

建筑施工工程师技术丛书

新型混凝土及其施工工艺

赵志缙 等编著



中国建筑工业出版社

建筑施工工程师技术丛书

新型混凝土及其施工工艺

赵志缙 等编著

中国建筑工业出版社

本书是建筑施工工程师技术丛书之一。内容着重介绍十六种新型混凝土，这些混凝土具有特殊的用途。文内分别叙述了各种混凝土的发展、配合比、物理力学性能、施工技术和方法；有的品种还简介了国外的研究和使用情况。可作建筑科研、施工、教学的参考。

* * *

责任编辑 陈淑英

建筑施工工程师技术丛书
新型混凝土及其施工工艺
赵志缙 等编著

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市平谷县大华山印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10⁵/₈；字数：284千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数：1—20,900册 定价：2.30元

统一书号：15040·5072

出版说明

当前，新技术革命浪潮冲击着一切经济部门，建筑业也不例外。许多现代化的科学技术方法和管理手段正逐步地应用在建筑业中，取得了越来越大的经济效益。党的十一届三中全会以来，我国的建筑事业得到了蓬勃发展，各种现代化的建筑如雨后春笋，逐年增多。常年奔波在施工生产第一线的建筑施工工程师们，担负着繁重而复杂的施工任务。他们渴望学习新技术，提高业务水平；渴望更新自己的知识以适应现代化的要求。从科学技术的发展和四化建设的需要考虑，对在职科技人员进行继续教育的重要性和迫切性也日益突出。为此，我们组织出版了这套丛书，希望这套书能对他们有所裨益，并在工程实践中广泛应用新技术，建造出更多优良的工程，取得更佳的经济效益。

城乡建设环境保护部曾委托同济大学、重庆建筑工程学院、哈尔滨建筑工程学院从一九八一年开始举办建筑施工工程师进修班。这套丛书就是根据这些班的教学内容，结合当前施工技术的发展，将施工新技术、新材料、新结构的课题适当加多，以同济大学的老师为主组织编写的。可作为工程师进修班的教材，也可作为建筑施工工程师和有关人员自学丛书。计划列题十余种，三年左右出齐。成书时尽量做到内容完整系统，文字叙述深入浅出，以便于现场施工工程师和技术员自学。当然，书中的内容选材是否适当，能否满足读者的要求，还希望广大读者提出意见，以便我们改进。谢谢！

城乡建设环境保护部干部局

中国建筑工业出版社

1986年6月

目 录

出版说明

前 言

第一章 聚合物混凝土	1
一、概述	1
二、聚合物浸渍混凝土	2
三、聚合物混凝土	9
四、聚合物水泥混凝土	14
第二章 流态混凝土	17
一、概述	17
二、流化剂及流态化机理	18
三、流态混凝土拌合物的性质	23
四、流态混凝土的配合比	28
五、流态混凝土的物理力学性能	35
第三章 补偿收缩混凝土	40
一、概述	40
二、混凝土的收缩	42
三、膨胀水泥与膨胀剂	47
四、限制膨胀率的选定	51
五、补偿收缩混凝土的主要性能	52
六、补偿收缩混凝土的施工	57
第四章 无砂大孔混凝土	60
一、概述	60
二、无砂大孔混凝土的原材料及配合比	63

三、无砂大孔混凝土的物理力学特性	67
四、无砂大孔混凝土的施工	78
第五章 纤维混凝土	86
一、概述	86
二、纤维混凝土的增强机理	88
三、纤维混凝土的物理力学性能	91
四、纤维和基体的界面粘结分析	105
五、纤维混凝土的配合比设计	108
六、纤维混凝土的施工	109
第六章 防水混凝土	113
一、概述	113
二、普通防水混凝土	113
三、外加剂防水混凝土	121
四、膨胀水泥防水混凝土	136
五、防水混凝土工程的施工	136
第七章 防射线混凝土	139
一、防射线混凝土的特点	139
二、防射线混凝土的原材料	140
三、防射线混凝土的配合比	144
四、防射线混凝土的施工	145
第八章 耐酸混凝土	147
一、水玻璃混凝土	147
二、硫磺混凝土	155
三、沥青混凝土	158
第九章 轻骨料混凝土	162
一、概述	162
二、轻骨料的性能	164
三、轻骨料混凝土的配合比设计	176
四、轻骨料混凝土的物理力学性能	189
五、轻骨料混凝土的施工	196

第十章 水下浇筑混凝土	200
一、概述	200
二、水下混凝土(砂浆)拌合物的技术要求	201
三、水下混凝土(砂浆)配合比设计	208
四、水下混凝土浇筑方法	213
五、水下压浆混凝土施工	227
第十一章 泵送混凝土	238
一、概述	238
二、材料与配合比	238
三、混凝土泵	243
四、混凝土泵送计算	250
五、混凝土泵送施工	252
第十二章 喷射混凝土	255
一、概述	255
二、喷射混凝土的原材料及配合比	256
三、喷射混凝土的物理力学性能	267
四、喷射混凝土施工	270
第十三章 真空混凝土	277
一、概述	277
二、真空混凝土的脱水密实机理	279
三、真空混凝土的施工及其配合比	283
四、真空作业制度	287
五、真空混凝土的性能	291
六、真空混凝土的试验研究	296
第十四章 S.E.C.混凝土	301
一、概述	301
二、S.E.C.混凝土的制备	302
三、新拌S.E.C.混凝土的性质	306
四、S.E.C.混凝土的物理力学性质	312

第十五章 太阳能养护混凝土.....	313
一、概述	313
二、透光材料和罩型的选择.....	314
三、经济效果.....	321
第十六章 磁化水混凝土.....	324
一、概述	324
二、磁化水混凝土的物理力学性质.....	324
三、磁化水提高混凝土强度的机理.....	327
四、磁化水混凝土的经济效果.....	329

第一章 聚合物混凝土

一、概 述

从1930年开始就有人将塑料用于混凝土，到1950年它的潜在的用途引起了人们的重视，在一定规模上开始了塑料用于混凝土的试验研究。

1975年5月在英国伦敦召开了第一届国际聚合物混凝土会议，第一次使用聚合物混凝土这一专业用语。1978年10月在美国奥斯汀召开了第二届国际聚合物混凝土会议。此后，聚合物混凝土在一些国家引起重视，较大规模地开展了研究工作，并陆续在一定规模上用于生产实践，逐渐积累了一些经验。目前，美、日、联邦德国、苏联等国家都重视这方面的研究工作，我国在该领域也开始了试验研究工作。

目前，聚合物混凝土分为三类：

1. 聚合物浸渍混凝土，简称PIC。它是将已硬化的普通混凝土放在单体里浸渍，然后用加热或辐射的方法使混凝土孔隙内的单体产生聚合作用，使混凝土和聚合物结合成一体的一种新型混凝土。按其浸渍方法的不同，又分为完全浸渍和部分浸渍两种。

2. 聚合物混凝土，简称PC。它是以聚合物（树脂或单体）代替水泥作为胶结料与骨料拌合，浇筑后经养护和聚合而成的一种混凝土。

3. 聚合物水泥混凝土，简称PCC。它是在水泥混凝土搅拌阶段掺入单体或聚合物，浇筑后经养护和聚合而成的一种混凝土。

上述三类聚合物混凝土，其生产工艺不同，物理力学性质也有区别，造价和适用范围亦不同。

二、聚合物浸渍混凝土

所谓聚合物浸渍混凝土 (Polymer Impregnated Concrete) 就是将硬化了的混凝土浸渍在单体中, 然后再使其聚合 成整体混凝土, 以减少其中的孔隙。

事实证明, 减少水泥混凝土的孔隙, 就能提高其强度和改善其它的性能。为了减少水泥混凝土的孔隙, 可像用聚合物浸渍木材一样, 用粘性小的单体浸渍混凝土, 然后用加热或放射线辐射的方法使其聚合。这一技术是1965年在美国原子能委员会的支援下, 由布鲁克海文国立研究所和美国垦务局共同开发。

由于聚合物浸渍混凝土具有高强、密实、防腐、耐磨等优点, 很快引起人们广泛重视。日本、苏联、联邦德国、英国、意大利、挪威、瑞士、波兰、澳大利亚等国也先后开展了研究, 取得了一批成果。目前正在设法解决高分子材料昂贵导致聚合物浸渍混凝土成本高的问题, 以向实用化方面迈进。

1. 生产工艺

聚合物浸渍混凝土的生产工艺过程为: 基体 (硬化了的混凝土) 的干燥→单体浸渍→聚合。

为了获得高强度的聚合物浸渍混凝土, 基体的养护方法十分重要。试验表明, 混凝土用高压釜养护较好, 因为高压釜养护在混凝土内所形成孔隙的形状和大小, 对单体浸渍是有利的。

(1) 基体干燥

聚合物是否充满基材的孔隙对聚合物浸渍混凝土的强度和耐久性有很大的影响, 为了最大限度地改善基体的性能, 必须对基体进行充分的干燥, 消除混凝土内孔隙中的游离水, 使聚合物能充分浸渍基体的孔隙。

基体一般采用常压下热风干燥的方法, 干燥所用的温度和时间, 取决于基体的大小和形状, 美国建议干燥的温度以150°C左右为宜, 因为采用这个温度进行干燥, 不但干燥速度快, 而且能

制作出高质量的聚合物浸渍混凝土。亦可对基体干燥后再抽真空（6666Pa即50mmHg以下），这可使单体易于浸入混凝土中。

如果基体干燥不充分，单体在基体中的浸渍也就不充分，聚合物的浸渍量低，浸渍的改性效果就差。

（2）浸渍

浸渍即将基体混凝土制品在常压或压力状态下浸渍在单体中，直到浸透为止。

浸渍用的单体，粘度应低一些，以便在浸渍时单体容易渗透到混凝土中。

浸渍用的材料，常用的有：甲基丙烯酸甲酯（MMA）、苯乙烯（S）、丙烯腈、三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸甲酯（TMPT-MA）、不饱和聚酯等，应用最广泛的还是前两种。

浸渍可以在常压下进行，亦可在压力下进行。试验证明，加压浸渍不但能提高浸渍速度（图1-1），而且能提高浸渍量，增强浸渍效果。表1-1为我国以水泥砂浆为基体进行加压浸渍试验的结果，由此可看出高压下浸渍效果较好。

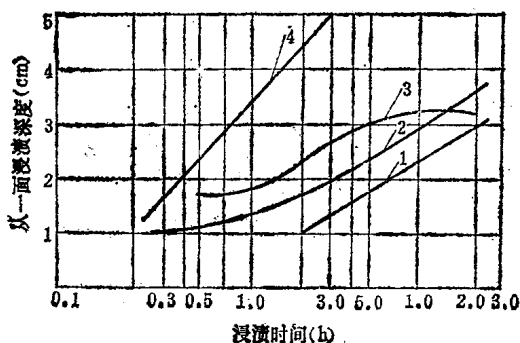


图 1-1 浸渍方法与浸渍速度的关系

1—常压下浸渍；2—基体抽真空(2666Pa)后进行常压浸渍；3—压力(0.4 MPa)下浸渍；4—基体抽真空(2666Pa)后进行加压(0.40MPa)浸渍

加压浸渍所以能提高浸渍效果，是由于加压浸渍时混凝土中残留空气的影响大幅度下降，基体中墨水瓶状气孔的气堵现象被

克服，减少了浸渍剂在聚合时的体积收缩，以及增大了聚合物与基体间的界面面积并提高了界面间的粘结的缘故。

MMA加压浸渍的效果(未经热处理)

表 1-1

试件类型	浸渍量 (重量百分数)	抗折强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	抗压强度提高 倍数 (α)
水泥砂浆基体	0 %	9.00	60.0	1
常压下浸渍	7.5%	3.20	162.0	2.7
在 25×10^5 Pa下浸渍	8.8%	33.50	206.0	3.43
在 50×10^5 Pa下浸渍	9.0%	33.00	218.0	3.63
在 100×10^5 Pa下浸渍	9.1%	31.00	225.0	3.75
在 150×10^5 Pa下浸渍	9.1%	30.00	223.0	3.72
在 200×10^5 Pa下浸渍	9.2%	27.00	237.0	3.95

由表1-1可看出，加压浸渍可以提高浸渍量，这是提高抗压强度的主要原因之一。

(8) 聚合

聚合即使浸渍在基体中的聚合物固化，使聚合后的聚合物混凝土，有较高的强度和较好的耐热性、耐腐蚀和耐磨性等。

聚合物浸渍混凝土的聚合方法，有热聚合、辐射聚合和催化剂聚合。目前应用较多的是前两种，美国和日本认为热聚合较好，聚合速度快，我国亦用热聚合。

热聚合多用增加化学引发剂的加热法。化学引发剂有过氧化苯酰、特丁基过苯甲酸盐、偶氮双异丁腈、 α -特丁基偶氮异丁腈等。用化学引发剂时，使用前将其溶解在单体中。热聚合的加热可用电炉、蒸汽或热水。

热聚合要选择合适的聚合温度和加热时间，聚合温度和加热时间不同，得到的聚合物的强度亦不同。

辐射聚合即用辐射线照射，聚合时要选择合适的辐射量。

聚合物浸渍混凝土热聚合时的加热时间和辐射聚合时的辐射量如表1-2所示。

由于基体表面的单体容易挥发，在聚合时，宜用薄膜覆盖基

各种聚合物聚合所需要的辐射量和加热时间

表 1-2

聚合物种类	聚合物软化	100%聚合所需要的辐射量	加热时间 (h)
	温度 (°C)	($10^{10} \times \text{cd/m}^2$) (辐射强度为 $1.68 \times 10^3 \text{cd/m}^2$)	(75°C加入1%过氧化苯)
甲基丙烯酸甲酯	100	1.53	1.25
苯乙烯	110	15.9	8.0
丙烯腈	270	0.51	0.6
苯乙烯-丙烯腈60/40	110	1.62	1.0
醋酸乙烯	70	1.62	1.0

体混凝土，或者在不溶解单体的介质中进行聚合。

在热水中聚合最方便，国外也认为在水中热聚合是商品化生产聚合物浸渍混凝土的最可行的方法。

2. 物理力学性能

聚合物浸渍混凝土是在普通混凝土中浸入6~9%（重量比）的聚合物制成的，混凝土的改性也是由于聚合物充满混凝土中的孔隙和毛细管而造成的。因此，聚合物浸渍混凝土与普通混凝土虽然在外观上有些相似，但内部确是有区别的。

聚合物浸渍混凝土显著地改善了混凝土的物理力学性能（表1-3）。一般情况下，聚合物浸渍混凝土的抗压强度约为普通混凝土的3~4倍；抗拉强度约提高3倍；抗弯强度约提高2~3倍；弹性模量约提高1倍；冲击强度约提高0.7倍。此外，徐变大大减少（图1-2），抗冻性、耐硫酸盐性、耐酸和耐碱等性能都有很大的改善。

聚合物浸渍混凝土抗压及抗拉强度的提高，与浸渍量有关，而浸渍量又取决于混凝土的孔隙率和毛细管的大小，此外也与单体的粘性、表面张力、单体分子量大小等有关。因此，孔隙率大而强度低的混凝土，用有机单体来浸渍改性，其效果显著；对于孔隙率小而强度高的混凝土，则有机单体浸渍改性的效果不大。

聚合物浸渍混凝土的应力—应变关系近似直线（图1-3），延性甚至比普通混凝土还差。其原因是，普通混凝土破坏时裂缝

聚合物浸渍混凝土的物理力学性能

表 1-3

特 性	甲基丙烯酸甲酯 (MMA) (浸渍率4.6~6.7%)			苯乙烯 (浸渍率4.2~6.0%)			MMA+10%TMPTMA (浸渍率5.5~7.6%)			聚丙烯腈 (浸渍率3.2~6.0%)		
	未浸渍	辐射聚合	热聚合	未浸渍	辐射聚合	热聚合	未浸渍	辐射聚合	热聚合	未浸渍	辐射聚合	热聚合
抗压强度 (MPa)	37.00	142.40	127.70	37.00	103.40	72.00	37.00	158.10	140.70	37.00	104.70	87.80
弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)	2.5	4.4	4.3	2.5	5.4	5.2	2.5	5.9	3.58	2.5	4.41	3.61
抗拉强度 (MPa)	2.92	11.43	10.6	2.92	8.47	5.91	2.92	12.0	9.77	2.92	9.0	6.39
抗弯强度 (MPa)	5.20	18.54	16.08	5.20	16.79	8.15	5.20	15.9	—	5.20	12.9	4.62
吸水率 (%)	6.4	1.08	0.34	6.4	0.51	0.70	6.4	1.09	1.21	6.4	2.95	5.68
耐磨量 (g)	14	4	4	14	9	6	14	9	5	14	7	6
空气腐蚀 (mg)	8.13	1.63	0.51	8.13	0.89	0.23	8.13	1.83	—	8.13	2.51	2.34
透水性 (mg/年)	0.16	0.02	0.04	0.16	—	0.04	0.16	0.0003	0.0366	0.16	—	—
导热系数 23°C (W/m·K)	2.30	2.26	2.19	2.30	2.22	2.26	2.30	2.29	—	2.30	2.15	2.18
热膨胀系数 ($\text{cm}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C} \times 10^{-6}$)	7.25	9.66	9.48	7.25	9.15	9.00	6.70	8.43	3.43	6.70	8.18	7.63
抗冻性(循环、重量 减少%)	490; 25.0	750; 4.0	750; 0.5	490; 25.0	620; 6.5	320; 0.5	740; 25.0	2560; 8.0	2560; 0	740; 25.0	1840; 25.0	2020; 2
冲击强度 (L/锤)	32.0	55.8	52.0	32.0	48.2	50.1	32.0	54.2	—	32.0	47.5	33.7
耐硫酸盐浸渍300天 (膨胀率%)	0.144	0.0	—	0.144	0.0	—	0.144	0.004	0.002	0.144	0.088	0.006
耐盐酸性15% HCl 浸渍84天重量减少(%)	10.4	3.64	3.49	10.4	5.5	4.2	—	10.58	—	—	13.31	—

围绕着骨料展开，裂缝遇到骨料要转向绕道，因而骨料起到阻挡裂缝开展的作用，故普通混凝土表现出有一点延性。而聚合物浸渍混凝土破坏时的裂缝是通过骨料展开，上述作用很小或不存在，特别在受拉时，聚合物浸渍混凝土无任何预兆就会破坏。

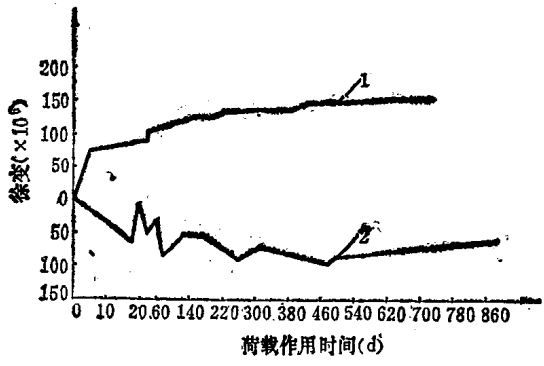


图 1-2 MMA浸渍混凝土与普通混凝土的徐变
1—普通混凝土的徐变；2—MMA浸渍混凝土的徐变

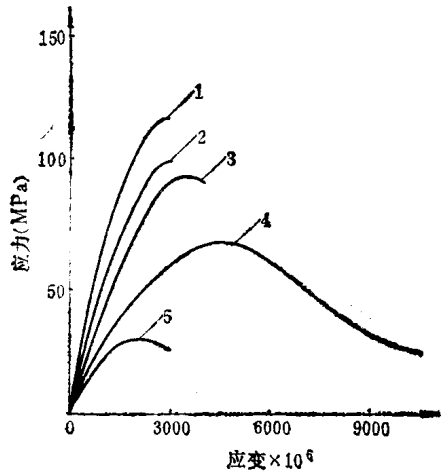


图 1-3 聚合物浸渍混凝土的应力-应变关系
1—100% MMA，2—90% MMA + 10% BA，3—70% MMA + 30% BA，
4—50% MMA + 50% BA，5—普通混凝土

为解决此问题，可在浸渍单体里添加丙烯酸丁酯，这样可以增加延性，但强度却有所降低。另外，还可用添加钢纤维的办法来增加聚合物浸渍混凝土的延性。

此外，温度对聚合物浸渍混凝土的各种性能产生影响，由于聚合物在高温下产生热分解，因而影响其性能。表1-4所示为苯乙烯—三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸甲酯（TMPTMA）、甲基丙烯酸甲酯（MMA）—三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸甲酯（TMPTMA）浸渍混凝土在温度21和177°C时的试验结果。可以看出随着温度的升高，抗压强度、弹性模量、泊松比等皆有所降低。

温度对聚合物浸渍混凝土性能的影响

表 1-4

混凝土种类	试验温度 (°C)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)	弹性极限 (MPa)	泊松比
基体混凝土	21	34.5	2450	8.3	0.16
基体混凝土	177	34.5	2030	7.9	0.14
苯乙烯-TMPTMA 聚合物浸渍混凝土 (浸渍率5.7%)	21	117	4480	72.5	0.21
苯乙烯-TMPTMA 聚合物浸渍混凝土 (浸渍率5.6%)	177	100	3710	68.3	0.18
MMA-TMPTMA 聚合物浸渍混凝土 (浸渍率6.4%)	21	122	4130	94	0.19
MMA-TMPTMA 聚合物浸渍混凝土 (浸渍率6.0%)	177	86	3290	61.5	0.17

温度对聚合物浸渍混凝土性能的影响，随所用有机单体的种类而有所不同。但总的趋势是一致的。因此，目前在高温下使用聚合物浸渍混凝土还有问题。

此外，聚合物浸渍混凝土还有一个缺点，即当温度到达比产生火灾还低的温度时，聚合物就会产生热分解，冒烟、并产生恶

臭气体和燃烧，强度和刚度急剧下降，严重地影响结构的安全。

3. 用途

聚合物浸渍混凝土的造价目前较高（在日本为8万日元/ m^3 ），实际应用尚不普遍。目前只是利用其耐腐蚀、高强、耐久性好的特性制作一些构件，如：管道内衬、隧道衬砌、桥面板、路缘石、铁路轨枕、混凝土船、海上采油平台等。将来，随着其制作工艺的简化和成本的降低，做为防腐材料、耐压材料、以及在水下及海洋开发结构方面将扩大其应用范围。

目前，国外研究的方向有：低聚合物含量（1~3%）的聚合物浸渍混凝土；简化生产工艺，在密封的模板内进行浸渍和聚合的方法；扩大应用范围，除研究聚合物浸渍混凝土外，还研究聚合物浸渍石棉水泥、石膏水泥、陶瓷等。

三、聚合物混凝土

聚合物混凝土亦称树脂混凝土，是以合成树脂为胶结材料、以砂石为骨料的混凝土。为了减少树脂的用量，还加有填料粉砂等。

聚合物混凝土与普通混凝土相比，具有强度高、耐化学腐蚀、耐磨性、耐水性和抗冻性好，易于粘结、电绝缘性好等优点。

由于聚合物混凝土具有上述一系列优点，所以从1950年开始研究以来，受到很多国家的重视，尤其是联邦德国、苏联、日本、美国等国家在这方面进行了大量的研究和试制工作，我国也开始了这方面的研究工作。

聚合物混凝土亦可掺加增强材料，经增强的聚合物混凝土，其抗裂性能比普通混凝土高很多倍。

1. 生产工艺

1) 原材料

① 胶结料