第一章　土木工程材料的基本性质

本章描述

本章通过各种土木工程特点的分析，说明土木工程材料的物理性质、力学性质及耐久性；重点讲解土木工程材料的密度、与水有关的性质、强度、弹性、黏性与塑性。通过学习，学生应能够对砂石的表观密度、堆积密度、吸水率和含水率进行检测。

教学目标

1. 能力目标

能够根据材料的基本性质，合理选用、使用常用的土木工程材料。

2. 知识目标

了解材料的组成。

掌握材料的基本性质。

3. 素质目标

培养学生爱岗敬业、细心踏实、勇于进取的工作作风。

具备严谨、科学、勇于创新的工作态度。

具备较强的心理素质和良好的身体素质。

1.1　材料的组成、结构与构造及其对材料性质的影响

1.1.1　材料的组成

材料的组成包括材料的化学组成、矿物组成和相组成。它不仅影响材料的化学稳定性，而且也是决定材料物理及力学性质的重要因素。

1. 化学组成

化学组成是指材料的化学元素及化合物的种类和数量。无机非金属材料的化学成分常用各氧化物的含量来反映。土木工程材料的诸多性质都与其化学成分有关，化学组成是决定材料化学性质（耐腐蚀性、燃烧性等）、物理性质（耐水性、耐热性、保温性等）、力学性质（强度、变形等）的主要因素之一。

2. 矿物组成

矿物是指无机非金属材料中具有特定的晶体结构和特定的物理力学性能的组织结构。矿物组成是指构成材料的矿物的种类和数量。一些建筑材料的矿物组成是决定其性质的主要因素，例如天然石材、无机胶凝材料等。最明显的例子是水泥，水泥是一种无机胶凝材料，它表现出的各种特性就与它的水泥熟料矿物组成有着直接的关系。

3. 物相组成

物相是指具有相同的物理、化学性质，以及一定的化学成分和结构特征的物质。自然界中的物质可分为气相、液相、固相。凡由两相或两相以上的物质组成的材料称为复合材料，土木工程材料大多是多相固体。

1.1.2 材料的结构

材料的结构对材料的性质有重要影响。材料的结构一般分为宏观、细观和微观三个层次。

1. 宏观结构

土木工程材料的宏观结构是指肉眼可以看到或借助放大镜可观察到的（毫米级）粗大组织。其尺寸在 10^{-3} m 级以上。

（1）散粒结构。

散粒状构造指呈松散颗粒状的材料，有密实颗粒与轻质多孔颗粒之分。前者如砂子、石子等，因其致密，强度高，适合做承重的混凝土骨料。后者如陶粒、膨胀珍珠岩等，因具多孔结构，适合做绝热材料。粒状构造的材料颗粒间存在大量的空隙，其空隙率主要取决于颗粒大小的搭配。密实颗粒用作混凝土骨料时，要求紧密堆积；轻质多孔粒状材料用作保温填充料时，则希望空隙率大一些好。

（2）聚集结构。

聚集结构是指由骨料与胶凝材料胶结成的结构。其综合性能好、价格较低，如水泥混凝土、砂浆沥青混凝土、烧土制品、塑料等。

（3）多孔结构。

多孔构造的材料其内部存在大体上呈均匀分布的独立的或部分相通的孔隙，含孔率较高，孔隙又有大孔和微孔之分。具有多孔构造的材料，其性质取决于孔隙的特征、多少、大小及分布情况。一般来说，这类材料的强度较低，抗渗性和抗冻性较差，绝热性较好，如微孔结构有水泥制品、石膏制品及黏土砖瓦等，多孔结构有加气混凝土、泡沫塑料等。

（4）致密结构。

密实构造的材料内部基本上无孔隙，结构致密。这类材料的特点是强度和硬度较高，吸水性小，抗渗和抗冻性较好，耐磨性较好，绝热性差，如钢材、天然石材、玻璃、玻璃钢等。

（5）纤维结构。

纤维构造的材料内部组成有方向性，纵向较紧密而横向疏松，组织中存在相当多的孔隙。这类材料的性质具有明显的方向性，一般平行于纤维方向的强度较高，导热性较好，如木材、竹、玻璃纤维、石棉等。

（6）层状结构。

层状构造的材料具有叠合结构，它是用胶结料将不同的片材或具有各向异性的片材胶合而成整体，其每一层的材料性质不同，但叠合成层状构造的材料后，可获得平面各向同性，更重要的是可以显著提高材料的强度、硬度、绝热或装饰等性质，扩大其使用范围，如胶合板、纸面石膏板、塑料贴面板等。

（7）纹理结构。

天然材料在生长或形成过程中，自然造成天然纹理，如木材、大理石、花岗石等板材，或人工制造材料时特意造成纹理，如瓷质彩胎砖、人造花岗石板材等，这些天然或人工造成的纹理，使材料具有良好的装饰性。为了提高建筑材料的外观美，目前广泛采用仿真技术，已研制出多种纹理的装饰材料。

2. 细观结构

细观结构（原称亚微观结构）是指用光学显微镜可以观察到的微米级的组织结构。其尺寸范围为 10^{-6}～10^{-3} m。细观结构包括：

（1）晶相种类、形状、颗粒大小及其分布情况。

（2）玻璃相的含量及分布。

（3）气孔数量、形状及分布。

3. 微观结构

微观结构是指借助电子显微镜或 X 射线，可以观察到的材料的原子、分子级的结构。微观结构的尺寸范围在 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ m。材料的微观结构是指物相的种类、形态、大小及其分布特征。它与材料的强度、硬度、弹塑性、熔点、导电性、导热性等重要性质有着密切的关系。

土木工程材料的使用状态均为固体，固体材料的相结构基本上可分为晶体、玻璃体、胶体三种形式。不同结构的材料，各具不同特性。

（1）晶体。

晶体是内部质点（原子、离子、分子）在空间上按特定的规则呈周期性排列时所形成的结构。晶体具有特定的几何形状、固定的熔点和化学稳定性。晶体微观上显示各向异性，但实际应用的晶体材料，通常是由许多细小的晶粒杂乱排列组成的，故晶体材料在宏观上显示为各向同性。

晶体内质点的相对密集程度和质点间的结合力，对晶体材料的性质有着重要的影响。例如在硅酸盐矿物材料（如陶瓷）的复杂晶体结构（基本单元为硅氧四面体）中，质点的相对密集程度不高，且质点间大多是以共价键联结，变形能力小，呈现脆性。

材料的化学成分相同，但形成的晶体结构可以不同，其性能也就大有差异。如石英和硅藻土，化学成分同为 SiO_2，但各自性能颇不相同。另外，晶体结构的缺陷，对材料性质的影响很大。

（2）玻璃体。

将熔融物质迅速冷却（急冷），使其内部质点来不及按规则排列就凝固，这时形成的内部质点无序排列的固体或固态液体结构即为玻璃体，又称为无定形体或非晶体。玻璃体没有固定的熔点，其强度、导电性、导热性等低于晶体。玻璃体无固定的几何外形，具有各向同性，破坏时也无清楚的解理面，加热时无固定的熔点，只出现软化现象。同时，因玻璃体是在快速急冷下形成的，故内应力较大，具有明显的脆性，如玻璃。

由于玻璃体在凝固时质点来不及作定向排列，质点间的能量只能以内能形式储存起来，因此玻璃体具有化学不稳定性，亦即存在化学潜能，在一定的条件下，易与其他物质发生化学反应，例如粉煤灰、水淬粒化高炉矿渣、火山灰等均属玻璃体。玻璃体常被大量用作硅酸盐水泥的掺合料，以改善水泥性质。

（3）胶体。

物质以极其微小的颗粒（粒径为 $10^{-9}\sim10^{-7}$ m）分散在连续相介质中形成的结构，称为胶体。其中分散粒子一般带有电荷（正电荷或负电荷），而介质带有相反的电荷，从而使胶体保持稳定。由于胶体的质点很微小，其总的表面积很大，因而表面能很大，有很强的吸附力，所以胶体具有较强的黏结力。

胶体中分散的微粒作布朗运动时，这种胶体称溶胶。溶胶具有较大的流动性，建筑材料中的涂料就是利用这一性质配制而成的。当溶胶脱水或微粒产生凝聚，使分散质点不能再按布朗运动自由移动时，称为凝胶。凝胶具有触变性，即将凝胶搅拌或振动，又能变成溶胶。水泥浆、新拌混凝土、胶黏剂等均表现出触变性。当凝胶完全脱水则成干凝胶体，它具有固体的性质，即产生强度。硅酸盐水泥主要水化产物的最后形式就是凝胶体。

材料的宏观结构不同，即使组成与微观结构等相同，材料的性质与用途也不同，如玻璃与泡沫玻璃、密实的灰砂硅酸盐砖与灰砂加气混凝土，它们的许多性质及用途有很大的不同。材料的宏观结构相同或相似，则即使材料的组成或微观结构等不同，材料也具有某些相同或相似的性质与用途，如泡沫玻璃、泡沫塑料、加气混凝土等。

1.1.3 材料的构造

材料的构造是指具有特定性质的材料结构单元间的相互组合搭配情况。构造概念与结构概念相比，更强调了相同材料或不同材料的搭配组合关系。

1.1.4 材料中的孔隙与材料性质的关系

1. 孔隙的分类

按孔隙的大小，可将孔隙分为微小孔隙、细小孔隙（毛细孔）、粗大孔隙等。对于无机非金属材料，孔径小于 20 nm 的微小孔隙，水或有害气体难以侵入，可视为无害孔。

按孔隙形状可将孔隙分为球形孔隙、片状孔隙（即裂纹）、管状孔隙、墨水瓶状孔隙、带尖角的孔隙等。片状孔隙、管状孔隙、带尖角的孔隙对材料性质的影响较大。

按常压下水能否进入到孔隙中，将常压水可以进入的孔隙称为开口孔隙，而将常压水不能进入的孔隙称为闭口孔隙。另外，开口孔中有些孔不仅与外界相通，而且彼此贯通，称为连通孔。开口孔隙对材料性质的影响较闭口孔隙大，往往使材料的大多数性质降低（吸声性除外）（图 1-1）。

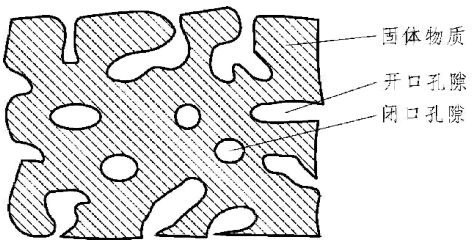


图 1-1　材料内孔隙示意图

2. 孔隙特征对材料性质的影响

孔隙特征是指材料内部孔隙的大小、形状、分布、连通与否等构造上的特征，对材料的物理、力学性质均有显著影响。一般情况下，材料孔隙率越大，则材料的表观密度、堆积密度、强度均越小，耐磨性、抗冻性、抗渗性、耐腐蚀性、耐水性及其他耐久性越差，而保温性、吸声性、吸水性与吸湿性等越强。

1.2　土木工程材料的基本性质及材料的体积组成

1.2.1　土木工程材料的基本性质

1. 材料的物理性质

（1）材料与质量有关的性质，如密度、表观密度、堆积密度、孔隙率和空隙率等。

（2）材料与水有关的性质，如亲水性与憎水性、吸水性、吸湿性、耐水性、抗渗性、抗冻性等。

（3）材料与热有关的性质，如热容量、比热容、导热性、耐火性、耐燃性等。

2. 材料的力学性质

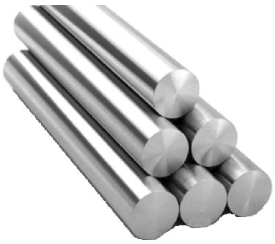
材料的强度、比强度、弹性与塑性、脆性与韧性、硬度和耐磨性等。

3. 材料的耐久性

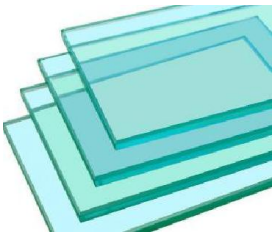
耐久性是材料抵抗自身和自然环境双重因素长期破坏作用的能力。

1.2.2　材料的体积组成

除钢材、玻璃和沥青（图 1-2）等少数材料外，绝大多数土木工程材料的内部都含有孔隙。



钢材



玻璃

沥青

图 1-2　致密材料

孔隙的多少和孔隙的特征对材料的性能会产生很大的影响。

含孔材料的体积包括三大部分：

（1）材料绝对密实体积，用 V 表示。绝对密实体积是指只有构成材料的固体物质本身的体积，即固体物质内不含有孔隙的体积。

（2）材料的孔隙体积，用 V_P 表示。$V_P = V_B + V_K$，其中：V_B 表示材料的闭口孔隙的体积；V_K 表示材料的开口孔隙的体积。

含孔材料（散粒堆积材料除外）在自然状态下的体积，用 V_0 表示。$V_0 = V + V_P = V + V_B + V_K$，是指材料的绝对密实体积与材料全部孔隙体积之和。

（3）空隙或间隙体积，用 V_J 表示。对于散粒状的堆积材料，如土、砂子和石子等堆积材料，材料的堆积体积除了包含绝对密实体积和孔隙体积外，还包括颗粒堆积时，颗粒与颗粒之间的空隙体积或间隙体积（V_J），所以堆积材料的堆积体积表示为 $V_0' = V + V_P + V_J = V + V_B + V_K + V_J$。

1.3 土木工程材料的物理性质

1.3.1 与质量状态有关的物理性质

密度是指物质单位体积的质量，单位符号为 g/cm^3 或 kg/m^3。材料由于所处的体积状况不同，故有真实密度、表观密度、体积密度和堆积密度之分。

1. 材料的密度、表观密度、体积密度与堆积密度

（1）密度。

密度，也称为真实密度（用符号“ρ”表示），是指材料在规定条件（105 °C±5 °C 烘干至恒重，再冷却至 20 °C）、材料绝对密实状态下（绝对密度状态体积是指不包括任何孔隙在内的体积）单位体积所具有的质量，按照（1-1）式进行计算。

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中：ρ——材料的密度，g/cm^3 或 kg/m^3；

m——材料在绝对干燥状态下的质量，g 或 kg；

V——材料的绝对密实体积，cm^3 或 m^3。

材料的密度大小取决于组成物质的原子量和分子结构，例如金刚石为 3.4～3.5 g/cm^3，C60 为 1.68 g/cm^3，石墨为 2.21～2.26 g/cm^3。

除钢材、玻璃和沥青等少数材料外，绝大多数土木工程材料的内部都含有孔隙。在测定有孔隙材料（如砖、石等）的密度时，应把材料磨成细粉，干燥后，用李氏瓶测定其绝对密实体积。材料磨得越细，测得的密实体积数值就越精确。一般要求细粉的粒径至少小于 0.2 mm。

另外，工程上还经常用到比重的概念，比重又称相对密度，是用材料的质量与同体积（绝

对密实体积）水在 4 °C 时的质量的比值。相对密度无单位，其在数值上与材料的真实密度相同（g/cm^3）。

（2）表观密度。

表观密度是指单位体积（含材料实体及闭口孔隙体积）物质颗粒的干质量，也称视密度。按下式计算：

$$\rho' = \frac{m}{V'} \tag{1-2}$$

式中：ρ'——材料的表观密度，g/cm^3 或 kg/cm^3；

m——材料在绝对干燥状态下的质量，g 或 kg；

V'——材料在包含闭口孔隙条件下的体积(即只含内部闭口孔，不含开口孔)，见图 1-3，cm^3 或 m^3。

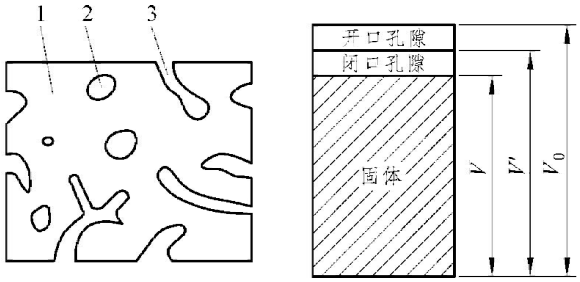


图 1-3　自然状态下体积示意图

1—固体；2—闭口孔隙；3—开口孔隙

通常，材料在包含闭口孔隙条件下的体积是采用排液置换法或水中称重法测量的。

（3）体积密度。

体积密度是指材料在自然状态下单位体积（包括材料实体及其开口孔隙、闭口孔隙）的质量，俗称容重。体积密度按照（1-3）式进行计算。

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \tag{1-3}$$

式中：ρ_0——材料的体积密度，g/cm^3 或 kg/m^3；

m——材料在自然状态下的质量，g 或 kg；

V_0——材料在自然状态下的体积，包括材料实体及其开口孔隙、闭口孔隙，见图 1-1，cm^3 或 m^3。

测定材料在自然状态下的体积的方法比较简单。

对于规则形状材料的体积，可用量具测得，如加气混凝土砌块的体积是逐块量取长、宽、高三个方向的轴线尺寸，计算其体积。

对于不规则形状材料的体积，可用排液法或封蜡排液法测得。为了防止液体由材料孔隙渗入材料内部，从而影响材料的体积测定，可以在材料的表面用蜡进行封涂。

毛体积密度是指单位体积（含材料的实体矿物成分及其闭口孔隙、开口孔隙等颗粒表面轮廓线所包围的毛体积）物质颗粒的干质量。因其质量是指试件烘干后的质量，故也称干体积密度。

（4）堆积密度。

散粒材料（粉状或粒状材料）在堆积状态下，单位体积（包含了颗粒的孔隙及颗粒之间的空隙）材料的质量称为材料的堆积密度，按照（1-4）式进行计算。

$$\rho_0' = \frac{m}{V_0'} \tag{1-4}$$

式中：ρ_0'——散粒材料的堆积密度，g/cm^3 或 kg/m^3；

m——散粒材料在堆积状态下的质量，g 或 kg；

V_0'——散粒材料在堆积状态下的体积，cm^3 或 m^3。

材料的堆积体积包括材料绝对体积、开口孔隙体积、闭口孔隙体积和颗粒间的空隙体积。材料的堆积密度反映散粒构造材料堆积的紧密程度及材料可能的堆放空间。

测定散粒材料的体积可通过已标定容积的容器计量而得。测定砂子、石子的堆积密度即用此法求得。若以捣实体积计算，则称紧密堆积密度。

在土木工程中，计算材料用量、构件自重、配料用量及确定材料的堆放空间时经需常要用到材料的密度、表观密度、毛体积密度和堆积密度等数据。常用土木工程材料的有关数据见表 1-1。

表 1-1　常用土木工程材料的密度、表观密度、堆积密度和孔隙率

材　料	密度 ρ/（$kg\cdot m^{-3}$）	表观密度 ρ/（$kg\cdot m^{-3}$）	孔隙率 P/%
石灰岩	2.60	1 800～2 600	—
花岗岩	2.80	2 500～2 700	0.5～3.0
碎石（石灰岩）	2.60	—	—
砂	2.60	—	—
黏土	2.60	—	—
普通黏土砖	2.50	1 600～1 800	20～40
黏土空心砖	2.50	1 000～1 400	—
水泥	2.50	—	—
普通混凝土	3.10	2 100～2 600	5～20
轻骨料混凝土	—	800～1 900	—
木材	1.55	400～800	55～75
钢材	7.85	7 850	0
泡沫塑料	—	20～50	—
玻璃	2.55	—	—

由于大多数材料或多或少均含有一些孔隙，故一般材料的表观密度总是小于其密度，即：

$$\rho > \rho_0 > \rho_0'$$

2. 材料的孔隙率与密实度

（1）孔隙率。

材料内部孔隙体积占材料自然状态下体积的百分率称为材料的孔隙率，按照（1-5）式进行计算。

$$P=\frac{V_{\mathrm{P}}}{V_0}\times 100\%=\frac{V_0-V}{V_0}\times 100\%=\left(1-\frac{\rho_0}{\rho}\right)\times 100\% \tag{1-5}$$

材料孔隙率的大小直接反映材料的密实程度，孔隙率小，则密实程度高。

① 开口孔隙率。

开口孔隙率即开孔体积与材料在自然状态下体积的百分率。

$$P_{\mathrm{k}}=\frac{V_{\mathrm{k}}}{V_0}\times 100\% \tag{1-6}$$

② 闭口孔隙率。

闭口孔隙率即闭孔体积与材料在自然状态下体积的百分率。

$$P_{\mathrm{b}}=\frac{V_{\mathrm{b}}}{V_0}\times 100\% \tag{1-7}$$

$$P=P_{\mathrm{k}}+P_{\mathrm{b}} \tag{1-8}$$

（2）密实度。

材料的绝对密实体积占自然状态下体积的百分率称为材料的密实度。密实度反映了材料体积内被固体物质所填充的程度，按照（1-9）式进行计算：

$$D=\frac{V}{V_0}\times 100\%=\frac{\rho_0}{\rho}\times 100\% \tag{1-9}$$

密实度与孔隙率之间的关系为：

$$P+D=1$$

含有孔隙的固体材料的密实度均小于 1。材料的很多性能如强度、吸水性、耐久性、导热性等均与其密实度有关。

工程上，一般通过测定材料的密度和表观密度来计算材料的孔隙率。

连通孔隙不仅彼此贯通且与外界相通，而封闭孔隙彼此不连通且与外界隔绝。孔隙按其尺寸大小又可分为粗孔和细孔。孔隙率的大小及孔隙本身的特征与材料的许多重要性质，如强度、吸水性、抗渗性、抗冻性和导热性等都有密切关系。一般而言，孔隙率小，且连通孔较少的材料，其吸水性较小，强度较高，抗渗性和抗冻性较好。几种常用土木工程材料的孔隙率见表 1-1。

3. 材料的空隙率与填充率

（1）空隙率。

散粒材料颗粒之间的空隙体积占材料堆积体积的百分率称为材料的空隙率，按照（1-10）式进行计算：

$$P' = \frac{V_J}{V_0'} \times 100\% = \frac{V_0' - V_0}{V_0'} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0'}{\rho_0}\right) \times 100\% \qquad (1\text{-}10)$$

空隙率的大小反映了散粒材料的颗粒相互填充的程度。

（2）填充率。

材料在自然状态下的体积占堆积体积的百分率称为材料的填充率。填充率反映了材料被颗粒填充的程度，按照（1-11）式进行计算：

$$D' = \frac{V_0}{V_0'} \times 100\% = \frac{\rho_0'}{\rho_0} \times 100\% \qquad (1\text{-}11)$$

密实度与空隙率之间的关系为：

$$P' + D' = 1$$

空隙率的大小反映了散粒材料的颗粒相互填充的致密程度。空隙率可作为控制混凝土骨料级配与计算含砂率的依据。