

新世纪理工系列

材料强度学基础



新世纪理工系列

材料强度学基础

主编 马有理 林 晶 刘二宝

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是编者根据多年的教学实践经验,结合当前材料强度学的发展情况,汇集了多方面的有关资料编写而成。全书共分11章,内容包括金属材料的内部结构和通性、材料强度基础、韧性脆性断裂的转变、拉伸强度、断裂力学基础、疲劳强度、材料的高温强度、腐蚀强度、高分子材料、复合材料。

本书较为系统地、科学地阐述了材料强度学方面的基础知识,可作为机械专业及材料专业的研究生、本科生和高职学生的专业教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料强度学基础/马有理,林晶,刘二宝主编. — 哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2008.6
ISBN 978-7-81133-261-2

I. 材… II. ①马…②林…③刘… III. 材料强度-强度
理论 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 079232 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 12
字 数 246 千字
版 次 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 23.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

材料强度学对于我们所处的现代社会而言,或者是对于未来的高技术化的社会而言,是一个基础性的但却是不可或缺的学科。无论是航天技术的开发,各种飞行器的研制,机动车辆和船舶的高性能化、高技术化,还是超高层建筑、大型桥梁的建设,或者是石油化工、原子能发电等都离不开材料科学作为支撑。

不论是对于一名工科专业的大学生,还是研究生,在学习过程中清楚地掌握有关材料强度学方面的基本知识都是必需的。另外,对于那些从事有关研究的专业技术人员,也希望有一种适合于他们的专业书籍。但是对于他们来讲,首要的问题是能找到一种比较适合于他们的知识水平的教材,这在目前也並不是一件容易的事情。到目前为止,有关方面的内容的论述都是较早年代出版的国外的翻译作品,而且这方面的内容一般都包含在理论程度比较深的断裂力学的著作中,这给初学者带来了很大的不便。因此,本书就是在这样的一种背景下,应运这种局势的需求而完成的。

本书从内容上共分 11 章。第 1 章绪论,介绍材料强度学的发展规律、历史和材料强度学在实际的机械结构设计中的重要地位;第 2 章金属材料的内部结构和通性,概括地叙述金属材料的内部构造、内部缺陷和它们对材料的强度性能产生的影响;第 3 章材料强度基础,阐述了材料的变形与断裂的一些基本知识,并从微观结构上对其进行解释和说明。第 4 章韧性与脆性断裂的转变,比较详细地讨论了影响材料的韧性断裂与脆性断裂之间转变的因素;第 5 章拉伸强度,拉伸强度是材料的最基本的强度特性,本章不仅对不同材料的拉伸特性进行了介绍,同时对材料在拉伸过程中所表现出来的一些性能进行了说明和解释;第 6 章断裂力学基础,在本章中介绍了著名的 Griffith 理论,这是作为材料强度方面的研究人员所必须知道和了解的,另外也对有关线性断裂力学的最基本的公式作了介绍;第 7 章材料的疲劳强度,在这一章中具体地涉及到了材料的破坏问题,讨论了裂纹的形成和扩展过程和影响材料疲劳强度的各种因素等;第 8 章材料的高温强度,毫无疑问,温度变化将引起材料的强度变化,在本章中讨论了温度对材料强度的具体影响、蠕变裂纹的形成、影响蠕变的因素等;第 9 章腐蚀强度,涉及到了腐蚀断裂破坏、影响腐蚀断裂破坏的因素及其预防措施等;第 10 章高分子材料的强度,介绍了高分子材料的内部结构、高分子材料的疲劳破坏的形式等;第 11 章复合材料的强度,分析讨论了复合材料的抗疲劳特性和复合材料在疲劳环境中的具体应用等。

作为一本初级的入门教材和参考书,本书重点阐述材料强度的基本理论和基本知识。本书的编写过程中,为了方便初学者阅读和使用,力求做到深入浅出。内容的编排上,在不影响读者阅读和理解的前提下,尽量不使用比较繁杂的理论公式。这样做的目的是为读者提供一

种有关材料强度方面学习的捷径。

本书的前言部分及第 1 章到第 7 章由马有理博士编写;第 8 章和第 9 章由林晶博士编写;第 10 章和第 11 章由刘二宝博士编写。

由于作者水平有限,书中的不妥之处在所难免,敬请广大读者给予指正。

作 者

2008 年 5 月于哈尔滨

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 材料强度学的发展史	1
1.2 现代机构设计的发展趋势	2
1.3 材料强度学的研究内容	4
第2章 金属材料的内部结构和通性	6
2.1 金属的结晶构造	6
2.2 金属的理论强度	9
2.3 晶格中的位错现象	15
2.4 位错移动的阻力	22
2.5 材料塑性与位错增殖	24
第3章 材料强度基础	27
3.1 材料的塑性特征	27
3.2 变形与断裂	29
3.3 断裂的特征	38
第4章 韧性与脆性断裂的转变	41
4.1 缺口的强化	41
4.2 夏比(Charpy)冲击实验	43
4.3 影响韧性-脆性转变温度的因素	46
4.4 韧性-脆性转变的模型	52
第5章 拉伸强度	54
5.1 材料的拉伸强度	54
5.2 塑性材料的屈服点	58
5.3 加工硬化	60
5.4 Seeger 的加工硬化理论	63
第6章 断裂力学基础	66
6.1 材料的断裂及分类	66
6.2 Griffith 强度理论	68
6.3 能量释放率	72
6.4 线性断裂力学	74
第7章 疲劳强度	81
7.1 概述	81

7.2 疲劳裂纹的形成及扩展	81
7.3 疲劳破坏的 $S-N$ 曲线	83
7.4 不连续材料的疲劳强度	85
7.5 影响疲劳强度的因素	87
7.6 低循环疲劳破坏	90
7.7 组合应力作用下的疲劳极限	92
7.8 裂纹的扩展	93
第8章 材料的高温强度	97
8.1 温度和应变速率对材料强度的影响	97
8.2 固体材料的蠕变	99
8.3 蠕变变形	101
8.4 蠕变综述	104
8.5 蠕变破坏	105
8.6 蠕变裂纹的形成	110
8.7 缺口对蠕变强度的影响	112
8.8 高温蠕变、疲劳及环境间的关系	113
8.9 高温低循环疲劳	114
8.10 热疲劳	119
8.11 超塑性	121
8.12 蠕变变形机制图	125
8.13 高温抗蠕变材料	126
第9章 腐蚀强度	127
9.1 腐蚀强度的定义与特征	127
9.2 应力腐蚀断裂	129
9.3 腐蚀疲劳断裂	142
第10章 高分子材料	151
10.1 高分子材料简介	151
10.2 高分子材料的分类	153
10.3 高分子材料的结构形态	155
10.4 高分子材料的强度	157
第11章 复合材料	163
11.1 复合材料简介	163
11.2 复合效应	168
11.3 复合材料的强度	169
11.4 影响复合材料强度的主要因素	182
参考文献	185

第 1 章 绪 论

1.1 材料强度学的发展史

尽管随着材料力学的不断发展,在 15 世纪末的文艺复兴时代人们就已经对材料强度学的概念有了初步的认识,但是对它的真正的实质性的研究却是在 18 世纪以后才开始的。而今天的材料强度学,是经历了各个学科的分化和统一的历程后,于 20 世纪 40 年代才逐步形成的。从材料强度学发展初期到该学科的真正形成,大约经历了如下的几个阶段。

(1)18 世纪 以法国为中心进行的固体力学的研究与应用,在此基础上人们提出了破坏抵抗力的概念。当时人们为了解决各种各样的弹性固体力学的具体问题,提出了很多假说和各种研究方法。在那时就开始对应力与应变之间的关系有了初步的了解,为今天的材料强度学中起主导作用的弹性力学做准备的同时,提出了材料的破坏抵抗力的概念。应力的概念是开始于 Leonhard Euler(1707—1783),根据牛顿的质点力学的原理,最后由 Augustin-Louis Cauchy (1789—1857) 在 1822 年以欧勒—柯希应力原理的形式确定下来。

(2)19 世纪 在 19 世纪上半叶为了适应社会发展和技术进步的要求,发现了新的现象和形成了新的理论。在此期间由于铁路技术的迅速发展对金属材料强度的研究产生了很大的冲击。自从进入产业革命时期^①以来,通过科学与技术的相互作用使得科学本身进入了一个崭新的时代。另外,在社会发展的带动下有很多新的现象被发现,例如钢铁材料的蠕变现象^②及疲劳极限^③等,此后以英国为中心开始了新材料的强度实验法及与钢铁桥梁建设有关的结构强度实验法的研究。

19 世纪下半叶自然科学领域的力学、电磁学及热力学——三大古典力学相继完成,它们的出现为面向 20 世纪的科学发现创造了契机。近代实验方法的确立也为新的现象的发现作出了巨大的贡献,比如 1863 年光学显微镜第一次被用来研究金属,从而导致了“金相学”的出现,使人们对金属材料的观察向前迈进了一大步,继而进入了微观领域。

(3)20 世纪上半叶 在 1900~1940 年间,人们在对金属材料的破坏及塑性研究的同时,提出了金属内部晶格位错的概念。由于 20 世纪初金属显微镜以及 X 射线等被应用于金属材料强度及破坏的研究,金属材料内部组织的观测和实验技术又取得了新的进展,金属材料强度的

① 产业时期:1750—1850 年

② 蠕变现象:1834 年被发现

③ 疲劳极限:1870 年被发现

研究又进入了一个新的时代。比如,1912年发现了X射线照射晶体时的衍射现象,从而开始了晶体微观结构的测定;1932年电子显微镜的发明以及后来出现的各种仪器把人们对微观世界的认识带入了更深的层次,借助于透射电镜可以观察到塑性变形金属中的位错运动,晶格相及原子相等。一些与材料相关的基础科学的进步也大大地推动了材料强度学的发展。

在固体物理学及量子力学等学科迅速发展的带动下,材料强度学作为现代科学的一个重要领域基本上正式形成了。材料强度学可以说是各相关学科彼此相结合,及各相关领域的研究者相互协调和努力的结果。从材料强度学的形成可以看出它与以下各个领域的发展都具有一定的联系。

人们对材料强度及疲劳破坏进行的研究,是随着生产实际的需要而逐步发展起来的。这其中包括:金属材料疲劳特性的微观研究,疲劳破坏的准确率及统计性质的研究;对以上的两个方面提供理论支持的疲劳理论或者被称为疲劳假说的研究;材料中存在的各种切孔对疲劳破坏的影响的研究等。19世纪被称为蒸汽机时代,而20世纪被称为石油时代,人类社会逐渐跨入了利用原子能的时代。因此,为了适应高温高压下所使用的机械设备的安全可靠性能的要求,展开了材料的蠕变性能,高温疲劳特性等各种各样的关于材料高温强度的研究。与此同时,拉伸应力与环境腐蚀同时作用下所引起的金属应力腐蚀破坏,氢脆化等的研究也逐渐地受到人们的重视。

第二次世界大战以后,根据生产发展的实际需求,开发出了高强度材料及超高强度的材料,并且它们在各种各样的实际机械设备中得到了应用。与那些强度较低的材料相比,像这样的高强度的材料内部一旦产生了裂纹,在极低的应力水平下都有可能导致破坏。另外,随着机械设备结构的大型化及焊接等因素的影响,结构材料中存在裂纹的可能性增大。使用超高强度的金属材料制作的压力容器,曾经有过在水压实验时当拉伸应力仅为材料强度的 $1/20 \sim 1/10$ 左右时,容器就发生了破坏的实例。因此,在这样的背景下以美国为中心从20世纪40年代开始,展开了材料强度学方面的全面研究。

1.2 现代机构设计的发展趋势

每一项具体的机构设计都会涉及广泛的学科领域,如材料强度学,工程力学和数学等。近代的机械结构设计发展很快,通过概率论和数理统计的方法进行的可靠性设计,可以定量估计机械结构失效的期限。利用失效概率这一概念可定量地评估构件的安全性能。借助于弹性力学及塑性力学研究材料内部各种裂纹的发生及发展规律的工程断裂力学,为定量地进行防止断裂设计和预测带有裂纹的机械零部件的寿命提供了可能。以往的传统结构设计,是以材料无裂纹作为前提而进行的强度计算,从而确定其安全使用寿命。而根据工程断裂力学并以疲劳裂纹的扩展规律为依据进行的疲劳设计,充分地考虑了实际的机械结构中可能存在的裂纹的影响,因而越来越多地受到了人们的重视,而且也取得了比较好的预期的安全效果。

为了提高机械产品的设计质量,准确地预测其寿命和安全可靠性,在进行机械结构设计时有必要建立起材料的微观组织及缺陷(包括裂纹,杂质,表面损伤等)和材料宏观性能之间的定量关系,并将其直接应用于机械设计的过程中。不同的金属材料或者即使是同一种材料但经过不同的工艺处理(如热处理)后,其内部的晶相结构及宏观的机械性能可能差别也很大,从而表现出不同的失效形式。断裂破坏是金属材料的主要的失效形式之一,材料的断裂是由于自身的结构缺陷(如工艺的开孔或开槽)或内部缺陷(铸造或焊接气孔)而引起的。在材料强度学上用断裂韧性——应力强度因子 K_{Ic} 来表达材料抵抗断裂的能力,从本质上讲,它是一个材料抵抗裂纹扩展的物理量。某些韧性比较好的金属材料,即使发现了材料内部存在裂纹,仍能够在一定的载荷下运行比较长的时间而不致于引起断裂;但其他的强度比较高的金属材料(如高强度钢)或者非金属材料(如陶瓷),材料中出现的微小裂纹也可能在低于材料的屈服极限应力的作用下,裂纹迅速扩展而导致材料的破坏。一般来讲,随着金属材料强度的提高,其断裂韧性要下降,两者之间的关系如图 1-1 所示。因此,在对高强度金属材料的机械零部件进行设计时,如果只考虑材料的强度计算公式 $[\sigma] = \sigma_s / n$ (σ_s 为材料的屈服强度; n 为安全系数),而忽略了材料的韧性降低所带来的影响,即使是在应力低于其屈服极限的情况下,机械零部件也有可能在其运行过程中发生突然的断裂破坏。值得注意的是,将安全系数定得越大,则为了得到相同的许用应力时,就应该选取强度越高的材料,导致材料的韧性降低。所以在对机械零件进行强度设计时,既要考虑到材料的强度,又要考虑到材料的韧性的影响,即在设计时应该同时进行以下两个方面的验算

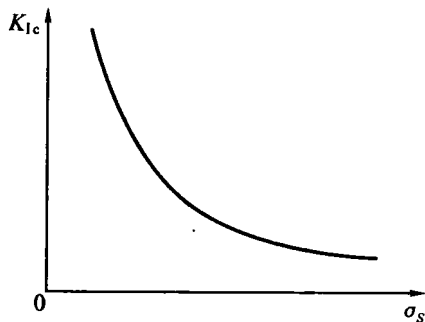


图 1-1 材料的强度和韧性的关系

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

$$K_I = [K_{Ic}] = K_{Ic} / n_k \quad (1-2)$$

式中 σ ——应力;

$[\sigma]$ ——许用应力;

K_I ——应力强度因子;

$[K_{Ic}]$ ——许用应力强度因子;

n_k ——安全系数。

固体火箭发动机的燃烧室的设计就是一个很好的例子。工作时燃烧室的工作温度会高达 3 500 K,其最高工作压力可达 10.5 MPa。因此,为了满足燃烧室的工作状况的要求,燃烧室的壳体材料应该同时具有高强度、高韧性等优良的高温机械性能以及良好的机械加工工艺性能。

但是在火箭设计的初期,人们对金属材料的断裂破坏还没有足够的认识,认为结构材料为无缺陷(无裂纹)的均一弹性体,从而按照古典材料力学公式进行结构设计和强度计算。在当时出于安全可靠和尽量减轻机体的结构重量的考虑,其工作应力定为 $\sigma = 1\,200\text{ MPa}$,材料的安全系数为 1.5,因而选用屈服强度高达 $\sigma_s = 1\,800\text{ MPa}$ 的不锈钢材料(37CrMnSiMoVA)。但是按照这样的强度设计制作的燃烧室,在进行压力试验时,壳体在远低于设定的工作应力的情况下发生了断裂破坏。按照古典力学的强度理论,应将安全系数取得更大。但是加大安全系数后的实验表明,断裂破坏时的应力反而更低。这是传统的设计理论所无法解释的现象。

后来,随着人们对断裂力学这门新兴学科认识的不断深入,经过对火箭发动机燃烧室壳体的失效分析与研究发现,壳体的断裂破坏是由于焊缝中存在的微小裂纹而引起的。当一般平板表面存在椭圆形裂纹时,根据断裂力学的知识,其前沿端部的应力强度因子 K_I 可按下式计算

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \quad (1-3)$$

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \quad (1-4)$$

式中, a 和 c 分别为椭圆形裂纹的短半轴和长半轴的长度。在此假定 $a = 1.5\text{ mm}$, $a/c = 0.5$, 则当工作压力 $\sigma = 1\,200\text{ MPa}$ 时,燃烧室壳体材料的应力强度因子 K_I 应该为 $215\text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$ 。如果材料的安全系数为 1.5,而选用屈服强度高达 $\sigma_s = 1\,800\text{ MPa}$ 的材料时,使其断裂韧性达到 $215\text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$ 是很困难的。根据图 1-1,如果继续提高材料的强度,其抵抗断裂的性能将更差。

由于依靠古典材料力学无法解决上述断裂破坏的问题,人们总结出了以断裂力学理论为基础,兼顾强度设计的新的设计方法。对于像火箭导弹等这样的一次性使用的机械零部件,如果将材料的安全系数取为 1.1,则所需金属材料的屈服强度就可以降低到 $1\,300\text{ MPa}$ 。这种强度钢材的应力强度因子 K_I 应该可达到 $300\text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$ 左右,按(1-3)式可算出此时的最大允许工作应力可达到接近 $1\,700\text{ MPa}$ 。因此,可以完全避免低应力下断裂破坏的发生。

1.3 材料强度学的研究内容

随着科学技术及生产力的迅速发展,材料强度学(Strength and Fracture of Material)的重要性已经逐渐被人们认识和接受。所谓的材料强度学是指固体材料在受到外力时产生变形或者是破坏,研究在此过程中的材料的力学行为(Mechanical Behavior of Material)的一门科学。广义而言,这里所说的材料(Material)既包含了一般意义上的工程材料,如金属材料、水泥、玻璃等,又包含了如木材、土壤及岩石等这样一些自然界所存在的固体物质。

金属材料不仅来源丰富,而且具有优良的使用性能和良好的机械加工性能,因此,金属材

料在国民经济各部门和人民的日常生活中都占有相当重要的地位。不论是在民用工业,如农业机械、机械制造、仪器仪表、电器制品、化工设备等;还是在国防工业,如坦克、枪炮、军舰、导弹、飞机、核动力装置、火箭、宇宙飞船等常规或者是尖端武器方面,均需要大量的金属材料。所以本书主要就金属材料强度的知识加以介绍。

金属材料的强度与破坏问题,在微观上与固体物理学、金属晶间组织学及材料学等紧密相关;而在宏观上它又与材料力学、构造强度学,安全和可靠性等有着必然的联系。在此,除了了解以材料的原子或分子的性质为出发点的材料的微观构造和性质以外,最重要的问题是弄清楚材料的破坏与材料的微观结构之间有什么内在的联系。

本书主要讨论了金属材料强度学方面的基本问题,同时,为了使内容更系统和更完整,还介绍了一些与非金属材料强度相关的内容。

第 2 章 金属材料的内部结构和通性

对于日常生活中及工业上所使用的各种金属材料,其中都会包含有诸如杂质、气孔、裂纹及其他缺陷,这些缺陷对材料强度会产生极大的影响。为了更好地理解缺陷对材料强度的影响,本章从理想固体材料的内部微观结构及其性质入手,介绍金属材料强度的基本知识,为以后各章奠定基础。

2.1 金属的结晶构造

任何一种固态物质按其原子或分子的排列状态都可分为晶体与非晶体两大类。通常情况下固态金属都是晶体结构,为此,首先介绍一下有关晶体和非晶体的一些基本概念。

2.1.1 晶体与非晶体

随着 X 射线衍射方法的发展和应用,人们已经证明了晶体是由原子或分子在三维空间周期性规则排列而构成的。有些晶体具有规则的外形,而有些晶体的外形则不规则。非晶体材料(例如木材、玻璃等)的原子或分子在空间的排列则是不规则的。由于晶体的构造对材料的性能有很大的影响,所以人们对晶体结构进行了深入细致的探讨。到目前为止,不仅测定了各种晶体的原子排列,而且对非晶体内部的无规则排列也进行了研究,同时对晶态与非晶态的转化条件有了一定的认识。

晶体与非晶体的区别还表现在很多方面。从液态到非晶态固体的转变是逐渐过渡的,没有明显的凝固点(熔点);而液态转变为晶态固体则是突变的,有特定的凝固点(熔点)。金属材料及合金等大多是晶体材料。非晶体物质中的各个方向上的原子排列密度大致相同,沿任何方向的性能表现出一致的结果,称为各向同性;而晶体物质则不然,沿着一个晶体的不同方向所测得的性能并不相同,有着或大或小的差异,称为各向异性。但是从能量的角度来看,非晶态结构是不稳定的,在一定条件下可以转变为晶态。比如玻璃在高温下长时间加热后就能转化为晶体。

2.1.2 金属的结晶构造

很多矿物质如水晶石、方解石等,作为晶体物质其晶体有着规则的外部形状。如果将水晶石捣成小的碎块,尽管其整体外形发生了变化,但是每一块中组成晶体的原子仍然呈有序排

列,所以其结晶组织并没有发生变化。大多数的金属物质虽然也都是晶体组织,但是它们并没有像水晶、晶石等矿物质那样的规则的外形。

图2-1是用显微镜拍摄的普通碳素钢表面的照片。从照片可以看出它是由很多的多角形的部分所组成的。

像这样的普通的金属材料,是由很多的无规则外形的结晶体所组成。这种物质被称为多结晶体,或简称为多晶体。而其内部的每一个结晶体称为晶粒,晶粒与晶粒之间的界线称为晶界。

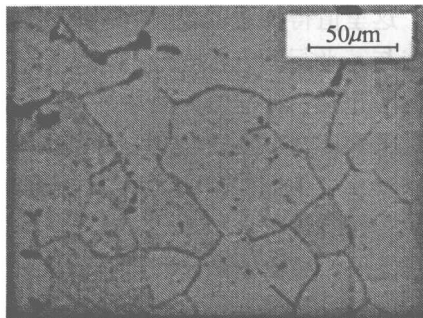


图2-1 碳素钢的显微镜组织

2.1.3 晶面与晶向

如上所述,对结晶体而言晶体内部的原子呈有序排列。这种原子的规则排列方式称为晶格。某种金属材料的晶格是该金属所独有的特征,所以不同的金属材料其晶格是有差异的。在结晶学中能够将完全反映晶格特性的最小的、最基本的几何单元称为晶胞。

在金属晶体中,通过一系列原子中心的平面称为晶面,通过两个以上原子中心的直线为原子列,各原子列的方向称为晶向。为了便于研究晶格中各晶面和晶向上原子排列的特点,有必要给予各种晶面和晶向以一定的符号,以表示它们在晶体中的位向。表示晶面的符号称为晶面指数;表示晶向的符号称为晶向指数。确定指数时,取晶胞的一个顶点为原点,晶胞的三个棱边为坐标轴,轴上的单位长度是晶格常数 a , b 和 c 。

1. 晶面指数

图2-2所示是以立方晶系为例确定对角面 $ABCD$ 面指数的示意图。确定晶面指数的具体方法和步骤如下。

(1)以晶胞的棱边长度(即晶格常数)为度量单位,求该晶面在各坐标轴上的截距。在此,设三轴上的截距分别为 A , B , C 。

(2)取各截距的倒数,按比例将三个倒数化为最小的简单整数,表示为 h , k 和 l 。

(3)将所得各整数依次连续写在圆括号内,如: (hkl) ,即为晶面指数。如果所求晶面在坐标轴上的截距为负值,则应该在相应的指数上方加“-”号,如: $(\bar{h}kl)$, $(h\bar{k}l)$, $(hkl\bar{l})$ 等。

按上述的步骤,坐标轴的原点应位于该待定面之外,以免出现0截距。在平面 $ABCD$ 中,

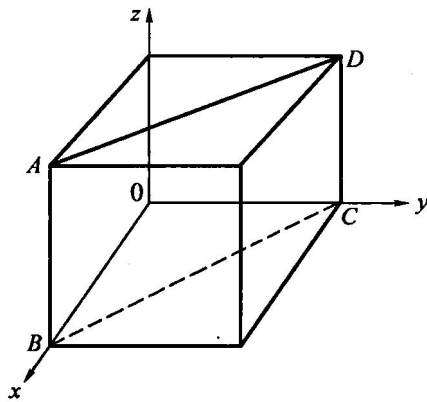


图2-2 晶面指数的确定

显然三轴上的截距分别为 $1, 1, \infty$, 取其倒数则为 $1, 1, 0$, 因此该面的截距为 (110) 。

这里值得注意的是, 晶面指数并非仅指某一晶格中的某一个晶面, 而是泛指该晶格中所有那些与其平行的方位相同的晶面。在同一种晶格中, 有些晶面虽然空间位向不同, 但其原子排列情况相同。如立方晶格中的 (100) 、 (010) 、 (001) 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 等, 这些晶面均属于一个晶面族, 通常可以把这些晶面统一用一种晶面指数 $\{100\}$ 来表示。也就是说, $\{hkl\}$ 不仅包括一系列互相平行的某组晶面, 而且还包括若干组空间位向不同但其原子排列情况相同的晶面。

2. 晶向指数

晶向指数确定的步骤如下:

(1) 通过坐标原点 O 作一直线使其平行于欲求晶向, 显然如果欲求晶向通过原点, 则没必要另外作出一条直线;

(2) 求出该直线上的任意一点在三个坐标轴 x, y, z 上的坐标值;

(3) 将投影值按比例化简为最小整数, 各轴的投影值分别用 u, v, w 表示, 并加一方括号, 一般情况下可表示为 $[uvw]$, 同族的晶向表示为 $\langle uvw \rangle$, 如果所求晶向在坐标轴上的截距为负值, 则应在相应的指数上方加“-”号, 如 $[\bar{u}vw]$ 、 $[u\bar{v}w]$ 等。

在此需要指出的是, 在立方晶系中同指数的晶面和晶向是互相垂直的, 即 $[100] \perp (100)$ 、 $[111] \perp (111)$ 、 $[110] \perp (110)$ 等。

2.1.4 原子间的作用力

从本质上来说, 金属材料的强度是由原子间的结合力所形成的。由于金属原子的基本特征是原子核对价电子没有强约束作用, 所以金属原子的结合是特殊的金属键结合。德鲁特和罗伦兹利用图 2-3 所示的模型来说明金属键结合的特性。金属晶体格子由正离子所构成, 带负电的电子云在正离子之间自由地运动。正离子与电子云之间的引力造成固体的结合力。

利用自由电子的结构图像能够满意地解释许多金属的物理性质。

因为价电子能自由地运动, 所以金属具有很高的导电性和导热性。因为自由电子吸收光能, 所以金属不透明。当自由电子吸收光能所激发的电子落回低能状态时, 又放出光能, 所以金属具有较高的反射能力。

金属中的原子不是与某几个特定的原子直接结合, 而是通过电子云把全部原子结合在一起。每一个原子所接触的原子数目受到空间的限制。金属晶体的最常见的结构是密排结构, 在这种密排结构中每个原子接触 12 个与其相临接的原子。虽然金属的每个原子中参与金属键结合的电子数较少, 两个单原子之间的键力较弱, 但是每个原子的相邻原子数目很多, 总的

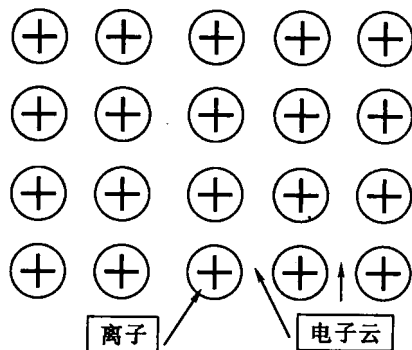


图 2-3 金属晶体的古典模型:
正离子被带负电的电子云所包围

键力较强,宏观上表现为金属材料具有较高的强度。

2.2 金属的理论强度

正如上面所叙述的那样,金属材料的内部晶相结构都是由晶体所组成,各原子之间由金属键相结合,形成有序的排列。概括来讲金属内部晶体的断裂破坏有如下两种基本形式。

(1)脆性断裂:晶体内部原子之间的金属键遭到破坏而导致的原子间相互分离,从而产生的脆性断裂。这种断裂形式一般是由于材料内部存在的微小裂纹在外力的作用下突然扩展所造成的。在金属这样的晶体材料及非晶体材料(如玻璃)中都可以观察到这种断裂形式。在晶体材料中,脆性断裂都沿着一定的晶体平面,这个晶体平面一般是晶体结构中原子排列密度较高的面。通常我们称这个晶面为解理面。

(2)剪切破坏:如果应力水平超过材料的弹性极限,某些晶面沿着作用力的方向产生相对滑移变形,这种变形是不可逆转的。当这种滑移变形达到某一极限值时,就会产生剪切破坏。

2.2.1 材料的理论临界拉伸强度

图2-4表示金属的晶体内部原子排列示意图,图中的圆圈代表原子的位置,粗实线表示假想的解理面的位置。图2-5是晶体在垂直于解理面的拉伸应力的作用下,晶体内沿着解理面的金属原子彼此分离,导致晶体断裂的示意图。达到使晶体断裂的正应力称为临界拉应力,也可称为解理强度。不难看出,临界拉应力是在解理面上的单位面积内破坏原子结合所需要的外力。下面介绍计算这种理论临界拉应力 σ_b 的方法。

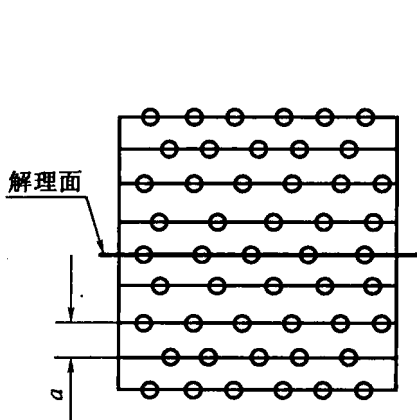


图2-4 晶体示意图

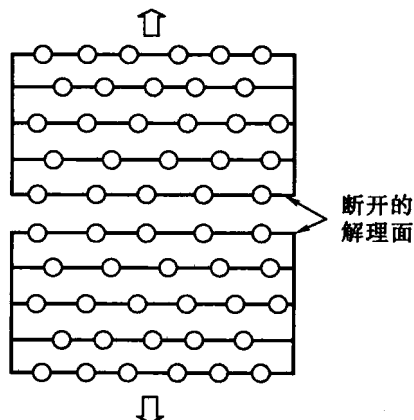


图2-5 应力作用下晶体断裂的示意图

纯脆性材料的应力-应变曲线如图 2-6 中的斜线所示。在晶体受到拉伸的过程中,处于解理面上的晶体内部的原子之间的距离被拉开,并在此过程中积蓄能量。对于完全脆性的金属材料,其晶体沿着解理面断裂前所储存的能量即为外力对它所做的功。该能量在晶体断裂时便成为断裂表面的能量。

现在假定试件的长度为 l ,横截面积为 A ,则其体积为 $V=A \times l$ 。当试件受到外力 P 的作用时,其应力应为 $\sigma=P/A$ 。试件被拉伸 dl 时所做的功 dW 可按式计算。

$$dW = Pdl = \sigma Adl = \sigma Vdl/l \quad (2-1)$$

将(2-1)式积分可得到对该试件所做的总功为

$$W = V \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (2-2)$$

式中, ϵ 为应变变量。

因此,对单位体积所做的功为

$$W/V = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (2-3)$$

(2-3)式所表示的物理意义为图 2-6 中阴影部分的面积。显然,该面积可以表示为 $\frac{1}{2}\epsilon\sigma$,所以(2-3)式可变为

$$W/V = \frac{1}{2}\epsilon\sigma \quad (2-4)$$

对于完全脆性的金属材料而言 $\epsilon = \sigma/E$ (此处的 E 为材料的弹性模量),将其代入(2-4)式可得

$$W/V = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2-5)$$

在此假定晶体中两相邻的原子面积为 1 个单位,如图 2-4 所示晶体内部的原子面之间的间距为 a ,则其所包围的体积为 $V=1 \times a$ 。将其代入(2-5)式可得

$$W = \frac{a\sigma^2}{2E} \quad (2-6)$$

该能量在晶体断裂后转变成上下两个断裂面的表面能。每一个表面的表面能如果都用 λ 表示的话,式(2-6)可以变为

$$2\lambda = \frac{a\sigma^2}{2E}$$

整理后可得

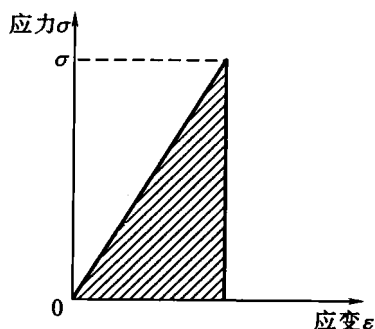


图 2-6 纯脆性材料的应力-应变曲线