

Tezhong Shuini Yu  
Tezhong Hunningtu

# 特种水泥与 特种混凝土

李乃珍 谢敬坦 著

中国建材工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

特种水泥与特种混凝土/李乃珍, 谢敬坦著. —北京: 中国建材工业出版社, 2010.9  
ISBN 978-7-80227-829-5

I. ①特… II. ①李…②谢… III. ①特种水泥 ②特种混凝土 IV. ①TQ172.79②TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 149260 号

## 内 容 简 介

本书从材料组成、性能、机理及生产技术、工程应用多个角度, 主要介绍了硫铝酸盐系列特种水泥, 介绍了快硬高强、自应力、抗腐蚀及补偿收缩等特种混凝土, 介绍了硫铝酸盐水泥的多种衍生产品。其中, 有最新科研成果的介绍, 也有特种水泥相关专业的论述, 书末附有作者对中国水泥和混凝土科学宗师王涛、吴中伟的回忆文章。

本书可供水泥、混凝土及相关专业技术人员, 科研、设计工作者和大专院校师生参考。

## 特种水泥与特种混凝土

李乃珍 谢敬坦 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 25.5

字 数: 639 千字

版 次: 2010 年 9 月第 1 版

印 次: 2010 年 9 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-829-5

定 价: 55.00 元

---

本社网址: [www.jccbs.com.cn](http://www.jccbs.com.cn)

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010)88386906

# 序一

我国特种水泥与特种混凝土的研究和开发，始于20世纪50年代，由中国建筑材料科学研究院主导和完成，至今已达数十种之多，基本可满足不同工程的建设需要。

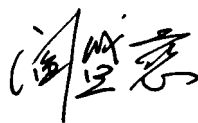
《特种水泥与特种混凝土》一书的主要内容是介绍硫铝酸盐水泥及其混凝土。硫铝酸盐水泥是20世纪70年代以王燕谋博士为主发明的，已有三十余年的生产史和应用史。正如王燕谋所预言的那样，“硫铝酸盐水泥的生产仍要发展，使用还要扩大，科学研究还要深入，在未来的岁月里，它必将有更大发展”。这一预言不断地被体现和证明，本书即为一例。

本书的主要作者李乃珍同志，年轻时供职中国建筑材料科学研究院十数年，受到浓厚的科学研究氛围的熏陶，曾得到院内科技先辈、名师和专家们的点拨，培养了科研素质，积累了科技经验。之后，进入特种水泥与水泥制品企业，历任技术副厂长和总工程师，带领其科技团队成员，发扬科技与生产实践相结合的精神，学习和发展前人的科技成果，勇于进取，努力使硫铝酸盐水泥新技术不断提高和完善，研发出多项特种水泥新型产品及其衍生产品，还注重开发特种水泥、膨胀剂及其混凝土的应用技术，结出了丰硕的果实。

本书有两个特色。第一，它是工厂工程师们的专门性著作，具有鲜明的务实观；作者站在特种水泥生产者的角度，小至生产工艺的一个环节，细至产品性能的一个侧面，对其进行了多方位的试验研究，言之有物，无空洞之感。第二，在阐述特种水泥生产技术、水泥性能和工程应用的同时，辟专节论述了其他著作中很少涉及的一些课题，如快硬水泥小时强度、抗风化性能、水泥配比设计有关率值、自应力水泥的安全性、抗海水水泥的高耐腐蚀性、补偿收缩混凝土的补偿效率计算等，有自己的研究结论和见解，对特种水泥、特种混凝土的生产、应用及科研设计工程师们，可资参考。

硫铝酸盐水泥系列，在制造过程中，需使用石膏作原料。目前，已有工厂利用化工副产品取代天然石膏配制生料，有的准备开展利用发电厂脱硫石膏代替天然石膏的研究。由于硫铝酸盐水泥采用低温煅烧，石膏替代了大量石灰石，可大大减少 $\text{CO}_2$ 的排放量，因此，发展特种水泥及其混凝土，尤其是发展硫铝酸盐水泥系列，是水泥工业实现低碳经济的重大举措之一。

在水泥工业控制总量、淘汰落后、调整结构、节能减排的关键时期，本书的出版，定能对上述方针的贯彻起到推动作用。需要指出，我国关于硫铝酸盐水泥及其混凝土的专著还很少，寥寥几本，这与硫铝酸盐水泥的发展形势不相适应，期望水泥与混凝土界同仁多做多写，在不远的将来，能有更多的新作问世，对促进特种水泥与特种混凝土的生产和应用技术进步做出应有的贡献。



2010.05.31

(阎盛慈教授，为中国建筑材料科学研究院原院长)

## 序二

在《特种水泥与特种混凝土》一书即将付梓之际，很乐意能为作者说几句话。

作者是河北省的工程师，在建材行业有较高的知名度。作为河北省科技顾问团成员，李乃珍同志曾写过建筑垃圾治理的文章，颇有见地，给我留下了深刻的印象。他早年在北京工作，1980年改革开放之初，石家庄市引进人才，调来石家庄，在一家国企长期担任总工程师职务。他植根于生产、科研第一线，主持过多项科研课题，卓有成就，曾获得省部级和国家级科技进步奖。1998年，荣获河北省最高的科技奖励——河北省省长特别奖，这是对他所做贡献的充分肯定。本书是他及其同事们所取得科技成果的结晶，内容翔实，数据丰富，有理论深度，有实际应用意义，深感是心血之作，我们有理由为之高兴。

作者热爱水泥事业，在企业深化改革中，较快地完成了角色转变。当国企改革、原所在企业已不再继续生产特种水泥时，作为将半生精力倾注于水泥专业的工程师们，面临科技生涯的又一次重大转折。乃珍同志不言放弃，不畏艰难，并作出了正确抉择。1999年，他带领一批原厂的技术骨干，创建了民营公司和研究所，使河北省及石家庄市拥有多年的特种水泥技术优势得以延续绵长。此举当即得到中国混凝土科学一代宗师吴中伟院士的热情支持，吴院士题词“科技创新争先进，改革开放换人间”，是对他们，也是对那一特殊时期许多处境相似的工程技术人才的激励。我当时在省政府主管科技工作，自然希望他们能够抓住机遇，谋取发展，应乃珍同志之托，题写了“功能建材，大有可为”，予以鼓励。直到最近，才知道他们不负众望，公司已办成河北省的高新技术企业。

本书反映了作者的科技人生，我以为有几点值得提倡。乃珍同志尊师敬长，从前言和附录文章中可以看到他对中国建筑材料科学研究院诸多专家的崇敬与感激之情；他尊重知识、尊重人才，不仅在他领办的研究所里形成了一个热爱科学、钻研技术的团队，而且相关行业、相邻技术领域的其他单位工程师们也乐于和他合作；他务实创新，有一种以科技为业的理想，有一种科技兴国的精神，十分注重将科研成果尽快转化为生产力。也正因为如此，才能一步一个脚印，不断进步。

细读本书，感到通俗易懂，文风淳朴，这在科技论文和科技专著中是不多见的，体现了作者知识面较宽和驾驭语言文字的功力。对于科技工作者来说，此点尤为可贵。

本书的出版，有益于建材工业的发展，必定对促进特种水泥和特种混凝土技术进步提供助力。祝愿作者们取得新的成绩。

刘健生

2010.06.06

(刘健生同志，曾任河北省副省长、河北省政协副主席)

# 前言

本书是一本关于特种水泥与特种混凝土的专门性著作，共分5篇，每一篇由若干章节组成，每一章是一个较宽范围的专业课题，每一节只论述其中一个小的专题，各节可独立成文，彼此之间又存在着专业技术上的内在关联。多数专著在写法上，一般都从头到尾叙述事物的全过程，比如水泥，从原燃材料写起，阐述理论，介绍产品性能与应用，有的还涉及生产装备、质量控制等诸多内容，前后连贯性强，能够让读者建立一个比较系统、完整的印象。本书在写作方法上，与其有所区别，主要表现是截取全过程的几个层面，专门论述，好处是可以避免容易和其他同类著作重复的一些共知性内容，而着力于加强对关键技术和重要观点的认识深度。将关键点联成一体，就是一个比较清晰的技术构架。对于不同需求的读者，有一个阅读的选择空间，特别适合于具有一定水泥及混凝土专业基础知识的读者。

本书的主旨内容是硫铝酸盐水泥及其混凝土。王燕谋、苏慕珍、张量在所著的《硫铝酸盐水泥》一书中指出，硫铝酸盐水泥的发明，实现了水泥理论、水泥生产、水泥性能及水泥应用四个方面的重大技术突破，形成了第三系列水泥，国内外的水泥科学家们赞誉它是21世纪的水泥。科学技术是第一生产力，硫铝酸盐水泥的发明，使我国诞生了一个新的特种水泥行业；它又催生了钙矾石类混凝土膨胀剂，进而诞生了混凝土膨胀剂行业。与此同步，硫铝酸盐水泥快硬混凝土、自应力混凝土、抗腐蚀混凝土及补偿收缩混凝土等特种混凝土技术得到长足发展。这些新产品、新技术，在本书中都能得到反映；尤其是现有同类著作中较少涉及的内容，本书则作为重点阐述。第一篇是硫铝酸盐快硬水泥及其快硬、高强混凝土，讨论了水泥配料理论及高强度等级水泥的生产技术；阐述了小时强度、抗折强度、凝结时间、抗风化性能及快硬混凝土配合比设计；介绍了当今市场上广为使用的主要衍生产品，如高强无收缩灌浆材料、锚固剂、混凝土道桥快速修补材料及用于煤矿安全生产的高水充填材料。第二篇是自应力硫铝酸盐水泥及其自应力混凝土，从既可避免后期爆管、又可避免前期爆管的角度出发，讨论了安全型自应力硫铝酸盐水泥理论及产品技术，阐述了自应力混凝土的膨胀性能，介绍了自应力混凝土压力管制造技术。第三篇是抗海水水泥及其高强、高耐腐蚀混凝土，阐述了该种水泥的耐腐蚀机理及混凝土性能，介绍了产品技术及耐腐蚀工程的应用。第四篇是膨胀剂及其补偿收缩混凝土，讨论了补偿收缩混凝土的抗裂理论、补偿效率及裂缝控制方法；阐述了膨胀剂的产品技术与品种发展，包括最新开发的温控型混凝土膨胀剂和全补偿型混凝土膨胀剂；比较全面地介绍了补偿收缩混凝土在多种类型工程的应用技术。第五篇介绍了其他特种水泥及相关专业技术，包括新型耐酸水泥、先进的仪器分析方法、小型窑磨设备管理技术、无声破碎剂的关键技术及环保治理。

本书各章节的选定，以其具有实际应用价值和是否符合技术发展方向为基准。其中，约三分之二的章节曾在国内专业技术杂志发表，如《水泥》、《混凝土》、《中国建材科技》、《混凝土与水泥制品》、《施工技术》、《建筑技术》、《建筑结构》、《特种结构》、《分析化学》、《膨胀剂与膨胀混凝土》、《商品混凝土》、《化工建设工程》、《山西建筑》、《中国建材》、《河北建材》等；约三分之一是新近撰写或首次公开的石家庄市太行特种水泥与防水工程研究所、阳

泉建材研究所的研究报告；也有在国际学术会议及中国硅酸盐学会专业会议上宣读的论文。在编辑方法上，按专业门类、产品类别进行了系统整理、编排；按现在的标准要求和通行做法，统一了各章节的写作格式、计量单位及图表符号，混凝土强度等级用  $C \times \times$  表示， $\times \times$  为阿拉伯数字，不用角标，例如 C50；抗渗等级用  $P_{\times \times}$  表示，阿拉伯数字用角标，例如  $P_{12}$ ；抗冻标号用  $D_{\times \times}$  表示，阿拉伯数字用角标，例如  $D_{150}$ ； $\epsilon_f$  表示自由膨胀率； $\epsilon_r$  表示限制膨胀率；水泥的强度等级采用现行的表示方法，例如原 400 号、425# 改称 42.5 级，余类推。对于早先发表过的论文，对有关观点和文字、数据进行了严格审查，作了必要的修改，删去了中英文摘要和无必要保留的文字。由于每一个章节都围绕一个科研课题或技术专题来写，每一项课（专）题都汇聚了众多工程师（含合作单位工程师）的研究成果和智慧，所以，有些章节是由多位作者共同完成的，在每一节末均予以注明。

本书的作者，可以视为是以李乃珍同志为代表的—个工程师群体，主要来自原石家庄市水泥制品厂、石家庄市特种水泥厂及石家庄市特种水泥设计研究所。李乃珍同志长期担任三个单位的总工程师，带领厂、所的科技队伍完成了多项省市级科研课题，并承担设计和工程技术服务工作，得以有条件能够组织大家完成本书的编撰。从—定角度而言，本书是工厂走科教兴国、科技创新之路的结晶。从 20 世纪 70 年代起，石家庄厂在市建材局局长田德奎领导下，得改革开放风气之先，和中国建筑材料科学研究院建立了合作关系。在建材研究院众多专家、教授的指导下，石家庄厂有幸成为我国硫铝酸盐水泥的发祥地，有幸成为我国 UEA 混凝土膨胀剂的发祥地，有幸成为我国水泥窑用磷酸盐结合铝质砖的发祥地，有幸在早期成为我国少有的自应力混凝土压力管生产厂家之一，有幸在特种水泥行业最先使用先进的同位素分析仪。实事求是地说，是中国建筑材料科学研究院的先进科技武装了石家庄厂，培育和造就了一支特种水泥专业科技队伍，使其在特种水泥及特种混凝土领域占有一席之地，能够在—个较长的历史时段内走在国内同行业的前列，成为国内外知名的特种水泥企业，曾与多个国家的水泥学者进行过技术交流，与国内多个同类工厂建有合作关系，因而，河北省及石家庄市具有发展特种水泥和特种混凝土的技术优势。后来，石家庄厂历经改制的波折，现已并入河北钢铁集团，原有的特种水泥生产设施业已拆除。对于仍然挚爱水泥事业的工程师们，只好作出新的选择。李乃珍、张志征、王保全等组建了民营体制的石家庄市功能建材有限公司，成立了石家庄市太行特种水泥与防水工程研究所；李广孝、李洪斌等人主石家庄市迅塔特种水泥有限公司，并引进了窑尾预热先进技术；胡培明、彭建中等以原阳泉特种水泥分厂为基础，已将其建成规模更大、面貌全新的阳泉天隆工程材料有限公司，并组建了阳泉建材研究所。大家继续发扬石家庄厂的优良传统，亲密合作，成为两省三地特种水泥行业的主力军。作者们实实在在地植根于生产第一线，是理论与生产相结合的践行者，切望与业界同仁交流，为促进特种水泥与特种混凝土的技术进步共同努力。考虑到目前国内该专业领域的著述较少，与特种水泥的大好形势不相适应，因此，将几十年的科研成果经总结、提炼而编撰成书。希望对同行业，对有关科研设计部门，对欲了解或使用特种水泥、特种水泥衍生产品（含膨胀剂）及特种混凝土的专业技术人员，能够提供—些有益的参考。

本书的主要合作者还有：胡培明、李广孝、彭建中、李洪斌、游宝坤、张志征、王保全、雷亚光、张立新、刘翠华、刘兰计等，全部合作者及其工作单位列于附录二。

在这里，我们向曾经给予原石家庄厂以指导、教诲的专家、教授们，致以诚挚的敬意。他们是中国建筑材料科学研究院的苏慕珍、曹永康、薛君珩、王幼云、游宝坤、吴万春、田

其暲、周继楠、任德和、张用宾、江之淦、张丕兴、刘宝元、武长发、赵顺增、陈鹤云、刘克忠、刘江宁、韩立林、崔琪、王益民、白友兆、刁江京，铁道科学研究院的李启棣、吴淑华、李怀素，北京建筑工程研究院的雷富恒，交通科学研究院的付智，煤炭科学研究院的屠丽南，北京市政工程研究院的许广存，中国矿业大学的侯朝炯、张连信，清华大学的阎培渝，济南大学的张柏寿、王惠中，华北市政设计研究院的宋光庭，河北省建材设计研究院的田然景、乔治芳，石家庄市建材研究所的曹坤元、徐和生、李恩江。

中国水泥工业的先驱者王涛先生，中国混凝土科学的一代宗师吴中伟院士，硫铝酸盐水泥发明者之一的邓君安教授，知名的水泥与耐火材料专家陆纯煊教授，水泥与水泥制品专家郑万廪和习国华教授，生前不辞辛劳，言传身教，他们的高尚品格永远值得我们学习。李书振、于计祥、赵振华三位同事，和我们并肩工作多年，可惜英年早逝；俞乃康（石家庄市二建总工程师）、黄伟良（保定市三建总工程师）两位先生，和我们共同开发补偿收缩混凝土工程应用技术，如今也已作古。编撰本书，可以说是学生对先师的一种回报，也是对同志和朋友的一种慰念。

为了发扬专家、师长严谨治学的作风，光大他们无私奉献的精神，让后来的科技工作者们能够从他们身上汲取力量，作者曾写过关于王涛先生、吴中伟院士、游宝坤教授的四篇回忆文章，现将其集结在一起，取名“导师与专家风范”，作为本书的附录一。

我们特别感谢河北省原副省长刘健生先生，特别感谢中国建筑材料科学研究院原院长阎盛慈教授，两位先生亲自伏案作序，使本书增色，体现了领导们对特种水泥事业和工厂科研工作的重视，给了我们莫大的鼓舞。在成书过程中，适逢中国混凝土与水泥制品协会特种水泥混凝土工程材料分会于2010年5月11日在郑州揭牌成立，硫铝酸盐及铝酸盐特种水泥界人士齐聚一堂，共议未来发展之前景，增强了我们努力把本书写好的信心，愿为特种水泥和特种混凝土事业尽微薄之力，并借以表达对老师、对领导、对朋友的感激之情。

在从事特种水泥及特种混凝土的开发研究中，原国家建材局局长王燕谋博士、副局长杨志元同志曾莅临指导，河北省及石家庄市科技厅（局）、经贸委、建材局给予了重要支持，原石家庄厂的领导高朝连、薛学、王礼干等同志多次协助解决实际困难。本书的编写与出版，得到中国建筑材料科学研究院原副院长曹永康、游宝坤和赵顺增三位教授的关怀，得到河北省科技厅原厅长赫威刚先生的鼓励，得到中国建材工业出版社陈永山先生的指教，得到阳泉天隆工程材料有限公司、石家庄市迅塔特种水泥有限公司及石家庄市功能建材有限公司的全力帮助。在此，表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中会存在一些缺陷、错误，敬请专家、同仁和读者批评、指正。

李乃珍 谢敬坦 2010年6月16日

# 目 录

## 第一篇 硫铝酸盐快硬水泥及其快硬、高强混凝土

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 快硬水泥配料技术及性能研究      | 2  |
| 第一节 硫铝酸盐水泥的配料计算方法及率值控制 | 2  |
| 第二节 快硬硫铝酸盐水泥的 6h 强度    | 11 |
| 第三节 快硬硫铝酸盐水泥的抗折强度特性    | 14 |
| 第四节 快硬硫铝酸盐水泥的调凝性能      | 19 |
| 第五节 硫铝酸盐水泥的抗风化性能       | 29 |
| 第二章 快硬水泥衍生产品及其应用       | 35 |
| 第一节 高强无收缩灌浆材料          | 35 |
| 第二节 锚固剂                | 37 |
| 第三节 混凝土道桥快速修补材料        | 39 |
| 第四节 高水充填材料的质量控制系统      | 43 |
| 第三章 快硬、高强混凝土           | 46 |
| 第一节 快硬硫铝酸盐水泥混凝土配合比设计   | 46 |
| 第二节 C90 钢纤维快硬混凝土       | 49 |
| 第三节 道桥快速修补混凝土的商品化      | 51 |
| 第四节 大流动性道桥快速修补混凝土的冬期施工 | 55 |
| 第五节 市区道路快速修补混凝土的大面积施工  | 58 |
| 第六节 水泥混凝土路面无阻碍交通快速修复技术 | 61 |

## 第二篇 自应力硫铝酸盐水泥及其自应力混凝土

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 自应力硫铝酸盐水泥及混凝土理论研究    | 66  |
| 第一节 自应力水泥的石膏反应系数与熟料的硅酸系数 | 66  |
| 第二节 自应力硫铝酸盐水泥及其混凝土的碱害    | 70  |
| 第三节 膨胀抑制剂的作用与机理          | 75  |
| 第四节 前期爆管研究               | 80  |
| 第二章 自应力硫铝酸盐水泥及混凝土性能      | 88  |
| 第一节 自应力硫铝酸盐水泥            | 88  |
| 第二节 安全型自应力硫铝酸盐水泥的研制与生产   | 114 |

|            |                            |     |
|------------|----------------------------|-----|
| 第三节        | 自应力硫铝酸盐水泥及其混凝土的膨胀稳定期 ..... | 116 |
| 第四节        | 配筋率对硫铝酸盐水泥混凝土自应力值的影响 ..... | 120 |
| <b>第三章</b> | <b>自应力混凝土压力管</b> .....     | 123 |
| 第一节        | 自应力硫铝酸盐水泥的制管适用性 .....      | 123 |
| 第二节        | 自应力混凝土管工艺定额及其技术参数 .....    | 127 |
| 第三节        | 用 UEA 制作自应力混凝土压力管 .....    | 132 |
| 第四节        | 用环氧树脂胶泥修补水泥电杆和压力管 .....    | 134 |

## 第三篇 抗海水水泥及其高强、高耐腐蚀混凝土

|            |                                 |     |
|------------|---------------------------------|-----|
| <b>第一章</b> | <b>抗海水水泥</b> .....              | 138 |
| 第一节        | 抗海水水泥的主要性能 .....                | 138 |
| 第二节        | 抗海水水泥的耐腐蚀性机理研究 .....            | 140 |
| <b>第二章</b> | <b>抗海水水泥混凝土</b> .....           | 148 |
| 第一节        | 抗海水水泥混凝土的主要性能 .....             | 148 |
| 第二节        | 高强、高耐腐蚀抗海水水泥混凝土 .....           | 155 |
| <b>第三章</b> | <b>抗海水水泥桩及海洋混凝土工程修补材料</b> ..... | 160 |
| 第一节        | 海洋混凝土工程快速与中速修补材料 .....          | 160 |
| 第二节        | 抗海水水泥深层搅拌桩与粉喷桩 .....            | 163 |

## 第四篇 膨胀剂及其补偿收缩混凝土

|            |                              |     |
|------------|------------------------------|-----|
| <b>第一章</b> | <b>补偿收缩混凝土的理论与性能研究</b> ..... | 168 |
| 第一节        | 广义的补偿收缩混凝土及补偿效率 .....        | 168 |
| 第二节        | “抗”“放”结合的补偿收缩混凝土防裂系统 .....   | 174 |
| 第三节        | 多学科结合, 实现裂缝控制 .....          | 176 |
| 第四节        | 混凝土耐久性值得关注的一个问题 .....        | 181 |
| 第五节        | 补偿收缩混凝土的结构设计 .....           | 186 |
| 第六节        | 补偿收缩混凝土的配合比设计 .....          | 191 |
| 第七节        | 补偿收缩混凝土限制膨胀率的主要影响因素 .....    | 199 |
| 第八节        | UEA 砂浆与混凝土的胀缩性能及长期强度 .....   | 203 |
| 第九节        | 混凝土膨胀剂与化学外加剂的适应性 .....       | 207 |
| 第十节        | 关于大体积补偿收缩混凝土的 DEF 现象 .....   | 211 |
| 第十一节       | 膨胀剂的颗粒级配 .....               | 217 |
| 第十二节       | 补偿收缩混凝土的相对膨胀落差与补偿效率 .....    | 224 |
| <b>第二章</b> | <b>膨胀剂品种的研究和发展</b> .....     | 231 |
| 第一节        | U 型混凝土膨胀剂 .....              | 231 |

|     |                               |     |
|-----|-------------------------------|-----|
| 第二节 | 高效 U 型混凝土膨胀剂 .....            | 234 |
| 第三节 | U 型混凝土膨胀剂生产技术的进展 .....        | 237 |
| 第四节 | FEA 分散性混凝土膨胀剂 .....           | 240 |
| 第五节 | 低坍损混凝土泵送剂及其复合膨胀剂 .....        | 241 |
| 第六节 | 全补偿型混凝土膨胀剂及其对高强混凝土干缩的补偿 ..... | 245 |
| 第七节 | 温控型混凝土膨胀剂 .....               | 250 |
| 第八节 | 防水、治水无机材料的开发 .....            | 255 |

**第三章 补偿收缩混凝土应用技术..... 259**

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 第一节   | 无缝施工技术的应用与规范化 .....               | 259 |
| 第二节   | 地下建筑的结构自防水 .....                  | 263 |
| 第三节   | UEA 在污水处理厂沉淀池与自来水厂清水池工程中的应用 ..... | 264 |
| 第四节   | 甬江水底隧道工程中 UEA 的应用 .....           | 267 |
| 第五节   | 高效 UEA 在十三陵蓄能电站工程中的应用 .....       | 270 |
| 第六节   | FEA 膨胀剂在大型水工结构中的应用 .....          | 272 |
| 第七节   | 郑州柿园水厂的自防水混凝土施工技术 .....           | 275 |
| 第八节   | 大型水池防裂抗渗的综合技术措施 .....             | 278 |
| 第九节   | 污水处理厂粗、细格栅防水混凝土施工 .....           | 280 |
| 第十节   | 石家庄文化广场的无缝施工技术 .....              | 282 |
| 第十一节  | 商品混凝土与无缝施工 .....                  | 286 |
| 第十二节  | 逆作法地下超长混凝土工程的抗裂防渗技术 .....         | 288 |
| 第十三节  | 无粘结预应力补偿收缩混凝土楼板施工 .....           | 291 |
| 第十四节  | 大体积结构混凝土工程的温差补偿效果 .....           | 293 |
| 第十五节  | 大面积抗裂混凝土薄板的施工技术 .....             | 302 |
| 第十六节  | 北国商城混凝土工程抗裂计算及 UEA 的应用 .....      | 304 |
| 第十七节  | 十堰市体育馆混凝土工程施工 .....               | 308 |
| 第十八节  | 高效 UEA 在广东建筑工程中的应用 .....          | 310 |
| 第十九节  | 补偿收缩混凝土在邯郸大型工程的应用 .....           | 314 |
| 第二十节  | 混凝土膨胀剂在化工与市政建设工程的应用 .....         | 317 |
| 第二十一节 | 膨胀剂在公路桥梁中的应用 .....                | 320 |
| 第二十二节 | 用膨胀剂制作刚性防水屋面与治理渗漏 .....           | 322 |

**第五篇 其他特种水泥及相关专业技术**

**第一章 其他特种水泥..... 326**

|     |                               |     |
|-----|-------------------------------|-----|
| 第一节 | 按英美标准生产 52.5 级抗硫酸盐硅酸盐水泥 ..... | 326 |
| 第二节 | 新型耐酸水泥及其应用 .....              | 331 |
| 第三节 | 白水泥磨产量提高的技术措施 .....           | 336 |
| 第四节 | 中小型回转窑筒体的开裂及对策 .....          | 339 |

第二章 分析测试..... 342

第一节 多元素分析仪在特种水泥分析中的应用 ..... 342

第二节 高铝类特种水泥及其原料中的钾、钠分析..... 347

第三节 光纤探头比色法测定水泥中的 SO<sub>3</sub> ..... 350

第四节 混凝土膨胀剂标准检验方法探讨 ..... 351

第五节 电杆蒸养混凝土强度的离心提高系数 ..... 357

第三章 相关专业技术..... 360

第一节 无声破碎剂的防喷技术 ..... 360

第二节 回转窑熟料掺加石灰石试验 ..... 364

第三节 立窑用磷酸盐砖系列砖型设计 ..... 367

第四节 水泥窑用轻质隔热砖的研制 ..... 372

第五节 建筑垃圾再生的技术途径..... 377

第六节 培育和发展建筑垃圾治理产业 ..... 380

附录一 导师与专家风范..... 384

(一) 感念王涛 ..... 384

(二) 听吴总讲学 ..... 386

(三) 永久的期盼 ..... 387

(四) 游宝坤与石家庄 ..... 388

附录二 合作者及工作单位 ..... 390

参考文献..... 393

# **第一篇 硫铝酸盐快 硬水泥及其快硬、 高强混凝土**

# 第一章 快硬水泥配料技术及性能研究

## 第一节 硫铝酸盐水泥的配料计算方法及率值控制

硫铝酸盐水泥属于特种水泥,被誉为 21 世纪的水泥,亦称为第三系列水泥,20 世纪 70 年代由中国建筑材料科学研究院研制成功,是我国水泥工业及水泥科学发展史上的重大成果。目前,我国约拥有近三十个硫铝酸盐水泥生产厂家。根据对多家工厂生产技术现状的调研,认为在产品品种与生产技术获得长足进展的同时,还存在一些需要深化认识和认真解决的问题。例如,对生产快硬、自应力不同的各品种水泥的熟料不加区分,对煅烧过程中因石膏还原分解导致部分  $\text{SO}_3$  挥发缺乏控制尺度,使用的碱度系数公式与实际偏差较大,自应力水泥生产技术未熟练掌握而导致前期或后期爆管事故,62.5MPa 高强度等级快硬水泥不能如愿生产,等等。有鉴于此,从熟料入手,提出了比较科学合理的配料计算方法及有关率值控制指标,并以 62.5MPa 级快硬水泥和安全型自应力硫铝酸盐水泥两种熟料为例,演示了配料计算的全过程。

### 1 碱度系数计算公式的演变及选择

碱度系数  $C_m$  是硫(铁)铝酸盐水泥生料熟料首要的控制率值,作用类似于硅酸盐水泥熟料的饱和比  $KH$ 。自该水泥问世以来,出现和使用不同的碱度系数计算公式。

该水泥研制之初,使用式(1),当时的情况是熟料中铁相较低,铁相组成按  $C_2F$  计算,延用时间有十余年。

$$C_m = \frac{C - 0.7(\bar{S} + F + T)}{1.87S + 0.55A} \quad (1)$$

后来,铁铝酸盐水泥研制成功,铁相组成也大体可以确定,按  $C_4AF$  计算,  $C_m$  计算公式改为式(2),不少生产厂至今仍在使用。

$$C_m = \frac{C - 0.7T}{0.73(A - 0.64F) + 1.4F + 1.87S} \quad (2)$$

式(2)适用的一个假定条件是熟料中无剩余石膏,也不缺少石膏,即  $f\text{-CaSO}_4 = 0$ ;如果不是这种情况,计算结果则与实际状态存在较明显的偏差。因此,导出式(3):

$$C_m = \frac{C - 0.7(T + \bar{S})}{0.55(A - 0.64F) + 1.4F + 1.87S} \quad (3)$$

上述三个公式中的  $C$ 、 $S$ 、 $A$ 、 $F$ 、 $\bar{S}$  分别表示  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  及其量值。

以不同组成的熟料为例,按三个公式分别计算各熟料的  $C_m$  及铝硫比  $A/\bar{S}$ ,比较计算结果的差别。使用式(2)与式(3)时,铝硫比的计算公式为:

$$A/\bar{S} = \frac{A - 0.64F}{\bar{S}} \quad (4)$$

表 1 列出了 6 个不同组成的熟料,表 2 列出了利用各公式计算得到的  $C_m$  与  $A/\bar{S}$ ,  $\Delta$  分

别表示式 (2) 或式 (3) 与用式 (1) 计算结果的差值。可以看出, 使用式 (2), 在  $A/\bar{S}$  正常范围内,  $C_m$  值比式 (1) 结果高; 当  $A/\bar{S} > 3.82$  时, 则产生负偏差, 有的达到 0.04 的较高值, 显然, 这是忽略  $f\text{-CaSO}_4$  因素造成的, 容易影响对熟料状态的判断。式 (3) 考虑了  $f\text{-CaSO}_4$  的影响, 用它计算的  $C_m$  值和式 (1) 相比, 均呈现负偏差, 呈规律性变化, 对于一个连续生产的工厂, 由式 (1) 转变为式 (3), 有利于质量控制, 符合实际、也比较合理, 而且, 考虑到  $F$  与  $A$  的结合, 适用于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量较高的配料方案。

表 1 熟料的化学成分 (%)

| No. | $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{SO}_3$ |
|-----|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|---------------|
| 01  | 9.58           | 3.39                    | 1.44           | 31.93                   | 43.55        | 0.95         | 9.95          |
| 02  | 7.42           | 1.86                    | 1.16           | 32.88                   | 43.96        | 0.67         | 10.69         |
| 03  | 4.32           | 3.03                    | 2.17           | 38.84                   | 40.48        | 1.36         | 9.24          |
| 04  | 7.83           | 2.71                    | 1.03           | 32.57                   | 42.89        | 0.85         | 11.26         |
| 05  | 10.66          | 2.81                    | 1.44           | 34.30                   | 43.33        | 1.24         | 6.17          |
| 06  | 6.72           | 1.82                    | 1.66           | 35.91                   | 41.46        | 1.68         | 10.52         |

表 2 不同计算公式得到的各熟料  $C_m$  值

| No. | $C_m$ |       |          |       |          | $A/\bar{S}$ |       |          |       |
|-----|-------|-------|----------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------|
|     | 式 (1) | 式 (2) | $\Delta$ | 式 (3) | $\Delta$ | 式 (1)       | 式 (2) | $\Delta$ | 式 (3) |
| 1   | 0.936 | 0.958 | +0.018   | 0.912 | -0.024   | 3.209       | 2.991 | 0.218    | 2.991 |
| 2   | 1.075 | 1.077 | +0.002   | 1.052 | -0.023   | 3.076       | 2.964 | 0.112    | 2.964 |
| 3   | 1.032 | 0.992 | -0.040   | 0.996 | -0.036   | 4.203       | 3.994 | 0.029    | 3.994 |
| 4   | 0.995 | 1.030 | +0.035   | 0.969 | -0.026   | 2.893       | 2.739 | -0.154   | 2.739 |
| 5   | 0.929 | 0.889 | -0.040   | 0.910 | -0.016   | 5.559       | 5.268 | -0.271   | 5.268 |
| 6   | 0.980 | 0.996 | +0.016   | 0.962 | -0.018   | 3.413       | 3.303 | -0.110   | 3.303 |

## 2 熟料的率值控制

### 2.1 碱度系数的技术意义

$$C_m = \frac{C - 0.7(T + \bar{S})}{0.55(A - 0.64F) + 1.4F + 1.87S}$$

式中  $0.7T$ ——表示  $\text{TiO}_2$  形成 CT 消耗的  $\text{CaO}$  量;

$0.7\bar{S}$ ——表示  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  中含有的  $\text{CaSO}_4$  及剩余的  $f\text{-CaSO}_4$  中的  $\text{CaO}$  量;

$(A - 0.64F)$ ——表示除  $\text{C}_4\text{AF}$  中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  以外剩余的可形成  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  量;

0.55——是  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  中除  $\text{CaSO}_4$  外所占有的  $\text{CaO}$  量计算系数;

$1.4F$ ——表示  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  形成  $\text{C}_4\text{AF}$  需要的  $\text{CaO}$  量;

$1.87S$ ——表示  $\text{SiO}_2$  形成  $\text{C}_2\text{S}$  需要的  $\text{CaO}$  量。

分子的意义是: 扣除 CT 及  $\text{CaSO}_4$  所用量后剩余的、可供  $A$ 、 $F$ 、 $S$  酸性氧化物形成目的矿物的  $\text{CaO}$  最大量;

分母的意义是:  $A$ 、 $F$ 、 $S$  形成目的矿物实际消耗的  $\text{CaO}$  量。

直观说来,  $C_m$  的意义是存在的  $\text{CaO}$  量占目的矿物实际需要  $\text{CaO}$  量的百分比, 当  $C_m > 1$  时, 表示  $\text{CaO}$  富余,  $f\text{-CaO} > 0$ ; 当  $C_m < 1$  时, 表示  $\text{CaO}$  不足以供给  $A$ 、 $F$ 、 $S$  全部形成目

的矿物； $C_m=1$  则是完美的理想状态。

## 2.2 铝硫比

$$A/\bar{S} = \frac{A - 0.64F}{\bar{S}}$$

意义是衡量  $\text{SO}_3$ （即  $\text{CaSO}_4$ ）对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  形成  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  目的矿物的满足程度，理论值为 3.82；当  $A/\bar{S} < 3.82$  时，表示  $\text{CaSO}_4$  充分满足并有剩余， $f\text{-CaSO}_4 > 0$ ；当  $A/\bar{S} > 3.82$  时，表示  $\text{CaSO}_4$  供应量不足，会有部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  形成其他铝酸盐矿物。

## 2.3 铝硅比

$A/S$  表示  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  之比值，目的是调节熟料  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  与  $\text{C}_2\bar{\text{S}}$  的含量关系，一般是根据生产水泥品种的区别进行原料质量控制，不直接用于配料计算。自应力硫铝酸盐熟料应控制  $\text{C}_2\bar{\text{S}}$  与  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$  的摩尔比，按式（5）计算。

$$m = \frac{M_{\text{C}_2\bar{\text{S}}}}{M_{\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}}} = 5.10S/A \quad (5)$$

$m$  值宜为 1~3.0。

## 2.4 $\text{SO}_3$ 挥发率

$$V = \frac{\bar{S}_{\text{干}} - \bar{S}_{\text{熟}}}{\bar{S}_{\text{干}}} \times 100 \quad (6)$$

式中  $\bar{S}_{\text{干}}$ ——表示干基生料的  $\text{SO}_3$  含量；

$\bar{S}_{\text{熟}}$ ——表示上述干基生料煅烧成熟料后的实际  $\text{SO}_3$  含量；

$V$ ——表示煅烧过程中  $\text{SO}_3$  的损失量，%。

该值直接用于生料配料计算，而且随烧成工艺条件的变化而变化，生产厂需跟踪、总结、修改。有的生产线  $V$  值为 15%~20%，有的高达 50%~60%；该值不准确时，严重影响  $C_m$  设计的准确程度和熟料质量，应尽可能设法降低  $V$  值，并力求配料计算与实际一致，它也是与硅酸盐水泥配料的一个标志性区别。

## 2.5 率值控制

不同水泥熟料的率值控制指标列于表 3。应注意，当熟料中出现下列情况之一时（包括： $C_m < 0.90$  或  $C_m > 1.0$ ； $\text{Al}_2\text{O}_3 > 32\%$ ； $\text{R}_2\text{O} > 0.50\%$ ； $\text{SiO}_2 < 8\%$ ； $A/\bar{S} > 3.82$  六种情况），均不宜用于磨制自应力硫铝酸盐水泥，或者应采取特别的技术措施。

表 3 不同水泥熟料的率值控制

| No.         | 低碱度水泥           | 安全型自应力水泥        | 快硬水泥            | 高强熟料粉           |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $C_m$       | $0.94 \pm 0.02$ | $0.96 \pm 0.02$ | $0.98 \pm 0.02$ | $1.02 \pm 0.02$ |
| $A/\bar{S}$ | $3.30 \pm 0.30$ | $3.30 \pm 0.30$ | $3.60 \pm 0.30$ | $3.90 \pm 0.30$ |
| $A/S$       | 3~4             | 2.5~3.5         | 4~6             | 5~8             |

## 3 熟料的矿物组成与计算

硅酸盐水泥熟料的主要矿物是  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{C}_4\text{AF}$ ，该系列的特种水泥，如抗硫酸盐水泥、油井水泥、快硬硅酸盐水泥等，首先是通过调整上述主矿物的含量范围来实现的，同时对少量辅助成分加以控制。

硫铝酸盐水泥熟料的主要矿物则是  $C_4A_3\bar{S}$  和  $C_2S$ , 当  $Fe_2O_3$  含量较高时, 铁相也被视为主要矿物。该系列中的快硬水泥、自应力水泥、膨胀水泥、低碱度水泥以及高强熟料粉, 以往在它们使用的熟料矿物控制方面的界限不甚分明, 在一定程度上是处于摸索前进状态, 因而, 容易出现质量事故。

近十余年的研究表明, 应该区分不同水泥对熟料的不同要求, 正确地控制熟料率值, 使熟料的矿物组成处于一定的范围, 是保证水泥产品性能的首要条件。

### 3.1 矿物种类

在下列矿物中,  $C_4A_3\bar{S}$ 、 $C_2S$  为主要矿物, 铁相在含量较高时, 也作为主要矿物对待。 $f-CaSO_4$  与  $f-CaO$  是配比设计中有意残留或生成的矿物。钙钛矿与方镁石对水泥性能不作贡献。其他少量矿物则不希望生成。

#### ① 无水硫铝酸钙

化学式为  $3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$ , 简写为  $C_4A_3\bar{S}$ 。在提供水泥强度方面, 它和硅酸盐水泥的  $C_3S$  作用类同, 区别在于它同时是提供水泥膨胀的矿物。

#### ② 硅酸二钙

化学式为  $2CaO \cdot SiO_2$ , 简写为  $C_2S$ 。它与  $C_4A_3\bar{S}$  在提供水泥强度与膨胀方面存在着一种内在的协调关系。

#### ③ 铁相

硫铝酸盐水泥熟料的  $Fe_2O_3$  含量一般为 2% 左右, 形成的铁相成分接近  $C_4AF$ ; 当  $Fe_2O_3$  含量增至 3.5% 以上时, 形成的铁相接近  $C_6A_2F$ , 该矿物的含量升至 15%~35% 时, 成为主要矿物之一, 这时熟料常被称为高铁硫铝酸盐熟料或铁铝酸盐水泥熟料。为了兼顾硫铝和高铁硫铝熟料的配制需要, 在设计中将铁相视为  $C_4AF$ 。

#### ④ 游离石膏

化学式  $f-CaSO_4$ , 简写为  $f-C\bar{S}$ 。生料中配入足够的二水石膏或硬石膏, 是使  $Al_2O_3$  全部形成  $C_4A_3\bar{S}$  而不形成其他铝酸盐矿物的必要条件。自应力水泥熟料要求有一定量的  $f-C\bar{S}$  存在, 高强熟料粉则允许  $f-C\bar{S}$  为负值。

#### ⑤ 游离石灰

熟料的碱度系数  $C_m > 0$  时, 会有  $f-CaO$  存在, 对水泥凝结时间和水化液 pH 值有一定影响。自应力水泥、低碱度水泥熟料不允许  $f-CaO$  存在, 高强熟料粉则允许有少量存在。

#### ⑥ 七铝酸十二钙

化学式  $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ , 简写为  $C_{12}A_7$ 。在水泥中视为非正常矿物, 一是会削弱  $Al_2O_3$  的有效利用, 二是会导致水泥急凝。

#### ⑦ 钙黄长石

化学式  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , 简写为  $C_2AS$ 。属非正常矿物, 是熟料形成过程的过渡相, 当煅烧温度过低或石膏配入量不足时会残留在熟料中, 应视为有害矿物。其占据了一部分  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$ , 对水泥性能无贡献。

#### ⑧ 硫硅酸钙

化学式  $4CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaSO_4$ , 简写为  $C_4S_2 \cdot C\bar{S}$ 。非正常矿物, 熟料形成过程的过渡相, 当烧成温度高于 1250℃ 时消失。

#### ⑨ 钙钛矿

化学式  $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ，简写为 CT。无效矿物。

#### ⑩ 方镁石

熟料中的  $\text{MgO}$  含量一般为 1% 左右，无效矿物。

### 3.2 熟料的矿物组成计算

计算硅酸盐熟料的主要矿物组成时，KH 可直接用于公式；硫铝酸盐熟料的  $C_m$  则不能直接用于矿物组成的计算公式，而是在确定的  $C_m$  或  $A/\bar{S}$  的一定范围内，用化学成分计算矿物含量。

① 当  $A/\bar{S} \leq 3.82$  时，

$$C_4A_3\bar{S} = 1.995 (A - 0.64F) = 2 (A - 0.64F)$$

$$C_2S = 2.87S$$

$$C_4AF = 3.04F$$

$$CT = 1.7T$$

$$f\text{-CaSO}_4 = 1.7\bar{S} - 0.44A$$

② 当  $A/\bar{S} > 3.82$  时

$$C_4A_3\bar{S} = 7.625\bar{S}$$

$$C_2S = 2.87 (S - 0.35C_2AS)$$

$$C_2AS = 2.69 (A - 3.82\bar{S})$$

③ 当  $C_m > 1.0$  时

$$f\text{-CaO} = C - 0.55(A - 0.64F) - 1.87S - 1.4F - 0.7(T + \bar{S})$$

## 4 配料计算过程及举例

### 4.1 原材料

生产 52.5MPa 级以上的快硬水泥及高强熟料粉，需保证形成较多的  $C_4A_3\bar{S}$  矿物，达 70% 左右的水平； $C_m$  值较高，以保证早期强度；应采用优质铝矾土、石灰石、石膏及煤；生产自应力和低碱度水泥时，原料级别可适当放宽。配制生料可以使用二水石膏、硬石膏。

在一定情况下，原材料可使用成分相近的取代物。如石膏，可利用化工厂副产品（含 P 石膏、含 F 石膏）；在工艺条件允许时，也可使用电厂的脱硫石膏。

### 4.2 62.5MPa 级快硬水泥配料

#### ① 原料化学成分

列出原料化学成分，如表 4 所示。

表 4 原料的化学成分

(%)

| No. | Loss  | $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | CaO   | MgO  | $\text{SO}_3$ |
|-----|-------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------|------|---------------|
| 矾土  | 14.31 | 5.97           | 3.98                    | 2.35           | 71.53                   | 0.48  | 1.38 |               |
| 石灰石 | 43.33 | 0.45           | 0.09                    |                | 0.44                    | 55.41 | 0.28 |               |
| 石膏  | 18.62 | 6.26           |                         |                | 0.99                    | 31.42 | 1.91 | 39.83         |

#### ② 干基原料及煤的灰分化学成分

列出干基原料及煤的灰分化学成分，如表 5 所示。