



红外手册

第二分册

(光学材料与元件)



红外与激光技术编辑组



红 外 手 册

编辑： 红外与激光技术编辑组
出版： 天津市(15)215信箱
印刷： 天津新华印刷厂

第二分册 (全套共有四个分册)

N 1973

测 62

出版说明

一九七五年，红外情报与分析中心根据现代红外技术发展的需要，组织和筹备《红外手册》(The Infrared Handbook)的编辑出版工作。红外情报与分析中心主任George Zissis,与亚利桑那大学光学教授W.L.Wolfe,即一九六五年出版的《军事红外技术手册》(Handbook of Military Infrared)的编辑，作为《红外手册》的编辑，共同合作，经过广泛、深入的调查研究，多方征求意见，在《军事红外技术手册》(该手册国内尚无中译本)的基础上，作了较大的修改，充实了大量数据，增加了新的内容，编成了这本《红外手册》。这本手册于一九七八年在美国出版，去冬引入我国，是目前红外学科领域中最新的一本参考书和必备的工具书。

为了及时地把这本手册推荐给我国从事红外工程技术设计、科教人员，我们全文翻译了这本手册，内部出版；考虑到使用方便，在译本中，根据全书的自然章节，拟分四分册出版：

- 第一分册： 辐射理论与大气传输
(即原手册的1-6章)
- 第二分册： 光学材料与元件
(即原手册的7-10章)
- 第三分册： 红外探测器
(即原手册的11-15章)
- 第四分册： 红外系统
(即原手册的16-25章)

参加第二分册翻译、校对的有金国祥、史长清、郑刚、李玉民、吴兆庆、郭明源、杨世华、马天一、陈兴一、陆荣铿、张秀媚、龚琰民等同志。整个分册由丁继增同志审订。

红外技术涉及的专业面很广，参加译、校和审订者的专业、外文水平有限，在译本中难免有谬误之处，敬请广大读者批评指正。

《红外与激光技术》编辑组

一九八〇年五月

红 外 手 册

第 二 分 册

目 录

第七章	光学材料·····	(1)
第八章	光学设计·····	(103)
第九章	光学元件——透镜和反射镜·····	(131)
第十章	光机扫描技术和装置·····	(166)

第七章 光学材料

目 录

7·1 引 言	(3)
7·1·1 符号、名称和单位	(3)
7·2 特性说明	(3)
7·2·1 非吸收材料的反射和透射	(3)
7·2·2 吸收	(7)
7·2·3 散射	(8)
7·2·4 反射和吸收材料的透射	(8)
7·2·5 折射率	(9)
7·2·6 热性能	(10)
7·2·7 德拜 (Debye) 温度	(10)
7·2·8 弹性模量	(10)
7·2·9 工程机械性能	(11)
7·2·10 热力学关系式	(12)
7·2·11 介电常数和损耗角正切	(12)
7·2·12 硬度和显微硬度	(13)
7·2·13 化学及其有关特性	(13)
7·3 简要数据	(14)
7·3·1 透射区	(14)
7·3·2 折射率	(15)
7·3·3 色散	(15)
7·3·4 介电常数	(16)
7·3·5 溶解温度、比热及热导率	(16)
7·3·6 热膨胀	(16)
7·3·7 德拜温度	(16)
7·3·8 弹性系数	(26)
7·3·9 工程弹性模量	(28)
7·3·10 硬度	(28)
7·3·11 溶解度、分子量和比重	(28)

7.4	选用特性参数的详细值	(33)
7.4.1	透射率详细图	(33)
7.4.2	折射率	(38)
7.4.3	吸收值	(62)
7.4.4	反射镜	(63)
7.4.5	某些红外粘结材料的光学特性	(64)
7.4.6	镜坯材料的特性	(65)
7.5	光学材料加工	(67)
7.6	窗口设计——平板变形	(80)
7.7	干涉滤光片	(81)
7.7.1	引言	(81)
7.7.2	术语	(81)
7.7.3	干涉滤光片的一般原理	(82)
7.7.4	长波通干涉滤光片	(84)
7.7.5	短波通干涉滤光片	(84)
7.7.6	带通干涉滤光片	(84)
7.7.7	“方带”干涉滤光片	(85)
7.7.8	滤光片矩阵	(85)
7.7.9	赫平 (Herpin) 等效膜层	(86)
7.7.10	类似于传输线的理论	(86)
7.7.11	入射角效应	(87)
7.7.12	会聚及发散光束效应	(88)
7.7.13	温度效应	(88)
7.7.14	基底和膜层	(89)
7.8	克里斯坦森 (Christiansen) 滤光片	(89)
7.9	选择性反射滤光片	(91)
7.10	选择性折射滤光片	(92)
7.11	偏振干涉滤光片	(92)
7.12	圆形可变滤光片	(93)
7.12.1	圆形可变干涉滤光片	(93)
7.12.2	圆形中性可变密度滤光片	(93)
7.13	市售滤光片	(94)
7.14	吸收滤光片	(99)
7.15	参考资料和文献目录	(99)
7.15.1	参考资料	(100)
7.15.2	文献目录	(101)

第七章 光学材料

7.1 引言

7.1.1 符号、名称和单位 表 7-1 列出了适合于本章使用的各种符号, 名称以及统一公式。

7.2 特性说明

本节具体涉及光学材料的各种特性及其用途, 第7.3节列出数据表。

7.2.1 非吸收材料的反射和透射 辐射光的反射一般包含偏振和相位场分量。本节用振幅和辐射通量参数给出偏振光和非偏振光的透射和反射分量的表示式。

图7-1示出单表面的反射和透射。在表7-2、表7-3、表7-4, 以及在图7-2中, 给出了各个量之间的关系式, 包括在单一介质(一般是空气)中平面平行板的反射特性、吸收特性和透射特性。也可参见图7-3。假定偏振光束入射在平板上。表7-5列出它的反射率和透射率。

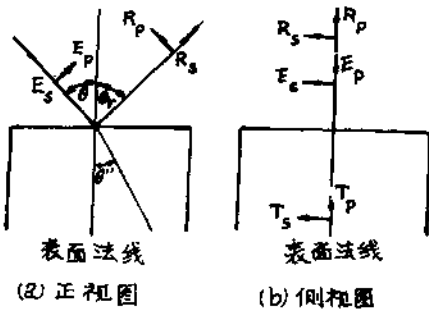


图 7-1 光反射和折射几何图形。画出正视图和侧视图是为了示出入射平面(与正视图的纸平面一致)和电矢量在透射和反射前后的不同方位。

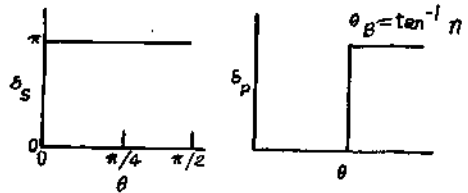


图 7-2 反射和入射电磁场之间的相位关系。布卢斯特角以 θ_B 表示。

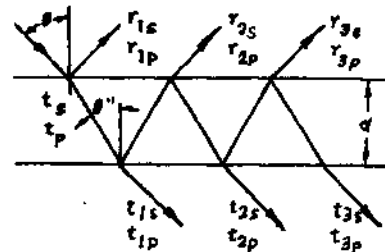


图 7-3 平面平行板中的多次反射。辐射光以角度 θ 入射并以 θ' 折射。第一次反射与单表面的相同且不加指数。没有示出电矢量方位。

表7-1 符号、名称、单位

符 号	名 称	单 位
A	面积; 各向异性因数	米 ² ; —
BRDF	双向反射率分布函数	球面度 ⁻¹
c	光速	米秒 ⁻¹
c_L	声波的纵向速度	米秒 ⁻¹
c_T	声波的横向速度	米秒 ⁻¹
c_p	等压比热	焦耳 ⁻¹ K ⁻¹
c_v	等容比热	焦耳 ⁻¹ K ⁻¹
d	板厚	米
dW	功的增量	牛顿米
E_p	平行入射平板的入射电场的振幅	伏米 ⁻¹
E_s	垂直入射平板的入射电场的振幅	伏米 ⁻¹
e	电子电荷	库仑
g	衰减常数	秒 ⁻¹
h	普朗克常数	焦耳秒
j	$\sqrt{-1}$	—
k_a	线性吸收系数	米 ⁻¹
k_{at}	原子吸收系数	—
k_B	波耳兹曼常数	瓦
k_o	浓度吸收系数	(大气压厘米) ⁻¹
k_m	质量吸收系数	米 ⁻³
k_{mol}	分子吸收系数	—
k_T	等温压缩	米K ⁻¹
l	长度	米
m	折算质量	克
N	每晶胞振子数	—
n	折射率	—
N_A	阿弗伽德罗数	摩尔 ⁻¹
N_m	原子数	—
n_e, n_o	非常光和寻常光折射率	—
n_i	i 种材料的折射率	—
$n(v)$	每单位体积的模数	米 ⁻³
P_i	第 i 位置的功率	瓦
Q	热量	焦耳
R	普适气体常数; 电阻	焦耳K ⁻¹ 摩尔 ⁻¹ ; 欧姆
r	每摩尔原子数	摩尔 ⁻¹
R_p	平行入射平面的反射电场的振幅	伏米 ⁻¹
R_s	垂直入射平面的反射电场的振幅	伏米 ⁻¹
r_p	R_p/E_p 为在平行方向上偏振辐射的振幅反射比	—
r_s	R_s/E_s 为在垂直方向上偏振辐射的振幅反射比	—
S	熵	瓦
T	温度	K, °C
T_p	平行于入射平面的透射电场的振幅	伏米 ⁻¹
T_s	垂直于入射平面的透射电场的振幅	伏米 ⁻¹
t_g	隙厚或层厚	米
t_p	T_p/E_p	—
t_s	T_s/E_s	—

续表

符 号	名 称	单 位
u	焓或内能	焦耳
V	体积	米 ³
V_c	原晶胞体积	米 ³
X	沿光束的距离	米
x	$h\nu/k_B T$	—
x_{ij}	应用强度	牛顿米 ⁻²
z	原子数	—
α	热膨胀, 偏振度	米K ⁻¹
β	体膨胀	米 ³ K ⁻¹
γ	泊松比	—
δ	相位关系或相角, 形变	—; 米
ϵ_0	真空介电常数	法
ϵ_0	低频介电常数	法
ϵ_ω	高频介电常数	法
θ_B	偏振角或布卢斯特角	弧度
θ	入射角	弧度
θ_D	德拜温度	K
θ_c	全反射临界角	弧度
θ_r	反射角	弧度
θ''	折射角	弧度
κ	消光系数	—
λ	辐射波长	米
μ	偶极矩	库仑米
ν	频率	秒 ⁻¹ , 赫
$\tilde{\nu}$	波数, $1/\lambda$	—
ν_D	最高限声频	秒 ⁻¹ , 赫
ρ_p	$ \tilde{r}_p ^2 = r_p r_p^*$; 等子在平行方向上偏振辐射的反射率或反射强度	—
ρ_s	$ \tilde{r}_s ^2 = r_s r_s^*$; 等子在垂直方向上偏振辐射的反射率或反射强度	—
ρ_0	电阻率	欧姆, 厘米
σ	工程强度; 热导率	牛顿米 ⁻² ; 瓦米 ⁻¹ ℃ ⁻¹
σ_0	低频电导率	姆欧米 ⁻¹
σ_ω	高频电导率	姆欧米 ⁻¹
τ_p	$ \tilde{t}_p ^2 = t_p t_p^*$	—
τ_s	$ \tilde{t}_s ^2 = t_s t_s^*$; 基底透过程	—
\dot{Q}	辐射通量, 辐射功率	瓦
ψ	光学相位	弧度
ω	角频率	秒 ⁻¹
ω_c	纵向晶格模型的角频率	秒 ⁻¹
ω_n	自然晶格频率	秒 ⁻¹
ω_p	横向晶格模型的角频率	秒 ⁻¹

表7-2 电介质的单表面反射关系式

类 型	公 式	说 明
角关系	$\theta_r = \theta$ $n \sin \theta = n_s \sin \theta''$	斯涅耳定律 斯涅耳定律
反射波振幅比	$\tilde{r}_s = r_s e^{j\delta_s} = \frac{\tilde{R}_s}{\tilde{E}_s}$ $\tilde{r}_p = r_p e^{j\delta_p} = \frac{\tilde{R}_p}{\tilde{E}_p}$	定义 定义
反射波振幅比	$\frac{\tilde{R}_s}{\tilde{E}_s} = \frac{\sin(\theta - \theta'')}{\sin(\theta + \theta'')}$ $\frac{\tilde{R}_p}{\tilde{E}_p} = \frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')}$	电介质菲涅耳定律 电介质菲涅耳定律
透射波振幅比	$\tilde{t}_s = t_s e^{j\delta_s} = \frac{\tilde{T}_s}{\tilde{E}_s}$ $\tilde{t}_p = t_p e^{j\delta_p} = \frac{\tilde{T}_p}{\tilde{E}_p}$	定义 定义
透射波振幅比	$\frac{\tilde{T}_s}{\tilde{E}_s} = \frac{2\sin\theta'' \cos\theta}{\sin(\theta + \theta'')}$ $\frac{\tilde{T}_p}{\tilde{E}_p} = \frac{2\sin\theta'' \cos\theta}{\sin(\theta + \theta'') \cos(\theta - \theta'')}$	电介质菲涅耳定律 电介质菲涅耳定律
垂直偏振的反射波振幅比	$\tilde{r}_s = \frac{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} - n \cos \theta}{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + n \cos \theta}$	只用入射角表示的非涅耳定律
垂直偏振的透射波振幅比	$\tilde{t}_s = \frac{2n \sin \theta}{n \sin \theta + (n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}$	只用入射角表示的非涅耳定律
平行偏振的反射波振幅比	$\tilde{r}_p = \frac{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \sin \theta - n \sin \theta \cos \theta}{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \sin \theta + n \sin \theta \cos \theta}$ $= \frac{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \cos \theta - n \sin \theta}{(n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \cos \theta + n \sin \theta}$	只用入射角表示的非涅耳定律 只用入射角表示的非涅耳定律
平行偏振的透射波振幅比	$\tilde{t}_p = 2n_1 \sin \theta \times$ $[(n \sin \theta + (n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2})^{-1} \times$ $[(n \sin^2 \theta + (n_1^2 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2})^{-1}]$	只用入射角表示的非涅耳定律

表7-3 单表面反射和透射强度的关系式

类 型	公 式	说 明
功率反射比	$\rho_s = \tilde{r}_s ^2 = \tilde{r}_s \tilde{r}_s^*$	定义
功率反射比	$\rho_p = \tilde{r}_p ^2 = \tilde{r}_p \tilde{r}_p^*$	定义
功率透射比	$\tau_s = \tilde{t}_s ^2 = \tilde{t}_s \tilde{t}_s^* = -\frac{(1 - \rho_p) \cos \theta}{n \cos \theta_s}$	定义
功率透射比	$\tau_p = \tilde{t}_p ^2 = \tilde{t}_p \tilde{t}_p^* = \frac{(1 - \rho_s) \cos \theta}{n \cos \theta_s}$	定义

表7-4 电介质单表面反射和透射的相位关系

$\delta_s = 0^\circ,$	$\theta < \theta_C$
$\delta_s = \frac{2 \tan^{-1}(n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}}{\pi \cos \theta},$	$\theta > \theta_C$
$\delta_p = 180^\circ,$	$\theta < \theta_B$
$\delta_p = 0^\circ,$	$\theta_B < \theta < \theta_C$
$\delta_p = \frac{2 \tan^{-1} n (n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}}{\cos \theta}$	

表7-5 两侧介质相同的平面平行板中的振幅表示式

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{ms} &= -t_s t_{sr} r_s^{2(m-1)} e^{j2(m-1)\phi} \\ \tilde{r}_{mp} &= -t_p t_{pr} r_p^{2(m-1)} e^{j2(m-1)\phi} \\ \tilde{t}_{ms} &= t_s t_{sr} r^{2m-1} e^{j(2m-1)\phi} \\ \tilde{t}_{mp} &= t_{ms} [\cos(\theta - \theta'')]^{-2} e^{j(2m-1)\phi} \end{aligned}$$

式中 t_s 和 t_p = 单表面透射

t_{sr} 和 t_{pr} = 单表面透射 t_s 和 t_p , 且分别可用 θ 和 θ'' 互换

m = 从 2 开始的反射或透射序数

ϕ = 光学相位 = $(2\pi n d \sec \theta'') \lambda^{-1}$

表7-6 在浸没于单一介质中的平面平行板内多次反射后的反射和透射的振幅和

$$\begin{aligned} \sum \tilde{r}_s &= \tilde{r}_s - \frac{t_s t_{sr} r_s}{1 - r_s^2 e^{2j\phi}} & \sum \tilde{t}_s &= \frac{t_s t_{sr} e^{j\phi}}{1 - r_s^2 e^{2j\phi}} \\ \sum \tilde{r}_p &= \tilde{r}_p - \frac{t_p t_{pr} r_p}{1 - r_p^2 e^{2j\phi}} & \sum \tilde{t}_p &= \frac{\tilde{t}_s}{\cos^2(\theta - \theta'')} \end{aligned}$$

求和可得到总的反射和透射。 r_s 和 r_p 的形式相同, 表7-6列出它们的方程式。

7.2.2 吸收 一光束经过吸收和反射后, 失去部分能量, 其最简易表示式是指数形式

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -k_a dx \quad (7-1)$$

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-k_a x) \quad (7-2)$$

式中 Φ = 光束在 x 点的光通量

x = 从初始光束到研究点的距离

Φ_0 = 初始光束的光通量

k_a = 吸收系数

吸收是波长的函数。大多数情况下是依据材料样品是波长的函数通过试验求得 k_a 的。列举出的单位是厘米⁻¹, (大气压厘米)⁻¹, 克/升, 分贝/公里, 百万分之一/厘米。这能量损失也用方程 (7-18) 规定的消光系数 κ 表示。

(1) 质量吸收系数 k_m , 等于线性 (寻常见) 吸收系数除以材料质量, 系指一克材料在光束单位截面上所吸收的能量。

(2) 原子吸收系数 k_{at} , 等于 α_m 乘以吸收体的一个原子质量 (等于原子重量除以阿弗伽德罗数, 6.02×10^{23})。

(3) 分子吸收系数 k_{mol} , 等于 α_m 乘以吸收体的一个分子质量 (等于分子重量除以阿弗伽德罗数)。

(4) 浓度吸收系数 k_c 的单位一般是大气压厘米⁻¹, 表示每单位路程长度和分压力的吸收量。

7·2·3 散射 第四章中已讨论了散射机理。光学材料的散射, 一般可用指数表示式来计算:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-k_s x) \quad (7-3)$$

除了 k_s 以外, 上式各个项都与方程 (7-2) 相同, k_s 是散射系数, 单位是厘米⁻¹。

7·2·4 反射和吸收材料的透射 图7-4是入射在平面平行板上、光通量为 Φ_0 的准直非偏振光的一般示图。示出入射光束, 面光束的整个相继路程只用一根光线表示。一般说来, 光束的全部入射功率都被反射、吸收和透射, 不计及任何偏振特性。 Φ_i 值表示光束所示位置的光通量。因此, 对于一次通过表面或单次反射, 功率的反射系数可给定为:

$$\rho_1 = \frac{\Phi_{R1}}{\Phi_0} = \text{单表面反射系数} \quad (7-4)$$

$$\tau_1 = \frac{\Phi_{T1}}{\Phi_0} = \text{单表面 (功率) 透射比} \quad (7-5)$$

$$\tau_i = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = e^{-k_a} = \text{内透射比 (一次通过)} \quad (7-6)$$

$$\tau_{ext} = \frac{\Phi_{T1}}{\Phi_0} = (1 - \rho_1)^2 \tau_1 = \text{外透射比} \quad (7-7)$$

对于无穷次通过, 其表示式为

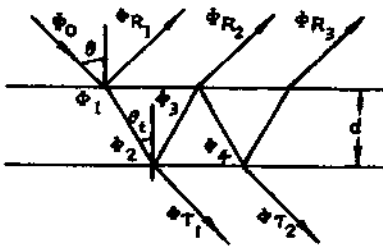


图 7-4 以一个角度入射在平面平行板上的光束之几何图形和能量关系。

$$\tau_\infty = \frac{(1 - \rho_1)^2 \tau_i}{(1 - \rho_1^2 \tau_i^2)} \quad (7-8)$$

$$\rho_\infty = \rho_1 + \frac{\rho_1 \tau_i \tau_i (1 - \rho_1)^2}{1 - \rho_1^2 \tau_i^2} \quad (7-9)$$

$$\alpha_\infty = \rho_1 + \frac{\tau_i \tau_i}{1 - \rho_1^2 \tau_i^2} \quad (7-10)$$

如果在路程中没有吸收, 其透射变为

$$\tau_\infty = \frac{(1 - \rho_1)^2 \tau_i}{1 - \rho_2 \tau_i^2} \quad (7-11)$$

对于垂直入射和无吸收时, 几个适宜的量是:

$$\rho_1 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (7-12)$$

$$\tau_1 = \frac{4n}{(n + 1)^2} \quad (7-13)$$

$$\tau_{\infty} = \frac{2n}{n^2 + 1} \quad (7-14)$$

许多通用红外光学材料的反射和透射数据分别在第7·3·1节、第7·4节以及在图7-5和图7-8到图7-29中给出。

7·2·5 折射率 材料的折射率可定义为真空中光速与材料中光速之比，还可以规定为一种复量

$$\hat{n} \equiv \frac{c}{v} \tilde{n} \equiv n - jk \quad (7-15)$$

折射率值随波长和温度而变化。波长和温度的变化是敏感的。折射率也随压力而变化，但对每一种固体材料，这种变化是很缓慢的。折射率值变化的基本方程是从偶极子的衰减谐振运动或相同电荷分布的微分方程推导来的^[7-1]，其结果是：

$$n^2 - \kappa^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \left\{ \frac{\omega_n^2 - \omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 g^2} \right\} \quad (7-16)$$

$$2n\kappa = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{\omega g}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 g^2} \quad (7-17)$$

式中 N = 每晶胞原子数

n = 实际折射率

κ = 消光系数（由于吸收所致）

ω_n = 自然晶格振动（角）频率

ω = 光学（角）频率 = $2\pi\nu$ 弧度⁻¹

ϵ_0 = 真空介电常数

g = 衰减常数

m = 偶极子的折算质量

这种简便分析表明，自由载流子的吸收与波长的平方成正比。当光学频率 ω 接近自然频率 ω_n 时，束缚电荷呈现出谐振，这时，它的消光系数给定为

$$2n\kappa = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega g} \kappa^2 = -\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \frac{1}{\omega g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7-18)$$

作者使用了许多方程来表示 n 随 λ 的变化，在适宜给出的地方都作了说明。

但还没有力求取得折射率与温度有关的回归近似方程。

在多数反射系数和透射比方程中，都用复折射率，例如，垂直入射的反射率可给定为：

$$\rho = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 = \frac{(n^2 - 1)^2 + \kappa^2}{(n^2 + 1)^2 + \kappa^2} \quad (7-19)$$

截止频率大约等于晶体的自然谐振，接近于色散方程所描述的谐振频率。如果 ω_0 和 ω_l 是横波和纵波光学模型的频率，则

$$\omega_0^2 = \omega_l^2 \left(\frac{\epsilon_{\infty}}{\epsilon_0} \right) \left(\frac{\epsilon_0 + 2}{\epsilon_{\infty} + 2} \right) - \frac{4\pi(Ze)^2}{3mV_c} \left(\frac{\epsilon_{\infty} + 2}{3} \right) \quad (7-20)$$

式中 Ze = 有效电荷

m = 折算质量

ϵ_{∞} , ϵ_0 = 分别为高低频的介电常数

V_0 = 原(晶)胞体积

在第7·3·2节和第7·3·3节的图7-6和图7-7以及在第7·4·2节的图7-30到图7-37和表7-15到表7-52中,分别给出了折射率数据及色散方程。

7·2·6 热特性 虽然几乎各种材料的每一种物理特性都与其温度、比热、热导率有关,然而,热膨胀与温度或加热的变化所引起的反应有更直接的关系。在逻辑上包括到的其它特性是溶解或软化温度,即发生某种变态的温度和与这些变化有关的加热。

比热与热容量紧密相关。热容量是使单位质量的物质温度升高一度所需的热量,常用单位是卡克 $^{-1}$ K $^{-1}$,或英热单位磅 $^{-1}$ °F $^{-1}$ 。材料的比热是其热容量与水的热容量之比,因此单位为无量纲。

线性热膨胀系数是温度变化一度每单位长度杆条的长度增量,量纲是度的倒数。因为膨胀通常是温度的函数,它可以用多项式形式给定为

$$\alpha = A + BT + CT^2 \quad (7-21)$$

这三项通常都是一种充分近似,面积和体积膨胀表明恰好是2和3倍于这个值。

热导率是对热沿物体传导时的一种方便衡量手段。热流与面积、温差以及时间成正比,而与长度成反比。热导率 σ 是由热速率方程确定的:

$$\dot{q} = \frac{\sigma A}{l} \Delta T \quad (7-22)$$

式中 $\dot{q} = \partial Q / \partial t$ = 热速率或功率

A = 面积

l = 长度

σ = 热导率

ΔT = 温差

注意,这个 σAl^{-1} 称为热导, σ 的量纲可以是卡厘米 $^{-2}$ 厘米 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 秒 $^{-1}$,或卡厘米 $^{-1}$ 厘米 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 秒 $^{-1}$,或英热单位英尺 $^{-1}$ °F $^{-1}$ 秒 $^{-1}$,或者瓦米 $^{-1}$ °C $^{-1}$ 。

第7·3·5节和第7·3·6节中的表7-8和7-9分别给出了比热、热导率和热膨胀数据。

7·2·7 德拜(Debye)温度 德拜特征温度 θ_D 可以定义如下:

$$\theta_D = \frac{h\nu_D}{k_B} \quad (7-23)$$

第7·3·7节中的表7-10给出了许多通用红外光学材料的德拜温度。

7·2·8 弹性模量 在衡量机械特性的几个重要量当中,最基本的是弹性常数 c_{ij} 、 s_{ij} 以及实际实用的杨氏模量 E ,压缩系数、破裂模量及硬度的各种表示式,加莫氏标度、克氏、洛氏、维氏硬度值等。

在各节的数表中列出的杨氏模量值是用几种方式中的一种方式确定的。优选值是从伸缩测量中得到的值。在测量中用的试验方法与杨氏模量定义所表示的伸延方法极一致。然而,对多数光学材料来说,在作伸、缩试验时,材料发生劈裂,所以很不容易取得这种数据。杨氏模量也可以通过挠曲样品的弯度测量中确定出来。光学材料杨氏模量的值通常都是从挠曲得来的,而且一般都比从伸、缩测量中得来的值低一些。这种数据也可从声速测量中推导出来。但是用这种方法取得的值这里一点也没有报导。

体积模量是压缩系数的倒数，而且一般是由压缩系数测量值确定，在缺乏实验值时，可从弹性系数推算出来。

一般说来，晶体的弹性特性是各向异性的，就是说，这些模量的值因晶体方向而不同。一个立方晶体的各向异性的度量是用各向异性因子 A 来衡量。各向异性因子规定为 $2c_{44} (c_{11} - c_{12})^{-1}$ 。对于弹性各向同性材料，其值等于 1，而对于弹性各向异性晶体，其值不是大于 1 就是小于 1。对于 $A > 1$ 的晶体，如锗和硅等，其杨氏模量沿 $\langle 100 \rangle$ 方向有最大值，而沿 $\langle 111 \rangle$ 方向有最小值。对于 $A < 1$ 的晶体，如氯化钠，其杨氏模量沿 $\langle 111 \rangle$ 方向有最大值，而沿 $\langle 100 \rangle$ 方向有最小值。弹性特性随方向变化可以大到 30%，这个设计中应加以考虑。

上述弹性特性的讨论只适用于晶体形变不大的情况，就是说，在学术研究上形变不到 1%，而实际应用上不到 2%。当晶体形变过度，不再遵从虎克定律时，就是说这种晶体是塑性形变。用弹性限来表示一种应力强度，超过这个限度会发生塑性形变；在这个限度以下就遵从虎克定律。对于金属材料来说，应力—应变曲线有急剧的变化。对于大多数光学材料，应力—应变曲线从一直线逐渐向下倾斜，变成一条曲线。在毫不违背虎克定律的情况下，应当明确定出弹性极限。对于作挠曲试验的某些晶体，应明确标出弹性极限。这一极限就看作是应力—应变曲线上压力强度，曲线的斜率是应力—应变曲线原点斜率的一半。

断裂模量与具体样品的取样过程密切相关，且只在作近似计算时才能用到。只要出现小小的裂纹或明显可见的裂缝，其断裂强度至少也要下降一个数量级。有几种材料，在可能发生断裂的压力下显示出明显不同的特性。溴碘化铯、溴氯化铯和氯化银的应力—应变曲线的斜率在有大的形变和明显的冷流下迅速增加，就是说，形变随时间而明显增加。

在第 7·3·8 节和第 7·3·9 节中的表 7-11 和表 7-12 分别给出弹性系数和模量数据。

7·2·9 工程机械性能 工程应力是加到试样上的瞬时负载 P 与其原横截面 A_0 之比。试样上两基准点之间的中心部分为标距 l_0 。工程应变是这一截面长度的变化量 $\Delta l = l - l_0$ 与原长度之比。应力与应变的关系直到弹性极限，都是线性的，而比例常数是杨氏模量 E ，即

$$E = \frac{P/A_0}{\Delta l/l_0} \quad (7-24)$$

从弹性形变到塑性形变的过渡有时是很快的，人们可以确定屈服强度。另外，可以把微观屈服强度规定为 10^{-6} 倍屈服强度所需的应力。任一实际的量度手段是把弹性极限应力或剩余屈服应力规定为产生一定程度的塑性应变，例如 0.1%、0.2% 或 0.5% 所需的应力。因此，人们可以选取例如 0.2% 为实用弹性极限应力。

由于大多数金属在加工过程中变硬，并产生进一步塑性形变所需的应力随着应变的增大而增加，所以其他量度手段是有用的。应变硬化率或者材料随应变的增大而硬化的速率，随着应变的增大而下降，直到在极限抗拉强度 (UTS) 或简化为抗拉强度 (TS) 的值为零。在低于极限抗拉强度的断裂应力强度下发生断裂，面积收缩是在材料 (在或接近 UTS) 拉细之后样品面积与原来面积之比。断裂应变、延性或断裂延伸度都是说明断裂前产生的量变 (而这种量变几乎等于总应变)。实际应力就是负载与瞬时而积之比，说明材料在拉细时的应力强度，无多大实用意义，但用它确定实际断裂应力，即断裂时的实际应力。实际应变或延伸度是长度增量与瞬时长度的比值的定积分：

$$\int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (7-25)$$

这个定义在没有颈缩前都是有效的，在发生颈缩后就要另作定义了。实际应变则是 $\ln A_i/A_0$ ，其中 A_i 和 A_0 分别是瞬时和初始横截面积。实际应力——应变曲线常称流动曲线，于是就有所谓的流动应力、流动应变和屈服强度同义的初始流动应力。材料韧性是断裂前承受一定能量的一种量度，就是流动曲线下方的那部分面积。

在第7·3·9节和第7·3·10节中的表7-12及表7-13中分别给出了杨氏模量、断裂模量、和硬度的工程机械性能。

7·2·10 热力学关系式

第一定律 $dQ = dU + dW$ (7-26)

熵 $dQ = TdS$ (7-27)

比热 $mc_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p$ (7-28)

$$mc_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v \quad (7-29)$$

内能 $dU = TdS - PdV$ (7-30)

式中 Q 为热量

W 为功

U 为内能

麦克斯韦关系式

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_s &= -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_v & \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s &= \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p \\ \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T &= \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v & \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T &= -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \end{aligned} \quad (7-31)$$

比热差

$$c_p - c_v = \frac{T}{m} \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p - \frac{T}{m} \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v = \frac{T}{m} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad (7-32)$$

如果 $PV = RT$ 则 $c_p - c_v = R/m$ ，用摩尔体积 V ，体积膨胀 β 和绝热压缩系数 k_T 表示时， $c_p - c_v = TV\beta^2 k_T^{-1} m^{-1}$ 。能斯特—林德曼 ((Nernst-Lindeman) 关系式是

$$c_p - c_v = Ac_p^2 \frac{T}{m} \quad (7-33)$$

式中 A 是常数。

7·2·11 介电常数和损耗角正切 用理论关系式来判断不同状态材料的介电常数。

(1) 稀薄气体 (克劳修斯—莫索提 (Claussius-Mosotti))

$$\frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0 + 2} = \frac{4}{3} \pi N \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right) \quad (7-34)$$

式中 N = 单位体积分子数

α = 极化率

$\mu =$ 偶极矩

(2) 凝聚介质 (安萨格(Onsager))

$$\frac{9(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)(2\epsilon_0 + \epsilon_\infty)}{(\epsilon_\infty + 2)^2(3\epsilon_0 + 2)} = \frac{4\pi N\mu^2}{3k_B T} \quad (7-35)$$

介质常数可写成下式

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 - j} = \epsilon_r + j\epsilon_i \quad (7-36)$$

式中 $\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}$

$$\epsilon_i = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)\omega}{1 + \omega^2\tau^2}$$

表7-7列出了介电常数值。

7·2·12 硬度和显微硬度 衡量硬度的手段在很大程度上是经验比较法。最起码的简易测尺是莫氏刻度——十种材料的硬度增升顺序表。在十种材料相互摩擦造成刻痕的基础上进行比较。刻度等级是不均等的。下面就是这十种材料及其已知值：

- 10 金刚石, C
- 9 刚玉, Al_2O_3
- 8 黄玉, $Al_2SiO_4(OH, F)_2$
- 7 石英, SiO_2
- 6 正长石, $KAlSi_3O_8$
- 5 磷灰石, $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
- 4 萤石, CaF_2
- 3 方解石, $CaCO_3$
- 2 石膏, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
- 1 滑石, $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$

其他一些测量硬度的方法是用一定形状的压头, 对一种材料施加一特定压力, 作压缩试验, 负载一般是规定好的质量 (单位为克)。这种方法是叫布氏、维氏或克氏, 由形状决定。硬度的计量可因应用的负荷、负荷时间、施加或释放速度而异。这种变异取决于材料的蠕变、冷流以及消除由微小裂缝引起的应力等特性。第7·3·10节中的表7-13给出了硬度数据。

7·2·13 化学及其有关特性 这些特性包括克分子量、比重和溶解度。首先是物质的克分子量 (用克表示), 例如, 食盐即氯化钠是58克。比重是密度的一种量度, 但不是用克厘米⁻³这种具体单位, 它是与水在4℃时的密度相关的一种物质的密度。由于水在这一温度时的密度是1克厘米⁻³或6.25磅英尺⁻³, 因此, 任何物质的密度就是它的比重乘以其中一个量纲的量。

溶解度数据一般是指在特定温度 (如不具体说明就是正常室温) 下100毫升水在平衡条件下溶解物质的克数。而此, 它大体上是一种百分比溶解度, 多少也是每种材料自然时效特性的指数。在第7·3·11节的表7-10中都有这些特性的数据。