

姜芳 姜文全 主编

化工机械基础

非
外
培



化学工业出版社

本书以《中国制造2025》为指导，结合化工行业转型升级的需要，以立德树人为宗旨，以培养工程应用型人才为目标，以“基础理论+专业技能+职业素养”为主线，以“项目引领、任务驱动”为模式，将思政教育融入专业教学之中，力求做到知识传授、能力培养、素质教育的有机统一。全书共分10章，主要内容包括：绪论、化工机械制图、流体力学、传热学、制冷与热泵技术、化工机械材料、化工机械防腐、化工机械密封、化工机械振动、化工机械故障诊断与维修。本书可作为高等院校化工类专业及相关专业的教材，也可供从事化工机械工作的工程技术人员参考。

前 言

化工机械基础

姜芳 姜文全 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

（地址：北京）

本书分为工程力学基础和化工设备设计基础两部分。工程力学基础部分包括工程材料、静力学、拉压与剪切、扭转与弯曲、复合强度等内容。化工设备设计基础部分包括容器设计的基本知识、内压薄壁容器的应力分析、内压薄壁圆筒、球壳与封头的设计、外压圆筒与封头的设计、容器零部件等内容。

本书适用于化工类专业本科教学，也可供相关行业参考。

化学工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

化工机械基础/姜芳, 姜文全主编. —北京: 化学工业出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-122-30494-0

I. ①化… II. ①姜… ②姜… III. ①化工机械 IV. ①TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 207967 号

责任编辑: 李玉晖

责任校对: 宋 夏

文字编辑: 陈 喆

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 290 千字 2017 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书为高等工科院校化工工艺类各专业《化工机械基础》课程编写的教材。本教材为妥善处理学时少、内容多的矛盾，编写时尽量做到重点突出、内容新颖、难易合适、切合实际。本书适用学时为 32~48 学时。

本书共分 2 篇 10 章。第 1 篇工程力学基础，包括静力学和材料力学两部分。静力学研究力的外效应中的平衡规律；材料力学研究构件的强度、刚度和稳定性问题。第 2 篇化工设备设计基础，以安全为前提，综合考虑质量保证的各个方面，阐述按规范设计中低压容器时有关的容器应力分析基本理论，引导学生学会全面考虑、分析和解决工程实际问题。

本书由辽宁石油化工大学梁艳编写第 1、2 章；姜芳编写第 3、4 章；徐立志编写第 5、7 章；张丽编写第 6、8 和 9 章；姜文全和张丽共同编写第 10 章。

全书由姜芳、姜文全主编，任建民教授主审。

在编写过程中得到了化机系全体教师的大力支持，同时教学指导委员会的各位委员提出了宝贵的意见，在此特表谢意。

限于笔者的水平，加之时间仓促，书中难免出现不足之处，敬请读者批评指正。

编者

2017 年 7 月

第1篇 工程力学知识

引言	2
第1章 工程材料	3
1.1 碳钢	3
1.2 合金钢	6
1.3 铸铁	11
1.4 化工设备材料的选择	12
第2章 物体的受力和静力学平衡方程	16
2.1 静力学基础知识	16
2.2 约束和约束反力	20
2.3 分离体和受力图	22
2.4 力的投影、合力投影定理	23
2.5 力矩和力偶	25
2.6 力的平移	27
2.7 平面力系的简化、合力矩定理	27
2.8 平面力系的平衡方程	30
2.9 空间力系	35
第3章 拉伸、压缩与剪切	41
3.1 拉伸与压缩的基本概念	42
3.2 横截面上的内力	42
3.3 横截面上的应力	44

3.4	拉伸与压缩变形 胡克定律	46
3.5	轴向拉伸与压缩时的强度计算	47
3.6	应力集中的概念	51
3.7	剪切与挤压	52

第4章 圆轴扭转和梁的弯曲 57

4.1	扭转的概念和内力分析	57
4.2	圆轴扭转时的应力及强度条件	60
4.3	圆轴扭转时的变形及刚度条件	64
4.4	弯曲的基本概念和内力分析	66
4.5	剪力图和弯矩图	70
4.6	弯曲时的应力和强度计算	74
4.7	惯性矩的计算	77
4.8	弯曲正应力的强度条件	81
4.9	梁的弯曲变形与刚度	84
4.10	提高梁的弯曲强度和刚度的措施	90

第5章 复合强度 96

5.1	应力状态	96
5.2	强度理论	102
5.3	弯曲和拉压组合作用	105
5.4	弯扭组合作用	108

第2篇 化工设备设计基础

第6章 容器设计的基础知识 114

6.1	容器的结构与分类	114
6.2	容器零部件的标准化	117
6.3	压力容器的安全监察	119
6.4	设计要求及设计条件	120

第7章 内压薄壁容器的应力分析 122

7.1	回转壳体的应力分析——薄膜应力理论	122
7.2	薄膜理论的应用	124

7.3	内压圆筒边缘应力	127
第8章	内压薄壁圆筒、球壳与封头的设计	131
8.1	强度设计的基本知识	131
8.2	内压薄壁圆筒与球壳的强度设计	132
8.3	内压封头的设计	139
第9章	外压容器设计	148
9.1	失稳现象	148
9.2	临界压力	149
9.3	外压圆筒的设计计算	150
9.4	外压凸形封头设计计算	156
9.5	加强圈的作用与结构	157
第10章	容器零部件	158
10.1	法兰连接	158
10.2	容器支座	167
10.3	容器的开孔补强	170
10.4	容器附件	173
	参考文献	177

第 1 篇

工程力学知识

引 言

工程力学是一门研究构件在满足强度、刚度和稳定性前提下，以最经济的代价，选择最适宜的材料，确定合理的形状和尺寸，为设计构件提供必要的理论基础和计算方法的学科。

从工程上的应用来说，工程力学包括：质点及刚体力学，固体力学，流体力学，流变学，土力学，岩体力学等。而固体力学包括材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、复合材料力学以及断裂力学等。如按使结构产生反应的作用性质分类，工程力学的许多分支都可以再分为静力学与动力学。例如结构静力学与结构动力学。

本篇包括三部分部分的内容：工程材料、静力学和材料力学。

力是物体间相互的（机械）作用。力对物体的作用效应取决于力的三要素，即力的大小、方向和作用点。是矢量，常用一个带箭头的线段来表示，在国际单位制中，力的单位牛顿（N）或千牛顿（kN）。

作用在物体上的力会引起两种效应：一是引起物体机械运动状态的改变，称为外效应；二是引起物体的变形，称为内效应。

静力学是研究物体在外力系作用下平衡规律的科学，即主要研究外效应。而材料力学主要是研究物体的变形规律，即主要研究内效应。

为保证构件正常工作，构件应具有足够的的能力负担所承受的载荷。因此，构件应当满足以下要求。

① 强度要求：即构件在外力作用下应具有足够的抵抗破坏的能力。在规定的载荷作用下构件当然不应破坏，包括断裂和发生较大的塑性变形。例如，冲床曲轴不可折断；建筑物的梁和板不应发生较大塑性变形。强度要求就是指构件在规定的使用条件下不发生意外断裂或塑性变形。

② 刚度要求：即构件在外力作用下应具有足够的抵抗变形的能力。在载荷作用下，构件即使有足够的强度，但若变形过大，仍不能正常工作。例如，机床主轴的变形过大，将影响加工精度；齿轮轴变形过大将造成齿轮和轴承的不均匀磨损，引起噪声。刚度要求就是指构件在规定的事业条件下不发生较大的变形。

③ 稳定性要求：即构件在外力作用下能保持原有直线平衡状态的能力。承受压力作用的细长杆，如千斤顶的螺杆、内燃机的挺杆等应始终维持原有的直线平衡状态，保证不被压弯。稳定性要求就是指构件在规定的使用条件下不产生丧失稳定性破坏。

如果构件的横截面尺寸不足或形状不合理，或材料选用不当，不能满足上述要求，将不能保证工程结构或机械的安全工作。相反，如果不恰当的加大构件横截面尺寸或选用高强度材料，这虽满足了上述要求，却使用了更多的材料和增加了成本，造成浪费。

我们可以做出以下结论：材料力学是研究各类构件（主要是杆件）的强度、刚度和稳定性的学科，它提供了有关的基本理论、计算方法和实验技术，使我们能合理地确定构件的材料和形状尺寸，以达到安全与经济的设计要求。

第 1 章

工程材料

工程材料主要是指机械、船舶、建筑、化工、交通运输、航空航天等各行业经常使用的各类材料。工程材料主要包括金属材料和非金属材料两大类，金属材料又可分为黑色金属材料和有色金属材料两类，黑色金属材料主要指各类钢和铸铁，有色金属材料主要指铝及铝合金、铜及铜合金以及滑动轴承合金等；非金属材料包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。

当今社会科学技术突飞猛进，新材料层出不穷，而且使用量也不断增加，但到目前为止，在机械工业中使用最多的材料仍然是金属材料。金属材料长期以来得到如此广泛应用，其主要原因是它具有优良的使用性能和加工工艺性能。金属材料中使用量最广的是钢铁材料，通常所指的钢铁材料是钢和铸铁的总称，指所有的铁碳合金。工业用钢按化学成分分为碳钢和合金钢两大类。碳钢为含碳量小于 2.11% 的铁碳合金；而合金钢是指为了提高钢的性能，在碳钢的基础上有意加入一定量合金元素所获得的铁基合金。

1.1 碳 钢

钢的总产量中碳钢占 80% 左右，是基本的工业用钢。碳钢容易冶炼，价格低廉，易于加工，性能上能满足一般机械零件的使用要求，因此是化工设备中用量最大的金属材料。含碳量在 0.0218%~2.11% 之间的铁碳合金称为碳素钢，简称碳钢。

1.1.1 碳钢的分类

钢的种类繁多，为了便于生产、使用、管理，可以按照钢材外形、含碳量、冶金质量和用途对钢进行分类。

① 为便于采购、订货和管理，我国目前将钢材按外形分为型材、板材、管材、金属制品四大类，共十六大品种。型材主要包括钢轨、型钢（圆钢、方钢、扁钢、六角钢、工字钢、槽钢、角钢及螺纹钢等）、线材（直径 5~10mm 的圆钢和盘条）等。板材主要有薄钢板（厚度等于和小于 4mm 的钢板）、厚钢板（厚度大于 4mm 的钢板）；又可分为中板（厚度大于 4mm 小于 20mm）、厚板（厚度大于 20mm 小于 60mm）、特厚板（厚度大于 60mm）、钢带（也叫带钢，实际上是长而窄并成卷供应的薄钢板）、电工硅钢薄板（也叫硅钢片或矽钢片）。管材主要有无缝钢管（用热轧、热轧-冷拔或挤压等方法生产的管壁无接缝

的钢管)和焊接钢管(将钢板或钢带卷曲成形,然后焊接制成的钢管)。金属制品主要包括钢丝、钢丝绳、钢绞线等。

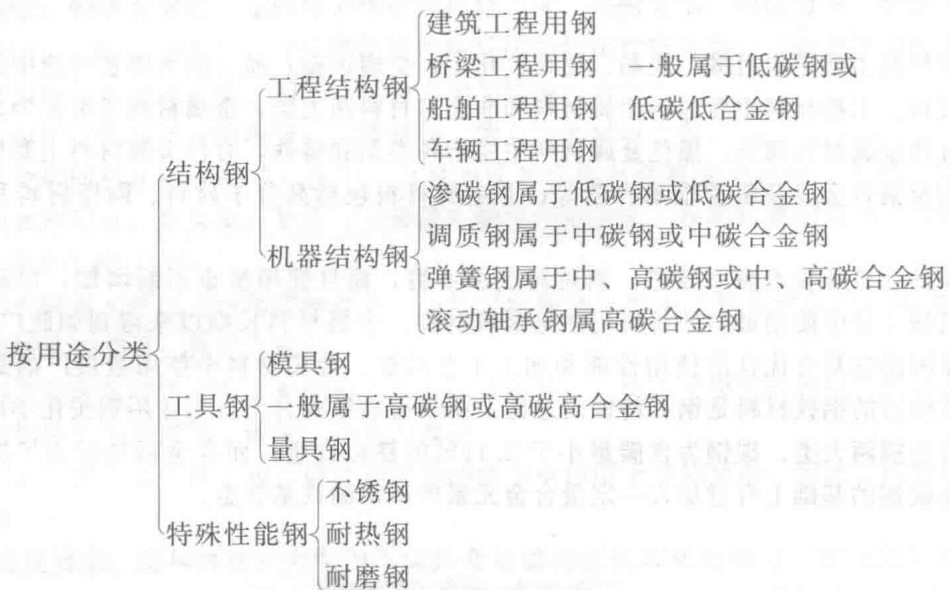
② 按钢的含碳量(质量分数)分为低碳钢(含碳量小于 0.25%)、中碳钢(含碳量在 0.25%和 0.6%之间)和高碳钢(含碳量大于 0.6%)。

③ 按钢中所含有害杂质硫、磷质量分数的多少,可分为普通钢 $S \leq 0.055\%$, $P \leq 0.045\%$; 优质钢 $S, P \leq 0.040\%$; 高级优质钢 $S \leq 0.030\%$, $P \leq 0.035\%$ 。

此外,按冶炼时脱氧程度,可将钢分为沸腾钢(脱氧不完全)、镇静钢(脱氧较完全)和半镇静钢三类。

④ 按钢的冶炼方法分为平炉钢和转炉钢。

⑤ 按钢的用途可分为结构钢、工具钢、特殊性能钢三大类,如下所示。



实际中给钢的产品命名时,常常把成分、质量和用途几种分类方法结合起来,如碳素结构钢、优质碳素结构钢、碳素工具钢、高级优质碳素工具钢、合金结构钢、合金工具钢等。

1.1.2 碳钢的牌号及用途

钢的牌号简称钢号,是对每一种具体钢产品所取的名称,是人们了解钢的一种共同语言。钢编号的原则主要有两条:一是根据编号可以大致看出该钢的成分;二是根据编号可大致看出该钢的用途。

我国钢的牌号表示方法,根据国家标准 GB/T 221—2008《钢铁产品牌号表示方法》中规定,采用汉语拼音字母、化学元素符号和阿拉伯数字相结合的方法表示。即:

① 钢号中化学元素采用国际化学符号表示,例如 Si、Mn、Cr 等,混合稀土元素用“RE”(或“Xt”)表示。

② 产品名称、用途、冶炼和浇注方法等,一般采用汉语拼音缩写字母表示。

③ 钢中主要化学元素含量(%)采用阿拉伯数字表示。

(1) 普通碳素结构钢

① 表示方法 普通碳结构钢表示方法采用代表屈服点的拼音字母“Q”、屈服点数值以

及规定的等级、脱氧方法等符号表示,按顺序组成牌号。例如 Q (屈服强度) 235 (屈服数值, MPa) A (质量等级) ……D (质量) F (沸腾钢) Z (镇静钢)。其中质量等级由 A~E, 磷、硫含量降低, 质量提高。碳素结构钢中表示镇静钢的符号“Z”和表示特殊镇静钢的符号“TZ”可以省略。如 Q235AF、Q235BZ 等。

② 分类

a. 甲类钢: A1、A2、…、A7 7 种。塑性好, 有一定的强度, 钢板、钢筋、型钢等。

b. 乙类钢: B1、B2、…、B7 7 种。塑性好, 有一定的强度, 钢板、钢筋、型钢等。

c. 特类钢: C1、C2、…、C5 5 种。塑性好, 有一定的强度, 钢板、钢筋、型钢等。

Q195、Q215、Q235 属低碳钢, 有良好的塑性和焊接性能, 并具有一定的强度, 通常轧成型材、板材和焊接钢管等用于桥梁、建筑等工程结构, 在机械制造中用作受力不大的零件, 如螺钉、螺母、垫圈、地脚螺钉、法兰以及不太重要的轴、拉杆等, 其中以 Q235 应用最广。Q235C、Q235D 质量好, 用作重要的焊接结构件。Q255、Q275 强度较高, 可用作受力较大的机械零件。碳素结构钢一般不进行热处理, 以供应状态直接使用, 但也可根据需要进行热加工和热处理。

(2) 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢的牌号以两位数字表示, 这两位数字表示钢的平均含碳量的万分之几。如“45”表示碳含量为 0.45%。

高级优质碳素结构钢则在优质钢牌号后加“A”, 如 45A 等。若 Mn 在 0.7%~1% 的碳素钢亦属于高级优质系列, 则数字后加“Mn”, 如 15Mn、60Mn 等。优质碳素结构钢的综合机械性能好, 可制造齿轮, 轴类等。

优质碳素结构钢随含碳量的增加, 其强度、硬度提高, 塑性、韧性降低。不同牌号的优质碳素结构钢具有不同的性能特点及用途。

08F 钢是一种含碳量很低的沸腾钢, 强度很低, 塑性很好。一般由钢厂轧成薄钢板或钢带供应, 主要用于制造冷冲压件, 如外壳、容器、罩子等。

10~25 钢属低碳钢, 强度、硬度低, 塑性、韧性好, 并具有良好的冷冲压性能和焊接性能。常用于制造冷冲压件和焊接构件, 以及受力不大、韧性要求高的机械零件, 如螺栓、螺钉、螺母、轴套、法兰盘、焊接容器等。还可用作尺寸不大, 形状简单的渗碳件。

30~55 钢属中碳钢, 经调质处理后, 具有良好的综合力学性能, 主要用于制造齿轮、连杆、轴类零件等, 其中以 45 钢应用最广。

60、65 钢属高碳钢, 经适当热处理后, 有较高的强度和弹性, 主要用于制作弹性零件和耐磨零件, 如弹簧、弹簧垫圈、轧辊等。

(3) 铸钢

铸钢的牌号表示方法以铸钢两个字拼音字母的第一个字母“ZG”和铸钢的平均含碳量的万分之几的两位数字按顺序组成牌号。如 ZG25 表示碳含量为 0.25% 的铸钢。铸钢的流动性差, 易生成魏氏组织, 降低钢塑性和韧性。

(4) 碳素工具钢

碳素工具钢的牌号用平均含碳量的千分数表示, 并在前冠以“T”。如 T12 表示含碳量 1.2%。

碳素工具钢一般以退火状态供应，使用时再进行适当的热处理。各种碳素工具钢淬火后的硬度相近，但随着碳含量的增加，未溶渗碳体增多，钢的耐磨性增加，而韧性降低。因此，T7、T8钢适于制造承受一定冲击而要求韧性较高的工具，如大锤、冲头、凿子、木工工具、剪刀等。T9、T10、T11钢用于制造冲击较小而要求高硬度和较高耐磨性的工具，如丝锥、板牙、小钻头、冷冲模、手工锯条等。T12、T13钢的硬度和耐磨性很高，但韧性较差，用于制造不受冲击的工具，如锉刀、刮刀、剃刀、量具等。

1.2 合金钢

由于碳钢在工业生产和应用中，性能主要有以下四方面的不足：

(1) 淬透性低

大尺寸和形状复杂件，不能保证性能均匀性和几何形状不变。

(2) 强度和屈强比较低

这使得工程结构和设备笨重，强度有效利用率低。

(3) 回火稳定性差

碳钢在调质时，为保证高强度，则回火温度应低些，造成韧性低。为保证较好韧性，而回火温度应高些时，强度又偏低。所以，碳钢综合机械性能水平不高。

(4) 不能满足某些特殊性能的要求

如：抗氧化、耐腐蚀、耐热等。

因此为了改善碳钢的性能，通常在冶炼时，有选择地向钢液中加入一些合金元素。合金元素在钢中可以两种形式存在：一种是溶解于碳钢原有的相中，另一种是形成某些碳钢中所没有的新相。在一般的合金化理论中，按与碳亲和力的大小，可将合金元素分为碳化物形成元素与非碳化物形成元素两大类。常用的合金元素有：①非碳化物形成元素：Ni、Co、Cu、Si、Al、N、B；②碳化物形成元素：Mn、Cr、Mo、W、V、Ti、Nb、Zr；③此外，还有稀土元素，一般用符号 Re 表示。

1.2.1 合金钢的分类

工业用合金钢的种类繁多，主要分类方法有以下几种。

①按所含合金元素多少分为低合金钢（总量低于5%）、中合金钢（总量在5%~10%）、高合金钢（高于10%）。

②按所含主要合金元素分为铬钢、铬镍钢、锰钢、硅锰钢。

③按正火或铸造状态组织分为珠光体钢、马氏体钢、铁素体钢、奥氏体钢、莱氏体钢。

④按用途分类主要分为结构钢、工具钢和特殊性能钢三类。其中结构钢有低合金结构钢、合金渗碳钢、合金调质钢、弹簧钢、轴承钢、易切削钢、超高强钢等几类；工具钢有刃具钢、模具钢、量具钢；特殊性能钢有不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。

1.2.2 合金钢的编号

(1) 合金结构钢

合金结构钢的牌号表示方法为“两位数字+合金元素符号+数字+质量等级符号A”。

① 当合金元素的平均含量 $<1.5\%$ 时，钢号中一般只标出元素符号，而不标明含量；但在特殊情况下易导致混淆者，在元素符号后亦可标以数字“1”，例如钢号“12CrMoV”和“12Cr1MoV”，前者铬含量为 $0.4\% \sim 0.6\%$ ，后者为 $0.9\% \sim 1.2\%$ ，其余成分全部相同。

② 当合金元素的平均含量 $\geq 1.5\%$ 、 $\geq 2.5\%$ 、 $\geq 3.5\%$ 、…时，则相应地在元素符号后面标以2、3、4、…；如果为高级优质钢，则在其钢号后加“A”，以区别于一般优质钢。例如：18Cr2Ni4WA。

③ 钢中的钒V、钛Ti、铝Al、硼B、稀土Re等合金元素，均属微合金元素，虽然含量很低，仍应在钢号中标出。例如20MnVB钢中，钒： $0.07\% \sim 0.12\%$ ，硼： $0.001\% \sim 0.005\%$ 。

④ 专门用途的合金结构钢，钢号冠以（或后缀）代表该钢种用途的符号。例如，铆螺专用的30CrMnSi钢，钢号表示为ML30CrMnSi。

(2) 低合金高强度结构钢

旧的编号方法，基本上和合金结构钢相同。新牌号的编制方法与碳素结构钢相同。如旧牌号的16Mn为新牌号的Q345。

(3) 滚动轴承钢

滚动轴承钢的牌号表示方法为：“G”+Cr+数字+其他元素符号。字母“G”为“滚”字头，表示为滚动轴承钢类，高碳铬轴承钢的含碳量不标出，数字表示平均含铬量的千分之几，如GCr15，平均含铬量为 1.5% 。

渗碳轴承钢的钢号表示方法，基本上和合金结构钢相同。

(4) 合金工具钢和高速工具钢

这两种钢的表示方法均为：数字+合金元素符号+数字。

说明：① 合金工具钢中，当 $C \geq 1.0\%$ 时，含碳量不标出，如Cr12、CrWMn；当 $C < 1.0\%$ 时，以千分之几表示，如9SiCr、3Cr2W8V。

② 对于含铬量低的钢，其含铬量以千分之几表示，并在数字前加“0”，以示区别。如平均 $Cr=0.6\%$ 的低铬工具钢的钢号为“Cr06”。

③ 高速钢，一般不标出含碳量，只标出合金元素平均含量的百分之几。如“钨18铬4钒”（W18Cr4V，简称18-4-1），“钨6钼5铬4钒2”（W6Mo5Cr4V2，简称6-5-4-2）。

(5) 不锈钢和耐热钢

不锈钢和耐热钢的牌号与合金工具钢几乎一样。例如：“2Cr13”钢的平均碳含量为 0.2% 。

说明：① 钢中含碳量 $\leq 0.03\%$ 者，钢号前分别冠以“00”表示之，如00Cr17Ni14Mo2； $C \leq 0.08\%$ 者，冠以“0”表示之，如0Cr18Ni9。

② 对钢中主要合金元素以百分之几表示；对钛、铌、锆、氮等微量元素则按合金结构

钢对微合金元素的表示方法，只标出元素符号，如 1Cr18Ni9Ti。

例如：20CrMnTi，表示平均含碳量为 0.20%，主要合金元素 Cr、Mn 含量均低于 1.5%，并含有微量元素 Ti 的合金结构钢；60Si2Mn，表示平均含碳量为 0.60%，主要合金元素 Mn 含量低于 1.5%，Si 含量为 1.5%~2.5% 的合金结构钢。

1.2.3 化工设备中常用的三类主要合金钢

(1) 合金结构钢

由于碳素结构钢的冶炼及加工工艺简单、成本低，这类钢的生产量在全部结构钢中占有很大比例。但随着工业和科学技术的发展，一般碳素结构钢难以满足重要机械构件和机器零件的需要，对于形状复杂、截面积较大、要求淬透性较好以及力学性能要求高的工件就必须采用合金结构钢制造。

合金结构钢按用途主要指低合金高强度结构钢，用于制作各种工程构件的钢称为工程结构钢，如制作房屋、桥梁、起重机机械、锅炉、压力容器、钻井架、车辆构件等，所以又称工程构件用钢或建筑工程用钢，包括碳素结构钢和低合金高强度结构钢。

该类钢的主要成分特点是含碳量较低 ($<0.2\%$)，保证该类钢具有良好的塑性。合金元素以 Mn 元素为主，强化铁素体基体，产生固溶强化；加入少量的 Ti、V、Nb、Re 等，细化晶粒，提高强韧性。合金结构钢的牌号表示方法：Q+数字+质量等级符号 (A、B、C、D、E)。

① 在 Q345 较低级别的钢中，16Mn 最具有代表性，是目前我国用量最多、产量最大的一种低合金高强度钢。其派生钢种有 16MnRe、16MnCu 等，Re 的主要作用是提高塑性和韧性，提高疲劳强度，降低冷脆转变温度，Cu 的主要作用是通过钝化提高耐蚀性。这类钢多用于船舶、车辆、桥梁等大型钢结构。

② 对 Q420 级的 15MnVN、14MnVTiRe 等，加入了钒、氮起到细化晶粒和第二相强化作用，稀土又起净化晶界作用，提高强韧性，因此强度高于 15MnTi。

③ Q460 级的钢种，如 14MnMoVBR，加入钼和微量硼元素，可推迟奥氏体冷却时的铁素体析出，而对贝氏体转变则影响不大，正火后得到贝氏体组织，然后再高温回火，以稳定组织，消除内应力，提高塑性和韧性，焊接性好，适于制造 400~500℃ 的锅炉、中温高压容器等。

(2) 机器结构钢

机器结构钢指用于制造各种机器零件，如轴类零件、齿轮、弹簧和轴承等所用的钢种，又称机器零件用钢，包括优质碳素结构钢和合金结构钢。

机器零件用钢不但要求钢材具有高的强度、塑性和韧性，良好的疲劳强度和耐磨性，而且还要求具有良好的切削加工性能和热处理工艺性能。机器零件用钢一般经过热处理后使用。

按用途不同，分为渗碳钢、调质钢、弹簧钢、轴承钢等。

① 渗碳钢 主要作于制作承受交变载荷、很大的接触应力，并在冲击和严重磨损条件下工作的零件，如汽车、重型机床齿轮、活塞销、内燃机的凸轮轴等。渗碳钢的性能“表硬心韧”，即零件表面硬度高、耐磨，心部则具有较高的韧性和足够的强度以承受冲击。一般渗碳件表面渗碳层淬火后硬度 $\geq 58\text{HRC}$ ，心部 35~45HRC。

渗碳钢的主要成分含碳量为 0.15%~0.25%，能够保证心部塑韧性，同时主加元素 Cr、Ni、Mn、B，强化基体，提高淬透性，保证心部强韧性；并微量元素 V、Ti、W、Mo，防止渗碳时过热，细化晶粒，提高耐磨性。

低淬透性渗碳钢，典型钢种 20、20Cr，其水淬临界直径 20~35mm，渗碳淬火后，心部强韧性较低，只适于制造受冲击载荷较小的耐磨零件，如活塞销、凸轮、滑块、小齿轮等。

中淬透性渗碳钢，典型钢种为 20CrMnTi，其油淬临界直径约为 25~60mm，主要用于制造承受中等载荷、要求足够冲击韧性和耐磨性的汽车、拖拉机齿轮等零件。

高淬透性渗碳钢，典型钢种为 18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4A，其油淬临界直径 >100mm，主要用于制造大截面积、高载荷的重要耐磨件，如飞机、坦克中的曲轴、大模数齿轮等。

化工设备中常用牌号为 15、20、20Cr、20CrMnTi、20MnTiB 等，通常尺寸小、受力小的零件，采用低碳钢，而尺寸大的、受力大的则采用低碳合金钢。

② 调质钢 采用调质处理，即淬火+高温回火后使用的优质碳素钢和合金结构钢，统称为调质钢。常用于受力较复杂的重要结构零件。如机床主轴、火车发动机曲轴、汽车后桥半轴等轴类零件，以及连杆、螺栓、齿轮等。调质钢具有良好的综合力学性能，即高的强度、良好塑性和韧性。

调质钢碳含量一般为 0.25%~0.5%，保证热处理后具有足够的强度、良好的塑性和韧性。含碳量太低，强度硬度不足；太高，塑性、韧性降低；为达到两者兼顾，取中碳范围。一般碳素调质钢的淬透性低，含碳量偏上限；合金调质钢淬透性好，随合金元素的增加，含碳量趋于下限，如 30CrMnSi、38CrMoAl。调质钢中通常加入合金元素 Cr、Ni、Mn、Si、Al 等，提高淬透性，保证调质处理后有良好的综合力学性能；并少量加入 W、Mo 元素，防止高温回火脆性，细化晶粒，提高回火稳定性。

调质钢按淬透性的高低，大致可以分为：a. 低淬透性调质钢。典型钢种 45、40Cr，这类钢的油淬临界直径最大为 30~40mm，广泛用于制造一般尺寸的重要零件，如轴、齿轮、连杆螺栓等。35SiMn、40MnB 是为节约铬而发展的代用钢种。b. 中淬透性调质钢。典型钢种 40CrNi，这类钢的油淬临界直径最大为 40~60mm，含有较多的合金元素，用于制造截面积较大、承受较重载荷的零件，如曲轴、连杆等。c. 高淬透性调质钢。典型钢种 40CrNiMoA，这类钢的油淬临界直径为 60~100mm，多半为铬镍钢。铬、镍的适当配合，可大大提高淬透性，并能获得比较优良的综合机械性能。用于制造大截面积、承受重负荷的重要零件，如汽轮机主轴、压力机曲轴、航空发动机曲轴等。

③ 弹簧钢 弹簧钢常常用于制造汽车、拖拉机和火车的板弹簧或螺旋弹簧。具有高的弹性极限和屈强比，高的疲劳强度和足够的塑性、韧性。

弹簧钢的含碳量为 0.45%~0.70%，多数 0.6% 左右，为中、高碳。含碳量过高，塑性和韧性降低，疲劳极限也下降。加入合金元素 Mn、Si，提高淬透性，提高强度及屈强比；少量加入元素 W、Mo、V 等，进一步提高淬透性，细化晶粒，提高回火稳定性和耐热性。化工设备中常用弹簧钢为 65Mn、60Si2Mn、50CrVA。

④ 滚动轴承钢 滚动轴承钢指用于制作各类滚动轴承的内外套圈、滚动体。化工设备中常用钢种有两大类。

a. 高碳铬轴承钢：GCr15、GCr15SiMn，其含碳量为 0.95%~1.15%，高碳，过共析成分，保证形成足够铬的碳化物强化相，提高强度、硬度及耐磨性。加入合金 Cr 元素，提高淬透性和接触疲劳抗力，细化晶粒。对大尺寸轴承，加入 Si、Mn 进一步提高淬透性。从化学成分看，滚动轴承钢属于工具钢范畴，所以这类钢也经常用于制造各种精密量具、冷冲模

具、丝杠、冷轧辊和高精度的轴类等耐磨零件。

b. 高碳无铬轴承钢：为了节铬，加入了 Mo、V 得到的，常用牌号 GMnMoVRE、GSiMnMoV，其性能与 GCr15 相近。

(3) 特殊性能钢

特殊性能钢指具有特殊物理化学力学性能的钢，如不锈钢、耐热钢、低温钢、耐磨钢。本书主要介绍在化工设备中常用的不锈钢和耐热钢。

① 不锈钢 通常所说的不锈钢是不锈钢和耐酸钢的总称。不锈钢是指能抵抗大气腐蚀的钢；耐酸钢是指能抵抗化学介质腐蚀的钢。“不锈”只是说腐蚀的速度相对较慢，没有绝对不受腐蚀的钢种。所以，“不锈”是相对的，“腐蚀”才是绝对的。

a. 腐蚀原理。腐蚀指金属表面与周围介质相互作用，使金属基体受到破坏的现象。根据腐蚀的原理不同，分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类。

化学腐蚀是指金属与周围介质直接接触产生化学反应而产生的腐蚀。腐蚀过程中无电流产生，如金属在高温下的氧化，产生的腐蚀产物是氧化皮。金属被腐蚀产生的腐蚀产物一般沉积于表面，形成一层膜，使金属基体与介质隔离。如果膜是稳定的、很致密，与基体结合牢固，则该膜具有保护作用，称之为氧化膜。反之，将使金属逐渐被腐蚀直至破坏。因而，提高金属耐化学腐蚀的能力，主要通过合金化或其他方法，使金属表面形成一层钝化膜。

电化学腐蚀是金属与电解溶液接触产生原电池作用引起的腐蚀现象。由阴极和阳极形成微电池，腐蚀过程中有电流产生，如钢在室温下的锈蚀主要属于电化学腐蚀。电极电位低的金属作为阳极而被腐蚀。

在同一种金属或合金中，也有可能产生电化学腐蚀。这主要是由于化学成分不均匀，组织状态和应力状态等的不同而引起的。同一金属内部、不同区域之间存在电极电位差，在电解质存在时，产生微电池作用引起腐蚀。例如，钢中珠光体由铁素体和渗碳体两相组成，铁素体的电极电位低于渗碳体。当电解质溶液（如硝酸酒精溶液）存在时，铁素体作为阳极被腐蚀。而渗碳体的电极电位高，为阴极而不被腐蚀。如图 1-1 所示。

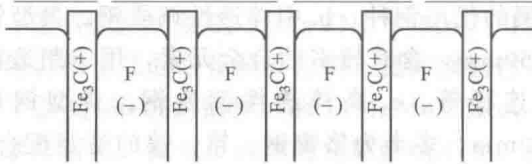


图 1-1 珠光体腐蚀示意图

F—阳极，电极电位低，失去电子被腐蚀；

Fe₃C—阴极，电极电位高，不腐蚀

b. 防腐蚀的措施。不锈钢防腐蚀的措施主要是合金化，即添加 Cr、Ni、Si、Al、Mo、Ti、Nb 等合金元素。

加入 Cr 元素，提高基体的电极电位。当铬含量为 12% 左右时，合金的电极电位由 $-0.56\text{V} \rightarrow +0.2\text{V}$ ，不锈钢中铬的含量都在 12% 以上。使钢在使用态为单相组织，避免形成微电池。加入 Cr、Si、Al 等形成致密氧化膜，基体与环境隔绝，提高耐蚀性。主要有 Cr₂O₃、SiO₂、Al₂O₃。Ti、Nb 等形成稳定碳化物或金属间化合物，避免晶界贫铬。

c. 常用不锈钢及用途。常用的不锈钢根据其组织特点，可分为马氏体不锈钢、铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢三种类型。

马氏体型不锈钢含碳量为 0.1%~1.0%，铬元素含量为 12%~18%。马氏体不锈钢淬透性好，空冷可到马氏体。化工设备中常用的牌号为 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13。1Cr13、2Cr13 经调质处理后，具有良好的综合力学性能，抗大气、蒸气等介质腐蚀的能力