

## 扰动对纤维沉降特性影响的试验研究

江磊,林江,刘翊之

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为了研究有初始扰动的情况下不同长径比的碳纤维的沉降规律,使用高速摄像机拍摄记录下碳纤维沉降过程中的形态。通过试验发现:纤维在水中沉降的轨迹都是由竖直方向逐渐趋向水平方向,并最终趋于稳定;在相同的扰动量下,纤维的初始转动速率随着长径比的增大而减小,当长径比 $\lambda=9$ ,扰动量 $n=50$  r/min时达到最大值4.2 r/min,并且长径比越小纤维转动速率到达0的时间越短;在相同的扰动量下,随着纤维的长径比增大,纤维的初始转动速率减小,并且转角的变化规律逐渐趋向于线性,扰动量越大,纤维转动速率到达0的时间越短。

**关键词:** 纤维沉降;长径比;扰动量;转动速率

**中图分类号:** TH140;O39

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2017)03-0178-05

## Experimental study on the effect of disturbance on fiber settlement

JIANG Lei, LIN Jiang, LIU Yizhi

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,  
Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to explore the settlement law of carbon fibers with different aspect ratios under the circumstances of initial disturbance, the morphology of carbon fibers was recorded by a high-speed camera. It is found that: the fiber deposition in the water first heads on the vertical track, then changes gradually to the horizontal direction, and eventually keeps stable; the amount of disturbance being identical, the initial rotation rate of the fiber decreases with the increase of the aspect ratio, and reaches the maximum value 4.2 r/min when the aspect ratio being and disturbance  $n=50$  r/min. And the smaller the aspect ratio is, the shorter it takes the rotation rate to reach 0; the amount of disturbance being identical, with the increase of the aspect ratio of the fiber, the initial rotation rate decreases. And the change of the rotation angle tends to be linear. The greater the disturbance is, the shorter it takes the rotation rate to reach 0.

**Keywords:** fiber settlement; aspect ratio; amount of disturbance; rotation rate

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51376162)

通信作者: 林江(1963—),女,浙江省杭州人,教授,博士,主要从事多相流理论及其应用研究。E-mail: linjiang@zust.edu.cn。

纤维悬浮流中存在一些包含在液或气中的固态纤维,与研究非牛顿理论及多相流紧密相关,因此,对纤维悬浮流的研究很有价值。此外,纤维悬浮流得到了广泛的应用,如复合材料是材料科学中的重要一环,其中短纤维材料又是复合材料的核心,而加工和成形短纤维复合材料需要涉及纤维悬浮流的相关理论,尤其是动力学,其原因是加工时纤维取向是由流动诱导的,这影响到成品的质量。

现代电子设备基本上都带有电磁屏蔽材料,而电磁屏蔽材料的主要成分就是碳纤维。碳纤维在电磁屏蔽材料的表面分布越均匀整齐则材料性能越好。因此,研究碳纤维在沉降的过程中的干扰因素对制造高性能的电磁屏蔽材料有一定的意义。邵雪明等<sup>[1]</sup>以长宽比和初始取向为变量,使用了组偶数阶取向张量表示纤维的取向分布函数,这有助于预测纤维取向。纤维取向主要有2种方法:一是对 Fokker-Planck 方程进行直接求解;二是采用封闭近似的方法去除高阶取向张量的不封闭,从而得到每阶的取向张量。其中,第二种方法主要用在悬浮流计算过程中。然而人们对这种方法的准确性有一定的异议,尤其是在处理复杂流动问题时。Lipscomb<sup>[3]</sup>求解了轴对称的收缩管道内的纤维悬浮流,在试验中发现纤维对流场的结构产生了影响。王叶龙等<sup>[4]</sup>使用 Boltzmann 法进行模拟得到了粒子沉降时的平均速度、取向分布并得出了粒子最终趋向于水平分布的结论。Lin 等<sup>[5]</sup>通过数值模拟得到了楔形体内的纤维悬浮流场,发现随着时间步长的增加,纤维越来越趋向于流线方向。

由于研究纤维悬浮流对实验仪器精度要求较高,所以早期的研究者们更倾向于数值模拟计算<sup>[6-14]</sup>,关于纤维悬浮流的试验却寥寥无几。因此,本课题组在前人研究的基础上,设计了一套较完整的试验方案,对纤维在沉降过程中旋转速度的影响因素等进行研究。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

扰动水路试验装置如图1所示,装置的主要设备包括一个水流扰动装置,一个测试水槽,其中水槽采用透光性较好的有机玻璃加工而成,以便于观察纤维在水中扰动的情况并进行测量。为了减少外界干扰因素,特别在水槽、扰动装置、试验台、地面之间均安装了缓冲垫。尺寸参数:水槽地面高度 500 mm,水位 400 mm,横截面为一个 150 mm×100 mm 的矩形,水槽的壁面厚度为 2 mm,长宽比为 3:2。扰动装置扰动量固定设置为 50、100、150 r/min。

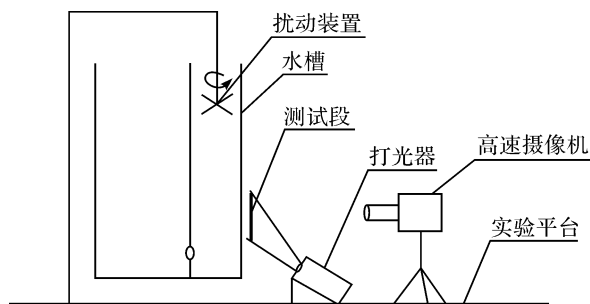


图1 试验装置示意

Fig. 1 Diagram of experimental device

本试验采用高速摄像系统对纤维在试验段的取向进行拍摄。高速摄像系统(OLYMPUS i-SPEED)主要包括摄影机、控制器显示装置、辅助照明灯,高速摄像机具有实时捕获移动的目标、快速记录图像、即时回放而且所拍的图像直观清晰的优点。试验中运动的纤维受到人工辅助打光灯光的照射,可以产生反射光,这些反射光的一部分透过高速成像系统的成像物镜落在其像感面上,之后受到驱动电路的控制响应其中的目标,每个采样点都会对应地产生电荷包,通过这种手段完成光电转换。最后这些电荷包被读出到设备中。读出的信号经过处理后传输至控制器显示装置,由它把图像读出并显示和判断,最后将结果输出。因此,这套高速摄像系统主要由光学成像、光电成像、信号传输、图像储存与处理这几部分构成。

### 1.2 试验材料

试验中选用的纤维是碳纤维,是一种含碳量在 95% 以上的高强度、高模量纤维的新型材料。碳纤维具有许多优良的性能,如耐疲劳性突出、各向异性、电磁屏蔽性好等。本试验采取的碳纤维密度为 1.78 g/cm<sup>3</sup>,长径比  $\lambda$  分别为 1、3、10。图2为本试验所采取

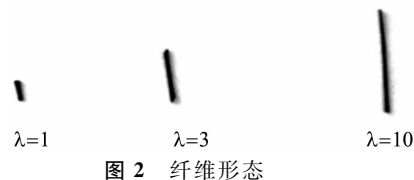


图2 纤维形态

Fig. 2 The state of fibers

的碳纤维,从图 2 可观察出个体纤维轴线基本上可以保持直线,单根纤维可以将其视为细长的圆柱体。

### 1.3 试验步骤

每次测试之前会使用重垂线对试验段进行校准,以保证水槽竖直。然后往水槽中加入纯净水直到水面高度到达 400 mm,启动扰动装置,使其保持一个稳定的转速,最后投入碳纤维。在试验中以纤维长径比 1、3、10 与扰动量 50、100、150 r/min 为变量,采用正交试验法,在相同的扰动量下投入长径比不同的纤维,以及在相同的长径比下控制扰动量的变化,共计 9 次试验。最后用高速摄像机记录了水面高度为 100 mm 处碳纤维的纤维形态变化,拍摄纤维在 0、3、6、9、12 s 时的运动轨迹。

## 2 试验结果

在扰动量为 50 r/min 时,长径比为 1 的纤维在 9 s 左右时最先转动趋于水平方向,长径比为 3 的纤维在 12 s 左右时趋于水平方向,长径比为 10 的纤维在 12 s 时并没有达到水平方向但是仍然有转动至水平方向的趋势,如图 3 所示。

在扰动量为 100 r/min 时,长径比为 1 的纤维在 6 s 左右最先转动趋于水平方向,长径比为 3 的纤维在 9 s 左右趋于水平方向,长径比为 10 的纤维在 12 s 时并没有达到水平方向但是仍然有转动至水平方向的趋势,如图 4 所示。

在扰动量为 150 r/min 时,长径比为 1 的纤维在 3 s 左右时最先转动趋于水平方向,长径比为 3 的纤维在 6 s 左右时趋于水平方向,长径比为 10 的纤维在 12 s 左右时转动至水平方向,如图 5 所示。

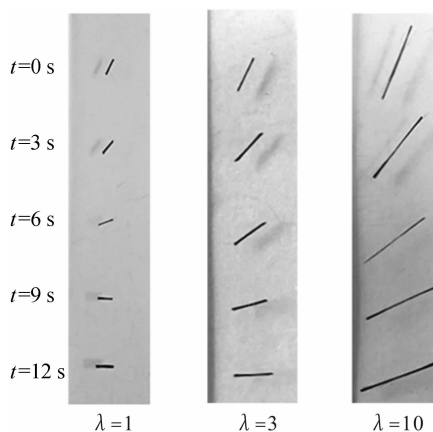


图 3 扰动量为 50 r/min 时的纤维形态

Fig. 3 Fiber morphology when disturbance speed 50 r/min

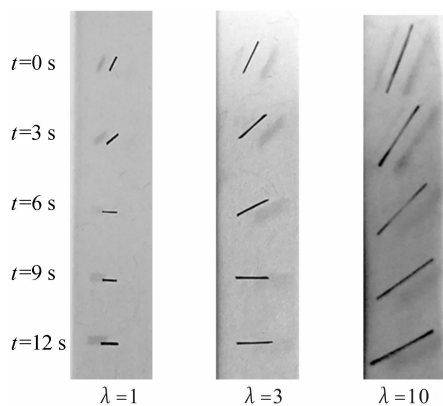


图 4 扰动量为 100 r/min 时的纤维形态

Fig. 4 Fiber morphology when disturbance speed 100 r/min

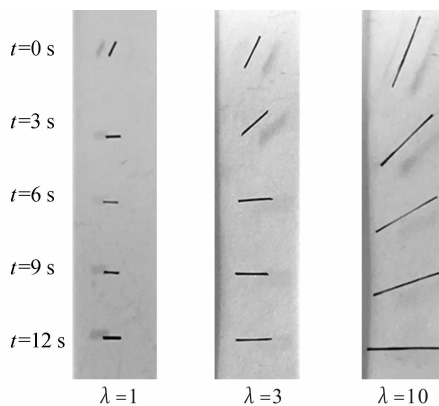


图 5 扰动量为 150 r/min 时的纤维形态

Fig. 5 Fiber morphology when disturbance speed 150 r/min

定义  $OP$  为碳纤维在空间中任意一根碳纤维取向,可以用水平角度  $\varphi$  与竖直角  $\theta$  来表示,纤维的取向如图 6 所示。本试验研究计算了纤维沉降到底部时竖直旋转的角速度,以及纤维在不同时间内旋转的平均角速度,通过拟合得到了纤维取向,不同扰动量与长径比情况下的纤维转动速率如图 7 所示。由图 7 可知,单根碳纤维在沉降的过程中,纤维取向与长径比、外部扰动量的大小均有关。随着长径比的增大,转动速率的衰减变缓;随着扰动量的增大,转动速率的衰减加快。

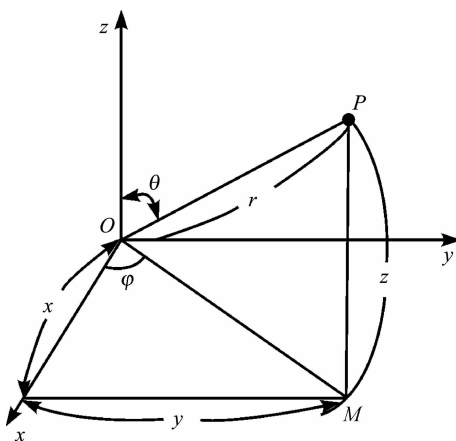


图6 纤维取向

Fig. 6 Fiber orientation diagram

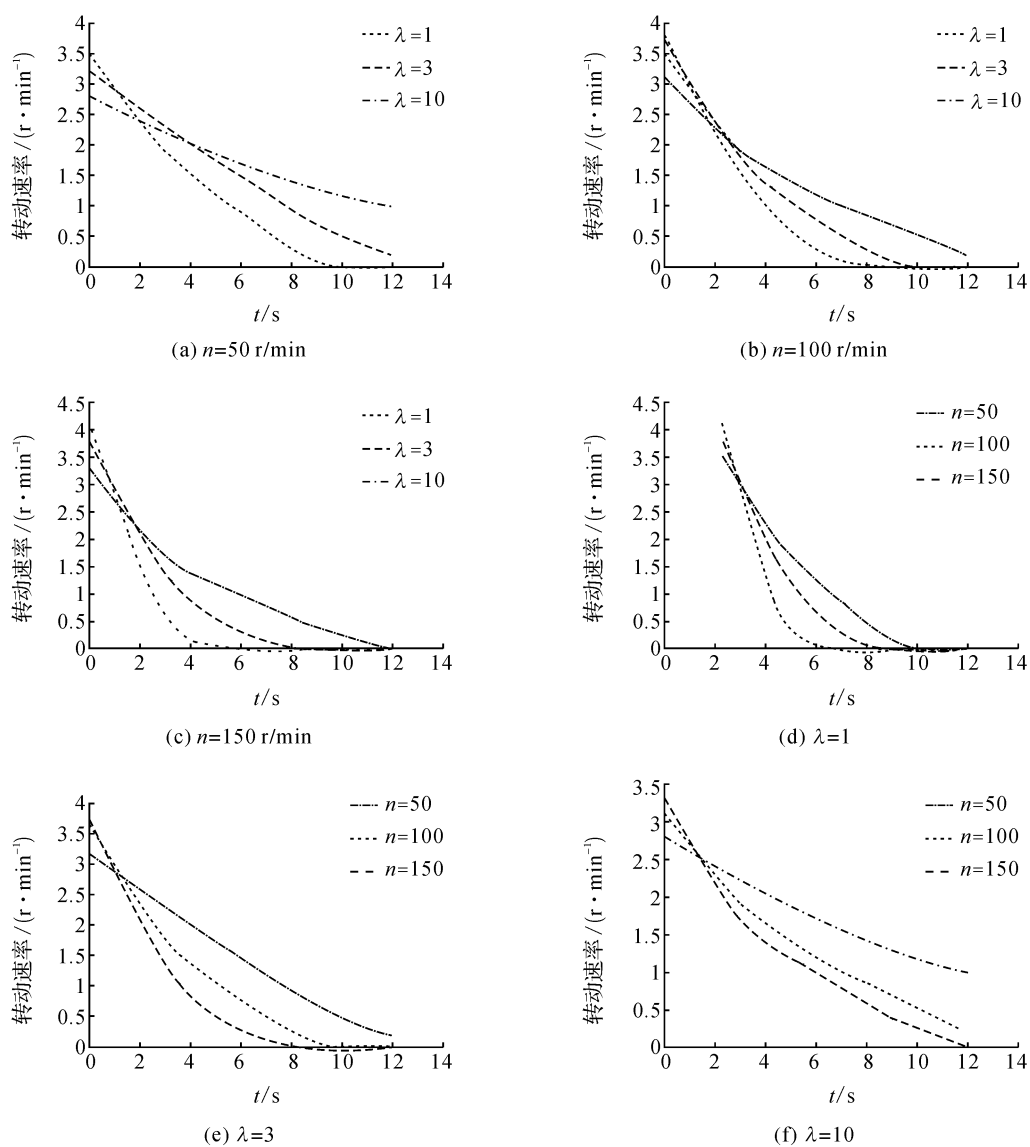


图7 不同扰动量与长径比情况下的纤维转动速率

Fig. 7 Fiber rotation speed diagram

### 3 结 论

针对纤维在流体中的沉降问题,采用正交试验法追踪了纤维在垂直管道中沉降的形态变化,最终得出了如下结论:

1)纤维在水中沉降的轨迹都是由竖直方向逐渐趋向水平方向,并最终趋于稳定。

2)在相同的扰动量下,纤维的初始转动速率随着长径比的增大而减小,当  $\lambda=1, n=50$  r/min 时达到最大值 4.2 r/min。并且长径比越小纤维转动速率到达 0 的时间越短。

3)在相同的扰动量下,随着纤维的长径比的增大,纤维的初始转动速率减小,并且转角的变化规律逐渐趋向于线性。扰动量越大,纤维转动速率到达 0 的时间越短。

#### 参考文献:

- [1] 邵雪明,张征宇. 方形粒子沉降运动特性的研究[J]. 浙江大学工学报(工学版),2005,39(3):453.
- [2] ADVANI S G, TUCKER C L. The use of tensor to describe and predict fiber orientation in short fiber composites[J]. Journal of Rheology,1987,31(8):751.
- [3] LIPSCOMB G G, DENN M M. The flow of fiber orientation in complex geometries[J]. Journal of Non-Newtonina Fluid Mechanics,2001,38(3):17.
- [4] 王叶龙,林建忠,万兴. 柱状粒子间相互作用对沉降运动的影响[J]. 自然科学进展,2004,14(1):39.
- [5] LIN J Z, ZHANG L X, WANG L Y. Research on the distribution function and orientation tensors of fiber suspensions in wedge-shaped flow field[J]. Journal of Hydrodynamics,2002(1):38.
- [6] KUNISCH K, MARDUEL X. Optimal control of non-isothermal viscoelastic fluid flow[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,2000,88(3):261.
- [7] 梁志明,周持兴,俞伟,等. 聚合物熔体的非等温平板收缩流动的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程,2003,19(1):15.
- [8] WANG Y L. Simulation of sedimentation of two circular particles with collision considered in vertical channel[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2006,27(7):983.
- [9] LIN J Z, ZHANG W F, WANG Y L. Research on the orientation distribution of fibers in a pipe flow[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE,2002,3(5):501.
- [10] DERAKHSHANDEH B, KEREKES R J, HATZIKIRIAKOS S G, et al. Rheology of pulp science fibre suspension: a critical review[J]. Chemical Engineering Science,2011,66(15):3460.
- [11] WANG J H. Mass transfer and rheology of fiber suspensions[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison,2013.
- [12] 张红平,欧阳洁,张玲,等. 聚合物熔体双尺度模型和 SIMPLER 方法在收缩流中的应用[J]. 高分子材料科学与工程,2007,23(4):15.
- [13] KNUSTEN J S, LIBERATORE M W. Rheology of high-solids biomass slurries forbiorefinery applications[J]. Journal of Rheology,2009,53(4):877.
- [14] 陈奇峰,陈广学,陈克复. 中浓纸浆悬浮液的流态化研究及 CFD 模拟[J]. 华南理工大学学报,2009,37(3):81.