

# 天然沸石混凝土 应用技术

---

冯乃谦 编著

● 混凝土现代技术丛书

中国铁道出版社

混凝土现代技术丛书

# 天然沸石混凝土应用技术

冯乃谦 编著



中 国 铁 道 出 版 社

1996年·北京

**(京) 新登字 063 号**

**图书在版编目 (CIP) 数据**

天然沸石混凝土应用技术/冯乃谦著. —北京: 中国铁道出版社, 1996

(混凝土现代技术丛书)

ISBN 7-113-02371-1

I. 天… II. 冯… III. 沸石, 天然-混凝土-应用-新技术  
IV. TU528.56

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 1649 号

混凝土现代技术丛书  
**天然沸石混凝土应用技术**  
冯乃谦 编著

\*

中国铁道出版社出版发行  
(北京市宣武区南菜园街甲 7 号)  
责任编辑 安鸿远 封面设计  
各地新华书店经售  
北京市燕山联营印刷厂

---

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张: 10.3

1996 年 12 月 第 1 版

印数: 1—3000

---

ISBN7-113-02371-1/TU

# 序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料，广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界水泥年产量已达 13 亿吨左右，可制作混凝土 30 亿  $\text{m}^3$  以上，所以混凝土不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

现在，我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进，形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土现代科学技术，分期分批出版专册（著）。

中国铁道出版社自组织《混凝土现代技术丛书》以来，已出版了《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《碾压混凝土》，《硫铝酸盐水泥混凝土的特性及应用》，《硅粉混凝土及其应用》，《自应力钢筋混凝土管》，《混凝土养护节能技术》，《真空混凝土工艺及设备》，《混凝土力学性能测定》，《数理统计在混凝土试验中的应用》，《混凝土的徐变》，《混凝土的收缩》，《混凝土力学》等 15 种。为完善此丛书，拟于近期组织出版的有《天然沸石混凝土应用技术》，《轻集料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高性能

混凝土》，《防腐蚀混凝土》，《纤维增强水泥复合材料》，《大体积混凝土》，《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬期施工》，《混凝土快速硬化》，《混凝土质量非破损检验技术》，《混凝土材料科学》，《混凝土的耐久性》，《混凝土碱-骨料反应》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进步很快，混凝土工程数量庞大，混凝土结构构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高性能混凝土、高效外加剂、商品混凝土等与先进国家相比还有较大差距，混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，更应立即加以重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还不高，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，以保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国混凝土科研与生产经验的积累，本丛书拟在新品种与特种混凝土，新工艺、新设备，性能与测试技术，应用理论等方面继续扩大选题范围。希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九九六年五月

# “混凝土现代技术丛书”

## 编委会名单

顾问：黄蕴元

主任委员：吴中伟

副主任委员：姚明初

编委会委员（以姓氏笔划为序）：

冯乃谦 吴中伟 沈旦申

洪定海 姚明初 龚洛书

蒋家奋 甄永严 蔡正咏

## 序 言

天然沸石是建筑材料工业新的矿产资源。清华大学土木工程系建材教研室自从1978年我国发现浙江缙云沸石矿以来,在近20年中,坚持不懈地对开发与推广应用天然沸石进行研究,取得了丰硕的成果。其中,通过省部级鉴定成果13项;获国家级、省部级奖励14项;国内外发表论文100篇以上;培养了硕士生、博士生及国内外访问学者10多名;国内外学术交流10余次。在研究、开发、应用天然沸石方面,取得了很大的社会效益与技术经济效益。

1990年北京地铁折返线复兴门车站混凝土工程,采用载体流化剂,首次成功地泵送60MPa、20~22cm坍落度、2.0h无坍落度损失的商品混凝土;1986年中建二局在深圳,首次在大流动性普通混凝土中掺加沸石粉,解决拌合物的泌水、离析与分层,泵送施工了近100m<sup>3</sup>混凝土;清华大学与张家口市在1980年就首次盖起了沸石新材料住宅试验楼,综合采用沸石水泥钢筋混凝土框架,沸石陶粒混凝土外墙板与楼板,沸石载气体多孔混凝土内隔墙板,均取得成功。。为了更有效、更大规模地将我国的天然沸石应用于水泥混凝土中,建设部还委托清华大学编制了天然沸石粉在水泥混凝土及砂浆中的应用技术标准,该送审稿经专家评议为国际先进水平。

清华大学在天然沸石的研究成果,获得国际上的大量检索与引用。EI检索文章5篇、ISI 4篇;CA检索专利一项,WPI检索专利一项。美国F. A. Mumpton教授引用了“天然沸石抑制碱-骨料反应”及“天然沸石粉对混凝土增强效应”的成果;意大利拿破仑大学的Michel Pansini教授引用了“天然沸

石抑制碱-骨料反应的研究”成果；香港理工大学陈延年博士引用了载体流化剂的成果，并邀请冯乃谦教授共同指导博士生；S. L. Sarkar 主编出版的“Mineral Admixtures in Cement and Concrete”一书中，引用了冯乃谦写的“The Properties of Zeolite Mineral Admixture Concrete”全文共 50 多页。S. L. Sarkar 认为：“天然沸石在混凝土中的应用，中国走在前面。”

中国铁道出版社即将出版的《天然沸石混凝土应用技术》（冯乃谦编著）一书，是清华大学在天然沸石研究、开发与应用方面的全面系统的总结，是我国乃至国际上当前天然沸石开发应用的最新成果，具有实用性与先进性。该书的出版将给读者提供许多在天然沸石方面的高科技成果与新的信息，会进一步推动我国天然沸石的开发与应用，带来更大的社会效益与经济效益。

中国工程院院士 吴中伟



# 前 言

天然沸石是建筑材料新的矿产资源。我国的 21 个省、自治区有天然沸石矿点 120 多处，而且都是露天矿床，便于开采。据文献记载，1912 年美国在洛杉矶修建渡槽时，曾使用了凝灰岩为掺合料，但直至 50 年代才知道当时所用的混合材是一种天然沸石。我国从 1978 年 3 月，由中国科学院地质研究所与清华大学土木系合作，开展利用天然沸石为水泥掺合料的研究以来，现在我国每年开发应用天然沸石大约有 5000~6000 万吨，用于生产水泥普通混凝土、高性能混凝土、建筑砂浆、流化剂载体，以及抑制水泥混凝土碱-骨料反应的添加剂等。本书是作者 10 多年研究工作的总结，汇集了我 国天然沸石应用于水泥混凝土方面的高新技术与新成就。正如 S. L. Sarkar 指出的，中国在这方面走在世界的最前面。

王瑞、张淑清、廉慧珍、郭玉顺、张玉蓉等也参加了部分研究工作；在整个研究过程中，得到了吴中伟先生的指导。对此表示衷心感谢。

1979 年，国家教委下达清华大学土木系天然沸石应用研究的重大课题；其后，建设部、国家建材局及北京市建材局也给予了很大的支持。中国建筑总公司、张家口地区科委在长期的合作中，对天然沸石的开发与应用，起了很大的推动作用。日本的大和房屋公司、久保田公司等，也在海外伸出了友谊之手，为本课题提供了技术上和财力上的支援。这一切，都使本课题的研究者得到了鼓舞、信心和力量。

天然沸石在水泥混凝土中的应用，具有独特的性能，如化学成分中的高硅及高的活性硅、活性铝的含量，离子交换

的性能，内比表面积很大的性能，自由脱附沸石水的性能，载气的性能等等。利用天然沸石作为水泥掺合料，可以有效地解决水泥的安定性不良；利用沸石粉为混凝土掺合料，通过离子交换，可以抑制碱-骨料反应；通过脱除沸石中的自由水，沸石粉作为载气体可以配制多孔混凝土；在低水灰比的混凝土中，掺入部分超细沸石粉代替相应的水泥，可获得高强度、高性能混凝土；沸石陶粒是当前人造轻骨料的优良新品种，超轻的沸石陶粒混凝土可浮于水上，高强度陶粒混凝土的抗压强度超过 50MPa……。将天然沸石的各种特性，合理的应用于水泥混凝土中，发挥其最大的技术效果，以取得最大的经济效益，是本书的最大特点。

本书是 1978 年以来，作者对沸石开发应用的科研成果，可作为乡镇企业开发新型建筑材料的参考；也可以作为工程技术人员、科研人员的参考书。为了便于参考，还附录了中华人民共和国行业标准：天然沸石粉在混凝土与砂浆中应用技术规程（报批稿）。参与该规程评审的专家一致认为，此标准具有实用性、先进性与科学性，为国际先进水平。这是在归口单位的指导与帮助下，参编单位共同努力的结果。

作者水平有限，难免有疏漏和错误之处，望读者批评指正。

作者

1986 年 3 月

# 目 录

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| <b>第一章 天然沸石</b> .....              | (1)  |
| 第一节 我国的天然沸石资源.....                 | (2)  |
| 第二节 斜发沸石与丝光沸石的矿物特征.....            | (4)  |
| 第三节 沸石的矿物特性.....                   | (7)  |
| 第四节 沸石的晶体构造 .....                  | (10) |
| 第五节 沸石的化学反应活性 .....                | (11) |
| 第六节 天然沸石应用综述 .....                 | (18) |
| <b>第二章 沸石水泥</b> .....              | (24) |
| 第一节 天然沸石作为水泥掺合料的研究<br>的历史与发展 ..... | (24) |
| 第二节 沸石水泥的强度试验 .....                | (25) |
| 第三节 沸石水泥的一些物理性能 .....              | (42) |
| 第四节 天然沸石在水泥中的作用机理 .....            | (46) |
| <b>第三章 沸石普通混凝土</b> .....           | (56) |
| 第一节 沸石普通混凝土拌合物的性能 .....            | (56) |
| 第二节 沸石普通混凝土硬化后的性能 .....            | (60) |
| 第三节 沸石混凝土的配合比 .....                | (64) |
| 第四节 沸石混凝土的施工应用 .....               | (66) |
| <b>第四章 沸石高性能混凝土</b> .....          | (69) |
| 第一节 组成材料与强度的关系 .....               | (69) |
| 第二节 沸石高性能混凝土配合比参数的<br>选择 .....     | (79) |
| 第三节 沸石高性能混凝土的力学性能 .....            | (83) |
| 第四节 沸石高性能混凝土的耐久性 .....             | (86) |

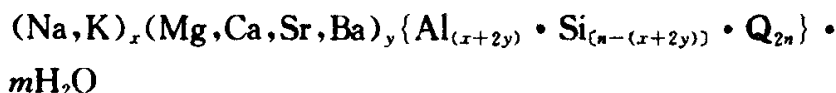
|            |                                 |              |
|------------|---------------------------------|--------------|
| 第五节        | 沸石高性能混凝土的微结构 .....              | (91)         |
| 第六节        | 沸石高性能混凝土的施工应用 .....             | (101)        |
| <b>第五章</b> | <b>天然沸石抑制碱-骨料反应及其机理 .....</b>   | <b>(104)</b> |
| 第一节        | 原材料的物化性能、试验方法<br>及标准 .....      | (105)        |
| 第二节        | 试验项目与结果讨论 .....                 | (110)        |
| 第三节        | 天然沸石对碱-骨料反应的抑制<br>机理 .....      | (125)        |
| 第四节        | 结论 .....                        | (136)        |
| <b>第六章</b> | <b>天然沸石的流化剂载体效应 .....</b>       | <b>(138)</b> |
| 第一节        | 坍落度损失与恢复的模型 .....               | (138)        |
| 第二节        | 载体流化剂的研制 .....                  | (142)        |
| 第三节        | 高强度、高流态混凝土及其坍落度损<br>失控制试验 ..... | (144)        |
| 第四节        | 载体流化剂的作用机理 .....                | (146)        |
| 第五节        | 施工应用 .....                      | (152)        |
| 第六节        | 结论 .....                        | (155)        |
| <b>第七章</b> | <b>天然沸石气体载体多孔混凝土 .....</b>      | <b>(156)</b> |
| 第一节        | 概述 .....                        | (156)        |
| 第二节        | 多孔混凝土用的气体载体天然沸石<br>岩的特性 .....   | (158)        |
| 第三节        | 天然沸石的载气规律 .....                 | (170)        |
| 第四节        | 天然沸石载气体的基本原理 .....              | (179)        |
| 第五节        | 气体载体多孔混凝土的研制 .....              | (180)        |
| 第六节        | 不同胶结料的载气体多孔混凝土的强<br>度与容重 .....  | (183)        |
| 第七节        | 天然沸石载气体多孔混凝土的收                  |              |

|            |                                   |              |
|------------|-----------------------------------|--------------|
|            | 缩与冻融·····                         | (190)        |
| 第八节        | 天然沸石载气体多孔混凝土的结<br>构特点·····        | (197)        |
| 第九节        | 沸石载气体多孔混凝土内隔墙板<br>的生产与应用·····     | (205)        |
| <b>第八章</b> | <b>天然沸石载气体多孔轻骨料混凝土·····</b>       | <b>(207)</b> |
| 第一节        | 试验用原材料及试验方案·····                  | (207)        |
| 第二节        | 天然沸石载气体多孔轻骨料混凝<br>土的收缩及其内部结构····· | (217)        |
| 第三节        | 提高沸石载气体多孔轻骨料混凝<br>土强度的试验·····     | (221)        |
| 第四节        | 水泥胶结料载体多孔轻骨料混凝<br>土的性能·····       | (230)        |
| <b>第九章</b> | <b>天然沸石人造轻骨料(陶粒)·····</b>         | <b>(237)</b> |
| 第一节        | 原材料的物理化学性质·····                   | (237)        |
| 第二节        | 天然沸石的加热温度与体积变化<br>的关系·····        | (239)        |
| 第三节        | 天然沸石高温加热膨胀机理·····                 | (244)        |
| 第四节        | 化学外加剂降低烧成温度·····                  | (247)        |
| 第五节        | 天然沸石陶粒生产烧成过程的粘结<br>及其解决·····      | (252)        |
| 第六节        | 人造超轻骨料的试制·····                    | (254)        |
| 第七节        | 天然沸石陶粒(膨胀沸石岩)的<br>物理力学特性·····     | (265)        |
| 第八节        | 沸石超轻陶粒的性质·····                    | (269)        |
| <b>第十章</b> | <b>沸石陶粒混凝土及其应用·····</b>           | <b>(274)</b> |
| 第一节        | 陶粒与水泥砂浆的界面结构·····                 | (274)        |

|      |                                   |       |
|------|-----------------------------------|-------|
| 第二节  | 沸石陶粒混凝土及与其他混凝土的<br>比较·····        | (276) |
| 第三节  | 沸石陶粒混凝土的结构特点与强度·····              | (281) |
| 第四节  | 沸石陶粒混凝土应用方面的研究·····               | (288) |
| 附录   | 中华人民共和国行业标准·····                  | (294) |
|      | 天然沸石粉在混凝土与砂浆中应用<br>技术规程（报批稿）····· | (294) |
| 参考文献 | ·····                             | (312) |

## 第一章 天然沸石

天然沸石的主要造岩矿物是沸石。沸石是一族架状构造的含水铝硅酸盐矿物。主要含 Na 和 Ca 及少数的 Sr、Ba、K、Mg 等金属离子。其 Si/Al 比（除钙沸石外）和阳离子（除方沸石外）都是变值。沸石的化学组成，通常用下式来表示。



式中，Al 的个数等于阳离子的总价数；O 的个数为 Al 和 Si 总数的 2 倍。

目前，世界上已发现的沸石种类有 36 种，其中常见且有用的有：斜发沸石、丝光沸石、菱沸石以及毛沸石等数种。我国以斜发沸石、丝光沸石居多。

由于沸石具有独特的吸附、离子交换、催化性等性能，以及耐酸、耐热、耐辐射，而且储量大、成本低，可广泛应用于工农业和国防工业。

据报道，目前国外已在火箭和导弹工业、轻工、建材、农牧渔业、控制环境污染等方面广泛利用沸石。其中以建材方面的沸石用量最大，世界沸石年产量的 2/3 用于建材工业。

我国天然沸石应用也有十多年的历史。我国的水泥工业年用沸石数千万吨以上。在混凝土、高性能混凝土以及砂浆方面的应用，也已普遍开展。超细沸石粉配制高性能混凝土与硅粉的效果相近，越来越受到了国内外的重视。在建设部的主持下，天然沸石粉在水泥混凝土及砂浆中应用的技术标

准即将颁布，这对促进我国混凝土技术的发展将起积极的推动作用。

## 第一节 我国的天然沸石资源

50年代以来，日、美等国都发现了大量的沸石矿床。我国自1972年在浙江缙云发现了具有工业意义的沸石矿床以来，随后在河南、山东、河北、黑龙江和内蒙古自治区等地也都陆续发现了沸石矿床。现在，在中国的21个省、自治区发现了120多处的沸石矿床。北起黑龙江省（9处）、吉林省（4处）、辽宁省（10处）的东北三省共有23处沸石矿床。在中国的华北地区，如山西（6处）、河北（14处）及内蒙古（5处）三省区共有沸石矿床25处。此外，山东省7处，河南省3处，陕西省1处，湖北省9处，安徽省1处，江苏省1处，江西省2处，浙江省21处，广东省10处，广西壮族自治区1处；西部的四川省3处，青海省2处，新疆自治区3处，西藏自治区1处等。据有关资料报导，我国有3个较大的沸石矿：

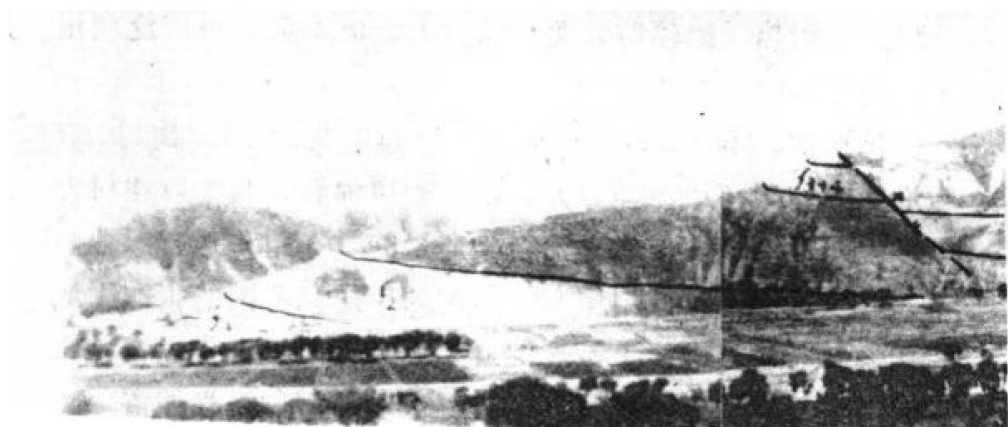


图 1—1 独石



## 一、河北省赤城县独石口沸石矿

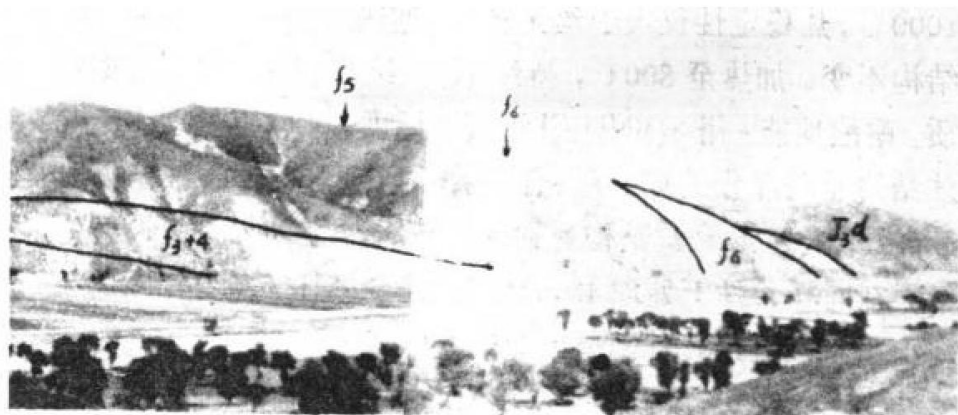
该矿区面积  $5\text{km}^2$ ，共有 8 层矿，总厚 180 余米，可露天开采。矿石为中、高品位的斜发沸石，矿物含量为  $50\%\sim 70\%$ ，储量 4 亿吨左右。因属火山沉积矿床，所以矿层稳定，规模大，品位高，是国内应用、试验成果较多的矿区之一。独石口沸石矿的外貌如图 1—1 所示。

## 二、浙江缙云县沸石矿

主要由两个矿区组成，一个是老虎岩，一个是天井山。是国内最早发现的大型沸石矿床。

(一) 老虎岩矿区：以斜发沸石为主，含有一定的丝光沸石，储量约 1000 万吨左右。

(二) 天井山矿区：共有二层矿，上层以斜发沸石为主，并含有丝光沸石，下矿层厚  $15\sim 30\text{m}$ ，合计储量  $1000\sim 2000$  万吨。



独石口沸石矿