



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

# 金属材料学

主 编 曹鹏军

副主编 马毅龙 陈 刚 孙建春



冶金工业出版社  
[www.cnmip.com.cn](http://www.cnmip.com.cn)



普通高等教育“十三五”规划教材

# 金属材料学

主 编 曹鹏军

副主编 马毅龙 陈 刚 孙建春



北 京  
冶金工业出版社  
2018

## 内 容 提 要

本书分为钢铁材料、有色金属材料和新型金属材料三大部分。钢铁材料部分主要介绍了钢的合金化原理、工程构件用钢、机器零件用钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、铸铁；有色金属材料部分主要介绍了铝合金、铜合金、镁合金和钛合金；新型金属材料部分主要介绍了磁性材料、电阻合金、形状记忆合金等功能材料。通过对本书的学习，学生可掌握常用金属材料的化学成分、加工工艺、组织结构和力学性能之间的关系，为以后从事金属材料的研发、生产和应用打下基础。

本书可作为金属材料工程等材料类专业本科学生的教材，也可供从事材料、热加工、机械等相关专业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属材料学/曹鹏军主编，—北京：冶金工业出版社，2018.11

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7900-8

I. ①金… II. ①曹… III. ①金属材料—高等学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 249495 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjchs@cnmp. com. cn

责任编辑 高 娜 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 禹 蕊

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7900-8

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；固安华明印业有限公司印刷

2018 年 11 月第 1 版，2018 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；17.75 印张；426 千字；270 页

45.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

# 前 言

“金属材料学”是金属材料工程专业的一门重要专业教育核心课程。学习本课程前应修完材料科学基础、材料力学性能、热处理原理与工艺等课程。“金属材料学”是研究金属材料的成分、组织结构、加工工艺与性能之间关系的一门科学技术，它对生产、应用和开发新型金属材料起着重要的指导作用。

按照普通高等教育“十三五”规划教材的出版要求，根据多年的教学经验和体会，在参考国内外相关教材和资料的基础上，结合培养应用型、创新型人才的需要，我们编写了本书。本书较为系统地介绍了钢的合金化原理，以及工程构件用钢、机器零件用钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、铸铁，有色金属及其合金和新型金属材料的成分、组织、热处理工艺、性能和用途等。

通过本课程的学习，学生可初步掌握金属材料的合金化原理，金属材料的化学成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系及其变化规律；掌握常用碳钢、合金钢、铸铁，有色金属合金的牌号、成分、热处理工艺、组织、性能和用途，能够根据工件的具体服役条件和使用性能要求，合理地进行选材和制定热处理工艺，初步具备新型金属材料研究开发的能力。

本书共9章，由重庆科技学院冶金与材料工程学院曹鹏军教授担任主编，并负责统稿，学院有关教师参编。第1~3章由曹鹏军教授编写，第4章由周安若副教授编写，第5章由孙建春副教授编写，第6章由仵海东副教授编写，第7章由范培耕副教授编写，第8章由陈刚副教授编写，第9章由马毅龙副教授编写，研究生武伟同学参与全书文字整理工作。

本书在编写过程中，得到了重庆科技学院冶金与材料工程学院、冶金工业出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。另外，本书的编写还参考了国内外相关教材和资料，编者向其作者和出版社一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，经验不足，书中难免存在不足之处，敬请同行和广大读者批评指正。

编 者  
2018 年 4 月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1 钢的合金化原理 .....                   | 1  |
| 1.1 钢中的合金元素 .....                 | 1  |
| 1.1.1 概述 .....                    | 1  |
| 1.1.2 钢的分类和编号 .....               | 2  |
| 1.1.3 合金元素在钢中的作用 .....            | 6  |
| 1.2 合金元素对铁碳相图及钢热处理的影响 .....       | 15 |
| 1.2.1 合金元素对铁碳相图的影响 .....          | 15 |
| 1.2.2 合金元素对钢热处理的影响 .....          | 17 |
| 1.3 合金元素对钢性能的影响 .....             | 22 |
| 1.3.1 合金元素与钢的强韧化 .....            | 22 |
| 1.3.2 合金元素对钢不同热处理状态下力学性能的影响 ..... | 29 |
| 1.3.3 合金元素对钢工艺性能的影响 .....         | 38 |
| 1.4 微量元素及钢的微合金化 .....             | 46 |
| 1.4.1 钢中的微量元素及其作用 .....           | 46 |
| 1.4.2 钢的微合金化 .....                | 47 |
| 习题 .....                          | 50 |
| 2 工程构件用钢 .....                    | 52 |
| 2.1 工程构件用钢的基本要求 .....             | 52 |
| 2.1.1 足够的强度与韧度 .....              | 52 |
| 2.1.2 良好的焊接性和成型工艺性 .....          | 52 |
| 2.1.3 良好的耐腐蚀性 .....               | 53 |
| 2.2 工程构件用钢的合金化 .....              | 53 |
| 2.2.1 合金元素对钢力学性能的影响 .....         | 53 |
| 2.2.2 合金元素对钢焊接性能的影响 .....         | 56 |
| 2.2.3 合金元素对钢耐大气腐蚀性能的影响 .....      | 56 |
| 2.3 铁素体-珠光体钢 .....                | 57 |
| 2.3.1 碳素工程结构钢 .....               | 57 |
| 2.3.2 低合金高强度结构钢 .....             | 59 |
| 2.4 低碳贝氏体钢、针状铁素体钢及低碳马氏体钢 .....    | 64 |
| 2.4.1 低碳贝氏体钢 .....                | 64 |
| 2.4.2 针状铁素体钢 .....                | 65 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 2.4.3 低碳马氏体钢 .....           | 66        |
| 2.5 双相钢 .....                | 66        |
| 习题 .....                     | 68        |
| <b>3 机器零件用钢 .....</b>        | <b>70</b> |
| 3.1 概述 .....                 | 70        |
| 3.1.1 力学性能要求 .....           | 70        |
| 3.1.2 工艺性能要求 .....           | 71        |
| 3.2 渗碳钢 .....                | 71        |
| 3.2.1 渗碳钢的工作条件及性能要求 .....    | 71        |
| 3.2.2 渗碳钢的成分 .....           | 72        |
| 3.2.3 常用渗碳钢 .....            | 73        |
| 3.2.4 渗碳钢的热处理 .....          | 76        |
| 3.3 调质钢 .....                | 78        |
| 3.3.1 调质钢的工作条件及性能要求 .....    | 78        |
| 3.3.2 调质钢的组织及成分特点 .....      | 79        |
| 3.3.3 常用调质钢 .....            | 79        |
| 3.3.4 调质钢的热处理 .....          | 83        |
| 3.4 弹簧钢 .....                | 85        |
| 3.4.1 弹簧钢的工作条件及性能要求 .....    | 86        |
| 3.4.2 弹簧钢的成分 .....           | 86        |
| 3.4.3 常用弹簧钢 .....            | 87        |
| 3.4.4 弹簧钢的热处理 .....          | 87        |
| 3.5 轴承钢 .....                | 90        |
| 3.5.1 轴承钢的工作条件及性能要求 .....    | 90        |
| 3.5.2 轴承钢的成分特点 .....         | 91        |
| 3.5.3 常用的轴承钢 .....           | 91        |
| 3.5.4 轴承钢的热处理 .....          | 93        |
| 3.6 马氏体型结构钢 .....            | 96        |
| 3.6.1 低碳马氏体型结构钢 .....        | 96        |
| 3.6.2 低合金中碳马氏体型超高强度结构钢 ..... | 101       |
| 3.6.3 马氏体时效钢 .....           | 103       |
| 3.7 特殊用途结构钢 .....            | 105       |
| 3.7.1 高锰钢 .....              | 105       |
| 3.7.2 易切削钢 .....             | 107       |
| 3.7.3 钢轨钢 .....              | 108       |
| 习题 .....                     | 109       |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 4 工具钢 .....                           | 110 |
| 4.1 刀具钢 .....                         | 111 |
| 4.1.1 刀具钢的工作条件及性能要求 .....             | 111 |
| 4.1.2 碳素工具钢 .....                     | 112 |
| 4.1.3 低合金工具钢 .....                    | 113 |
| 4.1.4 高速钢 .....                       | 115 |
| 4.2 模具钢 .....                         | 122 |
| 4.2.1 冷作模具钢 .....                     | 122 |
| 4.2.2 热作模具钢 .....                     | 125 |
| 4.2.3 塑料模具用钢 .....                    | 127 |
| 4.3 量具钢 .....                         | 128 |
| 4.3.1 常用量具用钢 .....                    | 128 |
| 4.3.2 量具钢的热处理 .....                   | 129 |
| 习题 .....                              | 129 |
| 5 不锈钢 .....                           | 131 |
| 5.1 概述 .....                          | 131 |
| 5.1.1 不锈钢的分类 .....                    | 131 |
| 5.1.2 不锈钢的牌号 .....                    | 132 |
| 5.1.3 金属腐蚀基本类型 .....                  | 132 |
| 5.1.4 不锈钢的性能要求 .....                  | 134 |
| 5.1.5 不锈钢的合金化原理 .....                 | 134 |
| 5.2 铁素体不锈钢 .....                      | 135 |
| 5.2.1 铁素体不锈钢特点 .....                  | 135 |
| 5.2.2 铁素体不锈钢的组织性能 .....               | 136 |
| 5.2.3 铁素体不锈钢的压力加工及热处理 .....           | 139 |
| 5.3 马氏体不锈钢 .....                      | 140 |
| 5.3.1 马氏体不锈钢的成分特点 .....               | 140 |
| 5.3.2 马氏体不锈钢的组织性能 .....               | 141 |
| 5.3.3 马氏体不锈钢的焊接 .....                 | 141 |
| 5.3.4 马氏体不锈钢分类 .....                  | 142 |
| 5.4 奥氏体不锈钢 .....                      | 143 |
| 5.4.1 奥氏体不锈钢的成分特点 .....               | 143 |
| 5.4.2 18-8 型奥氏体不锈钢的热处理特点 .....        | 143 |
| 5.4.3 Cr-Mn-N 及 Cr-Mn-Ni-N 型不锈钢 ..... | 144 |
| 5.4.4 奥氏体不锈钢的加工 .....                 | 145 |
| 5.4.5 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀、应力腐蚀及点腐蚀 .....      | 145 |
| 5.5 沉淀硬化不锈钢 .....                     | 147 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.5.1 奥氏体-马氏体型沉淀硬化不锈钢 .....    | 147 |
| 5.5.2 马氏体型沉淀硬化不锈钢 .....        | 148 |
| 5.6 超高强度不锈钢 .....              | 148 |
| 5.6.1 沉淀硬化高强度不锈钢 .....         | 149 |
| 5.6.2 时效不锈钢 .....              | 149 |
| 5.7 不锈钢应用实例 .....              | 151 |
| 5.7.1 不锈钢在医疗器械上的应用 .....       | 151 |
| 5.7.2 不锈钢在模具中的应用 .....         | 151 |
| 5.7.3 不锈钢在汽车工业中的应用 .....       | 152 |
| 5.7.4 高强度不锈钢在飞机上的应用 .....      | 153 |
| 习题 .....                       | 154 |
| 6 耐热钢及耐热合金 .....               | 155 |
| 6.1 耐热钢及耐热合金概述 .....           | 155 |
| 6.1.1 耐热钢及耐热合金的工作条件和性能要求 ..... | 155 |
| 6.1.2 钢的抗氧化性 .....             | 156 |
| 6.1.3 钢的热强性 .....              | 157 |
| 6.1.4 耐热钢的成分特点及合金化 .....       | 159 |
| 6.2 抗氧化钢 .....                 | 160 |
| 6.2.1 铁素体型抗氧化钢 .....           | 160 |
| 6.2.2 奥氏体型抗氧化钢 .....           | 161 |
| 6.3 热强钢 .....                  | 162 |
| 6.3.1 珠光体型热强钢 .....            | 162 |
| 6.3.2 马氏体热强钢 .....             | 164 |
| 6.3.3 奥氏体型热强钢 .....            | 166 |
| 6.4 镍基耐热合金 .....               | 169 |
| 6.4.1 固溶强化型镍基高温合金 .....        | 170 |
| 6.4.2 沉淀强化型镍基合金 .....          | 171 |
| 习题 .....                       | 172 |
| 7 铸铁 .....                     | 173 |
| 7.1 铸铁的石墨化过程及分类 .....          | 173 |
| 7.1.1 铸铁的石墨化过程 .....           | 173 |
| 7.1.2 铸铁的分类 .....              | 175 |
| 7.2 灰口铸铁 .....                 | 176 |
| 7.2.1 灰口铸铁的化学成分、组织和性能 .....    | 176 |
| 7.2.2 灰口铸铁的牌号和用途 .....         | 177 |
| 7.2.3 影响灰口铸铁组织与性能的因素 .....     | 177 |
| 7.2.4 灰口铸铁的孕育处理 .....          | 178 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 7.2.5 灰口铸铁的热处理 .....           | 179 |
| 7.3 球墨铸铁 .....                 | 179 |
| 7.3.1 球墨铸铁的化学成分、组织和性能 .....    | 179 |
| 7.3.2 球墨铸铁的牌号和用途 .....         | 180 |
| 7.3.3 球墨铸铁的热处理 .....           | 181 |
| 7.4 蠕墨铸铁 .....                 | 182 |
| 7.4.1 蠕墨铸铁的化学成分与金相组织 .....     | 182 |
| 7.4.2 蠕墨铸铁的牌号、性能与用途 .....      | 183 |
| 7.5 可锻铸铁 .....                 | 183 |
| 7.5.1 可锻铸铁的化学成分、组织及石墨化退火 ..... | 183 |
| 7.5.2 可锻铸铁的牌号、性能及用途 .....      | 184 |
| 7.6 特殊性能铸铁 .....               | 185 |
| 7.6.1 耐磨铸铁 .....               | 185 |
| 7.6.2 耐热铸铁 .....               | 186 |
| 7.6.3 耐蚀铸铁 .....               | 186 |
| 习题 .....                       | 186 |
| 8 有色金属及其合金 .....               | 188 |
| 8.1 铝及铝合金 .....                | 188 |
| 8.1.1 纯铝 .....                 | 188 |
| 8.1.2 铝合金的分类 .....             | 188 |
| 8.1.3 铝合金强化 .....              | 190 |
| 8.1.4 变形铝合金 .....              | 193 |
| 8.1.5 铸造铝合金 .....              | 197 |
| 8.2 镁及镁合金 .....                | 200 |
| 8.2.1 纯镁 .....                 | 200 |
| 8.2.2 镁合金 .....                | 201 |
| 8.3 铜及铜合金 .....                | 209 |
| 8.3.1 纯铜 .....                 | 209 |
| 8.3.2 黄铜 .....                 | 210 |
| 8.3.3 青铜 .....                 | 212 |
| 8.4 钛及钛合金 .....                | 213 |
| 8.4.1 纯钛 .....                 | 214 |
| 8.4.2 钛合金 .....                | 214 |
| 8.4.3 工业用钛合金 .....             | 215 |
| 8.4.4 钛合金的热处理 .....            | 217 |
| 习题 .....                       | 220 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 9 新型金属材料 .....        | 221 |
| 9.1 磁性材料 .....        | 221 |
| 9.1.1 软磁材料 .....      | 221 |
| 9.1.2 硬磁材料 .....      | 225 |
| 9.1.3 磁记录材料 .....     | 229 |
| 9.1.4 磁性纳米材料 .....    | 233 |
| 9.2 电阻合金 .....        | 235 |
| 9.2.1 精密电阻合金 .....    | 235 |
| 9.2.2 电热合金 .....      | 238 |
| 9.2.3 热电偶合金 .....     | 240 |
| 9.3 形状记忆材料 .....      | 242 |
| 9.3.1 形状记忆效应及机理 ..... | 243 |
| 9.3.2 形状记忆合金 .....    | 245 |
| 9.3.3 形状记忆陶瓷 .....    | 249 |
| 9.3.4 形状记忆聚合物 .....   | 250 |
| 9.3.5 形状记忆材料的应用 ..... | 253 |
| 9.4 其他功能材料 .....      | 256 |
| 9.4.1 热膨胀合金 .....     | 256 |
| 9.4.2 弹性合金 .....      | 261 |
| 9.4.3 减振合金 .....      | 266 |
| 习题 .....              | 269 |
| 参考文献 .....            | 270 |

# 1

## 钢的合金化原理

### 1.1 钢中的合金元素

#### 1.1.1 概述

合金元素是指为了获得所要求的组织结构、物理性能、化学性能和力学性能而特别添加到钢中的化学元素，所获得的钢称为合金钢。

碳素钢中加入合金元素可以改善钢的使用性能和工艺性能，使合金钢得到碳钢所不具备的优良性能或特殊性能。在使用性能方面，在低温下有较高韧性，在高温下有较高的硬度、持久强度以及抗氧化性，在酸、碱、盐介质中有良好的耐蚀性等。在工艺性能方面，可改善其淬透性、可焊性、抗回火稳定性、切削加工性等。这主要是由于各种合金元素的加入改变了钢的内部组织、结构。例如，合金元素与铁相互作用，改变了 $\alpha$ 固溶体和 $\gamma$ 固溶体的相对稳定性，使在高温时才稳定存在的奥氏体组织可在室温下成为稳定组织。

目前，钢中常用合金元素有第二周期中 B、N，第三周期中 Al、Si，第四周期中 Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu，第五周期中 Nb、Mo、Zr，第六周期中 W 以及稀土元素等。

一般当钢中合金元素总含量小于或等于 5% 时，称为低合金钢；合金元素总含量在 5%~10% 范围内，称为中合金钢；合金元素总含量超过 10% 称为高合金钢。

在冶炼时由于所用原材料以及冶炼方法和工艺操作等所带入钢中的化学元素，称为杂质。例如，硅、锰由脱氧剂带入；硫、磷由原料带入，并且在炼钢时除不净而被保留下来；钢液中不可避免地含有微量气体——氧气、氮气、氢气，这些元素在钢中有一定溶解度而保留下来。杂质元素存在往往会影响钢的性能，如硫使钢产生热脆现象，磷使钢产生冷脆现象，氢在钢中形成白点，导致钢的氢脆。这样，同一化学元素既可能作为杂质又可能作为合金元素，若属前者，则影响钢的质量；若属于后者，则改善钢的组织 and 性能。例如，硫因为在钢中形成硫化物夹杂，降低钢的韧性，特别是横向韧性以及抗层状撕裂性，所以希望其含量越低越好，但是在易切削钢中的硫含量高达 0.3%（质量分数），并适当提高锰含量以形成 MnS 夹杂而提高钢的切削性能；磷虽可恶化钢的冷脆性，但在易切削钢中（ $w(\text{P}) = 0.12\%$ ）可提高钢的切削性，在汽车钢板及奥氏体沉淀硬化不锈钢中，磷用来提高钢的强度；钴是高速钢、马氏体时效钢等超高强度钢中重要的合金元素，但在反应堆中的结构材料，如不锈钢中，则严格限制其含量（ $w(\text{Co}) < 0.1\%$ ），因放射性钴半衰期很长，不利于人身防护。

### 1.1.2 钢的分类和编号

#### 1.1.2.1 钢的分类

对钢进行分类是为了满足各方面的要求。按照不同的目的,分类原则是互不相同的。例如,按用途分类可满足使用者的要求,按金相组织和化学成分分类可便于检验和研究工作,按冶金方法分类有利于钢铁企业的管理等。当然,各种分类方法之间是有重复的。

目前,国际上比较通用的分类方法有两种:(1)按化学成分分类(GB/T 13304.1—2008、ISO4948-1);(2)按主要质量等级和主要性能或使用特性分类(GB/T 13304.2—2008、ISO4948-2)。

#### A 按用途分类

(1) 结构钢。结构钢主要用于承受负荷的结构件,根据其使用的地点场合又可分为以下两类:

1) 工程构件用钢。工程构件用钢用于建筑、桥梁、钢轨、车辆、船舶、电站、石油、化工等大型钢结构件或容器,其体积较大,一般需要进行焊接,通常不进行热处理。但对于特殊要求的结构钢,一般是在钢厂内进行正火或调质热处理。一些要求可靠性高的焊接构件,焊后在现场进行整体或局部去应力退火。这类钢材很大一部分是以钢板和各类型钢供货,其使用量很大,多采用碳素结构钢、低合金高强度钢和微合金钢。

2) 机器零件用钢。机器零件用钢用于制造各种机器零件,如各种轴、盘、杆类零件,齿轮、轴承、弹簧等,这类钢材需经过机械加工或其他形式的加工后使用,一般要通过热处理进行强韧化以充分发挥钢材的潜力。需要指出的是,结构钢也有按其使用的部门行业来分类的,例如造船用钢、飞机用钢、汽车用钢、石油用钢、汽轮机用钢、农机用钢、矿用钢等。当然,这种分类反映了各个使用部门、行业对结构材料要求的特点,但同时也造成了钢种的重复分类;而且,过细的分类也不利于各个部门行业的交流与沟通,限制了某些性能优异钢种的推广和应用。

(2) 工具钢。按不同的使用目的和性质,工具钢又可分为刀具钢、量具钢、冷作模具钢、热作模具钢、耐冲击工具用钢等。

(3) 特殊性能钢。特殊性能钢是指除了要求力学性能之外,还要求具有其他一些特殊性能的钢,如不锈钢、耐酸钢、耐热钢(包括抗氧化钢和热强钢)、耐磨钢、低温用钢、无磁钢等。

#### B 按金相组织分类

(1) 按平衡组织分类。按平衡组织可以分为亚共析钢(铁素体+珠光体)、共析钢(珠光体)、过共析钢(珠光体+渗碳体)和莱氏体钢(珠光体+渗碳体)。

(2) 按正火组织分类。按正火组织可以分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢、奥氏体钢。但应注意,这种分类方法与钢材尺寸有关,因而是有条件的。通常是以小于25mm直径的圆钢,奥氏体化后在静止空气中冷却所得到的组织为准。这是因为正火空冷的冷却速

度随钢材尺寸的不同会改变。

(3) 按加热冷却时是否发生相变分类。按相变组织可以分为铁素体钢、奥氏体钢、半铁素体或半马氏体的复相钢。

C 按化学成分分类

(1) 碳素钢。碳素钢按碳含量又可分为低碳钢 ( $w(C) < 0.25\%$ )、中碳钢 ( $w(C) = 0.25\% \sim 0.60\%$ )、高碳钢 ( $w(C) > 0.6\%$ ) 和超高碳钢 ( $w(C) > 1.0\%$ ) 等。

(2) 合金钢。按合金元素含量可分为低合金钢 ( $w(Me) \leq 5\%$ )、高合金钢 ( $w(Me) > 10\%$ ) 和中合金钢 ( $w(Me) = 5\% \sim 10\%$ )；按主要合金元素的名称可分为铬钢、锰钢、铬镍钢、铬锰硅钢等。

(3) 按冶金质量分类。按冶金质量主要以杂质元素 S、P 的限制含量来划分，见表 1-1。

表 1-1 不同质量钢中杂质元素 S、P 的限制含量 (质量分数) (%)

| 种 类   | S (不大于) |       |       | P (不大于) |       |       |
|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
|       | 优质钢     | 高级优质钢 | 特技优质钢 | 优质钢     | 高级优质钢 | 特技优质钢 |
| 碳素结构钢 | 0.035   | 0.030 | 0.020 | 0.035   | 0.030 | 0.025 |
| 合金结构钢 | 0.035   | 0.025 | 0.015 | 0.035   | 0.025 | 0.025 |

需要说明的是，上述钢分类中有关碳含量或合金元素的含量界限并不是绝对的，根据实际应用会有适当的变化。例如，实际使用中由于各类中合金钢和高合金钢又包括特殊性能钢，如不锈钢、工具钢、耐热钢等，而合金钢中又可以以主要合金元素命名，如铬钢、铬镍钢、锰钢、硅锰钢等，因此，在诸多文献中将中合金钢和高合金钢统称为合金钢。此外，Ti、Zr、Nb、V、B、RE（稀土）等元素当其质量分数小于 0.1% 时，就能显著影响钢的组织 and 性能，因此，这类钢又被称为微合金化钢。

D 按冶炼方法分类

根据冶炼方法和设备的不同，钢材可以分为转炉钢、电炉钢（包括电弧炉钢、感应炉钢）、真空感应炉钢、电渣炉钢等，平炉炼钢已趋淘汰。

根据钢液的脱氧程度不同，碳素钢又分为沸腾钢、镇静钢、半镇静钢，合金钢一般都是镇静钢。

除了上述分类方法之外，还可按工艺特点分为铸钢、渗碳钢、易切削钢、调质钢等。这些分类方法在实际工作中都能遇到，而且经常是几种分类方法重叠使用。

另外，在讲到具体钢的牌号时，有时还要涉及钢的成型方法和外形。按成型方法可分为锻钢、铸钢、热轧钢和冷拉钢四大类，按外形可分为型材、板材、管材和金属制品四大类。

图 1-1 所示为钢按化学成分和显微组织的分类图，该图将按成分或用途进行的分类与按组织的分类对应起来。可见，成分和组织两种分类方法有一定的对应关系，如低碳钢对应于铁素体组织，耐磨钢对应于奥氏体组织，而不锈钢对应于铁素体 (F)、奥氏体 (A)、马氏体 (M)、双相 (A-F) 和沉淀硬化不锈钢等。

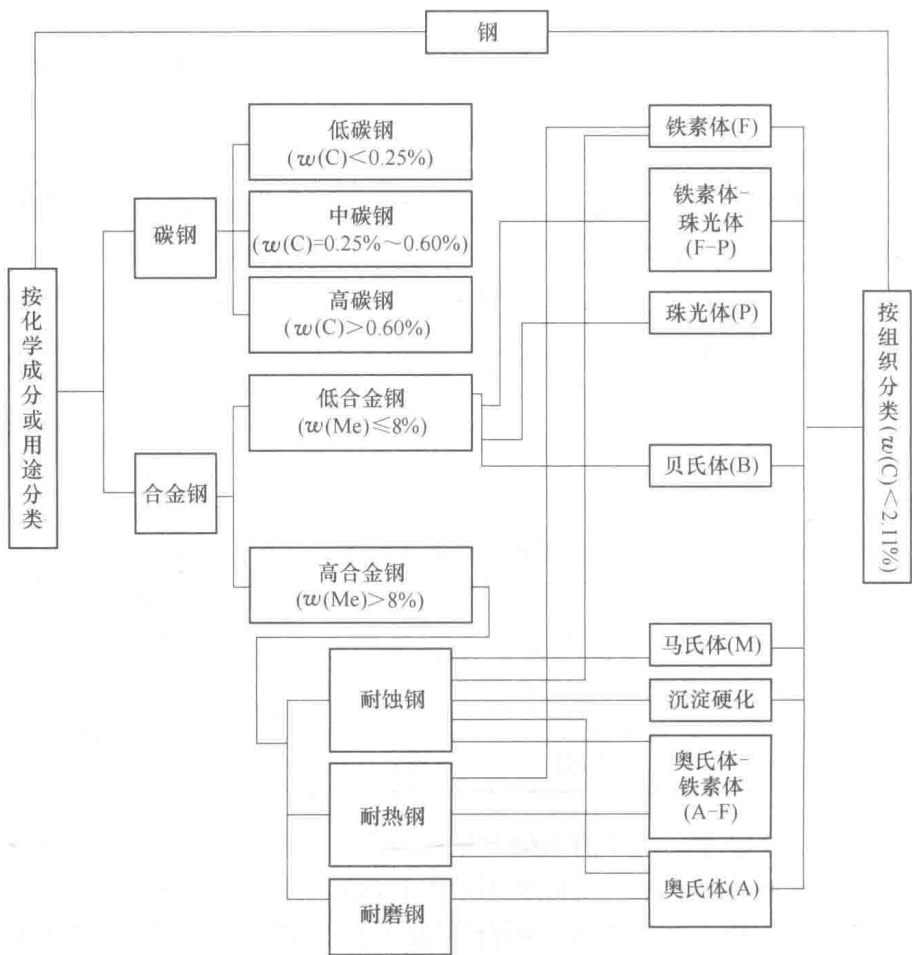


图 1-1 钢按化学成分和显微组织的分类图

1.1.2.2 钢的编号方法

我国现行的钢铁材料表示方法，是按国家标准（GB/T 221—2008）规定，采用数字、化学元素符号和作为代号的汉语拼音字母相结合的编排方法。钢铁产品的名称和表示符号见表 1-2。

表 1-2 钢铁产品的名称和表示符号

| 名 称     | 汉字 | 符号 | 名 称               | 汉字 | 符号 | 名 称    | 汉字 | 符号 |
|---------|----|----|-------------------|----|----|--------|----|----|
| 炼钢用生铁   | 炼  | L  | 电磁纯铁              | 电铁 | DT | 轧辊用铸钢  | 轧辊 | ZU |
| 铸造用生铁   | 铸  | Z  | 电工用冷轧取向<br>高磁感硅钢  | 取高 | QC | 桥梁钢    | 桥  | Q  |
| 球墨铸铁用生铁 | 球  | Q  | (电讯用) 取向<br>高磁感硅钢 | 电高 | DG | 锅炉钢    | 锅  | G  |
| 脱碳低磷粒铁  | 脱粒 | TL | 碳素工具钢             | 碳  | T  | 焊接气瓶用钢 | 焊瓶 | HP |
| 含钒生铁    | 钒  | F  | 塑料模具钢             | 塑模 | SM | 车辆大梁用钢 | 梁  | L  |
| 耐磨生铁    | 耐磨 | NM | 滚珠轴承钢             | 滚  | G  | 机车车轴用钢 | 机轴 | JZ |
| 碳素结构钢   | 屈  | Q  | 焊接用钢              | 焊  | H  | 管线用钢   | 管线 | L  |

续表 1-2

| 名 称            | 汉字  | 符号 | 名 称           | 汉字 | 符号   | 名 称  | 汉字 | 符号 |
|----------------|-----|----|---------------|----|------|------|----|----|
| 低合金高强度钢        | 屈   | Q  | 钢轨钢           | 轨  | U    | 沸腾钢  | 沸  | F  |
| 耐候钢            | 耐候  | NH | 冷锻钢           | 铆螺 | ML   | 半镇静钢 | 半  | b  |
| 保证淬透性钢         | 淬透性 | H  | 锚链钢           | 锚  | M    | 灰铸铁  | 灰铁 | HT |
| 易切削非调质钢        | 易非  | YF | 地质钻探<br>钢管用钢  | 地质 | DZ   | 球墨铸铁 | 球铁 | QT |
| 热锻用非调质钢        | 非   | F  | 矿用钢           | 矿  | K    | 可锻铸铁 | 可锻 | KT |
| 易切削钢           | 易   | Y  | 船用钢           | 船  | 国际符号 | 耐热铸铁 | 热铁 | RT |
| 电工热轧硅钢         | 电热  | DR | 多层压力容器用钢      | 高层 | gC   | 高级   | 高  | A  |
| 电工用冷轧无<br>取向硅钢 | 无   | W  | 锅炉与压力<br>容器用钢 | 容  | R    | 特级   | 特  | E  |

(1) 碳素结构钢和低合金结构钢。这类钢分为通用钢和专用钢两类。

通用结构钢的表示方法，是由屈服强度的第一个字母 Q、屈服强度数值、质量等级、脱氧方法符号 4 个部分按顺序组成，其中质量等级有 A、B、C、D 4 个等级。例如，碳素结构钢 Q235AF，表示屈服强度不低于 235MPa 的 A 级沸腾钢。低合金高强度结构钢 Q345C、Q345D 分别表示屈服强度不低于 345MPa 的 C 级和 D 级镇静钢。

专用结构钢一般采用通用结构钢牌号加表 1-2 中的产品用途符号表示。例如，压力容器用钢 Q345R，焊接气瓶用钢 Q295HP，锅炉用钢 Q390G，桥梁用钢 Q420Q 等。

(2) 优质碳素结构钢。优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示，为以平均万分数表示的碳的质量分数。例如，10 钢、20 钢、45 钢分别表示平均  $w(C) = 0.10\%$ 、 $0.20\%$ 、 $0.45\%$  的优质碳素钢，平均  $w(C) = 0.08\%$  的沸腾钢表示为 08F。 $w(Mn) = 0.70\% \sim 1.20\%$  的优质碳素钢应将锰元素标出，如 30Mn 表示平均  $w(C) = 0.30\%$ 、 $w(Mn) = 0.70\% \sim 1.20\%$  的钢。

沸腾钢和半镇静钢在牌号尾部分别加以符号“F”和“b”，镇静钢一般不标符号。高级优质碳素结构钢在其牌号尾部加“A”，特优钢在牌号后加“E”。专用钢在其符号尾部加用途符号，与碳素结构钢相同。

(3) 碳素工具钢。碳素工具钢以符号 T（碳）标识，其后为以名义千分数表示的碳的质量分数，含锰量较高的碳素工具钢应将锰元素标出，高级优质钢末尾加“A”。例如，T8Mn 表示平均  $w(C) = 0.80\%$ 、 $w(Mn) = 0.40\% \sim 0.60\%$  的碳素工具钢。

(4) 合金结构钢。合金结构钢按含碳量、合金元素化学符号及含量的顺序表示。含碳量以平均万分数表示的碳的质量分数表示，合金元素以平均质量分数表示。若合金元素的平均质量分数小于 1.5%，仅标明元素符号而不注明含量；若合金元素质量分数等于或大于 1.5%、2.5%、3.5%…，则相应地以 2、3、4…表示。例如，45Mn2 表示平均  $w(C) = 0.45\%$ 、 $w(Mn) = 1.40\% \sim 1.80\%$  的合金结构钢。40Cr 表示平均  $w(C) = 0.40\%$ 、 $w(Cr) = 0.80\% \sim 1.10\%$  的合金结构钢；若为含硫、磷量较低（ $w(S)$ 、 $w(P) \leq 0.025\%$ ）的高级优质钢，则在牌号后面加符号“A”，如 12CrNi3A 等。

另外，对有些合金结构钢，为表示其用途，在牌号前面再附以字母。如滚动轴承钢在

牌号前面加“滚”字的汉语拼音字首“G”，后面的数字表示铬的含量，以平均千分数表示的质量分数表示，如GCr9、GCr15等。

需要说明的是，加入Mo、V、Ti、Nb、B、N、RE等合金元素时，虽然其质量分数远小于1%，但仍应在钢号中标明此合金元素。例如，20MnVB表示 $w(\text{C}) = 0.20\%$ 、 $w(\text{Mn}) = 1.0\% \sim 1.3\%$ 、 $w(\text{V}) = 0.07\% \sim 0.22\%$ 、 $w(\text{B}) = 0.001\% \sim 0.005\%$ 的合金结构钢。

有些合金元素如Mn、Si、Cr、Ni等，虽然在钢中的质量分数也小于1%，但它们不是作为主要合金元素加入的，通常将其看作是钢中的残留元素，这些元素在牌号中不予标出。

(5) 合金工具钢。合金工具钢的含碳量是以名义千分数表示的碳的质量分数表示的，这与合金结构钢是有区别的，而且当钢中的 $w(\text{C}) > 1.0\%$ 时，不再标出含碳量，高速钢平均 $w(\text{C}) < 1.0\%$ 时也不标出；其合金元素的表示方法与合金结构钢相同。例如，5CrNiMo钢的 $w(\text{C}) = 0.5\% \sim 0.6\%$ ，Cr12MoV钢的 $w(\text{C}) = 1.2\% \sim 1.4\%$ ；9SiCr表示平均 $w(\text{C}) = 0.9\%$ ，平均 $w(\text{Si})$ 、 $w(\text{Cr}) < 1.5\%$ 的低合金工具钢；高速钢W18Cr4V表示平均 $w(\text{C}) = 1\%$ 、 $w(\text{W}) = 18\%$ 、 $w(\text{Cr}) = 4\%$ 、 $w(\text{V}) = 1\%$ 。

(6) 特殊性能钢。特殊性能钢与合金工具钢的表示方法基本相同。牌号前面的数字表示以名义万分数表示的碳的质量分数，如95Cr18表示 $w(\text{C}) = 0.90\% \sim 1.00\%$ ；但 $w(\text{C}) \leq 0.08\%$ 者，在牌号前加“0”，如022Cr12、06Cr13Al等；022Cr12表示 $w(\text{C}) = 0.03\%$ ， $w(\text{Cr}) = 11\% \sim 13.5\%$ 的不锈钢，06Cr13Al表示 $w(\text{C}) = 0.08\%$ ， $w(\text{Cr}) = 11.5\% \sim 14.5\%$ 、 $w(\text{Al}) = 0.1\% \sim 0.3\%$ 的不锈钢。

钢中主要合金元素的含量以质量分数表示。例如，12Cr18Ni9表示 $w(\text{C}) = 0.15\%$ ， $w(\text{Cr}) = 17.00\% \sim 19.00\%$ 、 $w(\text{Ni}) = 8.00\% \sim 10.00\%$ 的不锈钢。

### 1.1.3 合金元素在钢中的作用

钢中的合金元素不仅与铁和碳相互作用形成铁基固溶体和各类碳化物，同时它们之间以及非金属元素还可以形成金属间化合物和非金属夹杂物。为此，通过探讨合金元素的这些相互作用并依此对它们进行分类，可以明确钢中合金元素的存在形式、分布状态以及合金钢中的组成相类型。

#### 1.1.3.1 合金元素与铁的相互作用

钢中的合金元素对 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$ 和 $\delta\text{-Fe}$ 的相对稳定性及同素异构转变温度 $A_3$ 和 $A_4$ 均有极大的影响。在 $\gamma\text{-Fe}$ 中，有较大溶解度并稳定 $\gamma$ 相的元素称为奥氏体形成元素；在 $\alpha\text{-Fe}$ 中，有较大溶解度并使 $\alpha$ 相稳定的元素称为铁素体形成元素。它们对铁的多晶型转变的影响可分为两大类。

(1) 扩大 $\gamma$ 相区—— $\gamma$ 相稳定化元素。Mn、Ni、Co、C、N、Cu等合金元素使 $A_3$ 温度降低， $A_4$ 温度上升，即扩大了 $\gamma$ 相区。合金元素的这种作用包括以下两种情况：

1) 开启 $\gamma$ 相区。与 $\gamma\text{-Fe}$ 无限互溶的元素有Ni、Mn、Co。图1-2所示为这几种元素与铁形成的二元合金相图。可以看出，随着合金元素Ni、Mn、Co含量的增加，某一定成分的铁基合金不仅在高温和低温出现了 $\delta + \gamma$ 和 $\alpha + \gamma$ 两个两相区，同时 $\gamma$ 相的存在温度区间扩大，即使 $\gamma$ 相区扩大；甚至当Ni、Mn、Co等元素加入一定量后， $\gamma$ 相区扩大到室温以下，使 $\alpha$ 相区消失。这类合金元素被称为（完全）开启 $\gamma$ 相区的元素。