



改性异形聚丙烯纤维 对混凝土防裂抗渗作用的研究

王依民 倪建华 潘湘庆

纤维材料改性国家重点实验室 东华大学材料学院

摘要: 本研究利用高分子纤维成型理论基础,成功地研制成适用于混凝土防裂、增韧专用纤维,对纤维在制样中的分布进行了计算机模拟,并对其防裂、耐磨、抗冲击、抗渗、抗冻性能影响进行了探讨。还在多种工程领域进行了应用,如国道基础建设、房屋建筑、水利工程,其中在宁波白溪水库中的应用得到了有关专家的肯定。2002年初起,在北京国家大剧院工程中也进行了应用。

1 概述

混凝土是世界上用量最大,使用最广泛的建筑材料之一。目前,我国每年混凝土产量已达10亿立方米左右,较1995年的3亿立方米增长了2倍以上。国家计划,2010年水泥产量将增至8~8.5亿吨,即比1996年的4.9亿吨差不多翻了一倍,并超过世界水泥总产量的三分之一。可以肯定,在今后相当长的一段时间内,混凝土将仍然是我国现代工程建设的主要建筑材料。并且,由于其具有适用范围广,价格便宜,易浇注成型,比较耐久,还可有效利用一些工业固体废料制作节能环保型建筑材料等优点,而在众多建筑工程领域中发挥着其他材料无法替代的作用。

但是,混凝土也有抗拉强度低,极限拉应变小,抗冲击强度差,尤其是脆性大,以及在水泥硬化之前,由于塑性收缩、干燥失水造成混凝土开裂等缺点。在各种混凝土改性技术中,纤维混凝土的开发应用可认为是近年来混凝土技术的最大进展之一。纤维对混凝土的改性可分为低掺量和高掺量二种。前者是指纤维掺量在0.05-0.1%(体积分数)左右。纤维的加入可在不降低混凝土力学性能的前提下减少其早期收缩裂缝50-100%,从而有效地提高混凝土的耐久性。高掺量是指纤维在混凝土中的体积分数在0.5%以上,

一般采用玻璃纤维、钢纤维、碳纤维等高弹模纤维,可使混凝土力学性能明显提高。对于一些受力情况比较复杂、难以用加配钢筋等方法提高水泥混凝土强度的结构,如水工建筑、隧道矿井加固等,纤维混凝土的优势就可得到充分发挥。

发达国家在70年代末开始合成纤维在混凝土中的应用研究,到80年代该材料已经工业化规模地应用于各类混凝土工程。以美国为例,目前其合成纤维混凝土的使用量已占混凝土总产量的7%,而其钢纤维混凝土的用量仅3%,德国、日本也已大量地使用合成纤维混凝土。可见合成纤维混凝土的发展前景是非常可观的。我国混凝土年产量10亿 M^3 ,按上述发达国家7%的使用量计算,我国每年合成纤维混凝土的总量将可达7000万 M^3 。目前我国大都采用从发达国家进口混凝土用合成纤维,但是,进口纤维价格不菲,这在一定程度上影响了该材料的推广使用。因此研制国产合成纤维用于混凝土工程,对降低纤维混凝土造价、提高混凝土工程质量具有一定的经济意义和社会意义。

东华大学从92年起就进行了有关研究,包括各种纤维材料在混凝土中应用的可能性,特别是聚丙烯纤维。我们在多年的工作中深深体会到,纤维本身的物理、化学性能乃至其几何形态对

纤维混凝土的性能都有很大的影响。在众多合成纤维中,聚丙烯纤维具有耐碱性好、延伸率大等性能方面的优点,同时还具有价格低、密度小等经济方面的优势。但它与混凝土的粘合性能差,耐紫外性差,如不进行改进,其应用会受到限制。因此,在国家自然科学基金和燕山石化的支持和资助下,我们进行了有关研究,完成了合成纤维的试制和在混凝土中的应用基础和应用研究。

2 结果与讨论

2.1 改性异形聚丙烯纤维的制备

(1) 亲水改性和异形截面纤维的研究

研究结果发现添加 PPP 助剂并纺成以三叶形截面为最好,三叶的尺寸以 $0.1 \times 1 \text{mm}$ 为好。

(2) 纺丝工艺对初生纤维中 β 晶含量及微孔结构的影响

要制备多微孔聚丙烯纤维的关键是制得高 β 晶含量的初生纤维,并在拉伸过程中使不稳定的 β 晶转变为稳定的 α 晶相而产生微孔。纺丝工艺对 β 晶异形纤维的准备有较大的影响:

a. 纺丝温度对初生纤维中 β 晶相含量(K)和规整性参数(S)的影响

在纤维冷却速率相同的条件下研究了熔体温度对初生纤维中 β 晶含量和规整性参数的影响。发现在一定温度范围内,初生纤维的 K 值保持基本不变,而 S 值随熔体温度的上升略有提高。

b. 纺丝冷却速率对初生纤维中 β 晶含量的影响

随挤出速度的增加即纺丝速度的降低,初生纤维中 β 晶含量明显增大。因此,要提高纺丝速度或生产低纤度高含量 β 晶聚丙烯纤维的话,可用纺程加温的办法来保证 β 晶含量。

c. 热定型温度对拉伸丝微孔结构的影响

高的热定型温度虽然可使样品结晶度有提高。考虑到水泥混凝土的加工和使用过程中不会经受太高的温度。因此,采用低温长时间的热定型,如 100°C 热定型,既可消除内应力又可在纤维中保留较多的微孔。

2.2 改性聚丙烯纤维混凝土(砂浆)的性能

(1) 抗塑性收缩开裂

加入聚丙烯纤维可显著提高水泥砂浆的抗开裂性,但其效果与聚丙烯纤维的品种有一定关系,异形纤维及膜裂 II 纤维在 0.05%(体积分数)掺量时,膜裂纤维在掺量为 0.15%时,能降低塑性收缩开裂率 30%以上。在纤维掺量相同的条件下,纤维

的抗塑性收缩开裂能力为,纺丝纤维大于膜裂纤维。实验结果还表明,纤维表面处理技术对进一步提高聚丙烯纤维水泥砂浆的抗开裂能力是有效的。如对异形聚丙烯纤维进行碱表面处理,在纤维掺量 0.05%-0.15%条件下,相对于未处理纤维,其抗开裂能力可提高 2-10%不等。

(2) 力学性能

掺入 0.5%-1.5%聚丙烯纤维,水泥混凝土的抗压强度基本不变。但是聚丙烯纤维的几何形态与混凝土的力学性能有一定关系,纺丝聚丙烯纤维混凝土的抗压强度略高于基准水泥混凝土。而膜裂聚丙烯纤维使混凝土的抗压强度稍有降低。

在 0.5%体积掺量时,膜裂聚丙烯纤维和纺丝聚丙烯纤维可使基准混凝土的抗折强度分别提高 5%和 9%,与考核指标 10%的要求相比,此结果尚存在差距。但是聚丙烯纤维混凝土的抗弯韧性及抗冲击强度有大幅度的提高,在体积掺量为 0.5%、1.0%及 1.5%时,其抗冲击强度的提高率分别达到 78%、112%及 143%,大大高于 50-100%的考核指标要求。

(3) 耐久性

对改性异形聚丙烯纤维进行的纤维混凝土抗冻融试验结果表明,当聚丙烯纤维掺量在 0.5%时,纤维混凝土的抗冻标号即能达到 D300,为基准水泥混凝土的 5 倍,大大超过本项目考核指标 D100 的要求。

我们还研究了改性聚丙烯纤维在水泥混凝土中的耐大气老化性能。从目前 200 小时老化结果可预期,加上水泥基材对聚丙烯纤维的紫外线老化有一定的屏障作用,抗紫外改性聚丙烯纤维适合作纤维混凝土。

(4) 聚丙烯纤维/水泥石界面性能

用纤维拔出法,测得改性异形聚丙烯纤维/水泥石的界面脱粘强度在 0.05-0.15Mpa 左右,而且其绝对数值随纤维长度增大而降低,并与水泥石性能有关。SEM 观察发现,经酸、碱、表面处理,由于纤维的表面粗糙度增加,导致界面脱粘强度提高至最大值 0.31Mpa,较未处理纤维提高 2 倍以上。

我们在国内近百个工程多种工程领域进行了应用,如国道基础建设、房屋建筑、水利工程,其中在宁波白溪水库中的应用得到以赵国藩院士、谭靖夷院士为主任的鉴定会的肯定。2002 年

(下接 21 页)

维。继四孔纤维后，中国纺织大学还与仪征化纤联合开发成功七孔纤维。

多孔纤维具有优异的保暖、回弹性，因此主要用作床上用品、保暖服装等的填充料。床上用品的填充保暖材料，一般有三种来源：(1)以棉花为主的植物纤维，(2)以羽绒、羊毛为主的动物纤维，(3)以中空纤维为主的化学纤维。传统的棉花胎因容易板结，尤其在潮湿、多雨的季节或地区板结更严重，并且棉花胎保暖性能不尽人意，来源又受到农田种植规模的约束，其缺陷是不言而喻的。动物纤维虽轻柔保暖，但价格昂贵，很难普及，并且还有虫蛀、发霉之烦恼。而中空 PET 短纤维既具有动、植物纤维填充料的优点，又因工业生产带来的优势，其价格已与棉花相差无几。这就使中空化学纤维异军突起，发展迅猛，化纤盖被已成为消费者所普遍欢迎的床上用品。我国江河湖海岸线很长，山区又多，沿江海湖和山区潮湿的气候更使化纤原料显示出轻、暖、不蛀、不霉的优越性。

我国早在 70 年代就使用进口中空 PET 纤维作为絮棉材料，目前的使用量每年达数十万吨，而且大多采用国产中空纤维。

1996 年我们在中国石化总公司资助下采用特殊几何形状的狭缝间隙，利用熔体后粘法制取九孔芯高弹性中空纤维。由于中空内含有大量封闭的空气，因此采用该种纤维制得的用品具有优良的回弹持久性和保暖性。同时，采用适宜环形冷却吹风及优化的拉伸条件，可以满足各种产品对九孔中空絮填纤维的加工要求。同年通过了中国石化总公司主持的鉴定(中石化鉴定号 189)，并经上海市科技情报研究所检索查新(检索号 990190)，技术水平为“国际先进水平”，还申请了中国专利(专利号 CN1177022A)，1998 年 3 月 25 日获专利公开，1999 年 5 月授权，并作为 1997 年科技大事被列入《上海市科技年鉴》。

三、九孔中空纤维的制备

(上接 19 页)

初，北京国家大剧院工程也采用我们的纤维。此外，就建材，包括混凝土的其它性能的改进，如沥青防裂、保温建材的研制等，我们也有一些设想，近期进行了探索性试验。

高分子材料在建筑领域中的应用是一项严肃和重要的事，任何科学原理、应用基础和施工规划的问题会引起重大的事故，给国家财产、人民

(一) 孔型设计

纺制多孔纤维的关键之一是喷丝孔形的设计。巧妙地利用 BARNES 效应，即有粘弹性的熔体在离开喷丝孔时由于入口记忆效应，在径向发生胀大而相互粘连成孔。结果发现，喷丝孔狭缝间隙 0.1~0.14 为最佳。

(二) 丝熔体温度的影响

研究发现，随熔体温度的下降，中空度增大，但若温度太低，孔口膨化加剧，纺丝将无法继续，一般控制在 275~282℃ 为好。

(三) 冷却风速和风温的影响

风温的降低和风速的增大有利于中空度增大，但风温太低会导致成孔率的下降，风温的加大会导致风速不稳定。根据正交设计试验的结果，风温宜控制在 22℃，风速控制在 1.5m/min。

四、九孔中空纤维的开发和应用

1997 年 7 月我们与上海市民光被单厂合作开发九孔系列床上用品，98 年通过新产品鉴定，鉴定意见为“属创新产品，达到国内先进水平”。

以九孔被为标志的系列床上用品的开发成功，是高科技发展的硕果，也是床上用品不断追求完美的成果。97 年 9 月，“民光九孔被”开发成功，投入市场后，《新民晚报》题为“国货不逊洋，民光赛杜邦”的报道似一石激起千层浪，首批使用九孔被的消费者为其优异的性能所折服，市场一个以九孔被为标志的系列床上用品销售热很快兴起。

98 年，民光相继开发成功“九孔春秋被”、“九孔夏被”、“九孔枕芯”、“九孔床垫”等系列产品产量达 25 万条，创下 3500 万元产值，700 万利润。获 1999 年国家教委科技进步三等奖，2000 年上海市优秀产学研一等奖。

最近，我们又纺出了更细的功能化九孔和三维卷曲纤维，并计划在明后年开发出系列功能性九孔保暖服装和床上用品。

生命带来危害。我们真诚地感谢国家自然科学基金和燕山石化对我们工作的支持，这对完成项目的深度和广度是非常有利的。我们真诚地希望政府领导部门、管理机构、研究单位和设计施工单位联合起来，将这件事办到实处，为国家建设和为人民利益作出我们的贡献。