变截面毛细通道中气泡的运动特性分析

曹 瑜 张佐光 赵卫娟

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了确定复合材料成型过程中气泡的运动条件,利用变截面毛细模拟通道实验系统,研究了气泡在变截面毛细管中的运动行为,分析了气泡长度、毛细管半径及液体种类对气泡垂直穿出行为的影响,并从理论角度推导出气泡穿出的临界压力方程. 研究结果表明,气泡垂直穿出变截面毛细通道所需要的临界压力差,随气泡长度和毛细管半径的增大而减小,液体种类对其也有明显影响,实验结果与理论计算值基本吻合. 该研究结果将为复合材料成型中工艺参数的优化提供实验依据.

关 键 词: 复合材料; 孔隙; 气泡; 运动

中图分类号: TB 332

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0847-05

Mobility behavior for driving bubble traversing constricted capillary tubes

Cao Yu Zhang Zuoguang Zhao Weijuan

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Constricted capillary tubes were used in order to study bubble mobility condition in composite material during cure processing. The effects of bubble length, radius of capillary tube and the variety of liquid on the drive critical condition of a single bubble traversing through a joint of flow channel of constricted capillary tubes were studied. The results demonstrate that the critical pressure difference of bubble traversing through joint of constricted capillary tubes perpendicularly decreases with the increase of bubble length or the radius of capillary tube, and is also affected by the variety of liquid obviously. The experimental result tallies with the theoretical results, and the study has a certain reference value to optimize cure processing to reduce and remove voids in composites.

Key words: composite materials; void; bubble; mobility

随着复合材料应用的发展,复合材料中孔隙的存在越来越被人们所重视,孔隙缺陷对复合材料的性能有很大影响[1]. 由于技术原因以及基体树脂和增强材料本身的缺陷,使得制备无孔隙复合材料非常困难,但是研究气泡的形成和运动机理及排除措施,使其在复合材料中的含量降低到最低限度,对提高复合材料的质量却是非常重要的. 以往该领域的研究工作,主要集中于复合材料中气泡含量和孔隙率的研究[2-4],以及液态复合材料模塑 LCM(Liquid Composite Molding)过程中气泡形成的研究[5-8]. 然而,关于热压复合材料成型工艺中气泡在纤维单丝间的运动研究报道较少. 本文针对实际热压复合材料制备过程中纤维单丝间流动通道迅速聚集或分开的变化特点[9],研究了气泡在变截面毛细通道中的运动行为,分析了气泡长度、毛细管半径尺寸及液体种类对气泡垂直穿出变截面毛细通道的临界条件的影响. 研究结果对复合材料成型中气泡的排除具有一定的参考价值.

1 实验部分

1.1 实验原料及设备

乙二醇:分析纯,北京北化精细化学品有限责

收稿日期: 2005-08-18

基金项目: 国家 973 资助项目(2003CB615602); 国家 863 资助项目(2001AA335020)

作者简介: 曹 瑜(1981-), 男, 江西都昌人, 硕士生, i_cy@msn.com.

任公司;1,2-丙二醇:分析纯,北京益利精细化学品有限公司,所用液体物理性质见表1. 玻璃毛细管:半径0.10 mm,0.175 mm,0.25 mm,0.35 mm,0.5 mm,北京奥特玻璃管研究所;微量进样器:YY0088型鸽牌,量程10 μL,上海医用激光仪器厂;502胶:通用型,广东爱必达胶粘剂有限公司;游标卡尺:最小刻度0.01 mm,上海量具刃具厂.

表1 实验所用液体物理性能

液体名称	γ/(N·m^{-1})	η/(mPa·s)	ρ/(g·cm^{-3})
乙二醇	0.484	23.00	1.113
1,2-丙二醇	0.720	45.66	1.036

1.2 实验方法

通过对固化后纤维复合材料金相照片的观察,可以得知在固化成型过程中,纤维单丝间形成了许多形式复杂的流动通道. 对于树脂垂直纤维流动时,流动通道变化的特点是迅速的聚集和分开,即气泡和树脂是在截面迅速变化的流动通道中运动的[9].

因此,为了能够将研究气泡在纤维单丝间的垂直运动过程可视化,利用了一种微型变截面毛细流动通道进行实验分析,如图1所示.

该实验装置主要由液体承载部分、变截面流动通道部分和气泡注入部分3部分组成. 变截面流动通道是将两种半径大小不同的玻璃毛细管粘接在一起,要求小毛细管的外径与大毛细管的内径一致以保证连接处的密封性. 实验过程中,首先将液体倒入实验装置中,待左右两边玻璃管中的液面高度达到平衡后使用微量进样器向半径大的毛细管一端注入气泡,然后尽量保持左边玻璃管中的液面高度基本不变,缓慢地向右边玻璃管中滴加液体并实时观测气泡的运动状态,当气泡开始发生穿出运动时(如图2所示)记录下此时左右两边玻璃管中液面所在的刻度. 此时由左右两边玻璃管中的液面高度差h所产生的液体压力差

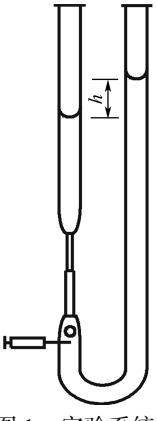


图1 实验系统示意图

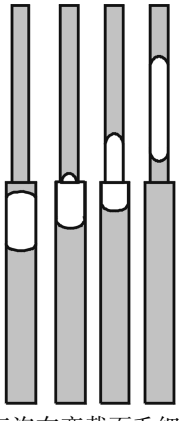


图2 气泡在变截面毛细管中穿出示意图

$P_l=\rho gh$ 认为是气泡垂直穿出变截面毛细通道所需的临界外加压力差. 其中,ρ 为液体密度;g为重力加速度.

2 理论分析

当气泡在变截面毛细流动通道中发生垂直穿出运动时,气泡的运动主要由作用在气泡上各个力之间的相互作用所控制,这里所说的力主要是由于气泡的形状和运动而引起的[10]. 如果忽略气泡中气体的粘性,那么,除了浮力 F_{buo} 外,只有3种力:液体惯性力 F_i、液体的粘性力 F_v 和表面张力 F_s[11]. 在一定液体压力差 F_l 的作用下,气泡所受到作用力合力为

$$F_{\mathrm{bub}}=F_{\mathrm{buo}}+F_{\mathrm{i}}+F_{\mathrm{v}}+F_{\mathrm{s}}+F_{\mathrm{l}}$$

其中,液体惯性力 $F_i=f(\rho v^2 d^2)$;液体的粘性力 $F_v=f(\rho vd)$;v为流体速度;d为气泡特征长度. 在实验过程中,气泡在变截面毛细流动通道中发生穿出运动前的初始状态为静止在变截面的连接处,即 $v=0$. 在实际热压成型过程中,树脂的流速满足 $v=k\dfrac{\Delta P}{\eta l}$,数量级处于 $10^{-5}\sim10^{-7}$ *m/s* 范围内[12]. 其中,k为渗透率系数;ΔP 为压力差;η 为粘性系数;l为气泡长度. 那么,在研究过程中液体的惯性力和粘性力都可以相对忽略不计时气泡受到的作用力为

$$F_{\mathrm{bub}}=F_{\mathrm{buo}}+F_{\mathrm{s}}+F_{\mathrm{l}} \tag{1}$$

在气泡穿出前气泡整体都处于截面积为S的毛细管中,因此式(1)展开为

$$P_{\mathrm{bub}}S=P_{\mathrm{buo}}S+(-P_{\mathrm{s}}S)+P_{\mathrm{l}}S$$

气泡在上升过程中所受到的净浮力为 $F_{buo}=\rho gV$,V为气泡的体积. 在截面为S的毛细管中,$P_{buo}=\dfrac{F_{buo}}{S}=\rho gl$. 而气泡在液体中所受到的液体压力差为 $P_l=\rho gh$.

气泡在穿出过程中会发生形变,即气泡穿出前端的表面曲率会发生改变,此时由于表面张力的作用,在气泡两端将产生一个方向与 P_{buo} 和 P_l 相反的附加压力差 P_a. *Gardescu* 通过 *Young-Laplace* 方程理论分析了驱使气泡水平穿出变截面连接处所需的附加压力差为

$$P_{\mathrm{a}}=2\gamma\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right) \tag{2}$$

其中,P_a 是气泡水平穿出运动时所要克服的附加压力差;γ 为气-液表面张力;r_1,r_2 为单个气泡前后两端的曲率.

由于式(2)中气泡的曲率不易测量,可以用

气泡表面与流动通道管壁间的夹角和通道半径来代替:

$$P_a = 2\gamma\left(\frac{\cos\theta_1}{R_1} - \frac{\cos\theta_2}{R_2}\right)$$

其中,θ_1 和 θ_2 是气泡上表面和下表面与流动通道管壁间的夹角;R_1 和 R_2 分别是流动通道的半径. 图 3 为气泡上下表面与毛细管管壁间的夹角示意图,在实验过程中首先通过数码相机拍摄记录下在体式显微镜下观测到的气泡在变截面毛细管中穿出过程中的形态,然后测量出气泡上下表面与毛细管管壁的夹角 θ_1 和 θ_2.

只有作用于气泡上的 P_{buo} 与 P_l 的和克服了表面张力所产生的附加压力差 P_a,即 $P_{buo}+P_l \geqslant P_a$ 时,气泡才可能垂直穿出变截面毛细管的连接处,由大毛细管进入到小毛细管中运动. 最终整理得到驱使气泡发生穿出运动的临界压力差 P_C 为

$$P_C = P_l \geqslant P_a - P_{buo} = 2\gamma\left(\frac{\cos\theta_1}{R_1} - \frac{\cos\theta_2}{R_2}\right) - \rho g l \qquad (3)$$

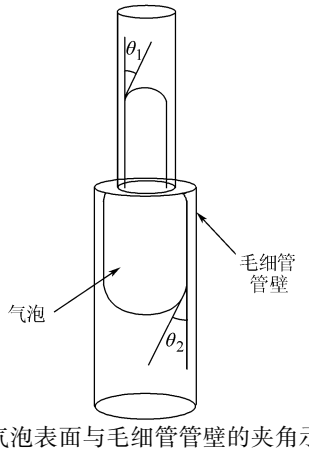


图 3　气泡表面与毛细管管壁的夹角示意图

在实际复合材料成型过程中,还需要考虑温度和压力等环境条件的影响. 温度和压力对气泡在液体中的运动状态的影响,主要体现在液体表面性能、液体密度和气泡在液体中大小等方面,因此环境条件的影响可以间接的通过式(3)中对应参数的改变体现其影响规律.

3　实验分析及验证

3.1　气泡长度对穿出临界压力差的影响

为了考察气泡长度对气泡垂直穿出变截面毛细管运动条件的影响,实验在室温、恒定液体(乙二醇)、恒定变截面(毛细管半径搭配为 0.25 *mm*/0.50 *mm* 和 0.35 *mm*/0.50 *mm*)条件下,分别测试了长度为 1.0 *mm*,2.0 *mm*,3.0 *mm*,4.0 *mm* 和 5.0 *mm* 的气泡垂直穿出毛细管连接处时的临界压力差,如图 4*a* 和图 4*b* 所示. 从图 4 中可以看出,气泡垂直穿出变截面毛细管连接处的临界压力差随着气泡长度的增加有下降的趋势.

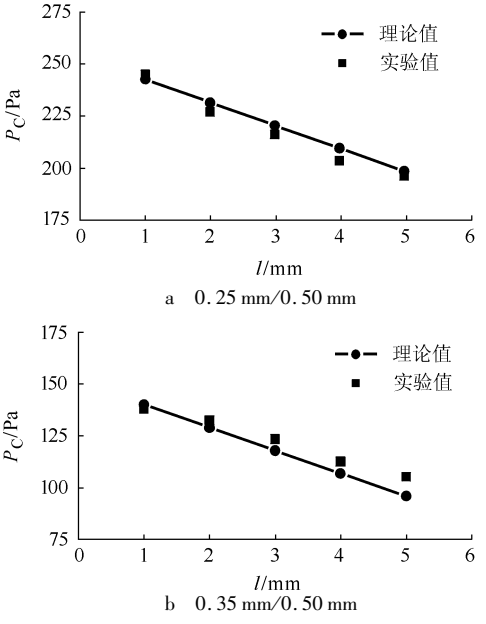


图 4　气泡垂直穿出时气泡长度—临界压力差关系

为了验证实验结果的合理性,可将实验数据与理论计算值进行比较,进行理论计算时代入方程式(3)中的参数见表 2(1). 由图 4 可以看出,理论曲线与实验曲线同样表现出了下降的趋势. 这是因为气泡在上升过程中自身存在浮力,而浮力与气泡的体积大小存在函数关系,当气泡长度越大时其所受的浮力作用越大,所以气泡穿出时所需要的临界压力差就会因气泡长度的增大而减小. 当实验所用液体及变截面毛细管半径都确定之后,式(3)中的 γ,R_1,R_2,θ_1,θ_2,ρ 全为定值,则式(3)可以化简为

$$P_C = -al + b \qquad (4)$$

其中,$a=\rho g$;$b=2\gamma\left(\frac{\cos\theta_1}{R_1}-\frac{\cos\theta_2}{R_2}\right)$.

由式(4)可以看出,式中只有气泡长度为自变量,且气泡垂直穿出变截面毛细管连接处的临界压力差与气泡长度成线性关系,与实验结果吻合较好.

表 2　理论计算所用参数

序号	液体名称	R_1/*mm*	R_2/*mm*	θ_1/(°)	θ_2/(°)
(1)	乙二醇	0.25	0.50	41.6	80.2
(2)	乙二醇	0.1~0.35	0.50	40.0	80.0
(3)	1,2-丙二醇	0.25	0.50	60.6	70.4

3.2　毛细管半径 *R* 对穿出临界压力差的影响

由式(3)可以看出,当实验所用的液体选定之后式中的 γ,ρ 都为定值,则气泡穿出变截面流动通道连接处时的临界压力差只与气泡两端的表

面曲率有关. 当气泡下端都处于同样半径的毛细管中时其表面曲率保持一致,即 R_2,θ_2 为恒值. 只改变气泡穿出连接处上端的曲率时,对于同一长度的气泡,式(3)可以化简为

$$P_C = \frac{c\cos\theta_1}{R_1} - C \tag{5}$$

其中,$c=2\gamma$;$C=\frac{2\gamma\cos\theta_2}{R_2}+\rho gl$.

实验发现,在本研究范围内气泡垂直穿出时的上端表面与毛细管管壁间的夹角随毛细管半径改变的变化不是十分明显. 为了进一步简化式(5),可以假设认为毛细管半径对气泡垂直穿出时上端表面与毛细管管壁间的夹角没有影响,那么,式(5)中又可以消除一个变量简化为

$$P_C = \frac{A}{R_1} - C \tag{6}$$

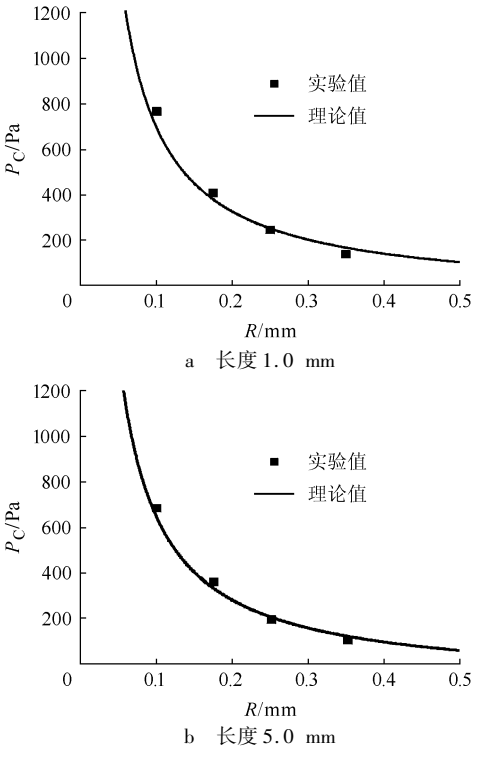
其中,$A=2\gamma\cos\theta_1$.

由式(6)可以看出,当其他影响因素确定,只考虑毛细管半径的影响时,气泡垂直穿出变截面毛细管所需的临界压力差 P_C 与毛细通道半径 R_1 成-1 次方的关系.

为了通过实验验证毛细管半径对气泡垂直穿出时的临界压力差的影响规律,实验过程中选用了 4 种不同半径大小的毛细管(毛细管半径分别为:0.10 *mm*,0.175 *mm*,0.25 *mm*,0.35 *mm*)与半径为 0.50 *mm* 的毛细管相连接. 图 5*a* 和图 5*b* 分别为长度 1.0 *mm* 和 5.0 *mm* 气泡垂直穿出变截面毛细管连接处时毛细管半径—临界压力差的关系,从图中可以看出,同一长度的气泡垂直穿出变截面连接处时的临界压力差随毛细管半径的减小而增大,而且实验曲线与理论曲线吻合效果比较好,理论计算时代入方程式(3)中的参数见表 2(2)这表明用所推导的理论方程来描述气泡在不同毛细管半径的变截面流动通道中的运动行为是可行的.

3.3 液体种类对穿出临界压力差的影响

液体自身性能是影响气泡垂直穿出变截面毛细流动通道连接处的主要因素之一. 为了研究液体种类对气泡垂直穿出变截面连接处的影响规律,实验中选用了乙二醇和 1,2 —丙二醇两种不同种类的液体. 实验研究了同长度气泡在不同液体中垂直穿出同一变截面连接处(毛细管半径搭配为 0.25 *mm*/0.50 *mm*)时的临界压力差. 图 6 为在不同液体中气泡穿出时气泡长度—临界压力差关系曲线,从图中可以看到由于液体种类的不同使得穿出时的临界压力差存在明显的差异.



a 长度 1.0 mm

b 长度 5.0 mm

图 5 气泡垂直穿出时毛细管半径—临界压力差关系

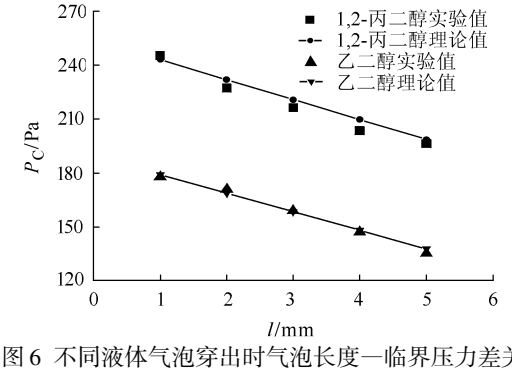


图 6 不同液体气泡穿出时气泡长度—临界压力差关系

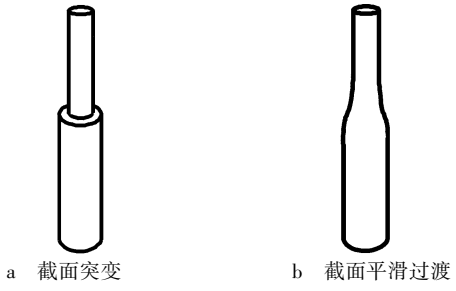
气泡在不同液体中运动时,除了液体 γ 和 ρ 的不同之外,气泡在同一变截面毛细流动通道中气泡上表面和下表面与流动通道管壁间的夹角也会发生改变,也就是说式(3)中的 γ,θ_1,θ_2,ρ 发生了改变,最后计算得到的 $P_a=2\gamma\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$ 必然存在差异,进行理论计算时代入方程式(3)中的参数见表 2(1)和表 2(3). 相同变截面流动通道中气泡所受到附加压力差的改变,是造成气泡在不同液体中作穿出运动时的临界压力差存在明显差异的主要原因.

3.4 变截面过渡形态对穿出临界压力差的影响

由于纤维单丝分布的不均匀性形成了许多复杂的流动通道不利于准确的定量研究. 因此,首先将纤维单丝的分布按照密实成型的等边三角堆积形式理想化,此时流动通道的收缩变化趋势是比

较平滑的. 为了能够更接近于实际中的流动通道,将原来由两个毛细管粘结在一起的流动通道(如图 7*a* 所示)进行了适当的改进,制作了截面变化较平滑的毛细管流动通道,如图 7*b* 所示.

图 8 所示为变截面过渡形态对气泡穿出临界压力差的影响规律. 其中,b_1,b_2,b_3 分别表示的是 3 种不同曲率的平滑过渡. 由图 8 可知,图 7*a* 中变截面毛细通道过渡形态的气泡在穿出过程中所需要的临界压力差(曲线 a)明显大于图 7*b* 中过渡形态中的值. 也就是说毛细管内径截面变化越是趋于平滑,气泡越是容易穿出,即气泡垂直穿出变截面处所需要的临界压力差越小.



a　截面突变　　b　截面平滑过渡

图 7　变截面毛细管流动通道的示意图

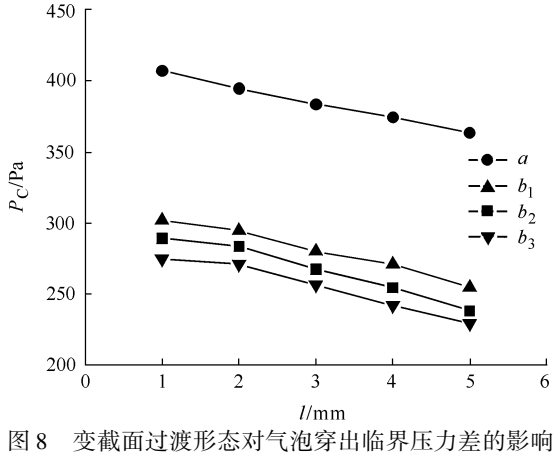


图 8　变截面过渡形态对气泡穿出临界压力差的影响

由于在复合材料成型过程中,纤维形成的通道截面是十分复杂且千变万化的,因此可以认为气泡在成型过程中穿出所需要的压力介于截面突变和截面平滑对称过渡两种情况.

4　结 束 语

气泡穿出变截面毛细通道运动行为的实验研究表明,气泡垂直穿出连接处时的临界压力差,随气泡长度和毛细管半径增大而减小,且与气泡长度成线性关系,与毛细管半径成-1 次方的关系. 液体种类和变截面过渡形态对气泡垂直穿出所需要的临界压力差也有较明显的影响. 所得到的运动条件理论方程较好地描述了气泡变截面毛细通道中的运动规律,且实验结果与理论计算结果吻合较好.

参考文献 (References)

[1] 盛磊. 纤维复合材料中孔隙的起因评述[J]. 航天返回与遥感,1996,17(2): 42-53
Sheng Lei. An overview of causes on porosity in fiber composites [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,1996,17(2): 42-53(in Chinese)

[2] Boey F Y C,Lye S W. Void reduction in autoclave processing of thermoset composites part 1: high pressure effects on void reduction[J]. Composties,1992,23(4): 261-265

[3] 李辰砂,冷劲松,杜善义,等. 纤维增强层合复合材料固化过程的研究[J]. 纤维复合材料,1999(1): 1-6
Li Chensha, Leng Jingsong, Du Shanyi, et al. Study on curing process of fiber reinforced composite laminates[J]. Fiber Composits,1999(1): 1-6(in Chinese)

[4] Kardos J L,Dave R,Dudukovic M P. Voids in composites[J]. Polymer Engineering and Science,1981,21(9): 518-533

[5] Loos A C,Springer G S. Curing of epoxy matrix composites[J]. Journal of Composite Materials,1983(17): 135-169

[6] Wood J R,Bader M G . Void control for polymer-matrix composites (1): theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles[J]. Composites Manufacturing,1994,5(3): 139-147

[7] Patel N,Rohatgi V,Lee L J. Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat[J]. Polymer Engineering and Science, 1995,35(10): 837-851

[8] Patel N,Lee L J. Modeling of void formation and removal in liquid composite molding part Ⅱ: model development and implementation[J]. Polymer Composites,1996,17(1): 104-114

[9] Lundström T S. Bubble transport through constricted capillary tubes with application to resin transfer molding[J]. Polymer Composites,1996,17(6): 770-779

[10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000: 378-379
Guo Liejin. Two-phase and multiphase dynamics [M]. Xi′an: Xi′an Jiaotong University Press, 2000: 378-379(in Chinese)

[11] 张远君. 两相流体动力学[M]. 北京:北京航空学院出版社,1987: 349-350
Zhang Yuanjun. Two-fluid hydrodynamic[M]. Beijing: Beijing Aeronautics Institute Press,1987: 349-350(in Chinese)

[12] José B,David Q. Rise of liquids and bubbles in angular capillary tubes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002 (247): 162-166

(责任编辑:彭　徽)