



国防特色教材·职业教育

船用材料与焊接

CHUANYONG CAILIAO YU HANJIE

张庆红 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·职业教育

船用材料与焊接

主编 张庆红

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书为国防科工局“十一五”规划教材,是按照以工作过程为导向的“船用材料与焊接”课程改革要求进行编写的,根据船舶建造实际工作过程和工作环境组织教学内容,形成针对工作需求的新型教学和训练项目。让学习者在完成具体项目的过程中学会完成相应工作任务,并构建相关理论知识,发展职业能力。

《船用材料与焊接》共有6个学习情境,分20个训练项目,内容由简单到复杂,循序渐进地介绍了船舶材料的选用、焊条电弧焊施工、埋弧焊施工、二氧化碳气体保护焊施工、手工钨极氩弧焊施工和特种焊施工等的基础知识、工艺知识和操作技能。

本教材是针对高职高专院校船舶工程专业编写的,也可作为成人高校、中职学校相关专业以及船厂员工岗位培训的教材。

图书在版编目(CIP)数据

船用材料与焊接/张庆红主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81133-602-3

I. ①船… II. ①张… III. ①船舶-工程材料-高等学校-教材②船舶-焊接工艺-高等学校-教材 IV. ①U668
②U671.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第036269号

船舶材料与焊接

张庆红 主编
责任编辑 史大伟

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

http://press.hrbeu.edu.cn E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19 字数:405千字

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷 印数:1500册

ISBN 978-7-81133-602-3 定价:38.00元

前 言

为了适应船舶工业飞速发展的形势,本教材根据高职高专对船舶工程焊接技术人员的要求,即培养学生掌握船用材料选用、船舶焊接生产项目施工技术指导与管理、质量控制与检测等职业能力,将基础知识、基本理论、基本技能融入到训练项目之中。学习者在完成具体项目的过程中学会完成相应工作任务,并构建相关理论知识,发展职业能力,同时了解行业背景,熟悉行业的工作特点。本教材以船用焊接件为载体,知识结构由简单到复杂,训练项目由易到难,共设置 20 个项目,包括船用碳钢、合金钢、有色金属的选用;平敷对接、立对接、管对接和主机座焊条电弧焊施工;工字梁角焊缝、船平台板拼接、内底板大接缝、平面分段埋弧焊施工;T 型接头、船体傍板分段、双层底分段、船体分段大合拢 CO_2 气体保护焊施工;不锈钢转向管路、铝合金肋骨框面板对接、螺旋桨修补氩弧焊施工;艏柱电渣焊施工和湿法水下焊接施工。

课程的目标是通过基于船舶建造工作过程的教学内容规划和教学项目的实施,贯彻国家职业资格标准的要求,培养学生具备船舶建造施工工艺编制能力、船舶焊接实际操作能力、现场协调与组织等能力。

本教材的编写特色是:以职业岗位的需求为出发点,恰当选取和合理安排了教学内容,内容描述上与传统教材有明显的区别。训练项目结构合理,具有较强的针对性。教材编写时在每个训练项目前列出了学习目标和项目任务,在每个训练项目后编制了思考与练习,便于组织教学和学生学学习。

本教材是针对高职高专院校船舶工程技术专业编写的,也可作为成人高校、中职学校相关专业以及船厂员工岗位培训的教材。讲学学时参考约 80 学时,训练项目全过程约 180 学时。

本书由九江职业技术学院张庆红(任主编)、武汉船舶职业技术学院许小平,共同编写学习情境 4,5,6,九江职业技术学院奚泉,编写学习情境 2,3,九江职业技术学院展龙编写学习情境 1。

本教材由渤海船舶职业学院邓洪军教授担任主审,在编写过程中得到了九江同方江新造船厂高级工程师刘道艳和江西制氧机有限公司高级工程师王剑的大

力帮助和支持,在此表示衷心感谢!

由于编者经历和水平有限,编写时间仓促,书中难免有欠妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2010年6月

目 录

学习情境 1 船用材料的选用	1
项目 1.1 船用碳钢的选用	1
项目 1.2 船用合金钢的选用	42
项目 1.3 船用有色金属的选用	55
学习情境 2 焊条电弧焊施工	76
项目 2.1 平敷焊条电弧焊施工	76
项目 2.2 I 型坡口立对接焊条电弧焊施工	97
项目 2.3 垂直固定管对接焊条电弧焊施工	114
项目 2.4 主机座的焊条电弧焊施工	135
学习情境 3 埋弧焊施工	152
项目 3.1 工字梁角焊缝船型位置埋弧焊	152
项目 3.2 船平台板拼接的埋弧焊	160
项目 3.3 内底板大接缝焊条电弧焊打底的埋弧焊	166
项目 3.4 拼板平面分段的焊剂铜衬垫单面埋弧焊	173
学习情境 4 二氧化碳气体保护焊施工	184
项目 4.1 T 型接头焊件的定位焊	184
项目 4.2 低碳钢船体傍板分段的 CO ₂ 气体保护焊	195
项目 4.3 双层底分段反装法的装配工艺与焊接	208
项目 4.4 船体分段大合拢的焊接	214
学习情境 5 手工钨极氩弧焊施工	236
项目 5.1 不锈钢转向管路的手工钨极氩弧焊	236
项目 5.2 铝合金肋骨框面板对接的手工钨极氩弧焊	253
项目 5.3 螺旋桨修补氩弧焊施工	265
学习情境 6 特种焊施工	281
项目 6.1 尾柱电渣焊施工	281
项目 6.2 湿法水下焊接施工	289
参考文献	298

学习情境1 船用材料的选用

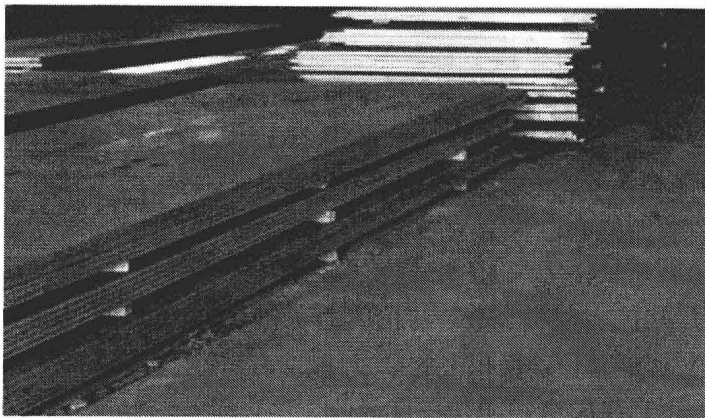
项目1.1 船用碳钢的选用

【学习目标】

- 1.掌握纯金属和合金的组织结构。
- 2.掌握纯金属和合金以及铁碳合金的结晶。
- 3.掌握金属材料的力学性能。
- 4.熟练掌握船用碳素结构钢的选用方法。

【项目任务】

本项目的任务是掌握船用金属材料的组织结构和力学性能,以及能够正确选用船用碳素钢,为船舶焊接施工奠定坚实的理论基础。具体实施为:主要通过课堂教学进行。



【背景知识】

1.1.1 金属材料的力学性能

金属材料的性能可分为使用性能和工艺性能两种。使用性能是指为保证零件能正常工作

和有一定的工作寿命。金属材料所应具备的性能包括力学性能、物理性能(如密度、导电性、导热性等)和化学性能(如耐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是指为保证零件的加工过程顺利进行。金属材料所应具备的性能包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理工艺性能等。它们是进行设计、选材和制定工艺的依据。

船用零件和工具所用金属材料的使用性能一般指力学性能,而力学性能是指在力的作用下,所表现出来的抵抗变形和破坏的能力。常用的力学性能指标有强度、刚度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳抗力等。

1. 强度、刚度和塑性

金属在逐渐增大的外力作用下,一般依次产生弹性变形、塑性变形和断裂。弹性变形是外力卸除后完全消失的变形。塑性变形(永久变形)是外力卸除后仍然保留的变形。测定金属强度、刚度和塑性的常用方法是拉伸试验。

(1) 拉伸试验

静载荷拉伸试验是工业上最常用的力学性能试验方法之一。试验时在试样两端缓慢地施加试验力,使试样的标距部分受轴向拉力,沿轴向伸长,直至试样拉断为止。测定试样对外加试验力的抗力,可以求出材料的强度值;测定试样在断裂后塑性变形的大小,可以求出材料的塑性值。

拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。试验前,将准备的材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样,常用的圆截面拉伸试样如图 1.1 所示。图中 d 为试样的原始直径(单位为 mm), L_0 为试样的原始标距(单位为 mm)。圆截面拉伸试样分为长试样和短试样;长试样 $L_0 = 10d$;短试样 $L_0 = 5d$ 。试验时将试样装夹在试验机的夹头上,并缓慢加载。将拉伸力 F (单位为 N)除以试样原始截面积 S_0 (单位为 mm^2),得到拉应力 σ (单位截面积上的拉力,单位为 MPa),即 $\sigma = F/S_0$;将伸长量 ΔL 除以试样的原始标距 L_0 ,得到线应变 ϵ (单位长度的伸长量),即 $\epsilon = \Delta L/L_0$ 。根据试验时 σ 与 ϵ 的对应关系,可绘出应力-应变曲线。

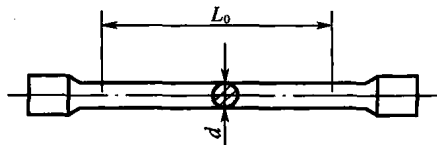


图 1.1 圆截面拉伸试样简图

图 1.2 所示的是低碳钢的应力-应变曲线。曲线上的 oe 斜直线段为试样的弹性伸长阶段,当拉应力 σ 超过 σ_s 后,试样产生微量塑性伸长;当 σ 增至 R_{el} 时,曲线上出现水平线段,这表示拉应力 σ 不增加而试样的塑性伸长却明显地继续增加,此现象称为屈服;曲线上的 sb 段为试样的显著均匀塑性伸长阶段;当 σ 超过 R_m 时,试样的某处横截面开始缩小,称为颈缩;此后,试样的塑性伸长集中在颈缩部分,所承受的拉应力 σ 迅速减小,直至断裂(曲线 k 点)。

(2) 强度

强度是材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。工程上常用的强度指标有弹性极限、屈服点、抗拉强度等。

① 弹性极限

弹性极限是试样在弹性伸长范围内能承受的最大拉应力,用符号 σ_e 表示,单位为 MPa,其计算公式为

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (1.1)$$

式中, F_e 为试样在弹性伸长范围内承受的最大拉伸力,单位为 N。

弹性极限 σ_e 是表征在拉伸力作用下,金属抵抗开始塑性变形的能力。

② 屈服点(屈服极限)

屈服点是试样屈服时承受的拉应力,用符号 R_{el} 表示,单位为 MPa,其计算公式为

$$R_{el} = \frac{F_s}{S_0} \quad (1.2)$$

式中, F_s 为试样屈服时承受的拉伸力,单位为 N。

对于无明显屈服现象的金属材料,难以测定 R_{el} 。国家标准规定,以产生 0.2% 残留应变时的拉应力作为条件屈服点(屈服强度),用符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服点 R_{el} 或条件屈服点 $\sigma_{0.2}$ 是表征在拉伸力作用下,金属抵抗明显塑性变形的能力,是金属工程结构设计和选材的主要依据。

③ 抗拉强度

金属材料在载荷作用下,断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度(也称强度极限),以 R_m 表示,单位为 MPa,其计算公式为

$$R_m = \frac{F_b}{S_0} \quad (1.3)$$

式中, F_b 为试样拉断前承受的最大拉伸力,单位为 N。

抗拉强度的物理意义是表征材料在载荷作用下,对最大均匀变形的抗力,表征材料在拉伸条件下所能承受最大力的应力值,它是设计和选材的主要依据之一,是工程技术上的主要强度指标。

(3) 刚度

在外力作用下,金属抵抗弹性变形的能力称为刚度。由拉伸试验测得的刚度指标是正弹

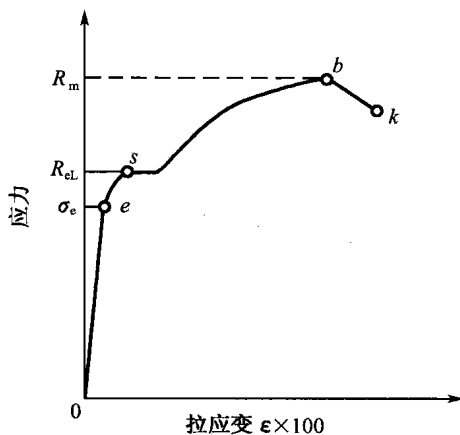


图 1.2 低碳钢的应力应变曲线示意图

性模量(杨氏弹性模量)。

由于应力-应变曲线中的弹性拉伸阶段(oe 斜直线段)遵守胡克定律,也就是说应力与应变成正比,即 $\sigma = E\epsilon$, 其比例常数 E (oe 直线的斜率)为正弹性模量(单位为 MPa),即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.4)$$

正弹性模量 E 表征在拉伸力作用下,金属抵抗弹性伸长的能力。金属的 E 愈大,金属抵抗弹性伸长的能力就愈强。

(4) 塑性

金属材料在载荷作用下,断裂前发生不可逆永久变形的能力就是塑性。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

① 断后伸长率

试样拉断后标距的残余伸长与原始标距之比的百分率称为断后伸长率,用符号 A 表示,即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中 L_0 ——试样的原始标距,单位为 mm;

L_u ——试样拉断后的标距,单位为 mm。

用长试样测得的伸长率用符号 A_{10} 表示,常写成 A ;用短试样测得的伸长率用符号 A_5 表示。对同一金属材料的伸长率而言, $A_5 > A_{10}$ 。通常试验优先选取短试样。

② 断面收缩率

断裂后试样横截面积的最大缩减量与原始横截面积之比的百分率称为断面收缩率,以 Z 表示,即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中 S_0 ——试样原始横截面积,单位为 mm^2 ;

S_u ——试样断后最小横截面积,单位为 mm^2 。

金属的断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 数值越大,表示材料的塑性越好。塑性好的金属,因断裂前可产生较大的塑性变形,从而易于对其进行塑性变形加工。

2. 硬度

硬度是指金属抵抗硬物压入其表面的能力,即抵抗局部塑性变形的能力,它是衡量金属软硬程度的依据。

金属的硬度通过硬度试验测定。硬度试验法具有简便快捷、不需专门试样、不破坏被测零件等优点,故应用广泛。常用的硬度试验方法有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度

试验法 3 种,所测得的硬度分别称为布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

(1) 布氏硬度

布氏硬度试验在布氏硬度计上进行,其测试原理如图 1.3 所示。对一定直径 D 的硬质合金球施加试验力 F 使其压入试样表面,经规定保持时间后,卸除试验力,测量试样表面压痕的直径。以试验力 F 除以球形压痕表面积 S 所得的商作为布氏硬度值,符号为 HBW,即

$$\text{HBW} = 0.102 \times \frac{F}{S} = \frac{0.204 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.7)$$

式中 F ——试验力,单位为 N;

D ——球直径,单位为 mm;

d ——压痕平均直径,单位为 mm。

实际进行布氏硬度试验时,并不需要按式 (1.7) 计算布氏硬度值,而是根据试验力 F 、压头直径 D 和测得的压痕直径 d 查布氏硬度表得到硬度值。布氏硬度标注时,硬度值写在符号 HBW 之前,如 250HBW。

由于布氏硬度试验的压痕大,故所测得的硬度值较准确,但其操作尚不够简便。布氏硬度法主要适用于测试硬度值小于 650HBW 且较厚的材料或零件,如铸铁、有色金属和硬度不高的钢。

(2) 洛氏硬度

洛氏硬度试验在洛氏硬度计上进行。其试验原理是在试验力作用下,将压头(金刚石圆锥或淬硬钢珠)压入试样表面,卸除试验力后,以其残余压痕深度衡量被测金属的硬度。如图 1.4 所示,试验时先加初始试验力 98.07 N(10 kg),使压头紧密接触试样表面 a 并压入至 b 处,以 b 处作为测量压入深度的起点,再加上主试验力使压头压入至 c 处,然后去掉主试验力,压头回升至 d 处,故深度 bd 就是残余压痕深度。残余压痕深度愈浅,金属的硬度愈高;反之,金属的硬度愈低。实际测试时,直接在硬度计表盘上读出硬度值。

为了能够测试各种金属材料的硬度,洛氏硬度试验采用 3 种不同的洛氏硬度标度,它们的符号、试验条件和硬度值有效范围见表 1.1。当进行洛氏硬度试验时,应根据被测金属及其大致硬度,按表 1.1 选用不同的洛氏硬度标度进行测试。在 3 种洛氏硬度标度中,HRC 主

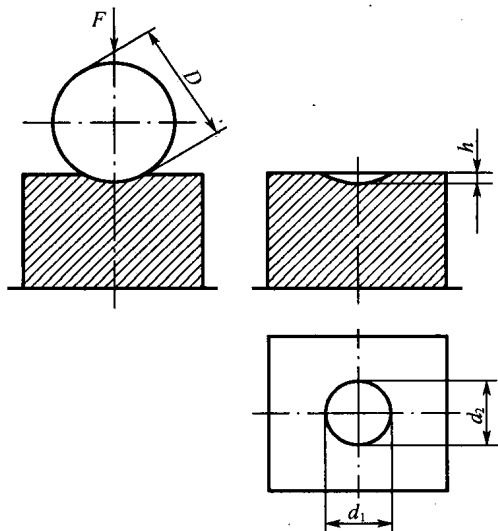


图 1.3 布氏硬度试验原理

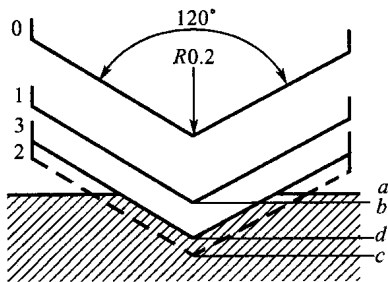


图 1.4 洛氏硬度试验原理简图

要用于淬火钢件的硬度测试,故在生产中应用最广。洛氏硬度标注时,硬度值写在硬度标度符号之前,如 60HRC,85HRA 等。

表 1.1 三种洛氏硬度标度

硬度标度符号	压头类型	总试验力/N(kgf)	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4(60)	60 ~ 85HRA	硬质合金、表面淬火钢、渗碳淬火钢等
HRB	φ1.588 mm 硬钢球	980.7(100)	25 ~ 100HRB (60 ~ 230HBS)	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	120°金刚石圆锥体	1 471.1(150)	20 ~ 67HRC (> 225HBS)	一般淬火钢件

洛氏硬度试验法操作快速简便、压痕小,可测试成品和较硬、较薄的工件。但因压痕小,对于组织和硬度不均匀的材料,在不同部位测得的硬度值波动较大,故在同一试样上应测试 3 点以上的值,再取其平均值。

(3) 维氏硬度

维氏硬度试验在维氏硬度计上进行,其测试原理与布氏硬度试验相似。如图 1.5 所示,在试验力 F 作用下,将相对面夹角为 136° 的正四棱锥金刚石压头压入试样表面,卸除试验力后,在试样表面留下对角线长度为 d 的正四棱锥压痕,以试验力 F 除以压痕表面积 S 所得的商作为硬度值,符号为 HV,即

$$HV = 0.102 \frac{F}{S} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (1.8)$$

式中 F ——试验力,单位为 N;

S ——球形压痕表面积,单位为 mm^2 ;

d ——压痕对角线的平均长度,单位为 mm。

实际进行维氏硬度试验时,一般可根据已知的 F 和测得的 d 在维氏硬度表上查得硬度值。维氏硬度标注时,硬度值写在符号 HV 之前,如 640HV。

维氏硬度试验的测量精度较高,测试的硬度范围大(10HV 以上),对被测试样的厚度或表层深度几乎没有限制(如能测很薄的工件、渗氮层、金属镀层等)。但是,其操作尚不够简便,对试样的表面质量要求较高,故在生产现场很少使用。

不同硬度试验法测得的硬度值不能直接进行比较,必须通过硬度换算表换算成同一种硬

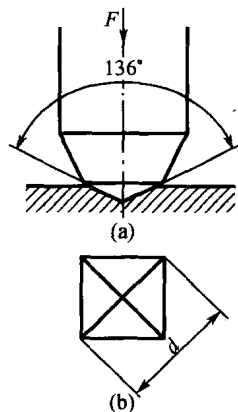


图 1.5 维氏硬度试验原理简图

度后,才能比较其高低。

3. 冲击韧性与疲劳抗力

就前述拉伸试验和硬度试验而言,作用于试样上的试验力是从零缓慢增至最大值的,故这类试验是静力试验。由静力试验测得的性能(如强度、塑性、硬度等)仅代表金属在静载荷作用下的性能,一般不能代表金属在非静力作用下的性能。金属在非静力条件下测得的性能,主要是指冲击韧性和疲劳抗力。

(1) 冲击韧性

快速作用于零件的外力,称为冲击外力或动载荷。在冲击外力作用下,金属抵抗断裂的能力即金属断裂前吸收变形能量的能力,称为冲击韧性。

金属的冲击韧性指标用冲击试验法测定。将被测金属制成带 U 型或 V 型缺口的标准冲击试样。冲击试验在摆锤式冲击试验机上进行,见图 1.6。将试样放在试验机支座的支撑面上,缺口背向摆锤冲击方向。

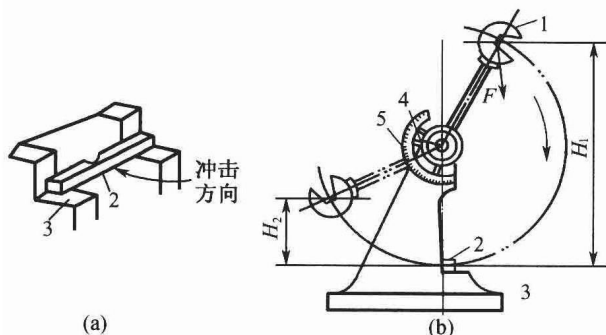


图 1.6 摆锤式冲击试验原理图

1—摆锤;2—试样;3—机架;4—指针;5—表盘

将重量为 F 的摆锤举至一定高度 H_1 , 然后自由落下将试样冲断, 并反向摆至高度 H_2 。以试样在一次冲击试验力作用下折断时所吸收的功即冲击吸收功 A_{ku} (或 A_{kv}) 作为冲击韧性的指标(单位为 J), 即

$$A_{ku}(A_{kv}) = F(H_1 - H_2) \quad (1.9)$$

实际试验时, A_{ku} (或 A_{kv}) 的值由指针在刻度盘上直接读出, 而无需按式(1.9)计算。我国习惯上仍以冲击韧度 α_{ku} 作为冲击韧性的指标(单位为 J/cm^2), 其计算公式为

$$\alpha_{ku} = A_{ku}/S \quad (1.10)$$

式中, S 为 U 型缺口试样缺口处的横截面积, 单位为 cm^2 。

冲击吸收功或冲击韧度愈大, 金属的冲击韧性愈好。同一金属的冲击韧性还与试验温度有关, 如图 1.7 所示。由图可见, α_{ku} 随温度下降而减小, 在某一温度区域内 α_{ku} 急剧变化, 此温区称为“韧脆转折温度”。该温度愈低, 金属的低温冲击性能愈好。

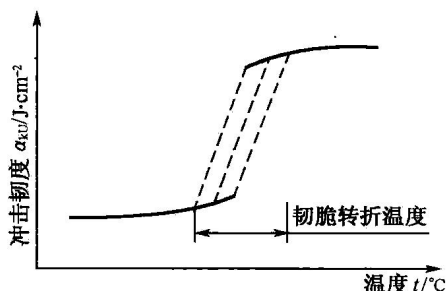


图 1.7 温度对 α_{ku} 的影响

2. 疲劳抗力

应力大小或应力大小及方向随时间作周期性变

化的应力,称为循环应力。典型的循环应力是对称循环应力,如图 1.8 所示。弹簧、齿轮和轴等机械零件工作时,主要承受循环应力。

零件在循环应力(其最大应力 $\sigma_{\max}$ 小于材料的 R_m 或 R_{el})作用下,经多次应力循环而发生断裂的现象,称为疲劳断裂或疲劳。金属抵抗疲劳断裂的能力,称为疲劳抗力。金属在对称循环应力作用下的疲劳抗力指标,由疲劳试验测定的疲劳曲线确定。疲劳曲线是金属承受的名义循环应力 σ (循环应力中的最大应力)与断裂前的应力循环次数 N 之间的关系曲线。一般钢铁的疲劳曲线如图 1.9 所示。由图可知,当 σ 低于某一值时疲劳曲线呈水平线,表示材料经无限次应力循环而不断裂。因此,以循环无限次不断裂的最大名义循环应力——疲劳极限作为材料的疲劳抗力指标,符号为 σ_{-1} 。材料的疲劳极限 σ_{-1} 愈大,其抵抗疲劳的能力愈强。

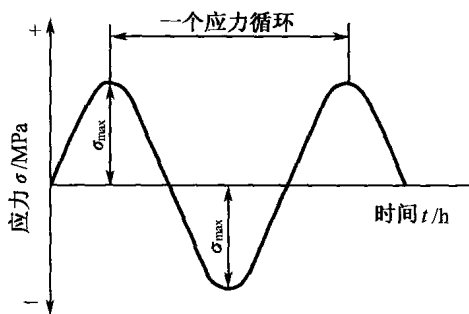


图 1.8 对称循环应力

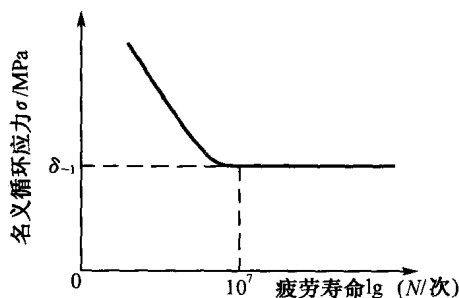


图 1.9 一般钢铁材料的疲劳曲线

金属材料的疲劳极限与抗拉强度之间有如下经验关系:中低强度钢 $\sigma_{-1} = 0.5R_m$, 灰铸铁 $\sigma_{-1} = 0.42R_m$, 球墨铸铁 $\sigma_{-1} = 0.48R_m$ 。

1.1.2 纯金属与合金的晶体结构

金属材料是指以金属键结合并具有金属特性的一类物质,它包括纯金属与合金。纯金属是指具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质,而合金是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属元素经熔炼、烧结或其他方式组合而成,具有金属特性的一类物质。金属材料在固态下一般都是晶体状态,所以要研究纯金属与合金的结构就必须首先研究它们的晶体结构。

1. 纯金属的晶体结构

(1) 晶体结构的基本概念

① 晶格与晶胞

晶体结构指晶体内部原子规则排列的方式。金属晶体结构不同,其性能往往相差很大。

为了便于分析研究各种晶体中原子或分子的排列情况,通常把原子抽象为几何点,并用许多假想的直线连接起来,这样得到的三维空间几何格架称为晶格,如图 1.10(a)所示;晶格中各连线的交点称为结点;组成晶格的最小几何单元称为晶胞,晶胞各边的尺寸 a, b, c 称为晶格常数,其大小通常以纳米(nm)为计量单位,晶胞各边之间的相互夹角分别以 α, β, γ 表示。图 1.10(b)所示的晶胞为简单立方晶胞,其晶格常数 $a = b = c$,而 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。由于晶体中原子重复排列的规律性,因此晶胞可以表示晶格中原子排列的特征。在研究晶体结构时,通常以晶胞作为代表来考查。不难看出晶格是由晶胞不断重复堆砌而成;通过对晶胞的研究可找出该种晶体中原子在空间的排列规律。

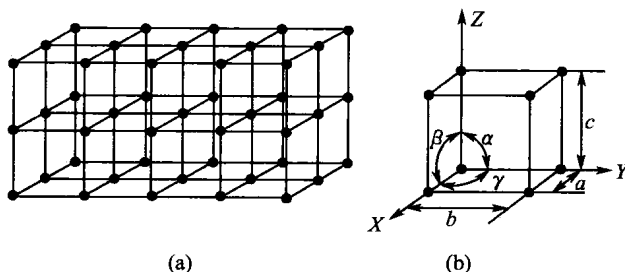


图 1.10 简单立方晶格与晶胞示意图

(a)晶格;(b)晶胞及晶格参数表示方法

②原子半径

原子半径是指晶胞中原子密度最大方向相邻两原子之间距离的一半。

③晶胞中所含原子数

晶胞中所含原子数是指一个晶胞内真正包含的原子数目。晶体由大量晶胞堆砌而成,故处于晶胞顶角及每个面上的原子就不会为一个晶胞所独有,只有晶胞内部的原子才为晶胞所独有。因此,不同晶格类型的晶胞所含原子数目是不同的。

④配位数及致密度

晶体中原子排列的紧密程度用配位数和致密度来表示。所谓配位数是指晶体结构中,与任一原子最近邻且等距离的原子数。

所谓致密度(K)是指晶胞中原子所占的体积分数,即

$$K = nw' / V$$

式中, n 为晶胞所含原子数, v' 为单个原子体积, V 为晶胞体积。

(2)常见纯金属的晶体结构

在纯金属中除少数具有复杂的晶体结构外,大多数具有简单的晶体结构,常见的晶格类型有以下三种。

①体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1.11 所示。它的形状是一个立方体,其晶格常数 $a = b = c$,所以只要一个常数 a 即可表示;其 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。在体心立方晶胞中,原子位于立方体的八个顶角和中心。体心立方晶胞中原子排列最紧密的方向是体对角线方向,所以原子半径(r)与晶格常数 a 之间的关系为 $r = \sqrt{3}a/4$ 。从图中可看出,体心立方晶胞的每个角上的原子是同属于与其相邻的八个晶胞所共有,故只有 $1/8$ 个原子属于这个晶胞,而晶胞中心的原子则完全属于这个晶胞,所以体心立方晶胞中的原子数为 $(1/8) \times 8 + 1 = 2$,即两个原子。体心立方晶格的配位数为 8。依据致密度公式可以得到:

$$K = \frac{nw'}{V} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

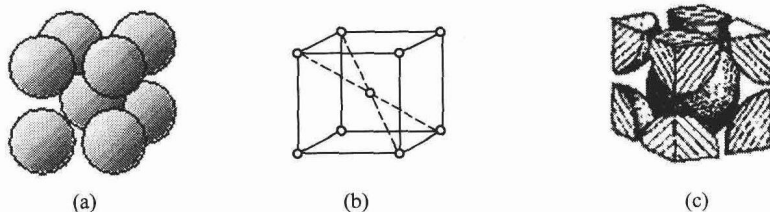


图 1.11 体心立方晶胞

(a)模型;(b)晶胞;(c)晶胞原子数

由此可知,体心立方晶格中有 68% 的体积被原子占据,有 32% 的体积为间隙。属于这类晶格的金属有 α -Fe, Cr, V, W, Mo, Nb 等 30 余种。

②面心立方晶格

面心立方晶胞如图 1.12 所示。它的形状也是一个立方体。在面心立方晶胞中,原子位于立方体的八个顶角和六个面的中心。属于这类晶格的金属有 γ -Fe, Al, Cu, Ni, Au, Ag, Pb 等。

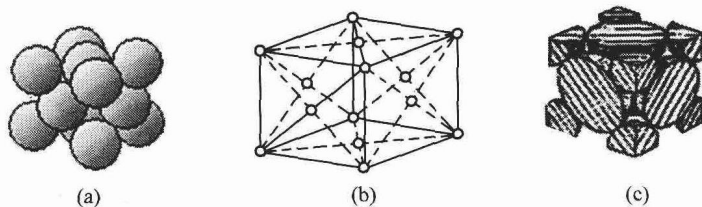


图 1.12 面心立方晶胞

(a)模型;(b)晶胞;(c)晶胞原子数

从图中可算出面心立方晶体的晶格常数 $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; 原子半径为 $r = \sqrt{2}a/4$; 每个晶胞所包含的原子数为 $(1/8) \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 个; 配位数为 12; 致密度为 0.74 或 74%。

③密排六方晶格

密排六方晶胞如图 1.13 所示。它是一个正六面柱体, 在晶胞的 12 个角上各有一个原子, 上底面和下底面的中心各有一个原子, 上下底面的中间有三个原子。属于这类晶格的金属有 Mg, Zn, Be, Cd 等。

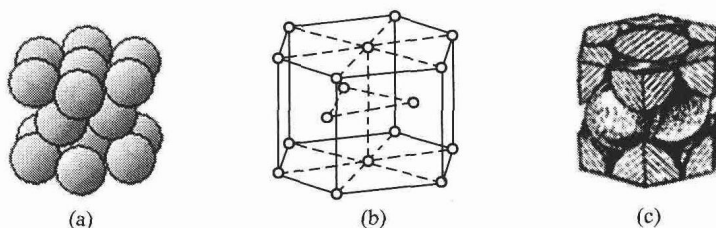


图 1.13 密排六方晶胞

(a)模型; (b)晶胞; (c)晶胞原子数

其晶格常数用正六边形底面的边长 a 和晶胞的高度 c 来表示, 两者的比值 $c/a \approx 1.633$; $(1/6) \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ 个; 配位数为 12; 致密度为 0.74 或 74%。

从以上分析可以看出, 在三种典型金属晶格中, 面心立方晶格和密排六方晶格中原子排列比体心立方晶格紧密, 因此当 $\gamma\text{-Fe}$ (面心立方晶格) 转变为 $\alpha\text{-Fe}$ (体心立方晶格) 时, 要发生体积膨胀, 这是钢淬火时容易变形甚至开裂的原因之一。

(3)晶体中的晶面与晶向

晶体中各种方位的原子平面称为晶面; 各个方向上的原子排列称为晶向。晶体的许多性能 (如各向异性等) 和行为都和晶体中特定晶面和晶向密切相关。为了研究不同晶面及晶向上的原子排列方式, 需要给予各种晶面及晶向一定符号, 以表示它们在晶体中的空间位向, 通常用晶面指数表示晶面, 用晶向指数表示晶向。下面介绍立方晶格中晶面指数和晶向指数的表示方法。

①晶面指数表示法

确定晶面指数的步骤如下:

第一步, 建方坐标系, 以晶格中任一结点为坐标原点, 过该点平行于晶胞的三棱边作 OX , OY , OZ 三个坐标轴, 晶格常数 a, b, c 分别作为相应的三个坐标轴上的度量单位。为防止晶面在坐标轴上的截距为零, 坐标原点不能设在所求平面上。

第二步, 以晶格常数 a 为度量单位, 求出该晶面在三个坐标轴上的截距。

第三步, 取待定晶面在三个坐标轴上截距的倒数。

第四步, 将三截距的倒数按比例化为最小整数并放入圆括号内, 数字之间不用标点分开。