

正方形小通道内不同性质溶液-氮气两相流型

杨竹强, 毕勤成

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用可视化手段研究了水力直径为 2.5 mm 的正方形小通道内蔗糖-氮气、羧甲基纤维素钠(CMC)-氮气、水-氮气和水力直径为 1.0 mm 的正方形小通道内蔗糖-氮气的垂直绝热上升流动, 对其流型、压降进行了实验采集. 实验中的典型流型有: 弹状流、搅拌流和环状流. 通过大量的数据得到了各个溶质的流型转变图和压降曲线, 对各种流型的流动机理进行了分析, 着重对黏弹性对于流动的影响进行了研究. 通过水力直径为 2.5 mm 的小通道内蔗糖-氮气、CMC-氮气和水-氮气流型的对比, 总结了流体的黏弹性、流量对于流型转变的影响. 对不同水力直径时的蔗糖-氮气流型进行对比研究, 总结了流体水力直径、表面张力等因素对于流型转变的影响, 同时在水力直径为 1.0 mm 的小通道内发现了明显的二次流动现象. 实验证实 Chisholm 方法对于非牛顿流体的压降处理已不再适用.

关键词: 非圆截面小通道; 蔗糖溶液; 羧甲基纤维素钠溶液; 流型

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0026-05

Experimental Investigation on Flow Pattern of Different Fluid-Nitrogen in Square Channels

YANG Zhuqiang, BI Qincheng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flow visualization experiments of different fluid-nitrogen co-current upward flow were conducted in a square channel with a hydraulic diameter of 2.5 mm. Three kinds of fluids were studied, i. e., water, saccharose, and sodium carboxymethyl cellulose (CMC). The typical flow patterns of different gases at liquid superficial velocities were recognized, including slug flow, churn flow, and annular flow. Flow visualization experiments on saccharose-nitrogen co-current upward flow were also carried out in a square channel with a hydraulic diameter of 1.0 mm. The flow regime maps and the pressure drop of the working fluids were obtained according to the plentiful experimental data. Flow mechanism in each flow pattern was discussed and the main factors affecting flow pattern were explored, in particular, the influence of the viscosity and the fluid flux. The results show that the surface tension, secondary flow, and hydraulic diameter have significant effect on the flow pattern transition. The experiment with the hydraulic diameter of 2.5 mm indicates that the Chisholm method may not suit the non-Newtonian fluid.

Keywords: non-circular minichannel; saccharose solution; CMC solution; flow pattern

小通道由于较大的通道面积/容积比, 可强化传热, 提高传热密度, 改善换热设备性能, 降低能源消

耗, 从而在紧凑式换热器中得到应用. 非圆截面的小通道已在各种紧凑式换热器中出现. Willmarth^[1]

收稿日期: 2010-06-05. 作者简介: 杨竹强(1986—), 男, 硕士生; 毕勤成(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576076).

网络出版时间: 2010-10-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/61-1069_t.20101019.1844.001.html

和 Ishii^[2] 分别研究了水力直径 $D_h=1,2\text{ mm}$ 的水平、垂直小矩形通道内的空气-水两相流动的流型,测量了含气率和界面浓度. 文献[3-5]将圆管通道和非圆管通道内的两相流动现象(包括流型转变、含气率、压降等)进行了对比分析,总结其影响因素并提出了相应的实验关联式. Satitchaicharoen^[6] 对几种不同尺寸的小间距矩形通道垂直上升两相流动进行了研究,分析了间距尺寸、通道宽度和液体黏度对流型转变的影响. Hibiki 等人^[7]对 $D_h=1.02\text{ mm}$ 的小管内垂直上升发展泡状流的空隙率、泡状平均直径、泡状数密度、截面浓度等物理参数进行了测量. Kawahara 等人^[8]实验研究了流体物性对水平圆管小通道内两相流特性的影响,分析了气泡速度、空隙率和压降对气-液两相流动的影响.

已有文献对圆形截面、矩形窄缝和非圆形截面(三角形、正方形、梯形等)小通道中的不同溶液的两相流动流型、压降以及换热系数等进行了实验研究和理论分析. 本文对非圆形截面小通道内高黏性(质量分数为 50% 的蔗糖)和黏弹性(质量分数为 0.4% 的 CMC)溶液的气-液两相流动进行研究,探究了黏弹性、表面张力等物性对于实验的影响.

1 实验系统

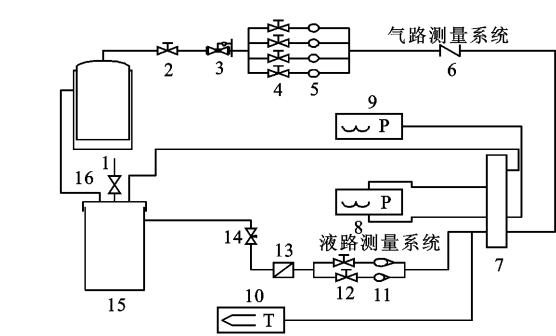
本实验在图 1 所示的两相流实验台上完成. 气体由高压氮气瓶提供,流经稳压阀、调节针阀、热式气体质量流量计后进入实验段. 在调节针阀与实验段之间装有单向止回阀,以防止因实验段中液路压力过大而导致的液体流入气路损坏气体流量计. 储液罐内溶液经氮气瓶高压氮气加压,流经针阀、过滤器、调节阀、转子流量计后进入实验段,随后气液混合溶液从实验段流出返回开口的储液罐. 实验系统中流量计采用并联布置,一路工作,其余各路保持关闭.

实验段材料为具有良好透光性的有机玻璃,便于流型拍摄和捕捉. 实验段流动通道截面为正方形,其结构见图 2,参数见表 1.

表 1 实验段结构参数

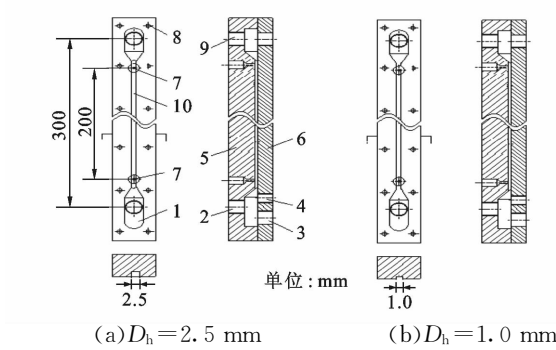
边长/mm	D_h/mm	取压段长度/mm
1.0	1.0	200
2.5	2.5	200

实验采用数码摄像机实现可视化,通过 VMTV 视频捕捉软件将数码摄像机拍摄的图像传递到计算机,捕捉存储瞬态的图像和动态的录相. 实验结果分析选取的工况及其参数如表 2 所示.



1:高压氮气瓶;2:针阀;3:稳压阀;4:调节针阀;5:热式气体质量流量计;6:止回阀;7:实验段;8:差压变送器;9:压力变送器;10:热电偶;11:转子流量计;12:调节阀;13:过滤器;14:针阀;15:储液罐;16:放气阀

图 1 实验装置流程图



1:气液混合室;2:入液口;3:入气口;4:测温孔;5:有机玻璃盖板;6:有机玻璃底板;7:测压孔;8:密封螺丝;9:气液出口;10:小通道

图 2 实验段结构示意图

表 2 实验工况和参数

工况	表观气速 $J_G/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	表观液速 $J_L/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	0.1	0.01
2	0.3	0.01
3	0.6	0.01
4	1.0	0.01
5	3.0	0.01
6	7.0	0.01
7	0.3	0.02
8	5.0	0.02
9	0.1	0.04
10	0.3	0.04
11	0.5	0.05
12	3.0	0.06
13	0.7	0.30
14	1.0	0.50
15	0.7	1.00
16	5.0	1.00

2 正方形小通道内两相流动实验结果与分析

2.1 $D_h=2.5\text{ mm}$ 时不同性质溶液-氮气的两相流型

实验拍摄了 $D_h=2.5\text{ mm}$ 的正方形截面小通道内水-氮气的两相流型如图3所示,随着表观速度的增大,共获得了3种流型:弹状流、搅拌流和环状流。

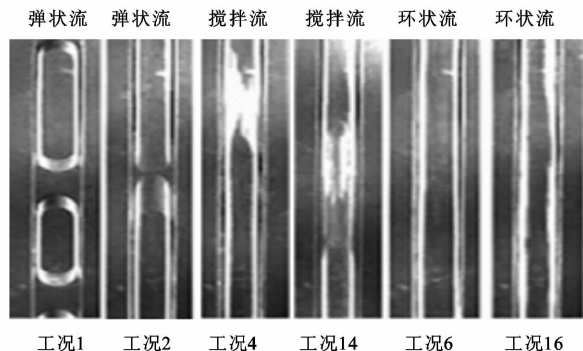


图3 $D_h=2.5\text{ mm}$ 时水-氮气的典型流型

如图4所示, $D_h=2.5\text{ mm}$ 的通道内 CMC-氮气两相流动中出现的典型流型分别为弹状流、弹环状流、弹状-搅拌流、搅拌流和环状流。CMC 溶液的零剪切黏度 $\eta_0=400\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 极限剪切黏度 $\eta_\infty=15\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右, 该溶液在 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 下的流变方程^[9]为 $\tau=0.372\dot{\gamma}^{0.7296}$ 。CMC-氮气在低液速、低气速下呈现的弹状流型与水-氮气流型中的气弹相比, 其弹头变得比较尖。这是因为在低速剪切时 CMC 的黏性较大, 弹头与液体间的摩擦力增大对气弹进行了拉伸。在高液速、低气速条件下, 已经观察不到完整的弹状流, 此时气弹头部曲率很大, 气弹尾部破碎, 形成了弹状-搅拌流。

如图5所示, $D_h=2.5\text{ mm}$ 的通道内蔗糖-氮气两相流动中出现的典型流型有弹状流、弹环状流、搅拌流和环状流。

实验中所用蔗糖溶液属于牛顿流体。蔗糖溶液

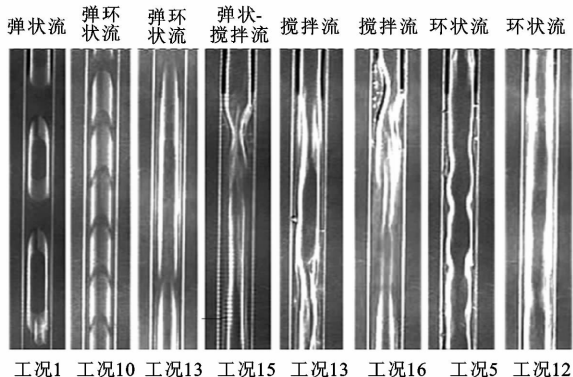


图4 $D_h=2.5\text{ mm}$ 时 CMC-氮气的典型流型

在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下对应的密度为 $1.229\text{ }57\text{ g/mL}$, 黏度为 $15.845\text{ }4\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ^[10], 其在低液速、低气速下呈现弹状流型, 弹头和弹尾为半球状, 其中弹头比水-氮气的尖, 但比 CMC 的平, 这是由于溶液在低速条件下黏度比 CMC 小、比水大而导致的结果。在液速较低的情况下, 蔗糖溶液出现了弹环状流。这是因为蔗糖溶液的高黏性使得液膜比较稳定, 气弹很难破碎, 在黏性力和表面张力的共同作用下, 气弹直接首尾相连而过渡到环状流。

2.2 $D_h=2.5\text{ mm}$ 时不同性质溶液-氮气的流型转变

$D_h=2.5\text{ mm}$ 时3种不同性质溶液的流型转变如图6所示。可以看出, 不同工质的转变界限有所不同, 下面对不同溶液的流型转变进行分析。

(1) 水和蔗糖溶液流型转变对比分析。在低表观液速下, 两种溶液的流型转变走向基本相同, 蔗糖溶液在低液速下的搅拌流区域较水的小。在较高的液速下, 蔗糖溶液弹状流区域减小, 在 $J_L>1\text{ m/s}$ 的低气速工况已经不再出现弹状流。其原因是蔗糖溶液的黏性很高, 低速情况下两相流动更为稳定, 因而搅拌流型区更小。液速增大到一定值后, 气弹和液弹的交替上升, 使得气弹尾部受到大的剪切力, 黏性越大剪切力越大, 因而转化为搅拌流的气速比水所需的小。

(2) CMC 和蔗糖溶液流型转变对比分析。CMC 溶液不仅有黏性, 还有弹性, 具有剪切稀化特性, 而蔗糖溶液只具有高黏性。低液速下 CMC 的弹状流-搅拌流和搅拌流-环状流转变曲线比蔗糖的向右弯曲, 这是因为低液速下 CMC 的黏性要比蔗糖的大得多。随着液速的增大, 蔗糖的弹状流-搅拌流转变界限比 CMC 的向右弯曲, 这是因为随着液速的增加, CMC 的剪切稀化作用使其黏性逐渐减小, 从而导致蔗糖在高液速区搅拌流的区域比 CMC 的更宽。

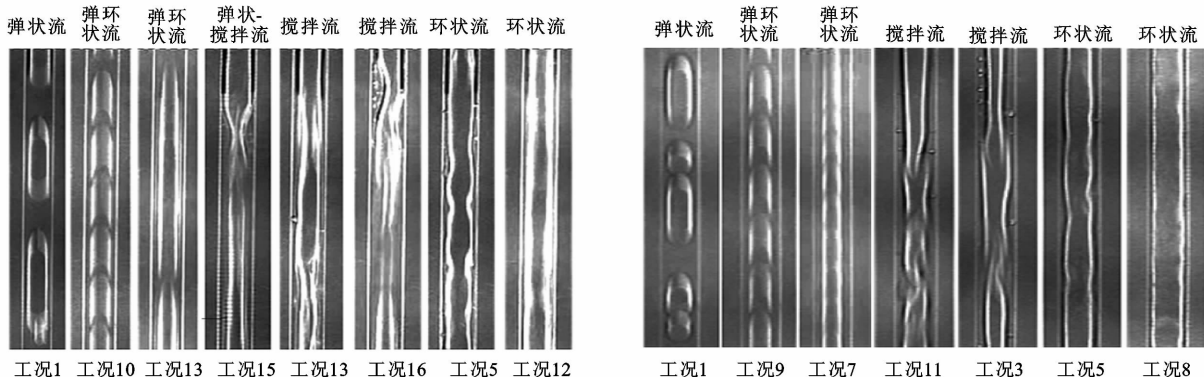


图5 $D_h=2.5\text{ mm}$ 时蔗糖-氮气的典型流型

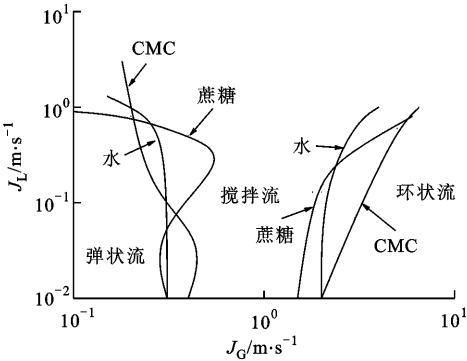


图 6 $D_h=2.5$ mm 时 3 种不同性质溶液-氮气流型转变图

2.3 不同水力直径时蔗糖-氮气的两相流型

为进一步探索水力直径、表面张力等物性对黏性流体的影响,研究了 $D_h=1.0$ mm 的正方形小通道内蔗糖-氮气的两相流动. 图 7 为 $D_h=2.5, 1.0$ mm 时蔗糖-氮气流型转变对比图,其中两者的流型转变走势基本相同,但界限转折点不同. 弹状流-搅拌流以及搅拌流-环状流的界限随着水力直径的减小均向右移动,这是由于水力直径不同时,相界面的变化受到了影响. 一方面,由于搅拌流的产生是流体湍流引起的,在相同速度下,水力直径越小 Re 越小,因而在同一液速下,搅拌流转化所需气速也就更大. 另一方面,小尺度使表面张力作用增强,液弹不易破碎,两相界面更易维持,因此 1.0 mm 通道中弹状流和环状流的区域明显大于 2.5 mm 通道的.

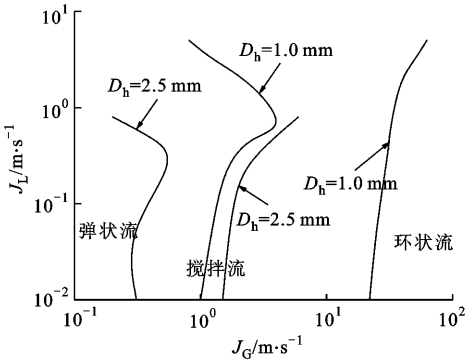


图 7 $D_h=2.5, 1.0$ mm 时蔗糖-氮气流型转变图

2.4 $D_h=2.5$ mm 时不同性质溶液-氮气两相摩擦压降

图 8 为水、蔗糖、CMC 3 种工质分别在所给定液速下的压降 Δp_f 对比图,对其进行分析如下.

(1)低液速时,3 者的压降差别比较大,而在较高液速时压降差别减小. 由于液速较低时 3 种溶液

的气液两相的摩擦压降黏性起主要作用,CMC 和蔗糖都具有高黏性,因而其压降远高于水的. 另外,低气速时 CMC 的压降高于蔗糖溶液的,而高气速时蔗糖溶液的压降高于 CMC 的. 这是因为气速的增大带动了 CMC 溶液的剪切稀化作用,使其黏性减小,压降增长减小.

(2)高液速时,同一表观气速下蔗糖的两相压降最高,CMC 次之,水最低. 这是因为速度较高时,对于 CMC 而言,其分子已经充分伸展,达到极限剪切黏度,弹性消失,这时 CMC 的流动规律和液体单相流动时相同,流动特性比较稳定.

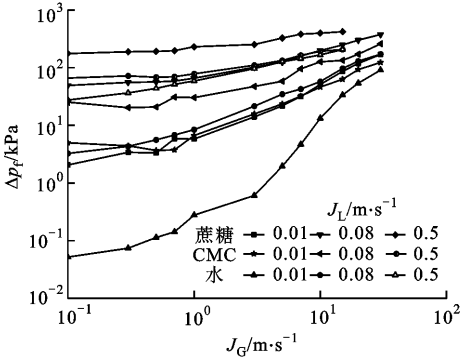


图 8 $D_h=2.5$ mm 时 3 种不同性质溶液-氮气两相摩擦压降

对不同性质溶液-氮气两相流体的压降特性采用 Chisholm 方法进行分析,发现对于牛顿流体溶液水和蔗糖,其数据符合较好,而对于非牛顿流体 CMC 溶液,如图 9 所示,Chisholm 方法已经不适用,应寻求一种新的处理方法.

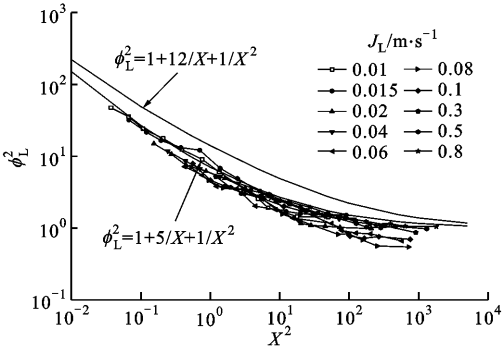


图 9 $D_h=2.5$ mm 时 CMC-氮气两相乘积因子 ϕ_L^2 与 Martinelli 数 X^2 的关系图

2.5 不同水力直径时蔗糖-氮气两相摩擦压降

在小通道内,通道的尺寸、形状对于流体的表面张力、二次流动等现象的影响一直是人们不断探索研究的对象^[4-6,11]. 图 10 为高黏性蔗糖溶液在不同

水力直径、不同流速下的压降对比图,通过分析可以得出以下结论。

(1)在同一表观气速下,2.5 mm 通道的压降明显大于 1.0 mm 通道的。这是因为水力直径越小所对应的 Re 越小,从而所得的压降越小。

(2)在不同水力直径的小通道内,随着气速增加,其压降的增加趋势是相似的,然而在一定表观气速范围内,随着表观液速的增大,1.0 mm 通道内压降的增长比 2.5 mm 通道缓慢,两者的差值逐渐增大。同时,在 1.0 mm 通道内出现了明显的二次流动现象。

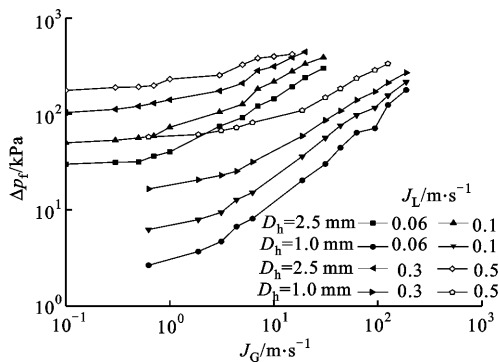


图 10 正方形小通道内蔗糖-氮气两相摩擦压降

3 结 论

本文通过可视化实验观察正方形通道内不同性质溶液-氮气的两相流型,得到以下结论。

(1)通过 $D_h=2.5$ mm 的正方形通道内不同性质溶液-氮气两相流动的可视化实验研究,获得了不同性质溶液-氮气的流型图及其流型转变图,并对其影响因素进行了分析,研究结果对工程应用具有一定的参考价值。

(2)通过对 $D_h=1.0$ mm 的正方形通道内蔗糖-氮气两相流动的研究,获得了 $D_h=2.5, 1.0$ mm 的通道内流型转变对比图,研究了水力直径对高黏性流体流型转变的影响,同时发现 $D_h=1.0$ mm 的通道内存在明显的二次流动现象。

(3)分析对比了 $D_h=2.5$ mm 和 $D_h=1.0$ mm 通道内的两相摩擦压降,发现 Chisholm 方法对于非牛顿流体的压降处理已不再适用。

参考文献:

[1] WILLIMARTH T, ISHII M. Two-phase flow regime in narrow rectangular vertical and horizontal Channels

[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(12): 1749-1758.

[2] WILLIMARTH T, ISHII M. Interfacial area concentration and void fraction of two-phase flow in narrow rectangular vertical channels[J]. Journal of Fluid Engineering, 1997, 119(4): 916-922.

[3] TRIPLETT K A, GHIAASIAAN S M. Gas-liquid two-phase flow in microchannels; part II void fraction and pressure drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(11): 395-401.

[4] WOLK G, DREVER M, RATH H J. Flow patterns in small diameter vertical non-circular channels[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(6): 1037-1061.

[5] ZHAO T S, BI Q C. Co-current air-water two-phase pattern in vertical triangular microchannels[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(5): 765-782.

[6] SATITCHAICHAROEN P, WONGWISES S. Two-phase flow pattern maps for vertical upward gas-liquid flow in mini-gap channels[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30(2): 225-236.

[7] HIBIKI T, TAKAMASA T, ISHII M. Some characteristics of developing bubbly flow in a vertical mini pipe[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(5): 1034-1048.

[8] KAWAHARA A, SADATOMI M, NEI K, et al. Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas-liquid two-phase flow in a circular microchannel[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(5): 831-841.

[9] 李静. 羧甲基纤维素钠溶液的流变性质及其对酸性乳体系的稳定作用[D]. 上海: 上海交通大学化学化工学院, 2007: 16-23.

[10] WEAST R C, ASTLE M J, BEYER W H. Handbook of chemistry and physics[M]. 67th ed. Boca Raton, Florida, America: CRC Press, 1986.

[11] 郭亚军, 毕勤成, 何永清. 正方形截面直通道内二次流现象的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 83-87.

GUO Yajun, BI Qincheng, HE Yongqing. Experimental investigation on secondary flow of air-water two-phase flow in straight channel with square cross-section[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 83-87.

(编辑 荆树蓉)