



文章编号:1006-7329(2003)05-0081-06

## 聚丙烯纤维控制特细砂混凝土 塑性收缩裂缝试验研究\*

吴芳<sup>1</sup>, 蔡贵生<sup>1</sup>, 杨长辉<sup>1</sup>, 王凌宇<sup>2</sup>, 李泽刚<sup>1</sup>

(1.重庆大学 建材系, 重庆 400045; 2.中铁十九局重庆市盐井项目部, 重庆 400000)

**摘要:**特细砂具有平均粒径小、比表面积大的特点,用其配制的大流动性混凝土极易出现塑性收缩裂缝。因此,对特细砂混凝土塑性收缩防裂措施进行研究,具有重要的现实意义。通过平板端约束试验,研究了聚丙烯纤维掺量对特细砂混凝土塑性收缩裂缝面积、裂缝宽度以及水分蒸发速率的影响,探讨了该纤维的阻裂机理。

**关键词:**聚丙烯纤维; 特细砂混凝土; 塑性收缩; 裂缝

**中图分类号:**TU528.572

**文献标识码:**A

### Research on Controlling Plastic Shrinkage Cracking of Superfine Sand Concrete by adding Polypropylene Fibers

WU Fang<sup>1</sup>, CAI Gui-sheng<sup>1</sup>, YANG Chang-hui<sup>1</sup>, WANG Ling-yu<sup>2</sup>, LI Ze-gang<sup>1</sup>,

(1. Department of Building Materials, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Yanjing Project Department of the 19th Railway Engineering Bureau of China, Chongqing 400000, P. R. China)

**Abstract:** Superfine sand is characterized by small average particle size and large specific surface area. It is easy to form plastic shrinkage cracks for high flowing concrete with superfine sand as fine aggregate. Thus, research on measures for superfine sand concrete to get rid of plastic shrinkage cracks is of important practical significance. In this paper, the influence of polypropylene fiber dosage on plastic shrinkage crack area as well as crack width and rate of water evaporation of superfine sand concrete were studied by way of an end-restrained span metal specimen, and crack-resistant mechanisms of polypropylene fiber on superfine sand concrete was analyzed.

**Keywords:** polypropylene fibers; superfine sand concrete; plastic shrinkage; cracking

塑性收缩是指混凝土处于半流态或塑性阶段,由于沉降运动、毛细管压力、早期化学收缩以及自收缩等引起的一种体积变化。当这种变化受到约束且约束应力超过混凝土抗拉应力时,将诱发宏观裂缝。由于这种裂缝形成于混凝土的塑性阶段,所以称之为塑性裂缝<sup>[1,2]</sup>。此类裂缝的存在不仅影响混凝土结构的使用性能,还将为外部水分以及侵蚀性介质提供进入混凝土内部的通道,从

\* 收稿日期:2003-06-28

基金项目:重庆大学骨干教师资助基金

作者简介:吴芳(1967-),女,重庆人,副教授,主要从事建筑材料研究。

而直接影响了混凝土的长期耐久性以及力学性能。因此,混凝土的塑性裂缝问题受到了越来越多的关注<sup>[3]</sup>。

大量的研究及工程实践表明,在混凝土中加入纤维可以有效地抑制塑性裂缝的出现<sup>[4,5]</sup>。其中聚丙烯纤维以其良好的抗裂性、韧性和抗疲劳性能得到了广泛的应用。

目前关于混凝土塑性收缩裂缝的研究大都集中在中、粗砂混凝土,而特细砂混凝土的裂缝及其相关问题的研究几乎没有。而在类似重庆的地区,特细砂混凝土应用广泛。众多的工程实践发现<sup>[6,7]</sup>,特细砂混凝土由于粒径小,表面积大,水泥浆和水的需求量大,用其配制的大流动性混凝土极易出现塑性收缩裂缝,因此,加强特细砂混凝土的塑性收缩裂缝研究,找出预防措施,具有重要现实意义。本文主要研究聚丙烯纤维掺量对特细砂混凝土塑性收缩裂缝的影响。

## 1 试验原材料

水泥:重庆滕辉地维水泥有限公司生产的 42.5R 普通硅酸盐水泥;

细集料:重庆渠河特细砂,细度模数 0.9;

粗集料:重庆小泉石灰石碎石,粒径 5~20 mm,其中粒径 5~10 mm、粒径 10~20 mm 的碎石分别占 30%、70%(质量百分比);

聚丙烯纤维:美国歇尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维(Durafiber);

外加剂:重庆江北特种建材有限公司生产的 FDN-O 型减水剂。

## 2 试验方法

### 2.1 试验装置

混凝土发生塑性裂缝一般取决于三个条件:1)混凝土发生塑性变形;2)混凝土处于约束状态;3)混凝土内部的塑性拉应力达到混凝土的临界抗拉强度值。因此,在进行混凝土的塑性收缩裂缝试验时,尽可能模拟这几个条件。

参照 KAI 试验研究<sup>[8]</sup>,采用如图 1 所示的试验装置。该装置利用端约束生成器提供约束,中心应力生成器促使裂缝的生成。

### 2.2 拌合物制备

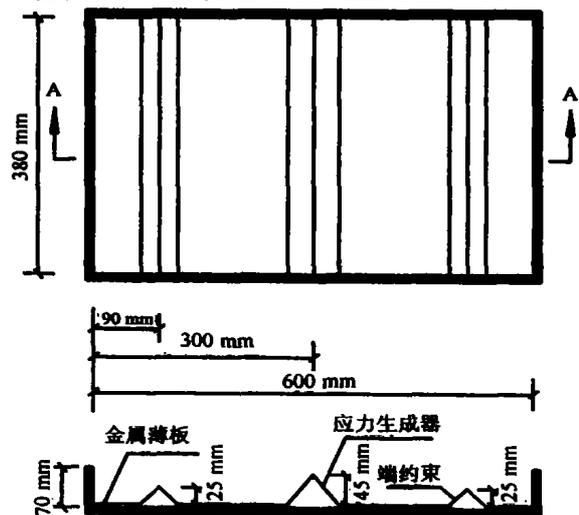
根据掺聚丙烯纤维的特细砂混凝土的搅拌时间应适当延长的原则,试验中采用了如下搅拌制度:依次放入大小石子、特细砂、水泥,干拌 1 min;慢慢倒入水,搅拌 1 min;加入减水剂,搅拌 1 min;最后均匀加入聚丙烯纤维,搅拌约 1.5 min,使纤维在混凝土中均匀分散。出料后迅速测其工作性能,然后入模成型。

### 2.3 试验环境条件

拌合物入模后,置于温度 30℃、相对湿度 60%,试件表面风速为 8 m/s 的环境下。

### 2.4 裂缝测试

混凝土拌合物入模后每 15 min 观察一次,记录混凝土表面变化情况、裂缝出现的时间和进展情况,并测试水分损失,1 h 以后每半小时观察一次。待裂缝基本稳定不再发展时,将裂缝分为宽度大致相等的若干小段,分别测试其长度  $l_i$  和宽度  $d_i$ ,然后按照公式( $\sum l_i \times d_i$ )计算裂缝面积。通过



A-A 剖面  
图 1 试验装置

比较裂缝宽度、面积来评价聚丙烯纤维对特细砂混凝土塑性收缩裂缝的影响。

以下试验结果非具体指明时间,所测裂缝面积、宽度及水分蒸发速率均指从混凝土搅拌开始后5 h。

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 聚丙烯纤维对特细砂混凝土塑性收缩裂缝的影响

为比较不同纤维掺量对混凝土塑性收缩裂缝的影响,试验研究了水灰比为0.40~0.50,纤维掺量为0%~0.22%(体积掺量)时,混凝土塑性收缩的裂缝面积、最大裂缝宽度和水分蒸发速率。试验结果见表1及图2~图5。

表1 混凝土配合比及试验测试结果

编号	配合比(kg/m <sup>3</sup> ) C:S:C:W	纤维掺量 (体积比)	外加剂 掺量(%)	坍落度 (cm)	扩展度 (cm)	最大裂 缝宽度 (mm)	裂缝面积 (mm <sup>2</sup> )	蒸发速率 (kg/m <sup>2</sup> ·h)	28d 强度 (MPa)
FRC-1	1:1.23:3.51:0.40	0	2.0	19.9	46.5×47.6	0.22	81.56	0.471 0	55.2
		0.05%	2.1	14.7	31.4×31.2	0.22	59.84	0.438 2	57.4
		0.11%	2.2	6.4	21.4×20.8	0.16	44.16	0.394 7	57.8
		0.16%	2.3	7.2	21.8×20.9	0	0	0.424 8	53.8
		0.22%	3.0	5.6	21.9×19.2	0	0	0.326 2	52.0
FRC-2	1:1.16:3.12:0.42	0	1.5	21.9	64.3×60.2	0.50	178.72	0.563 5	51.9
		0.05%	1.7	21.9	58.4×59.5	0.46	178.53	0.474 6	50.8
		0.11%	1.9	20.1	53.3×49.8	0.30	75.00	0.477 3	48.2
		0.16%	2.1	15.5	39.1×40.2	0.35	62.15	0.522 7	50.2
		0.22%	2.3	12.1	36.3×32.8	0.15	6.60	0.472 9	49.2
FRC-3	1:1.08:2.92:0.45	0	0.5	21.6	65.6×61.2	0.50	189.08	0.486 2	45.3
		0.05%	0.7	21.8	61.8×64.8	0.45	165.68	0.500 2	46.4
		0.11%	0.9	21.9	54.8×53.2	0.42	160.57	0.522 8	46.1
		0.16%	1.1	21.6	49.6×48.8	0.40	116.86	0.567 3	48.1
		0.22%	1.3	21.1	46.3×42.4	0.08	5.52	0.518 0	48.1
FRC-4	1:0.94:2.67:0.50	0	0.2	20.6	43.4×49.8	0.94	348.23	0.667 5	37.5
		0.05%	0.2	21.2	42.8×44.2	0.76	226.51	0.615 1	38.3
		0.11%	0.4	22.6	63.2×66.2	0.39	105.27	0.552 8	39.7
		0.16%	0.3	20.8	46.2×45.6	0.09	24.21	0.580 4	40.7
		0.22%	0.3	18.9	41.7×40.9	0.17	39.10	0.558 0	39.1

由图2可知,特细砂混凝土的塑性收缩裂缝面积与水灰比和纤维掺量有关。在0.4~0.5范围内,随水灰比增大,混凝土塑性收缩裂缝面积呈增长趋势。不掺纤维时,水灰比为0.5时的混凝土塑性收缩裂缝面积是水灰比为0.4时的4.27倍;掺0.11%纤维时,也有2.38倍。究其原因,主要是由于低水灰比时,特细砂混凝土的粘度增大,水分蒸发速率相对较低造成的,这可以从图3的测试结果得到证实。

掺入聚丙烯纤维后,混凝土塑性收缩裂缝面积随纤维掺量提高而降低。水灰比为0.45时分别掺入0.05%、0.11%、0.16%、0.22%的纤维后,裂缝面积分别减少了12.38%、15.

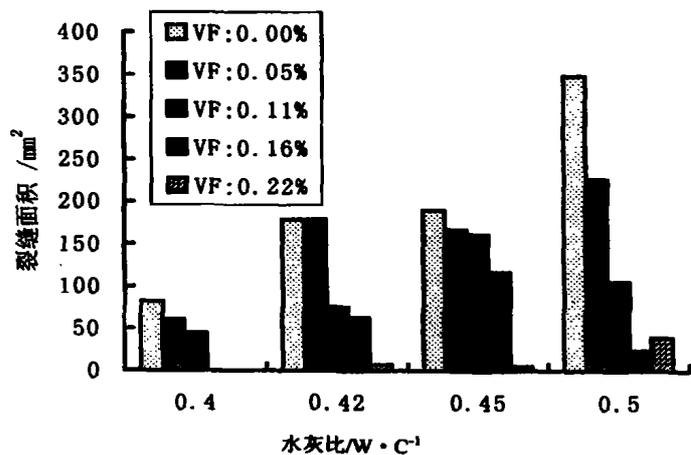


图2 纤维掺量对裂缝面积的影响(VF:体积掺量)

08%、38.20%、97.25%。测试结果说明,聚丙烯纤维对特细砂混凝土塑性收缩裂缝具有良好抑制作用。聚丙烯纤维对特细砂混凝土塑性收缩裂缝的抑制作用受混凝土水灰比的影响,同一掺量下,水灰比降低,纤维的抑制效率提高。水灰比0.4、纤维掺量0.16%时,试样表面未出现塑性收缩裂缝。

图4为水灰比与最大裂缝关系图。比较图2和图4可以看出,聚丙烯纤维掺量对特细砂混凝土塑性收缩裂缝最大宽度的影响与其对塑性收缩裂缝面积的影响规律相似。纤维掺量提高,裂缝最大宽度降低;同掺量条件下,水灰比降低,裂缝最大宽度亦降低。

从以上试验结果及分析可知,聚丙烯纤维的阻裂效果随其掺量的增加而增强。但从表1可见,水灰比为0.4,纤维的掺量为0.16%时,虽未出现裂缝,在减水剂掺量高达3.0%的情况下,混凝土坍落度也只有7.2 cm,完全不能满足大流动性要求。因此,在低水灰比时,考虑特细砂混凝土工作性,纤维掺量应适当减小。建议对于特细砂混凝土,其水灰比不超过0.4时,聚丙烯纤维掺量不宜超过0.11%。在实际工程中,聚丙烯纤维的适宜掺量应从工作性、经济性、阻裂效果等多方面加以考虑。

由图5可以看出,掺入聚丙烯纤维后,特细砂混凝土中的水分蒸发速率随着时间的进行不断减小,并且在混凝土成型1.5~2.0 h以后这种减小趋势更明显;而不掺纤维的混凝土其水分蒸发开始是逐渐增大,到2 h左右时开始减小。

试验中所观察到的裂缝出现时间基本集中在水分蒸发速率发生变化所对应的这段时间内,即混凝土成型1.5~2 h左右。这直接与混凝土中存在的自由水有关。素混凝土中,早期水分多,蒸发速率

不断增加,随着水泥水化和水分蒸发的进行,混凝土中自由水越来越少,便表现为蒸发速率不断减小。在2 h后,虽然掺入纤维后混凝土的水分蒸发速率变化也呈现类似变化趋势,但随纤维掺量提高,水分蒸发速率明显降低。显然,这是纤维隔断混凝土毛细管,阻碍了水分迁移的结果。特别应注意的是,在混凝土成型2 h前,掺加纤维的混凝土水分蒸发速率大于素混凝土。作者认为,这是

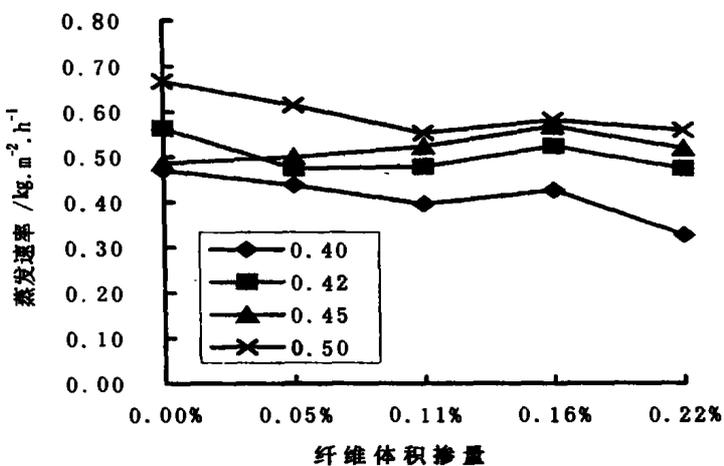


图3 纤维掺量对蒸发速率的影响

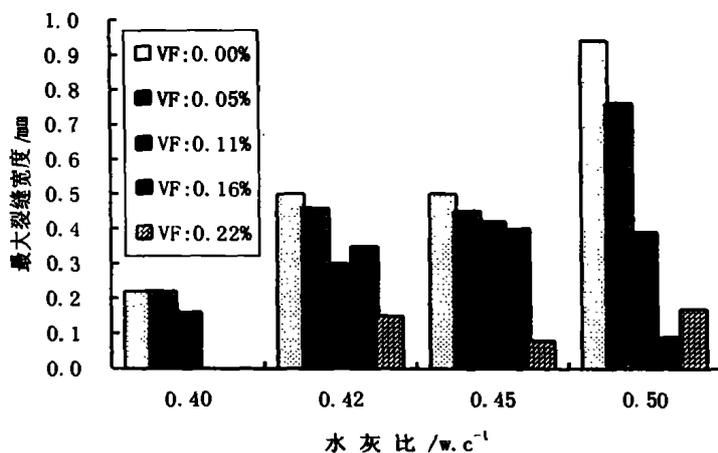


图4 纤维掺量对最大裂缝宽度的影响(VF:体积掺量)

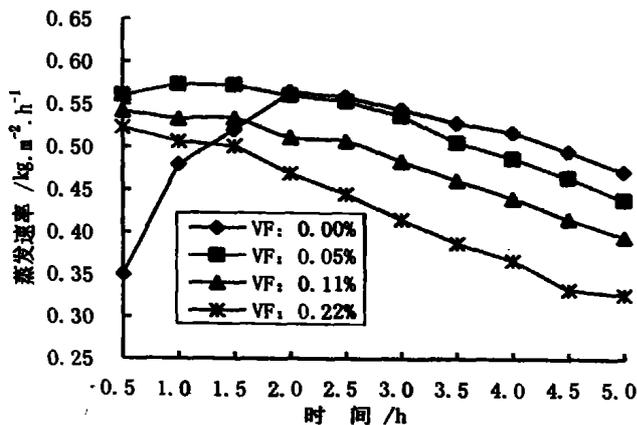


图5 蒸发速率随时间的变化趋势(W/C:0.40)

因为,该段时间内混凝土还处于不稳定的粘流态,表层混凝土中的水分容易沿纤维表面向外迁移,致使蒸发速率提高。由于混凝土是粘流态,这段时间水分的蒸发不会引起塑性收缩裂缝。实际上,混凝土成型 1.5~2 h 时正是混凝土的初凝时间。

从图 5 还可见,特细砂混凝土水分蒸发速率均在  $0.7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$  以下,低于 ACI 确定的临界值  $1.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ,纤维体积掺量低于 0.16% 的试样均出现了宏观裂缝。这一结果说明特细砂混凝土出现塑性收缩裂缝对应的水分蒸发速率临界值低于中、粗砂混凝土,同时也说明,同一施工环境下,特细砂混凝土更易出现塑性收缩裂缝,要防止特细砂混凝土出现塑性收缩裂缝,施工措施控制难度更大。特细砂混凝土出现塑性收缩裂缝对应的水分蒸发速率临界值,尚需进一步试验研究。

### 3.2 阻裂机理探讨

混凝土浇筑后由于泌水作用会在混凝土内部形成许多毛细通道,当混凝土表面水份的蒸发速度大于泌水速度时,混凝土的失水将由表及里向深处发展,毛细孔内水的弯液面的曲率也将随之逐渐增大(如图 6 所示)<sup>[9]</sup>

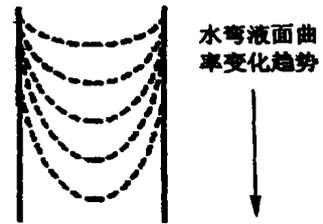


图 6 毛细孔内水弯液面的曲率变化趋势

根据毛细原理,毛细管内水的张力作用将使凹液面有缩小的趋势,这种趋势造成的孔内负压将使毛细管壁受到持续增长的压缩作用。这种压缩作用受到约束时,混凝土的表面将会因为处于受拉状态而开裂,这是混凝土产生收缩并最终发展为裂缝的微观原因。

纤维的掺入因为极大地改变了混凝土内部的毛细通道,影响水分迁移从而产生明显的阻裂作用。

掺入的纤维在混凝土中呈三维乱向分布,其阻裂机理具体表现在两个方面<sup>[10,11]</sup>:

- 1) 当微裂缝的长度大于纤维的间距时,纤维将跨越裂缝起到传递荷载的桥梁作用,使混凝土内的应力场更加连续和均匀,使微裂缝尖端的应力集中得以钝化,裂缝的进一步扩展受到约束。
- 2) 当微裂缝的长度小于纤维的间距时,纤维将迫使其改变方向或跨越纤维生成更微细的裂缝场,显著增大了微裂缝扩展的能量消耗。

上述分析可见,单就纤维的阻裂效应而言,在单位混凝土体积内纤维的根数越多,纤维的间距越小,纤维的阻裂效果越好。或者说单位体积混凝土内纤维分散后的表面积越大,阻裂效果越好(如图 7 所示)。

本试验中掺入的聚丙烯纤维同其它纤维相比细度较大,当掺量从 0.05% 到 0.22% 变化时,将获得 700~3 000 万根/kg 的纤维根数,因而表现出明显不同的阻裂效果。掺量越大时,其单位体积内获得的纤维根数越多,具有较好的阻裂效果。

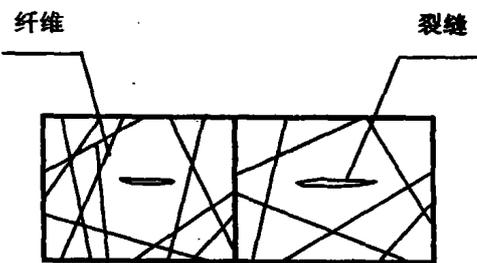


图 7 纤维掺量对裂缝的影响示意图

## 4 结论

1) 聚丙烯纤维(杜拉纤维)能有效抑制特细砂混凝土塑性收缩裂缝和水分蒸发速率,且抑制效率与混凝土的水灰比和纤维掺量有关。在 0.4~0.5 水灰比范围内,随水灰比降低,纤维阻裂效率提高;在 0~0.22% 纤维掺量范围内,纤维阻裂效果随其掺量提高而增强。

2) 特细砂混凝土出现塑性收缩裂缝对应的水分蒸发临界值低于  $1.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。同一施工环境下,特细砂混凝土更易出现塑性收缩裂缝,要防止特细砂混凝土出现塑性收缩裂缝,施工措施控制难度更大。

3) 聚丙烯纤维的阻裂作用,一方面归因于它对混凝土内毛细管的阻隔作用,引起水分蒸发速率降低;另一方面,在于其三维无序分布使混凝土内微裂缝尖端的应力集中得以钝化、增大了微裂缝扩展的能量消耗。

### 参考文献:

- [1] DAN RAVINA and RAHEL SHALON. Plastic Shrinkage Cracking[J]. ACI Journal, 1968, (4):282 - 291.
- [2] F. H. Wittmann. On the Action of Capillary Pressure[J]. CCR, 1976, 16:49 - 56.
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] Parviz Soroushian and Siavosh Ravanbakhsh. Control of Plastic Shrinkage Cracking with Specialty Cellulose Fibers[J]. ACI Materials Journal, July - August 1998:429 - 435.
- [5] Mirosław Grzybowski and Surendra P. Shah. Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete[J]. ACI Materials Journal, March - April 1990:138 - 148.
- [6] 路新景. 小浪底工程细砂混凝土试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1999, 20(4):37 - 38
- [7] 张武. 特细砂在普通混凝土中的应用与研究[J]. 施工技术, 2002, 31(8):41 - 42.
- [8] Kai PP. Proposed Test to Determine the Cracking Potential to Drying Shrinkage of Concrete[J]. Concrete Construction, 1985, (30):775 - 778.
- [9] 刘兰强. 聚丙烯纤维在混凝土中的阻裂效应研究[J]. 公路, 2000, (6):28 - 34.
- [10] Parviz Soroushian. Secondary Reinforcement - Adding Cellulose Fibers[J]. Concrete International, 1997, 6:28 - 34.
- [11] Kejin Wang, Surendra P. Shah and Pariya Phuaksuk. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials - Influence of Fly Ash and Fibers[J]. ACI Materials Journal, November - December 2001:458 - 464.

(上接第 80 页)

## 4 结论

1) 好氧时间、缺氧时间和水力停留时间三个因素对于连续流间歇曝气一体化氧化沟系统而言, 缺氧时间是影响系统 BOD<sub>5</sub> 和 TN 去除率的最显著性影响, 好氧时间对 BOD<sub>5</sub> 去除率也存在显著影响。

2) 在连续流间歇曝气一体化氧化沟系统采用 HRT 8 hr, 好氧时间 2 hr, 缺氧时间 2 hr 的运行方式时, 其出水水质 BOD<sub>5</sub> < 20 mg/l, TN < 20 mg/l, BOD<sub>5</sub> 去除率为 85.2%, TN 去除率为 55.5%。

### 参考文献:

- [1] 李伟民. 中试一体化氧化沟流态及规模型合建式一体化氧化沟试验研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 2000.
- [2] 廖日红. 连续流间歇曝气一体化氧化沟试验研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1997.