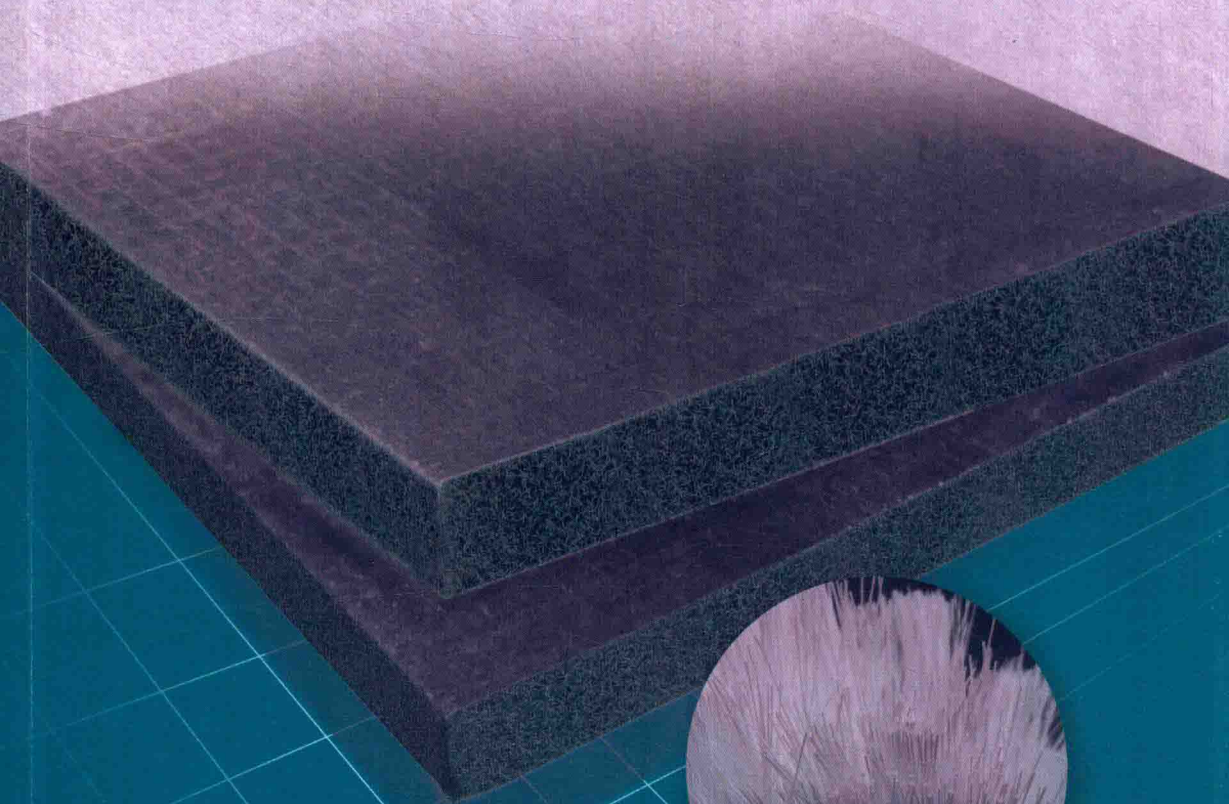


聚丙烯纤维水泥基材料 抗裂机理及应用研究

● 宣卫红 胡 阳 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

聚丙烯纤维水泥基材料 抗裂机理及应用研究

宣卫红 胡 阳 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

聚丙烯纤维水泥基材料抗裂机理及应用研究/宣卫红, 胡阳著. —南京: 河海大学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-5630-4984-4

I. ①聚… II. ①宣… ②胡… III. ①聚丙烯纤维—水泥基复合材料—抗裂性—研究 IV. ①TB333.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 144234 号

- | | |
|------|---|
| 书 名 | 聚丙烯纤维水泥基材料抗裂机理及应用研究 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5630-4984-4 |
| 责任编辑 | 成 微 |
| 封面设计 | 张世立 |
| 出版发行 | 河海大学出版社 |
| 网 址 | http://www.hhup.com |
| 地 址 | 南京市西康路 1 号(邮编:210098) |
| 电 话 | (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部) |
| 经 销 | 江苏省新华发行集团有限公司 |
| 排 版 | 南京新翰博图文制作有限公司 |
| 印 刷 | 虎彩印艺股份有限公司 |
| 开 本 | 700 毫米×1 000 毫米 1/16 |
| 印 张 | 11.25 |
| 字 数 | 217 千字 |
| 版 次 | 2017 年 9 月第 1 版 |
| 印 次 | 2017 年 9 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 52.00 元 |

序

为提高水泥混凝土的抗裂性,聚丙烯纤维被应用于建筑工程、道路桥梁工程、水利工程。然而,聚丙烯纤维抗裂机理尚不明确,部分工程应用效果未达到预期目标,严重影响了聚丙烯纤维的大量应用。本书以作者博士学位论文和江苏省教育厅资助项目“纤维增强水泥基复合材料抗冲击性能试验研究”为基础,对聚丙烯纤维与水泥基材料的黏结性能、聚丙烯纤维水泥基材料的基本力学性能进行系统的试验研究;深入分析了聚丙烯纤维与水泥基材料的界面黏结机理,以及聚丙烯纤维的减缩、增韧、补强抗裂效应;修订了聚丙烯纤维水泥基材料拉伸承载力计算公式。

本书的研究包含如下工作:

1. 试验研究

首先通过自行设计的聚丙烯纤维与水泥砂浆拉拔试验,系统地研究了水泥砂浆的4种水灰比、2种龄期,以及纤维的3种埋置长度、4种埋入角度等四种因素对聚丙烯纤维-水泥基材料黏结性能的影响,将试验数据经多因素回归分析得出了聚丙烯纤维拔出力-拔出位移的关系曲线。研究表明:

(1) 随着水泥砂浆水灰比的减小、龄期的增长,以及纤维的埋置长度的增大、埋入角度的增大,峰值拔出力及聚丙烯纤维-水泥基材料黏结强度均增大。

(2) 提出了聚丙烯纤维拔出破坏的五个阶段模型,即完全黏结、完全黏结至部分脱黏、部分脱黏至最大脱黏、最大脱黏至完全脱黏、摩擦拔出,该分析模型得到了同步进行的声发射试验信号特征参数的验证。综合考虑拔出过程中低弹性模量聚丙烯纤维变形大导致颈缩及纤维埋置端位移因素,提出了聚丙烯纤维-水泥基材料界面黏结应力分布模型,得出聚丙烯纤维与水泥基材料黏结-滑移本构关系。经分析未测试试件和测试试件的SEM电镜扫描照片,从微观层面上验证了聚丙烯纤维-水泥基材料良好的黏结性能以及聚丙烯纤维颈缩现象。

其次,针对聚丙烯纤维水泥基材料某些力学性能试验结果分歧较大,以及某些试验结果偏少的问题,对聚丙烯纤维混凝土的抗压、抗拉性能进行补充试验,并对聚丙烯纤维水泥砂浆的工作性、干缩性能、直接拉伸性能和抗冲击性能进行了详细

的试验研究。研究表明:

(1) 掺入聚丙烯纤维降低了砂浆的扩展度,增加了砂浆的含气量,减少了泌水率。

(2) 掺加低弹性模量聚丙烯纤维后,水泥基材料劈裂抗拉强度提高,抗压强度和静力抗压弹性模量降低,表明低弹性模量聚丙烯纤维有助于改善水泥基复合材料的脆性,提高水泥基复合材料的抗裂性能。

(3) 考虑水泥/砖基底约束的改进收缩试验表明:掺入纤维对早期和后期砂浆的变形均起到很好的约束作用,这种约束作用取决于纤维表面积及纤维与水泥基材料的弹性模量,同时也与纤维-砂浆界面黏结作用有关。给出了聚丙烯纤维水泥砂浆干缩变形-时间的回归关系式。

(4) 直接拉伸试验表明:掺入聚丙烯纤维不仅提高了直接拉伸曲线的破坏峰值荷载、极限抗拉强度,而且提高了峰值位移、全曲线断裂能,降低了弹性模量。因此,可以用峰值抗拉强度(峰值荷载)、峰值应变(峰值变形)、抗拉弹性模量作为聚丙烯纤维水泥基材料抗裂评价指标。

(5) 冲击试验表明:聚丙烯纤维水泥基材料具有良好的冲击韧性。随着纤维掺量的增加,水泥基材料的抗冲击能力大幅度提高。但是当纤维掺量过高时转而降低砂浆的抗冲击性能,因此纤维掺量存在一个合适的上限值,为 0.1%(体积比)。

2. 理论分析

首先,依据分形理论,采用递推算法编制了 VB 程序,随机构造了纤维砂浆拉伸三维破裂面。分析表明:掺入纤维增加了裂缝扩展路径,形成更为复杂的破裂面,因此提高了纤维砂浆的拉伸强度。同时,提出了直接拉伸承载力修正公式,计算结果与聚丙烯纤维直接拉伸试验结果相差小于 10%。

其次,采用 ANSYS 大型有限元分析软件,对纤维拔出试验进行数值分析,验证了纤维-水泥基材料界面黏结应力分布模型。采用聚丙烯纤维黏结-滑移本构关系曲线,计算了聚丙烯纤维砂浆收缩性能,结果表明:纤维间距越小,纤维对水泥砂浆变形的约束越大,计算的收缩变形-时间曲线与试验曲线吻合较好。

3. 工程应用

首先,对新沭河泄洪闸工程聚丙烯纤维混凝土开裂问题进行研究。有限元分析表明,单纯的温度应力不足以造成混凝土的开裂,但是当温度应力与收缩应力叠加超过混凝土的抗拉强度时,就会造成海漫混凝土面层开裂,这是该工程掺入聚丙烯

烯纤维后混凝土仍然开裂的主要原因。此外,由现场留置试件的力学试验结果可知,纤维在混凝土中的分散性的好坏、施工方法是否得当,是影响纤维混凝土抗裂性能能否充分发挥的重要因素。

其次,有限元分析和多项聚丙烯纤维外墙抹灰工程的应用实践表明,采用聚丙烯纤维抹灰砂浆——克拉丝纤维技术,能够较好地改善抹灰砂浆的韧性,防止抹灰砂浆层的开裂,对控制抹灰砂浆塑性阶段的非结构性裂缝的效果明显,并提出了聚丙烯纤维砂浆实用施工技术。

尽管作者在聚丙烯纤维水泥基复合材料抗裂性研究方面做了一些工作,但是该书的研究无论是范围还是深度方面都存在着一定程度的不足。作者非常愿意以此书为媒介接受同行们的批评和帮助,同时也愿意继续研究和改进,并加强研究成果的应用。

作者

2017年3月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状及存在的问题	2
1.2.1 聚丙烯纤维在水泥基材料中应用的历史和现状	2
1.2.2 纤维抗裂机理研究现状及存在的问题	2
1.2.3 纤维与水泥基材料黏结-滑移本构关系	13
1.2.4 现代分析及测试技术在纤维抗裂机理研究中的应用	17
1.2.5 工程应用现状	25
1.3 本书研究的技术路线及主要内容	27
第二章 聚丙烯纤维水泥基材料基本性能研究	30
2.1 聚丙烯纤维砂浆工作性试验	30
2.1.1 试验方案	30
2.1.2 试验结果及分析	31
2.2 聚丙烯纤维混凝土工作性试验	34
2.2.1 试验方案	34
2.2.2 试验结果及分析	35
2.3 聚丙烯纤维混凝土基本力学性能试验	36
2.3.1 试验方案	36
2.3.2 试验结果及分析	38
2.3.3 聚丙烯纤维混凝土力学性能机理分析	40
2.4 本章小结	40
第三章 聚丙烯纤维与水泥基材料黏结-滑移本构关系	42
3.1 聚丙烯纤维-水泥砂浆黏结性能试验研究	42
3.1.1 试验方案	42
3.1.2 试验结果及分析	44

3.2 聚丙烯纤维黏结-滑移本构关系	50
3.2.1 聚丙烯纤维拔出力-拔出位移试验拟合公式	50
3.2.2 聚丙烯纤维黏结-滑移本构关系	56
3.3 聚丙烯纤维拔出试验声发射信号特征分析	65
3.3.1 试验方案	65
3.3.2 试验结果及分析	66
3.4 聚丙烯纤维拔出试验有限元分析	68
3.4.1 计算单元	68
3.4.2 计算模型	70
3.4.3 计算结果分析	70
3.5 聚丙烯纤维拔出试件微观分析	74
3.5.1 纤维拔出后的孔洞形貌	74
3.5.2 纤维-水泥基材料界面形貌与能谱分析	76
3.6 本章小结	77
第四章 聚丙烯纤维的减缩抗裂效应	79
4.1 聚丙烯纤维砂浆干燥收缩试验研究	79
4.1.1 试验方案	79
4.1.2 试验结果及分析	80
4.1.3 纤维抑制干缩变形机理理论分析	83
4.1.4 小结	84
4.2 纤维砂浆干缩有限元分析	84
4.2.1 计算模型	84
4.2.2 计算结果及分析	85
4.3 纤维砂浆温度收缩有限元分析	86
4.3.1 计算模型	86
4.3.2 计算结果分析	87
4.4 本章小结	90
第五章 聚丙烯纤维的增韧、补强抗裂效应	92
5.1 聚丙烯纤维混凝土直接拉伸试验研究	92
5.1.1 试验方案	92
5.1.2 试验结果及分析	92
5.1.3 表面裂缝分形分析	94
5.2 聚丙烯纤维砂浆直接拉伸试验研究	97

5.2.1 试验方案	98
5.2.2 试验结果及分析	99
5.2.3 三维破裂面分形分析	103
5.3 纤维砂浆直接拉伸试件微观分析	112
5.3.1 试验目的	112
5.3.2 试验结果及分析	113
5.4 本章小结	116
第六章 聚丙烯纤维砂浆抗冲击性能研究	118
6.1 聚丙烯纤维砂浆锤击试验	118
6.1.1 原材料	118
6.1.2 配合比设计	118
6.1.3 试验方法	119
6.1.4 试验结果	119
6.2 聚丙烯纤维砂浆试件超声波测试分析	120
6.2.1 试验方法	120
6.2.2 试验结果	120
6.3 聚丙烯纤维砂浆抗冲击试件抗压强度试验	123
6.3.1 试验方法	123
6.3.2 试验结果	123
6.4 聚丙烯纤维砂浆冲击试件表面裂缝分形分析	125
6.5 本章小结	129
第七章 聚丙烯纤维水泥基复合材料工程应用研究	130
7.1 聚丙烯纤维混凝土在某海漫混凝土工程中的应用研究	130
7.1.1 工程概况	130
7.1.2 试验研究	131
7.1.3 有限元分析	137
7.1.4 裂缝原因及裂缝预防措施分析	143
7.2 聚丙烯纤维砂浆在外墙抹灰工程中的应用	145
7.2.1 工程概况	145
7.2.2 有限元分析	145
7.3 克拉斯纤维砂浆施工关键技术	146
7.3.1 施工工艺	146
7.3.2 施工技术要点	146

7.3.3 效益分析	147
7.4 本章小结	147
第八章 结论与展望	149
8.1 主要工作及结论	149
8.2 展望	152
致谢	153
附表	154
参考文献	159

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

随着我国经济的高速发展,城市化进程不断推进,大规模的基本建设将持续相当长的时间。近年来,我国城乡建筑竣工面积每年已达 20 亿 m^2 ,混凝土用量约 15 亿 m^3 。混凝土材料由于具有抗压强度高、制备容易、不易燃烧等优点,因而被广泛使用;但其也因抗拉强度低、韧性差等缺点,易导致混凝土结构物开裂,影响结构物耐久性。长期以来,对混凝土裂缝的研究已取得了令人瞩目的成绩^[1,2]。但是,由于人们对建筑物的安全、实用、经济、美观的要求越来越高,因此,混凝土结构物裂缝问题仍是工程建设领域研究的热点。

混凝土结构物裂缝包括由荷载引起的和由收缩变形引起的。据统计,混凝土结构物裂缝属于由变形为主引起的约占 80%,属于由荷载为主引起的约占 20%^[1]。产生变形的原因之一是混凝土的收缩。收缩分早期和后期,早期通常定义在拌制的 24 h 以内,后期是拌制 24 h 及以后^[3]。早期收缩主要包括塑性收缩、干燥收缩。后期收缩主要包括干燥收缩、温度收缩和碳化作用引起的收缩。单纯的收缩变形并不会产生裂缝,在收缩变形受到限制时^[4]才会产生裂缝。实际工程中,混凝土总会受到骨料、钢筋、模板的约束;或者同一构件不同部分的收缩差异也会产生约束作用。当约束产生的拉应力超过混凝土的抗拉强度,或者约束产生的拉伸应变超过了混凝土的允许极限应变时,混凝土将产生裂缝^[5,6]。

为了改善混凝土的脆性,提高抗裂性,人们在水泥基材料中掺入纤维,制成纤维水泥基复合材料。纤维混凝土是当代迅速发展的新型复合建筑材料。根据纤维弹性模量的高低可将纤维分为低弹性模量纤维和高弹性模量纤维。高弹性模量纤维包括:钢纤维、玻璃纤维、碳纤维等。低弹性模量纤维包括:有机纤维、尼龙、聚丙烯、聚乙烯等。

目前,针对高弹性模量纤维增强混凝土研究成果很多。通常认为:由于高弹性模量纤维的弹性模量一般高出混凝土一个数量级以上,因而对混凝土具有显著的阻裂、增强和增韧作用。由于玻璃纤维对人体有害,因此被限制使用。碳纤维价格昂贵,也仅在某些加固工程中使用。钢纤维是应用最广泛的高弹性模量纤维,但是

钢纤维混凝土的拌制麻烦,且需大幅度增加成本,因而不能普遍应用。

低弹性模量的聚丙烯纤维水泥基材料在工程中得到广泛应用。工程应用表明,聚丙烯纤维的掺入减少了混凝土的收缩,抵抗了混凝土的开裂,提高了混凝土的抗渗性和耐久性。但是也有少量的报道指出,聚丙烯纤维的使用未达到预想的效果。如 Aly^[7]的研究表明,掺入聚丙烯纤维增加了硬化混凝土的干缩变形,未能起到抗裂作用;宣卫红等^[8]介绍的某水利工程混凝土中掺入聚丙烯纤维后,仍然出现较多较宽的可视裂缝;周娅^[9]介绍某地下连续墙聚丙烯纤维混凝土工程,在突遇寒流温度下降时,出现温度裂缝。究其原因是对聚丙烯纤维的抗裂机理研究得尚不透彻,在某些工程应用中显得有些盲目,影响了聚丙烯纤维在工程中的大量使用。因此,本书研究的目的是要弄清楚聚丙烯纤维的抗裂机理,更好地指导聚丙烯纤维在工程抗裂中的应用。

1.2 国内外研究现状及存在的问题

1.2.1 聚丙烯纤维在水泥基材料中应用的历史和现状

聚丙烯纤维研究的历史可以追述到 20 世纪 60 年代前期。Goldfein 研究发现聚丙烯纤维有助于提高水泥砂浆的抗冲击性能。Zollo^[10]的试验表明,掺入体积掺量为 0.1%~0.3%的聚丙烯纤维,可减少 12%~25%的混凝土塑性收缩。

20 世纪 70 年代初,美、英等国将聚丙烯单丝纤维应用于某些混凝土制品及工程。Hannant^[11]介绍采用聚丙烯纤维混凝土可制作管桩、外墙板、海上浮动构件的外壳、检查井壁、装饰墙板。70 年代中期美国成功研制聚丙烯膜裂纤维,成束状,在混凝土拌合过程中可分裂成相互牵连的网络。80 年代初,美国公司采用表面处理技术,研制出具有均匀分散性的聚丙烯纤维。近十几年,美国加拿大已经广泛使用低掺量的聚丙烯纤维预拌混凝土。

20 世纪 70 年代,纤维混凝土技术传入中国。1986 年在大连召开了第一届全国纤维水泥与纤维混凝土学术会议,之后每两年召开一届。美国 Hill 兄弟公司的杜拉(DURA)聚丙烯纤维的开发,特别是 90 年代开始在中国工程中的应用,标志着聚丙烯纤维工程应用技术在中国越来越受到广泛的关注。

1.2.2 纤维抗裂机理研究现状及存在的问题

目前,许多学者致力于研究各种纤维的抗裂机理,如邓宗才^[5]总结的合成纤维

抗裂机理如下:

(1) 减少泌水。在混凝土中乱向分布的纤维,形成了三维支撑体系,阻止粗集料的下沉,减少了水分散失,防止早期开裂。

(2) 减少混凝土原始缺陷。在混凝土中乱向分布的纤维,将大孔细分成小孔,改善了混凝土的抗裂性。

(3) 降低混凝土表面与内部应力梯度,减少了因湿度、温度降低导致的开裂程度。

(4) 阻止混凝土裂缝的扩展。

(5) 提高了混凝土的变形性能。体现在提高了混凝土极限拉伸应变和断裂能。

上述对合成纤维的抗裂机理描述,主要是从纤维对混凝土原生品质的改善,以及形成的纤维混凝土的力学性能提高的宏观角度来说明的,可以作为聚丙烯纤维抗裂机理研究的参考。对于从微观、细观角度研究聚丙烯纤维抗裂机理,建立宏观力学性能与微、细观反应之间的关系,这方面的资料几乎未见到。因此,本书在详细分析和总结合成纤维抗裂机理的基础上,结合聚丙烯纤维的研究成果,提出聚丙烯纤维水泥基材料抗裂性研究的技术路线和主要工作内容。

1.2.2.1 纤维的作用方式

当水泥基材料开裂、裂缝向内部扩展时,纤维作用是跨越裂缝承受拉力,纤维失效形式可能是:拉断、脱黏、拔出^[10]。作用的效果既可以提高复合材料的抗拉强度,也可以提高其韧性,或者两者兼而有之。作用的机理是吸收了水泥基材料开裂时释放的能量,减弱了裂缝扩展的“动力”,因而起到了阻裂作用。图 1-1 给出了纤维作用及失效方式。

由于聚丙烯纤维是一种低弹性模量材料并且自身的柔软性很好,能够很好地分布在混凝土中,形成乱向的三维支撑结构,联接裂缝两端的基体。但是,聚丙烯纤维以何种方式起作用,需要进一步的探讨。而且纤维作用方式受到纤维自身因素的影响^[12],包括:纤维的力学性能参数、纤维的几何特征、纤维在水泥基材料中的分布与取向、纤维体积率、纤维比表面积、纤维平均间距与复合材料中纤维根数。除了纤维自身因素外,还包括纤维和水泥基材料的复合作用,体现在水泥基材料的基本性能方面,包括工作性、强度、变形性能,以及纤维-水泥基材料界面黏结作用。

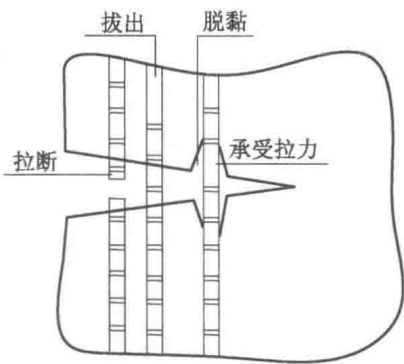


图 1-1 纤维作用及失效方式

1.2.2.2 聚丙烯纤维性能参数对抗裂性能的影响

1. 纤维几何特征

单丝纤维的几何特征包括:纤维的长度、长径比、横截面形状、表面粗糙度等。纤维的长度、表面粗糙度,主要是考虑纤维在水泥基材料中的分散情况,对纤维水泥基复合材料工作性有影响。而且纤维长度存在临界值,影响纤维的作用及失效方式。纤维的长径比、表面粗糙度,影响纤维-水泥基材料的界面性能。

2. 纤维在水泥基材料中的分布与取向

一般纤维在水泥基材料中的分布要均匀,但也可以根据需要在关键部位加密。纤维在水泥基材料中的取向反映了纤维的利用效率,是指在作用力方向上纤维投影长度的总和与纤维实际长度的总和的比值,通常用取向系数^[13] η_0 表示,取值为:一维取向, $\eta_0=1$;二维取向, $\eta_0=0.637$;三维取向, $\eta_0=0.405$ 。

3. 纤维体积掺量、纤维比表面积与单位体积复合材料中纤维根数

纤维的体积掺量是指,纤维的体积占复合材料体积的百分率,用 V_f 表示。根据不同掺量纤维对收缩变形的影响及对抗裂性的影响,得到合理的纤维掺量范围。附表中 139 次聚丙烯纤维试验掺量的统计结果见表 1-1。

聚丙烯纤维掺量在 $0.8 \sim 1.0 \text{ kg/m}^3$ 之间采用的频率为 54.7%。当纤维掺量在这个范围内时,混凝土的抗压强度变化不多,劈裂抗拉强度增加较多,特别是混凝土收缩变形降低较多,因此,可以作为聚丙烯纤维合理掺量的取值范围。

表 1-1 聚丙烯纤维掺量的统计

掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.5 及 以下	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6 及 以上	合计
频数	9	8	9	17	45	14	6	9	2	3	6	11	139
频率/%	6.5	5.8	6.5	12.2	32.4	10.1	4.3	6.5	1.4	2.2	4.3	7.9	100.0

经研究发现,单纯考虑纤维体积掺量并不能完全表征纤维的作用效果,比如相同掺量时,纤维直径粗细不同,表现的作用效果也不同,因此 Krenchel 提出纤维比表面积参数,即单位体积的纤维水泥基材料中纤维的表面积,用 FSS 表示为^[14]

$$FSS = \frac{P_f}{A_f} V_f \quad (1-1)$$

式中, P_f 是单根纤维横截面的周边尺寸, mm ; A_f 是单根纤维的横截面面积, mm^2 ; V_f 是纤维的体积率。

单位体积中纤维的根数 N 可以表示为

$$N = \frac{V_f}{A_f l_f} V_f \quad (1-2)$$

式中, l_f 是单根纤维的长度, mm。

1.2.2.3 聚丙烯纤维水泥基材料基本性能对抗裂性的影响

1. 工作性

聚丙烯纤维水泥基材料内在品质主要体现在工作性的改善方面。混凝土拌和物的工作性包括:混凝土的坍落度、泌水率、密度、拌和物的均匀性、含气量等指标。

关于聚丙烯纤维对混凝土坍落度的影响,17次聚丙烯纤维混凝土坍落度试验统计结果表明:掺入聚丙烯纤维降低了混凝土坍落度,降低的幅度为2.6%~39.3%,而与膨胀剂同时使用时,坍落度降低更是高达63.6%^[16]。分析原因,一方面因为聚丙烯纤维增加了混凝土的稠度;另一方面是由于掺加膨胀剂,发生快速的水化反应形成钙矾石和水化硅酸钙等水化产物时,混凝土逐步变稠,两者共同作用造成了坍落度的损失过大。如果坍落度损失过大,造成了拌合、运输、浇注、捣实和抹面等工作困难时,可以适当增加减水剂^[16],而不能加水^[17],以免混凝土抗压、抗拉、抗折强度的损失。

关于聚丙烯纤维对混凝土泌水率的影响,4次试验结果表明:聚丙烯纤维混凝土无泌水现象或泌水率大幅度降低;孙海燕等^[18]的试验进一步表明:如果聚丙烯纤维在混凝土中分散不均匀,结团,反而会造成混凝土泌水率的提高;分散均匀的聚丙烯纤维混凝土泌水率可以降低34.6%~57.7%。因此,需要规范聚丙烯纤维混凝土的施工工艺,保证聚丙烯纤维在混凝土中的良好分散性,这是聚丙烯纤维在工程中达到作用效果的前提条件。

关于聚丙烯纤维对混凝土含气量的影响,6次试验中,4次试验结果表明:聚丙烯纤维混凝土含气量增加幅度为9.8%~65.2%;2次试验结果部分增加、部分降低,其原因是掺加了粉煤灰掺合料,造成混凝土含气量降低^[18,19],含气量的增加或降低取决于聚丙烯纤维和粉煤灰的共同作用。

由上述研究结果可知:目前,对聚丙烯纤维混凝土的工作性研究,坍落度试验较多,其他指标试验较少,但是结果是确定的,即掺入聚丙烯纤维降低了混凝土坍落度、减少了泌水率、增加了含气量。坍落度如果损失过大,可掺加减水剂解决。含气量的增加降低了混凝土的抗压强度。泌水率的降低,说明聚丙烯纤维混凝土的保水性较好,可以减少因失水造成的混凝土的收缩;同时也说明混凝土拌合物的分层、离析现象减少,混凝土能够较充分地捣实,这是获得高强度的必要条件,因此可以提高抗裂性。对聚丙烯纤维砂浆工作性研究资料未能收集到,需要进行必要的补充试验,进一步验证聚丙烯纤维对水泥基材料内在品质的改善作用,同时要研究这种改善作用的机理。

2. 孔结构

白国庆^[20]、孟彬^[21]认为聚丙烯纤维的掺入可以提高混凝土中小于200 μm 的气孔率10%以上,降低混凝土中大于200 μm 的气孔率。其原因在

于聚丙烯纤维能够降低混凝土的泌水率,同时乱向分布的纤维分割了混凝土中的大孔,将混凝土中的孔细化,减少了混凝土的原始缺陷,这与工作性研究结果是一致的。

前文已经明确聚丙烯纤维混凝土含气量增加对混凝土抗压强度起到削弱作用,但是考虑到聚丙烯纤维细化气孔对混凝土抗压强度又起到增强作用,因此,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度的提高或是降低是这两方面因素综合作用的结果。

1.2.2.4 聚丙烯纤维水泥基材料力学性能对抗裂性的影响

据统计,由变形为主引起的混凝土结构物裂缝约占 80%,由荷载为主引起的裂缝约占 20%^[1]。单纯的收缩或膨胀变形并不会产生裂缝,只有收缩或膨胀变形受到限制的时候^[4]才会产生裂缝。实际工程中,混凝土总会受到钢筋、模板、基底和相邻构件的约束;或者同一构件不同部分的收缩差异,也会产生约束作用。当约束产生的拉应力超过混凝土的抗拉强度,或者约束产生的拉伸应变超过了混凝土允许极限应变的时候,混凝土将产生裂缝^[5]。因此,水泥基材料的抗裂性评价的力学指标主要是抗拉强度和极限拉伸应变。

对于纤维水泥基材料,同样可以采用抗拉强度和极限拉伸应变评价其抗裂性,即强度指标和韧性指标。如图 1-2 所示的三种材料的应力-应变曲线中,材料 1 抗拉强度高,但是极限拉伸应变变小;材料 2 极限拉伸应变大,但是抗拉强度低。材料 1、2 的抗裂性均较差,只有抗拉强度和极限拉伸应变都较大的材料 3 的抗裂性才是最好的。因此,单独考虑抗拉强度指标和极限拉伸应变值指标均不能完全反映纤维水泥基材料的抗裂能力。

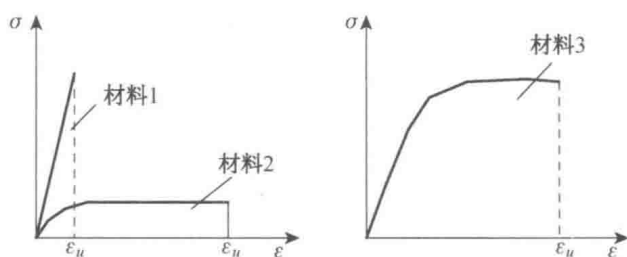


图 1-2 三种材料应力-应变曲线

1. 聚丙烯纤维混凝土强度

国内外对聚丙烯纤维混凝土的抗压强度、抗拉强度、弯拉强度、抗折强度、抗剪强度进行研究^[22-24]。附表中 36 次聚丙烯纤维混凝土抗压强度试验结果、25 次聚丙烯纤维混凝土抗折强度试验结果、24 次聚丙烯纤维混凝土抗拉强度试验结果见表 1-2。

表 1-2 聚丙烯纤维对混凝土强度影响的统计

强度指标	统计项	提高	降低	不确定	合计
抗压强度	频数	19	12	5	36
	频率/%	52.8	33.3	13.9	100.0
抗折强度	频数	18	2	5	25
	频率/%	72.0	8.0	20.0	100.0
抗拉强度	频数	16	5	3	24
	频率/%	66.7	20.8	12.5	100.0

聚丙烯纤维混凝土抗压强度约 52.8% 的统计结果是提高的, 47.2% 的结果是降低和不确定。由前述聚丙烯纤维混凝土工作性试验结果可知, 掺入聚丙烯纤维增加了混凝土的含气量, 可能会降低混凝土的抗压强度; 同时, 掺入聚丙烯纤维细化了混凝土内部孔隙, 会提高混凝土的抗压强度; 而且, 掺入聚丙烯纤维跨越微裂缝, 增加了混凝土的整体性。因此, 三者综合作用的结果, 决定了聚丙烯纤维混凝土相对未掺纤维的混凝土抗压强度是提高还是降低, 这个结论也被表 1-2 的聚丙烯纤维混凝土抗压强度试验结果证实。

掺入聚丙烯纤维的混凝土抗折强度、抗拉强度提高的比例约为 72.0%、66.7%, 提高的比例较高, 但是提高的机理尚不清楚。抗拉强度多采用劈裂抗拉强度, 较少采用直接拉伸抗拉强度。Simon^[24] 的直接拉伸试验结果表明抗拉强度提高了 48.56%, 邓宗才等^[25] 进行的直接拉伸试验抗拉强度比基准混凝土提高 20%。提高的原因是当混凝土达到极限抗拉强度后, 纤维与水泥基材料的界面黏结力阻止裂缝的进一步扩展, 因聚丙烯纤维的抗拉强度很高, 将拉应力传至未开裂的混凝土基材上, 直至邻近水泥基材料的应力达到极限抗拉强度产生新的裂缝, 如此进行下去产生“多缝开裂”, 使结构内部拉应力逐渐趋于均匀分布, 并最终主要由纤维承担。但是从邓宗才等^[25] 的直接拉伸试件的断口来看, 并未发现“多缝开裂”现象, 同时将抗拉强度的提高归结为高抗拉强度纤维承受拉应力的结果, 似是不妥, 因为以 100 mm×100 mm 的试件为例, 假设分布间距 7 mm 的聚丙烯纤维, 截面上总共分布有约 256 根纤维, 聚丙烯纤维的抗拉强度一般为 500 MPa, 直径 19 μm, 因此能够承受的拉伸荷载为 0.14 N, 换算到整个截面上, 所能提高的混凝土抗拉强度更是微乎其微。所以抗拉强度提高应有其他更主要原因, 有待进一步研究。

2. 聚丙烯纤维混凝土韧性

王铁梦^[1] 提出了“韧性”指标, 即使材料达到破坏时单位体积所需要的功。其含义是材料不仅须有足够的抗拉强度, 而且还须具有良好的变形能力。通常把材料应力-应变曲线(从加荷直至完全破坏的全过程)与应变轴所包围的面积称为材料的韧性, 可以通过直接拉伸试验测定和评价纤维混凝土的韧性。

如果直接拉伸试验难以获得材料的应力-应变曲线, 也可以通过弯曲试验研究