

# 机械制造基础

主 编 宁生科  
编 者 宁生科 李 蔚 马保吉  
王小翠 侯志敏

西北工业大学出版社

【内容简介】 依据高等工科院校机械制造基础课程的基本教学要求和适应 21 世纪高级工程技术人才培养的要求,以及贯彻深化改革高等工程教育课程体系的精神,近几年来,编者对机械制造基础课程进行了一系列的教学研究、实践和探索,积累了一些经验和成果,为此编写了这本教材。

全书共有 10 章,包括工程材料导论、铸造成形工艺、金属的塑性成形、焊接成形工艺、非金属材料的成形、切削加工、特种加工、特型表面加工、精密与超精密加工技术、先进制造技术。与《机械工程实践》教材配套使用,可实现理论教学与工程实践训练的良好衔接。本书可作为高等工科院校机械类、机电类及近机类专业教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/宁生科主编. —西安:西北工业大学出版社,2004.6

ISBN 7-5612-1780-3

. 机... . 宁... . 机械制造工艺—高等学校—教材 . TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 048210 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:(029)88493844

网 址: [www.nwpup.com](http://www.nwpup.com)

印 刷 者: 陕西向阳印务有限公司

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张: 16

字 数: 387 千字

版 次: 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1~5 000 册

定 价: 22.00 元

# 前 言

---

为了适应 21 世纪高级工程技术人才培养的要求以及深化改革高等工程教育课程体系的精神,近几年来,我们对机械制造基础课程进行了一系列的教学研究、实践和探索,积累了一些经验和成果,为此编写了这本教材。

为了符合高等工程教学改革的要求,本教材在编写过程中力争体现以下特点:

1. 全书以制造工艺方法为主线,以介绍工业制造背景知识为重点。
2. 精选传统金属工艺学的相关内容,突出新材料、新工艺、新技术、新设备等体现现代制造水平的内容。
3. 注意与《机械工程实践》教材在内容和体系上的协调配合。
4. 将特种加工、精密与超精密加工、先进制造技术分别单设成章,体现工业制造技术的发展水平和趋势。
5. 增加非金属材料的制造工艺方法,从而完善工业制造的全部基础知识。
6. 内容的编排符合从实践到认识的认知规律。

本书可作为高等工科院校机械类、机电类及近机类专业教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书由宁生科主编。参加编写的有:宁生科(绪论、第 1 章、第 2 章、第 7 章、第 8 章),李蔚(第 3 章、第 4 章、第 5 章),马保吉(第 9 章),王小翠(第 6 章),侯志敏(第 10 章)。

本教材在编写过程中,参考了有关文献资料,在此对相关作者深表感谢。西安工业学院教务处副处长薛虹对该书的出版给予了极大的支持,在此衷心地表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有欠妥之处,敬请读者指正。

编 者  
2004 年 2 月

# 目 录

---

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 绪论.....                | 1   |
| 第 1 章 工程材料导论.....      | 6   |
| § 1.1 常用金属材料 .....     | 6   |
| § 1.2 工程材料的性能.....     | 22  |
| § 1.3 钢的热处理.....       | 29  |
| § 1.4 非金属材料.....       | 33  |
| 第 2 章 铸造成形工艺 .....     | 46  |
| § 2.1 铸造理论基础.....      | 46  |
| § 2.2 砂型铸造.....        | 50  |
| § 2.3 特种铸造.....        | 60  |
| 第 3 章 金属的塑性成形 .....    | 70  |
| § 3.1 金属塑性成形的理论基础..... | 70  |
| § 3.2 常用锻造方法.....      | 75  |
| § 3.3 薄板冲压成形.....      | 87  |
| § 3.4 其他塑性成形方法.....    | 95  |
| 第 4 章 焊接成形工艺.....      | 101 |
| § 4.1 焊接理论基础 .....     | 102 |
| § 4.2 焊接方法 .....       | 107 |
| § 4.3 焊接工艺基础 .....     | 114 |
| § 4.4 胶接 .....         | 118 |
| 第 5 章 非金属材料的成形.....    | 121 |
| § 5.1 塑料的成形加工 .....    | 121 |
| § 5.2 橡胶的成形加工 .....    | 124 |
| § 5.3 陶瓷的成形加工 .....    | 126 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第 6 章 切削加工.....                | 130 |
| § 6.1 切削加工概述 .....             | 130 |
| § 6.2 切削机床与切削运动 .....          | 134 |
| § 6.3 切削刀具与切削过程 .....          | 144 |
| § 6.4 常用切削加工方法及应用 .....        | 157 |
| 第 7 章 特种加工.....                | 164 |
| § 7.1 特种加工概述 .....             | 164 |
| § 7.2 电火花加工 .....              | 166 |
| § 7.3 电解加工 .....               | 170 |
| § 7.4 超声波加工 .....              | 173 |
| § 7.5 激光加工 .....               | 175 |
| § 7.6 水射流切割技术 .....            | 177 |
| 第 8 章 特型表面的加工.....             | 179 |
| § 8.1 螺纹的加工 .....              | 179 |
| § 8.2 齿轮齿形的加工 .....            | 182 |
| § 8.3 成形面的加工 .....             | 190 |
| 第 9 章 精密与超精密加工技术.....          | 192 |
| § 9.1 精密与超精密加工技术的概念、特点和分类..... | 192 |
| § 9.2 精密与超精密加工的形成和发展 .....     | 198 |
| § 9.3 金刚石刀具超精密车削 .....         | 203 |
| § 9.4 精密与超精密磨削 .....           | 208 |
| § 9.5 典型超精密机床简介 .....          | 217 |
| § 9.6 精密与超精密加工环境 .....         | 221 |
| 第 10 章 先进制造技术 .....            | 222 |
| § 10.1 概述.....                 | 222 |
| § 10.2 先进制造技术.....             | 229 |
| § 10.3 快速成形制造技术.....           | 238 |
| § 10.4 绿色制造.....               | 243 |
| 参考文献.....                      | 248 |

# 绪 论

## 1. 典型机械的构成及其所用材料

任何机械,大至船舶、飞机、汽车,小至仪器、仪表,都是由许多零件或部件组成的。以汽车为例,一辆汽车是由车身、发动机、驱动装置、车轮等部分构成,其中每一部分又由若干零件或部件组成。

某型轿车如图 1 所示。轿车车身由许多零部件组成,不同的零部件需用不同的材料(包括钢、塑料、橡胶和玻璃等)和不同的加工方法来制造。例如,前灯的透镜是用玻璃制造的,聚光罩是用钢板经冲压和电镀制成的;发动机罩、顶盖、车门、翼子板、保险杠都是用钢板经冲压制成的;前窗玻璃和侧窗玻璃均为强化玻璃;座垫的缓冲垫采用尿烷泡沫,座垫套则采用乙烯或纺织品;轮胎采用合成橡胶;车轴是由钢经锻造、热处理和切削加工等工艺制成。



图 1 轿车

## 2. 机械工程材料及其分类

材料是人类用来制造各种产品的物质,是人类生活和生产的物质基础。

材料的种类繁多,按材料的组成特点,可分为金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料四大类;按材料的使用性能,可分为主要作为承力结构使用的结构材料和主要利用其光、电、磁、热、声等特殊性能的功能材料两大类;按材料的应用领域,可分为信息材料、能源

材料、建筑材料、机械工程材料、生物材料、航空航天材料等多种类别。

机械工程材料是主要用于制造结构件、机械零件和工具的材料。通常按化学成分与组成的不同分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。

### 3. 机械制造系统与机械制造过程简介

制造业是通过制造过程,将制造资源(物料、能源、设备工具、资金、技术、信息和人力等)转化为可供人们使用或利用的工业品或生活消费品的行业。

制造系统是由制造过程及其所涉及的硬件(物料、设备、工具和能源等)、软件(包括制造理论、制造工艺和制造信息等)和人员组成的一个将制造资源转变为产品的有机整体。

机械制造系统是一种典型的、具体的制造系统,它具有制造系统所具有的一切基本特性。其组成如图 2 所示。

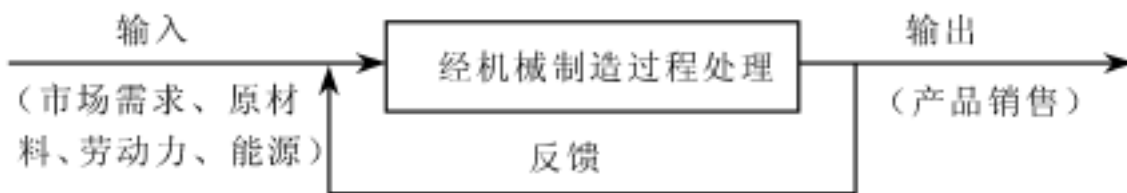


图 2 机械制造系统流程

机械制造过程如图 3 所示,它是一个由资源向产品或零件的转变过程。

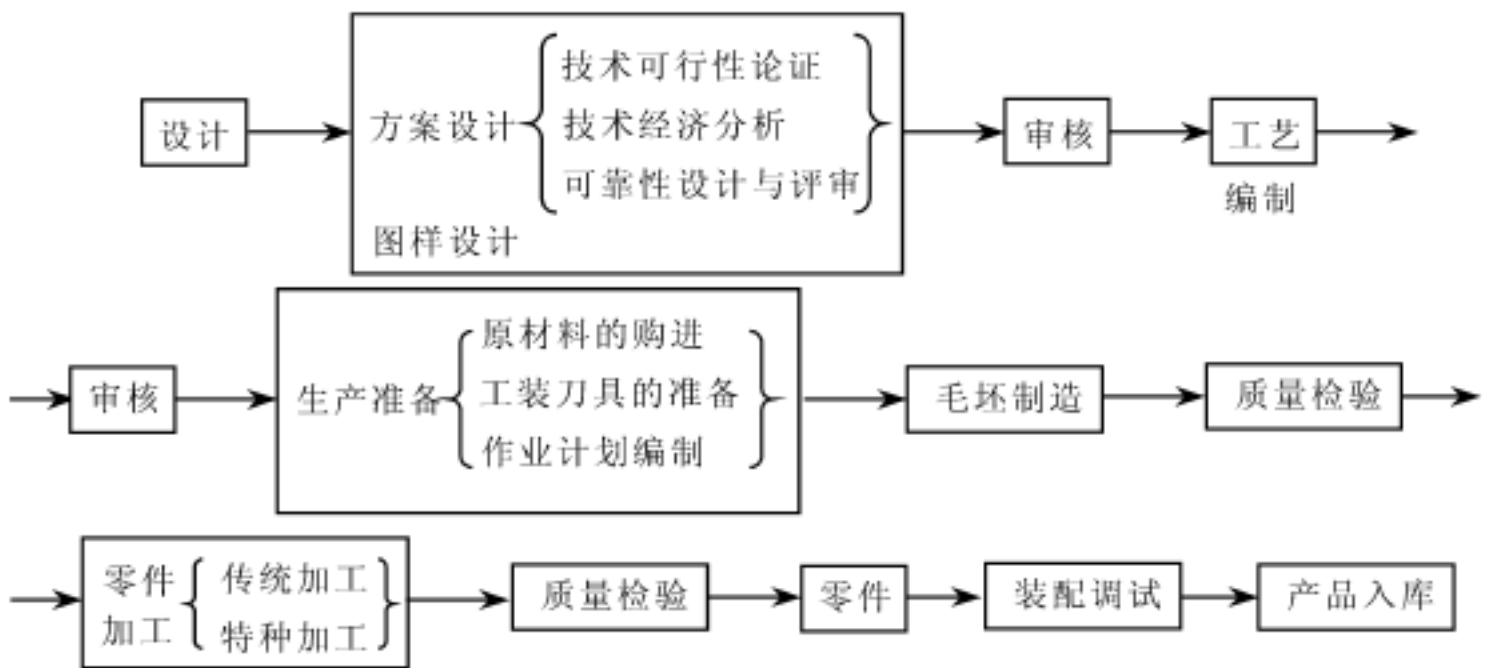


图 3 机械制造过程流程图

长期以来,人们习惯于孤立地分别研究机械制造过程中所涉及的各种问题,在改进机床、工具和制造工艺等方面取得了长足的进步,也成功地应用于大批量生产。但是,在如何大幅度提高小批量生产的生产率方面,由于各种因素非常复杂,长期未能取得大的突破。直至 20 世纪 60 年代末期,人们才开始运用系统的观点来认识和分析机械制造的全过程,并运用系统工程的理论和方法,根据机械制造系统的目的,从整体与部分、部分与部分、整体与外部环境之间的相互联系、相互作用及相互制约的关系中,综合、准确地分析和研究制造系统,逐步获得了技术先进、经济合理、效率较高、整体协调运转的最佳效果。

#### 4. 材料应用与机械制造技术发展史

材料是人类文明的物质基础。材料的发现和广泛应用以及材料加工工艺的进步是推动人类社会发展的动力。正因为如此,人们通常将材料作为划分时代的标志,即将人类社会划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。

(1)材料应用与机械制造技术发展简史 从古猿到原始人的漫长进化过程中,石器一直是人类使用的主要工具(除石器外,当然也应该有木器、竹器、骨器等,但都没有能像石器化石那样耐久而保留至今)。最初使用的是天然石块,以后慢慢学会了用石头相互撞击来制造简单工具,这在人类历史上经历了大约 200 万年的漫长岁月。后来逐步发展到磨制石器,按需要对石器进行磨光、磨尖、钻孔等,从而制作出石刀、石矛、石镰等精巧石器。大约距今 15 000 年,才开始出现复合工具,即将石斧、石刀、石镰等安装在木制、竹制或骨制的把柄上,特别是选择合适的木料和动物筋腱制成了弓、箭、弦等更加复杂的狩猎工具,使人类进入了新石器时代。

大约 50 万年前,人类学会了用火,到原始社会末期,人类的祖先开始用火烧制陶器。原始的制陶技术起源于旧石器末期,到新石器时代已相当发达。人类在利用火的时候,观察到泥土被火烘烤后变干、变硬的现象,于是在竹制或木制的容器外面涂上一层黏土后放到火上去烧烤,后来发现成形的黏土不用内部容器也可以当作容器。制陶是人类第一次对材料的加工超出了仅仅改变材料几何形状的范围,开始能够改变材料的物理和化学性能,通过复杂的工艺过程,创造出自然界所没有的人工材料,同时对材料的加工也不仅仅是利用人的体力,而是利用了火这种自然力。因此,制陶是古代材料应用及其加工技术的一大重要进步。

人类在烧制陶器的过程中发明了冶铜术,后来又发现把锡矿石加到红铜中一起冶炼,制成的材料更加坚韧耐磨,这就是青铜,从而使人类于公元前 5000 年进入青铜器时代。青铜器的出现在人类技术发展史上具有重要意义。

大约在公元前 1200 年,人类进入铁器时代。冶铁技术和铁器的发明是古代材料技术最重大的成就。最先掌握的是铸铁冶炼术,后来炼钢工业迅速发展,成为 18 世纪产业革命的重要内容和物质基础。1775 年,英国人威尔肯逊为了制造瓦特发明的蒸汽机而制造了汽缸镗床,标志着人类用机器代替手工的机械化进入了新的发展时期。随后相继出现了各种类型的金属切削机床和刀具,以及自动线、加工中心、数控系统和无人化全自动工厂。

(2)我国古代在材料和机械制造方面的辉煌成就 古老的中华民族在材料的应用和机械制造技术方面有过辉煌的成就。新石器时代的仰韶文化和龙山文化时期,我们的祖先已经能在氧化性窑中 950 ℃ 温度下烧制红陶;在还原性炉气中 1 050 ℃ 下烧制薄胎黑陶与白陶。3 000 多年前的殷、周时期,我们的祖先已经发明了釉陶,炉窑温度提高到 1 200 ℃。东汉时期出现了瓷器,并于 9 世纪传至非洲东部和阿拉伯世界,13 世纪传至日本,15 世纪传至欧洲,使瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了极大的影响。

我国在夏(公元前 2140 年开始)以前就掌握了青铜冶炼术,虽然晚于古埃及和西亚一些国家,但发展很快。到距今 3 000 多年的殷商、西周时期,我国的青铜冶炼技术已达到当时世界领先水平,青铜已广泛用于制造各种工具、兵器、食器和祭器等。1939 年河南安阳出土的晚商遗址中的司母戊大方鼎,其花纹精致,质量达 875 kg,外形尺寸为 133 cm × 78 cm × 110 cm,

是迄今为止世界上最古老的大型青铜器。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑,长 55.6 cm,在地下埋藏 2 000 多年仍然金光闪闪,锋利无比,是古青铜器的杰作。1980 年在陕西临潼秦始皇陵墓附近出土的 2 000 多年前的的大型彩绘铜车马,一车四马,由一名御官俑驾驶,大小约为真实车、马、人的一半,结构精细,形态逼真;整个铜车马由 3 400 多个零部件组成,总质量为 1 241 kg;材料以青铜为主,并配有金银饰品,综合了铸造、焊接、凿削、研磨、抛光以及各类连接等多种工艺;其加工工艺之复杂,制作技术之精湛,充分反映了我国劳动人民对古代人类文明所做的巨大贡献。

我国金属切削加工工艺的发展可追溯到青铜器时代。在湖南衡阳出土的东汉时期的人字齿轮,形状尺寸相当精确,说明在汉朝就有了金属机件。至明朝已经有了简单的切削加工设备,公元 1668 年,我国的切削加工已发展到使用直径近 6.6 m 的嵌齿铣刀,由牲畜牵动旋转,来铣削天文仪上的铜环。明朝宋应星所著《天工开物》一书,详细记载有冶铁、炼钢、铸造、锻造、焊接(锡焊和银焊)、热处理(淬火等)等各种金属加工方法。其中记载的关于锉刀的制造、翻修和热处理工艺与现代技术相差无几,这是世界上最早的机械制造方面的科学著作。

由此可见,我国古代在材料和机械制造的许多方面,都曾经处于世界领先地位,为人类文明的发展和进步做出了巨大的贡献。但是,在 18 世纪以后,特别是从 1840 年鸦片战争以后,由于长期的封建愚昧统治和闭关自守,中国人民饱受帝国主义侵略和殖民掠夺,严重阻碍了生产力的发展,使我国的科学技术水平处于极端落后的状态。

(3)我国在材料和机械制造领域的技术现状 新中国成立以后,特别是改革开放以来,我国在材料和机械制造领域有了突飞猛进的发展。材料和机械产品无论从品种、数量和质量方面,都基本满足了国防和工农业生产的需要。目前,我国钢年产量已经突破 1 亿吨,非金属材料、高分子合成材料、陶瓷材料和复合材料等各种材料在机械制造中发挥着越来越重要的作用。机械制造的新材料、新技术、新工艺和新设备层出不穷,计算机技术也已广泛应用于机械制造过程中,许多机械制造企业正朝着生产过程自动化的方向发展,与世界先进水平的差距正在逐步缩小。

以汽车制造业为例,通过技术引进与合作,我国汽车工业的整体水平有了大幅度提高,尤其是轿车制造技术进步明显。主要表现在以下几个方面:一是节能技术,包括发动机燃料喷射技术和稀薄燃烧技术的应用;二是环保技术,国产轿车已广泛采用闭环控制电子燃油喷射系统,普遍安装了三元催化装置,使尾气的排放有了大幅度降低;三是安全技术,包括 ABS 系统、安全气囊和新型安全带的安装,以及发生事故后自动熄火和断油等技术的采用。所有这些,都表明我国的汽车制造业已经大大缩短了与世界先进水平之间的差距,一些产品已经达到技术先进国家 20 世纪 90 年代水平。

## 5. 工程材料与机械制造技术发展趋势

进入新世纪,现代科学技术飞跃发展。材料技术、能源技术、信息技术成为现代人类文明的三大支柱。现在,世界上已有传统材料数十万种,并且新材料的品种以每年大约 5% 的速度在增长。多种多样的金属材料、高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料给社会生产和人们生活带来了巨大的变化。在工程材料的研究和应用方面,传统钢铁材料不断扩大品种规模,不断

提高质量并降低成本,在冶炼、浇铸、加工和热处理等工艺上不断革新,出现了炉外精炼、连铸连轧、控制轧制等新工艺,微合金钢、低合金高强度钢、双相钢等新钢种不断涌现;在非铁金属及其合金方面,出现了高纯高韧铝合金、高温铝合金、高强高韧和高温铁合金,先进的镍基、铁基、铬基高温合金、难熔金属合金及稀贵金属合金等;快速凝固金属非晶和微晶材料、纳米金属材料、定向凝固柱晶和单晶合金等许多新型高性能金属材料和磁性材料、形状记忆合金等功能材料也层出不穷。

在机械加工工艺方面,各种特种加工和特种处理工艺也日益繁多。传统的机械制造工艺过程正在发生变化,如铸造、压力加工、焊接、热处理、胶接、切削加工、表面处理等生产环节采用高效专用设备和先进工艺,普遍实行工艺专业化和机械生产自动化;为适应产品更新换代周期短、品种规格多样化的需要,高效柔性加工系统获得迅速发展;计算机集成制造系统把计算机辅助设计系统(CAD)、计算机辅助制造系统(CAM)与生产管理信息系统(MIS)综合成一个有机整体,实现了机械制造过程高度自动化,极大地提高了劳动生产率和社会经济效益,这是 21 世纪制造业的发展方向。

# 第 1 章 工程材料导论

## § 1.1 常用金属材料

### 1.1.1 碳素钢

含 C 质量分数小于 2.11% 的铁碳合金称为碳素钢,简称碳钢。碳素钢中除含有 Fe(铁)、C(碳)元素以外,还含有少量 Mn(锰)、Si(硅)、S(硫)、P(磷)等杂质元素。碳素钢由于其价格低廉,容易生产,并通过不同的热处理方法可改变其力学性能,因此能满足工业生产上的很多要求,所以广泛应用于建筑、交通运输及机械制造工业中。

#### 1. 化学成分对碳素钢组织与性能的影响

(1) C(碳)的影响 C 是影响碳素钢的组织 and 性能的主要元素。在钢中 C 主要以渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 的形式存在。当钢中含 C 质量分数等于或小于 1.0% 时,随着含 C 质量分数的增加,铁素体减少,珠光体增加,又由于层片状渗碳体起着强化作用,因此,致使钢的强度、硬度上升,而塑性、韧性下降,如图 1-1 所示。但是,当钢中含 C 质量分数大于 1.0% 后,钢中出现网状渗碳体,随着含 C 质量分数增加,尽管钢的硬度直线上升,但由于脆性增大,强度反而下降。钢中含 C 质量分数愈大,渗碳体网愈密,所以高碳钢的性能硬而脆。

(2) Mn(锰)和 Si(硅) Mn(锰)和 Si(硅)在钢中是有益元素,来源于炼钢材料——生铁和脱氧剂中的锰铁。在室温下,Mn 和 Si 能溶于铁素体,对钢有一定的固溶强化作用。同时,Mn 具有一定的脱氧和脱硫能力,能使钢中的 FeO 还原成 Fe,又可与 S 生成 MnS,减轻 S 的有害作用。碳素钢中含 Mn 质量分数一般在 0.25% ~ 0.80% 之间,含 Si 质量分数一般不超过 0.40%。

(3) S(硫)和 P(磷) S 和 P 是从炼钢原料及燃料中带入钢中的,是钢的有害元素。在钢

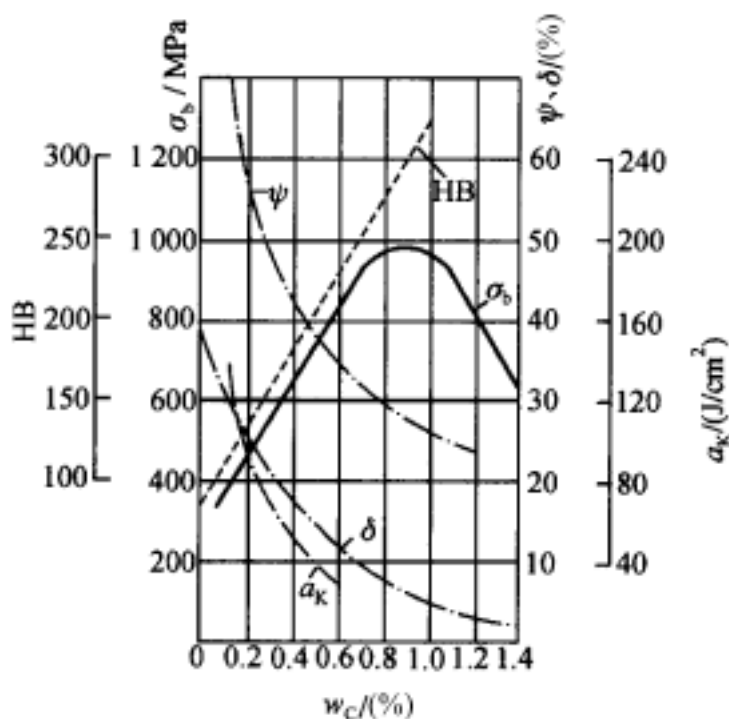


图 1-1 碳素钢的性能

中, S 常以 FeS 的形式存在。FeS 与 Fe(铁)形成低熔点共晶体(熔点 980 ),当钢材在轧制或锻造时(加热温度为 800 ~ 1 250 ),沿着晶界分布的低熔点共晶体呈现熔融状态。因而,削弱了晶粒之间的连接,使钢材在热加工时容易产生裂纹,这种现象称为热脆性。钢中 S 的含量不超过 0 .05%。P 在结晶时容易形成脆性很大的 Fe<sub>3</sub>P,使钢在室温下的塑性和韧性急剧下降,这种现象称为冷脆性。通常,钢的含 P 质量分数限制在 0 .045% 以下。

另外,钢中还含有 H(氢)、O(氧)、N(氮)等元素,它们对钢的机械性能也带来不利的影

## 2. 碳素钢的分类、牌号及用途

根据用途,碳素钢一般分为碳素结构钢、优质碳素结构钢、碳素工具钢。

(1)碳素结构钢 碳素结构钢的含 C 质量分数一般小于 0 .38%,而最常用的是含 C 质量分数小于 0 .25% 的低碳钢。碳素结构钢具有较高的强度、良好的塑性与韧性,工艺性能优良,冶炼成本低。因此,广泛应用于一般建筑、工程结构、普通机械零件制造等。

碳素结构钢的牌号是由代表屈服点的字母(Q)、屈服点数值、质量等级符号(A, B, C, D)及脱氧方法符号(F, b, Z, TZ)四个部分按顺序组成。质量等级反映了碳素结构钢中有害元素(S, P)含量的多少,从 A 级到 D 级,钢中 S 和 P 的含量依次减少。C 级和 D 级的碳素结构钢的 S 和 P 含量最少,质量好,可用作重要焊接结构件。脱氧方法符号 F, b, Z, TZ 分别表示沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢。钢的牌号中“Z”和“TZ”可以省略,如 Q215 - AF 表示屈服强度数值为 215 MPa 的 A 级沸腾钢。

碳素结构钢常见的牌号及用途: Q195 钢和 Q215 钢通常轧制成薄板、钢筋等,可用于制作铆钉、螺钉、地脚螺栓、轻负荷的冲压零件和焊接结构件等; Q235 钢和 Q255 钢用于制作铆钉、螺钉、螺栓、螺母、吊钩和不太重要的渗碳件,以及建筑结构中的螺纹钢、T 字钢、钢筋等; Q235C 钢和 Q235D 钢可用于重要的焊接件; Q275 钢属中碳钢,强度高,可部分代替优质碳素结构钢使用。

Q235 钢是用途最广的碳素结构钢,属于低碳钢,通常热轧成钢板、型钢、钢管、钢筋等。因其铁素体含量多,故其塑性、韧性优良。常用来制造建筑构件,车辆中的轴类、螺钉、螺母、冲压件、锻件、焊接件等。

(2)优质碳素结构钢 优质碳素结构钢的 S, P 含量较低(  $w_P = 0 .035%$  ),主要用来制造较为重要的机件。

依据 GB699—88,优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示,这两位数字即是钢中平均含碳质量分数的万分数。例如,20 钢表示平均含 C 质量分数为 0 .20% 的优质碳素结构钢。对于沸腾钢则在尾部增加符号 F,如 10F, 15F 等。

08, 10, 15, 20, 25 等牌号属于低碳钢。其塑性好,易于拉拔、冲压、挤压、锻造和焊接。其中 20 钢用途最广,常用来制造机罩、焊接容器、销子、法兰盘、螺钉、螺母、垫圈、小轴以及冲压件、焊接件,有时也用于制造渗碳凸轮、齿轮等。

30, 35, 40, 45, 50, 55 等牌号属于中碳钢。因钢中珠光体含量增多,其强度和硬度较高,淬火后的硬度可显著增加。其中,以 45 钢最为典型,它不仅强度、硬度较高,且兼有较好的塑性和韧性,即综合性能优良。45 钢在机械结构中用途最广,常用来制造轴、丝杠、齿轮、连杆、套筒、键、重要螺钉和螺母等。

60, 65, 70, 75 等牌号属于高碳钢。它们具有较高的强度、硬度和弹性,但可焊性、可切削性差,主要用做各种弹簧、高强度钢丝及其他耐磨件。经过淬火、回火后,不仅强度、硬度提高,

特别是弹性优良,因此,常用来制造小弹簧、发条、钢丝绳、轧辊等。

(3)碳素工具钢 碳素工具钢的含 C 质量分数高达 0.7% ~ 1.35%,它们淬火后有高的硬度(HRC > 60)和良好的耐磨性,常用来制造锻工、木工、钳工工具和小型模具。

碳素工具钢较合金工具钢价格便宜,但淬透性和红硬性差。由于淬透性差,只能在水类淬火介质中才能淬硬,且工件不宜过大和复杂。因红硬性差,淬火后工件的工作温度应小于 250℃,否则硬度将迅速下降。

碳素工具钢的牌号以符号“T”起首,其后面的一位或两位数字表示钢中平均含 C 质量分数的千分数。例如,T8 表示平均含 C 质量分数为 0.8% 的碳素工具钢(属优质钢材)。对于 S, P 含量更低的高级优质碳素工具钢,则在数字后面增加符号“ A ”表示,如 T8A。

常用的碳素工具钢为 T8, T10, T10A 和 T12 等牌号。在上述牌号中, T8 韧性最好,多用于制造承受冲击的工具,如凿子、锤子等锻工工具; T10, T10A 硬度较高,且仍有一定韧性,常用来制造钢锯条、小冲模等; T12 硬度最高,耐磨性好,但脆性大,适用于制造不承受冲击的耐磨工具,如钢锉、刮刀等。参见表 1-1。

表 1-1 碳素工具钢牌号、化学成分、力学性能及用途(GB1298—86)

| 牌号   | 化学成分的质量分数/(%) |             |      | 硬 度  |                |     | 用途举例                      |
|------|---------------|-------------|------|------|----------------|-----|---------------------------|
|      | wC            | wMn         | wSi  | 退火状态 | 试样淬火           |     |                           |
|      |               |             |      | HBS  | 淬火温度/<br>淬火介质  | HRC |                           |
| T7   | 0.65 ~ 0.74   | 0.40        | 0.35 | 187  | 800 ~ 820<br>水 | 62  | 凿子、冲头、木工工具、大锤等            |
| T8   | 0.75 ~ 0.84   | 0.40        | 0.35 | 187  | 780 ~ 800<br>水 | 62  | 冲头、木工工具、剪切金属用剪刀等          |
| T8Mn | 0.80 ~ 0.90   | 0.40 ~ 0.60 | 0.35 | 187  | 780 ~ 800<br>水 | 62  | 与 T8 钢相似,但淬透性高,可制作截面较大的工具 |
| T9   | 0.85 ~ 0.94   | 0.40        | 0.35 | 192  | 760 ~ 780<br>水 | 62  | 冲模、冲头、凿岩石用的凿子             |
| T10  | 0.95 ~ 1.04   | 0.40        | 0.35 | 197  | 760 ~ 780<br>水 | 62  | 刨刀、车刀、钻头、丝锥、手锯锯条、拉丝模、冷冲模等 |
| T11  | 1.05 ~ 1.14   | 0.40        | 0.35 | 207  | 760 ~ 780<br>水 | 62  |                           |
| T12  | 1.15 ~ 1.24   | 0.40        | 0.35 | 207  | 760 ~ 780<br>水 | 62  | 丝锥、锉刀、板牙、刮刀、铰刀、量具         |
| T13  | 1.25 ~ 1.35   | 0.40        | 0.35 | 217  | 760 ~ 780<br>水 | 62  | 剃刀、刮刀、刻字刀具等               |

### 1.1.2 合金钢

合金钢是为改善钢的某些性能、特意加入一种或几种合金元素所炼成的钢。如果钢中的含 Si 质量分数大于 0.5%,或者含 Mn 质量分数大于 1.0%,也属于合金钢。

## 1. 合金结构钢

合金结构钢是在优质碳素结构钢的基础上加入一些合金元素而形成的钢种。因加入合金元素较少(大多数小于5%),所以合金结构钢都属于中、低合金钢。合金结构钢中的主加元素一般为Mn, Si, Cr, B等,这些元素对于提高淬透性起主导作用;辅加元素主要有W, Cu, V, Ti, Ni等。

合金结构钢的牌号通常以“数字+元素符号+数字”的方法来表示。牌号中起首的两位数字表示钢的平均含C质量分数的万分数,元素符号及其后的数字表示所含合金元素种类及其平均含量的质量分数。若合金元素的质量分数小于1.5%,则不标其质量分数。高级优质钢在牌号尾部增加符号“A”。例如,16Mn, 20Cr, 40Mn2, 30CrMnSi, 38CrMoAlA等。

合金结构钢比碳素钢有更好的力学性能,特别是热处理性能优良,因此便于制造尺寸较大、形状复杂或要求淬火变形小的零件。

合金结构钢都是优质钢、高级优质钢(牌号后加“A”字)或特级优质钢(牌号后加“E”字)。一般按用途及热处理特点,合金结构钢可分为:合金渗碳钢、合金调质钢、合金弹簧钢、滚动轴承钢等。

(1)合金渗碳钢 合金渗碳钢是指经渗碳淬火、低温回火后使用的合金钢。主要用来制造在工作中承受强烈的摩擦损耗,同时又承受较大的交变载荷,尤其是冲击载荷的机械零件。如汽车、拖拉机中的变速齿轮,内燃机上的凸轮轴、活塞销等。

工作表面应具有很高的硬度(可达HRC60~80)和高的耐磨性,而心部应具有良好的塑性和足够高的强度。

合金渗碳钢含C质量分数一般为0.10%~0.25%,以保证心部具有足够的塑性和韧性;加入Cr, Ni, Mn, B等元素主要是提高钢的淬透性,保证淬火后零件心部的强度和韧性;另外,加入少量的Ti, V, W, Mo等元素,能形成稳定的碳化物,不仅能够阻止奥氏体晶粒的长大,还能增加渗碳层的硬度,提高耐磨性。

合金渗碳钢的热处理是渗碳后淬火,再低温回火。热处理后渗碳层组织为高碳回火马氏体和特殊碳化物,硬度为HRC60~62。心部组织与钢材的淬火性及零件的截面尺寸有关,一般为低碳回火马氏体或珠光体和铁素体组织。

应用最广泛的钢种是20CrMnTi,大量用于制造承受高速、重载、抗冲击和耐磨损的零件,尤其是汽车、拖拉机上的重要零件。

(2)合金调质钢 合金调质钢是指经调质(淬火+高温回火)处理后使用的钢。主要用于制造在重载荷作用下,同时又受冲击载荷作用的零件,如拖拉机、汽车、机床等机器上的用于传递动力的轴、连杆、齿轮、螺栓等。

调质件大多承受多种工作载荷,受力情况比较复杂。所以调质件应具有良好的综合机械性能,即具有高的强度,同时又具有良好的塑性和韧性。

一般要求合金调质钢的含C质量分数为0.25%~0.50%。含C质量分数过低,不易淬硬,回火后强度不够;含C质量分数过高则韧性不够。主加合金元素为Cr, Mn, Ni, Si, B等,主要是用来提高合金调质钢的淬透性,并在合金调质钢中形成合金铁素体,提高钢的强度。辅加合金元素为Ti, V, Mo, W等,主要在合金调质钢中形成稳定的合金碳化物,阻止奥氏体晶粒长大及细化晶粒,并防止回火脆性。

典型的钢种有:40Cr广泛用于制造一般尺寸的重要零件;35CrMo用于制造截面较大的零

件,例如曲轴、连杆等;40CrNiMn 用于制造大截面、重载荷的重要零件,如汽轮机主轴、叶轮、航空发动机轴等。

(3)合金弹簧钢 合金弹簧钢是一种专用结构钢,主要用于制造各种弹簧和弹性元件。

弹簧是利用弹性变形吸收能量来缓和振动和冲击,或依靠弹性储能来起驱动作用。因此,弹簧应具有高的弹性极限,以保证弹簧有足够高的弹性变形能力和较大的承载能力;具有高的抗疲劳强度,以防止在振动和交变应力作用下产生疲劳断裂;足够的塑性和韧性,以避免受冲击时脆断。此外,合金弹簧钢还要求有较好的淬透性,不易脱碳和过热,容易绕卷成形等。一些特殊合金弹簧钢还要求具有耐热性、耐蚀性等性能。

合金弹簧钢含 C 质量分数较高,一般在 0.45% ~ 0.7% 之间,以保证高的弹性极限和疲劳极限;加入 Si, Mn, Cr 等合金元素来提高钢的淬透性,同时也提高了弹性极限;加入 W, Mo, V 等元素来提高钢的回火稳定性。

合金弹簧钢大致分两类。一类是以 Si, Mn 为主要合金元素的弹簧钢,典型钢种有 65Mn 和 60Si2Mn 等。这类钢的价格便宜,淬透性明显优于碳素弹簧钢,主要用于汽车、拖拉机的扳簧和螺旋弹簧等;另一种是含 Cr, V, W 等元素的合金弹簧钢,典型钢种是 50CrVA。用于制造在 350 ~ 400 °C 温度下承受重载的较大弹簧,如阀门弹簧、高速柴油机的汽门弹簧等。

弹簧钢的热处理一般是淬火后中温(450 ~ 550 °C)回火,获得回火屈氏体组织。截面尺寸大于 8 mm 的大型弹簧常在热态下成形,即把钢加热到比淬火温度高 50 ~ 80 °C 时热卷成形,利用成形后的余热立即淬火和中温回火;截面尺寸小于 8 mm 的弹簧常采用冷拉钢丝冷卷成形,通常也进行淬火与中温回火或去应力退火处理。

(4)滚动轴承钢 滚动轴承钢主要用来制造滚动轴承的滚动体(滚珠、滚柱、滚针)和内、外套圈。从化学成分上看,滚动轴承钢属于工具钢,所以也用于制造精密量具、冷冲模、机床丝杠等耐磨件。

滚动轴承在工作时承受很大的交变载荷和极大的接触应力,受到严重的摩擦磨损,并受到冲击载荷的作用。因此,轴承钢必须具有高而均匀的硬度和耐磨性、高的接触疲劳强度、足够的韧性和淬透性。此外,还要求在大气和润滑介质中有一定的耐蚀能力和良好的尺寸稳定性。

滚动轴承钢含 C 质量分数要求较高,一般为 0.95% ~ 1.15%,目的是保证轴承钢的高硬度、高耐磨性和高强度;加入提高淬透性的合金元素 Cr(一般为 0.40% ~ 1.65%),并且形成合金渗碳体,以提高钢的耐磨性及疲劳强度;加入 Si, Mn, V 等元素进一步提高淬透性,同时 V 元素溶于奥氏体中,形成碳化物 VC,可以提高钢的耐磨性并防止过热,便于制造大型轴承。

滚动轴承钢的牌号由“G(表示“滚”) + Cr(铬) + 数字”组成,数字表示 Cr 质量分数的千分之几,C 的质量分数不标出。我国以铬轴承钢应用最广,最典型的是 GCr15,除制造轴承外也常用来制造冷冲模、量具、丝锥等。

## 2. 合金工具钢

合金工具钢主要用来制造刀具、模具和量具。其合金元素的主要作用是增加钢的淬透性、耐磨性及红硬性。与碳素工具钢相比,它适合制造形状复杂、尺寸较大、切削速度较高或工作温度较高的工具和模具。

合金工具钢按用途可分为合金刃具钢、合金模具钢及合金量具钢。合金工具钢的牌号与合金结构钢类似,不同的是以一位数字表示平均含 C 质量分数的千分数,当含 C 质量分数超过 1% 时,则不标出。如 9Cr2 的平均含 C 质量分数为 0.9%,CrWMn 的平均含 C 质量分数为

1.0%。合金元素的表示方法与合金结构钢相同,但由于合金工具钢都是高级优质钢,故牌号后不标“A”。

(1)合金刀具钢 合金刀具钢是在碳素工具钢的基础上加入少量的合金元素(小于5%)而制成的。主要用于制造各种在低速下切削、形状复杂、截面尺寸较大的金属切削刀具,如铣刀、车刀、钻头等。

合金刀具钢切削时受切削力的作用,使刃部和切屑之间产生强烈摩擦,刃部温度可达500~600℃,同时还要承受一定的振动和冲击。因此,合金刀具钢应具有较小的淬火变形,很高的强度、硬度和耐磨性,较高的热硬性(300℃),足够的塑性和韧性。

合金刀具钢的含C质量分数一般为0.8%~1.05%,以保证钢淬火后有足够的硬度和耐磨性。另外,材料中加入Cr, Mn, Si, W, V等合金元素, Cr, Mn, Si元素主要提高钢的淬透性, Si还能提高钢的回火稳定性; W, V等元素在钢中形成稳定的碳化物,能提高钢的硬度和耐磨性,并防止加热时过热,保持细小的晶粒组织。

典型合金刀具钢的牌号是9SiCr,适于制造各种变形要求小、转速较低的薄刃切削刀具,如扳牙、丝锥、钻头、铰刀、齿轮铣刀、拉刀等,也常作冷冲模。Cr06常用来制作剃刀、刀片、手术刀具以及刮刀、刻刀等。

合金刀具钢热处理与碳素工具钢基本相同。预先热处理是球化退火,目的是为了降低硬度有利于切削,并能细化晶粒,并为最终热处理作准备;最终热处理为淬火加低温回火;热处理后组织为细回火马氏体、粒状合金碳化物及少量的残余奥氏体,一般硬度为HRC60~65。

(2)合金模具钢 合金模具钢按其工作条件不同可分为冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢。

冷作模具钢主要用来制造各种冷冲模、冷墩模、冷挤压模和拉丝模等,工作温度为200~300℃。冷作模具钢应具有很高的硬度、高耐磨性,足够的强度和韧性;另外,还要求其热处理变形小,以保证模具的加工精度。尺寸较大、精度要求较高的冷作模具可选用低合金含量的冷作模具钢9Mn2V和CrWMn等,也可采用刀具钢9SiCr或轴承钢GCr15等;承受重负荷、生产批量大、形状复杂、要求淬火变形小、耐磨性高的大型模具,则必须选用淬透性高的高铬、高碳的Cr12型冷作模具钢或高速钢。

热作模具钢用于制作热锻模、热压模、热挤压模和压铸模等,工作时型腔表面温度可达600℃以上。热作模具钢在高温下应具有足够的强度、韧性和耐磨性,高的抗氧化性和高的热硬性,良好的耐热疲劳性(即在反复的受热、冷却循环中,表面不易热疲劳),还应具有良好的导热性及高的淬透性。热作模具钢对韧性要求高而对热硬性要求不太高,常用钢种有5CrNiMo,5CrMnMo及3Cr2W8V等。大型锻压模或压铸模采用含C质量分数较低、合金元素较多和热硬性很好的模具钢(如4Cr5MoSiV1)。热作模具钢具有较高的硬度、耐磨性和韧性,广泛用于制造模锻锤的锻模、热挤压模和铝、铜及其合金的压铸模等。

塑料模具包括塑料模和胶木模等,它们都是在不超过200℃的低温加热状态下,用来将细粉或颗粒状塑料压制成形。塑料模具在工作时,持续受热、受压,并受到一定程度的摩擦和有害气体的腐蚀,因此塑料模具钢主要要求在200℃时具有足够的强度和韧性,并具有较高的耐磨性和耐蚀性。常用的塑料模具钢主要为3Cr2Mo,主要用于制作中型模具。除此以外,尺寸较小、形状简单的塑料模可用碳素工具钢(如T12, T12A)制造;小型、复杂的塑料模具可用碳素结构钢及合金结构钢(如45钢、40Cr钢)来制造;中、大型塑料模具可用合金工具钢

(9Mn2V, CrWMn, Cr12 等)制造;尺寸较大、形状复杂的模具可用 Cr12 和 Cr12MoV 等钢来制造。

(3)合金量具钢 合金量具钢主要用来制造各种在机械加工过程中控制加工精度的测量工具,如卡尺、千分尺、螺旋测微仪和块规等。由于量具在使用过程中要求测量精度高,不能因磨损或尺寸不稳定而影响测量精度,所以合金量具钢应具有很高的硬度(大于 HRC56)和耐磨性以及高的尺寸稳定性。此外,合金量具钢还需要有良好的磨削加工性,使量具能达到小的表面粗糙度。形状复杂的量具还要求淬火变形小。

量具没有专门的钢种,碳素工具钢、合金工具钢和滚动轴承钢都可以制造量具。但精度要求高的量具,一般选用耐磨性和硬度较高的微变形合金工具钢,如 CrMn 和 CrWMn 等。GCr15 钢具有很高的耐磨性和较好的尺寸稳定性,也常用于制造高精度块规、螺旋塞头、千分尺等。对于在腐蚀介质中工作的量具,则可选用不锈钢如 9Cr18 和 4Cr13 等来制造。

(4)高速工具钢 高速工具钢(简称高速钢)用于制造高速切削刀具,有锋钢之称。高速钢要求具有高强度、高硬度、高耐磨性以及足够的塑性和韧性。由于在高速切削时,其温度可高达 600℃,因此,如果此时其硬度仍无明显下降,即要求高速钢具有良好的热硬性。

高速钢属于高碳钢,含 C 质量分数一般为 0.75% ~ 1.6%,目的是形成足够的合金碳化物。钢中加入大量的 W, V, Mo 及较多的 Cr 等元素,其中 W, Mo, V 元素主要是提高钢的热硬性及耐磨性, Cr 元素主要是提高钢的淬透性。

高速钢主要有钨系和钨钼系两类。钨系高速钢以 W18Cr4V 为代表,其特点是通用性强,具有适当的耐磨性和热硬性、过热与脱碳的倾向较小、淬透性高,并具有良好的韧性和磨削加工性,广泛用于制造工作温度在 600℃ 以下的复杂刀具,如拉刀、铣刀、机用丝锥等。钨钼系以 W6Mo5Cr4V2 应用最广,其 Cr 元素和 V 元素的含量较高,对应耐磨性高;组织中 Mo 元素的碳化物细小,提高了钢的韧性;其热硬性比 W18Cr4V 稍差,过热与脱碳倾向较大;W6Mo5Cr4V2 广泛用于承受冲击力较大的刀具,如插齿刀、钻头等。

### 3. 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊物理化学性能并可在特殊环境下工作的钢,如不锈钢、耐热钢、耐磨钢及低温用钢等。特殊性能钢的牌号与合金工具钢基本相同,但当含 C 质量分数小于等于 0.08% 和小于等于 0.03% 时,在牌号前分别冠以“0”及“00”,例如 0Cr19Ni9, 00Cr30Mo2 等。

(1)不锈钢 不锈钢通常是不锈钢和耐酸钢的总称。能抵抗大气腐蚀的钢称为不锈钢,而在一些酸碱类化学介质中能抵抗腐蚀的钢称为耐酸钢。一般不锈钢不一定具有抵抗酸碱介质腐蚀的性质,但耐酸钢一般都具有良好的耐蚀性。

不锈钢主要用来制造在各种腐蚀介质中工作并具有较高抗腐蚀性的零件或构件,例如化工装置中的各种管道、阀门和泵,医疗手术器械,防锈刀具和量具等。

不锈钢的主要性能要求是耐腐蚀性。另外,还要其具有合适的力学性能,良好的冷、热加工性和焊接工艺性。腐蚀按性质不同有化学腐蚀和电化学腐蚀之分。化学腐蚀是金属材料同外界介质发生化学反应而引起的腐蚀;电化学腐蚀是指金属材料在电解质溶液中发生原电池作用而产生的腐蚀,金属的腐蚀主要是电化学腐蚀。

通常钢的耐蚀性要求越高,其含 C 质量分数要求就越低,所以大多数不锈钢含 C 质量分数为 0.1% ~ 0.2%,但用于制造刀具和滚动轴承等的不锈钢含 C 质量分数要求较高(一般为 0.85% ~ 0.95%)。不锈钢中通常加入的合金元素有 Cr, Ni, Ti, Mo, V 等。其中, Cr 是不锈钢