

文章编号:1007-9629(2000)01-0048-05

聚丙烯纤维水泥基复合材料
物理学性能研究(I)

——抗塑性干缩开裂性能*

48-52

马一平, 谈慕华

TLU-28-58
TLU-78-1

(同济大学混凝土材料研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 研究了采用不同工艺制作的3种不同几何形态的聚丙烯纤维在不同掺量情况下对水泥基材料抗塑性干缩开裂性能的影响。结果表明:(1)聚丙烯纤维几何形态对抗塑性干缩开裂性能有明显影响, 拉丝PP纤维效果最好, 膜裂II PP纤维次之, 膜裂I PP纤维最差;(2)聚丙烯纤维掺量对抗塑性干缩开裂性能也有较大影响。随纤维掺量增大, 抗塑性干缩开裂性能随之增强, 在一定实验条件下, 当拉丝PP纤维掺量(体积分数) $\geq 0.10\%$ 时, 可使水泥砂浆免于塑性干缩开裂。另外, 对纤维阻止塑性干缩开裂的机理也进行了分析和讨论。

水泥基复合材料

关键词: 聚丙烯纤维; 抗塑性干缩开裂性能; 水泥砂浆; 抗塑性干缩开裂的机理**中图分类号:** TU 528**文献标识码:** A

水泥混凝土材料是目前最大宗人造建筑材料, 然而其自身尚存在着一些缺陷, 如易于塑性干缩开裂、抗拉强度低、韧性差等, 这些限制了其在结构工程中更广泛的使用。针对水泥混凝土材料在硬化之前, 由于塑性干燥失水收缩造成的开裂现象, 人们进行了改善其性能的研究, 如 Soroushian 等^[1]研究了在水泥基材料中掺加聚丙烯膜裂纤维以及不同的表面修饰方法对材料塑性干缩开裂性能的影响; Grzybowski 和 Shah^[2]采用圆环法研究了掺加钢纤维和聚丙烯纤维对混凝土干缩裂缝宽度的影响; Wang 等^[3]用直接拉伸法研究了掺加芳纶、聚乙烯和聚丙烯纤维对水泥基复合材料抗拉强度的影响, 并用圆环法研究了纤维的抗塑性干缩开裂性能等。以上研究表明, 在水泥基材料中掺加纤维材料可在不同程度上改善其抗塑性干缩开裂性能等。

鉴于聚丙烯纤维在合成纤维中具有密度小、湿强度高、延伸率大、耐碱性好、价格低等^[4]特点, 笔者研究了通过不同生产工艺制作的3种不同几何形态的聚丙烯纤维在不同掺量情况下对水泥基复合材料抗塑性干缩开裂性能和力学性能的影响, 同时分析探讨了纤维阻止塑性干缩开裂的机理和纤维对水泥基材料力学性能的影响机理。本文是关于抗塑性干缩开裂性能的研究, 有关力学性能部分的研究将在本文续文中刊出。

1 实验

1.1 实验原材料

水泥采用浙江德清中利达 425 普通硅酸盐水泥; 砂为黄砂、中砂; 聚丙烯纤维为东华大学提供的用膜裂工艺制作的聚丙烯膜裂 I 型纤维(简称膜裂 I PP 纤维)、聚丙烯膜裂 II 型纤维(简称膜裂 II PP 纤维)和用拉丝工艺制作的聚丙烯拉丝纤维(简称拉丝 PP 纤维)。3种聚丙烯纤维的外观形貌

收稿日期:1999-11-15

作者简介:马一平(1960-),男(回族),山东人,同济大学副教授

* 上海市教育委员会重点学科研究项目

及物理力学性能分别示于图 1、表 1。由图 1 可见,2 种膜裂纤维断面均为矩形,其基本单元断面的长·宽约 $320\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$,它们的差别在于膜裂 I PP 纤维基本单元之间牵连严重,而膜裂 II PP 纤维基本单元之间分离较好。拉丝 PP 纤维断面为圆形,直径约为 $43\ \mu\text{m}$,3 种聚丙烯纤维的长度均为 15 mm 左右。

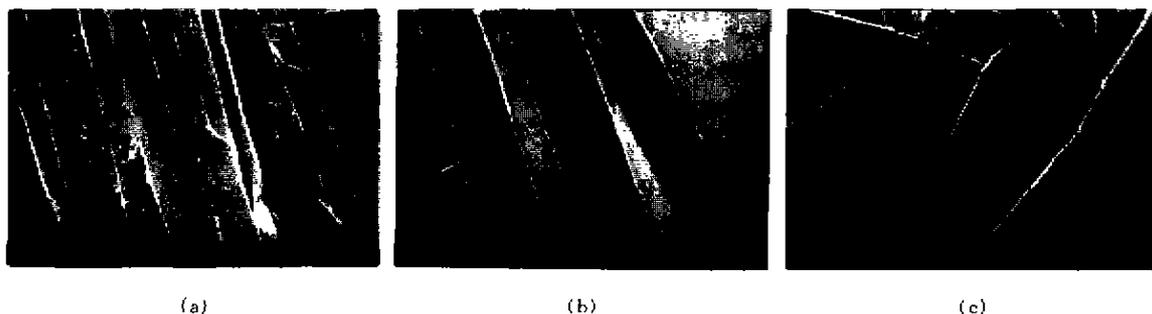


图 1 3 种聚丙烯纤维的外观形貌

Fig. 1 SEM photos of three polypropylene fibres

(a) Fibrillated film I PP fibre; (b) Fibrillated film II PP fibre; (c) PP fibre by drawing wire

表 1 聚丙烯纤维的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of polypropylene fibres

Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Tensile strength/MPa		Elongation/%	Young's modulus/GPa	Melting temperature/ $^{\circ}\text{C}$
	Dry	Wet			
0.9	400	400	8	8	165

1.2 塑性干缩开裂实验方法

塑性干缩开裂实验采用 $914\ \text{mm} \times 610\ \text{mm} \times 19\ \text{mm}$ 的木模,详见文献[5],采用砂浆搅拌机对水泥:砂:水 = 1:1.5:0.5(质量比)的砂浆搅拌约 3 min(对于纤维砂浆则同时加入纤维),然后将拌和料沿木模边缘螺旋式向试模中心进行浇注,直至拌和料自动流满整个木模,立即用刮平长木条沿试模长边快速刮平试件表面。成型后即打开位于试模短边的风速约为 $5\ \text{m/s}$ 的电风扇,并开启位于试模长边两边上方约 1.5 m 处的 1 000 W 碘钨灯,光照 4 h 后关灯,风吹 24 h 后关闭电风扇。采用自制 3.2,1 mm 塞尺测量裂缝宽度,按裂缝宽度分段测量裂缝长度 l_i ,并与文献[5]列出的裂缝宽度权值 A_i 一起计算塑性干缩开裂权重值 W : $W = \sum A_i \cdot l_i$ 。 W 反映了塑性开裂的总长度,以 cm 计,以拍照形式记录试件开裂形貌状况。

2 实验结果及讨论

2.1 聚丙烯纤维砂浆抗干缩开裂实验结果

图 2 为塑性干缩开裂权重值随纤维品种、纤维掺量(体积分数,下同)的变化情况,图 3 为不同纤维品种、不同纤维掺量时纤维砂浆塑性干缩裂缝长度按裂缝宽度分布情况。

由图 2 可见,在基准砂浆中掺加聚丙烯纤维后,除掺加 0.05% 膜裂 I PP 纤维之外,纤维砂浆塑性干缩开裂权重值均出现不同程度的减小,减小幅度在 2.2% ~ 100%。在纤维品种中,膜裂 I PP 纤维抗塑性干缩开裂效果不如膜裂 II PP 纤维,拉丝 PP 纤维的抗塑性干缩开裂效果最好;纤维掺量对纤维抗塑性干缩开裂效果

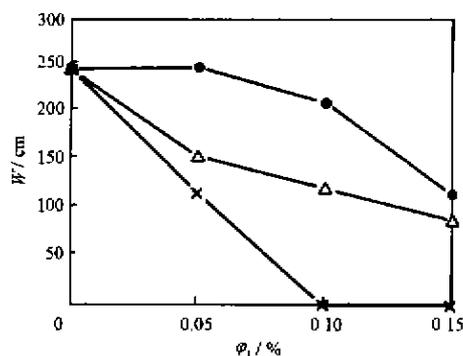


图 2 塑性干缩开裂权重值随纤维品种、掺量变化情况

Fig. 2 Varying of plastic shrinkage cracking weighted value with fibre type and fibre addition

●—Fibrillated film I PP fibre;
 △—Fibrillated film II PP fibre;
 ×—PP fibre by drawing wire

有很大影响,随纤维掺量增加,纤维砂浆塑性干缩开裂权重值下降,其中拉丝 PP 纤维当 $\varphi_f \geq 0.10\%$ 时,纤维砂浆塑性干缩开裂权重值下降为 0,即具有真正抗塑性干缩开裂效果.结合纤维品种和掺量可见,掺加 0.05% 拉丝 PP 纤维,塑性干缩开裂权重值下降幅度约为 52.5%,而掺加 0.10% 膜裂 II PP 纤维时约为 49.4%,掺加 0.15% 膜裂 I PP 纤维时约为 51.3%,若以塑性干缩开裂权重值下降 50% 计,则拉丝 PP 纤维的抗塑性干缩开裂能力约为膜裂 II PP 纤维的 2 倍,约为膜裂 I PP 纤维的 3 倍.

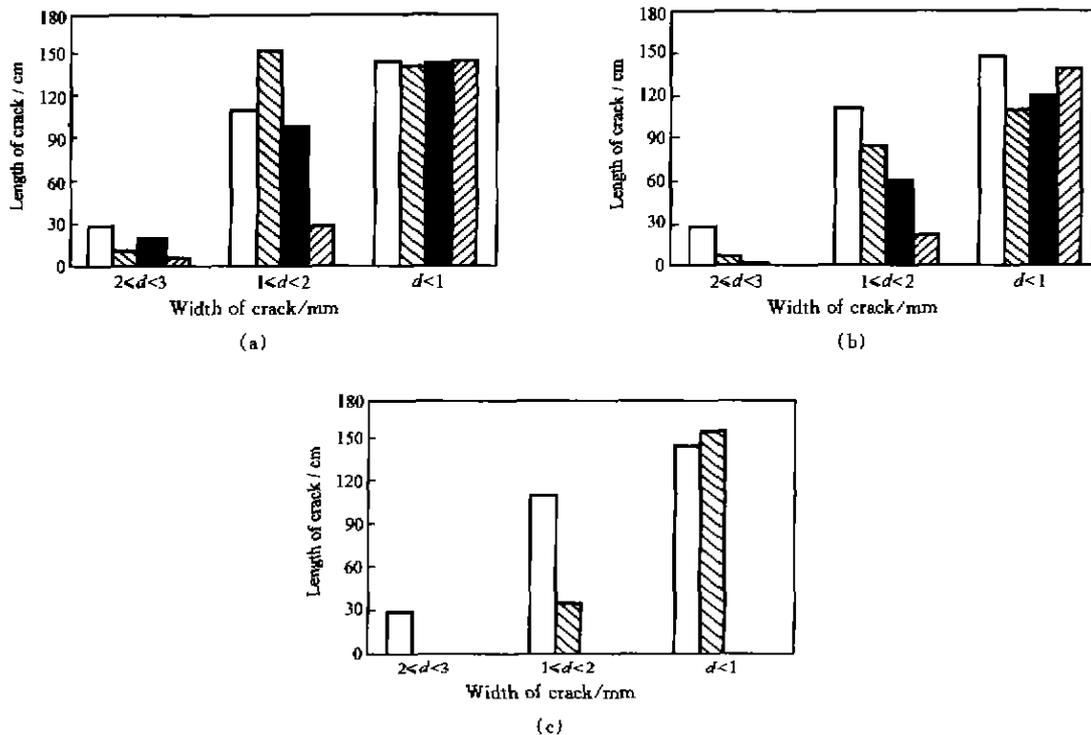


图3 不同纤维品种、掺量时纤维砂浆塑性干缩裂缝长度按裂缝宽度 d 分布情况
Fig.3 Distribution of plastic shrinkage cracking length with width of crack for different type of polypropylene fibre at different addition

(a) Fibrillated film I PP fibre; (b) Fibrillated film II PP fibre; (c) PP fibre by drawing wire

φ_f □—0; ▨—0.05%; ■—0.10%; ▩—0.15%

由图3可见,聚丙烯纤维具有不同程度的细化裂缝的作用,其中,拉丝 PP 纤维细化裂缝作用最为显著,当 φ_f 为 0.05% 时,2~3 mm 范围内的裂缝就已消失,1~2 mm 范围内的裂缝减少 67.5%,而小于 1 mm 的裂缝增加约 7.6%,当 $\varphi_f \geq 0.10\%$ 时,所有裂缝完全消失;而膜裂 II PP 纤维细化裂缝作用相对较小,但仍具有一定程度的细化裂缝作用,随着纤维掺量的增加,粗大裂缝数量减少,而细小裂缝则有所增加;3 个纤维品种中膜裂 I PP 纤维细化裂缝作用最小,但总的说来还是具有一些裂缝细化作用,如掺量为 0.05% 时,虽然塑性干缩开裂权重值较之基准砂浆未见减少,但仍可看出其在 2~3 mm 范围内的裂缝减少了约 62.4%,当掺量增加到 0.15% 时,其细化裂缝的作用才愈加明显.由此可见,要选择合适的纤维品种,掺入足量的纤维才能起到较好的抗塑性干缩开裂效果.图 4 示出部分试件塑性干缩开裂状况.

2.2 聚丙烯纤维抗塑性干缩开裂机理探讨

水泥基材料浇注成型后,由于水和水泥基材料的亲润性,在水分蒸发时,表层材料毛细管中便形成凹液面,而凹液面上表面张力的垂直分量形成了对管壁间材料的拉应力,此时材料处于塑性阶段,材料自身的塑性抗拉强度较低,若材料表层毛细管失水收缩产生的拉应力 σ_c 大于材料塑性抗拉强度 f_p ,即 $\sigma_c > f_p$,则材料表层出现开裂现象.

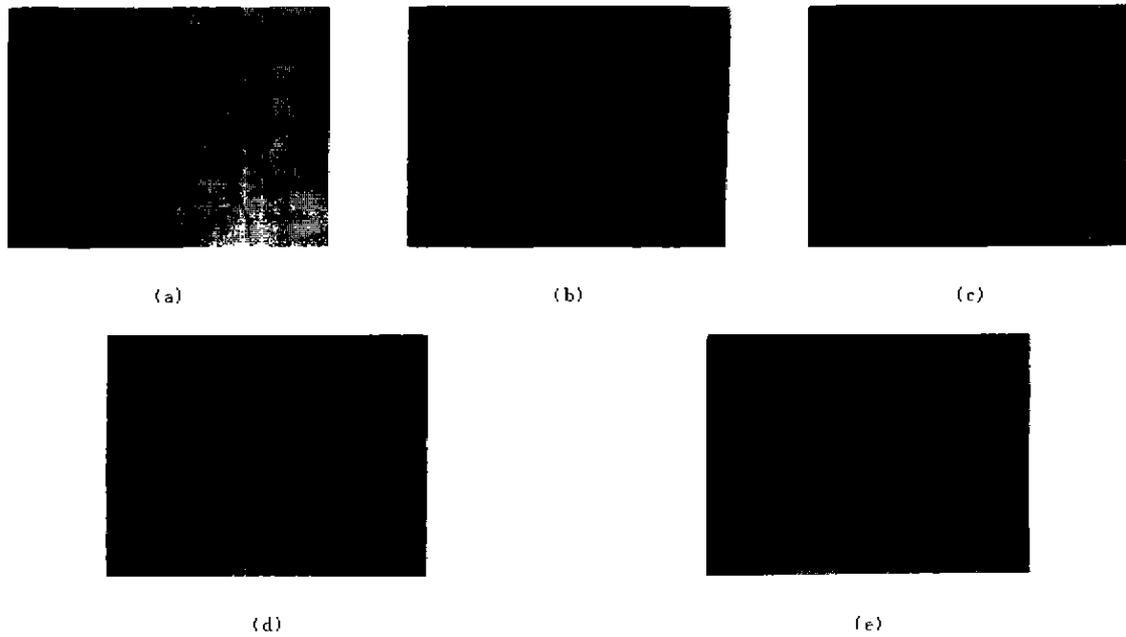


图 4 部分试件塑性干缩开裂状况

Fig. 4 Plastic shrinkage cracking states of some samples

(a) Blank mortar; (b) 0.05% fibrillated film I PP fibre mortar; (c) 0.05% fibrillated film II PP fibre mortar;
(d) Mortar with 0.05% PP fibre by drawing wire; (e) Mortar with 0.10% PP fibre by drawing wire

当在水泥基材料中掺入纤维材料后,由于此时表层材料中存在纤维材料,使得其失水面积有所减小,水分迁移较为困难,从而使毛细管失水收缩形成的毛细管张力有所减小.同时,低弹模的有机纤维相对于塑性浆体也成为高弹模纤维材料,依靠纤维材料与水泥基之间的界面吸附粘结力、机械啮合力等,增加了材料抵抗开裂的塑性抗拉强度,从而使 $\sigma_c \leq f_p$, 材料表层的开裂状况得以减轻,甚至消失.

根据上述分析可知,纤维阻止塑性干缩开裂原理似与水泥硬化体的纤维阻裂机理类似.由纤维硬化体的纤维间距理论^[6]可知,纤维三维乱向分布时,纤维平均间距 S 为

$$S = 13.8D \sqrt{1/\varphi_f} \quad (1)$$

即纤维平均间距随纤维体积分数 φ_f 增加而减小,随纤维直径 D 减小而减小.若以此理论来考虑纤维阻止塑性干缩开裂机理,则对于膜裂 I PP 纤维、膜裂 II PP 纤维和拉丝 PP 纤维来说,拉丝 PP 纤维的直径仅约为 $43 \mu\text{m}$,而前 2 种纤维即使仅按膜裂 PP 纤维基本单元计,其等效直径约为 $111 \mu\text{m}$,也明显大于拉丝 PP 纤维,故在相同纤维掺量情况下,拉丝 PP 纤维的纤维平均间距较小,因此其抗塑性干缩开裂能力明显高于膜裂 PP 纤维.考虑到膜裂 II PP 纤维基本单元的牵连程度小于膜裂 I PP 纤维,膜裂 II PP 纤维实际等效直径小于膜裂 I PP 纤维,因而 2 种膜裂纤维的抗塑性干缩开裂能力表现出一定差异.当纤维掺量增大时,对同一种纤维来说,其纤维平均间距随之减小,故纤维抗塑性干缩开裂能力相应提高;当纤维掺量增加到一定程度,会使纤维平均间距小于材料开裂时纤维临界平均间距,此时材料就不会开裂,在本实验条件下,拉丝 PP 纤维 $\varphi_f \geq 0.10\%$ 时材料不开裂的情况可能就属此理.对于不同直径的纤维,若纤维直径增大,则只有在更高纤维掺量情况下才能达到较小直径纤维在较低纤维掺量水平时的纤维平均间距.若照(1)式考虑,当纤维直径增大 1 倍时,则纤维掺量相应要增加 4 倍,由于本实验所采用的纤维截面形状不同,故出现了以塑性干缩开裂权重值下降约 50% 为考查标准时,膜裂 II PP 纤维掺量为 0.10%,膜裂 I PP 纤维掺量为 0.15% 就能达到拉丝 PP 纤维掺量为 0.05% 时的效果,这与(1)式规律不完全相符,其原因可能是由于膜裂纤维的截面是矩形,而拉丝纤维的截面是圆形,在同直径条件下,矩形纤维的面积要比

圆形纤维大一些,所以纤维与水泥基材料界面更容易产生粘结。

当纤维水泥基材料开裂后,由于纤维跨接在裂缝两侧,依靠纤维与基材的粘结及纤维自身的力学性能,使裂缝扩展速率得以延缓,开裂程度得以减小,从而使裂缝宽度减小、细化。

以上分析仅为初步分析,尚有待进一步深入研究。

3 结论

1. 聚丙烯纤维品种对水泥基材料抗塑性干缩开裂能力有明显影响,直径较小的拉丝 PP 纤维抗塑性干缩开裂能力最好,膜裂 II PP 纤维次之,膜裂 I PP 纤维最差。

2. 聚丙烯纤维掺量对水泥基材料抗塑性干缩开裂能力有较大影响,随纤维掺量增加,各种聚丙烯纤维的抗塑性干缩开裂能力均随之增加;在本实验条件下,拉丝 PP 纤维当其掺量 $\geq 0.10\%$ 时,可完全阻止水泥砂浆塑性干缩开裂现象的出现。

参 考 文 献

- [1] Soroushan Parviz, Mirza Faiz, Alhozaimy Abdulrahman. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(5): 553~560.
- [2] Grzybowski Miroslaw, Shah Surendra P. Shrinkage cracking of fibre reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(2): 138~148.
- [3] Wang Youjiang, Li Victor C, Backer Stanley. Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar[J]. Cement and Concrete Composites, 1990, (12): 29~40.
- [4] 钟玉昆编. 高分子合成材料[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 35~40.
- [5] 马一平, 李 昊, 谈慕华. 陶瓷-尼龙纤维水泥基复合材料力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(1): 43~48.
- [6] 沈荣熹. 纤维增强水泥复合材料(第三讲)[J]. 纤维水泥制品, 1984, (2): 15.

Effects of Polypropylene Fibres on the Physical and Mechanical Properties of Cement Based Composites (I) ——Plastic Shrinkage Cracking Resistance

MA Yi-ping, TAN Mu-hua

(State Key Lab. of Concrete Materials Research, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In present paper, the effects of different geometrical and different addition (by volume) of polypropylene fibres on plastic shrinkage cracking properties of cement based composites were investigated. The results showed that: (1) different geometrical states of polypropylene fibres had obviously effects on the plastic shrinkage cracking properties, and PP fibres by drawing wire had better effect than fibrillated film II PP fibre, the latter had better effect than fibrillated film I PP fibre; (2) the plastic shrinkage cracking resistance was increased with the increasing of polypropylene fibre addition. When the addition of PP fibre by drawing wire was equal or more than 0.10%, the fibre mortar could not crack. The mechanism of plastic shrinkage cracking resistance of polypropylene fibres was also analysed in this paper.

Key words: polypropylene fibre; plastic shrinkage cracking resistance; cement mortar; mechanism of plastic shrinkage cracking resistance