

文章编号:1004-9533(2004)06-0457-04

# 聚丙烯纤维性能及其在混凝土中的应用

傅和青<sup>1</sup>, 邹桂梅<sup>2</sup>, 张心亚<sup>1</sup>, 黄洪<sup>1</sup>, 陈焕钦<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学化工学院化工研究所, 广东 广州 510640;

2. 黄冈师范学院化学系, 湖北 黄冈 438000)

**摘要:**在混凝土中掺加聚丙烯纤维能有效地提高混凝土材料的抗裂性、抗冲击性、抗冻性能、改善混凝土的抗疲劳特性。分析了纤维改性混凝土机理。介绍了聚丙烯纤维在混凝土中的应用。指出了聚丙烯改性混凝土的发展趋势以及加强高性能、多功能以及复合聚丙烯纤维改性水泥土研究的重要性。

**关键词:**聚丙烯纤维;性能;机理;趋势

**中图分类号:** TU528.572 **文献标识码:** A

## Property of Polypropylene Fiber and Its Application in Cement

FU He-qing<sup>1</sup>, ZOU Gui-mei<sup>2</sup>, ZHANG Xin-ya<sup>1</sup>, HUANG Hong<sup>1</sup>, CHEN Huan-qin<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510640;

2. Department of Chemistry, Huanggang Normal College, Hubei Huanggang 438000, China)

**Abstract:** The properties of crack resistance, impact resistance, frost resistance and fatigue resistance of cement were improved by adding polypropylene fiber. Mechanism of fiber modifying cement were analyzed. The application of polypropylene fiber in cement was introduced and the development of polypropylene fiber cement was pointed out. Research on high capable, more functional and complex polypropylene fiber modifying cement was important.

**Key words:** polypropylene fiber; capability; mechanism; trend

聚丙烯纤维改性混凝土的研究,始于20世纪60年代。Hughes等<sup>[1]</sup>早在20世纪年代就研究了掺入原纤化的和单丝的聚丙烯纤维增强混凝土,认为掺入聚丙烯纤维后混凝土的增韧效果显著增强,到了1975年,对聚丙烯纤维混凝土的研究与应用理论达到一个发展阶段,之后合成纤维在改性混凝土中已发挥重要作用,特别是聚丙烯纤维以其成本低及改善混凝土性能的显著效果,受到工程界的关注。聚丙烯纤维改性混凝土是以水泥加颗粒基料为基体,在混凝土中掺入适量的聚丙烯纤维进行改性的

复合混凝土材料,聚丙烯纤维的加入,改善了混凝土的脆性和破坏性,减少混凝土塑性收缩裂缝,提高混凝土的韧性及抗冲击性能,明显改善混凝土的抗裂性能,已广泛应用于路面工程中,并取得良好的效果。

### 1 聚丙烯纤维对混凝土性能的改善

#### 1.1 改善水泥的抗裂性

聚丙烯等高分子材料制成一定规格的短纤维掺入水泥混凝土中,可改善建筑材料的防裂和增强性

收稿日期:2003-11-18

作者简介:傅和青(1968-),男(汉族),湖北英山人,博士,主要从事高分子材料等领域的研究。

联系人:傅和青,电话:(020)87110949, E-mail: fuhq2003@163.com。

能<sup>[2-4]</sup>。改性聚丙烯纤维的加入可提高水泥混凝土材料的抗裂纹强度,防止或阻止水泥固化过程中裂缝的形成和发展,从而减轻水泥混凝土中钢筋材料的锈蚀,延长水泥混凝土建筑的使用寿命。掺入聚丙烯纤维的混凝土可泵性好,坍落度损失小,混凝土表面质量光滑平整。掺入纤维后对混凝土抗压、抗折强度均有提高。而加入多孔 PP(聚丙烯)纤维效果最好,可使水泥抗压强度提高约 50%。王依民等<sup>[5]</sup>通过选择合适的纺丝条件可制得多  $\beta$  晶型的 PP 纤维,并可在合适的拉伸条件下使其晶型转变为  $\alpha$  晶型 PP 纤维,在纤维中留下微孔。多微孔 PP 纤维加入到水泥混凝土中,可有效地改善水泥早期干裂情况,提高混凝土的抗压、抗折强度。邢锋等<sup>[6]</sup>研究聚丙烯改性混凝土的抗裂性能发现聚丙烯纤维可以显著提高混凝土的抗裂性能,纤维掺量越高,抗裂能力越强,尽可能降低水泥用量和提高骨料含量可防止水泥裂缝。

### 1.2 改善 MDF 水泥耐水性能

MDF 水泥(Macro Defect Free Cement)是一种具有广阔应用前景的新型高性能材料,目前,MDF 水泥实际应用中存在的主要问题是体积稳定性差,耐水性不好,需对其改性。在 MDF 水泥中掺入 PP 纤维对其改性可提高其耐水性能<sup>[7]</sup>。因为 PP 纤维在 MDF 水泥材料中形成了能够限制材料体积变化和材料力学性能的网络结构,能够提高 MDF 水泥的抗弯强度和断裂韧性,还能大幅度地降低 MDF 水泥的抗弯强度和体积膨胀率,显著改善 MDF 水泥的耐水性能。MDF 水泥的体积膨胀率由 3.4% 降至 0.4%,抗弯强度下降率由 39% 降至 6%。

### 1.3 提高混凝土的抗冻性能

在混凝土中加入聚丙烯纤维,可以缓解温度变化而引起的混凝土内部应力的作用,阻止温度裂缝的扩展,按混凝土抗冻试验法,经多次反复冻融,无分层与龟裂等现象产生。实践及研究都表明,在混凝土中加入聚丙烯微纤维,可作为一种有效的混凝土温差补偿抗裂手段,从而提高混凝土的抗冻性能。

### 1.4 提高水泥的抗冲击性能

纤维增强混凝土能提高混凝土的抗冲击性能,使聚丙烯纤维对混凝土的增韧效果更加显著,更能提高混凝土的抗冲击性能。在一定范围内,纤维掺量增加,混凝土的抗冲击性能也增强。H. Toutanji 等<sup>[8]</sup>研究了加入聚丙烯纤维改性的增强硅灰混凝土的抗冲击性能,发现由于水泥体基体内聚力的增加,

加入硅灰石和聚丙烯纤维后,纤维在混凝土基体中得到有效分散,硅灰和聚丙烯纤维的混掺能显著提高混凝土的抗冲击性能。

### 1.5 提高混凝土的抗渗性能

通常情况下在混凝土中掺入聚丙烯纤维,可以有效地抑制混凝土早期开裂以及微裂纹进一步扩展,减少混凝土的收缩裂纹,能抑制贯通裂纹的产生,降低水泥的空隙率,提高密实度。Sun wen 等<sup>[9]</sup>研究聚丙烯纤维与刚纤维混掺发现不同种类和尺寸的纤维混掺,能减少裂纹源的尺寸和数量,发现掺入聚丙烯纤维以后能提高混凝土的抗渗透性能。不过 H. Toutanji<sup>[8]</sup> 等认为如果聚丙烯纤维与混凝土的粘接力不好,或者纤维的分散度不均匀就会使聚丙烯纤维混凝土的离子渗透量增大。

### 1.6 改善混凝土的抗疲劳特性

在混凝土中掺入聚丙烯纤维后,其静力弹性模量低于普通混凝土,当聚丙烯纤维掺率在  $0.05\% \leq \rho \leq 0.10\%$  范围时,纤维掺量的变化对静力弹性模量无太大的影响,但对疲劳变形模量则随着掺率增大而增大。表明对动力荷载作用下的结构,聚丙烯纤维能发挥更大的效果。弹性模量低、抗疲劳强度高的聚丙烯纤维改善混凝土的抗疲劳特性效果更好。

## 2 纤维改性混凝土机理<sup>[10]</sup>

### 2.1 多缝开裂理论

该理论认为:乱向分布的纤维与混凝土复合后,复合基体开裂后的性能,主要取决于纤维的体积率  $V_f$  与临界体积率  $V_{cr}$  之间的关系,当  $V_f > V_{cr}$  时,纤维将承担全部荷载,并有可能产生多缝开裂状态,改变了混凝土材料的单缝开裂、断裂性能低的状况,并出现假延性材料的特征。在多缝开裂时,裂缝间距变小,数量增多,裂纹更细,用肉眼不能看见。同时聚丙烯纤维产生乱向分布,削弱混凝土的塑性收缩,收缩的能量被分散到无数的纤维丝上,从而有效地增强混凝土的韧性,减少混凝土初凝时收缩引起的裂纹和裂缝,同时,无数的纤维丝在混凝土内部形成的乱向撑托体系,从而阻碍了沉降裂纹的形成复合材料的韧性,改变了应力—应变状态,提高了耐久性。

### 2.2 纤维间距理论

论该理论认为在混凝土内部存在着不同尺度及不同形状的孔缝、微裂纹和缺陷,当受到外力作用时,这些部位将产生应力集中,引起裂纹扩展,导致

混凝土结构的过早破坏。为减少这种破坏程度,应尽量减少裂缝源的尺度和数量,缓和裂缝尖端应力集中程度,抑制裂缝延伸。在混凝土中掺入一定体积率的纤维后,在受拉时,跨过裂缝的纤维将荷载传递给裂缝的上下表面,使裂缝处的材料仍能继续承载,缓和了应力集中程度,随着纤维数量的增加,纤维间距的减小并密布于裂缝周围,使应力集中就会逐渐减少和消失。

### 2.3 复合力学理论

该理论是基于线弹性、匀质顺向配置连续纤维混凝土复合材料而提出的,在混凝土中掺入聚丙烯纤维后,纤维不仅能够转移荷载,还能与基体界面粘合,当沿纤维方向承受拉力时,外力通过基体传递给纤维,使纤维混凝土复合材料的抗拉强度和弹性模量有所增加,其静力弹性模量低于普通混凝土,当聚丙烯纤维掺率达到一定范围时,纤维掺量的变化对静力弹性模量没有太大的影响,但对疲劳变形模量产生影响,使聚丙烯纤维混凝土抗疲劳强度提高,从而改善了混凝土的性能。

### 2.4 二次微加筋系统理论

该理论认为聚丙烯纤维与水泥基料有极强的结合力,纤维为混凝土提供了有效的二次微加筋系统,使聚丙烯纤维易与混凝土材料混合,分布均匀,同时由于细微,故比面积大,有效地抑制了混凝土因干缩、外力等作用所产生的微小裂缝,增强了混凝土的强度,延长了混凝土的使用寿命。

### 2.5 力学性能改变理论

该理论认为在水泥基材料中掺入 PP 纤维后,表层材料由于存在纤维材料,其失水面积有所减小,水分迁移较为困难,从而使毛细管张力有所减小;另一方面,低弹性模量的有机纤维相对于塑料浆体成了高弹性模量的材料,依靠纤维与水泥之间的界面吸附粘结力、齿合力等,增加了材料抵抗开裂的塑性抗拉强度,从而使应力  $\sigma_c \leq f_p$  (塑性抗拉强度),于是减轻了材料表层的开裂现象,甚至消失。

## 3 聚丙烯纤维在混凝土中的应用

### 3.1 聚丙烯纤维在改善混凝土性能方面的应用

掺加化学短纤维的水泥混凝土或水泥砂浆,在纤维掺量约为  $0.9 \text{ kg/m}^2$  时即可有效防止混凝土产生早期不均匀收缩裂缝,保证了各种连续无缝防水混凝土的抗渗质量<sup>[11]</sup>。将聚丙烯短纤维经过特殊

配方和生产工艺加工成的改性聚丙烯纤维混凝土是一种新型建筑材料,聚丙烯纤维对混凝土龟裂程度的控制结果比普通混凝土高出  $90\% \sim 100\%$ ,纤维的约束作用,大于温度变形与其它应力引起的裂缝发展,并且增强了混凝土的抗冲击能力与柔韧性<sup>[12]</sup>。纤维的微加筋作用改善了混凝土材料的整体性能,增强了抗裂、抗折、抗渗和抗冲击性能。在纤维混凝土添加适量的防水外加剂(如微膨胀剂及密实剂)可组成性能良好的聚丙烯纤维防水混凝土或防水砂浆,抗渗性能的增强有力地防止和延缓了渗水、潮湿气体和有害介质对混凝土的侵蚀及对钢筋的锈蚀,有利于保证超长结构的质量,从而进一步延长了建筑物的寿命。该材料应用于防渗修补工程和渠道防渗工程,效果很好。

### 3.2 聚丙烯纤维改性的混凝土在防渗工程中的应用

1) 沉箱板墙渗漏处修补:黑龙江省大庆采油厂松花江供水泵房的沉箱板墙,在 1998 年漏水和渗水,沉箱板墙渗漏处采用改性纤维防水砂浆漏水点处理和防渗处理以后,防水层与基底结合牢固,表面无干缩裂纹,抗渗效果优于普通防水砂浆,达到不漏不渗与平整美观的效果。

2) 纤维混凝土复合膜在梯形渠道上的应用:复合土工膜加现浇改性纤维混凝土板做防渗结构取得了很好效果。改性聚丙烯纤维掺量为  $1 \text{ kg/m}^3$ ,复合膜上现浇纤维混凝土厚度为  $3 \sim 5 \text{ cm}$ 。施工后改善了抗裂、抗冲击强度等性能指标。复合膜上短纤维能与纤维混凝土板粘接在一起,共同形成抗冻胀变形的防渗体,有效的起到保护防渗层作用,达到防止渗漏,保证渠道长期安全运行目的。聚丙烯纤维改性的混凝土是高寒地区较理想的渠道防渗材料<sup>[13]</sup>。

### 3.3 聚丙烯纤维改性的混凝土在其它方面的应用

聚丙烯纤维在国外已得到广泛应用。国外对聚丙烯混凝土的研究,始于 20 世纪 60 年代,到 1975 年,对聚丙烯纤维混凝土的研究与应用理论达到一个相对成熟阶段。在美国的高层建筑楼面、高速公路路面、载荷较大的仓库地面、停车场等结构中已得到广泛应用。在北美和欧洲,聚丙烯纤维增强混凝土已在高速公路扶栏、路面、机场、铁路枕木、桥梁桩基、高楼建筑、广场地面、码头、网球场、地下建筑、蓄水池、水库、水坝、河流建筑中等得到应用,海底输油管通常涂上纤维改性的增强水泥涂层,在防海水腐蚀的同时还可提高海底输油管道的抗冲击能力。

我国于1992年开始聚丙烯纤维改性混凝土的研制,并开发出了改性聚丙烯纤维混凝土,已在上海、无锡、厦门、杭州等许多建筑工程中得到应用。目前,在高速公路、桥梁、水库、堤岸、高楼大厦、水泥预制构件、喷射硅、隔热保温水泥板、白水泥工艺品、水泥空心砌块、水泥砂浆打底、楼面板、道路、隧道、港口、水池、污物池、地下车库、外墙抹面等工程均有很多应用。硅或砂浆中掺入聚丙烯纤维改性的混凝土其防裂效果好,降低了工程造价,提高了工程耐久性。

## 4 发展趋势

1)高性能聚丙烯改性纤维混凝土:高性能聚丙烯改性纤维混凝土,是21世纪水泥基材料的发展方向之一。据专家预测21世纪初将是我国钢筋混凝土破坏高潮,每年所需维修费将高达数千亿元。而聚丙烯能改善水泥土的耐久性,使水泥土高性能化,效果显著。在建筑中将会具有广阔的发展前景。

2)特种功能聚丙烯改性纤维混凝土:未改性的混凝土防冻性较差。在混凝土中加入聚丙烯纤维能改善混凝土的抗冻性能,从而使其应用范围扩大,可使其在冬天尤其是北方得到广泛应用。致密的混凝土使得建筑物的水蒸气和热量无法排除,一旦建筑物发生火灾就会引起建筑物构件强度降低,严重会引起建筑物的倒塌。在高性能水泥土中掺入聚丙烯纤维对其改性,当温度超过聚丙烯熔点时,混凝土内部的聚丙烯挥发逸出,并在混凝土中留下了纤维所占体积的孔道,均匀分布在构件中有利于水蒸气的排出和热量的散失,改善了混凝土的耐火性。聚丙烯纤维改性防火混凝土在重要工程、纪念性建筑中有广阔的应用前景。

3)复合聚丙烯纤维改性混凝土:复合材料综合了多种材料的性能,使其性能比单一性能大大提高。在混凝土中加入复合聚丙烯纤维其各种性能大大提高。如在混凝土中加入聚丙烯纤维和硅灰石,由于水泥体基体内聚力的增加,加入了硅灰石和聚丙烯纤维后,纤维在混凝土基体中得到有效分散,硅灰和聚丙烯纤维的混掺能显著提高混凝土的抗冲击性能。复合聚丙烯纤维改性混凝土将会受到许多学者的重视。

裂性、MDF水泥耐水性能和混凝土的抗疲劳特性;提高了混凝土的抗冻性能、抗冲击性能和抗渗性能,从而拓宽了混凝土的应用领域。为了进一步扩大混凝土应用领域,加强高性能、多功能以及复合聚丙烯纤维改性水泥土的研究尤为重要。聚丙烯纤维改性混凝土技术在21世纪将具有广阔的发展前景。

## 参考文献:

- [1] HUGHES B P, FATTUHI V I. Load - deflection curves for fiber - reinforced concrete beams in flexure[J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 29(10): 199 - 206.
- [2] BAUER D R A, MADSEN L O, NCUC. Polyolefin - Fasern in technischem textilien papieren und baustoffen[J]. Chemie Fasern Textilindustrie, 1991, 41(6): 189 - 191.
- [3] BAUER B. Compact shear test specimens for FRC materials [J]. Composites, 1987, 18(1): 54 - 60.
- [4] SHI Guan - yi, HUANG Bin, CAO You - hong. Studies on the  $\beta$  - form of isotactic polypropylene. 2. the melting behavior of predominantly  $\beta$  - form samples[J]. Macromol Chem, 1986, 87(1): 643 - 652.
- [5] 王依民,倪建华,潘湘庆. 混凝土防裂用改性聚丙烯纤维工艺研究[J]. 化学建材, 1997, (4): 172 - 174.
- [6] 邢 锋,冷发光,冯乃谦,等. 可裂速纤维增强混凝土抗裂性能[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 120 - 124.
- [7] 丁庆军,胡曙光,李 悦,等. 纤维增强 MDF 水泥材料的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1997(3): 49 - 51.
- [8] TOUTANJI H, MCNEIL S, BAYASI Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene - fiber - reinforced silica fume concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 961 - 968.
- [9] SUN Wei, CHEN Huisu, LUO Xin, et al. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high - performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(5): 595 - 601.
- [10] 赵 敏,高俊刚,邓奎林,等. 改性聚丙烯新材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2002. 484 - 485.
- [11] 张云水,宿宝江,孙景路,等. 聚丙烯纤维防水混凝土在防渗工程中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 1999, 26(4): 55 - 56.
- [12] 张希舜,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, 15(3): 88 - 91.
- [13] 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, 18(8): 8 - 9.

## 5 结语

聚丙烯纤维改性混凝土技术,改善了水泥的抗