

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

# 水泥与水泥混凝土

(第2版)

申爱琴 郭寅川 主编



CEMENT  
AND  
CONCRETE



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

Cement and Concrete

# 水泥与水泥混凝土

(第2版)

申爱琴 郭寅川 主编



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书是高等学校交通运输与工程类专业规划教材。本书系统论述了水泥及水泥混凝土材料性能与结构等方面的知识。有关水泥的主要内容包括水泥物理化学及力学基础、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等;有关水泥混凝土的主要内容包括普通混凝土材料组成、工作性、物理力学性质以及耐久性、配合比设计方法、质量控制及外加剂等。此外,还重点介绍了道路水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥的矿物组成及结构、水化硬化过程、技术性质及用途;全面介绍了道路混凝土、聚合物混凝土、粉煤灰及矿渣混凝土、高性能混凝土的原材料组成、配合比设计及技术性质等相关内容。

本书内容丰富,系统全面,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。

### 图书在版编目(CIP)数据

水泥与水泥混凝土 / 申爱琴,郭寅川主编. — 2版. — 北京:  
人民交通出版社股份有限公司, 2019. 2

ISBN 978-7-114-15164-4

I. ①水… II. ①申…②郭… III. ①水泥—教材②水泥—混凝土—教材 IV. ①TQ172②TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 275161 号

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

书 名: 水泥与水泥混凝土(第 2 版)

著 者: 申爱琴 郭寅川

责任编辑: 李 瑞 卢 珊

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 23

字 数: 574 千

版 次: 2000 年 5 月 第 1 版

2019 年 2 月 第 2 版

印 次: 2019 年 2 月 第 1 次印刷 总第 6 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15164-4

定 价: 56.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 第2版前言

随着我国“一带一路”倡议的提出,交通运输的现代化进程不断加速,交通运输发展再次进入黄金时期。截至2017年底,我国公路总里程已经达到477.35万km,其中高速公路达到13.65万km。据统计,目前国内有铺装路面的70%为水泥混凝土路面,加之石油沥青价格攀升、低碳环保意识增强、地方经济拉动需求将进一步推动水泥路面的发展,水泥路面的比例还将逐年提高。水泥路面不仅承载力大,养护费用少,而且使用寿命长,加之我国水泥总产量已连续30年位居世界第一,因此,修筑水泥路面符合发展循环经济、建设资源节约型和环境友好型公路交通的要求。

水泥混凝土已经是当今世界范围内应用最广、用量最大、取材便利的工程建筑材料,它不仅广泛应用于工业与民用建筑、道路与桥梁、海工与大坝、原子能与军事工程中,而且在输油输气管道、大型储罐、船舶以及工业窑炉的应用也日益增多。由此可见,水泥混凝土对国民经济建设及发展具有重要的作用。

水泥混凝土是以水泥和水组成的水泥浆体为黏结料,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,其中水泥和水起胶结作用,集料起填充作用。通常,在混凝土中还要添加各种化学外加剂或掺合料,即水泥混凝土的第五及第六组分,主要是针对工程需要改善混凝土的某些技术性能。

水泥混凝土是一种特殊的工程材料,其使用前需要现场拌和及养护,施工工艺对其性能影响极大。水泥混凝土的强度随龄期而增长,而且具有明显的阶段



性,因此,应以动态的视角认知混凝土,赋予这种材料生命力。水泥混凝土生命的“成长”可分为4个阶段:施工阶段属于混凝土生命的“幼儿期”,养护(凝结硬化)阶段属于混凝土生命的“青少年期”,开放交通(使用)阶段属于混凝土生命的“成年期”,混凝土材料及结构破坏属于其“老年期”。混凝土各个生命阶段要求其具有不同的技术性质,施工阶段要求其具有良好的工作性,凝结硬化阶段要求其具有较好的力学性质,交付使用阶段要求其具有耐久性。对于施工、养护及使用这三个不同阶段都有具体的性能评价指标及要求。本书基于动态理念,按照混凝土生命阶段对其性能评价指标、测试方法、影响因素等进行了系统论述。

水泥混凝土材料的组成、结构及性能三者之间密切关联,又相互影响。为了获得满足工程要求的宏观技术性能,在原材料质量满足要求的前提下,必须从材料组成设计方面进行优化,并通过合理的施工及养护确保材料内部形成良好的微、细观结构,进而获得优良的工程性能。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、系统的认识,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,编者不仅查阅了大量国内外有关资料,还结合大量的公路工程水泥混凝土项目实践,更加注重经典理论与现代工程实践相结合,突出传统知识构架与现代新技术的互补,对第1版的相关内容进行了修订、补充及完善,编著成本书。

随着土木工程的发展及工程应用领域的扩充,本书在第1版的基础上,除了系统介绍普通硅酸盐水泥之外,还重点论述了道路水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥的矿物组成及结构、水化硬化过程、技术性质、技术特点及用途。本教材中除了普通水泥混凝土之外,还全面论述了道路混凝土设计及施工技术。同时,针对常用的聚合物混凝土、粉煤灰及矿渣混凝土原材料组成、配合比设计及技术性质等逐一展开论述。随着对水泥混凝土认识的不断深入以及各类工程中对混凝土耐久性要求的不断提高,这次修订新增了一章内容,专门介绍高性能水泥混凝土的定义、组成及特点、高性能水泥混凝土的技术性质、高性能水泥混凝土的配合比设计等内容。

随着水泥基胶凝材料的发展以及应用的不断扩展,水泥品种日益增多,其性

能及功能也日渐完善。本次修订时,新增了一些水泥方面的内容,结合土木工程的需求,依据水泥相关的最新规范,特别将海工水泥、铝酸盐水泥、膨胀水泥和自应力水泥、白色及彩色硅酸盐水泥、超细及生态水泥等内容纳入本书中,旨在让读者了解到更多的水泥品种,了解各工程领域水泥的发展与应用状况。

基于现代测试技术的发展,水泥混凝土材料的研究不断深入,其应用技术的发展日新月异,各类新型水泥混凝土也逐步应用于不同工程领域。按照新理念、新材料、新技术制备的新型混凝土解决了长期以来制约混凝土材料技术发展或者应用的瓶颈问题,攻克了水泥混凝土的相关短板技术问题。基于此,本次修订时,还特别增加了纳米混凝土、内养护混凝土、自密实混凝土、水工及海洋混凝土、彩色混凝土、纤维混凝土以及透水混凝土等相关内容,以扩大读者的视野,以便掌握更多的水泥混凝土领域的前沿知识。

本书分为三篇,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进行了概述。

第二篇主要系统地论述了硅酸盐水泥的定义、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。同时,对一些常用的混合水泥及特种水泥的性能、构造及标准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。为了力求实用及拓宽读者视野,本书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、柔韧性不足的缺陷,还对目前常用的聚合物改性混凝土的工艺过程及其性能作了详细介绍。为了满足道路工程技术人员的需要,特别对道路混凝土作了重点阐述,从材料组成、配比设计到施工技术等方面均有详尽论述。此外,路面混凝土新技术,例如滑模式摊铺机施工、纤维混凝土、碾压混凝土、特殊条件(高温、低温)下路面混凝土、斜向预应力路面混凝土等施工均编入本书之中。

本次修订时,教材的第一篇,第二篇第一章,第三篇第一、三、五章由申爱琴编写修订;第二篇第四章、第三篇第四、六、七章由郭寅川编写;第三篇第二章由徐江萍编写,郭寅川修订。全书由申爱琴、郭寅川主编。

随着水泥及水泥混凝土技术日新月异的发展以及相关知识的快速更新,加之相关水泥与水泥混凝土规范近年来也在不断更新,为了满足研究生教学的需要,

2018年2月,编者对第1版教材进行了全面修订,首先对整个教材的相关规范以及过时的内容进行了更新,其次增加了很多新型水泥以及新型水泥混凝土方面的内容。此次修订中,研究生王文真、蒙洁、李德胜等在查阅资料、图表校对等方面做了大量的工作,在此表示感谢。本次教材修订后,作为高等学校交通运输与工程类专业规划教材出版,以满足广大读者的需求,特此说明。

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。

**编者**

**2018年12月**

# 目录

## 第1篇 水泥物理化学及力学基础

第1章 水泥的微观结构与性质	3
1-1 晶体与非晶体	3
1-2 玻璃体	6
1-3 固溶体	7
1-4 胶体	8
1-5 表面及界面	10
第2章 水泥的力学性质	13
2-1 强度	13
2-2 弹性	16
2-3 黏性	18
2-4 韧性及脆性	19
2-5 耐磨性	20
第3章 水泥的物理性质	21
3-1 密度、密实度及孔隙率	21
3-2 热学性质	23
3-3 抗渗性及抗冻性	24
第4章 水泥的化学性质与耐久性	25

## 第2篇 水 泥

第1章 概述	29
1-1 发展历史及研究动态	29
1-2 分类及命名	30

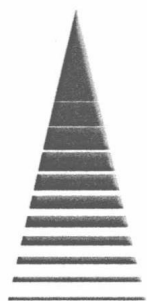


<b>第2章 硅酸盐水泥</b>	32
2-1 硅酸盐水泥定义及分类	32
2-2 硅酸盐水泥技术性质及技术标准	33
2-3 原料及生产工艺	38
2-4 水泥熟料组成及特性	43
2-5 水泥水化	59
2-6 水泥浆体凝结硬化	83
2-7 水泥石结构	99
2-8 水泥石的工程性质	118
<b>第3章 混合水泥</b>	134
3-1 普通水泥	134
3-2 矿渣水泥	136
3-3 火山灰水泥	140
3-4 粉煤灰水泥	142
<b>第4章 其他水泥</b>	146
4-1 道路水泥	146
4-2 海工硅酸盐水泥	148
4-3 铝酸盐水泥	149
4-4 膨胀水泥及自应力水泥	151
4-5 白色硅酸盐水泥	153
4-6 彩色硅酸盐水泥	154
4-7 核电工程用硅酸盐水泥	155
4-8 免压蒸管桩硅酸盐水泥	156
4-9 超细水泥及生态水泥	157

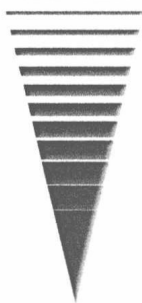
## 第3篇 水泥混凝土

<b>第1章 概述</b>	161
1-1 发展历史及研究动态	161
1-2 定义、分类及特点	164
<b>第2章 普通水泥混凝土</b>	168
2-1 普通水泥混凝土的材料组成	168
2-2 普通水泥混凝土的和易性	178
2-3 普通混凝土的结构	187
2-4 普通混凝土的物理性质	190
2-5 普通混凝土的力学性质	195
2-6 普通混凝土的耐久性	207
2-7 普通混凝土的配合比设计	213
2-8 普通混凝土的质量控制	224

<b>第3章 混凝土外加剂</b> .....	230
3-1 概述 .....	230
3-2 减水剂 .....	233
3-3 引气剂 .....	240
3-4 早强剂 .....	242
3-5 缓凝剂 .....	244
3-6 防冻剂 .....	245
<b>第4章 道路混凝土</b> .....	246
4-1 概述 .....	246
4-2 道路混凝土的技术性质及要求 .....	248
4-3 道路混凝土的材料组成及配合比设计 .....	252
4-4 道路混凝土施工 .....	262
4-5 道路混凝土新技术 .....	270
<b>第5章 聚合物混凝土</b> .....	281
5-1 概述 .....	281
5-2 聚合物浸渍混凝土 .....	282
5-3 聚合物混凝土 .....	285
5-4 聚合物改性混凝土 .....	287
<b>第6章 粉煤灰及矿渣混凝土</b> .....	296
6-1 概述 .....	296
6-2 粉煤灰混凝土 .....	297
6-3 矿渣混凝土 .....	303
<b>第7章 高性能混凝土</b> .....	309
7-1 概述 .....	309
7-2 高性能水泥混凝土的技术性质 .....	314
7-3 高性能水泥混凝土的组成设计 .....	318
<b>第8章 其他水泥混凝土</b> .....	324
8-1 纳米水泥混凝土 .....	324
8-2 内养护水泥混凝土 .....	328
8-3 自密实混凝土 .....	331
8-4 水工混凝土 .....	335
8-5 海洋混凝土 .....	338
8-6 彩色混凝土 .....	342
8-7 纤维混凝土 .....	345
8-8 透水性混凝土 .....	349
<b>参考文献</b> .....	354



# 第1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 1 章

# 水泥的微观结构与性质

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,涉及晶体、非晶体、玻璃体、固溶体、胶体等概念。在使用阶段,水泥石的微观结构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、含义及相关的计算公式。

## 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,正是由于这种平衡使原子间保持着一定的平衡距离。固体中,若原子、分子或离子作三向规则排列成为有序的结构,则称为晶体。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。



晶体的性质因其组成的原子、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、晶体结合形式

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共用某一数量的电子而产生。这种晶体,其结合能很大,强度和硬度非常大。

在金属晶体中,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他一个原子,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他原子吸引着的状态,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 说明了各晶体的大致区别。

晶体结合形式与材料性质

表 1-1-1-1

项目	离子晶体	共价键晶体	金属晶体	分子晶体	氢键结合晶体
特点	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	方向性小,密度小
强度与硬度	强度大,硬度大	强度大,硬度大	强度与硬度变化范围大	强度小,质软	强度大,硬度大
热学性质	熔点高	熔点高	熔点范围大,热传导性好	熔点低	熔点低
电学性质	导电性一般较差	导电性差	导电性好	导电性差	导电性差
结合能举例(kJ/mol)	NaCl(756)、LiF(1008)	金刚石(714)、SiC(1189)	Na(109)、Fe(395)	CH <sub>4</sub> (10)	冰 H <sub>2</sub> O(20)

## 二、晶体结构

晶体结构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。晶体内部可细分为完全相等单位的结构在三维空间重复,见图 1-1-1-1。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三个坐标轴方向不一样或者其三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、正交和六方晶系的几何特征见图1-1-1-2。

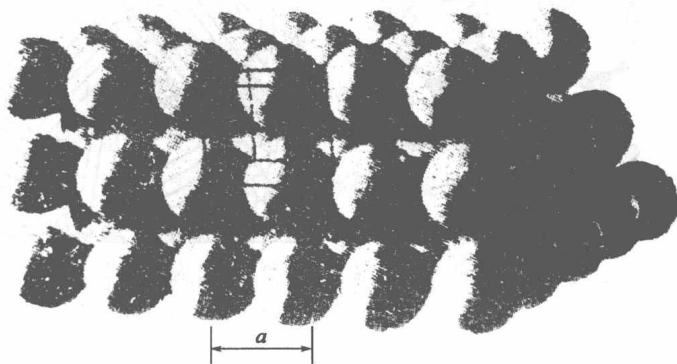


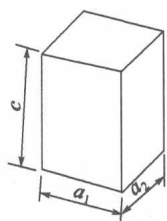
图 1-1-1-1 晶体结构

注:立方晶系中的点阵常数  $a$  在三个坐标方向上都是相同的。

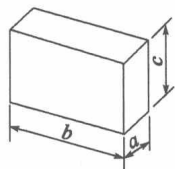
各种晶系的几何特征

表 1-1-1-2

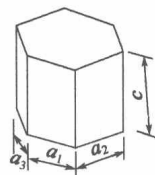
晶 系		轴 间 夹 角
立方	$a_1 = a_2 = a_3$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
正方	$a_1 = a_2 \neq c$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
正交	$a \neq b \neq c$	所有的夹角都等于 $90^\circ$
单斜	$a \neq b \neq c$	其中有两个夹角是 $90^\circ$ ,另一个不等于 $90^\circ$
三斜	$a \neq b \neq c$	三夹角都不相同,且都不为 $90^\circ$
六方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	夹角为 $90^\circ$ 和 $120^\circ$
菱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



a) 正方晶系:  $a_1 = a_2 \neq c$ ,  
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:  $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ ,  
夹角为 $90^\circ$ 及 $120^\circ$

图 1-1-1-2 正方、正交和六方晶系的几何特征

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,见图1-1-1-3。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。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。

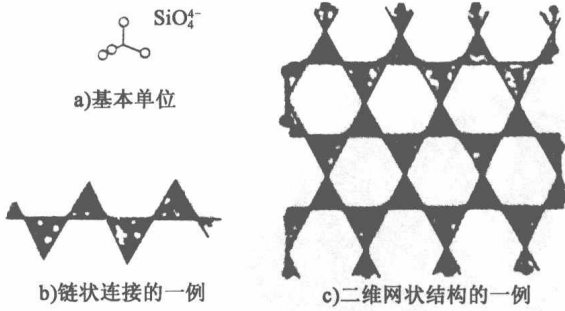


图 1-1-1-3  $\text{SiO}_4^{4-}$  四面体连接例子

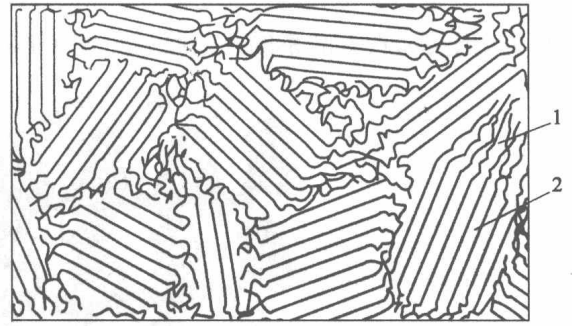


图 1-1-1-4 晶态—非晶聚合物  
1-非结晶性区域;2-结晶性区域

## 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,它还具有很大的黏度,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大的硬度、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,由于常温下玻璃黏度很大,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渐变的与可逆的

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(图 1-1-2-1),由于出现新相,体积、内能突然下降,同时伴随黏度的剧烈上升;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

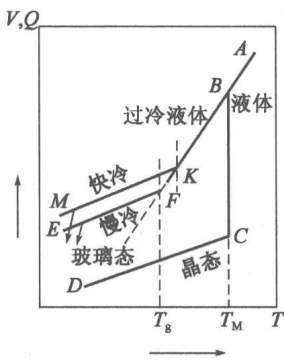


图 1-1-2-1 物质内能与体积随温度的变化

围。温度低于  $T_g$  时的固体称为玻璃,而高于此温度范围的就是熔体。因而玻璃体无固定的熔点,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体的普遍性质。早在1969年,D. Turnbull 曾评述过:如果冷却得足够快和温度足够低,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,也能显示出与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黏性增大,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。

## 1-3 固 溶 体

液体有纯净液体和含有溶质的液体之分,固体也有纯晶体和含有外来杂质原子的晶体之分。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,都可通过改变固溶体的生产条件,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。

### 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  $912^\circ\text{C}$  时,纯铁呈体心立方结构。在温度高于  $912^\circ\text{C}$  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。