排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 4 月 Apr. 2013 | 第 31 卷 第 4 期 Vol. 31 No. 4

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.04.015

平直管段不同宽度动边界环隙流场特性

张雪兰，孙西欢，李永业
（太原理工大学水利科学与工程学院，山西 太原 030024）


张雪兰

摘要：为进一步探讨不同因素对动边界环隙流场水力特性的影响，采用试验和理论分析相结合的方法，对环隙宽度条件分别为 25，20，15，10 mm 的动边界环隙流场水力特性进行研究，试验采用筒装料管道水力输送管道车模型在管路系统平直段部分完成，流量条件为 60 m^3/h，管道车模型质量为 750 g. 研究结果表明：平直管段动边界环隙内部水流为紊流形态；环隙断面内各测点压力值随环隙宽度增大趋于集中，且同一断面内动边界管道车壁附近压力值较小，固定管道边壁处压力值较大；同一宽度条件下，轴向速度在车中断面内分布较车前、车后断面更为均匀，且呈现动边界附近速度值较大，固定边界附近值较小的环绕车体层状分布；环隙宽度为 20 mm 时，断面内轴向速度分布均匀性最好；各环隙宽度条件下，车身沿程各测试断面内周向速度均呈现不均匀分布.

关键词：环隙流场；动边界；宽度；压力；速度
中图分类号：S277.9；TV134.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)04-0352-06

Characteristics of annulus moving boundary flow in straight pipe segments of different widths

Zhang Xuelan, *Sun Xihuan*, *Li Yongye*
(College of Water Resource and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: To further explore the influence of different factors on the hydraulic characteristics of the moving boundary annulus flow, through tests and theoretical analyses, annuluses with widths of 25, 20, 15, 10 mm respectively were studied. The test was carried out in the straight pipe segment of the pipeline system, whose control volume is 60 m^3/h, using barreled feed pipe carriage weighted 750 g. The research shows that the moving boundary annulus flow in straight pipe segment is turbulent morphology. Pressure values of measurement points in the annulus cross section tend to cluster as the width of the annulus increases. In the same section, pressure around the moving boundary of carriage is lower and pressure around the fixed pipe wall is higher. With the same width, the axial velocity sectional distribution is more uniform in the middle section than in the back or front. And the distribution is a layered one around the carriage body of which higher around the dynamic boundary and lower around the fixed border. When the width is 20mm, the axial distribution uniformity is best. Circumferential velocity shows uneven distribution in sections along the carriage under various conditions of different annulus widths.

Key words: annulus flow filed; moving boundary; width; pressure; velocity

收稿日期：2012-08-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51179116,51109155)
作者简介：张雪兰(1986—)，女，河北深州人，博士研究生(hbxiehou@126.com)，主要从事流体力学及流体机械研究.
孙西欢(1960—)，男，山西临猗人，教授，博士生导师(通信作者，sunxihuan@tyut.edu.cn)，主要从事工业水力学研究.

流体机械领域范围内,动边界同心环状缝隙流体问题常见于零部件间液压技术研究中,在研究过程中,多针对高旋转速度下某一固定宽度窄缝隙内流体压力场、速度场进行,且动边界沿长度方向运行速度较低[1]. 文中主要就动边界在较大速度运行条件下,针对环隙宽度条件变化对缝隙内部流场特性的影响进行试验研究.

筒装料管道流体输送中管道车车体前后两端分别布置间隔 120°的辐射状支脚,支脚外径与输送管道内径一致,运动过程中,车体在管道内呈现同心运动,车体与管道内壁间的流体呈现同心环状分布[2].

囊体管道输送与筒装料管道输送同为大物块管道输送,是区别于浆体管道输送的特殊两相流运移问题,两者在一定程度上具有相似性. 大物块管道输送领域内已有的大量试验研究主要集中在输送改进、输送体运动特性、载流体压降以及能耗等在不同输送条件下的变化规律,试验表明物块运行速度会随着其质量的增大而减小[3-5],摩擦系数会随物块重力增大而增大,随雷诺数的增大而减小,当输送流体产生紊动作用时会将囊体速度提高至流体速度的 1.5 倍[6-8];流体在管道中转向程度的不同引起压力下降程度的差别[9],流体浓度以及输送速度的增大都会带来压降的增大,物体的形状也会对其产生影响[10-12].

现有的从输送体周围流场角度进行的相关研究较少,水平同心型料管道输送数学模型能够从受力平衡的角度出发,运用达西摩阻公式对型料平稳匀速运行状态下环隙平均流速进行计算[13],筒装料管道输送环隙流场理论研究得出随边界运动情况的不同,环隙断面平均速度呈现不同的分布[14]. 由于管道车直径的不同,车体与输送管道内壁间必然形成不同宽度的环隙,此时环隙流体流场分布以及支脚对环隙内流场的影响程度都会发生相应的变化. 为了更加详尽地了解环隙流场内部特性,文中从试验测试的角度对筒装料管道水力输送过程中料筒周围同心环隙流场的水力特性进行研究. 试验在水平光滑的有机玻璃直管路内完成,流量控制条件为 60 m^3/h,环隙宽度分别为 25,20,15,10 mm.

1　试验设备

1.1　管道车

管道车模型包括圆柱状车体和端面支脚 2 个部分,车体由不同直径的 100 mm 长有机玻璃管制成,内部空腔为料仓,完成不同物料的储运;端面支脚为呈辐射状分布的 3 个直径为 10 mm 圆柱,以实现对车体的支撑作用,形成车体在管道中同心运行,模型示意图如图 1 所示.

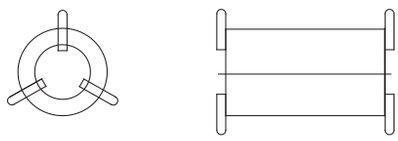


图 1　管道车模型示意图

Fig. 1　Pipeline carriage model diagram

1.2　管道系统

试验管道系统包括动力装置、入车装置、接车装置以及输送管路. 动力装置为水泵,完成将水从水源水库泵入输送管路;入车装置为一沿水流方向斜置的制动阀,能够实现按需开启,待管道车送入管路后完成密封,并尽可能地减小对水流的影响;接车装置为一内置缓冲海绵、底板带排水孔的水槽,满足车水分离的要求,并能完成水回流至水源水库;管路系统由内径为 100 mm 的不锈钢管和有机玻璃管间隔组成,试验管道系统示意如图 2 所示.

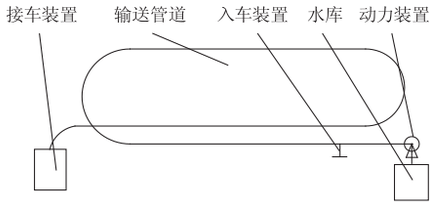


图 2　管道系统示意图

Fig. 2　Pipeline system diagram

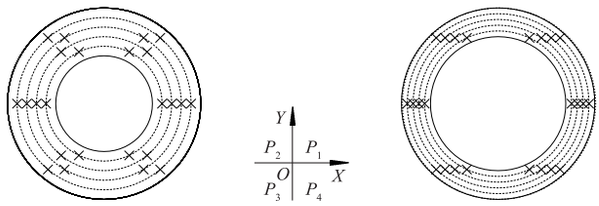
1.3　试验仪器

试验采用七孔测针完成对环隙流场压力及三维速度的测试,七孔测针探头为绕中心孔环布六孔的结构,仪器直接测得各孔压力值 p_n($n=1,2,\cdots,7$),依据其中最大压力值 p_m所在位置的计算公式并通过各压力 p_n计算得到局部动压强,进而根据贝努利方程得到三维速度[15].

2　试验设计

试验在管道系统中的平直管段完成. 试验中,环隙宽度分别为 25,20,15,10 mm,分别对应直径为 50,60,70,80 mm 的不同管道车模型,水流流量为 60 m^3/h,各管道车车载质量为 750 g. 沿车身长度方向布置 3 个测试断面,分别位于圆柱状车体两端和

车身正中位置,沿管道水流方向分别命名为车后、车中以及车前断面,同车型各测试断面测点布置相同. 不同车型对应不同宽度的环状缝隙,各宽度环隙断面内均等距布置4个测环,并在测环上进行测点布置,图3分别为环隙宽度25,20,15,10 mm情况下的断面测点布置示意图. (图中"×"表示测点位置). 以测试断面圆心为坐标原点建立极坐标系,测点极坐标见表1. 表中ρ为极径,θ为极角.



(a) d=25,20 mm (b) d=15,10 mm

图3 测点布置示意图

Fig. 3 Diagrammatic arrangement of measuring points

表1 各环隙宽度测点坐标值

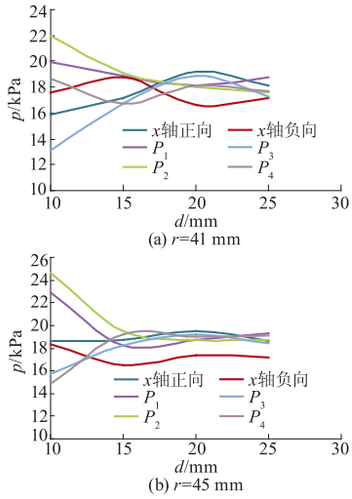
Tab. 1 Measuring points coordinate values at each annulus width

d/mm	ρ/mm	θ/(°)	d/mm	ρ/mm	θ/(°)	d/mm	ρ/mm	θ/(°)	d/mm	ρ/mm	θ/(°)
25	30	0	20	34	0	15	38	0	10	42	0
		77.6			59.5			68.7			57.4
		102.4			120.5			111.3			122.6
		180.0			180.0			180.0			180.0
		257.6			239.5			248.7			237.4
		282.4			300.5			291.3			302.6
	35	0		38	0		41	0		44	0
		56.8			50.4			59.7			53.6
		123.2			129.6			120.3			126.4
		180.0			180.0			180.0			180.0
		236.8			230.4			239.7			233.6
		303.2			309.6			300.3			306.4
	40	0		42	0		44	0		46	0
		62.3			57.4			53.6			50.3
		117.7			122.6			126.4			129.7
		180.0			180.0			180.0			180.0
		242.3			237.4			233.6			230.3
		297.7			302.6			306.4			309.7
	45	0		46	0		47	0		48	0
		51.9			50.3			48.9			47.5
		128.1			129.7			131.1			132.5
		180.0			180.0			180.0			180.0
		231.9			230.3			228.9			227.5
		308.1			309.7			311.1			312.5

3 试验结果分析

3.1 环隙各测试断面压力变化

不同环隙宽度条件下,测环半径存在差异,因此选取半径为41,45 mm上下浮动1 mm为测环区,研究不同缝隙宽度条件下车中断面压力变化. 图4为各测环区压力p随环隙宽度d变化情况的分析曲线. 由图可知,随着环隙流宽度的增加,同一测环区内各测点(P_1,P_2,P_3,P_4)压力值总体趋于集中. 根据图4a,4b中2个测环区压力集中值对比可知,半径为45 mm测环区内压力值总体高于半径为41 mm测环区压力值,这是由于在管道车较大速度运行过程中,动边界管道车壁带动其附近水流具有较大速度,静止管道内壁附近速度较小,因此半径较大的位置处压力较大.



(a) r=41 mm (b) r=45 mm

图4 各测环区压力随缝隙宽度变化曲线

Fig. 4 Curves of pressure change with gap width in each measuring loop region

3.2　环隙断面轴向速度变化

环隙断面轴向速度为沿圆柱状车体中心轴方向的速度.

3.2.1　不同环隙断面轴向速度分布

以车中断面为例,分析环隙宽度条件对断面轴向速度 v 分布的影响,如图 5 所示. 由图中 4 个环隙宽度断面轴向速度分布对比可以看出,当环隙宽度为 20 mm 时,断面轴向速度分布均匀性较好. 由于在单车试验过程中,环隙宽度为 20 mm 时,管道水流平均流速与管道车速度差最小,当水流到达管道车端面时,由于速度差产生的切应力较小,而切应力是形成涡体的主要因素,因此该情况下断面内水体混掺作用较小,水流紊动程度较低,轴向速度表现出相对均匀.

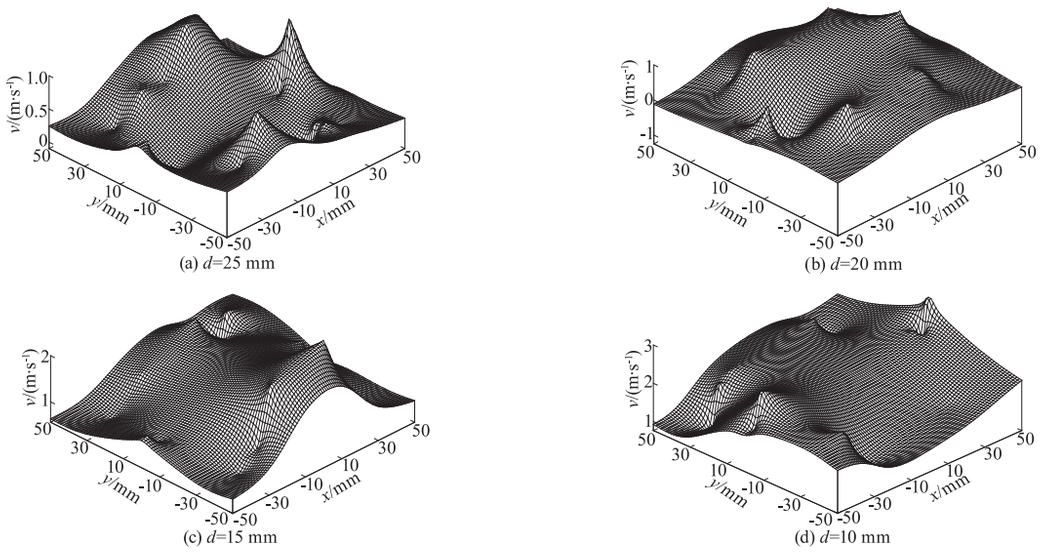


图 5　各环隙宽度车中断面轴向速度分布

Fig. 5　Axial velocity distribution in the middle section at each annulus width

3.2.2　车身沿程轴向速度变化

水流经过车端支脚进入环隙空间,依次经过车后、车中以及车前测试断面,图 6 为环隙宽度为 20 mm 时 3 个测试断面内的环隙轴向速度分布情况(图 6 中单位为 m/s). 由图可以看出,车前以及车后测试断面轴向速度分布较为紊乱,这是由于车端支脚对两端面流场的扰动,2 个测试断面分别位于辐射状分布圆柱体绕流的前部和后部,绕流作用使得轴向速度分布较为紊乱. 水流到达车中测试断面时,经过一定的再分布,断面速度分布基本呈现绕车体层状分布,较为均匀. 同时管道车壁面附近速度值较大,管道内壁附近值较小,这是由于动边界管道车壁带动作用使其周围水流速度较大,而静止管道内壁附近的水流由于黏滞作用的存在速度较小.

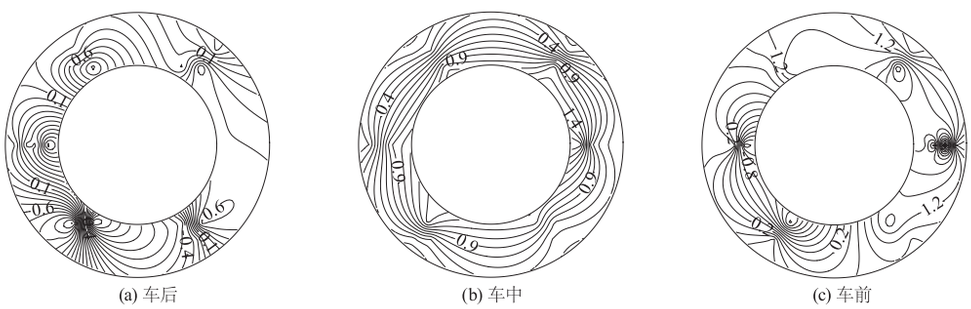


图 6　d = 20 mm 时各测试断面轴向速度分布

Fig. 6　Axial velocity distribution in each measuring section with annulus width of d = 20 mm

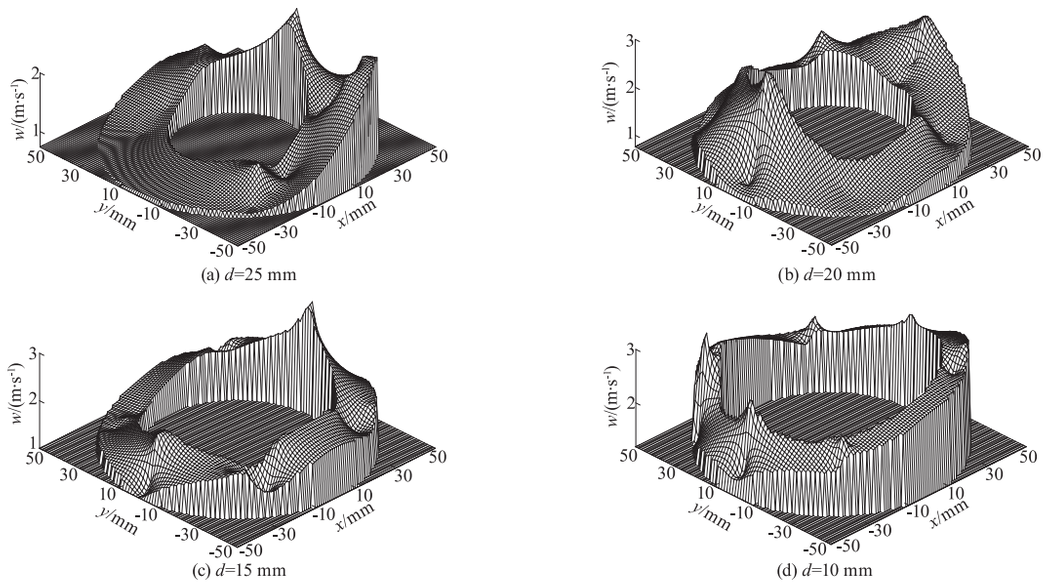
3.3　环隙断面周向速度变化

环隙断面周向速度为垂直于管道轴向的横断面内速度.

3.3.1　不同环隙断面周向速度分布

以车中断面为例,分析环隙宽度条件对周向速度分布的影响,如图 7 所示.

由图7可知,周向速度在各环隙宽度情况下均呈现分布不均匀性,这是因为管道车车端支脚布置面与水流方向垂直,水流在经过支脚进入环隙时,支脚结构对其产生了极大的扰动作用,同时车身料筒端面也会使来流形成绕流. 水流进入环隙时紊动剧烈,在环隙断面空间内受到管道车壁以及管道壁约束,由于管道轴向尺寸明显大于横断面尺寸,断面内周向速度不能得到充分发展. 加之沿管道车料筒周向同时存在绕流,因此各宽度条件下环隙流场周向速度均存在不均匀性分布.



(a) d=25 mm (b) d=20 mm (c) d=15 mm (d) d=10 mm

图7 各宽度环隙车中断面周向速度分布

Fig. 7 Circumferential velocity distribution in middle section at each annulus width

3.3.2 车身沿程周向速度变化

水流沿车身先后经过的车后、车中以及车前测试断面的环隙周向速度分布如图8所示(图中单位为m/s).

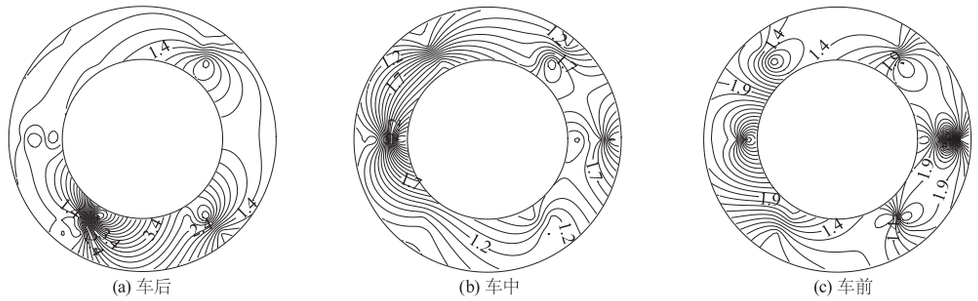

(a) 车后 (b) 车中 (c) 车前

图8 d=20 mm时各测试断面周向速度分布

Fig. 8 Circumferential velocity distribution in each measuring section with annulus width of d=20 mm

由图8可以看出,3个测试断面周向速度均呈现不均匀分布,辐射状车端支脚的扰动作用使得车前和车后断面内周向速度分布不均匀程度更为明显. 由于管道车体对水流在垂直于管道中心轴方向的绕流作用,车中测试断面内的周向速度呈现不均匀性,但这部分扰动作用程度要明显小于车端支脚的扰动作用. 同时由车中断面分布图可以看出,环隙断面周向速度分布也存在内大外小的情况.

4 结 论

通过在环隙宽度为25,20,15,10 mm,流量为60 m^3/h,以及荷载为750 g的控制条件下进行环隙流场压力及速度测定试验,并结合理论分析得出:

1)水流在进入环隙时过流断面面积骤然缩小,同时由于受到车端支脚和车体料筒端的扰动作用,

使得环隙内部水流以紊流的流动方式存在.

2）环隙断面压力分布呈现内小外大分布,且随环隙宽度的增大,断面各测环区内压力值趋于集中.

3）车体沿程测试各断面中,车中断面轴向速度分布均匀性较好,并为动边界附近速度值较大,固定边界附近值较小的环绕车体层状分布;当环隙宽度为20 mm时,轴向速度分布更为均匀.

4）各环隙宽度条件下,车前、车中以及车后各断面内周向速度均为不均匀性分布.

通过环隙内部水流流速、压力分布特性以及与环隙宽度变化关系的得出,为物料输送车型的选择提供支持,同时鉴于车端结构对水流的剧烈扰动作用,有必要进一步对车体支脚结构进行优化,探索从降低局部水头损失的角度减少输送能耗,提高输送效率.

参考文献(References)

[1] 许贤良,朱兵,张军,等. 同心环隙流理论研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2004,24(3):40－42.
Xu Xianliang, Zhu Bing, Zhang Jun, et al. The research of the concentric ring slit flow[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 24(3): 40－42. (in Chinese)

[2] 童学卫,李永业,孙西欢. 筒装料管道水力输送试验系统设计研究[J]. 山西水利,2008(2):42－43.
Tong Xuewei, Li Yongye, Sun Xihuan. Experimental system design on the piped hydraulic transportation of tube-contained raw material [J]. Shanxi Water Resources, 2008(2):42－43. (in Chinese)

[3] 李永业,孙西欢,延耀兴. 管道车不同荷重时筒装料管道水力输送试验研究[J]. 农业机械学报,2008,39(12):93－96.
Li Yongye, Sun Xihuan, Yan Yaoxing. Hydraulic characteristics of tube-contained raw material hydraulic transportation under the different loads on the pipedcarriage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(12):93－96. (in Chinese)

[4] 孙西欢,李永业. 管道车在有压管道中运动的试验研究[C]//第二十二届全国水动力学研讨会论文集,2009:416－422.

[5] 孙西欢,李永业. 筒装料管道水力输送影响因素分析[C]//水力学与水利信息学研究进展论文集,2009:371－375.

[6] Deniz Ulusarslan, Ismail Teke. An experimental investigation of capsule velocity, concentration rate and the spcing between the capsule for spherical capsule train flow in a horizontal circular pipe [J]. Powder Technology, 2005,159 (1/2):27－34.

[7] Wisuwat P. Small-scale tubular linear induction motor for pneumatic capsule pipeline system[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems,2007:1528－1532.

[8] Robert M, O′Connell P E, Liu H, et al. Performance of pneumatic capsule pipeline freight transportsystem driven by linear motor[J]. Journal of Transportation Engineering,2008,134(1):50－58.

[9] Deniz U, Ismail T. An experimental determination of pressure drops in the flow of low density spherical capsule train inside horizontal pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,2006,30(3):233－241.

[10] Deniz U. Determination of the loss coefficient of elbows in the flow of low-density spherical capsule train [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007,32(2):415－422.

[11] Deniz U. Comparison of experimental pressure gradient and experimental relationships for the low density spherical capsule train with slurry flow relationships[J]. Powder Technology,2008, 185 (2):170－175.

[12] Ismail T, Deniz U. Mathematical expression of pressure gradient in the flow of spherical capsules less dense than water[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007,33 (6):658－674.

[13] 林愉,陶燕. 水平同心型料管道输送的数学模型[J]. 化工矿物与加工,2001(10):11－14.
Lin Yu, Tao Yan. A mathematical model for concentric horizontal material-log flow in pipeline[J]. Industrial Minerals and Processing,2001(10):11－14. (in Chinese)

[14] 李永业,孙西欢,李飞,等. 动边界同心环状缝隙流研究[J]. 农业机械学报,2012,43(3):230－234.
Li Yongye, Sun Xihuan, Li Fei, et al . Cyclical flit flow of concentricity under the moving boundary condition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):230－234. (in Chinese)

(责任编辑　徐云峰)