

李赵 艺文 著

混杂纤维混凝土 阻裂增韧及耐久性能



科学出版社

混杂纤维混凝土 阻裂增韧及耐久性能

李 艺 赵 文 著

国家自然科学基金项目(50508008、51078065)
教育部中央高校基本科研业务费项目(90401009)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共分 10 章,第 1 章绪论,引出混杂纤维混凝土研究的必要性;第 2 章采用新型刀口诱导约束法全面阐述混杂纤维砂浆、混凝土的阻裂性能,并与传统的平板法进行试验对比。分析混杂纤维混凝土抗裂可靠性;第 3 章阐述中温作用下混杂纤维混凝土构件的弯曲韧性,通过最陡坡法优化配合比设计以协调各组分间的热工性能和力学特性,运用极差和方差分析量化各掺料的力学性能和耐久性能的影响水平;第 4 章通过渗水和渗氯试验分析混杂纤维混凝土的抗渗性能,给出抗裂和抗渗指标的关联;第 5 章介绍混杂纤维混凝土的抗冻性,分析混杂纤维混凝土抗冻可靠性;第 6 章分析受热后混杂纤维砂浆的阻裂性能,给出纤维砂浆抗裂可靠性;第 7 章通过混杂纤维细石混凝土的渗水试验,分析混杂纤维细石混凝土的抗渗性能,得到其耐久性指标间关系;第 8 章给出轴对称温度场中混杂纤维混凝土圆筒热力学分析;第 9 章详细阐述混杂纤维混凝土核废料容器的成型、水化热测定及数值模拟;第 10 章对混杂纤维混凝土核废料容器的服役状态进行数值模拟分析。

书中综合考虑基材、掺和料与水灰比的合理配比,以及温度、时效、内部作用等多因素耦联作用,使材料各组分相互取长补短,产生复合效应,从而使混凝土形成结构致密且基本无结构薄弱区域的均匀整体,以优化混凝土的阻裂增韧和耐久性能,旨在获得长期耐温、阻裂增韧、高耐久性的工程材料。本书为充分发挥材料潜能和纤维高性能混凝土开发与应用提供有力的理论支持。

本书可供土木、水利、交通、工业民用建筑等领域的科研人员、工程师、高等院校教师、研究生以及本科高年级学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

混杂纤维混凝土阻裂增韧及耐久性能/李艺,赵文著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-032997-4

I. ①混… II. ①李…②赵… III. ①纤维增强混凝土-研究
IV. ①TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 257023 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郑金红

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 324 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

混凝土至今仍是全世界用量最大、应用最广泛的建筑材料,但其存在抗拉强度低、脆性大和易开裂的缺点。目前,国际上公认在混凝土中掺加纤维有助于克服混凝土材料的先天缺陷。因此,纤维混凝土是一种具有广泛应用前景的工程材料。同研究相对成熟的单掺纤维混凝土相比,采用不同品质、不同几何形态纤维混掺而成的混杂纤维混凝土,可以从不同层次上改善纤维三维分布的均衡性以及集料与纤维的协调作用,提高增强效率。基于此,本书的研究对象为钢纤维(包括超短、超细钢纤维)、杜拉纤维和目前研究较少的玄武岩纤维等混掺的混杂纤维混凝土(hybrid fiber reinforced concrete, HFRC);关于混凝土材料的温度影响研究,以往大都集中于高温作用,而温度对水泥浆裂纹形成的最主要阶段是在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ (中温),但这方面的研究却相当匮乏,本书材料及构件的受热试验条件为 150°C ;针对《国家长期科学和技术发展规划》提出材料设计中要重点研究材料服役与环境的相互作用、性能演变等,本书采用可靠性方法分析了混杂纤维混凝土的抗裂性和抗冻性;鉴于传统的平板法抗裂试验复演性差的缺点,选择新型刀口诱导约束法进行抗裂性能研究,使得抗裂指标测试结果更具科学性;依托国家自然科学基金项目(50508008、51078065)和教育部中央高校基本科研业务费项目(90401009)对混杂纤维混凝土核废料容器的成型、水化热和服役状态进行了试验研究和数值模拟。

本书以常温和受热后(150°C)混杂纤维混凝土的坍落度、抗压、抗裂、弯曲韧性、断裂能、渗透、冻融等大量系列试验为基础,探明了混杂纤维混凝土温度损伤机理和时变性能;通过最陡坡法优化配合比设计以协调各组分间的热工性能和力学特性;运用极差和方差分析量化了各掺料的力学性能和耐久性能的影响水平,分析了混杂纤维混凝土圆筒内部热应力;对混杂纤维混凝土抗裂和抗冻进行了可靠性分析;对储存核废料用混杂纤维混凝土性能进行了系统研究。书中考虑基材、掺料与水灰比的合理配比以及温度、时效、内部作用等多因素耦联作用,使材料各组分相互取长补短,产生复合效应,从而使混凝土形成结构致密且基本无结构薄弱区域的均匀整体,以优化混凝土的各种性能,旨在获得长期耐温、阻裂增韧、高耐久的工程材料,为充分发挥材料潜能、纤维高性能混凝土开发与应用提供理论支持。

本书内容是作者课题组共同完成的研究成果,在此,对参与本书研究和写作工作的梁磊博士、周启硕士、郭宪刚硕士、丛溪硕士、宫文娟硕士、杨春晖硕士、曲洁硕士、王东升硕士、尹一涵硕士、孙博硕士、金子捷硕士、张诚硕士、金龙硕士等表示感谢,感谢他们对本书作出的重要贡献。

此外,作者还要衷心感谢国家自然科学基金委员会所提供的国家自然科学基金青年基金和面上项目、教育部中央高校基本科研业务费项目;感谢辽宁省科学技术厅为作者早期研究工作提供的基金。在研究工作中,得到了北京核工业地质研究院王驹总工程师、北京核工业第二研究院温英惠总工程师、大亚湾核电运营管理有限责任公司黄来喜总工程师所给予的重要帮助,在此深表谢意!

感谢作者的爱人、父母多年来的理解、支持和奉献,正因有了强大的后盾和默默的鼓励,才使作者能够踏实工作、潜心研究。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纤维混凝土国内外研究现状	1
1.1.1 阻裂性能研究现状	1
1.1.2 增强增韧性能研究现状	2
1.1.3 抗渗性能研究现状	4
1.1.4 温度作用下纤维混凝土研究现状	6
1.2 纤维混凝土的工程应用	8
1.2.1 钢纤维的工程应用	8
1.2.2 聚丙烯纤维的工程应用	9
1.2.3 玄武岩纤维的工程应用	10
1.2.4 混杂纤维的工程应用	12
1.3 纤维细石混凝土	12
1.3.1 细石混凝土的研究现状	12
1.3.2 纤维细石混凝土的研究现状	13
第 2 章 混杂纤维砂浆、混凝土的阻裂性能	15
2.1 纤维阻裂作用机理	15
2.1.1 复合材料力学理论	15
2.1.2 纤维间距理论	17
2.1.3 纤维对混凝土基体的作用	19
2.1.4 混杂纤维阻裂作用机理	20
2.2 试验原材料及设计	23
2.2.1 试验原材料	23
2.2.2 纤维砂浆、混凝土试验设计	24
2.3 坍落度测试	24
2.4 抗裂性试验	26
2.4.1 刀口诱导约束法	26
2.4.2 与传统平板约束法对比	34
2.5 纤维混凝土抗裂可靠性分析	38

2.5.1	结构可靠性基本理论及计算方法	39
2.5.2	钢筋钢纤维混凝土结构构件正常使用极限状态可靠性分析	44
2.5.3	纤维混凝土结构构件正常使用极限状态可靠性分析	47
第3章	混杂纤维混凝土的弯曲韧性	50
3.1	纤维增强增韧作用机理	50
3.1.1	不同纤维对混凝土的影响	50
3.1.2	纤维混凝土的不均匀性及改进措施	55
3.2	试验原材料及设计	56
3.2.1	试验原材料	56
3.2.2	正交化配合比设计	56
3.2.3	试件设计与升温机制	57
3.3	坍落度测试	57
3.3.1	试验结果	57
3.3.2	试验结果分析	59
3.4	抗压试验	60
3.4.1	测试方法及数据	60
3.4.2	极差分析	60
3.4.3	方差分析	61
3.4.4	试验结果分析	62
3.5	弯曲韧性试验	64
3.5.1	试验方法	64
3.5.2	试验设备及数据	64
3.5.3	极差分析	67
3.5.4	方差分析	69
3.5.5	试验结果分析	70
3.6	断裂能测试	74
3.6.1	测试方法及数据	74
3.6.2	极差分析	75
3.6.3	方差分析	75
3.6.4	试验结果分析	76
3.7	纤维混凝土调优试验	77
3.7.1	坍落度及抗压试验	77
3.7.2	弯曲性能试验	78
3.7.3	断裂能试验	82

第 4 章 纤维混凝土抗渗性能研究	84
4.1 纤维抗渗作用机理	84
4.1.1 服役期内抗渗性能的影响因素	86
4.1.2 混凝土渗透性的影响因素	89
4.2 中温下渗水试验	90
4.2.1 正交化配比试件渗水试验	90
4.2.2 调优试件渗水试验	95
4.3 常温下渗氯试验	102
4.3.1 试验装置	102
4.3.2 试验步骤	103
4.3.3 试验数据	104
4.3.4 分析及总结	104
4.4 抗裂与抗渗指标的关联	106
第 5 章 混杂纤维混凝土的抗冻性	109
5.1 纤维抗冻作用机理	109
5.1.1 混凝土冻融破坏理论	110
5.1.2 混凝土抗冻性的影响因素及改善措施	112
5.2 试验原材料及设计	115
5.2.1 试验原材料	115
5.2.2 正交化配合比设计	115
5.3 坍落度的测试	117
5.3.1 试验方法及数据分析	117
5.3.2 极差分析和方差分析	118
5.4 抗压试验	119
5.4.1 试验方法及数据分析	120
5.4.2 正交试验分析方法的比较	122
5.5 抗压强度损失测试	123
5.5.1 试验方法及数据分析	123
5.5.2 极差分析和方差分析	127
5.6 质量损失测试	130
5.6.1 试验方法及数据分析	131
5.6.2 极差分析和方差分析	132
5.6.3 分析及总结	135
5.7 抗裂与抗冻对比分析	144
5.7.1 抗裂试验数据	144

5.7.2	分析及总结	146
5.8	纤维混凝土冻融可靠性分析	150
5.8.1	冻融可靠性分析的必要性	150
5.8.2	冻融可靠性分析方法发展概况	151
5.8.3	混凝土冻融破坏过程的不确定性	152
5.8.4	利用冻融循环次数进行可靠性分析	153
5.8.5	利用抗压强度损失进行可靠性分析	154
第6章	纤维细石混凝土的阻裂性能	158
6.1	试验原材料及设计	158
6.1.1	试验原材料	158
6.1.2	正交化配合比设计	158
6.2	坍落度的测试	159
6.2.1	试验方法及数据	159
6.2.2	分析及总结	160
6.2.3	不同水灰比下坍落度分析	161
6.3	抗压试验	162
6.3.1	试验方法及数据	162
6.3.2	极差分析	164
6.3.3	方差分析	166
6.3.4	试验结果分析	166
6.4	抗裂试验	167
6.4.1	试验配比与数据	167
6.4.2	分析及总结	169
6.4.3	混杂纤维砂浆抗裂可靠性分析	173
第7章	纤维细石混凝土抗渗性研究	175
7.1	混凝土抗渗性能试验方法	175
7.2	试验原材料对抗渗性能的影响	176
7.3	纤维细石混凝土抗渗试验	178
7.4	试验结果分析	180
7.4.1	极差分析和方差分析	180
7.4.2	试验结果分析	182
7.4.3	纤维种类及掺量对纤维细石混凝土抗渗性能的影响	182
7.4.4	素混凝土与纤维细石混凝土抗渗性能的比较	183
7.5	纤维细石混凝土抗渗可靠性分析	184
7.5.1	基本方法	184

7.5.2 可靠指标的计算	184
7.6 纤维细石混凝土耐久性指标相互联系	188
7.6.1 抗裂与抗渗指标的关联	189
7.6.2 细石混凝土性能各指标的相互联系	191
第8章 混杂纤维混凝土圆筒的热应力分析	193
8.1 轴对称稳定温度场中热应力的解法及基本方程	193
8.2 轴向温度有变化的轴对称稳定温度场产生的热应力	194
8.2.1 轴向温度为指数函数时圆筒的热应力	196
8.2.2 轴向温度为三角函数时圆筒的热应力	199
8.2.3 表面温度为 z 任意函数时圆筒的热应力	202
第9章 混杂纤维混凝土核废料容器试验	206
9.1 固体核废料处置及核废料容器的研究现状	206
9.1.1 核废料处置的发展状况	206
9.1.2 混凝土核废料容器的研究现状	207
9.2 混凝土水化热研究现状	208
9.2.1 国外研究现状	208
9.2.2 国内研究现状	209
9.3 混杂纤维核废料容器试验	210
9.3.1 模板的设计制作	210
9.3.2 钢筋网架及测温探头的布置	210
9.3.3 核废料容器的浇筑成型	211
9.3.4 水化热的测试	212
9.3.5 试模的拆除及试件的养护	216
9.3.6 表面平整度及密实性检测	216
9.4 核废料容器的水化热模拟	219
9.4.1 单元的选取	219
9.4.2 热传导的基本假定	219
9.4.3 热力学参数的选取	220
9.4.4 温度荷载参数的处理和边界条件的选取	221
9.4.5 模型的建立与加载方式的选择	223
9.4.6 核废料容器的温度场数值模拟	224
9.4.7 温度值模拟分析	228
9.4.8 核废料容器的水化热应力模拟	229
第10章 混杂纤维混凝土核废料容器服役状态数值模拟分析	233
10.1 核废料容器的服役状态	233

10.2	有限单元及材料参数的选取·····	233
10.3	荷载状态和边界条件的选取·····	233
10.4	核废料容器使用过程中的温度场模拟·····	236
10.5	核废料容器使用过程中的温差应力·····	241
参考文献 ·····		246

第 1 章 绪 论

纤维的掺入对混凝土的力学和耐久性能等均有不同程度的影响。综合考虑基材和掺和料的合理配比,包括混凝土基体强度、混杂纤维参数的匹配效应,使之相互取长补短,产生复合效应,从而使混凝土形成结构致密且基本无结构薄弱区域的均匀整体,以优化混凝土性能。本章将详细介绍纤维混凝土阻裂增韧、抗渗性能以及温度作用影响的国内外研究现状。

1.1 纤维混凝土国内外研究现状

1.1.1 阻裂性能研究现状

裂缝一直是混凝土研究领域的难点。与普通混凝土相比,纤维在基体中可明显减少早期收缩裂缝、温度裂缝和长期收缩裂缝,阻止水泥基体原有缺陷(微裂缝)的扩展并有效延缓新裂缝的出现。基于混凝土是多相、多层次的复合材料,采用不同品质、不同几何形态的纤维混掺,制成混杂纤维混凝土。考虑纤维自身特性以及纤维几何尺寸与混凝土特征尺度的匹配关系等纤维参数,从不同层次上改善纤维三维分布的均衡性以及集料与纤维的协调作用,提高增强效率。

在建筑材料中掺入纤维的做法由来已久,利用纤维提高胶凝性建筑材料抗裂性的历史可追溯到古代,草筋黏土砖和纸筋石灰是最早的纤维增强型复合建筑材料^[1]。1963 年 Romualdi 和 Batson^[2]发表了关于钢纤维约束混凝土裂缝开展机理的论文,提出了钢纤维混凝土开裂强度是由对拉伸应力起有效作用的钢纤维平均间距所决定的结论,即纤维间距理论。Zollo^[3]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%。20 世纪 80 年代美国合成材料化学工业生产了一种由聚丙烯制成的纤维丝(称为 Fibermesh),并将其应用于混凝土建筑物,增强塑性混凝土的抗拉能力,显著降低其塑性流动和收缩微裂纹。玄武岩-植物纤维增强聚丙烯复合材料的研究是一个全新的课题,在国外已有大量的研究,但目前处于保密状态缺少公开发表文献。我国对于玄武岩纤维及其复合材料的研究也相对较少,河北工业大学的郭振华^[4]从海泡石纤维和改性玄武岩纤维的微观结构特性出发,进行海泡石/玄武岩复合纤维增强沥青复合材料的制备,通过路用性能试验,研究了海泡石纤维和改性玄武岩纤维对沥青混合料性能的影响以及结合机理。结果表明,添加适量海泡石和

改性玄武岩纤维可以制备性能优良的纤维复合沥青混合料;海泡石纤维对沥青表现极强的吸持能力,有效调节了沥青质与胶浆的含量;改性玄武岩纤维在沥青中主要起加固和改善混合料的作用,两种纤维的添加,使沥青混合料的高温变形性、水稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性等显著提高。

Sun 等^[5]于 2001 年发表了三种不同长度的钢纤维、一种短聚乙烯醇纤维(PVA)、一种短聚丙烯纤维(PP)分别混杂后的高性能混凝土自由收缩试验(0~120 天)和抗渗试验的结果。试验中发现,混凝土的干缩与水泥胶凝的孔结构有关,尤其是与孔径尺寸有关。当单掺纤维体积掺量相同时,纤维对干缩的影响主要与纤维的尺寸、体积和弹性模量有关。当混杂纤维的总体积掺量相同时,钢-PVA-PP 混杂纤维的减缩效果优于钢-PVA 混杂纤维。孙伟等人认为这是由于聚丙烯的纤维间距较小所致,这一点在三种钢纤维混杂的自由收缩试验中也得到证实:三种钢纤维混杂时,较多的短纤维会有较好的减缩效果。由于混杂纤维降低了孔隙率并减少了有害孔(孔径大于 50nm)的比例,混杂纤维具有最佳的减少高性能混凝土自由收缩的效果。不同总体积掺量的纤维高性能混凝土自由收缩试验表明,纤维体积掺量在 1.0%~2.0%时,对减少高性能混凝土自由收缩的效果最明显。但这一体积掺量可能太大,会增加纤维混凝土的生产成本。

高小建等^[6]通过在混凝土中加入减缩剂和聚丙烯纤维,研究了混凝土的早期开裂性能,结果表明:加入减缩剂能显著减轻混凝土早期开裂程度,掺聚丙烯纤维使混凝土早期开裂宽度减小,却增加了裂缝数量和开裂面积;几种措施对混凝土早期开裂的作用效果优劣次序为:减缩剂>减缩剂加聚丙烯纤维>聚丙烯纤维。

邓东升^[7]研究了合成纤维对水工混凝土抗裂性能的影响,并认为掺入合成纤维对减少水工混凝土的收缩开裂具有显著影响。14~60d 范围内纤维混凝土的收缩率比基准混凝土低 34.2%~60.2%,7d 龄期时的抗裂指标比基准混凝土提高了 26%,而 28d 龄期时则提高了 82%。

近年来,美国、德国和丹麦等国都建议在混凝土中掺加纤维,赋予混凝土一定的韧性,改善混凝土的抗裂性能。美国耐克公司是第二代增强材料尼龙纤维的生产者和销售者,将尼龙纤维用于预制构件和现场浇注的混凝土中已有 20 多年历史。通过掺入尼龙纤维,改进了混凝土的表面质量及整体性,提高了混凝土的抗裂性能。该公司还对聚丙烯及聚酯纤维在混凝土中的应用进行了研究^[6]。

德国 Messrs 研究掺入聚丙烯纤维在混凝土中可有效提高混凝土的抗裂及抗渗性能,抑制混凝土早期裂缝的产生^[8]。丹麦研究用聚丙烯纤维来改善混凝土早期收缩裂缝,认为掺加纤维会降低坍落度^[9]。

1.1.2 增强增韧性能研究现状

最早关于混杂纤维增强水泥基复合材料的研究可能是 Walton 等在 1975 年关

于有机纤维和无机纤维共同工作提高基体的抗拉性能和抗冲击性能的研究。1982年 Kobayashi 等^[10]研究了钢-聚乙烯混杂纤维混凝土的弯曲性能,试验结果表明:混杂纤维混凝土初裂强度与钢纤维混凝土基本相同,但达峰值后承载力下降较慢。该文可能是第一次在纤维混凝土中使用“hybrid”一词,20世纪90年代后关于混杂纤维混凝土的研究逐渐多起来,Glavind 和 Aarre^[11]研究表明:钢-聚丙烯混杂纤维可以提高混凝土的极限压应变。

进入21世纪后,混杂纤维混凝土越来越受到重视,研究成果也逐渐丰富起来。2000年 Qian 和 Stroeven^[12]进行了一种短聚丙烯纤维(长度12mm)、一种短钢纤维(长度6mm)、两种长钢纤维(长度分别为40mm和30mm)之间混杂的纤维混凝土密度、抗压、抗折和劈拉试验,认为0.15%是最佳的聚丙烯纤维体积掺量。通过分析试验数据,Qian 等认为短纤维可以提高抗压强度和抗折强度,但对劈拉强度无影响;40mm长纤维可以提高抗折强度和劈拉强度,但对抗压强度无影响。Qian 等也认为过多的纤维增加了混凝土的缺陷,不能达到最紧密堆积,因此可能对强度起到反面作用。Qian 等在比较单掺纤维和混杂纤维时,认为单掺聚丙烯纤维的最优掺量即是钢-聚丙烯混杂的最优掺量,但由于两种纤维相互作用,实际上混杂和单掺两种条件下的最优掺量可能不同。

同济大学姚武等^[13]根据高性能混凝土材料的多层次特性,以碳纤维和钢纤维混杂,在体积分数仅为0.5%的小掺量情况下显著提高了混凝土的强度和韧性。研究结果显示,混杂纤维混凝土的抗压强度和抗拉强度分别比基准混凝土提高了31.4%和36.5%;韧性指数提高了200%,断裂能提高了21倍,且在混凝土材料初裂后呈现优越的应变硬化行为。

华东交通大学王凯等^[14]研究并讨论了钢纤维与聚丙烯纤维混杂对高性能混凝土力学性能的影响,研究表明:低掺量混杂纤维在增强混凝土抗压强度作用方面虽不很理想(与素混凝土相比,仅提高10%~20%),但由于纤维的加入,增大了混凝土受压破坏时的延性,不出现崩碎和突然的强度降低,而是在达到峰值后强度逐渐降低,使混杂纤维混凝土表现出具有延性破坏的性质;低掺量混杂纤维在提高混凝土抗拉、抗折性能方面效果较好,起到了纤维混杂叠加增强作用,混凝土韧性得以增强;低掺量混杂纤维混凝土在抗冲击性能方面优于钢纤维混凝土及其他混凝土,抗冲击性有大幅度的提高,表现出超叠加效应,并在混凝土材料初裂后呈现优越的应变硬化行为。

东南大学孙伟等^[15,16]对聚丙烯纤维和钢纤维混杂增强高强混凝土的弯曲性能进行试验,研究表明:钢纤维与聚丙烯纤维组成三维乱向支撑网,在一定程度上弥补了混凝土的初始缺陷,增强了基体的抗拉能力;钢纤维与聚丙烯纤维缠绕在一起,在承受弯曲拉伸荷载时产生纤维连锁效应,提高了试件的抗弯强度;在裂缝扩展过程中,钢纤维与聚丙烯纤维先后起阻裂的主导作用,对裂缝的扩展进行全

过程抑制,明显增大了基体的韧性;从经济上考虑混杂纤维混凝土也有一定的优势,钢纤维增强、增韧效果好,但会导致工程造价高;聚丙烯纤维增韧效果好,价格较低,但仅掺加聚丙烯纤维难以提高混凝土的强度,只能延缓其后期破坏过程。因此,在钢纤维掺量较低的基础上加入低掺量的聚丙烯纤维,工程造价提高少,但却使混凝土的强度、韧性、阻裂能力等性能得到很大提高,大大改善了混凝土的脆性,特别适合抗震等级要求较高的工程。沈荣熹^[17]归纳总结了合成纤维作为混凝土增强材料的特点,指出低掺率在合成纤维混凝土中具有阻裂和增韧的作用。大连理工大学戴建国等^[18]给出了可用于计算弹性模量纤维混凝土构件受弯承载力的参数和计算方法,指出聚丙烯纤维在工程中不但可作为非结构性补强材料防止塑性收缩裂缝,还可作为结构性补强材料用于增强构件的受弯承载力,改善结构延性。

1.1.3 抗渗性能研究现状

混凝土的抗渗性是指混凝土抵抗有压介质(如水、油、溶液等)渗透作用的能力。20世纪30年代,人们开始关注混凝土的抗渗性能,是始于混凝土水坝、水渠及位于地下水位线以下的地下结构如隧道等的大型水工工程建设,一旦混凝土的抗渗能力不足或受到破坏,会降低这些结构的使用功能,造成污染、渗漏等事故。尤其是水坝之类的大型水工结构,在设计中需要确知混凝土抵抗高水压下水穿透的能力。

从20世纪80年代起,人们重新对混凝土抗渗性能产生兴趣,是由于混凝土的耐久性问题日益为人们所关注。混凝土的耐久性与水和其他有害液体、气体向其内部流动的数量、范围等有关,因此抗渗性能越高的混凝土其耐久性就越好。渗透性是混凝土耐久性诸多性能之一,但通常认为渗透性是评价混凝土耐久性的最重要的指标,因为所有混凝土耐久性问题都有一个共同点,它的破坏大多是有水及有害液体或气体侵入的条件下发生的,都与水或其他有害液体、气体向其内部传输的难易程度有关^[19]。在混凝土结构的抗渗性研究中,可分为材料的抗渗性研究、构件的抗渗性研究和结构的抗渗性研究三个层次。目前改善混凝土抗渗性能有两种途径,其一是在混凝土中添加外加剂,即通过膨胀剂提高混凝土的密实性,或加入憎水性有机材料提高混凝土抗渗性能的方法;其二在混凝土中掺入纤维,减少混凝土内部缺陷,改善混凝土内部品质,从而达到提高抗渗的目的^[20]。目前一般认为,合成纤维掺入混凝土可以提高混凝土的抗渗性能,因为纤维弹性模量高于凝结初期的混凝土的弹性模量,增加了塑性和硬化初期复合体的抗拉强度,可以有效地抑制早期干缩开裂的产生和发展,减少混凝土内部的微裂纹,改善了混凝土内部结构,降低孔隙率,抑制连通孔的产生;同时纤维使基体失水面积减小,水分迁移困难,降低了毛细管失水收缩形成的毛细管张力,乱向分布的纤维也阻断了混凝土内的毛细孔;但对第二种方法目前的研究并不统一。陈德玉和谭克锋^[21]研究了长度为5~15mm聚合物微纤维的抗渗性能,均匀分布在混凝土中的大量纤维起到了

“分流和筛滤”的作用,降低了混凝土表面的析水,阻碍了集料的离析,从而使混凝土中直径为 50~100nm 的孔隙含量大大降低,可以极大地提高抗渗能力,朱缨^[22]也有类似的结论,而且随着微纤维掺量增加,抗渗性能增加,当微纤维掺量为 0.9kg/m³ 时,混凝土抗渗标号超过 P12。

也有研究表明:加入纤维后增加了混凝土内部的界面,从而导致混凝土的孔隙率提高,抗渗性能下降的说法^[23]。孙家瑛^[24]的研究表明,纤维混凝土的抗碳化能力和抗气体渗透能力均比普通基准混凝土差,但当粗细两种纤维掺量相当时,混凝土抗碳化能力较之掺加单种纤维优越;网状聚丙烯纤维同样降低了混凝土的抗渗性能。然而,戴建国等^[25]对网状聚丙烯纤维混凝土的抗渗性能研究与此结论相反,掺加 0.05% 和 0.1% 的纤维混凝土抗渗能力分别比素混凝土提高了 40% 和 48%,掺加 0.3% 的纤维混凝土抗渗能力提高较少(仅 8%)。

贡金鑫和郭育霞^[22]的研究表明:高性能混凝土中掺加 PP 纤维影响了混凝土的密实性,使混凝土的吸水率和渗水高度有所增加,渗透性增强;但电通量减小,氯离子渗透变化不大。

对于钢纤维对混凝土抗渗性能的影响,黄承逵在《纤维混凝土结构》^[26]一书中提到 Mangat 等的海潮区和试验室喷洒试验表明:钢纤维混凝土和普通混凝土氯离子扩散速率相同,即钢纤维对未开裂混凝土的抗渗性能基本没有影响。Schupack 也认为,钢纤维混凝土的抗渗性能不会低于其混凝土基材(除非构件厚度小于 20mm)。

华渊等^[27]的研究表明:碳纤维与聚丙烯纤维、钢纤维与聚丙烯纤维混杂增强混凝土均可改善混凝土的抗渗性能,而且随纤维掺量的增加抗渗性能有提高的趋势。其原因在于,加入纤维后增加了硬化混凝土内部孔隙、空隙的曲折性,使压力水贯通整个混凝土试件截面所需的压力增加,同时使石子底部留下水囊的可能性大大降低。

易成等的带裂纹试件渗透试验表明,渗透流量与裂缝宽度之间不服从立方定律,掺入纤维后混凝土的裂缝扩展方式更有利于混凝土抗渗。此外,低掺率丙纶纤维也有助于大幅度提高混凝土的抗渗性能^[28]。

Lawler^[29]等在 2005 年发表了混杂纤维混凝土的弯曲韧性试验、约束收缩试验和抗渗试验结果,并结合电镜试验和试件断面结果分析了混杂纤维的增强机理,表明短纤维可以提高混凝土的初裂强度和小挠度范围内的承载能力。由于粗骨料的加入会降低胶凝材料比例,导致混凝土内界面区增多,使得新拌混凝土工作度降低,从而影响纤维分布和硬化混凝土的性能,所以粗骨料将影响纤维阻裂效果的发挥。砂浆或混凝土出现第一条宏观裂缝时的承载力随短纤维的增加而增加;但在大位移时砂浆的峰后承载力依然增加,而混凝土的峰后承载力则在 0.5mm 后明显下降。钢-PVA 混杂纤维在小挠度范围内的韧性优于单掺长钢纤维,但在整个

挠度范围内,长纤维桥接宏观裂缝和增韧效果比较明显。试件破坏面表明,单掺长纤维时只有拔出破坏,而与短纤维混杂后则出现长纤维的拉断破坏。Lawler 等认为这是由于短纤维能够增强基体,增加基体与长纤维之间的黏结,从而导致纤维被拉断,所以短纤维能够提高长纤维的增韧抗渗效果。

钱红萍等^[30]选用不同尺度的钢纤维、高弹性模量维纶纤维、低弹性模量聚丙烯纤维,按二元或三元混杂增强水泥基复合材料,系统研究了其限缩与抗渗性能并提出相应的机理。实验发现,混杂纤维有效提高了混凝土阻裂和限缩能力,明显改善混凝土的抗渗性能。他们认为不同尺度与不同性能的纤维能在相应结构层次上逐级阻裂和性能互补,纤维的混杂效应与孔结构密切相关,以合适的混杂比进行纤维混杂对孔结构有更好的改善效果。

孙伟等^[5]研究了加入膨胀剂和混杂增强纤维(钢纤维、聚丙烯纤维)高性能混凝土的抗渗性。通过实验发现,纤维的类型和尺寸在不同程度上减少了裂纹的数量和大小。混杂纤维和膨胀剂的联合使用对提高混凝土抗渗性的效果要比单独使用二者好。如果把直径大于等于 50nm 的孔隙称作有害孔,而小于 50nm 的孔隙称作无害孔,混杂增强纤维会增加无害孔的比例降低有害孔的比例,从而提高混凝土的抗渗性。

孙伟等^[31]在文献中对钢纤维、合成纤维以及膨胀剂在混凝土硬化过程中对收缩开裂的影响进行了研究。结果证实:碳纤维与膨胀剂混合增强混凝土,碳纤维能够对膨胀产生很大的内部限制,使得混凝土更加致密,混合增强的方式能够取得很好的抑制硬化期间收缩裂纹的效果,从而极大地改进抗渗性能。

美国圣荷西州立大学比较透水性试验的结果表明^[32],加入标准量的纤维可减少混凝土 79% 的渗水,从而防止和延缓了渗水、潮湿气体等有害介质对混凝土的侵蚀和受力钢筋的锈蚀,延长了建筑物的寿命。Reinhardt 等^[33]通过试验发现,裂纹宽度越大,温度对混凝土渗流量的影响就会越明显,这表示在相同温度的条件下,裂纹的存在会直接影响混凝土的抗渗性能。

我国测量混凝土渗透性的标准方法是透水法,其理论基础是 Daray 定律。该方法又可分为抗渗标号法、渗透系数法、渗水高度法。李佩珍等^[34]介绍了 RCT 氯离子渗透检测方法,该法是根据纯净的氯离子溶液所产生的电位差与其浓度成正比的关系得到的。文献[35]采用交流阻抗谱方法研究粉煤灰混凝土的渗透性和氯离子扩散性。文献[36]应用 Nernst-Einstein 方程中带电粒子的扩散系数与混凝土电导率的关系,来确定氯离子的扩散系数,建立了饱盐电导率法。该法获得的电导与 ASTM C1202 电量法测得的结果相关性很好,而且该法操作快速、准确、简便、可靠,具有很好的应用前景。

1.1.4 温度作用下纤维混凝土研究现状

加入钢纤维可改善混凝土的导热性能,使得钢纤维混凝土结构内的温度梯度