

补偿收缩 混凝土的 应用技术

史美东 史美生 编 著
史如平 审 稿

The Application Techniques of
Shrinkage-Compensating
Concrete

中国建材工业出版社

补偿收缩混凝土的应用技术

史美东 史美生 编 著
史如平 审 稿

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

补偿收缩混凝土的应用技术/史美东等编著. —北京:
中国建材工业出版社, 2006. 1
ISBN 7-80159-969-1

I. 补... II. 史... III. 膨胀水泥-研究
V. TQ172.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 118526 号

内 容 提 要

本书总结了我国改革开放以来在水利、土木建筑工程中应用膨胀混凝土的经验,介绍了我国常用的膨胀剂和国外的膨胀水泥材料的主要成分、性能。还介绍了补偿收缩混凝土的性能、要求、设计、施工和国内外的使用实例。对解决混凝土的裂缝问题可作重要的参考。

本书特别译介了美国补偿收缩混凝土的使用准则,并介绍了日本对膨胀剂的要求,对提高混凝土的质量和施工技术作有益的参考。本书可供水利、土木建筑工程的设计、施工以及商品混凝土公司人员学习参考。

补偿收缩混凝土的应用技术

史美东 史美生 编 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:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.5

字 数:254 千字

版 次:2006 年 1 月第 1 版

印 次:2006 年 1 月第 1 次

定 价:20.00 元

网上书店:www. ecool100. com

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

前 言

水泥混凝土的应用已有一个多世纪,补偿收缩混凝土(即膨胀混凝土)的应用也有半个多世纪。

当前土木工程建筑材料中,混凝土用得最多,如长江葛洲坝、三峡混凝土大坝应用上百万立方米以至上千万立方米的混凝土,北京、上海年浇筑混凝土达到 2000 万 m^3 以上,上海宝山钢铁厂的建设、秦山核电站的建设等工程都应用大量的混凝土。而混凝土的裂缝始终是人们关注的焦点。

城市中、高层建筑以及地下数十米的地下建筑、桥梁、道路、工业民用建筑应用大量混凝土。对长度从 100~1000m 的地上、地下混凝土建筑及高强、高性能混凝土,都需要工程界努力解决出现的问题。

1. 我国现行水泥标准的实施,水泥细度的提高,各类混凝土工程大量使用外加剂,出现了许多工程质量问题

(1)京津地区很多混凝土工程由于碱-集料反应,使重要建筑物(桥梁、房屋建筑)的混凝土胀裂破损,甚至需要拆除。

(2)很多工程混凝土的裂缝(主要因混凝土收缩)使地下室或屋顶混凝土裂渗,影响结构安全和使用。

(3)预应力混凝土、高强混凝土、高性能混凝土的应用对混凝土材料、设计施工要求愈来愈高。

(4)至 2004 年,我国膨胀剂的使用量已达 60 万 t,减水剂、泵送剂等年产量达 100 万 t。由于施工使用不当或材料不合要求导致的工程质量事故,时有报道。

2. 补偿收缩混凝土的应用研究状况

(1)为了解决普通混凝土的裂缝问题,解决混凝土在硬化过程中抗拉能力的不足,大多使用补偿收缩混凝土(美国用膨胀水泥,日本、中国用膨胀剂)。美国混凝土协会制订了 ACI 223—98《补偿收缩混凝土的使用准则》,我国也制订了《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2003)。

使用膨胀混凝土能产生一定预压应力,抑制或减少裂缝的出现,吴中伟教授曾称之“少裂或不裂混凝土”。

(2)中国建筑科学院(1986 年)和中国建材科学研究院(1987 年)对混凝土的收缩、徐变作了较系统的研究。

(3)我国科研单位、学者对混凝土和膨胀剂的研究

①薛君环对膨胀水泥的研究和吴中伟对膨胀混凝土的研究,1985 年推出的《膨胀和自应力水泥及其应用》提供了较为系统的研究(包括补偿收缩水泥和自应力水泥)。

中国水利水电科学院朱伯芳对水工大体积混凝土的温度应力作了长期的研究,以更好地解决水工混凝土的裂缝问题。

上海王铁梦对宝钢工程大体积混凝土的实践,著有《工程结构裂缝控制》(1997年),但本书仅涉及普通混凝土的论述,没有补偿收缩混凝土的内容。

中国建筑科学院富文权、韩素芳的《混凝土工程裂缝分析与控制》(2002年)也对普通钢筋混凝土的裂缝问题作了研究,并出版了《钢筋混凝土结构裂缝控制指南》(2004年)一书。

安徽金树青在研发 EA—L 明矾石膨胀剂的基础上出版了《明矾石混凝土膨胀剂的性能与应用》一书(1992年)。

中国铁道出版社多次组织出版了吴中伟的《膨胀混凝土》(1990年),周履、周永春的《收缩徐变》与富文权、韩素芳的上述著作。

游宝坤、李乃珍在长期研究混凝土膨胀剂和补偿收缩混凝土的基础上出版了《膨胀剂及其补偿收缩混凝土》(2005年)一书。

中国建材院还组织了三次(1994、1998、2002年)混凝土膨胀剂应用讨论会,中国建科院也组织过相关会议,如2004年4月于杭州召开的“钢筋混凝土结构裂缝控制”研讨会。

各省还研制了多种类型的膨胀剂,这些研究都对提高混凝土质量作出了贡献。

②根据已有的公开出版物和专利,对各省研究、生产的各类膨胀剂做部分简要介绍。

各地使用较为广泛的膨胀剂

研究单位或地区	研究人员	膨胀剂名称	生产地	开发时间
安徽建科院	金树青	EA-L 明矾石膨胀剂	庐江	1981
安徽建科院	金树青	FN-M 膨胀剂	庐江、东北	1994
安徽建科院	金树青	JEA 低碱膨胀剂	庐江	2000 *
安徽建科院	廖绍锋	AJ 膨胀型泵送剂 * *	庐江	1998
中国建材院	王延生	HEA、AEA 膨胀剂	北京、浙江、广州、庐江	1985 *
中国建材院	游宝坤	UEA-H 膨胀剂	北京、重庆、乌鲁木齐	1988 *
上海	上海建科院	UEA-B 膨胀剂	上海	1998
中国建材院	王延生等	CEA 膨胀剂	北京	1994
浙江大学	楼宗汉、叶青	LEA 膨胀剂	—	1998 *
浙江工业大学	史如平等	TEA 膨胀型防水剂	杭州、庐江	1993
浙江工业大学	史如平	TEA 高效膨胀剂	杭州、庐江	2004 *
杭州	史美东等	ASA 抗裂防水剂	杭州	2004
杭州萧杭特种水泥公司	蔡九德等	CMA 膨胀剂	杭州萧山	2003
中国水电 12 局	施工科研所	VF-II 抗裂剂	建德	1996
辽宁建科院	叶明	LJ 膨胀剂	沈阳	1994
辽宁建科院	王元	LJ 液态膨胀剂	沈阳	1995 *
河北	李乃珍	FEA 膨胀剂	石家庄	1994 *
江苏	陈国忠等	TMS-PB 膨胀剂	镇江	1994
江西建科院	刘松柏	WG-HEA	萍乡	1994
江西建材院	科源公司	KY-HPA 活性膨胀剂 * *	南昌	—

续表

北京水利部利力公司	包科祥	JS-Ⅲ混凝土抗裂剂	北京	—
中国建材院	黄春江等	ZY-Ⅱ膨胀剂	北京	1998 *
中国建材院	赵顺增	HCSA 膨胀剂	天津	2005
山东建科院	鲁统卫	PNC 膨胀剂	济南	2002
山东建材院	张明征	JEA 膨胀防水剂	济南	—
江苏建科院		JM-Ⅲ混凝土增强剂 * *	张家港、江宁	—
南京水科院		HCL-I 抗裂防渗剂 * *	南京	—

* 为申请专利时间, * * 为复合型膨胀剂(规范、标准未予推介)。

3. 补偿收缩混凝土存在的问题

(1) 现有的设计规范太简单, 没有精确的公式提供设计计算的依据。

如我国规范要求提高布筋的合理性和最小配筋率, 美国标准则提出混凝土收缩率与设计膨胀率相抵的原则要求。我国规范着重考虑配筋, 美国标准着重考虑减少混凝土构件之间的约束等。

(2) 膨胀剂材料与水泥、外加剂适应性的研究还不够, 如北京琉璃河水泥厂强度等级为 42.5 的水泥加入膨胀剂后其膨胀性能较好, 可是与有些高效减水剂又不相适应。

膨胀剂对坍落度的影响与水泥、减水剂是综合性的反应, 有报道用木钙不行, 用萘系减水剂也不行, 所以美国标准提出要很好地选择减水剂和缓凝剂。

(3) 施工管理、监理缺少可靠的现场监测混凝土质量的手段, 除了坍落度、强度、抗渗性监测之外, 现场混凝土的膨胀率无人检测。

(4) 对出现严重工程质量的混凝土, 缺少客观的分析和总结, 如单独材料的质量合乎规范, 可是混合在一起则发生问题, 所以施工前的试配很重要。

(5) 有些膨胀剂的广告言过其实, 有的认为用了其膨胀剂, 问题就解决了, 实际上还靠设计、施工、材料使用的密切配合才能做好补偿收缩混凝土。

本书选编了中国建材科学研究院王延生研究员的文章以及张汝良、吴杰、吕联亚等工程师的文章; 特邀浙江工业大学杨扬教授编写了日本对混凝土应用膨胀剂的要求; 美国周欣教授提供了有关资料; 本书引用了国内学者的有关研究成果。对此表示衷心的感谢。同时, 还要感谢同济大学欧建良, 浙江工业大学潘新、童敏娟, 还有方为红等同学为打印文稿和绘图付出了辛勤劳动; 感谢史如平教授对本书的认真审阅; 感谢中国建材工业出版社对本书出版的大力支持。

编著者

2005 年 9 月于杭州

目 录

第一章 补偿收缩混凝土使用的膨胀性材料	1
1.1 氧化镁类膨胀剂	1
1.2 氧化钙类膨胀剂	2
1.3 硫铝酸钙-氧化钙类膨胀剂	3
1.4 硫铝酸钙类膨胀剂	5
1.5 膨胀水泥	5
1.6 我国主要的膨胀剂	7
1.7 膨胀剂在混凝土中的适应性	10
第二章 补偿收缩混凝土的性能	12
2.1 混凝土的收缩	12
2.2 影响混凝土干缩变形的因素	13
2.3 确定混凝土收缩的方法	20
2.4 混凝土温度升降变形	25
2.5 混凝土的抗拉强度和极限拉伸	29
2.6 混凝土的抗裂条件	31
第三章 补偿收缩混凝土的要求	36
3.1 我国对膨胀混凝土的要求	36
3.2 美国对补偿收缩混凝土的要求	38
3.3 日本对混凝土用膨胀剂的要求	62
第四章 补偿收缩混凝土的设计	69
4.1 补偿收缩混凝土的设计考虑	69
4.2 不同构件对混凝土膨胀率的要求	70
4.3 《混凝土结构设计规范》对伸缩缝的规定	72
4.4 《地下工程防水技术规范》的规定和结构允许裂缝的规定	73
4.5 补偿收缩混凝土的膨胀性能	74
4.6 构件的约束条件	75
4.7 不设缝的构件的许可长度	76
4.8 膨胀混凝土的抗裂计算	77
4.9 各种方法联合应用	79

4.10 补偿收缩混凝土设计的基本步骤和要求	80
第五章 补偿收缩混凝土的施工	83
5.1 水泥和膨胀材料的选择	83
5.2 膨胀混凝土的级配	87
5.3 膨胀混凝土的输送、浇捣、抹面、拆模和养护	89
5.4 大体积混凝土施工	91
5.5 超长结构混凝土施工	95
第六章 TEA 膨胀剂的特点和工程应用	98
6.1 TEA 膨胀剂的研制	98
6.2 TEA 膨胀剂的特性	99
6.3 TEA 膨胀剂的应用实例	100
第七章 补偿收缩混凝土的问题和发展	103
7.1 施工中常见的问题	103
7.2 补偿收缩混凝土质量评定标准	105
7.3 裂缝治理技术	106
7.4 施工中的质量监督	112
7.5 补偿收缩混凝土的发展	113
第八章 钢筋混凝土工程应用膨胀混凝土的论文和讨论	116
8.1 我国混凝土膨胀剂及其发展方向	116
8.2 ASA(抗裂防水)膨胀剂	117
8.3 TEA 膨胀混凝土的工程应用	118
8.4 TEA 无缝设计施工技术在工程中的应用	120
8.5 试论防水剂与水工混凝土	123
8.6 膨胀混凝土探讨	126
8.7 膨胀混凝土的裂缝问题讨论	129
8.8 膨胀混凝土的抗裂计算讨论	133
8.9 混凝土裂缝控制的方法选择	138
8.10 超长结构混凝土的成功实践	140
8.11 我国和美国应用补偿收缩混凝土的实例	143
附录	146
附录 A 中华人民共和国建材行业标准	146
混凝土膨胀剂的限制膨胀率试验方法(标准的附录 A)	149
附录 B 混凝土外加剂应用技术规范	152
参考文献	156

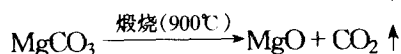
第一章 补偿收缩混凝土使用的膨胀性材料

1.1 氧化镁类膨胀剂

1. MgO 类膨胀剂的生产和性能

石灰岩中含有白云质[CaMg(CO₃)₂]的成分,在水泥生产煅烧时含有一定量的 MgO,应用于水工混凝土后对抑制、减少混凝土裂缝较好。

该类膨胀剂可利用菱镁矿(MgCO₃)煅烧生产:



然后粉磨,按需量(水泥中 MgO 小于 5%)加入。

如当地有白云岩或白云质石灰岩,可控制 MgO 含量生产 MgO 膨胀水泥。

MgO 经水化后有如下反应:



摩尔体积 11.2 24.3

水化后,固相体积增大一倍以上,促使水泥石膨胀。

浙江大学楼宗汉(1997 年)提出以石灰石、黏土、铁矿粉、白云石为原料生产 MgO 硅酸盐膨胀水泥,熟料成分为 CaO(60%~66%)、SiO₂(20%~24%)、Al₂O₃(4%~6%)、Fe₂O₃(4.5%~7.0%)、MgO(4%~6%),其中:(Al₂O₃ + Fe₂O₃)>10.8%,水泥中 SO₃含量为 3.0%~5.0%的膨胀剂,适用坝体等大体积混凝土的应用,已申请专利。

广东水利水电科学院陈理达(2002 年)对 MgO 混凝土的研究,见表 1-1。

表 1-1 MgO 混凝土的膨胀率

养护温度	MgO	各龄期 MgO 自生体积变形 $\epsilon(t) \times 10^{-6}$					
		3d	7d	28d	60d	90d	180d
20℃	4.5%	3.2	5.3	15.0	25.7	35.0	60.0
40℃		13.5	24.0	59.5	74.0	95.5	121.0

用 PⅡ 硅酸盐水泥,强度等级为 42.5 级,Ⅱ级粉煤灰掺 30%。

MgO 混凝土具有延迟微膨胀的性能,在常温下膨胀缓慢,在水工大体积混凝土内温度较高,加速了 MgO 的化学反应。大坝混凝土水化热主要发生在 3~7d 内,MgO 在 3d 后开始膨胀,1 年内趋于稳定,其微膨胀恰好发生在混凝土温降收缩阶段。

广东自 1990 年以来将 MgO 混凝土用于青溪水电站重力坝、广东飞来峡水利工程、广东阳

春长沙水库混凝土拱坝等。

2. P.K.Mehta(美)的研究认为普通水泥中加入 5% 的 MgO 膨胀剂(煅烧温度控制在 900~950℃,细度控制在 300~1180 μ m)产生的膨胀率能符合大体积混凝土补偿收缩的要求,可解决冷缩裂缝问题

由于大体积混凝土的内部温度是在较长时间内消散的,MgO 膨胀剂在混凝土体的限制下缓慢增加其膨胀率,故有较好的适应性。

控制 MgO 膨胀剂的粒度级配很重要,也是控制膨胀速率的重要因素。

3. 福建水口混凝土重力坝应用 MgO 膨胀剂后,中国大坝中心的监测结果

14d 的膨胀率	$\epsilon = 0.4 \times 10^{-4}$
1 年后的膨胀率	$\epsilon = 1.0 \times 10^{-4}$
2 年后的膨胀率	$\epsilon = 2.0 \times 10^{-4}$

经使用后,大体积混凝土的冷缩裂缝大为减少。

4. 浙江华东勘测设计研究院曹泽中对 MgO 膨胀混凝土用于大坝混凝土有专门的论著

我国长江三峡大坝混凝土也使用了含有 MgO(一定量)的中热微膨胀水泥(MHC)。

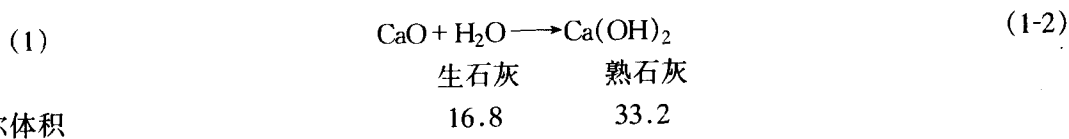
由于 MgO 膨胀剂的膨胀率较低,较难适应一般工民建构筑物对膨胀率的要求。

1.2 氧化钙类膨胀剂

1. CEA 膨胀剂(王延生、江云安)

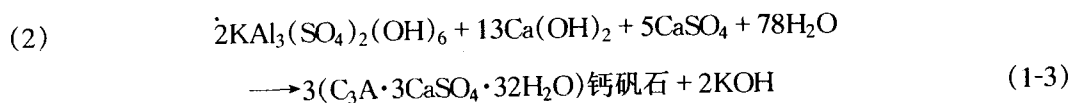
以石灰石、铝土质材料、铁质原料、明矾石等为原料,经 1400~1500℃煅烧、研磨而成。

其膨胀性化学反应:



摩尔体积

生石灰水化后的熟石灰体积增加一倍。



明矾石中的硫酸钾铝与水泥中的石膏、水化产物 Ca(OH)_2 生成钙矾石(Aft),其固相体积相应增加。

CEA 具石灰系和明矾石系特点,称复合型膨胀剂,其化学成分见表 1-2。

10%CEA 的 1:2 砂浆试件水中的限制膨胀率见表 1-3。

10%CEA 混凝土试件,经 14d 水中养护后,置于 25℃ 和相对湿度 50% 的空气中养护,1 年后仍有 0.011% 的膨胀率,表明空气中后期收缩很小。

表 1-2 CEA 膨胀剂的化学组成

%

烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Σ
2.02	15.92	4.12	1.67	70.80	0.53	3.47	0.35	0.41	99.27

表 1-3 CEA 混凝土的限制膨胀率

%

龄期	3d	7d	28d	3月	6月	1年	3年
限制膨胀率	0.021	0.032	0.043	0.048	0.049	0.047	0.048

CEA 已应用于北京 300 项工程。1998 年应用于福建龙门滩水电站,后来将掺量由 10% 提高到 15%~17%,才达到预定限制膨胀率。由于 CaO 的残余膨胀问题,北京市建委曾作出禁用的规定(2001 年)。

业界对 CaO 类膨胀剂有不同的认识,日本已淘汰了该类膨胀剂,GB 50119—2003 中 8.2.3 条规定:“含氧化钙类膨胀剂配制的混凝土(砂浆)不得用于海水或有侵蚀性水的工程”。

2. 石灰脂膜膨胀剂

由普通石灰和硬脂酸按一定比例细磨而成,是中国冶金建筑研究院的产品,主要用于设备灌浆以减少混凝土收缩。硬脂酸在研磨过程中起助磨剂作用,对生石灰又起到憎水隔离作用,使 CaO 延缓水化作用,以控制膨胀速率。

另外,石灰脂膜膨胀剂在 20℃ 时可达到 30MPa 膨胀压,在 4~24h 内体积膨胀 1.5~2 倍,可使混凝土构件胀裂,用于混凝土的静态无声爆破。

石灰质材料保质期短,其膨胀速率受温度、湿度影响较大,难以控制,很难用于混凝土的补偿收缩。

1.3 硫铝酸钙-氧化钙类膨胀剂

1. AEA(王延生)、FEA(李乃珍)、ZY-Ⅱ(黄春江)等属于这一类膨胀剂,但生产方法和成分、性能有差异,各有其专利

(1)AEA(1985 年)

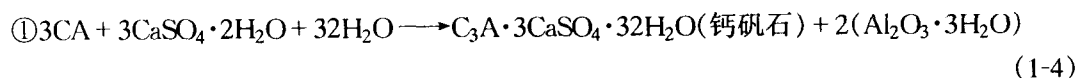
由一定比例铝酸钙(铝土矿+石灰岩煅烧)与天然明矾石、石膏粉磨而成,其成分见表 1-4。

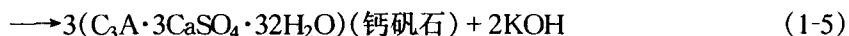
表 1-4 AEA 膨胀剂的化学组成

%

烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O+0.658K ₂ O	Σ
3.02	19.82	16.62	2.56	28.60	1.58	25.86	0.51	99.68

AEA 与水泥的水化反应:





掺量 12% AEA 1:2 砂浆试件的限制膨胀率:

7d(水中) $\epsilon_2 = 0.034\%$
 28d(空气中) $\epsilon_2 = -0.016\%$

王延生提出的凝灰岩膨胀剂,以煅烧凝灰岩、高铝黏土为主要原料,用低掺量以改进 AEA 的膨胀、强度性能,已在陕西、四川、广东生产。

(2)ZY-II 膨胀剂

该膨胀剂由 ASC 熟料(由矾土、石灰石和石膏配制的水泥生料,在回转窑中经 1360~1420℃煅烧而成水泥熟料),与石膏粉磨而成。

主要成分有 CA 和 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$,与水泥水化生成钙矾石。

ZY-II 的化学组成见表 1-5。

表 1-5 ZY-II 的化学组成 %

烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Σ
1.20	2.22	17.82	2.27	38.65	0.97	36.57	0.21	0.14	100.05

按 JC 476—2001 标准的 ZY-II 砂浆试件限制膨胀率见表 1-6。

表 1-6 ZY-II 砂浆试件的限制膨胀率 %

水泥	ZY-II	水 中		空 气 中
		7d	28d	21d
100	0	0.004	0.006	-0.028
94	6	0.035	0.042	-0.012
92	8	0.041	0.056	-0.007
JC 476—2001 标准		>0.025	<0.10	>-0.020

掺有 15% 粉煤灰时,ZY-II 混凝土试件限制膨胀率见表 1-7。

表 1-7 ZY-II 混凝土试件的限制膨胀率 %

水泥	ZY-II	水 中		空 气 中
		7d	14d	28d
100	0	0.002	0.008	-0.031
94	6	0.012	0.018	-0.018
92	8	0.018	0.022	-0.015

与空白混凝土相比,ZY-II 混凝土在空气中的收缩率可减少 50%,有一定补偿性能,28d 仍有收缩。

虽然掺量较小,但生产成本较高,在空气中呈收缩现象,与 U 型材料类似。

(3)FEA 膨胀剂

该材料由铝酸盐(15%~35%)、硫铝酸盐(20%~40%)两种熟料与硬石膏(35%~60%)、

少量明矾石(5%~10%)和硅酸盐矿物载体粉磨而成,有专利。

其化学组成: Al_2O_3 约 15%, R_2O 约 0.5%, $\text{SO}_3 > 30\%$ 。

一般掺率 8%, 砂浆试件水中 7d, $\epsilon_2 = 2.5 \times 10^{-4}$ 。

1.4 硫铝酸钙类膨胀剂

UEA 是游宝坤等于 1988 年开发的,以 U 型(UEA-H)膨胀剂为代表,由北京、重庆、乌鲁木齐生产,其他省(市)标以不同的英文后缀,如上海为 UEA-B、安徽为 UEA-N。

北京的 UEA-H 掺量为 8%,其他省市多为 10%~12%,所以同一类材料各地的组成是不一样的,使用时应加以注意。据北京的 UEA-H 与 ZY 说明书,其化学组成与性能一致,是同一产品。

该类膨胀剂以硫铝酸盐熟料、硅铝酸盐熟料(如地开石类)或铝土熟料与石膏配制磨细而成,其主要水化产物为钙矾石。

U 型膨胀剂化学组成见表 1-8。

表 1-8 U 型膨胀剂的化学组成

%

产地	掺量	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Σ
北京	8%	1.10	9.20	20.50	0.65	34.50	2.35	30.55	0.20	0.10	99.15
浙江	12%	1.57	25.75	16.50	0.90	24.10	0.90	28.78	0.49	0.10	99.09
安徽	10%	4.35	25.20	16.21	0.85	23.71	1.82	26.64	0.41	0.10	99.27

按 JC 476—2001 标准砂浆试件的限制膨胀率见表 1-9。

表 1-9 U 型膨胀剂砂浆试件的限制膨胀率

%

产地	掺量(%)	水中 7d	空气中 21d
北京	8	0.043	-0.008
浙江	12	0.030	-0.011
安徽	10	0.032	-0.007

掺量和膨胀率的差异,反映各厂材料配料的差异,空气中 21d 后尚在收缩。

1.5 膨胀水泥

1. 法国的膨胀水泥

1936 年法国人 H·Lossier 最早提出膨胀水泥的生产方法,用 50% 石膏、25% 铁矾土和 25% 的白垩作原料,在回转窑中煅烧成熟料作为膨胀剂。可在波特兰水泥中加入该膨胀剂和磨细高炉矿渣作为稳定剂,按一定比例粉磨而成膨胀水泥。

2. 明矾石膨胀水泥(AEC)

我国研究生产过多种类型的膨胀水泥,由于市场应用不多,很多已不生产。

1967 年我国研制了明矾石膨胀水泥,采用硅酸盐水泥熟料(58%~63%)、天然明矾石

(12%~15%)、石膏(9%~11%)、粉煤灰(或矿渣)(15%~20%)研磨制成,与水作用水化后产生钙矾石而发生膨胀作用。

建设部制定 JC/T 311—1997 标准,其原料仍有天然明矾石,不过根据 JC 476—2001 标准以及防水混凝土规范要求,在 1m^3 混凝土中其水泥碱含量应低于 3kg。

据浙江生产厂家资料,C30 AEC 膨胀水泥混凝土,其极限拉伸变形值为 $(140\sim154)\times 10^{-6}$,而普通混凝土为 $(80\sim100)\times 10^{-6}$ 。与膨胀剂的应用相比,AEC 水泥由于其价格较贵而限制了它的应用。

3. 高贝利特水泥(HBC)

该水泥是一种低热、抗裂性能好的大坝水泥,利用 90d 强度可以满足大坝混凝土要求。由于该水泥的 C_3S 和 C_3A 的含量低,相应的水化热也低。其 MgO 含量在 3.54% 时的自身体积变形为微膨胀 $18.92(28\text{d})\sim24.07(90\text{d})(\times 10^{-6})$,有利于(HBC-35)抗裂性能。HBC-30 混凝土 28d 的抗裂能力为 3.3MPa,90d 为 4.2MPa。

其化学矿物组成见表 1-10。

表 1-10 HBC 与 PC 水泥的化学及矿物组成比较

水 泥	化 学 组 成 (%)										矿 物 组 成 (%)			
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	R_2O		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
HBC-35	23.06	4.59	4.57	59.88	1.39	3.12	0.43	0.17	0.54		20.65	50.53	4.44	13.89
PC	22.66	5.31	3.29	65.75	1.21	—	—	—	—		55.10	23.40	8.50	15.80

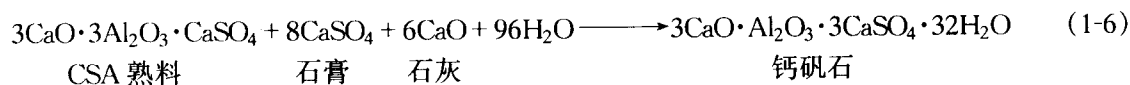
对比三峡大坝使用的 MHC(中热大坝水泥),HBC 的性能要好,当掺有 30% 的粉煤灰时,HBC 混凝土可以达到 F300 高抗渗要求。

4. 美国的膨胀水泥(K 型、S 型、M 型)

1958 年,美国加州大学 Klein 在法国人 H·Lossier 的研究基础上发明了 K 型膨胀水泥。

用单独煅烧的无水硫铝酸钙($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}=3\text{CaO}\cdot3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4$)熟料与硅酸盐熟料共同粉磨而成,用于补偿收缩混凝土。K 型膨胀水泥在美国应用较多。

K 型膨胀水泥水化机理是:



钙矾石在水化过程中逐渐形成,固相体积产生膨胀。K 型膨胀水泥混凝土在养护 7d 后,在空气中的收缩较少,仍有膨胀作用。

S 型膨胀水泥是以 C_3A 与有一定量硫酸钙的波特兰水泥粉磨而成,水化后产生钙矾石。

M 型膨胀水泥是硅酸盐水泥、铝酸钙水泥和硫酸钙适当配比粉磨的产物,由 $\text{CA}(\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与二水石膏、氢氧化钙水化生成钙矾石。

O 型膨胀水泥主要成分是 $\text{CaO}(75\%\sim90\%)$,美国规定不得用于海工建筑物。

与美国不同,日本发展 CSA 类水泥将 CSA 熟料作为膨胀剂使用。

5. 俄罗斯硅酸盐膨胀水泥

米哈伊洛夫 1949 年开始研究,1955 年制成硅酸盐自应力水泥。它由硅酸盐水泥熟料(72%~78%)、膨胀剂(高铝水泥)(14%~18%)、石膏(8%~10%)粉磨而成,细度为 4900 孔/cm² 的筛余不大于 10%,可用作补偿收缩混凝土用膨胀水泥。其化学组成见表 1-11。

表 1-11 俄罗斯某膨胀水泥的化学组成

										%
烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Σ
2.29	20.21	7.53	3.28	60.20	1.06	0.33	0.38	0.27	4.41	99.96

水泥中的成分 C₃S、C₂S 水化后形成 Ca(OH)₂,而 C₃A、CA 和 CA₂ 与 Ca(OH)₂ 和 CaSO₄·2H₂O 水化形成钙矾石。

在足够水分供应下,各矿物组成可产生体积的增加,如 $\Delta V_{C_3A} = 133.1\%$, $\Delta V_{CA} = 112.6\%$,当硬化水泥浆体具有一定结构强度时形成的钙矾石产生膨胀作用,转化为对混凝土施加压缩应力。

为使水泥膨胀稳定,要求膨胀剂与石膏之比大于 1,膨胀剂和石膏的含量一般在 20%~28% 为宜。

1.6 我国主要的膨胀剂

除了 1.3~1.4 节介绍的膨胀剂之外,各省利用当地原料生产合乎国家标准的膨胀材料,也得到广泛的应用。

1. LJ 膨胀剂

辽宁省建科院叶明等研究利用 A 组分材料与水水化生成氢氧化物,B 组分溶于水并在 Ca(OH)₂ 和石膏条件下生成钙矾石产生体积膨胀,并与明矾石作用产生后期膨胀,其化学组成见表 1-12。

表 1-12 LJ 膨胀剂的化学组成

										%
烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	
11.67	21.76	7.38	1.16	27.79	1.91	26.71	—	—	98.44	

按 JC 476—1992 的 6% LJ 砂浆试件,水中 14d 的限制膨胀率为 0.05%,28d 空气中为 0.04%,表明后期收缩很小。辽宁省建科院研制的 LJ 液态膨胀剂经浙江、安徽测试,不符合膨胀剂要求。

2. FS-Ⅲ 混凝土抗裂剂

北京利力新技术开发公司包科祥等研究,用 X 矿物、明矾石、适量膨胀熟料及石膏粉磨而成,熟料成分少,简化了工艺,降低了成本。其化学组成见表 1-13。

表 1-13 FS-Ⅲ抗裂剂的化学组成

%

烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Σ
1.90	24.25	17.40	1.93	22.75	1.72	28.7	0.33	0.96	99.94

按 JC 476—1992 的砂浆试件限制膨胀率见表 1-14。

表 1-14 FS-Ⅲ砂浆限制膨胀率

%

FS-Ⅲ (%)	水中 14d	空气中 28d
10	0.045	-0.008
12	0.059	-0.009

按 GBJ 119—88 的混凝土试件限制膨胀率见表 1-15。

表 1-15 FS-Ⅲ混凝土限制膨胀率

%

42.5 级普硅 水泥:砂:碎石	FS-Ⅲ (%)	水中		空气中	
		7d	14d	28d	90d
1:1.87:3.06	12	0.035	0.043	0.03	0.0275

3. PNC 膨胀剂

山东建科院鲁统卫等研究用不含碱的材料和部分工业废料(石膏)生产膨胀剂,含碱量在 0.2%,掺量 6%~8%。

按 JC 476—2001 标准砂浆试件限制膨胀率见表 1-16。

表 1-16 PNC 膨胀剂砂浆的限制膨胀率

胶结材 (%)		ε ₂ (%)			
水泥	PNC	水中 3d	水中 7d	水中 28d	水中 7d,空气中 28d
94	6	0.026	0.034	0.041	-0.005
92	8	0.031	0.041	0.050	0.003

按 GBJ 119—1988 混凝土试件限制膨胀率(胶结材 400kg/m³)见表 1-17。

表 1-17 PNC 混凝土的限制膨胀率

胶结材 (%)		ε ₂ (%)					
水泥	PNC	水中				水中 14d	
		3d	7d	14d	28d	空气中 28d	空气中 180d
94	6	0.0149	0.0162	0.0187	0.0197	0.0001	-0.0079
92	8	0.0180	0.0202	0.0231	0.0241	0.0061	-0.0037

4. WG-HEA 膨胀剂

江西建科院刘松柏研究认为硫铝酸盐水泥熟料或高铝水泥熟料与石膏粉磨可提供足够的活性硫铝酸盐矿相或活性铝酸盐矿相,能产生较大的早期膨胀。

8%WG-HEA 砂浆试件水中 7d 限制膨胀率可达到 0.025%，浙江测试 28d 空气中限制膨胀率为 -0.012%。

该材料以硫铝酸盐熟料配以烧黏土与石膏粉磨，因而其性能与 U 型膨胀剂相近。之前，中国建材院开发有 8% 的 HEA 膨胀剂。

5. LEA 膨胀剂

浙江大学楼宗汉与其博士生叶青研究认为 $MgSO_4$ 加入水泥中可直接溶于水。拌制水泥混凝土，按 42.5 级普通水泥：水：砂：碎石(1:0.55:2:3.30)，掺入 3% 水泥重量的硫酸镁，预拌于拌合水中，成型为 $70.7mm \times 70.7mm \times 275mm$ 试件，测得 28d 的自由膨胀率为 200×10^{-6} (试件中无钢筋)。该材料有专利。

按 JC 313—82 标准测定 LEA(掺率 3%)的净浆膨胀率见表 1-18。

表 1-18 LEA 膨胀剂的净浆膨胀率

龄期	7d	28d	90d
膨胀率(%)	0.157	0.254	0.332

6. CSA 膨胀剂(唐山北极熊特种水泥厂)与 HCSA 膨胀剂(中国建材院 赵顺增)

北京工业大学徐彦研究用矾土、石膏、石灰石按比例在回转窑中煅烧再与石膏粉磨而成，主要矿物组成为无水硫铝酸盐、石膏和石灰，与水泥水化后生成钙矾石。10%CSA(或 HCSA)可以达到标准膨胀率要求，其特点是后期的干缩较小。其化学组成见表 1-19。

表 1-19 CSA 与 HCSA 的化学组成比较

	烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	%
CSA	1.69	1.63	15.19	0.64	49.80	1.41	29.05	—	—	99.41
HCSA	1.19	1.50	15.61	1.37	50.60	2.08	27.50	—	—	99.85

7. VF-Ⅱ 混凝土防裂剂(中国水利水电第十二工程局施工科研所)

以高铝熟料、明矾石、石膏和添加剂等按比例加工而成，与水泥水化产生钙矾石膨胀作用。其化学组成见表 1-20。

表 1-20 VF-Ⅱ 防裂剂的化学组成

烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	%
—	15.77	14.10	2.19	23.98	2.07	30.91	—	—	89.02

按 GBJ 119—88 规范，12%VF-Ⅱ 混凝土试件的限制膨胀率为 $\epsilon_2 \times 10^{-4}$ ，见表 1-21。

表 1-21 VF-Ⅲ 混凝土的限制膨胀率

粉煤灰	水中 7d	水中 14d	空气中 28d	空气中 90d	R ₂₈ (MPa)
10%	0.98	1.00	-0.01	-1.45	26.4

12%VF-Ⅱ的 14d 水中砂浆试件限制膨胀率为 0.042%，空气中 28d 为 -0.010%，VF-Ⅱ曾用