

高等学校教学用书

建井工程材料

李 赤 波 编

煤炭工业出版社

TD26
L-212

高等学校教学用书

建井工程材料

李 赤 波 编

煤炭工业出版社

460083

内 容 简 介

本书介绍建井工程常用工程材料的基本性质及其使用方法,包括:材料的物理、力学性质;砖、石、无机胶凝材料;水泥混凝土;混凝土的外加剂;砂浆;合成高分子材料;木材;建筑结构钢材等。附录中给出了有关的国家标准、部颁标准和世界部分国家的水泥标准。

本书是煤炭高等学校矿井建设专业《建井工程材料》课的通用教材,也可供建井工程技术人员参考。

本书在煤炭高校采矿工程教材编审委员会委员余力教授主持下,经富嘉元副教授、鄒书凤讲师审定,张仁水老师亦提出过改进意见。

责任编辑 莫 国 震

高 等 学 校 教 学 用 书

建 井 工 程 材 料

李 亦 波 编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$

印张 $10^{1/2}$

字数 245千字

印数1—6,620

1984年12月第1版

1984年12月第1次印刷

书号15035·2675 定价1.55元

前 言

本书按照矿井建设专业《建井工程材料》教学大纲编写，主要介绍建井工程常用的工程材料，重点突出了水泥、水泥混凝土、混凝土外加剂和建筑结构钢材等内容；对适用于建井工程的合成高分子材料，亦作了一定的介绍。书中引用的有关技术标准及试验规程，均采自现行的技术规范。

工程材料品种繁多，用量巨大，不仅是各种工程建设的重要物质基础，而且材料费用甚高，一般要占工程造价的60~70%。因此，建井工程技术人员必须熟悉了解有关材料的成分、技术性质、应用方法、检验方法、储运保管和防护方法，以便经济、合理地选择和使用各种材料。

材料性能的测试，是正确选择和使用工程材料不可缺少的一个环节。特别是一些可靠性要求高、使用寿命长、在使用过程中要经受工作条件和使用周期考验的材料，一定要经过严格的测试后才可使用。因此，在教学过程中，还需重视实习课和习题作业等教学环节，培养学生分析问题、解决问题的能力。

材料的使用，与生产力和科学技术水平的发展密切相关。随着材料的研究由经验性的认识逐步深入到规律性的认识、由宏观现象的观测深入到微观本质的探讨，它已和许多学科联系得更加密切，并且相互渗透，形成了一门新兴的综合性学科——材料科学。它与能源、信息并列，成为当代技术的三大基础。目前，工程材料正在从一般工程性质的研究向着材料科学的方向发展，以期按指定的性能设计材料，生产材料，并运用现代计算技术，将材料设计和结构物设计，在一次最优化设计中同时完成。

本书在中国矿业学院余力教授主持下，经中国矿业学院富嘉元副教授、淮南矿业学院邬书凤讲师审定，山东矿业学院张仁水老师亦提出过改进意见，编者在此表示谢意。

编 者

1984年2月

目 录

前 言

第一章	工程材料的物理力学性质	1
第一节	材料的物理性质	1
第二节	材料的力学性质	6
第三节	材料的组成、结构、织构与性能的关系	10
第二章	砖、石	12
第一节	粘土质砖	12
第二节	石料	13
第三章	无机胶凝材料	17
第一节	气硬性胶凝材料	17
第二节	硅酸盐水泥	18
第三节	掺混合材料的硅酸盐水泥	25
第四节	特种水泥	27
第四章	水泥混凝土	30
第一节	混凝土的组成材料	30
第二节	混凝土的主要技术性质	38
第三节	混凝土的配合比设计	57
第四节	混凝土的施工质量控制	64
第五节	其它混凝土	73
第五章	混凝土的外加剂	88
第一节	减水剂	88
第二节	速凝剂	93
第三节	早强剂	97
第四节	其它外加剂	100
第六章	砂浆	102
第一节	砂浆的技术性质	102
第二节	砌筑砂浆配合比设计	105
第七章	合成高分子材料	107
第一节	概述	107
第二节	井巷工程中常用的合成高分子材料	108
第三节	聚合物混凝土	117
第四节	化学注浆材料	118
第八章	木材	121
第一节	木材的物理、力学性质	121
第二节	木材变色、腐朽和防腐	124
第九章	建筑结构钢材	127
第一节	钢的分类	127

第一章 工程材料的物理力学性质

矿井建设所使用的各种工程材料，不仅应在性能上满足使用的要求，而且还应在使用环境中较长时期的保持稳定。为了正确选用工程材料，必须通晓材料的各种物理力学性质。

第一节 材料的物理性质

一、比重

材料在密实状态下单位体积的重量与同体积4℃水的重量之比值称为比重 γ 。亦可用材料在密实状态下单位体积的重量表示：

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ g/cm}^3 \text{ 或 } \text{kg/m}^3 \quad (1-1)$$

式中 G ——材料在干燥状态下的重量，g，kg；

V ——材料在密实状态下的体积， cm^3 ， m^3 。

材料含气孔的固体体积，称为表观体积。单位表观体积的重量与同体积4℃水的重量之比值，称为表观比重，亦称假比重、视比重。

二、容重

材料含气孔和空隙时的单位体积重量称为容重 γ_0 。

$$\gamma_0 = \frac{G_0}{V_0}, \text{ g/cm}^3 \text{ 或 } \text{kg/m}^3 \quad (1-2)$$

式中 G_0 ——材料在自然状态下的重量，g，kg；

V_0 ——材料在自然状态下的体积， cm^3 ， m^3 。

材料含水分时，其重量和体积将发生变化，故必须注明测定容重时材料的含水状态，通常都以干燥状态为准。

粒状材料松散堆积体的单位体积重量，称为松堆（散）容重。常用工程材料的比重和容重见表1-1。

表 1-1 几种常用工程材料的比重和容重

材 料	$\gamma(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_0(\text{kg/m}^3)$	材 料	$\gamma(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_0(\text{kg/m}^3)$	材 料	$\gamma(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_0(\text{kg/m}^3)$
钢、铸钢	7.85	7850	沥青混凝土	—	2300~2400	花岗岩	2.6~2.9	2500~2800
铸 铁	7.85	7200	喷混凝土	—	2300~2350	石灰岩	2.60	2230
铝	2.80	2800	钢筋混凝土	—	2400~2500	水 泥	3.1~3.2	1200~1300
普通混凝土	—	2300~2400	水泥砂浆	—	2100~2200	砂	2.60	1450~1650

三、孔隙率

材料中孔隙（开口和闭口孔）容积与表观体积的百分比称为孔隙率 P 。

$$P = \left(1 - \frac{V}{V_0} \right) \times 100\% \quad (1-3)$$

$\frac{V}{V_0}$ 为材料的密实度。材料内部孔隙是否封闭、贯通及其粗细等，均为材料构造的重要特征。材料的开口孔隙率称为表观孔隙率。

四、细度

细度即粉（粒）状材料的粗细程度。常以标准筛筛余百分率或比表面积表示；亦可以颗粒大小的百分组成或单位重量的平均粒径表示。

（一）筛余率

取一定重量的试样置于规定筛号的标准筛上筛分，称其余量求出百分率，以百分数表示材料的细度。

（二）细度模数 $F \cdot M$

其值为各筛号筛上全部累计筛余百分数之和除以 100。粒状材料的细度常用 $F \cdot M$ 表示。

（三）比表面积 S

单位重量试样所含表面积总和。非孔性材料只具外表面积，多孔材料除外表面积外尚含内表面积。比表面积通常用单位重量表示，也有用固体的单位体积表示的。即 $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$ 或 $S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ 。 $S_v = \rho_p S_w$ 。式中 ρ_p 为颗粒密度。

1. 硅酸盐水泥

$$S_w = \frac{S_s(1 - \rho_s)\sqrt{\rho_s^3}\sqrt{\eta_s}\sqrt{T}}{\sqrt{\rho_s^3}\sqrt{T_s}\sqrt{\eta}(1 - \rho)} \quad (1-4)$$

2. 除硅酸盐水泥以外的其它水泥

$$S_w = \frac{S_s(1 - \rho_s)\sqrt{\rho_s^3}\sqrt{\eta_s}\sqrt{T}}{\sqrt{\rho_s^3}\sqrt{T_s}\sqrt{\eta}(1 - \rho)} \times \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (1-4')$$

式中 S_s ——校准仪器用的标准试样的比表面积， cm^2/g ；

T_s ——校准仪器时，压力计液面下降时间，s；

η_s ——校准仪器时，空气的粘度，泊；

ρ_s ——标准试样层空隙率；

γ_s ——标准试样的比重， g/cm^3 ；

S_w ——试验试样的比表面积， cm^2/g ；

T ——试验时，压力计液面下降时间，s；

η ——试验时，空气的粘度，泊；

ρ ——试样层空隙率；

γ ——试样的比重， g/cm^3 。

通过吸附等温线*，用 BET (S. Brunauer, P. H. Emmelt, E. Teller) 公式求出的多孔物体的比表面，称为 BET 比表面 (S_{BET})。

$$S_{\text{BET}} = U_m N_A a_m, \text{ m}^2/\text{g} \quad (1-5)$$

* 气体分子吸收到液体或固体表面上的现象称为吸附。吸附量依温度和压力不同，在一定温度下的平衡压与吸附量的关系曲线，称为吸附等温线。

式中 U_m ——单分子层的饱和吸附量, ml/mole;
 N_A ——阿佛加德罗常数 (6.023×10^{23});
 a_m ——吸附质的分子截面积, $\text{\AA}^2$ 。

五、亲水性与憎水性

多数工程材料的表面能被水润湿, 且能经由毛细管(作用)将水吸入材料内部, 使材料的强度、耐久性和保温性降低。图 1-1 为液滴与材料表面接触时的稳定状态。憎水性材料不能被水润湿, 故可用作防水材料或用来处理亲水性材料的表面。

六、吸水性

材料与水接触时经由毛细管或开口孔隙吸收水分的性质称为吸水性。水在毛细管中的上升高度 h 可由下式求出:

$$h = \frac{2T\cos\alpha}{\rho gr}, \text{ cm} \quad (1-6)$$

式中 T ——水的表面张力, g/s²;
 α ——凹液面切线与管壁的夹角;
 ρ ——水的密度, g/cm³;
 g ——重力加速度, cm/s²;
 r ——毛细管的半径或两平面间的距离, cm。

材料吸水的能力依构成孔隙隔膜物质的结构、孔隙分布及其贯通性有很大差别, 以重量吸水率或体积吸水率表示。

材料含水率为含水重与绝干材料重的百分比。未饱水状态的含水率与饱水状态含水率之比值, 称为饱水系数。材料长期置于一定温度和湿度的空气中, 最终达到吸收有固定水分的平衡状态(气干状态), 其固定水分(平衡水分)重对绝干材料重的百分率, 称为平衡含水率。材料的平衡含水率随空气的温度和湿度的改变而改变, 一般在相对湿度高、温度低的情况下较大。

七、耐水性

材料在水的作用下不会损坏、强度也不会显著降低的性质称为耐水性。用材料的软化系数 f_s 表示。

$$f_s = \frac{\sigma_w}{\sigma_d} \quad (1-7)$$

式中 σ_w ——材料在饱水状态下的抗压强度, kgf/cm²;
 σ_d ——材料在干燥状态下的抗压强度, kgf/cm²。

潮湿环境中的重要结构物, 材料的软化系数 f_s 不能低于0.85; 受潮较轻或次要结构物, f_s 亦不宜低于0.70。

八、抗渗性

材料抵抗压力水渗透的性能称为抗渗性, 用渗透系数 K 表示。

对于非圆形截面管孔, 在采用泊肃叶公式时应当用当量直径 D_0 。

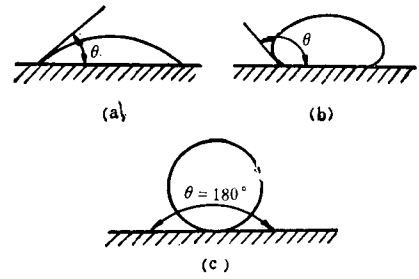


图 1-1 材料润湿角

a— $\theta \leq 90^\circ$, 亲水性材料; b— $\theta > 90^\circ$, 憎水性材料; c— $\theta = 180^\circ$, 完全憎水性材料

$$D_e = 4R_e = 4 \frac{F}{L}, \quad r_e = \frac{D_e}{2}$$

式中 R_e ——水力半径, cm;

F ——流体截面积, cm^2 ;

L ——流体浸润的周边长度, cm。

设材料的透水方向长度为 $l(\text{cm})$, 管孔率为 n , 透水截面积为 $A(\text{cm}^2)$, 则管孔的有效面积为 nA 。

$$Q = \frac{nA}{\pi r_e^2} \cdot \frac{\pi r_e^4}{8\eta} \cdot \frac{h}{l} = K \frac{h}{l} A \quad K = \frac{n r_e^2}{\eta} \cdot C_s$$

或

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{l}{h} \quad (\text{D'arcy 定理}) \quad (1-8)$$

式中 K ——渗透系数, cm/s ;

C_s ——系数, $\text{kg/s}^2 \cdot \text{cm}^2$;

h/l ——动力梯度;

η ——粘度系数, $\text{kg/s} \cdot \text{cm}$;

A ——透水截面积, cm^2 ;

Q ——透过截面的流体流量, cm^3/s 。

材料的抗渗性亦可用抗渗标号表示 (参见第四章第五节抗渗混凝土)。

九、耐久性

耐久性就是材料抵抗各种物理、化学及生物作用破坏的性能。

物理作用包括干湿作用、热应力、冻融循环等。干湿、冷热均可引起材料体积变化, 当体积变化受到限制时, 材料可能出现裂缝或内应力, 导致材料的强度和耐久性降低。

化学作用包括酸、碱、盐类水溶液对材料的侵蚀, 金属的氢脆、氢发生型腐蚀及氧耗型腐蚀等。

生物作用指昆虫、菌类等对材料的蛀蚀、腐朽等。

此外, 高分子材料因受紫外线照射、受热和臭氧引起的变质等均属于材料耐久性范畴。

十、抗冻性

材料抵抗内部水分结冰压力循环破坏的能力称为抗冻性。材料的抗冻性, 取决于材料内部孔隙特征、饱和系数、含水状态和材料的变形能力、强度及软化系数等。一般认为软化系数低于 0.8 时材料的抗冻性不佳; 饱和系数相同的同一种材料, 由于孔隙直径及其分布不同, 抗冻性亦有差别: 粗大孔隙不易含水, 对结冰压力可起缓冲作用; 极细孔隙虽能为水所充满, 但孔壁对水的吸附力极大, 冰点很低, 不易冻结; 毛细管孔隙形成亚微通道, 造成材料的可渗透性, 且常与较大孔隙中的自由水相连, 既易被水充满且易结冰 (低于 -15°C), 对材料的破坏作用很大。

十一、导热性

材料传导热量的性质称为导热性, 用导热系数 λ 表示。

$$\lambda = \frac{Q \cdot a}{A \cdot t(T_1 - T_2)}, \quad \text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (1-9)$$

式中 Q ——热量, kcal;
 a ——材料传热厚度, m;
 t ——传热时间, h;
 T_1 、 T_2 ——温度, $^{\circ}\text{C}$;
 A ——传热面积, m^2 。

热传导机制主要有:自由电子传导(金属材料)、晶格振动传导(具有离子键或共价键的晶体)和分子激励传导(有机质固体)等。无机材料的热传导视晶体或非晶体(玻璃体)而定,非晶体材料的导热系数较晶体材料低。同时含有结晶质和玻璃质的无机材料,导热系数的大小依其组分服从于混合律。影响多孔材料导热性的主要因素为材料的孔隙率、孔隙特征及含水率等。材料的导热系数随孔隙率增大而降低(粗大而连通的孔隙中的空气较易发生对流,使导热性增大),因结露(即形成小水珠)或受潮而增大,具有纤维组织的材料,影响尤为严重。

几种常用工程材料的导热系数见表1-2。

表 1-2 常用工程材料的导热系数 λ (kcal/m·h· $^{\circ}\text{C}$)

材料名称	λ	材料名称	λ	材料名称	λ	材料名称	λ
钢	50	玻璃	0.6~0.9	石膏板	0.22	岩棉	0.027~0.032
花岗岩	2.5	水	0.60	蒸压轻混凝土	0.046~0.054	玻璃棉	
普通混凝土	1.1~1.3	顺纹	0.30	泡沫玻璃		橡胶	0.028~0.031
耐火砖	0.9~1.2	横纹	0.15	石棉	0.045~0.055	泡沫塑料	0.03
普通粘土砖	0.7	泡沫混凝土	0.10~0.25	矿渣棉	0.039~0.044	密闭空气	0.02

十二、热容量

单位重量材料的温度升高(降低) 1°C ,所吸收(放出)的热量称为热容量。固体材料的热容量常以重量热容量 C 表示(kcal/kg· $^{\circ}\text{C}$)。材料的含水率增加时,其热容量亦相应提高。常用工程材料的热容量见表1-3。

表 1-3 常用工程材料的热容量 C (kcal/kg· $^{\circ}\text{C}$)

材料名称	C	材料名称	C
水	1.00	陶瓷	0.20
松木	0.65	普通粘土砖	0.19~0.21
密闭空气	0.24	砂、石	0.18~0.22
铝	0.21	泡沫混凝土	0.18
普通混凝土	约0.20	钢、铁	0.115

十三、胀缩性

干湿或冷热均可引起材料的体积变化。泥土、砂石、纤维等材料受湿润后,颗粒或纤维间被水膜隔绝,显示出湿胀;材料因毛细孔或胶孔中水分蒸发或散失而引起的体积缩小的现象称为干缩。在恒速干燥阶段,干缩同含水率的减少成正比;在减速干燥阶段,颗粒相互接触成“架桥”状态,虽然颗粒间的气孔水仍在继续蒸发,亦不会继续收缩。硅酸盐类材料受湿后,因构成气孔隔膜的含水率增加而导致气孔组织的体积增大。表1-4为硅酸

表 1-4 硅酸盐类材料 (吸水) 的膨胀率

材 料 名 称	线 膨 胀 率 (%)							
	2 天	4 天	6 天	8 天	10 天	12 天	14 天	16 天
陶 瓦	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
1:3 水泥砂浆	0.003	0.007	0.01	0.011	0.012	0.012	0.012	0.013
1:1 水泥砂浆	0.006	0.095	0.13	0.15	0.17	0.175	0.18	0.18
粘 土 砖	0.075	—	—	—	—	—	—	—
	(1天)							
碎石混凝土	0.027	0.029	0.031	0.032	0.033	0.034	0.034	0.034
1:6 水泥砂浆	0.031	0.034	0.037	0.037	—	—	—	—
1:4 水泥砂浆	0.034	0.038	0.039	0.04	0.041	0.042	0.042	—
砂 岩	0.039	0.04	0.04	0.04	0.04	—	—	—
水 泥 净 浆	0.018	0.029	0.038	0.043	0.049	0.052	0.055	0.057
煤渣混凝土	0.057	0.062	0.066	0.069	0.07	0.071	0.072	0.073

盐类材料因吸水而引起的湿胀。引起木材湿胀干缩的原因在于细胞本身含水率的增减；细胞间及细胞腔内水分的变化，对体积并无影响。木材急剧干燥将造成表里水分变化不均而出现开裂、翘曲及表面硬化现象。

第二节 材料的力学性质

材料的力学性质包括材料在外荷作用下有关强度和变形的性质。

一、材料的强度

(一) 强度的微观概念

材料的力学性质决定于原子或分子的结合和相互间的作用力。其结合方式有基本结合和派生结合二种。

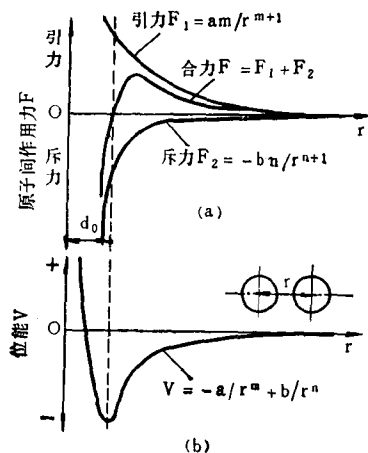


图 1-2 原子间距与原子间作用力 F 的关系 (a) 及位能 V 的变化 (b)

质各不相同，熔点亦高低不一。金属键的键能是基本结合中最低的。

2. 派生结合-分子键 (范氏键)、氢键 分子键是由于一个分子内部在电学上产生电偶极子由正负电荷引力形成的键合。分子键的键合力虽小，却是一种重要的结合。

氢键是分子极化的一种。

1. 基本结合 (1) 离子键 由原子释放出最外壳层的电子变成带正电荷的原子 (阳离子)，同接收其电子变成带负电荷的原子 (阴离子) 由库伦引力形成的一种键合。由离子键形成的物质键合力大、坚固、硬度高、熔点高、膨胀性低，一般为绝缘体。硅酸盐材料的键性以共价键和离子键为主。(2) 共价键 两个原子共有最外壳层电子的键合。共价键的强度随参与键合的电子数增多而增强。由共价键形成的物质键合力大，其物理力学性质与由离子键形成的物质基本相同。(3) 金属键 自由电子或游离电子由库伦引力形成的一种键合。金属的导热性、导电性和范性形变之所以大，主要起因于游离电子的行为。由金属键形成的物质其力学性质

3. 原子间距离与作用力 两原子间的距离为 r 时, 由于质量同时作用有引力 F_1 与斥力 F_2 , 其合力 $F = F_1 + F_2$ 。表示这种作用力关系的曲线称为康冬莫氏曲线 (图1-2)。

$F = 0$ 时, 原子间的距离 d_0 为稳定的平衡距离, 亦即材料不受外力时的初始平衡状态, 原子间的位能在 d_0 取最小值。如果有一外力使材料受到拉应力或压应力, 则 F 与 r 的关系亦发生变化, 反映到宏观上即为应力与应变的关系。材料受压时, 斥力 F_2 占优势, 使材料具有抵抗压缩的能力; 材料受拉时, 引力 F_1 占优势, 使材料内部产生抗拉伸的内力而与外力相抗衡。若 $r > r_m$, 抵抗拉伸的内力达到最大值 R_{max} , 此即材料的理论抗拉极限强度, 而 δ_{max} 是其极限拉伸值, $tg\alpha$ 即弹性模量。

材料受外力作用时, r 、 F 与外力之间将建立新的平衡。外力卸除后, 原子间富余的净相互作用能量将转化为功, 迫使原子回到原来位置, 宏观表现出材料外观形状的恢复。

(二) 静力强度与比强度

材料在建筑物中所承受的外力, 一般为不致产生动能而引起结构振动的静力荷载。因此, 材料抵抗外力破坏的强度 (抗拉、抗压、抗弯、抗剪) 总称之为静力强度。

材料的静力强度依构成材料的元素、键性、结构和织构等不同而异。同一类材料由于织构不同, 其强度可能相差较大。例如同一结晶质材料, 细晶质材料的强度往往高于粗晶质材料的强度。

材料强度对其容量之比值称为比强度, 为衡量材料轻质、高强性能的一项主要指标。

(三) 弹限强度

材料受力后达到弹性限值时的强度称为弹限强度。在 σ - ϵ 图中, 弹性限值依材料特性有几种不同的取值点, 例如: 比例极限、弹性极限、屈服点 (流限)、近似弹性极限及条件流限等。一般弹限强度是材料可资应用的最大极限强度, 常用弹限强度乘以适当的安全系数作为设计容许应力值。

(四) 极限强度

又称强度极限。为材料在外力作用下达到破坏之前, 截面上所能承受的最大应力。

(五) 疲劳强度

材料经受反复应力超过某一限度时即会导致材料断裂, 这个限度下的强度称为疲劳强度, 亦称疲劳极限。确定疲劳强度的方法是分阶段的改变应力振幅 S 进行疲劳试验, 求出材料断裂时的反复次数 N , 画出 S - N 曲线, 取 S - N 曲线平行于 N 轴的应力振幅值作为该材料的疲劳强度。疲劳强度的大小与材料性质、应力种类、疲劳应力比值、应力集中情况及温度等有关。

(六) 冲击韧性

材料对于冲击荷载所表现的抵抗能力称为冲击韧性, 又分为冲击抗拉韧性、冲击抗压韧性和冲击抗弯韧性三种。通常所作的冲击试验是冲击弯曲试验, 以其破坏试件所消耗的能量来判定材料的韧性。材料的韧性越大, 表示它抵抗冲击荷载的破坏能力越强。

(七) 硬度

硬度是材料抵抗其它硬物刻划、压入其表面的能力, 实际上是材料表面的局部抗压强度。

1. 刻痕硬度 用于测定精加工材料的硬度和金属硬度等, 常用莫氏硬度 HM 表示。莫氏硬度取金刚石为10, 按自然界出产的矿物依次排列为10级。用这些矿物刻划材料表面,

按其是否留下擦痕来确定硬度值。亦有用金刚石的棱角刻划，由擦痕宽度和产生擦痕时的荷重来表示的。莫氏硬度与矿物标对照列于表1-5。

表 1-5 莫氏硬度与矿物标的对照

莫氏硬度	刻痕硬度 (矿物) 标	莫氏硬度	刻痕硬度 (矿物) 标
1	滑石, $\text{Mg}_3[(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	6	长石, $\text{K, Na} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
2	石膏, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7	石英 (水晶), SiO_2
3	萤石, CaF_2	8	黄玉, $\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SiO}_4]$
4	方解石 (大理石等), CaCO_3	9	刚玉 (红宝石、白宝石), Al_2O_3
5	赤铁矿, Fe_2O_3	10	金刚石, C

2. 压痕硬度 用硬质钢球或金刚石方锥压在试件表面使其产生压痕 (永久形变)，根据凹痕单位面积上的压力来表示硬度的有：布氏硬度HB、维氏硬度HV；用金刚石压头或附加一定荷重的硬钢球压入材料表面，由压痕深度求得硬度的有洛氏硬度HR。压痕硬度常用于塑料、橡胶、木材及金属材料。

3. 回跳硬度 用镶嵌有金刚石、大体上为半球形的重锤 (肖氏锤) 从一定高度自由落下击于被测材料表面，按其回跳高度求出硬度，称为回跳硬度或肖氏硬度HS。施密特 (E. Schmidt) 锤回弹仪即是用其回跳系数N推测混凝土强度的。

二、材料的流变性质

润湿的粘土、新拌和的砂浆或混凝土以及密封材料等，不仅表现有粘性和弹性，而且还表现有粘弹性；木材、塑料、沥青、混凝土、玻璃和各种金属材料，除弹性变形外，还有徐变。所有这些从广义上说都可视为流动现象。研究物质流动性的学科领域称为流变学。

(一) 应力与应变

物体在外力作用下保持平衡时，物体内部任一截面上所产生的内力集度称为应力 σ (kgf/cm^2)。内力集度可分解为垂直于截面的正应力和平行于截面的剪应力。

物体在力的作用下产生变形时，其中任何两点间都会出现相对位移。距离很近的任意两点A、B沿AB方向的距离变化 ΔAB 与变形前两点间距离的比值 $\Delta AB/AB$ 称为沿AB方向的平均线应变。物体内部任一微单元的体积改变 ΔV 与原单元体积V之比值 $\Delta V/V$ 称为体积应变。物体内部两相互垂直的微小线段在变形后所夹角度的改变值 $\Delta\alpha$ 称为剪应变或角应变。

1. 屈服应力 材料受外力作用超过弹性极限达到屈服点后，在外力几乎不增加的情况下变形骤然加快，达到屈服点时的应力称为屈服应力。材料无明显的屈服点时，则可人为规定在产生某一永久变形值 (例如0.2%) 时的应力作为屈服应力。

2. 温度应力 材料内部由于温度分布不均匀而引起的应力。

3. 湿差应力 材料表里湿度不同导致胀缩不均而产生的应力。

4. 应力-应变关系

(1) 虎克固体 (理想弹性体) 应力-应变关系为直线，外力消除后变形完全消失的一种固体称为虎克固体。流变方程为 $\tau = \mu\gamma$ 。式中： τ —剪应力； μ —刚性模量； γ —位移梯度。虎克固体在外力作用速度改变时，应力-应变关系线的座标位置亦不会发生变化。

(2) 牛顿液体 (理想粘性液体) 应力-应变速度 ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) 关系为直线的液

体称为牛顿液体。流变方程为 $\tau = \eta \dot{\gamma}$ 。式中： τ —相邻两层平行流动着的液体在其流速不相等时层间产生的内摩擦力（即剪应力）； η —粘性系数； $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ ，速度梯度。 η 值随温度而变，温度升高，液体的 η 值随着减小。

（3）粘弹性体

a. 圣维南固体（理想弹塑性体）当剪应力增至屈服应力后产生塑流，在塑流过程中剪应力仍停留于屈服应力常数的一种固体称为圣维南固体。流变方程为 $\tau = \theta_s$ 。式中： τ —剪应力； θ_s —屈服应力。

b. 宾汉体 为圣维南塑性固体和牛顿粘性液体的混合物。流变方程为 $\tau = \theta_s + \eta \dot{\gamma}$ 。硅藻土、瓷土、石墨等的悬胶以及油漆等都具有这种流变特性。一般认为水泥净浆亦具有宾汉体的特征。宾汉体的特征为在未达到屈服应力前物体产生的流动为塑流（圣维南体特征），超过屈服应力后按牛顿液体规律产生粘性流动。

c. 麦克斯韦尔液体（液态粘弹性体）兼具有虎克固体和牛顿液体性质的物质。流变方程为 $\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{\mu} + \frac{\tau}{\eta}$ 。式中： $\dot{\tau} = \mu \dot{\gamma} - \frac{\tau}{t}$ ，剪切速率。麦克斯韦尔液体虽然具有一定程度的弹性，其本质仍属液体。内部结构由弹性和粘性两种成分组成（聚集体），弹性成分不构成骨架而埋在连续的粘性成分中。因此，在恒定荷载下，贮存于弹性体中的势能会随时间逐渐消失于粘性体中，表现为应力松弛。

d. 开尔文固体（固体粘弹性体）兼具有虎克固体与牛顿液体并联性质的物质。流变方程为 $\tau = \mu \dot{\gamma} + \eta \dot{\gamma}$ 。开尔文体受力时，变形须在一定时间后才能逐渐增加至最大弹性变形，卸荷后变形亦须在一定时间后才能趋于消失，表现为弹性后效。

e. 稠度 在表示液体和固体的流变性时，“阻止形状发生永久变化的物质属性”（宾汉定义）称为稠度。对于新拌砂浆或混凝土之类的宾汉体用管子压送时，按Buckingham-Reiner方程式，其流量Q为

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8l \cdot \eta_{ps}} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2P_0 l}{r \Delta P} + \frac{1}{3} \left(\frac{2P_0 l}{r \Delta P} \right)^4 \right] \quad (1-10)$$

式中的 P_0 为管内宾汉体开始流动时的压力。由此可见，流量Q（按第一项）与管子半径 r^4 成正比，与管子进口与出口的压力差 ΔP 成正比，与管子长度 l 、粘性系数 η_{ps} （ $= \tan \theta_{ps}$ ）成反比。

设（1-10）式中 $P_0 = 0$ ， $V = 4Q/r^2 \pi$ ， $P = \Delta P r / 2l$ ，则得： $\frac{V}{P} = \frac{1}{\eta} = \varphi$ 。式中V、P表示材料性质的稠度变数， φ 为流动系数，V-P曲线称为稠度曲线。

（二）弹性与塑性

1. 弹性后效（参见开尔文固体）。

2. 应变能 材料受外力作用所做的功有弹性变形功和塑性变形功两种。前者作为弹性应变能贮存于变形材料内，当材料中的裂缝扩展时，部分弹性应变能将提供裂缝扩展前所需的塑性变形功和产生新表面所需的能量。弹性系统在裂缝每扩展单位面积时所能释放出来的应变能，称为应变能释放率。其临界值称为临界应变能释放率，表示裂缝扩展单位面积所需要的能量，亦即材料对裂缝扩展的阻力，其意义与应变能释放率相反，通常可认为是材料的常数。

3. 徐变 固体材料在恒定荷载下, 变形随时间延续而缓慢增加的不平衡过程称为徐变。徐变可分为: (1) 一次徐变 $\frac{de}{dt}$ 随时间的推移而变小。材料处于一次徐变阶段不会发生断裂; (2) 二次徐变 $\frac{de}{dt}$ 取一定值。材料进入二次徐变阶段, 在理论上必然导致断裂 (不论断裂时间的长短), 必须按徐变速度大小对构筑物采取保护或补强措施; (3) 三次徐变 $\frac{de}{dt}$ 急剧增大, 变形急剧增加, 材料已处于即将断裂的危险状态。要特别加强防护或及时拆除。

4. 应力松弛 (参见麦克斯韦液体) 从热力学观点分析, 物体受外力作用产生一定的变形, 如果变形保持不变, 则贮存于物体中的弹性势能必将逐渐转变为热能, 这种能量转换而消失的过程, 亦即应力松弛现象。

5. 触变性 某些胶体在外力作用下流动性暂时增加, 外力除去后具有缓慢可逆的性能称为触变性。触变性是等温下凝胶-溶胶可逆反应的现象, 它与结构粘性的区别是: 前者可逆转变缓慢, 后者瞬间互变。

6. 脆性 材料在外力作用下直到断裂前只出现很小的弹性变形而不出现塑性变形的性质称为脆性。脆性材料的极限强度一般不超过弹性极限, 抗动荷载或抗冲击能力很差。

7. 延性、假延性 材料在外力作用下达到断裂前可伸展的程度称为延性或假延性。延性好的材料在断裂前有较大的应变量或延伸率, 有些还具有屈服点。纤维增强复合材料在外力作用下进入塑性变形阶段后, 基体中不断产生大量的、分散的微细裂缝, 称为多点开裂, 使应力集中得以消除, 荷载主要由横贯裂缝的纤维承担, 复合材料仍然保持整体并显示出较大的延伸能力, 这种性状称为假延性。

8. 韧性 材料在外力作用下在塑性变形中吸收能量的能力称为韧性。韧性是介乎延性、脆性之间的一种材料性能。材料阻止裂缝扩展的能力称为断裂韧性, 常用裂缝在基本型 (张开型) 变形条件下达到临界扩展时的各种参量作指标 (如 G_{IC} 、 K_{IC} 、 δ_{IC} 、 J_{IC} 等)。这些断裂韧性指标不同于表征材料塑性和韧性的传统指标, 它可以用来定量地进行断裂分析和抗断裂设计。

第三节 材料的组成、结构、组织与性能的关系

一、材料的组成

材料所含成分及其组分既能影响材料的物理力学性能, 亦会影响材料抵抗侵蚀作用的化学稳定性。生产材料时, 可以根据对材料性能的要求, 调整其化学成分或改变其含量; 使用材料时, 应结合使用条件, 考虑材料组成对性能的影响。

二、材料的结构

材料的结构分为晶体结构、玻璃体结构和胶体结构三种。

(一) 晶体结构

原子或原子团按一定规律呈周期性排列时, 称为晶体, 晶体具有各向异性。晶体材料受外力作用时, 容易沿滑移面滑动。晶体的外形、内部质点的密集程度和质点间的相互作用力决定着晶体材料的基本性质。由于材料通常是由许多细小晶粒无规则组成的, 故往往

显示出各向同性。

(二) 玻璃体结构

由熔体骤冷而成的固态无定形体，称为玻璃体或无定形体。玻璃体结构不及晶体结构有规律，具有各向同性，其物性随化学组成的渐变而连续变化，其物理化学性质随温度的升高向熔体渐变，没有固定熔点。玻璃体具有较大的内能，有向晶体自发转变的趋势。

(三) 胶体结构

由直径为 $1\sim 0.01\mu\text{m}$ ($10^{-4}\sim 10^{-8}\text{cm}$) 的粒子分散于介质中所组成的结构称为胶体结构。因其总表面积很大，表面能亦大，故吸附能力很强。固体微细粒子用液体分散后成为溶胶；溶胶凝结后成无流动性的半固体状称为凝胶；凝胶在长期应力作用下具有粘性液体的流动性质，称为触变性。触变性对球形粒子虽亦可能发生，但多数是发生于杆状和片状颗粒的胶体。这些粒子在静置时有些部位互相接触连接，形成为具有网状结构的凝胶（凝胶化），如由外部给予振动、搅拌，则结构被破坏又变为溶胶（溶胶化）。溶胶静置一段时间再变为凝胶所需的时间称为固化时间，它是衡量触变性的指标。溶胶在外力作用下凝胶化，除去外力又变为溶胶的性质称为加力凝结性。新拌砂浆和加有减水剂的新拌混凝土均有此特性。

三、材料的织构

同一组成、同一结构的材料，织构越致密、均匀，其强度越高。材料内部所含孔隙，不仅减少了有效受力面积，而且受力时还会在两相界面和孔隙尖端出现应力集中。人为地改变材料的织构状态或不同组成材料的复合，可以制成多种不同性能和多种功能的材料。

第二章 砖、石

第一节 粘土质砖

用粘土质原料烧制成的砖，称为粘土质砖。粘土质砖有普通粘土砖、烧结煤矸石砖和烧结粉煤灰砖等。

一、普通粘土砖

普通粘土砖以普通粘土为主要原料，经配料调制、制坯、干燥及焙烧等工艺制成。制造普通粘土砖的粘土属次生粘土中的易熔粘土，耐火度低于 1350°C ，其主要的构成矿物为高岭石 $2\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{H}_2\text{O}$ 及其它水化铝硅酸盐、石英 SiO_2 、长石、褐铁矿 $2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot3\text{H}_2\text{O}$ 、赤铁矿 Fe_2O_3 、菱铁矿 FeCO_3 、黄铁矿 FeS_2 、方解石 CaCO_3 、菱镁矿 MgCO_3 、石膏 $\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$ 或金红石 TiO_2 等。其中：二氧化硅约占40~80%；氧化铝约占10~40%；氧化铁的含量一般低于7%，它是决定制品颜色及降低粘土熔点的重要因素。粘土毛坯气缩为4.86~27%，烧结收缩为-2.88（即膨胀）至5.92%。粘土按颗粒组成不同，可分为肥粘土、粘土、砂质粘土（亚粘土）、砂质壤土（砂质垆母、亚砂土）及砂等五级。肥粘土及粘土宜于制瓦及薄壁空心制品；砂质粘土及砂质壤土宜于制普通粘土砖。

粘土加适当水拌和后具有可塑性，在外力作用下可做成各种形状的坯体。焙烧初期，粘土中的自由水分逐渐蒸发，温度升高至 110°C 左右时，自由水分全部脱除。温度继续升高，在大约 $450\sim850^{\circ}\text{C}$ 范围内，各种粘土矿物的结晶水脱出，碳素全部燃尽，高岭石和其它粘土矿物逐渐被分解，成为不溶于水的多孔性结构，强度很低。再继续升温，二价铁氧化成为三价铁，粘土中的易熔成分开始熔化，逐渐玻璃化成为液相充填于不熔物或难熔物的空隙中，并将其粘结成为整体。此时坯体收缩，孔隙率下降，强度也相应地增高。普通粘土砖的烧成温度一般控制在 $900\sim1200^{\circ}\text{C}$ 范围内，使粘土只烧至部分熔融；温度过高，坯体将软化变形成为废品。

焙烧砖的窑有间歇式窑（土窑）和连续式窑（轮窑、隧道窑）两类。目前多采用连续式窑。窑内分预热、焙烧、保温和冷却四带。轮窑为环形窑。砖坯在轮窑中不移动；焙烧各带沿着窑道周而复始地循环移动将砖烧成。隧道窑为直线窑，砖坯从窑的一端进入，经焙烧各带后被烧制成砖，由另一端出窑。在砖窑中，若焙烧时为氧化气氛，则烧成红砖；如果砖坯在氧化气氛中焙烧至 900°C 以上，再在还原气氛中焙烧，使高价氧化铁还原成低价氧化铁，则能烧成青砖。青砖较红砖结实，耐碱蚀，耐久性好，但价格较红砖高。青砖一般在土窑中烧成。焙烧砖时火候要适当，以免出现坯体爆裂或成为欠火砖（色浅、声哑、强度与耐久性差）和过火砖等。

国家建委颁布的《普通粘土砖标准》（JC149-73），对砖的形状尺寸、外观、强度等技术要求，均作了具体规定。砖的标准尺寸为 $240\times115\times53\text{mm}$ ；考虑砌筑灰缝为10mm，则4块砖长、8块砖宽和16块砖厚均为1m，每立方米砖砌体约需砖500块；每千块砖重约2500kg。对砖的质量要求是：砖面平直，棱角齐整，没有窑斑；断口致密，无孔眼、裂缝，