

目 录

译者的话	
前言	
序 言	
第一章 材料引论: 常用特性	1
1-1 结构 \leftrightarrow 性能 \leftrightarrow 加工工艺	1
1-2 力学行为	4
1-3 热学特性	9
1-4 材料对电场的响应	11
1-5 性能的表达	13
复习与思考	15
第二章 材料引论: 化学键的再研究	21
2-1 单个原子和离子	22
2-2 强键力 (主价键)	25
2-3 分子	29
2-4 次价键力	32
2-5 原子间距	35
2-6 配位数	39
2-7 材料的类型	41
复习与思考	42
第三章 固体中的原子有序	47
3-1 结晶特性	48
3-2 立方点阵	50
3-3 六方晶体	53
3-4 多晶型	55
3-5 晶胞几何学	56
3-6 晶向	59
3-7 晶面	62
3-8 X射线衍射	67
复习与思考	70
第四章 固体中的原子无序	78
4-1 固体中的杂质	79
4-2 金属中的固溶体	79
4-3 化合物中的固溶体	81
4-4 晶体缺陷	83
4-5 非晶材料	89
4-6 原子的振动	91
4-7 原子的扩散	95
4-8 扩散过程	99
复习与思考	101
第五章 固体中的电子迁移	107
5-1 电荷载流子	108
5-2 金属导电性	109
5-3 绝缘体	113
5-4 本征半导体	113
5-5 杂质半导体	119
5-6 半导体器件	123
复习与思考	126
第六章 单相金属	131
6-1 单相合金	132
6-2 单相合金的工艺过程	135
6-3 弹性形变	136
6-4 单晶体内的塑性形变	139
6-5 塑性形变后的金属性能	144
6-6 再结晶	146
6-7 多晶金属的行为	150
6-8 断裂	154
6-9 辐照损伤	157
复习与思考	158
第七章 分子相	164
7-1 大分子	165
7-2 线型聚合物	170
7-3 分子的不规则性	175
7-4 三维聚合物	178
7-5 聚合材料的形变	181
7-6 聚合物的电学行为	186
7-7 聚合物的稳定性	189
复习与思考	191
第八章 陶瓷材料	197
8-1 陶瓷相	198
8-2 陶瓷晶体 (AX)	199
8-3 陶瓷晶体 (A_mX_p)	203
8-4 复杂化合物	205

8-5 硅酸盐.....	206	11-3 析出工艺	288
8-6 陶瓷的电磁行为.....	209	11-4 $\gamma \rightarrow (\alpha + \bar{C})$ 反应速率.....	291
8-7 陶瓷的力学行为.....	216	11-5 工业用钢的热处理工艺	297
8-8 陶瓷材料的工艺过程.....	219	11-6 淬透性	302
复习与思考	222	复习与思考	307
第九章 多相材料：平衡图.....	229	第十二章 金属的腐蚀	314
9-1 相的定性关系.....	230	12-1 电镀：腐蚀的逆反应	314
9-2 相图.....	234	12-2 伽伐尼电偶	316
9-3 相的化学成分.....	237	12-3 伽伐尼电池的类型	319
9-4 相的数量.....	238	12-4 腐蚀速率	323
9-5 工业合金和陶瓷.....	241	12-5 腐蚀的控制	326
9-6 铁-碳系的相	246	复习与思考	330
9-7 Fe-Fe ₃ C相图	248	第十三章 铸铁、混凝土、木材和复合	
9-8 奥氏体的分解.....	251	材料（广泛使用的、更复杂	
9-9 普通碳钢和低合金钢.....	253	的材料）.....	333
复习与思考	255	13-1 铸铁	334
第十章 多相材料：显微组织及其性能.....	262	13-2 混凝土及其有关制品	339
10-1 固相反应	262	13-3 木材	346
10-2 多相显微组织	270	13-4 复合材料	349
10-3 显微组织：力学性能	273	复习与思考	351
10-4 显微组织：物理性能	277	附 录	356
复习与思考	280	A 部分常数及其换算	356
第十一章 多相材料：热处理工艺.....	284	B 常用元素表	358
11-1 退火工艺	284	C 常用工程材料的性能（20℃）.....	360
11-2 正火工艺	287	D 材料专用术语（按英文字母顺序排列）.....	361

第一章 材料引论：常用特性

前言

工程师将材料和能量改作产品时总力图选择最佳性能的材料。本章将介绍材料的最基本的常用特性，其它性能将在以后章节讨论。

本书的主题是材料的性能和行为取决于它们的内部结构。这一章中所介绍的材料在力学、电学和热学等方面的性能和特征，将作为以后各章中研究结构与性能关系的基础。本章对于数据表达，它们的偏差及在计算中所能确保的精度也作了简明的阐述。

目录

1-1 结构↔性能↔加工工艺

1-2 力学行为：

形变，强度（和硬度），韧性和计算实例。

1-3 热学特性：

热容量，热膨胀，热传导和计算实例。

1-4 材料对电场的响应：

电导率（和电阻率），介电行为和计算实例。

1-5 性能的表示：

定性信息，定量数据和数据的方差。

本章与其它各章一样，都是以复习和思考部分为结束，它包括总结、重要术语和概念一览表，课堂讨论题及习题。

学习要求

1. 牢固地建立各种材料都具有不同的内部结构这一概念（各种内部结构的详细内容将在以后各章讨论）。
2. 熟悉常用的术语和概念，这些术语和概念在本书以后各章节及你在未来的工作中与其它工程师交往时将经常碰到。
3. 了解材料的各种不同力学性能之间的相互关系，特别是对表 1-2.1 中引用的性能。
4. 复习物理学中学过的有关热和电的最基本特性，并通过电荷载流子来加深对导电性概念的理解。
5. 通过简单的计算来说明你所掌握的关于性能的知识（每章末尾的习题用于此目的）。
6. 复习平均值，中位数及标准差的概念，并能用适当的有效数字表达你的答案。
7. 学会使用两种单位制（对美国学生而言）。

1-1 结构↔性能↔加工工艺

每一个应用科学家和工程师（机械的、土木工程的、电气的或其它方面的）都必不可少地要用到材料，不论产品是桥梁、计算机、宇宙飞船、心脏起搏器、核反应堆、还是汽车

的排气装置，工程师们都必须完全了解他们所用材料的性能和行为特征。下面，我们就要考虑汽车制造中用到的各种各样的材料：铁、钢、玻璃、塑料、橡胶等。这里只不过是列举出几种材料（图 1-1.1）。而仅仅对钢材一项而言，就有 2000 多种不同种类和型号的品种。那么，要制造一个特定的零件，应根据什么原则来选择材料呢？

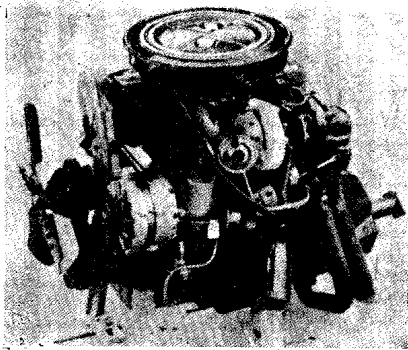


图 1-1.1 这是一个汽车发动机，里面有几百种不同的材料，（对那些图上看得见的材料，要求读者能够识别）。设计师根据每种材料的可加工性，物理化学性能、使用行为、成本以及材料来源进行选择。由于对材料重量的限制日趋重要，由于必须重新设计发动机以更有效地实现能量转换，以及由于原材料供应的日趋短缺，在未来的十年中，材料改进势在必行（The Ford Motor Company.）

在进行材料选择时，设计师必须首先考虑强度、导电性和/或导热性，密度及其它性能。然后，再考虑材料的加工性能和使用行为（其中材料的可成形性、机械加工性、电稳定性、化学持久性及辐照行为是重要的）以及成本和材料来源。例如生产变速齿轮用的钢必须是易机械加工的，但又要有足够的韧性以经受猛烈的冲击。生产挡板的金属必须是易成形的，但又有抗冲击变形的能力。电线必须能经受过高或过低的温度，而半导体必须在长时期内保持稳定的导电特性。

许多设计的改进取决于新材料的发展。比如，仅在几年前，晶体管还不能用当时已有的材料制成；激光技术的发展需要各种新的晶体和玻璃；燃气轮机的设计虽然已大有改进，但仍需要一种既便宜又能承受日益增高的温度的材料来作为涡轮机的叶片。

内部结构与性能 要工程师或科学家们对成千上万种已有材料都具有详细的知识，并始终能与新材料的发展保持并驾齐驱的状态显然是不可能的，他们必须牢牢地把握住支配各种材料性能的基本原则。这个原则就是材料的性能来源于该材料的内部结构，这是对工程师和科学家们最具有重要价值的一个原则。这与下述说法相似：电视机或其它电子产品（图 1-1.2）

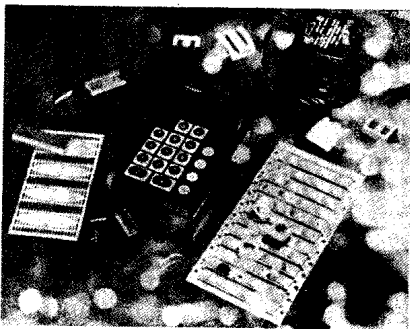


图1-1.2 电子计算机。计算机的性能取决于内部线路中各元件的排列。同样，材料的行为也取决于它内部各组元结构排列。我们将会看到这些排列包括原子周围的电子结构，原子的配位，晶体结构及相邻晶体的显微组织。工程师和科学家能够根据需要来选择和改变这些内部结构，正象线路设计师修改电子元件一样。要正确地做到这些我们必须了解材料的结构与其性能之间的关系
(The Arnold Engineering Company.)

的运行取决于元件，器件和产品内部的线路。任何人都能转动旋钮，但电子技术人员就要了解它的内部线路，以便能有效地进行修理，而电气工程师和物理学家就必须了解线路中每个元件的特性，以便设计或改进这些产品的性能。

材料的内部结构包括原子、原子在晶体中、分子中与邻近原子的结合方式以及显微结构。今后，我们将更加注意这些结构，因为技术人员在生产和使用材料时必须了解这些结构，正象机械工程师们为满足今后十年内的要求而对汽车进行重新设计或改进时必须了解内燃机的运行一样。

加工工艺与性能 材料必须进行加工，以满足工程师对所设计产品的要求。最常见的加工方法是单纯改变材料的几何形状，例如机械加工或锻造。当然材料的性能对加工过程是十分重要的。特别硬的材料会打坏切削工具的刀刃，而象铅那样的软材料又会“粘住”锯条，砂轮及其它工具。同样，高强度材料尤其是脆性材料是不适于塑性变形的。例如，制造汽车挡板的金属板如果不用最软的钢那必定是极大的浪费。

通常，在机械加工或塑性变形时，不只是包含材料形状的改变，而且也伴随着材料性能的改变。例如，一根金属丝当它通过模具拉拔时，它的直径减小了，同时本身也强化和变硬了。在一股作为导电体用的铜丝中是不希望这种硬化的，而在制造有缓冲层的子午线轮胎中的钢丝时，工程师们恰恰是利用这个过程来实现材料的强化。但是，不管愿望如何，只要制造过程中改变了材料的内部结构，那么它的性能也必定随之而改变。材料在变形时，它的内

部结构发生了变化；因而其性能也跟着发生变化。

热加工工艺也同样影响材料的内部结构，它们包括退火，高温淬火及其它热处理。我们的目的是要了解结构变化的本质，以便像工程师一样制订适当的工艺流程。

使用行为 在成品中的材料具有一整套满足设计需要的性能——强度、硬度、导电性、密度、色彩等等。倘若在使用过程中，材料的内部结构没有变化，那么它将永远保持这些性能。但是，如果产品遇到使材料内部结构发生变化的使用情况，那么，我们可以肯定地说材料的性能与行为也会发生相应的变化。这就解释了为什么当橡胶暴露在阳光和空气中时会逐渐地硬化，为什么铝不能用在超音速飞机中，为什么金属在周期性载荷的作用下会产生疲劳，为什么普通钢的钻头不能象高速钢钻头那样飞快地切削，为什么磁体在射频场中会失去它的磁性；又为什么半导体在核辐射下会损坏。这类例子是数不清的。工程师的结论是：不仅要考虑初始要求，而且要考虑那些将使材料内部结构发生变化，因而也导致材料性能发生变化的使用条件。

本教程的模式 本书设计的“结构”是：第一章讨论一些性能术语和性能的测量，第二章复习化学和物理引论中的一些基础科学知识，它们是直接说明结构-性能关系的，从第三章开始我们将依次讨论各种不同的结构特征，（从原子到复合材料）它们是决定材料性能的。我们将随时提到工艺过程和使用条件的作用，因为这是设计时必须经常考虑的因素。

例题和习题的目的是①说明结构和/或性能的原理；②扩大解题能力，这对于工程师和应用科学家是十分重要的[⊙]。

1-2 力学行为

材料受力后就会产生变形。**应变** ϵ 是单位长度的变形，而**应力** σ 是单位面积上的作用力。材料在形变时吸收了能量，因为力沿着形变方向作了功。**强度** 是使材料破坏的**应力**大小的度量。**延性**是材料在破坏前永久**应变**的数值，而**韧性**却是材料在破坏时所吸收的能量数值。（表 1-2.1）。

设计师们对这些力学性能制订了各种各样的规范，通常，例如对一种钢管，人们要求它有较强的强度，但也希望它有较高的延性，以增加韧性，由于在强度和延性二者之间往往是矛盾的，工程师们要做出最佳设计常常需要在二者中权衡比较。同时，还有各种各样的方法确定材料的强度和延性。当钢棒弯曲时就算破坏，还是必须发生断裂才算破坏？答案当然取决于工程设计的需要；但是这种差别表明至少应有两种强度判据——一种是开始屈服，另一种是材料所能承受的最大载荷。要做到这一点，我们应当研究材料的应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线（图 1-2.1），并依次讨论材料的形变、强度、硬度和韧性。

形变 材料的初始应变基本上是与应力成正比的，而且是可恢复的。应力消除以后，应变也跟着消失。我们称这种线性的、可恢复的应变为**弹性应变**。**弹性模量**（**杨氏模量**）就是应力 σ 与这种可恢复的应变 ϵ 之间的比值：

$$E = \sigma / \epsilon \quad (1-2.1)$$

⊙ 本书将全部采用国际单位制，但也附带地包括某些英制单位和非国际公制单位。这些地方要求工程师们会使用两种单位制。这样做不仅使工程师们能用国际单位制方便地解决各种问题，而且他们还将发现在今后的一定时期内要与某些还不熟悉纯地掌握国际单位制的人打交道，而这些人也在技术上也积累了大量的宝贵经验。

表1-2.1 材料的力学性能

性能或参数	符号	定义 (或注释)	常用单位	
			SI	英制
应力	σ	单位面积上的作用力 (F/A)	Pa① (N/m^2)	psi② $\text{lb}_f/\text{in.}^2$
应变	ϵ	相对变形($\Delta L/L$)	—	—
弹性模量	E	应力/弹性应变	Pa	psi
强度		破坏应力		
屈服	S_y	对初始塑性变形的抗力	Pa	psi
抗拉	S_t	最大强度 (以原始尺寸为基准)	Pa	psi
延性		破坏时的塑性应变		
延伸率	e_f	$(L_f - L_0)/L_0$	%③	%
断面收缩率	$R \text{ of } A$	$(A_0 - A_f)/A_0$	%	%
韧性		断裂破坏所需要的能量	J	ft-lb
硬度④		对塑性压入的抗力		硬度单位制

① $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2 = 0.145 \times 10^3 \text{ psi}$; $1000 \text{ psi} = 6.894 \text{ MPa}$

② 1 kg 质量的重力产生 9.8 N 的力

③ 有三种常用的决定硬度的方法。

布氏硬度 (BHN), 用一个大的压头。硬度值取决于压痕的直径 ($1-4 \text{ mm}$)。

洛氏硬度 (R), 用一个小压头。硬度值取决于压痕深度。根据压头及施加载荷的大小可采用几种不同的硬度。

维氏硬度 (DPH); 用金刚石锥体为压头。通常用它来测量微小区域内的硬度值, 此时所用的载荷是很小的。

④ %无量纲, 根据初始值(σ), 最终值或破坏值(f)来度量, (通常用百分比表示)。

杨氏模量 E 的公制单位是帕斯卡 (或者更通用兆帕斯卡 MPa), 如表 1-2.1 中所示, 相应的英制单位是 psi, 磅/平方英寸。常用材料的杨氏模量值列在附录 C 中, 我们在第二章中将会看到弹性模量 (杨氏模量) 是原子间键合力的度量。工程师们必须充分重视这个性能, 因为它与工程制品的刚度直接有关。

当应力再增加时, 材料内部除了弹性应变以外, 原子间还会产生永久的变形, 这种永久变形在作用力去除以后是不可恢复的, 我们称它为塑性应变。这种应变在材料的加工过程中是十分必要的 (例如, 在铝板的轧制过程中, 我们先将它轧制成较薄的铝板, 然后再将它轧制成很薄的铝箔)。可是, 在产品应用时, 我们的设计常常要避免塑性变形, 因此我们所设计的应力常在图 1-2.1 (b) 和 (c) 所示的弹性 (正比) 范围之内。

弹性应变, 当应力低于屈服强度时它是唯一的形变方式, 当应力不断增加而出现塑性应变时, 弹性应变也随着继续增加。这个弹性应变 (不是塑性应变) 当材料断裂 (或只是卸载) 后也是可恢复的。

延性 材料在断裂前的塑性应变 e_f 可以用延伸率百分数来表示。象所有的应变一样它是无量纲的 $(L_f - L_0)/L_0$ 或者 $\Delta L/L_0$ 。但从图 1-2.2 中可以看出, 由于塑性形变通常发生在局部的颈缩区内, 因而延伸率百分数还与标距有关。所以不论何时, 只要给出延伸率, 就必须标明其标距。

延性的第二种度量是断裂时的断面收缩率 $(A_0 - A_f)/A_0$ 。高韧性材料在断裂前有很大的截面收缩。延伸率是塑性“伸长”的度量, 而断面收缩率却是塑性“收缩”的度量。有些工程师先用断面收缩率作为延性的度量, 因为它不需要标距, 而且还能用它来确定断裂时的真应变 (见例 1-2.4 的注释)。人们还不能精确地建立延伸率和断面收缩率之间的关系, 因

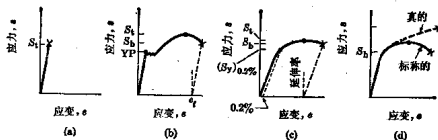
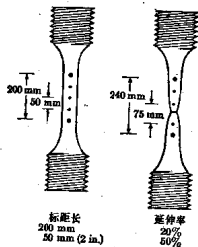


图1-2.1 应力-应变图

(a) 无塑性变形的脆性材料(例如铸铁) (b) 有明显屈服点的延性材料(例如低碳钢) (c) 没有明显屈服点的延性材料(例如铝)
 (d) 真应力-应变曲线与标称应力-应变曲线的比较图 S_b = 断裂强度; S_y = 抗拉强度; $S_{0.2}$ = 屈服强度; e_f = 延伸率(断裂前的应变); X = 断裂; Y_P = 屈服点



(a)



(b)

图1-2.2 拉伸试验

(a) 圆试件试验结束 (b) 延伸率与标距的关系, 既然最终的变形高度集中, 故不标明标距的延伸率是无意义的, 在常规试验中, 一般使用50mm (2in.) 的标距, (以英寸为单位, 对于50%和20%的延伸率, 标距分别为2.0in. → 3.0in. 和7.9in. → 9.5in.)

为塑性应变可能是高度集中的。当然, 延性材料的这两个值都很高, 而脆性材料的这两个值都几乎接近零。

强度(和硬度) 材料抵抗塑性变形的能力称为屈服强度, S_y , 它是用开始屈服的外力除以横截面积而得到的。象软钢一类的材料, 其屈服强度由确定的屈服点决定(图1-2.1b), 在比例极限不明显的其它材料中, 屈服强度通常定义为引起0.2%的塑性变形(或者由设计师专门规定另一个值)所需要的应力(图1-2.1c)。

材料的抗拉强度 S_b 是最大的外力除以原始横截面积的值。这个强度与别的强度一样, 它的单位与应力相同。要特别注意抗拉强度是以原始截面为基准的。这一点很重要。因为延性

材料当载荷超过最大值时，它的横截面积还会有所减小。

在表 1-2.1 中，强度被描述为造成破坏的应力。然而很明显，破坏是有不同定义的。例如，在无线电发射塔中的角钢，使用时一旦发生弯曲便认为是破坏了，因为这可能引起塔的倒塌。既然弯曲意味着塑性变形，故工程师们在设计无线电塔的结构时要保证应力低于角钢的屈服强度 S_y 。然而，在制作无线电塔的缆绳时，要通过模具拉拔金属丝，此时塑性变形又是必不可少的。这个塑性变形不会造成钢绳的破坏，尽管它的应力超过了屈服强度。在这种情况下，设计计算中使用的正是钢丝在使用时所能承受的最大载荷（只要不断裂）。用抗拉强度 S 去除最大的载荷，工程师们就能得到钢绳免遭破坏所必须的横截面尺寸。它们是在任何可能的塑性变形发生以前的原始设计尺寸。

如有需要，工程师们还可以计算其真应力 σ ，它是外力除以实际面积的值。当然，对于已经塑性变形的试样来说，这个值是沿其长度方向变化的，并在颈缩区达到最大（图 1-2.2）。这说明断裂的真应力 σ_f 总是大于以原始截面为基准的断裂强度 S_f （参阅图 1-2.1c 和 1-2.1d）。真应力使我们能够分析材料在形变和破坏时的真实作用力；然而以原始截面为基准的标称应力对工程师却更加有用，因为他们必须以原始尺寸作为设计的基准。

硬度被定义为材料对压入其表面的抗力，如预期的那样，材料的硬度与强度有着密切的关系，如图 1-2.3 中所示。布氏硬度值（BHN）是用大的球形压头所形成的压痕面积来计算的硬度值。打压痕是用很硬的钢或碳化钨制成的球体在标准化的负荷下进行的。此外还有几种工程师们常用的硬度指标，其中之一是洛氏硬度（R）它与 BHN 有关，但用一个小的标准压头通过压痕深度来测定。对于不同硬度范围的材料可选用不同的洛氏硬度规范（相应地选择不同形状的压头和负荷）。

韧性 这是材料断裂时所需能量的度量（图 1-2.4）。它与强度显著不同，强度是使材料变形或断裂所需应力的度量，能量是力和距离的乘积，用焦耳或者英尺·磅来表示；它与应力-应变曲线下的面积有密切的关系。在强度相等的情况下，延性材料断裂时所需要的能量比脆性材料多，因此它的韧性也比脆性材料高。标准的夏氏冲击试验及埃左冲击试验是几种韧性测量方法中最常用的两种，两者的区别在于试样的形状和施加能量的方式不同。因为韧性还与应力集中情况有关，所以人们必须仔细地识别所用的试验方法。

学习辅导材料（应力-应变曲线） 读者如果对应力-应变曲线或有关术语有疑问，可以参阅“材料基础教程学习辅导材料”①一书。书中用载荷、应力、应变等术语详细地描述了材料的应力-应变曲线，此外还介绍了真应力和真应变作为选读。后者与详细讨论应变硬化计算的后续课程有着密切的关系。

例 1-2.1 在以下两种情况下，哪一种的应力较大？

(a) 截面为 24.6mm × 30.7mm (0.97in. × 1.21in.) 的铝棒承受载荷 7640kg，即 7500N

① “材料基础教程学习辅导材料”一书是麻省理工学院教材，艾迪生-韦斯利出版公司 1977 年出版。

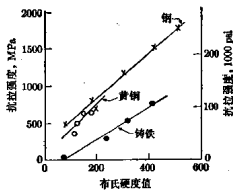


图 1-2.3 抗拉强度与布氏硬度值的关系，以钢、黄铜和铸铁为例

(或 16800lb),

(b) 圆截面直径为 12.8mm(0.505in.) 的钢棒承受载荷 5000kg (11000lb)

解:

$$\text{单位: } \frac{N}{(m)(m)} = Pa$$

$$\text{单位: } \frac{lb}{(in.)(in.)} = psi$$

计算:

$$a) \frac{(7640)(9.8)}{(0.0246)(0.0307)} = 100MPa$$

$$a) \frac{16800}{(0.97)(1.21)} = 14300psi$$

$$b) \frac{(500)(9.8)}{(\pi/4)(0.0128)^2} = 380MPa$$

$$b) \frac{11000}{(\pi/4)(0.505)^2} = 55000psi$$

注 牛顿 = ma = (kg)(9.8m/s²).

例1-2.2 一铜棒在变形前刻有 50mm (1.97in.) 长的标距线, 变形后标距线相距 59mm (2.32in.), 求应变。

解:

$$\text{单位: } \frac{(mm - mm)}{(mm)} = \frac{mm}{mm} \\ = \frac{\text{百分数}}{100}$$

$$\text{计算: } \frac{59 - 50}{50} = 0.18mm/mm \text{ (或 } 18\%)$$

注 用英制单位计算结果相同。

例1-2.3 设钢的平均弹性模量为 205000MPa (30000000psi),

今有钢丝直径为 2.5mm(0.1in.), 长为 3m(10ft), 受到 500kg (= 1100lb, 或 4900N) 的拉力, 问这根钢丝的伸长为多少?

$$\text{解: } \text{弹性模量} = \frac{\text{应力}}{\text{应变}} \quad \text{或} \quad \text{应变} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\text{单位: } m/m = \frac{N/m^2}{Pa} \quad in/in = \frac{lb/in^2}{psi}$$

计算:

$$\text{应变} = \frac{4900/(\pi/4)(0.0025)^2}{205000 \times 10^6} \quad \text{应变} = \frac{1100/(\pi/4)(0.1)^2}{30000000}$$

$$= 0.005m/m$$

$$= 0.005in/in$$

$$\text{伸长} = (0.005m/m)(3m)$$

$$\text{伸长} = (0.005in./in.)(120in.)$$

$$= 15mm$$

$$= 0.6in.$$



图1-2.4 韧性试验。试样(箭头所示)因摆锤冲击而断裂。断裂时所吸收的能量可以由摆锤所走过的弧线高度来计算
(The U. S. Steel Corp.)

·例1-2.4⊙ 铜丝的标称断裂强度为300MPa(43000psi)，断面收缩率为77%，求断裂时的真应力 σ_f 。

解： 根据原始截面积， A_0 ，

$$\frac{F}{A_0} = 300\text{MPa} \quad F = (300 \times 10^6 \text{N/m}^2) A_0$$

$$\sigma_f = \frac{F}{A_{ir}} = \frac{F}{(1 - 0.77) A_0} = \frac{(300 \times 10^6 \text{N/m}^2) A_0}{0.23 A_0} = 1300\text{MPa}$$

或

$$\frac{F}{A_{ir}} = \frac{(43000\text{psi}) A_0}{0.23 A_0} = 187000\text{psi}$$

注 真应变 ϵ 可以由横截面积尺寸得到。若设

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

假定体积为常数 $Al = A_0 l_0$ ，那么

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (1-2.2)$$

这是一个对所有应变都适用的真应变的定义，它与标距无关。

1-3 热学特性

热容量 区分材料的温度和它的热含量对于工程师和科学家来说是重要的问题。温度是热活动性的程度，而热含量却是热能。它们两者可以通过热容量联系起来。

在没有体积变化时，热容量 c 是每变化1°C时热含量的变化，通常在技术参数表中常以比热来代替热容量。材料的比热定义为该材料的热容量与水的热容量的比值，故若定义水的热容量为1 cal/g·°C (= 4.184 J/g·°C = 1 Btu/lb·°F)，人们就能用这种单位或者别的单位来进行热计算。

材料中各种不同的相变热是重要的，最熟悉的相变热是熔解热和蒸发热，它们分别是材料熔化和气化所需要的热量。在熔化和气化时材料内部的原子或分子结构发生了变化。以后，我们将研究材料在固态时可能出现的几种不同的结构变化，这些变化也使材料中的热含量发生变化。

热膨胀 材料在加热时通常会出现膨胀，这是由于原子的热运动加剧的结果。对于一级近似，长度的增加 $\Delta L/L$ 与温度的变化 ΔT 成正比：

$$\Delta L/L = \alpha \Delta T \quad (1-3.1)$$

进一步的考察表明线膨胀系数 α ，随温度的升高而略有增加，(图1-3.1) 20°C(68°F)的线膨胀系数列于附录C。

体膨胀系数 α_v 是联系体积膨胀 $\Delta V/V$ 和温度变化 ΔT 之间的参数，它们的关系与式(1-3.1)

⊙ 前面有黑点·的问题可按教师意图从略(见序言)，下同。

所示的相同，实际上 α_v 的值是 α_L 的三倍（见习题1-3.3b） \ominus 。

图1-3.1中膨胀系数的间断点是由材料内部原子排列的变化所引起的，具体来说，铜在1084.5°C(1984°F)时熔化，而铁原子在912°C(1673°F)时发生重排，近邻由八个（低于该温度）变化到十二个（高于该温度）。由于这样的结构变化对材料的工程性能有影响，故我们在以后几章内要讨论原子的排列。

热传导 热会通过固体发生传递，热传导系数 k 是热流 Q 和温度梯度 $\Delta T/\Delta x$ 之间的比例常数：

$$Q = k \left(\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (1-3.3)$$

热传导系数同样具有温度敏感性，但它却与热膨胀系数不同，在室温以上，这个系数是随着温度的升高而减少的（原因将在以后讨论）。图1-3.1中热传导系数间断点的出现是由于原子堆积的变化，而原子堆积的变化是伴随熔化和因温度变化引起的原子重排而发生的。

式(1-3.3)的关系为

$$\frac{\text{能量}}{\text{面积} \cdot \text{时间}} = k \left[\frac{\text{温差}}{\text{厚度}} \right]$$

因此热传导系数 k 的量纲可写成 $1/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})/(\text{C}/\text{mm})$ ，或者 $(\text{W}/\text{mm}^2)/(\text{C}/\text{mm})$ \ominus 。

例1-3.1 一根铝丝受34.5MPa(5000psi)的拉应力。问要得到同样的伸长需要升高多少温度？

解：从附录C中查出铝的弹性模量和线膨胀系数

$$\begin{aligned} \Delta L/L &= \sigma/E = (34.5 \times 10^6 \text{Pa}) / (70000 \times 10^6 \text{Pa}) \\ &= \alpha \Delta T = (22.5 \times 10^{-6}/\text{C})(\Delta T), \\ \Delta T &= 22^\circ\text{C} (= 40^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

注 温差 ΔT 也可以写成22K，因为绝对温度和摄氏温度的间隔是相等的。

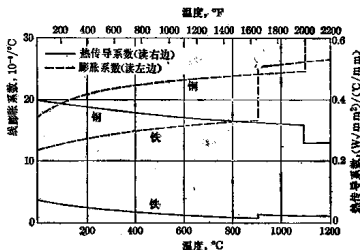


图1-3.1 热效应与温度的关系，铜在1084.5°C(1984°F)时有个间断点，这是由于熔化所造成的。铁在912°C(1673°F)时有个间断点，这是由于该温度下原子重新排列造成的，参见

第三章

\ominus 对于石墨、云母等各向异性（弹性能随晶向而不同）的材料，更一般的表达式是

$$\alpha_v = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z \quad (1-3.2a)$$

式中下标 x 、 y 、 z 表示三个坐标轴方向的线膨胀系数，当它们的值相等时，就象许多工程材料那样

$$\alpha_v = 3\alpha_L \quad (1-3.2b)$$

\ominus 遗憾的是在各种表格中所列的热传导系数的量纲并不总是一致。为了使英制单位与公制单位的值相互转换，本书附录C中备注上所列量纲与上述量纲始终保持一致。

例1-3.2 一钢索直径 2.8mm (0.11 in), 长 7.2m (23.6 ft), 受拉应力 31 MN/m^2 后再使温度升高 10°C 。问 (a) 在温度升高以前作用在钢索上的拉力是多少? (b) 温度升高以后, (如总长不变 ($\alpha_s = 11.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)) 作用在钢索上的力是多少?

解:

$$a) F_1 = (31 \times 10^6 \text{ N/m}^2) (\pi/4) (0.0028\text{m})^2 = 190\text{N}$$

$$\text{或 } F_1 = (4500 \text{ psi}) (\pi/4) (0.11 \text{ in.})^2 = 42.8 \text{ lb}_f$$

$$b) \text{ 写出平衡方程 } \alpha \Delta T + (\epsilon_s - \epsilon_t) = 0 = \alpha \Delta T + \Delta F / AE_s \\ - (F_2 - F_1) = \alpha \Delta T AE$$

从附录 C 中查出有关数据

$$F_1 - F_2 = (11.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}) (+10^\circ\text{C}) (\pi/4) (0.0028\text{m})^2 (205 \times 10^9 \text{ N/m}^2) \\ = 148\text{N}$$

$$F_2 = 42\text{N} \quad (\text{或 } 9.4 \text{ lb}_f)$$

例1-3.3 一厚 0.4cm 的不锈钢板, 一侧有循环热水, 另一侧有快速空气流动, 这样两个金属表面的温度分别为 90°C 和 20°C , 问每分钟通过该板传导了多少热量?

解: 从附录 C 中查出有关数据

$$Q = [0.015 (\text{J}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}) / (^\circ\text{C}/\text{mm})] (70^\circ\text{C}/4\text{mm}) (60\text{s}/\text{min}) \\ = 15.75 \text{ J}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}$$

注 以后我们将会了解到不锈钢的热传导系数和电导率比其它金属要低, 这是因为它含有大量的合金元素 (见第五章)。

1-4 材料对电场的响应[⊖]

电导率 (和电阻率) 在电场中, 金属和半导体能传导电荷。电导率 σ 取决于载流子数 n 、每个载流子携带的电荷数 q 和载流子的迁移率 μ 。电导率是电阻率 ρ 的倒数:

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = nq\mu \quad (1-4.1a)$$

$$\text{单位是: } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \left(\frac{\text{载流子}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{\text{C}}{\text{载流子}} \right) \left(\frac{\text{m/s}}{\text{V/m}} \right) \quad (1-4.1b)$$

在金属和以电子为载流子的半导体中, 每个载流子携带的电荷量是

$0.16 \times 10^{-18} \text{C}$, 或 $0.16 \times 10^{-18} \text{A} \cdot \text{s}$ 。迁移率是载流子的净速度或漂移速度, 它是由电场强度 \mathcal{E} 产生的, 漂移速度 \bar{v} 和电场强度 \mathcal{E} 的单位分别是 (m/s) 和 (V/m)。

$$\mu = \frac{\bar{v}}{\mathcal{E}} \quad (1-4.2)$$

迁移率通常用 $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的单位来表示。式 (1-4.1) 和 (1-4.2) 在第五章中讨论半导体时特别有用。

电阻率 ρ 是材料的特性, 因而它与材料的形状无关, 对于等截面材料, 电阻率可转化为

$$R = \rho L/A \quad (1-4.3)$$

⊖ 若您可以把电导率的内容推迟到第五章, 把介电常数的内容推迟到 7-6 节或 8-6 节。

其中 L 为长度, A 为横截面积。对于电阻 R 。工程师可利用物理学中关于电流 I (单位为安培) 与功率 P (单位为瓦) 的基本方程式, 即 $I = E/R$, $P = EI = I^2R = E^2/R = I^2/s$ 。

介电行为 绝缘体当然不能传导电荷, 但它们对电场并不是毫无反应的。我们可以这样来做一个试验: 把二块电极板分开一个距离 d , 并在它们之间施加一个电压 E , (图1-4.1 a), 此时电场强度 \mathcal{E} 是电位的梯度。

$$\mathcal{E} = \frac{E}{d} \quad (1-4.4)$$

在二块电极板间没有任何介质的情况下, 每块板上的电荷密度 \mathcal{Q} 正比于电场强度 \mathcal{E} , 对于单位电场强度 $1V/m$, 每平方米电极上有 $8.85 \times 10^{-12}C$ 的电荷

$$\mathcal{Q}_0 = (8.85 \times 10^{-12}C/V \cdot m) \mathcal{E} \quad (1-4.5)$$

对于单位电场强度这个电荷密度需要 55×10^6 个电子/米², 因为电子电荷是 $0.16 \times 10^{-19}C$ 。

假如在电极之间有材料 m , 如图1-4.1 所示, 电荷密度就从刚才的 \mathcal{Q}_0 增加到 \mathcal{Q}_m 。 \mathcal{Q}_m 与 \mathcal{Q}_0 之间的比值就称为电极间介电隔离材料的相对介电常数 κ

$$\kappa = \frac{\mathcal{Q}_m}{\mathcal{Q}_0} \quad (1-4.6)$$

在第七和第八章中, 相对介电常数对我们是很重要的, 在这二章, 我们将考虑电容器中应用的陶瓷和塑料的介电性能[⊖]。相对介电常数总是大于1的数, 因为当材料放入电场内, 无论是电子还是正负离子, 都会在材料内移动。

例1-4.1 有一直径为 0.9mm 的铜丝, 问 (a) 每英尺 (0.305m) 的电阻是多少? (b) 在 30m 长的铜丝两端施加 1.5V 的电压, 所消耗的功率是多少瓦特?

解: 从附录C, $\rho = 17\Omega \cdot m$

$$a) \quad R = (17 \times 10^{-9}\Omega \cdot m)(0.305m) / (\pi/4)(9 \times 10^{-6}m)^2 = 0.008\Omega$$

$$b) \quad P = \frac{E^2}{R} = \frac{E^2 A}{\rho L} = \frac{(1.5V)^2 \cdot (\pi/4)(9 \times 10^{-6}m)^2}{(17 \times 10^{-9}\Omega \cdot m)(30m)} = 2.8W$$

例1-4.2 某种含杂质的硅, 它的电阻率为 $0.03\Omega \cdot m$, 电荷迁移率为 $0.19m^2/V \cdot s$ (a) 问每 m^3 中有多少个电荷载流子? (b) 在厚度为 0.4mm 的硅片上施加 5mV 的电压, 其电荷载流子的漂移速度是多少? 作用零伏电压呢?

解: 根据式(1-4.1)和(1-4.2)

$$a) \quad = 1 / (0.16 \times 10^{-19}A \cdot s)(0.19m^2/V \cdot s)(0.03\Omega \cdot m) = 1.1 \times 10^{21}/m^3$$

b) 当外加电压为 5mV 时

⊖ 对于平板电容器, 电容值 C 由下列关系确定

$$C = \kappa(8.85 \times 10^{-12}C/V \cdot m)(A/d) \quad (1-4.7)$$

式中 A 是平板面积, d 是板间距。

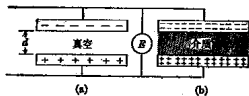


图1-4.1 电荷密度 \mathcal{Q} 与相对介电常数 κ 之间的关系。由于介质的存在, 使电容器所能容纳的电荷密度 \mathcal{Q}_m 以相对介电常数 κ 的比例增加: $\mathcal{Q}_m = \kappa \mathcal{Q}_0$ 。

$$\bar{v} = (0.19\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s})(0.005\text{V}/4 \times 10^{-6}\text{m}) = 2.4\text{m}/\text{s}$$

当外加电压为零时

$$\bar{v} = 0\text{m}/\text{s}$$

注：实际上电子运动在两种情况下都是有的。在电压为零时运动是混乱的，没有净的定向移动，随电场增大，净速度或漂移速度增加。

例1-4.3 一个6伏的灯泡使用16瓦的直流电。问每分钟通过灯丝的电子数是多少？

解：因为 $P = EI$

$$\text{电流} = 16\text{W}/6\text{V} \approx 2.7\text{A},$$

$$(2.7\text{A})(60\text{s}) \approx 160\text{A}\cdot\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{电子数} &= 160\text{A}\cdot\text{s} / (0.16 \times 10^{-18}\text{A}\cdot\text{s}/\text{电子}) \\ &= 10^{21} \end{aligned}$$

例1-4.4 二块电容器板(每板30mm×20mm)相距2.2mm平行放置，中间无任何介质。问要在电极板上产生 $0.24 \times 10^{-18}\text{C}$ 的电荷，需要加多少伏的电压？

解：用米为单位代入式(1-4.4)和(1-4.5)得到

$$\text{电压} = \frac{(0.24 \times 10^{-18}\text{C}) / (0.03\text{m})(0.02\text{m})}{(8.85 \times 10^{-12}\text{C}/\text{V}\cdot\text{m}) / (0.0022\text{m})} = 10\text{V}$$

1-5 性能 的 表示

定性信息 表示一个变量对有关性能的影响的示意图是将复杂的经验关系转变为定性关系时不可缺少的手段。如图1-5.1表明了混凝土的强度与加水量之间的关系。加水量越小，混凝土的强度越高。不过为了使混凝土可塑，加水量也不能太少。

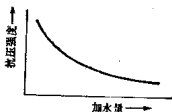


图1-5.1 两个变量间关系的示意图。混凝土的强度与加水量之间的关系。加水量为自变量

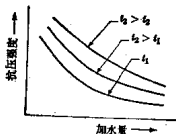


图1-5.2 三个变量间关系的示意图。混凝土的强度与时间 t 和加水量之间的关系

利用另外的参数，我们还可以示意表示其它的变量。图1-5.2把时间参数 t 加到图1-5.1中去。图1-5.2告诉我们(1)在加水量一定的情况下混凝土的强度随时间的延长而增加；(2)在时间相同的情况下，加水量越多，强度越小；(3)对于给定的强度，所加的水越少，所用的时间也越短。

示意图可以帮助工程师们预先确定，为要达到预期的结果，哪些量是可能控制的。有了这些资料，工程师们就能对他们在生产和使用中所用的材料预先作某些可能的修正。

定量数据 获得有关材料性能的定量数据是很重要的。从图1-5.3中，设计师们可以知道

当水与普通水泥的比值是 0.5 时, 混凝土可具有 33MPa(4800psi) 的抗压强度。然而如要使资料更完善, 则还应包括时间的参数以及水泥颗粒大小和温度等数据, 因为这些参数对定量关系都有影响。

数据的方差 任何实验室数据和生产数据都有一定的分布。图 1-5.4 表示了一种钢的五十个试样在 21°C(70°F) 冲击试验时所获得的散布。尽管试样大小和试验的手段在能确定的范围内都是一样的, 但这种现象还是会发生。冲击韧性的变化可能由下述几点原因所引起。(1) 制作试件的钢中有未测出的差别; (2) 试件准备过程中的细微差别; (3) 试验方法中的微小差别。

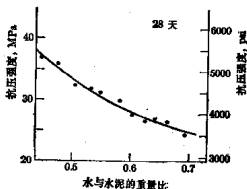


图1-5.3 定量数据。混凝土的强度与含水量的对应关系

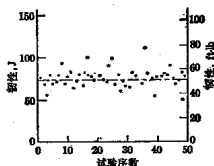


图1-5.4 数据的方差。汽车工程师协会的1040号钢在夏氏冲击试验(21°C)时的数据偏差, 所有的试验条件都是相同的

由于数据有这种值域, 故一般用平均值域中位数(中值)来表示试验结果, 在例 1-5.1 中列出了塑料的 21 个强度值, 它的平均值和中位数分别为 20.7MPa(3010psi) 和 20.9MPa(3030psi)。平均值和中位数彼此虽然很接近, 但它们之间还是有差别的, 这种情况下差别的来源是因为那些偏低的测量值更为分散的缘故。

只给出数据的平均值或中位数, 对于工程师和应用科学家们还是不够的。因为他们不能知道强度的值域; 为此他们要求给出标准差(SD)。标准差是数据散布的一个统计度量, 它由下式算出

$$SD = \sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} \quad (1-5.1) \textcircled{\ast}$$

式中 \bar{X} 是平均值, X_i 是单个试验值 (i 从 1 到 n)。实际上当足够多的数据服从正态分布规律时, 标准差的意义是: 大约有 2/3 的数据落在 $\pm 1SD$ 内, 95% 的数据落在 $\pm 2SD$ 内。

计算的精度 通常我们希望在计算性能时, 其精度与原始数据的精度一致。本书中, 原始数据有二或三位, 偶而有四位有效数字。这是对工业材料提供的典型数据。袖珍电子计算器中所显示的答案常常含有非有效数字。报告非有效数字的作法应当避免。最好是将最终答案(不是中间运算值)四舍五入到有效数字的位数, 它是受精度最低的非整数决定的(加一位) $\textcircled{\ast}$ 。

$\textcircled{\ast}$ 见前章中对记号 σ 的说明, 下同。

$\textcircled{\ast}$ 附加的一位数是它前面数字可能出现的误差值, 但对整数是明显的例外。例如当某人用一个精度为 1% 的磅秤来测定三口之家的平均体重时, 我们不能指望整数 3 来决定一个只有一位数的平均数。