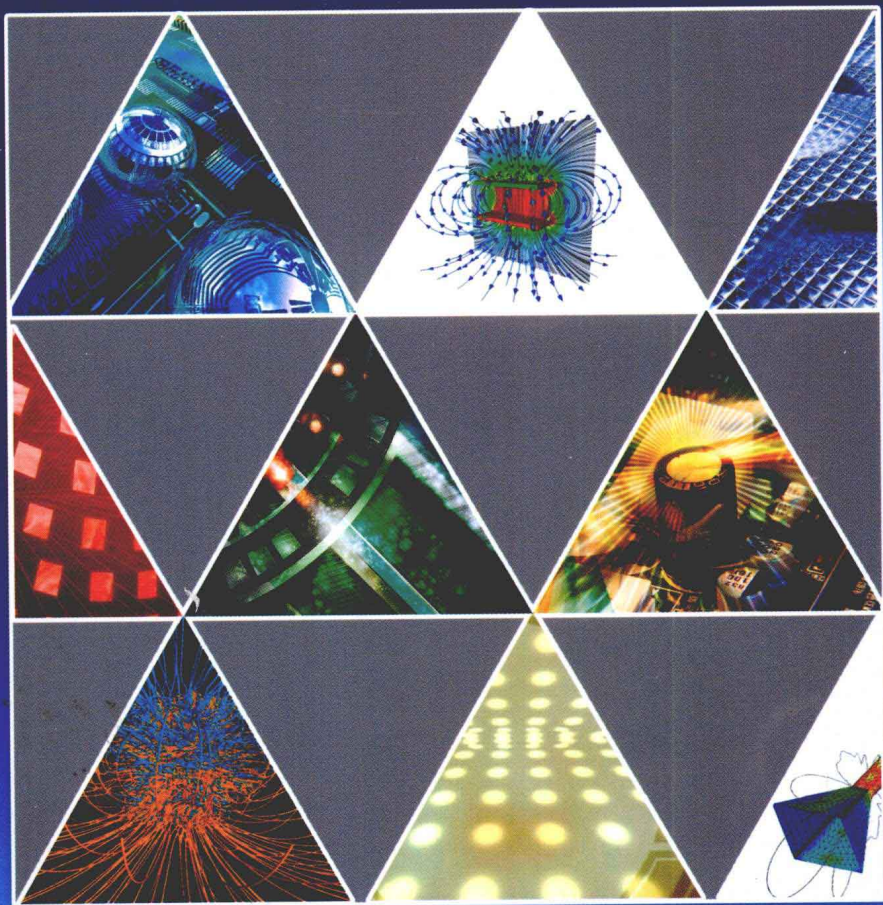


声发射检测及 信号处理

李孟源 尚振东 蔡海潮 董冠强 著



科学出版社

www.sciencep.com

河南科技大学学术著作出版基金资助出版

声发射检测及信号处理

李孟源 尚振东 著
蔡海潮 董冠强

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了声发射波检测的物理基础,声发射信号的时域、时差域、频域分析方法,声发射信号不失真检测的条件,声发射信号的数字处理方法如自适应滤波、贝塞尔滤波、模糊诊断、多传感器数据融合、神经网络和小波分析等;着重介绍了滚动轴承故障的声发射检测系统及故障信号的检测分析方法;简要介绍了声发射检测在机械加工中的应用。

本书可作为高等院校机械学、材料学、计量学等相关专业研究生、本科生的教学参考书,也可作为从事声发射检测工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

声发射检测及信号处理 / 李孟源等著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029295-7

I. ①声… II. ①李… III. ①声发射-无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第204461号

责任编辑:王志欣 陈 捷 潘继敏 / 责任校对:何艳萍

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年10月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—3 000 字数: 277 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

声发射(acoustic emission, AE)技术作为无损检测的一门新技术,其应用与发展已走过了近 60 年的历程。

GB/T 12604. 4—2005/ISO12716:2001《无损检测术语声发射检测》中,声发射被定义为材料中局域源能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象。在与声发射有关的文献中使用的术语还有应力波发射(stress wave emission)和微振动活动(microseismic activity)等。

定义表明:声发射波是一种弹性波,具有一定的能量;这种弹性波从时域角度看,波形具有瞬时信号的特征;它从有到无是个变化的过程,信号由零达到最大值之后,逐渐消失,但是这个过程的速度很快;信号幅值的大小和变化的快慢、波形的几何形貌特征等不仅与材料的性质有关,还与材料局部区域的物理形态、性质等有关。

目前,有关声学检测的相关资料所论述的声振动过程的测量技术,归纳起来都是由已知声源或振动结构求解其声场的过程。依据系统科学的观点,把已知声源的结构特征作为系统的输入,把检测得到的声发射参数作为系统的输出,在声学领域将这种由已知声源特征求解声场的过程称为数学物理过程的正问题,而把由测取声场数据反演计算出其声源特性的过程称为数学物理过程中的逆问题,又称为反问题。

声发射检测借助于声发射传感器、中间处理环节和信号处理分析技术,实现声发射源的定位、判断,属于声学工程中的逆问题范畴。从接收到的声发射弹性波来反推原始波是十分困难的。因为,要获得反问题的准确可靠的解,需要在可能条件下,首先必须精确测得声发射波,即在物理上声发射检测系统测取得到的必须是不失真的声发射信号;其次,在数学上更为复杂,求取准确可靠的解往往涉及非线性问题,且计算量很大;再次,当采用数值方法计算时,还可能出现数值解的不稳定和唯一性问题。但计算科学及信号处理技术的快速发展,高速计算机或专用信号处理设备如 DSP(digital signal processor)的出现,高性能、宽频带声发射传感器及测量技术的发展,为声学工程中逆问题的研究及应用提供了良好的条件,使得声发射技术在工程中得到越来越广泛的应用。

构件材料局域释放的弹性波从力学角度看是应力波;从物理学角度看,它是微振动波;从信息科学和信号分析角度看,它具有瞬时性的明显特征;因此,要从测量学角度出发,实时、不失真地测取这种快速释放的“瞬态”信号,并以此推演(反演)

构件材料的局部变化,其难度是不言而喻的。

声发射检测技术涉及材料学、力学、声学、信息科学、计量学、电子学和计算机等学科领域,影响其检测准确程度的因素多而复杂,传感器技术、电子技术、信号处理分析技术等能否恰当应用直接决定了检测的准确与否。

本书是作者多年从事声发射检测及机械设备故障诊断的工作总结。本书具有以下特点:其一,体系完整、层次清楚。以国家标准(GB)和国际标准(ISO)的声发射定义为基线,逐层次阐述声发射检测过程中所必备的知识:材料声发射的概念、各种常见工程材料声发射的机理、声发射波传播模式、声发射检测系统的构成、声发射信号的不失真检测、声发射信号的时域与频域分析和现代处理技术,以及声发射检测技术的工程应用实例。其二,侧重于理论,注意应用。本书侧重于声发射基本物理基础和声学理论的叙述。由于影响声发射检测准确程度的因素众多而复杂,以理论作指导,面对千差万别的设备、构件的声发射检测就会如鱼得水,不致迷失方向。本书结合工程中构件声发射检测及故障诊断的案例,阐述了不同设备、不同结构声发射检测系统及其信号处理分析方法,为读者利用声发射理论解决具体工程问题提供了参考,并起到了搭桥铺路的作用。

本书由河南科技大学李孟源撰写第1章,蔡海潮撰写第3、4、6章,尚振东撰写第2、5章及第7章的7.1节和7.2节,董冠强撰写第7章的7.3节。

由于声发射检测及信号处理涉及知识面广,并且声发射检测技术发展很快,书中疏漏、不妥之处在所难免,谨希望读者批评指正。

作者
2010年8月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 声发射现象	1
1.2 声发射技术	2
1.3 金属材料的声发射机理	5
1.3.1 金属材料的晶体结构	5
1.3.2 金属材料的变形	9
1.3.3 金属材料的声发射源	19
1.4 声发射技术的特点与发展	23
1.4.1 Kaiser 效应	24
1.4.2 Felicity 效应	24
1.4.3 声发射技术的特点	24
1.4.4 声发射技术的发展	25
1.4.5 声发射检测在机械构件中的应用	26
第 2 章 声发射信号传播及波形分析	28
2.1 声波检测物理基础	28
2.1.1 声波	28
2.1.2 声发射波	28
2.1.3 声发射波的传播模式	29
2.1.4 声波的几何描述	32
2.1.5 波动方程	33
2.2 声发射信号的时域分析	48
2.2.1 概述	48
2.2.2 信号时域特征参数	49
2.3 声发射信号的相关分析	52
2.3.1 相关	52
2.3.2 自相关函数	53
2.3.3 互相关函数	55
2.4 声发射信号的频域分析	56
2.4.1 傅里叶级数和频谱图	57

2.4.2	傅里叶变换和频谱密度	58
2.5	信号传输理论基础	62
第3章	声发射信号的不失真检测	64
3.1	概述	64
3.1.1	声发射检测系统的基本要求	64
3.1.2	线性系统及其主要性质	65
3.2	检测系统的静态特性	66
3.2.1	检测系统的误差	66
3.2.2	检测系统的静态特性参数	67
3.3	检测系统的动态特性	71
3.3.1	传递函数	71
3.3.2	频率特性	73
3.3.3	瞬态响应	76
3.3.4	实现不失真检测的条件	81
3.3.5	声发射传感器的频率响应	83
3.3.6	负载效应	85
第4章	声发射信号处理	90
4.1	概述	90
4.2	声发射信号数字处理基础	91
4.2.1	信号的数字化	91
4.2.2	DFT	93
4.2.3	数字式分析处理中的若干问题	96
4.2.4	FFT	100
4.3	滤波器	101
4.3.1	滤波的基本原理	101
4.3.2	自适应滤波器	104
4.3.3	贝塞尔滤波器	106
4.4	模糊诊断	107
4.4.1	模糊性	107
4.4.2	模糊集和隶属函数	107
4.4.3	模糊关系矩阵	108
4.4.4	常用的隶属函数	109
4.5	基于参数估计的声发射源多传感器数据融合	110
4.6	神经网络	115
4.7	小波分析	120

第 5 章 声发射检测系统	121
5.1 声发射传感器	121
5.1.1 压电式声发射传感器	121
5.1.2 电容式声发射传感器	124
5.1.3 其他传感器	127
5.1.4 传感器等效电路	127
5.2 声发射信号的调理	130
5.3 基于虚拟仪器的声发射检测系统	133
5.3.1 虚拟仪器的基本构成	134
5.3.2 虚拟仪器的分类	135
5.3.3 虚拟仪器的应用程序	136
5.3.4 LabVIEW 中的信号分析与处理工具箱	138
5.3.5 PCI-2 声发射检测系统简介	144
第 6 章 滚动轴承故障声发射检测	146
6.1 国外滚动轴承的声发射检测应用	146
6.2 滚动轴承的故障形式	146
6.3 滚动轴承的声发射检测理论基础	148
6.3.1 Hertz 接触应力理论	148
6.3.2 疲劳与接触应力	150
6.4 滚动轴承声发射信号产生机理	152
6.4.1 轴承声发射信号的产生	152
6.4.2 轴承的摩擦、磨损机理	153
6.4.3 货车轮对轴承内圈松动的声发射	158
6.5 声发射技术在滚动轴承故障检测中的应用	159
6.5.1 轴承故障检测方法简介	159
6.5.2 轴承故障检测的基本环节	160
6.5.3 滚动轴承故障的声发射检测	162
6.6 滚动轴承声发射信号处理	174
6.6.1 基本表征参数分析	174
6.6.2 统计特征参量分析	176
6.6.3 轴承故障特征频率	176
6.6.4 小波能量法	177
6.6.5 神经网络声发射信号处理	185
第 7 章 声发射检测在机械加工中的应用	187
7.1 铣削中的声发射检测	187

7.1.1	铣削中的声发射	187
7.1.2	铣削中声发射的数据处理	188
7.1.3	切屑形成中的声发射	191
7.1.4	结论	192
7.2	声发射检测技术在磨削加工中的应用	193
7.2.1	概述	193
7.2.2	声发射在研磨中的特性	194
7.2.3	磨削监控中的声发射特性	196
7.2.4	研磨中的声发射技术	198
7.2.5	接触检测	202
7.2.6	修整监测	207
7.2.7	结论	209
7.3	声发射在数控机床中的应用	210
参考文献		212

第 1 章 概 述

1.1 声发射现象

材料受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应力-应变的现象称为声发射,又称为应力波发射、应力波微振动等。

声发射是一种常见的物理现象,如果释放的应变能足够大,就可产生人耳听得见的声音。据我国史料记载,公元前 1000 年左右的周朝,周幽王的宠妃褒姒爱听撕裂绢的声音,于是周幽王下令每日进绢百匹,由专人负责撕绢以取悦爱妃,可以认为,绢的断裂声是我国最早的有关声发射的记载。无独有偶,我国四大名著之一的《红楼梦》也有声发射的相关内容,晴雯与贾宝玉吵架,气得把手中扇子撕得粉碎,宝玉见此情景说,“你若喜欢听扇子裂损的声音,那你就撕扇子听好了”。绢和扇子的材料不同,在力的作用下断裂过程中产生的应力-应变能已足够大,其声响可达到激励人耳、取悦于人的程度。上述非金属材料的声发射的频率应属音频的范畴。

声发射和微振动是自然界中随时发生的自然现象,如树枝折断产生的咔嚓声响、骨头折断的声音以及岩石的破碎声无疑都是人耳能听到的声发射信号。

锡鸣声是人们首次听到的金属材料的声发射现象。公元前 3700 年人类冶炼出纯锡,纯锡在塑性变形期间机械孪晶产生可听得到的声发射,因此,可以认为锡鸣是人类最早观察到的金属中的声发射现象。

20 世纪 50 年代初,德国人 Kaiser 观察到铜、锌、铝、锡、黄铜、铸铁和纯金属或合金在变形过程中都有声发射现象。近年来的研究表明,大多数金属材料塑性变形和断裂时均产生声发射现象。材料在应力作用下的变形与裂纹扩展是结构失效的重要机制,这种直接与变形和断裂机制有关的源通常被称为典型的声发射源。将流体泄露、摩擦、撞击、燃烧等与变形、断裂机制无直接关系的另一类弹性波称为其他声发射源或二次声发射源。

在材料加工、处理和使用过程中,有许多因素能引起内应力的变化,从而产生声发射信号,从发射源发射的弹性波最终传播到材料的表面。例如,在机械加工制造及金属切削加工过程中,工件的断裂、工件与刀具的摩擦、切屑的变形、切削刀具的破损和工件的塑性变形等,这些丰富的声发射信号都会以弹性波的形式最终传播到加工系统的特定表面。

以金属切削加工常用的精加工方法磨削为例,其切削刀具采用由大量随机分布的微小而锋利的刀具(如金刚砂等)构成的砂轮去除材料,从微几何的角度看,在磨削过程中磨粒的破损、金属的塑性变形等随时都产生声发射现象。

1.2 声发射技术

声发射现象产生的声发射信号强度差别很大。地震的声响、树枝的断裂声等人耳可听到的声发射信号毕竟是少数,机械工程中如此大的声响并不多见。绝大多数声发射信号如构件裂纹的产生与扩展、塑性变形的产生及加剧等,其应变能的能量都很小,声发射信号的强度很弱,欲检测到这些信号并判断其源自何处,靠人们的听觉系统是难以实现的,必须借助现代测试技术手段,利用对声发射信号变化敏感的器件——传感器,将声发射信号的声能转换成电能,即将声波的振动信号转换为电信号,进而判断声发射的产生及其形态特征。工程中,人们将借助于传感器探测,经记录、分析声发射信号并推断声发射源的技术称为声发射技术。

声发射技术是现代动态测试技术在声发射领域的具体应用。现代动态测试技术涉及数学、物理学、力学、电子学、误差理论与数据处理等多门学科。图 1.1 为声发射检测系统原理图。

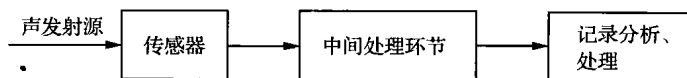


图 1.1 声发射检测系统原理图

1. 传感器

人类器官接收外界信号的能力受到其感官生理机能的限制。实验表明,人类大脑对听觉的吸收率仅为 11%,能感知的声音信号频率为 20~20000Hz。各种材料的声发射信号频率范围很宽,从几赫兹的次声频到数兆赫兹的超声频;声发射信号的幅度范围也很大,从 10^{-13}m 的微观位错运动到 1m 的地震波。

人耳是一种探测声波的声传感器,是通过声波的压力作用耳膜而探测声音的。传感器是人感官的延伸,其关键作用是扩展人类感知信息的能力。例如,声发射传感器不仅能感知 20~20000Hz 的音频,也能检测低于 20Hz 的次声频和大于 20000Hz 的超声频。声发射传感器是一种转换装置,它的作用是将材料塑性变形或裂纹产生的弹性波转换成易于检测、处理的电信号(如电荷),传输给测试系统进行分析、处理,以便得到声发射源的实时信息。

在对声发射原始信息的准确可靠捕获与转换过程中,传感器的性能起着至关重要的作用。为了减少测量误差,要求传感器具有下述良好性能:一是传感器的输

出信号与输入信号之间成比例关系,即线性度好,这样才能避免或减小线性误差;二是当传感器的输入信号变化一定数值时,输出信号变化较大,通常把输出信号的变化量与输入信号的变化量之比称为灵敏度,也就是说,传感器应具有足够高的灵敏度;三是传感器反应敏捷,即传感器输出信号的变化随输入信号的变化而变化,这就要求传感器能迅速、精确地跟踪输入信号,具有足够的带宽,以跟踪变化快慢不同的声发射波,即具有良好的动态特性。

声发射传感器在声发射技术和应用中占有十分重要的地位,是声发射技术及应用的首要环节。基于声发射信号的随机性和频带宽的特点,要想在声发射信号中提取有用信息,离不开高可靠性、高质量的声发射传感器。

工程应用表明:声发射信号的频率成分取决于材料性质和构件的具体特性,考虑到低频机械噪声干扰及高频波传播过程中的衰减,声发射传感器的使用频带宽度为 20kHz~2MHz,压力容器检测的使用频带宽度为 100~300kHz。

传感器灵敏度和工作带宽往往是矛盾的两个方面,即灵敏度高,工作带宽相对较窄。选取传感器时,应根据被测对象、信号的强弱和频率高低并兼顾传感器的灵敏度和工作频率范围。

2. 中间处理环节

中间处理环节包括信号的前置放大、调制、放大、滤波、积分、微分和 A/D 转换等,将传感器输出的电信号转换成有适度信噪比、具有一定幅值的电压或数字信号,以便于观察、记录和分析。以工程中常用的压电式声发射传感器为例,其输出为电荷量,功率小、内阻高、不容易读出,需要采用中间处理电路将传感器的高内阻转换为低输出阻抗,以便对信号进行放大。由于电荷信号不易放大,需要将电荷信号转换为电压信号,便于后续电路处理,以提高抗干扰能力。因此,中间处理环节是声发射检测系统不可或缺的重要组成部分。

3. 记录、分析与处理

现代声发射检测系统的记录、分析与处理多采用数字方式,如业界广泛采用的美国物理声学公司(PAC)的系统以及德国 Vallen 公司 AMSY 的超高速、全数字、全波形、强干扰声发射采集系统,都可以实时、全数字、多通道同时采集声发射参数和波形,既可在检测进程中实时对数据进行分析,也可在事后对记录数据进行处理,不仅适用于现场测试,也适用于实验室研究。系统可实时显示各类型图表,如定位图、历程图、关系图、分布图、三维图、波形图、频谱图及数据列表功能,对采集到的声发射信号进行频谱分析、统计分析、定位计算、堆积计算、信号模式自动识别以及小波分析等,从传感器采集的信号中滤除各种干扰,以获取构件的声发射信号。

PAC 是专业从事声发射检测技术研究的公司之一,其研制生产的多通道声发射系统,采用基于现代计算机软硬件平台的计算机一体化的 PCI 总线结构,吸取融合了 FPGA-DSP(可编程门阵列-数字信号处理器)技术,其核心部件是数字化的声发射卡。声发射卡以 32 位 DSP 为基础,可对所有通道声发射信号进行实时波形分析及处理,包括声发射采集、外参量(温度、压力等)输入采集及分析、数字滤波、声发射特征提取、报警输出、各种定位功能、多参数分析、相关分析、聚类分析、波形滤波及相关分析、图形滤波、快速傅里叶变换(FFT)分析、HiT 数据线形显示、统计及重放功能等。

4. 声耦合剂

由图 1.1 可以看出,声发射技术的首要环节是用传感器准确获取声发射源的声发射信号。声发射是弹性机械波,传感器与构件待测表面是否具有良好的声耦合,是准确获取声发射信号的首要环节。为此,在工程应用中需要在传感器与构件表面之间填充声耦合剂,这是声音的传播特性所决定的。

填充耦合剂的目的是在试件与传感器之间构建一个良好的声波传播路径,用耦合剂填充试件表面与传感器接触面之间的微小空隙,以免这些微小空隙内微量空气影响声波的穿透能力,减小声阻。另外,耦合剂具有过渡作用,可减小传感器与待测构件表面之间的声阻抗差,减小声发射波在该接触面的能量损失。再者,耦合剂的润滑作用可减小传感器表面与构件表面之间的摩擦。

研究表明,在一些应用中正确选择和使用耦合剂,比不采用耦合剂传感器的输出高许多。

耦合剂和试件表面材料之间应有严格的化学兼容性,即耦合剂不得浸入试件材料表面,以免腐蚀或损伤试件及传感器表面。从原理上讲,所有液体如油、水、甘油等均可用来做耦合剂,但由于大部分液体不能传递剪切力,工程中常用环氧树脂、真空脂、凡士林、黄油和快干胶等做耦合剂。安装传感器时,几牛顿的吸力可使耦合剂的厚度最小化。

耦合剂的声学性能好坏对获取的声发射质量影响很大。劣质耦合剂不仅不能改善和保证传感器与被测构件表面的耦合质量,反而可能使声发射源的声波能量损失,降低分辨率。这就要求:

- (1) 耦合剂声阻抗与传感器和被测构件待测面材料之间匹配良好。
- (2) 耦合剂透声性好,耦合剂材料的声衰减系数小。

耦合剂的物理性能对声发射波的采集也有较大影响。为减小声波能量在采集初始阶段的损失,要求耦合剂均匀、不含颗粒或杂质、不含气泡,因为声波通过空气传播时,空气时而变疏,时而变密,可使传感器采集的声波产生失真。

耦合剂应具有一定的黏滞性,不易流淌,且易挤出,不变色,稠度不易改变,不

析出,不变质,以保证在测试过程中采集声发射信号的稳定性,因为耦合剂黏度和稠度的变化将改变声发射弹性波的传播历程,从而使信号产生失真。

1.3 金属材料的声发射机理

金属材料的声发射是材料变形时材料内部局部快速释放能量形成弹性波的一种现象,该定义包含波产生的过程和波自身。金属材料的声发射源很多,如裂纹扩展、移位、滑移、孪晶、晶界滑移和断裂脱附,而合成材料的声发射源分为模型裂纹、纤维剥离和断裂等。

声发射是由材料内部局部的机械不稳定造成的。负载作用下的构件在正常情况下处于弹性平衡状态,一旦构件内部远离负载作用位置的某点出现一个小裂纹,裂纹的表面将以应力释放的方式移动,同时,也释放部分构件内部储存的弹性能。理解声发射的微观起源有助于声发射检测工作者决定产生声发射的可能性,并以此去检测各种潜在的感兴趣的声发射参数以便区别它们。这些都涉及材料力学和机械工程材料学等诸方面的知识。

1.3.1 金属材料的晶体结构

金属材料的性能与其内部的原子排列——晶体结构密切相关,金属在加工和工程结构使用过程中的诸多变化都与晶体结构有关。

1. 晶体与非晶体

固态材料按原子的聚集状态分为晶体和非晶体两大类。晶体材料如铁、钢、铜、铅等金属和金刚石,非晶体材料如塑料、橡胶和玻璃等。晶体与非晶体的本质区别在于:晶体材料内部的原子按一定规则排列,非晶体材料内部的原子为非规则排列。

由于晶体与非晶体内部原子排列的规则不同,其性能差异很大。晶体在不同方向上常表现出不同的物理、化学和力学性能,即具有各向异性的特征,而非晶体则为各向同性。

晶体中的原子按一定规律在空间有规则地排列在一起,称为晶格,如图 1.2 所示。

工程中为便于分析晶格中原子排列的规律,常以通过各原子中心的假想直线将其在三维空间的几何排列形式描绘出来,形成如图 1.2 所示的三维空间格架,并称为晶格。晶格的节点代表原子中心的位置,基于晶体中原子排列的规律性,人们从晶格中取出一个能完全代表晶格结构特征的最基本几何单元,称为晶胞。

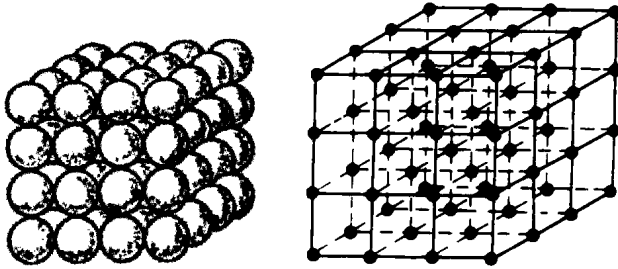


图 1.2 晶体、晶格示意图

2. 金属材料的晶格结构

金属材料中的晶体结构常见有三种形式:体心立方、面心立方和密排六方。其中,体心立方和面心立方为立方晶体,而密排六方属于六方晶系。

1) 体心立方晶格

图 1.3 为体心立方晶格示意图。从该图可以看出,体心立方晶格是由 8 个原子构成的立方体,其体心位置有一个原子;晶胞中每个顶点上的原子同时属于周围 8 个晶胞所共有;体心立方晶胞沿体对角线方向上的原子彼此紧密排列。铁、铬、钼、钛、锡和铁素体等均具有体心立方晶格。

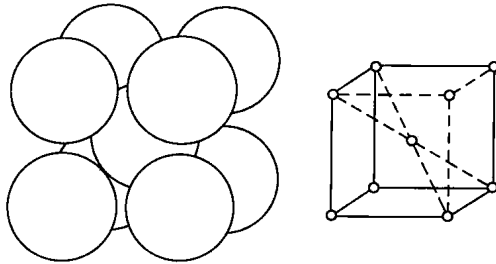


图 1.3 体心立方晶格

2) 面心立方晶格

图 1.4 为面心立方晶格示意图。属于这种结构的金属有铝、铜、铅、镁、银、镍、奥氏体和不锈钢等。由该图可以看出,面心立方晶格也是由 8 个原子构成的立方体,每个立方体的各个面心位置各有一个原子,每个面上沿对角线方向的原子紧密排列。

3) 封闭致密六边形晶格

图 1.5 为封闭致密六边形晶格结构示意图。锌、锰和铅等金属的晶格结构属于这种类型。封闭致密六边形晶格是由 6 个原子构成六方棱柱体,上、下两个底面的中心各有一个原子,上、下底面之间有 3 个原子。

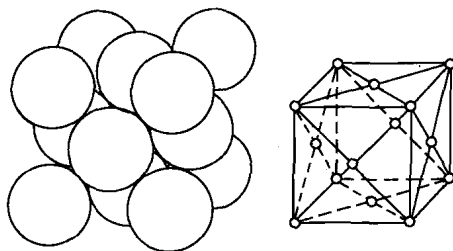


图 1.4 面心立方晶格

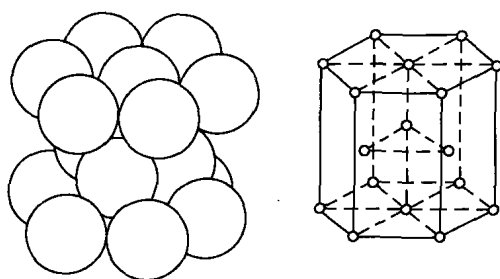


图 1.5 封闭致密六边形晶格

晶体结构不同,晶体中的原子排列紧密程度也不同,通常用致密度来表示晶体中原子排列的紧密程度。金属常见的三种晶体结构中原子排列最致密的是面心立方和封闭致密六边形,其次是体心立方。由于原子排列的紧密程度不同,比容不同,即单位质量物质所占体积不同。金属的晶格类型发生转变时,会带来体积的膨胀或收缩,当体积变化受到约束时,金属材料内部将产生内应力,使构件产生变形或裂缝,甚至断裂,产生弹性源。

晶体学中,通过晶体中原子中心的平面称为晶面。由图 1.3~图 1.5 的三种金属晶格结构示意图可以看出,各类型晶格结构的各晶面上原子排列的规律不同,同一种结构其各晶面上原子数目和原子排列规律也不同。由于晶体中不同晶面和晶向上的原子密度不同,原子间的结合力也有差异,因而晶体在不同方向上的性能也不同,晶体学上称为晶体的各向异性。晶体的各向异性使其在力学性能、物理性能和化学性能上与非晶体有重要的区别。

3. 金属材料的晶体缺陷

晶体学中将晶体内部原子都按同一规律、同一位向排列的晶体称为单晶体。工程应用的晶体材料,单晶体金属材料极为少见。机械设备构件的金属材料绝大多数为由许多不同单晶体所组成的多晶体,即工程用金属材料由许多不规则的颗粒小晶体所组成,如图 1.6 所示。每个小晶体称为一个晶粒,每个晶粒内部的晶格

位向均匀一致,而相邻晶粒的位向有一定的差异。晶粒之间的界面称为晶界,其原子排列不规则,是不同位向晶粒之间的过渡区。

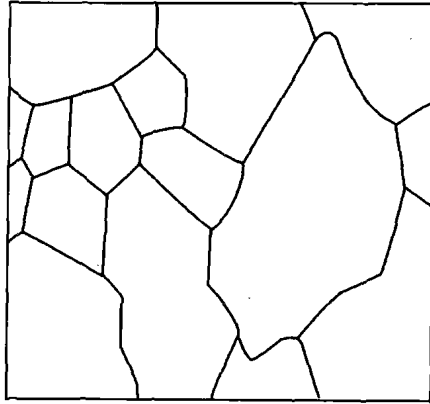


图 1.6 多晶体示意图

金属材料中的晶粒很小,肉眼看不到。例如,钢铁材料其晶粒直径一般为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{mm}$,如此小的尺寸只有在显微镜下才能观察到。在显微镜下观察到的晶粒大小、形态及其分布称为显微组织。

金属材料中的每个晶粒相当于一个晶体,具有各向异性。整个晶体各方向上的性能是大量位向各不相同的晶粒性能的均值,因此,整块金属在各个方向上的性能也均匀一致。实际上,受各种因素的影响,晶体的原子排列并非理想中那样规则和完整,总会存在一些不完整的、原子排列偏离理想状态的区域,这些区域称为晶体缺陷。依晶体缺陷的几何形态分类,可分为点缺陷、位错和面缺陷。

1) 点缺陷

点缺陷是三维尺度上不超过几个原子直径的微小缺陷,如图 1.7 所示。晶体中的点缺陷影响周围原子的正常排列,造成晶格的局部弹性畸变。晶格畸变不仅影响材料的强度等力学性能,还影响材料的电性能,如电阻率等,同时对扩散过程和相变过程也有较大影响。

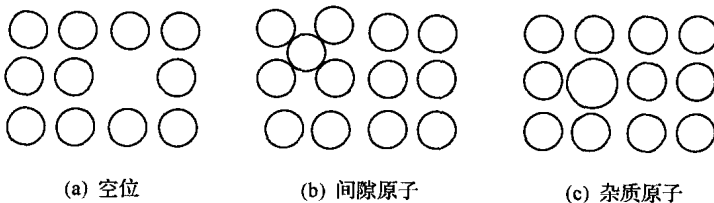


图 1.7 晶格点缺陷示意图