

传感器技术与系统

李 川 李英娜 编著
赵振刚 张长胜



科学出版社

传感器技术与系统

李 川 李英娜 编著
赵振刚 张长胜

科学出版社

北 京

内 容 简 介

传感器集信息的感知、采集、转换、传输和处理等多功能于一身,是实现现代化测量和自动控制的主要环节,本书力图对其从原理、系统和应用等层次展开讨论。

原理篇主要包括:金属传感器(第2章)、半导体传感器(第3章)、光纤传感器(第4章)、生物传感器(第5章)、波式与场式传感器(第6章)。

系统篇主要包括:测量系统与数据分析(第7章)、微机电系统(第8章)、纳机电系统(第9章)、智能传感器(第10章)、传感器网络(第11章)。

应用篇主要包括:机械参量(第12章)、热工参量(第13章)、电磁参量(第14章)、化学参量(第15章)、物联网中的传感器技术与系统(第16章)。

本书可供从事检测、仪器、仪表、自动化、物联网等技术和应用研究的科研人员、工程技术人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术与系统 / 李川等编著. —北京: 科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047858-0

I. ①传… II. ①李… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 056880 号

责任编辑: 余 江 张丽花/责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨/封面设计: 迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张: 29 1/2

字数: 699 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

公元前 5 世纪, Protagoras 在《论真理》中提出人是万物的尺度, 把人作为衡量万物的标准。19 世纪, Mendeleyev 指出科学从测量开始; 王大珩先生强调仪器仪表是人类认识世界的工具。在 Nobel 物理学奖和化学奖中约 1/4 属测试方法和测量仪器, 1901 年, Roentgen 发现 X 射线, 可用于电离计、闪烁计数器和感光乳胶片等检测, 在医学上常用作透视检查, 工业中用来探伤; X 射线衍射法已成为研究晶体结构、形貌和各种缺陷的重要手段; 1979 年, Cormack 发明计算机控制的扫描层析诊断法, 产生了医用和工业用 CT 仪器, 能深入人体和物体内部进行观察; 1986 年, Ruska 发明透射电子显微镜, 分辨力可达 0.2nm, Binning 和 Rohrer 发明扫描隧道电子显微镜, 可观察和定位单个原子; 1991 年, Ernst 发明高分辨率核磁共振法, 产生了核磁共振波谱仪, 可完成分子成像, 为分子结构和分子运动的研究创造了条件。2002 年, Fenn 发明了电喷雾电离源, 促进了质谱技术在大分子分析领域, 特别是生物大分子领域的广泛使用; 田中耕一发明基质辅助激光解吸电离法, 可分离生物大分子。

测量技术指标是一个国家科学与技术学科水平的量化标志。测量范围方面, 电压纳伏至百万伏, 电阻超导约 $10^{14}\Omega$, 谐波到 51 次, 加速度为 $10^{-4}g\sim 10^4g$, 频率测量至 10^{12}Hz , 压力测量至 10^8Pa , 温度测量接近热力学温度 $0\sim 10^8\text{K}$ 等; 测量精度方面, 工业参数测量提高至 0.2% 以上, 航空航天参数测量达 0.05% 以上, 时间计量精度达 10^{-14} ; 测量灵敏度向单个粒子、分子、原子级发展; 可靠性方面, 一般可靠性为 $(2\sim 5)\times 10^4\text{h}$, 高可靠的为 $2.5\times 10^5\text{h}$; 稳定性方面, 高精度仪器小于 $\pm 0.01\%$, 一般仪器小于 $\pm 0.1\%$; 高温、高湿、高尘、腐蚀、振动、冲击、电磁场、辐射、深水、雨淋、高电压、低气压等条件下的环境适应性。

测量不但是检验科学理论的唯一标准, 其重要结果往往指明了理论前进的方向。2013 年, 因次原子粒子质量的生成机制理论, 促进了人类对这方面的理解, 并被 CERN 的大型强子对撞机的超环面仪器及紧凑 μ 子线圈探测器发现的基本粒子证实, Englert 和 Higgs 荣获 2013 年 Nobel 物理学奖。从而使粒子物理学中的标准模型成为一种被广泛接受的框架, 可描述强力、弱力及电磁力这三种基本力及组成所有物质的基本粒子, 基本粒子通过与遍布于宇宙的 Higgs 场耦合而获得质量。但 2015 年的 Nobel 物理学奖却授予了通过中微子振荡现象证实中微子有质量的梶田隆章和 McDonald, 这一结果表明标准模型不能完成关于宇宙基本组成的理论描绘。

目前, 计算机和各种智能计算单元的普及、信息互联技术的飞速发展, 促进了传感器互联和信息收集, 以及信息传感设备与互联网的进一步结合, 在互联网+、工业化 4.0 或工业互联网等国家技术创新计划的带动下, 传感器技术与系统将迎来前所未有的机遇与挑战。

本书受国家自然科学基金(No.51567013)、昆明理工大学信息检测与处理创新团队和昆

明理工大学研究生核心课程建设项目的资助。特别感谢天津大学张以谟老师的谆谆教诲和刘铁根老师的长期支持。在编写的过程中，还得到了昆明理工光智检测科技有限公司、云南航天工程物探检测股份有限公司和云南电网有限责任公司电力科学研究院等单位的支持和帮助，在此一并表示感谢。在长期的教学过程中，还要感谢一直与我教学相长的研究生和本科生，以及参与撰写的李英娜、赵振刚、张长胜等老师。

李 川

2016 年 1 月于昆明理工大学

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 信息传感与能量转换	1
1.3 传感材料的传感性能	2
1.4 传感材料的功能转换特性	22
1.5 传感器特性分析	27
1.6 测量	38
1.7 小结	41
参考文献	41

第一篇 原 理

第 2 章 金属传感器	46
2.1 引言	46
2.2 电阻式传感器	46
2.3 电感式传感器	49
2.4 电容式传感器	51
2.5 振弦式传感器	51
2.6 热电偶	52
2.7 磁敏式传感器	53
2.8 超导体传感器	57
参考文献	57
第 3 章 半导体传感器	59
3.1 引言	59
3.2 半导体的基础物性	59
3.3 电阻式半导体传感器	62
3.4 压电式半导体传感器	63
3.5 半导体 Hall 传感器	64
3.6 光电式半导体传感器	65
3.7 生化敏半导体传感器	73
3.8 陶瓷传感器	77
参考文献	84

第4章 光纤传感器	86
4.1 引言	86
4.2 光强调制	86
4.3 波长调制	90
4.4 频率调制	93
4.5 相位调制	95
4.6 光学层析成像	97
4.7 偏振调制	99
4.8 光栅调制	100
4.9 分布式光纤传感器	103
参考文献	108
第5章 生物传感器	112
5.1 引言	112
5.2 生物传感器的基本结构	112
5.3 酶传感器	118
5.4 微生物传感器	124
5.5 基因传感器	127
5.6 免疫传感器	131
5.7 仿生传感器	136
5.8 生物芯片	138
5.9 有机材料传感器	139
参考文献	141
第6章 波式与场式传感器	144
6.1 引言	144
6.2 激光全息干涉仪	144
6.3 红外传感器	148
6.4 微波传感器	150
6.5 核磁共振	152
6.6 核辐射传感器	153
6.7 超声波传感器	158
参考文献	161

第二篇 系 统

第7章 测量系统与数据分析	163
7.1 引言	163
7.2 测量系统	163
7.3 测量误差	178

7.4 测量不确定度	186
7.5 测量数据的分析与处理	203
参考文献	217
第 8 章 微机电系统	219
8.1 引言	219
8.2 微效应	220
8.3 微执行器	237
8.4 微传感器	242
参考文献	249
第 9 章 纳机电系统	252
9.1 引言	252
9.2 纳米科学与技术	252
9.3 纳米测量技术	258
9.4 纳米操作	270
9.5 纳米传感器	272
参考文献	279
第 10 章 智能传感器	281
10.1 引言	281
10.2 数据处理	282
10.3 智能信息处理	290
10.4 模糊传感器	298
10.5 智能变送器	303
10.6 虚拟仪器	305
10.7 软测量	307
10.8 多传感器的数据融合	313
参考文献	321
第 11 章 传感器网络	323
11.1 引言	323
11.2 计算机系统接口总线	323
11.3 计算机串行接口总线	324
11.4 工业以太网	327
11.5 标准仪器总线	328
11.6 现场总线	331
11.7 无线传感器网络	334
11.8 IEEE 1451 传感器网络	337
参考文献	340

第三篇 应 用

第 12 章 机械参量	342
12.1 引言	342
12.2 几何量与运动量	343
12.3 力学量	352
12.4 声学量	360
参考文献	363
第 13 章 热工参量	365
13.1 引言	365
13.2 温度	365
13.3 压力	372
13.4 流量和流速	377
13.5 密度	383
13.6 物位	387
13.7 黏度	389
参考文献	390
第 14 章 电磁参量	392
14.1 引言	392
14.2 电学单位	393
14.3 电参量	402
14.4 电磁兼容性	404
14.5 磁学单位	406
14.6 电磁场	410
14.7 光学	412
14.8 电离辐射	416
参考文献	417
第 15 章 化学参量	419
15.1 引言	419
15.2 化学计量	420
15.3 物理化学	420
15.4 无机分析测试技术	427
15.5 有机分析测试技术	431
15.6 气体成分	434
参考文献	440

第 16 章 物联网中的传感器技术与系统.....442

16.1 引言442

16.2 智能材料与结构443

16.3 工业446

16.4 生物医学453

16.5 自然生态453

16.6 人居环境454

参考文献459

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

传感器是以材料的电、磁、光、声、热、力等功能效应和功能形态变换原理为基础，综合物理、化学、生物工程、微电子、材料、精密机械、微细加工、试验测量等学科，所形成的专门学科领域。传感器是能感受规定的被测量，并按照一定规律转换成可用的输出信号的器件或装置^[1]，参见图 1.1-1，通常由敏感元件和转换元件组成，其中，敏感元件是直接感受被测量的部分，转换关系为 $y=\varphi(x)$ ；转换元件是将敏感元件输出量转换为适合传输和测量的信号部分，转换关系为本章末 $z=\psi(y)=\psi[\varphi(x)]=f(x)$ 。根据被测量类型，传感器可按四级分类(类、族、组、支)，参见本章末附图 1.1~附图 1.3^[1-3]。当传感器的输出为规定的标准信号时，称为变送器。测量或指示被测量值的装置称为计、表和仪(器)。变送器、记录仪、调节器、手操器、运算器、执行机构和控制阀可称为自动化仪表。

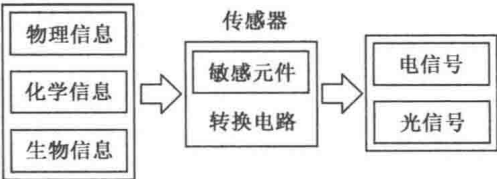


图 1.1-1 传感器的基本原理

1.2 信息传感与能量转换

传感器将电子(质量 $9.11\times10^{-31}\text{kg}$ ，单位负电荷 $1.6\times10^{-19}\text{C}$)、质子(质量 $1.7\times10^{-27}\text{kg}$ ，单位正电荷)和中子(质量略大于质子，电中性)视为主要作用粒子。原子(直径约 10^{-10}m)由电子和原子核(直径约 10^{-14}m)组成。化学反应就是通过各原子之间的价电子交换或共享，使原子达到稳定电子结构的过程。传感器材料的信号或能量的转化都与这种价电子的运动有关，参见表 1-1。

表 1-1 键性与物性的关系

项目	离子键	共价键	金属键
结构特点	无方向性或不明显，配位数大	方向性明显，配位数小，密度小	无方向性，配位数大，密度大
机械性质	强度和硬度高，劈裂性良好	强度高，硬度大	强度有差异，有韧性
热学性质	熔点高，膨胀系数小，熔体中存在离子	熔点高，膨胀系数小，熔体中有分子存在	熔点有差异，导热性好，液体温度范围宽
电学性质	绝缘体，熔体为导体	绝缘体，熔体为非导体	导体(自由电子)
光学性质	对红外吸收强，多是无色或浅色透明	折射率大，与气体的吸收光谱不同	不透明，有金属光泽

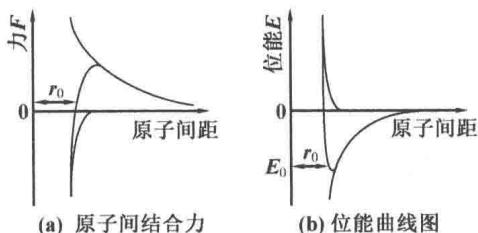


图 1.2-1 力和位能与原子间距的关系曲线

键的拆分和结合是敏感功能材料实施信号传输和功能变化的基本依据，价电子与价电子之间的相互作用可基本确定分子或晶体的主要物理性质。在固体中，原子间的结合力包括引力和斥力，参见图 1.2-1 (a)。在平衡位置 $r_0 \approx 0.3\text{nm}$ 时，合力为零，对应于图 1.2-1 (b) 中位能曲线的最低值。固体的弹性与图 1.2-1 中的引力、斥力曲线形状

有关。

若固体的弹性模量为 K ，温度上升到某一高度后，体积变化为 $\Delta V/V$ ，则该固体单位体积的弹性能 E_e 为

$$E_e = \frac{1}{2} K \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \quad (1.2-1)$$

设该固体的原子间距为 r ，且体积变化百分比很小，有 $\Delta V/V = 3\Delta r/r$ ，则

$$E_e = \frac{9}{2} K \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2 \quad (1.2-2)$$

当 $r=r_0$ 时，有

$$K = \frac{1}{9n_0} \frac{d^2 E}{dr^2} \quad (1.2-3)$$

原子间的化学反应，主要取决于原子的外层电子数和空间分布。在结晶体中，原子或离子的排列通常是使固体的自由能降到最低。无论离子键、共价键还是金属键，它们的发生及形成，主要是通过这种构成键的过程，使材料中所有的原子都能得到稳定的电子外壳。由于形成化学键是价电子的直接作用，因此原子参与键合的价电子越多，其键能就越高。

传感器在接触到被测量对象的原始信息后，根据传感材料的性质，按照一定的规律和比例转化，然后再以电的形式输出信号^[4-10]。传感器和被测物体之间信息的授受关系，也伴随着能量的授受关系(电能、热能、机械能间的物质效应)。传感器的能量变换以传达信息为目的，即灵敏地响应和有效地实现转换。为了减少干扰和其他副作用，常将转换的能量控制在最低极限。传感器把检测到的非电量信号变换成电信号，主要有如下四种类型。

(1) 守恒定理，包括能量守恒、动量守恒、电荷守恒等。转换的能量等于或小于原来的机械能，小于的情况主要是材料及传输的损耗。

(2) 传感器的工作原理服从相关的场与波动的规律，声、光、热、磁、应力等都是波动和场的形式存在，分别源于声波、光波、红外波动、热振波动、磁场、应力场。

(3) 传感器进行能量和信号的转换和传输是由组成传感器的物质完成的，物质由粒子构成，可用统计规律来理解和应用这些粒子所体现的物质性质。

(4) 传感器在运行中受组成物质的固有特性约束。这些特性规定了该物质所具有的各种变化规律和特性，这些定律包含着物质固有的物性常数和定义各种物性常数的公式。

1.3 传感材料的传感性能

传感器以材料的电、磁、光、声、热、力等效应和功能形态变换原理为基础^[4-15]。

1.3.1 力学性能

敏感材料的力学性能是指该材料在各种不同工作情况(载荷、速度、温度等)下,从开始受力(静力或动力)至被破坏的全过程所呈现的力学特征,例如,弹性模量、弹性极限、屈服点、强度极限、延展率、断面收缩率、硬度、韧性、持久极限和蠕变等。各类材料的弹性、强度、收缩和蠕变在很大程度上与化学组成、晶体结构、显微结构和宏观结构有关,也与外部条件(温度、环境介质、荷载、加载速度、时间)有关。

1. 弹性模量

对弹性体施加应力 σ_{xx} 时,沿平行方向和垂直方向分别产生伸长应变和收缩应变,即 ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} ,当这种变形服从 Hooke 定律时,称为弹性变形,即

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = E\epsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} = (E/\mu)\epsilon_{yy} \end{cases} \quad (1.3-1)$$

式中, E 是弹性模量(Young 模量); $\mu = \epsilon_{xx}/\epsilon_{yy}$ 是横向变形参数(Poisson 比)。

若对材料施加的是剪切应力或静压力,根据剪切 Hooke 定律,可得剪切模量 G 和体积弹性模量 K 为

$$\begin{cases} G = E/[2(1+\mu)] \\ K = E/[3(1+\mu)] \end{cases} \quad (1.3-2)$$

弹性模量反映了晶体成分和非晶成分的结合强度,结合能高的材料,其弹性模量一般也高。弹性模量 E 与剪切模量 G 、体积弹性模量 K 和 Poisson 比 P 一样,表现为各向异性。由于微观结构组成的不规则排列,多晶或非晶材料在大多数情况下不显示各向异性。

在多晶相材料中,弹性模量 E 是各相弹性模量的平均值,如两相体系为

$$E = E_1V_1 + E_2V_2 \quad (1.3-3)$$

式中, E_1 和 E_2 是相 1 和相 2 的弹性模量; V_1 和 V_2 是相 1 和相 2 的体积分量。若相 1 具有基质特征,相 2 作为分散相位于其中,根据 Hashin 理论,弹性模量为

$$E = E_1 \left\{ 1 + \frac{A(1-E_2/E_1)V_2}{1-(A-1)[E_2/E_1 + (1-E_2/E_1)V_2]} \right\} \quad (1.3-4)$$

式中, A 是常数。在孔隙率为 P 的类材料中,它对体系弹性模量 E 的影响可按式(1.3-4)导出的简化公式计算(适于低孔隙率和球性孔):

$$\begin{cases} E = E_0 e^{1-AP} \\ E = E_0 e^{-BP} \end{cases} \quad (1.3-5)$$

式中, E_0 是无孔时的弹性模量; P 是孔隙率; A 、 B 是常数。一般地,弹性模量随孔隙率的提高反而下降,这种关系也适合含有气泡的非晶体材料。大多数无机非金属材料传感器的弹性模量不仅取决于材料的密实性,也取决于微观结构的组成(包括带有相应应力的孔)以及前期工艺。例如,无机非金属晶体材料的弹性模量为 $(100 \sim 400) \times 10^3 \text{MPa}$; 金属的弹性模量为 $(50 \sim 400) \times 10^3 \text{MPa}$; 有机高分子的弹性模量为 $10^2 \sim 10^3 \text{MPa}$ 。

实际材料的弹性行为还出现与时间有关的附加变形(弹性滞后作用,非弹性变形),在

经历一定时间后才能达到平衡状态。非弹性变形的存在，在应力-应变试验时出现能量损失，在 σ - ϵ 曲线上有一个非常明显的滞后，参见图 1.3-1。非弹性变形的来源包括：结构组成单元的位移、点缺陷的移动、外来原子的扩散、晶界黏性滑移等。

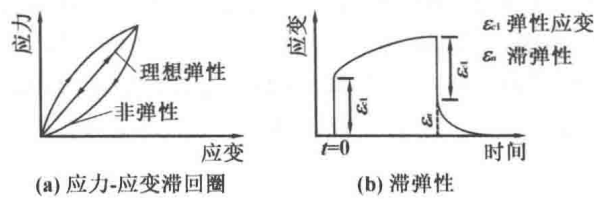


图 1.3-1 非弹性变形

2. 脆性

绝大多数无机非金属材料呈现脆性，到达弹性极限时直接被破坏，而金属会出现塑性变形，晶须的行为可能例外，参见图 1.3-2。若机械力的作用相对产生的应力分布弛豫时间很短，脆性表现得非常明显。脆性材料受力破坏时，一般无显著变形，而是突然断裂，其断裂面较粗糙，延展率和断面收缩率均较小。这时，机械能集中在一定的位置(应力峰)。在无机非金属材料中，缺乏位错、塑性变形和有效的裂纹障碍，应力不会消除，结果造成脆性断裂。而金属中，金属键和紧密球形堆积一般导致塑性变形。

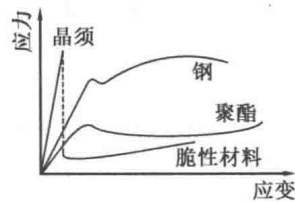


图 1.3-2 应力-应变曲线

脆性行为在一定条件下的无机非金属材料显示出不完全相同的特性，参见表 1-2。脆性只在材料中不出现由温度升高引起的塑黏性时才有意义。在一些纯晶体材料中，如果温度适当，在力的作用下会在断裂前出现流动现象。

表 1-2 影响材料脆性、半脆性和延展性的相关条件

力学性能	位错性质	单晶行为	多晶行为	断裂源
完全脆性	位错不运动	弹性直至断裂	弹性直至断裂	表面裂纹 内应力引起晶体内部断裂
部分脆性	位错运动 横向滑移困难 有限面滑移	塑性 屈服阶段长 部分延展性	弹性直至断裂	表面裂纹 颗粒界面滑移带碰撞导致劈裂
半脆性	位错运动 轻度横向滑移 有限面滑移	塑性 屈服阶段短 延展性好	断裂前部分塑性	表面裂纹
延展性	位错运动 横向滑移很少 滑移面无限	塑性 屈服阶段短 韧性断裂	塑性流动至韧性断裂	韧性断裂

3. 塑性

塑性是指材料受力时，当应力超过屈服点后，能产生显著的残余变形而不致断裂的性

质。残余变形被称为塑性变形。在金属晶格中，位错的迁移引起塑性流动，而不出现裂纹。在无机非金属材料的一些非常复杂的晶格中，位错由于受阻而产生裂纹；而在完全没有滑移面的无定形玻璃结构中，则不会出现引起塑性滑移的位错迁移。然而，在适当的条件下，无机非金属材料中也会有可延展性的迹象存在。由脆性到塑性的过渡取决于温度，参见图 1.3-3。含玻璃相的多晶材料随温度升高而塑性变形增加，这是由于玻璃在 T_{cnt} 温度点以上，开始出现黏性流动，造成塑性形变。

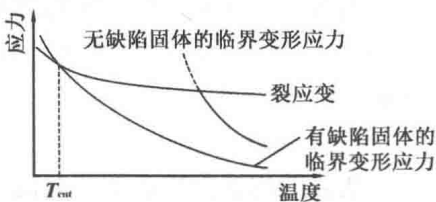


图 1.3-3 脆性向塑性转变与温度的关系

4. 韧性

韧性是指材料抵抗裂纹产生和扩展的能力，能表征材料断裂过程中单位体积材料吸收能量的量度。断裂过程中吸收的能量越多，材料的韧性越强；反之，断裂过程中吸收的能量越少，材料的韧性越低，抗断裂的能力越小。韧性可由拉伸应力-应变曲线下包围面积的大小来衡量。强度值高、延展性小的材料，应力-应变曲线下的面积小，则材料的韧性低；强度值低、延展性大的材料也是这样。因此，提高材料的韧性必须同时提高材料的强度和延展性。量度韧性的指标有两类：①冲击韧性，材料受冲击而破断的过程所吸收的冲击功的大小；②断裂韧性，材料裂纹尖端应力强度因子的临界值。

5. 抗力强度

力学强度是材料抵抗各种外来力学荷载的整体综合能力。抗拉强度是单位面积上导致材料结构组成单元之间的化学键分离和相互摩擦以及制造新表面的力。

理论强度 σ_{th} 约为弹性模量 E 的 1/10，定义为

$$\sigma_{\text{th}} = \sqrt{E\gamma/\alpha} \tag{1.3-6}$$

式中， γ 是表面能； α 是离子距离。实际上，某些单晶、晶须和完全没有缺陷的玻璃纤维的实际强度只有弹性模量的 1/100~1/10。理论强度和实际强度的差别主要是由于一定的应力集中在材料的某些局部区域。

1.3.2 热学性能

敏感材料的热学性能是材料在受热冲击时的热学特征。在热力学温度 0K 时，原子与原子之间、阳离子和阴离子之间的距离，几乎接近平衡位置，随时间变化也很小。当温度升高时，各粒子在原来位置上的振动逐渐变得激烈起来，振动增加到 10^{12} 次/s。随着温度的升高，振动的范围也逐渐加宽，能量也随之增大。传感器材料常需要传递热能信号或对热进行换能，相关的热性能包括比热容、热膨胀、热传递、热稳定性等。

1. 比热容

比热容是指物质加热升高 1K 时，单位体积所吸收的热量，相应的 1mol 物质所吸收的热量，称为克分子热容。克分子热容从 0K 开始在低温以 $(T/\theta_D)^3$ ($\theta_D=hv/k$ 是特征温度) 的速率上升；到达一定的温度后以 θ_D/T 的速率上升；当 $T \geq \theta_D$ 时，不再与温度有关，且服从于 Dulong-Petit 定律达到定值，约 $n \cdot 25\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (n 为化学分子式内的原子数目)。

2. 热膨胀

热膨胀是指温度改变 Δt 时，固体会在一定方向上使长度发生变化，其线膨胀系数为

$\alpha=\Delta L/(L\Delta t)$ ；或相对体积变化，其体膨胀系数为 $\beta=\Delta V/(V_0\Delta t)$ 。固体的可逆热膨胀产生基于组成单元的元素的非谐热振动，取决于原子级因素(键型、键强)和晶体结构(晶向、各向异性)。因热膨胀与比热容有关，所以膨胀系数会随温度上升而变大；在温度大于 θ_D 时与比热容一样保持常数。但实际上，缺陷的出现，不存在热膨胀系数为常数的温度区域。

3. 热传递

热能的传递方式通常有对流、传导和辐射三种形式。在固体内只有传导和辐射两种形式。材料内部热传导受到原子能级、微观结构、环境和温度等因素控制。特别是辐射传递仅在完全特定的条件下发生。

4. 热应力

在加热或冷却时，由于物体受热不均匀或各组分的膨胀及收缩不同，所产生的应力称为热应力。在无机非金属材料中，由于制造条件和使用条件等，特别是如果存在温度梯度，就会产生各种应力。由热引起的应力变化通常被划分为以下几种。

(1) 暂时热应力，在均质和非均质材料中均有这种应力状态，由于温度梯度的存在而产生，温度达到平衡时消失。

(2) 淬火或冷却应力。在快速冷却阶段，由于需要平衡温度分布而出现的应力。这种应力会长久保留在材料中，但可通过退火使其消失。

(3) 永久热应力。一般存在于非均质材料中。特别是一些复合材料，由于不同的变形系数使得材料很容易形成和保持应力状态。

均质的非金属固体材料被加热和冷却时由于导热能力较小而产生温度梯度，这使材料在各个部位的热膨胀和收缩不同，从而产生应力，如玻璃。当熔融和成形的玻璃迅速冷却时，表面层受拉应力，内部受压应力，参见图 1.3-4(a)；继续冷却，应力状态与此相反，参见图 1.3-4(b)；这种状态一直保持着，除非再转变温度进行退火，应力才会消除。应力消除的速率 $d\sigma/dt$ 与应力 σ 成正比，与弛豫时间 τ 成反比，即

$$-\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma}{\tau} \tag{1.3-7}$$

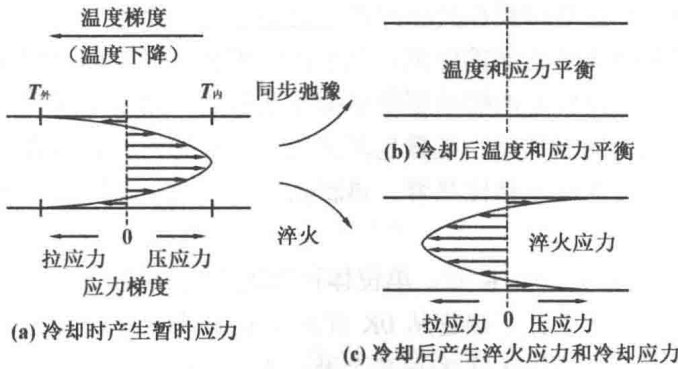


图 1.3-4 冷却过程中的温度和应力分布图

5. 热稳定性

热稳定性是材料抵抗温度变化的能力，金属材料在温度变化的情况下一般发生伸缩形

变，很少会被彻底破坏；非金属材料一般属于较脆性的弹性体，其热稳定性与热应力具有十分密切的关系。一种脆性材料突然遭受温度变化时是否破裂，取决于其是否能承受出现的应力，或者说这应力是否越过材料的抗拉强度(断裂强度)。影响热稳定性的因素很多：

$$R=\frac{\sigma}{\alpha E}\sqrt{\frac{\lambda}{C\rho_0}}$$

(1.3-8)

式中， R 是热稳定性系数； λ 是热导率； C 是热容； ρ_0 是密度。

通常，热稳定性表示为温度变化时不遭受破坏所能承受的最大温度差：

$$\Delta T_{\max}=\frac{3\sigma(1-\mu)}{2\alpha E}$$

(1.3-9)

在破坏性的裂纹扩散过程中， ΔT 值低时，剩余强度先是保持常数，接着在一个临界温度差突然直线下降，又一个阶段保持常数，最后随着温度差上升而连续下降，参见图 1.3-5。可通过提高抗拉强度、最大应变和导热能力提高热稳定性。

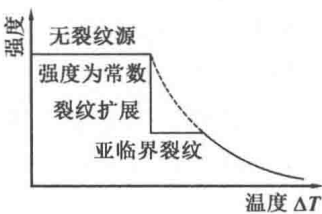


图 1.3-5 受热后材料的强度变化曲线

1.3.3 电导和介电特性

1. 导电能力与电导或电阻率

从电流导通的能力来看，材料一般可分为导体、半导体和绝缘体三类，参见表 1-3。

表 1-3 一些固体在室温(25℃)时的电阻率

金属	电阻率/(Ω·cm)	半导体	电阻率/(Ω·cm)	绝缘体	电阻率/(Ω·cm)
银	1.6×10 ⁻¹¹	锗	4.7×10 ⁻²	玻璃	10 ⁶ ~10 ¹⁵
铜	1.7×10 ⁻¹¹	硅	5	云母	9×10 ¹¹
铝	2.8×10 ⁻¹¹	磁铁矿 [*]	1.0×10 ⁻¹	金刚石	10 ¹⁴
铁	10×10 ⁻¹¹	铋化钢	2.0×10	氧化铝	10 ¹⁰
铅	20×10 ⁻¹¹			聚乙烯	10 ¹² ~10 ¹⁴

由于电子的热散射，金属的电阻率随温度的升高而增加。通常，金属的电阻率正比于热力学温度 T 。在低温时，许多金属材料的电阻率随温度 T^5 规律变化。根据 Madsen 定律，含少量杂质或缺陷的金属材料，其电阻率为 $\rho=\rho_0+\rho(i)$ ， $\rho(i)$ 为电阻率与温度有关的部分， ρ_0 为与温度无关的部分。受到杂质与缺陷的影响，当 T 趋于 0K 时仅剩部分剩余电阻。

半导体和绝缘体在整个禁带范围内存在电子的热激发，在大部分温度范围内，其电阻随温度的升高而降低。在绝对零度时，所有的绝缘体或半导体都具有极好的绝缘性能，只是当温度升高时，产生的热活化过程才使它们产生电的传导。由于绝缘体的禁带宽(如金刚石的禁带宽度为 6eV)，因此将其价带中的电子激发到导带就比较困难，在大多数情况下几乎不存在电导。

半金属(砷、锑、铋、硒、碲等)的电阻率比典型的金属低，但在半导体范围内，对温