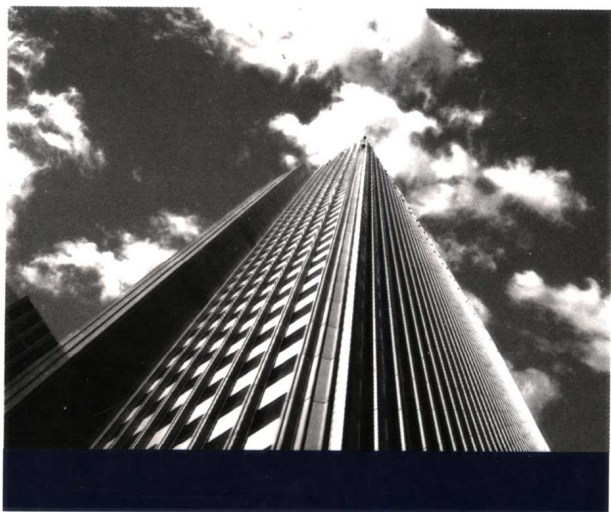


朱宏军 程海丽 姜德民 编著

# 特种混凝土和 新型混凝土



Chemical Industry Press



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

# 特种混凝土和新型混凝土

朱宏军 程海丽 姜德民 编著



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

特种混凝土和新型混凝土/朱宏军,程海丽,姜德民  
编著. -北京:化学工业出版社,2004.3  
ISBN 7-5025-5314-2

I. 特… II. ①朱…②程…③姜… III. 混凝土-生  
产工艺 IV. TU528.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 020462 号

---

特种混凝土和新型混凝土

朱宏军 程海丽 姜德民 编著

责任编辑:刘俊之

文字编辑:周寒

责任校对:李林

封面设计:蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

http://www.cip.com.cn

\*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印刷

北京兴顺印刷厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 14 $\frac{1}{2}$  字数 393 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5314-2/TU·38

定 价: 36.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

## 内 容 提 要

本书较全面系统地对近几十年发展起来的特种混凝土和新型混凝土进行了介绍。主要内容包括各类特种混凝土和新型混凝土的原料组成、配合比设计、施工工艺及这些混凝土的性能和应用，对其中一些混凝土研制与发展的沿革也作了简要阐述。

本书有较强的实用性，理论上也有一定的深度。可供建筑工程、交通、水利、采矿、化工、冶金等领域的工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业的教材或参考资料。

## 前 言

近十几年来,随着我国经济的发展,混凝土的应用量越来越大,对混凝土性能和功能的要求也越来越多。不仅原有的一些特种混凝土得到了大量应用,而且一些具有新性能或新功能的混凝土也不断涌现。作者在多年教学和科研及大量资料积累的基础上,编写了这本《特种混凝土和新型混凝土》。编写的目的旨在对已经成功应用或正在应用的各种特种混凝土和新型混凝土作比较全面系统的介绍。内容以各种混凝土的原料组成、配合比设计、施工工艺、技术性能及施工为主,力求具有实用性。

本书在编写过程中,参考引用了国内外诸多专家、学者及有关企业公开发表的研究成果和技术数据,在此表示诚挚的感谢!

全书共 23 章,其中第四、十二、十三章由程海丽编写,第十七、二十一章由姜德民编写,其余由朱宏军编写。北方工业大学王珊教授、高建岭博士、高振林工程师参与了本书的审核,另外编写过程还得到了中国建材研究院等单位同行专家的支持,在此也一并表示谢意。

由于编者的水平和能力有限,难免有疏漏、错误之处,诚望同行专业予以指正。

作者谨识

2003 年 11 月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 高性能混凝土 .....</b>	<b>4</b>
第一节 概述 .....	4
第二节 研制高性能混凝土的主要技术途径和措施 .....	5
第三节 高性能混凝土的原料选择和配合比设计 .....	11
第四节 高性能混凝土的性能 .....	30
第五节 高性能混凝土的施工 .....	33
第六节 高性能混凝土的应用 .....	34
<b>第二章 纤维增强混凝土 .....</b>	<b>37</b>
第一节 概述 .....	37
第二节 纤维增强混凝土的增强机理 .....	39
第三节 钢纤维增强混凝土 .....	48
第四节 玻璃纤维增强混凝土 .....	67
第五节 其他纤维增强混凝土 .....	76
<b>第三章 干硬混凝土 .....</b>	<b>80</b>
第一节 概述 .....	80
第二节 干硬混凝土的原料组成 .....	80
第三节 干硬混凝土的配合比设计 .....	81
第四节 干硬混凝土的施工 .....	85
第五节 干硬混凝土的性能及测定 .....	87
<b>第四章 流态混凝土 .....</b>	<b>90</b>
第一节 概述 .....	90
第二节 流态混凝土的原料组成 .....	91
第三节 流态混凝土拌和物的性质 .....	98
第四节 硬化后流态混凝土的性质 .....	101
第五节 流态混凝土的配合比设计 .....	103
第六节 泵送混凝土——流态混凝土的泵送施工 .....	111

<b>第五章 耐酸混凝土</b>	117
第一节 概述	117
第二节 水玻璃耐酸混凝土	117
第三节 硫磺耐酸混凝土	130
<b>第六章 耐碱混凝土</b>	137
第一节 概述	137
第二节 耐碱混凝土的原料组成	138
第三节 耐碱混凝土的技术性能及配合比设计	139
第四节 耐碱混凝土的施工	140
<b>第七章 耐海水混凝土</b>	142
第一节 概述	142
第二节 耐海水混凝土的技术要求	143
第三节 耐海水混凝土的原料选择	145
第四节 耐海水混凝土的配合比设计	147
第五节 耐海水混凝土的施工	152
<b>第八章 耐热(耐火)混凝土</b>	153
第一节 概述	153
第二节 硅酸盐系列耐热混凝土	153
第三节 铝酸盐耐热混凝土	158
第四节 磷酸盐耐热混凝土	164
第五节 其他耐热混凝土	167
<b>第九章 耐油混凝土</b>	170
第一节 概述	170
第二节 耐油混凝土的原料选择及配合比设计	171
第三节 耐油混凝土的施工	174
<b>第十章 耐磨损混凝土</b>	175
第一节 概述	175
第二节 耐磨损混凝土的原料选择	176
第三节 耐磨损混凝土的配合比设计	179
第四节 耐磨损混凝土的施工	182
<b>第十一章 防水混凝土</b>	183
第一节 概述	183
第二节 普通防水混凝土	184

第三节	专用外加剂防水混凝土 .....	187
<b>第十二章</b>	<b>聚合物混凝土 .....</b>	<b>199</b>
第一节	概述 .....	199
第二节	聚合物浸渍混凝土 (PIC) .....	200
第三节	聚合物改性水泥混凝土 (PMC) .....	209
第四节	树脂混凝土 (PC) .....	227
<b>第十三章</b>	<b>膨胀混凝土 .....</b>	<b>236</b>
第一节	概述 .....	236
第二节	膨胀水泥和膨胀剂 .....	236
第三节	限制条件下膨胀混凝土的技术性能 .....	241
第四节	补偿收缩混凝土 .....	244
第五节	自应力混凝土 .....	250
第六节	补偿收缩混凝土与自应力混凝土的区别 .....	258
第七节	膨胀混凝土的应用与发展 .....	259
<b>第十四章</b>	<b>轻混凝土 .....</b>	<b>261</b>
第一节	概述 .....	261
第二节	轻集料混凝土 .....	262
第三节	加气混凝土 .....	282
第四节	泡沫混凝土 .....	300
第五节	轻集料多孔混凝土 .....	305
第六节	大孔混凝土 .....	308
<b>第十五章</b>	<b>喷射混凝土 .....</b>	<b>317</b>
第一节	概述 .....	317
第二节	喷射混凝土的原料组成 .....	318
第三节	喷射混凝土配合比设计 .....	320
第四节	喷射混凝土的施工 .....	328
第五节	喷射混凝土的性能及其影响因素 .....	332
第六节	喷射纤维混凝土 .....	333
<b>第十六章</b>	<b>水下不分散混凝土 .....</b>	<b>336</b>
第一节	概述 .....	336
第二节	水下不分散混凝土的原料组成 .....	338
第三节	水下不分散混凝土的配合比设计 .....	340
第四节	水下不分散混凝土的施工 .....	342



第五节	水下不分散混凝土的性能 .....	346
第六节	NDC 工程应用实例 .....	348
<b>第十七章</b>	<b>道路混凝土 .....</b>	<b>354</b>
第一节	概述 .....	354
第二节	道路水泥混凝土 .....	355
第三节	道路沥青混凝土 .....	378
第四节	城市步行道路混凝土 (透水性混凝土) .....	390
<b>第十八章</b>	<b>防辐射混凝土 .....</b>	<b>399</b>
第一节	概述 .....	399
第二节	防辐射混凝土的原料组成 .....	402
第三节	防辐射混凝土的配合比设计 .....	404
第四节	防辐射混凝土的施工 .....	408
<b>第十九章</b>	<b>导电混凝土 .....</b>	<b>410</b>
第一节	概述 .....	410
第二节	导电混凝土的原料组成 .....	411
第三节	导电混凝土的配合比设计 .....	412
第四节	导电混凝土的导电性能及其影响因素 .....	415
第五节	导电混凝土的施工及应用 .....	416
<b>第二十章</b>	<b>防爆混凝土 .....</b>	<b>419</b>
第一节	概述 .....	419
第二节	防爆混凝土的原料组成 .....	419
第三节	防爆混凝土的配合比设计 .....	420
第四节	防爆混凝土的施工 .....	421
第五节	防爆混凝土的应用 .....	421
<b>第二十一章</b>	<b>绿化混凝土 .....</b>	<b>423</b>
第一节	概述 .....	423
第二节	绿化混凝土的原料组成 .....	424
第三节	绿化混凝土的配合比设计 .....	426
第四节	绿化混凝土的施工技术 .....	427
第五节	绿化混凝土的技术性能与技术指标 .....	428
<b>第二十二章</b>	<b>装饰混凝土 .....</b>	<b>431</b>
第一节	概述 .....	431
第二节	装饰混凝土的分类 .....	431

第三节	装饰混凝土的施工及制作工艺 .....	432
第四节	影响装饰混凝土质量的主要因素及解决措施 .....	440
第五节	装饰混凝土及其制品的应用 .....	443
第二十三章	其他新型混凝土和特种混凝土 .....	446
第一节	发光混凝土 .....	446
第二节	金属混凝土 .....	447
第三节	上釉混凝土 .....	448
第四节	磁化水混凝土 .....	449

## 绪 论

混凝土，这种以水泥为主要胶结材料，砂、石为主要集料（也称骨料）配制而成的人造石材，是一种既古老又新型，而且还在不断发展的材料。说其古老，可以追溯到 5000 年前，我国甘肃省秦安县大地湾地区，就曾经用类似于当今水泥混凝土的材料修筑过建筑物的地面。古罗马在 2000 年前也曾用具有较强水硬性的胶凝材料建造过地下水道。遗憾的是，这些古代的混凝土材料没有得到延续。虽然劳动人民曾先后发明制造了石膏和石灰及以石灰与火山灰混合物为主要胶结料的混凝土材料，但这些材料主要是气硬性的，耐水性差，强度也不高。1756 年，英国工程师约翰·斯梅顿（John Smeaton）受命重建英国康瓦尔海岸外的爱迭斯顿灯塔。为使重建的灯塔能承受狂风暴雨及海浪的冲击，约翰·斯梅顿开始致力于寻找和制备“最好的石灰”作胶结料。其间他发现，成分越纯，CaO 含量越高的石灰，耐水性反而越差。而用一些 CaO 含量不高的石灰石烧制出的石灰，特别是含黏土杂质较高的石灰石烧制的石灰，耐水性反而较好。

斯梅顿这一发现，使很多研究者得到启发：要制备具有一定耐水性的石灰，必须选用含黏土杂质的石灰石作为烧制石灰的原料，或在烧制石灰时人为地掺入一定的黏土。后来，约瑟夫·派克（Joseph Perker）用产于第三纪元的黏土质石灰石烧成了类似古罗马曾用过的石灰石-火山灰的胶凝材料，并命名为罗马水泥。但现在看来，这种罗马水泥只是一种含有少量水硬性硅酸盐矿物的石灰。

1824 年，英国建筑工人约瑟夫·阿斯普丁（Joseph Aspdin）首次烧制出了“可以制成与波特兰岛（Portland）岩石颜色类似并十分坚硬耐水的胶凝材料”。他将其称之为“波特兰水泥（Port-

land cement)”。并在 1824 年 10 月 21 日获得了专利。这就是现今硅酸盐水泥的原型。这种水泥的发明，开创了胶凝物质材料和混凝土科学的新纪元，使混凝土这种人造石材很快成了建筑工程材料中无可争议的最主要的材料。对水泥及混凝土的研究也成了材料科学和工程研究领域中的一个重要组成部分。

随着经济和科技的发展，水泥和混凝土技术也随之发展。特别是 20 世纪 50 年代（即二战结束）后，全球经济开始复苏，科技和工业发展日益加快，对水泥及混凝土的数量要求越来越大，性能要求越来越高。为适应这种要求，陆续研制出了如早强混凝土、大坝混凝土、膨胀混凝土、纤维增强混凝土、聚合物混凝土等与普通混凝土不同的混凝土，我们称之为“特种混凝土”。进入 20 世纪 70 年代后，科技和现代工业开始突飞猛进，尤其是到 20 世纪 90 年代后，社会都市化的发展及产业技术的进步，都进一步促使混凝土技术更快地发展。例如，由于城市建设用地日益紧缺，建筑用地的价格成倍甚至十几倍几十倍的增长，促使房屋建筑要“上天入地下水”，即建造高层或超高层的建筑和建造多层的地下建筑甚至水中建筑。这就要求用于这些建筑的混凝土具有更高的强度以缩小结构的截面积，降低建筑物的自重；要求混凝土具有更高的耐久性和抗渗性以适应建造更深的地下工程甚至水中工程。为此研制出了高强混凝土、高性能混凝土、防水混凝土及水下浇筑混凝土。人们生活水平的提高，要求建筑物具有更强的隔声能力和隔热保温能力，这就需要一些用于墙体、屋面的混凝土材料具有较好的隔声、保温、隔热能力，为此，还制成了具有良好保温隔热性能和隔声性能的轻混凝土。一些化工工业要求混凝土具有抗各种腐蚀介质（酸、碱、盐）的耐蚀性；冶金建材工业要求混凝土具备耐热性；核工业的发展要求混凝土具有防辐射性；高等级公路要求混凝土具有高耐磨性和抗冻性；城市步行道为促使道路的排水和城市绿化要求混凝土具有透水性；一些特殊工业及试验场所要求混凝土具有抗静电性；对建筑物美化要求混凝土具有装饰性等。经广大科研工作者努力，已经或正在研制出能适应这些特殊要求的新型混凝土。同时，建筑施

工技术的发展也要求与之相适应的混凝土，如混凝土泵送技术的发展要求被泵送混凝土的可泵性，为降低施工噪声要求混凝土免振而具备的自流平性，也即在保证不离析前提下的大流动性等，为此研制出了流态混凝土等。

总之，现代经济和工业的发展促使了混凝土技术的发展，而混凝土技术的发展又反过来促进了现代经济和工业及科技的更大进步。可以说，没有混凝土的发展，就没有经济和科技的发展，也没有人类文明的进步。新兴的混凝土技术已经成为当代文明世界的物质支柱。我们相信，随着科技的发展和广大混凝土科技工作者的努力，一些更高性能更多功能的混凝土必将继续涌现。混凝土这一古老而又新型的材料，必将为经济的发展和人类的物质文明作出更大的贡献。

# 第一章 高性能混凝土

## 第一节 概 述

高性能混凝土 (high performance concrete, 简称 HPC) 是 20 世纪 90 年代发展起来的新型高技术混凝土。1990 年在美国马里兰州由美国 NIST 和 ACI 主办的讨论会上首次提出“HPC”这一新型混凝土的名词。所谓高性能混凝土的高性能是要求同时包含以下两个方面。

- ① 新拌混凝土要求高工作性；
- ② 硬化混凝土要求高强度的同时还要求具有高耐久性。

这一概念提出后，引起国际混凝土学术界及工程应用界的极大关注。因为在此之前，曾把混凝土标号大于  $C_{40}$ （后来又定为大于  $C_{50}$ ）的混凝土称之为高强混凝土。高强混凝土在工程中的应用，在很大程度上减少了混凝土结构的尺寸，从而降低混凝土结构的自重乃至整个建筑物的自重，使高层建筑、大跨度建筑构件（如大跨度桥梁）的建造可以提高到一个新的水平。但高强混凝土对新拌混凝土的工作性和硬化混凝土的耐久性没有提出特别要求。因此，高强混凝土对于现代建筑科学和技术仍然是不完善的。而高性能混凝土的提出和研制，是在高强混凝土的基础上。对混凝土技术的新的的发展。无疑对建筑科学和技术起到了更大的促进作用。

近 10 年来，世界各国的混凝土专家及学者都对如何更科学地定义高性能混凝土进行了大量的探讨。如美国的 P. K. Mehta，日本的钢材，我国的吴中伟院士和清华大学冯乃谦教授，都从混凝土性能、工程应用的条件等各个方面提出了各自的观点。特别是吴中伟院士结合可持续发展的问题，提出高性能混凝土的含义还应包括节约资源、不破坏环境、符合可持续发展的原则。具体的就是要在

保证高工作性，高强度，高耐久性的基础上，胶结料应尽量少用水泥。因为水泥的主要成分硅酸盐水熟料在生产过程中不仅对环境造成污染，而且消耗大量的能量。这些提法对今后高性能混凝土的研究都具有很重要的启示。

近几年来，高性能混凝土在建筑工程中的应用越来越广泛，因此，对高性能混凝土的研究也越来越受到重视。1998年在我国召开了东亚高性能混凝土研讨会，会上由中国、日本等国的数十位混凝土专家学者宣读了论文，对高性能混凝土的研究、在工程中的应用进行了探讨。这次会议对高性能混凝土的发展起到了较大的推动作用。随着我国经济的发展和建筑科技的进步，高性能混凝土在建筑工程中应用的比例将会逐年加大。我们应更加重视高性能混凝土的研究和应用，使高性能混凝土的技术获得更快的发展。

## 第二节 研制高性能混凝土的主要技术途径和措施

大量研究表明，影响混凝土性能（尤其是强度和耐久性）的最主要因素有两个方面：一是混凝土中硬化水泥浆体的孔隙率，孔分布和孔特征；二是混凝土硬化水泥浆体与集料的界面。要想提高混凝土的强度和耐久性，必须降低混凝土中水泥石的孔隙率，改善孔分布（即尽可能降低有害大孔），减少开口孔。法国路桥研究中心曾用BJH法测得，高性能混凝土中水泥石的孔隙率为18.8%，并且孔半径多小于2.5nm。而普通混凝土水泥石中大于5nm的孔隙率就达26.7%。为改善混凝土中硬化水泥浆体与集料界面的结合情况，应设法减少在集料-浆体界面上主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体定向排列组成的过渡带的厚度。从而增强界面物理连接或化学连接的强度。

到目前为止，主要从以下几方面的技术措施实施上述途径。

(1) 选用优质的、同时符合一定要求的水泥和粗细集料。这是配制高质量混凝土的基本条件，更是配制高性能混凝土的必要条件。

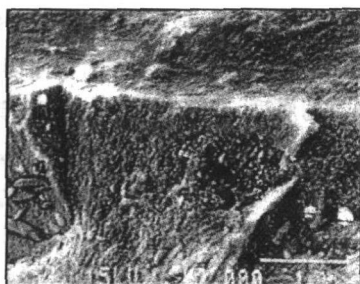
(2) 选用高效减水剂。在满足新拌混凝土大流动度的同时，降低 $W/C$ ，使混凝土中水泥石孔隙率降低。

(3) 选用具有一定潜水硬性的活性超细粉。如硅灰、稻壳灰、超细沸石粉、超细矿渣粉、超细粉煤灰、超细石灰石粉等。通过掺用活性超细粉提高混凝土的性能是目前高性能混凝土研究中最活跃的课题。这些活性超细粉在高性能混凝土中所起的作用可归纳为如下几种“粉体效应”。

①“活性效应”“活性效应”表现在两个方面。一是活性超细粉本身都含有大量火山灰活性物质。这些活性物质与水泥水化时产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应形成低碱水化硅酸钙。即所谓二次水化反应。这与矿渣水泥、粉煤灰水泥、火山灰水泥中的矿渣、粉煤灰、火山灰等“混合材”起的作用完全一样。二是活性超细粉的最大特点是“超细”，其表面积远大于掺混合材水泥中的混合材，一般在  $600\text{m}^2/\text{kg}$  以上。而硅灰则可达  $12000\text{m}^2/\text{kg}$  以上，具有如此大比表面积的活性超细粉使二次水化反应速度大大加快，反应程度也大大增加。而二次水化速度的加快和反应程度的增加，使水泥石中对强度和稳定性有不良影响的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体大大减少，对水泥石性能有利的低碱水化硅酸钙凝胶却大大增加。同时还减少了水泥石与集料界面过渡区的厚度及过渡区  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  富集和排列的程度。研究表明，掺加微硅粉的高性能混凝土水泥石中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量很少，与不掺硅粉的相比， $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量大约降低了2倍（如图1-1所示）。



(a) 无微硅粉的水化产物



(b) 掺加微硅粉的水化产物

图 1-1 掺硅灰和不掺硅灰水泥石电子显微镜照片



② 微集料效应 超细粉的颗粒直径大多在  $5\mu\text{m}$  以下。这种尺度的粉粒能够填充到一般细集料和水泥中混合材粉粒所不能填充的孔隙中，因而使水泥石中的孔隙率进一步降低。

③ 复合胶凝效应 在超细粉中如果掺入一些对超细粉活性有激活作用的物质，可以使超细粉的活性进一步加强，二次水化速度更快，这种作用称之为“复合胶凝效应”。

还有一些研究指出，某些超细粉的加入，在以合适的比例替代水泥时，不仅不会使水泥浆体流动性降低，反而会使流动性增大。这主要是由于一些玻璃态物质组成的超细粉（如粉煤灰超细粉及磷渣超细粉）其粒体表面不吸水，又可以填充在水泥粒子间隙和絮凝状结构中，占据充水空间，把絮凝结构中的水分释放出来，从而使水泥浆体流动性得以增加。

(4) 改善混凝土的施工工艺 改善混凝土施工工艺也是制备高性能混凝土的有效途径之一，目前效果比较显著的有以下几种。

① 水泥裹砂混凝土搅拌工艺 这是 20 世纪 80 年代日本首先应用的一种混凝土搅拌工艺，用这种搅拌方式制备的混凝土也称为 S. E. C 混凝土（Sand Enveloped With Cement）即裹砂混凝土。目前此法已成为制备高强混凝土和高性能混凝土的常用搅拌方法。用这种搅拌工艺在相同原料和配比条件下，强度可以比普通方法制备的混凝土高 20% 左右，耐久性、抗渗性也可以大幅度提高。

裹砂混凝土搅拌工艺与普通搅拌工艺的主要区别是搅拌时原料的投料顺序不同。普通搅拌工艺是水泥、砂、石 1 次配好加入搅拌机后，加上应配的水量拌和，而水泥裹砂搅拌工艺的投料方法如图 1-2 所示。

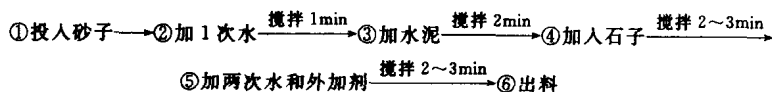


图 1-2 水泥裹砂搅拌工艺流程

这种方法之所以能改善混凝土的性能，是由于一次搅拌时，砂子颗粒表面黏结了一层水泥，形成了薄薄的“水泥外壳”。在二次