



补偿收缩混凝土裂渗 控制技术及其应用

■ 赵顺增 游宝坤 著

中国建筑工业出版社

补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用

赵顺增 游宝坤 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用/赵顺增, 游宝坤著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-112-12369-8

I. ①补… II. ①赵… ②游… III. ①膨胀混凝土-裂缝渗流-控制 IV. ①TU528.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 159745 号

本书是在总结过去 20 多年来我国补偿收缩混凝土研究和应用经验的基础上编写的一部全面介绍混凝土膨胀剂和补偿收缩混凝土应用技术的专著。主要包括: 概论; 混凝土膨胀剂; 混凝土的收缩与裂缝; 补偿收缩混凝土的相关技术标准; 补偿收缩混凝土的基础理论; 补偿收缩混凝土的机理研究; 补偿收缩混凝土的基本性能; 补偿收缩混凝土裂渗控制技术; 补偿收缩混凝土筑坝新技术; 补偿收缩混凝土应用实例; 补偿收缩混凝土的发展与展望。

本书中的一些观点比较新颖, 很多都是作者首次提出。

* * *

责任编辑: 张伯熙 郭 栋

责任设计: 肖 剑

责任校对: 张艳侠 刘 钰

补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用

赵顺增 游宝坤 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 352 千字

2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-12369-8

(19644)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

混凝土的收缩开裂是从其诞生之日起就未能很好解决的技术难题,也是影响混凝土和钢筋混凝土结构耐久性的重要问题。自 20 世纪 90 年代以来,高性能混凝土在我国得到广泛的应用。高性能混凝土虽然没有统一的定义,但是一般认为它应该具备高强度、高工作性、高耐久性和高体积稳定性四项特征。客观地说,前三项已经取得很大进步,唯独体积稳定性尚未很好解决,使用所谓高性能混凝土的结构,开裂现象不仅没有减少,反有增多的趋势。

以膨胀水泥为胶凝材料的补偿收缩混凝土是水泥混凝土学科中化害为利的典范,利用技术手段将有害的膨胀成分,控制、转变为有利的膨胀变形,补偿普通水泥混凝土的收缩,解决水泥混凝土结构的收缩开裂,体现了辩证法的胜利。

20 世纪 50 年代,已故中国工程院资深院士、中国建筑材料科学研究总院原总工程师吴中伟教授将膨胀水泥技术引入我国,并组织一批科研人员对其进行研发。其后,中国建筑材料科学研究总院的一大批科技工作者和国内其他单位的学者对这一学科展开研究,先后研制出多种膨胀水泥,以及用这些膨胀水泥制造的水泥制品,如自应力混凝土输水管等。

20 世纪 80 年代末,游宝坤教授和吴万春教授创造性地提出用掺加膨胀剂的补偿收缩混凝土实现超长钢筋混凝土结构无缝设计施工,并带领其科研团队,联合国内其他单位的科技人员展开工程应用技术研究,为补偿收缩混凝土开辟了新的应用领域。经过二十多年的发展,在补偿收缩混凝土应用领域,我国已经处于国际领先地位。掺加膨胀剂的补偿收缩混凝土被广泛用于结构自防水、大体积混凝土裂缝控制和超长钢筋混凝土结构无缝设计施工,称为补偿收缩混凝土的“三大应用技术”,其应用实例遍及全国各地的土木工程领域。

在水泥混凝土学科中,相较而言,膨胀水泥及其补偿收缩混凝土研究方向系统性的著述不多。近年来,随着水泥混凝土学科研究的深入,膨胀剂和补偿收缩混凝土也取得不少新成果。笔者潜心研究多年,有一些心得体会。例如,在新产品研究方面,基于原地反应原理设计、研制的新型双膨胀源混凝土膨胀剂—HCSA,能够很好地补偿高性能混凝土的干燥收缩;在膨胀机理方面,对水泥基材料膨胀干缩临界点、补偿收缩混凝土的有效膨胀窗口、补偿收缩混凝土的干燥收缩落差、混凝土干燥收缩开裂概率、可调控膨胀速率膨胀剂的原理、无收缩混凝土制备原理等问题进行了一些探索性研究,并提出一些浅显的看法;在标准规范方面,组织制定了我国首部产品国家标准《混凝土膨胀剂》GB 23439—2009 和首部应用技术标准《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T 178—2009;在测量仪器方面,研制了新型膨胀收缩变形测量仪器,解决了长期以来测量变形不精确的难题;另外在工程应用方面也有一些新的发展。本书汇纳了这些新内容,对补偿收缩能力筑坝新技术做了系统介绍,并结合工程实例系统阐述了补偿收缩混凝土裂渗控制原理和技术,目的

是为了进一步扩大补偿收缩混凝土的应用范围、提高应用质量，充分发掘和利用补偿收缩混凝土优良特性，为发展节材减排的绿色混凝土，推进发展低碳建筑业做好准备工作。

今年是我们的导师，我国膨胀水泥混凝土学科的奠基者吴中伟先生逝世十周年。我们长年追随吴先生，先生的音容笑貌至今历历在目，先生“爱祖国，惜寸阴”的教诲犹在耳边，继承和发展先生未竟的事业就是对先生最好的缅怀。我们一定会把膨胀剂和补偿收缩混凝土的研究和应用工作持续进行下去。

作为把科技成果转化生产力的生力军，各膨胀剂生产单位的企业家和技术人员、各建筑设计院的工程师和施工单位的技术人员，对我国膨胀剂的应用都做出了巨大贡献，在此表示衷心感谢！

补偿收缩混凝土裂渗控制技术是我国几代科技工作者共同努力的结晶，科学事业的点滴进步，都凝聚了众多人的心血，笔者有幸对学科的新发展进行总结，不胜荣幸，绝不敢冒功于己。非常感谢多年来从事膨胀剂和补偿收缩混凝土工作的同事和朋友，由于人数众多，唯恐挂一漏万，故不具名感谢。

本书共有十一章，其中由赵顺增撰写第二章，第三章的第五节，第四章，第六章（第一节除外），第七章，第八章的第四、五、六节，第十章的第二节，第十一章；游宝坤撰写第一章，第三章（第五节除外），第五章，第六章的第一节，第八章的第一、二、三节，第九章，第十章第一节。

作者水平有限，书中错误难免，敬请读者指正。

赵顺增 游宝坤

2010年8月1日

目 录

第一章 概论	1
第一节 膨胀水泥发展概述	1
第二节 混凝土膨胀剂发展概述	2
第三节 膨胀混凝土的研究与发展	5
第二章 混凝土膨胀剂	8
第一节 混凝土膨胀剂的分类	8
第二节 混凝土膨胀剂的原材料	9
第三节 混凝土膨胀剂的生产工艺	13
第四节 混凝土膨胀剂的性能	15
第三章 混凝土的收缩与裂缝	25
第一节 混凝土的收缩变形	25
第二节 混凝土的徐变	28
第三节 混凝土的变形与开裂	29
第四节 有害裂缝与无害裂缝	30
第五节 现代混凝土工程收缩裂缝特点及应对措施	31
第四章 补偿收缩混凝土的相关技术标准	37
第一节 我国补偿收缩混凝土相关标准制修订历史	37
第二节 相关标准的技术内容	41
第三节 测量方法和仪器	56
第五章 补偿收缩混凝土的基础理论	65
第一节 传统的补偿收缩模式	65
第二节 正确的补偿收缩模式	66
第三节 冷缩与干缩的联合补偿	70
第六章 补偿收缩混凝土的机理研究	74
第一节 膨胀源及其水化反应	74
第二节 膨胀水泥石的孔结构	90
第三节 膨胀过程假说	98
第四节 膨胀和干缩临界点	102
第五节 有效膨胀与有效膨胀窗口	107
第六节 可调控膨胀速率原理	112
第七节 补偿收缩混凝土的干燥收缩落差	116
第八节 无收缩混凝土的制备原理	123

第七章 补偿收缩混凝土的基本性能	126
第一节 新拌补偿收缩混凝土的工作性能	126
第二节 硬化补偿收缩混凝土的性能	128
第三节 补偿收缩混凝土的耐久性	141
第四节 特殊补偿收缩混凝土的性能	150
第八章 补偿收缩混凝土裂渗控制技术	157
第一节 补偿收缩混凝土结构自防水原理	157
第二节 补偿收缩混凝土超长结构连续施工技术	160
第三节 补偿收缩大体积混凝土抗裂原理	165
第四节 补偿收缩混凝土的设计计算问题	167
第五节 补偿收缩混凝土工程实测应力—应变情况	173
第六节 补偿收缩混凝土应用技术要点	176
第九章 补偿收缩混凝土筑坝新技术	184
第一节 补偿收缩混凝土筑坝技术概况	184
第二节 低热微膨胀水泥混凝土	185
第三节 双膨胀水泥混凝土	188
第四节 氧化镁膨胀混凝土	192
第五节 硫铝酸钙类膨胀剂在水电工程中的应用	199
第六节 补偿收缩混凝土筑坝新技术	201
第十章 补偿收缩混凝土应用实例	203
第一节 国外的工程应用	203
第二节 中国的工程应用	206
第十一章 补偿收缩混凝土的发展与展望	220
参考文献	223

第一章 概 论

普通水泥混凝土由于干缩和冷缩等原因,往往导致开裂和劣化。人们希望有这样一种水泥,它在凝结硬化时能产生一定量的膨胀,以抵消其收缩,从而消除因混凝土收缩而引起的各种弊端。从另一种角度,人们探索能否用水泥水化所产生的膨胀来张拉钢筋,以达到机械预应力的目的。

在水泥水化硬化过程中,能使混凝土产生一定体积膨胀的通称膨胀混凝土。在钢筋限制下,其膨胀转化为预压应力。国际上一般按建立的预应力值大小划分,能在混凝土中建立 0.2~0.7MPa 预压应力、以补偿混凝土收缩为目的的称为补偿收缩混凝土,能在混凝土中建立 1.5~6.0MPa 预压应力、以达到机械预应力为目的的称为自应力混凝土。

配制补偿收缩混凝土时,多用混凝土膨胀剂,也可用膨胀水泥;配制自应力混凝土时,多用自应力水泥,也可用混凝土膨胀剂。

第一节 膨胀水泥发展概述

通过实践和研究,人们逐渐认识到除了有各种因素会导致水泥混凝土收缩之外,确也存在着一些使水泥混凝土体积发生膨胀的物理化学变化。如海水侵蚀会使水泥混凝土膨胀,水泥中有过高的游离石灰或方镁石时也会使水泥混凝土膨胀、开裂以致破坏,对这些现象的深入研究和解释,孕育了膨胀和自应力水泥的诞生。关于膨胀和自应力水泥的发展历史,文献 [1-3] 都进行过较为详细的汇总报道,兹简述如下:

1890 年,凯特劳脱 (C. Candlot) 首先发现铝酸三钙和硫酸钙能形成钙矾石。

1892 年,米却利斯 (W. Michaelis) 提出钙矾石是造成波特兰水泥混凝土在含硫酸盐介质中产生膨胀、破坏的原因,即所谓的“水泥杆菌”。

1936 年,法国洛西叶 (H. Lossier) 是最早认识到钙矾石具有消除水泥收缩和产生预应力的学者,他发明了膨胀水泥。它由波特兰水泥、膨胀剂和矿渣组成,膨胀剂是用矾土、石膏和白垩土磨成生料再加以煅烧而制得,但未正式生产。

1958 年,美国的克莱恩 (A. Klien) 在此基础上开发了 K 型膨胀水泥,1964 年正式投入生产。通过在波特兰水泥熟料中加入适量的膨胀剂而制成。膨胀剂的配制和煅烧是使其中具有适量的无水硫铝酸钙 ($3\text{CA} \cdot \text{CaSO}_4$, 简写 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$)、 CaSO_4 和 CaO , 可以根据所需要的膨胀值调节膨胀剂的掺入量,以制得能够补偿收缩的膨胀水泥或自应力水泥。

美国还曾开发了一种由 C_3A 含量较高的波特兰水泥熟料为基体。适当增加石膏掺加量的 S 型膨胀水泥,但其性能不如 K 型膨胀水泥,1973 年后中止生产。

1945 年,前苏联 В. В. Михайлов 也根据形成钙矾石的原理,研制成功不透水膨胀水泥。1955 年,他又发明 M 型膨胀水泥 (硅酸盐膨胀水泥),它由波特兰水泥、铝酸盐水泥和石膏按一定比例共同粉磨而成。

20 世纪 50 年代，苏联的布德尼可夫和克拉夫钦卡发明了石膏矾土膨胀水泥，它由铝酸盐水泥和石膏共同粉磨而成。

20 世纪 60 年代，苏联库塔切拉德捷（Кутацеладзе）等研制成功用煅烧明矾石和石膏作膨胀组分的明矾石膨胀水泥。

我国从 20 世纪 50 年代起，研究和生产了多种类型的膨胀水泥。1957 年建筑材料科学研究院（现中国建筑材料科学研究总院）左万信等研究成功回转窑烧结法制造铝酸盐水泥，为各种膨胀水泥的研究与生产奠定了基础。20 世纪 50 年代末，以铝酸盐水泥为膨胀组分，先后研制成功石膏矾土膨胀水泥和硅酸盐膨胀水泥。60 年代初，研制成功以矿渣为基础的矿渣膨胀水泥。70 年代研制成功用于混凝土大坝的低热微膨胀矿渣水泥、明矾石膨胀水泥、自应力铝酸盐水泥和自应力硫铝酸盐水泥，80 年代试制成功铁铝酸盐膨胀水泥。

此外，还研制成功以硅酸盐水泥为基础掺入少量氧化钙的浇筑水泥，和掺入少量氧化镁的镁质油井膨胀水泥等，由于使用量少，没有形成产业规模，基本没有生产。

膨胀较大的自应力水泥主要用于中小口径的自应力钢筋混凝土输水管，由于新型塑料管材的快速发展，成本和安装费用处于劣势地位的自应力钢筋混凝土输水管行业已经被市场竞争击垮；而用于工业与民用建筑的微膨胀水泥，也由于生产和运输成本高，原本就没有发展起来，这部分市场已被蓬勃发展的膨胀剂占领，目前国内外膨胀水泥的生产量已经很少。

第二节 混凝土膨胀剂发展概述

混凝土膨胀剂（Expansive Agent for Concrete）是在膨胀水泥基础上发展而来的一种混凝土外加剂，在混凝土制备过程中，按一定比例掺入硅酸盐水泥混凝土中，即可拌制成膨胀混凝土。以往生产硅酸盐膨胀水泥时，是将预先制备好的膨胀剂或单独粉磨好的膨胀剂原料再与硅酸盐水泥粉磨而成，认为这种生产工艺可以保证产品的均质性和膨胀稳定性。日本是最先将膨胀剂作为产品，直接用于混凝土中的国家。1962 年，日本大成建筑技术研究所购买了美国 A. Klein 的 K 型膨胀水泥专利，在此基础上，研制成功硫铝酸钙膨胀剂（Calcium Sulfo-Aluminate，简称 CSA），它是用石灰石、矾土和石膏配制成生料，经电融烧制成一种含有 $C_4A_3\bar{S}$ （无水硫酸钙）、CaO 和 $CaSO_4$ 的熟料，然后粉磨成膨胀剂。1969 年，日本水泥公司出售名为“阿沙那波卡”CSA 膨胀剂。在水泥中内掺 CSA（等量取代水泥重量）8%~10%可拌制成补偿收缩混凝土，内掺 15%~25%可拌制成自应力混凝土。

1970 年，日本小野田水泥公司开发成功石灰系膨胀剂，它是用石灰石、石膏和黏土配制成生料，经 1400℃左右煅烧成含有游离氧化钙 40%~50%的膨胀熟料，再经粉磨制成石灰系膨胀剂。它通过 CaO 水化生成 $Ca(OH)_2$ 使混凝土产生膨胀，在水泥中掺入 7%~10%可制得补偿收缩混凝土。

近年，俄罗斯、美国、澳大利亚、保加利亚等国也开展了混凝土膨胀剂的研制，它们分别用含铝矿渣、含有铝酸钙的工业废渣、硫铝酸钙熟料、煅烧明矾石和煅烧高岭土等作膨胀组分，膨胀源为钙矾石。

20 世纪 90 年代后,美国的 P. K. Mehta 等为解决大体积混凝土温差裂缝问题,提出在水泥中掺入 5% 的 MgO,只要 MgO 煅烧控制在 900~950℃ 的温度范围内,物料粒度 300~1180 μm ,MgO 所产生的膨胀速率是符合补偿大体积混凝土冷缩要求的。1997 年日本电气化学工业公司推出“电化 CSA100R”新型膨胀剂,以 30kg/m³ 替代水泥,使水泥的水化速度减缓,抑制了温升,在混凝土最高温度降至常温过程中,由于 CSA 水化产生的膨胀能在温度下降时也会持续,从而缓和温度下降的体积收缩,防止大体积混凝土开裂。

我国从 20 世纪 70 年代进行混凝土膨胀剂的研究。1974 年,建筑材料科学研究院的游宝坤、邓慎操和陈全行等研制成功类似日本 CSA 的硫铝酸钙膨胀剂,与日本电融法的区别是,采用回转窑烧制法制成 CSA 熟料,粉磨至比表面积为 200~300m²/kg 制成膨胀剂,由于无法解决烧成过程中物料结圈的问题,一直没有投入工业化生产。

1979 年,安徽省建筑科研院金树青、刘莉芳等在明矾石膨胀水泥基础上,研制成功明矾石膨胀剂(EA-L),由不煅烧明矾石与石膏粉磨而成,在水泥中掺入 15%~18%,可拌制成补偿收缩混凝土。由于其掺量大、碱含量高,目前已被淘汰。

1985 年后,建筑材料科学研究院王延生、张桂清、江云安等研制成功氧化钙—硫铝酸钙型的复合膨胀剂(CEA)。用含 f-CaO 为 40%~50% 的膨胀熟料,与明矾石和石膏粉磨而成。其后,又研制成功用铝酸盐水泥熟料、明矾石和石膏磨制而成的铝酸钙膨胀剂(AEA)。1986 年游宝坤、韩立林、吴万春和李乃珍等研制成功 UEA-I 型膨胀剂,用特制硫铝酸盐熟料(CSA 类熟料)、明矾石和石膏粉磨而成,由于熟料烧制困难,为适应膨胀剂生产的需求,以后又陆续开发了 UEA-II、UEA-III 型膨胀剂,UEA、AEA 和 CEA 三种产品均通过部级技术鉴定,其中 UEA 膨胀剂及其应用获国家科技进步二等奖。

与此同时,同济大学研制出早强型硫铝酸盐膨胀剂,长江科学院研制出大坝混凝土膨胀剂。1985 年,南京化工学院(现南京工业大学)研制成功氧化镁膨胀剂,用于水电站坝基混凝土。

1990 年,山东省建筑科研院研制成功以明矾石和石膏为主原料的 PNC 膨胀剂,1992 年,山东省建材研究院研制成功 JEA 膨胀剂,浙江工业大学研制出 TEA 膨胀剂,江西省建材院开发了 HEA 膨胀剂等,这些膨胀剂均属硫铝酸钙类,掺量为 10%~12%。

1992 年我国制定了《混凝土膨胀剂》JC 476 建材行业标准,统一了试验方法和技术指标,但对膨胀剂掺量和碱含量未作规定,标准水平较低,对质量较差的膨胀剂约束力不够。随着我国对混凝土碱—集料反应的重视,1998 年对该标准进行了修订,规定膨胀剂的碱含量 $\leq 0.75\%$ 。标准检验时的内掺量不得大于 12%。1999 年,为与国际接轨,我国实施 ISO 水泥标准,因此,在 2001 年对该标准进行第三次修订(JC 476—2001),对膨胀剂质量提出了更高的要求。随着膨胀剂使用量的扩大,市场对高品质膨胀剂的需求增加,2009 年颁布实施了新的《混凝土膨胀剂》GB 23439—2009 国家标准。

为不断提高膨胀剂的技术水平,以中国建筑材料科学研究总院为代表,对混凝土膨胀剂进行了深入持续的研究,实现了产品的更新换代。中国建筑材料科学研究总院的游宝坤、李光明等分别以特制铝酸钙水泥熟料和铝酸钙—硫铝酸钙水泥熟料作为膨胀组分,研制出一种高性能膨胀剂(UEA-H),又名 ZY 膨胀剂;1995 年,赵顺增、吴万春、刘立、雷秀英等采用硫铝酸盐水泥熟料、烧矾土和石膏为原料,研制成低碱 UEA 并在天津豹鸣股份有限公司投入生产;1998 年起,赵顺增、刘立、郑万廪等历时 8 年,研制出具有双

膨胀源的新型高性能膨胀剂—HCSA，在天津豹鸣股份有限公司投入工业化生产；唐山北极熊特种水泥公司对硫铝酸钙水泥熟料进行改性，再将该熟料与石膏、石灰石磨制成CAS膨胀剂；石家庄市功能建材公司以铝酸盐熟料、硫铝酸盐熟料、石膏和分散剂磨制成FEA膨胀剂；重庆江北特种建材有限公司和南京特种建材有限公司等也生产低碱低掺量UEA膨胀剂，广西云燕特种水泥公司生产低掺量AEA膨胀剂。

经过 20 年的努力，我国混凝土膨胀剂质量的发展经历了高碱高掺、中碱中掺和低碱低掺的三个阶段，如表 1-1 所列，膨胀剂的主要组成列于表 1-2。

膨胀剂质量发展的三个阶段 表 1-1

阶 段	年 份	碱含量 (%)	掺量 (%)	品牌代表
高碱高掺	1980~1985	1.8~2.0	15~20	EA-L
中碱中掺	1986~1997	0.80~1.0	10~12	UEA-I，UEA-II，AEA，CEA，PNC
	1998~2000	0.50~0.75	10~12	UEA-III，AEA，CEA，PNC，HEA
低碱低掺	2000~至今	0.25~0.50	6~8	UEA-H，ZY，CSA，FEA，HCSA

注：掺量指按照《混凝土膨胀剂》JC 476—2001 标准检验时达到标准值时的检验掺量。

我国主要膨胀剂的组成情况 表 1-2

膨胀剂品种	品牌	基本组成	标准掺量 (%)	碱含量 (%)	膨胀水化产物
明矾石膨胀剂	EA-L	明矾石，石膏	15	1.8~2.0	钙矾石
U-I 型膨胀剂	UEA-I	CSA 类熟料，明矾石，石膏	12	1.0~1.5	钙矾石
U-II 型膨胀剂	UEA-II	煅烧明矾石，明矾石，石膏	12	0.8~1.2	钙矾石
U-III 型膨胀剂	UEA-III	煅烧高岭土，明矾石，石膏	12	0.5~0.75	钙矾石
U-IV 型膨胀剂	UEA-H	铝酸钙—硫铝酸钙熟料，石膏	8	0.3~0.5	钙矾石
铝酸钙膨胀剂	AEA	铝酸盐水泥，明矾石，石膏	8	0.5~0.7	钙矾石
分散性膨胀剂	FEA	铝酸盐-硫铝酸盐熟料，石膏，分散剂	8	0.5~0.7	铝矾石
复合膨胀剂	CEA	石灰系熟料，明矾石，石膏	8	0.5~0.7	氢氧化钙，钙矾石
高性能膨胀剂	HCSA	C ₄ A ₃ S ₃ 、CaO 和 CaSO ₄	6	0.3~0.5	氢氧化钙，钙矾石

注：掺量指按照《混凝土膨胀剂》JC 476—2001 标准检验时达到标准值时的检验掺量。

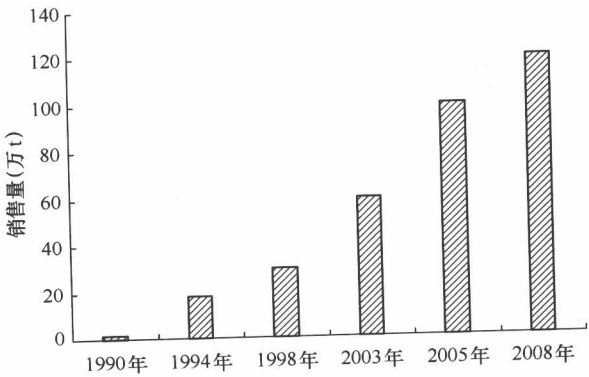


图 1-1 中国混凝土膨胀剂的年销售量趋势

与日本相比，我国膨胀剂开发应用较晚，1990 年销量仅为 1.8 万 t，随着掺膨胀剂的补偿收缩混凝土结构自防水、超长结构无缝设计和施工方法以及大体积混凝土裂渗控制三大应用技术的推广，膨胀剂的销量逐年递增，1994 年达 18 万 t，1998 年达 30 万 t，2003 年达 60 万 t，2005 年达 100 万 t，2008 年达 120 万 t，居世界同类产品之首，销售量趋势见图 1-1。

第三节 膨胀混凝土的研究与发展

一、膨胀混凝土类型

研究膨胀混凝土的目的,一是为了减免普通混凝土的收缩开裂;二是探索能否利用水泥水化所产生的膨胀来张拉钢筋,简化预应力工艺。在 20 世纪 30~60 年代,随着各种膨胀水泥和混凝土膨胀剂的研制成功,为膨胀混凝土的研究与应用提供了可靠的物质基础。膨胀混凝土分为补偿收缩混凝土和自应力混凝土两种类型。

美国混凝土协会(ACI) 223 委员会给予的定义是:

补偿收缩混凝土是一种当膨胀受到约束产生的压应力,能大致抵消由于干缩在混凝土中出现的拉应力的膨胀水泥混凝土。

自应力混凝土是一种当膨胀受到约束时导入很高的压应力,在干缩和徐变后,混凝土中仍然保持足够的压应力的膨胀水泥混凝土。

一般把自应力为 $0.2\sim 0.7\text{MPa}$ 的膨胀混凝土称为补偿收缩混凝土,自应力为 $0.7\sim 1.0\text{MPa}$ 的膨胀混凝土称为填充用补偿收缩混凝土,自应力为 $1.0\sim 6.0\text{MPa}$ 的膨胀混凝土称为自应力混凝土。我国新制定的《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T 178—2009 对补偿收缩混凝土的定义为:由膨胀剂或膨胀水泥配制的自应力为 $0.2\sim 0.7\text{MPa}$ 的混凝土。

二、膨胀混凝土研究概况

1936 年法国洛西叶(Lossier)研制出一种硫铝酸钙膨胀水泥后,设想用这种水泥制取化学预应力混凝土,虽然实验室的研究结果是有希望的,但是,由于在实际上控制膨胀的难度较大,故判定为没有实用价值。然而,文献记载了 Lossier 水泥曾用于石拱建筑。这种水泥经改进后,曾经用于装配式闭合拱桥、地基基础和修复工程。

1945 年,前苏联米哈依洛夫(В. В. Михалов)把研制成功的不透水膨胀水泥,成功应用于二次世界大战中被破坏的钢筋混凝土构筑物和地下工程防潮层,以及堵漏和修补工程。1955 年前后,米哈依洛夫创造了硅酸盐膨胀-自应力水泥(国外称为 M 型水泥),开始用于地下工程,如地下铁道预制拱环的接缝和防渗等,并推广到压力输水管。20 世纪 70 年代在机场、公路、大跨度薄壳、轻骨料膨胀混凝土匣子结构以及大面积(1500m^2)无缝的楼板、屋面板等工程广泛使用,这些工程所用的膨胀混凝土实际上均属于补偿收缩的性质。1975 年,苏联计生产 3 万 t 自应力水泥,制成 7万 m^3 膨胀混凝土。米哈依洛夫因此杰出贡献,荣获斯大林奖章。

1958 年,美国 A. 克莱因(A. Klein)研制成功的硫铝酸钙膨胀水泥,取名 K 型水泥。1963 年与同事 Bertero, Lin, Mehta, Pirtz 和 Polivka 等,对补偿收缩混凝土进行大量研究,在多种用途上推广。1968~1970 年,美国生产 M 型水泥和 S 型水泥,均用作补偿收缩混凝土而得到推广,1972 年美国混凝土协会在佛罗里达州召开了以 Klein 冠名的国际膨胀混凝土学术会议,随后,ACI223 委员会提出《使用补偿收缩混凝土的标准作法》(ACI223-77),这是世界上第一部关于补偿收缩混凝土性能研究、结构设计和施工的

指南。

日本从 20 世纪 60 年代起开发膨胀水泥混凝土, 研制和出售各种类型的膨胀剂, 其中应用最广的是 CSA 膨胀剂, 其次是石灰系膨胀剂。1964 年在东京召开第一次 CSA 研究会, 随后开展了掺膨胀剂的混凝土物理力学性能和耐久性研究, 对补偿收缩混凝土在各种工程的应用, 进行了应力—应变的实物测试以及施工技术的研究。在此基础上, 日本建筑学会于 1982 年颁布了《掺膨胀剂混凝土的配合比设计和施工指南》。关于膨胀剂的适用性, 建筑占 40%, 土木占 25%, 制品占 35%。土木主要指道路、地下沟、水槽、涵洞、灌浆, 制品主要包括钢管砂浆衬里、高强桩、外压管、内压管和楼板构件等。

澳大利亚、印度、保加利亚、英国、德国和波兰等也进行过膨胀混凝土的研究工作, 但文献报导很少。

中国建筑材料科学研究总院是我国膨胀混凝土的发源地, 在吴中伟院士指导下, 从 1956 年起, 以曹永康为首的课题组开展了硅酸盐自应力混凝土的研究, 1:2 混凝土的自应力值为 2~3MPa, 随后研究出用离心法制造自应力混凝土压力管的整套生产工艺和质量控制方法, 1969 年开始工业化生产自应力混凝土压力水管。1974 年起, 陆续研究成功自应力铝酸盐水泥和自应力硫铝酸盐水泥, 1:2 混凝土自应力值达 4~8MPa, 1980 年, 又研究成功明矾石自应力水泥, 都成功用于制造混凝土压力管。1985 年我国颁布了《自应力混凝土输水管》GB 4084。自应力混凝土管材用离心法成型, 公称直径 100~800mm, 长度 3000~4000mm, 工作压力为 0.4~1.2MPa。经过 15 年之努力, 形成了自应力混凝土管生产行业, 到 1995 年底累计生产各种口径的自应力混凝土管材 68163km, 广泛应用于城镇和工矿企业输水管道, 也应用于农用水利建设引水上山管道、倒虹吸管道、喷灌管道、排涝管道和小水电站水轮机的引水管道。近年来, 由于 PVC 管的发展, 对其形成强烈冲击, 自应力混凝土管行业大幅度萎缩。

我国对补偿收缩混凝土的研究始于 1960 年, 中国建筑材料科学研究总院先后研究成功硅酸盐膨胀水泥、石膏矾土膨胀水泥、明矾石膨胀水泥、矿渣膨胀水泥、硫铝酸盐膨胀水泥等, 对这些膨胀水泥配制的补偿收缩混凝土进行了大量的系统研究, 主要应用于水池、油罐、地下室、后浇缝、梁柱接头、设备二次灌浆和渗漏修补工程等, 但总用量不大。1980 年后, 采用明矾石膨胀水泥配制的补偿收缩混凝土修建的一座 600m² 地下人防工程, 配筋率 0.3%~0.6%, 导入自应力 0.2~0.8MPa, 经 20 多年观察无渗漏; 用其在毛主席纪念堂 (100m×100m) 和北京饭店做后浇缝回填性混凝土, 在天津地铁西站做结构自防水获得大面积成功。江苏省建筑科学研究总院用硅酸盐膨胀水泥做刚性防水屋面近 120 万 m², 长江科学院和浙江大学用低热微膨胀混凝土进行长 30m 的水坝及大型坝块试验, 一次浇筑成功。这些工程实践开创我国补偿收缩混凝土应用之先河, 对其后的发展起到重要的推进作用。中国工程院吴中伟院士是我国膨胀混凝土研究的奠基人, 1979 年出版《补偿收缩混凝土》一书, 是当代我国第一本论述补偿收缩混凝土的专著, 提出了补偿收缩的原理和正确的补偿收缩模式, 补偿收缩混凝土的设计和如何使用等指导意见。在他的指导下, 我国科技工作者进行大量试验研究和工程实践, 使补偿收缩混凝土得到广泛应用。

中国建筑材料科学研究总院通过对膨胀水泥的研究和开发应用, 借鉴日本发展膨胀混凝土的经验, 发现用混凝土膨胀剂取代膨胀水泥不仅具有先进的科学技术意义, 而且利于

生产、运输及施工的组织,节约费用,符合市场发展方向。1985年后,研究方向从膨胀水泥转为混凝土膨胀剂。中国建筑材料科学研究总院先后研制成功 UEA、AEA 和 CEA 三种膨胀剂。在石家庄市特种水泥厂生产成功 UEA 膨胀剂后,开展了大规模的 UEA 补偿收缩混凝土试验研究,在亚运会工程、北京十三陵水下九龙宫和天津市第一人民医院地下室等一批大型工程应用成功。在此基础上开发三大应用技术,首先提出结构自防水是根本、抗裂比防渗更重要的新概念,开发补偿收缩混凝土结构自防水技术,1992 年建设部把《UEA 补偿收缩混凝土防水工法》YJFD22—92 列为国家级工法。随后,根据“抗”、“放”结合的补偿收缩混凝土原理,以膨胀加强带替代后浇带,提出《超长钢筋混凝土结构无缝设计和施工方法》专利技术(专利号 93117132.6)。提出采用膨胀剂、掺合料(粉煤灰、矿渣粉)和缓凝减水剂“三掺”方法的大体积混凝土裂渗控制技术。三大技术适应我国大规模工程建设中裂渗控制的需要,在许多重大工程中得到推广应用,补偿收缩混凝土主要应用于高层建筑地下室、地铁、水厂和污水处理厂,水电站大坝的面板、堵头、铁路和公路隧道、海港码头、核电站和地下发射井等。值得自豪的是,补偿收缩混凝土成功应用于北京 2008 奥运会国家体育场地下防水主体结构(建筑面积 25.8 万 m^2)、国家游泳中心“水立方”、北京奥林匹克公园、国家会议中心地下工程(401m $\times$ 101.5m)、北京奥林匹克中心区地下交通联系工程(总长度 9800m)、中国科学技术馆新馆、首都机场 3 号航站楼地下道桥、北京南站等,为北京奥运会场馆及附属工程建设做出了应有的贡献。据不完全统计,至 2008 年,全国混凝土膨胀剂累计应用量达 950 万 t,折合补偿收缩混凝土约 2.5 亿 m^3 ,居世界之首。

混凝土膨胀剂和补偿收缩混凝土已发展成为一个新的专业学科,中国土木工程学会混凝土外加剂专业委员会分别在 1994 年、1998 年、2002 年和 2006 年召开了四届《全国混凝土膨胀剂学术交流会》,出版四部论文集。2002 年建设部修订了《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119—2003,2004 年中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品分会膨胀与自应力混凝土专业委员会创办了《膨胀剂与膨胀混凝土》科技期刊,并于 2004 年、2005 年在北京组织召开了两次技术交流会,经各方专家讨论,起草了《补偿收缩混凝土应用技术导则》。2008 年,制定了《混凝土膨胀剂》GB 23439—2009 和《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T 178—2009 两部标准。这一系列工作,进一步提高了混凝土膨胀剂的技术指标,规范了补偿收缩混凝土的应用技术,把我国补偿收缩混凝土的应用提高到一个新水平。

第二章 混凝土膨胀剂

第一节 混凝土膨胀剂的分类

理论上能够让混凝土产生体积膨胀的材料都有可能用于制造膨胀剂。现行国家标准《混凝土膨胀剂》GB 23439—2009 将混凝土膨胀剂按水化产物分为硫铝酸钙类混凝土膨胀剂（代号 A）、氧化钙类混凝土膨胀剂（代号 C）和硫铝酸钙—氧化钙类混凝土膨胀剂（代号 AC）三类。

新的国家标准还将混凝土膨胀剂按限制膨胀率分为Ⅰ型和Ⅱ型。Ⅰ型水中 7d 的限制膨胀率 $\geq 0.025\%$ ，Ⅱ型水中 7d 的限制膨胀率 $\geq 0.050\%$ 。对产品进行分类分型一方面符合行业的现状；另一方面也鼓励发展优质高效的新产品，Ⅱ型产品的性能指标能够符合日本标准的要求，达到了先进国家产品的技术水平。

一、硫铝酸钙类混凝土膨胀剂

是指与水泥、水拌合后经水化反应生成钙矾石的混凝土膨胀剂。比较有代表性的产品是日本电气化学工业公司的 CSA、我国的 UEA、ZY、FEA、PNC、CSA 等。目前我国市场上销售的膨胀剂大都属于硫铝酸钙类混凝土膨胀剂。采取固定 SO_3 ，变换 Al_2O_3 的技术路线， SO_3 一般由硬石膏提供，通过改变 Al_2O_3 来源，如铝酸钙（高铝水泥熟料）、硫铝酸钙（硫铝水泥熟料）、明矾石、含铝矿渣、煅烧矾土、高铝煤矸石、高铝粉煤灰、煅烧高岭土、地开石等，各生产厂据此制定不同的生产配方，形成不同品牌的膨胀剂。

二、氧化钙类混凝土膨胀剂

是指与水泥、水拌合后经水化反应生成氢氧化钙的混凝土膨胀剂。比较有代表性的产品是日本小野田水泥公司的 CA。我国也在 20 世纪 60 年代和 80 年代分别研制成功几种 CaO 膨胀剂，如用掺过烧 CaO 膨胀剂生产的浇筑水泥、包裹法生产的脂膜石灰以及过烧、包裹相结合的复合膨胀剂（CEA）的熟料等。该生产技术和应用要求严格，现在市场上没有这类产品。但是从节约高品质铝矾土和优质石膏等方面考虑， CaO 类混凝土膨胀剂应该是一个发展方向。

三、硫铝酸钙—氧化钙类混凝土膨胀剂

是指与水泥、水拌合后经水化反应生成钙矾石和氢氧化钙的混凝土膨胀剂。有两种生产技术途径，一是生产专用的 CaO 熟料，再与硫铝酸钙类膨胀剂在粉磨时复合，如与明矾石、硬石膏复合的 CEA 复合膨胀剂即属于此；另外一种方法是在熟料烧成中，直接烧制成含有 CaO 和能够水化形成钙矾石的矿物，如无水硫铝酸钙和硬石膏，通过技术手段控制 CaO 的结晶程度和有效含量，如 HCSA 高性能混凝土膨胀剂。硫铝酸钙—氧化钙类

混凝土膨胀剂兼具氧化钙类和硫铝酸钙类膨胀剂的特点,通过技术措施较易控制膨胀速率,是可控膨胀速率的高性能膨胀剂发展方向。

第二节 混凝土膨胀剂的原材料

由于产品种类、生产工艺的差别,混凝土膨胀剂的原材料也不相同。从生产技术来看,膨胀剂有全熟料膨胀剂,如日本的 CSA、CA,我国的 HCSA;含熟料膨胀剂,主要是我国生产,如早期的 UEA-I、CEA、AEA、ZY、CSA 等;无熟料膨胀剂,如 UEA-II、UEA-III、HEA 和其他一些膨胀剂。由于市场上产品名称比较混乱,牌号众多,很难从名称上分辨产品性能的优劣,因此新国家标准按照限制膨胀率对产品进行了分型,Ⅰ型产品基本上都是无熟料膨胀剂,售价约几百元 1t,Ⅱ型产品必须是含有一定比例熟料的膨胀剂,否则达不到标准要求的技术指标。含熟料膨胀剂的熟料一般是铝酸钙水泥熟料或硫铝酸钙水泥熟料,全熟料膨胀剂则是特种膨胀熟料,生产这些熟料的主要原料是石灰石、铝土矿和石膏;无熟料膨胀剂的铝质材料大致有明矾石、高岭土、地开石、煤矸石、焦宝石、赤泥等。

一、石灰石

石灰石又称石灰岩,是一种以方解石为主要成分的碳酸盐。化学分子式为 CaCO_3 ,其理论化学组成为:CaO56.04%, CO_2 43.96%,属三方晶系,常呈复三方偏三角面体及菱面体结晶,集合体呈晶簇、粒状、钟乳状、鲕状或致密块状,无色或白色,玻璃光泽,硬度为 3,密度 $2.6\sim 2.8\text{g/cm}^3$ 。

石灰石是生产特种膨胀熟料、铝酸钙熟料、硫铝酸钙熟料等混凝土膨胀剂专用熟料的主要原料,生产膨胀剂熟料的石灰石中 CaO 含量不小于 53%,高于普通水泥原料的要求。

二、铝土矿

铝土矿又称矾土,通常是指包括三水铝石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、一水硬铝石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、一水软铝石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、赤铁矿、高岭石、蛋白石等多种矿物的混合物。其化学成分变化很大, Al_2O_3 含量 40%~75%,矿石通常呈致密状、豆状、鲕状等集合体。灰、灰黄、黄绿、红、褐等色。用于生产膨胀剂熟料的铝土矿中 Al_2O_3 含量应不小于 70%。

我国的铝土矿主要集中在山西、河南、贵州和广西 4 省区。大量开采的地区有河南省的小关、洛阳、新安和宝丰,贵州省的修文和清镇,山东省的张店,山西省的阳泉和孝义,广西壮族自治区的平果等地。

三、石膏

通常所称的石膏是指石膏矿和硬石膏矿,这两种矿物主要是盐湖中化学沉积作用的产物,常与石盐、钾盐及光卤石共生。两种石膏常伴生产出,其主要区别是石膏含 2 个结晶水,又称二水石膏,溶解速度快,但溶解度小;硬石膏不含结晶水,溶解速度慢,但溶解度较大,二者可互相转化。

膨胀剂生产过程中主要使用硬石膏。也使用磷石膏、脱硫石膏等工业废弃物。

我国石膏矿产蕴藏丰富，分布广，储量居世界前列，而且硬石膏储量多于石膏。除少数省、市外，各地都有石膏矿床分布。比较上规模的矿山有：山西太原西山、灵石、湖北应城、湖南邵东、甘肃天祝、宁夏中卫及四川大为等石膏矿。

四、明矾石

明矾石的化学式为 $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ，是一种含水的钾铝硫酸盐类矿物，由于其中的钾常被钠置换，明矾石按成分又可分为钾明矾石和钠明矾石两类，较多见的是两种成分混合的钾钠明矾石。其矿物特征见表 2-1。

明矾石矿物特征 表 2-1

晶体形态	化学成分 (%)		化学性质	物理性质
等轴晶系，晶体呈立方体、八面体、偏复方十二面体自然产出，通常呈细粒状、柱状、集合体致密块状、土状	K_2O	9.9	易溶于水和盐酸，在碱性溶液中完全分解	白色，含杂质呈浅灰、浅黄、浅红、浅褐色。透明或半透明，油脂光泽。硬度 2~2.5。具强烈的热电效应
	Al_2O_3	10.8		
	SO_3	33.8		
	H_2O	45.5		

明矾石一般由富含钾铝成分的酸性火山岩及火山沉积岩经热液蚀变而成。矿石为灰至灰黑色，次为灰白、紫灰及杂色。矿石矿物组成以钾明矾石为主，约占 85%；其次为钠明矾石。常伴生有铜、镓、铀等金属元素。较纯的明矾石矿石平均化学成分为 SO_3 16.4%、 Al_2O_3 18.8%、 K_2O 4.07%、烧失量 21.85%。明矾石的工业要求见表 2-2。

明矾石的一般工业要求 表 2-2

项 目	边界品位 (%)	工业品位 (%)	富矿 (%)	贫矿 (%)
含纯明矾石	≥ 20	≥ 35	≥ 45	35~45
相当于含硫酐 (SO_3)	7.72	13.51	17.37	13.51~17.37
可采厚度 (m)	≥ 2			
夹石剔除厚度 (m)	≥ 1			

根据矿床地质、围岩性质、蚀变特征以及所处的大地构造位置，明矾石的矿床类型可分为中生代陆相火山喷发—沉积型、中生代陆相火山热液型、元古代火山热液型 3 种类型。

我国早期的膨胀剂大多是采用生明矾石或经 600~700℃ 煅烧的明矾石制造。20 世纪 90 年代，出于对混凝土碱-集料反应的担忧，混凝土膨胀剂产品标准对碱含量进行了严格限制，明矾石不再是膨胀剂的主要原料。2009 年新颁布的混凝土膨胀剂国家标准，充分考虑资源综合利用等因素，将产品标准中的碱含量指标定为由供需双方商定的选择性指标，为含有明矾石的高碱含量膨胀剂在不具备碱集料反应条件的环境下使用开了窗口。优质明矾石是生产膨胀剂的好原料，可以作为无熟料膨胀剂的铝质材料或含熟料膨胀剂的辅助铝质材料使用。

我国明矾石矿产蕴藏丰富，集中分布于华东地区，以浙江平阳、萧山和安徽庐江等地