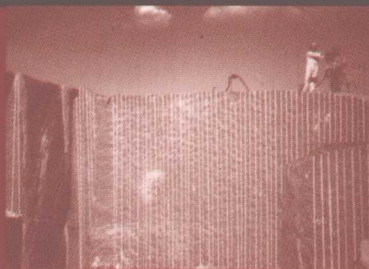


Jingtai Baopo Jishu
Wusheng Posuiji Jiqi Yingyong

静态爆破技术—— 无声破碎剂及其应用



游宝坤 著

中国建材工业出版社

静态爆破技术

——无声破碎剂及其应用

游宝坤 著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

静态爆破技术——无声破碎剂及其应用/游宝坤著.

—北京:中国建材工业出版社,2008.4

ISBN 978-7-80227-415-0

I. 静... II. 游... III. 静态爆破—爆破技术
IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 018556 号

内 容 简 介

本书全面、详细、系统地介绍了无声破碎剂及其静态爆破技术。从静态爆破技术发展概况,无声破碎剂的物理化学性能,无声破碎剂的研制、生产工艺、水化和膨胀机理、破碎机理,以及无声破碎剂膨胀压的影响因素等方面阐述了静态破碎的原理、技术、方法和工程实例,为国内填补了空白,为从事无声破碎剂的研制、生产和推广应用的科技工作者和工程技术人员提供了一本权威读物。

静态爆破技术

——无声破碎剂及其应用

游宝坤 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:12

字 数:292千字

版 次:2008年4月第1版

印 次:2008年4月第1次

书 号:ISBN 978-7-80227-415-0

定 价:30.00元

本社网址:www.jccbs.com.cn

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



游宝坤，1938 年出生，广东省中山市人。中国建筑材料科学研究总院教授级高级工程师，享受国务院特殊津贴专家；中国硅酸盐学会膨胀与自应力混凝土专业委员会名誉主任，长期从事膨胀—自应力水泥和混凝土膨胀剂的研究，是我国混凝土膨胀剂的学术带头人；我国无声破碎剂（SCA）主要发明者，开创了我国无声破碎技术——被应用于混凝土岩石安全拆除和花岗石、大理石等石材荒料的开采。在国内外发表论文百余篇，著作三部。

责任编辑 吕佳丽 朱文东

封面设计 意博视觉

前 言

爆破的发展有三个里程碑。第一个里程碑是我国古代四大发明之一的黑火药,它是爆破技术的先驱,是人类社会将化学能转化为机械能的首次实践;第二个里程碑是十九世纪六七十年代,瑞典人诺贝尔先后发明了硝化甘油炸药和雷管,以及随后出现各种工业炸药,这使得爆破技术有了长足的进步,取得了惊人的成绩;第三个里程碑是近一二十年来各种控制爆破的出现,它是通过一定的技术措施,严格控制爆炸能量和爆破规模,达到质量上、数量上、时间上和方向上的控制爆破,它大大改变了爆破技术的面貌,使得人们能够把爆破技术运用到城市人口稠密地区,运用到改建和扩建工程中来。控制爆破是日本人最先提出来的,但是,无论从控制爆破的综合技术和规模上,我国都处于国际领先水平^[1]。

炸药和雷管爆炸时,在极短的时间里释放出极高的能量,产生极大的压力,因而引起“乱石横飞,硝烟弥漫”。后来,人们研制高能燃烧剂,它主要以金属氧化剂和金属还原剂组成,这种高能燃烧剂的反应热大于炸药,而燃烧速度却是炸药的百分之一,是一种低速“炸药”,在爆破物体时,仅产生少量的声响、震动、炮烟和飞石,燃烧剂组分(以铝和镁为主要成分)均为无机物,不会产生有毒气体,也不需要雷管起爆。这是控制爆破技术的一大进步^[2]。

然而,不管炸药还是高能燃烧剂,在爆破时都会产生声响、震动、炮烟和飞石,对环境产生有害影响。特别是在有人、有建筑物、设备和交通要道附近,用炸药爆破混凝土构筑物是非常困难的。为保护矿山资源,用炸药开采花岗石、大理石等石材荒料也是不允许的。因此人们渴望研制出一种安全、可靠的静态“爆破剂”。

1981年,原中国建筑材料科学研究院在膨胀水泥的研究基础上,研制成功无声破碎剂(Soundless Cracking Agent,简称SCA),1983年该成果通过部级技术鉴定^[3]。SCA是一种由无机化合物和有机化合物组成的膨胀粉末,它与水拌成浆体,灌入混凝土或岩石的钻孔中,产生固体膨胀和30MPa以上的膨胀压,经过6~24h便可在无震动、无噪声、无飞石和无毒气的情况下,把混凝土和岩石破碎。专家们一致认为:“SCA对爆破技术是一项重要的补充和发展,填补了我国一项空白,有广阔的实用意义。”无声破碎剂(SCA)自1983年投入工业生产已有25年历史,总销量超过20万t以上,主要应用于石材荒料开采和混凝土的破碎。

无声破碎剂是什么,它运用了什么原理,它又是怎样生产出来的,它的性能如何,它可应用于哪些领域,采用什么样的技术,经济效果如何等,是不少同仁十分关心的问题。尽管已有一些文章发表,但是,在国内外至今尚没有一本专著全面、详细、系统地介绍无声破碎剂及其静态爆破技术。

作者和王延生教授级高级工程师是“无声破碎剂及其应用”研究组负责人,研究组成员有张桂清、郑喜生、江云安、韩立林和檀黎五位高级工程师。参与生产开发和推广应用的还有北京宇翼特种水泥厂的刘长旺、曾成斌、赵文元、王光礼等,北京中岩特种工程材料公司的陈旭峰、黄春江、马魁宏、齐冬友、刘绪光等;石家庄市功能建材有限公司的李乃珍、张志征、王保全、

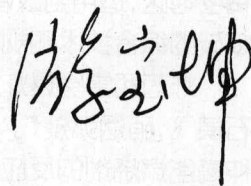
谢敬坦、雷亚光、张立新等。

今年我刚好 70 岁,差不多有大半生是开发和研究膨胀剂和无声破碎剂技术,2005 年,为支援三农,写了《石材无声切割技术》一书,已由中国建材工业出版社出版。无声破碎剂(SCA)及其应用技术,是对爆破技术的一项重要补充和发展,是一门独立学科。本书对此进行了全面、系统的阐述,以期为我国经济建设做出有益的贡献。

本专著的出版,填补了国内外这一学科著作的空白,同时,也希望今后能看到更新的本学科著述。应该说明,无声破碎剂技术发展的成就,不仅仅是个人努力的结果,而是集体智慧的结晶,我衷心感谢上述提及的同事和从事无声破碎剂研制、生产和推广应用的科技工作者和工程技术人员。

本著作的出版,得到北京宇翼特种水泥厂、北京中岩特种工程材料公司和石家庄市功能建材有限公司的大力支持,谨此衷心感谢。

作者



2008.1 于北京

目 录

第一章 静态爆破技术发展概况	1
第二章 无声破碎剂的物理化学性能	5
第一节 无声破碎剂的膨胀源选择	5
第二节 氧化钙的物化性能	7
第三节 破碎剂的种类	9
第三章 无声破碎剂的研制	12
第一节 原料与试验方法	12
第二节 矿物组成的计算	13
第三节 矿物组成的选择	14
第四节 粉磨比表面积对产品性能的影响	17
第五节 外加剂的选择	18
第六节 无声破碎剂的型号	19
第七节 高效无声破碎剂(HSCA)的研制	19
第八节 HSCA 生产工艺的改进	22
第四章 无声破碎剂的生产工艺	24
第一节 复合型破碎剂生产工艺	24
第二节 回转窑生产工艺	24
第三节 立窑生产工艺	29
第四节 隧道窑生产工艺	30
第五节 国内无声破碎剂生产现状	30
第六节 无声破碎剂建材行业标准	32
第五章 无声破碎剂的水化和膨胀机理	37
第六章 无声破碎剂的破碎机理	44
第一节 固体膨胀的静态试验	44
第二节 数理分析	47
第三节 混凝土和岩石的破碎机理	51
第四节 贵重石材荒料无声切割机理	55

第七章 无声破碎剂膨胀压的影响因素	59
第八章 无声破碎工程设计	64
第一节 混凝土构筑物破碎工程设计	64
第二节 岩石的破碎工程设计	69
第三节 冬季破碎工程设计	72
第四节 影响破碎效果的因果分析	73
第九章 石材无声切割法	75
第一节 前言	75
第二节 我国石材工业发展近况	75
第三节 石材地质和石材的工程性质	77
第四节 石材荒料开采技术	81
第五节 SCA 开采荒料的方法	82
第六节 钻孔参数设计理论计算	88
第七节 SCA 使用量概算方法	92
第八节 SCA 型号的选择	93
第九节 SCA 施工方法	93
第十节 石材无声切割施工机具	96
第十一节 石材无声切割法的应用实例	98
第十二节 SCA 无声破碎法的技术经济分析	106
第十三节 结语	107
附录一 无声切割法(SCM)开采石材荒料技术规程	107
第十章 控制爆破与静态破碎的联合应用技术	110
第一节 控制爆破技术	110
第二节 静态破碎技术	112
第三节 控爆与静态破碎技术的联合应用	113
第四节 工程实例	113
第十一章 混凝土桩头静态破碎方法	117
第一节 日本水泥公司提出的施工法	117
第二节 日本住友水泥公司提出的施工方法	120
第三节 无声破碎剂拆除桩头施工法(PSCM)	123
第十二章 静态破碎剂在桥梁加固工程中的应用	127
第一节 自应力混凝土概念	127
第二节 掺静态破碎剂的混凝土性能	128

第三节 自应力钢管混凝土的性能.....	131
第四节 工程应用.....	134
第十三章 快速破碎方法的研究与应用.....	136
第十四章 无声破碎剂的工程应用.....	141
第一节 国外工程中的应用.....	141
第二节 国内工程中的应用.....	146
第十五章 静态破碎技术的发展前景.....	178
参考文献.....	180

第一章 静态爆破技术发展概况

凡是刚性物体断裂时,都会发出声音,以炸药或高能燃烧剂为载体的爆破,发出几百分贝以上的声响,伴随震动、炮烟和飞石,称之为动态爆破。以无声破碎剂为载体的固体膨胀,在刚性体断裂时,也会发出几分贝的声响,但一般人的听觉是听不出来的,称之为静态爆破。为通俗易懂,称之为无声破碎更为贴切。不管怎样,静态破碎应属爆破范畴。

在没有发明黑火药之前,人类祖先就是用最原始的办法破碎石头,例如用烈火燃烧石头,用冷水泼淋,石头会产生温差应力,使石头碎裂。或者用水灌入岩石裂缝中,水结成冰产生冻胀,使石头碎裂,然后用人工磨制成打猎或生活用石器。早在几千年前,古代埃及劳动人民在建造金字塔时,为了采岩石,他们先在岩石上钻孔,然后把干燥木棒插入孔中并注水,木棒吸水膨胀,其膨胀压力促使岩石裂开。这些原始方法开创了静态破碎的先河。然而,它的效率极低,受天然条件影响很大,自然就被淘汰了。

中国人发明了黑火药,开创了爆破技术的先河,瑞典人诺贝尔发明了硝化甘油炸药,以及后来出现各种工业炸药,这使得爆破技术有了巨大发展。除用于军事战争外,应用于开山凿渠,筑路建坝。近 50 年来,随着城市建设扩大和工业发展,工业与民用建筑的混凝土拆除和石材荒料开采的需求量也越来越多,技术要求也越来越高,对环保影响很大的爆破技术受到了限制。尽管凿岩机、重锤等机械方法可拆除房屋和废旧混凝土基础,但它发出的巨大撞击声,对环境的影响也很大。人们希望出现一种静态“爆破”方法,无声无息地把东西拆除。显然,人们必须找寻一种有别于炸药的破碎载体,能使物体安全断裂开来。这就是本书介绍的无声破碎剂及其静态破碎技术。

在人类科学技术的发展史上,唯物辩证法的思维往往创造出许多发明。在水泥化学中,人们发现受海水侵蚀的混凝土码头开裂破坏的原因,是由于形成“水泥杆菌”——膨胀性结晶钙矾石($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)。1936 年,法国的 H. Lossier 利用形成钙矾石的原理,发明了减少混凝土收缩裂缝的膨胀水泥,即把有害的东西变成有益的发明。而今,日本和我国发明了 CSA、UEA、AEA、ZY 等膨胀剂,适量掺入水泥中,可拌制成膨胀混凝土控制有害裂缝,提高建筑结构的抗裂防渗能力,目前已在我国大量应用^[4]。我国混凝土科学一代宗师吴中伟院士指出,膨胀水泥是唯物辩证法运用在水泥化学中的最典型例证^[5]。在这样的启示下,能否利用水泥浆体的膨胀把刚性物体胀裂开来呢?

人们发现,水泥中的游离氧化钙($f-CaO$)过多时,由于高温煅烧的石灰会慢慢水化形成氢氧化钙 $[Ca(OH)_2]$,会使混凝土胀裂,导致结构破坏。在这样的启示下,1968 年,日本技研兴业研究所的田中秀男^[6]最先研究静态破碎剂,他用生石灰与水拌制成浆体,填充到钻孔中,通过 CaO 水化生成 $Ca(OH)_2$,产生膨胀压使混凝土破坏。后来,田中毛见等人把波特兰水泥、石膏、 CaO 、CSA 膨胀剂、赤泥与水拌合,使其产生体积膨胀。上述方法,由于膨胀压低,工艺复杂,未能实用化。日本《陶瓷》杂志在 1980 年报道了小野田、住友公司研制的一种无公害静态破碎剂,可产生 30MPa 的膨胀压,但未透露其制造方法。日本河野俊夫^[7]在 1982 年报道了小

野田水泥公司研制 Bristar 破碎剂的部分资料。到目前,日本已有五家公司生产这种静态破碎剂。美国康塔克工业公司,购买了日本的专利,在 1984 年也开始生产 Bristar 破碎剂。前苏联、波兰、法国等相继研制出这种产品。

在我国,中国建筑材料科学研究总院水泥科学研究所于 1981 年率先研制无声破碎剂。王延生、游宝坤、张桂清等在膨胀水泥研究成果的基础上,通过试验室的研究,优选膨胀力最大的 $f\text{-CaO}$ 作膨胀源,初步确定了生产工艺。1982 年在原中国建材院水泥中间试验厂进行了两次工业试制,研制成功了无声破碎剂(SCA)。SCA 在 80 多个破碎工程中应用,破碎混凝土和岩石约 2500m^3 ,获得了良好的效果,于 1983 年初通过了部级技术鉴定^[8]。

无声破碎剂研制成功后,《北京日报》、香港《成报》等媒体进行了大量报道,称中国制成无声破碎剂,爆石科学一大突破,引起国内外的巨大关注。国内数百家企业和个人写信或上门求教,有英国、原联邦德国、瑞士、芬兰、挪威、印度等国家和地区的二十二家公司要求技术转让,购买专利。为适应国内外用户的需要,1983 年无声破碎剂(SCA)在中国建筑材料科学研究总院琉璃河水泥中间试验厂(现改为北京宇翼特种水泥厂)正式投产。近年,北京中岩特种工程材料公司和石家庄市功能建材有限公司生产高效无声破碎剂(HSCA),这些厂都是用回转窑烧成特种膨胀熟料,再加其他辅料磨制成无声破碎剂,其质量稳定,破碎效率高。产品主要供应国内用户,同时出口到美国、加拿大、澳大利亚、巴西、沙特阿拉伯等国家和中东地区,每年销量约 10000t 以上。

我们是研制特种水泥的科技人员,对爆破知识不懂。我们边学习爆破施工技术,边到现场实践。逐渐掌握了无声破碎工程设计,提出了不同破碎物的钻孔参数和施工方法。为推广无声破碎技术,我们在 1983 年编写了《无声破碎剂的性能与应用》^[9]、《无声破碎剂应用技术》^[10],1985 年编写了《石材无声切割法》,作者主编的《无声破碎工程通讯》出版了 11 期。中国建筑材料科学研究总院在 1983 年、1985 年和 1986 年分别在天津、西安和哈尔滨召开三次全国无声破碎技术合作交流会。并举办多次无声破碎剂应用技术培训班,培养了一批骨干队伍。为满足城建改造和工厂设备更新的需要,我院与有关施工单位合作,在北京、上海、广州、南京、福州、西安、天津、哈尔滨、吉林、重庆、辽阳等 20 多个城市建立无声破碎技术服务中心,在我们的指导下,承包混凝土和岩石破碎工程,受到社会各界人士欢迎。

与此同时,我们深入广东罗定、云浮,山东青岛,河南南阳等地的大理石矿和花岗石矿,指导他们用 SCA 开采石材荒料,收到立竿见影的效果,这种非破损开采方法,与爆破法相比提高了几倍成材率,与人工凿楔法相比,工效提高 4~5 倍,受到石材矿山欢迎,已在全国推广,意大利、巴西、沙特阿拉伯等国家也引进了这种方法。2005 年,作者总结这方面成果,出版了《石材无声切割技术》专著^[11]。

总之,水泥是用于建筑物的,而水泥系膨胀破碎剂是用于破碎、解体构筑物 and 岩石。建设—破坏—建设交替循环,水泥工业深深地把这两者联结起来,充分体现了唯物辩证论在科学技术领域的生命力。

北京日报

BEIJING RIBAO

1983年12月

6

星期二

癸亥年十一月初三

北京地区天气预报

白天 晴
风向 北转南
风力 二三级

夜间 晴
风向 南转北
风力 一二级

最高气温 11℃

最低气温 零下1℃

7日, 晴间多云

北京“无声爆破”开花结果

在全国重点建设中广泛采用显示“特异功能”
在国外也引起广泛注意, 纷纷要求订货购买专利

据新华社武汉12月5日电 (记者李永长)
北京建筑材料科学研究院研制成功的“无声爆破”在我国重点工程建设中得到广泛采用, 为加速重点工程建设作出了贡献。

近年来, 在长江葛洲坝水利枢纽工程、引滦入津工程、宝山工程、兰州炼油厂工程、北京至秦皇岛铁路工程等重点工程建设项目中, “无声爆破”成功地显示出它的“特异功能”。今年五月, 在葛洲坝枢纽主体工程建筑物三江船闸提升楼附近的坝体上, 有一块体积约二十立方米的钢筋混凝土需要炸除。但这里的环境不允许采用黄色炸药进行爆破。要在过去, 只能依靠人工, 用钢钎、铁锤解决这个难题。这次, 他们将粉末状的“无声破碎剂”加水调成浆体, 灌入到钢筋混凝土的钻孔中, 经过十多个小时, 这块巨大的“顽石”就静悄悄

地变成布满龟纹、四分五裂的一堆碎石渣。在整个“爆破”过程中, 听不到轰鸣, 看不见飞石, 周围的设施、建筑安然无恙, 铁道、公路上依旧旧人来车往。

这项爆破新技术自一九八一年研究成功后, 北京建研院的科研人员一方面继续对“无声破碎剂”进行改进、提高, 一方面专门组成技术服务队到全国各地特别是重点工程建设单位查门服务, 做好推广试用工作。十一月下旬, 来自全国二十三个省、市、自治区的一百多个单位在葛洲坝建设工地交流了“无声破碎剂”的应用经验。据了解, 我国研制成功的“无声破碎剂”在国外也引起了广泛注意。美国、西德、瑞士、印度等国和地区的二十多家单位纷纷要求转让技术、购买专利。在去年的广交会上, 外商也纷纷要求订货。

南方日报

NANFANG RIBAO

第12124号

1983年5月

18

星期三

农历癸亥年四月初六

小满: 农历四月初九

广州市区天气预报

多云间阴

风向 东南

风力 一至二级

温度 最高29℃

最低24℃

罗定县金鸡大理石厂开采“帝女红”有新法 用“无声破碎剂”切割大理石坯

本报讯 罗定县金鸡大理石厂最近运用“无声破碎剂”开采“帝女红”(即405红菱大理石)石坯, 先后进行了单面、双面和三面的切割试验, 都获得成功。这种试验, 在我国大理石的开采史上还是第一次。

一百多年来, 这里开采“帝女红”石坯, 都是靠人工

切割, 取一立方米石砖, 要两个人花半个月的时间。运用“无声破碎剂”, 一立方米的石砖, 两个人一天就可以完成, 达到加快速度、降低成本、节约原料、提高成品率、增加产量的目的。

“无声破碎剂”又称“静态爆破剂”, 起源于日本, 后又流传到美国。我国中央建材

局建筑材料研究院水泥研究所的专家们, 十几年来研制成功。利用这种“无声破碎剂”开采大理石, 不用雷管, 不用导火线, 只要打孔, 把它与水搅成浆糊状, 放入孔内, 经过十二至二十四个小时后, 靠药物高温, 孔内就会产生每平方厘米三百公斤的压力, 使石坯自然裂开。(范光彪、赖国林)

香港政府指定刊登有關法律性質廣告之有效刊物

經中國人民郵政登記證廣一第新報社第 廣東郵政管理局執照第三號

WEN WEI PO
197-199, WANCHAI ROAD
HONG KONG

無聲爆破劑爆破時不會產生震動、噪音、飛石和有毒氣體，特別適用於開採貴重石材，而且不會影響生產。

「①其性能指標 外介
達到了目前國際上 口。

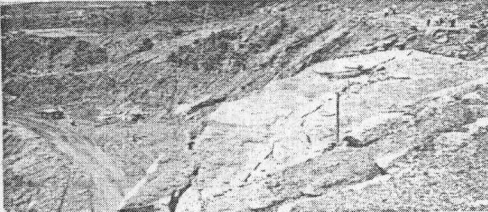
稿特

對爆破技術是「重要的知識和經驗」，填補「我國」空白。有廣泛的利用意義。以上諸語是建部給予無阻礙的鼓勵。以上諸語是建部給予無阻礙的鼓勵。以上諸語是建部給予無阻礙的鼓勵。無礙破劑是中國建築材料科學研究所製成成功新產品。正式公開。每方厘米厚至五百公斤。破碎時大約用十公分的破碎器就能破開。目前，內地已有三百五十個位方採運這種藥劑。從碎運至一千方。甚為經濟。破碎面運至四方。五金電站都可使用。效果甚好。三個月一日通過鑑定。正式公開。每方厘米厚至五百公斤。破碎時大約用十公分的破碎器就能破開。目前，內地已有三百五十個位方採運這種藥劑。從碎運至一千方。甚為經濟。破碎面運至四方。五金電站都可使用。效果甚好。

廣門並打算與深圳有關當局合作在深圳建廠生產。不久的將來，還準備在香港舉行試驗，讓本港建築商人認識。

本報記者

的特點是：低壓慢加載、靜態爆破，沒有使用炸藥時產生震動、噪音、飛石和有毒氣體的弊病。在不適宜使用炸藥的地方最合用，對開採貴重石材的經濟效果極為良好，成材率可達百分之九十。改進生產線方面的作用也很大而且不會影響生產。



短無聲爆破劑爆破的巨石一分為二

氣毒無音噪無石飛無動震無程過

香港地方煙煙稠密，現時每箱在本地使用非常有利。除國內及香港的兩間工廠，其他每箱生產五千噸「無聲破劑」，除國內外，還向美國、加拿大、新加坡出口，而本港每年亦使用數千五百噸生煙產品，目前日本亦有生產該種物品，售價每噸約為一千七百元，而中國的產品則每噸售一千二百美元左右。他又表示，目前已成長一種更高效率的「無聲破劑」，縮短炸石的時間及提高影底率，預計今年就可投產。

他表示，「無聲破碎劑」是一種灰黑色的粉末，把它與水拌成漿體，灌入預先在岩石或混凝土上鑽好的孔中，通過膨脹壓脹作用，可產生每平方厘米五百公分的膨脹壓力。由於漿體的膨脹壓力比岩石的拉力大五至十倍，比混凝土的拉力大十至五十倍，故能在無震動、無飛石的、無噪音、無毒氣的情況下，把物體破碎或切開開來，所花的時間為十小時。

他表示，在某些場合下，機械施工可能無法實施，而使用鑽孔及灌入附近設備的安全，使用「無聲破碎劑」最為安全適合。他

【本報特約】一種由中國科學院研製兩年而成的一「無聲破障劑」，最近在本港推介使用，該種粉末可在無噪音及無震動的情況下，把巨石破碎，克服使用炸藥的種種缺點。

中國建築材料科學研究所的一個代表團最近抵港，昨日並將在將軍澳一地展示無聲破障技術。該院工程師王延生表示，破碎混凝土

「無聲破障劑」發售



○「無聲號牌劍」發生效力後，工部人員用鑽筆換開大石。

成報

第二章 无声破碎剂的物理化学性能

无声破碎剂(SCA)与炸药、高能燃烧剂,在材料组成与物化性能上有本质的区别,三种破碎材料的比较见表 2-1。炸药、高能燃烧剂爆破是通过气体膨胀,在瞬间产生成百上千个大气压和 2000 ~ 5000℃ 高温,致使周围介质遭受强烈的破坏。而无声破碎剂是水泥类的膨胀胶凝材料,它与水反应,形成固相体积倍增的结晶,这一结晶的生成对孔壁施加压缩应力,当压缩应力(σ_r)、垂直方向的张拉应力(σ_θ)超过了脆性物体的抗拉强度时,便使物体发生龟裂,如图 2-1 所示。由于 SCA 的水化反应继续进行,膨胀应力不断增长,使得被破碎物的裂缝宽度和深度不断扩展,致使脆性物体崩裂破碎,如图 2-2 所示。

表 2-1 三种破碎材料的比较

破碎材料	炸药	高能燃烧剂	无声破碎剂
破碎原理	气体膨胀	气体膨胀	固体膨胀
爆炸时间(s)	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	$10^{-1} \sim 10^0$	$10^4 \sim 10^5$
压力(MPa)	几千~十几千	几百	30~50
温度(℃)	2000~4000	3000~5000	70~100
破碎特点	高压,瞬时	高压,瞬时	低压,慢加载
对环境影响	有震动、噪声、飞石、瓦斯	震动、噪声、飞石等较少	无公害

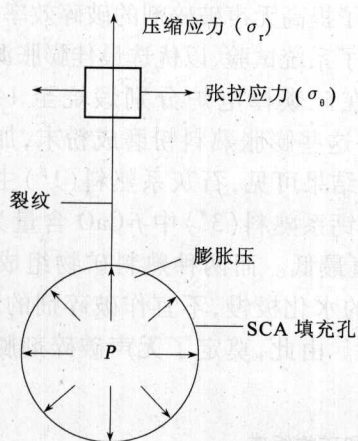


图 2-1 SCA 破碎原理图解

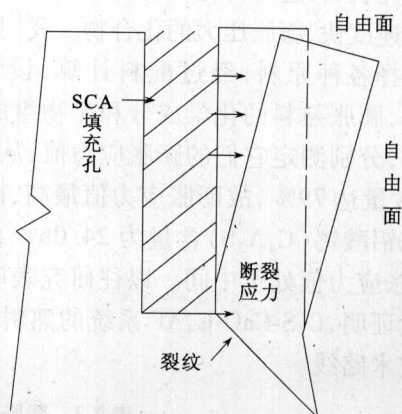


图 2-2 被破碎体发生裂缝状况

第一节 无声破碎剂的膨胀源选择

膨胀破坏的机理虽然简单,但是要使它能够应用于工程实际,还必须满足各种条件才行,

简要地讲有下面几条：(1)要有适当的缓凝时间以保证完成充填作业；(2)充填后药剂不会自孔中喷出，产生的膨胀压能均匀有效地作用于被破碎体；(3)具有适应各种情况所需的膨胀压和变形量的能力，以保证充分破坏对象物；(4)破碎时，达到必需的膨胀压的时间要适宜；(5)破碎剂本身不能是有毒物质或危险物质。

在水泥化学中，能使水泥产生体积膨胀的有三种化合物，以 CaO 、 Al_2O_3 、 CaSO_4 形成的水化硫铝酸钙（又称钙矾石， $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）；高温煅烧的 $f\text{-CaO}$ ，水化形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ；高温煅烧 MgO ，水化形成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。各种矿物形成水化物后固相体积变化率，见表 2-2。例如：

	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 16 \times 4.186\text{kJ}$		
分子量(g)	56.08	18.02	74.08
表观密度(g/cm^3)	3.34	1.00	2.24
克分子体积(cm^3)	16.79	18.02	33.08

$$\Delta V_{\text{CaO}} = \frac{33.08 - 16.79}{16.79} \times 100\% = 97\%$$

也即 CaO 水化为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，固相体积增加 97%。 MgO 水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，固相体积增加 104%，由铝酸钙与石膏水化形成钙矾石，固相体积增加 95.4% 左右。

表 2-2 各种矿物形成水化物后固相体积变化率

水化反应方程式	水化前体积(cm^3)	水化后体积(cm^3)	固相体积增加率(%)
$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$	16.79	33.08	97
$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$	12.22	24.93	104
$3\text{C}_3\text{A} + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	371	725	95.4

研究表明，这三种化合物的水化速度是不同的。为了提高无声破碎剂的破碎效率，必须选择水化速度快、膨胀压大的化合物。我们在实验室进行了系统试验，以优选最佳膨胀源。

选择各种原料，经过配料计算，设计三种生料，在硅碳棒电炉分别煅烧至 1450°C 和 1300°C ，膨胀熟料的化学成分和矿物组成见表 2-3。将这些膨胀熟料粉磨成粉末，加水拌制成浆体，分别测定它们的膨胀应力值，从表 2-4 的试验结果可见，石灰系熟料(1[#])主要矿物 $f\text{-CaO}$ 含量达 79%，故膨胀应力值最高，而石灰-硫铝酸钙系熟料(3[#])中 $f\text{-CaO}$ 含量为 36%，无水硫铝酸钙($\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$)含量为 24.06%，其膨胀应力值最低。而两种熟料矿物组成的 2[#]熟料，膨胀应力值处于中间。以往研究表明，由于 MgO 的水化极慢，不宜作破碎剂的膨胀源。本试验证明， $\text{C}_3\text{S}\text{-CaO}\text{-C}_4\text{AF}$ 系统的熟料的膨胀能量高。由此，奠定了无声破碎剂膨胀源选择的技术路线。

表 2-3 膨胀熟料的化学成分和矿物组成

膨胀熟料编号	化 学 成 分 (%)						矿 物 组 成 (%)			
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	C_3S	C_4AF	$\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$	$f\text{-CaO}$
1 [#]	2.20	0.85	0.85	89.55	0.58	—	8.36	4.05	—	79.68
2 [#]	7.41	5.45	5.45	80.63	0.35	5	28.16	1.82	10.08	53.83
3 [#]	2.66	12.46	12.46	63.68	0.03	1.63	10.11	1.76	24.06	36.48

表 2-4 不同矿物组成的破碎剂膨胀应力值

编号	矿物系统	膨胀应力值 (MPa)			
		12h	1d	2d	3d
1	$C_3S-CaO-C_4AF$	30.8	71.3	114.5	117.1
2	$C_2S-CaO-C_4A_3\bar{S}$	25.8	63.6	81.2	90.2
3	$C_2S-CaO-C_4A_3\bar{S}$	4.97	10.2	20.5	22.6

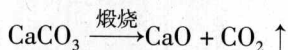
第二节 氧化钙的物化性能

在古罗马的建筑和中国长城的建造中,人们把生石灰(CaO)加水消化变成熟石灰,用于砖石的砌筑或墙体抹面。因此,人们对生石灰的用途并不陌生。现在,我们利用CaO的破坏作用作为静态破碎剂的膨胀源,这令人感到十分惊奇。这是为什么?首先要了解氧化钙的晶体结构及其物化性能。

一、氧化钙的晶体结构及其物化性能

氧化钙(CaO)主要从碳酸钙($CaCO_3$)分解而得。纯CaO的熔点为 $2614^{\circ}C$ 。结晶成无色或灰黄色的透明立方体,属立方晶系,立方解理完整。它的表观密度为 $3.32g/cm^3$,莫氏硬度为3~4,折射率为1.83。

石灰是用石灰石经 $700 \sim 800^{\circ}C$ 煅烧而得, $CaCO_3$ 分解后生成CaO,分解出 CO_2 。



石灰是白色无定形的易碎物料,表观密度波动于 $3.08 \sim 3.30g/cm^3$ 之间,其值随着石灰煅烧温度的提高而增大,这是因为晶格收缩增大,孔隙率减小,而晶体尺寸长大,石灰的物理性状与石灰石煅烧温度的关系,见表2-5。

表 2-5 石灰的物理性状与石灰石煅烧温度的关系

煅烧温度($^{\circ}C$)	表观密度(g/cm^3)	孔隙率(%)	晶体尺寸(μm)
800	1.57	50	0.3
1000	2.00	38	1~2
1200	2.62	20	6~13
1400	3.30	5	13~20

与表观密度相同,石灰的化学活性也决定于它的烧成温度,低于 $1000^{\circ}C$ 烧成的石灰,加水后立即“消解”。随着煅烧温度的升高,石灰的表观密度增大,晶体尺寸由 $0.3\mu m$ 增长到 $20\mu m$ 。晶体结构越致密,其水化所需时间就越长,试验结果如图2-3所示,石灰煅烧温度越高,水化反应越慢,反映在水化发热温度上为较低。

把一块石灰放在水里时,在其表面上进行的溶解反应极为缓慢。水化反应是渐进的,以致看不到温度的明显升高。但是,把石灰粉碎成粉末,刚加水时似乎是惰性的。但几分钟后,会突然猛烈地反应,放出大量水化热,有沸腾现象。因此,提高煅烧温度使石灰活性降低,主要是由于晶格收缩减少了表面积,而与分子的变化关系不大。松散的粉状石灰,如果在 $1400^{\circ}C$ 下