

# 水泥 与 水泥混凝土

申爱琴 主编 张登良 主审

SHUI NI  
YU  
SHUI NI  
HUI NI  
GONG  
TU

人民交通出版社



464856

Shuini yu Shuini Hunningtu

# 水泥与水泥混凝土

申爱琴 主编

张登良 主审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

《水泥与水泥混凝土》是一本系统论述水泥及混凝土材料性能与结构等方面的著作。内容包括水泥物理化学基础、硅酸盐水泥生产工艺、矿物特征、水化机理、水泥石结构及工程性质、普通混凝土材料组成、和易性、物理力学性质以及耐久性、配合比设计方法、质量控制、外加剂、道路混凝土新技术、聚合物混凝土、高强混凝土等。

本书内容丰富,全面系统,可作为高等学校公路与城市道路及材料专业研究生参考教材,也可供有关专业科研人员、工程技术人员、高校师生学习参考。

DV20/18

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水泥与水泥混凝土/申爱琴主编. —北京:人民交通出版社, 2000.4

ISBN 7-114-03644-2

I. 水… II. 申… III. ①水泥②水泥-混凝土  
IV. ①TQ172②TU528.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 24679 号

### 水泥与水泥混凝土

申爱琴 主编

张登良 主审

版式设计:刘晓方 责任校对:戴瑞萍 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010—64216602)

各地新华书店经销

北京交通印务实业公司印刷

开本:787×1092  $\frac{1}{16}$  印张:17.25 字数:441 千

2000 年 5 月 第 1 版

2000 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0 001~3 000 册 定价:30.00 元

ISBN 7-114-03644-2  
TU·00066

# 前 言

随着我国改革开放的不断深入,公路建设事业日新月异,正处于前所未有的大发展时期。由于修筑黑色路面需要的高质量沥青材料的缺乏,其价格也较高,因此修筑水泥混凝土路面具有广阔前景,况且我国生产水泥的资源丰富,水泥混凝土路面又具有承载力大、养护费用少,寿命长等优点。近年来,水泥混凝土高等级公路发展更加迅猛,而且全国各省市也修筑了大量的水泥混凝土路面。

水泥混凝土是以水泥和水组成的水泥浆体为粘结料,将不同粒径的粗、细集料胶结起来,在一定条件下,硬化成为具有一定力学性能的复合材料。

现代科学技术的发展,为探索材料微观结构与宏观表现之间的关系提供了可行性,使人们更加清楚地认识到,要改变水泥及混凝土的技术性能,可通过改变水泥及混凝土微观结构来实现,例如改变水泥石的孔结构,可大大提高混凝土的耐久性。要保证水泥混凝土结构物质量,就必须对水泥及混凝土材料基础理论有一个深入、全面、系统地认识,以动态的方法去研究水泥的水化过程及水化生成物结构与特征,充分揭示水泥石结构与工程性质之间的有机联系,深入研究混凝土流变性质、力学性质及影响因素。为此,在近几年研究生教学基础上,我们查阅了大量国内外有关资料,将一些经典的理论与现代工程实践相结合,编成此书。

本书分为三大篇,第一篇介绍了水泥的物理化学及力学基础知识,包括水泥中经常用到的晶体、玻璃体、固溶体、胶体、以及表面界面等名词概念,并对其力学性质、物理性质以及化学性质也进行了概述;第二篇主要系统地论述了水泥的定义、分类、技术性质及技术标准、水泥工艺、率值、水泥水化过程及机理、流变性质、工程性质、水泥石结构及凝结硬化理论,而且,对一些常用的混合水泥及专用水泥的性能、构造及标准也进行了简单而系统的描述;第三篇全面地论述了普通水泥混凝土的材料组成、工艺性质、结构形成、强度理论及破坏机理、混凝土的物理性质及耐久性,并且介绍了普通混凝土的配合比设计方法。

为了力求实用性及拓宽读者视野,本书中还介绍了普通混凝土的质量控制方法、常用混凝土外加剂作用机理及使用方法。结合现代路桥工程需求,为了克服混凝土刚度大,柔性小的缺陷,还对目前常用的聚合物改性混凝土的工艺流程及其性能作了详细介绍。为了满足工程技术人员的需要,对道路混凝土作了重点阐述,从材料组成到配比设计以及施工方面均有详尽论述。此外,路面混凝土新技术,例如轨道式摊铺机施工、滑模式摊铺机施工、钢纤维混凝土、碾压混凝土以及特殊条件下混凝土路面施工均编入本书之中。

在本书的编著过程中,得到了博士生导师张登良教授的大力支持和帮助,除了对写作大纲审阅外,还提供了大量的参考资料,并进行了主审。博士生导师王秉纲教授、上海同济大学材料工程学院王培铭教授也为本书编著提供了大量参考资料,在此我们表示衷心感谢。

本书第一篇、第二篇、第三篇中第一章、第三章及第五章由申爱琴编写,第三篇中的第二章、第六章由徐江萍编写,第四章、第七章由陈拴发编写。全书由申爱琴主编,张登良主审。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请国内外同行不吝赐教、批评指正。

主编

2000年1月

# 目 录

第一篇 水泥物理化学及力学基础	1
第一章 材料的微观构造与性质	1
§ 1-1 晶体与非晶体	1
§ 1-2 玻璃体	4
§ 1-3 固溶体	5
§ 1-4 胶体	6
§ 1-5 表面及界面	7
第二章 材料的力学性质	9
§ 2-1 强度	10
§ 2-2 弹性	12
§ 2-3 粘性	14
§ 2-4 韧性及脆性	15
§ 2-5 耐磨性	16
第三章 材料的物理性质	16
§ 3-1 密度、密实度及孔隙率	16
§ 3-2 热学性质	17
§ 3-3 抗渗性及抗冻性	18
第四章 材料的化学性质与耐久性	19
第二篇 水泥	21
第一章 概述	21
§ 1-1 发展历史及研究动态	21
§ 1-2 分类及命名	22
第二章 硅酸盐水泥	23
§ 2-1 硅酸盐水泥定义及分类	23
§ 2-2 硅酸盐水泥技术性质及技术标准	24
§ 2-3 原料及生产工艺	29
§ 2-4 水泥熟料组成及特性	33
§ 2-5 水泥水化	48
§ 2-6 水泥浆体凝结硬化	72
§ 2-7 水泥石结构	87
§ 2-8 水泥石的工程性质	105
第三章 混合水泥	119
§ 3-1 普通水泥	120
§ 3-2 矿渣水泥	121

§ 3-3	火山灰水泥 .....	125
§ 3-4	粉煤灰水泥 .....	127
第四章	其它水泥 .....	130
§ 4-1	道路水泥 .....	130
§ 4-2	快硬硅酸盐水泥 .....	131
§ 4-3	高铝水泥 .....	132
§ 4-4	膨胀水泥及自应力水泥 .....	135
第三篇	水泥混凝土 .....	138
第一章	概述 .....	138
§ 1-1	发展历史及研究动态 .....	138
§ 1-2	定义、分类及特点 .....	140
第二章	普通水泥混凝土 .....	143
§ 2-1	普通水泥混凝土的材料组成 .....	144
§ 2-2	普通水泥混凝土的和易性 .....	153
§ 2-3	普通混凝土的结构 .....	162
§ 2-4	普通混凝土的物理性质 .....	164
§ 2-5	普通混凝土的力学性质 .....	169
§ 2-6	普通混凝土的耐久性 .....	182
§ 2-7	普通混凝土的配合比设计 .....	187
§ 2-8	普通混凝土的质量控制 .....	199
第三章	混凝土外加剂 .....	203
§ 3-1	概述 .....	203
§ 3-2	减水剂 .....	205
§ 3-3	引气剂 .....	212
§ 3-4	早强剂 .....	213
§ 3-5	缓凝剂 .....	215
§ 3-6	防冻剂 .....	216
第四章	道路混凝土 .....	217
§ 4-1	概述 .....	217
§ 4-2	道路混凝土的技术要求 .....	218
§ 4-3	道路混凝土的组成材料 .....	220
§ 4-4	道路混凝土的配合比设计 .....	222
§ 4-5	道路混凝土施工 .....	226
§ 4-6	路面混凝土的新技术 .....	234
第五章	聚合物混凝土 .....	239
§ 5-1	概述 .....	239
§ 5-2	聚合物浸渍混凝土 .....	240
§ 5-3	聚合物混凝土 .....	243
§ 5-4	聚合物改性混凝土 .....	245
第六章	粉煤灰混凝土 .....	253

§ 6-1	概述 .....	253
§ 6-2	材料、配合比与技术性质 .....	254
第七章	高强混凝土 .....	259
§ 7-1	概述 .....	259
§ 7-2	高强混凝土的组成材料 .....	261
§ 7-3	高强混凝土的配合比设计 .....	263
参考文献	.....	266

# 第一篇 水泥物理化学及力学基础

材料的创新促进了现代科学技术的发展,而现代科学技术的发展又使人们更加清楚地认识了材料微观结构与宏观表现之间的关系。近年来,随着我国国民经济及交通事业的飞速发展,路用材料科学技术水平不断提高,科研成果层出不穷。由于新结构、新技术、新工艺的不断涌现和发展,对水泥及水泥混凝土的品种及质量的要求不断提高。因此,必须从微观上研究水泥的内部结构及成分对其性能的影响,探求水泥的结构、物性和反应三者的规律以及它们之间的有机联系,并通过水泥的化学组成和内部结构来认识及改善材料的性能。因而有必要掌握水泥的一些物理化学及力学基础知识。

## 第一章 材料的微观构造与性质

近代水泥科学的核心是结构与性能之间的关系,而各种水泥的技术性质又取决于其内部结构。换句话说,通过改变水泥的微观结构可使其性能得到改善。水泥石的微观结构较为复杂,涉及到晶体、非晶体、玻璃体、固溶体、胶体等概念。在使用阶段,还与其表面及界面性能、力学性能、物理性能有关。因而有必要了解上述各概念的定义、含义及计算公式。

### § 1-1 晶体与非晶体

固体材料通常是排列成晶体结构的原子聚合体,因此,固体材料的性质不仅取决于原子本性,同时也取决于原子聚合方式。

原子之间的作用力有引力和斥力两种。固体材料在一定的温度和压力下,这两种方向相反的力是相互平衡的,而由于这种平衡也就使原子间保持着一定的平衡距离。固体中,由原子、分子或离子作三向规则排列成有序的结构,称为晶体。而原子、分子或离子本身沿三维空间作不规则排列的,称为非晶体。例如铝、锌等金属以及组成岩石的各种矿物等均属于晶体,而玻璃、塑料等均属于非晶体。

晶体的体质因其组成的原子、分子或离子等的结合形式不同而有差异。根据结合形式不同可将晶体分为:离子键晶体,如 NaCl、LiF 等;共价键晶体,如金刚石、碳化硅等;金属键晶体,如各种金属和合金;分子键晶体,如萘、萘等;氢键晶体,如冰(H<sub>2</sub>O)等。

实际上,很多晶体都是按上述理想状态组合而成的。

#### 一、晶体结合

离子晶体的结合力大部分来自离子间的静电引力(库仑引力)。在离子晶体中,电子受到各个离子的约束,一般处于极难活动的状态。



共价键晶体的结合力主要靠各个原子都共用某一数量的电子而产生的。这种晶体,其结合能很大,强度和硬度非常大。

在金属晶体中,是由电子与阳离子之间的静电引力,以及离子与离子之间、电子与电子之间的排斥力相互平衡而产生结合力。自由电子能使金属具有良好的导电性和导热性。在金属结合中,其结合力不像共价结合那样具有方向性。

分子晶体的结合力是由于电荷非对称分布而产生分子的极化,或者由于电子的运动而发生瞬时的极化,亦即由于分散效应而产生所谓范德华力的微弱引力。这种分子结合力不论属于何种结合形式都是经常存在的,但是在分子晶体中,这种力是起支配作用的。分子晶体的大部分属于有机化合物。

氢键结合晶体的形成是由于在某种条件下,氢原子将它的一个电子给予分子中其它一个原子,这时,因质子很小,接近质子的原子会夹紧质子而非常靠近,成为一个氢原子被两个其它原子吸引着的状态,使氢原子介于两个原子之间而构成氢键结合。

各种晶体结合形式不同,其材料的性质也有所差异。但是,要严格区分晶体结合的形式是困难的,表 1-1-1-1 说明各晶体的大致区别。

晶体结合形式与材料性质

表 1-1-1-1

	离子晶体	共价键晶体	金属晶体	分子晶体
构造	方向性小, 密度中等	方向性大, 密度小	方向性小, 密度大	方向性小
强度与硬度	硬度大 强度大	强度大 硬度大	强度与硬度 变化范围大	强度小 质软
热学性质	熔点高	熔点高	熔点范围大 热传导性大	熔点低
电学性质	导电性 一般较小	导电性小	导电性大	导电性小
结合能举例 (kJ/克分子)	NaCl 756 LiF 1008	金刚石 714 SiC 1189	Na 109 Fe 395	CH <sub>4</sub> 10

## 二、晶体构造

晶体的构造可反映材料的某些工程性质。晶体的结构形式可通过 X 射线衍射或电子射线扫描等方法来确定。在晶体内部,可细分为完全相等单位的构造在三维空间重复着,见图 1-1-1-1 所示。立方晶体沿 3 个垂直方向有相同的排列: $a_1 = a_2 = a_3$ ,大部分金属和相当数量的陶瓷材料是立方晶系的。非立方晶体的重复排列沿 3 个坐标轴方向不一样或者其 3 个晶轴间的夹角不全等于  $90^\circ$ 。自然界中共有 7 种可能的晶系。这 7 种晶系的名称和它们的几何特征列于表 1-1-1-2。正方晶系和正交晶系的几何特

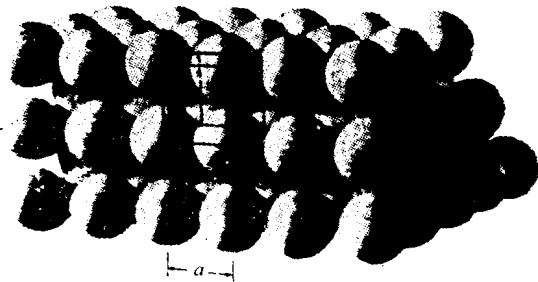


图 1-1-1-1 晶体结构

立方晶系中的点阵常数  $a$  在三个坐标方向上都是相同的

征见图 1-1-1-2。

各种晶系的几何特征

表 1-1-1-2

晶系		轴间夹角
立方	$a_1 = a_2 = a_3$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
正方	$a_1 = a_2 \neq c$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
正交	$a \neq b \neq c$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
单斜	$a \neq b \neq c$	其中有两个夹角是 $90^\circ$ ; 另一个不等于 $90^\circ$
三斜	$a \neq b \neq c$	三夹角都不相同, 且都不为 $90^\circ$
六方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	夹角为 $90^\circ$ 和 $120^\circ$
菱方	$a_1 = a_2 = a_3$	所有的夹角都相等, 但不为 $90^\circ$

以岩石矿物为主的硅酸盐有很多种类, 其晶体构造也是多种多样的, 见图 1-1-1-3 所示。如果以 4 个  $O^{2-}$  离子包围一个  $Si^{4+}$  离子所组成的  $SiO_4^{4-}$  作为基本单位, 则它们既可以成为独立体, 也可以成为链状构造(例如辉石类)、二维网状构造(例如高岭土、云母)或三维网状构造(例如硅石  $SiO_2$ 、长石类), 其中  $Si^{4+}$  与  $O^{2-}$  的结合是半离子性、半共价性的。

某些有机化合物中, 高分子某些较为规则构造部分称为结晶性的, 而不规则构造部分则称为非结晶性的, 见图 1-1-1-4 所示。结晶性部分所占比例随着分子的化学构造、延伸度和温度等条件的改变而变化。

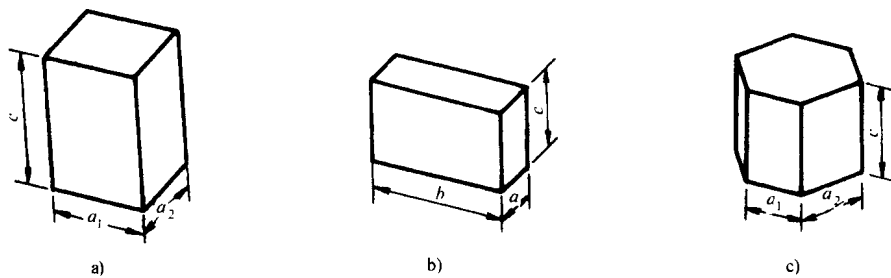


图 1-1-1-2 非立方晶体

a) 正交晶系:  $a_1 = a_2 \neq c$ ; 各个夹角都为  $90^\circ$ ; b) 正交晶系:  $a \neq b \neq c$ ; 各个夹角都是  $90^\circ$ ; c) 六方晶系:  $a_1 = a_2 \neq c$ ; 夹角为  $90^\circ$  及  $120^\circ$

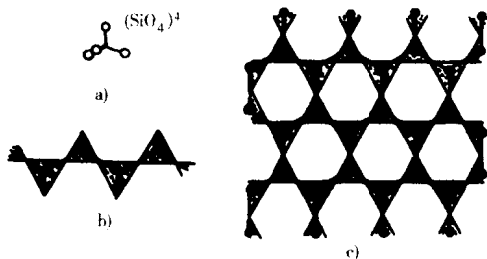


图 1-1-1-3  $(SiO_4)^{4-}$  四面体连结例子

a) 基本单位; b) 链状连结的一例; c) 二维网状结构的一例

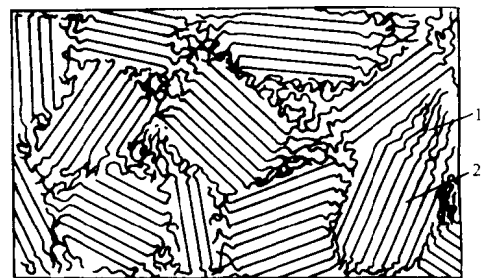


图 1-1-1-4 晶态—非晶共聚物  
1-非结晶性区域; 2-结晶性区域

## § 1-2 玻璃体

玻璃体是由于熔融物冷却较快而形成的。玻璃是无机非晶态固体中最重要的一族。当达到凝固温度时,它还具有很大的粘度,致使原子来不及按照一定的规则排列起来,就已经凝固成为固体,从而形成玻璃体结构。

一般无机玻璃的外部特征是有很高的硬度,较大的脆性,对可见光具有一定的透明度,并在开裂时具有贝壳及蜡状断裂面。

玻璃体具有以下物理通性。

### 一、各向同性

玻璃体内部任何方向的性质(如折射率、导电性、硬度、热膨胀系数等)都是相同的。这与晶体一般具有各向异性的特性是不同的,却与液体有类似性。

### 二、介稳性

当熔体冷却成玻璃体时,这种状态并不是处于最低的能量状态。它能较长时间在低温下保留了高温时的结构而不变化,因而称介稳状态。

从热力学观点看,玻璃态是一种高能量状态,它必然有向低能量状态转化的趋势,也即有析晶的可能。然而从动力学观点看,由于常温下玻璃粘度很大,由玻璃态转变为晶态的速率是十分小的,因此它又是稳定的。

### 三、由熔融态向玻璃态转化的过程是可逆的与渐变的

当熔体向固体转变时,若是结晶过程,当温度降至  $T_M$ (熔点)时(见图 1-1-2-1),由于出现新相,同时伴随体积、内能的突然下降与粘度的剧烈上升;若是熔融物凝固成玻璃的过程,开始时熔体体积和内能曲线以与  $T_M$  以上大致相同的速率下降直至  $F$  点(对应温度  $T_g$ ),熔体开始固化。这时的温度称为玻璃形成温度  $T_g$ 。

当玻璃组成一定时,  $T_g$  应该是一个随冷却速度而变化的温度范围。低于  $T_g$  时的固体称为玻璃,而高于此温度范围它就是熔体。因而玻璃体无固定的熔点,而只有熔体 $\rightleftharpoons$ 玻璃体可逆转变的温度范围。

非晶质固体随处可见,现已认识到玻璃形成的能力几乎是凝聚物态物体的普遍性质,早在 1969 年, D. Turnbull 曾评述过:如果冷却的足够快和足够低,几乎所有材料都能制备成非晶质固体。某些属于固体与液体的混合物的凝胶体,也能显示跟非晶质固体同样的力学性质。由长链状分子构成的固体骨架称为弹性凝胶,而具有三维网状构造的固体骨架则称为刚性凝胶。前者有明胶和沥青等,后者有硅胶和硅酸盐水泥的水化凝胶。

常见的玻璃体有硅酸盐玻璃,如石英玻璃是将熔化的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )经过急速冷却所得的产物。这种熔融体冷却时形成较大的网状构造而使粘性增大,在不产生规则整齐排列的  $\text{SiO}_4$  晶体的情况下,直接转变为非晶质固体,也可称为无定形晶体。玻璃就属于这类非晶质固体,此外,还有合成树脂和橡胶等。

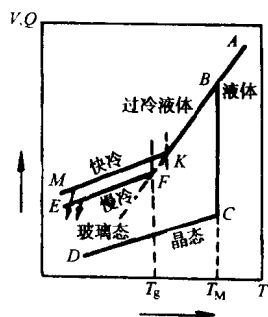


图 1-1-2-1 物质内能与体积随温度的变化

## § 1-3 固 溶 体

液体中有纯净液体和含有溶质的液体之分,固体中也有纯晶体和含有外来杂质原子的固体溶液之分。把含有外来杂质原子的晶体称为固体溶液,简称固溶体。固溶体普遍存在于无机固体材料中,材料的物理化学性质,能随着固溶体的生成,在一个更大范围内变化。因此,无论对功能材料,还是结构材料,都可通过生成固溶体的条件,提高材料的性能。

当溶剂和溶质的原子大小相近,电子结构相仿时,便容易形成固溶体。固溶体按其溶剂原子被溶质原子所取代的情况不同,又分为置换固溶体、有序固溶体和间隙固溶体。

### 一、置换固溶体

晶体结构中一种原子对另一种原子的无规则置换所形成的固溶体称为置换固溶体。铜和锌的固溶体就称为置换固溶体。此种固溶体在许多金属中是相当常见的。置换固溶体的溶解度主要取决于几何上和化学上的限制。如果溶质原子和溶剂原子具有相近的原子尺寸,则溶解度大。要得到很高的固溶度,还要求溶质和溶剂的化学性质相近似。

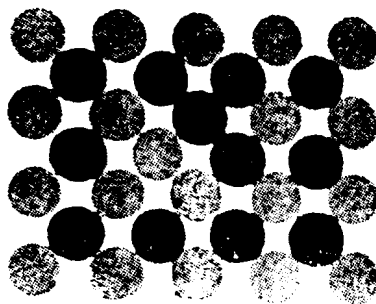


图 1-1-3-1 有序固溶体(大多数原子之间,如果有序化是完全的就会形成化合物)

### 二、有序固溶体

在置换固溶体中,溶质原子在溶剂中的分布是随机的,故又称为无序固溶体。但对于某些固溶体,当其从高温缓慢冷到某一临界温度以下时,溶质原子会从统计随机分布状态过渡到占有一定位置的规则排列状态,即发生“有序化”过程,形成有序固溶体(图 1-1-3-1)。

### 三、间隙固溶体

一个小原子位于较大原子的间隙中(图 1-1-3-2),这种固溶体称为间隙固溶体。铁中的碳原子就是一例。当温度低于 912℃时,纯铁呈体心立方结构。当温度高于 912℃的某一范围内,铁呈面心立方结构。在面心立方点阵的晶胞中心存在着较大的间隙(或称“洞”)。由于碳原子非常小,它能够运动到这个“洞”中,形成铁和碳的固溶体。但在低温时,铁具有体心立方体结构,其原子间的空隙小得多,因此,碳在体心立方体中的溶解度是有限的。

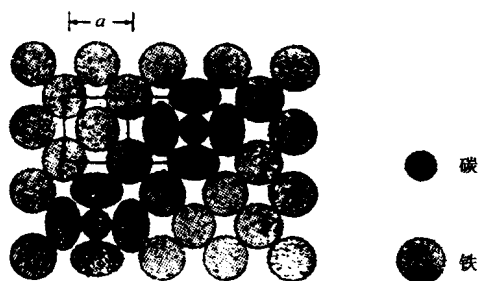


图 1-1-3-2 间隙固溶体  
(碳在面心立方铁中)

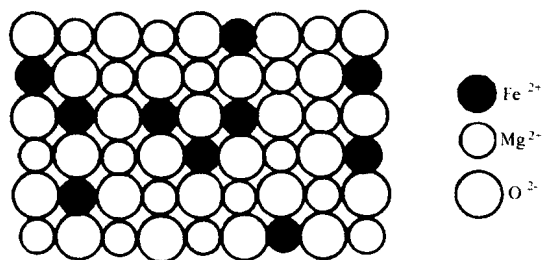


图 1-1-3-3 化合物中的置换固溶体  
( $\text{Fe}^{2+}$  离子置换了  $\text{MgO}$  结构中的  $\text{Mg}^{2+}$ )

另外,在离子相中也会产生置换固溶体。在离子固溶体中,原子和离子的大小是很重要的。图 1-1-3-3 表示了一个简单的离子固溶体的例子。食盐的各个正六方面就是 NaCl 结构的晶面。MgO 的结构与此相同,在此 MgO 结构(图 1-1-3-4)中,  $Mg^{2+}$  离子被  $Fe^{2+}$  所取代。由于两个离子的半径分别为 0.066nm 和 0.074nm,故可以完全地取代。另一方面,  $Ca^{2+}$  离子则不能用来取代  $Mg^{2+}$ , 因其半径为 0.099nm, 相对较大。

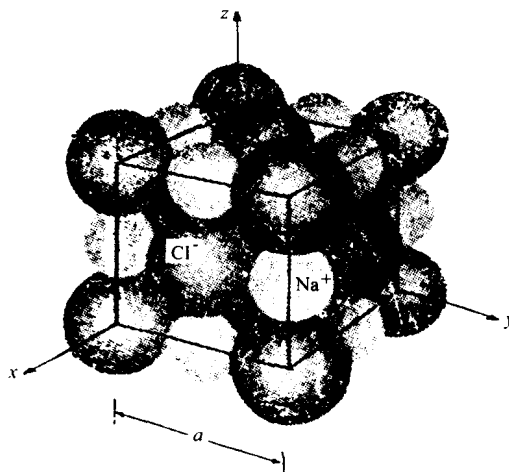


图 1-1-3-4 晶体结构

化合物固溶体形成的条件比金属固溶体更严格,它有一个附加条件,即被取代离子和新离子的价电荷必须相等。例如,在 MgO 中若用  $Li^+$  来取代  $Mg^{2+}$  是相当困难的。尽管它们的离子半径相等,但是电荷不足,故只有当存在其它的补偿电荷时,这种固溶体才有可能实现。

## § 1-4 胶 体

胶体是由物质三态(固、液、气)所组成的高分散度的粒子作为分散相,分散于分散介质中所形成的系统。高度分散性和多相性是胶体系统最显著的特点。

胶体体系表面能数值很大,因此在热力学上是不稳定的体系。

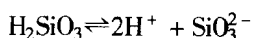
### 一、胶体的吸附现象

吸附是指物质(主要指固体)表面吸住周围介质(液体或气体)中的分子或离子的现象。固体所以具有吸附能力,是由于固体表面层上的粒子和固体内部的粒子所处情况不同。固体内部,每一个粒子被周围的粒子包围着,各个方面的吸引力是平衡的,但在表面层上的每个粒子向内的吸引力没有平衡,这就在固体物质表面上产生吸附力,把周围介质中的某些离子或分子吸附在它的表面上。被吸附的离子或分子由于振动可以脱离表面而解吸,同时另有一些粒子又会被固体物质的表面所吸附,而形成吸附和解吸的动态平衡,实际上这是一个可逆过程。

由此可见,吸附作用和物质的表面积有关,表面积越大,吸附能力越强。胶体是一个高度分散体系,其总表面积非常大,因而胶体具有高度的吸附能力。

### 二、胶体粒子的结构

胶体粒子的吸附性与其内部结构有关。现以硅胶为例,说明胶粒的结构(图 1-1-4-1)。胶粒的中心部分叫胶核,硅酸溶胶中的胶核可以看作是  $SiO_2$  的聚集体,有很强的吸附性。硅酸溶胶中存在着弱电解质  $H_2SiO_3$ , 在水中有着下列电离平衡:



电离出  $n$  个  $SiO_3^{2-}$  被胶核所吸附,同时有  $2n$  个  $H^+$  离子电离出来。其中  $2(n-x)$  个  $H^+$  又被吸附在  $SiO_3^{2-}$  周围,这些就组成胶粒。胶核所吸附的  $SiO_3^{2-}$  和一部分较近的  $H^+$  离子形成

吸附层。这样,胶粒带负电,在胶粒周围还松弛地吸附了一部分带相反电荷的  $H^+$  离子,这部分  $2x$  个  $H^+$  离子形成了扩散层。因为吸附层与扩散层各带有相反的电荷,所以相对移动时两者之间就存在着电位差,这个电位差称  $\xi$  电位。

### 三、胶体的稳定性和聚沉作用

胶体粒子在体系中不断进行着无规则的布朗运动,粒子越小,运动得越快。但一般在一定条件下同一种胶粒带同号的电荷,因而互相排斥,阻止了它们互相接近,使胶粒很难聚集成较大的粒子而沉降,所以溶胶具有较大的稳定性。此外,在胶粒的吸附层中,此相反电荷离子(如硅酸溶胶的结构式中  $H^+$  离子)都能水化,从而在胶粒周围形成了一个水化层,阻止了胶粒之间的聚集;同时,在一定程度上也阻止了胶粒和带相反电荷的离子相结合,增加了溶胶的稳定性。

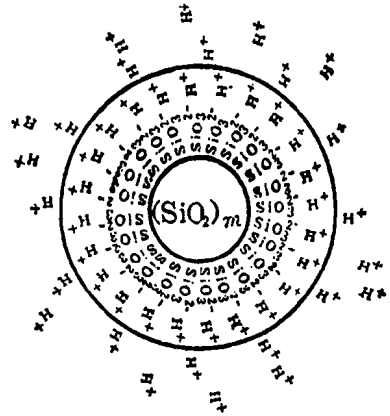


图 1-1-4-1 硅酸胶粒结构示意图

溶胶的稳定性是相对的、有条件的,而不稳定则是绝对的。只要减弱或消除使它稳定的因素,就能使胶粒聚集成较大的颗粒而沉降,从而达到破坏胶体的目的。这种使胶粒聚集成较大的颗粒而沉降的过程叫做聚沉。

### 四、凝胶

在聚沉过程得到的产物中常有一种叫凝胶。凝胶并不是一般的沉淀,而是一种相当稠厚的物质。凝胶从外貌上看,既不像液体,也不像固体,它是由溶胶凝结成无流动性的半固体状。凝胶是在亲水性胶体中呈线状粒子和具有结构粘性而形成。通过冷却、加热和加入电解质便可形成凝胶。凝胶具有由分散介质形成的蜂窝状或由细纤维集合而成的毛细管状结构,在其空隙中包含有液体。液体部分经逐渐蒸发干燥固化了的称为干凝胶。水泥的水化物便是干凝胶的一种。

#### 1. 凝胶的溶胀

干燥凝胶吸取溶媒膨胀的现象称为溶胀。溶胀对弹性凝胶较为明显。例如,橡胶由苯、四氯化碳等有机溶剂作用而膨胀(溶胀),混凝土也会由于吸水而稍许膨胀。

#### 2. 凝胶触变性

溶胶在静置时变为凝胶,或在施加外力振动搅拌等刺激时变为凝胶的现象称为触变性。触变性多发生在杆状和片状颗粒的胶体。这些粒子在静置时,在有些部位上互相接触连结起来,从整体来看形成为具有网状结构的凝胶,如由外部给予刺激(振动、搅拌),则遭破坏又变为溶胶。

溶胶化了的胶体静放一段时间,到再变为凝胶所需要的时间叫做固化时间,是衡量触变性的指标。粘结剂、水泥浆等均表现有触变性。

## § 1-5 表面及界面

材料之间的化学相互作用和力学相互作用大多由它们的表面性质所决定,为了满足现代交通的需要,路面材料经常须改性后使用,而改性的效果也与材料的表面性质息息相关。

## 一、表面张力和表面自由能

众所周知,如果没有外力的约束,液体将倾向于形成球形小滴。这是因为在各种几何形状中,以球形的比表面积与体积的比值为最小。而且,经常可看到,当两个球形的水滴或水银珠互相接触时,会合并成一个较大的球滴。这种使总的表面积尽可能减小的倾向是由于总表面能趋向于最低的结果。总表面能是表面能与比表面积的乘积。表面能是增加单位面积的表面所需要做的功,其单位为  $\text{J}/\text{m}^2$ 。表面能和表面张力具有相同的数值和量纲,不过后者的单位是用单位长度上的力来表示的(例如  $\text{N}/\text{m}$ ),表面能与表面张力等值,这是由于产生单位面积新表面所消耗的能量与扩张该表面时单位长度上所需要的力相等。

## 二、界面

在固相、液相、气相之间,两种相接触的面称为界面。二相中任何一相的变化都会影响到界面的性质。

形式上可将界面以物质三态——固态、液态和气态划分,即:气—液、气—固、液—液、液—固、固—固。

二相间界面稳定存在的普遍的先决条件是界面产生的自由能是正值;若为零或负值,则偶然的起伏即可导致表面区不断扩大,最后使一种物质完全分散在另一物质之中。例如两种气体之间或两种能互溶的液体或固体之间的界面,单位面积的自由能对分散力并无抵消作用,就是这种情形。甚至对于互不混溶的液体,在有合适的第三种组分存在时,也会因显著影响界面自由能而导致自动乳化。

## 三、吸附

固体或液体表面吸引外来原子、离子或分子而造成吸附。通常,将结合微弱的外来原子或分子薄膜归之为物理吸附。在降低压力或升高基底的温度时,固体对气体的物理吸附将迅速降低。物理吸附膜的厚度为几个单分子层,而化学吸附膜与其不同,它通常是单原子或单分子的。高温时比低温时更易发生化学吸附。洁净金属发生的相与相之间的化学反应,多数是从化学吸附开始的,然后在位错和晶界之类的优先位置上发生稳定反应产物的生核和长大。

对于很小的固体或液体弥散在气体介质或液体介质的悬浮体系,吸附具有重要的作用。如果悬浮相颗粒的直径为  $1 \sim 100\text{nm}$ ,则称之为胶体。升高温度或添加离子以中和胶体颗粒所吸附的表面电荷,可以使这种胶体由胶态悬浮体中发生凝聚或絮凝。液体在气体中的胶态弥散体通常称为气溶胶,而烟则常是固体在气体中的弥散体;泡沫是气泡在液体或固体中的弥散体。

## 四、浸润

液体在与固体相接触时所采取的形态,取决于表面能的大小,如图 1-1-5-1a)所示。由于液滴可以自由流动直至达到平衡。因此,在固体表面这一平面上,各种表面张力之间必然存在着力的平衡。对于部分浸润,当接触角为  $\theta$  时,根据表面张力在水平方向的平衡,得到:

$$p_{SV} = p_{LV}\cos\theta + p_{SL} \quad (1-1-5-1)$$

式中:  $p_{SV}$ 、 $p_{LV}$  和  $p_{SL}$ ——分别为固—气、液—气和固—液的表面张力。

如果所形成的两个新表面的能量低于初始固—气界面的能量(即  $p_{LV} + p_{SL} < p_{SV}$ ),则液体将完全浸润固体的表面( $\theta = 0^\circ$ ),如图 1-1-5-1b)所示;反之,如果固—液界面能大于初始的固—

气和液—气界面能(即  $p_{SL} > p_{SV} + p_{LV}$ ), 则完全不浸润( $\theta = 180^\circ$ , 图 1-1-5-1c)。

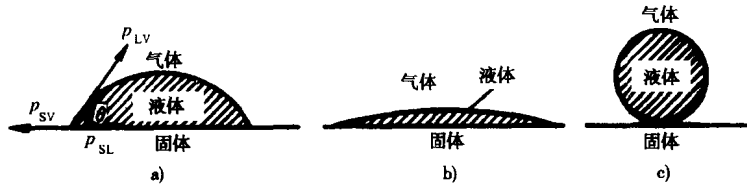


图 1-1-5-1

a) 固体基底被液体部分浸润; 表面张力在水平面上的平衡给出  $p_{SV} = p_{LV}\cos\theta + p_{SL}$ ; b) 当形成的两个新表面的能量低于原始固—气界面的能量时, 也就是  $p_{LV} + p_{SL} < p_{SV}$ , 发生固体基底的完全浸润(即  $\theta = 0^\circ$ ); c) 当固—液界面能高于原始界面的表面能时, 也就是  $p_{SL} > p_{SV} + p_{LV}$ , 则不发生浸润。

由于固—液界面上未满足的结合键比较少, 因此经常发现固—液表面能低于相应的固—气或液—气表面能。实际上, 如果固体和液体在化学上是相容的, 且没有表面吸附的污染, 则通常是有利于浸润的。

### 五、粘附

表面能对于固体之间的粘附有重要的作用。粘附是指两个发生接触的表面之间的吸引。粘附可以用粘附功来表示, 这就是分开单位面积粘附表面所需要的功或能。如图 1-1-5-2 所示, 粘附功  $P_{AB}$  由下式给出:

$$P_{PB} = J_A + J_B - J_{AB} \quad (1-1-5-2)$$

式中:  $J_A, J_B$ ——A 和 B 的表面能;

$J_{AB}$ ——A 与 B 之间的界面能。

当两个相似的或相容的表面相接触时, 由于  $J_{AB}$  不大, 这时  $P_{AB}$  就比较大。两个完全不相似或不相容的表面(通常是两个互不形成化合物或固溶体的物质之间的那种表面), 其  $J_{AB}$  值较高, 而  $P_{AB}$  就比较小。因此, 如果不存在吸附污染, 相容材料的粘附将比不相容材料的粘附更为牢固。

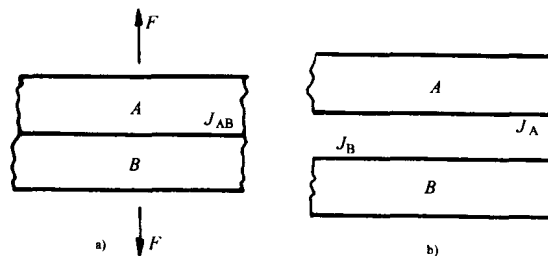


图 1-1-5-2 以表面能表示的粘附功

a) 与 b) 之间的能量增量就是粘附功, 它由  $P_{AB} = J_A + J_B - J_{AB}$  给出

影响粘附的因素可归结为: (1) 表面污染的存在; (2) 表面的粗糙程度(原子尺度); (3) 当接触压力去除后, 固体中残存的弹性应力将使已经粘附的连接点断开, 使粘附受到影响。

## 第二章 材料的力学性质

材料的机械加工性质以及弹性、塑性和粘性等性能统称为力学性质。此外, 更重要的力学



性质还有强度、硬度、脆性、疲劳和韧性等。在讨论材料的力学性质时，一般以材料弹性、塑性和粘性三者作为基础。

所谓弹性，指由于外力作用而产生变形，如果除去外力，则变形就会立即消失而完全恢复原状的一种性质。

所谓塑性，指应力达到某种限度以上，或者经过长时间的持续所产生的变形，即使应力消失也不能完全复原的一种性质。

所谓粘性，指当应力达到某种限度以上时，变形速度将会随着应力的增长而相应地加大的一种性质。

实际工程中使用的材料，一般同时兼有这些性质，只是在某种条件下，材料的某一种性质占优势而已。例如，混凝土材料，当应力在一定范围内时，主要表现出弹性。而当应力超出某一限度时，则会表现出一定的粘性及塑性。

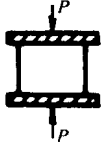


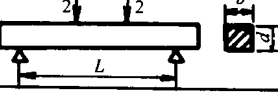
## § 2-1 强 度

材料的强度是材料在应力作用下抵抗破坏的能力。通常，材料内部的应力多由外力(或荷载)作用而引起，随着外力增加，应力也随之增大，直至应力超过材料内部质点所能抵抗的极限，即强度极限，材料发生破坏。

强度因外力种类的不同而分为抗拉强度、抗压强度、抗折强度、抗剪强度和抗扭强度等，还因加荷速度的不同而可以分为静力强度和冲击强度，表 1-2-1-1 列出了各种静力强度的分类和计算公式。再就是当荷载反复作用时，材料将会在比静力强度低的强度下遭到破坏，因而被称为疲劳破坏。若经过很长时间的荷载持续作用而发生的破坏，则称为徐变破坏。

静力强度分类

表 1-2-1-1

强度类别	举 例	计算式	附 注
抗压强度 $f_c$	混凝土 	$f_c = \frac{P}{A}$	$P$ ——破坏荷载(N); $A$ ——受荷面积( $\text{cm}^2$ ); $L$ ——跨度(cm);
抗拉强度 $f_t$	钢 	$f_t = \frac{P}{A}$	$b$ ——断面宽度(cm); $d$ ——断面高度(cm)
抗剪强度 $f_v$	木材 	$f_v = \frac{P}{A}$	
抗折强度 $f_m$	混凝土 	$f_m = \frac{PL}{bd^2}$	

### 一、静力强度

材料的静力强度，实际上是在特定条件下测定的强度值。通常使用的木材、石料、混凝土及钢材等的强度都是静力强度。

材料的强度主要取决于材料的组成和结构。在材料内部一般都存在有晶格错乱、空隙、气孔、残余应力等，在复合材料中又存在有不均匀性和各向异性等各种缺陷，所以求出不存在这