

# 第一章 绪 论

各种土木工程都是由材料构成的，这些构成材料的性质决定了土木工程的使用性能，因此材料不仅是构成各种土木工程的物质基础，而且是决定不同种类土木工程性能的主要因素。为使土木工程获得结构安全可靠，使用状态良好及美观、经济的性能，就必须合理选择与正确使用材料。为此，学习与掌握材料的有关知识对于从事土木工程建设、保证工程质量、促进技术进步和降低工程成本等至关重要。

## 第一节 土木工程材料的分类

自然界中的各种材料几乎都可用于土木工程建设，就其定义来说，土木工程材料就是土木工程中使用的各种材料，或构成土木工程的各种材料都是土木工程材料。为便于学习和应用，土木工程中常从不同角度对其分类。

### 一、按主要组成成分分类

1) 有机材料：它包括天然有机材料（如木材、天然纤维、天然橡胶等）及人工合成有机材料（如石油沥青、胶粘剂、合成橡胶、合成树脂等），它们均是以有机物构成的材料，具有有机物质耐水性好等一系列特性。

2) 无机材料：它包括金属材料（如各种钢材、铝材、铜材等）及非金属材料（如天然石材、水泥、石灰、石膏、陶瓷、玻璃、各种人造石材和人造矿物棉等），它们均是以无机物构成的材料，具有无机物质耐久性好等一系列特性。

3) 复合材料：它包括有机-无机复合材料（如沥青混合料、聚合物混凝土、金属增强塑料、玻璃钢等）塑料复合材料及金属-无机非金属材料（如钢筋混凝土、钢纤维混凝土、夹丝玻璃等）。由于它们能够克服单一材料的弱点，发挥复合后材料的综合优点，满足了当代土木建筑工程对材料性能的要求。因此，复合材料目前已经成为应用最多的土木工程材料。

### 二、按材料在工程中的作用分类

1) 结构材料：承受荷载作用的材料（如构筑物的基础、柱、梁所用的材料），结构材料的合格与否是决定土木工程结构的安全性与使用可靠性的关键。

2) 其他功能材料：具有其他功能（如起围护作用的材料、起防水作用的材料、起装饰作用的材料、起保温隔热作用的材料等）。功能材料的选择与使用是否科学合理，往往决定了工程使用的可靠性、适用性和美观效果。

### 三、按使用部位分类

按使用部位可将土木工程材料分为：建筑结构材料、桥梁结构材料、水工结构材料、路面结构材料、建筑墙体材料、建筑装饰材料、建筑防水材料、建筑保温材料等。材料在不同部位中使用时，对其主要性能的要求不尽相同，各自的技术质量标准也可能有所差别。

## 第二节 土木工程材料的质量及其技术标准

### 一、土木工程材料的质量

材料的质量是影响土木工程质量与技术水平最直接和最重要的因素之一。掌握与控制好材料的质量对于保证工程质量具有决定性作用。然而，不同的工程或工程部位，对于材料的质量指标类型或其标准要求可能不同。这就要求我们对于不同的工程或工程部位确定相适应的质量指标。

材料的质量产生于生产、贮运、应用等过程中，主要决定于材料的组成与结构。要想正确地选择和使用质量合格的材料，必须掌握材料的质量形成过程，工程对材料质量的具体要求，以及正确检测或鉴别材料质量的方法。从应用的角度来看，首先必须正确掌握材料的技术和质量标准。

### 二、土木工程材料的技术标准

#### 1. 标准的概念与分类

标准就是对重复性事物和概念所做的统一规定。它以科学技术和实践经验的综合成果为基础，经有关方面协商一致，由主管机构批准，以特定形式发布，作为共同遵守的准则和依据。简而言之，标准就是对某项技术或产品所实行统一规定的各项技术指标的要求。任何技术或产品必须符合相关标准才能生产和使用，因此，建筑材料标准是工程中对所使用材料进行质量检验的依据。工程实际中要正确地选择、验收和使用材料，必须掌握材料的各项标准。

依据适用范围，我国现行的常用标准有三大类。

第一类是国家标准如《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》(GB175—1999)。其中“GB”为国家标准的代号，“175”为标准编号；“1999”为标准颁布年代号；“硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥”为该标准的技术产品名称。上述标准为强制性国家标准任何技术产品不得低于此标准规定的技术指标。此外还有推荐性国家标准以“GB/T”为标准代号它表示也可以执行其他标准为非强制性。如《建筑用砂》(GB/T14684—2001)表示建筑用砂的国家推荐性标准标准代号为14684颁布年代为2001年。

第二类是行业标准如《混凝土路面砖》(JC/T 446—2000)。其中“JC”为颁布此标准的建材行业标准代号，其他行业标准代号见表1-1；“T”表示为推荐标准；“446”为此技术标准的二级类目序号；“2000”为标准颁发年代号。

表 1-1 几个行业的标准代号

行业名称	建工行业	冶金行业	石化行业	交通行业	建材行业	铁路行业
标准代号	JG	YJ	SH	JT	JC	TB

第三类是企业标准代号为“QB/”其后分别注明企业代号、标准顺序号、制定年代号。根据国家标准法规规定同一产品或技术的企业标准，其技术指标要求不得低于国家标准或地方标准。

工程中可能采用的其他技术标准还有国际标准(代号ISO)、美国国家标准(ANS)、美国材料与试验学会标准(ASTM)、英国标准(BS)、德国工业标准(DIN)、日本工业标准(JIS)、法国标

准 NF 筹。

## 2. 材料技术标准在土木工程中的应用

为使材料满足设计要求的技术性能和相应的使用环境及使用条件，材料的技术性能就必须达到相应的技术要求。因此，土木工程材料在使用前，必须根据工程要求通过验证试验，检验其部分或全部技术性质指标。只有这些指标能够达到技术标准规定的要求时，才允许其在工程中使用。

在材料管理工作中，了解与确定材料的技术性质时，也必须要求使用统一的标准方法检测其技术参数 此时也应遵守材料的试验标准（或称试验规程）在材料的贮运、使用方面 国家也规定了相应的质量标准。在各种土木工程建设过程中，只有掌握了这些标准，并按照其进行操作和使用，才能正确管理与使用好材料。

## 第三节 材料在土木工程中的作用

### 一、材料对保证土木工程质量的的作用

在土木工程建设中工程质量优良是人们追求的第一目标，而工程质量的优劣通常与所采用材料的优劣及使用的合理与否有直接的关系。以往工程实践表明，从材料的选择、生产、使用、检验评定 到材料的贮运、保管等都必须做到科学合理。否则 任何环节的失误都可能造成工程质量缺陷，甚至是重大质量事故，国内外土木工程的重大质量事故无不与材料的质量不良有关。因此，在土木工程建设中要获得质量可靠的工程，就必须准确熟练地掌握有关材料的知识，能够正确地选择和使用有关材料。此外，工程建设的许多质量信息大多来自材料，都是通过材料的表现来传递的。

### 二、材料对工程造价的影响

在一般土木工程的总造价中，与材料有关的费用通常占 50% 以上。在实际工程建设过程中，在满足相同技术指标和质量要求的前提下，选择不同的材料可能对工程的构成成本影响很大；相同的材料采用不同的使用方法也可能产生不同的经济效果；材料的贮运、保管等管理不当，也可能造成很大的浪费。工程实际中只有通过合理地选择、使用与管理材料，才能最大限度地获得经济效益。合格的建筑企业绝不会采取以次充好、盲目使用材料的做法来降低成本。土木工程建设中通过降低材料损耗的方法来降低成本，这也是工程技术人员通常采用的方法。

### 三、材料对土木工程技术的影响

在土木工程建设过程中，工程的设计方法、施工方法都与材料密切相关。通常，采用不同的材料就决定了工程的施工工艺与施工方法。从土木工程和土木工程技术发展历史来看，材料性能的变化往往是变革工程建造方法的基础，是决定土木工程结构设计形式和施工方法的主要因素。在工程设计过程中，欲更完美地实现设计意图，就必须选择适当的材料，结合所选材料的特性，最大程度地优化并满足人们对工程性能的要求。在工程施工过程中，许多技术问题的解决往往离不开材料性能的改进或使用方法的改进。此外，某些新材料的出现通常会促使建筑施工技术的改进，产生更好的技术效果。

## 第四节 土木工程材料的发展现状及发展方向

### 一、当代土木工程材料的发展与应用现状

从某种程度上来说，土木工程采用的材料往往标志着一个时代的特点。随着人类文明及科学技术的不断进步，土木工程材料也在不断进步与更新换代。在现代土木工程中，尽管传统的土、石等材料仍在基础工程中广泛应用，砖瓦、木材等传统材料在工程的某些方面应用也很普遍，但是，这些传统的材料在土木工程中的主导地位已逐渐为新型材料所取代。目前，水泥混凝土、钢材、钢筋混凝土已是不可替代的结构材料，新型合金、陶瓷、玻璃、有机材料及其他人工合成材料、各种复合材料等在土木工程中也占有愈来愈重要的位置。

从土木工程材料性能改进方面来看，与以往相比，当代土木工程材料的物理力学性能也已获得明显的改善与提高，应用范围也有明显的变化。例如水泥和混凝土的强度、耐久性及其他功能均有显著的改善；随着现代陶瓷与玻璃的性能改进，其应用范围与使用功能已经大大拓宽。此外，随着技术的进步，传统材料的应用方式也发生了较大的变化，现代施工技术与设备的应用也使得材料在工程中的性能表现比以往更好，为现代土木工程的发展奠定了良好的物质基础。

### 二、当代土木工程的发展对材料的要求

尽管目前土木工程材料在品种与性能方面已有很大的进步，但是与人们对于其性能要求的期望值还有较大的差距。

首先从土木工程材料的来源来看，鉴于土木工程材料的用量巨大，尤其在应用方面，经过长期使用的不断累计，单一品种或数个品种的原材料来源已不能满足其持续不断的需求。尤其是历史发展到今天，以往大量采用的粘土砖瓦和木材等已经给社会的可持续发展带来了沉重的负担。从另一方面来看，由于人们对于各种建筑物性能要求的不断提高，传统建筑材料的性能也越来越不能满足社会发展的需求。为此，以天然材料为主要建筑材料的时代即将结束，取而代之的将是各种人工材料，这些人工材料将会向着再生化、利废化、节能化和绿色化等方向发展。

从土木工程发展对材料技术性能要求方面来看，对材料技术性能的要求越来越多，各种物理力学性能指标的要求也越来越高，从而表现为未来建筑材料的发展具有多功能性和高性能的特点。具体来说就是材料向着轻质高强、多功能、良好的工艺性和优良耐久性的方向发展。

从土木工程材料应用的发展趋势来看，为满足现代土木工程结构性能和施工技术的要求，材料的应用也向着工业化方向发展。例如，水泥混凝土等结构材料向着预制化和商品化的方向发展，材料向着成品或半成品的方向延伸，材料的加工、贮运、使用及其他施工操作的机械化、自动化水平不断提高，劳动强度逐渐下降。这不仅改变着材料在使用过程中的性能表现，也在逐渐改变着人们对于土木工程材料使用的手段和观念。

## 第五节 本课程的主要内容及学习任务

### 一、本课程的性质与主要内容

本课程是土木工程专业的专业技术基础课，通过学习，力图使学生掌握较扎实的基本理论

和基础知识，为后续专业课程的学习及以后从事土木工程建设并在工作中认识与掌握材料的有关性质和正确使用材料打下良好的基础。

根据本课程的特点与要求，在本教材中重点介绍了土木工程材料的一些基本性质。在此基础上，本书还重点介绍了当前土木工程中常用的材料，如水泥、石灰、沥青等胶凝材料，砖、石等砌体材料，钢材等结构材料，水泥混凝土、沥青混凝土、砂浆等现场配制材料。此外，还介绍了玻璃、陶瓷、木材、塑料及其他有机高分子材料等功能材料。针对上述常用材料的主要技术性质，本书中还介绍了检测这些技术性能指标的试验检测及质量评定方法。

通过了解上述材料的有关知识和要求，可以指导学生正确使用这些材料，引导学生利用有关理论和知识来分析和评定材料，并根据其对材料基本特点的了解和正确使用实例的分析，为以后认识和使用新的材料提供可借鉴的先例。

## 二、本课程的理论课学习任务

本课程在理论学习方面，以熟悉常用土木工程材料的性能、掌握常用材料的标准及应用为主要宗旨。为达到此目的，在学习过程中应了解某些重点材料的生产工艺原理，较清楚地认识材料的组成、结构、构造及其与性能的关系。在此基础上应能够利用已掌握的理论知识对材料进行分析，学会判断材料的用途和使用方法，明确材料的结构、组成、性能等之间的关系。

在本课程具体内容方面，要求学生必须熟悉常用土木工程材料的主要品种、规格、选择及应用、贮运和管理等方面的知识，掌握主要材料在工程使用过程中的基本规律，为后续课程的学习与理解以及从事土木工程的实践工作打下良好的基础。

## 三、本课程的实验课学习任务

材料试验是检验土木工程材料性能、鉴别其质量水平的主要手段，也是土木工程建设中质量控制的重要措施。对于某些材料，在选择过程中往往需要经验证试验后才能确定。在材料使用前，只有经标准试验确认合格后，才能在工程实际中应用。在工程使用过程中，必须对材料按规定抽样试验，检验其在工程实际中使用的质量是否稳定，以判断其在工程中的真实表现。在工程验收中，工程实体的验收试验也是判定或鉴定工程质量的重要手段之一。由此可见，材料试验检验工作是一项经常化的、责任性很强的工作。

本课程中试验课的主要任务，就是通过试验操作，验证已学有关材料的基本理论，增加感性认识，熟悉试验鉴定、检验和评定材料质量的方法。通过试验课，一方面加深学生对理论知识的理解，掌握材料基本性能的试验检验和质量评定方法，培养学生的实践技能；另一方面，培养学生严谨的科学态度和实事求是的工作作风，为从事土木工程实践工作打下较坚实的基础。

## 复习思考题

1. 简述材料在土木工程中的作用。
2. 在土木工程建设中如何通过控制材料的质量状态来控制工程质量。
3. 简述土木工程材料课程学习的内容和任务。
4. 综述土木工程材料的应用现状与发展趋势。

## 第二章 土木工程材料的基本性质

土木工程建设对工程性能的要求最终主要体现为对其构成材料性能的要求。人们对土木工程的要求体现在多个方面。首先,各种土木工程必须坚固可靠,满足人们对安全性的要求,这就必须选择性能可靠的结构材料;其次,还要求土木工程必须有良好的使用性能以及漂亮的外观,这就要求材料应具有良好的装饰性及其他物理性能。为此,对于不同的土木工程必须选择相适应的材料,才能满足对工程性能的各种不同要求。

材料在土木工程中所起的作用,从根本上来讲就是其性质的表现。选择、应用、分析和评价材料,都应以其性质为依据。本章所指的材料性质,是指材料处于不同的使用条件和使用环境时,通常必须考虑的最基本的、共有的性质。因为材料处于土木工程的部位不同、使用环境不同、人们对材料的使用功能要求不同,要求材料所起的作用就不同,所以对不同种类的材料,应考虑的基本性质也不尽相同。本章主要介绍在不同的使用环境下,各类土木工程材料的基本性质及其含义 影响这些性质的因素 它们彼此间的关系 等等。

### 第一节 材料的物理状态参数

#### 一、材料的体积

体积是物体占有的空间尺寸。由于材料的物理状态不同,同一种材料可表现出不同的体积。

##### 1. 材料的绝对密实体积

材料的绝对密实体积是指材料内部没有孔隙时的体积,或不包括内部孔隙的材料体积。一般以  $V$  表示材料的绝对密实体积。由于材料自然状态下并非绝对密实,所以绝对密实体积一般难以直接测定,只有玻璃等材料可近似地直接测定。

##### 2. 材料的表观体积

材料的表观体积是指整体材料(包括内部孔隙)的外观体积。一般以  $V_0$  表示材料的表观体积。外形规则材料的表观体积,可直接以尺度量后计算求得;外形不规则材料的表观体积,常用排水法或排油法测定(具体方法见试验一)。

##### 3. 材料的堆积体积

材料的堆积体积是指散粒状材料堆积状态下的总体外观体积。根据其堆积状态不同,同一材料表现的体积大小可能不同,松散堆积下的体积较大,密实堆积状态下的体积较小。一般以  $V_0'$  表示材料的堆积体积。材料的堆积体积,常以材料所填充容器的容积大小来测量。

体积的度量单位通常以立方厘米  $\text{cm}^3$  或立方米  $\text{m}^3$  表示。

#### 二、材料的密度、表观密度、堆积密度

##### 1. 材料的密度

材料的密度是指材料所具有的质量  $M$  与其绝对密实体积  $V$  之比。这里的质量是指材

料所含物质的多少，工程实际中常以重量多少来衡量质量的大小。

材料的密度通常以  $\rho$  表示 其计算公式为：

$$\rho = M/V$$

式中  $\rho$ ——材料的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$M$ ——材料的质量 ( $\text{g}$ )；

$V$ ——材料的绝对密实体积 ( $\text{cm}^3$ )。

常用的土木工程材料中多含有内部孔隙，除钢材、玻璃及沥青等外绝大多数材料不能直接测定其密度（通常是将材料磨成细粉后测定），但是材料的密度仅由其微观结构和组成所决定，与其所处的环境或自然状态无关，土木工程常用材料的密度见表 2-1。

## 2. 材料的表观密度

表观密度是指材料所具有的质量  $M$  与其表观体积  $V_0$  之比。表观密度通常以  $\rho_0$  表示，其度量单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$  计算公式为：

$$\rho_0 = M/V_0$$

式中  $\rho_0$ ——材料的表观密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$M$ ——材料的质量 ( $\text{kg}$ )；

$V_0$ ——材料的表观体积 ( $\text{m}^3$ )。

表 2-1 土木工程常用材料的密度、表观密度、堆积密度

材料名称	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	表观密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	堆积密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
钢材	7.85	7 800 ~ 7 850	—
石灰石(碎石)	2.48 ~ 2.76	2 300 ~ 2 700	1 400 ~ 1 700
砂	2.5 ~ 2.6	—	1 500 ~ 1 700
水泥	2.8 ~ 3.1	—	1 600 ~ 1 800
粉煤灰(气干)	1.95 ~ 2.40	1 600 ~ 1 900	550 ~ 800
烧结普通砖	2.6 ~ 2.7	2 000 ~ 2 800	—
普通水泥混凝土	—	(常取 2 500)	—
红松木	1.55 ~ 1.60	400 ~ 600	—
普通玻璃	2.45 ~ 2.55	2 450 ~ 2 550	—
铝合金	2.7 ~ 2.9	2 700 ~ 2 900	—

因为大多数材料的表观体积  $V_0$  中多包含有内部孔隙，其孔隙的多少、孔隙中是否含有水及含水的多少 都可能影响其总质量（有时还可能影响其表观体积），因此材料的表观密度除了与其微观结构和组成有关外，还与其自然状态、内部构造特征及含水状况等因素有关。同一种材料在不同的状态或环境下，表观密度的大小可能不同，但一般都在气干状态下测定表观密度值大小。土木工程常用材料的表观密度见表 2-1。

值得注意的是，材料的表观密度所指的外观体积中包含了材料颗粒中的各种孔隙。而在土木工程中许多散粒状材料在使用过程中，其大部分表面开口孔可能吸纳部分更细小的材料。为更确切地反映颗粒状材料在实际混合材料中所占有的空间体积，消除这些开口孔隙的影响，可将这部分可吸纳其他细小材料的开口孔隙剔除。此时，应以其实际占有的空间体积来确定其表观密度，且必须用排水法或蜡封法来测定其表观体积。

### 3. 材料的堆积密度

材料的堆积密度是指材料所具有的质量 ( $M$ ) 与其堆积体积 ( $V'_0$ ) 之比。堆积密度通常以  $\rho'_0$  表示 其度量单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$  计算公式为:

$$\rho'_0 = M/V'_0$$

式中  $\rho'_0$ ——材料的堆积密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

$M$ ——材料的质量 ( $\text{kg}$ ) ;

$V'_0$ ——材料的堆积体积 ( $\text{m}^3$ )。

域为散粒状堆积材料的堆积体积  $V'_0$  中, 既包括了材料颗粒内部的孔隙, 也包括了颗粒间的空隙, 除了颗粒内孔隙的多少及其含水多少外, 颗粒间空隙的大小也影响堆积体积的大小。所以 材料的堆积密度与散粒状材料自然堆积时的颗粒间空隙、颗粒内部结构、含水状态、颗粒间被挤压实的程度等因素均有关 (土木工程常用材料的堆积密度见表 2-1)。

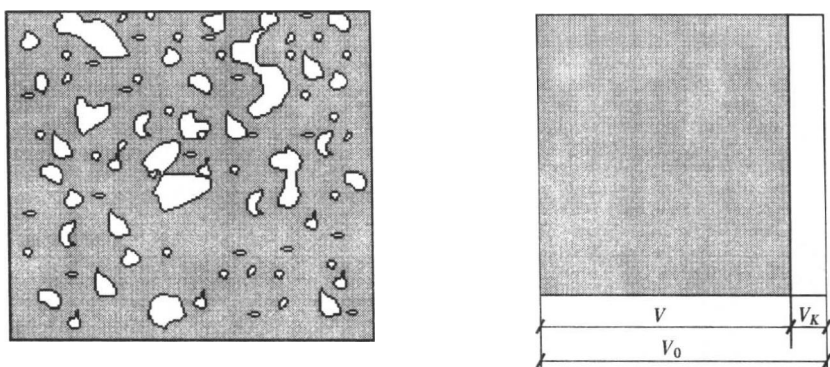


图2-1 含孔材料体积组成示意图

### 三、材料的孔隙率及孔特征

材料的孔隙率是指材料内部孔隙的体积占材料总体积的百分率 (见图 2-1) 以  $P$  表示。孔隙率  $P$  的计算公式为:

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = (1 - \rho_0/\rho) \times 100\%$$

孔隙率反映了材料内部孔隙的多少, 它会直接影响材料的多种性质。

材料内部除了孔隙的多少以外, 孔隙的特征也是影响其性质的重要因素之一。材料孔隙的特征主要表现为: 孔隙是在材料内部被封闭的, 还是在材料的表面与外界连通, 前者为闭口孔, 后者为开口孔。有些孔隙在材料内部是被分割为独立的, 还有的孔隙在材料内部相互连通。此外, 单个孔隙尺寸的大小, 孔隙在材料内部的分布均匀程度等都是孔隙在材料内部的特征表现。这些孔特征对材料的性质有重要影响, 在以后的各节内容中会经常涉及这些孔特征。

与材料孔隙率相对应的另一个概念是材料的密实度。密实度表示材料内被固体所填充的程度, 它在量上反映了材料内部固体的含量。

### 四、材料的空隙率

材料空隙率是指散粒状材料堆积体积 ( $V'_0$ ) 中 颗粒间空隙体积所占的百分率 以  $P'$  表示。

空隙率  $P'$  的计算公式为：

$$P' = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} \times 100\% = (1 - \rho'_0 / \rho_0) \times 100\%$$

材料的空隙率与其颗粒的形状、大小颗粒的搭配情况、相互间挤密的程度等有关，它在一定程度上反映了颗粒状材料的堆积状态。显然，材料的空隙率越大，则表明材料颗粒间相互嵌挤的紧密程度就越差。

### 五、材料的压实度

材料的压实度是指堆积状散粒材料被压实的程度。由于同一材料的堆积密度是可变的， $\rho'_0$  的大小与材料被压实的程度有很大关系，当散粒状材料经充分压实后，其堆积密度值接近最大，此时的干堆积密度值被定义为  $\rho_m$ ，也称为最大干密度。对于未被充分压实的同一材料来说其  $\rho'_0$  值显然小于  $\rho_m$ 。

在工程实际中，散粒状材料的压实度是指经压实后的干堆积密度（ $\rho'_0$  值与该材料经充分压实后的干堆积密度  $\rho'_m$  值的比率百分数。显然材料的压实度值越大说明被压实的程度越高，其内部堆积状态就越密实。压实度常以  $K_y$  表示：

$$K_y = \rho'_0 / \rho'_m \times 100\%$$

式中  $K_y$ ——材料的压实度（%）；

$\rho'_0$ ——施工现场的材料，经压实后的实测干堆积密度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）；

$\rho'_m$ ——在试验室内，将相同材料试样经充分压实后的最大干堆积密度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）。

当散粒状材料经充分压实，其堆积密度达到  $\rho'_m$  后相应的空隙率  $P'$  值已达到最小值 此时的堆积体结构达到最为密实的状态，即使以后再受到压力也不会产生明显的变形，这对结构物的稳定性打下了良好的基础。因此，散粒状材料压实后的压实度（ $K_y$  值愈大所构成的结构物就愈稳定。

## 第二节 材料的基本物理性质

### 一、材料的亲水性与憎水性

材料与水接触时，有些可能被水所润湿，而有些材料则不能被水润湿。这种现象说明了材料与水之间的相互作用性质，前者为亲水性，后者为憎水性。

材料具有亲水性或憎水性的根本原因在于材料的分子结构（是极性分子或非极性分子）。亲水性材料与水分子之间的分子亲和力大于水分子本身之间的内聚力。反之，憎水性材料与水分子之间的亲和力小于水分子本身之间的内聚力。

工程实际中材料是亲水性或憎水性通常以润湿角的大小划分如图 2-2。其中润湿角  $\theta$  愈小，表明材料愈容易被水润湿。当材料的润湿角  $\theta \leq 90^\circ$  时称为亲水性材料当  $\theta > 90^\circ$  时，称为憎水性材料。水在亲水性材料表面可以铺展开，且能通过材料毛细管作用自动将水吸入材料内部。水在憎水性材料表面不仅不能铺展开，而且水分不能渗入材料的毛细管中。有关现象示意图见图 2-3。

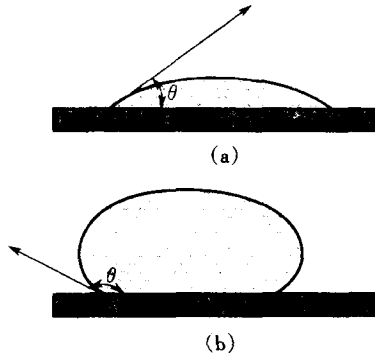


图 2-2 材料润湿示意图  
(a)亲水性材料 (b)憎水性材料

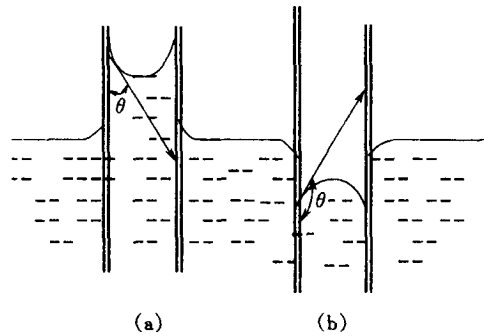


图 2-3 材料毛细管吸水性示意图  
(a)亲水性毛细管;(b)憎水性毛细管

## 二、材料的吸水性

亲水性材料在水中吸收水分的能力，称为材料的吸水性，并以吸水率表示。材料吸水率的表达方式有如下两种。

### 1. 质量吸水率

质量吸水率是指材料在吸水饱和时，所吸水量占材料干质量的百分比，并以  $W_m$  表示。质量吸水率  $W_m$  的计算公式为：

$$W_m = \frac{M_b - M}{M} \times 100\%$$

式中  $M_b$ ——材料吸水饱和状态下的质量 (g 或 kg)；

$M$ ——材料在干燥状态下的质量 (g 或 kg)。

### 2. 体积吸水率

体积吸水率是指材料在吸水饱和时，所吸水的体积占材料自然状态下体积的百分率，并以  $W_v$  表示。体积吸水率  $W_v$  的计算公式为：

$$W_v = \frac{M_b - M}{V_0} \times \frac{1}{\rho_w} \times 100\%$$

式中  $M_b$ ——材料吸水饱和状态下的质量 (g 或 kg)；

$M$ ——材料在干燥状态下的质量 (g 或 kg)；

$V_0$ ——材料在自然状态下的体积 ( $\text{cm}^3$ )；

$\rho_w$ ——水的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 常温下取  $\rho_w = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

材料的吸水率与其孔隙率有关，更与其孔特征有关。因为水分是通过材料的开口孔吸入，并经过连通孔渗入内部的。材料内部与外界连通的孔隙愈多，其吸水率就愈大。

## 三、材料的吸湿性

材料的吸湿性是指材料吸收潮湿空气中水分的性质。当较干燥的材料处在较潮湿的空气中时，便会吸收空气中的水分；而当较潮湿的材料处在较干燥的空气中时，便会向空气中释放水分。前者是材料的吸湿过程 (也称为材料的还湿性) 后者是材料的干燥过程。由此可见 在空气中 某—材料的含水多少是随空气湿度的改变而变化的。材料在某一状态下含水的多少

称为材料的含水率 并以  $W_h$  表示 其计算公式为：

$$W_h = \frac{M_s - M}{M} \times 100\%$$

式中  $W_h$ ——材料的含水率 (%)；

$M_s$ ——材料在吸湿状态下的质量 (g 或 kg)；

$M$ ——材料在干燥状态下的质量 (g 或 kg)。

显然，材料的含水率受所处环境中空气湿度的影响，当空气中湿度在较长时间内稳定时，材料吸收空气中水分的速度与干燥过程中水分释放的速度处于平衡状态，此时材料的含水率则在较长时间内保持不变，其含水率则被称为材料的平衡含水率。在某一湿度下 平衡含水率只与材料本身的性质以及环境温度等有关，一般亲水性强的材料、含有开口孔隙多的材料，其平衡含水率高 它在空气中的质量变化也大 环境温度较高时 材料的平衡含水率也较高。

材料吸水或吸湿后 除了本身的质量增加外 还会降低其绝热性、强度及耐久性 造成体积的增减、变形或变质 对工程产生不利的影响。

#### 四、材料的耐水性

材料的耐水性是指材料长期在水的作用下不破坏，强度也不显著降低的性质。衡量材料耐水性的指标是材料的软化系数以  $K_R$  表示 其计算公式为：

$$K_R = \frac{f_b}{f}$$

式中  $K_R$ ——材料的软化系数；

$f_b$ ——材料饱水状态下的抗压强度 (MPa)；

$f$ ——材料干燥状态下的抗压强度 (MPa)。

软化系数反映了材料饱水后强度降低的程度，是材料吸水后性质变化的重要特征之一。其实 许多材料吸水 (或吸湿) 后 即使尚未达到饱和状态 其强度等性质也会有较明显的变化。这是因为材料吸水后，水分会分散在材料内部微粒的表面，削弱了微粒间的结合力，导致材料强度不同程度的降低。当材料内含有可溶性物质时 (如石膏、石灰等) 吸入的水中还可能使这些可溶物质产生溶解，造成强度的严重降低。

材料耐水性这一性质限制了材料的使用环境 软化系数小的材料耐水性差 其使用环境尤其受到限制。工程中通常将  $K_R > 0.85$  的材料称为耐水性材料，它们可以应用于水中或潮湿环境中的重要结构。用于受潮较轻或次要结构时，材料的  $K_R$  值也不得小于 0.75。

材料的耐水性与其亲水性、可溶性、孔隙率、孔特征等均有关 通常从这几个方面来改善材料的耐水性。

#### 五、材料的抗渗性

材料的抗渗性是指材料抵抗压力水渗透的性质。土木工程中许多材料常含有孔隙、孔洞或其他缺陷，当材料两侧的水压差较高时，水可能从高压侧通过内部的孔隙、孔洞或其他缺陷渗透到低压侧。这种压力水的渗透，不仅会影响工程的使用，而且渗入的水还会带入能腐蚀材料的介质，或将材料内的某些成分带出，造成材料的性能劣化甚至结构破坏。因此，长期处于有压水的环境中时，材料的抗渗性也是决定工程使用寿命的重要因素之一。

材料抗渗性的表示指标有多种，为方便起见通常采用的有渗透系数或抗渗等级。

### 1. 渗透系数

按照达西定律，在一定的时间  $t$  内透过的水量  $W$ ，与材料垂直于渗水方向的渗水面积  $A$  和材料两侧的水头差  $H$  成正比，与渗透距离（材料的厚度） $d$  成反比。以公式表示为：

$$W = K_s \frac{A \cdot t \cdot H}{d}$$

式中  $K_s$ ——材料的渗透系数 (cm/h)，它可通过对试件的渗水试验，根据所测得的参数求得：

$$K_s = \frac{W \cdot d}{A \cdot t \cdot H}$$

$W$ ——时间  $t$  内的渗水总量 (cm<sup>3</sup>)；

$A$ ——试件垂直于渗水方向的渗水面积 (cm<sup>2</sup>)；

$H$ ——试件两侧的水头差 (cm)；

$t$ ——渗水时间 (h)；

$d$ ——试件的厚度 (cm)。

材料的  $K_s$  值愈小，则其抗渗能力愈强。工程中某些多孔材料的渗水性能多用渗透系数表示。

### 2. 抗渗等级

材料的抗渗等级是指材料用标准方法进行透水试验时，试件在透水前所能承受的最大水压力所确定的抗渗指标，材料的抗渗等级愈高，其抗渗能力愈强。土木工程中对一些常用材料（如混凝土、砂浆等）的抗渗防水能力常以抗渗等级表示。

材料的抗渗性与其亲水性、孔隙率、孔特征、裂缝等缺陷有关。在其内部孔隙中，开口孔、连通孔是材料渗水的主要通道。工程中一般采用对材料进行憎水处理、减少孔隙率、改善孔特征（减少开口孔和连通孔）防止产生裂缝及其他缺陷等方法来增强其抗渗性。

### 六、材料的抗冻性

材料的抗冻性是指材料在饱水状态下，能经受多次冻融循环作用而不破坏，强度也不严重降低的性质。

有些工程中，材料常接触水，经常处于饱水状态。在冬天寒冷的季节，温度降为负温时，材料由表及里逐渐结冰，阻止了内部水分的外溢。同时当内部水分结冰时，产生的体积膨胀（约增大9%）受到材料的约束，从而造成冰对材料内孔壁的静水压力（即冰晶压力），此压力可能很大，往往使孔壁被胀裂。当温度回升，冰融化时，不仅孔隙还会充满水，而且某些被冻胀的裂缝中还可能再渗入水分。再次受冻结冰时，材料会受到更大的冻胀和裂缝扩张。如此反复冻融循环，最终将会导致材料的破坏。

为检验材料的抗冻性，土木工程中通常按规定的方法对材料的试件进行冻融循环试验，例如以试件质量损失不超过5%、强度下降不超过25%时，所能承受的最多冻融循环次数来确定混凝土的抗冻等级。材料的抗冻等级，以字符“F”及材料可承受的最多冻融循环次数表示，如F25、F50、F100等，分别表示此材料可承受25次、50次、100次的冻融循环。通常根据工程的使用环境和要求，确定对材料抗冻等级的要求。

就材料本身来说，材料的抗冻性主要与其孔隙率、孔特征、吸水性及抵抗胀裂的能力等有

关，通常从这些方面改善材料的抗冻性。

## 七、材料的热工性质

材料的热工性质包括导热性、热容性和热变形性。

### 1. 材料的导热性

材料的导热性质是指当两侧有温差时，固体材料将热量由温度高的一侧向温度低的一侧传递的能力，也就是传导热的能力。

固体材料的导热性以导热系数  $\lambda$  表示 其含义是 当材料两侧的温差为 1 K 时 在单位时间 (1 h) 内，通过单位面积(1 m<sup>2</sup>) 并透过单位厚度 (1 m) 的材料所传导的热量。以公式表示为：

$$\lambda = \frac{Q \cdot a}{(t_1 - t_2) \cdot A \cdot Z}$$

式中  $\lambda$ ——材料的导热系数 [W/(m·K)];

$Q$ ——传导的热量 J);

$a$ ——材料的厚度 m);

$A$ ——材料的传热面积 m<sup>2</sup>);

$Z$ ——传热时间 h);

$(t_1 - t_2)$ ——材料两侧的温度差 K)。

材料的导热系数越大 则导热性越强 绝热性越差 不同土木工程材料的导热性差别很大，通常把  $\lambda < 0.23$  W/(m·K) 的材料称为绝热性材料。

固体材料的导热性与其结构和组成、含水率、孔隙率及孔特征等有关，通常以材料的表观密度来反映其相关性。一般非金属材料的绝热性优于金属材料。材料的表观密度小、孔隙率大、闭口孔多、孔分布均匀、孔尺寸小、含水率小时 则表现出导热性差、绝热性好。通常所说的材料导热系数是指其干燥状态下的导热系数。当材料一旦吸水或受潮时，导热系数会显著增大 绝热性明显变差。

对于流体材料而言，主要是通过其本身的流动传热，导热性不仅与其热传导能力有关，更取决于流动的速度与状态。

### 材料的热容性

热容性是指材料受热时吸收热量或冷却时放出热量的能力。材料的热容性常以其升温或降温时的热容量来表示。其计算公式为：

$$( \quad )$$

式中  $Q$ ——材料的热容量 kJ);

$M$ ——材料的质量 kg);

$(t_1 - t_2)$ ——材料受热或冷却前后的温度差 K);

$c$ ——材料的比热容 [kJ/(kg·K)]。

其中比热容 ( $c$ ) 值是真正反映不同材料间热容性差别的参数。其值的大小可以在实验室条件下通过检测材料在温度变化时的热量释放量，再由下式求出：

$$c = \frac{Q}{M \cdot (t_1 - t_2)}$$

$c$  值的物理意义是 质量为 1 kg 的材料 在温度每改变 1 K 时所吸收或放出热量的大小。

材料的比热容值大小与其组成和结构有关，比热容值大的材料对缓冲建筑物的温度变化

有利，工程中常优先选择热容量大的材料。因为水的比热容值最大，当材料含水率高时，比热容值则大。通常所说材料的比热容值是指其干燥状态下的比热容值。

### 3. 材料的温度变形性

材料的温度变形性是指温度升高或降低时体积变化的性质。

除个别材料如 277 K 以下的水以外，多数材料在温度升高时体积膨胀，温度下降时体积收缩。这种变化表现在单向尺寸上时，为线膨胀或线收缩，相应的技术指标为线膨胀系数 ( $\alpha$ )。材料的单向线膨胀量或线收缩量计算公式为：

$$\Delta L = (t_1 - t_2) \cdot \alpha \cdot L$$

式中  $\Delta L$ ——线膨胀或线收缩量 (mm 或 cm)；  
 $(t_1 - t_2)$ ——材料升降温前后的温度差 (K)；  
 $\alpha$ ——材料在常温下的平均线膨胀系数 (1/K)；  
 $L$ ——试件原来的长度 (mm 或 cm)。

土木工程中，对材料的温度变形大多关心其某一单向尺寸的变化。因此，研究其平均线膨胀系数具有实际意义。材料的线膨胀系数与材料的组成和结构有关，应选择合适的材料来满足工程对温度变形的要求。几种常见土木建筑材料的热工参数见表 2-2。

表 2-2 几种常见土木材料的热工参数

材料名称	导热系数 [W/(m·K)]	比热容 [J/(kg·K)]	线膨胀系数 ( $\times 10^{-6}/K$ )
钢材	55	0.63	10~20
普通混凝土	1.28~1.51	0.48~1.0	5.8~15
烧结普通砖	0.4~0.7	0.84	5~7
木材(横纹)	0.17	2.51	—
水	0.60	4.187	—
花岗岩	2.91~3.08	0.716~0.787	5.5~8.5
玄武岩	1.71	0.766~0.854	5~7.5
石灰岩	2.66~3.23	0.749~0.846	3.64~6.0
大理石	3.45	0.875	4.41
沥青混凝土	1.05	—	(负温下)20

## 第三节 材料的力学性质

材料的力学性质是指材料在外力作用下抵抗外力的能力。它主要包括材料在外力作用下所表现的强度和变形性。

### 一、材料的强度与比强度

#### 1. 材料的强度

材料的强度是指材料在外力作用下抵抗破坏的能力。从本质上来说，材料强度的高低是体现其内部质点间结合力的大小指标。

受外力作用时，在材料内部便产生应力，此应力随外力的增大而增大，当应力增大到材料内部质点间结合力所能承受的极限时，应力再增加便会导致内部质点间的断开，此极限应力值通常称为材料的极限强度，简称为强度。工程实际中建筑物或构筑物的受力破坏，往往被认为

是材料的断裂或变形过大，此时材料的强度通常是确定建筑物或构筑物承载能力的依据。

根据所受外力的作用形式不同，材料的强度可分为抗压强度、抗拉强度、抗弯、抗折强度、抗剪强度等。各种不同受力形式的强度计算公式见表 2-3。

表 2-3 不同作用力形式的强度计算公式

作用形式	强度计算公式
抗压 抗拉 或抗剪	$f = \frac{P}{A}$ 式中 $f$ ——材料的抗压、抗拉或抗剪强度(MPa); $P$ ——试件能承受的最大荷载(N); $A$ ——试件的受力面积(mm <sup>2</sup> )。
抗弯 (抗折)	$f = \frac{3PL}{2bh^2}$ 式中 $f$ ——材料的抗弯(抗折)强度(MPa); $P$ ——试件所能承受的最大荷载(N); $L$ ——两支点间距(mm); $b, h$ ——试件横截面的宽度和高度(mm)。

材料的强度与其组成及结构有密切的关系。即使材料的组分相同，若构造不同，其强度差别可能很大。其主要原因在于材料内部质点间的结合键、孔隙率、孔特征及内部缺陷等方面存在着差别。材料内质点间的结合键愈强、孔隙率愈小、各孔隙的尺寸愈小且分布均匀、内部缺陷愈少时，则材料的强度可能愈高。土木工程常用结构材料的强度值范围见表 2-4。

表 2-4 土木工程常用结构材料的强度值范围 (MPa)

材 料	抗压强度	抗拉强度	抗弯(折)强度	抗剪强度
钢材	215 ~ 1 600	215 ~ 1 600	215 ~ 1 600	200 ~ 355
普通混凝土	7.5 ~ 60	1 ~ 4	0.7 ~ 9	2.5 ~ 3.5
烧结普通砖	5 ~ 30	—	1.8 ~ 4.0	1.8 ~ 4.0
花岗岩	100 ~ 250	7 ~ 25	10 ~ 40	13 ~ 19
石灰岩	30 ~ 250	5 ~ 25	2 ~ 20	7 ~ 14
玄武岩	150 ~ 300	10 ~ 30	—	20 ~ 60
松木(顺纹)	30 ~ 50	80 ~ 120	60 ~ 100	6.3 ~ 6.9

通常内部结构均匀的材料具有较稳定一致的力学强度，而且也往往表现出较均匀的变形。对于内部构造非匀质的材料，由于其不同方向抵抗不同形式外力作用的能力不同，则其表现强度以及变形能力也不同。例如 水泥混凝土、砂浆、砖、石材等非匀质材料的抗压强度较高 而抗拉、抗折强度却很低 且变形能力较差。

## 2. 材料的比强度

结构材料在土木工程中的主要作用就是承受结构荷载，其中的承载能力既要承受使用荷载，也要承受材料本身的自重。因此，欲提高结构材料承受外荷载的能力，一方面应提高材料的强度 另一方面应减轻材料本身的质量(或自重)要求材料具备轻质高强的特点。反映材料轻质高强的力学参数是比强度。比强度是指按单位体积质量计算的材料强度，即材料的强度

与其表观密度之比 ( $f/\rho_0$ )。在高层建筑及大跨度结构工程中常采用比强度较高的材料。这类轻质高强的材料,也是未来土木工程材料发展的主要方向。几种常用材料的比强度值见表 2-5。

表 2-5 几种结构材料的比强度参考值

材料(受力状态)	强度(MPa)	表观密度(kg/m <sup>3</sup> )	比强度
玻璃钢(抗弯)	450	2 000	0.225
低碳钢	420	7 850	0.054
铝材	170	2 700	0.063
铝合金	450	2 800	0.160
花岗岩(抗压)	175	2 550	0.069
石灰岩(抗压)	140	2 500	0.056
松木(顺纹抗拉)	100	500	0.200
普通混凝土(抗压)	40	2 400	0.017
烧结普通砖(抗压)	10	1 700	0.006

## 二、材料的弹性与塑性

材料在外力作用下会产生变形,不同的材料或同一种材料所受外力的大小不同,就会表现出不同的变形。材料的两种最基本力学变形是弹性变形和塑性变形,此外还有粘性流动变形和徐变变形等。

### 1. 材料的弹性与弹性变形

材料在外力作用下产生变形,外力去除后能恢复为原来形状和大小的性质称为材料的弹性,这种可恢复的变形称为弹性变形。

对于某些理想的弹性材料来说,弹性变形的大小与其所受外力的大小成正比,在某一范围内其比例系数为一常数 这个常数被称为弹性模量 并以符号 'E' 表示 其计算公式为:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

式中  $\sigma$ ——材料所受的应力 (MPa);

$\epsilon$ ——在应力  $\sigma$  作用下的应变。

弹性模量  $E$  是反映材料抵抗变形能力的指标, $E$  值愈大 表明材料的刚度愈大 在外力作用下抗变形的能力就越强。 $E$  值是土木工程结构设计和变形验算所依据的主要参数之一。几种常用土木工程材料的弹性模量  $E$  值见表 2-6。

表 2-6 几种常用土木建筑工程材料的弹性模量值  $E$  ( $\times 10^4$  MPa)

材 料	低碳钢	普通混凝土	烧结普通砖	木材	花岗岩	石灰岩	玄武岩
弹性模量	21	1.45 ~ 360	0.3 ~ 0.5	0.6 ~ 1.2	200 ~ 600	600 ~ 1 000	100 ~ 800

### 2. 材料的塑性与塑性变形

材料在外力作用下产生显著的变形,且变形过程中材料并未产生开裂,当外力去除后不能完全恢复到原来形状和大小的性质称为塑性,其中不可恢复的变形称为塑性变形。一般认为,材料的塑性变形是因其内部质点间受剪应力作用,使某些质点间相对滑移所致。当所受外力很小时,塑性材料几乎不变形,只有当外力的大小致使材料内质点间的剪应力超过某些质点间

相对滑移所需要的应力时，才会产生塑性变形，而且只要该外力不解除，塑性变形会继续发展。

值得指出的是，完全弹性材料或塑性材料根本就不存在，通常材料的力学变形既有弹性变形，也有塑性变形。只是不同的材料或同一材料的不同受力阶段，是以弹性变形为主还是以塑性变形为主它们的主要区别就是变形能否恢复

### 三、材料的脆性与韧性

#### 1. 材料的脆性

材料在外力作用下，未产生明显变形而发生突然破坏的性质称为脆性，具有这种性质的材料为脆性材料。一般脆性材料的抗静压强度很高，但抗冲击能力、抗振动作用、抗拉及抗折（弯）强度很差。土木工程中常用的无机非金属材料多为脆性材料，例如，天然石材、普通混凝土、砂浆、普通砖、玻璃及陶瓷等。

#### 2. 材料的韧性

材料在振动或冲击荷载作用下，能吸收较多的能量，并产生较大的变形而不突然破坏的性质称为韧性。衡量材料韧性的指标是材料的冲击韧性值，即破坏时单位断面所能吸收的能量，并以符号“ $\alpha_k$ ”表示，其计算公式为：

$$\alpha_k = \frac{A_k}{A}$$

式中  $\alpha_k$ ——材料的冲击韧性值 (J/mm<sup>2</sup>)；

$A_k$ ——试件破坏时所吸收的能量 (J)；

$A$ ——试件受力截面积 (mm<sup>2</sup>)。

从公式可见，材料韧性的主要特点是破坏时能够吸收较多的能量，其主要特征表现就是在荷载作用下能产生较明显的变形。土木工程中对用于桥梁、路面、工业厂房的吊车梁等受振的结构部位，通常应选用韧性较好的材料。常用的韧性材料有低碳钢、低合金钢、铝材、橡胶、塑料、木材、竹材等，还有玻璃钢等复合材料。

### 四、材料的硬度与耐磨性

#### 1. 材料的硬度

硬度是指材料表面抵抗硬物压入或刻划的能力。土木工程中为保持建筑物的使用性能或外观，常要求材料具有一定的硬度，如部分装饰材料、预应力钢筋混凝土锚具等。

根据检测方法不同，表示土木工程材料硬度的指标有多种。对于金属、木材等材料常以压入法检测其硬度，如洛氏硬度 HRA、B、C，以金刚石圆锥或圆球的压痕深度计算求得）、布氏硬度 HB，以压痕面积计算求得）等。对于天然矿物材料的硬度常用摩氏硬度表示，它是两种矿物相互对刻的方法确定矿物的相对硬度，并非材料绝对硬度的等级。其硬度的对比标准分为 10 级，由软到硬依次分别为滑石、石膏、方解石、萤石、磷灰石、正长石、石英、黄玉、刚玉、金刚石。混凝土等材料的硬度常用肖氏硬度检测（以重锤下落回弹高度计算求得）。

#### 2. 材料的耐磨性

材料的耐磨性是指材料表面抵抗磨损的能力。土木工程中有些部位经常受到磨损的作用，如路面、地面等。选择这些部位的材料时，其耐磨性应满足工程的使用寿命要求。材料的耐磨性可用磨损率  $G$  表示，其计算公式为：

$$G = \frac{M_1 - M_2}{A}$$