

面向21世纪

# 工程材料及应用

主 编/周凤云  
副主编/杨可传

工程制图与机械基础系列教材

华中理工大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS  
E-mail: hustpp@wuhan.cngh.com

714-43  
Z73

工程制图与机械基础系列教材

# 工程材料及应用

主 编 周风云  
副主编 杨可传

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及应用/周凤云 主编 杨可传 副主编  
武汉:华中理工大学出版社, 1999年10月  
ISBN 7-5609-2012-8

I. 工…  
II. ①周… ②杨…  
III. 工程材料-应用  
IV. TH14

工程制图与机械基础系列教材  
工程材料及应用

主 编 周凤云  
副主编 杨可传

责任编辑:叶翠华

封面设计:潘 群

责任校对:熊九龄

监 印:熊庆瑜

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

录排:华中理工大学出版社照排室

印刷:武汉大学印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:17.25

字数:395 000

版次:1999年10月第1版

印次:1999年10月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5609-2012-8/TH·105

定价:19.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

# 前 言

本书是根据原国家教委 1996 年批准的“工程制图与机械基础面向 21 世纪课程体系及教学内容改革”重大课题要求而编写的系列书之一。

众所周知,材料、能源、信息是当今世界发展科技和生产力的三大支柱。而材料这一支柱又是社会经济的先导,因为任何产品的制造、任何工程的建设离开了材料基础是无法实现的,并且它们的使用寿命又与材料品质的优劣及设计选材是否得当息息相关。这就要求从事工程技术工作的人员必须加强对材料科学知识的掌握。此外,随着现代科学技术的迅速发展,材料的品种、类型与日俱增,在工程领域中,除采用金属材料外,非金属材料、复合材料的应用也日趋广泛。

基于上述原因,为了适应 21 世纪“知识经济”时代的需要与高等学校人才培养规格的需要,作者根据多年的教学实践,并参考了近年来国内外有关的教材及文献编写了这本书,以配合教学改革工作的进行。

本书的特点在于:

1. 对材料科学的基本理论(如原子结合键、晶体结构、晶体缺陷、凝固状态、相图及相变、热处理原理、塑性变形与强化等)作了必要且系统的阐述,确保了全书知识的深度。

2. 在阐述基本理论的基础上,全面分析了金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料的化学成分、组织结构、制备工艺、性能特点、应用状况及其相应新材料的发展,在拓宽知识广度的前提下,达到理论与实际有效地结合。

3. 通过列举多种机械产品实例来说明机械设计与用材的关系,为读者学会合理选材、正确制定材料加工工艺路线起到了强化训练的作用。

4. 除论及金属表面热处理外,本书第十三章还较全面地介绍了材料表面改性新技术与新方法及其相关的机理,弥补了同类书中所缺少的内容,反映了材料科学的新成就,符合当今工业生产之急需。

5. 全书文字简洁,通俗易懂,所用的 230 余幅插图清晰、准确,计量单位统一采用 SI 单位制表达。力求既使读者对当今工程材料知识有一个全面的认识,又不使之感到叙述抽象玄奥、烦琐枯燥。同时,每章之后还附有便于读者理解内容重点的思考与练习题,从而有助于教学过程的组织与实施。

本书共分 13 章,皆由华中理工大学教师编写。其中前言、绪论及第一、二、三、四、六、八、九、十、十一、十二章、附录由周风云编写,第五、七两章由姜德春编写,杨可传负责编写第十三章及第四、五、七、八章中部分内容的修定与审校。全书由周风云任主编,杨可传任副主编。

由于作者水平有限,加之编写时间仓促,书中的错误与疏漏在所难免,恳请同仁及读者批评指正。

编者

1999 年 3 月于武汉

## 绪 论

随着我国经济体制的改革,市场已深入到人们生活的各个领域之中,以至没有哪个人能离开市场而独立生活;没有哪个企业能离开市场而开展生产经营活动。市场经济成分的加大,导致企业与企业间的竞争,这是一种客观的必然。尽管社会主义市场经济的特点决定了这种竞争的实质是,保护先进,鞭策后进,以利社会生产的发展,然而企业要在竞争中取胜,必须按照消费者的需求生产出优质的产品。产品质量的好坏,首先又取决于选用的材料是否适合该产品的使用要求。一个真正具有独创性的产品设计,不考虑所用的材料是很难取得成功的。因此,对于每个设计人员来说,他会经常遇到选材的问题,小到剃须刀片,大到飞机、轮船、火车、汽车以及各种机械装置。这表明作为工程技术人员,必须具备材料的基本知识。

什么是材料呢?材料是人类赖以生存与发展、征服及改造自然的物质基础,是人类经济活动的基本组成部分。利用它,人们可以制造各种有用的器件。在人类社会漫长的发展过程中,材料一直被认为是历史进化的标志。每一种新材料的发现和应用都把人类改造自然的能力提高到一个新的水平,把人类文明带进一个新的阶段。在远古的原始人时代,人类采用石头、木头、兽的骨头等制造生产工具和生活用具,维持着最初期的生存。大约在六七千年前的原始社会末期,我们的祖先学会了用火烧制陶器,并在三千多年前的殷、周时期发明了釉陶,此后便发展为二千多年前东汉时期的瓷器,瓷器的出现打开了东、西方文化交流的渠道,带动了生产的进步。

人类在烧制陶器的过程中又发明了冶铜术。我国的冶铜术开始于公元前 2140 年,到了商、周时期青铜已普遍用于制作工具与祭器,如晚商遗址(河南安阳)出土的斚(qiāng,古代一种斧子)、铲、犁、铤(bēn)以及重达 875kg、外形尺寸为 113cm×78cm×110cm、四周刻有精美花纹的青铜器司母戊鼎都是最好的说明。尤其是从湖北随县出土的战国青铜编钟与新近在南京东郊发掘的六朝古墓群中的金、银、玉器与陶瓷,都充分显示了当时人类与自然界作斗争的能力及生产、文化水平。

冶铜技术的发展,不仅促进了奴隶制社会向封建社会的早期过渡,也为炼铁提供了必要的条件。我国是世界上最早进行生铁冶炼的国家,据文史资料记载,早在春秋战国时期,我国就广泛采用了铁制品,不仅在农业上有铁镰、铁铲、铁锹等工具,还有斧、锯、钻等木工用具。公元前 513 年的晋国还制作了刻有刑书的大铁鼎,现今河南南阳还发现了面积达 120000m<sup>2</sup>、残留熔炉 17 座的汉代冶铁遗址及大量的铁器。在炼铁的过程中,我国劳动人民还创造出三种炼钢的方法。自隋唐以后,钢铁用量就有了很大的上升,如公元 953 年,铸出重 50000kg 以上,高 5.3m、长 6.8m、宽 3m 的沧州大铁狮;元代铸出重达 8000kg 的大铁龟。我国古人最早掌握的先炼铁,后炼钢的冶金技术,对晚于我国 1600 多年后才起步的欧洲各国的钢铁生产有着极深远的影响。明代宋应星在广泛实践的基础上,对我国古代的科学技术,其中包括冶炼钢铁的技术进行了系统的总结,写出了著名的《天工开物》一书。由上可以看出,在材料制造与使用上,我国劳动人民谱写了光辉的篇章,为人类社会的发展作出了巨大的贡献。

进入 18 世纪后,钢铁工业得到了迅速的发展,并成为产业革命的重要内容与物质基础。到了 20 世纪,近代工业与冶金技术取得了很大的进步,钢铁材料的产量在世界范围内有了大幅

度的提高,且品种规格繁多。随着科学技术的突飞猛进,研究材料的方法也在不断深化,从1863年采用光学显微镜研究材料开始,相继出现了1921年的X射线晶体衍射技术,1932年的电子显微镜以及电子探针、离子探针、俄歇电子谱仪等现代仪器,使人们对材料及材料科学有了全新的认识,有力地推动了材料的研究。自本世纪50年代开始,高分子材料、先进陶瓷材料及复合材料的开发与应用显得十分活跃,继尼龙之后又研制了聚酯纤维、聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯等各种新型的工程塑料;在陶瓷材料方面,出现了从传统陶瓷向现代陶瓷的开发并形成产业的新趋势;以玻璃钢为代表的一系列复合材料也应运而生。当今国际社会公认,人类已进入“材料变革”的新时代,材料、能源与信息成为科技革新的三大支柱。

现代材料的品种繁多,据粗略的统计,世界各国已注册的材料达40多万种。在浩瀚的材料世界中,那些用于制作工程构件、机械装备、机械零件、工具及模具的材料归属于工程材料。对于这类材料,工程上要求有强度、硬度、韧性、塑性等力学性能,而那些要求具有光、声、电、磁、热等功能和效应的材料则为功能材料。工程材料中又包含着金属材料、高分子材料、陶瓷材料以及由它们组成的复合材料,其中传统的钢铁、有色金属材料一直是用量最多,使用范围最广的工程材料。仅就机械工业来说,各种机床、汽车、拖拉机、农业机械、矿山机械、冶金设备、发电设备、石油化工设备、交通运输设备以及军用器械等所用的材料中,金属材料约占90%以上。这是因为金属材料具有其它材料不可能完全取代的独特性能,如金属有比高分子材料高得多的弹性模量、有比陶瓷材料好得多的韧性以及磁性与导电性。必须指出的是,世界各工业发达国家还在不断开发新的金属材料,如高比强度与高比模量的铝锂合金、有序金属间化合物及机械合金化合金、氧化物弥散强化合金等高温结构材料,这些材料已经分别在航空航天、能源、机电等各领域获得了应用,并产生了很大的技术经济效益。有资料显示,到21世纪的早期,新金属材料将与高分子材料、陶瓷材料和复合材料共同发展而形成四分天下的基本格局。

通过《工程材料及应用》一书的学习,机械类与近机类各专业的学生可获得工程材料的有关理论知识及分析技能;了解材料的成分、加工工艺、组织结构与性能间的关系及变化规律;掌握常用工程材料的基本特性及应用范围;懂得材料的性能与工程设计的关系,以便能合理地选用材料、正确地制定材料加工程序,设计出既经久耐用,又成本低廉的优质产品。

# 第一章 材料的结合方式及性能

材料是制作有用器件的物质。作为物质体系的基本单元——原子、离子或分子等粒子,在构成物质的具体状态时,彼此之间会产生相互作用力,存在相互作用的势能;粒子本身又由于不停的热运动,还具有相应的动能。若粒子间的相互吸引力越大,则结合得越紧密;若粒子的热运动越剧烈,则彼此分离的趋势就越大。物质的状态就取决于粒子间的相互作用和它们的热运动。在一定的温度、压力等外界条件下,物质会处于气态,此时,粒子的动能大大超过粒子的势能;当温度和压力降低,粒子的热运动变慢,相互距离变近,其动能小于相互间作用的势能,物质就会由气态过渡到凝聚态。这时,如果粒子不能保持在较长距离内呈有序排列,但相互间的引力还能保证粒子承受热冲击而不分开,物质便呈液体状态;当粒子间的距离变得很近,相互作用的势能比粒子的动能大得多的时候,物质则处于固态。工程上常用的材料为固态。

## 第一节 固态原子的结合键

### 一、晶体与非晶体

固态物质按其原子(离子、分子)聚集的组态,可分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子可在三维空间呈有规则的周期性重复排列,且规则排列的距离大大超过原子尺度,贯穿晶体的整个体积,称为长程有序;而非晶体中的原子只能在几个原子尺度的小范围内作有规则的排列,称为短程有序。自然界有些晶体还具有规则的外形(如天然的金刚石、结晶盐、水晶等),但并不是所有的晶体都有规则的几何外形,不过它们都具有固定的熔点。而非晶体则没有固定的熔点。研究表明,晶体和非晶体在一定的条件下可以互相转化。如通常是晶体的金属,若将它从液态通过急冷(大约  $10^6\text{ }^\circ\text{C/s}$ ),便可使其具有类似玻璃的某些非晶态特征,称为“金属玻璃”;而非晶态的玻璃经高温长时间加热又可形成晶体玻璃。值得指出的是,广泛使用的工程材料多为晶体物质。

### 二、原子间的结合能

晶体中的原子之所以作长程有序的规则排列,与其原子间的相互作用有关。当两个原子接近时,原子核不发生变化,但是原子的外层电子会重新排布,或是失去电子(电离能低者),或是吸收电子(电负性高者),于是引起相互间的静电作用,即吸引作用与排斥作用。吸引力产生于异性电荷间的库仑引力,它随原子间距的缩小呈指数关系增大;排斥力产生于同性电荷之间的库仑斥力及电子云的重叠所引起的斥力,前者作用的距离范围比后者大得多。随着原子间距的缩小,斥力也呈增大的趋势。此外当两原子接近到一定程度时,由于体积的缩小,引起电子动能的增加,使斥力的增长速度大于引力。图 1-1 表达了原子间的吸引力( $f_{\text{吸}}$ )、排斥力( $f_{\text{斥}}$ )及它们的合力( $f_{\text{合}}$ )随两原子距离变化的情形。图中 A 点的合力为零,即原子间的距离为  $a_0$  时,吸引力与排斥力平衡。此时原子间相互作用的势能具有最低值  $E_0$ ,即原子间的结合能,如图 1-1 中的曲线( $E_{\text{合}}$ )所示, $a_0$  为平衡距离。当两原子间的距离小于  $a_0$  时,斥力大于引力,总的作用力为

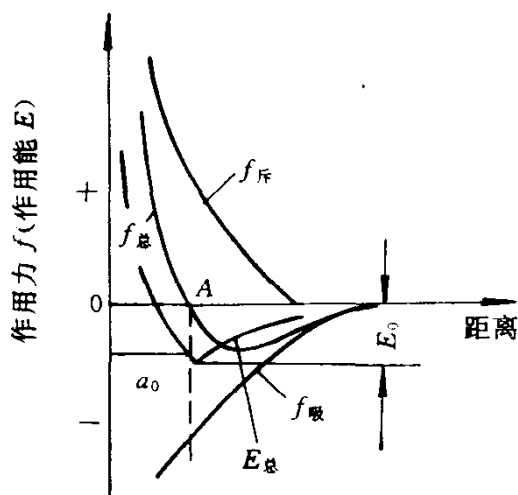


图 1-1 原子间的相互作用力(能)

斥力,使原子的间距趋于扩大;当两原子间的距离大于  $a_0$  时,引力大于斥力,使原子间距趋于变小。所以要将相距为平衡距离的两原子相互间拉开或压缩都需要做功,引起能量的升高。

上述两个原子的结合情况也可用以描述大量原子的聚集状态。它表明了对于大量原子的聚合体,只有当其原子间相距为平衡距离,并成为规则排列的晶体,处于最低能量状态时,才是最稳定的。晶体中,使原子稳定结合在一起的力叫作“结合键”。晶体结合键的强弱用其原子结合能来表征,即把 1mol 的固体分解为自由原子所需的能量 (kJ/mol)。原子的结合能愈大,则表示键的结合愈

强。不同类型的原子,它们之间形成的结合键性质不一样,结合能的大小也不相同。

### 三、原子结合键的类型

晶体的原子结合键有金属键、共价键、离子键、范德瓦尔键(分子键)等几种基本的类型。

#### (一)金属键

金属原子最外层价电子与原子核的联系微弱,在相邻原子核电场的作用下,原子很容易失去外层电子而成为正离子,而离开原子的外层电子则形成围绕离子的电子云,如图 1-2(a)所示。脱离原子的价电子,这时不再与某一特定的正离子相互吸引,而是在电子云中自由运动,成为与若干个正离子相吸引的电子。通过正离子与电子之间的相互吸引,使所有的离子结合在一起。这种结合力就是金属键。由于维持原子在一起的电子并不固定在一定的位置上,所以金属键是无方向性的。当金属发生弯曲等变形时,金属键方向也随之变动,金属原子便改变它们彼此之间的位置关系,并不使键破坏,如图 1-2(b)所示,因此,金属键使金属具有良好的塑性。在电压作用下,电子云中的价电子会发生运动,从而使金属具有良好的导电性。正离子在热的作用下,震动加剧并传递热量,故金属还有良好的导热性。

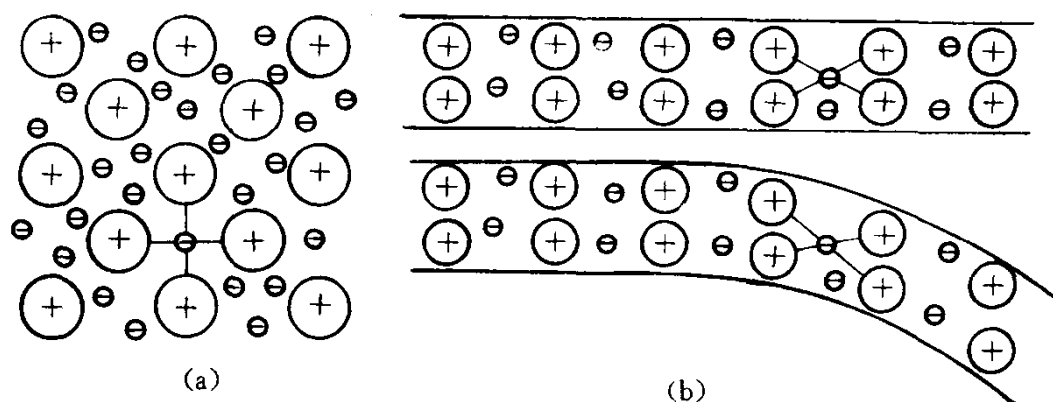


图 1-2 金属键

(a)金属原子正常堆积时的金属键及其电子云; (b)金属变形时的金属键(方向变化而未破坏)

#### (二)共价键

处在周期表中间位置的具有三、四、五个价电子的元素,它们获得和丢失电子的能力相近,

原子既可能获得电子变为负离子,也可能丢失电子变为正离子。当同种原子或相邻近的原子共同占有其部分价电子时,会使每个原子的最外层电子处于满壳层状态。被共用的价电子同时属于两相邻的原子,价电子就在这两个相邻原子核之间运动,形成一个负电荷较集中的地区,以致对带正电荷的原子核产生吸引力,将它们结合起来。这种由共用价电子对形成的结合键叫共价键。

以硅为例,一个 4 价的硅原子,与 4 个在它周围的硅原子共享最外层的电子,从而使每个硅原子最外层获得满壳层的 8 个电子,如图 1-3(b)所示。每一个共有电子代表 1 个共价键,所以 1 个硅原子有 4 个共价键与 4 个邻近的硅原子结合。为了形成硅的共价键,硅原子排列必须堆集成四面体,即 4 个硅原子构成 1 个四面体,另有 1 个硅原子处在四面体的中心,如图 1-4 所示。由此可见表征硅原子之间结合力的共价键之间形成一定的角度( $109^\circ$ ),称为键角。这表明共价键彼此之间有固定的方向关系。

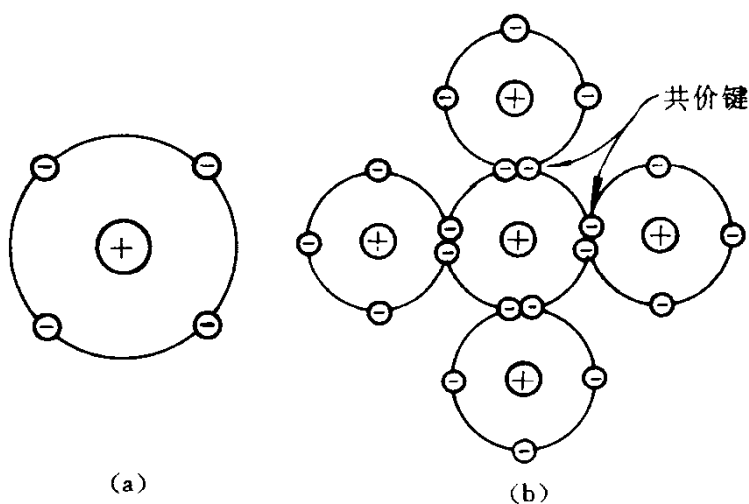


图 1-3 硅的共价键  
(a)硅原子; (b)硅的 4 个共价键

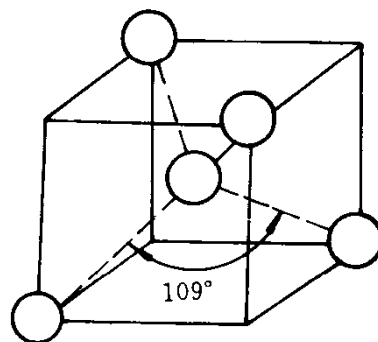


图 1-4 硅的四面体和键角

由于共价键本身很强,而且键之间有固定的方向关系,所以,当具有共价键的材料发生弯曲时,不能像金属键的原子那样,仅彼此位置发生改变,而是结合键必受破坏。因此,由共价键结合起来的陶瓷材料,其性能硬而脆、塑性很差,受力时要么不变形,要么材料破断。

### (三)离子键

当一种材料有  $A$ 、 $B$  两种原子时,如  $A$  原子将它的价电子贡献给  $B$  原子, $A$  原子外层电子在空出后具有满壳层电子数, $B$  原子外层电子亦被填满时,则  $A$  变成正离子, $B$  为负离子,由于正负离子的吸引就产生离子键。离子键使  $A$ 、 $B$  原子结合在一起。图 1-5 所示的是氯化钠( $\text{NaCl}$ )的离子键。 $\text{Na}$  的外层电子贡献给  $\text{Cl}$ , $\text{Na}$  变为带正电的离子,而内层电子数为 8,是满壳层电子数, $\text{Cl}$  接受 1 个电子,变为带负电的离子,并使外层电子数为 8,也是满壳层电子数。所以 1 个  $\text{Na}$  原子和 1 个  $\text{Cl}$  原子靠正负离子间的静电引力而结合在一起。

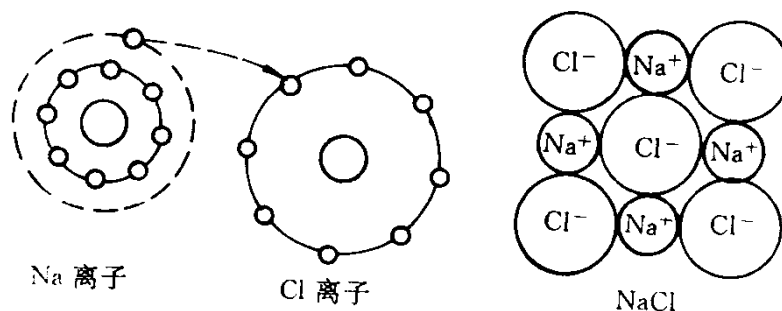


图 1-5  $\text{NaCl}$  的离子键

由离子键结合起来的材料,当受到一定大小的外力作用时,离子之间将失去电的平衡作

用,离子键被破坏,宏观上则表现为材料破断。所以离子键材料脆性大,加之没有自由电子存在,故在常温下导电性很差,在熔融状态,因整个离子容易运动,又易于导电。

#### (四)范德瓦尔键(分子键)

原子状态已经形成稳定电子壳层的惰性气体元素,在低温下可结合成固体,并在其结合过程中没有电子的得失、共有或公有化,原子或分子间的结合力是很弱的,这种存在于中性原子或分子间微弱的结合力称范德瓦尔键或分子键。它来自分子偶极间的作用。通常非极性分子是没有偶极的,即在平均情况下电子云所产生的负电荷中心与原子核所具有的正电荷中心相重合。但实际上在每一瞬时,分子(或原子)上电子云分布的密度是不均匀的,其正、负电荷中心并不重合,而使分子一端带负电,另一端带正电,形成瞬时偶极,偶极与偶极之间的吸引力便构成范德瓦尔键。

范德瓦尔键可在很大的程度上改变材料的性质,如由大分子链组成的高聚物(聚氯乙烯塑料)其大分子链内部通常具有共价键应该是很脆的,但因链与链之间的结合(大分子与大分子之间)是范德瓦尔键,由于这种键的结合力很弱,在外力作用下,键易破坏平衡,导致分子链的滑动,致使高聚物产生很大的变形。这可以理解由范德瓦尔键结合的材料会有很高的塑性。

晶体几种不同结合键的结合能列于表 1-1 中,由表可见,离子键结合能最高,共价键其次,金属键第三,而范德瓦尔键最弱。因此,反映在不同结合键的材料特性上也有明显的差异。

表 1-1 不同结合键能及其材料的特性

| 结合键种类 | 结合能<br>(kJ/mol) | 熔 点  | 硬 度  | 导电性   | 键的方向性 |
|-------|-----------------|------|------|-------|-------|
| 金属键   | 113~350         | 有高有低 | 有高有低 | 良好    | 无     |
| 共价键   | 63~712          | 高    | 高    | 不导电   | 有     |
| 离子键   | 586~1047        | 高    | 高    | 固态不导电 | 无     |
| 范德瓦尔键 | <42             | 低    | 低    | 不导电   | 有     |

## 第二节 工程材料的分类

为了便于材料的生产、应用与管理,也为了便于材料的研究与开发,有必要对固体材料进行分类。由于材料的种类繁多,用途甚广,因此分类的方法也有多种。

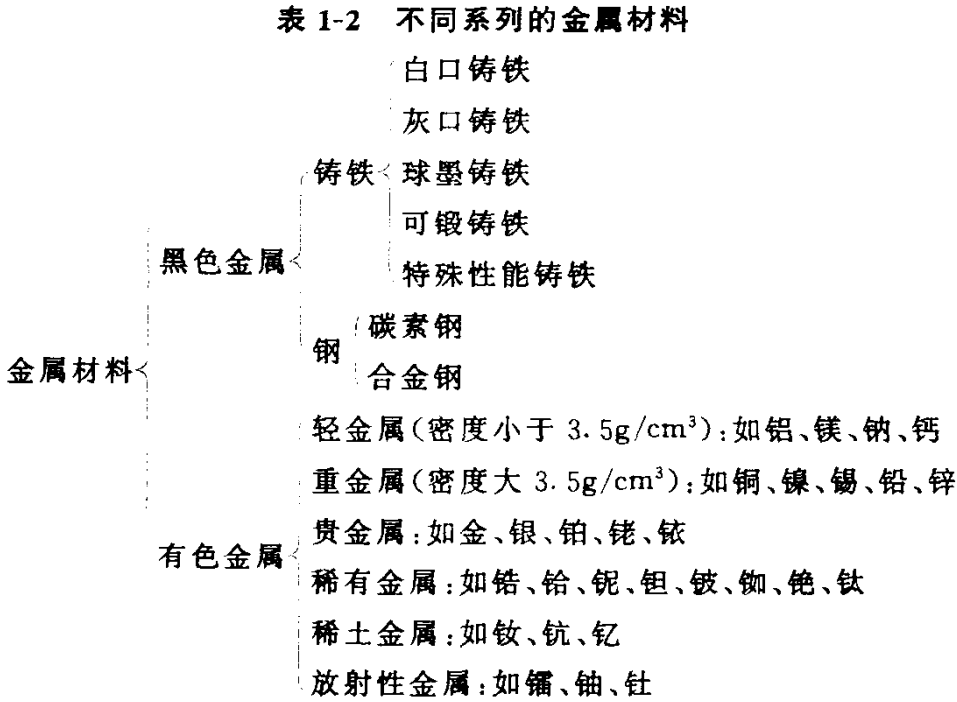
按材料的用途可分为:建筑材料、电工材料、结构材料等;按材料的结晶状态可分为:单晶体材料、多晶体材料及非晶体材料;按材料的物理性能及物理效应又可分为:半导体材料、磁性材料、激光材料(这类材料能受激辐射而发出方向恒定、波长范围窄、颜色单纯的激光,如红宝石、钇铝石榴石、含钕玻璃等)、热电材料(在温度作用下产生热电效应,由热能直接转变为电能或由电能转变为热能,可用于制造引燃、引爆器件)、光电材料(利用光电效应,可将光能直接转换成电能,如用硅、硫化镉等光电材料制作的太阳能电池)等。

值得指出的是,在工程上通常是按材料的化学成分、结合键的特点将工程材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等几大类。

### 一、金属材料

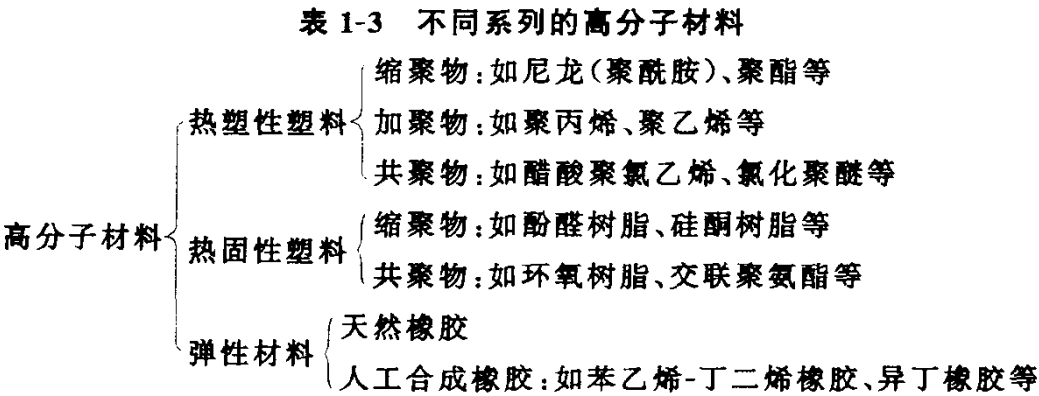
金属材料是以过渡族金属为基础的纯金属及其含有金属、半金属或非金属的合金,是工程

材料中最重要的材料之一。金属材料皆为晶体,其原子间的结合键主要为金属键。但大多数金属材料中,还含有化合物等其它物质,故金属材料中还存在着其它的结合键。工业上通常把金属材料分为两大类:一类是黑色金属,它是指铁、锰、铬及其合金,其中以铁为基的合金——钢和铸铁应用最广,占整个结构和工具材料的 80% 以上。第二类是有色金属,它是指黑色金属以外的所有金属及合金。这两类材料还可进一步细分为表 1-2 所示的系列。



二、高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组分材料。每一个高分子化合物又都是由一种或几种简单的低分子化合物聚合而成的,故高分子化合物也称高分子聚合物(简称高聚物)。有的高聚物是以碳、氢、氧中的一种或几种结合而成,另一些高聚物中还含有氮、硫、氯、氟、硅等元素。高分子内的原子之间存在着很强的共价键,而高分子与高分子之间的结合是靠分子键实现的。这类材料大体可细分为表 1-3 所示系列。



三、陶瓷材料

陶瓷材料主要是指由一种或多种金属元素与非金属元素的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物及硅酸盐所组成的无机非金属多晶材料。它们有的是以离子键为主的离子晶体,有的是以共价键为主的共价晶体,完全由一种结合键组成的陶瓷材料是不多的,大多数是二者的混合键。陶瓷材料可细分为表 1-4 所示的系列。

表 1-4 不同系列的陶瓷材料

|      |      |                                              |
|------|------|----------------------------------------------|
| 陶瓷材料 | 普通陶瓷 | 陶器                                           |
|      |      | 日用和建筑用陶瓷                                     |
|      |      | 电瓷(绝缘瓷)                                      |
|      |      | 化工陶瓷:耐酸、耐碱材料                                 |
|      | 特种陶瓷 | 多孔陶瓷:隔热保温材料                                  |
|      |      | 工程陶瓷:高强陶瓷、超硬陶瓷、高温陶瓷等<br>功能陶瓷:电子陶瓷、超导陶瓷、磁性陶瓷等 |

## 四、复合材料

复合材料是由两种或两种以上性质不同的材料组合起来的一种固体材料(如玻璃钢,是由玻璃纤维与热固性高分子材料复合而成的),它的原子具有非常复杂的结合键。在性能上不仅保留了组成材料各自的优点,而且还有着单一材料不具备的优良性能。这类材料质轻、强度高、耐高温、耐磨损,不仅是航空、航天的理想材料,也是建筑、化工、机械、造船等工业领域广泛使用的材料。

## 第三节 材料的性能

材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类,材料的使用性能主要是指力学、物理和化学性能;材料的工艺性能则是指铸造性、可锻性、可焊性及切削加工性等。材料的这些性能不仅是设计工程机件(或构件、零件)选用材料的重要依据,同时还是控制、评定产品质量优劣的标准。本节重点阐述的是材料的力学性能及其测试。

### 一、力学性能

材料的力学性能是指它在外力或是能量以及环境因素(温度、介质等)作用下表现出的特性。通常把力或能量称为载荷或负荷。材料常见的力学性能有弹性、强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳特性以及耐磨性等。

#### (一)拉伸试验及曲线

拉伸试验是测定材料力学性能最常用的试验方法。它是将圆形或是板状的试样装在拉伸试验机上,如图 1-6 所示。沿试样轴向缓慢施加载荷,使其发生拉伸变形直至断裂。拉伸前后的试样如图 1-7 所示。一般拉伸试验机上都带有自动记录装置,可绘制出载荷  $P$  与试样伸长量  $\Delta L$  之间的关系曲线,并可据此测定应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )关系: $\sigma = P/F_0$  (MPa)、 $\epsilon = \Delta L/L_0$  (%)。图 1-8 是低碳钢拉伸的应力-应变曲线( $\sigma$ - $\epsilon$  曲线)。研究表明低碳钢在外加载荷作用下的变形过程一般可分为三个阶段,即弹性变形,塑性变形和断裂。

1. 弹性极限 在图 1-8 中的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线上,  $oA$  段为弹性阶段,即去掉外力后,变形立即恢复,这种变形称为弹性变形,其应变值很小,  $A$  点的应力  $\sigma_e$  称为弹性极限。 $oA$  线中  $oA'$  部分为一斜直线,因应力与应变始终成比例,所以  $A'$  点的应力  $\sigma_p$  称为比例极限。由于  $A$  点和  $A'$  点很接近,一般不作区分。

材料在弹性范围内,应力与应变的比值  $\sigma/\epsilon$  称为弹性模量  $E$  (单位为 MPa)。 $E$  标志材料抵抗弹性变形的能力,用以表示材料的刚度。 $E$  值愈大,即刚度愈大,材料愈不容易产生弹性变形。 $E$  值的大小,主要取决于各种材料的本性,反映了材料内部原子结合键的强弱。当温度升高

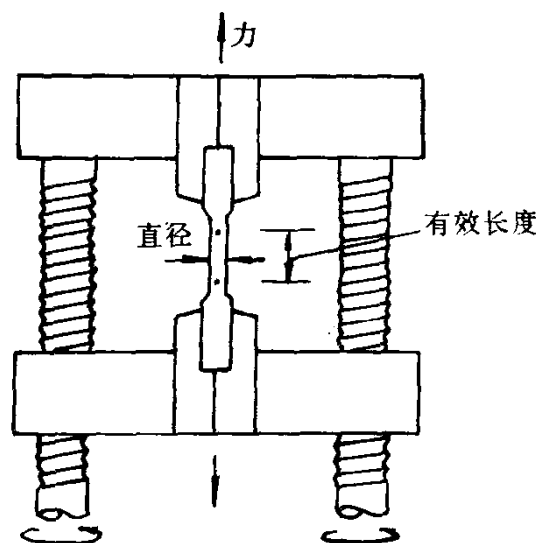


图 1-6 拉伸试验示意图

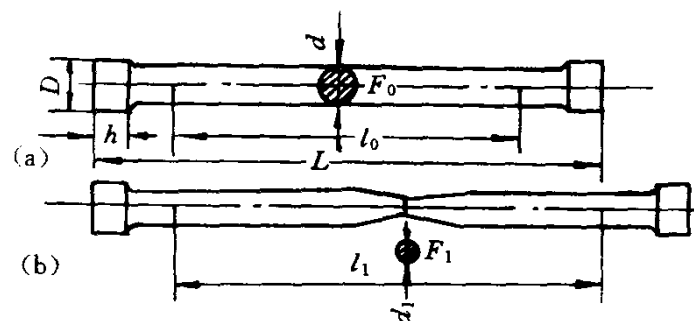


图 1-7 拉伸试样

(a) 拉伸前；(b) 拉断后

时,原子间距加大,金属材料的  $E$  值会有所降低,而一些处理方法(如热处理、冷热加工、合金化等)对它的影响很小。表 1-5 列出了一些材料的弹性模量。

值得注意的是,材料的刚度不等于机件的刚度,因为机件的刚度除取决于材料的刚度外,还与结构因素有关,机件刚度的提高,可通过增加横截面积或改变截面形状来实现。

理想的弹性体,加载后立即产生弹性变形,卸载后立即恢复原状,应变的产生与时间无关。实际的工程材料,特别是一些高分子材料,加载后应变不立即达到平衡值,卸载时变形又不立即消失,这种应变落后于应力的现象,称为弹性滞后或滞弹性。

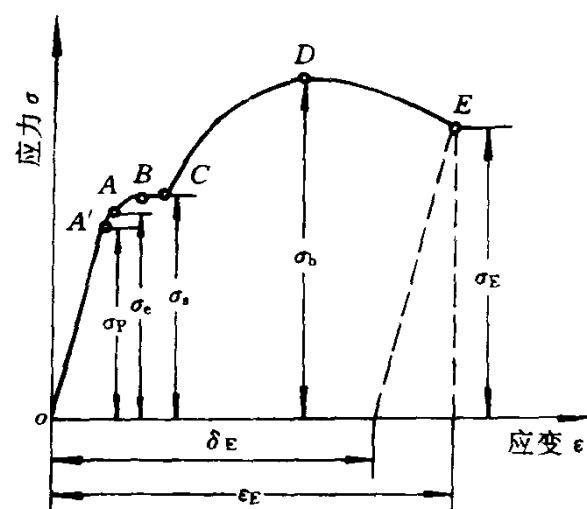


图 1-8 低碳钢的应力-应变曲线

2. 强度 强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。用拉伸曲线可以测定材料的屈服强度和抗拉强度。

表 1-5 部分工程材料的弹性模量( $E$ )及其键型

| 材料  | $E/\text{MPa}$ | 键型  | 材料                      | $E/\text{MPa}$            | 键型      |
|-----|----------------|-----|-------------------------|---------------------------|---------|
| 铁   | 214000         | 金属键 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 400000                    | 共价键和离子键 |
| 镍   | 210000         | 金属键 | 石英玻璃                    | 70000                     | 共价键和离子键 |
| 钛   | 118010         | 金属键 | 硬橡胶                     | 4000                      | 共价键     |
| 铝   | 72000          | 金属键 | 无规聚苯乙烯                  | 3000                      | 分子键     |
| 铜   | 132400         | 金属键 | 支化聚乙烯                   | 200                       | 分子键     |
| 镁   | 45000          | 金属键 | 碳纤维复合材料                 | $(70\sim 200)\times 10^3$ |         |
| 金刚石 | 1140000        | 共价键 | 玻璃纤维复合材料                | $(7\sim 46)\times 10^3$   |         |

(1)屈服强度 由图 1-8 可以看出,当拉伸试验应力  $\sigma$  超过 A 点后,试样除有弹性变形外,还产生塑性变形,在 BC 段,表现出应力几乎不增加而应变却继续增加的特点,显示了试样的屈服。试样屈服时承受的最小应力  $\sigma_s$ (即 B 点的应力)称为屈服强度或屈服点,它反映了材料

对明显塑性变形的抗力。实际上,不少材料并没有明显的屈服现象,为此工程上规定,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( $\sigma_{0.2}$ )。一些工程机件在使用时是不允许发生塑性变形的(如紧固螺栓),因此屈服强度是工程设计与选材的重要依据之一。

(2) 抗拉强度 材料发生屈服后,其应力与应变的变化如图 1-8CD 段所示,到 D 点应力达最大值  $\sigma_b$ ,D 点以后,试件产生“颈缩”,迅速伸长,应力明显下降,在 E 点断裂。 $\sigma_b$  称为抗拉强度,它代表材料在拉伸条件下,破断前所受的最大应力。对于那些变形要求不高的机件,常将  $\sigma_b$  作为设计与选材的依据。

3. 塑性 塑性是材料在断裂前发生永久变形的能力。采用拉伸断裂时的延伸率( $\delta$ )与断面收缩率( $\psi$ )来表示:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中,  $l_0$  与  $F_0$  分别为试样原始长度与原始截面积;  $l_1$  与  $F_1$  分别为试样拉断后的长度与拉断处的截面积,如图 1-7 所示,  $\delta$  值与  $\psi$  值越大,材料的塑性越好。两者相比,用  $\psi$  表示塑性更接近材料的真实应变。

长试样( $l_0 = 10d_0$ )的延伸率写成  $\delta$  或  $\delta_{10}$ ;短试样( $l_0 = 5d_0$ )的延伸率须写成  $\delta_5$ 。同一材料,  $\delta_5 > \delta$ ,所以对不同材料,  $\delta$  值和  $\delta_5$  值不能直接比较。

## (二) 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标,反映材料表面抵抗微区塑性变形的能力。工程上常用的有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度、显微硬度等试验方法。

1. 布氏硬度 布氏硬度试验法是用一直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金球,在规定载荷  $P$  的作用下压入被测试金属的表面停留一定时间后卸除载荷,测量被测试金属表面上所形成的压痕直径  $d$ ,如图 1-9 所示,由此计算压痕的球缺面积  $F$ ,然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力( $P/F$ ),以此作为被测试金属的布氏硬度值 HB。其计算式为:

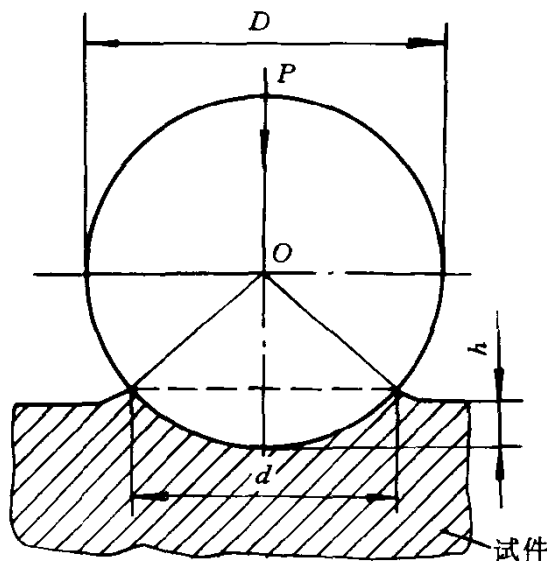


图 1-9 布氏硬度测试示意图

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-1)$$

式中,载荷  $P$  的单位为 N 或 kgf(1kgf=9.8N),球体直径  $D$  与压痕直径  $d$  的单位为 mm,故 HB 的单位为 N/mm<sup>2</sup>,但习惯上不标出单位,只写出硬度的数值。

采用不同材料的压头测定的布氏硬度值,用不同的符号加以表示,当压头为淬火钢球时,硬度符号为 HBS,适用于布氏硬度值低于 450 的金属;当压头为硬质合金球时,硬度符号为 HBW,适用于布氏硬度值为 450~650 的金属。例如,120HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 钢球,在 9.81kN(1000kgf)载荷作用下保持 30s,测得的布氏硬度值为 120。500HBW5/750 表示用直径 5mm 硬质合金球,在 7.35kN(750kgf)载荷作用下保持 10~15s,测得的布氏硬度值为 500。

在进行布氏硬度试验时,应根据被测试材料的种类和试样厚度,选用不同大小的球体直径  $D$ 、施加载荷  $P$  和载荷保持时间,按 GB231—84 规定,球体直径有 10mm、5mm、2.5mm、2mm 和 1mm 五种;载荷与球体直径平方的比值( $P/D^2$ )有 30、15、10、5、2.5、1.25 或 1 共七种,可根据金属材料的种类和布氏硬度范围按表 1-6 选定  $P/D^2$  值。载荷的保持时间为:黑色金属 10~15s,有色金属 30s,布氏硬度值小于 35 时为 60s。

当载荷  $P$  与球体直径  $D$  选定时,硬度值只与压痕直径  $d$  有关。 $d$  愈大,则布氏硬度值愈小;反之, $d$  愈小,硬度值愈大。在实际测试时,可以用式(1-1)计算,一般是用刻度放大镜测出压痕直径  $d$ ,然后根据  $d$  值查 GB231—84 规定,即可求得所测的硬度值。

表 1-6 布氏硬度试验的  $P/D^2$  值的选择

| 材 料     | 布氏硬度   | $P/D^2$ *   |
|---------|--------|-------------|
| 钢及铸铁    | <140   | 10          |
|         | >140   | 30          |
| 铜及其合金   | <35    | 5           |
|         | 35~130 | 10          |
|         | >130   | 30          |
| 轻金属及其合金 | <35    | 2.5(或 1.25) |
|         | 35~80  | 10(或 5、15)  |
|         | >80    | 10(15)      |
| 铅、锡     |        | 1.25(或 1)   |

\* 试验条件允许时,应尽量选用 10mm 球和无括号的  $P/D^2$  值。

布氏硬度试验是由瑞典工程师布利涅尔(J. B. Brinell)于 1900 年提出的。

2. 洛氏硬度 洛氏硬度试验也是用一定规格的硬质压头,以一定大小的载荷压入试样表面,但使用的压头与载荷不同于布氏硬度,并根据压坑的深度来计算硬度值。材料硬,压坑深度浅,则硬度值高;反之材料软,硬度值低,这和布氏计量相一致。洛氏硬度计上有一个百分表头,用以测量压坑深度,但不必由深度来计算硬度值,试验时在表头上直接读出被测材料或零件的硬度值。

为了适应不同材料的硬度测试,采用不同的压头与载荷组合成几种不同的洛氏硬度标尺。每一种标尺用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后注明,如 HRC, HRA, HRB 等,几种常用洛氏硬度级别试验规范及应用范围见表 1-7。

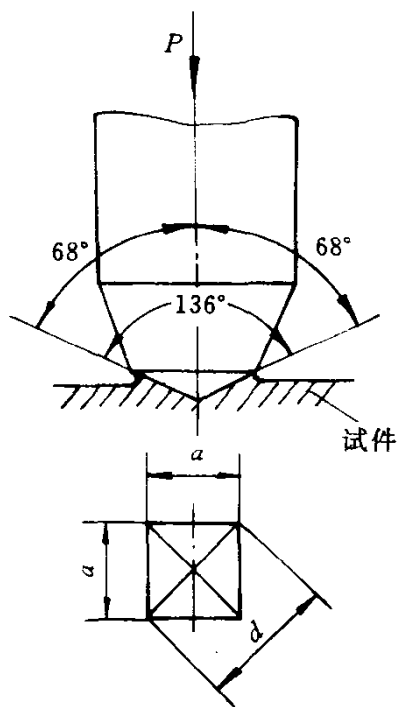
表 1-7 常用洛氏硬度的级别及其应用范围

| 洛氏硬度 | 压 头         | 总载荷<br>/N(kgf) | 测量范围      | 应 用           |
|------|-------------|----------------|-----------|---------------|
| HRC  | 120°金刚石圆锥体  | 1471.1(150)    | 20~67HRC  | 淬火钢等硬零件       |
| HRA  | 120°金刚石圆锥体  | 588.4(60)      | 70HRA 以上  | 零件的表面硬化层硬质合金等 |
| HRB  | φ1.588mm 钢球 | 980.7(100)     | 25~100HRB | 软钢和铜合金等       |

洛氏硬度试验的优点是,操作简便、迅速,硬度值可在表盘上直接读出;压痕小,可测量成品件;采用不同标尺可测定各种软硬不同和厚薄不同的材料。但应注意,不同级别的硬度值间无可比性,只有查表(见附录一)转换成同一级别后才能比较硬度高低。此外,因压痕小,受材料

组织不均等缺陷影响大,所测硬度值重复性差,对同一测试件一般需测三次后取平均值。

洛氏硬度试验是由美国洛克威尔(S. P. Rockwell 和 H. M. Rockwell)于 1919 年提出的。



3. 维氏硬度 洛氏硬度试验虽可采用不同的标尺来测定由极软到极硬金属材料的硬度,但不同标尺的硬度值间没有简单的换算关系,使用上很不方便。为了能在同一种硬度标尺上测定由极软到极硬金属材料的硬度值,设计了维氏硬度试验法。所谓维氏硬度试验,是用一相对面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥体压头,在规定载荷  $P$  作用下压入被测试金属表面,保持一定时间后卸除载荷,然后再测量压痕投影两对角线的平均长度  $d$ ,如图 1-10 所示,并计算出压痕的表面积  $F$ ,最后求出压痕表面积上平均压力( $P/F$ ),以此作为被测试金属的维氏硬度值,用符号 HV 表示。即

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (1-2)$$

图 1-10 维氏硬度测试示意图

式中,载荷  $P$  的单位为  $N$ (或  $kgf$ ),两对角线的平均长度  $d$  的单位用  $mm$ 。与布氏硬度值一样,习惯上也只写出其硬度数值而不标出单位。在硬度符号 HV 之前的数值为硬度值,HV 后面的数值依次表示载荷和载荷保持时间(保持时间为  $10\sim 15s$  时不标注)。例如,640HV30 表示在  $294.3N(30kgf)$  载荷作用下,保持  $10\sim 15s$  测得的维氏硬度值为 640,而 640HV30/20 表示在  $249.3N(30kgf)$  载荷作用下,保持  $20s$  测得的维氏硬度值为 640。

维氏硬度试验常用的载荷有  $49.1N$ 、 $98.1N$ 、 $196.2N$ 、 $294.3N$ 、 $490.5N$ 、 $981N$  等几种。试验时,载荷  $P$  应根据试样的硬度与厚度来选择。一般在试样厚度允许的情况下尽可能选用较大载荷,以获得较大压痕,提高测量精度。在实际测试时,可以用式(1-2)计算,但一般是用装在机体上的测量显微镜,测出压痕两对角线的平均长度  $d$ ,然后根据  $d$  查 GB4340—84 规定求得所测的硬度值。维氏硬度适用于各种金属材料尤其是表面层,如化学热处理渗层、电镀层的硬度测量。此法压痕清晰,尤其在显微镜下测量对角线的长度,保证了试验的精确性。但因试验要求被测面光洁度高,故准备测试面的工作较为麻烦。

维氏硬度试验是由英国的史密斯(R. L. Smith)和桑德兰德(G. E. Sandland)于 1925 年提出的。

4. 肖氏硬度 肖氏硬度试验的原理是将顶端为金钢石的冲头从固定高度  $h_1$  自由下落到试样表面,测量其回跳高度  $h_2$ ,以此来反映被测材料的硬度值,用符号 HS 表示。即

$$HS = K \frac{h_2}{h_1}$$

式中, $K$  为常数。当金属的弹性极限越高,塑性变形越小,则储存的弹性能量越高,回跳的高度也越高,回跳的高度也越高,表明金属越硬。

肖氏硬度试验冲击力小,产生的压痕小,对试样破坏小;肖氏硬度计重量轻,携带方便,特别适合于在现场对大型试件(如机床床身,大型齿轮等)进行硬度测量。

5. 莫氏硬度 莫氏硬度是一种划痕硬度,用于陶瓷和矿物的硬度测定。莫氏硬度的标度是选定十种不同的矿物,从软到硬分为十级(见表 1-8)。后来考虑到该分级中,高硬度范围中相邻几级标准物质的硬度相差很大,因此增加为十五级,又称为李德日维耶硬度(见表 1-8)。

表 1-8 莫氏硬度及李德日维耶硬度分级表

| 材料名称 | 莫氏硬度分级 | 李德日维耶<br>硬度分级 | 材料名称 | 莫氏硬度分级 | 李德日维耶<br>硬度分级 |
|------|--------|---------------|------|--------|---------------|
| 滑石   | 1      | 1             | 结晶石英 | 7      | 8             |
| 岩盐   | 2      | 2             | 黄玉   | 8      | 9             |
| 方解石  | 3      | 3             | 花岗石  |        | 10            |
| 萤石   | 4      | 4             | 刚玉   | 9      | 12            |
| 磷灰石  | 5      | 5             | 碳化硅  |        | 13            |
| 钠长石  | 6      | 6             | 碳化硼  |        | 14            |
| 焙炼石英 |        | 7             | 金刚石  | 10     | 15            |

### (三)冲击韧性

不少机件在工作中常常会受到高速作用的冲击载荷,如冲床的冲头、锻压机的锤杆、汽车的齿轮、飞机的起落架以及火车的起动与刹车部件等等。材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力叫冲击韧性  $a_k$ 。为了评论材料的  $a_k$  值,常采用一次冲击弯曲试验。由于在冲击载荷下加载速度大,材料的塑性变形得不到充分发展。为了能灵敏地反映出材料的冲击韧性,通常采用带缺口的试样进行试验,图 1-11、图 1-12 是国家标准规定的一次弯曲冲击试样的尺寸及加工要求。

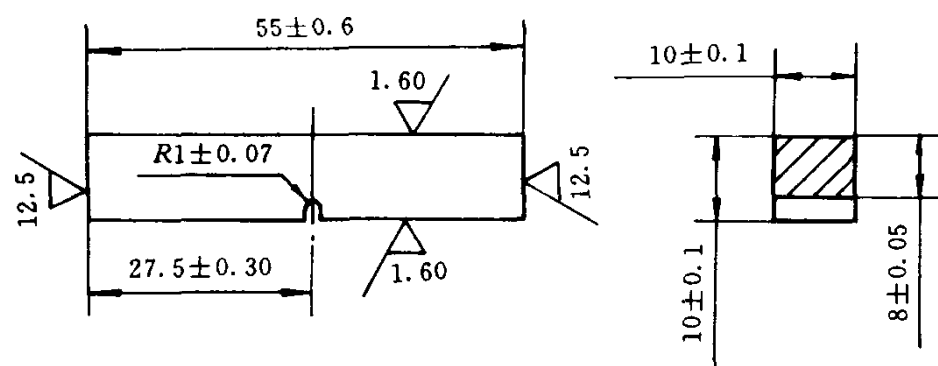


图 1-11 夏比 U 型缺口试样(梅氏试样)

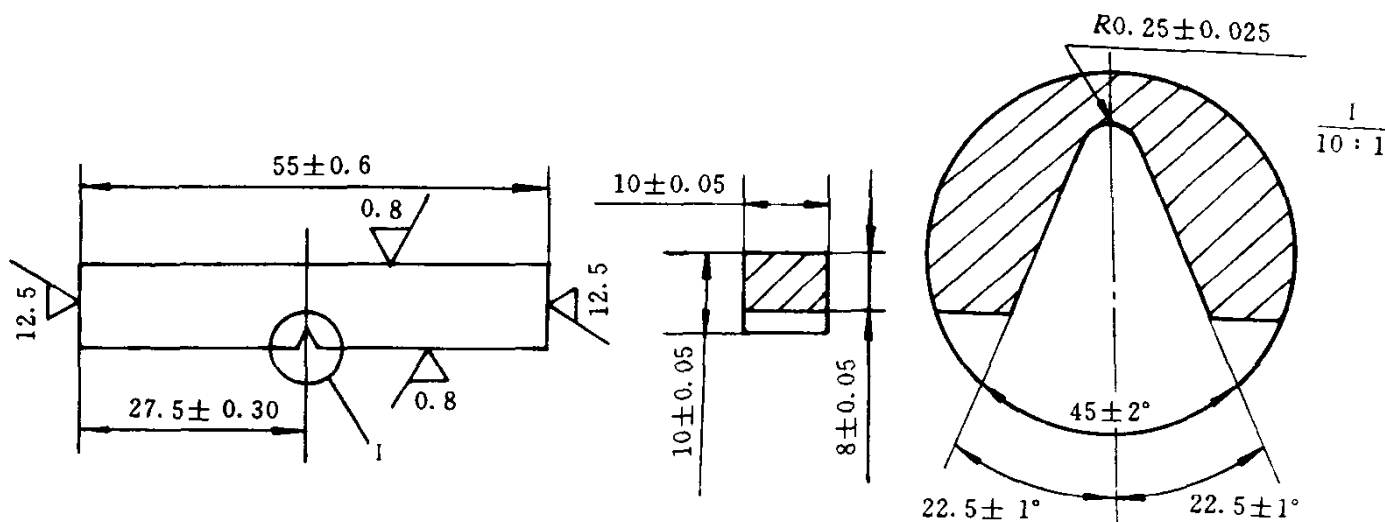


图 1-12 夏比 V 型缺口试样(夏氏试样)