



智能化融媒体新形态教材

机械制造基础

主 编 刘瑞鹏 曹亚伟 杨英琴

北京工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础 / 刘瑞鹏, 曹亚伟, 杨英琴主编.
北京: 北京工业大学出版社, 2025. 7. -- (智能化融媒体新形态教材). -- ISBN 978-7-5639-8854-9

I. TH

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025 QZ0053 号

机械制造基础

JIXIE ZHIZAO JICHU

主 编: 刘瑞鹏 曹亚伟 杨英琴

责任编辑: 邢蕊峰

封面设计: 杨 楠

出版发行: 北京工业大学出版社 <http://press.bjut.edu.cn>
(北京市朝阳区平乐园 100 号 邮编: 100124)
010-67391722 bgdcbs@bjut.edu.cn

经销单位: 全国各地新华书店

承印单位: 廊坊市广阳区九洲印刷厂

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张: 13

字 数: 341 千字

版 次: 2025 年 7 月第 1 版

印 次: 2025 年 7 月第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-5639-8854-9

定 价: 49.80 元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题, 请寄本社发行部调换 010-67391106)

前 言

本教材根据“双高计划”课程改革建设的需要，以学生为中心，按照学生的认知方式以及学科的内在逻辑编写而成；以能力为基础，将形成能力所需的知识、技能、态度等要素进行有序的组织与整合。书中涉及的能力中心课程范式以强化职业岗位能力和工作技术能力的实用性和精准性为核心，聚焦于将与能力目标紧密关联的知识体系、技能训练等内容有效整合进课程体系中，通过模块化的教学模式，确保教学内容可直接应用且具有针对性，旨在培养能够迅速适应并胜任特定职业岗位需求的专门人才。

本教材分为五章，分别为金属材料、非金属材料与新型材料、机械零件的毛坯制造技术、金属切削加工、先进制造技术。其中涵盖的内容不仅构成了机械制造大类专业不可或缺的坚固基石，更在生产一线能够直接转化为生产力的关键技术知识。本教材从专业教学的高标准出发，紧密结合职业岗位的实际需求，力求在教学内容的深度和广度之间寻找一个完美的平衡点。它巧妙地融合了理论深度与实践应用的广度，既保证了专业知识的系统性和完整性，又突出了技术在实际操作中的可行性和有效性。

在深度上，本教材深入挖掘了机械制造领域的核心知识与技术原理，确保学生能够掌握扎实的基础理论，为后续深入学习打下坚实的基础。同时通过引入前沿的学术成果和行业趋势，使教学内容保持先进性和前瞻性，激发学生的创新思维和探索精神。

在广度上，本教材广泛涵盖了机械制造过程中各个环节的关键技术，从材料选择、工艺设计到设备操作、质量控制等。这种全面的知识体系不仅有助于学生建立对机械制造全过程的宏观认识，更能够提升他们在未来工作中面对复杂问题时的综合分析和解决的能力。

培养技术应用型人才作为当代教育教学改革的核心任务之一，是一项既复杂又充满挑战的系统性工程。它不仅要求教育机构在课程设置、教学方法、实践环节等多个方面进行全面而深入的革新，更强调对教材内容的精挑细选与持续优化，以确保学生能够获得扎实的前沿知识与技能，从而满足社会对技术应用型人才的迫切需求。



本教材在编纂过程中，虽然力求内容的准确性、科学性和实用性，但受学识所限，难免存在疏漏或不足之处，期待读者不吝赐教，提出宝贵的意见和建议。

编 者

目 录

第一章 金属材料	1
第一节 金属材料的性能.....	2
一、金属材料的力学性能.....	2
二、金属材料的物理、化学和工艺性能.....	7
第二节 常用金属材料.....	8
一、钢.....	9
二、铸铁.....	21
三、有色金属.....	33
复习思考题.....	39
第二章 非金属材料与新型材料	40
第一节 非金属材料.....	41
一、高分子材料.....	41
二、陶瓷材料.....	48
第二节 新型材料.....	50
一、复合材料.....	50
二、功能材料.....	52
三、功能梯度材料.....	53
四、理想材料.....	53
五、纳米材料.....	53
复习思考题.....	54
第三章 机械零件的毛坯制造技术	55
第一节 铸造.....	56
一、铸造工艺基础.....	56
二、铸造方法.....	60
第二节 焊接.....	73
一、焊接工艺基础.....	74
二、焊接方法.....	85
第三节 锻压.....	95
一、金属的塑性变形.....	95



二、锻压方法·····	97
复习思考题·····	116
第四章 金属切削加工·····	120
第一节 金属切削加工基础·····	121
一、切削运动及切削要素·····	121
二、刀具·····	123
第二节 车削加工·····	129
一、车削基础知识·····	130
二、车床·····	130
三、车削加工基本操作·····	135
第三节 铣削加工·····	141
一、铣削基础知识·····	141
二、铣床·····	143
三、铣削·····	146
第四节 刨削加工·····	149
一、刨削基础知识·····	149
二、刨床·····	151
三、刨削加工基本操作·····	154
第五节 磨削加工·····	156
一、磨削基础知识·····	156
二、磨床·····	158
三、磨削基本操作·····	161
第六节 钻削加工·····	164
一、钻床·····	164
二、钻孔·····	166
三、扩孔·····	168
四、铰孔·····	169
复习思考题·····	171
第五章 先进制造技术·····	172
第一节 数控加工简介·····	173
一、数控加工基础知识·····	173
二、编程基础·····	177
第二节 电火花线切割加工简介·····	189
一、电火花线切割机床的编程操作与加工·····	189
二、加工实训·····	197
复习思考题·····	201
参考文献·····	202

第一章 金属材料

金属材料因具有良好的力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能，所以成为机器零件最常用的材料。本章主要介绍常用金属材料的性能及结构的基础知识，为后续学习打下理论基础。

知识目标

了解弹性、强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度的概念；
了解金属的晶体结构和结晶的概念；
熟悉铁碳合金的基本组织和相图。

能力目标

具备分析钢的成分、组织与性能之间关系的能力。

知识拓展

中国古代的机械技术

在中国，机械拥有悠久的创造、发展及使用历史。3 000 年前出现了简单的纺织机，2 000 年前人们已将绳轮、凸轮、连杆机构等用于生产。汉代以后的指南车及记里鼓车利用了齿轮和齿轮系传动的原理。据《后汉书·杜诗传》记载，公元 31 年，东汉劳动人民已发明并利用水排鼓风炼铁。

请查阅资料，概述中国古代的机械技术。





第一节 金属材料的性能

金属材料的特性可划分为应用特性和加工特性两大类。应用特性指材料在服役过程中表现出的本质属性，这些属性直接制约着材料的适用范围、运行稳定性及有效服役周期，具体涵盖机械特性、物理特性与化学特性三个维度。加工特性则体现为材料在成形制造过程中呈现的适应性特征，是评估材料可加工性及确定加工方案的关键要素。

在机械构件选材与制造过程中，机械特性和加工特性构成主要考量因素。对于特殊工况下运行的零部件，还需额外关注其物理特性与化学特性。

一、金属材料的力学性能

金属的机械特性表征材料承受外力作用时的响应特征，构成材料选型、构件设计、工艺评估及质量检测的核心参数体系。

不同金属材料展现的机械特性存在显著差异，其核心评价指标包括弹性模量、强度极限、延展性、硬度、冲击韧性及疲劳极限等关键参数。

（一）弹性、强度与塑性

金属材料的强度、弹性与塑性一般可通过拉伸试验来测定。

拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。试验时，先将被测金属材料制成标准试样[参见《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)]，然后在试样的两端逐渐施加轴向载荷，直到试样被拉断为止。

1. 拉伸曲线

图 1-1 为低碳钢的拉伸曲线。由图可见，低碳钢试样在拉伸过程中，可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

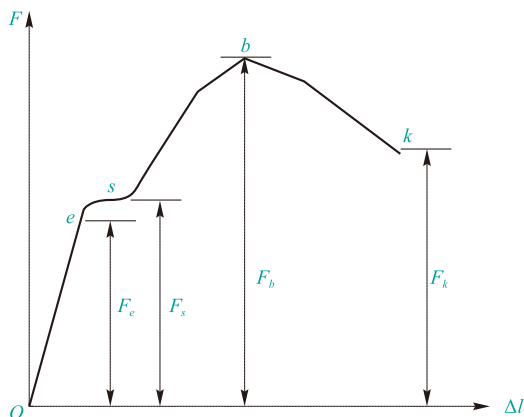


图 1-1 低碳钢的拉伸曲线

当外加载荷未超过 F_e 值时,拉伸曲线 Oe 段呈现线性关系,说明试样伸长量与载荷呈正比例关系,严格遵循胡克定律,此时材料处于纯弹性形变阶段。载荷突破 F_e 临界点后,试样在弹性形变基础上开始叠加塑性形变。当载荷达到 F_s 屈服点时,材料进入显著塑性变形阶段,拉伸曲线出现水平或锯齿状平台,该现象被定义为屈服效应。随着载荷持续增大至峰值 F_b ,试样局部区域发生截面收缩,形成颈缩现象。由于颈缩区域截面积持续缩减,承载能力逐步下降,最终在拉伸曲线 k 点位置发生断裂。

为使曲线能够直接反映出材料的力学性能,可用应力 σ (试样单位横截面上的拉力, $\sigma = \frac{4F}{\pi d_0^2}$)代替载荷 F ,以应变 ε (试样单位长度上的伸长量, $\Delta l/l$)取代伸长量 Δl 。由此绘成的曲线,称作应力-应变曲线。 σ - ε 曲线和 F - Δl 曲线形状相同,仅是坐标的含义不同。

2. 弹性

在拉伸图上, e 点是弹性变形的最大极限,以该点的应力值 σ_e 作为弹性指标,称为弹性极限。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中, F_e 为试样在不产生塑性变形时的最大载荷(N); A_0 为试样的原始横截面积(mm^2)。

弹性极限表征材料保持纯弹性形变的最大应力阈值,故对不允许存在微量塑性变形的工程部件具有关键意义。

3. 强度

强度指标反映材料在静载条件下抵抗塑性变形与断裂的能力,依据载荷的作用形式可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度及抗剪强度等。工程实践中,屈服强度与抗拉强度构成最核心的力学性能参数。

(1) 屈服点 σ_s 。它是拉伸试样产生屈服现象时的应力。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中, F_s 为试样产生屈服时所承受的最大载荷(N)。

对于许多没有明显屈服现象的金属材料,工程上规定以试样产生0.2%塑性变形时的应力作为该材料的屈服点应力,称为条件屈服点应力,用 $\sigma_{r0.2}$ 表示,如图1-2所示。

(2) 抗拉强度 σ_b 。它是金属材料在拉断前所能承受的最大应力。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中, F_b 为试样在拉断前所承受的最大载荷(N)。

屈服点 σ_s 和抗拉强度 σ_b 在选择、评定金属材料及设计机械零件时具有重要意义。由于机械零件或构件工作时,通常不允许发生塑性变形,因此多以 σ_s 作为强度设计的依据;对于脆性材料,因断裂前基本不发生塑性变形,故无屈服点可言,在强度计算时,则以 σ_b 为依据。

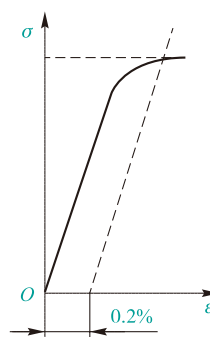


图 1-2 条件屈服点示意图



4. 塑性

塑性表征金属材料发生永久形变而不破裂的能力，通常采用延伸率 δ 与断面收缩率 ψ 作为塑性优劣的量化指标。

(1) 伸长率。伸长率是指试样拉断后标距增长量与原始标距之比，即：

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中， l_k 为试样断裂后的标距； l_0 为试样原始标距。

必须指出，伸长率的数值与试样尺寸有关，因此，用长试样（ $l_0/d_0=10$ 的试样）、短试样（ $l_0/d_0=5$ 的试样）求得的伸长率分别以 δ_{10} （或 δ ）和 δ_5 表示。

(2) 断面收缩率。断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比，即：

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$$

式中， A_k 为断裂后试样颈缩处面积（ mm^2 ）。

δ 和 ψ 值越大，材料的塑性越好。良好的塑性是金属材料进行轧制、锻造、冲压、焊接的必要条件，如果在使用时超载，会因材料发生塑性变形而避免零件突然断裂。

(二) 硬度

金属材料抵抗更硬的物体压入其内的能力，称为硬度。它是衡量材料软硬的一个指标。硬度是材料性能的一个综合物理量，表示金属材料在一个小的体积范围内抵抗弹性变形、塑性变形或断裂的能力。一般来说，硬度越高，耐磨性越好，强度也越高。

金属材料的硬度是在硬度计上测定的。常用的测定方法有布氏硬度法和洛氏硬度法，有时还用维氏硬度法。

1. 布氏硬度

布氏硬度的测试原理如图 1-3 所示。用一定直径的淬火钢球或硬质合金球，在一定压力下压入试样表面，并保持压力至规定时间后卸载，然后测得压痕直径 d ，据此计算出压痕表面积，进而得到所承受的平均应力值，该值即布氏硬度值 HB。

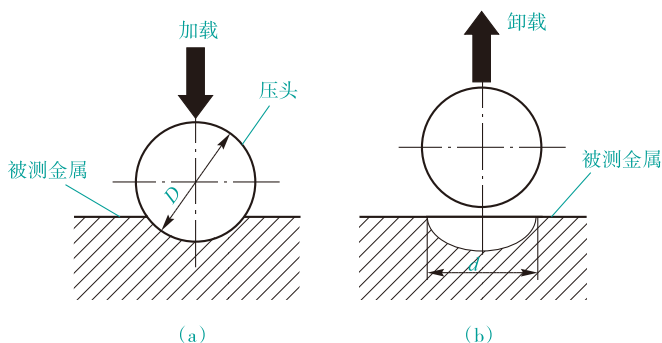


图 1-3 布氏硬度的试验原理

具体试验时，HB 值一般不需计算，而是卸载后用带有刻度的放大镜测出被测金属上压痕

的直径 d ，然后按已知的 F （试验压力）、 D （压头直径）值查表求得。当压头为钢球时，用HBS表示；当压头为硬质合金球时，用HBW表示。

布氏硬度法因压痕面积大，故测试数据重复性好，且与强度之间有良好的对应关系。但同时因其压痕面积大而不适宜测试产品零件及薄而小的零件，也因其测试过硬的材料可能会导致压头变形而不适宜测试硬度太高的零件。此外，还因其测试过程相对较费时，故也不适合大批量生产的零件的检验。

淬火钢球适宜于布氏硬度在450 HBW以下的零件，硬质合金球适宜于布氏硬度在450～650 HBW的零件。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度的测试原理如图1-4所示。用一个锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体或一具有特定直径的钢球为压头，在规定载荷作用下压入被测金属表面，卸载后根据压痕深度 h 来确定其硬度值，用符号HR表示。在实际测试时，可在硬度计上直接读出其硬度值。

为了能用同一硬度计测定从极软到极硬材料的硬度，可采用不同的压头和载荷，以组成HRA、HRB、HRC三种不同的标尺。表1-1为这三种标尺的试验条件和应用范围。

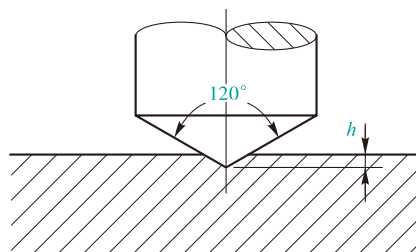


图 1-4 洛氏硬度的试验原理

表 1-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件和应用范围

洛氏硬度	压头类型	总载荷/N	测量范围	应用范围
HRA	120° 金刚石圆锥体	588.4	70～85 HRA	高硬度表面、硬质合金
HRB	$\phi 1.588$ mm 淬火钢球	980.7	20～100 HRB	软钢、灰铸铁、有色金属
HRC	120° 金刚石圆锥体	1471	20～67 HRC	一般淬火钢件

洛氏硬度测试简单、迅速，因其压痕小，可用于成品检验。它的缺点是测得的硬度值重复性较差，这对存在偏析或组织不均匀的被测金属尤为明显。为此，必须在不同的部位测量数次并取其平均值。

3. 维氏硬度

洛氏硬度测试法虽能通过不同标尺覆盖软质至硬质金属的硬度检测，但各标尺间缺乏简便的换算关系，实际应用存在局限性。为满足单一标尺覆盖全硬度范围的需求，维氏硬度检测方法应运而生。

维氏硬度的测试原理（图1-5）与布氏硬度法具有同源性，采用两相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥压头，在特定载荷 F 作用下压入被测金属表面，经规定保载时间后卸除载荷。通过测量压痕投影对角线平均长度 d ，计算压痕表面积 S ，最终以单位面积承受的平均压力值作为硬度表征，记作HV。

维氏硬度检测技术具备载荷小、压痕浅的优势，特别适用于表层硬化处理（如淬硬层）及化学热处理表面（渗碳层、渗氮层等）的硬度测定。其连续统一的标度体系允许自由选择测试



载荷而不影响硬度值的准确性，从而实现从超软到极硬材料的全范围检测。但该方法的测试流程相对烦琐，检测效率低于洛氏硬度法。

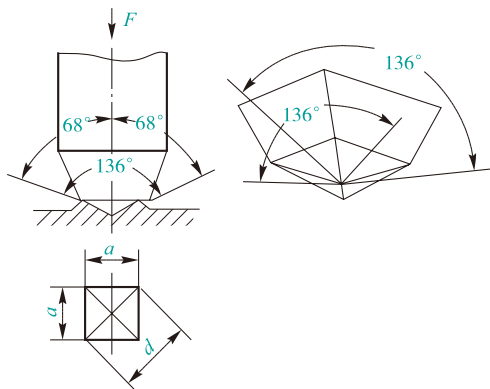


图 1-5 维氏硬度的测试原理

由于各种硬度的试验条件不同，故相互间无理论换算关系。但通过实践发现，在一定条件下存在着某种粗略的经验换算关系。例如：在 200 ~ 600 HBW， $HRC \approx 1/10 HBW$ ；在小于 450 HBW 时， $HBW \approx HV$ 。同时，硬度和强度之间有一定的换算关系，故在零件图的技术条件中，通常标注硬度要求。

(三) 冲击韧性

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力叫作冲击韧性。

冲击韧性通常采用摆锤式冲击试验机测定，如图 1-6 所示。测定时，一般是将带缺口的准冲击试样 [参见《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB/T 229—2020)] 放在试验机上，然后用摆锤将其一次冲断，以试样缺口处单位截面积上所吸收的冲击功表示其冲击韧性，即：

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

式中， a_k 为冲击韧性值。根据试样缺口形状不同，有 a_{kV} 、 a_{kU} 两种表示方法。 A_k 为冲断试样所消耗的冲击功 (J)； A 为试样缺口处的截面积 (cm^2)。

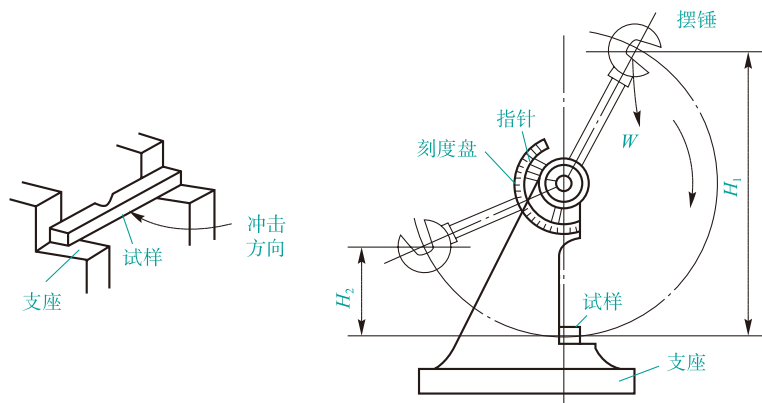


图 1-6 冲击试验原理

对于脆性材料（铸铁等）的冲击试验，试样一般不开缺口，因为开缺口的试样冲击值过低，难以比较不同材料冲击性能的差异。

a_k 值越低，表示材料的冲击韧性越差。材料的冲击韧性与塑性之间有一定的联系， a_k 值高的材料，一般都具有较高的塑性指标。但塑性好的材料，其 a_k 值不一定高。这是因为在静载荷作用下能充分变形的材料，在冲击载荷作用下不一定能迅速地进行塑性变形。

冲击值的大小与很多因素有关。它不仅受试样形状、表面粗糙度、内部组织的影响，还与试验时的环境温度有关。因此，冲击值一般作为选择材料的参考，不直接用于强度计算。

在冲击载荷环境中运行的机械部件，极少因单次大能量冲击失效，多数破坏源于小能量反复冲击的累积效应。实验数据表明：材料抵抗低能量多次冲击的能力主要与其强度指标相关，而非传统认为的冲击韧性参数。

（四）疲劳强度

工程领域诸多关键部件（如内燃机曲轴、传动齿轮、弹性元件及滚动轴承等）长期处于交变载荷作用的环境中。

这类构件在服役过程中，即便承受的循环应力远低于材料强度极限，仍可能发生无预警断裂，该现象称为疲劳失效。与静载断裂不同，无论材料本身呈现脆性或塑性特征，疲劳失效均呈现突发性，断裂前无明显塑性变形征兆，具有较高的安全隐患。

金属材料在无数次循环载荷作用下而不致引起断裂的应力，叫疲劳强度。当应力按正弦曲线对称循环时，疲劳强度以符号 σ_{-1} 表示。

鉴于实际测试无法实现无限次应力循环，工程规范为不同金属材料设定了特定循环基数。钢铁材料通常采用 10^7 次作为循环基数，若达到该次数未发生疲劳断裂，则判定其具备无限寿命特性。对于有色金属合金及部分超高强度钢种，则普遍采用 10^8 次作为循环基数。

普遍认为材料内部夹杂物、表面微痕等应力集中源的存在，会引发微观裂纹的萌生。此类微裂纹在循环应力作用下持续扩展，导致构件有效承载面积逐步缩减，最终因剩余截面无法承受载荷而发生瞬时断裂。

为提高零件的疲劳强度，可采用的方法有以下三种。

- （1）设计上：尽量避免应力集中，如避免断面急剧变化。
- （2）工艺上：降低零件表面粗糙度，并避免表面划痕；采用表面强化处理，如喷丸处理、表面淬火等。
- （3）材料方面：保证冶金质量，减少杂质、疏松等缺陷。

二、金属材料的物理、化学和工艺性能

（一）金属材料的物理性能

物理性能表征金属材料对温度变化、重力作用等物理现象的反应特性，主要包括密度、熔融温度、热膨胀系数、导热系数、导电特性及磁学性能等指标。不同机械部件根据功能需求对物理性能有差异化要求，例如航空部件多采用低密度铝镁钛合金，而电机电器元件设计则需重点考量材料的导电性能。



金属材料的物理特性对加工工艺有显著影响。例如：高速钢因导热性能较弱，锻造时需采用缓慢加热工艺以防止裂纹产生；材料的导热系数直接影响切削刀具的温度变化。不同熔点的材料（如锡基轴承合金、铸铁与铸钢）需匹配差异化的熔炼设备与铸型材料。

（二）金属材料的化学性能

化学性能反映金属在常温或高温环境中抵抗化学侵蚀的能力，涵盖耐酸性、耐碱性及抗氧化性等指标。

处于腐蚀介质或高温工况的机械部件，其腐蚀速率显著高于常规环境，设计时需优先选用化学稳定性优异的合金材料。典型应用包括采用不锈钢制造化工容器与医疗器械，选用耐热钢生产内燃机排气阀及电站高温部件。

（三）金属材料的工艺性能

工艺性能指材料适应制造流程的特性，具体包含铸造性能、可锻性、焊接性能及切削加工性等。

构件设计与工艺选择需重点考量材料的工艺适应性。例如：灰铸铁因卓越的铸造性能被广泛用于铸件生产，但其可锻性极低，无法进行锻造加工，焊接性能也相对较弱；低碳钢凭借优良的焊接特性成为焊接结构的首选材料，而高碳钢则因焊接性能缺陷应用受限。

第二节 常用金属材料

材料是人类生产和社会发展的重要物质基础。其中，金属材料一直以来都发挥着非常重要的作用，尤其是对机械类行业更是如此。

金属材料主要包括工业用钢、铸铁和有色金属三类。

钢是以铁为基体、碳含量通常低于 2% 并含有其他元素的金属材料。碳素钢因成本优势、工艺适应性强及力学性能满足常规工程需求，成为工业领域应用最广的金属材料。为提升力学性能、优化工艺特性或获得特殊物理化学性能，通过添加特定合金元素形成合金钢，以满足现代工业对材料性能的更高要求。

与碳钢相比，合金钢经过合理的加工处理后能够获得较高的力学性能，有的还具有耐热、耐酸、抗蚀等特殊物理化学性能。但其价格较高，某些加工工艺性能较差，某些专用钢只能应用于特定的工作条件。因此应正确选用各类钢材，合理制定其冷热加工工艺，以达到提高效能、延长寿命、节约材料、降低成本、产生良好经济效益的目的。

工业上常用的铸铁是碳的质量分数为 2.5% ~ 3.5% 的铁、碳、硅多元合金。为提升物理化学性能，铸铁中可添加合金元素形成合金铸铁。铸铁在机械制造领域应用广泛，按质量占比统计，汽车、拖拉机中铸铁件占 50% ~ 70%，机床设备中铸铁件占 60% ~ 90%。机床床身、工作台、箱体及底座等复杂结构件，或承受压应力与摩擦的部件，多采用铸铁制造。

非铁基金属统称为有色金属材料，与铁基金属相比，其产量较低且成本较高，但凭借独特

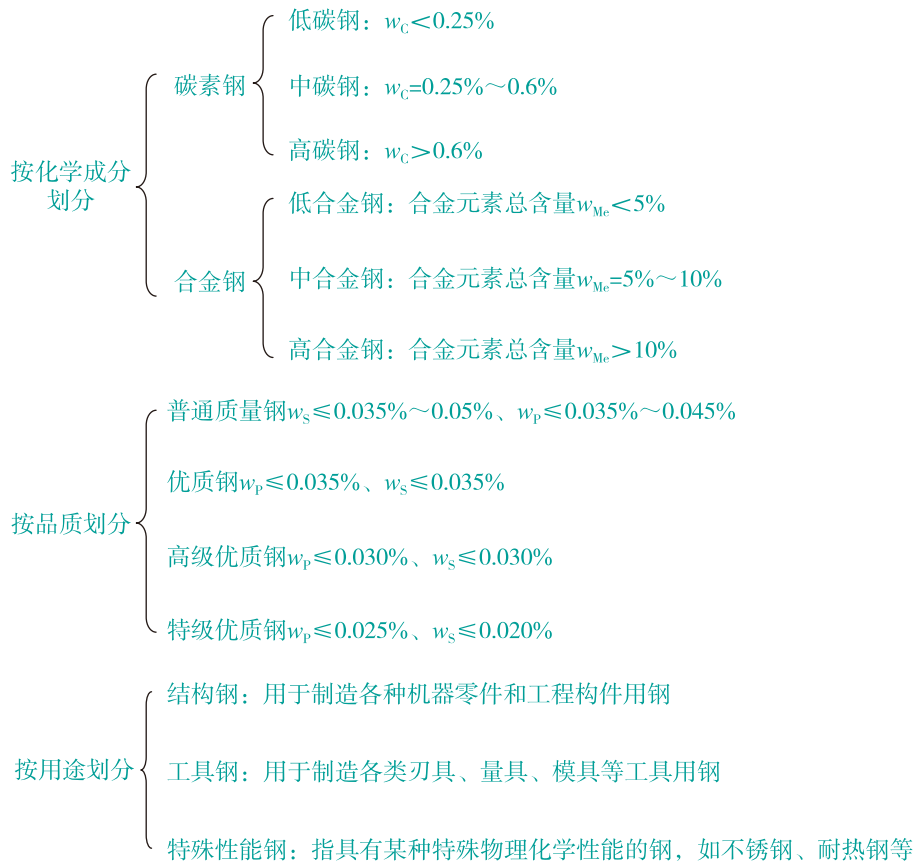
的性能优势在科技与工程领域占据重要地位。

一、钢

(一) 钢的概述

1. 钢的分类

钢的种类很多, 为了便于管理、选用及研究, 可以从不同角度将钢分成若干类别。常用的分类方法有以下三种。



2. 钢中常存元素对性能的影响

碳钢中除碳外, 还含有少量的锰、硅、硫、磷等常存元素。这些元素是由矿石及冶炼等原因进入钢中的。它们的存在对钢的性能有较大的影响。

(1) 锰: 锰是一种有益元素。锰具有很好的脱氧能力, 因此能够清除钢中的 FeO , 进而大大改善钢的品质。锰能溶解于铁素体和渗碳体中, 形成合金固溶体和合金渗碳体, 从而提高钢的强度和硬度。当锰作为少量常存元素存在时 ($w_{Mn} < 0.8\%$), 对钢的性能影响不显著。

(2) 硅: 硅也是一种有益元素。硅的脱氧能力比锰强, 此外它也能溶于铁素体中, 产生固溶强化, 使铁素体的强度和硬度得以提高。但硅在钢中作为少量常存元素存在时 ($w_{Si} < 0.37\%$), 对钢的性能影响也不显著。



(3) 硫: 硫在铁素体中几乎不能溶解, 而是以 FeS 的形态存在于钢中。当钢材在 $800 \sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行锻造成形时, 容易发生脆性断裂, 为了消除硫的有害作用, 必须在钢中加入锰。锰可以和硫形成高熔点 ($1620\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的 MnS, 以减轻硫的有害作用, 改善钢的热加工性能。

(4) 磷: 磷也是钢中的有害元素, 磷在钢中可全部溶解于铁素体, 使钢的强度、硬度有所提高, 但塑性、韧性急剧降低。这种脆化现象在低温时尤其严重, 故称为冷脆性。此外, 磷的存在还使钢的焊接工艺性能变差。

3. 合金元素在钢中的作用和存在形式

为了改善钢的力学性能或获得某些特殊性能, 会有目的地在冶炼钢的过程中加入一些元素, 这些元素称为合金元素。通过合金化, 可提高和改善钢的性能。

合金元素在钢中的存在形式主要有合金铁素体和合金碳化物。

(1) 形成合金铁素体。几乎所有合金元素都可或多或少地溶入铁素体中, 形成合金铁素体。

合金元素溶入铁素体后, 使铁素体的强度、硬度提高, 但塑性、韧性有所下降。

(2) 形成合金碳化物。钢中能形成碳化物的元素有铁、锰、铬、钼、钨、钒、铌、锆、钛 (与碳的亲合力由弱到强)。合金钢中碳化物的存在形式为合金渗碳体和特殊碳化物。

锰是弱碳化物形成元素, 易溶入渗碳体中, 形成合金渗碳体, 合金渗碳体的稳定性、硬度比渗碳体略高, 是一般低合金钢中碳化物的主要存在形式。

铬、钼、钨作为中等碳化物形成元素, 在钢中既可生成合金渗碳体, 也能形成 Cr_2C_3 、 Mo_2C 、 WC 等特殊碳化物, 后者具备更高熔点、硬度、耐磨性及热稳定性。钒、铌、锆、钛属强碳化物形成元素, 通常生成特殊类型碳化物。如 NbC、VC、TiC 等, 故常在工具钢中加入这类合金元素, 以提高工具的强度、硬度和耐磨性, 而不降低韧性。

4. 合金元素对钢热处理的影响

合金元素对钢热处理的影响主要有细化晶粒、提高淬透性、增加残留奥氏体的含量和提高红硬性。

(1) 细化晶粒。除锰、磷外, 多数合金元素具有晶粒细化功能, 其中强碳化物形成元素钒、铌、锆、钛的细化效果尤为显著。这类合金碳化物 (如 TiC、VC 等) 的熔点高、硬度高, 且很稳定, 不易分解, 能细化晶粒。

(2) 提高淬透性。提高钢的淬透性的元素主要有铬、锰、镍、硼。由于淬透性的提高, 采用合金钢制造的大截面零件, 经热处理后可保证整个截面具有比较均匀的组织 and 性能。形状复杂的合金钢零件, 可采用冷却能力较弱的淬火介质 (如油等) 及分级淬火、等温淬火等工艺, 从而降低变形和开裂倾向。

(3) 除铝、钴外, 大多数合金元素都能使钢的组织应力与变形量减小。但对于一些硬度及尺寸稳定性要求较高的刃具、模具、量具, 淬火后一般要进行冷处理或多次回火处理。

(4) 提高红硬性。回火能使碳化物的形成、析出和聚集长大的速度减缓, 故采用相同温度回火, 合金钢的硬度比碳钢高。因此, 合金元素提高了钢在回火过程中抵抗软化的能力, 即回火稳定性。

含有强碳化物形成元素的合金钢，在高温回火时，进一步提高了钢的硬度，从而使钢在高温下保持高的硬度，即红硬性（耐热性），这对工具钢具有十分重要的意义。

（二）碳素钢

1. 碳素结构钢

碳素结构钢的平均 w_c 在0.06%~0.38%，虽含有较多杂质元素及非金属夹杂物，但其性能仍能满足常规工程结构与普通零部件的需求，故应用广泛。此类钢材通常以热轧态钢板或型材（圆钢、方钢、工字钢、钢筋等）形式供应，无需热处理即可使用。碳素结构钢的牌号、成分、力学性能见表1-2。

表 1-2 碳素结构钢的牌号、成分、力学性能及应用举例
[摘自《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)]

牌号	等级	化学成分 $w_c/\%$	厚度或直径 ≤ 16 mm时, 屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	应用举例
Q195	—	0.12	≥ 195	315 ~ 430	承受载荷不大的金属结构件、铆钉、垫圈、地脚螺栓、冲压件及焊接件
Q215	A	0.15	≥ 215	335 ~ 450	
	B				
Q235	A	0.22	≥ 235	370 ~ 500	金属结构件、钢板、钢筋、型钢、螺栓、螺母、短轴心轴。Q235C、Q235D可作重要焊接结构件
	B	0.20			
	C	0.17			
	D				
Q275	A	0.24	≥ 275	410 ~ 540	强度较高，用于制造承受中等载荷的零件，如键、销、转轴、拉杆、链轮、链环片等
	B	0.21			
	C	0.20			
	D				

碳素结构钢牌号表示方法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，如Q235AF。质量等级符号反映了碳素结构钢中有害元素（磷、硫）含量的多少。从A级到D级，钢中磷、硫含量依次减小。C、D级的碳素结构钢磷、硫含量低，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、镇静钢及特殊镇静钢。镇静钢和特殊镇静钢的牌号中，脱氧方法符号可省略。

2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢牌号用两位数字表示。该两位数字表示的是钢中平均碳的质量分数的10 000倍。如08、45、60表示钢中 w_c 为0.08%、0.45%、0.60%。

优质碳素结构钢按含锰量不同，分为普通含锰量（ w_{Mn} 在0.25%~0.8%）及较高含锰量



(w_{Mn} 在 0.7% ~ 1.2%) 两组。含锰量较高的一组, 在其牌号后加 Mn, 如 65 Mn。若是沸腾钢, 则在牌号后加 F, 如 08 F。优质碳素结构钢的化学成分、力学性能见表 1-3。

表 1-3 优质碳素结构钢的化学成分、力学性能
[摘自《优质碳素结构钢》(GB/T 699—2015)]

牌号	化学成分			抗拉强度力学性能						
	$w_C/\%$	$w_{Mn}/\%$	$w_{Si}/\%$	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	伸长率 $A_5/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	A_{KU_2}/J	硬度 HBW	
									不大于	
				不小于						
08	0.05 ~ 0.11	0.25 ~ 0.50	≤ 0.03	325	195	33	60	—	131	—
10	0.07 ~ 0.13	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	335	205	31	55	—	137	—
15	0.12 ~ 0.18	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	375	225	27	55	—	143	—
20	0.17 ~ 0.23	0.35 ~ 0.65	0.17 ~ 0.37	410	245	25	55	—	156	—
25	0.22 ~ 0.29	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	450	275	23	50	71	170	—
30	0.27 ~ 0.34	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	490	295	21	50	63	179	—
35	0.32 ~ 0.39	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	530	315	20	45	55	197	—
40	0.37 ~ 0.44	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	570	335	19	45	47	217	187
45	0.42 ~ 0.50	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	600	355	16	40	39	229	197
50	0.47 ~ 0.55	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	630	375	14	40	31	241	207
55	0.52 ~ 0.60	0.50 ~ 0.85	0.17 ~ 0.37	645	380	13	35	—	255	217
60	0.57 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	675	400	12	35	—	255	229
65	0.62 ~ 0.70	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	695	410	10	30	—	255	229
70	0.67 ~ 0.75	0.50 ~ 0.80	0.17 ~ 0.37	715	420	9	30	—	269	229

08F 钢强度低、塑性好, 大多用作薄板、冲压件等。

10 ~ 25 钢由于碳的平均质量分数较低, 因此具有良好的冲压性能, 常用作受力不大而塑性、韧性要求较高的机械零件。10 ~ 25 钢也常作为渗碳用钢, 这类钢经渗碳、淬火及低温回火后, 能使零件表面硬度达到 60 HRC, 而心部仍保持一定的韧性, 故可用作表面要求耐磨并承受一定冲击载荷的机械零件。

35 ~ 50 钢常用作调质钢。经调质处理的该类型钢种展现出优异的强韧结合特性, 即良好的综合力学性能, 常用于制作承受高交变载荷与冲击载荷的传动齿轮、连杆机构、主轴等关键机械部件。

55 ~ 70 系列钢种主要作为弹簧材料使用, 经淬火配合中温回火处理后, 其弹性极限显著提升, 兼具高强度与适度韧性, 适用于制造小型弹性元件 (如弹簧)、车轮组件及低载荷耐磨部件。

3. 碳素工具钢

碳素工具钢的含碳量在 0.65% ~ 1.35%, 经热处理可获得高硬度与耐磨性, 其主要应用于刀具、量具及模具的制造。

碳素工具钢的牌号用 T 加数字表示, 该数字表示钢中平均碳的质量分数的 1 000 倍。如 T8 钢表示钢中碳的平均质量分数为 0.8% 的碳素工具钢。若为高级优质钢, 则在钢的牌号后加 A。如 T10A 表示钢中碳的平均质量分数为 1.0% 的高级优质碳素工具钢。含锰量较高者, 在牌号后加 Mn, 如 T8MnA。碳素工具钢的牌号、成分及用途见表 1-4。

表 1-4 碳素工具钢的牌号、成分及用途
[摘自《工模具钢》(GB/T 1299—2014)]

牌号	化学成分 w/%			退火状态 HBW	试样淬火		用途列举
	C	Si	Mn		不大于	淬火温度 和冷却剂	
				不小于			
T7 T7A	0.65 ~ 0.74	≤ 0.35	≤ 0.40	187	800 ~ 820 °C 水	62	承受冲击, 韧性较好、硬度适当的工具, 如扁铲、手钳、大锤、改锥、木工工具
T8 T8A	0.75 ~ 0.84		≤ 0.40	187	780 ~ 800 °C 水	62	承受冲击, 要求较高硬度的工具, 如冲头、压缩空气工具、木工工具
T8Mn T8MnA	0.80 ~ 0.90		0.40 ~ 0.60	187			同上, 但淬透性较大, 可制断面较大的工具
T9 T9A	0.85 ~ 0.94		≤ 0.40	192	760 ~ 780 °C 水	62	韧性中等、硬度高的工具, 如冲头、木工工具、凿岩工具
T10 T10A	0.95 ~ 1.04		≤ 0.40	197			不受剧烈冲击、高硬度耐磨的工具, 如车刀、刨刀、冲头、丝锥、钻头、手锯条
T11 T11A	1.05 ~ 1.14		≤ 0.40	207			不受冲击、要求高硬度高耐磨的工具, 如锉刀、刮刀、精车刀、丝锥、量具
T12 T12A	1.15 ~ 1.24		≤ 0.40				同上, 要求更耐磨的工具, 如刮刀、剃刀
T13 T13A	1.25 ~ 1.35	≤ 0.40	217				

4. 铸造碳钢

对于形状复杂、锻造困难且力学性能要求高于铸铁的机械部件, 铸造碳钢成为优选材料,



广泛应用于重型机械、矿山设备、冶金机械及轨道交通部件的生产。但铸造碳钢存在流动性差、凝固收缩率高、易偏析等工艺缺陷，铸造性能逊于铸铁材料。

铸造碳钢牌号由 ZG（铸钢拼音的首字母）加两组力学参数构成，首组数值代表屈服强度，次组数值表示抗拉强度。例如，ZG 200-400 表示屈服强度为 200 MPa、抗拉强度为 400 MPa 的铸造碳钢。

工程用铸造碳钢的牌号、成分、力学性能及用途见表 1-5。

表 1-5 工程用铸造碳钢的牌号、成分、力学性能及用途
[摘自《一般工程用铸造碳钢件》(GB/T 11352—2009)]

牌号	主要成分 w/%			力学性能						用途列举
	C	Si	Mn	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A_5/\%$	断面伸 缩率 Z/%	A_{kv}/J	A_{ku}/J (室温)	
	不大于			不小于						
ZG 200-400	0.20	0.60	0.80	200	400	25	40	30	47	良好的塑性、韧性和焊接性，用于受力不大的机械零件，如机座、变速箱壳等
ZG 230-450	0.30		230	450	22	32	25	35	一定的强度和好的塑性、韧性、焊接性。用于受力不大、韧性好的机械零件，如砧座、外壳轴承盖、阀体等	
ZG 270-500	0.40		270	500	18	25	22	27	较高的强度和较好的塑性，铸造性良好，焊接性尚好，切削性好。用于轧钢机架、轴承座、连杆、箱体、曲轴等	
ZG 310-570	0.50	0.60	0.90	310	570	15	21	15	24	强度和切削性良好，塑性、韧性较低。用于载荷较高的大齿轮、缸体、制动轮、辊子等
ZG 340-640	0.60			340	640	10	18	10	16	有高的强度和耐磨性，切削性好，焊接性较差，流动性好，裂纹敏感性较大。用作齿轮、棘轮等

(三) 合金钢

1. 低合金高强度结构钢

我国自主研发的低合金高强度结构钢，以碳素结构钢为基础，添加锰、硅等合金元素（总含量 $< 3\%$ ），通常在热轧、正火状态下使用，其组织为铁素体+珠光体。该产品同时保证了力学性能和化学成分。

其牌号体系与碳素结构钢类似，由屈服强度代号Q、屈服强度值及质量等级（A～E）三部分构成，如Q390E代表屈服强度为390MPa的E级低合金高强度结构钢。

低合金高强度结构钢屈服点较碳素结构钢提高30%～50%，并具有良好的塑性、韧性、焊接性及较好的耐蚀性。热轧低合金高强度结构钢的牌号及化学成分见表1-6，拉伸性能见表1-7。

表 1-6 热轧低合金高强度结构钢的牌号及化学成分
[摘自《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)]

牌号		化学成分（质量分数）/%															
钢级	质量等级	C ^a		Si	Mn	P ^c	S ^c	Nb ^d	V ^e	Ti ^e	Cr	Ni	Cu	Mo	N ^f	B	
		以下公称厚度或直径/mm		不大于													
		≤40 ^b	>40														
		不大于															
Q355	B	0.24		0.55	1.60	0.035	0.035	—	—	—	0.30	0.30	0.40	—	0.012	—	
	C	0.20	0.22			0.030	0.030								—		
	D	0.20	0.22			0.025	0.025								—		
Q390	B	0.20		0.55	1.70	0.035	0.035	0.05	0.13	0.05	0.30	0.50	0.40	0.10	0.015	—	
	C					0.030	0.030										
	D					0.025	0.025										
Q420 ^e	B	0.20		0.55	1.70	0.035	0.035	0.05	0.13	0.05	0.30	0.80	0.40	0.20	0.015	—	
	C					0.030	0.030										
Q460 ^e	C	0.20	0.20	0.55	1.80	0.030	0.030	0.05	0.13	0.05	0.30	0.80	0.40	0.20	0.015	0.004	

注：a. 公称厚度大于100mm的型钢，碳含量可由供需双方协商确定。

b. 公称厚度大于30mm的钢材，碳含量不大于0.22%。

c. 对于型钢和棒材，其磷和硫含量上限值可提高0.005%。

d. Q390、Q420最高可到0.07%，Q460最高可到0.11%。

e. 最高可到0.20%。

f. 如果钢中酸溶铝Als含量不小于0.015%或全铝Alt含量不小于0.020%，或添加了其他固氮合金元素，氮元素含量不作限制，固氮元素应在质量证明书中注明。

g. 仅适用于型钢和棒材。



表 1-7 热轧低合金高强度结构钢的拉伸性能
[摘自《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)]

牌号		上屈服强度 R_{eH}^a /MPa 不小于								抗拉强度 R_m /MPa				
钢级	质量等级	公称厚度或直径/mm												
		≤ 16	> 16 ~ 40	> 40 ~ 63	> 63 ~ 80	> 80 ~ 100	> 100 ~ 150	> 150 ~ 200	> 200 ~ 250	> 250 ~ 400	≤ 100	> 100 ~ 150	> 150 ~ 250	> 250 ~ 400
Q355	B、C	355	345	335	325	315	295	285	275	—	470 ~ 630	450 ~ 600	450 ~ 600	—
	D									265 ^b				450 ~ 600 ^b
Q390	B、C、 D	390	380	360	340	340	320	—	—	—	490 ~ 650	470 ~ 620	—	—
Q420 ^c	B、C	420	410	390	370	370	350	—	—	—	520 ~ 680	500 ~ 650	—	—
Q460 ^c	C	460	450	430	410	410	390	—	—	—	550 ~ 720	530 ~ 700	—	—

注: a. 当屈服不明显时, 可用规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替上屈服强度。

b. 只适用于质量等级为D的钢板。

c. 只适用于型钢和棒材。

低合金高强度结构钢的成本与碳素结构钢相近, 故推广使用低合金高强度结构钢在经济上具有重大意义, 特别是在桥梁、船舶、高压容器、车辆、石油化工设备、农业机械中应用更为广泛。

2. 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。合金元素一般加入不多, 属低、中合金钢。

合金结构钢牌号由三部分构成: 首部两位数字表示碳含量万分比, 中部元素符号标识合金成分, 尾部数字表示合金元素含量百分比 (含量 < 1.5% 时省略数值)。例如, 20CrMnTi 表示碳含量为 0.20%, 含铬、锰、钛元素的合金钢。合金结构钢都是优质钢, 若为高级优质钢, 则在牌号后加 A。

(1) 渗碳钢。渗碳钢适用于制造表面需高硬度且耐磨、心部具备强韧性的冲击载荷部件, 典型应用包括汽车变速箱齿轮、活塞销等传动元件。

渗碳钢最终热处理为渗碳、淬火+低温回火。热处理后表层组织硬度可达 60 ~ 62 HRC; 心部组织淬透后硬度为 40 ~ 48 HRC, 未淬透时硬度为 25 ~ 40 HRC。

(2) 调质钢。调质钢主要用于制造要求高强度和良好塑性与韧性相配合的重要零件, 即要求具有良好的综合力学性能的零部件, 如机床主轴、曲轴、连杆、齿轮等。

调质钢经调质处理后可以提高其综合力学性能。对于表面要求高硬度及耐磨性的零件, 在

调质处理后可进行表面淬火或氮化处理。

(3) 弹簧钢。弹簧钢大多是在冲击、振动及变动载荷下工作的，因此要求弹簧钢具有较高的弹性极限、疲劳极限及冲击韧性。

根据弹簧的尺寸不同，可将其分为热成形弹簧（线径或厚度大于 10 mm）和冷成形弹簧（线径或厚度小于 10 mm）两大类。

热成形弹簧由于尺寸较大，通常在淬火加热时成形，利用余热进行淬火加中温回火后使用。弹簧热处理后可采用喷丸处理进行表面强化，以进一步提高弹簧的疲劳极限并延长其使用寿命。冷成形弹簧尺寸较小，常用冷拉弹簧钢丝冷卷成形，由于产生加工硬化，屈服强度大大提高，故不必再进行淬火，只要在 200 ~ 300 °C 进行一次去应力及稳定尺寸的处理即可使用。

弹簧钢的主要牌号有 55Si2Mn、60Si2Mn、50CrVA、55SiMnB 等。

(4) 滚动轴承钢。滚动轴承钢专门用于制造轴承套圈及滚动体（滚珠、滚柱等），其服役时承受高频交变接触应力，要求材料具备高接触疲劳强度、优异硬度与耐磨性，同时保持适当的韧性。轴承组件因点线接触产生极大应力，易引发表面疲劳剥落与磨损失效。因此，滚动轴承钢的碳的质量分数较高（ w_c 在 0.95% ~ 1.15%），以保证淬火后有足够的硬度及耐磨性；主加元素为铬（ w_{Cr} 在 0.5% ~ 1.65%），作用是提高钢的淬透性，并形成碳化物，提高钢的耐磨性；在大型轴承中，还需加入硅、锰，以进一步提高淬透性。

滚动轴承钢锻造后均需经过球化退火处理，以改善切削加工性能。最终热处理为淬火+低温回火，硬度为 62 ~ 64 HRC。对于精密零件应进行 -80 ~ -60 °C 的冷处理，稳定尺寸。

滚动轴承钢牌号以 G 开头，后接铬元素符号及含量千分比数值（如 GCr15 表示铬含量为 1.5%），碳含量不标注。含其他合金元素时参照合金结构钢标号规则。例如，GCr15 钢表示铬的平均质量分数 w_{Cr} 为 1.5% 的滚动轴承钢；GCr15SiMn 钢表示除铬的平均质量分数 w_{Cr} 为 1.5% 外，还含有硅、锰合金元素的滚动轴承钢。

目前，我国以高碳铬轴承钢应用最广（占 90%）。在高碳铬轴承钢中，又以 GCr15、GCr15SiMn 钢应用最多。前者主要用于制造中小型轴承的内外套圈及滚动体，后者应用于较大型的滚动轴承。

高冲击或特大型轴承多采用合金渗碳钢制造，典型牌号如 20Cr2Ni4；耐蚀性要求高的轴承则选用马氏体不锈钢，常用的不锈钢有 8Cr17 等。

(5) 合金工具钢。合金工具钢牌号表示方法与合金结构钢相似，但当碳的平均质量分数大于 1% 时，含碳量不标出；当 $w_c < 1\%$ ，则牌号前的数字表示碳的平均质量分数的 1 000 倍。合金元素的表示方法与合金结构钢相同。由于合金工具钢都属于高级优质钢，故不再在牌号后标出 A 字。

合金工具钢按其用途不同，可分为以下几种。

① 量具刃具钢：量具刃具钢主要用于制造各种形状较为复杂的低速切削工具（丝锥、板牙、铰刀等）和精密量具，因此，要求具有高的硬度、耐磨性、红硬性及一定的韧性。量具刃具钢中碳的质量分数较高（ w_c 在 0.75% ~ 1.5%），以确保获得高硬度和足够的碳化物，从而提高钢的耐磨性；主加元素铬、硅、锰可提高钢的淬透性和回火稳定性，钨、钒可形成碳化物，从而提高钢的耐磨性及红硬性。

常用量具、刃具钢的牌号、成分、热处理及用途见表 1-8。



表 1-8 常用量具、刀具钢的牌号、成分、热处理及用途
[摘自《工模具钢》(GB/T 1299—2014)]

牌号	化学成分 w/%					试样淬火		布氏硬度 HBW 10/3 000 ≥	用途列举
	C	Mn	Si	Cr	W	淬火温度和冷却剂	HRC 不小于		
Cr06	1.30 ~ 1.45	≤ 0.40	≤ 0.40	0.50 ~ 0.70	—	780 ~ 810 °C水	64	241 ~ 187	锉刀、刮刀、刻刀、刀片、剃刀
Cr2	0.95 ~ 1.10	≤ 0.40	≤ 0.40	1.30 ~ 1.75	—	830 ~ 860 °C油	62	229 ~ 179	车刀、插刀、铰刀、冷轧辊等
9SiCr	0.85 ~ 0.95	0.30 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.95 ~ 1.25	—	830 ~ 860 °C油	62	241 ~ 197	丝锥、板牙钻头、铰刀、冷冲模等
8MnSi	0.75 ~ 0.85	0.80 ~ 1.10	0.30 ~ 0.60	—	—	800 ~ 820 °C油	65	≤ 229	长丝锥、长铰刀
9Cr2	0.80 ~ 0.95	≤ 0.40	≤ 0.40	1.30 ~ 1.70	—	820 ~ 850 °C油	62	217 ~ 179	尺寸较大的铰刀、车刀等刃具
W	1.05 ~ 1.25	≤ 0.40	≤ 0.40	0.10 ~ 0.30	0.8 ~ 1.2	800 ~ 830 °C水	62	229 ~ 187	低速切削硬金属刀具，如麻花钻、车刀和特殊切削工具

量具刀具钢锻造后需进行球化退火，最终热处理为淬火+低温回火，组织为回火马氏体+碳化物+残留奥氏体，硬度为 60 HRC 以上。

②高速工具钢：高速工具钢是红硬性、耐磨性较高的高合金工具钢，且具有一定的强度和韧性，因此，它主要用来制作各种高速切削刀具，如齿轮铣刀、钻头、拉刀等。

高速工具钢的 w_C 在 0.75% ~ 1.50%，并含有 10% 以上的钨、钼、铬、钒等碳化物形成元素及钴。常用高速工具钢的牌号、成分及硬度见表 1-9。

表 1-9 常用高速工具钢的牌号、成分及硬度
[摘自《高速工具钢》(GB/T 9943—2008)]

种类	牌号	化学成分 w/%						硬度		红硬性 HRC
		C	Cr	W	Mo	V	Co	退火 HBW	淬火+回 火 HRC	
钨系	W 18Cr4V	0.73 ~ 0.83	3.80 ~ 4.50	17.20 ~ 18.70	—	1.00 ~ 1.20	—	≤ 255	≥ 63	61.5 ~ 62
	W 12Cr4V 5 Co5	1.50 ~ 1.60	3.75 ~ 5.00	11.73 ~ 13.00	—	4.50 ~ 5.25	4.75 ~ 5.25	≤ 277	≥ 65	—
钨钼系	CW 6Mo5 Cr4V2	0.86 ~ 0.94	3.80 ~ 4.50	5.90 ~ 6.70	4.70 ~ 5.20	1.75 ~ 2.10	—	≤ 255	≥ 64	60 ~ 61
	W 6Mo5 Cr4V2	0.80 ~ 0.90	3.80 ~ 4.40	5.50 ~ 6.75	4.50 ~ 5.50	1.75 ~ 2.20	—	≤ 255	≥ 64	64
	CW 6Mo5 Cr4V3	1.25 ~ 1.32	3.75 ~ 4.50	5.90 ~ 6.70	4.70 ~ 5.20	2.70 ~ 3.20	—	≤ 262	≥ 64	64
	W 6Mo5 Cr4V3	1.15 ~ 1.25	3.80 ~ 4.50	5.90 ~ 6.70	4.70 ~ 5.20	2.70 ~ 3.20	—	≤ 262	≥ 64	65

高速工具钢在铸态下碳化物分布不均匀,故必须反复进行锻造。锻后应进行退火处理,以改善其切削加工性能。由于淬火后有较多的残留奥氏体,为了减少残留奥氏体量,其最终热处理为淬火+多次高温回火,组织为回火马氏体+碳化物+少量残留奥氏体,硬度在 62 HRC 以上。

③热作模具钢:热作模具钢用于制造热态金属成形模具(热锻模、压铸模等),需具备抗热疲劳性能、高强度及良好的韧性。

热锻模钢 w_c 在 0.5%~0.6%,压铸模钢 w_c 在 0.3%~0.5%,以保证淬火后既有较高的硬度,又有较好的韧性。并含有铬、锰、镍、硅等合金元素,以强化铁素体,提高钢的淬透性等。常用的热作模具钢的各项数据见表 1-10。

表 1-10 常用热作模具钢的牌号、成分及用途
[摘自《工模具钢》(GB/T 1299—2014)]

牌号	化学成分 $w/\%$								用途列举
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Ni	
5CrMnMo	0.50 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	0.25 ~ 0.60	0.60 ~ 0.90	—	—	0.15 ~ 0.3	1.40 ~ 1.80	中小型锻模
4Cr5W2VSi	0.32 ~ 0.42	≤ 0.40	0.80 ~ 1.20	4.50 ~ 5.50	1.60 ~ 2.40	0.80 ~ 1.00	—	1.40 ~ 1.80	热挤压模(挤压铝、镁)、高速锤锻模
5CrNiMo	0.50 ~ 0.60	0.50 ~ 0.80	≤ 0.40	0.50 ~ 0.80	—	—	0.15 ~ 0.3	1.40 ~ 1.80	形状复杂、重载荷的大型锻模
4Cr5MoSiV	0.33 ~ 0.43	0.2 ~ 0.5	0.80 ~ 1.20	4.75 ~ 5.50	—	0.30 ~ 0.60	1.10 ~ 1.60	1.40 ~ 1.80	同 4Cr5W2VSi
3Cr2W8V	0.30 ~ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	2.20 ~ 2.70	7.5 ~ 9.0	0.20 ~ 0.50	—	1.40 ~ 1.80	热挤压模(挤压铜、钢)、压铸模

热作模具钢铸态碳化物分布不均匀,必须反复锻造。锻后应进行球化退火处理,以降低内应力,改善切削加工性能。最终热处理为淬火+中温(高温)回火,组织为回火托氏体(回火索氏体)。

④冷作模具钢:冷作模具钢是指在常温下使金属材料成形的模具用钢,使用时其工作温度一般不超过 300 ℃。由于在冷态下被加工材料的变形抗力较大且存在加工硬化效应,故模具的工作部分承受很大的载荷及摩擦、冲击作用。因此,冷作模具钢需满足高硬度、高耐磨性、高强度与适度韧性要求,现有多种专用钢种应用于该领域。

碳素工具钢:碳素工具钢典型牌号如 T10A,具备加工性能优良、成本低廉的优势,但存在淬透性低、耐磨性不足、热处理变形显著及寿命较短等缺陷,适用于小型、结构简单、精度要求低的轻载模具制造。



低合金工具钢:低合金工具钢常用牌号包括 9SiCr、CrWMn 及 GCr15 轴承钢,其淬透性、耐磨性及尺寸稳定性优于碳素工具钢,因回火稳定性良好可采用较高回火温度,综合力学性能更优,适用于中等尺寸、结构较复杂、精度较高的低载荷模具生产。

高铬和中铬冷作模具钢:高铬与中铬冷作模具钢的代表牌号有 Cr12、Cr12MoV,其具备卓越的淬透性、耐磨强度及承载能力,热处理变形量小,广泛应用于大型、复杂结构、高精度要求的重载冷作模具制造。

高速钢类冷作模具钢:也可用于制造大尺寸、复杂形状、高精度的重载冷作模具,其耐磨性、承载能力更优,故特别适合于工作条件极为恶劣的黑色金属冷挤压模。

(四) 特殊性能钢

特殊性能钢具备独特的物理或化学特性,适用于既需力学性能又需特殊功能的部件制造,主要类型包括不锈钢、耐热钢及耐磨钢。

1. 不锈钢

不锈钢涵盖耐大气腐蚀的不锈钢与耐化学介质(如酸液)腐蚀的耐酸钢两类。

金属的腐蚀通常可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两种类型,大多数金属的腐蚀属于电化学腐蚀。故提高钢耐蚀性的主要方法有以下几种。

(1) 形成钝化膜。在钢中加入合金元素(常用铬),使金属表面形成一层致密的、牢固的氧化膜(又称为钝化膜,如 Cr_2O_3 等),使钢与外界隔绝而阻止其进一步氧化。

(2) 提高电极电位。在钢中加入合金元素(如铬),可以提高其抵抗电化学腐蚀的能力。如在铁素体中溶解质量分数为 11.7% 的铬时,其电极电位将由 -0.56 V 跃升为 0.20 V 。

(3) 形成单相组织。钢中加入铬或铬镍合金元素,可以阻止微电池形成,从而显著提高耐蚀性。

碳易与钢中的铬等合金元素形成碳化物,同时出现贫铬区,从而降低钢的耐蚀性,故不锈钢中碳的质量分数愈低,其耐蚀性愈好。

不锈钢牌号也是由数字、元素符号、数字三部分组成,前面的数字表示碳的平均质量分数的 1 000 倍,后两项与其他合金钢相同。当 $w_{\text{C}} \leq 0.03\%$ 或 0.08% 时,在牌号前冠以 00 或 0。如 1Cr13 表示平均 w_{C} 为 0.1%、 $w_{\text{Cr}} \approx 13\%$ 的不锈钢; 0Cr18Ni9 表示平均 $w_{\text{C}} \leq 0.08\%$ 、 $w_{\text{Cr}} \approx 18\%$ 、 $w_{\text{Ni}} \approx 9\%$ 的不锈钢。

根据不锈钢在室温下显微组织的不同,可将常用的不锈钢分为以下三种。

(1) 马氏体不锈钢。马氏体不锈钢的 w_{C} 在 $0.1\% \sim 0.4\%$, w_{Cr} 在 $12\% \sim 14\%$ 。这类钢的淬透性高,具有较高的强度、硬度及耐磨性。主要用于力学性能要求较高、耐蚀性要求较低的工件,如汽轮机叶片、水压机阀、要求硬而耐磨的医疗器械、量具及轴承等。其主要牌号有 1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13 等。

(2) 铁素体不锈钢。铁素体不锈钢 $w_{\text{C}} < 0.12\%$,主加元素 w_{Cr} 在 $12\% \sim 30\%$,空冷后的组织为单相铁素体。铁素体不锈钢具有高的耐蚀性以及良好的塑性、切削加工性和焊接性,经济性较佳,但强度较低,故主要用于对力学性能要求不高而对耐蚀性要求较高的零件,如化工设备中的容器、管道等。其常用牌号有 1Cr17、1Cr25 等。

(3) 奥氏体不锈钢。这类钢是应用最广的不锈钢。它具有低碳(绝大多数钢 $w_{\text{C}} < 0.12\%$)、

高铬 (w_{Cr} 在 17% ~ 19%) 和较高的镍 (w_{Ni} 在 8% ~ 11%) 的成分特点。这类钢在退火后可以提高钢的耐蚀性, 使钢软化, 应采用固溶处理, 即将钢加热到 1 100 °C, 水淬快冷到室温。奥氏体不锈钢具有最佳的耐蚀性, 此外, 它还具有良好的塑性、韧性、冷变形性和焊接性, 但切削加工性较差。其主要用于耐蚀性要求较高及冷变形成形后需焊接的轻载零件。这类钢不能通过热处理强化, 主要通过冷加工硬化来提高强度。常用的牌号有 0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 等。

2. 耐热钢

耐热性包含高温抗氧化与高温强度双重指标。抗氧化钢指在高温环境中抗介质腐蚀的钢种, 热强钢指高温下能保持力学性能的钢种, 二者统称为耐热钢。

一般在钢中加入铬、铝、硅等元素, 可形成致密的、连续的氧化膜, 如 Cr_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等, 可提高钢的抗氧化能力。而要提高钢的热强性, 通常采用合金化的方法提高原子间结合力及形成有利的组织状态。

15CrMo、12CrMoV 钢因其碳的质量分数较低, 合金元素含量少, 主要用于 300 ~ 500 °C 条件下工作的锅炉、石油热裂装置、气阀等零件。4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 钢属中碳高合金耐热钢, 常用来制造受高温废气腐蚀及承受冲击、磨损的排气阀等零件 (故又称阀门钢)。1Cr18Ni9Ti、4Cr14Ni14W2Mo 钢, 因其含有较多铬、镍元素, 是一种广泛应用的热强钢, 通常在锅炉、汽轮机方面应用较多。

3. 耐磨钢

高锰钢的化学成分特点是高碳 (w_C 在 0.9% ~ 1.5%)、高锰 (w_{Mn} 在 11% ~ 14%)。其脆性很大, 耐磨性也不高, 不能直接使用。高锰钢需经固溶处理 (1 060 ~ 1 100 °C 高温加热、快速水冷), 此时韧性很高, 故又称“水韧处理”。

高锰钢固溶状态硬度虽然不高 (约为 200 HBW), 但当其受到高的冲击载荷和高应力摩擦时, 表面发生塑性变形而迅速产生加工硬化, 形成硬 (> 500 HBW) 而耐磨的表面层 (深度 10 ~ 20 mm), 心部仍为高韧性的奥氏体。

高锰钢不能采用压力加工和切削加工成形, 通常都是直接铸造成零件, 经淬火后使用。其专用于高摩擦、强冲击工况, 典型应用包括坦克履带、挖掘机铲齿、推土机护板及铁路道岔等部件。常用牌号为 ZGMn13-1、ZGMn13-2、ZGMn13-3、ZGMn13-4, 其中 1、2、3、4 表示品种代号, 适用范围分别为低冲击件、普通件、复杂件、高冲击件。

二、铸铁

铸铁作为重要铁碳合金, 以铁、碳、硅为主成分, 杂质元素硫磷含量高于碳钢, 广泛应用于工程领域。其多元合金特性使它在特定工况下具有独特优势。

(一) 铸铁的概述

1. 铸铁分类

铸铁中碳元素以化合态 (渗碳体 Fe_3C) 或游离态 (石墨) 形式存在, 据此将铸铁分为三类。



(1) 白口铸铁。碳元素除微量固溶于铁素体外，其余均以渗碳体形态存在，断口呈现银白色。此类铸铁硬度高且脆性大，机械加工性能差，因此极少用于制造机械零件。

(2) 灰铸铁。碳全部或大部分以游离状态的石墨存在于铸铁中，其断口呈灰色，故称灰铸铁。它是工业中应用最广的铸铁。根据铸铁中石墨形态的不同，灰铸铁可分为灰铸铁（石墨呈片状）、可锻铸铁（石墨呈团絮状）、球墨铸铁（石墨呈球状）、蠕墨铸铁（石墨呈蠕虫状）四种。铸铁中不同形态的石墨组织如图 1-7 所示。

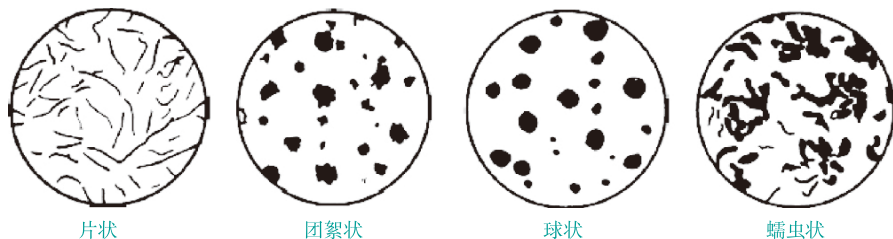


图 1-7 铸铁中的不同石墨形态

(3) 麻口铸铁。这种铸铁组织中既有石墨，又有莱氏体，属于白口和灰口间的过渡组织。断口呈黑白相间的麻点，故称麻口铸铁。这类铸铁也具有较大的硬脆性，故工业上很少使用。

2. 石墨对灰铸铁性能的影响

(1) 力学性能。灰铸铁的金属基体与石墨构成显微组织，相当于在纯铁或钢基体中分布着大量石墨。石墨的强度、硬度、塑性极低，使灰铸铁类似含微裂纹的钢基体。石墨减少有效承载面积并引发应力集中，导致灰铸铁强度、硬度较低，塑性、韧性差，但其抗压强度接近钢材。

(2) 工艺性能。灰铸铁脆性大，无法进行锻压加工。焊接时易产生裂纹并形成白口组织，导致焊后加工困难，焊接性能差。但其铸造性能优异，缺陷率低。石墨促使切屑碎裂，通常无需切削液即可加工，切削性能良好。

(3) 减振性优。石墨可吸收机械振动能量，减振能力为钢材的 5 ~ 10 倍，适合制造机床床身、机座等部件。

(4) 耐磨性佳。石墨兼具润滑作用与储油凹坑形成能力，利于保持摩擦面油膜，适用于导轨、衬套、活塞销等耐磨件。

(5) 缺口敏感性低。基体固有石墨缺口降低了外部缺口（键槽、刀痕）对疲劳强度的影响，使缺口敏感性降低。

综上，灰铸铁的性能由基体与石墨形态（数量、尺寸、分布）共同决定。石墨化不充分，易产生白口组织；石墨化太充分，则形成的石墨粗大，使其力学性能变差。因而在生产中就要控制石墨的形成过程。

3. 影响石墨化的因素

影响铸铁石墨化的关键因素是化学成分与冷却速率。

(1) 化学成分。灰铸铁除碳外，还含有硅、锰、硫、磷等元素，其对石墨化的作用如下。

① 碳与硅：作为铸铁核心元素，对组织与性能起决定性作用。

碳是石墨的形成元素，可促进石墨化进程。碳含量增加导致石墨析出量增多、尺寸粗化，

基体中铁素体比例上升而珠光体比例下降；反之，则石墨量减少且细化。

硅是强效石墨化促进元素。硅含量提升能显著增加石墨生成量。实验表明，硅含量不足时，即使碳含量高也难以形成石墨。此外，硅可优化铸造工艺性能。

碳和硅对铸铁组织的共同影响如图 1-8 所示。

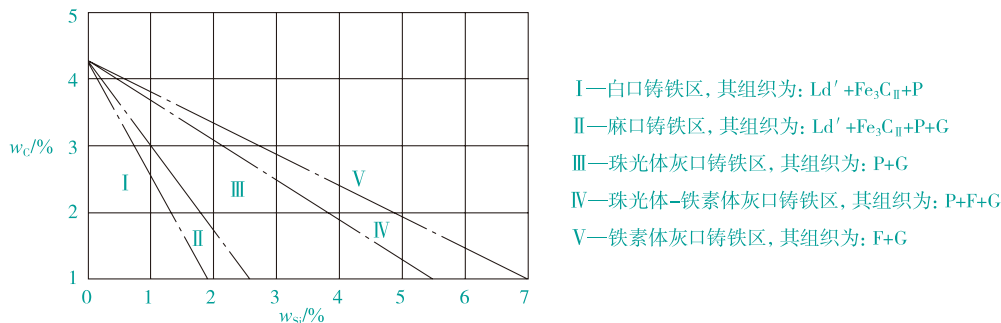


图 1-8 铸铁组织图 (铸件壁厚 50 mm, 砂型铸造)

由图可见，碳硅含量改变，铸铁的组织性能也随之而变。碳、硅含量过高，将形成强度甚低的铁素体灰铸铁，且石墨粗大；反之，容易出现硬脆的白口组织，并给熔化和铸造增加困难。在工业生产中，灰铸铁的碳、硅含量控制为： w_C 在 2.7% ~ 3.9%， w_{Si} 在 1.1% ~ 2.6%。

②硫和锰：这两个元素在铸铁中是密切相关的。硫是强烈阻碍石墨化的元素。同时，硫使铸铁具有热脆性。此外，硫还会使铸铁的流动性降低，凝固收缩率增加。因此，硫是铸铁中非常有害的元素，必须严格控制其含量，一般控制在 0.15% 以下。锰本身也是阻碍石墨化的元素，但它和硫有很强的亲和力，可消除硫的有害作用。通常，在铸铁中锰的含量控制为 0.6% ~ 1.2%。

③磷：磷是微弱促进石墨化的元素，同时还能提高铸铁的流动性，但形成的 Fe_3P 增加了铸铁的脆性，使铸铁在冷却过程中易于开裂，所以一般铸铁中含磷量也应严格控制。

从以上讨论可以看出，碳、硅、锰是调节组织的元素，磷是需要控制使用的元素，硫是需要限制使用的元素。

(2) 冷却速度。在生产中可以见到，相同化学成分的铸铁，若铸件的壁厚不同，其组织往往不同，厚壁处呈灰口组织，而薄壁处常出现白口组织。这表明，冷却速率对石墨形态具有调控作用：相同成分下，冷却速率差异可导致不同的石墨化程度与不同的组织形态。冷却速率受浇注温度、铸件壁厚及铸型材料导热性等因素共同影响。例如，快速冷却抑制石墨化，形成渗碳体组织；缓慢冷却则促进石墨充分析出。

①浇注温度：在其他条件相同时，浇注温度愈高，铸件的冷却速度愈小。这是因为浇注温度愈高，在铁液凝固前铸型所吸收的热量愈多，延缓了铸型中金属的冷却速度。

②铸件壁厚：铸件壁厚是影响冷却速度的一个重要因素。铸件愈薄，其冷却速度愈快；铸件愈厚，其冷却速度愈慢。但在生产中，不能通过改变铸件壁厚来调整铸铁的组织，而应选择适当的化学成分，采取必要的工艺措施来改善铸铁的组织，获得所需要的性能。

③铸型材料导热能力：各种铸型材料的导热能力不同。如金属型的导热能力大于砂型，所以铸件在金属型中的冷却速度要比在砂型中快。同是砂型，湿型的冷却速度大于干型和预热



的铸型。因此，借助于调节铸型的冷却速度，可以控制铸件的组织。通过以上分析可见，要获得某种所要求的组织，必须根据铸件的尺寸（壁厚），来选择合适的铸铁成分（主要是碳和硅）。

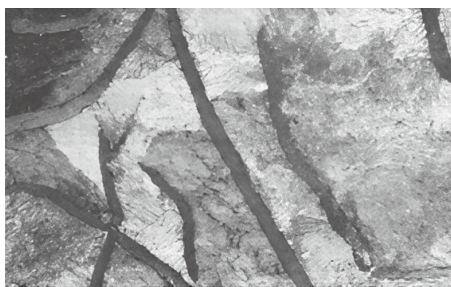
（二）灰铸铁

灰铸铁是应用最广的一种铸铁。在各种铸铁件的总产量中，灰铸铁件占 80% 以上。机床床身、箱体、内燃机的缸体、缸盖、缸套、活塞环、汽车、拖拉机的变速箱、油缸及阀体等都是用灰铸铁制造的。

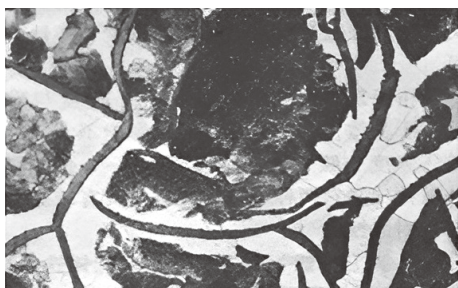
1. 灰铸铁的化学成分、组织和性能

灰铸铁的化学成分一般为： w_C 在 2.5% ~ 3.6%、 w_{Si} 在 1.1% ~ 2.5%、 w_{Mn} 在 0.6% ~ 1.2%、 $w_P \leq 0.50\%$ 、 $w_S \leq 0.15\%$ 。

灰铸铁的组织由基体与片状石墨组成。按基体结构的不同，其显微组织可分为如图 1-9 所示的三种类型。



(a) 珠光体灰铸铁 (200×)



(b) 珠光体-铁素体灰铸铁 (200×)



(c) 铁素体灰铸铁 (200×)

图 1-9 灰铸铁的显微组织

(1) 珠光体灰铸铁。珠光体灰铸铁的组织在珠光体基体上分布着细小而均匀的石墨片 [图 1-9(a)]。此种铸铁有较高的强度和硬度，可用来制造重要的机件。

(2) 珠光体-铁素体灰铸铁。珠光体-铁素体灰铸铁 [图 1-9(b)] 虽然强度较低，但仍可满足一般机件的要求。其铸造性能、切削加工性和减振性等均优于前者，故用途最广。

(3) 铁素体灰铸铁。铁素体灰铸铁 [图 1-9(c)] 的强度、硬度最低，很少用来制造机械零件。

灰铸铁的力学性能由基体强度与石墨形态共同决定，其强度、硬度低于碳钢，塑性韧性趋近于零，但抗压强度接近钢材。此外，灰铸铁的减振性、耐磨性好，缺口敏感性低，故灰

铸铁被广泛用于铸造机床床身和各类机器的零件。

2. 灰铸铁的孕育处理

提高灰铸铁力学性能的有效方法是向铁液中冲入孕育剂（常用 $w_{Si}=75\%$ 的硅铁合金）进行处理，然后浇注，这种方法称为孕育处理，用这种方法得到的铸铁称为孕育铸铁。

经孕育处理的铸铁，其强度、硬度与普通灰铸铁相比，明显提高（如抗拉强度 R_m 为250~400 MPa，硬度为170~270 HBS），并在厚大截面上具有均匀的组织 and 性能，故常用作力学性能要求较高的厚大铸件的铸造材料。

3. 灰铸铁的牌号及性能

灰铸铁的牌号是用“灰铁”的汉语拼音首字母HT加三位数字表示，数字表示灰铸铁的最低抗拉强度。如HT150表示最低抗拉强度不小于150 MPa的灰铸铁。

灰铸铁试样的抗拉强度见表1-11，灰铸铁的硬度见表1-12。

表 1-11 灰铸铁试样的抗拉强度
[摘自《灰铸铁件》(GB/T 9439—2023)]

材料牌号	铸件主要壁厚 t/mm		抗拉强度 R_m/MPa		
			单铸试棒或并排试棒		附铸试块
	$>$	\leq	\geq	\leq	\geq
HT100	5	40	100	200	—
HT150	2.5	5	150	250	—
	5	10			—
	10	20			—
	20	40			125
	40	80			110
	80	150			100
	150	300			90
HT200	2.5	5	200	300	—
	5	10			—
	10	20			—
	20	40			170
	40	80			155
	80	150			140
	150	300			130
HT225	5	10	225	325	—
	10	20			—
	20	40			190
	40	80			170
	80	150			155
	150	300			145



续表

材料牌号	铸件主要壁厚 t /mm		抗拉强度 R_m /MPa		
			单铸试棒或并排试棒		附铸试块
	$>$	\leq	\geq	\leq	\geq
HT250	5	10	250	350	—
	10	20			—
	20	40			210
	40	80			190
	80	150			170
	150	300			160
HT275	10	20	275	375	—
	20	40			230
	40	80			210
	80	150			190
	150	300			180
HT300	10	20	300	400	—
	20	40			250
	40	80			225
	80	150			210
	150	300			190
HT350	10	20	350	450	—
	20	40			290
	40	80			260
	80	150			240
	150	300			220

注：1. 对于单铸试棒和并排试棒，最小抗拉强度值为强制性值。

2. 经供需双方同意，代表铸件主要壁厚处的附铸试块的抗拉强度值，也可作为强制性值。当铸件的主要壁厚超过 300 mm 时，试棒的类型和尺寸以及最小抗拉强度值，应由供需双方商定。

3. 若规定了试棒的类型，应在牌号后加上“/”号，并在其后加上字母来表示试棒的类型：

/S 代表单铸试棒或并排试棒；

/A 代表附铸试块；

/C 代表本体试样。

4. 以抗拉强度作为验收指标时，应在订货协议中规定试样类型。如果订货协议中没有规定，则由供方自行决定。HT100 是适用于要求高减震性和高热导率的材料。

表 1-12 灰铸铁的硬度
[摘自《灰铸铁件》(GB/T 9439—2023)]

材料牌号	铸件主要壁厚 t /HR		铸件的布氏硬度 /HBW	
	$>$	\leq	min.	max.
HT-HBW 155	2.5	5	—	210
	5	10	—	185
	10	20	—	170
	20	40	—	160
	40	80	—	155
HT-HBW 175	2.5	5	170	260
	5	10	140	225
	10	20	125	205
	20	40	110	185
	40	80	100	175
HT-HBW 195	4	5	190	275
	5	10	170	260
	10	20	150	230
	20	40	125	210
	40	80	120	195
HT-HBW 215	5	10	200	275
	10	20	180	255
	20	40	160	235
	40	80	145	215
HT-HENW 235	10	20	200	275
	20	40	180	255
	40	80	165	235
HT-HBW 255	20	40	200	275
	40	80	185	255

注：铸件特定位置的布氏硬度差不大于 40 HBW 的，仅适应于批量生产的铸件，经供需双方同意，可以适当增大硬度值波动范围。

黑体数字表示对应该硬度等级的铸件主要壁厚处的最小和最大布氏硬度值。

对同一硬度等级，硬度随壁厚的增加而降低。

(三) 可锻铸铁

可锻铸铁又名马铁，它是将白口铸铁经石墨化退火而成的一种铸铁。由于其石墨呈团絮状，大大减轻了对基体的割裂，故抗拉强度显著提高（抗拉强度一般在 300 ~ 400 MPa，最高可达 700 MPa），且具有相当高的塑性和韧性（ $A \leq 12\%$ 、 $a_k \leq 30 \text{ J/cm}^2$ ），可锻铸铁就是因此而得名，

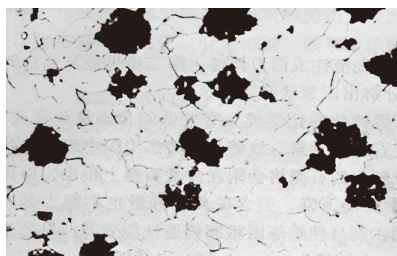


而并不是真的可以锻造。

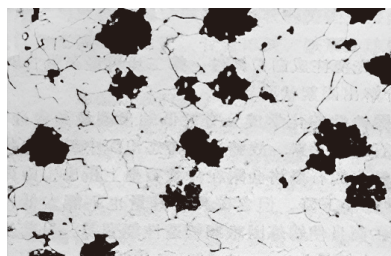
1. 可锻铸铁的分类和制取

按照退火方法的不同，可锻铸铁可分为黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁和白心可锻铸铁三种，其中白心可锻铸铁在我国应用较少。前两种可锻铸铁的显微组织如图 1-10 所示。

可锻铸铁的生产分为两步：先浇注白口铸铁件，然后进行高温石墨化退火。白口铸铁内必须没有片状石墨，否则在退火时从渗碳体片中分解出来的石墨将沿着原来的石墨结晶而得不到团絮状石墨。因此，必须控制铸件的化学成分，使其具有较低的碳、硅质量分数。通常可锻铸铁的化学成分为： w_C 在 2.2% ~ 2.8%、 w_{Si} 在 1.0% ~ 1.8%、 w_{Mn} 在 0.5% ~ 0.7%、 $w_P \leq 0.1\%$ 、 $w_S \leq 0.2\%$ 。



铁素体可锻铸铁 (200×)



珠光体可锻铸铁 (100×)

图 1-10 可锻铸铁的显微组织

可锻铸铁的退火工艺如图 1-11 所示。

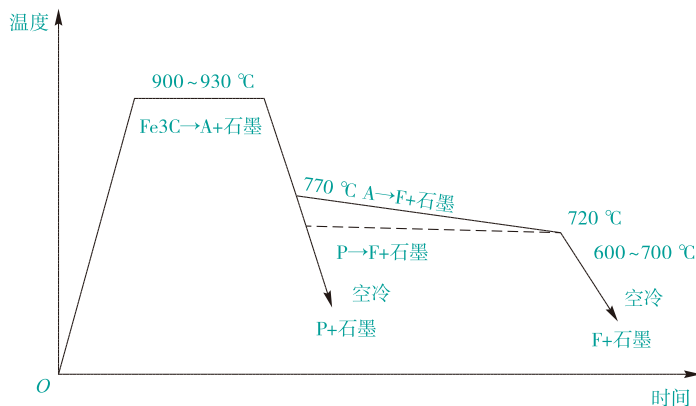


图 1-11 可锻铸铁的退火工艺曲线

2. 可锻铸铁的特点

可锻铸铁因退火工艺复杂、周期长，导致生产成本低、效率低，近年逐渐被球墨铸铁替代，但其韧性及耐蚀性优势仍适用于复杂薄壁冲击件及潮湿环境部件。与球墨铸铁相比，具有质量稳定、铁液处理简易、易于组织流水线生产等优点。

3. 可锻铸铁的牌号及用途

可锻铸铁的牌号由三个字母加两组数字表示，其中KT为“可铁”两字汉语拼音的首字母，H、Z、B分别表示黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁、白心可锻铸铁，两组数字分别表示材料的最低抗拉强度和最低伸长率。如KTZ450-06是指最低延伸率为6%、最低抗拉强度为450 MPa的珠光体可锻铸铁。黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的牌号和力学性能见表 1-13。

表 1-13 黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的牌号和力学性能
[摘自《可锻铸铁件》(GB/T 9440—2010)]

牌号	试样直径 d/mm	抗拉强度 R_m/MPa	0.2% 屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	伸长率 $A/\%$ ($L_0=3d$)	布氏硬度 HBW
		不小于			
KTH 275-05	12 或 15	275	—	5	≤ 150
KTH 300-06		300	—	6	
KTH 330-08		330	—	8	
KTH 350-10		350	200	10	
KTH 370-12		370	—	12	
KTH 450-06		450	270	6	
KTH 500-05	12 或 15	500	300	5	165 ~ 215
KTH 550-04		550	340	4	180 ~ 230
KTH 600-03		600	390	3	195 ~ 245
KTH 650-02		650	430	2	210 ~ 260
KTH 700-02		700	530	2	240 ~ 290
KTH 800-01		800	600	1	270 ~ 320

注：试样直径 12 mm 只适用于主要壁厚小于 10 mm 的铸件。

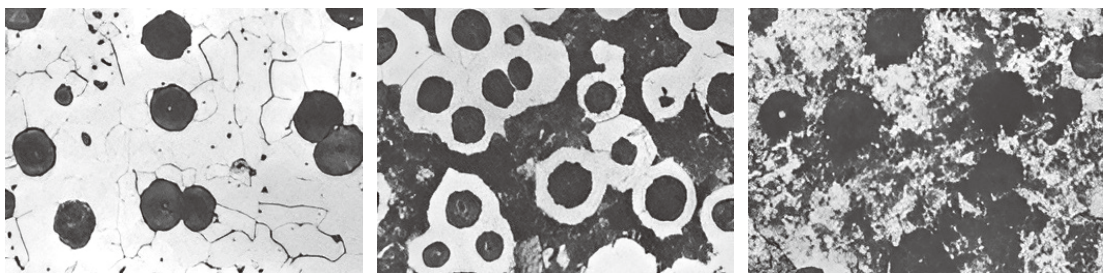
(四) 球墨铸铁

球墨铸铁是 20 世纪 50 年代发展起来的一种新型结构材料，它是向出炉的铁液中加入球化剂和孕育剂而得到的。

1. 球墨铸铁的化学成分、组织和性能

球墨铸铁的碳、硅含量较高，一般 w_C 为 3.6% ~ 4.0%， w_{Si} 为 2.0% ~ 3.2%，以降低白口倾向，保证球化效果。硫、磷含量较低，一般原铁液中 $w_S < 0.04\%$ 、 $w_P < 0.1\%$ ，以降低其有害作用。

球墨铸铁的组织是由钢的基体与球状石墨组成的，其显微组织如图 1-12 所示。



铁素体球铁 (100×)

铁素体+珠光体球铁 (100×)

珠光体球铁 (100×)

图 1-12 球墨铸铁的显微组织



由于球墨铸铁中的石墨呈球状，它对基体的割裂程度大大减轻，因此球墨铸铁的综合力学性能优于其他铸铁。其抗拉强度与钢相当，屈服强度超过 45 钢，塑性韧性虽低于钢材，但优于其他铸铁。球墨铸铁同时保留了灰铸铁的耐磨性、减振性及低缺口敏感性等优点，兼具铸铁与钢的双重特性。

2. 球墨铸铁的生产

(1) 铁液。制造球墨铸铁所用的铁液含碳量要高（3.6% ~ 4.0%），但硫、磷量要低。为防止浇注温度过低，出炉的铁液温度必须在 1 400 °C 以上。

(2) 球化处理和孕育处理。球化处理和孕育处理是制造球墨铸铁的关键，必须严格按照规范操作。

球化剂的作用是使石墨呈球状析出，我国广泛采用的球化剂是稀土硅铁镁合金。它是由稀土、镁、硅铁和回炉料按一定比例熔制而成的。采用稀土镁合金作为球化剂，结合我国资源优势，可稳定球化过程、降低镁消耗量并提升球墨铸铁品质。球化剂的加入量一般为铁液重量的 1.0% ~ 1.6%（视铸铁的化学成分和铸件大小而定）。孕育剂的主要作用是促进石墨化、防止产生白口，此外还有细化石墨、圆整石墨球的作用。常用的孕育剂为含硅 75% 的硅铁，加入量为铁液重量的 0.4% ~ 1.0%。

炉前处理的工艺方法有多种，其中以冲入法最为常用，如图 1-13 所示。冲入法是将球化剂放在铁液包中的堤坝内，上面覆盖铁屑和稻草灰并压紧，以延缓铁液与球化剂的作用，防止球化剂迅速上浮，以提高吸收率。处理时，先冲入容量为 1/2 ~ 2/3 的铁液，待反应完毕后，在出铁槽中放上孕育剂，再冲入余下的铁液，搅拌扒渣后，即可进行浇注。

(3) 热处理。铸铁热处理仅能改变基体组织，无法影响石墨形态与分布。球墨铸铁因石墨呈球状，对基体割裂效应弱，其力学性能主要由基体组织决定，通过热处理优化基体可显著提升性能指标。因此，大部分球墨铸铁都要进行热处理。球墨铸铁常用的热处理方法有退火、正火、调质处理、等温淬火等。

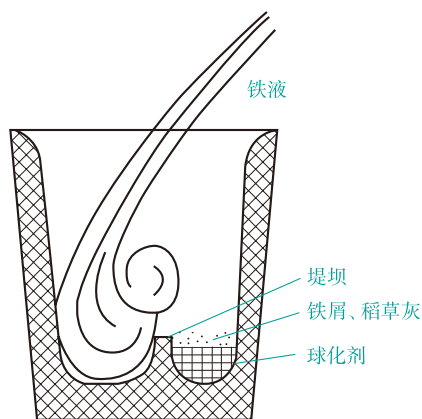


图 1-13 冲入法球化处理

3. 球墨铸铁的牌号及用途

球墨铸铁的牌号由 QT 和两位数字组成，其中 QT 是“球铁”两字汉语拼音的首字母，后面两位数字分别表示材料的最低抗拉强度和最低伸长率。铁素体珠光体球墨铸铁本体试样的力学性能指导值见表 1-14，铁素体珠光体球墨铸铁材料的硬度等级见表 1-15。

表 1-14 铁素体珠光体球墨铸铁本体试样的力学性能指导值
[摘自《球墨铸件》(GB/T 1348—2019)]

材料牌号	特件壁厚/mm	屈服强度 $R_{p0.2}(\text{min.})/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m(\text{min.})/\text{MPa}$	伸长率 $A(\text{min.})/\%$
QT350-22L/C	$t \leq 30$	220	340	20
	$30 < t \leq 60$	210	320	15
	$60 < t \leq 200$	200	310	12

续表

材料牌号	特件壁厚/mm	屈服强度 $R_{p0.2}$ (min.)/MPa	抗拉强度 R_m (min.)/MPa	伸长率 A (min.)/%
QT350-22R/C	$t \leq 30$	220	340	20
	$30 < t \leq 60$	210	320	15
	$60 < t \leq 200$	200	310	12
QT350-22/C	$t \leq 30$	220	340	20
	$30 < t \leq 60$	210	320	15
	$60 < t \leq 200$	200	310	12
QT400-18L/C	$t \leq 30$	240	390	15
	$30 < t \leq 60$	230	370	12
	$60 < t \leq 200$	220	340	10
QT400-18R/C	$t \leq 30$	250	390	15
	$30 < t \leq 60$	240	370	12
	$60 < t \leq 200$	230	350	10
QT400-18/C	$t \leq 30$	250	390	15
	$30 < t \leq 60$	240	370	12
	$60 < t \leq 200$	230	350	10
QT400-15/C	$t \leq 30$	250	390	12
	$30 < t \leq 60$	240	370	11
	$60 < t \leq 200$	230	350	8
QT450-10/C	$t \leq 30$	300	440	8
	$30 < t \leq 60$	供方提供指导值		
	$60 < t \leq 200$			
QT500-7/C	$t \leq 30$	300	480	6
	$30 < t \leq 60$	280	450	5
	$60 < t \leq 200$	260	400	3
QTS50-5/C	$t \leq 30$	330	530	4
	$30 < t \leq 60$	310	500	3
	$60 < t \leq 200$	290	450	2
QT600-3/C	$t \leq 30$	360	580	3
	$30 < t \leq 60$	340	550	2
	$60 < t \leq 200$	320	500	1
QT700-2/C	$t \leq 30$	410	680	2
	$30 < t \leq 60$	390	650	1
	$60 < t \leq 200$	370	600	1
QT800-2/C	$t \leq 30$	460	780	2
	$30 < t \leq 60$	供方提供指导值		
	$60 < t \leq 200$			

注: 若需方要求特定位置的最小力学性能值, 由供需双方商定。



表 1-15 铁素体珠光体球墨铸铁材料的硬度等级
[摘自《球墨铸铁件》(GB/T 1348—2019)]

材料牌号	布氏硬度范围/HBW	其他性能 ^{a,b}	
		抗拉强度 $R_m(\text{min.})/\text{MPa}$	屈服强度 $R_{p0.2}(\text{min.})/\text{MPa}$
QT-HBW 130	< 160	350	220
QT-HBW 150	130 ~ 175	400	250
QT-HBW 155	135 ~ 180	400	250
QT-HBW 185	160 ~ 210	450	310
QT-HBW 200	170 ~ 230	500	320
QT-HBW 215	180 ~ 250	550	350
QT-HBW 230	190 ~ 270	600	370
QT-HBW 265	225 ~ 305	700	420
QT-HBW 300°	245 ~ 335	800	480
QT-HBW 330°	270 ~ 360	900	600

注: a. 当硬度作为检验项目时, 这些性能值仅供参考。

b. 除了对抗拉强度有要求外还对硬度有要求时, 推荐的硬度的测定步骤参考 GB/T 1348—2019 中的 E.3。

c. HBW 300 和 HBW 330 不适用于厚壁铸件。

(五) 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是近些年发展起来的一种新型铸铁, 其石墨呈短片状, 片端钝而圆, 类似蠕虫。

1. 蠕墨铸铁的性能

蠕墨铸铁的力学性能介于同基体灰铸铁与球墨铸铁之间, 抗拉强度优于灰铸铁, 兼具一定的塑性和韧性。但因石墨是相互连接的, 故蠕墨铸铁的强度和韧性都不如球墨铸铁。

蠕墨铸铁具备优异的导热性能, 其抗热生长与抗氧化能力优于其他类型铸铁, 断面敏感性低于灰铸铁, 厚壁件性能分布更均匀, 耐磨性方面超越孕育铸铁及高磷耐磨铸铁。

2. 蠕墨铸铁的制取

制造蠕墨铸铁的原铁液和其炉前处理与球墨铸铁类似。蠕化剂一般采用稀土镁钛、稀土镁钙合金或镁钛合金, 加入量为铁液重量的 1% ~ 2%。

蠕墨铸铁的铸造性能接近灰铸铁, 缩孔、缩松倾向比球墨铸铁小, 故铸造工艺较简便。

3. 蠕墨铸铁的牌号及应用

蠕墨铸铁的牌号由 RuT 和一组数字组成, 其中 RuT 是“蠕铁”两字汉语拼音的前三个字母, 数字表示材料的最低抗拉强度, 例如 RuT400 代表的是最低抗拉强度为 400 MPa 的蠕墨铸铁。

凭借高力学性能与优良的热特性, 蠕墨铸铁适用于高温或大温度梯度工况部件, 如大型柴油机缸盖、制动盘、钢锭模具等。其具有低断面敏感性与良好的铸造性能, 适合制造复杂结构的大型铸件, 如重型机床床身、柴油机机体等。

三、有色金属

与黑色金属相比，有色金属具有密度小、强度高等特点，因此，在工业领域，尤其是在空间技术、原子能、计算机等新兴工业中，有色金属应用很广泛。

有色金属种类繁多，本模块重点介绍机械工业常用的铝及铝合金、铜及铜合金、滑动轴承合金及粉末冶金材料。这些材料在特定应用领域具有不可替代的优势。

(一) 铝及铝合金

1. 工业纯铝

纯铝呈现银白色金属光泽，密度 2.72 g/cm^3 ，熔点 $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ，导电导热性能优异，导电率仅次于银、铜。其表面氧化膜可阻止内部金属继续氧化，具备良好的大气腐蚀抗力，但耐酸碱盐腐蚀性较弱。晶体结构为面心立方，无同素异构转变，无磁性特征。纯铝塑性极佳（99.99% 纯度时抗拉强度 45 MPa 、断后伸长率 50%），低温性能突出（ $-235 \text{ }^\circ\text{C}$ 仍保持塑韧性），冷加工可提升强度但降低塑性。工艺性能优越，适合铸造、切削及冷热成形加工，焊接性能良好。工业中多用于制备铝合金或制造低强度要求的导热、耐大气腐蚀的器皿。

工业纯铝分为铸造纯铝和变形纯铝两种。按《铸造有色金属及其合金牌号表示方法》（GB/T 8063—2017）规定，铸造纯铝牌号由 Z 和铝的化学元素符号及表明纯铝百分含量的数字组成，如 ZA199.5 表示 $w_{\text{Al}}=99.5\%$ 的铸造纯铝。按《变形铝及铝合金牌号表示方法》（GB/T 16474—2011）规定，变形纯铝用 1+字母+数字的形式表示，字母表示原始纯铝的改型情况，如为 A，则表示为原始纯铝，如为其他字母，则表示为原始纯铝的改型，数字表示最低铝百分含量中小数点后面两位数字，如 1A30 表示 $w_{\text{Al}}=99.30\%$ 的原始纯铝。

2. 铝合金

纯铝因强度、硬度低，不宜直接用作工程结构材料。通过添加 Si、Cu、Mg、Zn、Mn 等主加元素及 Cr、Ti、Zr、B、Ni 等辅加元素制成铝合金，可在保持纯铝特性的同时提升其力学性能。

(1) 铝合金的分类。铝合金分为变形铝合金与铸造铝合金两类，依据成分与工艺特性划分。如图 1-14 所示。

此图中，合金成分位于 D 点左侧的合金加热至固溶线（FD 线）以上时塑性优良，适合锻造、轧制等塑性加工，称为变形铝合金。成分位于 D 点右侧的合金塑性较差，不宜压力加工，但流动性好，适于铸造工艺，称为铸造铝合金。此分类方法通过相图成分范围直接界定两类铝合金的应用领域。

变形铝合金按成分分为不可热处理强化与可热处理强化两类：F 点左侧的合金固溶体成分稳定，无法通过热处理强化；FD 区间的合金固溶体成分随温度变化，可经热处理强化。

(2) 变形铝合金。按《变形铝及铝合金牌号表示方法》（GB/T 16474—2011）的规定，变形铝合金用 2~8+字母+数字的形式表示。2~8 表示变形铝合金组别，依次表示主要合金元素为 Cu、Mn、Si、Mg、Mg+Si、Zn、其他元素。如 2A11 表示以铜为主要合金元素的变形铝合金。

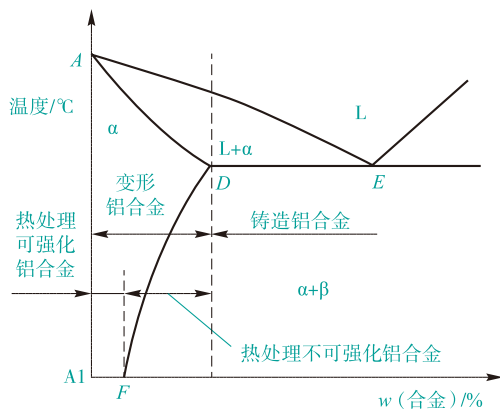


图 1-14 铝合金分类示意图

变形铝合金的热处理有别于钢，其淬火后硬度未显著提升，需经时效处理使强度、硬度增强，此现象称为时效硬化。室温时效为自然时效，加热（100 ~ 200 °C）时效为人工时效。因淬火态铝合金硬度较低，可在淬火后至时效前实施冷加工。淬火结合时效处理是该类铝合金的主要强化手段。

变形铝合金按性能和用途不同可分为以下四种。

①防锈铝：主要为 Al-Mn、Al-Mg 合金。防锈铝不能用热处理强化，但可通过冷变形产生的加工硬化来提高强度。防锈铝具有良好的塑性、耐蚀性及焊接性，主要用于受力不大、经冲压或焊接制成的结构件，如各种容器、油箱、导管、线材等。

②硬铝：主要为 Al-Cu-Mg 合金。硬铝经淬火+时效处理后具有较高的强度和硬度，在航空工业中获得了广泛的应用，如制造飞机构架、螺旋桨、叶片等。但硬铝的耐蚀性差，通常可在硬铝板表面包覆一层纯铝，以增强其耐蚀性。

③超硬铝：主要为 Al-Cu-Mg-Zn 合金。超硬铝经淬火+人工时效后具有较高的强度，但其耐热性较低、耐蚀性较差，可通过提高时效温度或包铝的方法解决。超硬铝常作飞机上主要受力部件，如大梁、桁架、翼肋、起落架和活塞等。

④锻铝：主要为 Al-Cu-Mg-Si 合金。锻铝经淬火+时效处理后强度可与硬铝媲美，并具有良好的锻造性能。生产中常用作棒料或模锻件。

（3）铸造铝合金。铸造铝合金应具有良好的铸造性能，其成分应接近共晶点。此外，为了提高其综合力学性能，常采用变质处理。对于需承受较大载荷的合金材料，可加入 Cu、Mg、Zn 等元素，以形成 CuAl_2 、 Mg_2Si 等强化相，再经淬火与时效处理后，能取得更为明显的强化效果。

铸造铝合金主要有 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系、Al-Zn 系四种，其中以 Al-Si 系合金应用最广。其代号用 ZL+ 三位数字表示，其中第一位数字表示铸造铝合金的类别（1 为 Al-Si 系、2 为 Al-Cu 系、3 为 Al-Mg 系、4 为 Al-Zn 系），后两位数字为合金顺序号。如 ZL102 表示 2 号 Al-Si 系铸造铝合金。

铸造铝合金的牌号由 Z 和基体金属铝的化学元素符号、主要合金化学元素符号以及表明合金化学元素名义质量分数的数字组成，牌号后加 A 表示优质。如 ZAlSi12 表示 $w_{\text{Si}}=12\%$ 的 Al-Si 系铸造铝合金。

几种常见铸造铝合金的代号（牌号）、化学成分、力学性能及用途见表 1-16。

表 1-16 几种常见铸造铝合金的代号(牌号)、化学成分、力学性能及用途
[摘自《铸造铝合金》(GB/T 1173—2013)]

合金类别	合金代号 (牌号)	铸造方法及热处理状态	室温力学性能			用途列举
			抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A/\%$	布氏硬度 HBW	
			不小于			
铝硅合金	ZL102 (ZAlSi12)	金属型 退水	145	3	50	形状复杂的零件,如仪表、抽水机壳体等
铝铜合金	ZL201 (ZAlCu5Mn)	砂型 淬火+不完全人工时效	335	4	90	气缸头、活塞、挂架梁、支臂等
铝镁合金	ZL301 (ZAlMg10)	砂型 淬火+自然时效	280	10	60	在大气或海水中工作的零件,能承受较大振动载荷
铝锌合金	ZAl401 (ZAlZn11Si7)	砂型 人工时效	245	1.5	90	压力铸造的零件,工作温度不超过 200℃,结构形状复杂的汽车、飞机零件

(二) 铜及铜合金

1. 纯铜

纯铜密度为 8.96 g/cm^3 , 熔点为 1083°C , 具有优良的导电性和导热性, 其导电性仅次于银。纯铜在大气、淡水中具有良好的耐蚀性, 但在海水中耐蚀性较差。纯铜具有面心立方结构, 无同素异晶转变, 无磁性。纯铜的强度不高 ($200 \sim 250 \text{ MPa}$), 硬度较低 ($40 \sim 50 \text{ HBW}$), 塑性很好 ($45\% \sim 50\%$)。冷变形后, 其强度在 $400 \sim 500 \text{ MPa}$, 硬度提高到 $100 \sim 200 \text{ HBW}$, 但伸长率下降到 5% 以下, 采用退火可消除铜的加工硬化。纯铜还具有优良的焊接性能。工业纯铜的主要用途是配制铜合金, 来制作导电、导热材料及耐蚀器件等。

工业纯铜的纯度为 $99.50\% \sim 99.90\%$, 其代号用“铜”字的汉语拼音首字母 T 加顺序号表示, 共有 T1、T2、T3、T4 四个牌号。顺序号越大, 表示纯度越低。

2. 铜合金

合金是在纯铜中加入 Zn、Sn、Al、Mn、Ni、Fe、Be、Ti、Zr 等合金元素所制成的。铜合金既保持了纯铜优良的特性, 又有较高的强度。按化学成分, 铜合金可分为黄铜、青铜、白铜三大类。黄铜是以 Zn 为主要合金元素的铜合金, 白铜是以 Ni 为主要合金元素的铜合金, 青铜是以除 Zn、Ni 外的其他元素为主要合金元素的铜合金。按生产加工方式分, 铜合金又分为加工铜合金和铸造铜合金两大类。除用于导电、装饰和建筑外, 铜合金主要在有耐磨和耐蚀要求的情况下使用。

(1) 黄铜。Cu-Zn 二元合金称为普通黄铜, 其加工产品代号表示方法为: H+ 铜的平均质量分数, 如 H68 表示 w_{Cu} 为 68% 的普通加工黄铜。普通黄铜中, $w_{\text{Zn}} < 32\%$ 的称为单相黄铜, 它强度低, 塑性好, 一般冷塑性加工成板材、线材、管材等, 常用代号有 H68、H70、H80, 主要用于制造弹壳和精密仪器; w_{Zn} 在 $32\% \sim 45\%$ 的称为两相黄铜, 它的热塑性好, 一般热轧成棒材、板材等, 常用代号有 H59、H62 等, 主要用于制造水管、油管、散热器、螺钉等。普通



黄铜具有良好的耐蚀性，但冷加工后的黄铜在海水、湿气、氨的环境中容易产生应力腐蚀开裂（季裂），故需进行去应力退火。

特殊黄铜是在普通黄铜的基础上加入 Al、Si、Pb、Sn、Mn、Fe、Ni 等合金元素形成的，相应地称为铝黄铜、硅黄铜、铅黄铜等。这些合金元素的加入均能提高合金的强度，另外 Al、Sn、Mn、Ni 能提高耐蚀性和耐磨性，Mn 能提高耐热性，Si 能改善铸造性能，Pb 能改善切削性能。特殊黄铜加工产品代号表示方法为：H+主加元素的化学元素符号+铜的平均质量分数+各合金元素的平均质量分数，如 HPb59-1 表示 w_{Cu} 为 59%、 w_{Pb} 为 1% 的加工铅黄铜。特殊黄铜常用代号有 HPb59-1、HSn90-1 等，主要用于制造冷凝管、齿轮、螺旋桨、钟表零件等。

铸造黄铜的牌号表示方法为：Z+铜的元素符号+主加元素的化学符号及其平均质量分数+其他元素的化学元素符号及其平均质量分数，如 ZCuZn38 表示 w_{Zn} 为 38%、余量为铜的铸造普通黄铜。

常用黄铜的牌号、化学成分、力学性能及用途见表 1-17。

表 1-17 常用黄铜的牌号、化学成分、力学性能及用途

[摘自《加工铜及铜合金牌号和化学成分》(GB/T 5231—2022)、《铸造铜及铜合金》(GB/T 1176—2013)]

类别	牌号	化学成分 w/%			加工状态或铸造方法	室温力学性能			用途列举
		Cu	其他	Zn		抗拉强度	伸长率	布氏硬度	
						R_m /MPa	A/%	HBW	
					不小于				
普通黄铜	H68	67.0 ~ 70.0	—	余量	软	295	50	—	复杂的冷冲件和深冲件、散热器外壳、导管及波纹管等
					硬	—	17	—	
	H62	60.5 ~ 63.5	—	余量	硬	335	12	—	销钉、铆钉、螺母、垫圈、导管、夹线板环形件、散热器等
特殊黄铜	HPb59-1	57 ~ 60	Pb0.8 ~ 1.9	余量	硬	370	8	—	销钉、螺钉等冲压件或加工件
	HMn58-2*	57 ~ 60	Mn1.0 ~ 2.0	余量	硬	—	—	—	船舶零件及轴承等耐磨零件
铸造黄铜	ZCuZn16Si4	79 ~ 81	Si2.5 ~ 4.5	余量	S、R	345	15	90	接触海水工作的配件以及水泵、叶轮和在空气、淡水、油、燃料以及工作压力在 4.5 MPa 和 250 °C 以下蒸汽中工作的铸件
					J	390	20	100	
	ZCuZn40Pb2	58 ~ 63	Pb0.5 ~ 2.5 Al0.2 ~ 0.8	余量	S、R	220	15	80	一般用途的耐磨、耐蚀零件，如轴套、齿轮等
					J	280	20	90	

注：软指 600 °C 退火；硬指变形度 50%；S 指砂型铸造；R 指熔模铸造；J 指金属型铸造。

(2) 青铜。根据所加合金元素不同，青铜分为锡青铜和特殊青铜两种。加工青铜的代号表示方法为：Q+主加元素符号及该元素的平均质量分数+其他元素平均质量分数，如 QSn4-3 表示 w_{Sn} 为 4%、 w_{Zn} 为 3% 的锡青铜。铸造青铜的牌号表示方法与铸造黄铜相同。

①锡青铜：以锡为主加元素的铜合金。锡青铜的性能主要取决于锡的含量。 $w_{\text{Sn}} < 5\%$ 的锡青铜塑性好，适于进行冷变形加工； w_{Sn} 在 $5\% \sim 7\%$ 的锡青铜热塑性好，适于进行热加工； w_{Sn} 在 $10\% \sim 14\%$ 的锡青铜塑性较低，适于铸造合金。锡青铜的铸造流动性差，易形成分散缩孔，铸件致密度低，但合金体收缩率小，适于铸造外形及尺寸要求精确的铸件。锡青铜具有良好的耐蚀性、减摩性、抗磁性和低温韧性，在大气、海水、蒸汽、淡水及无机盐溶液中的耐蚀性比纯铜和黄铜好，但在亚硫酸钠、酸和氨水中的耐蚀性较差。常用的锡青铜有QSn4-3、QSn6.5-0.4、ZCuSn10Pb1等，主要用于制造弹性元件、耐磨零件、抗磁及耐蚀零件，如弹簧、轴承、齿轮、蜗轮、垫圈等。

②无锡青铜：为了进一步提高青铜的力学性能和工艺性能，常在铜中加入铝、硅、铅、铍等元素组成硅青铜、铅青铜、铍青铜等不含锡的青铜。铝青铜的强度、硬度、耐蚀性高于锡青铜，并具有较高的耐热性；铍青铜不仅具有高的强度、硬度与弹性极限，同时还具有抗磁与受冲击时不产生火花等特性。

常用青铜的化学成分、力学性能及用途见表1-18。

表1-18 常用青铜的化学成分、力学性能及用途

[摘自《加工铜及铜合金牌号和化学成分》(GB/T 5231—2022)、《铸造铜及铜合金》(GB/T 1176—2013)]

类别	牌号	化学成分 w/%			加工状态 或铸造方法	室温力学性能		用途列举
		Sn	Cu	其他		抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 A/%	
						不小于		
锡青铜	QSn4-3	3.5 ~ 4.5	余量	Zn2.7 ~ 3.3	板、带、棒、线	550	4	弹簧、管配件和化工机械中的耐磨及抗磁零件
	ZCuSn10Pb1	9.0 ~ 11.5	余量	P0.26 ~ 0.40	砂型 金属型	220 310	3 2	重要的轴瓦、齿轮、连杆和轴套等
无锡青铜	QAl7	Al6.0 ~ 8.0	余量		板、带、棒、线	637	5	重要的弹簧和弹性元件
	QBe2	Be1.8 ~ 2.1	余量	Ni0.2 ~ 0.8	板、带、棒、线	500	30	重要仪表的弹簧、齿轮等
	ZCuPb30	Pb27.0 ~ 33.0	余量	—	金属型	—	—	高速双金属轴瓦、减磨零件等
	ZcuAl10Fe3Mn2	Al9.0 ~ 11.0	余量	Fe2.0 ~ 4.0 Mn1.0 ~ 2.0	砂型 金属型	490 540	13 15	重要用途的耐磨、耐蚀的重要铸件，如轴套、螺母、蜗轮等

(三) 轴承合金

轴承合金专用于制造滑动轴承、轴瓦及内衬材料。

1. 轴承合金的性能要求

当轴承支撑轴运转时，轴瓦表面承受交变载荷并与轴颈产生剧烈摩擦。为确保设备平稳低噪运行并降低轴瓦磨损，轴承合金需满足一些性能要求。



- (1) 具有一定的强度和疲劳抗力, 以承受较高的交变载荷。
- (2) 具有足够的塑性和韧性, 以抵抗冲击和震动, 并保证与轴的良好配合。
- (3) 具有较小的摩擦系数和良好的磨合能力, 并能储油。
- (4) 具有良好的导热性、抗蚀性和较低的膨胀系数, 以防温升影响轴的咬合。

2. 轴承合金的组织特点

为了满足以上性能要求, 轴承合金的组织特点应该是软硬兼有, 或者是在软基体上均匀分布着硬质点, 或者是在硬基体上均匀分布着软质点。当轴承工作时, 软组织很快被磨凹, 凸出的硬组织便起支撑轴的作用。这样, 既减小了轴与轴瓦的接触面, 凹下的空间又可储存润滑油, 保证轴承有良好的润滑条件和低的摩擦系数, 减轻轴的磨损。此外, 偶然进入的外来硬物也能被压入软组织内, 不致擦伤轴颈。

铸造轴承合金牌号以Z为前缀, 后接基体元素、主加元素符号及含量百分比, 例如ZSnSb 11 Cu 6 表示锡基轴承合金, 含锑 11%、铜 6%, 余量为锡。

3. 轴承合金的牌号及分类

(1) 锡基轴承合金。该合金属 Sn-Sb-Cu 系, 亦称锡基巴氏合金, 其摩擦系数低, 塑性、耐腐蚀性及导热性优良, 但成本较高, 适用于高速重载轴承制造, 如汽轮机、内燃机、涡轮机等关键设备。

(2) 铅基轴承合金。该合金属 Pb-Sb-Sn-Cu 系, 又称铅基巴氏合金, 综合性能略逊于锡基合金, 但经济性更优, 常用于制造低速低负荷轴瓦, 适用温度不超过 120 °C。

(3) 其他轴承合金。除了巴氏合金以外, 还有铜基、铝基轴承合金, 它们的特点是承载能力高、密度较小、导热性好和疲劳强度高, 工作温度较高, 价格便宜, 所以, 也广泛用作汽车、拖拉机、内燃机车等的一般工业轴承。

(四) 粉末冶金材料

粉末冶金材料是由几种金属粉末或金属与非金属粉末混匀压制成形, 并经过烧结而获得的材料。由于它存在一些微小孔隙, 属于多孔材料。

1. 粉末冶金法

粉末冶金与金属的熔炼和铸造有根本的不同。粉末冶金不用熔炼和浇注, 而是用金属粉末(包括纯金属、合金和金属化合物粉末)作原料, 经混匀压制成形和烧结制成合金材料或制品, 这种生产过程称为粉末冶金。

粉末冶金兼具特殊材料制备与精密近净成形加工双重功能, 可实现少、无切削生产。它可使压制品达到或接近零件要求的形状、尺寸精度与表面粗糙度, 大大提高生产率和材料利用率。

2. 常用粉末冶金材料

(1) 硬质合金。硬质合金是以碳化钨或碳化钨与碳化钛等高熔点、高硬度的碳化物为基, 并加入钴作为黏结剂所形成的一种粉末冶金材料。

硬质合金不能进行锻造及切削加工, 也不需要热处理, 其硬度很高(在 86 ~ 93 HRC), 且具有很高的耐热性, 故用硬质合金制成的刀具比高速钢刀具具有更高的切削速度。

(2) 烧结减摩材料。常用的烧结减摩材料为多孔轴承材料, 主要用于制造滑动轴承。这类零件压制成形后浸入润滑油中, 其孔隙可吸附大量的润滑油, 从而达到减摩及润滑的效果。常

用于制造纺织机械、家用电器等的轴承，也可用于其他轴承。

除此以外，粉末冶金法常用于制造特殊性能金属材料，如结构材料、摩擦材料及电磁性能材料等。

由于压制设备吨位及模具制造的限制，粉末冶金法还只能生产尺寸有限且形状不太复杂的工件。此外，粉末冶金制品的力学性能仍低于铸件与锻件。

复习思考题

1. 比较说明 HBS 和 HRC 两种硬度指标在测试方法、适用硬度范围以及应用范围上的区别。
2. 下列各种工件应该采用何种硬度试验方法来测定其硬度？
① 锉刀；② 黄铜轴套；③ 供应状态的各种碳钢钢材；④ 硬质合金刀片；⑤ 耐磨工件的表面硬化层。
3. 为什么金属的疲劳断裂具有很大的危险性？如何提高金属的疲劳强度？
4. 什么叫金属材料的工艺性能？研究工艺性能有何意义？
5. 简述碳钢和白口铸铁在成分、组织、性能上的差别。
6. 指出这几种钢的类别、碳的质量分数及用途：ZG 200-400、T7、T12A。
7. 合金钢中经常加入的元素有哪些？它们在钢中有什么作用？
8. 为什么汽车变速箱齿轮常采用 20CrMnTi 钢制造，而机床的变速箱齿轮却用 45 钢或 40Cr 钢制造？
9. 白口铸铁、灰铸铁和钢，三者的成分、组织和性能有何主要区别？
10. 灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁在组织上的根本区别是什么？试述石墨对铸铁性能的影响。
11. 铝合金分为几类？各类铝合金各有何强化方法？铝合金淬火与钢的淬火有何异同？
12. 铜合金分为几类？举例说明各类铜合金的牌号、性能特点和用途。
13. 轴承合金必须具备哪些特性？其组织有何特点？常用滑动轴承合金有哪些？



在线测试