

## 聚丙烯纤维混凝土的研究现状与趋势

汪 洋<sup>1</sup>, 杨鼎宜<sup>1,2</sup>, 周明耀<sup>1,3</sup>

(1. 扬州大学水利与建筑工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 东南大学, 江苏 南京 210096;

3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**[摘要]** 聚丙烯纤维以其极好的化学稳定性和优良的技术经济性能, 在水泥基复合材料中得到日益广泛的应用。本文阐述了聚丙烯纤维混凝土的特点和主要性能, 并对国内外聚丙烯纤维混凝土的研究与应用现状进行了综述, 最后展望了聚丙烯纤维混凝土在渠道防渗工程中的应用前景。

**[关键词]** 聚丙烯纤维; 混凝土; 收缩裂缝; 渠道防渗

**[中图分类号]** TU528.572 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3550(2004)01-0024-03

## The present research condition and trend of polypropylene fiber concrete

WANG Yang<sup>1</sup>, YANG Ding-yi<sup>1,2</sup>, ZHOU Ming-yao<sup>1,3</sup>

(1. Hydraulic and Civil Engineering College of Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009, China;

2. Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China; 3. Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** For its wonderful chemistry stability and excellent economic and technical capability, Polypropylene fiber has an extensive application in cement-base composite. In this paper, the characteristic and main capability of the polypropylene fiber concrete are expounded, and the present research condition and application of the polypropylene fiber concrete in domestic and overseas research are summarized. Finally the application of polypropylene fiber concrete in canal seepage prevention is prospected.

**Key words:** polypropylene fiber; concrete; shrinkage cracks; canal seepage prevention

## 1 前言

纤维在提高混凝土性能方面扮演着日益重要的角色<sup>[1]</sup>。聚丙烯纤维混凝土是一种掺入少量短切聚丙烯纤维来增强或改善混凝土某些性能的复合材料。大量的室内试验和工程实践证明, 聚丙烯纤维混凝土具有抑制塑性收缩裂缝、抗冲击和弯曲疲劳性能较好、抗松散性较好、剩余强度较高、抗渗性较好、抗拉及抗折弯强度有所增加、耐气候老化、抗冻融性较好等优点。利用这些优点, 聚丙烯纤维混凝土在高层建筑的地下室、污水处理厂的污水池、港区路面、高速公路路面、码头货物料场以及地下洞室、护坡等工程中得到了广泛的应用, 并收到了良好的效果。本文阐述了聚丙烯纤维混凝土的特点和主要性能, 并对国内外聚丙烯纤维混凝土的研究与应用现状进行了综述, 最后展望了聚丙烯纤维混凝土在渠道防渗工程中的应用前景。

## 2 聚丙烯纤维混凝土的研究与应用现状

国外对聚丙烯纤维混凝土的研究, 开始于20世纪60年代。1975年, 在国际材料与结构实验室联合会论文集《纤维增强水泥与混凝土》上, 对有关聚丙烯纤维混凝土的各项性能、计算方法、施工技术等均有较全面的论述<sup>[2]</sup>。20世纪80年代初期, 为解决军用混凝土工事在受炮火攻击后的抗碎问题和军事工程的耐久性问题, 美国军队工程师的混凝土专家与美国最大

的化工产品企业——合成工业公司聚丙烯材料专家共同研制出用于混凝土增强的聚丙烯纤维<sup>[1]</sup>, 并已大量应用于机场跑道、高层建筑地下室等工程中。美国最大的丹佛机场(总面积超过53平方英里, 设计年客流量1.1亿人次), 其机场跑道、停机坪、地下传输通道等, 都采用了掺加聚丙烯纤维网的混凝土, 效果良好, 路面没有出现龟裂和断裂现象<sup>[18]</sup>。墨西哥市高级购物中心, 是1989年墨西哥最大的建筑项目, 为了提高建筑物的抗地震破坏能力, 全部混凝土结构中(包括板、梁、柱)都掺入了纤维网<sup>[18]</sup>。国内关于聚丙烯纤维混凝土的研究起步较晚, 而且是随着国外聚丙烯纤维在国内重大建设项目中的大规模应用开始的, 目前的研究主要集中于聚丙烯纤维混凝土的物理和力学性能<sup>[3]</sup>。20世纪90年代, 中国纺织大学开始进行改性聚丙烯纤维的研制。2001年, 吉林水利实业公司在吉林省梅河口市进行的渠道防渗护砌试验工程, 则是在全国水利工程中较早采用了改性聚丙烯纤维混凝土的应用实例<sup>[2]</sup>。浙江省宁波市将聚丙烯纤维混凝土用于水库大坝面板、溢洪道进水渠底防护工程。该工程于2001年4月通过了国家验收, 其中改性聚丙烯纤维混凝土面板达到了国际领先水平<sup>[6]</sup>。

## 3 聚丙烯纤维及聚丙烯纤维混凝土

## 3.1 聚丙烯纤维的物理性能

聚丙烯纤维白色, 半透明, 呈网状或束状单丝结构(如图1), 在混凝土中搅拌时分散成丝状。纤维的材料性能见表1。

**[收稿日期]** 2003-10-20

**[基金项目]** 水利部水利科技开发基金项目(97053); 江苏省水利科技重点项目(2002100)



图1 网状聚丙烯纤维

表1 聚丙烯纤维的物理性能<sup>[20,21]</sup>

项目	特征参数	项目	特征参数
密度	0.9	纤维长度	16mm~19mm
吸水率	0	弹性模量/MPa	3500
抗拉强度/MPa	350~770	耐酸碱性	很好
熔点/℃	162	分散性	良好
燃点/℃	590	安全性(对人体)	良好

### 3.2 聚丙烯纤维混凝土的性能

聚丙烯纤维是一种新型的混凝土增强纤维,被称为混凝土的“次要增强筋”(即不代替受力钢筋)<sup>[8]</sup>,对混凝土的性能产生如下影响:

#### 3.2.1 抑制了塑性收缩裂缝,提高了混凝土的连续性和稳定性

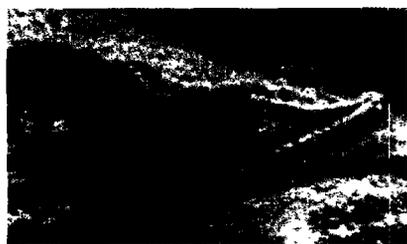


图2 硬化混凝土中聚丙烯纤维的 ESEM 图片

#### 3.2.2 提高了混凝土的抗渗性

由于聚丙烯纤维抑制了混凝土的塑性收缩,克服了原生裂缝的产生与发展,因而聚丙烯纤维混凝土抗渗性得到了提高。有研究表明,掺量为  $1.18\text{kg}/\text{m}^3$  聚丙烯纤维混凝土比普通混凝土可减少 79% 的渗水。聚丙烯纤维钢筋混凝土在模拟海洋环境下进行的渗透试验表明<sup>[14]</sup>,纤维掺量为 0.05% 和 0.1% 混凝土中的钢筋比普通混凝土中的钢筋分别迟 9 天和 11 天锈蚀。在南京水利科学研究院进行的抗渗试验表明,掺聚丙烯纤维混凝土的水灰比虽比普通混凝土大,但最终加压到 2.1MPa 时,其渗水高度比普通混凝土减少 16%~49%,可见其抗渗能力优于普通混凝土<sup>[10]</sup>。这些试验都说明少量短切聚丙烯纤维加入混凝土后可增加混凝土的致密性,有效的防止和延缓了渗水、潮湿气体和氯化物有害物质对混凝土的侵蚀和受力钢筋的锈蚀,从而提高了建筑物的耐久性。

#### 3.2.3 改善了混凝土的强度和冲击韧性

有研究表明<sup>[11-13]</sup>,掺加聚丙烯纤维可以显著改善混凝土的抗冲击特性。李光伟等用落锤法测试聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能<sup>[11]</sup>,结果表明,混凝土中掺  $1.0\text{kg}/\text{m}^3$  聚丙烯纤维,抗冲击强度可提高 31%~37%;砂浆中掺  $0.6\text{kg}/\text{m}^3$  聚丙烯纤维,抗冲击强度可提高 41%,究其原因是由于纤维有着较大的吸收能量的能力。天津市市政工程研究院曹诚的研究同样表

李光伟研究表明<sup>[7]</sup>,与普通混凝土相比,掺加  $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  纤维时,收缩变形分别减少 7%、11%、18%。同济大学混凝土材料研究国家重点实验室的测试表明<sup>[8]</sup>,聚丙烯纤维掺量为 0.05% 和 0.15% 的砂浆干缩裂缝加权宽度分别为对照试样的 63.5% 和 37.3%。此外,加入聚丙烯纤维还能延缓混凝土第一条裂缝的产生;混凝土中掺有 0.1% (体积分数) 的聚丙烯纤维时,收缩裂缝面积和最大缝宽均可降低 40% 左右,对砂浆裂缝面积的控制效果更好,纤维体积掺量为 0.1% 时,早期塑性收缩裂缝面积可降低 45% 左右<sup>[9]</sup>。大量的工程实践也都证明,聚丙烯纤维的使用对减少混凝土塑性收缩和防止开裂作用十分明显。对聚丙烯纤维减少收缩裂缝的机理一般认为是由于短切乱向分布的聚丙烯纤维的存在,起到了象筛子一样的作用,抑制了混凝土的颗粒下沉,从而减少了混凝土中水溢出而形成的毛细通道,减少了泌水现象。

网状聚丙烯纤维经搅拌后自动分散成两头带钩形的单丝型纤维,图 2 为纤维体积含量 0.1% 时,硬化混凝土中纤维的分布形态。从图中可以看出:纤维端部呈弯钩形,好像“钢筋”加了弯钩一样,增加了与混凝土的粘结力。这种分布形态是由纤维的体积掺量和直径决定的,体积掺量超过 0.2% 以上时,纤维容易发生成团现象,不易搅拌均匀;纤维直径太大则不易弯曲,直径太小则自身容易弯曲成团,不易分散。

明聚丙烯纤维能有效提高混凝土的冲击韧性<sup>[13]</sup>,以混凝土的冲击韧性  $W$  为指标评价可见,掺入 0.1%~0.2% 的聚丙烯纤维能使混凝土的抗冲击能力提高 5 倍以上。聚丙烯纤维体积掺量为 0.1% 和 0.2% 时,能使混凝土初裂后继续吸收冲击能量的能力  $\Delta W$  分别提高 2.62 和 3.83 倍,说明聚丙烯纤维混凝土较普通混凝土具有比较好的延性。

表征混凝土韧性的另一性能是抗破碎性。图 3、图 4 分别为素混凝土和聚丙烯纤维混凝土在抗压试验中达到最大荷载时的破坏示意图。从图 3、图 4 中可以看出,素混凝土由于环箍效应,加压至最大荷载后四周混凝土破碎剥落,试块呈棱锥体状;而纤维混凝土由于大量的聚丙烯纤维(每立方米大约千万根的数量级<sup>[8]</sup>)随机分布于混凝土中,使混凝土的变形性能

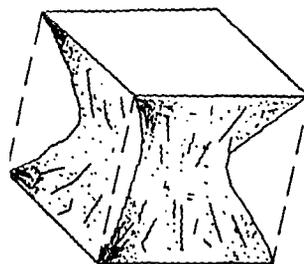


图3 素混凝土抗压试验破坏示意图

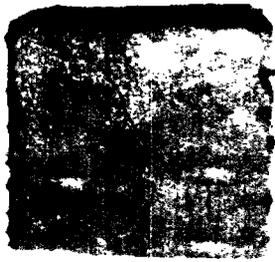


图4 纤维混凝土抗压试验破坏示意图

有显著提高,在达到最大荷载后仍不破碎,这对地震破坏的建筑物中人员和财产安全有很大意义。

#### 3.2.4 提高了混凝土的抗冲磨性能

在混凝土中掺入一定量的聚丙烯纤维可以提高混凝土的抗冲磨强度。掺 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维时,混凝土的抗冲磨强度可提高 $37\% \sim 40\%$ <sup>[11]</sup>。孙家瑛等试验发现<sup>[12]</sup>,纤维体积掺量为 $0.1\%$ 、 $0.2\%$ 时,混凝土的耐磨性能较对照试样分别提高了 $20\%$ 、 $25\%$ ,并且当纤维掺量一定时,纤维混凝土的模坑宽度随磨细矿渣粉掺量的增加而减小。Mindess等研究表明<sup>[15]</sup>,当聚丙烯纤维掺量为 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,与水泥用量相同的普通高强混凝土相比,抗冲磨强度分别提高了 $33\%$ 、 $49\%$ 和 $58\%$ 。许多工程实践也证明,聚丙烯纤维混凝土有较好的抗磨损性能。

#### 3.2.5 提高了混凝土的抗冻融性能

混凝土的抗冻融性能是耐久性的表征,也是寒冷地区混凝土所必须的性能要求。有研究表明,掺少量短切聚丙烯纤维的混凝土按混凝土抗冻试验法,经25次反复冻融,无分层与龟裂等现象发生。董建伟等报道<sup>[16]</sup>掺入少量聚丙烯纤维的混凝土,经反复冻融100次后强度仍符合要求。究其原因,由于纤维在混凝土材料内部各方向上的随机均匀分布,对材料整体产生微加筋作用,缓解了温度变化而引起的混凝土内部应力的作用,阻止了温度裂缝的扩展;同时,聚丙烯纤维混凝土抗渗能力的提高也有利于其抗冻能力的提高。

#### 3.2.6 改善了混凝土的弯曲疲劳性能

聚丙烯纤维混凝土的抗压强度与素混凝土相当,但能在一定程度上提高弯曲强度,提高的程度与纤维掺量有关。陈栓发采用美国MTS(850型)电液伺服疲劳试验机进行聚丙烯纤维混凝土弯曲疲劳性能试验,按三分点法对试件加荷<sup>[17]</sup>。试验结果表明,聚丙烯纤维混凝土的应力与疲劳寿命间的关系和普通混凝土相似:

$$\sigma/s = \alpha - \beta \lg N_i, \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——疲劳强度,MPa;

$s$ ——静载一次作用下的极限弯拉应力,MPa;

$\alpha, \beta$ ——回归参数,由试验条件、加载方式及材料特性等因素决定;

$N_i$ ——疲劳破坏次数。

纤维掺量 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 时,回归参数 $\alpha, \beta$ 分别较普通混凝土提高了 $8.34\%$ 、 $18.94\%$ ,这说明掺加聚丙烯纤维在一定程度上改善了混凝土的弯曲疲劳性能<sup>[17]</sup>。

聚丙烯纤维混凝土的其他性能,如:由于聚丙烯纤维有一定的化学惰性,在酸性、碱性环境下几乎不发生变化,从而提高了混凝土在海水环境下的耐腐蚀性;由于聚丙烯纤维熔点较高( $162^\circ\text{C}$ 左右),在发生火灾高温时能熔化形成气体通道,从而能

有效的防止高强度混凝土的爆炸,因此有学者提出,聚丙烯纤维混凝土可作为高层建筑防火混凝土。

## 4 聚丙烯纤维混凝土的生产工艺

在混凝土中掺入聚丙烯纤维的施工方法与常规混凝土的施工方法基本相同,无需改变原设计混凝土的配比,也不取代原设计的受力钢筋。一般情况下聚丙烯纤维的掺量为 $0.6\text{kg}/\text{m}^3 \sim 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,纤维长度为 $15\text{mm} \sim 19\text{mm}$ 。

确立正确的搅拌制度对改善纤维混凝土的性能有很大作用。一般说来,投料顺序、搅拌时间、搅拌机类型及纤维形状和数量对混凝土搅拌质量都有影响<sup>[11]</sup>。戴建国等人研究<sup>[20]</sup>认为少量聚丙烯纤维网加入混凝土,为防止纤维分布不均、避免引起纤维成团现象,不适宜采用人工搅拌。聚丙烯纤维常用的掺加工工艺有干拌法和湿拌法。干拌法即先将纤维和砂、石、水泥一起搅拌均匀后,再加水一起搅拌成混凝土;湿拌法即将砂、石和水泥搅拌均匀后,再加入纤维和水一起搅拌成混凝土。卢安琪等报道<sup>[10]</sup>,在其他条件都相同的情况下,干拌法掺加工工艺有利于纤维在混凝土中均匀分散,其28d的混凝土抗压强度较湿拌法掺加工工艺的混凝土提高了 $10\%$ 左右。

## 5 应用前景及展望

渠道防渗工程技术,是节水灌溉各个环节中的重要一环。目前,我国已建渠道防渗工程55万多千米,仅占渠道总长的 $18\%$ , $80\%$ 以上的渠道没有防渗<sup>[23]</sup>。因此,农村水利中渠道防渗工程还有很长的路要走。以往采用的普通混凝土常常会出现不同程度的裂缝,裂缝的产生不仅加大了渠道的渗漏损失,降低了工程效益,而且使混凝土的耐久性降低,从而影响工程的使用寿命。少量短切聚丙烯纤维加入混凝土后可明显提高混凝土的抗拉强度、抗渗和抗冻性能,从而提高了工程效益和使用寿命,其经济效益显著。所以聚丙烯纤维混凝土在渠道防渗中具有非常好的推广应用前景,对加速我国节水农业的建设速度意义重大。

我国在改性聚丙烯纤维和聚丙烯纤维混凝土的应用研究领域起步较晚,所完成的研究主要集中于聚丙烯纤维混凝土的物理和力学性能,而理论研究还不够深入和系统。因此仍将有大量的研究和开发工作亟待展开。

### 【参考文献】

- [1]盛黎明,邓运清.混凝土聚丙烯纤维的发展与应用[J].桥梁,2002,(6):24-25.
- [2]董建伟,张国东,张宏雷.水利工程中改性聚丙烯纤维混凝土的研究应用[J].吉林水利,2001,(9):1-7.
- [3]阎利,万朝均,王绍东.聚丙烯纤维增强混凝土概述[J].化学建材,2003,(1):52-55.
- [4]朱江.聚丙烯纤维混凝土的防水性能及其应用[J].防水材料施工,2002,(2):38-39.
- [5]张希瞬,吴宗峰,张庆功,等.超长建筑应用聚丙烯纤维混凝土施工技术[J].山东建筑工程学院学报,2000,(3):88-91.
- [6]周明耀,杨鼎宜,汪洋.合成纤维混凝土材料的发展与应用.水利与建筑工程学报(已录用,待发表).
- [7]李光伟.聚丙烯纤维对混凝土抗裂性能的影响[J].水电站设计,2002,(6):98-100.
- [8]钟秉章,朱强,倪建华.聚丙烯纤维混凝土在水利水电工程上的应用探讨[J].红水河,2002,(4):38-42.

· 下转第31页 ·

此锈蚀速度,混凝土从钝化膜破坏后到出现顺筋裂缝只需要3~4个月。因此可参照此条件制定人工加速试验的标准条件。

#### 4 自然气候环境中长期试验数据的获得

自然环境中长期试验的结果是建立人工加速退化试验和自然气候相关性的关键之一,但目前长期试验的数据并不太多,这主要是因为长期试验需要花费大量的人力物力,就某个单位或个人来讲进行全国范围内大量的长期试验是不现实的,但可针对某一地区的某一类混凝土进行专门的试验;同时还可以通过以下途径获得构件自然环境中长期使用寿命的数据:

(1)实际使用中出現混凝土耐久性失效的构件,收集构件施工时的资料并进行实际组成成分的测量,结合当地的气候条件得出该类构件的长期使用寿命。

(2)根据数年的试验数据,利用时间序列分析、生存分析等数理统计工具预测构件在自然气候环境中的长期使用寿命。

#### 5 结语

对于钢筋混凝土的耐久性试验应首推自然气候环境下的真实试验。但是,为了缩短试验的时间、提高试验效率,人工气候加速退化试验有时也是必须的。这二种试验方法之间存在一定的相关性,但是这种相关性就目前来讲还不能简单合一的定量关系式来表达。人工气候加速退化试验应进一步探索对自然气候的模拟程度、可靠性及随机性。

在相同的耐久性失效准则下,通过人工气候加速退化试验和自然气候长期试验结果的对比可以定性的探讨它们之间的相关关系。标准人工加速退化试验条件的建立更有利于人工加速试验结果在工程中的应用。自然环境中长期试验的结果是建立人工加速退化试验和自然气候相关性的关键之一,它是制订人工加速退化试验方法和推断长期使用寿命的依据,应在国家有关部门的组织下在全国范围内建立长期试验的可靠数据库。

·上接第26页·

- [9]戴建国,刘明,黄承逵.聚丙烯纤维混凝土和砂浆的塑性收缩试验研究[J].沈阳建筑工程学院学报,2000,16(3):195-198.
- [10]卢安琪,祝烨然,李克亮,等.聚丙烯纤维混凝土试验研究[J].水利水电工程学报,2002,(12):14-19.
- [11]李光伟,杨元慧.聚丙烯纤维混凝土性能的试验研究[J].水利水电科技进展,2001,21(5):14-16.
- [12]孙家瑛,魏涛,王学文.聚丙烯纤维对混凝土路用性能的影响[J].混凝土,2001,(6):57-59.
- [13]曹诚,刘家彬.聚丙烯纤维对混凝土动力学特性的影响研究[J].混凝土,2000,(5):43-45.
- [14]Rongxi Shen etc, Crack-arresting Effect of Polypropylene Monofilament Fibre at Small Dosage in Concrete, Proceedings of the international Conference on Fiber Reinforced Concrete[C]. Edited by shien Li etc. Guangzhou, 1997:36-55.
- [15]Chen L, Mindess S, Morgan D R, et al. Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete[A]. Stevens D J, et al. Testing of Fiber Reinforced Concrete[C]. ACI, 1995, 41-75.
- [16]董建伟,王广宇,裴宇波.改性聚丙烯纤维混凝土及其应用[J].吉林水利,2000,(9):7-10.
- [17]陈拴发.聚丙烯纤维混凝土弯曲疲劳性能[J].西安公路交通大学学报. 2001,(2):18-20.
- [18]http://www.bestfc.com.cn/jbxyy.htm.

#### [参考文献]

- [1]John Sedgwich. Strong but sensitive[J]. The Atlantic Monthly, 1991, 73(4):70-82.
- [2]李果,戴靠山,袁迎曙.钢筋混凝土耐久性试验方法研究[J].淮海工学院学报,2002,11(3):56-59.
- [3]王清辉,龚章群.人工气候环境实验室[J].通信电源技术,1993,(4):6-11.
- [4]张令茂,江文辉.混凝土自然碳化及其与人工加速碳化相关性研究[J].西安冶金建筑学院学报,1990,22(3):207-214.
- [5]姬永生.人工气候混凝土耐久性模拟试验研究[D].徐州:中国矿业大学建工学院,2001.
- [6]王浚,黄本诚,万才大.环境模拟技术[M].北京:国防工业出版社,1996.
- [7]吴荫顺.金属腐蚀研究方法[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [8]吴中伟.水泥混凝土工作者面临的挑战与机会[J].混凝土与水泥制品,1996,(1):3-5.
- [9]王新友,李宗津.混凝土使用寿命预测的研究进展[J].建筑材料学报,1999,2(3):249-256.
- [10]B. M. 莫斯克文, M. 伊万诺夫,等.混凝土和钢筋混凝土的锈蚀及其防护方法[M].倪继森,何进源,等译.北京:化学工业出版社,1988.
- [11]Braun K. Prediction and evaluation of durability of reinforced concrete elements and structures [A]. in: Proceedings of 4th Conference on Durability of Building Material and Components, Singapore, 1987, 383-388.
- [12]惠云玲.混凝土结构钢筋锈蚀耐久性损伤评估及寿命预测方法[A]. in: 第四届全国混凝土耐久性学术交流会论文集, 1996, 56-63.
- [13]F. J. Molion, C. Alonso. Cover cracking as a function of bar corrosion; Part I Experimental test[J]. Materials and Structure, 1993, 26:532-548.
- [14]苗树柯.考虑钢筋腐蚀的钢筋混凝土结构耐久性分析[D].北京:清华大学土木工程系,1990.
- [15]蒋德稳.钢筋混凝土人工综合侵蚀效应的研究[D].徐州:中国矿业大学建工学院,2002.

[作者简介] 耿欧(1973-),男,讲师,博士,主要从事混凝土耐久性研究和教学工作。

[单位地址] 江苏省徐州市中国矿业大学建工学院(221008)

[联系电话] 0516-3884708

- [19]谷章昭,邓咏梅,樊钧,等.合成纤维混凝土的性能及其工程应用[J].建筑技术,2000,31(1):30-32.
- [20]戴建国,黄承逵.网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J].混凝土与水泥制品,1999,(4):35-37.
- [21]马华堂,管新建,李洪存,等.聚丙烯纤维混凝土的力学特性及路面工程[J].河南科学,2002,20(6):733-735.
- [22]朱江,苏建波,李士恩.聚丙烯纤维混凝土的力学性能[J].广西工学院学报,2000,11(2):30-64.
- [23]水利部农村水利司,等.渠道防渗工程技术[M].北京:中国水利水电出版社,1999:1-12.
- [24]苏晓薇,刘丽英.聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J].吉林水利,2002,(3):15-17.
- [25]李光伟.聚丙烯纤维对混凝土抗裂性能的影响[J].水电站设计,2002,18(2):98-101.
- [26]姚武,李杰,周钟鸣.聚丙烯纤维对混凝土抗拉强度的影响[J].混凝土,2001,(10):40-42.
- [27]吴富平,张恒,张晓辉.改性聚丙烯纤维混凝土在高寒地区工程中的应用[J].东北水利水电,2000,(8):8-10.

[作者简介] 汪洋(1982-),男,硕士研究生。

[单位地址] 江苏省扬州大学水利与建筑工程学院 50008 信箱(225009)

[联系电话] 0514-7979455; E-mail: myzhou@yzu.edu.cn