

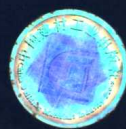
中国混凝土外加剂专业委员会
第三届全国混凝土膨胀剂学术交流论文集

游宝坤 主编

混凝土膨胀剂 及其应用

——混凝土裂渗控制新技术

中国建材工业出版社



混凝土膨胀剂及其应用

第三届全国混凝土膨胀剂学术交流会论文集

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会
混凝土外加剂专业委员会

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土膨胀剂及其应用/游宝坤编著. —北京: 中国
建材工业出版社, 2002. 11

ISBN 7-80159-348-0

I. 混... II. 游... III. 混凝土—膨胀剂
IV. TU528.554.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 086358 号

混凝土膨胀剂及其应用

游宝坤 主编

中国建材工业出版社出版(北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京管庄永胜印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 35.25 字数: 834 千字

2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

印数: 4000 册 定价: 65.00 元

ISBN: 7-80159-348-0/TU·166

谨 以 此 书

纪念中国混凝土科学一代宗师，我国膨胀和自应力混凝土研究奠基人，已故中国工程院资深院士吴中伟教授。



吴中伟院士与夫人(前中左)在全国第二届混凝土膨胀剂学术交流会上与部分专家合影(1998. 南昌)

前 言

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会混凝土外加剂专业委员会在 1982 年成立以来,经历二十载春秋,在广大科技工作者的努力下,我国混凝土外加剂的生产和应用取得了巨大成就,极大地推动了我国商品混凝土、高性能混凝土和特种混凝土的发展,其中掺入膨胀剂的补偿收缩混凝土为减免建筑结构裂渗作出了积极贡献。

1998 年在南昌市召开第二届全国混凝土膨胀剂学术交流会,中国工程院吴中伟院士在会上发表了《重视质量,积极创新》的重要报告。他对我国混凝土膨胀剂生产和应用所取得的成就给予高度评价,同时,他又严肃指出:“补偿收缩混凝土工程出现一些裂渗事故,值得深思和警惕。应总结经验教训,才能把我国补偿收缩混凝土的研究与开发应用提高到一个新水平。”根据他的指示,我国科技工作者、工程技术人员和企业家经过近四年之努力,在提高混凝土膨胀剂产品质量及其应用技术水平方面取得了较大进步,在此基础上,本专业委员会于 2002 年在重庆市召开第三届全国混凝土膨胀剂学术交流会。

本届会议共受到论文 107 余篇,涉及内容广泛,论文作者都是从事多年混凝土膨胀剂研究,生产和应用的科技工作者和工程技术人员,他们为本届会议提供了有较高学术水平和应用价值的论文。在此,我们向所有论文作者表示衷心感谢!并对本届会议和论文集出版赞助支持的膨胀剂生产企业表示诚挚感谢!

混凝土膨胀剂是改善混凝土抗裂防渗性能,提高工程耐久性的外加剂。自 1998 年以来,经过四年之努力,我国膨胀剂品种有所增加,质量有所提高,已研制出低碱低掺量的膨胀剂。新修定的《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—2001 的实施,完成了与 ISO 标准接轨,为我国混凝土膨胀剂质量提高到一个新水平奠定基础。

混凝土膨胀剂应用技术研究方面也取得了长足进步,进一步完善了补偿收缩混凝土结构自防水,少缝或无缝设计施工和大体积混凝土裂缝控制三大应用技术,开发了膨胀剂在高性能混凝土,钢管桩混凝土,大面积预应力楼板、水电、港工和核工业设施等领域的应用技术。由建设部颁布的《混凝土外加剂应用技术规范》GBJ50 119—2002,对包括膨胀剂在内的各种混凝土外加剂的正确应用具有指导意义。

混凝土膨胀剂的生产仍保持良好势头,据不完全统计,我国混凝土膨胀剂有 10 多个品牌,生产厂家近 80 多个,分布全国。2001 年膨胀剂年销量约 40 万吨,比 1998 年增加 10 万吨左右。20 年来,我国膨胀剂从无到有,从小到大,累计销量约 300 万吨,折合补偿收缩混凝土约 7 500 万 m^3 ,居世界之首。这显示了膨胀剂在混凝土外加剂中占有重要地位。

世界最大建筑市场在中国,奥运会申办成功,西部大开发,跨世纪基础设施工程众多,城镇大建设和环保治理等,都为建材行业发展提供了机遇。我国加入 WTO 后,竞争更为激烈,我们希望混凝土膨胀剂的科技工作者,研制质量更好的产品,生产管理向 ISO 接轨,尤其应进一步提高应用技术水平,为我国建设作出更大贡献。

本论文集错漏在所难免,恳请各位专家指正。

中国土木工程学会及预应力混凝土学会
混凝土外加剂专业委员会
二〇〇二年

编 委 会

主 编:游宝坤

编委会委员:(按姓氏笔划为序)

方瑞良	王贞祥	王延生	王栋民	王振雄	王保安
王长民	王 勇	王 莹	王振财	江云安	李光明
李应权	李乃珍	李细和	史如平	刘松柏	刘翰祥
刘群贤	刘 立	刘绪光	吴万春	吴菊珍	吴 瑞
何 丹	周爱如	周建启	邵中军	陈鹏声	陈富银
陈明养	陈 靖	陈普法	仲晓林	苑立东	肖保怀
叶宏临	胡玉初	林文东	林宝玉	屈志中	马丽媛
单莲英	侯维红	黄春江	黄善良	张利俊	张玉玲
夏京生	张志强	陆少边	郑远林	顾政民	顾渭建
孟昭富	雷秀英	赵顺增	赵炎龙	潘先文	席耀忠
鲁统卫	韩立林	韩国柱	韩军洲	缪昌文	蒲心诚
董同刚	董兰女	颜亨吉			

说 明

1. 文中 W/C 一般为正体,但也用于运算公式中(应为斜体),本书难以统一,故尊重作者原稿,其他类似。
2. 混凝土强度等级表示方法,例如过去有为 C_{40} 的,现统一为 C40,其他如 P、D 等也作类似处理。
3. 过去 AFm、AFt 有取 AF_m 、 AF_t 的,现本书统一为 AFm、AFt。

注:为方便读者阅读,对论文中字符使用不统一的情况,进行如上编辑,特此说明。

2002 年 11 月

热诚欢迎与各界同仁合作!

2002 年 11 月

目 录

前 言

专 论

1. 我国混凝土膨胀剂发展近况和前景	1
2. 论我国混凝土膨胀剂生产的发展方向	11
3. 高性能膨胀混凝土 (HPEC) 膨胀与强度发展的协调性研究	14
4. 大体积补偿收缩混凝土的结构稳定性问题	22
5. “抗”、“放”结合的补偿收缩混凝土防裂系统	27
6. 如何正确使用混凝土膨胀剂	32
7. 使用补偿收缩混凝土工程实践	37
8. 膨胀剂对高性能混凝土的裂缝控制作用	45
9. 掺加粉煤灰补偿收缩混凝土的研究及应用	54
10. 混凝土中使用 UEA 膨胀剂的问题探讨	61
11. JC 476—2001 标准促进新产品的开发	67
12. 《地下工程防水技术规范》修订的内容及特点	72

第一章 基础理论与材料研究

1. 钙矾石的物理化学性能与混凝土的耐久性	77
2. 二次钙矾石形成和膨胀混凝土的耐久性	86
3. ZY 高性能混凝土膨胀剂性能和水化机理的研究	92
4. 铝酸钙——硫铝酸钙混凝土膨胀剂 (ZY—II) 的研究与应用	100
5. 高效能硫铝酸钙膨胀剂研究	107
6. CSA 膨胀剂与水泥的适应性实验研究	113
7. HF 混凝土膨胀剂的技术性能及补偿收缩作用机理	120
8. $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SO}_3$ 四元体系高性能膨胀剂的研究	126
9. PNC 低碱混凝土膨胀剂的研究与应用	133
10. WG—HEA 低掺量膨胀剂的研制	138
11. FEA 分散性混凝土膨胀剂	142
12. CGM 高强无收缩灌浆料系列产品的研究与性能	144
13. 用膨胀剂、防腐剂提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能	155

第二章 补偿收缩混凝土及其裂渗控制技术的研究

1. 关于大体积补偿收缩混凝土的 DEF 现象	160
2. 关于补偿收缩混凝土限制膨胀率的设计依据	167
3. 补偿收缩混凝土限制膨胀率的主要影响因素	174
4. 试件脱模时间对限制膨胀率试验结果的影响	179

5. 混凝土膨胀剂与化学外加剂的适应性	183
6. 超长混凝土结构膨胀加强带的研究与应用	189
7. 钢纤维膨胀混凝土的力学性能及变形特性研究	195
8. 钢纤维膨胀混凝土管内压性能实验研究	202
9. 膨胀剂对补偿收缩混凝土有效应用的探讨	207
10. 预拌泵送混凝土施工中裂缝控制措施	214
11. FNC 与 UEA 复合型流化膨胀剂的应用与研究	219
12. 地下室外墙裂缝成因及其对策	223
13. 地下室大体积混凝土抗裂防渗技术	226
14. 关于补偿收缩混凝土设计的几个问题	229
15. 膨胀混凝土的裂缝问题讨论	232
16. 地下室边墙裂缝控制工程实践	237
17. 住宅地下室混凝土早期裂缝原因浅析	242
18. 补偿收缩混凝土使用的几个问题	246

第三章 混凝土膨胀剂在工程中的应用

1. 高性能 ZY 膨胀剂在华为科研中心 10.8 万 m ² 底板工程中的应用	250
2. 珠海拱北口岸广场 4.6 万 m ² 地下工程无缝防水施工技术	253
3. 北京市五环路圆明园立交桥 U 型混凝土槽施工技术	258
4. ZY 补偿收缩混凝土在北四环地下连续墙工程中的应用	262
5. 北京东方广场超大型建筑的裂渗控制技术	266
6. 超长钢筋混凝土结构无缝施工技术在武汉国际会展中心工程中的应用	273
7. UEA 无缝设计施工新技术在武汉销品茂商城中的应用	277
8. 高性能 AEA 在工程中的应用综述	284
9. UEA—Y 膨胀剂在绍兴城市广场地下室的应用	288
10. 膨胀剂在超长高层建筑中的应用	292
11. UEA—H 在北京清源水质净化厂中的应用	297
12. UEA—U 在引黄入呼供水工程中的应用	302
13. UEA—H 在曙光电子城净水池的应用	307
14. FEA 膨胀剂在大型水工结构中的应用	311
15. 混凝土抗裂防渗剂 HLC—I 在污水处理厂的应用	315
16. FEA 自防水混凝土在郑州柿园水厂的施工技术	321
17. 补偿收缩混凝土在核电站工程中的应用	324
18. 补偿收缩重混凝土在核电站乏燃料后处理工程中的应用	327
19. AEA 膨胀剂在江苏田湾核电站的应用	331
20. 防辐射大体积补偿收缩混凝土施工技术	334
21. 补偿收缩混凝土在地铁工程中的应用	337
22. 改性聚丙烯纤维和低碱膨胀剂双掺技术在防裂抗渗混凝土工程中的应用	344
23. 钢纤维微膨胀混凝土在津围公路工程中的应用	347
24. 无收缩高强灌浆料处理水下工程渗漏技术	353
25. 混凝土膨胀剂在水泥制品中的应用	357

26. 低碱型 UEA 膨胀剂在钢管混凝土中的应用	363
27. 连徐高速公路京杭大运河特大桥 C50 微膨胀钢管混凝土的施工	368
28. UEA 膨胀剂在徐宿高速公路宿迁南枢纽立交桥工程中的应用	374
29. 补偿收缩混凝土在预应力工程中的应用	377
30. 南京国际展览中心超长大面积楼板混凝土抗裂技术	383
31. 珠海拱北口岸广场地面层大面积无粘结预应力混凝土施工技术	387
32. 超长大面积现浇混凝土空心楼板的裂缝控制	394
33. 中山大学珠海教学大楼超长结构后张预应力无缝施工技术	398
34. 补偿收缩混凝土在哈铁站候车室超长预应力结构中的应用	403
35. 重庆国际会展中心超长大地下室施工技术	407
36. 宝钢技术中心超长地下室结构的设计研究	413
37. 微膨胀混凝土在超长地下室工程中的应用	418
38. 合理取消混凝土后浇带的基础施工	423
39. 上海世贸商城地下室防止裂缝措施	429
40. 大型体育场的抗裂防渗施工技术	431
41. UEA-H 补偿收缩混凝土在逆作法施工中的应用	434
42. 补偿收缩混凝土在长沙通程商业广场工程中的应用	438
43. 大庆商城超市 UEA 混凝土工程的裂缝控制	441
44. UEA 混凝土在长春亚泰杏花园高层住宅楼工程的应用	444
45. 沈阳桃仙国际机场航站楼超长地下室结构抗裂防渗施工技术	448
46. 双向超长大体积混凝土的浇筑与裂缝控制	452

第四章 膨胀剂在高性能混凝土中的研究与应用

1. UEA 补偿收缩超高强混凝土的研究	455
2. 补偿收缩高强混凝土的研究	460
3. 膨胀剂与细掺料双掺对氯离子在高性能混凝土中扩散性能的影响	466
4. 高强硅粉抗磨蚀混凝土的开裂与防止措施	470
5. 徐州金穗大厦地下工程高性能补偿收缩混凝土应用	475
6. 某商住大厦转换层板的混凝土施工	480
7. AEA 高性能混凝土在大体积混凝土工程中的应用	486
8. UEA-H 在重庆渝澳大桥工程应用	491
9. C40 免振捣混凝土变形研究	495
10. UEA 高性能混凝土在立交桥冬施中的应用	499
11. 补偿收缩高性能大体积混凝土在深圳世贸广场中的应用	503
12. 高性能混凝土裂缝成因分析与对策	508

第五章 标准与规范

1. 《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—2001	511
2. 《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—2001 编制说明	521
3. 《混凝土外加剂应用技术规范》GBJ 50119—2002 (8) 膨胀剂部分	526
4. 《水运工程混凝土施工规范》JTJ 268	534

我国混凝土膨胀剂的发展近况和前景

游宝坤

一、前言

1998年10月5~10日,中国土木工程学会及预应力混凝土外加剂专业委员会在南昌市召开了第二届全国混凝土膨胀剂学术交流会,并出版了论文集。中国工程院吴中伟院士是我国膨胀混凝土研究的奠基人,他提出了“混凝土补偿收缩模式”的学术观点,撰写了《补偿收缩混凝土》^[1]与《膨胀混凝土》专著^[2],他指导了UEA等混凝土膨胀剂研究、开发和应用,为解决混凝土工程的抗裂防渗问题作出了重大贡献。他对我国混凝土膨胀剂的发展十分关注,尽管他身体不适,仍欣然应邀出席上届年会,并在会上作了重要的学术报告。他希望我们应总结经验教训,把我国补偿收缩混凝土的研究与开发应用提高到一个新水平。不幸的是病魔夺走了他的宝贵生命,我们永远怀念他。他是中国混凝土科学一代宗师,他给我们留下了许多学术成就和精神财富,值得我们永远学习。

二十年来我国混凝土膨胀剂研制和开发应用取得了哪些成绩,存在些什么问题,今后膨胀剂的发展方向如何?这是本届学术交流会的任务。

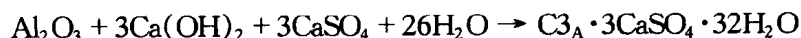
二、混凝土膨胀剂的研制

中国建筑材料科学研究院和其他科研、大学单位对提高我国混凝土膨胀剂质量做了许多工作,回顾20年历程,膨胀剂的质量发展经历了高碱高掺、中碱中掺和低碱低掺的三个阶段,见表1。

表1 我国膨胀剂质量的发展

阶 段	年 份	碱含量 (%)	掺量 (%)	品 牌 代 表
高碱高掺	1980~1985	1.53~1.80	15~20	EA—L
中碱中掺	1986~1997	0.8~1.0	10~12	UEA—I、UEA—II、AEA、CEA、PNC、FS
	1998~2000	0.50~0.75	10~12	UEA—III、AEA、CEA、PNC、HEA
低碱低掺	2000~	0.25~0.50	6~8	UEA—H、ZY、CSA、FEA、HF

膨胀剂的质量与其生产工艺有密切关系。我国绝大多数生产硫铝酸盐型膨胀剂,其膨胀源是钙矾石($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$),除石膏质量外,其活性高低主要取决于铝质膨胀熟料的质量。从钙矾石形成的普通反应式可知:



CaSO_4 由石膏提供, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 主要由水泥中 C_3S 和 C_2S 水化析出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提供, 而 Al_2O_3 则由铝质膨胀组份提供。虽然水泥中含有 5%~10% C_3A , 但它水化很快, 在混凝土塑性阶段已形成钙矾石, 对膨胀基本无贡献。因此, 要提供额外含铝组份, 经作者理论计算和试验^[1], 在硅酸盐系统中要形成不少于 25% 钙矾石才能使水泥产生体积膨胀。在 Al_2O_3 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 足量条件下, 钙矾石形成数量取决于水泥-膨胀剂体系中 SO_3 的数量。硅酸盐水泥体系的胀缩临界值 $\text{SO}_3 = 4.78\%$ 。一般水泥中含有 4%~6% 二水石膏作缓凝组分, 相应带入 SO_3 , 约有 2%~3%, 因此, 膨胀剂组分应补充 $\text{SO}_3 = 2.5\% \sim 3.5\%$, 才能使水泥石产生足够的膨胀, 见图 1。试验表明, 石膏的溶解速度快, 钙矾石形成的速度也快, 有效膨胀效能降低。所以, 我国膨胀剂都以含杂质较少, 溶解速度较慢的硬石膏作为膨胀组分。硬石膏中 $\text{SO}_3 \geq 48\%$ 。

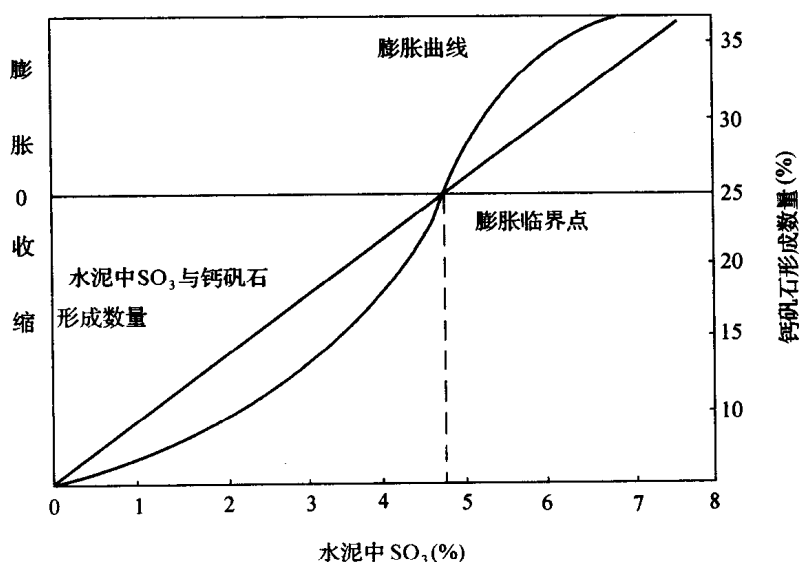
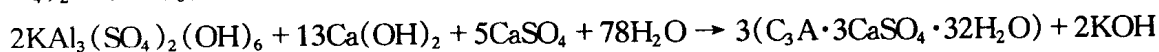


图 1 水泥中 SO_3 与钙矾石和胀缩关系

我院研究表明^[4], 钙矾石的形态、生成速度和数量对水泥膨胀有直接影响。当水泥-膨胀剂系统中 CaO 和 CaSO_4 满足条件下, 膨胀速率和大小主要取决于含铝组分的活性高低和数量。所以, 膨胀剂的质量与含铝组分有直接关系, 由此形成我国混凝土膨胀剂研究的发展史。

在 80 年代初, 安徽省建筑科学研究院在我院的明矾石膨胀水泥基础上, 研制成功明矾石膨胀剂 (EA—L)^[5], 它是以明矾石作含铝组分, 明矾石主要矿物为硫酸铝钾 $[\text{2KAl}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_6]$, 它在碱和硫酸盐激发下形成钙矾石, 水化反应如下:



但这种膨胀剂效能较低, 掺量为 15%~20%, 碱含量达 2.5%~3.0%, 目前已淘汰。

1985~1988 年, 中国建材院先后研制成功复合膨胀剂 (CEA)^[6], 铝酸钙膨胀剂 (AEA)^[7] 和 U 型膨胀剂 (UEA)^[8]。CEA 是用含有 $f\text{CaO} = 30\% \sim 40\%$ 的高钙膨胀熟料与明矾石和石膏磨制而成, 以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石作为膨胀源, 属氧化钙-硫铝酸钙类膨胀剂, 曾在北京有三家生产。AEA 是用高铝水泥熟料, 明矾石和石膏磨制而成, 高铝水泥熟料中

的铝酸钙 CA 和 CA₂ 分别与石膏水化反应生成钙矾石而产生膨胀。目前, 在国内有 10 多家生产 AEA 膨胀剂。CEA 和 AEA 掺量为 10%~12%, 碱含量 0.4%~0.8%。

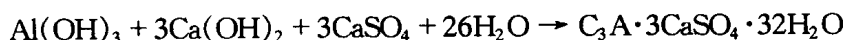
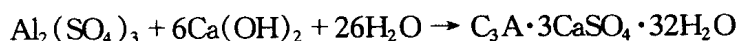
UEA 膨胀剂的膨胀源也是钙矾石, 但其生产工艺有了更新换代的发展。

第一代 UEA—I 膨胀剂是用硫铝酸钙 (CSA) 膨胀熟料, 明矾石和石膏磨制而成, 其中 CSA 熟料是用石灰石、矾土和石膏配制成生料, 在回转窑经 1350℃ 左右煅烧而成, 熟料中主要矿物为硫铝酸钙 (C₄A₃S̄), fCaO 和 fCaSO₄, 它们按下式水化反应形成钙矾石:

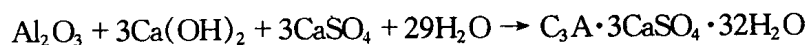
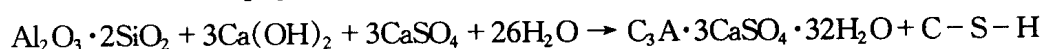
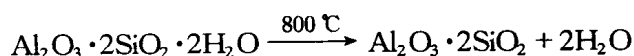


我们是根据吴中伟院士提出的“干缩和冷缩联合补偿模式”设计 UEA 工艺配方, 水化较快的 C₄A₃S̄ 主要补偿混凝土冷缩, 而水化较慢的明矾石主要补偿混凝土干缩。UEA—I 曾在石家庄市特种水泥厂生产。

鉴于 CSA 熟料在生产过程中逸出较多 SO₃, 对环境有污染, 1989 年我们研制第二代 UEA—II^[9], 它是用硫酸铝盐熟料, 明矾石和石膏磨制而成, 其中硫酸铝熟料是用天然明矾石经 700~800℃ 煅烧而成, 熟料中的 Al₂(SO₄)₃, Al(OH)₃ 与 CaSO₄ 和 Ca(OH)₂ 水化反应生成钙矾石, 水化反应式如下:



UEA—II 具有双膨胀效能, 掺量为 10%~12%, 但它的缺点是水化较快, 造成混凝土坍落度损失较大, 另外, 它碱含量较高, R₂O=1.7%~2.0%, 对碱—集料反应带来不利影响, 所以, 我们在 1995 年研制成功第三代 UEA—III, 又名硅铝酸盐膨胀剂 (专利号 ZL 91110609)^[9], 它是在 800~900℃ 高温下煅烧高岭土、明矾石和石膏或用煅烧高岭土和石膏磨制而成。高岭土经煅烧脱水后, 生成偏高岭石 (Al₂O₃·2SiO₂) 和 Al₂O₃, 在碱和硫酸盐激发下生成钙矾石:

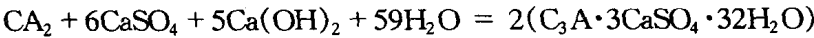


由于煅烧高岭土的碱含量 R₂O = (Na₂O + 0.658K₂O) = 0.5%~0.8%, 所以, UEA—III 的碱含量 < 0.75%。成为低碱膨胀剂。其掺量为 10%~12%, 具有较好的补偿收缩性能, 对混凝土坍落度损失较小, 基本不存在碱—集料反应。目前, 有 20 多个厂家生产第三代 UEA 膨胀剂。

1990 年后, 山东省建科院和山东省建材院分别研制成功 PNC 和 JEA 膨胀剂。浙江工业大学的 TEA, 中国建筑科学研究院的 JP—II, 北京利力公司的 FS—III, 北京祥业公司的 PPT—III, 江西省建材院和江西武冠新材料有限公司的 WG—HEA, 北京新中洲建材公司的 HEA—I 等 10 多个牌号膨胀剂进入市场。尽管这些膨胀剂的工艺配方没有公开, 但据我了解, 大多属于硅铝酸盐膨胀剂。

为适应市场之需, 我院北京中岩特材公司在 2000 年研制成功第四代 UEA—H, 又名 ZY[®] 膨胀剂。它是用改性铝酸钙—硫铝酸钙熟料和石膏磨制而成, 其中熟料是用矾土、石灰石和石膏配制成生料, 在回转窑中经 1340~1380℃ 煅烧成特种膨胀熟料, 其主要矿物组成

为铝酸钙 CA 和 CA_2 ，以及硫铝酸钙 $C_4A_3\bar{S}$ ，这三种含铝矿物的水化速度不同，它们分别与 $CaSO_4$ 水化生成钙矾石：



ZY 膨胀剂具有较大的膨胀能，其掺量为 6%~8%，碱含量为 0.2%~0.4%，属于低碱低掺量膨胀剂，已正式投入生产。目前我院又研制成功低掺量 8% 的高效 AEA。我国主要膨胀剂的组成见表 2。

表 2 我国主要膨胀剂的组成

膨胀剂品种	品 牌	基本组成	标准掺量 (%)	碱含量 (%)
明矾石膨胀剂	EA—L	明矾石、石膏	15	2.5~3.0
U—I 型膨胀剂	UEA—I	硫铝酸钙熟料、明矾石、石膏	12	1.0~1.5
U—II 型膨胀剂	UEA—II	硫酸铝盐熟料、明矾石、石膏	12	1.7~2.0
U—III 型膨胀剂	UEA—III	硅铝酸盐熟料、明矾石、石膏	12	0.5~0.75
硫铝酸钙膨胀剂	CSA	硫铝酸钙熟料、石膏	8	0.4~0.6
ZY 膨胀剂	ZY	铝酸钙—硫铝酸钙熟料、石膏	8	0.3~0.5
复合膨胀剂	CEA	石灰系熟料、明矾石、石膏	10	0.4~0.70
铝酸钙膨胀剂	AEA	高铝水泥熟料、明矾石、石膏	10	0.5~0.70

与此同时，唐山北极熊特种水泥公司生产类似日本的硫铝酸盐膨胀剂 (CSA)。石家庄功能建材公司生产以高铝水泥熟料、硫铝酸盐熟料、石膏和分散剂的 FEA 膨胀剂。天津豹鸣建材公司、南京特材公司、重庆江北特种建材公司、山东寿光利飞混凝土外加剂公司等也已生产低掺 UEA 膨胀剂。

研究和生产实践表明，低碱低掺膨胀剂必须采用回转窑生产的含铝膨胀熟料，不但膨胀效能高，而且质量较稳定，这应是我国膨胀剂生产的发展方向。

三、《混凝土膨胀剂》标准的沿革

1992 年以前，我国尚未制定《混凝土膨胀剂》建材行业标准，只有企业标准，产品质量无可比较。为提高我国混凝土膨胀剂质量与监督，1991 年国家建材局向我院下达了制定《混凝土膨胀剂》建材行业标准，我院与有关科研和生产厂家开展了研究，并参考日本《混凝土膨胀剂》JIS A6202—1980 的标准，结合我国水泥标准的国情，提出了我国膨胀剂性能的统一试验方法，通过对大量的试验结果数理统计，于 1992 年制定了我国第一个《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—92。但这个标准水平较低，对膨胀剂掺量和碱含量没有限制指标。当时，膨胀剂质量差异较大，水平较低。

随着我国对碱—骨料反应的重视，1997 年国家建材局下达了《混凝土膨胀剂》标准修订的任务，我院与兄弟单位通过试验研究，并参考日本《混凝土膨胀剂》新标准 JIS A6202—1997，在 1998 年制定了我国第二个《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—1998，这个修改标准第一次把膨胀剂掺量规定 $\leq 12\%$ ，碱含量 $\leq 0.075\%$ ，氯离子含量

≤0.005 0%。并把多功能的复合膨胀剂列入标准。这样，把我国混凝土膨胀剂提高到一个新水平，淘汰一些落后产品。

1999 年，我国水泥标准发生巨大变化，向国际接轨，我国实施 ISO 水泥标准后，标准砂、水灰比和水泥强度等级与原标准有很大不同。为了使混凝土膨胀剂标准与 ISO 水泥标准接轨，1999 年国家建材局第三次下达修改标准的任务，我院与兄弟单位开展了试验研究，于 2001 年制定了第三个《混凝土膨胀剂》建材行业标准 JC 476—2001（详见本论文集），这一新标准特点是采用 ISO 标准砂，调整了水灰比，强度指标有所下调，要求膨胀性能更高，测量膨胀率的比长仪从百分表改为千分表，仪器的构造和精度更好。鉴于掺入化学外加剂的“复合膨胀剂”检测方法和指标与本标准不大相容，故从新标准中取消。

表 3 混凝土膨胀剂标准的沿革

项 目			中国标准 JC 476			日本标准 JIS A6202	
化 学 成 分	氧化钡, %, 不大于 含水量, %, 不大于 烧失量, %, 不大于 总碱量, %, 不大于 氯离子, %, 不大于		1992	1998	2001	1980	1997
			5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
			3.0	3.0	3.0	/	/
			/	/	/	3.0	3.0
			/	0.75	0.75	/	0.75
			/	0.05	0.05	/	0.05
细度 (mm)	比表面积, m ² /kg, 不小于		250	250	250	200	200
	0.08 mm 筛余, %, 不大于		10	10	12	/	/
	1.25 mm 筛余, %, 不大于		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
物 理 性 能	凝结 时间	初凝, min, 不早于	45	45	45	60	60
		终凝, h 不迟于	10	10	10	10	10
	限制 膨胀率 (%)	水中 7 d $\geq$	0.020	0.025	0.025	0.030	0.025
		28 d $\leq$	/	0.10	0.10	/	/
		空气中 21 d $\geq$	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.015
	抗压强度 (MPa)	7 d $\geq$	30	25	20	6.9	22.5
		28 d $\geq$	48	45	40	29.4	42.5
	抗折强度 (MPa)	7 d $\geq$	5.0	4.5	3.5	/	/
		28 d $\geq$	6.8	6.5	4.5	/	/
膨胀剂掺量			/	≤ 12	≤ 12	≤ 10	≤ 10

我国《混凝土膨胀剂》标准在 10 年内进行了三次修订（详见表 3），大大促进了我国膨胀剂质量水平的提高，今后，希望各生产厂家严格执行 JC 476—2001 标准，各质检部门要严格监督。

四、混凝土膨胀剂生产发展

混凝土膨胀剂研究的不断进步和《混凝土膨胀剂》标准的三次修订，促进了我国混凝土

膨胀剂的生产发展。从 1998 年以后,我国开始生产低碱膨胀剂 ($R_2O \leq 0.75\%$),规定掺量 $\leq 12\%$ 。这样,把我国膨胀剂质量提高到一个新水平。各厂家根据当地原料资源,采用高铝水泥熟料,硫铝酸盐熟料,煅烧高岭土,高铝煤矸石等含铝熟料(熟料中 $Al_2O_3 \geq 35\%$)。明矾石是一种好原料,但其含钾、钠较多,掺量小于 10% 也能满足标准要求。但明矾石品位要达二级以上 ($Al_2O_3 \geq 17\%$, $SO_3 \geq 16\%$)。我国绝大多数厂家生产硫铝酸盐类膨胀剂。

氧化钙-硫铝酸盐膨胀剂(如 CEA)在北京有三家生产,但有一家因对石灰系熟料控制不严,出现因 $fCaO$ 后胀破坏混凝土的工程事故。所以,北京市建委下文规定,CEA 膨胀剂经检验水泥安定性合格才能使用。采用 CaO 和 MgO 作膨胀剂,煅烧工艺要十分严格,否则,易出现后期胀裂的工程事故。值得注意。

事实上,我国膨胀剂质量水平与日本膨胀剂有一定差距。我院对比试验表明,在限制膨胀率相当水平下,日本 CSA 膨胀剂掺量为 7%~8% 掺入混凝土中约 30 kg/m^3 ,而我国大部分膨胀剂掺量为 10%~12%,掺入混凝土中约 $40\sim 45\text{ kg/m}^3$,替代水泥量较多,对混凝土坍落度和早期强度带来负面影响。所以,我国膨胀剂的质量及其稳定性有待进一步提高。

2002 年初,我院的北京中岩特材公司研制并投入生产低碱低掺量的 ZY 膨胀剂,其掺量为 6%~8%,在北京、深圳、广州、天津和石家庄等重大工程应用成功,其补偿收缩性能良好,对混凝土坍落度损失影响小,并有一定增强作用,受到用户好评。与此同时,一些兄弟厂家也生产低掺膨胀剂。由此,我国已进入生产低掺低碱膨胀剂的时期。2000 年北京市建委规定,掺量 $\leq 8\%$ 的膨胀剂才准入北京建筑市场。

据不完全统计,我国约有 80 多个膨胀剂生产厂家,年销 5 000 吨以上有 30 多家骨干企业,其中销售万吨级厂家有天津豹鸣建材公司、北京中岩特材公司、重庆江北特种建材公司、山东寿光市利飞混凝土外加剂公司、上海白水泥公司、沈阳天柱山混凝土外加剂公司、南京特材公司、江西省瑞州特种建材公司,安徽庐江特材厂、山东建研院混凝土外加剂公司、江西武冠新材料有限公司、浙江荆山建筑外加剂厂等。膨胀剂品牌有 UEA、ZY、AEA、CEA、PNC、HEA、FEA、FS-Ⅲ、JP-Ⅱ、PPT-Ⅲ、TEA、JEA 和 CSA 等。其中《UEA》、《ZY》为我院注册商标。另有部分厂家用膨胀剂与减水剂复合,以抗裂防水剂进入建筑市场。

鉴于 1999 年以后,我国大规模的基础设施、城市改造和房地产业的兴起,涉及众多的抗裂防渗工程,因而促进了混凝土膨胀剂的生产,见图 2。据不完全统计,全国年销量在 1998 年约 30 万吨,到 2001 年达 40 万吨,四年内累计约 150 万吨。加上从 1980~1997 年累计生产的 150 万吨,我国在工程上应用膨胀剂已达 300 万吨,其中 UEA、ZY 和 AEA 年销量约占 70%。以平均 40 kg/m^3 计,折合补偿收缩混凝土约 7 500 万立方米。由此可见,我国混凝土膨胀剂近年生产仍保持良好的发展势头。

为加强生产管理规范化和提高产品质量,目前已有一批膨胀剂生产企业通过 ISO 9002 认证,它们是天津豹鸣建材公司、北京中岩特材公司、重庆江北特种建材公司、南京特材公司、上海白水泥公司、江西省瑞州特种建材公司、山东寿光市利飞混凝土外加剂公司、江西武冠新材料公司、山东省建研院混凝土外加剂公司、浙江荆山建筑外加剂厂、浙江兰溪特种水泥公司、沈阳天柱山混凝土外加剂公司、西安红旗混凝土外加剂厂、昆明嘉生混凝土外加剂公司、广西横县白水泥公司等。我们希望更多企业通过 ISO 9002 认证,增加企业知名度,为提高我国混凝土膨胀剂质量作出新贡献。