



目 录

绪论	(1)
第一章 金属材料的性能	(5)
第一节 金属材料的力学性能	(5)
第二节 金属材料的物理和化学性能	(15)
第三节 金属材料的工艺性能	(17)
第二章 常见金属的晶体结构与结晶	(20)
第一节 金属	(20)
第二节 常见金属的晶体结构	(21)
第三节 金属的实际晶体结构	(28)
第三章 纯金属的结晶	(35)
第一节 金属结晶的现象	(35)
第二节 金属结晶的条件	(36)
第三节 金属结晶的过程	(38)
第四节 晶粒大小的控制	(45)
第五节 金属铸锭(件)组织与缺陷	(47)
第四章 金属的塑性变形与再结晶	(51)
第一节 金属材料的塑性变形	(51)
第二节 冷塑性变形对金属组织与性能的影响	(57)
第三节 回复与再结晶	(61)
第四节 金属的热加工	(66)
第五章 合金的结构与结晶	(70)
第一节 合金的相结构	(70)
第二节 二元合金相图	(74)
第三节 合金的力学性能与相图的关系	(85)
第六章 铁碳合金相图和碳钢	(87)
第一节 纯铁、铁碳合金的相结构及其性能	(88)
第二节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	(90)
第三节 碳钢	(102)
第七章 钢的热处理	(115)
第一节 钢的热处理的原理	(116)
第二节 钢常用的热处理工艺	(125)
第三节 其他热处理工艺	(137)



第四节 金属材料热处理工艺设计及应用实例	(143)
第八章 合金结构钢	(149)
第一节 合金钢的分类和牌号	(149)
第二节 合金元素在钢中的作用	(151)
第三节 低合金结构钢	(158)
第四节 合金结构钢	(161)
第九章 特殊性能钢	(172)
第一节 不锈钢	(172)
第二节 耐热钢	(178)
第三节 耐磨钢	(181)
第四节 低温钢	(183)
第十章 工具钢	(185)
第一节 工具钢的分类及编号	(185)
第二节 刃具钢	(187)
第三节 模具钢	(192)
第四节 量具钢	(196)
第十一章 铸 铁	(198)
第一节 概述	(199)
第二节 铸铁的分类	(200)
第三节 普通灰铸铁	(201)
第四节 球墨铸铁	(206)
第五节 蠕墨铸铁及可锻铸铁	(211)
第六节 合金铸铁	(215)
第十二章 非铁金属	(219)
第一节 铝及铝合金	(219)
第二节 铜及铜合金	(225)
第三节 钛合金	(231)
附 录	(237)
金属材料及热处理实验指导书	(237)
实验一 拉伸试验	(237)
实验二 金属材料的硬度试验	(239)
实验三 铁碳合金平衡组织鉴别实验	(241)
实验四 碳钢热处理后的基本组织鉴别实验	(243)
实验五 钢的热处理	(246)
参考文献	(250)

绪论

一、材料与人类文明的发展历史

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。人类社会的发展伴随着材料的发明和发展。人类最早使用的材料是石头、泥土、树枝、兽皮等天然材料。由于火的使用,人类发明了陶器、瓷器,其后又发明了青铜器、铁器。因此历史学家常根据材料的使用,将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。而今人类已跨进人工合成材料的新时代,金属材料以及高分子材料、陶瓷材料、复合材料等新型材料得到迅速的发展,为现代社会的发展奠定了重要的物质基础。

中华民族为材料的发展和应用作出了重大的贡献。在人类的发展史上,最先使用的工具是石器。我们的祖先用坚硬的容易纵裂成薄片的燧石和石英石等天然材料制成石刀、石斧、石锄。早在新石器时代(公元前 6000~公元前 5000 年)的磁山(河北)-裴李岗(河南)文化时期,中华民族的先人们用黏土(主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3)烧制成陶器。在仰韶(河南)文化(公元前 4000~200 年)和龙山(山东、河南等)文化时期制陶技术已经发展到能在氧化性气氛的窑中(950°C)烧制成红陶,在还原性气氛的炉中(1050°C)烧制薄胎黑陶与白陶。在 3000 多年前的殷、周时期,发明了釉陶,炉窑温度提高到了 1200°C 。马家窑(甘肃)文化时期的陶器以砂质和泥质红陶为主,表面彩绘有条带纹、波纹和舞蹈纹等(见图 0-1),制品有炊具、食具、盛储器皿等。我国在东汉时期发明了瓷器(见图 0-2),成为最早生产瓷器的国家。瓷器于 9 世纪传到非洲东部和阿拉伯国家,13 世纪传到日本,15 世纪传到欧洲。瓷器成为中国文化的象征,对世界文明产生了极大的影响。直到今天,中国瓷器仍畅销全球,名誉四海。



图 0-1 陶器

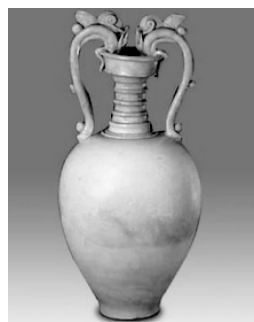


图 0-2 瓷器

我国青铜的冶炼在夏朝(公元前 2140 年始)以前就开始了,到殷、西周时期已发展到很高的水平。青铜主要用于制造各种工具、食器、兵器。从河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎重达 8750 N,外型尺寸为 $1.33\text{m}\times 0.78\text{m}\times 1.10\text{m}$,是迄今世界上最古老的大型青铜器(见图 0-3)。



在制造时采用了精湛的铸造技术。在泥模塑造、陶范翻制、合范、熔炼、浇注等铸造全过程中,充分体现了中国古代劳动人民的聪明才智和高超的技艺。从湖北江陵楚墓中发掘出的越王勾践的两把宝剑,长 0.557m,宽 0.046m,保存完好,基本上没有腐蚀,金光闪闪,锋利异常,剑体满饰菱形花纹,剑上铭刻八字“越王勾践,自作用剑”,是我国青铜器的杰作。在湖北大冶发现的春秋晚期的铜矿井遗址深达 50m,炼铜炉渣有 40 多万吨,实属罕见。从湖北隋县出土的战国青铜编钟是我国古代文化艺术高度发达的见证。春秋战国时期《周礼·考工记》中记载了钟鼎、斧斤等六类青铜器中的锡含量,称为“六齐(剂)”。书中写道:“六分其金而锡居一,谓之钟鼎之齐;五分其金而锡居一,谓之斧斤之齐;四分其金而锡居一,谓之戈戟之齐;三分其金而锡居一,谓之大刃之齐;五分其金而锡居二,谓之削杀矢之齐;金、锡半,谓之鉴燧之齐”。这是世界上最古老的关于青铜合金成分的文字记载,这表明我们的祖先已经认识到了青铜的性能与成分之间的密切关系。我国劳动人民创造了灿烂的青铜文化。

我国从春秋战国时期(公元前 770~公元前 221 年)已开始大量使用铁器。从兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模,说明冶铸技术已由泥砂造型水平进入铁模铸造的高级阶段。到了西汉时期,炼铁技术又有了很大的提高,采用煤作为炼铁的燃料,这要比欧洲早 1700 多年。在河南巩县汉代冶铁遗址中,发掘出 20 多座冶铁炉和锻炉,炉型庞大,结构复杂,并有鼓风装置和铸造坑,可见当年生产规模之壮观。我国古代创造了三种炼钢方法:第一种是从矿石中直接炼出自然钢。用这种钢制作的剑在东方各国享有盛誉,东汉时传入了欧洲;



图 0-3 司母戊鼎

第二种是西汉时期的经过“百次”冶炼锻打的百炼钢;第三种是南北朝时期生产的灌钢。先炼铁后炼钢的两步炼钢技术我国要比其他国家早 1600 多年,钢的热处理技术也达到了相当高的水平。西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”一说,正确地说出了钢铁加热、水冷的——淬火热处理工艺要点。《汉书·王褒传》中记载有“巧冶铸干将之朴,清水淬其锋”的制剑技术。明代科学家宋应星在《天工开物》一书中对钢铁的退火、淬火、渗碳工艺作了详细的论述。钢铁生产工具的发展,对社会进步起了巨大的推动作用。

在材料领域中还应该提到的是丝绸。丝绸是一种天然高分子材料,它在我国有着悠久的历史,于 11 世纪传到波斯、阿拉伯、埃及,并于 1470 年传到意大利的威尼斯,进入欧洲。中国丝绸,名扬四海。

历史充分说明,我们勤劳智慧的祖先,在材料的创造和使用上有着辉煌的成就,为人类文明、世界进步作出了巨大贡献。

中华人民共和国成立以后,我国的钢铁冶炼技术有了突破性进展,目前钢产量已跃居世界首位。武汉长江大桥使用碳素结构钢 A3(即 Q235)钢制造,而我国自行设计和建造的南京长江大桥则用强度较高的合金结构钢 16Mn 制造,九江长江大桥则用强度更高的合金结构钢 16MnVN 制造。我国的原子弹、氢弹的研制成功,火箭、人造卫星的上天,都以材料的发展为坚实基础。年产 30 万吨乙烯工程的建成大大地推动了我国高分子材料工业的发展。



在当代,科学技术和生产飞跃发展。材料、能源与信息作为现代社会和现代技术的三大支柱,发展格外迅猛。

在材料中非金属材料发展神速,尤以人工合成高分子材料的发展最快。从 20 世纪 60 年代到 70 年代,有机合成材料每年以 14% 的速度增长,而金属材料的年增长率仅为 4%。到 70 年代中期,全世界的有机合成材料和钢的体积产量已经相等,除了作为结构材料代钢铁外,目前正在研究和开发具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。陶瓷材料的发展同样十分引人注目,它除了具有许多特殊性能作为重要的功能材料(例如可作光导纤维、激光晶体等)以外,其脆性和抗热震性正在逐步获得改善,是最有前途的高温结构材料。机器零件和工程结构已不再只使用金属材料制造了。

随着航空、航天、电子、通信等技术以及机械、化工、能源等工业的发展,对材料的性能提出越来越高、越来越多的要求。传统的单一材料已不能满足使用要求。复合材料的研究和应用引起了人们的重视。如玻璃纤维树脂复合材料(即玻璃钢)、碳纤维树脂复合材料已应用于宇航和航空工业中制造卫星壳体、宇宙飞行器外壳、飞机机身、螺旋桨、发动机叶轮等;在交通运输工业中制造汽车车身、轻型船、艇等,在石油化工工业中制造耐酸、耐碱、耐油的容器、管道等。

近几年来,我国在新材料的研究和材料加工新工艺的研究工作中取得了卓有成效的重大成果。研制成功性能优越、用途广泛的新型结构钢;研制出零电阻温度为 128.7K 的 Tl-Ca-Ba-Cu-O 超导体(铊系超导体),我国在 C60 和巴基管新型碳材料的研究方面取得许多新的成果,利用巴基管作为衬底,制备出均匀、致密的金刚石薄膜,并用巴基管作为晶须增强复合材料,制作纳米复合材料。材料快速成型技术和材料表面处理技术在我国得到迅速发展。激光表面淬火、激光熔涂技术已在汽车发动机缸套、凸轮轴、石油抽油管、纺织用锭杆等零件的表面强化上得到应用。化学气相沉积(CVD)可制造出高硬度、高耐磨性的金黄色 TiN 薄膜,用于耐磨零件和装饰件的表面处理。

总之,材料科学和材料工程发展很快。我们需要掌握材料科学的基本理论和基本知识,研究和发明新的材料和新的工艺,合理地使用各种工程材料,为四个现代化建设事业作出应有的贡献。

二、课程的性质、任务和学习方法

(一)课程的性质

金属材料与热处理是焊接专业的一门重要专业技术基础课,是学习后续专业课程的基础。

(二)本课程的任务

- (1)掌握常用金属材料的力学性能指标、测试方法与应用;
- (2)掌握金属结晶的基本理论和基本知识;
- (3)掌握合金的基本概念,了解合金相图的表示与应用;
- (4)掌握铁碳合金的分类,铁碳合金的成分—组织—性能—应用之间关系;
- (5)掌握塑性变形对金属材料组织性能的影响规律以及如何消除;
- (6)掌握钢的热处理基本原理和工艺,以便正确选用热处理工艺方法,合理安排工艺路线;



(7)掌握常用的工业用钢(含船用结构钢)、铸铁、非铁金属的分类及其牌号表示,分析其成分、组织、性能之间的关系,以便合理选用。

(三)本课程的学习方法

本课程的学习方法具体如下:

- (1)明确学习目的和激发强烈的求知欲;
- (2)做好学习笔记,课后认真复习;
- (3)认真阅读教材,抓住各章节的重点,积极参加教学讨论、答疑等活动;
- (4)广泛阅读课外参考书和相关科技杂志及专业网站,扩大知识面。



第一章 金属材料的性能



学习导航

- 掌握金属材料强度、塑性的测试方法
- 掌握金属材料硬度的测试方法
- 掌握冲击韧性、疲劳强度的正确表示及应用



案例导入

金属材料具有各种不同的使用性能,在生产上得到广泛应用。研究金属材料的根本目的是改善和提高其使用性能,金属材料的使用性能包括物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能,对于结构材料来说,其中最重要的是力学性能。

第一节 金属材料的力学性能



学习要点

◎拉伸试样与拉伸试验;强度、塑性指标的正确表示;金属材料硬度的测试方法及应用;冲击韧性、疲劳强度的正确表示及应用。

金属材料的力学性能是指在力的作用下,所显示与变形和破坏有关的性能。常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击吸收功、疲劳极限等。

一、强度和塑性

(一)拉伸试验及拉伸曲线

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。

试验前,将材料制成一定形状和尺寸的标准拉伸试样。图 1-1 所示为常用的圆形拉伸试样。若设试样从开始加载直到断裂前所受的拉力为 F ,与其所对应的试样原始标距长度 L_0 的



伸长量 ΔL 绘成曲线,便得到拉伸曲线。图 1-2 所示为退火状态的低碳钢拉伸曲线。用试样原始截面积 S_0 去除拉力 F 得到应力,以试样原始标距 L_0 去除绝对伸长量 ΔL 得到应变 ϵ ,即 $\sigma = F/S_0, \epsilon = \Delta L/L_0$,则力-伸长($F-\Delta L$)曲线就成了工程上的应力-应变($\sigma\epsilon$)曲线。

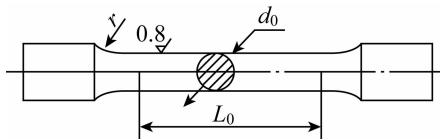


图 1-1 标准拉伸试样

从图 1-2 拉伸曲线可以看出,低碳钢在拉伸过程中明显地表现出不同的变形阶段,所以通常将低碳钢的应力-应变($\sigma\epsilon$)曲线当作典型情况来说明材料的力学性能。整个曲线可分为弹性变形、塑性变形、及断裂三个阶段。在弹性变形阶段(oe 段)中,若卸除试验力,试样能完全恢复到原来的形状和尺寸;其中在 op 阶段,应力与应变呈正比关系,即符合虎克定律。当应力超过 σ_e ,塑性变形便进入屈服阶段(es 段),应力应变曲线出现平台或锯齿,应力不增加或只有微小增加,试样却继续伸长。屈服之后材料进入均匀塑性变形阶段(sb 段),均匀变形的原因是冷变形强化(加工硬化)所致,变形与硬化交替进行,变形量越大,为使材料变形所需的应力越大。当试样变形达到最高点 b 时,变形强化跟不上变形的变化,不能再使变形转移,致使某处截面开始减小。在断裂阶段(bk 段),应力增加,变形加剧,形成缩颈。此时,施加于试样的力减小,而变形继续增加,直至断裂(k 点)。

如果是真应力 S 和真应变 $e(\psi_e)$ 绘制曲线,则得到真实应力和应变曲线,如图 1-3 中的 OBK 曲线。

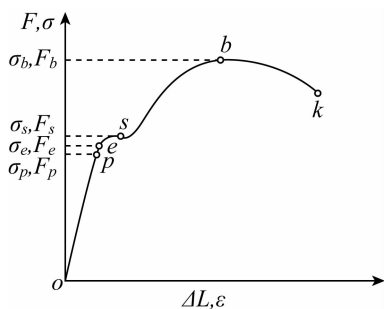


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线

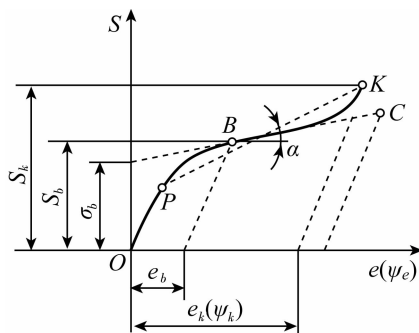


图 1-3 真实应力-应变曲线

(二)常用强度性能指标

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规定非比例伸长应力、屈服强度、抗拉强度等。

1. 规定非比例伸长应力

金属材料在载荷作用下,试样标注部分的非比例伸长达到规定的原始标注百分比时的应力,以 σ_p 表示,单位为 MPa(见式(1-1))。

$$\sigma_p = F_p / S_0 \quad (1-1)$$



式中 F_p ——试样非比例伸长为规定量时的拉力, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

弹性极限是理论上的概念,一般难以用实验直接测定。在实际工程上,常以屈服点或规定残余伸长应力代替。

规定非比例伸长应力是弹性元件设计和选材的主要依据。

2. 屈服强度

金属材料在载荷作用下,产生屈服时的最低应力称为材料的屈服强度,以 σ_s 表示,单位为 MPa(见式(1-2))。

$$\sigma_s = F_s / S_0 \quad (1-2)$$

式中 F_s ——材料屈服时的拉伸力。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标。除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服点外,大多数合金都没有屈服现象,因此提出“规定残余伸长应力”作为相应的强度指标。国家标准规定:当试样卸除拉伸力后,其标距部分的残余伸长达到规定的原始标距百分比的应力,作为规定残余伸长应力 σ_r 。表示此应力的符号应附以角标说明,例如 $\sigma_{r0.2}$ 表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力(见式(1-3))。

$$\sigma_y = F_r / S_0 \quad (1-3)$$

式中 F_r ——产生规定残余伸长时的拉力, N。

国标曾将产生 0.2% 残余伸长率的规定残余伸长应力 $\sigma_{r0.2}$ 称为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。目前一些技术资料仍沿用这一术语。

屈服强度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(曾称强度极限),以 σ_b 表示,单位为 MPa(见式(1-4))。

$$\sigma_b = F_b / S_0 \quad (1-4)$$

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。

(三) 塑性性能指标

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。常用的塑性指标是材料断裂时最大相对塑性变形,如拉伸时的断后伸长率和断面收缩率。

1. 断后伸长率

试样拉断后,标距的伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,以 δ 表示(见式(1-5))。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 L_1 ——试样拉断后的标距, mm;

L_0 ——试样原始标距, mm。

试样的长度和截面尺寸对 δ 是有影响的。按直径的尺寸分为标准试样和比例试样两种。



标准试样的直径为 20 mm,而比例试样直径是任意的。因采用标距的不同,又有长、短试样之分。国家标准规定,长标距试样的标距公式为 $L_0 = 10d_0$,短试样的标距公式为 $L_0 = 5d_0$,式中的 d_0 和 S_0 分别为试样原始直径和原始截面积。短试样的伸长率用符号 δ_5 表示,长试样的伸长率用符号 δ_{10} 表示,对同一材料 $\delta_5 > \delta_{10}$,通常试验优先选取短的比例试样。

2. 断面收缩率

试样拉断后,缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率,以 ψ 表示。其数值按式(1-6)计算:

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 S_0 ——试样原始面积, mm^2 ;

S_1 ——试样断裂后缩颈处的最小横截面积, mm^2 。

δ 或 ψ 数值越大,则材料的塑性越好。

除常温试验之外,还有金属材料高温拉伸试验方法(GB/T4338—1995)和低温拉伸试验方法(GB/T13239—1991)供选用。

二、硬度

硬度能够反映出金属材料在化学成分、金相组织和热处理状态上的差异,是检验产品质量、研制新材料和确定合理的加工工艺所不可缺少的快速检测性能之一;同时,硬度试验是金属力学性能试验中最简便、最迅速的一种方法。

硬度实际是指一个小的金属表面或小的体积内抵抗弹性变形、塑性变形或抵抗破裂的一种抗力,因此硬度不是一个单纯确定的物理量,不是基本的力学性能指标,而是一个由材料的弹性、强度、塑性、韧性等一系列不同力学性能组成的综合性能指标,所以硬度所表示的量不仅决定于材料本身,而且还取决于试验方法和试验条件。

硬度试验方法一般采用压入法,常用的硬度性能指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

(一)布氏硬度

布氏硬度的测定原理是用一定大小的试验力 $F(\text{N})$,把直径为 $D(\text{mm})$ 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面(见图 1-4),保持规定的时间后卸除试验力,用读数显微镜测出压痕平均直径 $d(\text{mm})$,然后按公式求出布氏硬度 HB 值,或者根据 d 值从有关的布氏硬度表中查出 HB 值。

$$HBS(HBW) = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

由于金属材料有硬有软,被测工件有厚有薄,有大有小,如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ,就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此,在生产中进行布氏硬度试验时,要求能使用不同大小的试验力和压头直径,对同一种材料采用不同的 F 和 D 进行试验时,能否得到同一的布氏硬度值,关键在于压痕几何形状的相似,即可建立 F 和 D 的某种选配关系,以保证布氏硬度的不变性。

国家标准(GB231—1984)规定布氏硬度试验时,常用的 $0.102F/D^2$ 的比例为 30、10、2.5

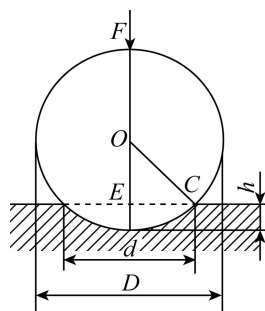


图 1-4 布氏硬度试验原理

三种,根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同,按照表 1-1 的规范选择试验压头(钢球)直径 D 、试验力 F 及保持时间。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度使用范围(HBS)	球直径 D /mm	$0.102F/D^2$	试验力 F /N	试验力保持时间/s	备注
钢 铸铁	≥ 140	10		29420	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的2.5倍。 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的4倍。 试样厚度至少应为压痕深度的10倍。 试验后,试样支撑面应无可见变形痕迹
		5	30	7355		
		2.5		1839		
	< 140	10		9807	10~15	
		5	10	2452		
		2.5		613		
非铁 金属材料	≥ 130	10		29420	30	
		5	30	7355		
		2.5		1839		
	35~130	10		9807	30	
		5	10	2452		
		2.5		613		
	< 35	10		2452	60	
		5	2.5	613		
		2.5		153		

淬火钢球作压头测得的硬度值以符号 HBS 表示,用硬质合金球作压头测得的硬度值以符号 HBW 表示。符号 HBS 和 HBW 之前的数字为硬度值,符号后面依次用相应数值注明压头直径(mm)、试验力(0.102FN)、试验力保持时间(s)(10~15 s 不标注)。例如:500HBW5/750,表示用直径 5mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500;120HBS10/1000/30,表示用直径 10mm 的钢球压头在 9807N 试验力作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

目前,布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材的硬度测试。



(二)洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的性能试验方法,它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。

洛氏硬度试验原理如图 1-5 所示。它是用顶角为 120° 金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16 英寸) 的淬火钢球作压头,先施加的初始试验力 F_1 (98N),再加上主试验力 F_2 ,其总试验力 $F=F_1+F_2$ (588N、980N、1471N)。图中 0—0 为压头没有与试样接触时的位置;1—1 为压头受到初试验力 F_1 后压入试样的位置;2—2 为压头受到总试验力 F 后压入试样的位置经规定的保持时间,卸除主试验力 F_2 ,仍保留初试验力 F_1 ,试样弹性变形的恢复使压头上升到 3—3 的位置。此时压头受主试验力作用压入的深度为 h ,即 1—1 位置至 3—3 的位置。金属越硬, h 值越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念,故人为的规定一常数 K 减去压痕深度 h 的值作为洛氏硬度指标,并规定每 0.002 mm 为一个洛氏硬度单位,用符号 HR 表示,则洛氏硬度值见式(1-7):

$$HR = \frac{K-h}{0.002} \quad (1-7)$$

由此可见,洛氏硬度值是一无量纲的材料性能指标,使用金刚石压头时,常数 K 为 0.2,使用钢球压头时,常数 K 为 0.26。

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度,采用了不同的压头和总负荷组成几种不同的洛氏硬度标度,每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后加以注明,我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种,试验条件(GB230—1991)及应用范围见表 1-2。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值,例如 52HRC、70HRA 等。

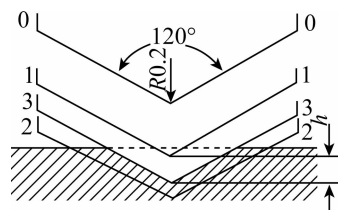


图 1-5 洛氏硬度试验原理

洛氏硬度 HRC 可以用于硬度很高的材料,操作简便迅速,而且压痕很小,几乎不损伤工作表面,故在钢件热处理质量检查中应用最多。但由于压痕小,硬度值代表性就差些。如果材料有偏析或组织不均匀的情况,则所测硬度值的重复性差,故需在试样不同部位测定三点,取其算术平均值。

上述硬度试验方法中,布氏硬度试验力与压头直径受约束关系的约束,并有钢球压头的变形问题;洛氏硬度各标度之间没有直接简单的对应关系。

表 1-2 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总实验力 F /kN	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120° 金刚石圆锥体	0.5884	70~85HRA	硬质合金,表面淬硬层,渗碳层
HRB	$\phi 1.588$ mm 钢球	0.9807	25~100HRB	非铁合金,退火、正火钢等
HRC	120° 金刚石圆锥体	1.4711	20~67HRC	淬火钢,调质钢

由于洛氏硬度试验所用试验力较大,不宜用来测定极薄试样及渗氮层、金属镀层等的硬度,为此,人们应用洛氏硬度试验的原理,减小试验力,提出了表面洛氏硬度试验方法。表面洛氏硬度的标尺有六种。在表 1-3 中列出了各标尺的试验规范、测量硬度范围及应用。



表 1-3 表面洛氏硬度试验的标尺、试验规范及应用

标尺	硬度符号	压头类型	初始试验力 F^0 (N)	主试验力 F^1 (N)	总试验力 F (N)	测量硬度 范围	应用举例
15N	HR15N	金刚石圆锥	29.42	117.7	147.1	70~94	渗氮钢、渗碳钢、极薄钢板、刀刃、零件边缘部分、表面镀层
30N	HR30N			264.8	294.2	42~86	
45N	HR45N			411.9	441.3	20~77	
15T	HR15T	$\phi 1.588$ 钢球	29.42	117.7	147.1	67~93	低碳钢、铜合金、铝合金等薄板
30T	HR30T			264.8	294.2	29~82	
45T	HR45T			411.9	441.3	1~72	

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速,硬度值可直接读出,压痕较小,可在工件上进行试验,采用不同标尺可测定各种软硬不同的金属和厚薄不一的试样的硬度,因而广泛用于热处理质量的检验。其缺点是压痕较小,代表性差,由于材料中有偏析及组织不均匀等缺陷,致使所测硬度值重复性差,分散度大。此外,用不同标尺测得的硬度值彼此没有联系,不能直接进行比较。

(三) 维氏硬度试验

维氏硬度的试验原理与布氏硬度相同,也是根据压痕单位面积所承受的试验力来计算硬度值。所不同的是维氏硬度试验的压头不是球体,而是两对面夹角 α 为 136° 的金刚石四棱锥体,如图 1-6 所示。压头在试验力 F (N) 作用下,将试样表面压出一个四方锥形的压痕,经一定保持时间后,卸除试验力,测量出压痕对角线平均长度 d [$d = (d_1 + d_2) / 2$],用以计算压痕的表面积 A (mm^2)。维氏硬度值 (HV) 为试验力 F 除以压痕表面积 A 所得的商,并按式(1-8)计算:

$$\text{HV} = \frac{0.102F}{A} = \frac{0.204F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (1-8)$$

与布氏硬度值一样,维氏硬度值也不标注单位。

维氏硬度试验之所以采用正四棱锥体压头,是为了当改变试验力时,压痕的几何形状总保持相似,而不致影响硬度值。

根据材料的软硬、厚薄及所测部位的特性不同,需要在不同试验力范围内测定维氏硬度。为此,我国制定了三个维氏硬度试验方法国家标准具体如下:

(1)《金属维氏硬度试验方法(GB 4340—84)》。试验力范围为 49.03~980.7N,共分六级。主要用于测定较大工件和较深表面层的硬度。

(2)《金属小负荷维氏硬度试验方法(GB 5030—85)》。试验力范围为 1.961~49.03 N,共分七级。主要

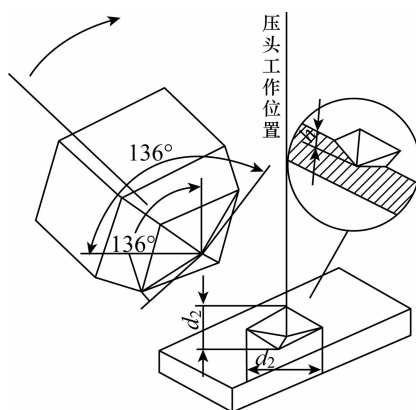


图 1-6 维氏硬度试验压头及压痕



用于测定较薄工件和工具的表面层或镀层的硬度,也可测定试样截面的硬梯度。

(3)《金属显微维氏硬度试验方法(GB/T 4342-91)》。试验力范围为 $98.07 \times 10^{-3} \sim 1.961 \text{ N}$,共分五级。主要用于测定金属箔、极薄的表面层的硬度以及合金中各种组成相的硬度。

维氏硬度试验的优点是不存在布氏硬度试验时要求试验力 F 与压头直径 D 之间所规定条件的约束,也不存在洛氏硬度试验时不同标尺硬度值无法统一的弊端。维氏硬度试验时不仅试验力可任意选取,而且压痕测量的精度较高,硬度值较为精确。唯一的缺点是硬度值需通过测量压痕对角线长度后才能进行计算或查表,因此,工作效率比洛氏硬度法低得多。

(四)其他硬度试验方法

1. 努氏硬度试验

金属努氏硬度试验也是一种显微硬度试验方法。与显微维氏硬度相比有两点不同:一是压头形状不同,如图 1-7 所示。努氏硬度试验所使用的是两个对面角不等的四角棱锥金刚石压头(其对面角分别为 $172^{\circ}30'$ 和 130°),因此,在试样上得到的是长、短对角线长度比(l/w)为 7.11 的棱形压痕;二是硬度值不是试验力除以压痕表面积的高值,而是除以压痕投影面积的高值。因此,测量出压痕长对角线的长度 $l(\mu\text{m})$,就可按式(1-9)计算努氏硬度值(HK):

$$\text{HK} = 0.102 \times 14.23 \frac{F}{l^2} = 1.451 \frac{F}{l^2} \quad (1-9)$$

式中 F ——试验力,其值可在 $0.4903 \sim 19.61 \text{ N}$ 范围内选取。

努氏硬度试验由于压痕细长,而且只测量长对角线的长度,因而精确度较高。对于表面淬硬层或渗层、镀层等薄层区域的硬度测定以及渗层截面上硬度分布的测定较为方便。

2. 肖氏硬度试验

肖氏硬度试验是一种动载荷试验法,其原理是将一定质量的带有金刚石圆头或钢球的重锤,从一定高度落于金属试样表面,根据重锤回跳的高度来表征金属硬度值大小,因而也称为回跳硬度。肖氏硬度的符号用 HS 表示。

标准重锤从一定高度落下,以一定的动能冲击试样表面,使金属产生弹性变形与塑性变形。重锤的冲击能一部分转变为塑性变形功被试样吸收,另一部分则转变为弹性变形功储存在试样中。当弹性变形恢复时,能量被释放,使重锤回跳一定的高度。金属的屈服强度越高,塑性变形越小,则储存的弹性能量越高,重锤回跳高度便越高,表明金属越硬。因此,肖氏硬度值试验只有在金属弹性模量相同时才可进行比较。

肖氏硬度计一般为手提式,较为轻便,使用方便。可在现场测量大型工件的硬度。大型冷轧辊的硬度验收标准就是肖氏硬度值。其缺点是试验结果的准确性受人为因素影响较大,硬度测量精度较低。

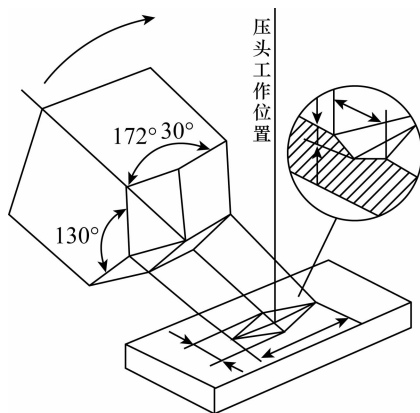


图 1-7 努氏硬度试验压头与压痕图



三、冲击吸收功

机械零部件在工作过程中不仅受到静载荷或交变载荷作用,而且受到不同程度的冲击载荷作用,如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计 and 制造受冲击载荷的零件和工具时,必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧性。

目前最常见的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验,其试验原理如图 1-8 所示。

将被测定的材料先加工成标准试样,然后放在试验机的机架上,试样缺口背向摆锤冲击方向(见图 1-8),将具有一定重力 F 的摆锤举至一定高度 H_1 ,使其具有势能(FH_1),然后摆锤落下冲击试样;试样断裂后摆锤上摆到 H_2 高度,在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断试样所做的功,称为冲击吸收功,以 A_K 表示,单位为 J,则有 $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在 GB/T229—94 中,仅规定了冲击吸收功的概念。若用试样的断口处截面积 S_N 去除 A_K 即得到冲击韧性,用 a_K 表示,单位为 J/cm^2 (见式(1-10))。

$$a_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功 A_K 越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功的 A_K 组成比较复杂,所以有时测得的 A_K 值及计算出来的 a_K 值不能真正反映材料的韧脆性质。

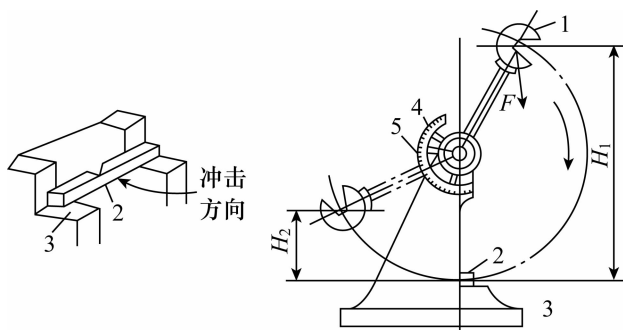


图 1-8 冲击实验原理图

1—摆锤;2—试样;3—机架;4—指针;5—刻度盘

长期生产实践证明, A_K 、 a_K 值对材料的组织缺陷十分敏感,能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大,为了确定出材料由塑性状态向脆性状态转化的趋势,可分别在一系列不同温度下进行冲击试验,测定出 A_K 值随试验温度的变化。实验表明, A_K 随温度的降低而减小;在某一温度范围,材料的 A_K 值急剧下降,表明材料由韧性状态向脆性状态转变,此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件,其韧脆转变温度的确定有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

四、疲劳极限

许多机械零件如轴、齿轮、弹簧等许多工程结构都是在交变应力下工作的,它们工作时所承受的应力通常都低于材料的屈服强度。材料在循环应力和应变作用下,在一处或几处产生局部



永久性累积损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程称为材料的疲劳破坏。

疲劳破坏与静载荷下的破坏不同,断裂前没有明显的塑性变化,发生断裂也较突然。这种断裂具有很大的危险性,常常造成严重的事故。据统计,大部分机械零件的失效是由金属疲劳造成的。因此,工程上十分重视对疲劳规律的研究。无裂纹材料的疲劳性能指标主要是疲劳极限和疲劳缺口敏感度等。

在交变载荷下,金属材料承受的交变应力(σ)和断裂时应力循环次数(N)之间的关系,通常用疲劳曲线来描述,如图 1-9 所示。金属材料承受的最大交变应力 σ 越大,则断裂时应力交变的次数 N 越小;反之 σ 越小,则 N 越大。当应力低于某值时,应力循环到无数次也不会发生疲劳断裂,此应力值称为材料的疲劳极限,以 σ_D 表示。常用钢铁材料的疲劳曲线(见图 1-10(a))形状有明显的水平部分,其它大多数金属材料的疲劳曲线(见图 1-10(b))上没有水平部分,在这种情况下,规定某一循环次数 N_0 断裂时所对应的应力作为条件疲劳极限,以 $\sigma_R(N)$ 表示。

通常材料疲劳性能的测定是在旋转弯曲疲劳试验机上进行,具体试验方法参阅《金属旋转弯曲疲劳试验方法(GB4337—84)》。试验规范规定各种金属材料指定寿命(循环基数) N_0 (如合金钢为 10^7 ,低碳钢 5×10^6),应力循环次数达到 N_0 次仍不发生疲劳破坏,此时的最大应力可作为疲劳极限。通常在对称应力循环条件下的纯弯曲疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

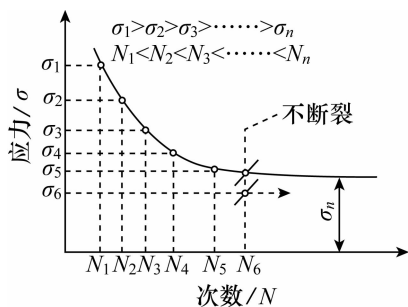


图 1-9 疲劳曲线示意图

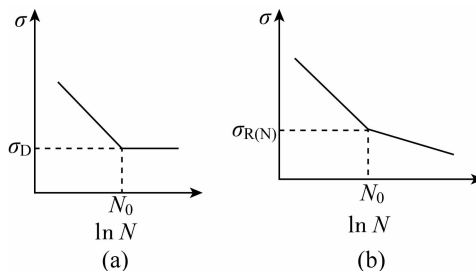


图 1-10 两种类型疲劳曲线

(a) 钢铁材料;(b) 部分非铁合金

由于疲劳断裂通常是从零件最薄弱的部位或外部缺陷所造成的应力集中处发生,因此疲劳断裂对许多因素很敏感,例如,循环应力特性、环境介质、温度、零件表面状态、内部组织缺陷等,这些因素导致疲劳裂纹的产生或裂纹迅速扩展而降低疲劳寿命。

为了提高零件的疲劳抗力,防止疲劳断裂事故的发生,在进行机械零件设计和加工时,应选择合理的结构形状,防止表面损伤,避免应力集中。由于金属表面是疲劳裂纹易于产生的地方,而实际零件大部分都承受交变弯曲或交变扭转载荷,表面处应力最大。因此,表面强化处理就成为提高疲劳极限的有效途径。

由于工程实际的要求,对疲劳的研究工作已逐渐从正常条件下的疲劳问题扩展到特殊条件下的疲劳问题,如腐蚀疲劳、接触疲劳、高温疲劳、热疲劳、微动磨损疲劳等。对这些疲劳及其测试技术还在广泛进行研究,并已逐步标准化。



第二节 金属材料的物理和化学性能



学习要点

◎了解金属材料的物理化学特性。

一、金属的物理性能

(一)密度

单位体积物质的质量称为该物质的密度：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 ρ ——物质的密度, kg/m^3 ;

m ——物质的质量, kg ;

V ——物质的体积, m^3 。

密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属,如铝、镁、钛及它们的合金。密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属,如铁、铅、钨等。金属材料的密度直接关系到由它们所制构件和零件的自重。轻金属多用于航天航空器上。

(二)熔点

金属从固态向液态转变时的温度称熔点,纯金属都有固定的熔点。熔点高的金属称为难熔金属,如钨、钼、钒等,可以用来制造耐高温件,如在火箭、导弹、燃气轮机和喷气飞机等方面得到广泛应用。熔点低的金属称为易熔金属,如锡、铅可用于制造保险丝和防火安全阀零件等。

(三)导热性

导热性通常用热导率来衡量。热导率的符号是 λ ,单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。热导率越大,导热性越好。金属的导热性以银为最好,铜、铝次之。合金的导热性比纯金属差。在热加工和热处理时,必须考虑金属材料的导热性,防止材料在加热或冷却过程中形成过大的内应力,以免零件变形或开裂。导热性好的金属散热也好,在制造散热器、热交换器与活塞等零件时,要选用导热性好的金属材料。

(四)导电性

传导电流的能力称导电性,用电阻率来衡量,电阻率的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小,金属材料导电性越好,金属导电性以银为最好,铜、铝次之。合金的导电性比纯金属差。电阻率小的金属(纯铜、纯铝)适于制造导电零件和电线。电阻率大的金属或合金(如钨、钼、铁、铬)适于做电热元件。

(五)热膨胀性

金属材料随着温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说,金属受热时膨胀体



积增大,冷却时收缩体积缩小。热膨胀性用线胀系数 α_L 和体胀系数 α_V 来表示(见式(1-11))。

$$\alpha_L = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \Delta t} \quad \alpha_V = 3\alpha_L \quad (1-11)$$

式中 α_L ——线胀系数(1/K 或 1/°C)；

L_1 ——膨胀前长度(m)；

L_2 ——膨胀后长度(m)；

Δt ——温度变化量,K 或 °C。

由膨胀系数大的材料制造的零件,在温度变化时,尺寸和形状变化较大。轴和轴瓦之间要根据其膨胀系数来控制其间隙尺寸;在热加工和热处理时也要考虑材料的热膨胀影响,以减少工件的变形和开裂。

(六)磁性

金属材料可分为铁磁性材料(在外磁场中能强烈地被磁化,如铁、钴等)顺磁性材料(在外磁场中只能微弱地被磁化,如锰、铬等)和抗磁性材料(能抗拒或削弱外磁场对材料本身的磁化作用,如铜、锌等)三类。铁磁性材料可用于制造变压器、电动机、测量仪表等。抗磁性材料则用于要求避免电磁场干扰的零件和结构材料,如航海罗盘。铁磁性材料当温度升高到一定数值时,磁畴被破坏,变为顺磁体,这个转变温度称居里点,如铁的居里点是 770°C。

一些金属的物理性能见表 1-4。

表 1-4 一些金属的物理性能及机械性能

金属	铝	铜	镁	镍	铁	钛	铅	锡	锑
元素符号	Al	Cu	Mg	Ni	Fe	Ti	Pb	Sn	Sb
密度 $\times 10^3 / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.7	8.94	1.74	8.9	7.86	4.51	11.34	7.3	6.69
熔点/°C	660	1083	650	1455	1539	1660	327	232	631
线膨胀系数/ $(^\circ\text{C} \times 10^6)^{-1}$	23.1	16.6	25.7	13.5	11.7	9.0	29	23	11.4
相对导电率/%	60	95	34	23	16	3	7	14	4
导热系数/ $\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	2.09	3.85	1.46	0.59	0.84	0.17			
磁化率	21	抗磁	12	铁磁	铁磁	182	抗磁	2	
弹性模量 E/MPa	72400	130000	43600	210000	200000	112500			
抗拉强度/MPa	80~110	200~240	200	400~500	250~330	250~300	18	20	4~10
伸长率/%	32~40	45~50	11.5	35~40	25~55	50~70	45	40	0
断面收缩率 $\varphi/\%$	70~90	65~75	12.5	60~70	70~85	76~88	90	90	0
布氏硬度/HB	20	40	36	80	65	100	4	5	30
色泽	银白	玫瑰红	银白	白	灰白	暗灰	苍灰	银白	银白



二、金属的化学性能

(一) 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力称耐腐蚀性,碳钢、铸铁的耐腐蚀性较差;钛及其合金、不锈钢的耐腐蚀性好。在食品、制药、化工工业中不锈钢是重要的应用材料。铝合金和铜合金有较好的耐腐蚀性。

(二) 抗氧化性

金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力称抗氧化性。加入 Cr、Si 等合金元素,可提高钢的抗氧化性。如合金钢 4Cr9Si2 中含有质量分数为 9% 的 Cr 和质量分数为 2% 的 Si,可在高温下使用,制造内燃机排气阀及加热炉炉底板、料盘等。

金属材料的耐腐蚀性和抗氧化性统称化学稳定性。在高温下的化学稳定性称为热稳定性。在高温条件下工作的设备,如锅炉、汽轮机、喷气发动机等部件和零件应选择热稳定性好的材料来制造。

第三节 金属材料的工艺性能



学习要点

◎ 了解金属材料的工艺特性。

金属材料的工艺性能是指制造工艺过程中材料适应加工的性能。金属材料的一般加工过程如下:在铸造、锻压、焊接、机加工等加工前后过程中,一般还要进行不同类型的热处理。因此,一个由金属材料制得的零件其加工过程十分复杂。工艺性能直接影响零件加工后的质量,是选材和制订零件加工工艺路线时应当考虑的因素之一。

一、铸造性能

金属材料铸造成形获得优良铸件的能力称为铸造性能,用流动性、收缩性和偏析来衡量。

(一) 流动性

熔融金属的流动能力称为流动性。流动性好的金属容易充满铸型,从而获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件。

(二) 收缩性

铸件在凝固和冷却过程中,其体积和尺寸减少的现象称为收缩性。铸件收缩不仅影响尺寸,还会使铸件产生缩孔、疏松、内应力、变形和开裂等缺陷。故铸造用金属材料的收缩率越小越好。



(三) 偏析

金属凝固后,铸锭或铸件化学成分和组织的不均匀现象称为偏析。偏析大会使铸件各部分的力学性能有很大的差异,降低铸件的质量。

表 1-5 所示为几种金属材料的铸造性能的比较。

表 1-5 几种金属材料铸造性能的比较

材料	流动性	收缩性		偏析倾向	其他
		体收缩	线收缩		
灰口铸铁	好	小	小	小	铸造内应力小
球墨铸铁	稍差	大	小	小	易形成缩孔、缩松,白口化倾向小
铸钢	差	大	大	大	导热性差,易发生冷裂
铸造黄铜	好	小	较小	较小	易形成集中缩孔
铸造铝合金	尚好	小	较大	较小	易吸氧,易氧化

二、锻造性能

金属材料用锻压加工方法成形的适应能力称为锻造性。锻造性能主要取决于金属材料的塑性和变形抗力。塑性越好,变形抗力越小,金属的锻造性能越好。铜合金和铝合金在室温状态下就有良好的锻造性能。碳钢在加热状态下锻造性能较好。其中低碳钢最好,中碳钢次之,高碳钢较差。低合金钢的锻造性能接近于中碳钢,高合金钢的较差。铸铁锻造性能差,不能锻造。

三、焊接性能

金属材料对焊接加工的适应性称为焊接性。也就是在一定的焊接工艺条件下,获得优质焊接接头的难易程度。在机械工业中,焊接的主要对象是钢材。碳质量分数是焊接性好坏的主要因素。低碳钢和碳质量分数低于 0.18% 的合金钢有较好的焊接性能,碳质量分数大于 0.45% 的碳钢和碳质量分数大于 0.35% 的合金钢的焊接性能较差。碳质量分数和合金元素质量分数越高,焊接性能越差。铜合金和铝合金的焊接性能都较差。灰口铸铁的焊接性很差。

四、切削加工性能

切削加工性能一般用切削后的表面质量(以表面粗糙度高低衡量)和刀具寿命来表示。影响切削加工性的因素很多,主要有材料的化学成分、组织、硬度、韧性、导热性和形变硬化等。金属材料具有适当的硬度(170~230HBS)和足够的脆性时切削性良好。改变钢的化学成分(如加入少量铅、磷等元素)和进行适当的热处理(如低碳钢进行正火,高碳钢进行球化退火)可提高钢的切削加工性能。表 1-6 所示是几种金属材料的切削加工性能比较。



表 1-6 几种金属材料的切削加工性能比较

等级	金属材料	切削加工性能
1	铝、镁合金	很容易加工
2	易切削钢	易加工
3	30 钢正火	易加工
4	45 钢、灰口铸铁	一般
5	85 钢(轧材)、2Cr13 钢调质	一般
6	65Mn 钢调质、易切削不锈钢	难加工
7	1Cr18Ni9Ti, W18Cr4V 钢	难加工
8	耐热合金、钴合金	难加工

五、热处理工艺性能

钢的热处理工艺性能主要考虑其淬透性,即钢接受淬火的能力。含 Mn、Cr、Ni 等合金元素的合金钢淬透性比较好,碳钢的淬透性较差。这将在第七章中介绍。铝合金的热处理要求较严,它进行固溶处理时加热温度离熔点很近,温度的波动必须保持在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内。铜合金只有几种可以用热处理强化。

思考题和习题

1. 金属材料的性能包括哪几方面?
2. 解释下列常用力学性能指标: σ_b , σ_s , σ_{-1} , δ , ψ , a_k , A_k , HB, HRC, HV。
3. 为什么真应力大于工程应力,真应变小于工程应变?
4. 淬火钢的拉伸曲线上没有出现屈服平台,如何根据其拉伸曲线得到屈服强度?
5. 拉力试样的原标距长度为 50mm,直径为 10mm,经拉力试验后,将已断裂的试样对接起来测量,若最后的标距长度为 71mm,颈缩区的最小直径为 4.9mm,试求该材料的伸长率和断面收缩率的值?
6. 某工厂买回一批材料(要求: $\sigma_s \geq 230\text{MPa}$; $\sigma_b \geq 410\text{MPa}$; $\delta_5 \geq 23\%$; $\psi \geq 50\%$),做短试样($l_0 = 5d_0$; $d_0 = 10\text{mm}$)拉伸试验,结果如下: $F_s = 19\text{KN}$, $F_b = 34.5\text{KN}$; $l_1 = 63.1\text{mm}$; $d_1 = 6.3\text{mm}$;问买回的材料合格吗?
7. 试说明布氏硬度、洛氏硬度与维氏硬度的实验原理,并比较布氏、洛氏和维氏硬度试验方法的优缺点。



第二章 常见金属的晶体结构与结晶



学习导航

- 掌握金属晶体结构的基本知识
- 掌握常见金属晶体结构的类型、特点
- 掌握晶向指数和晶面指数的概念与表示方法
- 掌握晶体的各向异性
- 掌握某些金属多晶型性的概念
- 能分析晶体缺陷对金属性能的影响



案例导入

金属材料在固态下多为晶体,晶体中的原子(离子、分子)是作长程有序规则排列的,且不同结合键的晶体有着不同的性能。与金属键相结合的金属晶体一般都具有较好的塑形,然而值得思考的是,为什么同样以金属键结合得晶态铁与晶态铝的塑形有很大差别呢?研究表明,材料的性能不仅与其组成原子的本性及其原子间的结合键有关,还与晶体中原子(离子、分子)在三维空间长程有序的具体排列方式,即晶体结构有关。



第一节 金属



学习要点

- ◎金属原子的结合方式及其对金属性能的影响

一、金属的原子结构特点

金属是具有良好的导电性、导热性、延展性(塑形)和金属光泽的物质,它们由大量的自由原子构成。而根据原子结构理论,自由原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子组成,它们电荷总数相等。核外电子按能级不同由低至高分层排列着,内层电子能量低最为稳定,最外层电子的能量高,与核结合得弱。最外层电子决定了金属的主要物理和化学性能。

金属原子结构的特点就是,最外层电子数很少,一般只有1~2个,而且这些外层电子与原子核的结合力较弱,很容易脱离所属原子核的束缚而变成自由电子,此时原子核失去外层电子



而成为正离子。

由于金属原子结构的这一特点,决定了金属原子间的结合方式。

二、金属原子间的结合方式

金属原子很容易失去其外层电子而具有稳定的电子壳层,形成带正电荷的正离子,当许多金属原子结合时,这些正离子常在空间整齐地排列,而远离核的电子则在各正离子之间自由游荡,形成“电子云”。金属正是依靠正离子和自由电子之间的相互吸引而结合起来的,这种结合方式就是金属键。金属键的示意图如图 2-1 所示。

根据金属键,就可以解释金属的一些主要特性。

金属具有不透明性和金属光泽。因为金属中的自由电子能吸收可见光的能量,所以即使是很薄的金属片也是不透明的。吸收可见光的能量而激发到较高能级上的电子,处于不稳定状态,当它重新跳回到低能级时,又把吸收的可见光能量以电磁波的形式辐射出来,使金属具有特殊光泽。

金属具有良好的可锻性。由金属键结合的晶体中,金属正离子周围都充满着自由电子,在各个方向上结合力相同,即金属键没有方向性;而且,金属键相互结合时,又不受价电子数目的限制,所以金属键没有饱和性。因此,金属在一定外力作用下,两层相邻的正离子之间发生了相对位移,位移后的两层正离子之间,仍能依靠与自由电子的相互作用力而结合在一起,即始终保持着金属键的结合方式,宏观上显示出良好的可锻性。

金属具有良好的导电性。由于金属中的自由电子在外加电场的作用下,沿着电场方向作定向加速运动而成为电子流,所以金属具有良好的导电性。

金属具有良好的导热性。因为金属除了依靠正离子振动传递热能外,其自由电子从高温区向低温区的运动也能传递热能,而非金属无自由电子传递热量,故金属要比非金属的导热性好。

金属具有正的电阻温度系数。当金属温度升高时,正离子的三维热振动的频率和振幅增大,自由电子定向运动的阻力增加,电阻升高。所以,金属的电阻随温度的升高而增大,即金属具有正的电阻温度系数。

总之,金属的主要特性及其晶体结构特点,都是和金属键这种结合方式密切相关的。

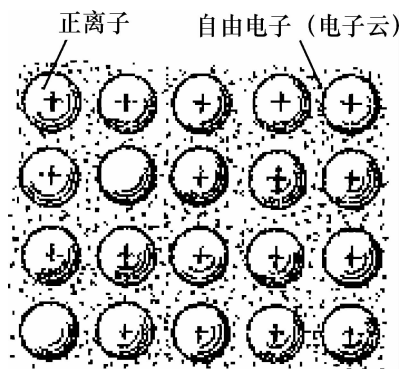


图 2-1 金属键示意图

第二节 常见金属的晶体结构



学习要点

◎ 常见金属晶体结构的类型、特点



不同的金属材料具有不同的力学性能,即使是成分相同的材料,当经过不同的冷热加工后性能也会有很大差异。材料性能上的差异主要取决于金属内部原子排列规律和结构缺陷。

一、金属的晶体结构

(一)晶体的特性

固态物质根据其原子排列特征,可分为晶体和非晶体两类。晶体的特点是:

(1)组成晶体的基本质点(原子、离子或分子)在三维空间呈规则排列,因此晶体一般有规则的外形;

(2)具有一定的熔点;

(3)具有各向异性。一般情况下固态金属都是晶体。

(二)晶体结构的基本概念

实际晶体中的各类质点(主要是原子)虽然都是在不停地运动着,但是,通常在讨论晶体结构时,常把构成晶体的原子看成是一个个固定的小球,这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积,如图 2-2(a)所示。

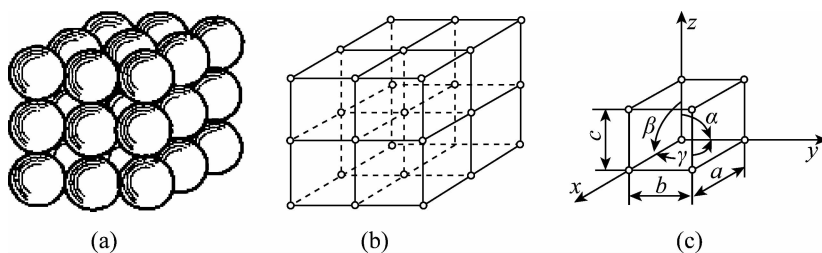


图 2-2 简单立方晶格与晶胞示意图

(a)晶体中的原子排列;(b)晶格;(c)晶胞及晶格参数表示方法

工程上便于描述晶体内部原子排列的规律,人为地将原子视为一个几何质点,并用一些假想的线条将各原子连接起来,便形成一个空间格子,简称晶格(见图 2-2(b))。由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格内取一个能代表晶格特征的,由最少数目的原子排列成最小结构单元来表示晶格,称为晶胞(见图 2-2(c))。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。为了研究晶体结构,通常取晶胞角上的某一结点作为原点,沿其三条棱边作三个坐标轴 x 、 y 、 z ,且称为晶轴。规定坐标原点的前、右和上方为轴的正方向,反之为负方向。而且常以晶胞棱边的长度 a 、 b 、 c 和棱边之间夹角 α 、 β 、 γ 等六个参数作为晶格参数,表示晶胞的几何形状和大小,如图 2-3 所示。其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数,单位为 10^{-10} m 。而 α 、 β 、 γ 称为晶轴间夹角,单位为度($^\circ$)。

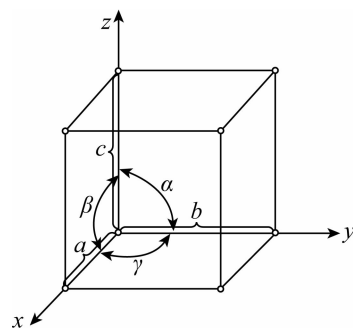


图 2-3 晶格参数表示法



二、常见金属的晶体结构

根据晶体细胞中原子小球排列的规律不同,可以将晶格基本类型划分为 14 种。在金属材料中,常见晶格类型有体心立方晶格(见图 2-4)、面心立方晶格(见图 2-5)、密排立方晶格(见图 2-6)三种。

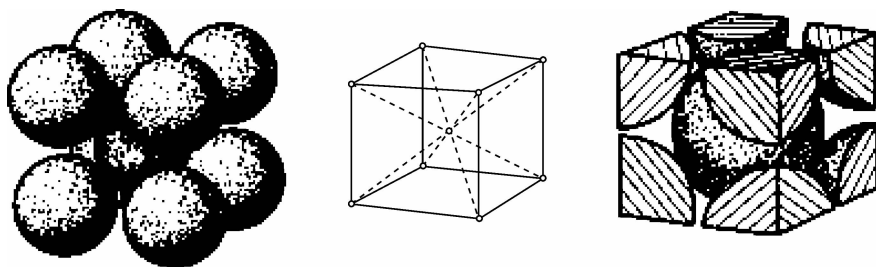


图 2-4 体心立方晶胞示意图

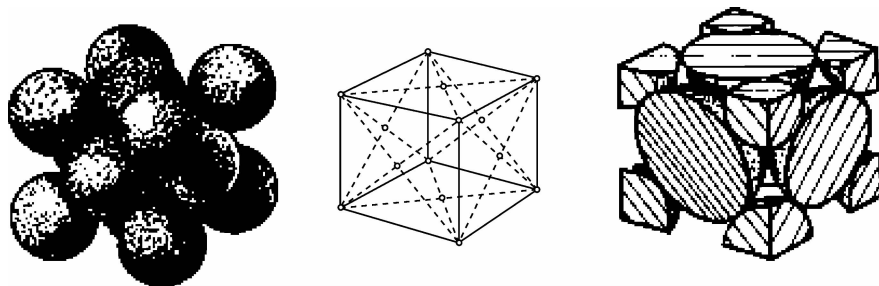


图 2-5 面心立方晶胞示意图

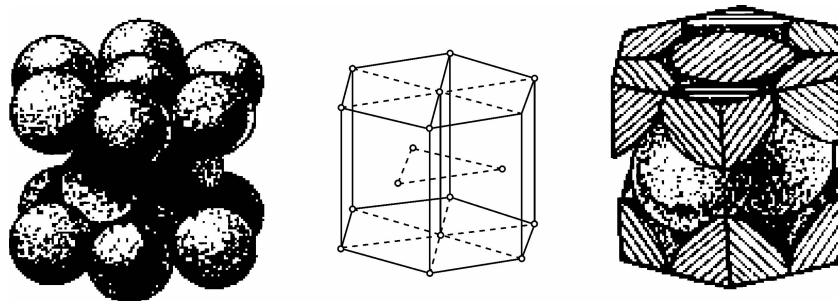


图 2-6 密排六方晶胞示意图

(一)体心立方晶格(B. C. C 晶格)

体心立方晶格的晶胞中,八个原子处于立方体的角上,一个原子处于立方体的中心,角上八个原子与中心原子紧靠。具有体心立方晶格的金属有 Mo、W、V、 α -Fe 等。

体心立方晶胞具有下列特征:

(1)晶格常数 $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(2)晶胞原子数:在体心立方晶胞中,每个角上的原子在晶格中同时属于 8 个相邻的晶胞,因而每个角上的原子属于一个晶胞仅为 $1/8$,而中心的那个原子则完全属于这个晶胞。所以一



个体心立方晶胞所含的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1$, 即 2 个。

(3) 原子半径: 晶胞中相距最近的两个原子之间距离的一半, 或晶胞中原子密度最大的方向上相邻两个原子之间距离的一半称为原子半径 ($r_{\text{原子}}$)。体心立方晶胞原子相距最近的方向是体对角线, 所以原子半径与晶格常数 a 之间的关系为 $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

(4) 致密度: 晶胞中所包含的原子所占有的体积与该晶胞体积之比称为致密度 (也称密排系数)。致密度越大, 原子排列紧密程度越大。体心立方晶胞中原子所占有的体积为 $\frac{4}{3}\pi r_{\text{原子}}^3 \times 2$, 晶胞体积为 a^3 , 所以致密度为:

$$\frac{\frac{4}{3}\pi r_{\text{原子}}^3 \times 2}{a^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 \times 2}{a^3} \approx 0.68 = 68\%$$

即晶胞 (或晶格) 中有 68% 的体积被原子所占据, 其余为空隙。

(5) 空隙半径: 若在晶胞空隙中放入刚性球, 则能放入球的最大半径为空隙半径。体心立方晶胞中有两种空隙。一种为四面体空隙 (见图 2-7(a)), 其半径为 $r_{\text{四}} = 0.29r_{\text{原子}}$; 一种为八面体空隙 (见图 2-7(b)), 其半径为 $r_{\text{八}} = 0.15r_{\text{原子}}$ 。

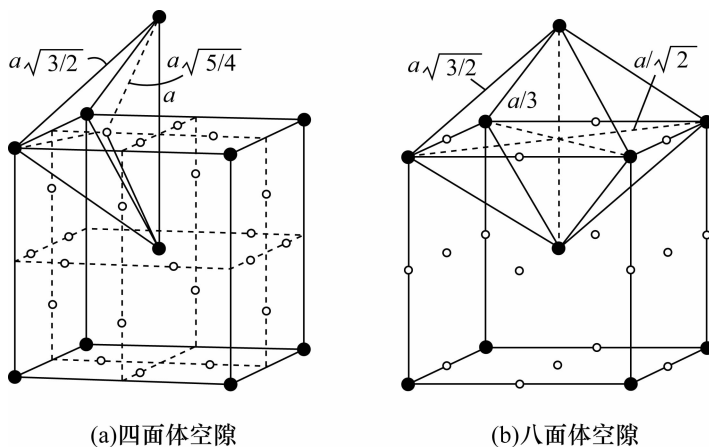


图 2-7 体心立方晶胞中的空隙位置

(a)四面体空隙; (b)八面体空隙

(6) 配位数: 配位数为晶格中与任一原子相距最近且距离相等的原子数目。配位数越大, 原子排列紧密程度就越大。体心立方晶格的配位数为 8。

(二) 面心立方晶格 (F. C. C 晶格)

面心立方晶格的晶胞中, 金属原子分布在立方体的八个角上和六个面的中心。面中心的原子与该面四个角上的原子紧靠。具有这种晶格的金属有 Al、Cu、Ni、Au、Ag、 γ -Fe 等。

面心立方晶胞具有下列特征:

(1) 晶格常数: $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

(2) 晶胞原子数: 与体心立方晶格一样, 其晶胞顶角上的每个原子也同时由相邻的八个晶胞



所共有,而六个面心原子却同时由与该面相邻的两个晶胞所共有,所以面心立方晶胞的原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 个。

(3)原子半径:面心立方晶胞原子相距最近的方向是面对角线,所以原子半径与晶格常数 a 之间的关系为 $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。

(4)致密度:面心立方晶胞中原子所占有的体积为 $\frac{4}{3} \pi r_{\text{原子}}^3 \times 4$,晶胞体积为 a^3 ,所以致密度为:

$$\frac{\frac{4}{3} \pi r_{\text{原子}}^3 \times 4}{a^3} = \frac{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a\right)^3 \times 4}{a^3} \approx 0.74 = 74\%$$

(5)空隙半径(见图 2-8): $r_{\text{四}} = 0.225r_{\text{原子}}$; $r_{\text{八}} = 0.414r_{\text{原子}}$ 。

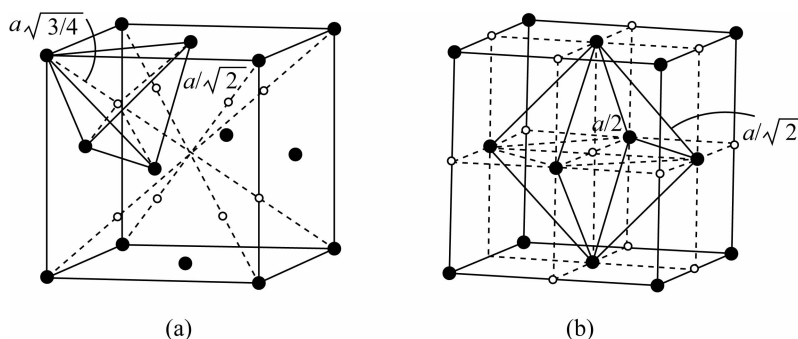


图 2-8 面心立方晶胞中的空隙位置

(a)四面体空隙;(b)八面体空隙

(6)配位数为 12。

(三)密排六方晶格(H. C. P 晶格)

密排六方晶格的晶胞中十二个金属原子分布在六方体的十二个角上,在上下底面的中心各分布一个原子,上下底面之间均匀分布三个原子。具有这种晶格的金属 Mg、Cd、Zn、Be 等。

密排六方晶胞具有下列特征:

(1)晶格常数:用底面正六边形的边长 a 和两底面之间的距离 c 来表达,两相邻侧面之间的夹角为 120° ,侧面与底面之间的夹角为 90° 。

(2)晶胞原子数: $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ (个)。

(3)原子半径: $r_{\text{原子}} = \frac{1}{2} a$ 。

(4)致密度:0.74(74%)。

(5)空隙半径: $r_{\text{四}} = 0.225r_{\text{原子}}$; $r_{\text{八}} = 0.414r_{\text{原子}}$ 。

(6)配位数为 12。

由以上三种金属晶体结构的特征可看到:面心立方晶格和密排六方晶格中原子排列紧密程



度完全一样,在空间是最紧密排列的两种形式。体心立方晶格中原子排列紧密程度要差些。因此,当一种金属(如 Fe)从面心立方晶格向体心立方晶格转变时,将伴随着体积的膨胀。这就是钢在淬火时因相变而发生体积变化的原因。面心立方晶格中的空隙半径比体心立方晶格中的空隙半径要大,表示容纳小直径其他原子的能力要大。如 γ -Fe 中最多可容纳 2.11% 的碳原子,而 α -Fe 中最多只能容纳 0.02% 的碳原子。这在钢的化学热处理(渗碳)过程中有很重要的实际意义。由于不同晶体结构中原子排列的方式不同,将会使它们的形变能力不同,这将在以后的章节中详细介绍。三种典型晶体结构特征见表 2-1。

表 2-1 晶体类型及特性参数

结构类型	晶格常数	晶胞中原子数目	最近原子间距 d_0	致密度
面心立方	a	$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$	$a\sqrt{2}/2$	0.74
体心立方	a	$1/8 \times 8 + 1 = 2$	$a\sqrt{3}/2$	0.68
密排立方	a, c	$1/6 \times 12 + 3 + 1/2 \times 2 = 6$	a	0.74

三、晶向指数和晶面指数

在晶体中,通过空间点阵中的任意一组阵点的平面代表晶体中的原子平面,称为晶面。空间点阵中各阵点列的方向代表晶体中原子列的方向,称为晶向。为方便起见,人们通常用一种符号即晶向指数和晶面指数来分别表示不同的晶向和晶面。

(一) 晶向指数

晶向指数是表示晶体中点阵方向的指数,由晶向上阵点的坐标值决定。其确定步骤如下:

(1) 建立坐标系。如图 2-9 所示,以晶胞中待定晶向上的某一阵点 O 为原点,以过原点的晶轴为坐标轴,以晶胞的点阵常数 a, b, c 分别为 x, y, z 坐标轴的长度单位,建立坐标系。

(2) 确定坐标值。在待定晶向 OP 上确定距原点最近的一个阵点 P 的三个坐标值。

(3) 化整并加方括号。将三个坐标值化为最小整数 u, v, w , 并加方括号, 即得待定晶向 OP 的晶向指数 $[uvw]$ 。如果 u, v, w 中某一数为负值, 则将负号标注在该数的上方。

对于晶向指数需作如下说明:(1)一个晶向指数代表着相互平行、方向一致的所有晶向;(2)若晶体中两晶向相互平行但方向相反,则晶向指数中的数字相同,而符号相反。如 $[11\bar{2}]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 等;(3)晶体中原子排列情况相同但空间位向不同的一组晶向称为晶向族,用 $\langle uvw \rangle$ 表示。例如立方晶系中的 $[111], [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], [1\bar{1}\bar{1}], [11\bar{1}], [\bar{1}\bar{1}1], [\bar{1}1\bar{1}], [1\bar{1}1], [\bar{1}11]$ 八个晶向是立方体中四个体对角线的方向,它们的原子排列情况完全相同,属于同一晶向族,故用 $\langle 111 \rangle$ 表示。如果不是立方晶系,改变晶向指数的顺序所表示的晶向可能不是等同的。如正交晶系中, $[100], [010], [001]$ 这三个晶向就不是等同晶向,因为在这三个晶向上的原子间距分别为 a, b, c , 其上的原子排列情况不同,性质也不同,所以不能属于同

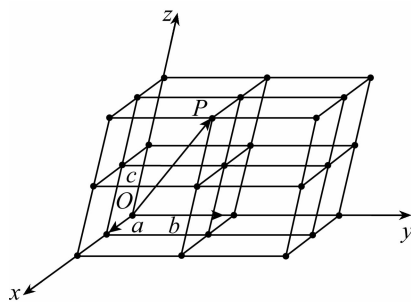


图 2-9 晶向指数的确定



一品向族。

(二) 晶面指数

晶面指数是表示晶体中点阵平面的指数,由晶面与三个坐标轴的截距值所决定。其确定步骤如下:

(1) 建坐标。如图 2-10 所示,以晶胞的某一阵点 O 为原点,以过原点的晶轴为坐标轴,以点阵常数 a, b, c 为三个坐标轴的长度单位,建立坐标系。但应注意,坐标原点的选取应便于确定截距,且不能选在待定晶面上。

$$oa_1 = \frac{1}{2}a \quad ob_1 = \frac{1}{2}b \quad oc_1 = \frac{1}{2}c$$

(2) 求截距。求出待定晶面在三个坐标轴上的截距。

如果该晶面与某坐标轴平行,则其截距为 ∞ 。

(3) 取倒数。取三个截距值的倒数。

(4) 化整并加圆括号。将上述三个截距的倒数化为最小整数 h, k, l , 并加圆括号, 即得待定晶面的晶面指数 (hkl) 。如果晶面在坐标轴上的截距为负值, 则将负号标注在相应指数的上方。

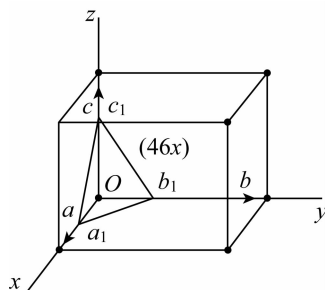


图 2-10 晶面指数的确定

对于晶面指数需作如下说明:(1)晶面指数 (hkl) 不是指一个晶面,而是代表着一组相互平行的晶面。(2)平行晶面的晶面指数相同,或数字相同而正负号相反,如 (hkl) 与 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 。(3)晶体中具有等同条件(即这些晶面上的原子排列情况和晶面间距完全相同)而只是空间位向不同的各组晶面称为晶面族,用 $\{hkl\}$ 表示。(4)在立方晶系中,具有相同指数的晶向和晶面必定相互垂直,例如 $[100] \perp (100)$, $[111] \perp (111)$ 等,但此关系不适用于其他晶系。

六方晶系的晶向指数和晶面指数在此不作讨论。

四、晶体的各向异性

在相同晶格中,由于不同晶面和晶向上的原子排列情况不同,因而原子间距不同,原子间相互作用的强弱也不同,从而导致晶体的宏观性能在不同方向上具有不同数值,这种现象称为晶体的各向异性。例如,具有体心立方晶格的铁,其弹性模量 E 就各向不同。如图 2-11 中所示的 c 方向, E 约为 135000MPa, 而 a 方向 E 约为 290000MPa。而且晶体的各向性,在物理、化学和力学性能等方面都会表现出来。然而,实际使用的金属材料,一般都不表现出各向异性的特征,而表现出各向同性。例如,工业用铁的弹性模量 E , 无论从何种方向取样,测定结果其弹性模量 E 全是 210000MPa。这主要是由于理想晶体和实际晶体结构之间还存在着很大的差异。

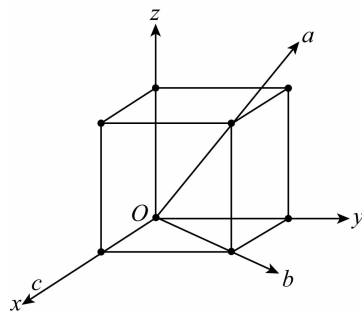


图 2-11 立方晶格的晶向

工业上使用的金属材料绝大多数是由许多单晶体组成的多晶体。所谓单晶体,是指其内部



晶格位向基本一致的晶体,即接近于理想晶体,所以它具有各向异性的特征。而多晶体是由许多单晶体(即晶粒)组成。在多晶体中,各晶粒的原子排列规律相同,只是位向不同而已。由于晶粒的性能在各个方向上相互影响,再加上晶界作用,就完全掩盖了每个晶粒的各向异性。故测出多晶体的性能在各个方向上都几乎相等,显示出各向同性的性质。

五、多晶型性

大部分金属只有一种晶体结构,但也有少数金属如 Fe、Mn、Ti、Co 等具有两种或几种晶体结构,即具有多晶型。当外部条件(如温度和压强)改变时,金属内部由一种晶体结构向另一种晶体结构的转变称为多晶型转变或同素异构转变。如 Fe 在 912℃ 以下为体心立方晶格,称为 α -Fe,在 912~1394℃,具有面心立方晶格,称为 γ -Fe,而从互 1394℃ 至熔点,又转变为体心立方晶格,称为 δ -Fe。由于不同的晶体结构具有不同的致密度,因而当发生多晶型转变时,将伴有比容或体积的突变。 α -Fe 的致密度小, γ -Fe 的致密度大, δ -Fe 的致密度又小,所以在 912℃ 由 α -Fe 转变为 γ -Fe 时体积突然减小,而 γ -Fe 在 1394℃ 转变为 δ -Fe 时体积又突然增大。除体积变化外,多晶型转变还会引起其他性能的变化。



第三节 金属的实际晶体结构



学习要点

◎实际金属晶体结构的特点与晶体缺陷

一、单晶体和多晶体

晶体内部的晶格位向完全一致的晶体称为单晶体。金属的单晶体只能靠特殊的方法制得。实际使用的金属材料都是由许多晶格位向不同的微小晶体组成的:每个小晶体都相当于是一个单晶体,晶体内部的晶格位向是一致的;小晶体之间的位向却不相同。这种外形呈多面体颗粒状的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体如图 2-12 所示。

二、晶体缺陷

金属晶体内部原子规则有序地排列是理想晶体的状态。实际上金属由于结晶或其他加工等条件的影响,内部原子排列并不是理想完整的,存在大量的晶体缺陷。这些缺陷的存在,对金属性能会产生显著的影响。

根据晶体缺陷存在形式的几何特点,通常将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

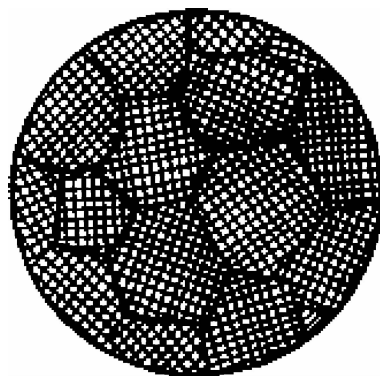


图 2-12 多晶体的晶粒与晶界示意图



(一)点缺陷

点缺陷特征是在晶体空间三个方向尺寸都很小,不超过几个原子间距,最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子,如图 2-13 所示。

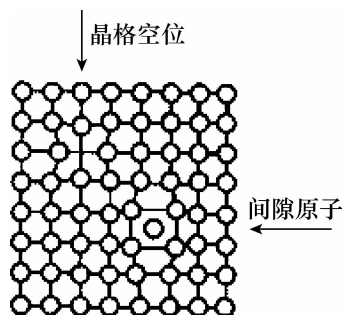


图 2-13 晶体中的空位和间隙原子

1. 空位

在晶体晶格中,若某结点上没有原子,则这结点称为空位。晶格中原子处于高频热振动中,当某些原子的动能大大超过给定温度下的平均动能,原子可能脱离原来的结点,跑到晶体的表面(包括晶界面、孔洞、裂纹等内表面),甚至从表面蒸发,使晶体内形成无原子的节点,即空位。

脱离平衡位置的原子大致有三个去处:一是迁移到晶体的表面上,选样所产生的空位叫肖脱基空位(见图 1-14(a));二是迁移到晶格的间隙中,这样所形成的空位叫弗兰克尔空位(见图 1-14(b));三是迁移到其他空位处的空位,这样虽然不产生新的空位,但可使空位变换位置。

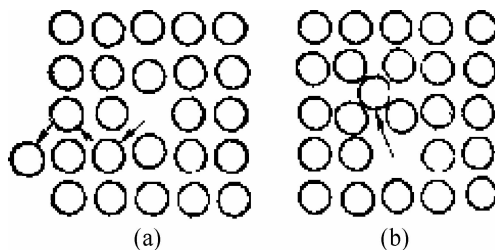


图 2-14 脱离平衡位置的原子去处

(a)和弗兰克尔空位;(b)弗兰克尔空位

2. 间隙原子

位于晶格间隙之中的原子称为间隙原子。形成间隙原子是非常困难的,在纯金属中,主要的缺陷是空位而不是间隙原子。例如,铜在 1000°C 时,空位浓度约为间隙原子浓度的 10^{35} 倍。间隙原子会造成其附近晶格的很大畸变。

由于点缺陷的存在,会使其周围的晶格发生畸变,并使材料的强度、硬度升高。

(二)线缺陷

线缺陷的特征是在晶体空间两个方向上尺寸很小,而第三个方向的尺寸很大。属于位错是一种很重要的晶体缺陷。其特点是围绕晶体中一条很长的线,在一定范围内原子发生有规律的错排,都离开它们原来的平衡位置。位错的主要类型有刃型位错和螺型位错。



1. 刃型位错

刃型位错几何模型如图 2-15 所示,在一个完整晶体的某一晶面(如图示 ABC 面)上,沿 EF 线垂直插入半个晶面。由于这多出的晶面像刀刃一样切入,使晶体中以 EF 为中心线的附近一定范围的区域内原子位置都发生错动,其特点是:ABC 晶面上半部原子受挤压,下半部受拉伸,而位错线中心的原子错动最大,晶格畸变严重,离位错线越远,晶格畸变越小,直至恢复正常。

刃型位错有正负之分,若额外半原子面位于晶体的上半部,则此处的位错线称为正刃型位错,以符号“ \perp ”表示。反之,若额外半原子面位于晶体的下半部,则称为负刃型位错,以符号“ \lrcorner ”表示。实际上这种正负之分并无本质上的区别,只是为了表示两者的相对位置。

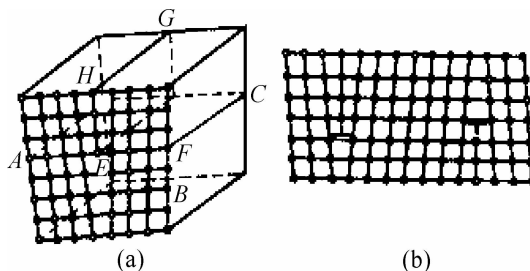


图 2-15 刃型位错几何模型

(a)立体;(b)平面

2. 螺型位错

螺型位错示意图如图 2-16(a)所示。

这种位错,犹如在晶体 BC 右方的上下两部分原子面间。沿 ABCD 晶面发生错动,在 ae 及其右方,上下两部分晶体相对移动了一个原子间距。从图 2-16(b)顶视图可以看出,在 aa' 右边晶体的上下层原子间相对移动一个原子间距,从而在 BC 和 aa' 之间形成一个上下原子面不相吻合的过渡区。该过渡区的晶格发生了严重畸变,其原子平面被扭曲成为螺旋面,故称为螺型位错。因此螺型位错是一个螺旋状的晶格畸变的管道,BC 线称为位错线。由于螺型位错区的晶格发生了严重畸变,所以形成一个应力场,成为应力集中区。

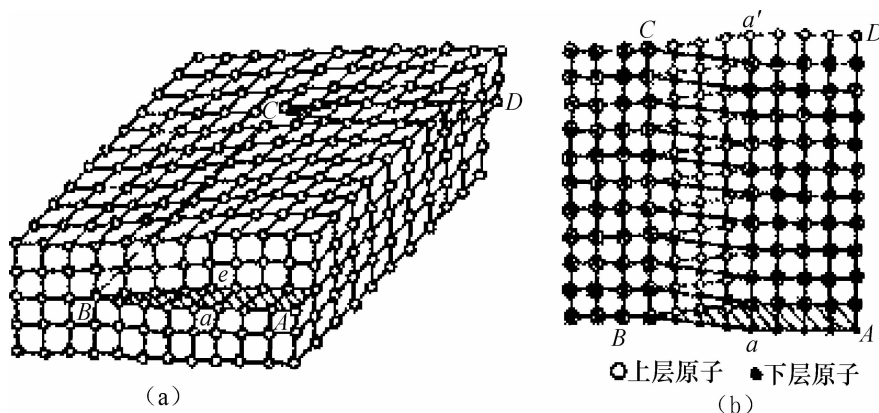


图 2-16 螺型位错示意图

(a)示意图;(b)顶视图

根据位错线附近呈螺旋形排列的原子的旋转方向的不同,螺型位错可分为左螺型位错和右螺型位错两种。通常用拇指代表螺旋的前进方向,而以其余四指代表螺旋的旋转方向。凡符合右手法则的称为右螺型位错,符合左手法则的称为左螺型位错。

刃型位错与螺型位错的区别如下:

(1)刃型位错具有一个额外的半原子面,而螺型位错无。