

# 改性聚丙烯纤维混凝土及其应用

董建伟 王广宇 裴宇波

TU528.572

②  
7-10

(吉林省水利实业公司,吉林 长春 130062)

**摘要:**本文通过对改性聚丙烯纤维混凝土性能和优点的简述及在实验与实际工程中的应用,证明该种混凝土具有较强的抗冲击、抗疲劳的性能,能提高混凝土在各种环境下的耐久性能,从而有效延长混凝土的使用寿命。

**关键词:**聚丙烯纤维 混凝土 性能 应用

## 1 纤维混凝土简述

纤维混凝土是以水泥加颗粒集料为基体,并且用纤维来增强或改善某些性能的混凝土复合材料。纤维在混凝土中可以是乱向的,也可以是不同程度、不同类型的定向性,而且还可以包含一种以上的纤维。纤维的掺入,对混凝土基体产生了增强、增韧、阻裂等效应,从而增加了混凝土的强度和抗冲击、耐疲劳性能,改变了混凝土脆性易开裂的破坏形态,在疲劳、冻融等因素作用下,提高混凝土的耐久性能,延长混凝土的使用寿命。

## 2 纤维混凝土改善多种技术性能的机理

关于纤维混凝土能改善多种技术性能的机理,目前常见有这样几种解释:

**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  $V_f$ ,当  $V_f$  大于临界体积率  $V_{fc}$  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,从而提高了复合材料的韧性,改变了应力—应变状态,提高了耐久性。

**2.2 纤维间距理论** 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时,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。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,从而改善了混凝土的性能。

另外,有人认为是纤维为混凝土提供了有效的二次微加筋系统,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的进一步发展,进而增强了混凝土的强度,延长了混凝土的使用寿命。

## 3 常见的混凝土增强纤维

常见的混凝土增强纤维有钢纤维和非钢纤维两类,非钢纤维中又分为高弹纤维( $F_f/E_c > 1$ ,如碳纤维、石棉纤维、玻璃纤维等)和低弹纤维( $F_f/E_c \leq 1$ ,如尼龙、聚丙烯等合成纤维)。钢纤维效果较好,成功应用的实例较多,价格也较高;碳纤维具有胜过钢材的刚度和强度的优良性能,价格更为昂贵;石棉纤维应用时间虽然较长,但最近已被世界

卫生组织确定为鼻咽癌的致癌物,将很快被淘汰;玻璃纤维在新浇混凝土中不易乱向混合并易受损伤,从而降低混凝土强度,同时也有污染环境的问题;合成纤维近年来发展较快,主要为聚丙烯纤维。由于聚丙烯(PP)纤维具有强度大、耐腐蚀、价格低等优点,综合起来,较其它合成纤维如尼龙、芳纶等纤维有一定的优越性。

聚丙烯是一种典型的聚烯烃类结晶聚合物。一般聚丙烯纤维(短纤维)的主要性能为:

容量  $8.829\text{kN/m}^3$

弹性模量  $1.57\sim 4.41\text{kN/mm}^2$

抗拉强度  $400\text{N/mm}^2$

与混凝土比较,容重约为 0.375 倍,弹性模量约为 0.05~0.15 倍,抗拉强度约为 100 倍。

可以看出,聚丙烯纤维的抗拉强度虽比混凝土高很多,弹性模量却很低,在应力增大的情况下,混凝土将达到极限变形,而在纤维产生全部约束应力之前,混凝土已经开始破裂,所以提高抗拉强度和抗压强度的幅度不很大。然而在某些方面性能的改进,特别是对耐久性的改善是令人满意的。试验表明,聚丙烯纤维与混凝土之间有足够的附着力,能抑制裂缝的扩展,在受拉和受压的情况下,材料破坏的形态与普通混凝土有较大的不同,“聚丙烯混凝土复合材料在冲击强度上的改进是惊人的”。适用于可能受到冲撞作用的混凝土构件,以及混凝土受破坏后仍要求有一定的剩余强度和几何形状的地方。国内外已有许多研究和应用聚丙烯混凝土的成功实例。

普通聚丙烯纤维有柔性大、不吸水的缺点,因此易打团,与水泥搅拌较为困难,这也是妨碍聚丙烯纤维应用的重要因素。为此,吉林省水利实业公司吉水土工合成材料研究所组织有关单位对此进行了较深入的研究,对聚丙烯这种典型的聚烯烃类结晶聚合物进行了改性处理。根据异相成核理论,在聚丙烯中加入成核剂共混材料,改变其结晶行为,使聚丙烯在异相 $\beta$ 成核剂的作用下,熔融结晶成 $\beta$ 晶或拟六方晶系结构,由挤出机吐丝后,再经冷、热牵伸等处理工序,使分子未取向部分得到取向和定型。 $\beta$ 晶态在转变为 $\alpha$ 晶态时,纤维表面出现了部分微孔,因而提高了纤维的亲介质性,可与水泥结合得更好;在应力—应变图上可以看出,纤维的弹性模量有所增加;透过拔丝甬道观察窗,可以看到拔出的纤维较刚挺光亮,改性增加了纤维的刚度,同时短切的改性纤维在水中也有一定的分散

悬浮性,与水泥的易拌和性得到了改善。

对聚丙烯纤维进行类似改性处理及应用于混凝土中,国内外亦有先例,如大连理工大学、美国的 FIBRE MESH 公司等。

#### 4 用于增强或改善混凝土性能的纤维主要参数

纤维纤度  $d$ 。纤维纤度单位过去为旦尼尔(D),现为特(Tex)或分特(Dtex)。纤度大易于搅拌,纤度小则分散性好。

纤维抗拉强度  $T$ 。一般常以克/旦尼尔或者克/分特表示。

纤维弹性模量  $E$ 。纤维抗拉强度及纤维弹性模量大,将有利于抑制混凝土裂纹的产生和发展。

纤维体积率  $V_f$ 。纤维体积率  $V_f$  大时,混凝土的延塑性较好,但过大会使混凝土的孔隙率增加,导致强度的下降。

纤维长径比。长径比较大有利于剩余强度的增加,长径比较小有利于弹性模量的提高。

有时要考虑纤维比表面 SFS。复合材料每一单位体积中的纤维的总面积,对复合材料受力应变时的基体破坏方式起着决定性作用。纤维分散程度越高、周表面积越大越有利。

#### 5 纤维混凝土制备

一般地说,拌有纤维筋材的混凝土不同于普通混凝土之处,有如下几点:水泥含量较高,一般为 350~500kg;粗集料含量低,一般为 350~370kg。

为了提高纤维与水泥的附着效率,粗集料粒径要较小,一般不大于 10mm。

聚丙烯短纤维混凝土的制备,大致有两种方法:对纤度较大的纤维,宜采用干搅拌的办法,即将集料与纤维混合搅拌,使纤维散开,以保证与砂浆更好地粘附,从而提高附着力;搅拌两分钟后,再将水泥和水掺入;如果纤维体积率  $V_f$  超过 1% 时,应代之以人工搅拌方式。

对纤度较小的纤维,如纤度 10~30Dtex、长径比大时,宜采用水搅拌方式,即将纤维放入水量符合设计水灰比的水中,搅拌均匀后,在搅拌水泥与集料时倒入搅拌机,搅拌 4~5 分钟。

在正常配比混凝土的情况下,加入水散性较大的改性纤维也可以发挥作用。此时,只需要将纤维

开松并溶散于水中,在搅拌机中与水泥、集料搅拌4~5分钟即可。

吉林省水利实业公司吉水土工合成材料研究所在试验和实践中还发现,将纤维预先用纤维开松机开松后,或将纤维用加有表面活性剂(如减水剂)的水中进行溶散,会更容易搅拌均匀。

## 6 改性聚丙烯纤维混凝土的优点

综合有关试验研究成果,改性聚丙烯纤维混凝土有如下优点:

- 6.1 抗冲击强度较大 几乎为普通混凝土的二倍。
- 6.2 抑制干缩裂缝 收缩率较对比件减少约12.5%,与对比试件在同样温度烘干时,裂纹明显减少。
- 6.3 抗松散性较好,剩余强度较高 标准试块的高度在材料实验机上被压缩了10%~13%仍未散开,大致保持原几何形状。
- 6.4 磨损较小 国外用高速旋转的橡胶轮胎摩擦混凝土试块来模仿在高速公路上汽车对混凝土路面的磨损情况,表明加聚丙烯纤维的混凝土较对比试件减少物料损失17%~34%。
- 6.5 减少渗透 抗渗压力增加约20%,混凝土渗透高度减少约26.6%。
- 6.6 抗拉及抗折弯强度有所增加 试件在压折时,发生类似于钢筋混凝土的多裂缝型折断,折断速度较慢;抗折强度及极限拉伸强度增加约8%~10%;在国外尚有增加抗折弯强度达30%的报道。
- 6.7 触变性 乱向分布的纤维在混凝土中构成了三维筛网,挡住了水泥颗粒的下沉,使之易保持原状和造型。
- 6.8 耐化学腐蚀 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;同时,纤维在混凝土内部可避免光氧老化。
- 6.9 抗冻融性较好 冻融100次后强度符合要求,这是由于具有一定弹性的聚丙烯纤维在混凝土中可吸收冻胀产生的应力。
- 6.10 节省粗集料 纤维混凝土粗集料的用量一般较低,这对石料紧缺、价格较高的多沙地区有特殊意义。
- 6.11 抗人为及施工破坏能力强 实验采用了“野蛮实验法”。

用 $500 \times 500 \times 50\text{mm}$ 薄纤维混凝土板( $V_f =$

0.1%),自0.6m高度落于混凝土地面后,一角出现连两角边的贯穿裂缝,长约250mm。但提起薄板后,裂纹一端板角不脱落,不晃动,保持几何尺寸完整。

考虑实际施工情况,进行了场地跌落实验。所采用的纤维混凝土护板尺寸 $600 \times 800\text{mm}$ ,最薄处80mm,开孔率5%,菱形排布。结果为:

——自2.0m自由平落于湿硬土地上数次无裂纹、破损;

——分别自0.5、0.9m自由平落于干硬地上数次无裂纹、破损;

——自1.5m自由平落于干硬地后,出现多缝型孔间贯穿裂缝及微细长裂纹,但未发生象普通混凝土那样分崩离析的破碎现象,整体保持完整。

跌落实验表明,改性聚丙烯纤维混凝土护板有一定的刚塑结合的优点,提高了其抗人为及施工破坏的能力,增加了耐久性。这些优点对水利工程混凝土构件是十分重要的,利用这些优点,可以制作出适应北方江河堤防复杂荷载条件,具有一定刚塑结合特点的混凝土材料,增加材料的耐久性,在较大程度上满足了工程要求。

## 7 用于喷射的聚丙烯纤维混凝土

聚丙烯纤维混凝土有较高的粘稠性,用于喷射混凝土也较为适当。

将聚丙烯纤维混凝土采用喷涂的方法用作河床稳定材料,国外在1970年已有报道。其优点不仅施工便捷,而且在坡比很大、甚至垂直的墙面上也能进行作业;据国外施工经验,混凝土回弹量比加钢纤维减少约5%,纤维用量仅为钢纤维的 $\frac{1}{16}$ ~ $\frac{1}{22}$ ,聚丙烯纤维自身的化学惰性使之能抗锈、抗碱、不受其他添加剂的影响,成本较其它加筋材料低廉。可降低混凝土的渗透性,减少裂缝,增加抗磨损能力。另外,对喷射机械磨损少,施工人员工作强度低。

喷射用的改性聚丙烯纤维,长度一般在12~50mm,大致有两种类型:一种是纤维丝网,另一种是膜裂纤维。膜裂纤维分散性及与混凝土粘合性较好,常用于干喷方式,粗集料粒径一般在9.5mm以下;经改性的拉丝纤维一般有较好的水悬浮性,易与水泥集料进行湿拌合,常用于湿喷方式,骨料粒径一般大于9.5mm。

喷射改性聚丙烯纤维混凝土时,纤维的体积率  $V_f$  一般控制在 0.1%~1.0% 之间。在这个范围内,纤维的增加会使护面塑性裂缝减少、韧性和抗压强度增加,但造价也随纤维的增加而上升。因此一般加入纤维的体积率  $V_f=0.1\% \sim 0.3\%$  较为经济适用。据国内外施工经验,为了防止寒冷地区的冻融问题,聚丙烯纤维的体积率  $V_f$  应在 0.3% 左右。

## 8 纤维混凝土应用与研究的现状和展望

纤维混凝土在国外已有近 40 年的研究和应用历史,聚丙烯纤维混凝土也已在公路、机场、码头、屋顶防水、蓄水、混凝土桩基础、煤矿隧洞、水渠、河流护岸等许多场合得到了成功的应用。

吉林省水利实业公司吉水土工合成材料研究

所在这方面也作了大量研究和应用工作。1998 年首次在吉林省梅河口市采用聚丙烯纤维混凝土进行了渠道薄壁(30~50mm)防渗护砌实验工程,取得了经验;1999 年又在九台市进行了小规模渠道薄壁防渗护砌施工,效果较好;2000 年,又对合成纤维及相关高分子材料进行了更加深入的研究,开始进行首次聚合物——纤维混凝土堤防护坡实验工程,并协助某大型水库进行了海漫段纤维混凝土补强工程;同时总结渠道防渗的经验和教训,又进一步研究出纳米聚合物——纤维混凝土超薄壁(10mm)渠道防渗卷材并申报国家专利,同时研究了适用于不同纤维的高分子添加剂使用方法,使纤维混凝土的研究和应用水平又有了较大的提高。

随着研究的不断深入,作为一种新型的水利工程建设材料,聚丙烯纤维混凝土的优越性会不断地为人们所认识和掌握,将越来越多地应用于水利工程建设中。□

### 参考资料:

- 1 (美)D. R. 兰卡德《纤维混凝土的应用》
- 2 (英)J. J. 桑斯费尔德《非钢纤维混凝土的性能与试验》
- 3 Zonsoveld, J J. The marriage of concrete and plastica, No10, October1970, P1~12.
- 4 (法)J. 达达尔《聚丙烯纤维增强混凝土力学性能的研究中作出的一点贡献》
- 5 《聚丙烯塑料的改性与应用》
- 6 (美)《FIBRE MESH 微加筋系统》
- 7 (美)《喷射混凝土采用 FIBRE MESH 纤维——高科技系统》
- 8 《近代混凝土技术》
- 9 (美)A. L. LANDAU《纤维加强混凝土的新发展》

## Quality - Improving Polypropylene Fabre Concrete and Its Application

Dong Jianwei Wang Guangyu Pei Yubo

**Abstract:** The performance, advantages and application in practice of quality - improving polypropylene fabre concrete are presented in this paper. This kind of concrete is better in performance of anti - shock and anti - fatigue, also it can improve the durability of concrete under various environments, and thus prolong effectively the life of concrete.

**Keywords:** polypropylene fabre concrete performance application