



建筑工程纤维 应用技术

史小兴 主编 金 剑 副主编



化学工业出版社

建筑工程纤维应用技术

史小兴 主 编
金 剑 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

建筑工程纤维应用技术/史小兴主编. —北京:
化学工业出版社, 2007. 12

ISBN 978-7-122-01627-0

I. 建… II. 史… III. 纤维增强混凝土-研究
IV. TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 185757 号

责任编辑: 常 青
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 徐雪华
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 326 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

序 言

自 20 世纪 70 年代以来,纤维混凝土的研究和工程应用在国内外发展迅速。除了已大量应用的钢纤维之外,专用于混凝土的合成纤维品种亦愈来愈多,纤维混凝土技术也进入了一个新的发展阶段。

混凝土材料是目前世界上用量最大、应用最广泛的建筑材料,其在具有许多优异性能的基础上,也存在着抗拉强度低、脆性大和易开裂等缺点,使其在工程应用上受到一定限制。在混凝土材料中掺加纤维有助于克服上述缺点,提高混凝土的抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度,增加混凝土的韧性、抗冲击性,改善混凝土的抗裂性、抗渗性以及耐磨损性,大大提高混凝土的耐久性,从而提高建筑物的使用质量和寿命,纤维的这些作用均已被材料学界和工程界所公认。

纤维混凝土性能的改善与纤维品种、纤维性能、纤维与混凝土界面间的黏结状况、所用基体混凝土的类别和强度等级、施工技术等因素有关。因此,正确选择纤维和使用纤维非常重要。《建筑工程纤维应用技术》一书通过对建筑工程用纤维性能、生产工艺技术、应用技术、施工技术、纤维的检测方法以及工程实例的介绍,较为系统地总结了建筑工程用纤维的应用技术。

该书主编史小兴先生长期从事合成纤维的科研、生产及管理工作,有着扎实的理论基础和丰富的实践经验。在 20 世纪 90 年代末他开始关注和涉足合成纤维在建筑领域的应用工作,逐步开始从事建筑工程用合成纤维的研究开发、工程推广和应用工作,积累了丰富的工程应用实践经验,并参与编制了我国多项建筑工程纤维方面的标准与规程。该书副主编金剑先生一直从事合成纤维研究开发和推广工作,主持或参加完成多项国家科技攻关和省部级项目,并多次获得省部级科技进步奖,已发表大量学术论文,近年来他在将合成纤维应用于建筑工程的推广方面做了许多卓有成效的工作。

该书不仅对从事纤维混凝土的科研、设计与管理人员具有很好的参考价值,而且也可供大专院校的师生学习参考,同时也适合于有一定文化程度的一线生产及施工人员阅读。我深信此书的出版会对我国纤维混凝土的发展起到很好的促进作用。

中国工程院 院士
大连理工大学 教授

赵国藩

2007 年 11 月

前 言

由水泥制作的砂浆和混凝土，是建筑行业耗用量最大、应用范围最为广泛的建筑材料，它们具有许多优异的性能；但其抗拉强度偏低、韧性差，同时具有易脆裂性等弱点，使其在建筑工程上的应用受到一定的制约。随着国内外对水泥制作基材研究的深入，许多专家和学者不断探索提高混凝土制品抗拉性能、韧性和延性等途径和方法，在使混凝土制品抗拉强度获得不断提高的同时，克服其韧性差、脆性大的弱点也有了显著的进展。其中，掺加纤维以增强混凝土的力学性能，就是近年来研究和推广应用于解决混凝土上述弱点的重要技术方法之一。

纤维混凝土是当代迅速发展的新型复合建筑材料，通过在混凝土中掺加多种纤维，可以提高混凝土的抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度，增加混凝土的韧性、抗冲击性，改善混凝土的抗裂性、抗冻性、抗渗性以及耐磨损性等，大大提高了混凝土的力学性能和耐久性，进而也提高了建筑工程的质量和使用寿命。

常用于混凝土的建筑工程纤维品种繁多，具体有钢纤维、玻璃纤维、陶瓷纤维、碳纤维、芳族聚酰胺纤维、高弹模聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚酰胺纤维等。由于各种纤维本身的性能有差异，相应地对混凝土的影响和所起的作用也各不相同。经过多年的研究和工程实践，纤维混凝土的优良性能已得到工程界的认可，并已在水利、房建、市政和路桥等工程中得到了广泛的应用。但是在纤维实际使用过程中也出现过诸多问题，特别是有些设计和施工技术人员，由于对建筑工程用纤维的性能、纤维在混凝土中所起作用以及如何正确使用纤维和在使用中的注意事项等了解不够深刻，在正确选择和使用纤维上尚存在不足之处，致使这种简便易行、效果明显的技术，未能得到充分的应用。

本书试图通过对纤维混凝土抗裂作用的机理和建筑工程用纤维的性能、生产工艺技术、应用技术、施工技术要点以及纤维质量检测等多方面的介绍，特别是通过对合成纤维在建筑工程上应用实例的介绍，给从事纤维混凝土设计和施工技术人员，以及建筑工程界的有关人士提供参考。

全书由史小兴、金剑统一筹划和定稿；参加本书编写的有：第一章，史小兴；第二章，金剑、刘海明；第三章，刘丽君；第四章，焦红娟；第五章，刘海明、焦红娟；第六章，史小兴、焦红娟、刘海明；第七章，焦红娟；第八章，金剑、刘丽君。感谢我国合成纤维界前辈、著名专家吴宏仁教授对全书的审阅。由于本书涉及内容专业范围较广，加上编者水平和经验有限，书中难免有挂一漏万等不足之处，敬请业内专家、学者和广大读者批评指正，不胜感谢！

编 者

2007年11月于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 建筑工程纤维混凝土	1
一、建筑工程纤维的定义	1
二、纤维混凝土	2
第二节 建筑工程纤维发展简史	2
第三节 建筑工程纤维主要品种及其分类	4
一、按纤维的材质分类	5
二、按纤维的弹性模量分类	5
第四节 建筑工程纤维的基本性能要求	5
一、力学性能	5
二、化学稳定性	6
三、热性能	7
四、分散性	7
五、纤维与基体界面的黏结性	8
六、纤维的长径比	8
第二章 建筑工程纤维的基本生产工艺	10
第一节 聚丙烯纤维	10
一、聚丙烯纤维的成型加工	10
二、聚丙烯纤维生产品种	13
第二节 聚丙烯腈纤维	17
一、聚丙烯腈纤维的成型加工	17
二、聚丙烯腈纤维生产品种	18
第三节 聚乙烯醇纤维	20
一、聚乙烯醇纤维的成型加工	21
二、聚乙烯醇纤维生产品种	23
第四节 聚酯纤维	24
一、聚酯纤维的成型加工	25
二、聚酯纤维生产品种	26
第五节 聚酰胺纤维	27
一、聚己二酰己二胺纤维的成型加工	28
二、聚己内酰胺纤维的成型加工	28
三、聚酰胺纤维生产品种	28
第六节 芳香族聚酰胺纤维（芳纶）	29

一、聚间苯二甲酰间苯二胺纤维	29
二、聚对苯二甲酰对苯二胺纤维	30
三、聚对苯甲酰胺纤维	31
第七节 超高分子量聚乙烯纤维	31
第八节 碳纤维	32
一、碳纤维的分类和制备方法	32
二、聚丙烯腈基碳纤维	33
三、纤维素基碳纤维	34
四、沥青基碳纤维	34
第九节 玻璃纤维	35
一、玻璃纤维分类	35
二、玻璃纤维的形态	35
三、玻璃纤维的制备	36
四、玻璃纤维性能及用途	36
第十节 钢纤维	36
一、钢纤维生产的工艺方法	37
二、钢纤维的品种	38
第十一节 矿物纤维	39
第三章 建筑工程纤维在水泥混凝土中的作用	40
第一节 水泥混凝土产生裂缝的原因	40
一、裂缝的分类	40
二、产生裂缝的原因	41
第二节 建筑工程纤维在水泥混凝土中的作用	42
一、阻裂	42
二、增强	42
三、增韧	43
四、抗渗性	43
五、抗碳化性	43
六、抗冻融性	43
七、抗冲击与抗疲劳性	44
八、耐久性	44
第三节 建筑工程纤维在水泥混凝土中作用的机理	44
一、复合材料力学混合律理论	45
二、纤维间距理论	46
第四章 建筑工程纤维在砂浆和水泥混凝土中的使用技术	48
第一节 建筑工程纤维在砂浆中使用	49
一、建筑结构特点	50
二、干混砂浆	50
三、建筑工程纤维在干混砂浆中的作用	58

四、建筑工程纤维在砂浆中的使用要点	62
五、工程实例	63
第二节 建筑工程纤维在水泥混凝土中的使用	64
一、聚丙烯细纤维增强混凝土	65
二、聚丙烯粗纤维增强混凝土	77
三、聚酰胺纤维增强水泥混凝土	87
四、纤维混凝土的施工特点	92
第五章 建筑工程纤维性能及其砂浆和混凝土的测试	93
第一节 建筑工程纤维性能测试	93
一、纤度	93
二、纤维直径	94
三、截面形状	95
四、抗拉强度	96
五、弹性模量	98
六、极限伸长率（断裂伸长率）	99
七、耐碱性能	99
第二节 纤维砂浆及混凝土拌和物的测试	100
一、水灰比分析	100
二、稠度测试	102
三、含气量测试	104
第三节 纤维砂浆及混凝土硬化体性能的检测	105
一、抗裂性	105
二、抗渗性	107
三、收缩性	107
四、耐磨性	108
五、静态弹模	109
六、抗压强度	110
七、劈裂抗拉强度	111
八、抗剪强度	112
九、抗折强度	113
十、抗冲击性	114
十一、弯曲韧性	116
第六章 建筑工程纤维在水泥混凝土中的应用	119
第一节 建筑工程纤维在房建工程方面的应用	119
一、房建工程的特点	119
二、需要解决的问题	120
三、建筑工程纤维的作用	121
四、施工技术	122
五、工程实例	123

第二节 建筑工程纤维在路桥工程方面的应用	127
一、路桥工程特点	127
二、需要解决的问题	128
三、解决路面和桥面裂缝的措施	130
四、建筑工程纤维的作用	130
五、施工技术	136
六、工程实例——北京市五环路	137
第三节 建筑工程纤维在水利工程方面的应用	140
一、水利工程的特点	140
二、需要解决的问题	140
三、建筑工程纤维的作用	144
四、施工技术	146
五、工程实例	146
第七章 建筑工程纤维在沥青混凝土中的作用及应用	153
第一节 概述	153
第二节 建筑工程纤维在沥青混凝土中的作用机理	154
一、纤维-沥青基体的界面结构有助于降低沥青对温度的敏感性	154
二、纤维的稳定、增黏作用	155
三、纤维对基体材料裂纹扩展的阻滞作用	155
四、纤维对抗疲劳性能的改善	156
第三节 沥青混凝土路面结构及掺和料选择	157
一、沥青混凝土路面的种类	157
二、掺和料的选择	159
三、沥青混凝土用纤维的性能要求	160
第四节 纤维沥青混凝土的组成设计及性能测试	161
一、目标配合比设计	161
二、生产配合比设计	164
三、生产配合比验证	165
四、聚酯纤维沥青混凝土性能测试研究	165
第五节 纤维沥青混凝土的应用领域及注意事项	169
一、应用领域	169
二、纤维在沥青混凝土中的使用方法及注意事项	170
第六节 纤维沥青混凝土经济效益分析	170
一、初期建设投资增加的费用	171
二、拌和机生产率下降增加的费用	171
三、摊铺、碾压成本比较	171
四、材料费用的增加	171
五、养护费用	171
六、用户费用	172
第七节 工程实例	172

一、在盐通高速公路（南通段）沥青路面工程中的应用	172
二、在宁淮高速公路沥青路面工程中的应用	182
三、在武昌中北路（洪山广场—岳家嘴）道路第二标段工程中的应用	183
第八章 建筑工程纤维的研究发展趋势	184
第一节 纤维混凝土材料的微观机理研究	184
第二节 混杂纤维增强混凝土的研究	185
一、弹性模量和高延性纤维混杂	185
二、不同尺度纤维混杂	185
三、两种不同的耐久性纤维的混杂	185
四、三元或三元以上纤维混杂	186
第三节 超高性能纤维增强水泥基材料	190
第四节 纤维增强水泥基工程复合材料	192
第五节 纤维增强复合材料	196
第六节 开发环保的性能佳的天然纤维	198
第七节 大力发展替代石棉的纤维水泥制品	199
第八节 结语	201
参考文献	202

第一章 绪 论

第一节 建筑工程纤维混凝土

一、建筑工程纤维的定义

历经一个多世纪的研究和实践，混凝土技术取得了突飞猛进的发展，混凝土材料已成为当今工程建设中用量最大、应用范围最广的工程材料。多年来，在混凝土技术的发展过程中，材料结构的复合化，一直被认为是重要的发展方向之一，如添加砂子、石子以及外加剂等；在混凝土中掺加纤维则是近些年迅速发展的一种材料复合技术。

建筑工程用纤维是一种细而长的聚合物材料，其长径比一般在 100 以上，并且具有一定的抗拉强度（也称断裂强度）、弹性模量（也称初始模量）和极限伸长率（也称断裂伸长率）。在建筑工程中应用的纤维，主要系指在混凝土中能均匀分布、且能强化混凝土结构的、短段的不连续的纤维材料。

根据所用纤维材质的不同可分为：天然纤维或人造纤维；有机纤维或无机纤维等。具体地说，可分为天然有机纤维，天然无机纤维，人造有机纤维（也称合成纤维），以及“人造无机纤维”。如果根据所用纤维力学性能的弹性模量的不同，即纤维的弹性模量是高于还是低于它所掺加基体的弹性模量，相应又可分为高弹模纤维和低弹模纤维两类；如若根据它所掺加基体材料的不同，又可分为：水泥混凝土用纤维、砂浆（水泥净浆）用纤维、沥青混凝土用纤维等。建筑工程用纤维的分类见表 1-1、掺加不同弹性模量纤维对加工成制品性能的影响见表 1-2。不同建筑基体材料对所使用纤维的不同要求见表 1-3。

表 1-1 建筑工程用纤维的分类

纤维类别	纤维名称
天然有机纤维	多种麻类纤维、木浆纤维、椰壳纤维(统称纤维素纤维)以及动物的鬃毛等
天然无机纤维	石棉纤维、针状硅灰石等
合成有机纤维	聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维、聚酯纤维、聚酰胺纤维、超高分子量聚乙烯纤维等
无机纤维	金属纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、矿棉纤维以及碳纤维等

表 1-2 掺加不同弹性模量纤维对加工成制品性能的影响

纤维类别	对加工成制品性能的影响
高弹模纤维	可明显改善硬化后水泥砂浆和混凝土制品的抗拉强度和韧性等，它们主要是高弹模人造有机纤维以及人造无机纤维等
低弹模纤维	在混凝土硬化的初期，对基体有明显的约束作用，能防止和减少制品产生裂缝以及适量增加硬化后制品的韧性；它们主要是普通型人造有机纤维以及天然有机纤维等

表 1-3 不同建筑基体材料对所使用纤维的不同要求

基 体 类 别	纤 维 特 点
水泥混凝土用纤维	因使用基材的碱性较强,要求所用纤维具有较好的耐碱性,如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维等
砂浆(水泥净浆)用纤维	因使用基材的碱性较强,要求所用纤维具有较好的耐碱性,如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维等
沥青混凝土用纤维	因使用时热拌温度在 170~180℃或更高,相应要求所用纤维材料具有较高的耐热性,如聚酯纤维等

二、纤维混凝土

这里所指的混凝土系指广义上的混凝土,泛指由无机胶结材料(水泥、石膏、石灰等)和水,或者有机胶结材料(沥青、树脂等)的胶状物与细骨料(砂)、粗骨料(石子)等集料,需要时还可掺入外加剂和矿物混合材料,按适当的比例配合,经过均匀拌制、密实成型及养护硬化而成的一种复合材料。在工程上使用最为广泛的当以水泥做胶结材料的水泥混凝土和以沥青做胶结材料的沥青混凝土两类。

在水泥混凝土中,水泥与水起凝胶作用,集料起骨架填充作用。水泥和水反应后形成坚固的水泥石,将集料颗粒固结成为具有一定物理力学性能的整体,称为人工石材,也称之为“砼”。

混凝土是用量最大、应用最广泛的主要建筑材料,在使用过程中具有多方面的适从性,并具有造价低廉、抗压强度高、适应性强、安全稳定等优点;但同时也存在抗拉强度、延性、韧性较低等固有缺陷,这意味着混凝土是一种脆性材料,在较大的拉伸荷载下易于发生开裂;相应其抵抗冲击强度的能力以及韧性也较差。

纤维混凝土可以看作是在普通混凝土中,掺加了一定量较短的、均匀分散的、且不连续的纤维,并与之复合而成的混凝土。纤维与混凝土基材相结合,改善了混凝土的固有弱点,对混凝土性能起到多方面的影响。概括地讲,掺加纤维对混凝土性能的影响主要有以下几点。

(1) 对混凝土拌和物性能的影响

- ① 减少了混凝土的沉降、分层、离析,增加了混凝土拌和物的和易性;
- ② 增加了混凝土的黏聚性,降低了混凝土的坍落度,坍落度的经时损失有所增加。

(2) 对凝结、硬化后混凝土性能的影响

- ① 有效抑制和减少混凝土早期的塑性收缩裂缝。
- ② 显著增加混凝土的抗冲击性能。
- ③ 提高混凝土的抗疲劳性能。
- ④ 在纤维掺量适当的情况下,能使纤维混凝土的抗压、抗折强度有一定程度的增加;但当掺量不足时,上述影响将不明显。

纤维混凝土抗裂性能和耐久性能的提高,对建设优质、美观、耐久的工程意义重大。

第二节 建筑工程纤维发展简史

纤维在建筑工程中的应用,在人类的历史上可追溯到 1000 多年以前。最初是以天然纤维——某些纤维素纤维经过简单处理后直接使用。早在古代,人们已知道并开始使用天然纤维素纤维以增强某些无机材料;如在我国古代,人们将秸秆或杂草经切断掺入自然干燥的黏

土砖中；埃及人用稻草或动物毛发来加强陶制物品；古罗马人则将剪短的马鬃掺于石膏、石灰或火山灰水泥中；古代庙宇中人们在修建所供奉的塑像时，也常常采用掺有植物纤维的黏土塑制而成。由此可见，先人们通过实际探索发现，将纤维加入无机胶结料中能够降低其脆性，并减少开裂。

1824年，英国人 J. Aspdin（约瑟夫·阿斯普丁）发明了“波特兰”水泥，自此开始了现代的水泥混凝土。1847年，法国人（兰波特）用钢丝作骨架制成了混凝土小船及花盆，出现了最原始的钢筋混凝土构件。1874年，美国人在混凝土中加入废钢片，开始了钢纤维在混凝土中应用的起步。1910年，美国 H. F. Porter 提出了“钢纤维”混凝土的概念，发表了有关以短纤维增强混凝土的研究报告，且获得专利，并建议把短纤维均匀分散在混凝土中用以强化基体料。1911~1933年间，在美、英、法、德等国均有人先后申请了在混凝土中均匀掺加短铁丝、细木片等改善混凝土性能的专利，但未在实际工程中加以应用。日本在二次世界大战期间，也曾进行过这方面的研究。直到1963年，J. P. Romualdi 和 J. B. Batson “关于纤维混凝土增强理论研究报告”的发表，纤维间距理论的提出，才使钢纤维的研究和应用取得了较快的发展。我国在20世纪70年代，开始了“钢纤维混凝土”理论和应用的研究；80年代起，钢纤维已在道路、桥梁、隧道等多项混凝土工程中获得了广泛的应用；继而，钢纤维混凝土的试验方法、设计施工规程以及《混凝土用钢纤维》等行业标准的相继颁布，推进了钢纤维在我国各项建筑工程中的应用。

1879年最早出现了石棉纤维水泥，1900年奥地利人 Hatschek（哈谢克）采用圆网抄取机制造石棉水泥板，使石棉水泥开始走向工业化生产。我国在20世纪30年代中期开始生产石棉水泥的“波形瓦”。到70年代，全世界石棉水泥工业生产达到高峰；进入70年代中期后，人们发现石棉粉尘具有致癌危害；故自80年代初起，若干发达国家相继限制石棉水泥制品的生产与使用，进而推动了无石棉纤维增强水泥制品的研制和开发，其代用品曾主要为玻璃纤维，此外还有木浆纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维等。

20世纪50年代末至60年代初，中国水泥工业研究院等单位，曾探索用中碱玻璃纤维增强普通硅酸盐水泥砂浆或混凝土；前苏联皮留柯维奇等人，曾探索用无碱玻璃纤维增强石膏矾土水泥砂浆；但最终都因玻璃纤维不能承受水泥水化物的碱性侵蚀、失去增强效果未获成功。1967年，英国建筑科学研究院（BRE）试制成含锆的抗碱玻璃纤维，1971年英国开始生产；1979年英国 BRE 公布的报告指出：虽然此种纤维材料处于室内干燥环境中对构件的力学性能变化不大，但处于潮湿环境或暴露于大气中时，构件的各项力学性能仍有大幅降低。为此，进入80年代，国际上有关科研单位均致力于提高“玻璃纤维增强混凝土”（GRC）耐久性的研究；同时西方国家主要采取在抗碱玻璃纤维外覆保护层、在水泥中掺加某些聚合物乳胶等措施；中国建筑材料研究院则采取抗碱玻璃纤维与低碱度水泥相匹配的技术。采用该技术配制成的 GRC，不论处在湿热环境中、或长期暴露于大气中，其耐久性显著优于抗碱玻璃纤维与普通波特兰水泥相匹配制成的 GRC，为此被称之为具有中国特色的“双保险” GRC 技术路线。由于它较好地解决了 GRC 的耐久性问题，促使我国的 GRC 产业得到较快的发展。

纤维混凝土研究与应用的实质性进展，得益于合成纤维生产技术的发展。进入20世纪60年代前期，美国人 S. Goldfein 开始探索使用合成有机纤维——聚丙烯纤维作为水泥混凝土的掺加料，并建议用于美军部队制作防爆结构件。70年代初期，英国将聚丙烯纤维掺入混凝土中制作管件、薄板等制品，并在建筑行业中，制定了相关的标准。最近二十多年来，

以美国为代表的技术发达国家开发生产出了一系列可掺加入混凝土中的单丝状合成纤维；如美国大力开发用于增强混凝土的合成纤维，主要有聚丙烯纤维和聚酰胺纤维等；德国和日本则分别开发出了用于增强混凝土的聚丙烯腈纤维和聚乙烯醇纤维；美国的格雷斯公司、日本的 TORASUTO KIKAKUKI 等也纷纷推出了相应的沥青混凝土增强用纤维。美国格雷斯公司 2003 年公开的专利 US6569526 报道了一种高分散性增强合成纤维，该纤维可以应用于混凝土、砂浆、喷浆混凝土和沥青混凝土等基体材料中，不仅具有良好的分散性，而且能够明显提高混凝土材料的强度。以往人们掺加入混凝土当中的纤维（如大多数植物纤维），大多无法耐受混凝土基体材料中很强的碱性，或因其无法在混凝土中均匀分散，或不具有一定的耐高温性能而达不到抗裂、增强的预期效果。合成纤维生产技术的进步使这些问题逐一获得解决。近年来，合成有机纤维中抗拉强度高、且抗碱性较好的聚丙烯纤维和聚酰胺纤维，尽管存在着它们的弹性模量相对较低的弱点，但它们能在混凝土的初期塑性阶段，抑制和减小裂缝的发生和发展的特点，使其在混凝土中的应用取得很大进展。合成纤维被掺加到混凝土中，同时还对混凝土的抗渗性、抗冻性、抗冲击性、延性、耐磨性等有所改善，并且由于施工的和易性好、易操作、价格适中，已在建筑领域得到了广泛应用。

在 20 世纪 70 年代，纤维混凝土技术传入我国。我国的高等院校、科研院（所）和施工单位，开始了在混凝土中掺用合成纤维的研究工作，并逐步在若干建筑工程中取得了应用；之后随着国产建筑用合成纤维的成功开发，合成纤维在混凝土中的应用取得了快速发展。1986 年中国土木工程学会纤维水泥与纤维混凝土委员会在大连召开的第一届全国纤维水泥与纤维混凝土学术会议，相应地促进了全国范围合成纤维应用于混凝土中各种技术的交流；此后，纤维水泥混凝土学术年会又分别在哈尔滨（1988）、武汉（1990）、南京（1992）、南海（1994）、重庆（1996）、井冈山（1998）、济南（2000）、郑州（2002）、上海（2004）、大连（2006）等地召开，截止到 2006 年，已召开了十一届年会。2008 年，在北京将召开纤维水泥混凝土的第十二届学术年会，相信它将会对纤维混凝土技术在我国的发展和应用起到积极的促进作用。

目前，应用最为广泛的是合成纤维增强混凝土，合成纤维来源于有机聚合物。常用于纺制纤维的有机聚合物有聚丙烯（PP）、聚酰胺（PA）、聚酯（PET）、聚丙烯腈（PAN）和聚乙烯醇（PVA）等。由上述这些聚合物纺成的合成纤维，通常其弹性模量均较低，故均属于低弹模纤维。近年来，一些高弹模纤维也相继开始被用于混凝土的增强，如芳香族聚酰胺纤维、超高分子量聚乙烯纤维、超高分子量聚丙烯腈纤维、超高分子量聚乙烯醇纤维等；这些纤维具有较高的弹性模量和抗拉强度，掺加入混凝土后，混凝土的增强、增韧效果十分明显。

纤维混凝土可广泛应用于房建工程中的墙板、楼板、地下室以及建筑外墙的抹面；水利工程的水坝、蓄水池、水渠、薄壁水管；路桥工程的路面、桥面铺装层；隧道；军事工程的掩体、防空洞、防护门；港口工程中的码头、防洪堤以及混凝土的预制板材、管材等。

随着纤维混凝土各种设计规范、施工规范和标准的制定和出台，纤维混凝土的应用必将会有更大的发展。

第三节 建筑工程纤维主要品种及其分类

可应用于建筑工程的纤维品种繁多，通常按其不同的材质、不同的性能以及行业规范，将之分属于不同的纤维类别。现将各种建筑工程纤维按照行业习用的分类方法说明如下。

一、按纤维的材质分类

1. 无机纤维

(1) 矿物纤维

- ① 天然矿物纤维：如石棉、针状硅灰石等。
- ② 人造矿物纤维：如矿石棉、岩石棉、玻璃纤维等。
- (2) 金属纤维 如碳钢纤维、不锈钢纤维等。
- (3) 化学纤维 如碳纤维。

2. 有机纤维

- (1) 植物纤维 如西沙尔麻、剑麻、黄麻、木浆纤维、椰壳纤维等。
- (2) 动物纤维 如动物的鬃毛等。
- (3) 合成纤维

① 普通合成纤维：如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维、聚酯纤维、聚酰胺纤维等。

② 高性能合成纤维：如芳香族聚酰胺纤维、超高分子量聚乙烯纤维、超高分子量聚丙烯腈纤维、超高分子量聚乙烯醇纤维等。

二、按纤维的弹性模量分类

(1) 低弹模纤维 系指纤维弹性模量低于水泥混凝土基体模量的纤维。包括各种植物纤维、动物纤维及普通合成纤维（如聚丙烯纤维、普通聚丙烯腈纤维、普通聚乙烯醇纤维、聚酯纤维、聚酰胺纤维等）。

(2) 高弹模纤维 系指纤维弹性模量高于水泥混凝土基体模量的纤维。包括多种无机非金属纤维（如石棉、玻璃纤维、碳纤维）、金属纤维（低碳钢纤维、不锈钢纤维）及多种高性能合成纤维（如芳香族聚酰胺纤维、超高分子量聚乙烯纤维、超高分子量聚丙烯腈纤维、超高分子量聚乙烯醇纤维等）。

第四节 建筑工程纤维的基本性能要求

一、力学性能

建筑行业最为关注的、反映纤维力学性能的指标主要有抗拉（断裂）强度、弹性模量和极限延伸率。

(1) 抗拉强度 它是反映纤维材料在受拉伸直至断裂时其单位面积所能承受拉力的大小，常以“帕斯卡”（Pa）表示，1 帕斯卡（Pa）=1 牛顿/平方米（N/m²）。普通建筑用纤维材料的抗拉强度一般为几百兆帕（MPa）；高性能的建筑用纤维材料，其抗拉强度可达上千乃至几千兆帕（MPa）。

(2) 弹性模量 系指纤维受拉伸时发生单位形变所需力的大小，建筑工程纤维中通常由负荷-伸长曲线中起始部分荷载随伸长变化最大时点切线或割线的斜率得到的初始模量表示。以“帕斯卡”（Pa）表示，普通建筑用纤维材料的弹性模量一般为几千兆帕（MPa），因为 1000MPa=1GPa，亦即为几个 GPa；但高性能的建筑用纤维材料，其弹性模量可达几十万

至几百 GPa。纤维弹性模量所表征的是纤维所具的刚性，纤维与水泥基材的弹性模量比值越高，则受荷载的纤维所分担的应力也越大。

(3) 极限延伸率 纤维的极限延伸率指纤维受力伸长至断裂时与纤维原长相减增加的长度，除以其原长得到的百分数。纤维的极限延伸率越大，则越有利于纤维增强水泥基复合材料韧性的提高。与水泥基材相比，纤维极限延伸率至少要高一个数量级，但是纤维的极限延伸率不可过大，否则由于纤维与水泥基材的过早脱离而影响纤维发挥增强作用。

表 1-4 是未掺加纤维的水泥制品的力学性能及其相应物理性能指标；表 1-5 是建筑工程用不同纤维的力学性能及其相应物理性能指标。

表 1-4 水泥制品基体的物理性能指标

水 泥 制 品	密度/(g/cm ³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限伸长率/%
水泥(净)浆	2.0~2.2	3~6	10~25	0.01~0.05
水泥砂浆	2.2~2.3	1.5~3	25~35	0.005~0.015
普通混凝土	2.3~2.45	1.5~3	25~35	0.01~0.02
高强混凝土	2.3~2.45	2.7~4.5	35~50	0.01~0.02

表 1-5 建筑工程用不同纤维的物理性能指标

建 筑 用 纤 维	密度/(g/cm ³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限伸长率/%
聚丙烯纤维	0.91	350~700	3.0~5.0	15~35
聚丙烯腈纤维	1.16~1.17	360~510	4.0~10.0	12~20
聚乙烯醇纤维	1.26	550~750	4.0~6.0	9~17
聚酯纤维	1.38	650~850	10.0~15.0	7~17
聚酰胺纤维	1.14	590~950	2.5~6.6	16~28
高强高模聚丙烯腈纤维	1.17~1.18	800~950	9.5~14	15
超高分子量聚丙烯腈纤维	1.18	5800~7500	94~177	6~8
高强高模聚乙烯醇纤维	1.30	1100~1500	20~29	3.5~5.0
超高分子量聚乙烯醇纤维	1.30	1235~2470	39~65	3.0~4.5
对位芳族聚酰胺纤维	1.43	2740~3320	59~120	1.5~3.3
间位芳族聚酰胺纤维	1.38	562~662	9.8~17	17~25
芳族聚对苯甲酰胺纤维	1.46	2050~2900	116~133	1.0~2.0
超高分子量聚乙烯纤维	0.97~0.98	1800~3400	60~130	2.5~4.0
聚丙烯腈基碳纤维	1.71~1.91	4000~5500	250~295	1.6~1.8
纤维素基碳纤维	1.60~1.65	200~600	25~35	1.5~2.0
沥青基碳纤维	1.57~2.16	590~790	30~33	2.0~2.4
玻璃纤维	2.5~2.7	2400~4400	55~86	4.0~5.2
矿物纤维	2.4~2.7	1000~3000	65~86	1.0~2.0
钢纤维	7.8~7.9	1470~2500	176~196	1.0~2.0

纤维本身的抗拉强度和弹性模量是纤维的力学性能指标，可以通过测量纤维的应力-应变曲线而获得，为接近纤维使用时的状态，多数采用单根纤维进行测试。纤维的相对质量密度是反映纤维材质本身的物理指标，同种材质纤维的相对密度相差很小。

二、化学稳定性

纤维的化学稳定性，是指纤维处于不同酸、碱条件下，以及接触有机溶剂等时所具的稳定性如何。

一方面是指纤维本身的稳定性。作为建筑用纤维，常用于掺加在水泥基体中，由于普通硅酸盐水泥在水化过程中生成大量的氢氧化钙，使基体具有相当大的碱性，其 pH 值可达

10~12。在水泥水化的过程中,基体内部的水化热温度可达 55~75℃,这种高温的碱性条件对掺入其中的纤维带来了考验。当掺加钢纤维时,水泥基体的高碱度对钢纤维起到阴极保护作用,只要钢纤维不外露于空气或与潮湿的物质接触,它一般不会对混凝土中发生腐蚀,耐久性能较好;对于某些合成有机纤维(如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维、聚乙烯醇纤维以及聚酰胺纤维等),它们本身没有或存在少部分与碱性物质发生化学反应的基团,故具有良好的耐碱性,掺加在水泥基体中能保持良好的化学稳定性;但某些普通玻璃纤维以及部分合成有机纤维(如聚酯类纤维),它们本身含有能与碱性物质发生反应的基团,在高碱性水泥基体中容易与基体发生反应,故这部分纤维不适合用于碱度较高的混凝土中。按照新制定的水泥混凝土和砂浆用合成纤维国家标准和技术规程要求,用于建筑用的合成纤维的耐碱性能(在特定的试验条件下测试)大于 95%。

另一方面是指纤维对于混凝土中其他材料的稳定性。混凝土是一种混合材料,越来越多的外加剂和辅料用来改善混凝土的各项性能。要求纤维的加入对混凝土本体不产生任何负面影响。目前工程中使用的建筑工程纤维大多为惰性材料,在混凝土中以纯物理方式发挥作用,不会与其他材料发生化学反应,保证了混凝土整体的稳定性。

三、热性能

纤维的热性能是指纤维在经受不同温度时所具的稳定性。要求纤维在常温及使用温度下性能保持稳定。然而纤维的热性能与它本身的材质密切相关。

对于水泥混凝土,常规的浇筑方式一般都在常温下进行,大体积混凝土内部的水化热的温度有时可达 80℃以上,但也在常规纤维的热稳定范围内。在一些混凝土预制品中常采用高温养护,在蒸汽压为 6~20atm(1atm=101325Pa)下养护温度在 160~210℃,这时掺加的纤维要求其熔点比较高,而且还要有很好的耐碱性能,在这样的情况下选择聚丙烯纤维就不能满足要求。

一般对纤维热性能要求较高的为沥青混凝土,目前沥青混凝土的配制主要采用热拌方式,拌和温度一般在 170~180℃左右,内部温度则可达 200℃。因此,沥青混凝土中使用的纤维,必须具有较高的耐高温性。我们知道,合成有机纤维中的聚丙烯纤维,它的熔点只有 165~173℃,在沥青混凝土的拌和温度下早已熔融,无法发挥纤维的加筋作用,因而不建议聚丙烯纤维掺加在沥青混凝土中;合成纤维中的聚酯纤维,它的熔点为 255~260℃,在高温拌和条件下性能仍然比较稳定,是目前沥青混凝土中应用最广泛、用量最大的纤维增强材料;又如聚丙烯腈纤维,它没有明显的熔点,在被熔化前于 220~230℃时开始分解,所以它也可以掺入沥青混凝土中使用。按交通部门的行业标准,对要掺加入沥青混凝土中用纤维耐热性的考核,定为在 210℃条件下、经 2h 体积仍无变化者即被认可使用。

四、分散性

建筑工程用纤维被掺加入混凝土中,所起的阻裂、增韧、增强等作用。首先必须保证所掺加的纤维在混凝土中具有良好的分散性、并与混凝土基体有足够的黏结力。如果纤维在混凝土中分散性不好,再好的纤维在混凝土和其他混合材料中的作用也发挥不出来。所以要求纤维加入基体时,一方面通过强制的机械搅拌以使纤维能均匀分散;另一方面要求纤维本身具有良好的分散性能,即经过特殊的表面处理。只有两者结合,才能使纤维均匀地分散在基体中。