

中国堤防工程施工丛书

ZHONGGUO
DIFANG GONGCHENG
SHIGONG
CONGSU

18

抗碳化法

杨定华 李小平 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

CONGSU

18

抗碳化法

杨定华 李小平 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，主要介绍了抗碳化法的定义、适用范围、工法原理、施工材料与设备、施工工艺流程、质量控制及检验，并通过典型案例来说明土工合成材料法的广泛应用。书中还介绍了一些土工合成材料法的新工艺、新技术以及我国目前土工合成材料法的研究现状及发展趋势。

本书可供从事水資源开发利用、河道和堤防等工程技术人员阅读，并可供从事土木建筑、公路交通、铁道桥隧、地基处理等设计、科研、施工、监理、生产与管理方面的人员以及中职、中专和高等院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

抗碳化法 / 杨定华等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

(中国堤防工程施工丛书; 18)

ISBN 7-5084-4068-4

I. 抗... II. 杨... III. 堤防—防洪工程
IV. TV871

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 110977 号

书 名	中国堤防工程施工丛书·18 抗碳化法
作 者	杨定华 李小平 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 7.375 印张 198 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	24.00 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1.2万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

材料与设备、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。书前汇集了相应的术语与符号；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

混凝土的碳化，是影响穿堤建筑物诸如水闸、泵站、船闸渠道以及大坝、电站等所有混凝土或钢筋混凝土结构耐久性的重要因素，它直接关系到混凝土或钢筋混凝土工程包括桥梁、隧道、地铁、矿井等的使用寿命问题。为此，一直为世人所关注，并为从事混凝土材料、结构的设计、施工与修补人员提供了开拓创新的研究课题。

2006年5月19日，中国工程院院士、水利部长江水利委员会总工程师郑守仁在即将举行的中国长江三峡大坝全线到顶的新闻发布会前夕，向全世界告白：“三峡大坝是混凝土重力坝，其混凝土浇筑量为2800万 m^3 ，为世界上规模最大的钢筋混凝土大坝。它可以长期使用。只是使用年限较长，三峡大坝表面会出现碳化，但可以采用技术修补加以解决。”

郑守仁明确表示，随着科技日益发达，中国对三峡大坝的维护技术也将越先进，中华民族子孙后代有能力把三峡大坝保护好。

抗碳化法正是混凝土或钢筋混凝土防碳化的一种维护技术。

混凝土的碳化，是一个复杂耗时的缓慢过程。碳化从混凝土构件或建筑物的表面开始，到达钢筋位置使钢筋脱钝而锈蚀。实践表明，钢筋混凝土大坝的耐久性，目前设计为50~100年，而水闸等穿堤建筑物的混凝土或钢筋混凝土耐久性一般在20~50年。在上述设计年限内，出现的混凝土碳化及随后发生的钢筋锈蚀、混凝土脱裂、混凝土剥落与非荷载作用造成的裂缝等，若不及时加以修补，其后果将不言而喻。

我国是世界上堤防工程最多的国家，也是一个使用混凝土的大国。目前，国内基本建筑年投资高达2万亿元人民币以上，新建的混凝土结构工程，按上述最低年限20年后需要维修防护计算，约在0.8万~1.0万亿元人民币。加上1949年以来的混凝土工程，每年投入的维护费用占当年投资的60%以上。由此可见，大量的混凝土碳化及其抗碳化法技术修补，始终摆在我们的面前。它要求我们去发现混凝土碳化的原因，探究发生碳化的作用机理，寻找防止或抵抗碳化的新材料、新工艺和新技术。

《抗碳化法》一书正是上述一系列问题的实践总结，也是碳化与抗碳化理论的升华。

《抗碳化法》一书采取集体讨论和分工合作的方式进行编著。由杨定华执笔编撰前言、术语、符号、绪论、工法原理、施工材料与设备以及附录A~附录E；由李小平执笔编撰施工质量控制及验收标准、工程应用典型案例、附录F~附录J及参考文献；由杨晓云执笔编撰施工工艺及流程；董建军、陈彦生参加了部分章节内容的编写。全书由董建军策划，陈彦生统稿。

鉴于编著者水平所限，书中难免有欠妥或有误的地方，敬请读者不吝斧正为谢。

编著者

2006年6月

术 语 表

碳化：指混凝土中性化的一种表现形式。系大气中的二氧化碳（ CO_2 ）、二氧化硫（ SO_2 ）等酸性物质不断向混凝土内部扩散并与其水泥的碱性水化物氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 发生物理化学反应过程。

钝化：指金属经阳极氧化或化学方法处理，由活泼态变为不活泼的钝态的过程。钝化后的金属表面有一层氧化物保护薄膜而不易腐蚀。

老化：主要指高分子化合物的性能逐渐变坏的过程。即高分子化合物受光、热、空气等作用，化学结构遭受破坏，物理机械性能下降。

锈斑：主要指钢筋在含有酸性气体诸如二氧化碳的潮湿空气、水、泥土或混凝土中被氧化而在其表面生成的一层氧化物、含水氧化物或碱式盐等。

脱落：广义指“掉下”。在钢筋混凝土碳化中，主要指混凝土表层脱离其构件或建筑物的现象。

锈蚀：主要指钢筋混凝土中的钢筋因锈斑继续向钢筋内部延展而出现的腐蚀。

渗透：主要指化学溶液与纯溶剂在相同的外压下由半透膜隔开时，纯溶剂能透过半透膜使溶液变淡的现象。

氯离子渗透：主要指氯离子对混凝土或钢筋混凝土的渗透。

二氧化碳渗透：指大气中二氧化碳对混凝土或钢筋混凝土的渗透。

侵蚀：广义指逐渐侵入破坏，或者指侵害腐蚀。

化学侵蚀：主要指单质或化合物的一种侵害腐蚀。

磨蚀：通常指流水、风、波浪、冰川等所挟带的碎屑物质，在运动过程中对地表和相互间发生的摩擦破坏作用。

活化作用：指在化学反应中，使分子得到活化能的过程。

反应物的分子要能参加反应，必先处于活化状态，即必须具有一个最低限度的能量。此最低限度的能量一般远较分子的平衡能量为高，两者之间的差值就叫做“活化能”。一般反应的活化能为 $80\sim 250\text{kJ}/\text{mol}$ 。

溶蚀：指地面水或地下水对岩石中可溶性物质进行溶解和搬移的作用。其中以石灰岩的溶蚀最显著。

龟 (jūn) 裂: 最早指天旱地土开裂——龟坼。后来泛指土体、混凝土之类因干缩产生的裂缝。

混凝土剥落: 指混凝土剥蚀脱落。

混凝土剥蚀: 指混凝土受侵蚀而损坏。

混凝土胀裂: 指混凝土受温度作用膨胀而开裂。

混凝土麻面: 泛指混凝土构件或建筑物表面不平整。

混凝土强度等级: 指按混凝土立方体 (边长 150mm) 抗压标准强度划分的 12 个等级。即符号 C 与 MPa 计的 $C_{7.5}$ 、 C_{10} 、 C_{15} 、 C_{20} 、 C_{25} 、 C_{30} 、 C_{40} 、 C_{50} 、 C_{55} 、 C_{60} 、 C_{70} 和 C_{80} 。

粘着剥离强度: 指粘结剂与被粘物相连的表层剥落分离强度。

耐久性: 指结构在规定时间内, 承受开裂、腐蚀、热退化、碳化、脱层、磨损和外来物损伤的能力。

可靠度: 指一个系统 (设备、部件、元件或工程结构等) 在规定的时间内与条件下完成预定功能的概率。它是综合反映可靠性的一项指标。

可靠性: 指一个系统 (设备、部件、元件或工程结构等) 在规定的时间内和条件下无故障的工作的性质。

动态可靠度: 指结构在正常使用阶段的某一时刻, 保持结构功能的能力的概率度量。

混凝土或钢筋混凝土结构耐久性: 指混凝土或钢筋混凝土结构在正常维护下, 材料性能虽随时间变化, 仍能满足预定的功能要求。

管片接缝弹性密封垫: 指管片接缝防水密封材料中最主要的一类, 以弹性压密作为主要防水原理。通常为有特殊断面的橡胶类类型 (也有制成 L 形或兜绕成环圈状的) 材料, 由工厂加工预制, 现场粘贴于管片密封沟槽。

弹性密封垫的材料以氯丁橡胶、丁基橡胶为主, 也可掺加三元乙丙橡胶、天然橡胶。可以加工成硫化橡胶型、未硫化橡胶腻子型、发泡橡胶型, 同时, 掺入遇水膨胀类树脂制成的遇水膨胀型橡胶, 以及以下各种类型的复合形式的材料。

管片密封垫的沟槽: 指管片混凝土环纵面开设的、为使弹性密封垫正确就位、牢固固定、被压缩的体积得以储存而设置的沟槽。沟槽的剖面形式与尺寸必须与弹性密封条的相适应。

符 号 表

- H_C : 混凝土碳化深度, mm
 t : 时间, 年
 a : 单位体积混凝土吸收二氧化碳能力的系数
 K : 混凝土碳化速率系数, mm/a
 q : 大气中二氧化碳的浓度, %
 K_{g_0} : 矿渣混凝土 90 天龄期的气体渗透系数, 10^{-7}
 K_{gF} : 粉煤灰混凝土 90 天龄期的气体渗透系数, 10^{-7}
 W_F : 粉煤灰掺量, %
 a_1 : 混凝土养护条件修正系数, 大于 28 天时, $a_1=1.0$
 a_2 : 混凝土水泥品种修正系数, 普通硅酸盐水泥的 $a_2=1.0$; 矿渣水泥的 $a_2=1.3$
 a_3 : 环境条件修正系数, 室外条件的 $a_3=0.845$
 f_{ck} : 混凝土抗压强度标准值, MPa; N/mm²
 K_c : 水泥用量影响系数
 K_w : 水灰比影响系数, $K_w = \sqrt{\frac{W/C}{0.382}}$
 W : 水用量, kg
 C : 水泥用量, kg/m³
 γ_2 : 粉煤灰影响系数
 γ_3 : 气候条件影响系数, 中国中部的 $\gamma_3=1.0$; 南方的 $\gamma_3=0.5 \sim 0.8$; 北方的 $\gamma_3=1.1 \sim 1.2$
 K_j : 混凝土构件角部修正系数, 构件角部的 $K_j=1.4$; 非角部的 $K_j=1.0$
 K_{mk} : 计算模式不定性系数, $K_{mk}=1.0 \sim 1.2$
 K_{CO_2} : 二氧化碳浓度影响系数, 室内的 $K_{CO_2}=1.0 \sim 2.5$; 室外的 $K_{CO_2}=1.1 \sim 2.0$
 K_p : 混凝土浇筑面修正系数, $K_p=1.2$
 K_r : 环境温度与相对湿度对碳化影响系数, 一般情况下, $K_r = 2.56 \sqrt[4]{T(1-R)R}$

T : 年平均温度, $^{\circ}\text{C}$

R : 年平均相对湿度, %

K_i : 混凝土质量影响系数, 通常用 $K_i = \frac{57.94}{f_c} - 0.76$ 表示

σ : 名义压 (或拉) 应力, MPa

K_T : 环境温度影响系数

K_R : 环境相对湿度影响系数

A_1 、 A_2 、 A_3 : 应力水平影响系数

在压应力状态下

$$A_1 = 0.00087; A_2 = 0.00215; A_3 = 0.00008$$

在拉应力状态下

$$A_1 = 0.00322; A_2 = 0.0394; A_3 = 0.0587$$

η_s : 集料品种影响系数

η_c : 混凝土养护方法影响系数

K_K : 混凝土碳化速率影响系数

RH : 环境相对湿度, %, 一般 $RH > 55\%$

R_d : 试验 (短期) 相对湿度, %

【 目 录 】

编著者的话

前 言

术语表

符号表

1 绪论	1
1.1 工法定义	1
1.2 适用范围	4
1.3 发展简史	7
1.4 发展趋势	9
2 工法原理	11
2.1 混凝土碳化的作用机理	11
2.2 工作原理	30
2.3 抗碳化、防腐蚀有关计算公式	32
3 施工材料与设备	34
3.1 商品材料	34
3.2 研发或推荐的新材料	56
3.3 主要施工设备、工具	70
4 施工工艺及流程	87
4.1 混凝土碳化判定与评价法	87
4.2 树脂系列表面封闭法——以 CT203 聚合物树脂 合成剂为例	91
4.3 丙烯酸酯共聚乳液水泥砂浆(简称丙乳砂浆)表面封闭法	95
4.4 环氧涂料表面封闭法	97
4.5 混凝土碳化处理的工程措施	102
4.6 桥梁混凝土结构抗碳化防腐蚀技术措施	106

5	施工质量控制与验收标准、评定	109
5.1	结构混凝土防碳化涂料施工质量控制与验收	109
5.2	混凝土桥墩抗碳化防腐蚀质量控制	110
5.3	混凝土或钢筋混凝土抗碳化防腐蚀质量标准	111
5.4	抗碳化防腐蚀质量检查与评定	113
6	工程应用典型案例	115
6.1	水闸混凝土抗碳化处理典型案例	115
6.2	渠道混凝土抗碳化处理典型案例	131
6.3	桥梁混凝土抗碳化处理典型案例	133
6.4	涵洞混凝土抗碳化处理典型案例	138
6.5	大坝混凝土抗碳化处理案例	140
7	本书适用与参考的有关标准规范	148
7.1	本书适用的有关标准规范	148
7.2	混凝土原材料、外加剂、混凝土及砂浆类标准规范 参考目录	150
	附录	158
	附录 1 SL230—98《混凝土坝养护修理规程》	158
	附录 2 钢筋混凝土桥梁表层修补推荐做法	205
	附录 3 与抗碳化法相关的英语专业词汇	216
	参考文献	219

绪 论

碳化，是引发穿堤建筑物钢筋混凝土中钢筋锈蚀的重要因素，也是降低水利、水资源工程混凝土耐久性的主要因素。国内外对混凝土和钢筋混凝土碳化与抗碳化的调查研究和处置措施，已有长期的历史经验与教训可为我们所借鉴与警示。

作为堤防工程的穿堤建筑物，诸如水闸、泵站、船闸、渠道等混凝土或钢筋混凝土结构与构件，因其具有长期与水相伴接触的特点，故在建筑物的设计、施工与修护管理中，根据混凝土中钢筋锈蚀原理，除研究外部环境的水、混凝土内部孔隙、 CO_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对钢筋锈蚀影响外，特别进行了碳化与防（抗）碳化的试验研究与施工维护应用工作。

1.1 工 法 定 义

抗碳化法，是防止混凝土原本碱性朝中性化转变的一种施工与工程管理维护方法。

抗碳化是碳化的相对。

通常说的碳化，主要是指混凝土的碳化。它是水泥石中的水化产物与周围环境中的二氧化碳作用，生成碳酸盐或其他物质现象。碳化将使混凝土的内部结构及组织发生变化，直接影响混凝土结构的性质及耐久性。

抗碳化，主要是防止混凝土中水化产物与周围环境里的二氧化碳进行传质运动，延缓因碳化造成混凝土结构内部碱性降低的

时间，或阻止其 pH 值由 13 左右降至 9 左右——碱性向中性转化。

抗碳化，对水泥混凝土结构而言，主要是延缓或阻隔环境中的二氧化碳扩散到混凝土中；延缓或阻止二氧化碳与混凝土水化物发生化学反应；以及延缓或阻止 OH^- 的扩散等三个过程技术。

抗碳化法的本质，就在于保护混凝土结构的原本设计功能：抗渗、承重、支撑与耐久。同时，对钢筋混凝土结构而言，延缓与阻止因碳化而导致钢筋的锈（腐）蚀的发生和发展。

众所周知，混凝土内部的碱性较强，在水泥凝结硬化过程中，pH 值达到 13.5~13.8，硬化混凝土中液相的 pH 值一般在 12.5 以上。如此之高的碱性是可以使其内部的钢筋表面保持钝化状态的。

但是，大气中的 CO_2 、 SO_2 等酸性物质与混凝土内的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生中和反应后，结果使混凝土的 pH 值由原来的碱性（液相 12.5 固相 13.5~13.8）逐渐降低到 pH 只有 9 左右，几近中性的 pH=7。

研究表明，当混凝土的 pH 值由 12.5 以上降到 11.8 以下时，隐埋在混凝土内的钢筋表面钝化薄膜就被破坏失效，使钢筋表面变为活化状态或者处于活化作用之中。在此情况下，当空气中的 O_2 、 CO_2 通过混凝土内的孔隙扩散到钢筋表面时，就会发生锈蚀。钢筋锈蚀后，锈蚀产生的体积比原来钢筋的体积要膨胀 2~4 倍，从而对钢筋周围的混凝土产生相应的膨胀应力。锈蚀越严重，铁锈就越多，相应膨胀应力也越大，膨胀应力达到和超过混凝土极限强度时就导致混凝土开裂并沿钢筋形成裂缝。裂缝的产生已使水和 CO_2 沿缝进入混凝土内，从而又加速了碳化和钢筋的锈蚀。如此恶性循环，其结果将带来穿堤建筑物结构外部混凝土大量剥落及钢筋截面积缩小，最终降低建筑物承载力与稳定性，影响结构物的安全。为此，抵抗或防止碳化，使混凝土钢筋处于钝化状态，或者说，尽量保持混凝土原本的碱性而不被中性。

综上所述，防止混凝土碳化，或者抵抗混凝土碳化的技术，其工法核心在于减缓碳化速度和有效控制混凝土原本处于碱性水

平而不趋于中性化过程。

鉴于混凝土碳化速度主要取决于混凝土的抗渗性和含水量、大气中的 CO_2 浓度以及环境相对湿度等，故抗碳化法的技术修补，可以划分为：

- (1) 以提高混凝土抗渗能力的抗碳化技术。
- (2) 以适度降低混凝土含水量的抗碳化技术。
- (3) 以淡化大气中的 CO_2 浓度的抗碳化技术。
- (4) 以降低环境相对湿度的抗碳化技术。

(1) ~ (2) 属于混凝土配制与浇筑的内因控制技术，但不能为了防止碳化而降低混凝土工程设计强度要求，或者为了抵抗碳化而提高混凝土工程造价成本。

(3) ~ (4) 属于混凝土工程的环境空间（含大气等）的外因控制技术。外因从理论上讲是可以控制的，但实际上可能由于增加投资而难以实施。

为此，国内外研究结果表明，防止混凝土碳化或抵抗混凝土碳化法，转向为快捷、有效的修补材料与工艺方面。即防碳化的防护材料施工法和抗碳化的修补材料施工技术两大类。

防碳化的防护材料包括环氧厚浆刷涂与喷涂法；环氧沥青厚浆的刷涂与喷涂法；聚氨酯刷涂与喷涂法；氯丁胶乳沥青的刷涂与喷涂法以及耐蚀类石材、陶瓷与密实混凝土板用于防碳化的耐蚀水泥砂浆衬砌法等。

抗碳化的修补材料施工技术包括砂浆与混凝土原材料修补技术；特种砂浆、混凝土材料修补技术；化学注（灌）浆材料修补技术；嵌缝密封材料修补技术；快速堵漏止水材料修补技术；防水片材修补技术等（见附录 F）。

不论是防碳化的防护材料施工法，还是抗碳化的修补材料施工技术，其工法的宗旨是，通过抗碳化法的实施，达到恢复或改善原有工程结构状况，避免造成险坝、险闸、险渠、险堤等，保证堤坝、水闸、泵站、船闸和渠道，以及路桥、隧道、竖井、地铁等的安全运行。

1.2 适用范围

抗碳化法应用于两个方面：一是混凝土或钢筋混凝土建筑物的不同工程；二是混凝土组成的构筑物或构件。

作为水资源的堤坝混凝土或钢筋混凝土建筑物，抗碳化法适用于下述系列工程。

1.2.1 水闸

抗碳化法用于水闸的闸室、上游连接段和下游连接段的所有混凝土或钢筋混凝土构件和建筑物。包括：

- (1) 节制闸的闸室，上、下游连接段。
- (2) 进水闸的闸室，上、下游连接段。
- (3) 分洪闸的闸室，上、下游连接段。
- (4) 排水闸的闸室，上、下游连接段。
- (5) 挡潮闸的闸室，上、下游连接段。
- (6) 冲沙闸的闸室，上、下游连接段。

在上述各类型水闸中，重点是闸室的底板、胸墙、翼墙、边墩、闸孔等一系列混凝土的抗碳化处治。

1.2.2 泵站

抗碳化法用于泵站主要是永久性的主要建筑物的混凝土或钢筋混凝土表面。包括：

- (1) 泵房混凝土壁面及混凝土构件。
- (2) 进水闸的混凝土或钢筋混凝土壁面。
- (3) 引渠混凝土或钢筋混凝土表面。
- (4) 进、出水池的混凝土或钢筋混凝土表面。
- (5) 出水混凝土管道表面。
- (6) 变电设施的混凝土表面。

对于重要的泵站，有时对其次要永久性建筑物诸如导水墙、挡土墙等的混凝土表面，也作个别抗碳化法处治以保证其整体性