



宁夏大学优秀学术著作出版基金资助

西部盐碱地区

高性能混凝土

Durability Study
of High Performance Concrete
in the West Salt Region

耐久性研究

王德志◎著



黄河出版传媒集团
阳光出版社

西部盐碱地区 高性能混凝土耐久性研究

Durability Study
of High Performance Concrete
in the West Salt Region

王德志◎著



黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目(CIP)数据

西部盐碱地区高性能混凝土耐久性研究 / 王德志著.
-- 银川: 阳光出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5525-1662-3

I. ①西… II. ①王… III. ①盐碱地—混凝土—耐用性—研究—西北地区 ②盐碱地—混凝土—耐用性—研究—西南地区 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 003571 号

西部盐碱地区高性能混凝土耐久性研究

王德志 著

责任编辑 王 燕
封面设计 黄 健
责任印制 岳建宁

黄河出版传媒集团 出版发行
阳光出版社

地 址 宁夏银川市北京东路 139 号出版大厦 (750001)
网 址 <http://www.yrpubm.com>
网上书店 <http://www.hh-book.com>
电子信箱 yangguang@yrpubm.com
邮购电话 0951-5014124
经 销 全国新华书店
印刷装订 宁夏锦绣彩印包装有限公司
印刷委托书号 (宁)0017437

开 本 720mm × 980mm 1/16
印 张 10
字 数 450 千字
版 次 2015 年 2 月第 1 版
印 次 2015 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5525-1662-3/T·14

定 价 56.00 元

版权所有 翻印必究

作者简介



王德志，山东曲阜人，现为宁夏大学土木与水利工程学院副教授，交通与管理工程系副主任。2004年毕业于山东莱阳农学院土木工程专业，获得学士学位，2007和2010年毕业于宁夏大学水利水电工程专业，分别获硕士学位博士学位。先后参加国家、省部级课题多项，主持国家级、省级课题各一项；发表学术论文10余篇，获得宁夏自然科学优秀学术论文一等奖一项、三等奖一项、宁夏回族自治区高等学校优秀博士论文一项。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纤维素纤维的研究进展	3
1.1.1 天然植物纤维增强混凝土	4
1.1.2 未处理天然植物纤维存在的问题	7
1.1.3 纤维素纤维增强混凝土	9
1.2 纳米级矿物掺和料混凝土的研究进展	10
1.2.1 纳米级矿物掺和料用于混凝土的研究进展和应用状况 ..	11
1.2.2 纳米级矿物掺和料的增强效应	14
1.3 存在的问题、研究思路与研究内容	16
1.3.1 存在的问题	16
1.3.2 研究思路	17
1.3.3 研究内容	17
1.3.4 研究路线	19
第 2 章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对水泥物理力学性能 的影响	20
2.1 水泥的性能	20
2.1.1 细度	20
2.1.2 凝结时间	20
2.1.3 体积安定性	21
2.1.4 强度及强度等级	21
2.1.5 水化热	22
2.1.6 碱含量	22

2.2	材料和方法	23
2.2.1	材料	23
2.2.2	试验方法	24
2.3	结果与分析	25
2.3.1	试验结果	25
2.3.2	机理分析	33
2.4	结论	37
第3章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对混凝土力学性能的影响		39
3.1	前言	39
3.2	材料和方法	41
3.2.1	材料	41
3.2.2	试验方法	42
3.3	结果与分析	45
3.3.1	试验结果	45
3.3.2	机理分析	54
3.3.3	人工神经网络法预测混凝土长期强度	57
3.3.4	多元线性回归分析预测混凝土长期强度	61
3.4	结论	65
第4章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对混凝土抗硫酸盐腐蚀的影响		66
4.1	前言	66
4.1.1	现场试验	66
4.1.2	pH值恒定试验法	67
4.1.3	增加侵蚀溶液浓度试验法	67
4.1.4	改变浸泡方式实验法	68
4.1.5	干湿循环试验法	69

4.1.6	凹口梁(缺口梁)试验法	70
4.2	材料和方法	71
4.2.1	试验材料	71
4.2.2	试验方法	71
4.3	结果与分析	72
4.3.1	试验结果	72
4.3.2	机理分析	76
4.3.3	抗硫酸盐侵蚀耐久寿命预测模型	77
4.4	结论	81
第5章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对混凝土 抗冻性的影响		82
5.1	前言	82
5.2	材料和方法	83
5.2.1	试验材料	83
5.2.2	试验方法	83
5.3	结果与分析	86
5.3.1	试验结果	86
5.3.2	机理分析	89
5.4	结论	97
第6章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对混凝土高温性能的 影响		98
6.1	前言	98
6.2	材料与方法	102
6.2.1	试验材料	102
6.2.2	试验方法	102
6.3	结果与分析	104
6.3.1	试验结果	104

6.3.2	机理分析	107
6.3.3	混凝土高温(火灾)后强度预测公式比较	109
6.3.4	混凝土内部温度场模拟	111
6.4	结论	122
第7章 纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对混凝土		
微观结构的影响		
		124
7.1	水泥的水化反应	125
7.2	纤维素纤维、纳米级矿物掺和料对混凝土微观结构的影响 ...	127
7.2.1	正常养护时混凝土的 SEM 图分析	127
7.2.2	硫酸盐腐蚀时混凝土的 SEM 图分析	129
7.2.3	冻融循环 100 次后混凝土的 SEM 图分析	131
7.2.4	800℃高温试验后混凝土的 SEM 图分析	133
7.3	结论	134
第8章 结论		
		135
8.1	主要结论	135
8.1.1	纳米级矿物掺和料和纤维素纤维对水泥物理力学性能的影响	135
8.1.2	纳米材料和纤维素纤维对混凝土力学性能的影响	136
8.1.3	纳米材料和纤维素纤维对耐硫酸盐腐蚀的影响	136
8.1.4	纳米材料和纤维素纤维对混凝土抗冻性的影响	136
8.1.5	纳米材料和纤维素纤维对耐火性能的影响	137
8.1.6	纳米材料和纤维素纤维对微观结构的影响	137
8.2	创新之处	137
8.3	展望	138
参考文献		
		139
后记		
		156

第1章 绪论

虽然混凝土已成为目前世界上用量最大的人造建筑材料,但其自重、易开裂、抗拉强度低、抗断裂应变值小、性质较脆的缺陷仍然不能从根本上得以解决,其优势也得不到充分发挥,而且这些缺陷在某些条件下还限制了混凝土结构更好的应用。同时,混凝土结构工程带裂缝工作相当普遍,结构的开裂日益增多和严重。尽管科技工作者和工程技术人员采取各种方法进行研究和处理,但混凝土构件的裂缝仍然随处可见,特别是已建水工渠道、涵洞、路桥面板及各种已修农田水利工程或新修的高速混凝土路面及隧道混凝土工程等,严重影响到混凝土的耐久性。处于常态工作环境中时,混凝土结构的裂缝宽度小于规范限值,结构的承载力和耐久性受影响不大;但是处于水下、海洋等恶劣环境中时,当裂缝扩展到一定程度,水分渗入将会引起钢筋锈蚀、裂缝处混凝土发生碳化、剥落等一系列的严重病害,对结构的安全构成威胁,会降低结构的承载力和耐久性。同时,由于裂缝的存在,长期荷载作用下损伤的积累使混凝土结构失效,诸如海洋钻井平台的倒塌倾覆事故已是屡见不鲜。为了提高混凝土耐久性,必须采用高抗裂的高性能混凝土,从增强混凝土内在品质的角度和从混凝土开裂的源头上改善和提高混凝土耐久性。

国内外的专家学者长期以来致力于改善混凝土性能的研究,我国也不

同程度的投入了大量的支持资金,采取各种方法和途径进行混凝土的改性。从混凝土的发展现状可以看出,对混凝土改性将是21世纪结构工程研究的主要目标。而纳米级矿物掺和料和纤维就是一种典型的混凝土改性材料,它们将显著地提高混凝土原有的密实性、抗拉、抗弯强度和断裂延伸率,特别是提高混凝土的韧性和抗冲击性,从而改变混凝土在人们传统观念中的形象。

混凝土在未承受荷载前由于水泥水化造成的化学收缩和物理收缩引起砂浆体积的变化,在粗骨料和砂浆界面上产生了分布极不均匀的拉应力。当此拉应力超过了混凝土的极限抗拉强度时,则出现裂缝。这种微裂缝在外荷载影响下发展并延伸成贯穿性裂缝,成为环境中侵蚀性介质侵入的通道,降低了混凝土的耐久性。水泥基材料的上述缺点是本质性的,不可能通过自身材质的改良来修复,只有通过复合化的技术途径来解决。纳米级矿物掺和料颗粒微细,一方面发生二次水化反应,另一方面填充混凝土的孔隙;纤维材料抗拉强度高,恰好可以优势互补,用来改善混凝土抗拉强度低的缺点。因此,纳米级矿物掺和料与纤维增强混凝土的应运而生,使脆性混凝土向弹韧性混凝土转变。

纳米级矿物掺和料与纤维增强混凝土是一种新型复合材料。纳米级矿物掺和料的粒级、比表面积,纤维的几何形状、力学性能、加工方法、体积率与基体混凝土的配合比、原材料力学性能、掺和料与外加剂的使用等均对纳米级矿物掺和料与纤维增强混凝土的基本性能产生不同程度的影响。在纳米级矿物掺和料与纤维增强混凝土技术发展和应用过程中,研究和探索它们的基本性能不仅对工程施工和应用具有十分重要的意义,同时也具有重要的理论研究价值。

为了适应现代化的建筑设计和施工的要求,提高建筑工程的质量和延长建筑物的使用期限,节省有限的天然资源,保障人们的生命财产安全,针对我国天然资源严重困乏的实际情况和西部现有特色,研究具有高抗裂性

能、高耐久性能的纳米级矿物掺和料和纤维增强高性能混凝土,无疑对发展地方经济、改变西部贫困面貌、改善环境问题起着重要的支撑作用。

本课题试图通过优化混凝土设计和附加纳米微粉及纤维组分,研制高抗裂性能、低脆性的高性能混凝土,通过无机-有机多组分复合的技术方法,开发新型复合抗裂材料,提高混凝土的工作性能和抗拉强度。同时研究材料组成、结构和性能之间的关系,探索材料增强和耐久原理,达到混凝土抗裂防渗和安全耐久的目的,实现按工程使用和施工需要设计和配制特定性能的混凝土。

1.1 纤维素纤维的研究进展

近代关于纤维混凝土的理论研究开始于1910年,由美国Porter首创,1911年美国的Graham正式将钢纤维掺合到混凝土中,并初步验证了它的优越性。1940年前后,美、英、法、德等国先后取得了一些相关专利。在第二次世界大战期间,为了战争的需要,日本曾把纤维用于抗爆结构。1963年美国Romualdi提出的“纤维阻裂机理”^[1]促进了钢纤维增强混凝土(SFRC)的开发。1964年丹麦Krenchel的博士论文《纤维增强材》(Fiber Reinforcement)^[2]首次应用复合材料理论探讨纤维增强无机胶凝材料的机理。在纤维阻裂机理和复合材料理论的指导下,20世纪70年代国际土木工程建筑材料界出现了“纤维热”。80年代起美国大力开发合成纤维增强混凝土,主要使用聚丙烯、尼龙等纤维。美国在1990年和1991年举行了纤维增强混凝土的专题报告会,正式拉开了纤维增强混凝土研究与应用的序幕;1995年韩国举行了纤维增强水泥混凝土的专题报告会,1996年在中国北京举行的第三届国际水泥混凝土报告会,表明纤维增强混凝土的研究与应用已经国际化。著名的化学公司如杜邦公司、3M公司、日本帝人公司等都开发出了多种水泥增强用纤维品种,并已经在高速公路、桥梁、摩天大楼、地铁、隧

道等土木工程中获得广泛应用,高强度、高韧性、高耐久性的纤维混凝土已经取得了长足发展。

水泥混凝土中常用的纤维按照弹性模量可以分为两大类:高弹性模量纤维($E_f/E_c > 1$)和低弹性模量纤维($E_f/E_c < 1$)。低弹性模量纤维(如各种有机纤维、尼龙、聚丙烯、聚乙烯等)可以提高混凝土的韧性、抗冲击性能等与材料的塑性有关的物理性能;高弹性模量纤维(如钢纤维、玻璃纤维、碳纤维等)则能改善混凝土的强度和刚性。

1.1.1 天然植物纤维增强混凝土

天然植物纤维泛指从天然生长的植物中获取的纤维,由纤维素、半纤维素、木质素、甲胶等组成,其中以纤维素为主,是重要的生物资源。按照处理程度可将天然植物纤维分为两类:未经过打浆处理的纤维和经过打浆处理的纤维(又称为纤维素纤维(cellulose fiber)或木浆纤维(pulp fiber))。未经过打浆处理的纤维保持多个纤维细胞连接在一起,因此内部存在着大量的半纤维素和木质素;而经过打浆处理的纤维中半纤维素和木质素已经被处理,仅含有纤维素纤维。

来源于植物的天然纤维,例如稻草、青草和麦秸,早在公元前 1400 年就用于增强土坯砖了,甚至在今天,一些发展中国家仍然使用稻草增强的灰泥和砖。由于植物纤维的廉价性、来源广泛性和环境友好性,越来越多的国家和地区对植物纤维增强混凝土的研究产生浓厚的兴趣,并取得了显著的成果。

事实上,大部分植物纤维性能较低,只有一些性能较高的植物纤维才具有较高的工业利用价值。如麻的纤维长度是天然植物纤维中最长的,具有高强低伸的特性,麻类纤维的初始模量和抗拉刚度比涤纶稍高,其中苧麻是麻纤维中性能最好的,它的比强度接近玻璃纤维,麻类纤维在天然植物纤维中最适合做复合材料增强剂,表 1-1 是各种麻纤维与玻璃纤维的性能比较。可见,虽然麻纤维的拉伸强度和模量都比玻璃纤维低,但是苧麻纤

维的比强度与玻璃纤维接近,所以天然植物纤维完全可以替代玻璃纤维,作为制备可完全降解的环保型复合材料的理想增强材料;椰纤维和竹纤维同样具有非常好的力学性能,具有较高的韧性,也比较适合作增强材料。

表 1-1 几种麻纤维的性能^③

项目	抗拉强度(MPa)	抗拉模量(GPa)	断裂伸长率(%)	密度(g/cm ³)	比强度(N/kg)
剑麻	718	2.9	2.2	1.26	570
亚麻	715	7.8	1.8	1.49	480
黄麻	387	7.7	1.5	1.21	320
苧麻	1078	3.2	1.8	1.54	700
大麻	672	2.5	2.2	1.40	480
玻璃纤维	2300	73	3.2	2.60	880

20 世纪 70 年代初,英国和瑞典^④用剑麻作为砂浆的增强材料,并研究了改进剑麻纤维水泥耐久性的工作。该研究采用了 CBI 方法,将复合材料存放于干湿循环条件中,在一次干湿循环中,试件的毛细孔系统交替地饱和和干燥。通过该方法,试验研究了玻璃纤维和剑麻纤维(其中包括经浸渍处理和未经浸渍处理的剑麻纤维)增强水泥砂浆试件。试验表明,玻璃纤维增强水泥随时间而变脆,剑麻纤维增强混凝土也随时间变化而变脆,但是通过对纤维进行防护浸渍处理,可以延缓这一过程。当采用硅灰代替部分普通硅酸盐水泥以降低基材的碱度时,取得了较好的效果。

Coutts^⑤研究剑麻纤维增强水泥砂浆后发现,当纤维质量掺量为 8% 时,可使抗裂强度提高 50%~60%。Swift^⑥研究了剑麻纤维增强水泥基材料包含抗弯强度、能量吸收能力在内的力学性能。

Mansur 和 Aziz^⑦通过对黄麻纤维的研究发现该纤维有利于提高硬化复合材料的抗拉(抗弯)强度和韧性,提高程度取决于黄麻纤维掺量和纤维长度,在达到最好效果时存在着最佳纤维掺量和纤维长度。他们^⑧的研究还发现竹网可以有效提高水泥砂浆延展性和韧性,可以显著提高其抗拉、抗

弯和抗冲击性能。

Coutts 和 Warden^[9]发现空气中处理过的马尼拉麻的质量掺量达到 8% 时,复合材料的抗弯强度可以达到 27MPa,断裂韧度达到 2 kJ/m²。Zhu^[10]研究香蕉纤维增强复合材料后发现,当掺量为 8%~16% 时抗弯强度可超过 20MPa;掺量为 14% 时抗弯强度为 25MPa,断裂韧度为 1.74kJ/m²;同时认为该纤维资源在中国、印度和东南亚等国家丰富,可以大力发展。

Castro 和 Naaman^[11]的研究结果表明,体积率为 5%,纤维长度 50~75mm 的龙舌兰纤维仅对复合材料的韧性有所提高,而对抗弯强度没有提高;当纤维含量超过 7% 时,抗弯强度才有提高。Couts 和 Warden^[5]通过研究由天然纤维提取的纤维素纤维也发现类似的结论。他们认为纤维素纤维掺入量为 8% 时复合材料的抗弯强度最高,随着纤维掺量进一步增加,抗弯强度反而有大幅度下降,这是因为随着纤维掺量的逐渐增多,复合材料中的孔含量也逐渐增多,纤维用量增加对强度的提高作用被孔含量的增加所抵消。随着纤维含量的提高,复合材料韧性的提高幅度明显减小,并且逐步趋于稳定。

M. Sarigaphuti 等人^[12]在 20 世纪 90 年代初选用从松树和白杨树中分离出的植物纤维作为混凝土的增强物质,在掺入混凝土混合料之前,先将纤维锤击松散,成为一根根干燥的细纤维,研究体积掺量为 0.5% (约为水泥质量的 1%) 的该种纤维在加速老化条件下控制混凝土裂缝扩展情况,并与相同掺量的聚丙烯纤维混凝土进行比较。试验发现掺 0.5% 的植物纤维限制混凝土收缩干裂的能力与同掺量的聚丙烯纤维相当,两种纤维混凝土的最大裂缝宽度均为混凝土的 1/3,对混凝土的自由收缩和抗压强度没有明显的影响。通过热水浸泡老化处理后,植物纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和素混凝土的韧度基本没有改变,且植物纤维和聚丙烯纤维均不受水泥石中碱性物质的腐蚀,但在干湿循环老化处理后,两种纤维的韧度均下降 40% 左右。

进入 21 世纪,由于能源危机,需要供应大量比较便宜的纤维资源,利用价廉易得的植物纤维增强混凝土的研究成为热点并取得较大的发展。巴西的 Romildo D 和 Toledo Filho 等人^[13]在对碱敏感纤维增强混凝土耐久性研究中发现将剑麻纤维增强混凝土成型后即放到碳化箱中(CO_2 29.8%, 26.7℃, RH64.3%)109d 后,其脆化过程比未处理的混凝土得到延缓,同样将梳理整齐的剑麻纤维掺入到水泥基复合材料中之前在硅灰浆液中浸泡 10min,然后再在空气中干燥,其脆化过程也比未处理的混凝土得到延缓。

1.1.2 未处理天然植物纤维存在的问题

由于天然植物纤维中存在大量的半纤维素、木质素和果胶等,使其在增强混凝土时与各种化学纤维增强混凝土有很大的不同,其应用存在如下几个问题。

(1) 延缓水泥凝结和硬化过程

水泥必须在碱性介质($\text{pH} > 12$)中才能凝固。水泥中加入糖类、甘油、羧基甲基纤维素、单宁和葡萄糖酸及盐类等将使水泥凝固延缓,如加入水泥质量 1% 的泥糖,水泥几乎完全停止凝固^[14]。未经处理的天然植物纤维中几乎都含葡萄糖等成分,因此水泥中加入天然植物纤维和加入化学纤维(如玻璃纤维)不同,天然植物纤维在水泥浆碱性溶液中浸泡,会有许多萃取物沉淀,这些沉淀物中有许多对水泥有缓凝或阻凝作用,例如大多数木材使水泥不能凝固,几乎所有天然植物纤维都对水泥有阻凝或缓凝作用。

(2) 未处理天然植物纤维吸水对混凝土性能的影响

混凝土中水泥含量通常较高,水分含量的变化使得基体有很大的体积变化倾向,这种倾向与吸湿性天然纤维引起的体积变化相叠合会加剧复合材料体积变化的程度。与传统混凝土的应变低于 0.05% 相比,此种构件的收缩应变超过 0.15%。这种由环境影响引起的频繁发生的长度变化可导致构件的变形和被约束构件的开裂,特别是在靠近没有足够柔韧性的连接件

位置。长度变化可能不会引起强度和韧性的降低,然而对构件的整体性能是有害的。Bessell 和 Mutuli^[15]通过测量复合材料的裂缝发现剑麻纤维和胶凝材料的界面连接强度较低,认为主要是因为剑麻纤维从水泥中吸水造成的,从而导致复合材料的界面性能较弱。Savastano 和 Agopyan^[16]通过背散射电子成像术(BSEI)和能量色散谱仪(EDS)研究剑麻增强水泥基材料后发现,纤维与胶凝材料的界面多孔且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富集。这种界面特征与剑麻纤维与基体的粘结强度和力学性能有关。

(3) 未处理天然植物纤维在碱性环境中的退化

天然植物纤维暴露于碱性环境中时会遭受各种程度的退化, Singh^[17]报告了天然植物纤维在碱性环境中浸泡以后的剑麻、大麻和黄麻纤维的强度大幅度降低。Castro 和 Naaman^[11]也报告了浸泡在各种溶液中的天然纤维强度的降低。

Gram^[18]深入讨论了天然植物纤维特别是剑麻纤维碱性退化的机理,认为存在以下两种作用。

①“剥落”作用,分子链的末端基团连续释放,这是末端基团和 OH^- 之间反应的结果。这种机理引起的退化作用可能很小,因为在温度低于 75°C 时反应速度很慢,对长分子链(聚合度 25000)纤维的影响很小。

②碱性水解,可引起分子链分离,明显降低聚合度。半纤维素和木质素对这种退化作用特别敏感。Gram 认为伴随着天然植物纤维中间层中半纤维素和木质素的分解和腐烂,单个纤维细胞之间的连接断开,长纤维分解成为小的单体细胞导致纤维增强效果损失。

(4) “矿物化”

水泥水化产物进入纤维的孔隙、孔隙与间隔中,使纤维“矿物化”且变形能力下降,刚性与脆性增加,纤维与水泥基材的界面结合被强化,从而植物纤维增强水泥受弯时的初裂强度增加而韧性降低。Filho 等^[19]通过研究认为纤维的“矿物化”是植物纤维增强水泥老化后变脆的主因。

1.1.3 纤维素纤维增强混凝土

未经过处理的天然植物纤维,由于其具有的天生缺陷(多孔、高吸水率、耐碱性差),限制了天然植物纤维混凝土大规模的应用,通常只用于制造平板和波形板,且得到的制品的抗弯强度是非常低的,常常低于 4MPa,限制了其在建筑结构上的应用。

经过打浆处理的天然植物纤维(纤维素纤维)可从某些植物如黄麻、椰壳、剑麻和竹子中获得,树木是纤维素纤维的主要来源,可通过机械打浆、化学打浆或二者结合打浆得到纤维素纤维。经过打浆处理的纤维素纤维由多细胞组合体变化为单细胞纤维,原来结构中大量存在的糖类物质和木质素被浸出,纤维进一步解离成为单纤维,并在纤维表面形成很多细小的绒毛,从而提高对水泥粒子和其他粉状材料粒子的吸附能力,提高了纤维素纤维与基体的粘结强度,最终提高纤维素纤维水泥制品的密实度与强度。纤维素纤维相对于未经过处理的天然植物纤维来说,吸水率减小,对碱性环境的抵抗能力也有很大提高,对混凝土的抗裂性具有良好的改性作用。

UF500 纤维素纤维是美国生产的新一代纤维,它既不同于早期的天然植物纤维,也不同于聚丙烯、聚丙烯腈等化学纤维,是一种基因改良的天然纤维素纤维。该纤维素纤维本身具备极好的亲水性,在新拌混凝土中能吸附一部分自由水,而且纤维基体内部有天然空腔,能蓄存纤维本身质量约 70%的自由水,在水泥水化的过程中,这两部分水分会缓慢释放,促进水泥继续水化,补偿混凝土的收缩,改善混凝土微观结构,减少混凝土内部微缺陷,使混凝土更加密实。为防止混凝土中碱性环境对纤维素的腐蚀,其表面进行了化学处理提高了对碱性环境的抵抗能力。

传统的纤维增强混凝土增强材包括钢纤维、碳纤维、玻璃纤维、化学合成纤维等,它们一般都存在着耗能大、造价高、易污染环境等问题。与化学纤维相比,各种天然植物纤维具有价廉、可回收、可降解、可再生等优点并具有一般纤维的强度和刚度,且比重较小,比强度、比刚度均较高。以天然