

# 第一章 道路材料的基本性质



## 第一节 物理性质

### 一、密度、表观密度、毛体积密度、饱和面干密度、松方密度

#### (一) 密度

材料在绝对密实状态下(不含内部任何孔隙)单位体积的质量称为材料的密度,定义式如下:

$$\rho_t = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中  $\rho_t$ ——材料的密度  $g/cm^3$ ;

$m$ ——材料的绝对干燥质量  $g$ ;

$V$ ——材料在绝对密实状态下的体积(不含内部任何孔隙的体积),  $cm^3$ 。

材料的密度  $\rho_t$  取决于材料的组成与微观结构。当材料的组成与微观结构一定时,材料的密度  $\rho_t$  为常数。

为测得含孔隙材料的绝对密实体积  $V$  须将材料研磨成细粉末,使材料内部的所有孔隙外露(即全部成为开口孔隙)用排开液体的方法来测定。

#### (二) 表观密度

材料在自然状态下不含开口孔隙时,单位体积的质量称为材料的表观

密度 又称视密度 定义式如下：

$$\rho_a = \frac{m}{V'} = \frac{m}{V + V_b} \quad (1-2)$$

式中： $\rho_a$ ——材料的表观密度  $g/cm^3$ ；

$V'$ ——材料在自然状态下不含开口孔隙时的体积， $cm^3$ ；

$V_b$ ——材料内部闭口孔隙的体积， $cm^3$ 。

测定材料的表观密度  $\rho_a$  时，直接采用排水法测定材料的体积  $V'$ 。

### (三) 毛体积密度

材料在自然状态下，含内部所有孔隙时，单位体积的质量称为材料的毛体积密度 又称体积密度 定义式如下：

$$\rho_b = \frac{m}{V_0} = \frac{m}{V + V_p} = \frac{m}{V + V_b + V_k} \quad (1-3)$$

式中： $\rho_b$ ——材料的毛体积密度  $kg/m^3$  或  $g/cm^3$ ；

$V_0$ ——材料在自然状态下的体积（包括材料内部所有闭口孔隙和开口孔隙的体积）， $m^3$  或  $cm^3$ ；

$V_p$ ——材料内部所有孔隙的体积（ $V_p = V_b + V_k$ ）， $m^3$  或  $cm^3$ ；

$V_k$ ——材料内部开口孔隙的体积， $m^3$  或  $cm^3$ 。

材料的自然状态体积  $V_0$  对于规则形状的材料直接测定外观尺寸 计算其体积即可；对于不规则形状的材料则须在材料表面涂蜡后（封闭开口孔隙）用排水法测定。

材料的毛体积密度除与材料的密度有关外，还与材料内部孔隙的体积  $V_p$  有关系。材料的孔隙率越大，则材料的毛体积密度越小。

### (四) 饱和面干密度

材料在吸水饱和状态下，含内部所有孔隙时，单位体积的质量称为材料的饱和面干体积密度，又称饱和面干密度或表干密度，定义式如下：

$$\rho_s = \frac{m'_{sw}}{V_0} = \frac{m'_{sw}}{V + V_p} = \frac{m'_{sw}}{V + V_b + V_k} \quad (1-4)$$

式中： $\rho_s$ ——饱和面干密度， $g$  或  $kg$ ；

$m'_{sw}$ ——内部吸水饱和，而表面干燥时（表面无发亮的水迹）材料的质量， $g$  或  $kg$ ；

其余符号意义同式 1-3)。

## (五) 松方密度

散粒材料或粉末状材料在自然堆积状态下，单位体积的质量称为松方密度 定义式如下：

$$\rho = \frac{m}{V'_0} = \frac{m}{V_0 + V_v} \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ ——材料的松方密度  $\text{kg/m}^3$ ；

$V'_0$ ——材料在堆积状态下的体积（包括颗粒间空隙的体积）， $\text{m}^3$ ；

$V_v$ ——材料颗粒间空隙的体积  $\text{m}^3$ 。

按堆积的紧密程度分为自然堆积状态、捣实堆积状态、振实堆积状态，相应的松方密度称为堆积密度、捣实密度、振实密度。

材料的松方密度与材料的毛体积密度、堆积的紧密程度等有关。

## 二、密实度、孔隙率与空隙率

### (一) 密实度

材料体积（自然状态）内固体物质的充实程度称为材料的密实度  $D$  定义如下：

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% = \frac{\rho_b}{\rho_t} \times 100\% \quad (1-6)$$

密实度  $D$  反映材料的密实程度， $D$  越大 材料越密实。

### (二) 孔隙率

孔隙率是指材料内部孔隙体积占材料在自然状态下体积的百分率。孔隙率分为开口孔隙率和闭口孔隙率。

#### 1. 孔隙率

材料内部所有孔隙的体积与材料在自然状态下体积的百分率称为材料的孔隙率  $P$  定义式如下：

$$P = \frac{V_p}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{V}{V_0} = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100\% \quad (1-7)$$

#### 2. 开口孔隙率

材料内部开口孔隙的体积与材料在自然状态下体积的百分率称为材料

的开口孔隙率  $P_k$ 。由于水可进入开口孔隙，工程中常将材料在吸水饱和状态下所吸水的体积  $V_{sw}$  视为开口孔隙的体积  $V_k$  开口孔隙率可表示为：

$$P_k = \frac{V_k}{V_0} = \frac{V_{sw}}{V_0} = \frac{m_{sw}}{V_0} \cdot \frac{1}{\rho_w} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中： $V_{sw}$ ——吸水饱和状态下所吸水的体积， $\text{cm}^3$ ；

$m_{sw}$ ——吸水饱和状态下所吸水的质量， $\text{g}$ ；

$\rho_w$ ——水的密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 3. 闭口孔隙率

材料内部闭口孔隙的体积与材料在自然状态下体积的百分率称为材料的闭口孔隙率  $P_b$  定义式如下：

$$P_b = \frac{V_b}{V_0} = \frac{V_p - V_k}{V_0} = P - P_k \quad (1-9)$$

### (三) 空隙率

材料在堆积状态下，颗粒间空隙的体积  $V_v$  占堆积体积的百分率称为空隙率 又称间隙率 定义式如下：

$$n = \frac{V_v}{V'_0} = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right) \times 100\% \quad (1-10)$$

对于致密砂石，如普通天然砂、石，可用视密度  $\rho_a$  近似替代体积密度  $\rho_b$  式(1-10)可写为：

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_a}\right) \times 100\% \quad (1-11)$$

对于水泥混凝土用集料，通常采用自然堆积状态和振实状态下的空隙率。对于沥青混合料用集料，通常采用捣实状态下的空隙率，又称间隙率  $VCA_{DRC}$ 。

在配制水泥混凝土、砂浆、沥青混合料等时 为节约水泥、沥青等胶凝材料 改善混凝土、沥青混合料的性能 宜选用空隙率  $n$  或间隙率  $VCA_{DRC}$  小的砂、石。

## 三、材料的吸水性与耐水性

### (一) 材料的吸水性

吸水性是材料在水中吸收水分的性质，用  $w_m$  表示 定义式如下：

$$w_m = \frac{m_{sw}}{m} \times 100\% = \frac{m'_{sw} - m}{m} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中： $m_{sw}$ ——材料吸水饱和时所吸水的质量，g 或 kg；

$m'_{sw}$ ——材料吸水饱和时材料的质量，g 或 kg

当材料未达到饱和状态时，由上式计算得的结果称为含水率。

砌筑石材采用真空吸水饱和，混凝土、砂石集料采用常压吸水饱和。

吸水率主要与材料的孔隙率，特别是开口孔隙率有关。孔隙率大或体积密度小，特别是开口孔隙率大的亲水性材料具有较大的吸水率。

岩石的吸水率与岩石的致密程度和岩石的矿物组成有关。侵入岩和多数变质岩的吸水率较小，一般不超过 1%。二氧化硅的亲水性较好，因而二氧化硅含量高则吸水率较高，即酸性岩石 ( $\text{SiO}_2 \geq 65\%$ ) 的吸水率相对较高。岩石的吸水率越小，则岩石的强度与耐久性越高。

由于常压下封闭孔隙不吸水，而主要是开口孔隙吸水，因此可以认为当材料吸水饱和时，材料所吸水的体积  $V_{sw}$  与开口孔隙的体积  $V_k$  相等，即  $V_{sw} = V_k$ 。由此可知材料的吸水率可直接或间接反映材料的部分内部结构及其性质，即可根据材料吸水率的大小对材料的孔隙率、孔隙状态及材料的性质做出粗略的评价。

## (二 材料的耐水性

材料长期在水的作用下，保持其强度的能力称为材料的耐水性。

材料的耐水性用软化系数  $K_p$  来表示，定义式如下：

$$K_p = \frac{f_{sw}}{f_d} \quad (1-13)$$

式中  $f_{sw}$ ——材料在吸水饱和状态下的抗压强度，MPa；

$f_d$ ——材料在绝干状态下的抗压强度，MPa。

材料的软化系数  $K_p$  的选值为 0~1.0。 $K_p \geq 0.85$  时称为耐水性材料。经常受到潮湿或水作用的结构，须选用  $K_p \geq 0.75$  的材料，重要结构须选用  $K_p \geq 0.85$  的材料。

## 四、材料的抗渗性

抗渗性是指材料抵抗压力水或其他液体渗透的性质。抗渗性用渗透系数  $K$  来表示，计算式如下：

$$K = \frac{Qd}{AtH} \quad (1-14)$$

式中： $K$ ——渗透系数， $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或  $\text{m}/\text{h}$ ；

$Q$ ——渗水量， $\text{m}^3$ ；

$d$ ——试件厚度， $\text{m}$ ；

$A$ ——渗水面积， $\text{m}^2$ ；

$t$ ——渗水时间， $\text{h}$ ；

$H$ ——水头（水压力）， $\text{m}$ 。

渗透系数  $K$  越大，材料的抗渗性越差。

材料的抗渗性与材料内部的孔隙率，特别是开口孔隙率有关。开口孔隙率越大，大孔含量越多，则抗渗性越差。

混凝土类材料的抗渗性常采用抗渗等级来表示，即在规定的试验方法下，混凝土材料所能抵抗的最大水压力来表示。如 P2、P4、P6、P8、P10、P12 等，分别表示可抵抗 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2MPa 的水压力。对于抗渗性高的高性能混凝土材料，水压法难以表征其抗渗性，因此目前采用  $\text{Cl}^-$  离子扩散系数、电导量等来表征其抗渗性。混凝土的氯离子扩散系数  $D_{\text{NEL}}$  评定标准见表 1-1。

混凝土渗透性的氯离子扩散系数  $D_{\text{NEL}}$  评定标准 (CCES01—2004) 表 1-1

氯离子扩散系数 ( $10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ )	> 1000	500 ~ 1000	100 ~ 500	50 ~ 100	10 ~ 50	< 10
混凝土渗透性等级	I	II	III	IV	V	VI
混凝土渗透性评价	很高	高	中	低	很低	可忽略

桥梁、隧道等与水或腐蚀介质接触的工程等，所用材料应具有一定的抗渗性。对于防水材料则应具有很好的抗渗性。

材料的抗渗性与材料的耐久性（抗冻性、耐腐蚀性等）有着非常密切的关系。一般而言，材料的抗渗性越高，水及各种腐蚀性液体或气体越不易进入材料内部，则材料的耐久性越高。

## 五、材料的抗冻性

抗冻性是材料抵抗冻融循环作用，保持其原有性质的能力。对结构材料主要指其保持强度的能力，并多以抗冻等级来表示。抗冻等级用材料在吸水饱和状态下（最不利状态）经冻融循环作用，强度损失不超过 25%（慢冻法）或动弹性模量损失不超过 20%（快冻法）且质量损失不超过 5% 时所

能抵抗的最多冻融循环次数来表示。如 F25 F50 F100 F150 F200 F250 F300 等 分别表示在经受 25 50 100 150 200 250 300 次的冻融循环后仍可满足使用要求。快冻法较慢冻法的试验条件更为严酷，因此，对于同一混凝土快冻法的冻融循环次数较慢冻法略少。目前工程上规定采用快冻法测试（动弹性模量法）

材料在冻融循环作用下产生破坏，主要是由于材料内部毛细孔隙及大孔隙中的水结冰时的体积膨胀（约 9%）以及水分迁移产生的渗透压等造成的。膨胀会对材料孔壁产生巨大的压力，由此产生的拉应力超过材料的抗拉强度极限时，材料内部产生微裂纹，造成强度下降。此外在冻结和融化过程中，材料内外的温差所引起的温度应力也会导致微裂纹的产生或加速微裂纹的扩展。

影响材料抗冻性的主要因素有：

(1) 材料的孔隙率  $P$  和开口孔隙率  $P_k$

一般情况下， $P$  越大 特别是  $P_k$  越大 则材料的抗渗性差 即材料含水量越多，因此材料的抗冻性越差。

(2) 孔隙的充水程度

充水程度以水饱和度  $K_s$  来表示，定义式如下：

$$K_s = \frac{V_w}{V_p} \quad (1-15)$$

理论上讲 若材料内部孔隙分布均匀 当水饱和度  $K_s < 0.91$  时 结冰不会引起冻害，因未充水的孔隙空间可以容纳由于水结冰而增加的体积。但当  $K_s > 0.91$  时，则已容纳不下结冰增加的体积，故对材料的孔壁产生压力，因而会引起冻害。实际上，由于局部饱和的存在和孔隙分布不均匀， $K_s$  须比 0.91 稍少才安全。如对于水泥混凝土， $K_s < 0.80$  时冻害才会明显减少。

对于受冻材料，吸水饱和状态是最不利的状态，因其水饱和度  $K_s$  最大。可以用下述关系式来估计或粗略评价多数材料抗冻性的好坏。

$$K_s = \frac{V_{sw}}{V_p} = \frac{V_k}{V_p} = \frac{W_v}{P} = \frac{P_k}{P} \quad (1-16)$$

为提高材料的抗冻性 在生产材料时常有意引入部分封闭的孔隙 如在混凝土中掺入引气剂。这些引入的闭口孔隙可切断材料内部的毛细孔隙，当开口的毛细孔隙中的水结冰时，所产生的压力可将开口孔隙中尚未结冰的水挤入到无水的封闭孔隙中（由于毛细作用，微细孔隙中水的冰点低于

0℃。如半径为  $1.5 \times 10^{-9}$  的微细孔隙中 水的冰点约为  $-75^\circ\text{C}$ ) 即这些封闭的孔隙可起到卸压的作用。

(3)材料本身的强度

材料强度越高,抵抗冻害的能力越强,即抗冻性越高。

材料的耐久性指标往往与材料抗冻性的好坏有很大的关系。一般地说 材料的抗冻性越高 则材料的耐久性也越高。

## 六、材料的干缩与湿胀

含孔材料在干燥时会产生收缩,吸湿时产生膨胀。大孔中的水失去时不会引起收缩,毛细孔隙中的水失去时会引起毛细孔内水面后退,弯月面的曲率增大 在表面张力作用下 水的内部压力比外部小 其压力差  $\Delta P$  为:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{1v}}{r} \quad (1-17)$$

式中  $\sigma_{1v}$ ——水与空气界面的表面能 (即水的表面张力),N/m;

$r$ ——水面的曲率半径 ,m。

干燥程度越高,失水量越多,毛细孔隙中水的弯月面的曲率越大,即曲率半径越小 产生的收缩力越大。吸湿时 弯月面的曲率减小 压差减少 产生湿胀。材料中的毛细孔隙越多,材料的干缩湿胀值越大。干缩湿胀值大的材料易在干湿交替时产生裂纹。

## 第二节 材料的力学性质

### 一、材料的受力变形

#### (一) 弹性

材料在外力作用下产生变形,当外力取消后,能完全恢复到原来状态的性质称为材料的弹性,材料的这种变形称为弹性变形。明显具备这种特征的材料称为弹性材料。受力后材料的应力  $\sigma$  与材料的应变  $\epsilon$  的比值称为材料的弹性模量  $E(E = \sigma/\epsilon)$ 。

#### (二) 塑性

材料在外力作用下产生变形,当外力取消后,材料仍保持变形后的形状

和尺寸的性质称为材料的塑性，将这种变形称为塑性变形。具有较高塑性变形的材料称为塑性材料。

大多数材料在受力不大时表现为弹性，受力达到一定程度时表现出塑性特征，称之为弹塑性材料。

### (三) 粘弹性

一些非晶体材料，在受力时可以同时表现出弹性和粘性，称为粘弹性。水泥混凝土、沥青混合物通常被认为是粘弹性材料。非晶体含量越高，则粘性越明显。

#### 1. 徐变

材料在恒定应力情况下，其应变随时间而缓慢增长，此种现象称为材料的徐变或蠕变，此时弹性模量也将随时间而降低。徐变属于塑性变形。

作用的外力越大，则徐变越大，最后使材料趋于破坏。受力初期，材料的徐变速度较快，后期逐步减慢直至趋于稳定。晶体材料（如岩石）的徐变很小，而非晶体材料及合成高分子材料（如沥青混合物、塑料、水泥混凝土等）的徐变较大。

#### 2. 应力松弛

材料在恒定应变情况下，其应力随时间而减小，此种现象称为材料的应力松弛或弛豫，此时弹性模量也随时间而降低。晶体材料（如岩石）的应力松弛很小，而非晶体材料，特别是合成高分子材料、沥青混合料的应力松弛较大。

材料的粘弹性可以采用符合胡克定律的弹性元件、符合牛顿液体的粘性元件、符合理想塑性的塑性元件来组合成各种不同的流变模型，来表示不同的粘弹性。图 1-1 给出了弹性元件和粘性元件力学模型及其变形曲线。

弹性元件： $\sigma$  和  $\tau$  分别表示正应力和切应力， $\epsilon$  和  $\gamma$  表示正应变和切应变， $E$  和  $G$  表示拉伸弹性模量和剪切弹性模量，则有：

$$\sigma = E\epsilon$$

或

$$\tau = G\gamma \quad (1-18)$$

粘性元件： $d\gamma/dt$  和  $d\epsilon/dt$  分别表示切应变速率和正应变速率， $K$  表示和粘液粘性有关的系数， $\eta$  表示粘液的粘度，则有：

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

或 
$$\sigma = K \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-19)$$

图 1-2 为常用的一种表示材料粘弹性的 Maxwell 模型。在 Maxwell 模型中，弹性元件和粘性元件所受的应力  $\sigma$  相同，且弹性元件的应变  $\epsilon_1$  与粘性元件的应变  $\epsilon_2$  之和等于 Maxwell 模型的应变  $\epsilon$ 。由此可得 Maxwell 方程：

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{K} \quad (1-20)$$

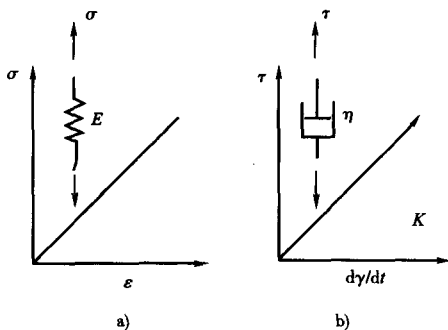


图 1-1 弹性元件、粘性元件力学模型  
a)弹性元件, b)粘性元件

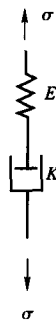


图 1-2 Maxwell 模型

在  $t=0$  瞬间加载 以后恒定应力  $\sigma = \sigma_0$  则 Maxwell 方程的解为：

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{K}t \quad (1-21)$$

即应变除瞬间弹性应变外，还随时间而不断增长。

保持  $\epsilon = \epsilon_0$  则 Maxwell 方程的解为：

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{K}t\right) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (1-22)$$

式中  $\theta = K/E$  称为松弛时间。其物理意义是  $\epsilon$  维持不变 当  $t$  等于松弛时间时 应力  $\sigma$  减少至初始应力  $\sigma_0$  的  $1/e$ 。松弛时间越长 材料的弹性越明显，越接近于理想固体，反之，则接近理想液体。对于松弛时间一定的材料 加载速度快 ( $t < \theta$ ) 则松弛现象来不及产生 材料表现为弹性 加载速度慢 ( $t > \theta$ ) 则材料表现出流动性。路口、车站处易出现车辙 与此有较大的关系。

## 二、材料的脆性与韧性

脆性是材料在荷载作用下在破坏前无明显的塑性变形而表现为突发性破坏的性质。脆性材料的特点是塑性变形很小，且抗压强度与抗拉强度的比值较大（5~50倍），无机非金属材料多属于脆性材料。

韧性又称冲击韧性，是材料抵抗冲击振动荷载的作用而不发生突发性破坏的性质，是在冲击振动荷载作用下，材料吸收能量、抵抗破坏的能力。钢材的材料冲击韧性用具有一定形状和尺寸的试件（具有U形或V形缺口），在一次冲击作用下冲断时所吸收的功来表示，称之为冲击吸收功  $A_k$  (J)；或用断口处单位面积所吸收的功来表示，称之为冲击韧性值  $\alpha_k$  (J/cm<sup>2</sup>)。

路用集料的抗冲击性是将粒径为 9.5~13.2mm 质量为  $m$  的集料装入规定的冲击杯内，以质量为 13.75kg 的冲击锤从高度为 380mm 处落下冲击集料 15 次后，测定 2.36mm 筛以下集料的质量  $m_1$ ，以 2.36mm 筛以下集料的百分含量表示，称为冲击值  $LSV = (m_1/m) \times \%$ 。

韧性材料的特点是变形大，特别是塑性变形大，抗拉强度接近或高于抗压强度。木材、建筑钢材、橡胶等属于韧性材料。

## 三、材料的强度

材料在外力或应力作用下，抵抗破坏的能力称为材料的强度，并以材料在破坏时的最大应力值来表示。

### （一）材料的理论强度

材料的破坏实际上是固体材料内部质点化学键的断裂。固体材料的强度决定于各质点间的结合力，即化学键力。对无缺陷的理想化固体材料（包括不含晶格缺陷）其理论强度为  $f_{th}$ ，即材料所能承受的最大应力，是克服固体材料内部质点间结合力形成两个新的表面所需的力，用下式表示，称为 Orowan 公式。

$$f_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{a}} \quad (1-23)$$

式中： $\gamma$ ——材料的表面能，J/m<sup>2</sup>；

$a$ ——原子间距，m。

由上式计算的理论强度  $f_{th}$  很高 为实际强度的 100 ~ 1000 倍。这是由于实际材料内部常含有大量的缺陷，如晶格缺陷、孔隙微裂纹等，从而使实际值比理论值小得多。

## (二) Griffith 断裂理论

材料受力时，在缺陷处形成应力集中导致强度降低。当脆性材料内部含有一长度为  $2c$  的微裂纹时 由 Griffith 断裂理论 其强度为：

$$f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (1-24)$$

对于延性材料，受力破坏时会产生较大的塑性变形，消耗大量的能量，即塑性功  $\gamma_p$ 。Orowan 将上式修正为：

$$f = \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_p)}{\pi c}} \quad (1-25)$$

对于延性材料 通常  $\gamma_p \gg \gamma$ 。由式 1-25 可知 材料中的裂纹尺寸越长，材料强度越小。在每一应力下都对应有一临界裂纹尺寸  $c_c$  当裂纹尺寸超过  $c_c$  时 则在该应力下 裂纹迅速扩展 并在一瞬间破坏。

Griffith 断裂理论成功地解释了材料的实际强度远低于理论强度的原因 并由此可知减少材料内部的缺陷 裂纹、孔隙等 可大幅度提高材料的强度。

## (三) 比强度

比强度是材料强度与体积密度的比值。比强度是衡量材料轻质高强性能的一项重要指标。比强度越大，则材料的轻质高强性能越好。

## 四、材料的硬度与耐磨性

### (一) 材料的硬度

硬度是材料抵抗较硬物体压入或刻画的能力。砂石材料采用莫氏硬度来测定与表示 并划分为 10 级 由小到大为滑石 1、石膏 2、方解石 3、萤石 4、磷灰石 5、正长石 6、石英 7、黄玉 8、刚玉 9、金刚石 10。

材料的硬度愈大，则材料的耐磨性愈高。

## (二) 材料的耐磨性

材料抵抗磨损的能力,称为材料的耐磨性或抗磨耗性。石料的抗磨耗能力通常用磨耗试验机测定。按测试目的和试验方法的不同,分有洛杉矶磨耗损失、狄法尔磨耗损失、道瑞磨耗值、磨光值等。

### 1. 洛杉矶磨耗损失

用于评定抵抗摩擦、撞击的能力。

洛杉矶磨耗损失是将一定粒径和数量的石料及钢球,装入到转速为  $30 \sim 33\text{r/min}$  的洛杉矶磨耗机圆筒中,经旋转 500 次或 1000 次后按下式计算:

$$Q_L = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1-26)$$

式中:  $Q_L$ ——洛杉矶磨耗损失, %;

$m_0$ ——试验前试件的绝对干燥质量, g;

$m_1$ ——试验后试件的绝对干燥质量, g。

### 2. 狄法尔磨耗损失

用于评定抗冲击能力、抗边缘剪切能力。该法仅用于无条件做洛杉矶磨耗损失试验的情况下。

狄法尔磨耗损失是将一定粒径和数量的石料及钢球(测定碎石不加钢球)装入到转速为  $30 \sim 33\text{r/min}$  的狄法尔磨耗机圆筒中,经旋转 10000 次后按下式计算:

$$Q_D = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1-27)$$

式中:  $Q_D$ ——狄法尔磨耗损失, %;

其余符号意义同上。

### 3. 道瑞磨耗值

用于评定公路路面抗滑表层所用粗集料抵抗车轮撞击及磨耗的能力。

道瑞磨耗试验是用添加细砂的环氧树脂将石料胶结为规定尺寸的试件待其固化后放在转速为  $28 \sim 30\text{r/min}$  的道瑞磨耗试验机的磨盘上,并在磨盘上洒布粒径为  $0.3 \sim 0.9\text{mm}$  的石英砂磨料旋转 500 转后按下式计算:

$$AAV = \frac{3(m_0 - m_1)}{\rho_s} \quad (1-28)$$

式中:AAV——道瑞磨耗值;

其余符号意义同上。

#### 4.磨光值

为保证道路的耐久性和行车的安全性,工程人员希望路面石料在车轮的作用下,不产生大的磨耗,同时又不被磨光。

磨光试验是用添加细砂的环氧树脂将石料胶结为规定尺寸的试件,待其固化后,安装在加速磨光机上,用流撒金刚砂的橡胶轮磨光规定的时间后,再用摆式仪测定试件的摩擦系数值,即磨光值。

磨光值通常在 30~80 之间。磨光值只是石料磨光性能的相对指标,并非路面的摩擦系数。

### 第三节 材料的化学性质

#### 一、材料的化学稳定性

大多数道路材料均具有良好的化学稳定性,即不与环境中的酸、碱、盐介质发生化学反应。化学稳定性差将导致材料的耐久性下降。

通常无机非金属材料的化学稳定性较高。但部分无机非金属材料在环境中的化学稳定性较差。如当石料中含有黄铁矿  $\text{FeS}_2$  时,会因黄铁矿与水反应生成氧化铁而使石料遭受破坏。因此,混凝土用砂石时,应限制黄铁矿的含量。此外,许多酸和一些盐类对混凝土具有腐蚀作用。

金属材料的化学稳定性差,易产生电化学腐蚀和化学腐蚀。

沥青材料和高分子材料的耐腐蚀性好,但其在光、热、电等的作用下会产生聚合或解聚反应从而使其产生老化现象。

#### 二、石料的酸碱性

沥青混合料用石料的成分和酸碱性对其与沥青的粘附性有着很大的影响。对于沥青混合料用岩石, $\text{SiO}_2$  含量大于 65%称为酸性石料, $\text{SiO}_2$  含量为 52%~65%称为中性石料, $\text{SiO}_2$  含量小于 52%称为碱性石料。配制沥青混合料时,一般希望使用  $\text{SiO}_2$  含量少而  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  含量高的碱性石料。

石料的酸碱性可通过其碱值  $C$  来评定，如下式所示：

$$C = \frac{N_0 - N_1}{N_0 - N_2} \quad (1-29)$$

式中： $N_0$ ——硫酸标准溶液中氢离子的浓度；

$N_1$ ——受检石料与硫酸标准溶液反应后，溶液中氢离子的浓度；

$N_2$ ——纯碳酸钙与硫酸标准溶液反应后，溶液中氢离子的浓度。

碱度值越高，说明石料的碱性越强，与沥青间的粘附性越强。

石料的酸碱性对水泥混凝土一般没有大的影响，但近年来，工程人员认为粗集料的酸碱性对界面过渡区的宽度、致密度以及界面粘结强度有一定的影响，碱性粗集料的界面优于中性粗集料的界面，而中性粗集料的界面又优于酸性粗集料界面。

此外，酸性集料因含有较多的石英，而石英的温度线胀系数通常较其他矿物高 1 倍左右，甚至更高，因而粗集料的酸碱性对混凝土的温度变形性能有很大的影响。在配制大体积混凝土时，应注意粗集料的酸碱性。

## 第四节 材料的耐久性

### 一、材料的耐久性

材料长期抵抗各种内外破坏因素或腐蚀介质的作用，保持其原有性质的能力称为材料的耐久性。材料的耐久性是材料的一项综合性质，一般包括有抗渗性、抗冻性、耐腐蚀性、抗老化性、抗碳化性、耐热性、耐溶蚀性、耐磨性等许多项。

材料耐久性的好坏，直接影响到道路、桥梁的使用与安全。过去工程人员主要注重材料和结构的强度，而较少考虑材料和结构在环境因素作用下的耐久性，即按强度进行设计。但目前已经认识到这一失误，并正在向按结构的耐久性进行设计过渡。

材料的组成、性质和用途不同，对耐久性的主要要求也不同，如结构材料主要要求强度不显著降低。工程的重要性及所处环境不同，则对材料耐久性年限的要求也不同。如处于严寒地区与水接触的混凝土，对抗冻性的要求远远大于非受冻地区混凝土。又如在一般使用条件下，普通工程中普通混凝土的耐久性寿命为 50 年以上，而一些重要的基础工程混凝土的耐久

性寿命至少要在 100 年以上。因此应根据工程的重要性、所处的环境及材料的特性，正确选择合理的耐久性寿命。

## 二、影响材料耐久性的主要因素

### (一) 内部因素

内部因素是造成材料耐久性下降的根本原因。内部因素主要包括材料的组成、结构与性质。当材料的组成易溶于水或其他液体，或易与其他物质产生化学反应时，则材料的耐水性、耐化学腐蚀性等较差。如岩石内含有较多的黄铁矿、云母时，风化速度快。此外，由方解石、白云石组成的岩石在含有酸性气体的环境中也易风化。

无机非金属脆性材料在温度剧变时易产生开裂，即耐急冷急热性差；晶体材料较同组成非晶体材料的化学稳定性高；当材料的孔隙率  $P$  特别是开口孔隙率  $P_k$  较大时，则材料的耐久性往往较差。对有机材料，因含有不饱和键、双键或三键等，抗老化性较差。当材料强度较高时，材料的耐久性往往较高。

### (二) 外部因素

外部因素也是影响耐久性的主要因素。外部因素主要有：

#### (1) 化学作用

包括各种酸、碱、盐及其水溶液，各种腐蚀性气体作用或氧化作用。对材料具有化学腐蚀或氧化作用。

#### (2) 物理作用

包括光、热、电、温度差、湿度差、干湿循环、冻融循环、溶解等，可使材料的结构发生变化，如内部产生微裂纹或孔隙率增加。

#### (3) 机械作用

包括冲击、疲劳荷载，各种气体、液体及固体引起的磨损与磨耗等。

#### (4) 生物作用

包括菌类、昆虫等，可使材料产生腐朽、虫蛀等而引起的破坏。

金属材料常由化学和电化学作用引起腐蚀和破坏；无机非金属材料常由化学作用、溶解、冻融、风蚀、温差、湿差、摩擦等其中某些因素或综合作用而引起破坏；有机材料常由生物作用、溶解、化学腐蚀、光、热、电等作用而引起

起的破坏。

实际工程中，虽然材料同时受到多种外界破坏因素的作用，但往往起主要作用的只有少数几个因素，故在设计、生产和使用时应重点考虑起主要破坏作用的因素。

对材料耐久性最可靠的判断是在使用条件下进行长期观测，但这需要很长的时间。通常是根据使用条件与要求，在实验室进行快速试验，据此对材料的耐久性做出判断。