

中国堤防工程施工丛书
ZHONGGUO
DIFANG GONGCHENG
SHIGONG
CONGSHU

17

化灌法

魏涛 李珍 董建军 陈彦生 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

中国堤防工程施工丛书

ZHONGGUO

DIFANG GONGCHENG

SHIGONG

CONGSHU

17

化 灌 法

魏 涛 李 珍 董建军 陈彦生 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系《中国堤防工程施工丛书》之一,主要介绍了化灌法的定义、适用范围、工法原理、施工工艺流程、质量控制及检验,并通过长江重要堤防隐蔽工程以及江汉航线新城船闸上闸首裂缝处理工程、观音寺闸裂缝处理工程等工程实例,来说明化灌法的应用。书中还介绍了一些新的工艺技术及我国目前化灌的研究现状及发展趋势。

本书可为从事水利堤防工程者直接应用,并为土木建筑、冶金采矿、石油化工、公路交通、铁道桥隧、地基处理的设计、科研、施工、监理、生产与管理方面的人员和中专、中专及高等院校的师生提供有益的借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

化灌法/魏涛,李珍、董建军等编著. —北京:中国水利水电出版社,2005

(中国堤防工程施工丛书:17)

ISBN 7-5084-3216-9

I. 化... II. ①魏... ②李... ③董... III. 水闸
裂缝灌浆 IV. TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第098831号

书 名	中国堤防工程施工丛书·17 化灌法
作 者	魏涛 李珍 董建军 陈彦生 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32开本 4.875印张 131千字
版 次	2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	16.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编 著 者 的 话

沿江、河、湖、海的岸边修建的挡水建筑物称为堤；构建在河谷或河流中拦截水流的水工建筑物称为坝。“防水的堤坝”合称为“堤防”（《辞海》1999年版缩印本第668页）。

目前，中国堤防总长近30万km，其中江、河、湖堤长达27万余km，海堤1万余km；大、中、小型库坝8.5万座，总库容5184亿 m^3 ；蓄滞洪区近百处，总容积980亿 m^3 。这些数量均名列世界前茅。

1998年大水以后，在中央积极财政政策的支持下，堤防建设进度加快，长江、黄河、淮河、海河、松花江、辽河和珠江等七大流域以堤防为重点的防洪体系进一步完善，堤防建设标准普遍提高，抗御大洪水的能力增强。到2000年，新建与加固堤防已长达7400km，流域干、支流Ⅰ、Ⅱ级重要堤防达标1.02万km；海堤达标6000km；全国有236座城市达到国家防洪标准。所有这些成果的取得，离不开采用“新材料、新技术和新工艺”的历史性突破。《中国堤防工程施工丛书》正是“三新”应用的总结与理论的升华。

丛书分四篇十八册，即总论篇的《堤防工程施工工法概论》、《堤防工程探测、监测与检测》；护岸工程篇的《抛石法》、《沉排法》、《柴枕法》、《板桩法》、《模袋法》和《吹填法》；防渗工程篇的《深搅法》、《高喷法》、《注浆法》、《射水法》、《抓斗法》、《切槽法》、《振动沉模板法》和《土工合成材料法》；补强篇的《化灌法》、《抗碳化法》。

各册分别介绍了各工法的定义、适用范围、工法原理、施工

科技与设备、施工工艺及流程、施工质量控制与验收标准、工程应用典型案例。书前汇集了相应术语与符号；书末附有相关的施工用表、规范与设备细目。丛书内容简明扼要，通俗易懂，集知识性、实用性和可操作性于一体，实为当代堤防工程施工工法大全。

“科学有无止境的前沿”，“技术有不停滞的进步”。我们深信，编撰并出版《中国堤防工程施工丛书》，无疑有着十分重要的意义。分册的陆续问世，将有助于相关学科领域和企业单位获得更高、更深与更多的创新与发展。

2005年5月

前 言

化灌法作为一种堤防工程施工工法,无疑因其独特的优点——能注入宽度 0.1mm 及其以下的裂缝而被岩土工程界所重视。国际上有关科学家和工程师研究认为:宽度超过 0.0035mm 的裂缝就可能成为渗水通道;水在 0.007mm 宽的裂缝中,仍会产生 10^{-4} cm/s 的流速。

上述三个数据告诉我们,堤防工程包括涵闸、泵站等穿堤建筑物,几乎普遍存在着宽度在 0.0035~0.007mm 的裂缝,而 10^{-4} cm/s 的渗流速度,基本上被堤防设计工程师纳入防渗处理的界限值。换言之,如此细微的裂缝必须处理,否则会贻误解决堤防安全隐患时机。

长期以来,对于渗流速度大于 10^{-4} cm/s 的裂缝处理,大多采用水泥浆材,而水泥是具有一定粒度颗粒材料,例如普通硅酸盐(简称“普硅”)水泥其最大粒径为 0.088mm。即使是 525 号普硅水泥掺加 X-404 和 JG-2 两种高效减水剂湿磨的改性水泥,其最大粒径也有 0.04mm。显而易见,无论是改性水泥,还是普硅水泥配制的浆材,对于 0.007mm 宽的裂缝是难于注入的。这就要求灌浆工程师与浆材研究的科学家另辟蹊径,寻求能注入 7‰mm 即 $7\mu\text{m}$ 宽度的裂缝浆材,以达到 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ cm/s 渗流速度的防渗。

另外,对于堤防工程,出现裂缝往往又多处于具有一定流速的漏水部位,注入的浆材易被水稀释或冲走。故在寻求新的浆材的同时,又要求具有高粘结度和瞬时粘结的功能性材料。

归纳上述两者要求:一是结构上要求浆材粒径应小于缝的最

小尺寸，至少小于 $1/3 \sim 1/10$ ；二是功能上要求防渗堵漏，并经两者要求满足后，最终达到被灌物（或称“灌浆载体（Carrying—body for Grouting）”）近似“无缝隙（Seamless）”的连续、完整并具坚固性的物体。化学浆材诸如环氧树脂类浆材、丙烯酸盐类浆材、聚氨酯类浆材、甲基丙烯酸酯类浆材、木质素类浆材、硅酸钠（水玻璃）类浆材以及其他有机与无机化学浆材，自19世纪末以来，在国内外水资源堤防工程，水电水利工程，交通公路、铁道、机场、桥梁、隧道、港口、码头工程，冶金矿山工程，石油钻井工程，核废料及垃圾处理工程，文物考古工程，人防地下工程，以及工民建基础处理工程中，均得到广泛应用。

和其他任何材料一样，工程应用中的化学浆材，有利有弊，关键在于把握“利多弊少、利大于弊”的使用原则。在社会效益中主要体现其“公正”与“效率”；在经济效益中则侧重于“增值”和“省时”；而在人文—自然环境效益中，凸显的是“和谐”及“可持续发展”。

《化灌法》一书采取集体讨论与分工合作方式编著。由魏涛主笔撰写前言、绪论、工法原理、施工材料与设备及部分工程应用案例与附录；李珍执笔撰写施工工艺及流程、施工质量控制及验收标准，以及部分工程应用案例与附录；董建军与陈彦生参加了部分章节编写工作；全书由董建军策划、陈彦生统稿。

在编著中，引用了水利部长江水利委员会、长江科学院及黄河、淮河、海河、松花江、辽河和珠江诸流域相关省（直辖市、自治区）穿堤建筑物裂隙补强方面的信息，以及国内铁道、公路、桥隧等部门的有关文献，在此一并表示谢意。

鉴于笔者水平有限，书中难免有不当之处，祈盼读者不吝指正。

编著者

2005年10月

术 语 表

浆液：指注浆材料的主剂（简称浆材）与固化剂等材料的液体混合物。

浆液的配比：指浆液的主剂、固化剂与添加剂的用量比。

结构式：用短线来代表一对共用电子的图式叫做结构式。

固化剂：指混入主剂中引起化学反应、且可调节和促进固化反应的物质。

促进剂：指能缩短凝胶时间的添加剂。

缓凝剂：指能使凝胶时间延长的添加剂。

催化剂：指本身不发生任何化学变化、仅能促使其他物质的反应速度加快的物质。

溶液：指一种或一种以上的物质分散到另一种物质里，形成均匀的稳定的混合物。

溶剂：指能溶解其他物质的物质。

溶质：指被溶解的物质。

单体：指进行聚合反应的低分子化合物。

聚合物：指由许多相同的分子聚合成一个分子而形成的化合物。

高分子：指分子量 10^4 以上的物质。例如：丙烯酰胺单体分子式是 $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$ ，但与固化剂进行聚合反应后，分子量在 10^4 以上，这种物质即为高分子物质。

链节、聚合度：高分子化合物分子量大的原因是由于它们的分子是由特定结构的单位多次重复组成。这种特定结构单位叫做链节。链节的重复次数叫做聚合度。

线型、环型、体型有机高分子化合物：有机高分子化合物中的碳链的结合方式是线型的称为线型有机高分子化合物；若碳链的结合方式是首尾相连的环型，则称为环型有机高分子化合物；若碳链的结合方式是通过支链交联起来的体型，则称为体型有机高分子化合物。

均裂和异裂：有机高分子共价化合物的共价键的断裂方式有两种：一种叫做均裂，也就是一个共价键断裂时，组成该键的一对电子由键合的两

原子各留一个；另一种断裂方式是成键的一对电子保留在一个原子上，这叫异裂。

自由基、离子：均裂产生的带单电子的原子（或基团）称为自由基（也叫游离基）；异裂产生的带电原子叫做离子。

官能团：决定有机高分子化合物分子主要化学性质的基团称为官能团。如：羟基—OH、醛基—CHO。

加成反应：有机化合物分子中的 π 键断裂，两个一价的原子或原子团加到不饱和键的两个碳原子上的反应，称为加成反应。

取代反应：有机化合物分子中一种原子（或原子团）被另外一种原子（或原子团）所代替的反应，称为取代反应。

氧化、还原反应：有机化合物与氧化合或失去氢的反应叫做氧化反应；与氢化合或失去氧的反应叫做还原反应。

自由基（型）反应：有机化合物通过均裂进行的反应为自由基反应。

离子（型）反应：有机化合物通过异裂进行的反应为离子反应。

加聚反应：由一种或多种单体通过加成反应，相互结合为高分子化合物的反应叫做加聚反应。

缩聚反应：由一种或多种单体互相缩合成为高聚物，同时析出其他低分子物质（如水）的反应叫做缩聚反应。

溶液的浓度：一定量溶液成溶剂中所含溶质的量称为溶液的浓度。

质量百分浓度（%）：用溶质的质量占全部溶液质量的百分率来表示的溶液的浓度叫做质量百分浓度（简称百分浓度）。用符号 % 来表示。

体积摩尔浓度（M）：用 1L（或单位体积）溶液中所含溶质的摩尔数来表示的溶液的浓度叫做体积摩尔浓度（简称摩尔浓度）。用符号 M 表示。

当量浓度（N）：用 1L 溶液中所含溶质的当量数来表示的溶液的浓度叫做当量浓度，用符号 N 表示。

质量摩尔浓度（ m ）：用 1000g 溶剂中所含溶质的摩尔数来表示的溶液的浓度叫做质量摩尔浓度。用符号 m 表示。

摩尔分数浓度（ x ）：用溶质的摩尔数占全部溶液摩尔数的分数表示的溶液的浓度叫做摩尔分数浓度。一般用符号 x 来表示。

液体的表面张力：液面各部分的相互间的吸引力叫做表面张力。

接触角：当浆液在固体表面上形成一液滴时，在固、液、气三相交界处，自固、液界面经液体内部到气、液界面的夹角称为接触角。通常以 θ 表示。

凝胶：指由胶体溶液起胶凝作用而成的物质，或者胶体溶液起凝结作用而成的沉淀性质。

凝胶化：溶胶变成凝胶的现象叫做凝胶化。

凝胶时间：浆液的主剂与固化剂从液态混合时起，到混合液失去流动性止，所经过的时间定义为浆液的凝胶时间。

纯浆液凝胶：指由浆液本身凝胶化的硬化物。

固结体：指浆液与固态物质诸如砂一起混合或者往砂中浸透并使之凝胶化的固体。

凝固体：指在一定压强（如 101.325kPa）下，晶体物质从液态变或固态的固结体。

粘度：粘度亦称“粘滞系数”，“动力粘度”的简称。是指浆液流动时，具有不同流速的各层面间的内摩擦力。

流动度：粘度的倒数即是流动度。

有机硅酸钠浆液：由硅酸钠+有机物固化剂构成的浆液称为有机硅酸钠浆液。

无机硅酸钠浆液：由硅酸钠+无机物固化剂构成的硅酸钠浆液称为无机硅酸钠浆液。

LD₅₀（致死量 50%）：通常把被测物质经鼠口投入，在 48 小时内死亡率达 50%的投药量（mg/kg）定义为 LD₅₀。

LC₅₀（致死浓度 50%）：使试验动物吸入挥发性物质与空气的混合气体，在 48h 内动物死亡率达 50%的挥发性物质的投放浓度（mg/L）定义为 LC₅₀。

..... 符 号 表

d' 或 ρ' : 密度, g/cm^3 , t' 是测定时的温度

σ : 粘结强度, MPa

K : 渗透系数, cm/s

%: 质量百分浓度

M : 体积摩尔浓度, mol/L

m : 质量摩尔浓度, mol/kg

n : 物质的量, mol

θ : 接触角, $(^\circ)$ 。

η : 粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10^3 \text{cp}$

【 目 录 】

编著者的话

前 言

术语表

符号表

1 绪论	1
1.1 化灌法的定义	1
1.2 适用范围	2
1.3 发展简史	3
1.4 发展趋势	4
2 工法原理	6
2.1 作用机理	6
2.2 工作原理	30
3 施工材料与设备	38
3.1 施工材料	38
3.2 施工设备	69
4 施工工艺及流程	79
4.1 施工准备	79
4.2 施工工艺	81
4.3 施工流程	88
5 施工质量控制及验收标准	92
5.1 质量管理措施与保证体系	92
5.2 施工质量控制	93
5.3 质量效果评价	96
6 工程应用典型案例	100
6.1 新城船闸裂缝处理及其效果	100

6.2	观音寺闸裂缝处理及其效果	111
6.3	樊口大闸蟹裂缝处理及其效果	114
6.4	东荆河堤复兴闸加固处理及其效果	117
6.5	堤坝及桥隧涵闸等工程化学浆材处治简表	120
附录		124
附录 A	裂缝调查记录表	124
附录 B	化学灌浆钻孔布置	125
附录 C	化学浆材抗压强度试验记录表	129
附录 D	浆材粘度与胶凝时间试验记录表	130
附录 E	化学浆材粘接抗拉强度试验记录表	131
附录 F	化学浆材粘接劈拉强度试验记录表	132
附录 G	化学浆材浆液与聚合物密度和抗渗性试验记录表	133
附录 H	适用于堤坝等工程的商售化灌浆材	134
附录 I	化学浆材性能测试方法作业指导书	136
参考文献		142

绪 论

1.1 化灌法的定义

化灌法是化学灌浆法的简称。

广义地说，化灌法是一种工程处理措施。

说得具体些，化灌法就是通过钻孔将硅酸钠或高分子化合物的浆液高压灌入地基或建筑物的裂隙及孔隙中，经胶结凝固后，可以产生防渗及加固的良好效果〔《辞海》1999年版（缩印本）253页〕的一种灌浆法。它与水泥灌浆法、粘土灌浆法并列为当前流行的三种灌浆法。

从上述定义中，可以清楚地看出：化灌法旨在浆材、工艺、被灌载体、作用及其目的效果几个方面有不同于水泥灌浆和粘土灌浆的特点。

首先，化灌法所采用的浆液即浆材是两大类：一是硅酸钠；二是高分子化合物。

硅酸钠，化学式 Na_2SiO_3 。是一种无色晶体或白色粉末。溶于水呈碱性，其透明的浆状溶液，就是通常讲的“水玻璃”。

硅酸钠是“学名”。水玻璃是“号”，或者说是“别名”、“俗称”。硅酸钠或水玻璃的英文单词为 Sodium Silicate。

在这里附带说几句：硅酸钠遇酸分解，析出硅酸的胶状沉淀。由石英砂与硅酸钠熔合而成。在肥皂、造纸等工业中作填料，也可用作粘合剂、防火材料或用以调制耐酸砂浆及耐酸混

凝土。

化灌法主要是利用硅酸钠的粘结作用。

高分子化合物，又叫高分子聚合物，亦称“高聚物”，也称“大分子化合物”。通常指有机高聚物，分子量高达数千乃至数百万以上。高分子聚合物通常以 High Polymer 英语单词来表示。高分子化合物分天然与合成两大类：

天然的如天然橡胶、淀粉、纤维素、核酸、蛋白质等。

合成的如合成塑料、合成纤维、合成橡胶等。

化灌法目前常采用的高分子化合物主要是合成树脂类。

如果从化学结构来划分，高分子化合物可分为链状的线性高聚物与网状的体型高聚物。

其次，化灌法工艺，着重于“高压灌入”四个字上。这里讲的高压是相对于常压，通常对一个大气压而言的，目前国内化灌法采用的“高压”一般在 10~40MPa 之间。

第三，被灌物是“地基或建筑物的裂隙及孔隙”。这不同于水泥或粘土被灌物——孔隙或孔洞，换句话说，化灌法重点解决的是地质缺陷或施工缺陷中的细微裂隙问题。

第四，化灌法的作用与功能，一是防渗；二是加固。所谓防渗主要是指防止水在裂隙或孔隙中的渗透，尤其是它们中间的细微孔隙。用粘土或水泥灌浆法是难于灌注的，只有用化灌法才能灌注。所谓加固主要指采用化灌法将软弱地基或建筑物施工缺陷带来的非连续、不完整和低强度性能转变为连续、完整和坚固性状，重点是提高力学强度。

1.2 适用范围

化灌法的适用范围较广，本书主要叙述用于堤防工程穿堤建筑物的防渗堵漏和补强加固。相关应用有以下几方面：

- (1) 水库大坝防渗帷幕和基础加固。
- (2) 混凝土建筑物裂缝补强及加固处理。

- (3) 铁路隧道施工中动水堵漏和软弱带处理。
- (4) 矿井建设中的止水和加固。
- (5) 人防等地下建筑物的防水和加固。
- (6) 石油钻井中灌浆堵水驱油。
- (7) 桥基加固及桥体裂缝补强。
- (8) 地质岩体断层破碎带泥化夹层处理。
- (9) 文物保护及修复等。

1.3 发展简史

化学灌浆是 20 世纪 40 年代之后,随着石油化工的发展而发展起来的高分子化学的一个应用学科,作为水利堤防工程化灌法则是化学灌浆技术的一个应用分支。

化学浆材最早出现于 19 世纪末,第一个应用化灌浆材的是德国的切撒尔斯基,1886 年,他在一个孔里注入浓硅酸钠,另一个邻孔注入凝结剂,因此而获得专利。1909 年比利时的莱梅利和杜蒙发明了灌注稀硅酸盐和酸溶液混合液的一步法。1912 年法国的阿尔伯特·弗兰科伊斯使用硫酸铝与硅酸盐同时灌注的方法。1925 年荷兰工程师尤斯登(H. J. Joosten)论证了硅酸盐化学灌浆的可靠性,并获得专利。从 19 世纪末到 20 世纪 50 年代初,在这期间所有的化学浆材都是水玻璃型的。

20 世纪 50 年代后由于二次世界大战的刺激,使得有机化学工业得到了迅速的发展。有机高分子化合物作为浆材也开始进入灌浆领域,美国于 1951 年研制出了丙烯酸胺浆材(AM—9)、日本于 1963 年研制出同类产品(日东—ss)、我国于 1965 年投产(丙凝)。

我国在化灌浆材方面的研究是从 20 世纪 50 年代提出来的,并初步掌握化灌法。1953 年开始研究应用水玻璃作为浆材。1954~1956 年,中国科学院化学所和有关部门开始土壤硅化电化学加固的研究工作。1958 年国家科学技术委员会建立三峡岩

基组，提出长江三峡工程深覆盖层防渗补强和坝体混凝土裂缝补强加固两大课题，并列入了我国“十二年科学发展规划”。1959年5月在北京召开了有关专家灌浆座谈会，随后提出研究报告，指出了木质素磺酸钙对水泥浆有分散作用，同时，还指出硅酸盐、环氧树脂、甲基丙烯酸甲酯等材料有灌浆应用前景。又由于青铜峡、丹江口等大型水电工程的建设，迫切需要化学灌浆，各方面加强了研究工作，中国科学院广州化学研究所、中国水利水电科学研究院、长江科学院、华东水利水电勘测设计研究院等单位进行了高分子化学浆材和灌浆技术的系统研究。60年代研制出了丙烯酰胺类浆材（俗称丙凝）、甲基丙烯酸甲酯和环氧树脂浆材，并用于大坝基础和混凝土裂缝灌浆处理，70年代开发了聚氨酯系列浆材，80年代开发了丙烯酸盐和酸性水玻璃。90年代以来，国际上通用的七大化灌浆材（表1-1）在我国堤坝等工程中获得广泛应用。

表 1-1

七大化灌浆材表

序 号	材 料
1	水玻璃类浆材
2	木质素类浆材
3	丙烯酸盐类浆材
4	聚氨酯类浆材（油溶性、水溶性、弹性）
5	环氧类浆材
6	甲基丙烯酸甲酯类浆材
7	丙烯酰胺类浆材

1998年洪水以后，化灌法在中国堤防工程穿堤建筑物的防渗堵漏和补强加固方面作了拓展应用，并取得广泛的社会效益和经济效益。

1.4 发 展 趋 势

结合目前工程需要，坚持科学发展观，化灌法在下述几个方