

陈玉祥 王霞 编著

油气田应用材料



石油天然气是当下全球经济发展最为依赖的主要能源之一，当前面临的挑战是如何对有限的石油天然气资源进行充分开发和合理利用。随着非常规油气资源动用的越来越多，资源开发利用的难度加大，材料技术已成为资源充分开发和合理利用的物质基础和技术先导，成为石油天然气开发中的重要技术。各种材料已渗透到油气田开发的各个领域内，了解和应用先进材料显得必不可少……

中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

油气田应用材料

陈玉祥 王 霞 编著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

油气田应用材料 / 陈玉祥, 王霞编著. —北京: 中国石化出版社, 2009

ISBN 978-7-80229-747-0

I. 油… II. ①陈… ②王… III. 油气田-材料科学
IV. TE-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 118130 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京金明盛印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 13.5 印张 335 千字

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

定价: 39.00 元

前 言

能源、信息、材料被认为是 21 世纪国民经济的三大支柱，其中材料是各行各业的基础，可以说，没有先进的材料，就没有先进的石油开采技术，因此，材料研究在石油开发中显示出越来越重要的地位。油气田应用材料种类繁多、用量巨大。其中，金属材料、水溶性高分子材料所占比例较大，近年来随着常规油气资源的减少，资源开发利用的难度愈来愈大，无机非金属材料 and 新型复合材料在石油开发中的作用也日益凸显，起到了非常重要的作用。所以说材料技术已成为石油能源进行有效开发和合理利用的物质基础和先导，学习和了解各种材料在油气田开发中的应用显得尤为重要。

作者根据多年的油气田现场生产经验，结合目前所从事的油气田开发和材料科学的研究，对油气田开发中所涉及各类相关材料——金属、无机非金属和高分子三大基础材料、以及在三大基础材料基础上发展起来的复合材料和其他类型的新材料作了科学的分类研究，以油气田开发中所涉及的这些材料的品种、类型、性能和使用特性为重心的编著本书。

本书以材料学科的内容为框架，结合油气田开发现场的实际需要，主要阐述了油气田开发过程中所涉及到的各类应用材料，重点强调了各类油气田应用材料的基本规律、性能要求及发展趋势，编写力求语言简洁，内容充实，深度适中，实用性强。本书的编著和出版获四川省学术带头人培养基金项目(001003544)资助，是第一本介绍各种材料在油气田开发领域中应用的专著，以期对从事石油开发和材料学研究的技术人员有较好的借鉴作用。

本书由西南石油大学一直从事油气田材料和油气田开发科研和教学工作的陈玉祥、王霞和范舟三位老师编写；同时潘成松、侯铎、刘多容和杜旭东四位研究生参加了相关章节的编写工作。第一章材料科学基础知识由王霞、范舟、潘成松编写；第二章油气田开发用金属材料由陈玉祥、杜旭东编写；第三章油气田开发用无机非金属材料由陈玉祥、潘成松编写；第四章油气田开发用高分子聚合物由王霞、侯铎编写；第五章油气田开发用复合材料由王霞、刘多容编写；第六章油气田开发用新材料由陈玉祥、潘成松编写。全书由陈玉祥、王霞统稿。

本书在编写过程中，参考了大量的文献，对这些文献的作者表示衷心地感谢！另外研究生李刚、上官昌淮和胡刚等同学参加了本书的文字校对、图形处理等工作，在此一并表示感谢！

本书由于涉及众多学科，加之编者学识水平所限，读者不可避免地会发现一些不足之处。谬误或不当之处敬请不吝指正。

编 者
2009 年 5 月于成都

目 录

第一章 材料科学基础知识	(1)
第一节 金属材料科学基础知识	(1)
一、金属的晶体结构	(1)
二、常用金属材料	(5)
三、金属材料的性能	(9)
四、金属材料的热处理	(17)
第二节 无机非金属材料科学基础知识	(20)
一、无机非非金属材料的晶体结构	(20)
二、无机非金属材料的特点及种类	(24)
三、无机非非金属材料的性能	(31)
四、无机非非金属材料的制备工艺	(37)
第三节 高分子材料科学基础知识	(42)
一、高分子的基本概念	(42)
二、聚合物	(43)
三、高分子的合成方法	(51)
四、高分子材料的性能	(52)
第二章 油气田开发用金属材料	(56)
第一节 钻井用金属材料	(56)
一、钻头	(56)
二、钻铤	(57)
三、钻杆	(58)
四、套管	(65)
第二节 油气田开发用金属材料	(70)
一、油管	(70)
二、抽油杆柱	(79)
第三节 油气集输管线用金属材料	(83)
一、油气集输管线概述	(83)
二、油气集输用钢管	(84)
三、油气集输管线性能	(86)
第三章 油气田开发用无机非金属材料	(93)
第一节 油井水泥及水化硬化过程	(93)
一、油井水泥	(93)
二、油井水泥的水化与硬化	(102)
第二节 油气钻探用金刚石	(105)
一、钻探用金刚石	(105)

二、钻探用金刚石的性质	(105)
三、金刚石钻头	(106)
第三节 油气田开发用陶瓷	(112)
一、陶瓷种类	(112)
二、陶瓷材料的性能特点	(113)
三、油气田开发用陶瓷材料	(115)
第四章 油气田开发用高分子聚合物	(118)
第一节 聚合物化学剂	(118)
一、采油用聚合物的性能和作用	(118)
二、聚合物溶液性质	(119)
三、聚合物驱和聚合物/碱/表面活性剂复合驱	(121)
四、水力压裂液聚合物添加剂	(125)
五、化学调剖堵水剂	(131)
第二节 聚合物钻井液处理剂及油井水泥降失水剂	(138)
一、聚合物钻井液处理剂	(138)
二、油井水泥降失水剂	(143)
第三节 油气田采输用聚合物防腐蚀涂料	(148)
一、防腐蚀涂料的特点和作用	(149)
二、防腐蚀涂料的组成和各组分的作用	(150)
三、油气田常用防腐蚀涂料	(153)
四、油气田防腐蚀涂料配套系统	(160)
第五章 油气田开发用复合材料	(163)
第一节 复合材料概述	(163)
一、复合材料的定义	(163)
二、复合材料的分类	(163)
三、复合材料的性能特性	(164)
第二节 油气田开发用玻璃钢	(165)
一、玻璃钢	(165)
二、玻璃钢抽油杆	(166)
三、玻璃钢管	(169)
四、玻璃钢地下油罐	(171)
五、玻璃钢阀门	(172)
第三节 油气田开发用碳纤维复合材料	(172)
一、碳纤维复合材料	(172)
二、碳纤维连续抽油杆	(173)
三、海上采油平台	(177)
第四节 油气田开发用金属基复合材料	(178)
一、金属基复合材料	(178)
二、金属基复合轴承	(179)
三、金属基复合管道	(179)

第五节 油气田用其他复合材料	(180)
一、防砂用硅酸盐复合材料	(180)
二、固井用纤维增强水泥基复合材料	(180)
第六章 油气田开发用新材料	(182)
第一节 新材料概述	(182)
一、新材料的定义	(182)
二、新材料在油气田中的应用概况	(183)
第二节 油气田开发用高性能结构材料	(184)
一、油气田开发用高性能金属	(184)
二、油气田开发用高性能工程塑料	(186)
三、油气田开发用表面工程材料	(188)
第三节 油气田开发用新型功能材料	(190)
一、形状记忆合金接头和封隔器	(191)
二、形状记忆聚合物异径管接头	(192)
三、光纤传感器	(193)
四、油气田用其他新型功能材料	(194)
第四节 油气田开发用纳米材料	(195)
一、纳米材料	(195)
二、纳米材料的特殊结构及基本效应	(196)
三、纳米材料的制备方法	(198)
四、纳米材料的表面改性	(199)
五、纳米材料在油气田开发中的应用	(199)
参考文献	(203)

第一章 材料科学基础知识

第一节 金属材料科学基础知识

金属材料是最重要的工程材料，包括纯金属和合金。简单金属原子之间以金属键结合，过渡金属原子的结合键以金属键为主，也有部分共价键。由于金属键没有方向性，原子之间没有选择性，所以金属材料在受外力作用而发生相对运动时不会破坏金属键。以金属为主体的工程材料具有较高的弹性模量、硬度和强度、塑性、韧性、导电和导热性能优异。油气田钻采过程中需要大量金属材料，合理使用金属材料，正确认识和掌握金属材料基础知识，对充分发挥金属材料的作用很有实际意义。

一、金属的晶体结构

1. 纯金属的晶体结构

金属中原子的排列是有规则的，而不是杂乱无章的，人们把凡是原子(或离子、分子)在三维空间上按一定规律呈周期性排列的固体称为晶体；而非晶体则无这种周期性排列，如玻璃、松香、木材、棉花等都是非晶体。晶体结构就是晶体内部原子排列方式及特征，决定晶体结构的内在因素是原子或离子、分子键合的类型及键的强弱。金属在固态下一般都是晶体，金属晶体的结合键是金属键。由于金属键具有无饱和性和方向性的特点，从而使金属内部的原子趋于紧密排列，构成高度对称的简单晶体结构。组成晶体的物质点不同，就可能形成各种各样的晶体。假定晶体中的物质点都是固定的刚球，那么晶体就由这些刚球按一定的规律堆积而成(图1-1(a))。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点抽象为纯粹的几何点，称之为阵点(或结点)。这些阵点有规则地周期性重复排列所形成的空间几何图形即称为空间点阵，而通常以假想在几个方向上将阵点连接起来，形成一个空间格子，称为晶格(图1-1(b))。

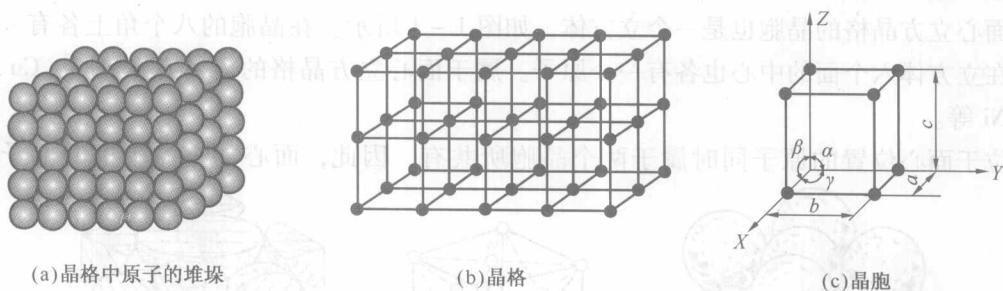


图1-1 晶体、晶格、晶胞及晶格常数示意图

从1-1(b)中可以看出，晶体中阵点排列具有周期性特点，可以从晶格中选取一个能代表晶体特征的最小几何单位来分析阵点的排列规律，这个最小的几何单元则称为晶胞(图1-1(c))。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 表示。其中 a 、 b 、 c 及 α 、 β 、 γ 为晶格常数。不同金属晶体因晶格形式及晶格常数的不同，表现出

不同的物理、化学和力学性能。

(1) 三种常见的金属晶体结构

① 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞为一个立方体(图 1-2)。晶胞的八个角上各有一个原子,在立方体的中心还有一个原子,因其晶格常数 $a=b=c$, 且 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。属于体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mo、W、V 等。

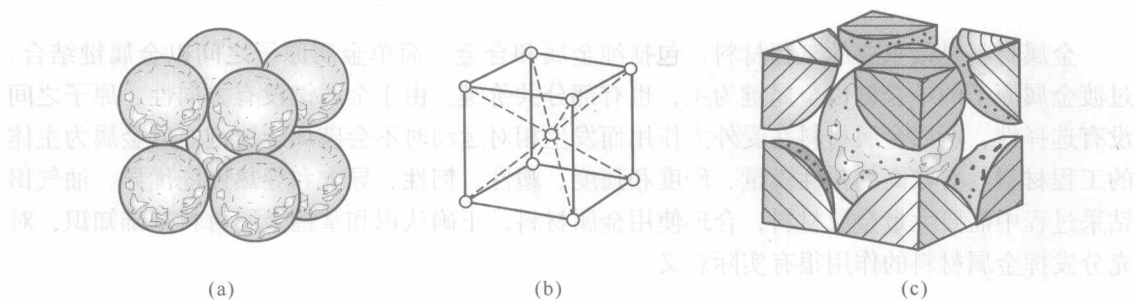


图 1-2 体心立方晶格的晶胞示意图

在体心立方晶胞中,每个顶点上的原子为 8 个晶胞所共有,故只有 $1/8$ 个原子属于这个晶胞。晶胞中心的原子完全属于这个晶胞,所以体心立方晶胞中的原子数为: $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 。

晶胞中原子排列的紧密程度可以用两个参数来表征:配位数和致密度。配位数是指晶体结构中,与任一个原子相邻最近、等距离的原子数目。显然,配位数越大,原子排列便越紧密。在体心立方晶格中,以立方体中心的原子来看,与其最近邻且等距离的原子有 8 个,所以体心立方晶格的配位数为 8。

致密度 K 就是晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比。体心立方晶胞含有两个原子,原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$, 晶胞体积为 a^3 , 故体心立方晶格的致密度为:

$$K = 2 \times \frac{4}{3}\pi \times \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 / a^3 = 0.68$$

② 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,如图 1-3 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子,在立方体六个面的中心也各有一个原子。属于面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Cu、Al、Ag、Ni 等。

位于面心位置的原子同时属于两个晶胞所共有,因此,面心立方晶胞中的原子数为

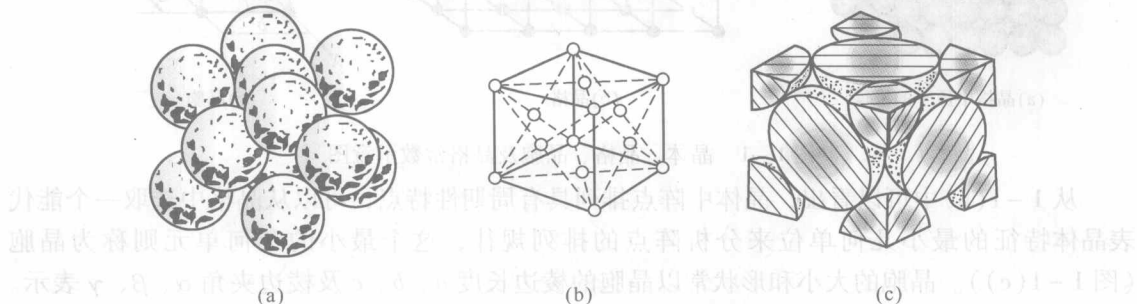


图 1-3 面心立方晶格的晶胞示意图

$$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4。$$

在面心立方晶胞中，对角线的长度为 $\sqrt{2}a$ ，等于4个原子半径，所以面心立方晶胞的原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。从图1-3可以看出，晶胞中每个原子周围都有2个最近邻原子，所以面心立方晶胞的配位数是12。

$$\text{面心立方晶胞的致密度为: } K = 4 \times \frac{4}{3}\pi \times \left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3 / a^3 = 0.74。$$

③ 密排六方结构

密排六方结构的晶胞是一个正六棱柱体，如图1-4示。晶胞的十二个角各有一个原子，构成六方柱体，上下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有3个原子。属于密排六方晶格的金属有Zn、Mg、 α -Ti等。

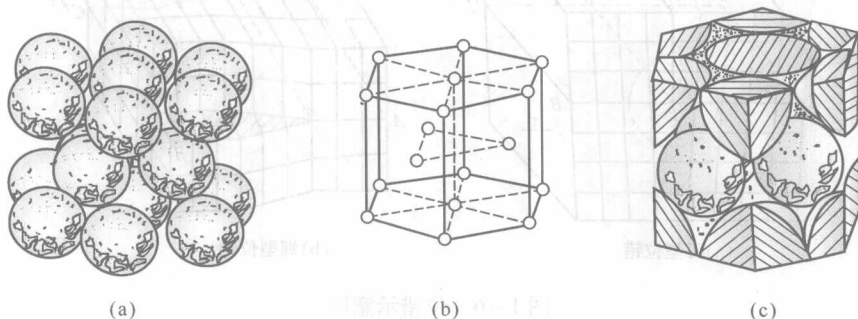


图1-4 密排六方晶格的晶胞示意图

密排六方晶胞的晶格常数有两个：一是正六边形的边长 a ，另一个是上下两底面之间的距离 c ， c 与 a 之比称为轴比。此时原子半径为 $1/2a$ 。晶胞原子数为 $1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ ，配位数为12，致密度为0.74，与面心立方晶格相同。

部分金属在特定温度和压力下具有不同的晶体结构即具有多晶型性。当外部条件改变时，金属内部由一种晶体结构向另一种晶体结构转变称为多晶型转变，转变的产物称为同素异构体。例如，铁在912℃以下为体心立方结构，在912~1394℃具有面心立方结构，温度超过1394℃至熔点间转变为体心立方结构。由于不同晶体结构的致密度不同，当金属由一种晶体结构向另一种晶体结构转变时，将伴随着体积的突变。同素异构转变对于金属是否能够通过热处理操作来改变自身性能具有重要的意义。

(2) 实际金属的晶体结构

在金属晶体结构中，由于原子的热运动，以及晶体的形成条件、冷热加工过程等因素的影响，实际晶体中不可避免地存在许多不完整的部位，即晶体缺陷。根据晶体缺陷的几何特征，可以将它们分为三类：

① 点缺陷是指在三维空间的各个方面上尺寸都很小的缺陷，尺寸范围约为一个或几个原子尺度，包括空位、间隙原子、杂质或溶质原子等，如图1-5。

② 线缺陷是指在两个方向上尺寸很小，另外一个方向上尺寸较大的缺陷。位错是金属结构中最常见的线缺陷。当晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体沿某晶面发生局部滑移时，滑移面上滑移区与未滑移区的交界线称为位错。通常位错分为刃型位错和螺型位错，如图1-6。

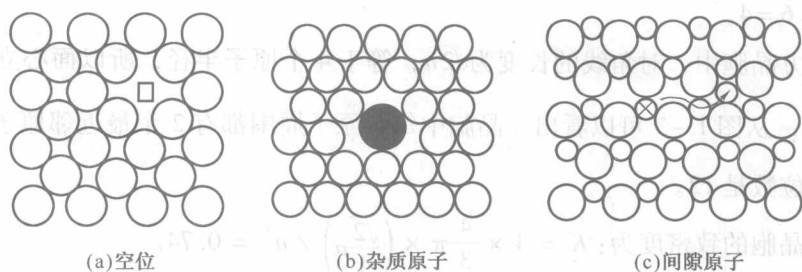


图 1-5 晶体中的点缺陷

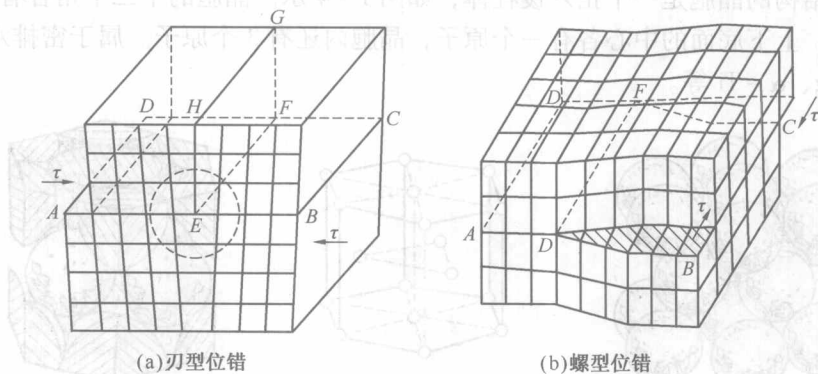


图 1-6 位错示意图

③ 面缺陷是指在一个方向上尺寸很小，另外两个方向上尺寸很大的缺陷，主要包括晶界和亚晶界等。常用金属都是由很多晶粒组成的，叫做多晶体，晶粒与晶粒之间的交界面称为晶界。每一个晶粒相当于一个单晶体，单晶粒是由许多尺寸、位向差很小的小晶块组成，这些小晶块称为亚晶粒。亚晶粒之间的交界面称为亚晶界，如图 1-7。

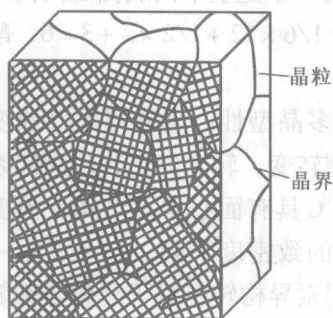


图 1-7 多晶体及晶界、亚晶界示意图

2. 合金的晶体结构

合金是由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)组成的具有金属特征的材料。绝大多数合金是通过熔化、精炼而成，只有少数合金在固态下通过制粉、混合、压制成型、烧结等工序完成。

组成合金的最基本并能独自存在的物质称为组元。合金中具有相同成分、相同晶体结构和性质并以界面相互隔开的均匀组成部分称为相。金属可以是单相或多相，由一种相组成的合金称为单相合金，由几种不同的相组成的合金称为多相合金。尽管合金中的组成相多种多样，但根据合金中各组元间的相互作用，可分为固溶体和金属化合物两大类。

(1) 固溶体

固溶体是指合金两组元在固态下相互溶解而形成的一种成分均匀的新固相。合金中晶格形式被保留的组元称为溶剂，溶入固溶体中失去其原有晶格类型的组元是溶质。固溶体的晶格形式与溶剂组元的晶格相同。

根据溶质原子在溶剂晶格中所占位置的不同，可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

① 置换固溶体

当合金二组元的原子直径大小相近,溶质原子占据溶剂晶格的结点,取代部分溶剂原子而形成的固溶体,称为置换固溶体。例如,锌溶解于铜中形成置换固溶体。

② 间隙固溶体

当溶质原子半径远小于溶剂原子半径,溶质原子进入溶剂晶格的间隙而形成的固溶体称为间隙固溶体。一般地,溶质原子半径与溶剂原子半径之比 ≤ 0.59 时,则形成间隙固溶体。例如,铁碳合金中的碳原子溶于铁的间隙中而形成间隙固溶体。由于溶质原子的溶入,引起溶剂晶格发生歪扭和畸变,使合金的强度、硬度上升,塑性、韧性下降的现象,称为固溶强化。在实际生产中,常常运用固溶强化的方法来提高金属材料的力学性能。

(2) 金属化合物

金属化合物是指合金中晶体结构与组成元素的晶体结构均不相同的固相物质。金属化合物具有复杂的晶格类型。金属化合物一般具有高熔点、高硬度,而塑性及韧性极差,可用于提高合金的强度、硬度和耐磨性。生产中,常通过压力加工和热处理等方法,改变金属化合物在合金中的形状、大小及分布,来调节合金的性能。

根据合金中金属化合物相结构的性质和特点,可将其分为正常价化合物、电子化合物及间隙化合物三类:

① 正常价化合物

符合正常原子价规律的化合物,具有一定的化学成分,可用分子式来表示。通常金属性强的元素与非金属或类金属(具有特殊性能介于金属与非金属之间的元素)都能形成这种类型化合物,例如 Mg_2Sn 、 Mg_2Si 、 MnS 等。

正常价化合物具有较高的硬度和脆性,在合金中,当它在固溶体以细小而均匀地分布时,可使合金得到强化。

② 电子化合物

按一定的电子浓度比组成一定晶体结构的化合物。所谓电子浓度 C_e 是指化合物中价电子数与原子数的比值,即 $C_e = \text{价电子数} / \text{原子数}$ 。当 $C_e = 3/2$,形成具有体心立方晶格的 β 相,如黄铜; $C_e = 21/13$,电子化合物为复杂立方晶格的 γ 相,如 Cu_5Zn_3 化合物; $C_e = 7/4$,形成具有密排六方晶格的 ϵ 相,如 $CuZn_3$ 化合物。电子化合物性能特点是熔点和硬度高,可作为强化相存在于合金中。

③ 间隙化合物

由原子半径较大的过渡族元素和原子半径较小的非金属元素组成。过渡族元素的原子占据新晶格的正常位置,原子半径较小的非金属元素的原子则有规律地嵌入晶格的间隙中。

晶体结构中原子半径比小于 0.59 时,形成简单晶格的间隙化合物,如 TiC 、 ZrC 、 NbC 、 VC 等,简单晶格间隙化合物的显著特点是熔点和硬度极高,十分稳定;当原子半径比大于 0.59 时,形成复杂晶格的间隙化合物,如 Fe_3C 、 FeB 、 $Cr_{23}C_6$ 等。复杂晶格的间隙化合物的熔点,硬度和稳定性方面均比简单晶格的间隙化合物差,这一点对钢铁的热处理有较大影响。

二、常用金属材料

1. 钢铁

由于钢铁材料价格低廉、便于冶炼、容易加工、性能各异,能满足很多生产及应用方面

的要求，因此钢铁材料成为使用最广、用量最大的金属材料，在现代工业、农业、科研、国防等行业中占有极其重要的地位。据统计，机械产品中钢铁材料约占 95%。

(1) 分类和编号

① 分类

按用途分类是我国主要的钢材分类方法，根据用途一般将钢材分为三类：结构钢、工具钢、特殊性能钢。

按化学成分，可分为碳素钢和合金钢两大类。碳素钢又分为低碳钢、中碳钢、高碳钢；合金钢可分为低合金钢、中合金钢、高合金钢。

根据室温时的显微组织或平衡状态下的显微组织，可以将钢分为：亚共析钢、共析钢、过共析钢和莱氏体钢；或珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢、奥氏体钢、铁素体钢、复相钢等。

按钢中的 P、S 含量不同，分为普通钢、优质钢、高级优质钢。

② 编号

我国钢的编号，由三大部分组成：化学元素符号、汉语拼音字母和阿拉伯数字。其化学元素符号表示钢中所含的合金元素种类；汉语拼音字母用来对钢的种类、性质、特点、要求等内容加以说明；阿拉伯数字用来表示合金元素的含量或钢性能的数值。

I) 普通碳素结构钢 普通碳素结构钢牌号由 Q、屈服强度数值、质量等级符号(分 A、B、C、D 四级)和脱氧方法(F、B、Z、TZ)等四部分按顺序组成；

II) 优质碳素结构钢 优质碳素结构钢牌号用两位数字表示，这两位数字表示钢中的平均含碳量的万分数。如 45 钢表示平均含碳量为 0.45%。如果是高级优质钢，则在牌号后面加“A”表示；

III) 碳素工具钢 碳素工具钢的编号是在 T 的后面附以数字来表示，数字代表钢中平均碳的质量分数，以 0.1% 为单位。例如，T12 表示平均碳的质量分数 $W_c = 1.2\%$ 的碳素工具钢；

IV) 合金结构钢 合金结构钢的牌号采用“二位数字加元素符号加数字”表示。前面两位数字表示钢的平均碳含量的万分数，元素符号表示钢中所含的合金元素，而后面数字表示该元素平均含量的质量百分数；

V) 合金工具钢 合金工具钢的牌号表示方法与合金结构钢相似，其区别在于用一位数字表示平均碳含量(C)的千分数。

除此之外，还有一些特殊专用钢，为表示钢的用途在钢号前面冠以汉语拼音，而不标出含碳量。如 GCr15 为滚珠轴承钢，“G”为“滚”的汉语拼音字首。

(2) 碳素钢

碳钢有结构钢和工具钢之分。结构钢是制造一般机械零件和工程结构所用的钢；工具钢主要用于制造刀具、量具和模具等。

① 普通碳素结构钢

对化学成分要求不甚严格，钢的磷、硫含量较高($P \leq 0.045\%$, $S \leq 0.055\%$)，但必须保证其力学性能。常用普通碳素结构钢的牌号有 Q195、Q215、Q235 等。

② 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢既要保证其力学性能，又要保证其化学成分，钢中的磷、硫含量较低(S、P 含量均不大于 0.035%)。使用前一般都要进行热处理。常用优质碳素结构钢的牌号

有 35、40、45 等。

③ 碳素工具钢

碳素工具钢的含碳量一般在 0.65% ~ 1.35%，可分为优质碳素工具钢和高级优质碳素工具钢两类，随着碳含量的增加(从 T7 到 T13)，钢的硬度无明显变化，但耐磨性增加，韧性下降。

碳素工具钢的优点是成本低，冷热加工工艺性好，在手用工具和机用低速切削工具上有较广泛的应用。常用碳素工具钢的牌号有 T10、T10A、T9、T12 等。

(3) 合金钢

合金钢是为改善碳素钢的某些性能而加入一种或几种合金元素形成的钢。可以分成合金结构钢、合金工具钢和特殊性能钢。

① 合金结构钢

在低碳钢的基础上加入少量合金元素而得到，具有较高强度的合金钢。主要分为两种：一种是普通低合金结构钢，另一种是机器结构钢。合金结构钢具有强度高，用此类钢可提高构件的可靠性，并能减轻重量，节约钢材。主要用于制造桥梁、船舶、车辆、锅炉、高压容器、输油输气管道、大型钢结构等。常用合金结构钢的牌号有 16Mn、20Cr、20CrMnMo、40Cr、35CrMo 等。

② 合金工具钢

合金工具钢是在碳素工具钢的基础上，加入合金元素(Si、Mn、Cr、V 等)制成的。由于合金元素的加入，提高了材料的热硬性、耐磨性，并改善了材料的热处理性能。合金工具钢常用来制造各种切削刀具、模具、量具和其他耐磨工具。因而对应地也就有刃具钢、模具钢、量具钢之分。其性能、化学成分和组织状态也不同。常用合金工具钢的牌号有 9SiCr、W18Cr4V、Cr12MoV、5CrMnMo 等。

③ 特殊性能钢

凡具有特殊的物理、化学性能的钢，称为特殊性能钢。特殊性能钢的种类很多，比较重要的有不锈钢、耐热钢和耐磨钢。

I) 不锈钢 不锈钢是指在腐蚀性介质中具有高度化学稳定性的合金钢。能在酸、碱、盐等腐蚀性较强的介质中使用的钢，又称为耐蚀钢，或称耐酸钢。耐蚀钢一般都具有良好的抗大气腐蚀性能。按组织不同，不锈钢可分为马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢、奥氏体型不锈钢和双相不锈钢。常见不锈钢的牌号有 1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9Ti、1Cr21Ni5Ti 等。

II) 耐热钢 耐热钢是指在高温下具有高的热化学稳定性和热强性的特殊钢。热化学稳定性是钢在高温下对各类介质化学腐蚀的抗力；热强性是钢在高温下具有较高强度的性能。

为了提高钢的抗氧化性，加入 Cr、Si 和 Al 等合金元素，在钢的表面形成完整稳定的氧化物保护膜。但 Si 和 Al 含量较多时使钢材易变脆，所以一般都以加 Cr 为主。为了提高钢的热强性，加入 Ti、Nb、V、W、Mo、Ni 等合金元素。

耐热钢按组织不同可分为：奥氏体型耐热钢、珠光体型耐热钢、马氏体型耐热钢。常用耐热钢的牌号有 1Cr13Mo、1Cr13、Cr11MoV、4Cr9Si2 等。

III) 耐磨钢 耐磨钢主要用于承受严重磨损和强烈冲击的零件，如车辆履带板、挖掘机铲斗、破碎机颚板和铁轨分道叉、防弹板等。对耐磨钢的主要要求是有很高的耐磨性和韧性。高锰钢一般含有较高的碳(1.0% ~ 1.3%)和锰(11% ~ 14%)，还含有一定量的硅以改善钢的流动性。其牌号主要有 ZGMn13-1 ~ ZGMn13-5。

2. 有色金属合金

除钢铁以外的金属材料称为有色金属。把密度低于 4.5kg/m^3 的金属称为轻金属，目前全世界金属材料的总产量为 $8 \times 10^8\text{t}$ ，其中有色金属占 5%。习惯上把有色金属分为以下几类：

- a. 有色轻金属，如镁、铝等；
- b. 有色重金属，如铜、锌、铅、锡等；
- c. 稀有金属，如钛、钨、钒、钼、锆等；
- d. 贵金属，如金、银、铂、铑等；
- e. 放射性金属，如铀、镭、钍、钋等。

有色金属种类繁多，性质千差万别，用途极其广泛。随着航空、航海、石油化工以及空间技术的发展，轻金属铝和钛在工业上占有越来越重要的地位。

(1) 铝及铝合金

铝及铝合金具有比强度高、塑性优良、导电、导热性能优异等特点，同时还具有良好的加工性能和耐蚀性，在航天航空、电气、石油化工、运输等领域都有广泛的应用。

纯铝为银白色，相对密度为 $2.7 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，熔点为 660°C ，沸点为 2477°C ，强度、硬度较低，塑性较好，导电性和导热性好。将合金元素加入纯铝中可以获得一系列铝合金。这些合金元素加入后，通过固溶或析出形成不同的相，分布在铝的基体内，可以不同程度地影响铝的物理性能、力学性能、加工性能及耐腐蚀性能等。铝合金的种类很多，根据铝合金的工艺性能可分为铸造铝合金和变形铝合金。铸造铝合金主要是包括硅铝合金、镁铝合金、铝铜合金等；变形铝合金主要有铝锰(镁)合金；铝铜镁合金等。

在油气田钻采中，铝合金占有重要地位。如用于石油天然集输管线的铝合金管是挤压无缝管，铝合金有 1A70A、3A21、6061、6063 等；在石油天然气钻探过程中制作钻探器，如美国生产的 2014 铝合金钻探器等。

(2) 钛及钛合金

钛习惯上被归为稀有金属，但实际上其储量极为丰富，仅次于铝、铁和镁，位居金属中的第四位。钛及钛合金具有重量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀及良好的低温韧性等优点，因而在航天、航空、石油、化工等方面获得了广泛的应用。

纯钛为银白色，相对密度 $4.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，熔点 1668°C ，强度不高，高塑性，耐蚀性和耐热性。钛合金按微观结构可分为三类： α 钛合金、 $\alpha + \beta$ 钛合金和 β 钛合金。 α 钛合金具有高温性能好，在 $300 \sim 550^\circ\text{C}$ 具有优良的高温强度和抗氧化性、组织稳定等特点，可作管道、高压容器等，如 $\text{Ti}-5\text{Al}-2.5\text{Sn}$ 。 $\alpha + \beta$ 钛合金在常温时强度高，高温 ($>500^\circ\text{C}$) 强度较低，焊接性能差，可制作叶片、容器等。 β 钛合金其特点是塑性好，但性能不稳定，高温强度和抗氧化性能较差，常用作飞机结构件和紧固件。

(3) 铜及铜合金

铜及铜合金的性能特点是具有高的导热性、导电性、抗蚀性，中等强度但塑性很高，工艺性能良好。铜及铜合金可分为四大类：紫铜、黄铜、青铜和白铜。按加工状态可分为铸造铜合金和加工铜合金。

纯铜呈紫红色，相对密度为 $8.9 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，熔点 1083°C ，强度低，硬度低，塑性好，导电性能和导热性好，主要用作导电、导热及抗腐蚀器材。

黄铜是以锌为主要合金元素的铜合金，具有优良的机械性能，易于加工成型，对大气有

优异的抗腐蚀性能,黄铜可分为普通黄铜和特殊黄铜。特殊黄铜可用于制作油气田中常用的石油管材。

青铜是指以锡、铅等为主要合金元素的铜合金,由锡青铜、铅青铜、硅青铜、铍青铜等。青铜常用于耐磨、耐腐蚀的器材。

白铜是以镍为主要合金元素的铜合金,具有优异的耐腐蚀性能,可用作蒸发器、凝汽器等腐蚀环境中的器件。白铜分为耐腐蚀用白铜和电工用白铜两种。

(4) 镁及镁合金

镁是现代工业合金中密度最小、力学性能较低,应用范围受到很大的限制的金属元素。纯镁的耐蚀性能很差,但加入一些合金元素制成镁合金,通过制造工艺加以控制,获得的系列镁合金可以大大改善镁合金的耐蚀性能。虽然镁合金的强度、弹性模量比铝合金、合金钢低,但其比强度明显高于铝合金和钢,比刚度则与铝合金和钢大致相同,而且镁合金还具有优良切削加工性能和散热快、抗电磁干扰能力强等特性,使镁合金在飞机、导弹、军工中得到广泛的应用。

镁合金可分为铸造镁合金和变形镁合金两大类。铸造镁合金适合于铸造工艺,用于生产各种铸件,如砂型铸件、蜡模铸件、压铸件等;变形镁合金适用变形加工工艺,用于生产各类加工材,如板、棒、线、型、管等。

三、金属材料的性能

在油气田钻采过程中选用材料时,必须考虑材料本身的性能是否能够满足使用要求。金属材料的性能用来表征材料在给定外界条件下的行为参量,一般分为使用性能和工艺性能两类。使用性能是指材料在使用过程中所表现的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能,包括铸造、锻造、焊接、热处理和切削性能等。

1. 金属材料的力学性能

金属材料在加工和使用时会受到外力作用,金属材料受外力后所表现的行为规律是:首先发生弹性变形,然后是弹塑性变形,最后是裂纹形成与扩展,直至断裂。金属材料在外力的作用下抵抗外力所表现的性能称为力学性能。衡量金属材料的力学性能常用的指标有:强度、塑性、硬度和韧性等。

(1) 强度与塑性

测定金属材料力学性能最基本的方法是静态拉伸试验,它可以测定弹性、强度、塑性等许多重要力学性能。按国家标准 GB/T 228-2002 规定,将标准拉伸试样(如图 1-8)安装在材料拉伸试验机上,沿两端缓慢施力,进行轴向拉伸,使之变形直至断裂,便可以得到连续载荷 F 和相应伸长量 ΔL 的相互关系。以伸长量 ΔL 为横坐标,载荷 F 为纵坐标,则表示载荷 F -伸长量 ΔL 关系的曲线,称为拉伸曲线。经过处理,可以得到表示试样所受应力 R (试样单位原始横截面积上的力)与发生的应变 ε (试样原始标距的伸长与原始标距之比的百分率)之间关系

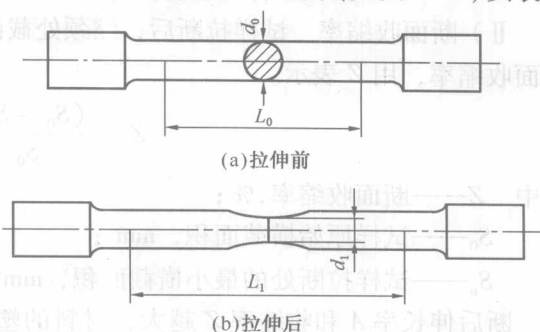


图 1-8 圆形标准拉伸试样

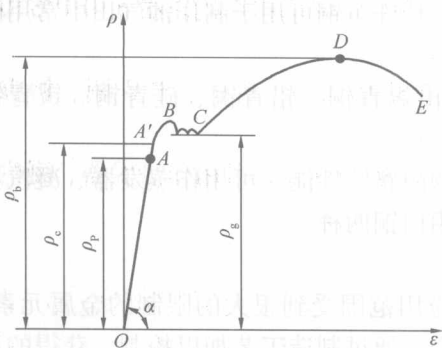


图 1-9 低碳钢的应力-应变曲线

的曲线，称为应力 R - 应变 ε 曲线，如图 1-9。

① 强度

材料在外力作用下抵抗永久变形和破坏的能力称为强度，是表征金属材料抵抗塑性或断裂的物理性能。根据施加载荷的不同，可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。其中常用的是屈服强度和抗拉强度指标。

I) 屈服强度 屈服强度反映材料抵抗塑性变形的能力，材料开始产生明显塑性变形时的应力称为屈服强度，也称屈服极限。用 R_{el} 表示，即：

$$R_{el} = F_{el} / S_0$$

式中 F_{el} ——材料在屈服点的拉力，N；

S_0 ——试样截面积， mm^2 。

低碳钢、中碳钢、铜、铝等少数金属具有明显的屈服现象，但大多数金属材料都没有明显的屈服现象。因此工程上规定，把试样产生的塑性变形量为标距长度的 0.2% 时所对应的应力值定为该材料的条件屈服强度，用 $R_{0.2}$ 表示。

II) 抗拉强度 抗拉强度反映材料抵抗断裂破坏的能力，材料在受拉时所能承受的最大应力称为抗拉强度，以 R_m 表示，即：

$$R_m = F_m / S_0$$

式中 F_m ——为试样拉断前的最大外力，N。

② 塑性

塑性是金属的一个重要特征，是指材料受力破坏前发生不可逆永久变形的能力。塑性变形不仅改变金属的外形和尺寸，而且还引起其组织和性能的变化，常用断后伸长率和断面收缩率表示。

I) 断后伸长率 试样拉断后，标距段的残余伸长与原始标距之比的百分率称为断后伸长率，用 A 表示。

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \times 100\%$$

式中 A ——断后伸长率，%；

L_0 ——试样初始标距，mm；

L_u ——试样拉断后标距段长度，mm。

II) 断面收缩率 试样拉断后，缩颈处截面积的减少值与原始横截面积之比的百分率称为断面收缩率，用 Z 表示。

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \times 100\%$$

式中 Z ——断面收缩率，%；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 ；

S_u ——试样拉断处的最小横截面积， mm^2 。

断后伸长率 A 和收缩率 Z 越大，材料的塑性越好。但对材料塑性要求有一定限度，并不是越大越好，否则会限制材料强度使用水平的提高，不能发挥材料强度的潜力。