

 混凝土技术丛书

水泥品种与性能

● 隋同波 文寨军 王晶 编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

混凝土技术丛书

水泥品种与性能

隋同波 文寨军 王 晶 编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥品种与性能/隋同波, 文寨军, 王晶编. —北京:
化学工业出版社, 2006
(混凝土技术丛书)
ISBN 7-5025-8245-2

I. 水… II. ①隋…②文…③王… III. ①水泥-
产品-基本知识②水泥-性能-基本知识 IV. TQ172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 017251 号

混凝土技术丛书

水泥品种与性能

隋同波 文寨军 王晶 编

责任编辑: 常青 窦臻 马燕珠

文字编辑: 管景岩

责任校对: 凌亚男

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 12 字数 144 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8245-2

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《混凝土技术丛书》编委会

主任 姚燕

副主任 韩素芳 王铁梦 陈龙珠 王玲

委员 (按姓氏笔画排序)

王玲 中国建筑材料科学研究院高级工程师，中国混凝土外加剂协会秘书长，中国土木工程学会外加剂专业委员会副主任，中国建筑学会建材分会外加剂应用技术委员会副主任

王铁梦 冶金建筑研究总院原副院长兼上海分院总工程师，教授级高级工程师，博士生导师，国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心技术顾问

王爱勤 北京市建筑材料科学研究院院长助理，高级工程师

邱平 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心高级工程师

沈荣熹 中国建筑材料科学研究院水泥与新型建筑材料研究所顾问，教授级高级工程师

张树凯 原国家建材局生产司司长，中国水泥制品工业协会名誉会长，高级工程师

张荣成 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心教授级高级工程师

陈龙珠 上海交通大学教授，博士生导师，安全与防灾工程研究所所长，建设部桩基动测单位资质评审专家委员会委员

陈拴发 长安大学公路学院教授

岳跃真 中国水利水电科学研究院结构材料所副总工程师，教授级高级工程师

周德源 同济大学土木工程学院教授，博士生导师

胡曙光 武汉市副市长，武汉理工大学教授

姜红 国家建筑工程质量监督检验中心常务副主任，中国建筑科学研究院建筑工程检测中心主任，教授级高级工程师

姚燕 中国建筑材料科学研究院院长，教授级高级工程师，博士生导师，中国建筑材料工业协会副会长，中国混凝土外加剂协会会长，中国水泥制品工业协会副会长，中国硅酸盐学会水泥分会主任，中国水泥协会副会长，中国建筑学会建材分会副主任

崔庆怡 陕西建筑科学研究院顾问，教授级高级工程师

隋同波 中国建筑材料科学研究院院长助理，所长，教授级高级工程师，博士生

导师，中国硅酸盐学会水泥分会秘书长

韩素芳 中国建筑科学研究院教授级高级工程师，中国土木工程学会混凝土质量专业委员会主任委员

韩继云 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心研究员，一级注册结构师

出版者的话

混凝土具有强度高、耐久性好、原料来源广、制作工艺简单、成本较低、适用于各种自然环境等优点，因此，它是世界上使用量最大、最为广泛的首选建筑材料。近年来，随着建筑技术的不断更新，混凝土的组成及施工工艺也发生了巨大变化，混凝土结构的研发与创新，新材料、新工艺、新技术的开发应用，典型工程的创新应用等均取得了长足的进步，建造了许多举世瞩目的工程项目。为了及时总结推广和应用混凝土的新技术、新工艺、新材料，总结在混凝土研究开发方面的创新经验，以期进一步促进对混凝土的科学研究和技术发展，我们特邀请了中国建筑材料科学研究院、中国建筑科学研究院、原冶金工业部建筑科学研究所、上海交通大学等有关科研院所和企业的专家、教授编写了《混凝土技术丛书》和《建筑工程质量控制丛书》。

这两套丛书总结和反映了国内外有关混凝土研究、开发、应用的最新技术、最新进展，书中有不少数据与理论是作者长期实践经验的总结，这些资料非常宝贵，有的是第一次公开出版，具有非常重要的参考价值。这两套丛书是从事土木与水利工程的地质勘探、结构设计、施工技术、质量检测和监理等工作的科研人员及工程技术人员自学提高的必备参考书，同时也可作为继续教育的培训用书及相关院校师生的参考书。

我们真诚地欢迎读者和用户对丛书提出宝贵的意见和建议，以便再版时不断使其得到改进和完善。

化学工业出版社

2005年12月

前 言

水泥是建筑业三大基本材料之一，使用广，用量大，素有“建筑业的粮食”之称。生产水泥虽需较多能源，但水泥与砂、石等集料所制成的混凝土则是一种低能耗型建筑材料。例如，在相同荷载的条件下，混凝土柱的耗能量仅为钢柱的 $1/5 \sim 1/6$ ，砖柱的 $1/4$ 。根据预测，在未来的几十年内，水泥依旧是主要建筑材料。水泥具有较好的可塑性，与砂、石等拌合后的混合物具有较好的和易性，可浇注成各种形状及尺寸的构件，以满足设计上的不同要求；水泥的适应性较强，适用于海上、地下、深水、严寒、干热、腐蚀、辐射等各种条件下；水泥还可与各种有机、无机材料制成各种用途的水泥基复合材料；水泥耐久性较好，维修工作量小，不易生锈、耐腐朽。目前，水泥已广泛用于建筑、水利、道路、国防等工程中。近年来，宇航、信息及其他新兴工业中对各种具有特种性能的水泥基复合材料的需求也越来越大。因此，水泥工业在整个国民经济中起着十分重要的作用。在目前甚至未来相当长的时期内，水泥仍将是人类社会主要的建筑材料。按性能和用途，可分为通用水泥、专用水泥和特性水泥三大类。通用水泥为用于大量土木建筑工程一般用途的水泥，如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥等。专用水泥则指有专门用途的水泥，如油井水泥、中热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、砌筑水泥等。特性水泥指某种性能较突出的一类水泥，如快硬水泥系列、膨胀水泥系列、抗硫酸盐硅酸盐水泥等。按照水泥熟料的矿物组成又可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥和无熟料水泥等。

改革开放以来，我国水泥工业取得了令人瞩目的成绩。水泥科学研究工作得到了很大的发展，在水泥熟料煅烧、粉磨、熟料形成、水泥熟料新矿物、水硬化、废渣综合利用、外加剂、节能技术等有关的基础理论以及测

试方法的研究和应用取得了长足的进步，已形成了硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥以及复合硅酸盐水泥六大通用硅酸盐水泥体系，广泛应用于工业和民用建筑工程建设。此外，在特种水泥的研究和开发方面成绩卓越，已由建国初期仅有的3~4个品种发展到现在的60多个品种，从仅能生产用于建筑工程的一般水泥，发展到生产石油、水电、冶金、化工、海港和国防部门等工程所需的特种水泥。我国水泥工业还相当重视工业废渣和资源的综合利用，如早在20世纪50年代就已推广使用矿渣硅酸盐水泥，目前我国水泥工业已成为消纳其他工业废弃物的主要行业，年利用工业废渣达4亿吨。同时，我国水泥工业不断发展新技术、新工艺，例如在20世纪50年代就已开始悬浮预热器的研究，20世纪70年代开发和建成了我国第一条悬浮分解窑，尤其是20世纪90年代以来，新型干法水泥生产进入了大型化、集约化快速发展时期，产业结构正在发生巨大变化和提升，已形成技术先进、成熟可靠的700~6000t/d新型干法生产线的国产化技术和装备系列，技术已达到国际先进水平。目前我国水泥产量已达10亿吨，其中新型干法水泥已发展到3亿多吨，是世界第一水泥生产和消耗大国，也是世界上新型干法生产线最多和产能最大的国家。

此外，在水泥发展过程中，通用硅酸盐系列水泥从产量和用途来看，在基本建设工程中占有重要地位，但由于通用硅酸盐水泥固有的性能和特点，决定了它不能满足一些特殊工程的需要。特种水泥是指具有某些特殊性能的水泥，或者说，凡不属于通用硅酸盐系列的水泥可通称为特种水泥。对于某些特殊工程，必须采用特种水泥来满足工程的质量要求或施工工艺新要求。例如，油井的固井必须采用油井水泥，大坝施工必须采用中热或低热水泥，有硫酸盐侵蚀的工程必须采用抗硫酸盐水泥，抢修抢建就必须采用快硬早强水泥，装饰工程必须采用白水泥或彩色水泥等。因此，特种水泥在工程建设中也是必不可少的。当今世界各国都在研究和发​​展特种水泥新品种，水泥已从单一的含硅酸盐矿物的品种发展到各种化学成分、矿物组成、性能与应用范围不同的品种。我国特种水泥的发展经过50多年几代人的努力，经历了仿造、自主研发开发、创新提升三个阶段，已研制成功6大体系8大类共60余种特种水泥。目前，我国在特种水泥的理论研究、品种数量及应用水平上

已进入世界先进行列。

本书主编单位中国建筑材料科学研究院是我国水泥、混凝土与房建材料行业历史最长、规模最大的研究机构，主要从事水泥、混凝土、特种工程材料等新品种、新工艺、新装备、新技术的研究开发，现已开发成功水泥煨烧预分解、利用回转窑煨烧矾土水泥、水泥添加晶种煨烧等先进工艺技术，研制成功 60 余种新品种水泥，包括国际首创的硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥，上述成果广泛应用于水利、石油、冶金、机械、航天、海洋等开发领域。

本书结合编者多年实践经验，比较系统地介绍了硅酸盐系列通用水泥和特种水泥的基本理论知识，包括最新水泥标准、水泥生产质量要求、生产过程质量控制、水泥的性能及技术特点、水化硬化机理和应用等方面的知识，较为全面地反映了硅酸盐系列通用水泥和特种水泥研究和应用的新理论和生产新技术，为科研工作者开展相关研究工作提供参考和借鉴，同时对于广大工程技术人员了解和掌握这些知识，指导水泥的生产和应用亦大有帮助。

本书可供水泥及其制品、建筑工程、环境保护、化学建材等部门的科研、生产、工程技术人员参考，也可作为相关专业领域的各类大、中专院校师生的教学参考书。

本书在编写出版过程中，得到了有关领导、专家和同行的悉心指导和热情帮助，在此一并致以真诚的谢意。编者也恳切欢迎各种评论和意见，以便使未来的版本得到逐步提高和改善。

编 者

2006 年 1 月于北京

内 容 提 要

本书系《混凝土技术丛书》的一个分册，比较全面、系统地介绍了硅酸盐系列通用水泥和特种水泥的基本理论知识，包括最新水泥标准、水泥生产质量要求、生产过程质量控制、水泥的性能及技术特点、水化硬化机理和应用等方面的知识。本书也较为全面地反映了硅酸盐系列通用水泥和特种水泥研究及应用的新理论与生产新技术，为科研工作者开展相关研究工作提供参考和借鉴，同时对于广大工程技术人员了解和掌握这些知识，指导水泥的生产和应用亦大有帮助。

本书可供水泥及其制品、建筑工程、建筑材料、环境保护等部门的科研、生产技术人员参考，也可作为相关专业领域的各类大、中专院校师生的教学参考书。

目 录

第一章 概论	1
第一节 水泥研究发展现状	1
第二节 水泥品种的分类	4
第二章 硅酸盐系列通用水泥	5
第一节 概述	5
第二节 硅酸盐水泥	8
一、定义	8
二、技术指标	9
三、原材料的准备	14
四、生料的制备	18
五、熟料的煅烧	18
六、熟料的矿物组成及特性	22
七、水化反应与特性	24
八、物理力学性能	30
九、国家标准	37
十、应用与存放	38
第三节 普通硅酸盐水泥	40
第四节 矿渣硅酸盐水泥	43
一、矿渣的化学组成和矿物组成	43
二、矿渣水泥的水化、硬化	47
三、矿渣水泥的性能特点	48
四、国家标准	50
五、矿渣硅酸盐水泥的应用	51
第五节 火山灰质硅酸盐水泥	52

一、火山灰质混合材料及其化学成分	52
二、火山灰质混合材料活性的评定	54
三、火山灰水泥的水化、硬化	56
四、火山灰水泥的性能特点	57
五、国家标准	58
六、火山灰质硅酸盐水泥的应用	58
第六节 粉煤灰硅酸盐水泥	60
一、粉煤灰的化学组成和矿物结构	60
二、粉煤灰水泥的水化与硬化	62
三、粉煤灰水泥的性能特点	63
四、国家标准	65
五、粉煤灰硅酸盐水泥的应用	66
第七节 复合硅酸盐水泥	66
一、混合材料的种类与掺量	67
二、复合水泥的品种及应注意的问题	68
三、复合水泥的性能	69
四、国家标准	70
五、复合硅酸盐水泥的应用	71
第八节 石灰石硅酸盐水泥	72
一、石灰石的掺量与质量要求	72
二、石灰石硅酸盐水泥的水化及性能	73
三、国家标准	73
四、石灰石硅酸盐水泥的应用	74
第三章 特种及新品种水泥	75
第一节 概述	75
第二节 快硬高强水泥	79
一、快硬硅酸盐水泥	80
二、无收缩快硬硅酸盐水泥	83
三、快凝快硬硅酸盐水泥	85
四、铝酸盐水泥	89

五、快硬高强铝酸盐水泥	100
六、快凝快硬氟铝酸盐水泥	102
七、快硬硫铝酸盐水泥	109
八、快硬铁铝酸盐水泥	115
九、快凝快硬型砂水泥	117
第三节 膨胀水泥	119
一、硅酸盐膨胀水泥	122
二、明矾石膨胀水泥	123
三、铝酸盐膨胀水泥	124
四、硫铝酸盐膨胀水泥	126
五、铁铝酸盐膨胀水泥	127
第四节 自应力水泥	129
一、自应力硅酸盐水泥	129
二、明矾石自应力水泥	131
三、自应力铝酸盐水泥	133
四、自应力硫铝酸盐水泥	135
五、自应力铁铝酸盐水泥	136
第五节 水工水泥	137
一、中热硅酸盐水泥	141
二、低热硅酸盐水泥	143
三、低热矿渣硅酸盐水泥	145
四、低热粉煤灰硅酸盐水泥	146
五、低热微膨胀水泥	147
六、抗硫酸盐硅酸盐水泥	149
第六节 油井水泥	151
一、API 通用油井水泥	151
二、特种油井水泥	158
第七节 装饰水泥	161
一、白色水泥	162
二、彩色水泥	164

三、无熟料装饰水泥	167
第八节 其他特种水泥	168
一、砌筑水泥	168
二、低碱度水泥	170
三、道路硅酸盐水泥	172
参考文献	177

第一章 概 论

第一节 水泥研究发展现状

就广义而言，水泥泛指一切能够硬化的无机胶凝材料；而狭义的水泥则专指现代水泥，即具有水硬性的胶凝材料。水泥起源于胶凝材料，是在胶凝材料的发展过程中逐渐演进和发明的。

所谓胶凝材料，即胶结料，是指在物理、化学作用下，能从浆体变成坚固石状体，并能胶结其他物料而具有一定机械强度的物质。胶凝材料可分为有机和无机两大类，沥青和各种树脂属于有机胶凝材料，无机胶凝材料按硬化条件又分为水硬性和非水硬性两种。非水硬性胶凝材料拌水后只能在空气中硬化而不能在水中硬化，如石灰、石膏等；而非水硬性胶凝材料拌水后既能在空气中硬化，又能在水中硬化。

原始水泥可追溯到 5000 年前，埃及的金字塔、古希腊和古罗马时代用石灰掺砂制成的混合砂浆，曾被用于砌筑石块和砖块，这种用来作砌筑用的胶凝材料被称为原始水泥。虽然按今天科学家的眼光看，它们只不过是黏土、石膏、气硬性石灰、火山灰、水硬性石灰，但就是这些原始的发现为现代水泥的发明奠定了基础。

1824 年，英国人丁·阿斯普丁 (Joseph Aspdin) 发明了一种把石灰石和黏土混合后加以煅烧来制造水泥的方法，并获得了专利权。这种水泥同英国附近波特兰小城盛产的石材颜色相近，故称为波特兰水泥。人类最早是利用间歇式土窑（后发展成土立窑）煅烧水泥熟料，1877 年回转窑烧制水泥熟料获得了专利权，继而出现

了单筒冷却机、立式磨以及单仓钢球磨等，从而有效地提高了水泥产量和质量。1905年湿法回转窑出现；1910年土立窑得到了改进，实现了立窑机械化连续生产；1928年德国的立列波博士和波利休斯公司在对立窑、回转窑综合分析研究后，创造了带回转炉算子的回转窑，为了纪念发明者与创造公司，取名为“立波尔窑”。1950年，悬浮预热器窑的发明与应用使熟料热耗大幅度降低，与此同时，熟料的冷却设备也有了很大的发展，其他的水泥制造设备也不断更新换代。20世纪60年代初，日本将德国的悬浮预热器窑技术引进后，于1971年开发了水泥窑外分解技术，从而揭开了现代水泥工业的新篇章，并且很快在世界范围内出现了各具特点的预分解窑，形成了新型干法水泥生产技术。随着原料预均化、生料均化、高功能破碎与粉磨、环境保护技术和X射线荧光分析等在线检测方法的配套发展、逐步完善，加上电子计算机和自动化控制仪表等技术的广泛应用，使新型干法水泥生产的熟料质量明显提高，能耗明显下降，生产规模不断扩大。新型干法水泥生产工艺正在逐步取代湿法、老式干法和立窑等生产工艺。

我国的水泥工业解放前十分落后，1876年只是在河北唐山成立了启新洋灰公司，以后又相继建立了大连、上海、中国、广州等水泥厂，历史上最高年产量（1942年）只有229万吨。我国水泥工业真正的发展是在解放以后，20世纪50年代，我国按照前苏联模式，在部分高校中设立了水泥专科和中等专业学校，注重培养水泥方面的专业技术人才，与此同时，国家成立了建材研究结构，一部分专业人才潜心研究水泥技术，并建成了一批水泥厂。经过50年的发展，我国水泥工业在世界上举足轻重，1998年我国水泥产量已达5.36亿吨，连续多年居世界第一。在提高水泥产量的同时，水泥质量也不断提高，产品的标准不断更新，并逐步向国际化接轨。20世纪90年代以来已开始在水泥行业广泛使用产品质量国际认证体系。

在水泥发展过程中，硅酸盐系列水泥（即波特兰水泥）从产量和

用途来看,在基本建设工程中占有重要地位。但是,由于硅酸盐水泥固有的性能和特点,决定了它不能满足一些特殊工程的需要,也不能满足现代化建设工程和施工新技术的需求。当今世界各国都在研究和发 展专用水泥及特种水泥。水泥已从单一的含硅酸盐矿物的品种发展到各种化学成分、矿物组成、性能与应用范围不同的品种。

到目前为止,我国已研制成功了特种水泥和专用水泥 100 余种,经常生产的有 30 余种,约占水泥总产量的 25%,如道路水泥、大坝水泥、快硬水泥、水工水泥、油井水泥、膨胀水泥、自应力水泥、耐高温水泥、装饰水泥等。

从发展趋势看,今后一段时间内将在改善现有水泥品种性能的基础上,逐步开发用途更为广泛的水泥。与此同时,节能的地位和作用日益突出。围绕着节能有三方面的工作要做:第一,淘汰一批产量在 4.4 万吨以下的小立窑水泥厂,控制水泥工业规模总量,使原燃料、资金、市场优化配置。第二,从探索水泥的矿物着手,研究开发节能型矿物,即低钙低烧成温度的矿物和矿物体系,系统地研究其共存条件及工业生产的可能性。要研究矿化剂的作用机理,把新型高效的矿化剂的研究和发展新品种水泥结合起来。对传统低能耗矿物 C_2S 的活性研究应进一步深入。从矿物的微观构造,尤其是从晶格缺陷理论方面的研究去开拓新的途径。第三,从可持续发展和环境保护的高度出发,利用工业废渣生产和发展新型水泥。今后 10 年内的重点将放在解决数量最大的两种工业废渣——粉煤灰和煤矸石的综合利用上。工业废渣作为水泥混合材仍然是主要途径,但在混凝土工程、筑路工程及发展新型墙体材料及其他建筑材料上,仍然可以利用一些工业废渣。要利用活性混合材料发展免烧(或低温烧成)水泥,如碱矿渣水泥等,以及发展一些特殊工程专用的低强度等级的水泥,如砌筑水泥、低热大坝水泥等。如果以工业废渣为原料发展的节能改性硅酸盐水泥在性能和价格上能与传统硅酸盐水泥竞争成为事实,也不排除在今后达到取代部分硅酸盐水