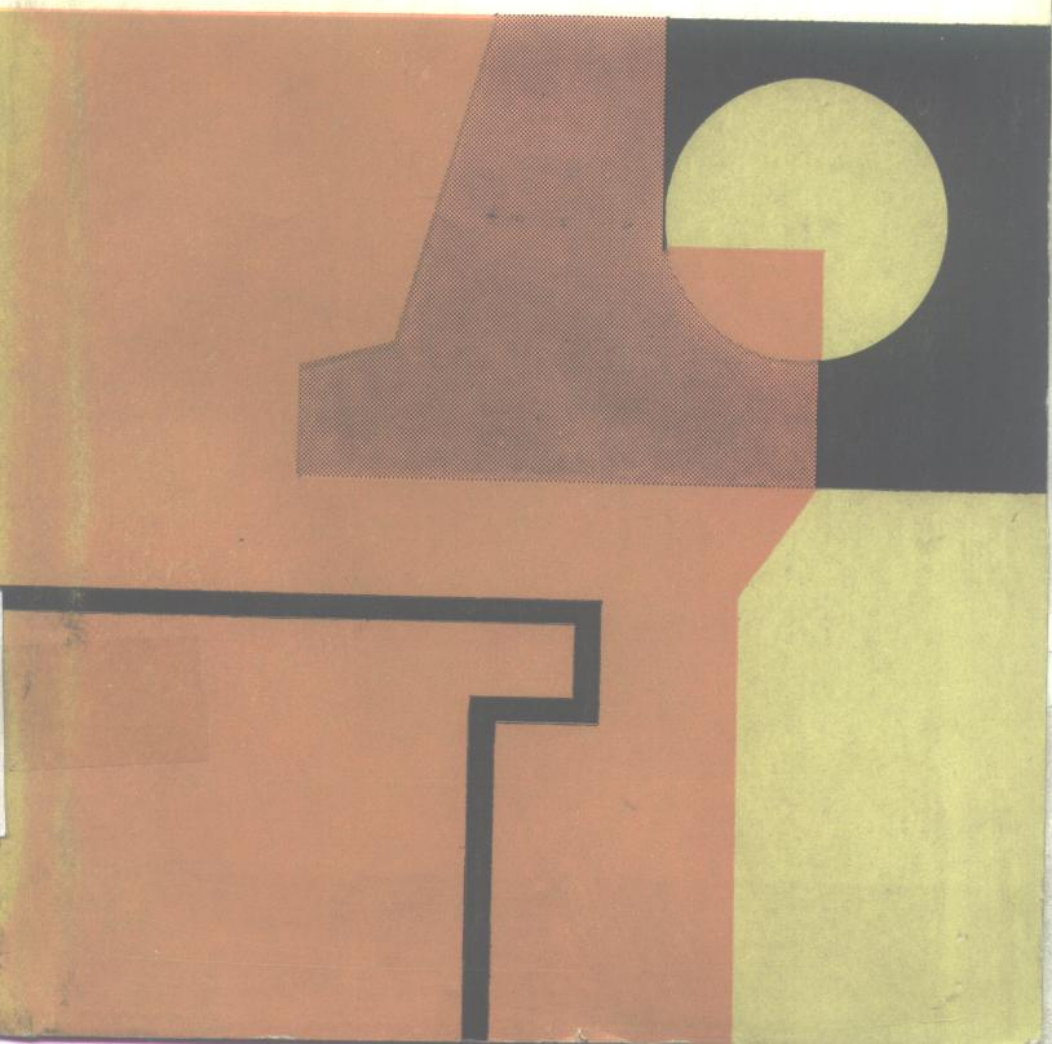


# 混凝土的性能

〔英〕A·M·内维尔 著

李国洋 马贞勇 译 蒋恩德 沙凤丹 杨顺喜 校



# 混凝土的性能

[英] A·M·内维尔 著

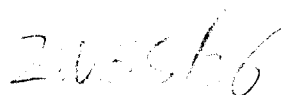
李国泮 马贞勇 译

蒋恩德 沙凤丹 杨顺喜 校

中国建筑工业出版社

本书对混凝土原材料——主要是水泥和骨料——性能、混凝土拌合物性能，硬化混凝土强度，变形性，耐久性，拌合物和硬化混凝土物理力学性能试验方法以及轻混凝土和重混凝土性能作了系统地论述，既注意实际应用问题，又着重从整体观点和基本的科学原理上揭示混凝土性能本质的理论问题，是一本带有经典性的著作。本书收集的资料非常丰富(共引用972份文献)，包括许多国家最新研究成果，从中可以帮助了解混凝土性能科学发展历史、现状和趋势。本书论述深入浅出。

本书可供从事混凝土性能研究和使用混凝土的科技人员以及大专院校建筑材料与制品专业的师生参考。



## Properties of concrete

A.M.Neville

PITMAN PUBLISHING LIMITED (London)

Third edition first published in

Great Britain 1981

\* \* \*

混凝土的性能

李国泮 马贞勇 译

蒋恩德 沙凤丹 杨顺喜 校

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

陕西省印刷厂印刷

\*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：27 $\frac{1}{8}$ 字数：720千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数：1—13,100册 定价：4.40元

统一书号：15040·4504

## 译者说明

本书原著是英国著名混凝土学学者 A·M·内维尔所著，是一本在混凝土专业学术界有影响的专著。原著于1963年问世；第二版出版于1973年（第二版于1973年、1975年、1977年印刷三次）；第三版出版于1981年。本书系按1981年出版的第三版译出。

这里需要说明几点：

1. 译文原按1977年出版的第三版译出。译校者分别为：马贞勇，译第1~3章，第4章后半部分；李国泮译第4章前半部分，第5~10章，主题索引。蒋恩德，沙凤丹校改。之后又于1982年由杨顺喜、李国泮按照第三版原著进行了修改，补译和删节。

2. 原著第二版关于应力、强度的单位采用  $\text{MN}/\text{m}^2$ ，即兆牛顿/米<sup>2</sup>。第三版改为  $\text{MPa}$ ，即兆帕斯卡。按国际单位制（SI单位制）规定： $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ ，即1帕斯卡=1牛顿/米<sup>2</sup>，Pa可同时用  $\text{N}/\text{m}^2$  表示，故本译本关于应力、强度的单位仍然用  $\text{MN}/\text{m}^2$ 。

3. 原著并用 SI 与英制两种单位制，由于国内不采用英制单位，故译文中对某些物理力学量、长度、重量等只保留了 SI 制，删减了英制；但所有图中均保留了两种单位制。

4. 凡书中提到的参见页码（包括索引内页码）均指英文本原文页码，该页的中译文用方括号在段首标出。如第二页倒数第3行（尚可参阅第83页）中的83页，实际在本书中为84页倒数15行所标的[83]以下的内容请读者注意。

5. 原著有一致谢词，翻译时删去。

## 序 言

混凝土和钢材是两种最常用的结构材料。这两种材料有时互为补充，有时也互相竞争，就是说要建造相同类型和功能的结构物，既可以使用钢材，也可以使用混凝土。但是从目前的情况看，一般的工程师对于建造结构物的混凝土材料的知识，往往比对钢材的了解要缺乏一些。

钢材是在严格控制的条件下生产的，它的各种性能均在试验室中予以测定，并载入产品说明书中。因此，设计人员只需要参照相应规范选用钢材即可，而现场的管理人员的工作仅限于制定各个钢构件间的连接工艺。

但是在混凝土施工工地上情形就大不相同了。诚然，水泥的质量如同钢材一样，也是由生产厂保证的，只要选择适宜的水泥，它就决不会成为混凝土结构发生问题的原因。但是问题在于真正作为建筑材料的是混凝土，而不是水泥。而混凝土结构构件一般都在现场制作，它的质量几乎全靠混凝土的拌制、浇筑工艺来保证。

钢材与混凝土制造方法的不同如此明显，因此，保证现场混凝土工程的质量显然是十分重要的。再加上混凝土工种的技术水平目前还不如其它工种那样训练有素，现场工程师的管理工作更显得重要。诸如这些因素，设计人员都必须加以考虑。否则，如果实际采用的混凝土的性能与设计计算中假设的不同，即使是周密的设计，也容易发生质量事故。

但是，决不应该由上述种种理由得出制造优质混凝土很困难的结论。所谓“劣质”混凝土——往往是一种稠度很稀的物质，硬化后成为蜂窝状的非均质的物体，配制这种混凝土，只要把水泥、骨料和水简单地拌合起来即可。相反，配制优质混凝土，各

组分的比例要保持精确地与设计的相同，这成为“专门的”学问，然而往往无需增加工作量，这就是两种混凝土差别之关键所在。

那么，什么是优质混凝土呢？有两项全面的标准：（一）混凝土在硬化状态下要具有良好的性能；（二）在新拌合状态下，即从搅拌机中出料、运输直到在模板中浇筑等情况下，也都具有良好性质。对新鲜状态下混凝土的要求是：拌合物的稠度必须是在不花费大气力情况，采用预定方法就能够使混凝土密实；还要使拌合物具有足够的粘滞性，对所采用的浇筑方法不致产生离析而使混凝土成品造成不均质的后果。

一般说来，对硬化状态下混凝土的主要要求就是要具有足够的抗压强度。强调这一点，不仅是为了混凝土能抵抗规定的压力，达到安全的要求，而且还因为混凝土其它一系列性能都与抗压强度的高低有关系。混凝土的各种性能，如密实度、耐久性、抗拉强度、抗渗性、耐磨性、抗硫酸盐侵蚀以及其它一些性能，将在适当的章节中予以讨论。

近年来对混凝土上述性能的兴趣大为增长，原因是现代规范需要阐明对混凝土特殊性能的要求，于是简单地规定混凝土组成材料的数量、质量就很不够了。因此，具备有关混凝土性能的知识，将有助于我们选用更适宜、更经济的混凝土。工艺设备的发展，也是促使采用混凝土积极性高涨的原因，这些设备使混凝土匀质性得以改善，带来了经济和技术效益。

本书问世以来近二十年间，翻印过多次且译成八国文字。这说明，混凝土仍旧是一种十分重要的结构材料，人们对它的兴趣从未减弱。但是知识在不断地发展，这就是为什么还要出版第三版的原因。

由于本书在许多国家使用，所以我想最好用国际单位制(SI)与英制两种单位制，何况美国还把英制单位不尽合理地看成惯例。因而，本书列出的所有数据、插图与表格对世界各国不论习惯米制还是英制的读者都是方便适用的。

限于本书的篇幅，内容不可能包括混凝土的整个领域，作者选取了自认是相当重要、相当有意义以及自己深入了解的内容，但是着重从整体观点和基本的科学原理来论述混凝土的性能。因为正如亨利·普安卡雷（Henri Poincare'）所说：事实的堆积不是科学，就象一堆石头不是房屋一样。

**A·M·内维尔**

# 目 录

## 序言

### 第一章 波特兰水泥 1

历史简介——波特兰水泥的制造——波特兰水泥的化学组成——水泥的水化：硅酸钙水化物，铝酸三钙水化物和石膏的作用——凝结：假凝——水泥的细度——硬化水泥的结构——水化产物的体积：毛细孔，凝胶孔——水泥凝胶体的力学强度——水化水泥净浆中的水——水泥的水化热——化合物组成对水泥性能的影响：熟料中玻璃体的影响——水泥物理性能的试验：标准净浆的稠度，凝结时间，安定性，水泥强度

参考文献

### 第二章 各种类型的水泥 63

各种类型的波特兰水泥——普通波特兰水泥——快硬波特兰水泥——特种快硬波特兰水泥——低热波特兰水泥——抗硫酸盐水泥——波特兰矿渣水泥——过硫酸盐水泥——波特兰火山灰水泥和火山灰——粉煤灰：火山灰的应用——白水泥——其它波特兰水泥——天然水泥——膨胀水泥——高铝水泥：制造，组成，水化作用，抗化学侵蚀性——高铝水泥混凝土的物理性能：高铝水泥的转化——高铝水泥的耐火特性——外加剂：氯化钙，缓凝剂，减水剂，超塑化剂（高效减水剂）

参考文献

### 第三章 骨料的性能 121

骨料的一般分类——天然骨料的分类：人造骨料——取样——颗粒的形状和特征——骨料的粘结——骨料的强度——骨料的其它力学性能——比重——松散容重——骨料的多孔性和吸水率——



骨料的含水量——砂的湿胀——骨料中的有害杂质；有机杂质；粘土和其它细材料；盐的杂质；不安定的颗粒——骨料的安定性——碱骨料反应：碱—碳酸盐反应——骨料的热性能——筛分分析：级配曲线；细度模数；级配的要求——实际的级配——粗细骨料的级配：过大和过小骨料——骨料间断级配——骨料最大粒径——毛石料的使用——骨料的装卸

参考文献

## 第四章 新鲜混凝土

207

和易性的定义——足够的和易性要求——影响和易性的因素——和易性的量测：坍落度试验；密实因数试验；流展度试验；重塑性试验；维比试验；德国流展度试验台法；球体贯入度试验；纳塞K-探针法；双点试验法；试验的比较；时间与温度对和易性的影响——离析性——泌水性——混凝土的搅拌：混凝土搅拌机，搅拌的匀质性，搅拌时间，手工拌合——预拌混凝土——泵送混凝土——混凝土的振动：内振动器；外振动器；振动台；其它振动器——二次振动——在炎热天气浇灌混凝土——大体积混凝土的浇灌——预填骨料混凝土——真空法处理混凝土——喷射混凝土——新鲜混凝土的分析

参考文献

## 第五章 混凝土的强度

275

水灰比——胶空比——拌合物中的有效水——混凝土强度的本质：抗拉强度；受压开裂与破坏；微裂缝；粗骨料对强度的影响；拌合物富度对强度的影响——强度公式——龄期对混凝土强度的影响——自愈现象——抗压与抗拉强度的关系——混凝土与钢筋的粘结——混凝土的养护：养护方法；混凝土的成熟度——温度对混凝土强度的影响——常压蒸汽养护——高压蒸汽养护——水泥强度的变异——混凝土的疲劳强度——冲击强度——拌合水的质量

参考文献

## 第六章 弹性、收缩和徐变

370

应力-应变关系与弹性模量; 动弹性模量——波桑比——早期体积变化——膨胀——干燥收缩; 收缩机理; 影响收缩的因素; 养护与放置条件的影响; 湿差收缩——收缩裂缝——水分迁移——碳化与碳化收缩——混凝土的徐变; 徐变的影响因素——徐变与时间的关系——徐变的本质——流变学模型——徐变的影响  
参考文献

## 第七章 混凝土的耐久性

446

混凝土的渗透性; 渗水性的量测; 空气与蒸汽渗透性——混凝土的化学侵蚀: 硫酸盐侵蚀; 抗硫酸盐试验; 海水侵蚀; 酸侵蚀; 盐析现象——冰冻对新拌混凝土的影响; 冬季施工——硬化混凝土的冰冻侵蚀; 冰冻作用; 抗冻混凝土; 混凝土的抗冻性试验; 解冻盐类的影响——加气的混凝土; 加气; 空气含量; 加气的影  
响; 空气含量的测定——混凝土的热工性质: 导热系数; 热扩散系数; 比热; 热膨胀系数; 混凝土的耐火性及温度对强度的影响——耐磨与抗气蚀性; 耐冲刷磨蚀; 抗气蚀性; 耐磨性试验; 混凝土的耐磨性——混凝土的电学性质——声学性质  
参考文献

## 第八章 硬化混凝土的试验

539

抗压试验; 立方试件试验; 圆柱试件试验; 棱柱试件试验; 等效立方试件试验——试件端部条件与压顶的影响——抗压试件的试验——抗压试件的破坏——高径比对强度的影响——立方试件与圆柱试件强度的比较——弯曲试验——劈裂试验——加载速率对强度的影响——试验时湿度状态的影响——试件尺寸对强度的影响; 试件尺寸与骨料粒径——岩心试件试验——加速养护试验——回弹仪试验——贯入抗力试验——拔出试验——超声脉冲速度试验——弹性模量的电动力学测定——硬化混凝土组成的试验; 水泥含量; 原始水灰比的测定; 物理方法——试验结果的变异性; 强度分布; 标准离差。  
参考文献

## 第九章 轻混凝土与重混凝土

618

轻混凝土的分类——轻骨料：天然轻骨料，人造轻骨料——轻骨料混凝土——轻骨料混凝土配合比设计：例题——加气混凝土——无砂混凝土——锯屑混凝土——防辐射混凝土的性能：照射对强度与徐变的影响——重混凝土——特种混凝土  
参考文献

## 第十章 配合比设计

660

基本考虑：造价；规范——配合比的设计程序——选择拌合物配合比的因素：平均强度，“最低”强度，平均强度与“最低”强度的关系；质量控制；耐久性；和易性；骨料的粒径；骨料的级配和种类；骨灰比；每盘拌合物的配比与称量——绝对体积计算法——具有典型级配的组合骨料——拌合物配合比设计简例——高强度混凝土配合比设计：例题；超高强度混凝土——抗弯强度的配合比设计——掺加气剂混凝土的配合比设计——美国配合比设计方法：例题——现行英国方法；流态混凝土的技术要求——计算的评述  
参考文献

## 主题索引

729

# 第一章 波特兰水泥

〔1〕\*水泥，这个名词的一般含义可以解释为具有粘着和内聚性质，能够使矿质碎块粘结成密实整体的一种材料。这一定又适合于各种胶凝材料。

在工程施工中，水泥这个名词的意义局限于与石、砂、砖、建筑砌块等一起用的胶凝材料。这一类水泥的主要组成成分是石灰的化合物，因而，在建筑和土木工程中，我们主要是同含钙的胶凝材料打交道。在混凝土生产中受到重视的是能同水进行化学反应并能在水中凝结、硬化的水泥。因此被称为水硬水泥。

水硬性水泥主要由石灰的硅酸盐和铝酸盐组成，可以粗略地分为天然水泥、波特兰水泥和高铝水泥几类。在本章中论述波特兰水泥的生产，及其在水化前和硬化后的结构和特性。不同种类的波特兰水泥和其他水泥将在第二章中叙述。

## 历史简介

胶凝材料的应用历史悠久。古代埃及人曾应用过煨烧不纯的石膏。希腊人和罗马人曾应用过煨烧的石灰石，后来又懂得在石灰和水中掺加砂、碎石，或砖和碎瓦片。这就是历史上第一次出现的混凝土。石灰砂浆在水中并不硬化，在水下工程中，罗马人应用了将石灰和火山灰粉磨或磨细的烧粘粘土的混合物。在火山灰和烧粘土中的活性氧化硅和氧化铝，与石灰结合在一起，形成后来大家知道的火山灰水泥。这是以维苏威火山附近的村庄普泽里（Pozzuoli）而命名的，因为在那里最早发现了火山灰。今天应用的火山灰水泥这个名称，是指将天然材料在常温下经过磨细而制得的水泥。罗马有一些结构物的砖石砌体是用砂浆来粘结

---

\* 方括号内数字为英文原书页码，下同。参见译者说明（4）。——译注

的，例如罗马的科利肖姆（Coliseum）和在尼姆（Nîmes）附近的加尔桥（Pont du Gard）一直存在到今天，其胶凝性材料仍然坚硬和牢固。在庞贝（Pompeii）废墟中，发现砂浆风化的情况常比软石为少。

<sup>[2]</sup>中世纪在水泥的质量和和应用方面带来了全面的衰退，只是在18世纪，关于水泥的知识才有所发展。约翰斯米顿（John Smeaton）在1756年被委派建造位于科尼什（Cornish）海湾外的艾迪斯东（Eddystone）灯塔，他发现用火山灰与含有粘土质多的石灰石拌合能制得最好的砂浆。由于认识到这种过去未曾考虑到的粘土的作用，斯米顿（Smeaton）首先理解水硬性石灰化学性质的人。

以后，其它的水硬性胶凝材料相继研制成功，约瑟夫·帕克（Joseph Parker）用煅烧泥土质石灰石制得了“罗马水泥”。直到1824年，里兹的一个建造商约瑟夫阿斯帕丁（Joseph Aspdin）取得“波特兰水泥”专利，这时水泥才发展到了高峰。这种水泥的制备是在熔炉中加热细散的粘土和硬石灰石的混合料，直到二氧化碳排除完，这时的温度比烧成熟料所需温度要低得多。现代水泥的原型是伊萨克·约翰逊（Issac Johnson）在1845年制成的，他把粘土和白垩的混合物煅烧到烧结，使其产生了生成强固的胶凝化合物所必需的反应。

波特兰水泥这一名称，起先是由于凝固的水泥的颜色和质量相似于波特兰石——在 多尔西特（Dorset）开采的一种石灰石，因而得名。这个名称直保留到今天，用以说明把石灰质的和粘土质的，或其他含氧化硅、氧化铝和含氧化铁的材料均匀地拌合在一起，在烧结温度下煅烧成熟料，经过磨细而制得的一种水泥。这就是现行英国标准（BS12:1978）中的定义，标准中还规定在煅烧以后，除石膏和水外，不加任何其它材料（尚可参阅第83页）。

### 波特兰水泥的制造

从上面对波特兰水泥所下的定义可以看出，波特兰水泥主要

是由石灰质材料，例如石灰石或白垩，和存在于粘土或页岩中的矾土和硅石所制成。也有使用一种石灰质和泥质材料组成的泥灰岩混合物来制造水泥的。在英国，白垩存在于东南部，因此，水泥厂多数集中在泰晤士河口和梅德韦河（Medway）。石灰石存在于西南部、中部、北英格兰和威尔士等几个地区，泥质矿床英国到处都有。制造波特兰水泥的原材料则几乎遍布世界各地。

水泥制造过程基本上包括粉磨原材料，按一定的比例均匀地拌合在一起，置于一个大的旋转窑中，在大约1400°C温度中煅烧，此时材料烧结和部分熔融成球状物即熟料。熟料经冷却，加入一些石膏并磨成细粉，得到的产品便是全世界广泛应用的商品牌特兰水泥。

〔3〕现在讲一讲水泥制造的一些细节问题。

原材料的拌合和粉磨可以在水中或在干的条件下进行，因而称之为“湿法”过程和“干法”过程。目前采用的制造方法也是根据所用原材料的硬度和湿度来决定的。

让我们首先谈谈湿法生产过程。如果用的是白垩，那么可将白垩粉碎成细粒并分散于淘泥池水中；淘泥池是一个循环池，有带耙齿的旋臂，用于打碎硬块。粘土通常亦是在相似的淘泥池中与水拌合并被破碎。这两种混合料用泵抽吸，按预定的比例混合，通过一系列筛子，最后，生料浆流入贮罐中。

如果用的是石灰石，先将石灰石进行爆破开采，然后破碎，破碎通常是在较小的两级破碎机中进行，接着喂入球磨机，这时分散于水中的粘土也同时喂入。在磨中完成石灰石的粉碎（直至粉状细度）过程，最后的生料浆用泵抽吸到贮罐中。在此以后，不管原材料的本来性质如何，制造方法都是相同的了。

生料浆是乳状稠性液体，含水量在35~50%，只有一小部分材料粒子（大约2%）的粒径是大于90微米（No.170ASTM①）筛眼孔径通常备有几个贮罐。贮存料浆，用机械搅拌或用压缩空气

---

① ASTM=美国试验与材料学会。——译注

搅拌以防止悬浮固体的沉淀。如前所述，生料浆的石灰含量是由原生石灰质和粘土质材料的百分比所决定。为了取得要求的化学组成，可以把不同贮罐的生料浆掺合在一起，进行最后的调整，有时是用一套专用的掺合罐装置来进行的。有时还出现这种情况，例如挪威的一家位于世界最北部的工厂，所用原材料是一种岩石，其组成决定，只需粉碎而无需再进行配料。

最后，石灰含量符合要求的生料浆进入回转窑。回转窑是一个大的、耐火衬砌的钢制圆筒，直径最大可达7.5米(25英尺)，有的长达230米(760英尺)，绕着与水平面稍有倾斜的轴缓慢地旋转。生料浆从窑的上端喂入，而煤粉则用鼓风机从下端吹入，窑内温度达1400~1500°C。应该指出的是煤的含灰量不应过大，因为制造1吨水泥用煤大约190~350公斤(420~770磅)这在考虑水泥价格时是应加以注意的因此往用油(每吨水泥约用150升，相当40美国加仑)或天然气代替煤，但是近来一些烧油工厂又改成烧煤。

<sup>[6]</sup> ① 生料浆在窑中向下运动时遇到逐渐升高的温度。起初排掉水分，放出二氧化碳，干料进行一系列化学反应，最后，在窑内最热部分，约20~30%的材料变成液体，氧化钙、二氧化硅和氧化铝重新结合，熔合成球状物质，其直径为3~25毫米(1/8~1英寸)，即为熟料。然后熟料掉落到冷却机中进行冷却。冷却机有各种类型，它经常作为一种来加热随即要用来燃烧煤粉的空气。湿法生产厂目前最大的窑可日产熟料3600吨。

经过冷却的熟料，其特征是黑色、有光泽和坚硬的，与石膏掺合一起磨碎，为的是防止水泥的急凝。粉磨是在球磨机中进行，球磨机由几个隔仓组成，各仓内的钢球渐次缩小。有些厂内采用闭路粉磨系统：从球磨机出来的水泥通过选粉机，细颗粒被气流送入贮仓，粗颗粒重新进入球磨机。闭路粉磨避免了产生大量过分细的材料，或是少量太粗的材料，而这些缺点是开路粉磨

---

① 原书4~5页图删掉。

系统中经常遇到的。

当水泥粉磨到令人满意的程度,即每公斤水泥具有多于 $1.1 \times 10^{12}$ 颗粒时就可装入人们熟知的纸袋<sup>①</sup>中,或装入桶,或作散装运输。

在干法和半干法生产中,原材料经过破碎后按正确比例喂入球磨机。原材料在球磨机里得到干燥,并被粉磨成细粉。干粉末,称为生料粉,由泵送入混合筒仓,这时按照制造水泥所需材料的比例作最后的调整。为了获得均匀的混合料,生料粉的掺合通常是采用压缩空气吹送方法进行混合,使粉末向上运动,并减少其表现密度。压缩空气每一次只吹送生料筒仓的四分之一部分,这样就可以使比较重的材料从无吹气部分横向移动到吹气部分。因此,经过气吹的材料就形成几乎象液体一样的状态,轮流向仓内其他各个四分之一部分吹气大约1小时的时间,就获得了均匀的混合料。有些水泥工厂则采用连续混合方法。

<sup>(1)</sup>采用半法生产时,将混合的生料粉过筛,送入旋转盘,即盘式成球机,同时加入12%生料粉重量的水。这样就形成了直径为约15毫米的硬小球。这一过程是必要的,因为粉末直接送入窑内将不利于在形成水泥熟料的化学反应中所需的气流和热交换。

生料球在来自窑内热气预热的炉篦中烘成干硬状,然后进入窑内,以后的工艺流程与湿法相同。然而,由于生料球的含水量只有12%左右,而湿法中采用的生料浆含水量为40%,所以干法窑是比较小的。所需的热量也是较低的,因为只有约12%含水量必需排除掉,但是在排除原材料的初始含水量(通常是6~10%)时也耗用一些热量。在原材料比较干的情况下,这种方法是比较经济的。在这种情况下,每吨水泥的总耗煤量可以少到100公斤(220磅)。

在采取干法生产时,使含水量约0.2%的生料粉通过一个通常为悬置式的预热炉。生料粉送往窑里之前在这里加热到约

① 英国标准袋容量为50公斤(以前为112磅)水泥;美国袋装94磅;加拿大现已改成装80磅。



800°C。由于生料粉不含需要排除的水分，并且由于生料粉已经预加热，因此窑的尺寸可以比采取湿法时小得多。大部分生料粉都可以通过设在预热炉和窑之间的流化煅烧炉（用一种分开来的热源）。这样便提高了生料粉入窑之前的脱掉二氧化碳作用（ $\text{CaCO}_3$ 的分解作用），并且大幅度提高了窑的生产能力。世界上最大的干法生产厂可日产6,200吨熟料，用的是一个直径6.2米（20英尺）、长105米（345英尺）的窑。一个窑的这种产量约等于英国全部水泥消费量的七分之一。

除非原料需要采用湿法生产，目前都采用干法生产，以便最大限度地降低烧制所需要的能量。烧制过程通常约占生产成本的40~60%，而为制取生产水泥的原材料仅占水泥总成本的10%。

在美国，用干法生产1吨水泥平均能耗1973年为1.8兆瓦时<sup>1.72</sup>。电力消耗约占所用总能量的6~8%，大体上是：粉碎原材料为10千瓦小时，生料粉磨为28千瓦小时，烧制为24千瓦小时磨细为41千瓦小时<sup>1.18</sup>。

还有其他制造水泥的方法，也许值得提及的一种是用石膏代替石灰。石膏、粘土和焦炭，以及砂和氧化铁在窑中煅烧，最终产品是波特兰水泥和二氧化硫，后者进而生成硫酸。

<sup>18</sup>在仅需要小批量生产水泥的地区，可以采用一座哥特利布（Gottlieb）型立式窑，将生料粉和煤粉混合煅烧，制成成团的熟料，然后加以磨细。单独的一座高8.5米（28英尺）的窑日产水泥150吨。

应予着重指出的是，所有方法均要求将原材料制成均匀的混合料，因为窑中的一部分反应必须通过在固体材料中的扩散作用而发生，材料的均匀分布是获得匀质产品的基本保证。

### 波特兰水泥的化学组成

制造波特兰水泥所用的原材料主要包括氧化钙、二氧化硅、氧化铝和氧化铁。除了由于没有足够反应时间而残留下来的少量游离石灰外，这些化合物在窑中互相作用，生成一系列比较复杂