料的潜力和进一步强化修复零件；获知主要船机零件在不同状态下可能失效的原因，以便正确保养这些零件并延长其寿命。因此，本书主要内容有基本理论；铁及其合金；有色金属及其合金；主要船机零件选材要求及失效分析等几部分。

本书为轮机员和船厂的技术人员在工作中对船机故障进行材料方面的分析、修理时对零件材质提出要求以及修造后对零件材质加工工艺进行验收提供了必要的知识，也可作为大专院校有关专业的教学用书。

本书第一、二、三、四、五章由李兴无编写；第六、七、十、十三章由满一新编写；第八、九、十一、十二章由冯广勤编写；第十四、十五章及附录由倪暹编写和收集。全书由李兴无、满一新统稿，由杨烈宇教授主审。本书全部金相图片由刘之敏拍摄。

由于水平所限和时间仓促，书中难免出现缺点和错误，诚盼读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第一章 金属材料的性能指标</b> .....  | 1  |
| 第一节 机件失效的主要形式及其与选材的关系.....  | 1  |
| 第二节 金属材料的机械性能.....          | 3  |
| 一、静载荷作用下测定的指标.....          | 3  |
| 二、动载荷作用下测定的指标.....          | 6  |
| 第三节 金属材料的工艺性能及物理、化学性能.....  | 8  |
| <b>第二章 金属的晶体构造与结晶</b> ..... | 9  |
| 第一节 金属原子间的结合特点——金属键.....    | 9  |
| 第二节 金属晶体的结构特点.....          | 9  |
| 第三节 常见金属的晶格类型.....          | 10 |
| 一、体心立方晶格.....               | 10 |
| 二、面心立方晶格.....               | 10 |
| 三、密排六方晶格.....               | 11 |
| 第四节 单晶体的各向异性.....           | 11 |
| 第五节 实际金属的晶体结构及缺陷.....       | 11 |
| 一、点缺陷.....                  | 12 |
| 二、线缺陷.....                  | 13 |
| 三、面缺陷.....                  | 13 |
| 第六节 金属的结晶.....              | 14 |
| 一、金属结晶过程的实验观察和能量条件.....     | 14 |
| 二、金属的结晶理论.....              | 15 |
| 三、结晶的基本形式——树枝状晶体.....       | 16 |
| 第七节 铸锭的组织及其缺陷.....          | 16 |
| 第八节 船机铸件的验收.....            | 18 |
| <b>第三章 金属的变形与再结晶</b> .....  | 20 |
| 第一节 单晶体金属的变形.....           | 20 |
| 一、单晶体的弹性变形.....             | 20 |
| 二、单晶体的塑性变形.....             | 20 |
| 第二节 多晶体金属的变形.....           | 22 |
| 一、多晶体的弹性变形.....             | 22 |
| 二、多晶体的塑性变形.....             | 22 |
| 第三节 塑性变形对金属组织和性能的影响.....    | 23 |
| 一、塑性变形对金属组织的影响.....         | 23 |
| 二、塑性变形对金属性能的影响.....         | 24 |

|            |                                 |           |
|------------|---------------------------------|-----------|
| 第四节        | 经塑性变形后的金属在加热时的变化                | 25        |
| 一、         | 恢复(回复)                          | 25        |
| 二、         | 再结晶                             | 25        |
| 三、         | 再结晶后的晶粒长大                       | 26        |
| 第五节        | 金属的热加工                          | 27        |
| 第六节        | 船机锻件的验收                         | 28        |
| <b>第四章</b> | <b>合金的构造与合金相图</b>               | <b>30</b> |
| 第一节        | 合金中的相结构                         | 30        |
| 一、         | 固溶体                             | 30        |
| 二、         | 化合物                             | 31        |
| 第二节        | 合金的结晶过程及合金相图的建立                 | 33        |
| 第三节        | 二元合金相图的基本类型                     | 36        |
| 一、         | 匀晶相图                            | 36        |
| 二、         | 共晶相图                            | 38        |
| 第四节        | 合金性能与相图的关系                      | 40        |
| 一、         | 合金的物理、机械性能与相图的关系                | 40        |
| 二、         | 合金的工艺性能与相图的关系                   | 41        |
| <b>第五章</b> | <b>铁碳合金相图</b>                   | <b>42</b> |
| 第一节        | 纯铁                              | 42        |
| 一、         | 纯铁的机械性能                         | 42        |
| 二、         | 纯铁在固态下的转变                       | 43        |
| 第二节        | 铁碳合金的相结构和组织                     | 43        |
| 一、         | 铁素体                             | 43        |
| 二、         | 奥氏体                             | 43        |
| 三、         | $\delta$ -铁素体                   | 44        |
| 四、         | 渗碳体                             | 44        |
| 五、         | 珠光体                             | 44        |
| 第三节        | 铁-渗碳体合金相图                       | 46        |
| 一、         | Fe-Fe <sub>3</sub> C相图上的特性点和特性线 | 46        |
| 二、         | 铁碳合金的分类                         | 46        |
| 三、         | 典型合金的结晶过程                       | 47        |
| 第四节        | 铁碳相图的实用价值                       | 50        |
| 一、         | 在选材方面的应用                        | 50        |
| 二、         | 为制定热加工工艺提供参考数据                  | 50        |
| <b>第六章</b> | <b>碳钢</b>                       | <b>52</b> |
| 第一节        | 钢铁生产简介                          | 52        |
| 一、         | 生铁的冶炼                           | 52        |
| 二、         | 钢的冶炼                            | 52        |
| 第二节        | 冶金质量对碳钢的影响                      | 53        |
| 一、         | 冶炼方法对碳钢质量的影响                    | 53        |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 二、脱氧程度对钢的质量影响                       | 54 |
| 三、碳钢的化学成分对钢性能的影响                    | 55 |
| 四、气体和非金属夹杂物的影响                      | 56 |
| 第三节 碳钢的分类、牌号和用途                     | 57 |
| 一、碳钢的分类                             | 57 |
| 二、钢的编号                              | 58 |
| 三、普通碳素结构钢                           | 58 |
| 四、优质碳素结构钢                           | 60 |
| 五、专用碳素结构钢                           | 61 |
| 六、碳素工具钢                             | 63 |
| 第七章 热处理原理                           | 66 |
| 第一节 概述                              | 66 |
| 第二节 钢在加热时的组织转变                      | 67 |
| 一、共析钢的奥氏体化过程                        | 67 |
| 二、非共析钢的奥氏体化过程                       | 68 |
| 三、奥氏体晶粒长大及其影响因素                     | 69 |
| 第三节 钢在冷却时的组织转变                      | 69 |
| 一、奥氏体等温冷却转变曲线                       | 70 |
| 二、奥氏体连续冷却转变曲线                       | 76 |
| 第四节 淬火钢在回火时的组织转变                    | 77 |
| 一、淬火钢在回火过程中的组织转变                    | 77 |
| 二、回火脆性                              | 79 |
| 三、非马氏体组织的回火                         | 79 |
| 第八章 热处理工艺                           | 81 |
| 第一节 钢的退火和正火                         | 81 |
| 一、退火                                | 81 |
| 二、正火                                | 83 |
| 第二节 钢的淬火                            | 83 |
| 一、加热环节                              | 83 |
| 二、冷却环节                              | 84 |
| 三、淬火缺陷                              | 86 |
| 第三节 淬火钢的回火                          | 88 |
| 第四节 钢的表面热处理                         | 88 |
| 一、表面淬火                              | 88 |
| 二、表面化学热处理                           | 89 |
| 第五节 热处理新技术                          | 93 |
| 第九章 合金钢的分类与用途                       | 94 |
| 第一节 合金元素在钢中的作用                      | 94 |
| 一、合金元素在钢中的存在形式                      | 94 |
| 二、合金元素对 Fe—Fe <sub>3</sub> C 状态图的影响 | 95 |



|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 三、合金元素对钢的热处理的影响.....              | 96         |
| 第二节 合金钢的分类及编号.....                | 97         |
| 第三节 各类合金结构钢的基本特点及在船舶动力装置中的应用..... | 97         |
| 一、低合金结构钢.....                     | 97         |
| 二、合金渗碳钢.....                      | 98         |
| 三、弹簧钢.....                        | 99         |
| 四、合金调质钢.....                      | 100        |
| 五、滚珠轴承钢.....                      | 104        |
| 第四节 合金工具钢.....                    | 105        |
| 一、低合金工具钢.....                     | 105        |
| 二、高速钢.....                        | 105        |
| 三、硬质合金.....                       | 107        |
| 第五节 特殊钢.....                      | 107        |
| 一、不锈钢.....                        | 107        |
| 二、耐热钢.....                        | 108        |
| <b>第十章 铸铁.....</b>                | <b>110</b> |
| 第一节 铸铁的特点及分类.....                 | 110        |
| 第二节 铸铁中的石墨及石墨化.....               | 110        |
| 一、石墨.....                         | 110        |
| 二、铸铁中的石墨化.....                    | 111        |
| 第三节 灰口铸铁.....                     | 113        |
| 一、灰口铸铁的成分、组织和性能.....              | 113        |
| 二、灰口铸铁的孕育处理.....                  | 115        |
| 三、灰口铸铁的热处理.....                   | 115        |
| 四、灰口铸铁的牌号及其在船机零件上的应用.....         | 116        |
| 第四节 可锻铸铁.....                     | 116        |
| 一、可锻铸铁的生产及其组织.....                | 117        |
| 二、可锻铸铁的牌号、性能及用途.....              | 118        |
| 第五节 球墨铸铁.....                     | 118        |
| 一、球墨铸铁的生产.....                    | 119        |
| 二、球墨铸铁的组织、性能和用途.....              | 119        |
| 三、球墨铸铁的热处理.....                   | 121        |
| 第六节 特殊铸铁.....                     | 121        |
| 一、耐磨铸铁.....                       | 122        |
| 二、耐热铸铁.....                       | 122        |
| 三、耐蚀铸铁.....                       | 122        |
| <b>第十一章 铜及其合金.....</b>            | <b>124</b> |
| 第一节 紫铜.....                       | 124        |
| 一、紫铜的一般特性.....                    | 124        |
| 二、紫铜的用途.....                      | 124        |

|      |                        |     |
|------|------------------------|-----|
| 第二节  | 黄铜                     | 125 |
| 一、   | 普通黄铜                   | 125 |
| 二、   | 特殊黄铜                   | 127 |
| 第三节  | 青铜                     | 128 |
| 一、   | 锡青铜                    | 128 |
| 二、   | 无锡青铜                   | 130 |
| 第四节  | 白铜                     | 130 |
| 第五节  | 铜合金的热处理特点              | 131 |
| 第十二章 | 铝及其合金、钛及其合金            | 132 |
| 第一节  | 铝及其合金                  | 132 |
| 一、   | 工业纯铝                   | 132 |
| 二、   | 铝合金                    | 132 |
| 第二节  | 钛及其合金                  | 136 |
| 一、   | 钛及其合金的特点               | 136 |
| 二、   | 钛合金的应用                 | 138 |
| 第十三章 | 轴承合金                   | 139 |
| 第一节  | 滑动轴承的工作条件及其对材料的组织和性能要求 | 139 |
| 第二节  | 巴氏合金                   | 141 |
| 一、   | 锡基巴氏合金                 | 141 |
| 二、   | 铅基巴氏合金                 | 142 |
| 第三节  | 铜基轴承合金——铜铅合金           | 143 |
| 第四节  | 铝基轴承合金——高锡铝合金          | 144 |
| 第十四章 | 船用柴油机主要零件的材料及热处理       | 146 |
| 第一节  | 曲轴                     | 146 |
| 一、   | 曲轴的工作条件                | 146 |
| 二、   | 曲轴材料的技术要求              | 146 |
| 三、   | 曲轴的热处理及其表面强化           | 146 |
| 四、   | 球墨铸铁曲轴                 | 147 |
| 第二节  | 连杆                     | 147 |
| 一、   | 连杆的受力情况                | 147 |
| 二、   | 连杆材料及热处理               | 148 |
| 第三节  | 活塞销                    | 148 |
| 一、   | 活塞销的技术要求               | 148 |
| 二、   | 渗碳活塞销                  | 149 |
| 第四节  | 凸轮及凸轮轴                 | 149 |
| 一、   | 凸轮及凸轮轴的工作条件            | 149 |
| 二、   | 凸轮及凸轮轴材料的技术要求          | 149 |
| 三、   | 凸轮及凸轮轴的热处理             | 149 |
| 第五节  | 重要螺栓                   | 150 |
| 一、   | 重要螺栓的技术条件              | 150 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 二、重要螺栓的热处理                 | 150 |
| 第六节 活塞                     | 151 |
| 一、活塞的工作条件                  | 151 |
| 二、活塞材料的技术要求                | 151 |
| 三、活塞材料                     | 151 |
| 第七节 活塞环                    | 152 |
| 一、活塞环的工作条件                 | 152 |
| 二、活塞环材料的技术要求               | 152 |
| 三、活塞环的材料                   | 152 |
| 四、活塞环的金相组织                 | 152 |
| 五、活塞环的硬度                   | 153 |
| 六、活塞环的表面强化                 | 153 |
| 第八节 气缸套                    | 153 |
| 一、气缸套的工作条件                 | 153 |
| 二、气缸套材料的技术要求               | 153 |
| 三、气缸套材料                    | 154 |
| 第九节 气阀                     | 155 |
| 一、气阀的工作条件                  | 155 |
| 二、气阀材料的技术要求                | 155 |
| 三、气阀的材料                    | 155 |
| 四、气阀的表面强化                  | 157 |
| 第十五章 船机零件某些失效形式的分析         | 158 |
| 第一节 金属的宏观断口分析              | 158 |
| 一、韧性断裂和脆性断裂                | 158 |
| 二、疲劳断裂                     | 161 |
| 第二节 拉缸分析及防止措施              | 163 |
| 第三节 穴蚀分析及防止措施              | 164 |
| 一、穴蚀分析                     | 164 |
| 二、防止穴蚀的措施                  | 165 |
| 第四节 零件的蠕变失效                | 166 |
| 第五节 轴承的损坏形式及原因             | 166 |
| 一、疲劳                       | 167 |
| 二、磨损                       | 168 |
| 三、腐蚀                       | 168 |
| 四、穴蚀                       | 169 |
| 附录 I 国产船用柴油机主要易损零件材料与热处理要求 | 170 |
| 附录 II 我国与外国某些钢号对照表         | 175 |
| 附录 III 我国与国外有色金属牌号对照表      | 186 |
| 附录 IV 中、外轮机员金属材料试题选录       | 189 |

# 第一章 金属材料的性能指标

## 第一节 机件失效的主要形式及其与选材的关系

由于金属的性能能满足机器零件的使用要求，因而现代各种机件大多以金属制造。随着科学技术的发展，金属材料的性能也在日益提高。即使如此，金属零件的使用寿命还是有限的，且因承受载荷和所处温度及腐蚀环境的不同，其失效形式也将各异，表 1-1 例举了几种零件的主要损坏形式。

零件的主要损坏形式举例

表1-1

| 零件名称 |           | 主要损坏形式                           |
|------|-----------|----------------------------------|
| 柴油机  | 曲轴        | 轴颈磨损、疲劳断裂                        |
|      | 连杆        | 疲劳断裂                             |
|      | 连杆螺栓      | 塑性断裂                             |
|      | 气缸套       | 磨损、擦伤、裂纹、穴蚀                      |
|      | 活塞环       | 磨损、擦伤、折断                         |
| 汽轮机  | 排气阀       | 烧损（出现麻点、局部过热、熔化）、疲劳碎裂、磨损拉伤、卡死和断裂 |
|      | 轴瓦        | 磨损、腐蚀、穴蚀、疲劳                      |
| 通用机器 | 叶轮        | 变形、轴向键槽处开裂                       |
|      | 叶片        | 疲劳断裂、应力腐蚀、腐蚀疲劳                   |
|      | 汽缸        | 开裂                               |
|      | 汽缸法兰的联接螺栓 | 脆性断裂                             |
| 通用机器 | 传动齿轮      | 齿面接触疲劳（麻点）、磨损、断齿                 |
|      | 轴类        | 磨损、疲劳断裂                          |
|      | 滚动轴承      | 磨损、接触疲劳                          |
| 通用机器 | 弹簧        | 产生塑性变形、疲劳断裂                      |

很多零件的正常失效是磨损超限。例如柴油机气缸套与活塞环由于磨损超限，引起功率不足，耗油增加；轴与轴瓦在长期运转中，装配间隙逐渐扩大，润滑油膜破裂，导致机器振动加剧，由此引起剧烈磨损，使机器失去正常的工作性能。影响摩擦零件使用寿命的因素很多，外部条件如零件表面加工质量、润滑、相对运动的速度、温度和介质情况等，而内因则更不可忽视，它往往直接与材料的耐磨性有关，而材料的耐磨性又由材料的成分、组织和适当的热处理所决定。

在柴油机的毁损事故中，以曲轴的断裂最为严重。从表 1-1 可见机件的断裂事故中，疲劳断裂又居多数，约占断裂事故的 80~90%。发生疲劳断裂的零件，有两个共同特点：

1. 都承受交变或重复载荷的作用；

2. 断口都分成三个区域：疲劳核心区——疲劳源；疲劳裂纹扩展区——疲劳弧线；瞬时断裂区——呈脆性特征（图 1-1）。金属材料抵抗疲劳断裂的能力，除与零件的形状、表面光洁度和介质情况等有关外，更主要与材料本身的强度、塑性、显微组织以及冶金质量等有关。

除疲劳断裂以外，还有脆性断裂和塑性断裂等。后面将要提到的根据材料塑性与韧性的不同可分成脆性材料和塑性材料。脆性材料固然会产生脆性断裂，但并非塑性材料都只发生塑性断裂，它在某种情况下产生的是塑性断裂，而在另一种情况下却发生脆性断裂。以螺栓为例，它一般使用钢材制造，也就是用塑性材料制造，在生产实践中却发现既有塑性断裂，也有脆性断裂。

所谓脆性断裂，乃是在断裂前不产生明显的宏观塑性变形；而塑性断裂，在断裂时则有明显的塑性变形。脆性和塑性并不是金属的固定性质，对同一种材料而言，影响其断裂性质的因素很多，如温度、加载速度、缺口形状和大小以及材料处理情况等，这将在后面进一步加以探讨。



图1-1 疲劳断口的一般特征

有些零件在使用过程中受介质的腐蚀作用而遭到腐蚀破坏。如图1-2所示，为一柴油机缸套因用海水冷却，不断受到海水中氯离子作用而产生的腐蚀情况。从图中看出，尤以进水口处更为严重，呈蜂窝状。

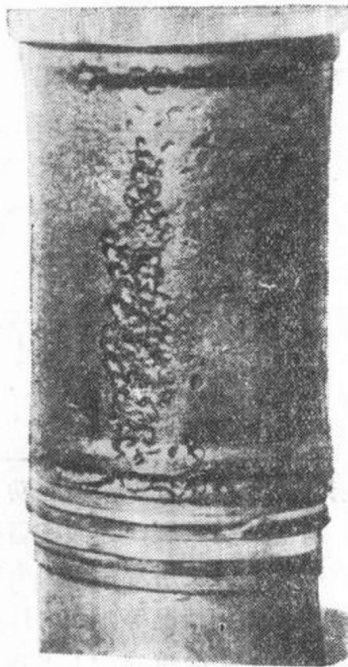


图1-2 缸套的腐蚀

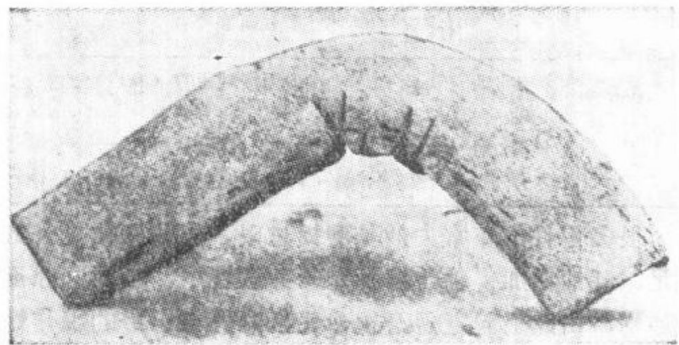


图1-3 应力腐蚀情况

有些零件是在拉应力和腐蚀介质的共同作用下发生的破坏，称应力腐蚀。图1-3所示为一船用锅炉使用40年后发现的应力腐蚀情况。也有些零件是在交变应力和腐蚀介质的共同作用下发生了破坏，称腐蚀疲劳。例如汽轮机叶片就常被毁损于此种情况。

柴油机中的精密偶件要求很高，即使在工作中产生微小的变形，都将直接影响它的功能，这就是说零件的变形也是它失效的一种形式。

对失效零件的观察分析方法或笼统的说研究金属材料的方法有二：

一是宏观断口分析。所谓宏观断口分析，就是只用肉眼或借助于放大镜（1~20倍）对

断口进行观察。用这种方法虽然辨别不了断口的细节，但可以观察到它的全貌，此法简单易行，特别适合于现场分析，至今已有四百余年的历史了。

二是微观形态分析。此法是借助于各种仪器或设备（如光学显微镜、透射电镜、扫描电镜、X 衍射仪等）来观察金属材料内部的显微组织，从而找出零件失效的原因。

综上所述，零件失效形式是多种多样的。要提高零件的使用寿命，就必须提高零件的耐磨、耐蚀、耐热、耐疲劳以及其他的承载性能等。而提高这些性能，首先就要从材料本身的成分和内部组织着眼，去认识其成分、组织与性能间相互关系的规律，以达到正确选材和寻求新的金属材料及其强化工艺的目的。

## 第二节 金属材料的机械性能

机器零件在使用过程中承受着各种不同的载荷，如静载荷、交变载荷与冲击载荷等。与所受的载荷相对应，零件内部可产生拉应力、压应力、弯曲应力、剪切应力和扭转应力等。

而零件的应力状态往往不是单一类型的，而是同时出现多种应力，表 1-2 列举了几种零件的应力状态。设计和制造机器零件时，必须依据零件的受力情况和周围环境（温度、腐蚀介质等），参照该零件可能损坏的形式，才能比较正确的选材。但大多数的机械是在常温、大气中工作的，在选择这类机械零件的材料时，只需以它们的机械性能为主要依据即可。

所谓金属材料的机械性能，是指金属材料抵抗外力作用的能力，或称力学性能。下面分别阐述在不同载荷作用下金属的几种指标。

几种零件的应力状态 表1-2

| 零件名称   |                     | 应力状态                                   |
|--------|---------------------|--|
| 柴油机    | 曲轴<br>连杆<br>活塞销     | 交变弯曲应力、扭转应力<br>交变拉压应力、纵向弯曲应力<br>交变弯曲应力 |
| 机器联接的件 | 螺栓<br>销钉<br>铆钉<br>键 | 剪切应力                                   |
| 车床     | 主轴<br>齿轮            | 交变弯曲应力、扭转应力<br>交变弯曲应力、交变接触压应力          |

### 一、静载荷作用下测定的指标

所谓静载荷是指作用于零件上的载荷从零开始逐渐增加到某一数值后便保持恒定，且加载平缓。在静载荷作用下测定的主要指标有：

1. 强度：指金属材料抵抗产生塑性变形和断裂的能力。衡量金属强度的指标常用以下三种：

1) 屈服极限：是材料抵抗微量塑性变形的抗力指标，用  $\sigma_s$  表示。当材料所受的力超过弹性极限到达某一值后，虽然外力不再增加而塑性变形继续发生，这种现象一般称之为屈服。屈服阶段内的最低应力，就叫屈服极限。

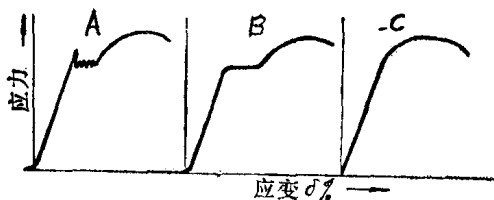


图1-4 三种不同的应力—应变曲线示意图

各类钢材的应力—应变曲线可归纳为如图 1-4 所示的三种典型曲线。A、B 两种情况说明它们都有明显的屈服现象，而对于 C 这类无明显屈服现象的材料，为便于比较起见，通常以产生 0.2% 的塑性变形时所需的应力值作为屈服极限。但又要与真正的屈服极限有所区别，故称它为名义屈服极限，用  $\sigma_{0.2}$  表示。机

械中的零件一旦发生塑性变形，就会影响机器的正常工作，所以大多数零件都以在工作中不产生塑性变形为原则作为设计计算时的主要依据，它是工程技术中最重要的机械性能指标。 $\sigma_s$ 的单位  $\text{kgf/mm}^2$ ①。

2)强度极限：指金属材料抵抗断裂的能力。也就是指材料从开始受力到断裂为止所能承受的最大应力值，称强度极限或抗拉强度或拉伸强度，用  $\sigma_b$  表示，单位同  $\sigma_s$ 。

$\sigma_b$  是材料最明显的强度特征，也容易测定，且常用它和  $\sigma_s$  比较来衡量材料的安全储备，是最基本的强度值。

3)抗弯强度：是材料经过抗弯试验后得到的。对于塑性很好的材料来说，如用于船体、锅炉、建筑或其它金属结构用的普通低碳钢或低碳低合金钢，以及用这些钢种制成的板、管、型钢和线材等，虽然对强度有一定的要求，但由于在建造施工过程中，需要对它们进行大量的弯曲、冲压和扭转等冷变形加工，因此对材料的表面质量和塑性要求较高。象这一类材料的弯曲试验，主要是比较它们在一定弯曲条件下的塑性变形性能，所以通常把这类材料的弯曲试验看做是工艺性能试验，常称之为冷弯试验。图 1-5a) 为塑性材料弯曲试验示意图。

对于脆性材料例如铸铁等，需要通过弯曲试验(图 1-5b)测出它们的抗弯强度。由材料力学已知弯曲应力是由拉、压两部分组成的，其中拉应力的大小决定铸铁的工作可靠性。铸铁的抗拉强度较低，不宜制作承拉零件，而在实际工作中往往要承受弯曲力矩，因此，除抗拉强度外，抗弯强度便成为灰铸铁机械性能的重要衡量指标，用  $\sigma_{bb}$  表示，单位  $\text{kgf/mm}^2$ 。

灰铸铁抗弯强度值也可按下式计算：

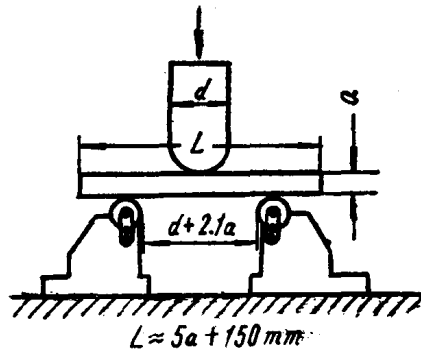
$$\sigma_{bb} = K \cdot p$$

式中：  $p$  —— 试样断裂时的载荷；

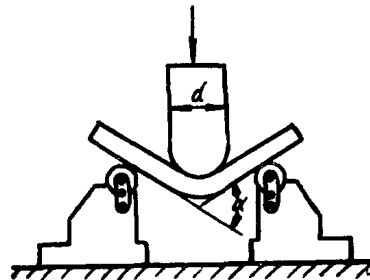
$$K \text{—— 灰铸铁抗弯试样系数, } K = \frac{8l}{\pi d^3},$$

$K$  也可查表；

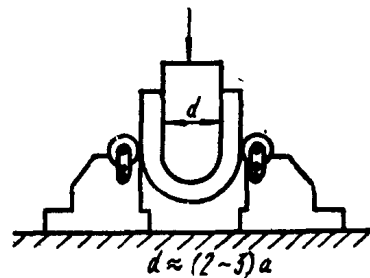
①  $1\text{kgf/mm}^2 = 980.665\text{Pa}$



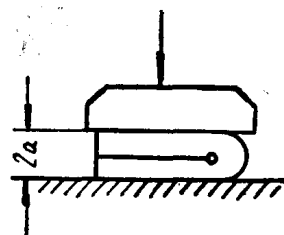
1) 弯曲试验装置示意图



2) 试样弯至规定角度  $\alpha$  后，检查其外表面是否完好



3) 试样弯至两端平行后(弯曲  $180^\circ$ )，检查其外表面是否完好



1) 进一步压弯至两面接触重合，检查其外表面是否完好

a)



b)

图 1-5 金属材料弯曲试验示意图  
a) 塑性材料； b) 脆性材料

$l$ ——试样长度；

$d$ ——试样直径。

2. 塑性：指在外力作用下金属材料产生塑性变形而不破坏的能力。常用的塑性指标有：

1) 延伸率：用  $\delta$  表示：

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\%$$

式中： $l$ ——试样原始长度；

$l_1$ ——试样拉断后的长度。

由于  $\delta$  值与试样尺寸有关，为了便于比较，常注明  $\delta_5$  或  $\delta_{10}$ ，分别表示试样的计算长度为其直径的 5 倍或 10 倍时的延伸率。

2) 断面收缩率：用  $\psi$  表示：

$$\psi = \frac{F - F_1}{F} \times 100\%$$

式中： $F$ ——试样原始断面积；

$F_1$ ——试样拉断后的最小断面积。

$\psi$  与试验尺寸无关，它能准确而灵敏地反映金属材料的塑性。

工程上常按延伸率大小把材料分成两大类，即  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料，如钢、铝和铜等； $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料，如铸铁等。

3. 硬度：指金属材料的表面抵抗另一物体压陷、划痕、摩擦或切削等的抗力。硬度不是一个单纯的物理量或力学量，而是代表弹性、塑性、强度、韧性等一系列不同物理量的一个综合性指标。

金属材料的硬度测定是比较简单的，并且基本上又属无损检验，所以目前无论是在工厂企业，还是科研部门应用极为普遍。

常用的硬度测定法都是用一定的载荷把一定形状的压头压在金属表面上，然后测定压痕的面积或深度来确定硬度值。凡压痕越大或越深者，说明硬度越低。根据测量用的压头和压力的不同，可获得不同的硬度指标。常用硬度指标有以下三种：

1) 布氏硬度：用 HB 表示。布氏硬度的测定如图 1-6 所示。这种方法的特点是利用钢球压痕的球面积：

$$F = \pi D h = \frac{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$

去除外加载荷  $p$ ，便可得到：

$$HB = \frac{p}{F} = \frac{2p}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中： $D$ ——钢球直径；

$d$ ——压痕直径。

布氏强度值 HB 的实际使用上限为 450，超过 450，钢球不能胜任。故此法最适宜于测定普通碳钢、普通低合金结构钢、调质钢、铸铁及有色金属材料等的硬度。

2) 洛氏硬度：用 HRA、HRB、HRC 或 RA、RB、RC 表示。它的测定如图 1-7 所示，其特点是测定压痕深度。由于压痕较小，对已加工完的工件表面也可进行试验。采用不同的试验条件可以测定从极软到极硬的材料的硬度。为区别起见，分别以 HRA、HRB 和 HRC 表示

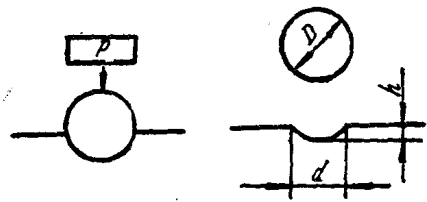


图 1-6 布氏硬度的测定示意图



之。即当应用 $120^\circ$ 角的圆锥形金刚石压头和在 $60\text{kgf}$ 、 $150\text{kgf}$ ① 载荷下所测得的硬度时，分别用HRA、HRC表示；当用 $\phi 1.58\text{mm}$ 钢球和 $100\text{kgf}$  载荷下所测得的硬度时，用HRB表示。HRA用于测极硬材料，HRB用于测软金属，HRC常用于淬火钢及其它较硬材料。

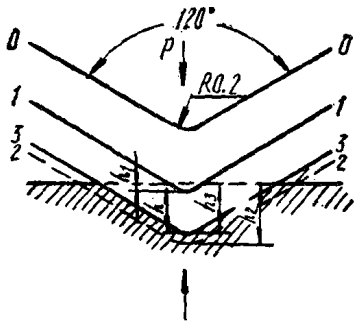


图1-7 洛氏硬度的测定示意图

0-0压头没有和试样接触；1-1初载荷作用下，压头与试样接触；2-2主载荷作用下，压头压入试样位置；3-3去除主载荷，因弹性变形而提高的位置

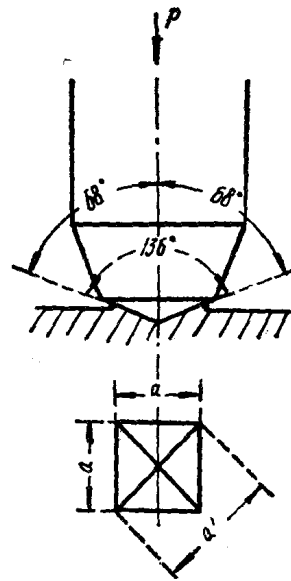


图1-8 维氏硬度的测定示意图

洛氏硬度试验法的缺点是：由于压痕小，使得材料的成分和组织存在不均匀时，可能产生误差。

3) 维氏硬度：用HV表示。采用布氏硬度试验法，但换用四棱锥体的金刚石作压头，如图1-8所示。此法具有一个从最软到极硬的统一硬度标准，是一种较精确的试验方法，可以测量极薄、极小的试样。

这种方法还可用 $200\text{gf}$ ② 以下的载荷来测定材料显微组织中各个组成物的硬度，即显微硬度（如果载荷为 $100\text{gf}$ ，则标注为 $\text{HV}_{0.1}$ ）。

## 二、动载荷作用下测定的指标

所谓动载荷是指载荷明显地随时间而改变的一种载荷，如柴油机连杆在工作中便受到动载荷的作用。动载荷又可分为冲击载荷与交变载荷，冲击载荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的载荷；交变载荷是随时间作周期性变化的载荷。

1. 冲击韧性：工程上对各种金属材料抵抗冲击载荷的能力，是以冲断具有缺口的标准试样所需要的能量为衡量标准的。若冲断标准试样所需能量为 $A_k$ ，试块在缺口处的最小截面积为 $F$ ，则：

$$a_k = \frac{A_k}{F}$$

$a_k$ 便称为冲击韧性，单位 $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ ③。在这里应当强调几点：

1) 不同缺口形状和深度的试样的冲击试验结果，不能彼此比较，也不能互相换算。

2) 按照 $a_k = \frac{A_k}{F}$ ，冲击韧性即“单位面积上所消耗的功”，这是一种传统的表示方法。

①  $1\text{kgf} = 9.80665\text{N}$ 。

②  $1\text{gf} = 0.00980665\text{N}$ 。

③  $1\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2 = 1\text{Nm}/\text{cm}^2$ 。