

---

# 纤维对混凝土抗渗性能及硬化水泥浆体孔结构的影响

邓世汉<sup>1</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 唐傲泽<sup>3</sup>, 许碧莞<sup>4</sup>

(1. 湛江港集团有限公司, 广东 湛江 524027; 2. 南方工程建设局, 广东 廉江 415900; 3. 中交第二航务工程勘察设计院, 广州 510260; 4. 同济大学 材料科学与工程学院 上海 200092)

**摘要:** 本文试验研究了纤维掺量 0.9kg/m<sup>3</sup>时, 纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维对混凝土抗渗性能的影响。试验结果表明: 这两种纤维均可以明显改善混凝土的抗渗性, 改善程度均在 80% 以上; 且纤维素纤维 UF500 的改善效果较聚丙烯纤维高出 16%。结合压汞法对纤维掺量 0~0.3% (质量百分比) 的各 28d 硬化水泥浆体的孔结构进行了测试与分析, 探讨纤维对硬化水泥浆体孔结构的影响。结果表明: 相同纤维掺量下, UF500 纤维对水泥浆体孔隙率、平均孔径以及孔径分布的改善效果都明显高于聚丙烯纤维; 综合孔结构参数测试结果, 试验掺量范围内纤维素纤维 UF500 的最佳掺量为 0.23%, 聚丙烯纤维以 0.15% 最佳。

**关键词:** 混凝土, 抗渗性, 水泥浆体, 孔结构, 纤维素纤维, 聚丙烯纤维.

## Influence of Fiber on Concrete Permeability and Pore Structure of Hard Cement Paste

Deng Shihan<sup>1</sup>, Zhang Jie<sup>2</sup>, Tang Jingze<sup>3</sup>, Xu Biwan<sup>4</sup>

(1. Zhanjiang Port Group Co., Ltd., Guangdong Zhanjiang 524027; 2. South Construction Inc., Guangdong Lianjiang 415900; 3. The Second Investigation & Design Institute, CTE, Guangzhou 510260; 4. Tongji University School of Material Science and Engineering, Shanghai 200092)

**Abstract:** Influence of cellulose fiber UF500 and polypropylene fiber on concrete permeability at the dosage of 0.9kg/m<sup>3</sup> was investigated. Results show that both of these fibers can significantly improve concrete permeability at a degree more than 80%. Furthermore, improvement of UF500 fiber is 16% better than that of polypropylene fiber. Pore structures of 28d hard cement paste (HCP) with fiber dosage from 0 % to 0.3%, were determined by MIP( Mercury intrusion porosimetry ). Influences of fiber type and dosage on pore structures of HCP were analyzed. It shows that improving effects of UF500 on porosity, mean diameter and pore size distribution are all obviously higher than that of polypropylene fiber. In this test, the most suitable dosage of UF500 is 0.23%, while it is 0.15% for polypropylene fibers.

**Keywords:** concrete, permeability, HCP, pore structure, cellulose fiber, polypropylene fiber.

虽然纤维增强混凝土作为新型复合材料的发展仅始于 20 世纪 70 年代, 然而经过这短短几十年的发展, 不论是纤维的品种、纤维增强理论发展, 还是纤维混凝土的推广应用都有了十足的长进。众多试验研究和工程实践都表明<sup>[1-3]</sup>: 掺入混凝土中的纤维不但具有增强、增韧的作用, 而且其阻裂、限缩, 以及改善混凝土基体孔结构的作用可以明显提高混凝土的抗渗性。混凝土良好抗渗性对地下结构、大坝、水渠、污水处理池、码头、跨海大桥等工程应用具有重要意义。然而不同的纤维对混凝土性能的影响程度存在差异, 主要取决于纤维的品种、纤维掺量、纤维长径比、纤维在混凝土基体中的分布情况, 纤维混凝土搅拌工艺, 以及混凝土受力情况等因素<sup>[2,4]</sup>。

众所周知, 硬化水泥浆体是一种多孔材料, 各种尺寸的孔或是充满或是部分填充于水化产物中, 是水泥硬化体中最重要的非固相微结构元。混凝土中孔隙率大小、孔径分布、孔形貌特征以及不同尺寸的孔在空间的排布情况都会对材料的强度、渗透性、导热性、吸水性等宏观性能有直接的影响。就混凝土渗透性而言, 绝大多数对混凝土有害的水、溶液或气体等介质都是通过混凝土的孔隙进入混凝土内部而造成破坏的。因此, 对硬化水泥浆体孔结构的深入研究, 将有利于更好地对混凝土宏观抗渗性能进行控制优化。

本文选取两种不同品种纤维, 即纤维素纤维 UF500、合成纤维聚丙烯纤维对混凝土渗

透性能影响进行对比研究，并结合压汞法就纤维对硬化水泥浆体孔结构的影响进行测试研究。

## 1. 试验原材料与方法

### 1.1 试验原材料与配比

试验原材料：水泥：海豹牌 P·042.5 普通硅酸盐水泥，其主要化学成分见表 1，主要物理性能指标见表 2。细、粗集料：细集料采用黄砂，细度模数 2.4；粗集料为 5~25 连续级配碎石。减水剂：MAPEI SP-1 聚羧酸盐超级减水剂，砂浆减水率 25%。纤维：生态纤维素纤维 UF500（美国 Buckeye 公司产），聚丙烯纤维 PP，具体纤维性能指标见表 3。

表 1 水泥化学组成 %

Tab.1 cement chemical compositions %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O
20.52	7.63	60.14	2.59	2.60	2.53	0.61	0.32	0.23

表 2 水泥物理性能

Tab. 2 Cement physical properties

密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	0.08mm 筛余/%	比表面积 /(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
			3d	7d	28d	3d	7d	28d
3.12	0.96	427	6.33	8.61	10.6	33.3	59.9	68.4

表 3 纤维特性

Tab.3 Fiber properties

纤维类型	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	纤维长度/mm	纤维直径/um
UF500	750	>8 000	2.1	16
PP	330	5 500	10. 0	40

试验配比：

(1) 混凝土：采用上述试验原材料，各混凝土选用相同的基体配比，即： $m(c):m(s):m(a):m(w)=400:720:990:190$ 。外加剂掺量为  $4.0\text{kg}/\text{m}^3$ ；纤维掺量均为  $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 水泥浆体试样：将水泥分别与各个掺量的 UF500、PP，按水胶比 0.29 拌制成净浆（无掺外加剂）。净浆中纤维掺量分别选取水泥质量的 0、0.15%、0.23%、0.3%，即相应混凝土中掺量分别为 0、0.6、0.9、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 1.2 试验方法

### (1) 抗渗性能测试

抗渗性能试验采用一次加压法,即一次加压到 1.2MPa,持压 8h,然后降压,取出试件,沿圆台体轴中心劈开,量得 10 点的渗水高度,并取其平均值。

### (2) 微孔结构测试

用美国 Quantachrome 公司生产的自动扫描-60 型压汞仪(mercury intrusion porosimetry, MIP)测量 28d 硬化水泥浆体的孔结构,测孔区间为 1.778~2134nm。结合相应的分析软件分析各样品的孔隙率、平均孔径和孔径分布等孔结构特征参数。

## 2. 试验结果与讨论

### 2.1 纤维对混凝土抗渗性能的影响

纤维掺量  $0.9\text{kg/m}^3$ , 纤维素纤维 UF500 混凝土、聚丙烯纤维混凝土及基准混凝土的抗渗性能情况如图 1 所示。加压 1.2MPa,持续 8h 后,基准混凝土的渗透高度为 12.0cm,聚丙烯纤维混凝土为 2.4cm,较基准混凝土降低了 80%;而 UF500 纤维混凝土的渗透高度仅为 0.5cm,较基准混凝土降低了 96%,较聚丙烯纤维混凝土降低了 16%。可见,纤维能够明显改善混凝土的渗透性能,且纤维素纤维 UF500 的改善效果要明显高于聚丙烯纤维。这主要是因为纤维的掺入增加了拌合料的刚性,减少集料沉降,减少了泌水通道的形成,增加了流体由泌水通道进入混凝土内部的难度<sup>[5]</sup>;此外,纤维还能限制混凝土基体收缩,阻止微裂缝的形成与扩展,并且还能改善孔结构,增加混凝土基体的密实程度,从而提高其抗渗能力;而纤维品种对混凝土抗渗性能改善程度的差异主要与纤维本身的特性以及其对混凝土水泥石基体孔结构影响有关。

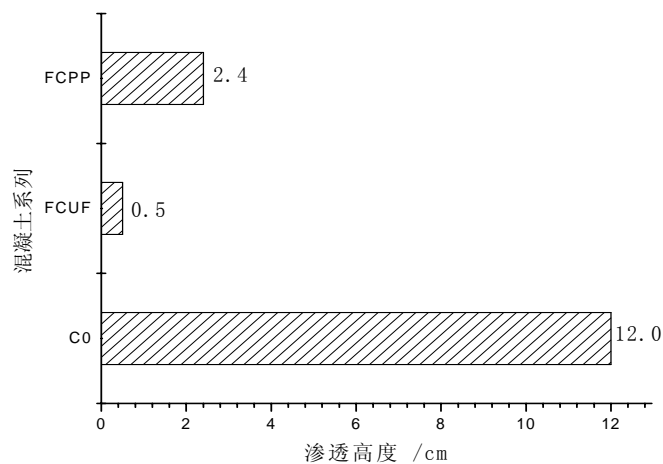


图 1 基准混凝土、UF500 纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土抗渗性

目前国内已有较多关于聚丙烯纤维混凝土性能的研究,而对纤维素纤维对混凝土性能影响的研究还较少。N. Bantial 等人<sup>[3]</sup>系统研究了混凝土试件在不受压力荷载、受不同压力荷载作用下,纤维素纤维对混凝土的抗渗性能的影响。其研究表明:在不受压力荷载作用下,纤维素纤维的掺入能够明显降低混凝土的渗透性能,如图 2 所示;在受压力荷载作用下,当压力从 0 增加到  $0.3f_c$  ( $f_c$  为试件的抗压强度)时,素混凝土与纤维素纤维混凝土的渗性都明显降低;随着压力的增加并超过一临界值时,素混凝土的渗透性快速明显增加,纤维素纤维混凝土的渗透性虽然也增加,但是其抗渗性还是要优于相应不加压力荷载的情况,如图 3 所示,这对混凝土在实际应用中很有价值,因为混凝土构筑物在使用时基本是受荷载

的，所以纤维素纤维的添加在抗渗性方面很好地确保了构筑物的设计安全。N. Banthial<sup>[3]</sup>认为纤维素纤维对混凝土抗渗性的改善，除了一般纤维所具有的减少泌水通道形成，阻裂限缩功效外；其独特的亲水性能使纤维素纤维在混凝土拌制过程中能够吸收并保有部分水分，在混凝土内部湿度下降的情况下，能再将水分释放出来，起到减少混凝土早期收缩的功效，如此，纤维素纤维与水泥浆体形成的牢固粘结使其在试件受压超过某临界值时的抑止裂缝扩展效应还很明显。

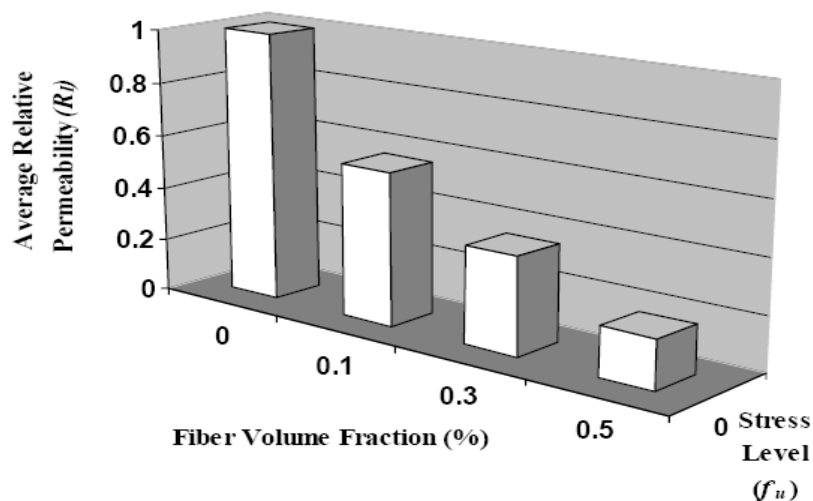


图2  $f_u=0$  纤维素纤维对混凝土渗透性能的影响<sup>[3]</sup>

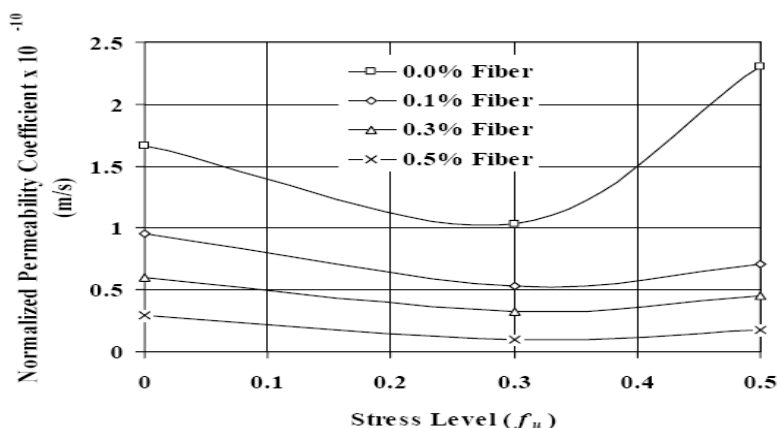


图3 各个纤维掺量下，纤维素纤维混凝土抗渗性随应力变化情况<sup>[3]</sup>

## 2.2 纤维对硬化水泥浆体孔结构的影响

F.H. Wittman 在 1980 第七届国际水泥化学会议中提出了孔隙学的概念，用于研究孔结构。根据 F.H. Wittman 的观点，孔结构内容主要包括：孔隙率、孔径分布和孔几何学等。表 4 为 28d 硬化基准水泥浆体、UF500 纤维水泥浆体、聚丙烯纤维水泥浆体的孔隙率、平均孔径测试结果。

表 4 28d 硬化水泥浆体孔结构参数

试样编号	纤维掺量/%	孔隙率 $(cc \cdot g^{-1})$	平均孔径/ nm
P0	0	0.0293	5.84

PUF1	0.15	0.0120	4.50
PUF2	0.23	0.0100	3.16
PUF3	0.30	0.0160	3.40
PP1	0.15	0.0194	6.876
PP2	0.23	0.0399	8.083
PP3	0.30	0.0635	8.442

### 2.2.1 硬化水泥浆体的孔隙率

水泥石的孔隙率是最重要的孔结构参数之一，其不仅关系到混凝土的强度力学性能，而且与抗渗性能密切相关。图 1 为水化 28d 纤维掺量对硬化水泥浆体孔隙率的影响。结合表 4 和图 1，可以看到，与基准水泥净浆试样相比，聚丙烯纤维仅在掺量 0.15% 时，孔隙率明显下降，其下降幅度约为 33.79%；而后随着纤维掺量的增加而明显增大，掺量 0.23% 时，孔隙率已高出基准试样 31.62%。而 UF500 纤维的掺入使水泥浆体孔隙率下降 45.39% 以上，其中以掺量 0.23% 最为明显。相同纤维掺量下，纤维素纤维 UF500 水泥浆体孔隙率要比聚丙烯纤维硬化水泥浆体低 38.14% 以上。

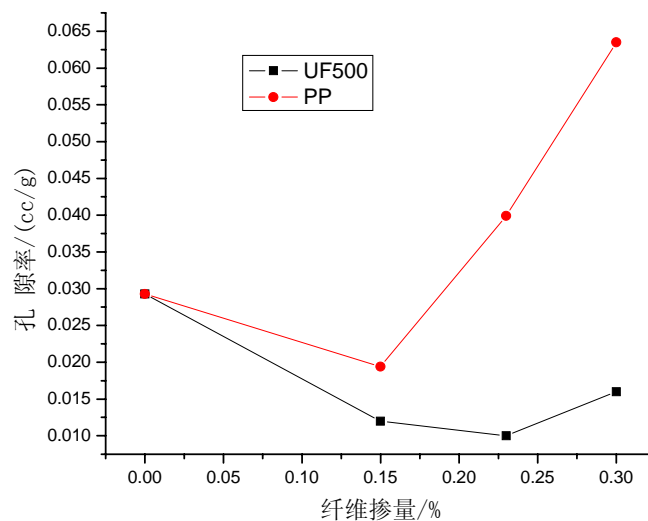


图 4 纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维水泥浆体孔隙率

### 2.2.2 硬化水泥浆体的平均孔径及孔径分布

混凝土材料的性能不仅与其孔隙率有关，而且和孔的形状、孔径分布以及孔在空间的位置有关。当混凝土材料的孔隙率相近时，其孔径大小、孔径分布就可能决定材料的宏观力学和耐久性能。本试验以硬化水泥浆体平均孔径为代表进行分析。图 2 为纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维净浆平均孔径随纤维掺量变化情况。结合表 1，可以发现：UF500 水泥浆体平均孔径的影响趋势与对孔隙率的影响基本类似，即纤维的掺入均使浆体平均孔径明显下降，下

降幅度约在 22.94%以上；其中掺量 0~0.23%时，平均孔径随纤维掺量增加而降低，而在掺量 0.30%时则略微有所回升。聚丙烯纤维水泥浆体的平均孔径随纤维掺量的增加而增大，增加幅度在 17.74%以上。相同纤维掺量下，纤维素纤维 UF500 水泥浆体平均孔径均明显低于聚丙烯纤维水泥浆体，且掺量越大，二者差距越明显。

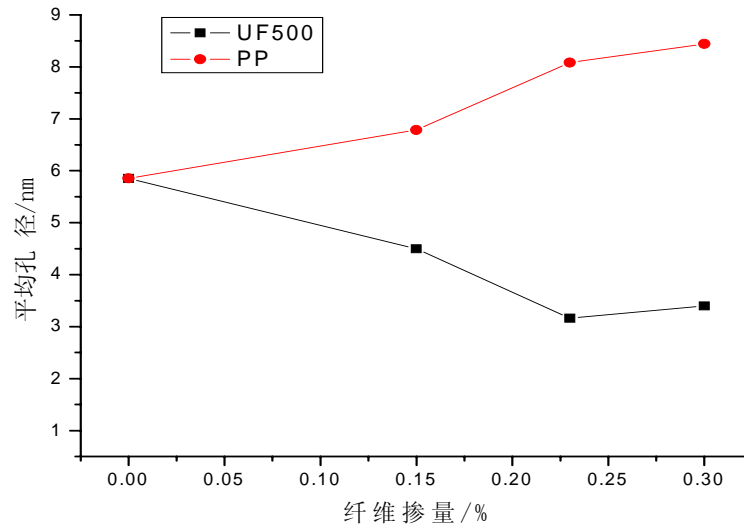


图 5 纤维掺量对纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维水泥浆体平均孔径影响

如前所述，混凝土材料基体孔径分布也是影响材料宏观性能的主要因素。根据吴中伟院士<sup>[6]</sup>对孔径的划分，即多害孔 (>200nm)、有害孔 (200~50nm)、少害孔 (50~20nm)、无害孔 (<20nm)，纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维浆体孔径分布情况如图 3 所示。由图可见，纤维的掺入可以使基准水泥浆体的孔径分布朝少害孔与无害孔方向发展，优化孔径分布；试验掺量范围内，UF500 纤维在掺量 0.23%时，小于 50nm 的少害、无害孔量最大，表明其对孔结构的改善效果最好。聚丙烯纤维虽然也能改善孔尺寸分布，但效果较不明显，且随掺量增大而减弱。相同纤维掺量下，聚丙烯纤维的改善效果不如 UF500 纤维明显。

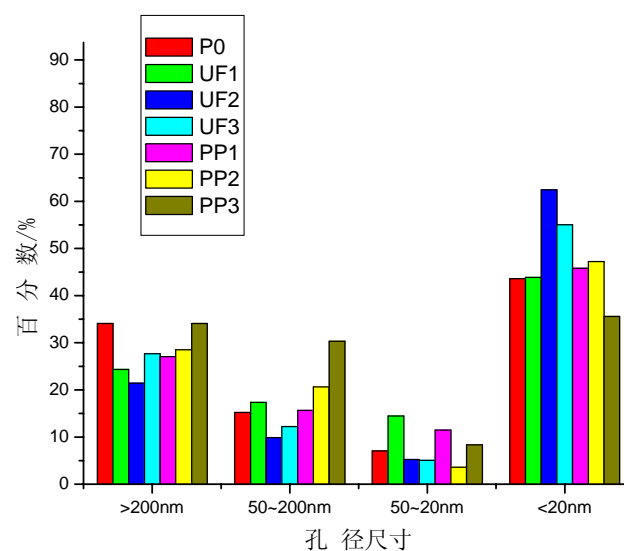


图 6 纤维素纤维 UF500、聚丙烯纤维水泥浆体孔径分布

---

结合混凝土渗透性能的测试结果与纤维水泥浆体孔隙率、平均孔径以及孔径分布情况可以看出,纤维素纤维 UF500 及聚丙烯纤维对混凝土抗渗性能的影响规律与对孔结构的改善情况基本类似,即纤维素纤维的改善效果要明显优于聚丙烯纤维。这与纤维本身的特性相关,纤维素纤维 UF500 具有亲水性,在水中易分散,同时还具有一定的保水性,能够在因水泥水化或外界环境因素影响造成浆体内部相对湿度降低的情况下,释放其保有的水分促进水泥进一步水化,减少孔隙,细化浆体孔径,其亲水特性还能增强水泥基体对纤维的握裹作用;而聚丙烯纤维呈憎水性,长径比较大,因此其在浆体内部的分散情况要弱于纤维素纤维,且憎水特性使其容易在纤维和水泥基体之间存在较大水胶比的微界面,弱化其对混凝土孔结构以及抗渗性的整体改善。

### 3. 结论

(1) 纤维素纤维 UF500 和聚丙烯纤维均能提高混凝土的抗渗性能,提高幅度在 80% 以上。同时,纤维素纤维 UF500 混凝土的抗渗性比聚丙烯纤维混凝土提高 16%。

(2) UF500 纤维对孔隙率、平均孔径以及孔径分布的影响存在类似的规律性,即在掺量 0~0.23% 时,其均随掺量的增加而减小,而在掺量 0.30% 时,其值略微有所增大。

(3) 仅在掺量 0.15% 时,聚丙烯纤维浆体孔隙率比基准试样明显下降 33.79%;而后随掺量的增加,孔隙率随之显著增大。其平均孔径则随纤维掺量增加而增大,增长幅度在 17.74% 以上。聚丙烯纤维虽然可以起到改善孔径分布的效果,但效果较不明显,且随掺量增大而减弱。

(4) 无论混凝土抗渗试验,还是孔结构测试结构的结果都表明,试验掺量范围内,纤维素 UF500 的改善效果要明显优于聚丙烯纤维。纤维素纤维 UF500 的最佳掺量为 0.23%,聚丙烯纤维以 0.15% 最佳。

### 参考文献

- [1] 孙伟, 钱红萍, 陈苏惠. 纤维混杂及其与膨胀剂复合对水泥基材料性能的影响. 硅酸盐学报, 2000, 28 (2): 95-104.
- [2] 沈荣熹, 崔琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料. 中国建材工业出版社.
- [3] N. Banthia, A. Bhargava. Permeability of stressed concrete and of fiber reinforcement.
- [4] 华渊, 连俊英, 周太全. 长径比对混杂纤维增强混凝土力学性能的影响. 建筑材料学报, 2005 (1): 71-75.
- [5] Zollo, R.F., Ilter, J.A. and Bouchacourt, G.B., "Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete", *Proc. RILEM Symposium, FRC 86* (Ed. Swamy et al.), Vol. 1, 1986.
- [6] 吴中伟, 廉惠珍. 高性能混凝土, 北京: 中国铁道出版社 199