杜拉纤维
在土建工程中的应用

龚　益　沈荣熹　李清海　编著

机 械 工 业 出 版 社

杜拉纤维是解决混凝土工程裂缝等老大难问题的高科技建材。本书介绍其在土建工程中的应用技术，主要内容有：杜拉纤维混凝土的物理性能、力学性能、耐久性、性能试验、作用机制及其综合效果以及其在工民建、道路、桥梁、水利和石化工程中的应用实例，混凝土墙体裂缝及其解决办法，泵送及喷射杜拉纤维混凝土，杜拉—钢纤维与高强混凝土，应用杜拉纤维的技术经济分析等。

本书可供土建工程的设计、施工、监理等相关科技及管理人员学习参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

杜拉纤维在土建工程中的应用／龚益等编著．—北京：机械工业出版社，2002

ISBN 7-111-10959-7

Ⅰ．杜… Ⅱ．龚… Ⅲ．聚丙烯纤维—纤维增强混凝土

Ⅳ．TU528.572

中国版本图书馆CIP数据核字（2002）第070826号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　　邮政编码100037）

责任编辑：何文军　涂　鹏　　版式设计：冉晓华　　责任校对：吴美英

封面设计：姚　毅　　责任印制：闫　焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年10月第1版·第1次印刷

890mm×1240mm　A5·10印张·295千字

0001-4000册

定价：26.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

序

从结构的裂缝控制观点来看，普通与高强混凝土建筑材料的优越性在一般的建筑结构中往往得不到充分的发挥。因此，提高混凝土的韧性，克服其脆性，将会有很大的技术经济意义。

上世纪60年代初Goldfein的早期研究工作发现，在水泥净浆与砂浆中掺加少量聚丙烯纤维可以明显提高其抗裂性能，此后，英国将短切聚丙烯粗纤维掺入混凝土中用以制造各种构件及预制件。70年代中期美国开始大力开发丝束相连的膜裂聚丙烯纤维，用以代替钢筋网片控制混凝土的收缩。近30年又陆续开发出一系列可掺入混凝土中的单丝纤维，如聚丙烯、尼龙、聚丙烯腈、聚乙烯等，其中聚丙烯单丝纤维因其价格低廉，耐化学腐蚀性高，并且来源广而吸引工程界。杜拉纤维（Durafiber）是美国希尔兄弟化工公司的产品。它是一种以聚丙烯为原料，以独特工艺制造的高强聚丙烯单丝纤维，可以极为有效地控制混凝土或砂浆的塑性收缩、干缩、温差变形等因素引起的微裂缝，防止及抑制裂缝的形成及发展，大大改善混凝土的抗渗性能、抗冲击及抗裂能力，广泛使用于地下工程防水、工业与民用建筑、屋面、墙体、地面以及道路和桥梁工程中，其显著的效果已为大量的工程实践所证明。

我国建设部科技发展促进中心，于1998年6月专门印发《美国杜拉纤维“技术研讨会纪要”》的通知，要求在建设工程中推广应用。

机械工业出版社现编辑出版这套科技普及读物，龚益教授、沈荣熹教授等人合写《杜拉纤维在土建工程中的应用》一

书，对其推广应用无疑是一项有益的工作。总之，推广使用“杜拉纤维”对解决建筑工程中混凝土结构和砂浆抹面、防水工程中出现裂缝的“常见病”和“多发病”是一项极有效的措施。普通的聚丙烯纤维由于见水成团，搅拌不易分散，不能直接在工程中应用。近年来国内已试制出类似的单丝纤维，目前还正处在试用与考察阶段，估计不久的将来，也会实现此种纤维的国产化。

预祝“杜拉纤维”推广应用前程广阔，在建筑工程中使用纤维混凝土和纤维砂浆后一定能涌现出越来越多质量优良的工程。

徐至钧

2001.11

徐至钧教授级高级工程师、中国国际工程咨询公司专家组成员、
中国现代结构研究会副会长。

前　　言

翻开人类文明的历史，我们可以看到一个有趣的现象，那就是社会生产的进步首先体现为材料的进步。从原始的石器时代到青铜器时代，再到冶铁技术诞生，高性能新材料的出现和复合化的发展趋势往往就是技术进步和时代变革的标志。以建筑材料中应用最为广泛的混凝土来说，其发展过程从新石器时代的泥结卵石、草筋泥沙浆，经历石灰（石膏）三合土、火山灰石灰混凝土、掺有牛马血和糯米汁等“外加剂”的混凝土，直到近代波特兰水泥混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、自应力混凝土、纤维增强混凝土与聚合物混凝土等，主要遵循的就是复合化的技术路线。水泥混凝土是近现代使用最广泛的建筑材料，也是当前最大宗的人造材料。据不完全统计，世界水泥年产量已超过15亿t，折合成混凝土，应不少于45亿m3。早在1991年，美国全国混凝土建筑物总值已达6万亿美元之巨[85]。目前混凝土的应用，正向高强度、高性能化的方向发展。作为当今时代最主要的结构工程材料，混凝土的发展不断地推动着人类文明的进步。

从经济发展的角度考察，发达国家的进步总是与高性能、高技术建筑材料的广泛应用同步。自20世纪90年代初开始，合成纤维在改性混凝土中扮演了越来越重要的角色，特别是聚丙烯单丝纤维，在高新技术的生产工艺背景下解决了抗老化和易掺和的工程难题，所以能够在完全不增加施工难度的前提下取得大大改善混凝土性能的显著效果，受到工程界越来越多的注意。以美国希尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维（Durafiber）为例，技术上的重要改进使其具有很好的抗老化能力，对酸、碱、紫外线等都有极高的耐受力。杜拉纤维的化学稳定性使其能够在混凝土中长期保持良好的性能，从而有效控制混凝土塑性收缩和沉降引起的裂缝问题，改善混凝土的抗裂、抗渗性能，提高抗冲击和抗冻能力。在美国、加拿大、澳大利亚、日本、韩国、墨西哥以及东南亚许多国家，杜拉纤维大量用于地下工程防水、工业与民

用建筑的屋面、墙体和地面，以及公路及桥梁工程。由于杜拉纤维在混凝土施工中拌合容易、分布均匀、施工简单、效果显著，已经成为深受国外建筑工程界青睐的高科技建筑材料[42]。

禅房法器，不可或缺，是以其用而重之。诸如杜拉纤维之类内含高新技术，具有高附加值的建筑材料在国外工程界广泛应用，无疑说明了它的技术价值和直接或者间接的经济价值。但是在中国，我们却注意到一个令人困惑的事实：到处都在建设，到处都是工地，然而在这许许多多的建筑工地上，推广应用高科技建筑材料却是困难重重。建筑施工的成本造价逐日攀升，“豆腐渣工程”时有出现，混凝土工程的耐久性令人担忧，诸如混凝土工程裂缝等等老大难问题更是始终困扰着中国大地上的建设者。面对这种情况，我们除了要对行业内部孳生的不正之风痛加声讨之外，也需要更加大声疾呼地推广普及关于高科技建筑材料的科学知识。毕竟最终能够战胜贪婪和腐败的希望，只在于高度发达和完美结合的技术文明与精神文明。

复合化是各种材料发展的主要途径，混凝土也不例外。新石器时代用泥浆胶结大卵石作为柱基（西安半坡遗址）；用草木筋增强黄土与黄土结核（料浆石）泥浆抹墙打地坪；古埃及人用石膏砂浆砌金字塔；古罗马人用火山灰石灰混凝土建筑斗兽场与水渠、桥梁；东汉至今的石灰三合土房基与路基；唐宋以来用桐油、牛马血、糯米汁、羊桃藤汁掺入石灰砂浆中增加密实度，也改善了防水与耐久性（南京、和州等城墙）；传说古罗马及秦长城已用牛马血外加剂，可以说是引气外加剂的远祖。近代工程实践中出现的各种增强混凝土，掺加混合材料和多种化学外加剂，都是用多种材料复合来改善性能，以达到增强、耐久、经济的目的。复合化带来的超叠加效应，正是高性能混凝土获得其优良性能的主要原因[41]。

杜拉纤维在20世纪90年代中期经由海外华人介绍到中国大陆，因其性能优良、质量稳定而在国内数以千计的建筑工程中得到应用，取得了显著的阻裂、防渗、抗冻成效。非止于此，更主要的是杜拉纤维为我国在土建工程界推广使用合成纤维起到了很好的推动与促进作用。就此而论，杜拉纤维也是功不可没。

本书介绍杜拉纤维在土建工程中的应用。其中前言、第一章、第

七章至第十一章和第十四章内容均由龚益起草；其他章节，则是在沈荣熹提供部分内容初稿的基础上，由龚益补充完成；李清海撰写了第十三章有关纤维混凝土性能试验方法的内容；最后由龚益负责对全书各章加以协调并完成全书，再经沈荣熹通篇审定。北京恒律公司赵敏小姐和安立同先生、马施龙先生为协助资料整理、书稿录入做了很多工作，并整理完成了杜拉纤维在国内应用于各种主要工程实例的附录清单。尤其应该提到的是，在本书的撰写过程中，我们得到了铁道科学研究院徐蕴贤研究员、李渊小姐、解放军空军工程设计研究局王璋水高级工程师、中国现代结构研究会副会长、教授级高级工程师徐至钧先生、恒律发展有限公司董事长骆丽女士、王齐先生、北京铸墙集团高级工程师司国权先生、清华大学水利系邓宗才博士、哈尔滨工业大学刘琳博士、北京温德建设咨询公司刘博总经理、王平先生、中华混凝土信息商务网（http://Chinaconcrete.com）吴戈先生以及乾坤律师事务所余德和律师、中央财经大学林琼副教授、首都经贸大学马淑艳副教授、北方尚达装饰工程公司总经理庞勃先生等许多贤士高人的帮助和指教，同时参阅了大量文献资料。尽管在使用这些资料时我们已经注意到尽可能详尽地标引注明其出处，但恐怕还是会有挂一漏万的地方。在此谨向直接或者间接地帮助我们完成本书写作的所有的朋友表示由衷的谢意。

从某种意义上说，所谓杜拉纤维只是现代层出不穷的高新技术建筑材料当中的一个代表。它既不是惟一的、也不是最后的高科技的结晶，但对改善建筑工程质量、提高混凝土工程的耐久性卓有成效。土木建筑工程要求实打实，来不得虚假和空话。本书在行文写作上也力求做到有的放矢。行文简浅显，做事诚平恒，是我们追求的目标。衷心希望本书所介绍的知识能够推进建筑行业的技术进步，并对改善中国土建工程的质量起到一定的作用。如其若此，便是我们最大的荣幸了。书中不妥之处，尚祈各界读者朋友不吝指正。

Email:gongxi52@263.net

作者谨识

目　　录

序

前言

第一章　概述……1

第一节　纤维混凝土的定义……1

一、什么是纤维混凝土……1

二、纤维混凝土的未来……2

第二节　纤维混凝土发展简史……2

一、纤维混凝土的诞生……2

二、理论研究与工程应用……3

三、纤维混凝土在中国……4

第三节　纤维的品种与性能……6

一、纤维的分类……6

二、纤维的作用……7

三、对纤维产品的要求……8

四、几种主要纤维的物理力学性能……11

第四节　合成纤维在混凝土中的应用……12

一、水泥基体的作用与分类……12

二、混凝土的优点与缺点……14

三、纤维与混凝土的复合……17

四、纤维在混凝土中的作用效果……20

第二章　混凝土专用的杜拉纤维……27

第一节　杜拉纤维的材质与材性……27

一、聚丙烯单丝纤维……27

二、杜拉纤维产品的包装……28

三、杜拉纤维产品的主要技术参数……28

第二节　杜拉纤维的表面形貌……29
第三节　杜拉纤维外观尺度的表示法……31
第四节　杜拉纤维在混凝土中的掺量……32
第三章　杜拉纤维混凝土拌合物……34
第一节　杜拉纤维混凝土拌合物的制备……34
一、杜拉纤维混凝土拌合物……34
二、操作方法和注意事项……35
第二节　杜拉纤维混凝土拌合物的性能……36
一、稠度：坍落度试验……36
二、含气量和凝结时间……38
三、对杜拉纤维混凝土半合物工作性的评价……39
第四章　杜拉纤维混凝土的物理性能……41
第一节　杜拉纤维混凝土的表观密度……41
第二节　杜拉纤维混凝土的密实度……41
第三节　杜拉纤维混凝土的塑性收缩与干缩……42
一、杜拉纤维混凝土的塑性收缩……42
二、杜拉纤维混凝土的干缩……45
第四节　杜拉纤维混凝土的抗渗性……46
一、影响混凝土抗渗性的因素……47
二、杜拉纤维混凝土抗渗试验结果……47
三、杜拉纤维混凝土的抗渗机制……48
第五节　杜拉纤维混凝土的耐磨性……49
第六节　杜拉纤维混凝土的热工性能……50
一、比热容……50
二、热导率……51
三、热扩散率……51
四、热膨胀系数……51
第七节　杜拉纤维混凝土的耐火性能……51
第五章　杜拉纤维混凝土的力学性能……54
第一节　杜拉纤维混凝土的强度……54
一、杜拉纤维混凝土的抗压强度……56

二、杜拉纤维混凝土的弹性模量……62
三、杜拉纤维混凝土的抗拉强度与抗折强度……63
四、强度指标之间的换算……65
第二节　杜拉纤维混凝土的韧性与剩余弯曲强度……66
一、杜拉纤维混凝土的韧性……66
二、剩余弯曲强度……66
第三节　抗疲劳性……67
第四节　杜拉纤维混凝土的抗冲击性……70
第六章　杜拉纤维混凝土的耐久性……72
第一节　抗冻融性……72
第二节　抗碳化性……74
一、混凝土的碳化反应……74
二、加入杜拉纤维的作用……75
三、涂敷卫钢宝以保护钢筋……76
第三节　抗碱—集料反应……79
一、碱—集料反应的类型……79
二、碱—集料反应的特征……80
三、碱—集料反应的防治……81
第四节　混凝土结构的安全性与耐久性……82
一、耐久性影响结构的可靠度……82
二、混凝土结构耐久性的定义……83
三、提高混凝土结构耐久性的途径……84
四、结构的安全性与耐久性……86
第七章　杜拉纤维的作用机制及其综合效果……90
第一节　混凝土的裂缝……90
一、混凝土的特点……90
二、混凝土的裂缝……93
三、对裂缝现象的理论解释……94
四、混凝土材料裂缝的测度……97
第二节　造成混凝土裂缝的原因……99
一、混凝土材料裂缝的分类……99

二、引起裂缝的两类原因……102
三、从材料角度看裂缝控制……102
第三节　裂缝对混凝土耐久性的影响……104
第四节　杜拉纤维在混凝土中的阻裂作用……106
一、在塑性混凝土中的阻裂作用……106
二、在硬化混凝土中的阻裂作用……107
三、杜拉纤维阻裂作用的综合效果……108
第五节　杜拉纤维与膨胀剂阻裂作用的比较……111
一、混凝土本体自防水基本原理……111
二、杜拉纤维与膨胀剂抗裂作用的比较……116
三、几种刚性自防水措施的比较……117
第六节　杜拉纤维与钢筋网片阻裂作用的比较……120
第七节　杜拉纤维与玻璃纤维混凝土的比较……122
一、玻璃纤维的类别……122
二、抗碱玻璃纤维和硫铝酸盐水泥……124
三、杜拉纤维与玻璃纤维的差异……126
第八章　混凝土墙体裂缝及其解决办法……128
第一节　导致裂缝的主要因素……129
一、温度和湿度因素……129
二、砌筑质量因素……130
三、荷载因素……130
第二节　克服墙体裂缝的措施……131
一、提高砂浆抗剪强度……131
二、改善墙体防水性能……132
三、提高主体工程质量……133
第九章　泵送杜拉纤维混凝土……137
第一节　泵送混凝土……137
一、泵送混凝土的施工特点……137
二、泵送混凝土的性能要求……138
第二节　泵送商品混凝土工程的早期裂缝……140
一、商品混凝土早期裂缝的概念……140

二、商品混凝土早期裂缝的成因……141
三、泵送商混工程裂缝的预防……142
第三节　泵送杜拉纤维混凝土的实际应用……145
一、杜拉纤维对泵送的影响……145
二、泵送杜拉纤维防水混凝土……145
三、泵送C20杜拉纤维混凝土地坪……147
四、泵送C30S8杜拉纤维混凝土……151
第十章　杜拉纤维喷射混凝土……155
第一节　喷射混凝土……155
一、喷射混凝土的定义……155
二、喷射混凝土的特点……155
三、喷射混凝土的应用……156
第二节　加入杜拉纤维的作用……157
一、发挥材料复合的优势……157
二、改善喷射混凝土施工性能……161
三、杜拉纤维喷射混凝土的作业方式……162
第三节　喷射纤维混凝土在加固工程中的应用……165
第十一章　杜拉—钢纤维混凝土与杜拉纤维
高强混凝土……168
第一节　杜拉—钢纤维增强混凝土……168
一、钢纤维增强混凝土……168
二、杜拉—钢纤维形成筋级配……170
第二节　杜拉纤维高强混凝土的应用……173
一、杜拉纤维高强混凝土……173
二、杜拉纤维高强混凝土用于钢管混凝土柱……173
三、杜拉纤维高强混凝土用于地下室底板……174
第十二章　杜拉纤维混凝土的工程应用……177
第一节　杜拉纤维混凝土用于工业与民用建筑……177
一、结构刚性自防水……177
二、抗裂防渗砂浆、素浆……178

三、用于承重平面和大体积混凝土……178
四、混凝土预制构件、艺术品及其他……178
第二节　杜拉纤维混凝土用于道路和桥梁工程……179
一、超薄路面……180
二、桥梁工程……184
第三节　纤维混凝土用于水利工程……186
第四节　纤维混凝土用于石化工程……191
第十三章　纤维混凝土的性能试验……200
第一节　纤维混凝土拌合物的试验……200
一、稠度试验……200
二、质量密度试验……203
三、含气量试验……204
四、水灰比分析……206
第二节　纤维混凝土硬化体的试验……208
一、表观密度与吸水率试验……208
二、抗压强度试验……209
三、劈裂抗拉强度试验……211
四、抗剪强度试验……213
五、抗折强度试验……214
六、静态弹性模量试验……216
七、动态弹性模量试验……219
八、弯曲韧性试验……221
九、抗冲击试验……226
十、抗冻性能试验……228
十一、抗渗性能试验……231
十二、收缩性试验……232
十三、耐磨性试验……233
第十四章　工程应用杜拉纤维的技术经济分析……235
第一节　高科技建筑材料的技术经济特点……235
一、技术的先进性和宣传的隐蔽性……235
二、生产的专业性和应用的简易性……237

三、全球化：中国加入WTO的影响……238
第二节　高新技术建材推广的经济理论分析……241
一、非技术壁垒对技术创新的阻碍作用……241
二、非技术壁垒的具体内容和表现形式……245
三、体制因素制约高新技术建材的推广……249
第三节　应用杜拉纤维的技术与经济评价……251
一、成本问题……251
二、道德背景……255
三、效益分析……257
附录1　国内应用杜拉纤维的部分工程项目……268
一、工业与民用建筑……268
二、道路与桥梁工程……281
三、水利工程及其他……283
四、杜拉纤维早期在美国应用的部分实例……285
附录2　杜拉纤维在混凝土工程中的应用问答……287
附录3　杜拉纤维技术研讨会纪要……295
参考文献……300

第一章　概　　述

第一节　纤维混凝土的定义

一、什么是纤维混凝土

纤维混凝土，是纤维增强混凝土的简称，通常是指以水泥净浆、砂浆或者混凝土为基体，以非连续的短纤维或者连续的长纤维作增强材所组成的水泥基复合材料，也叫纤维混凝土。

尽管在通常场合下所说的混凝土大多是指以水泥作为基材的建筑材料，即水泥混凝土，但是广义概念下的混凝土并未指定必须由水泥作为粘结材料。例如，以沥青为粘结材料，辅以石渣或石子制成的混凝土称为沥青混凝土，通常用做道路、桥梁等构筑物的表面敷设。在沥青混凝土中掺入适量的纤维，即成为沥青纤维混凝土。顾名思义，纤维混凝土是纤维与混凝土的复合体。按照纤维材性材质的划分，包括有机纤维和无机纤维；按照纤维材料的弹性模量可以分为高弹性模量纤维和低弹性模量纤维；按照纤维的长度划分，可以分为长纤维和短纤维；按照纤维的粗细程度又可以划分为粗纤维和细纤维。按照单位体积混凝土中所掺加纤维的重量和体积大小还可以分为高掺量和低掺量纤维混凝土。一般来说，如果所掺纤维量相对于混凝土本身可以忽略不计时，即可称为“外掺的”或者称为“低掺量的”纤维混凝土。杜拉纤维就是一种低弹性模量的合成纤维。杜拉纤维混凝土属于低掺量的纤维混凝土。

事实上，所谓纤维的粗细和长短也都是相对的。极端而言，钢筋混凝土当中的钢筋也可以算得上是又粗又长的纤维。在目前实际工程中已经获得应用的纤维混凝土有石棉水泥、钢纤维混凝土、玻璃纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土以及碳纤维混凝土。某些植物纤维和具有较高弹性模量的合成纤维也被应用于制备纤维混凝土。从目前发展的趋势看，以杜拉纤维为代表的聚丙烯单丝纤维在制备纤维混凝土方面

具有一定的优势。

二、纤维混凝土的未来

纤维混凝土的问世和普及推广是一项具有深远社会意义的进步。作为术语出现的“纤维混凝土”只是相对于不掺加纤维的普通“混凝土”而言才具有存在价值。相信在不太久远的将来，混凝土中掺加纤维将会成为一种习惯性的标准做法，就好像在混凝土当中必定有砂石水泥一样平常。到那时，所有的混凝土中都会掺有一类叫做“纤维”的物料，所有的“混凝土”都是“纤维混凝土”，“纤维混凝土”的称谓也会成为历史的遗迹。

第二节　纤维混凝土发展简史

一、纤维混凝土的诞生

混凝土或砂浆中的纤维增强原理，在世界各国建筑业中早有应用，因此在混凝土中掺加纤维以便改善其性能的想法甚至早于水泥混凝土的问世。可以这样说，自从水泥来到人间，人类开始采用水泥混凝土作为建筑材料的时候开始，就在探索试验向其中掺入各种各样的纤维。在民间，老百姓用黄土白灰拌合起来抹墙砌砖时就有掺入“麻刀”的做法。麻刀是典型的植物纤维。除了麻刀，还有稻草、猪鬃、头发、纸屑、棉絮，几乎所有的纤维都曾经被用作增强建筑材料的试验品。我国许多农村地区建造的房屋，在泥巴当中掺入稻草，使泥巴这种强度很低的材料增加了韧性。20世纪50年代以来，世界上许多工业发达国家关于纤维混凝土的研究取得了明显的成就，其中包括：钢纤维混凝土、玻璃纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和碳纤维混凝土等。

纤维混凝土研究与应用的实质性进展，得益于合成纤维技术的突破。特别是最近二十多年来，以美国为代表的技术发达国家研制生产出一系列可以掺入混凝土当中的单丝合成纤维，如：改性聚丙烯、尼龙、聚酯、聚丙烯腈、聚乙烯等。以往人们掺入混凝土当中的纤维（包括玻璃纤维与大多数植物纤维［大多无法耐受混凝土材料中很强的碱性，或者因其无法在混凝土中均匀分散而达不到阻裂增强的预期效果，而普通的聚丙烯材料又因其在紫外线作用下会迅速老化崩解而不能使用。所有这些困难，都只能在纤维材料科学技术进步的背景下才

能看到解决的曙光。可以这样说，纤维混凝土发展的历史，其实就是人类寻找和发现能够适应混凝土高碱性环境，又能在混凝土中均匀分散的纤维的历史。

二、理论研究与工程应用

20世纪60年代中期Goldfein研究用合成纤维作水泥砂浆增强材的可能性[43]，发现尼龙、聚丙烯与聚乙烯等纤维有助于提高砂浆的抗冲击性。Zollo等的实验结果表明，若在混凝土中掺加体积率为0.1%～0.3%的聚丙烯纤维时，可使混凝土的塑性收缩减少12%～25%[24]。

随着纤维混凝土在中国的应用推广，建筑材料理论界也在国外学术界研究成果的基础上开始关注并研究相关的理论问题。例如：中国建筑材料科学研究院沈荣熹研究了低掺率合成纤维在混凝土中的作用机制，归纳总结了合成纤维作为混凝土增强材的特点，明确指出低掺率合成纤维在混凝土中具有阻裂作用和增韧作用[6][7]。大连理工大学戴建国、黄承逵、赵国藩研究了低弹性模量纤维混凝土的剩余弯曲强度问题，给出了可用于计算低弹性模量纤维混凝土构件抗弯承载力的指标和计算方法，同时说明聚丙烯纤维在工程中不但可以作为非结构性补强材料来防止塑性收缩裂缝，而且可以作为结构性补强材料用于增强构件的抗弯承载力，改善结构延性[44]。关于纤维混凝土的理论研究表明，纤维对混凝土综合性能改善的主要贡献很可能不是增加强度而是抗裂增韧，那种不加区分地一味强调纤维对混凝土强度指标改善效果的观点也许会把纤维混凝土的应用推广引入歧途。

钢纤维增强混凝土最早发展是在1849年，法国花匠莫尼尔（1823～1906）在水泥中加入细铁丝网制成花盆和种桔树用的铁丝水泥桶。1855年法国工程师用细铁条增强水泥，制成一艘水泥船并获得专利。1910年美国人波特（Porter）把薄钢片掺入混凝土中改善混凝土的抗拉强度和抗冲击性并获得专利[35]。这些都是钢纤维混凝土的早期应用。1995年在英国举办的“第100届国际建筑展览会”上，展示了未来建筑技术与建筑材料的发展方向。专家预见未来大部分的建筑结构物仍然要采用钢材和混凝土来建造，混凝土技术将会有很大的发展，极有可能采用非金属材料作为加强筋或者增强材料。如果考虑“复合优势”的作用，那么更具发展前景的趋势很可能是金属材料与非金属材