

混凝土现代技术丛书

膨胀混凝土

吴中伟 张鸿直 著

中国铁道出版社

1990年·北

混凝土现代技术丛书

膨胀混凝土

吴中伟 张鸿直 著

中国铁道出版社

1990年·北

内 容 简 介

本书是在总结国内外几十年来膨胀混凝土发展和使用经验的基础上编写的一部全面介绍膨胀混凝土使用技术的专著。主要内容包括：膨胀混凝土的发展史；各种类型的膨胀水泥和膨胀剂；膨胀混凝土的性能；补偿收缩混凝土的设计问题及使用技术；国内外应用补偿收缩混凝土的实例；应用膨胀混凝土处理普通混凝土的变形和开裂等问题；自应力混凝土的设计问题；国内广泛应用的自应力混凝土压力管的设计和制作技术；自应力混凝土在建筑结构中的应用以及提高自应力值的途径；膨胀混凝土的膨胀机理；对发展膨胀混凝土的展望。

本书观点较新颖，其中很多是作者首次提出的。

混凝土现代技术丛书

膨胀混凝土

吴中伟 张鸿直 著

*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 傅希刚 封面设计 刘景山

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092mm 1/32 印张：8.25 字数：185千

1990年10月 第1版 第1次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7-113-00881-X/TU·199 定价：4.10元

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。目前世界混凝土年产量已达60亿吨左右，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提高经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

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技术，分期分批出版专册（著）。近期内将陆续出版的有：

1. 新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《沸石混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《轻骨料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高强度混凝土》，《防腐蚀混凝土》，《硫铝酸盐水泥混凝土的性质和应用》，《碾压混凝土》，《纤维增强水泥复合材料》等。

2. 新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》，《真空混凝土工艺及设备》，

IV

《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬季施工》，《混凝土快速硬化》等。

3. 性能与测试技术方面

《混凝土力学性能测定》，《混凝土强度综合法测试技术》等。

4. 应用理论方面

《混凝土材料科学》，《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》，《混凝土的耐久性》，《混凝土力学》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
我国高中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品
混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性
问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水
平还落后于发达的工业国家，因此，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，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在混凝土科研与生产经验的
积累，本丛书的选题范围将继续扩大；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

一九八八年元月

前 言

膨胀混凝土是一种特种混凝土，它包括补偿收缩混凝土和自应力混凝土两大类，已在中、苏、美、日等国推广应用，技术经济效益显著。

自从1936年法国发明膨胀水泥并制成膨胀混凝土以来，随着科学技术的进步和使用经验的积累，膨胀混凝土的品种、原料、性能以及应用范围不断增加与扩大。现在，膨胀水泥、膨胀剂、膨胀混凝土的品种已增加到十多种；性能除膨胀这一主要特性之外，还随着品种的不同，分别具有高强、早强、抗掺、耐硫酸盐侵蚀和低温硬化等优良的性能。充分利用上述诸性能，已使膨胀混凝土的应用范围从最早的填缝、修补、处理接头等扩展到防水工程、地下工程、要求早强和高强度的工程、低温施工、多种自应力混凝土制品与构件、装配整体式工程以至大体积混凝土及油井堵塞等方面。有些膨胀混凝土在利用工业废渣、地方资源，节省能源，缩短工期，降低造价等方面，收到了良好的效果。

我国是一个研究与应用膨胀混凝土较早的国家。在开发品种、认识性能、扩大用途、增加用量等方面均位于世界前列。以自应力混凝土压力输水管为例，到1987年底止已铺设了25000km，在数量上远远超过苏联和日本，节约了大量钢铁，满足了城乡工农业建设的需要，为我国四化建设作出了很大贡献。遗憾的是，由于十年内乱的干扰，使之在科技水平方面未能取得应有的进展。根据我国资源条件和建设的需要，可以预见，膨胀混凝土定将能够得到迅速的发展。

众所周知，开裂问题是水泥混凝土百余年来都未能很好地解决的技术难题。膨胀混凝土以其膨胀（实际上是限制条件下的膨胀）来抵消（或补偿）部分或全部导致开裂的收缩，从而减轻或避免了水泥混凝土的开裂，因此它具有十分广泛的用途；另外，膨胀混凝土的应用，还有利于提高建筑物的耐久性，延长其安全使用期，从而取得很大的经济效益。这种补偿收缩功能，使膨胀混凝土成为一种极有发展前途的防渗结构材料。膨胀混凝土有足够的膨胀能来张拉钢筋（并且能够根据钢筋配置的方向作多向张拉）产生预应力。虽然目前预应力值还不大，但已能满足压力管、板、筒、槽等制品以及路面、地坪、双向薄壁结构等的需要；还能够与预应力混凝土配合使用，发挥部分预应力以及减少预应力损失等有利作用。作者相信，在不远的将来，膨胀混凝土将代替相当一部分普通混凝土而大量应用于混凝土制品、构件与构筑物之中。作者还认为，膨胀混凝土在我国的发展规模与科技水平仍将处于世界领先地位。

膨胀混凝土的历史要比普通混凝土晚一百年，加上种种社会、经济等方面的原因，这项技术的发展速度与需要相比，还是相当缓慢的。膨胀混凝土的应用中，至今还存在不少问题，诸如测试方法、标准规范、应用技术以至基础理论等，均尚待深入研究，以便提出更好的解决方法。只有通过深入而细致的工作，才有可能真正发挥这种特种混凝土的功效，扩大其应用范围，大幅度地增加产量，充分挖掘这一高效能材料的潜力。

本书的目的是想通过系统地介绍膨胀混凝土的品种、性能、用途、设计、施工等方面的知识，推动在工程中的应用；同时阐明一些基本概念、规律和机理，使膨胀混凝土的科学技术水平能够得到进一步提高，为膨胀混凝土的研究开

发准备条件。近二十年来，国内外发表的有关膨胀混凝土的文章与汇编较多，但缺少系统论述膨胀混凝土的专著。

本书除第二章中的第四节和第十一章由张鸿直撰写外，其余部分均由吴中伟撰写。限于作者的水平，书中错误之处在所难免，敬请读者不吝指正。

吴中伟 张鸿直

1989年10月

常用符号

ε	膨胀率	ν	泊桑比
ε_1	自由膨胀率	μ	配筋率
ε_2	限制膨胀率	E_c	混凝土弹性模量
ε_m	最大膨胀率	E_s	钢筋弹性模量
ε_e	有效膨胀率	d	钢筋(丝)直径
ε_r	弹性回伸或弹性伸长	r_s	钢筋效应范围
s	收缩率	β	钢筋效应折减系数
s_2	限制收缩率	A_s	钢筋截面积
s_T	温度收缩率	A_c	混凝土截面积
s_k	极限延伸	W	张拉钢筋的功
D	补偿后最终变形	U	自应力混凝土膨胀能
ξ	膨胀指数	u	膨胀比能
σ_z	自应力值	U_s	有效膨胀能
σ'_z	最大自应力值	R_t	混凝土极限抗拉强度
C	徐变		

目 录

常用符号·····	XII
第一章 概 论 ·····	1
第一节 膨胀混凝土的发展史·····	1
第二节 膨胀混凝土的功能·····	3
第三节 变害为利的范例·····	5
第四节 膨胀混凝土在中国·····	7
第二章 混凝土的变形和开裂 ·····	13
第一节 混凝土的变形——膨胀与收缩, 自由变形与 限制变形·····	14
第二节 混凝土的失水干缩·····	17
第三节 混凝土的降温冷缩·····	24
第四节 混凝土的徐变·····	30
第五节 有害裂缝和无害裂缝·····	36
第三章 膨胀水泥和膨胀剂 ·····	39
第一节 膨胀水泥和膨胀剂的分类·····	39
第二节 硫铝酸盐类膨胀水泥和膨胀剂·····	41
第三节 氧化钙类膨胀剂·····	54
第四节 其它类型的膨胀剂·····	57
第四章 膨胀混凝土的性能 ·····	60
第一节 膨胀混凝土与普通混凝土性能的比较·····	60
第二节 影响膨胀混凝土性能的重要因素·····	62
第三节 限制条件下膨胀混凝土的性能·····	66
第四节 一个重要的性能指标——膨胀指数·····	76

第五节	膨胀能·····	81
第六节	膨胀混凝土的徐变·····	84
第五章	补偿收缩混凝土·····	88
第一节	补偿收缩的原理·····	88
第二节	补偿收缩模式·····	89
第三节	冷缩和干缩的联合补偿·····	97
第四节	刚性(绝对)限制的补偿收缩问题·····	100
第六章	补偿收缩混凝土的设计问题·····	106
第一节	设计限制膨胀率 ε_{2m} 的选用·····	107
第二节	膨胀率的测定方法·····	111
第三节	试件、模型与实物的对比问题·····	116
第四节	补偿收缩混凝土板的测试结果·····	118
第七章	补偿收缩混凝土使用技术·····	120
第一节	补偿收缩混凝土的主要建筑性能·····	120
第二节	配制补偿收缩混凝土注意事项·····	123
第三节	补偿收缩混凝土构造注意事项·····	127
第四节	补偿收缩混凝土施工注意事项·····	131
第五节	填缝和修补工作注意事项·····	132
第八章	补偿收缩混凝土应用实例·····	134
第一节	国外应用实例·····	134
第二节	国内应用实例·····	142
第九章	自应力混凝土·····	162
第一节	自应力混凝土的涵义·····	162
第二节	自应力混凝土的用途·····	164
第三节	自应力值的测定·····	168
第四节	对发展自应力混凝土的不同认识·····	171
第十章	自应力混凝土的设计问题·····	175
第一节	有效膨胀能和最大自应力·····	175

第二节	自应力混凝土设计方法探索	180
第十一章	自应力混凝土压力管	183
第一节	自应力混凝土压力管在中国的发展	183
第二节	自应力混凝土压力管的设计	186
第三节	自应力混凝土压力管的制作及其质量问题	201
第十二章	自应力混凝土在建筑结构中的应用	210
第一节	应用条件	210
第二节	部分预应力混凝土——自应力—预应力混凝土和预应力—自应力混凝土	212
第十三章	自应力的提高	216
第一节	自应力值决定自应力混凝土的发展	216
第二节	提高自应力值的途径	218
第三节	两种提高自应力值的特殊方法	220
第十四章	膨胀混凝土的膨胀机理	225
第一节	有关膨胀的理论问题	225
第二节	膨胀混凝土膨胀的动力	225
第三节	钙矾石相的形成机理与膨胀	227
第四节	膨胀过程假设	229
第五节	限制条件下膨胀的某些特征	232
第六节	几个理论课题	240
第十五章	膨胀混凝土的发展与展望	241
主要参考文献		249

第一章 概 论

第一节 膨胀混凝土的发展史

膨胀水泥与膨胀混凝土虽然诞生于本世纪30年代中叶，但到50年代末期才开始小规模地生产和应用，直到60~70年代才得到较大的发展。早期美国和日本曾进行了大量的研究开发工作，取得了满意的效果；苏联也进行了较多的研究工作。我国的研究工作开始较早，其后一度停滞，近10年来发展较快。到了70年代末，美国因社会、经济等方面的原因出现停滞现象，而我国与日本则继续有所发展。兹将膨胀混凝土发展史简述如下：

1890~1892年，凯特劳脱 (C. Candlot) 首先发现钙矾石，即水化硫铝酸钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$)。

1936年，法国亨利·洛西叶 (H. Lossier) 发明膨胀水泥，并取得专利。后来少量用作拱桥顶石，未大量生产。

1955年前后，苏联米哈依洛夫 (В. В. Михайлов) 创造不透水性膨胀水泥，以后发展成为硅酸盐自应力水泥（简称应力水泥，在国外这一类水泥被称为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，但因快凝问题而未能大量生产。70年代在机场、公路、大跨度薄壳、轻集料膨胀混凝土匣子结构以及大面积 (1500m^2) 无缝的楼板、屋面板等工程中广泛使用。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，但在苏联均称作自应力混凝土。1975年，苏联生产了3万吨

自应力水泥，制成7万立方米膨胀混凝土，水泥标号以HLI—20，HLI—40为主，即自应力水平分别为2和4 MPa。

1957年，中国建筑材料研究院试制成功硅酸盐自应力水泥（M型水泥，但没有快凝的缺点）。1969年开始生产自应力混凝土压力水管，以后又用于铸铁管道与石棉水泥管道的接缝。1978年起大量用于防水屋面，属于补偿收缩的性质。

1958年，美国A.克莱因（A.Klein）试制成功另一种硫铝酸盐型水泥，取名K型水泥，并获得专利；1963年开始用作补偿收缩混凝土，并大量生产，在多种用途上推广。

1968~1970年，美国生产M型水泥与S型水泥（一种C₃A含量高并用过量硫酸钙改性的波特兰水泥），均用作补偿收缩混凝土而得到推广。70年代美国曾大量采用补偿收缩混凝土于房屋、公路、机场、水柜、冰场、游泳池、停车场等工程，大多数取得成功。膨胀水泥的年产量曾达到50万吨，近年反而有所减少。

1965~1972年，日本引进美国K型水泥技术，但改为CSA（无水硫铝酸钙）膨胀剂，在使用部门拌制时掺入，以制作补偿收缩混凝土与自应力混凝土。稍后日本又试制成功石灰型（CaO）膨胀剂。到1976年这两种膨胀剂年产共约5万吨，约可折算为40~50万吨膨胀水泥。其中用于现浇补偿收缩混凝土的约占70%，其余30%用于预制构件和制品，属于自应力混凝土。1988年产量增加到7万吨，两种用途用量相近。

1969年，中国建筑材料研究院试制成功不煅烧明矾石膨胀水泥，不久即投产，用作补偿收缩混凝土。1978年开始生产不煅烧明矾石膨胀剂，在施工现场制作明矾石膨胀混凝土。明矾石膨胀水泥后来也扩大用途作为高强度混凝土、钢纤维增强混凝土以及制造压力管的自应力混凝土。1985年又以不煅烧明矾石为基础，制成两种复合膨胀剂。

1974年，中国建筑材料研究院与石家庄水泥制品厂共同试制成功硫铝酸盐膨胀水泥，分早强型与自应力型两种。同年，长江水利电力研究院与浙江大学研制成功低热微膨胀水泥，适用于大体积混凝土。建筑材料研究院又试制成功铝酸盐自应力水泥，其膨胀能较大，自应力水平可达到6~8 MPa，专用于制作高压输水管。80年代试制成功的铁铝酸盐膨胀水泥，具有多种功能。此外，还有少量石灰型膨胀水泥（如浇筑水泥）和石灰膨胀剂（如脂膜石灰膨胀剂）。现在我国各种膨胀水泥与膨胀剂的年产量约30万吨，品种较多，使用范围较广。其中尤以自应力混凝土管的发展为最快；补偿收缩混凝土也受到较多的重视，发展形势很好。

除了中国、苏联、美国、日本以外，其他国家如瑞典、英国、捷克斯洛伐克、联邦德国、波兰、保加利亚、澳大利亚、瑞士、加拿大、新西兰等国，也进行过膨胀混凝土的研究工作。苏联是最先推广使用膨胀混凝土的国家，除硅酸盐自应力混凝土以外，还创造了石膏矾土膨胀水泥、镁质膨胀水泥、煅烧明矾石膨胀水泥等品种，但均未见大量应用。现在各国膨胀水泥（包括膨胀剂）的年产量约在150万吨上下，只及水泥总产量的0.2%。所以，膨胀混凝土现在尚处于开始推广阶段，还有大量的研究开发工作有待于努力进行。

第二节 膨胀混凝土的功能

膨胀混凝土以其化学能——膨胀能来作功，主要发挥补偿收缩与自应力两大功能。此外由于它还有其它优良性能，因此常常同时具有某些超越普通混凝土的功能，在应用中发挥着重要作用。

补偿收缩的目的在于减轻或避免混凝土因体积收缩引起的开裂。混凝土在使用过程中，常常因为干燥失水、温度下

降等原因出现体积收缩。收缩引起的开裂问题成为自有混凝土以来人人关心的难题，多少科技工作者以解决水泥混凝土开裂问题作为奋斗目标。膨胀混凝土在硬化过程中产生的膨胀可以用来补偿使用条件下产生的收缩。科学地讲，就是用限制膨胀来抵消全部或部分的限制收缩，从根本上消除导致混凝土开裂的因素，达到解决开裂问题的目的。

自应力的目的在于提高构件或制品的承载与工作能力。自应力是一种预应力，因为是由化学能所产生的，所以又叫做化学预应力 (Chemical Prestressing)，以区别于目前广泛采用的机械预应力 (Mechanical Prestressing)。当前，膨胀混凝土化学能的利用还很不充分，因此自应力值一般是很低的；在一定的使用环境下，自应力损失较大，使膨胀混凝土远远不及预应力混凝土那样采用得普遍。所以膨胀混凝土的自应力这一主要功能，还未能充分利用。但是鉴于膨胀混凝土中蕴藏的全部膨胀能并不低，自应力工艺也远较机械预应力简便；经过研究改进，自应力水平将能得到提高。目前，自应力混凝土的使用范围较狭，在结构中只能作为部分预应力，或发挥减少收缩等辅助作用。这种状况将会得到改变，逐步发展成为用途大、效益高的化学预应力混凝土，从而愈来愈多地代替机械预应力混凝土在工程中使用。

膨胀混凝土除了上述两种主要功能以外，由于所用膨胀水泥、膨胀剂的品种、性能以及集料与用法等的改变，还能显示出超过普通混凝土的优点（例如抗渗性优越、快硬早强、后期强度高（超过100MPa）、抗硫酸盐性好、低温硬化以及断面小、自重轻等等），因此适于在地下、防水、贮罐、路面、屋面、楼板、墙板、管道、接缝、大跨与高层建筑以至水利工程、海水工程、冬季施工工程、抢修工程中推广使用。所以膨胀混凝土在适当使用的情况下，具有防水材

料、结构材料、耐蚀材料、接缝材料、抢修材料等功能。这些功能的充分发挥，常常能够在节能、省工、降低成本、加快速度、满足特种要求等方面取得显著的技术经济效益。

第三节 变害为利的范例

在科技发展史中，有着许多变害为利的事例，很多科技工作者通过变害为利的创造发明为人类造福。膨胀水泥与膨胀混凝土就是变害为利的一个范例。

自从水泥混凝土问世以来，很多工程的破坏崩溃事故是因膨胀所致，因此膨胀被认为是混凝土的一大祸害。从水泥的安定性不良到盐碱、海水的腐蚀、冰冻、碱—集料反应以至钢筋锈蚀等引起的破坏，都是膨胀因素在起作用，其中钙矾石的形成与增多是一个最常见的主因。早在19世纪末，米却利斯（W·Michaelis）就发现钙矾石的生成是波特兰水泥混凝土在硫酸盐介质中发生破坏性膨胀的主要原因，因此名之曰“水泥杆菌”。当时对于这种膨胀性破坏十分恐惧，称为混凝土的白死病。

自从法国洛西叶开始，不少发明家为利用这种有害的“水泥杆菌”，创造适宜的条件，有控制地利用原来为害的膨胀现象，将破坏性的膨胀能转化成有利的膨胀能，产生自应力、补偿收缩、密实高强等优越功能。也就是利用膨胀来克服钢筋的限制而产生自应力，这是自应力混凝土的理论基础；利用限制膨胀来补偿限制收缩，这是补偿收缩混凝土的理论基础。这些都是变害为利的科学创造，40年来，随着膨胀混凝土的推广使用，为人类社会增加了物质财富。同时，通过对膨胀现象与膨胀因素的认识，对钙矾石的组成、性质、形貌，生成过程、膨胀机理的深入研究，也提高了水泥混凝土材料科学的水平。