

W/O 乳化液分散相液滴破裂的临界条件

姜雪梅, 董守平, 张红光, 刘国彪, 王彦丽

中国石油大学机电学院流体实验室, 北京 102249

[摘要] 分析牛顿型液-液两相乳化液的分散相液滴的破裂机理及其临界条件, 用 Couette 双圆筒装置形成薄层纯剪切流场, 通过白油包水型乳化液滴在不同剪切率下的变形和破裂情况, 验证临界破裂条件并加以修正。提出对于油水旋流分离器, 根据实际的流场分布和乳化液的物性特点, 可以预测分离效果; 或根据分离器的分离能力, 适当控制其转速或流量等操作条件, 使内部流场合理分布, 防止乳化液进一步乳化。为此, 研究液滴的临界破裂条件可为各类油水乳化液分离设备内部的剪切分布的合理性提供可靠依据和优化指标。

[关键词] 分散相液滴; 剪切率; 破裂; 纯剪切流场

[中图分类号] TE622.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)05-0063-03

Critical Breakage Condition for Dispersed Droplets of W/O Emulsion

JIANG Xuemei, DONG Shouping, ZHANG Hongguang, LIU Guobiao, WANG Yanli

Hydromechanics Lab., School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The mechanism and critical breakage condition of dispersed droplets in Newtonian liquid-liquid emulsion was analysed. A lamina shear flow was obtained by Couette double-cylinder device. Based on the deformation and breakage of the water-in-oil emulsion at different shearing rates, the critical breakage condition was validated and updated. With respect to the water-oil hydrocyclone, the separate effect can be forecast by the flow distribution and the physical properties of the emulsion. According to the separate capability of the hydrocyclone, the operating condition such as rotating speed and flux can be appropriately controlled to maintain a reasonable distribution of the internal flow field, therefore, to prevent a further emulsification. The study of the critical breakage condition can provide a reliable basis to determine the proper shear distribution in various emulsion separating devices.

Key Words: disperse phase droplet; shear rate; breakage; simple shear flow

CLC Number: TE622.5

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)05-0063-03

0 引言

牛顿型液-液两相乳化液的分散相液滴在外力场的作用下, 会同时发生拉伸变形、破裂或聚合现象, 较小液滴发生碰撞聚合, 较大液滴被剪碎, 经过一段时间后达到一种动态平衡, 此时存在能够经受外力作用而不会破裂的最大稳定液滴。当分散相浓度较低时, 聚合

作用影响较小, 液滴的最大稳定粒径主要由破裂决定。目前油水重力沉降设备和旋流器中都对液滴引入了剪切力, 若能了解分散相在流场中是否发生破裂而进一步乳化, 可以预测油水分离效果。本文将通过分析分散相液滴的变形、破裂的机理和临界条件, 来分析在纯剪切流场中, 对于给定物理性质和粒径分布的乳化液介

收稿日期: 2006-12-25

作者简介: 姜雪梅, 女, 北京市昌平区府学路 18 号 146 信箱中国石油大学机电学院, 博士研究生, 主要从事油水分离方面的研究;

E-mail: jxmshch@sina.com

董守平(通讯作者), 男, 北京市昌平区府学路 18 号 146 信箱中国石油大学机电学院, 教授, 主要从事高等流体力学、多相流测量、粒子成像测速、数字化图像处理等方面的基础理论研究和现场应用研究; E-mail: dongshouping@163.com

质,不同剪切率下液滴发生破裂的临界半径,为各类油水乳化液分离设备内部的剪切分布的合理性提供可靠的依据和优化指标。

1 纯剪切流场中液滴破裂机理及临界半径的确定

牛顿型液-液两相体系中分散相的变形、破碎和聚合研究始于 20 世纪 30 年代,最早由 Taylor^[1-2]研究双曲线流场和纯剪切流场中液滴变形时,提出液滴变形和破裂的小变形理论和大变形理论,认为黏度比 λ 和界面张力系数 Ca 一起控制牛顿型液滴的形变。Taylor 的小变形理论假设,初始形状为球形的液滴在受到剪切力或拉伸力时,将发生椭球状形变,当变形度接近 0.5 时破裂为 2 个更小的液滴。Cox^[3],Barthes-Biesel^[4]和 Rallison^[5]都分别对 Taylor 的小变形理论进行了修正。大形变理论则认为,当黏度比 $\lambda < 0.01$ 时,液滴将被拉伸成稳定的丝状,只有当流动停止时,丝状物才发生破裂^[2]。Tomotika^[6]指出,这种破裂是由于柱形丝状物的界面扰动所致,丝状物的不稳定性可由正弦畸变增长率 q 来描述。为此,液滴的变形或破裂可根据黏度比 λ 和界面张力系数 Ca 来评价。

界面张力系数为黏性力(使液滴发生变形)与界面张力(使液滴保持球状)的比值,即 $Ca = \frac{\eta_c \dot{\gamma} R}{\sigma}$,若界面张力不足以抵制剪切力引起的液滴变形,液滴将发生破裂。为此,界面张力系数存在一个临界值,该值主要取决于流场类型和两相的黏度比。已知给定流场中发生破裂的临界界面张力系数,就可以确定发生破裂的液滴的粒径范围。

Taylor^[1-2]提出了在双曲线流场和纯剪切流场中,牛顿型液-液两相体系中的分散相液滴发生破裂时,黏性比 $\lambda \rightarrow 0$ 时,临界界面张力系数 Ca_{crit} 的经验公式为

$$Ca_{crit} = \frac{16\lambda + 16}{19\lambda + 16} \quad (1)$$

De Bruijn^[7]通过拟合 Grace 的实验数据,推导出在纯剪切流场中,牛顿型液-液两相体系中的液滴发生破裂时,临界界面张力系数的经验公式为

$$\log(Ca_{crit}) = -0.506 - 0.099 \log \lambda + 0.124 (\log \lambda)^2 - \frac{0.115}{\log \lambda - \log 4.08} \quad (2)$$

求出临界界面张力系数后,根据 $R_{crit} = \frac{Ca_{crit} \sigma}{\eta_c \dot{\gamma}}$,就可

可确定不同剪切率下发生破裂的液滴粒径范围。

董守平^[8]从流体动力学的角度入手,假设液滴界面膜的内外压差与其界面张力相等,通过分析剪力场中液滴运动时的受力情况,得出液滴受的剪切力与液滴形态及其界面张力间的关系为

$$\tau = \frac{r_{ab}^3 - 1}{r_{ab}^3 + 1} \cdot \frac{4\sigma}{d} = \alpha \tau_{crit} \quad (3)$$

令 $\alpha = \frac{r_{ab}^3 - 1}{r_{ab}^3 + 1}$,则根据 α 的大小可以衡量乳化液接

近乳化的程度。当液滴的长短径比 r_{ab} 愈大,分散相液滴所受的剪切应力也愈大,液滴也越易破裂。当 $r_{ab} \gg 1$ 时,液滴被拉长成细丝状,流场稍有扰动即破碎成小液滴,此时其剪切应力为 $\tau_{crit} = 4\sigma/d$,称为临界乳化剪切强度,

相应地液滴临界破裂半径为 $R_{crit} = \frac{2\sigma}{\eta_c \dot{\gamma}}$ 。

根据 Taylor 的小变形理论,当变形度 $D = (a-b)/(a+b) = 0.5$ 时,液滴发生破裂,则此时对应的 $r_{ab} = 3, \alpha = 0.929$ 。

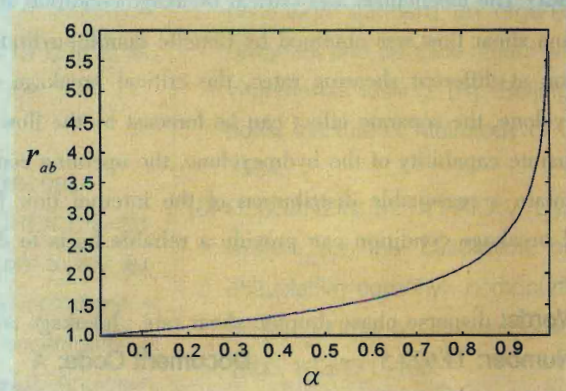


图 1 分散相液滴变形的 r_{ab} 与 α 的关系曲线

Fig. 1 Relation ship between r_{ab} and α in droplet deformation

图 1 给出了分散相液滴变形的 r_{ab} 与 α 的关系曲线。由图 1 可知,在很大范围内液滴的变形都很小。当 $0.3 \leq \alpha \leq 0.8$ 时,相对应的长短径为 $1.2 \leq r_{ab} \leq 2.1$,变形率不大,而当 $\alpha \geq 0.9$ 时,液滴的变形急剧加大,接近严重乳化的程度。为此可将乳化理论的临界破裂半径修正为 $R_{crit} = \frac{2\alpha\sigma}{\eta_c \dot{\gamma}}$ 。

2 实验分析及应用

2.1 实验分析

本实验采用内筒旋转、外筒固定的 Couette 双圆筒装置,形成薄层纯剪切流场。实验介质为浓度 25% 的白油包水型乳化液,室温 25℃ 时,白油黏度为 $\eta_c=36\text{mPa}\cdot\text{s}$,两相黏性比 $\lambda=\eta_d/\eta_c=0.0278$,油水界面张力 $\sigma=3.36\times 10^{-3}\text{N/m}$ 。根据上述 3 种经验公式的分散相液滴破裂时的临界半径与剪切率之间的关系式分别为

Taylor 理论:

$$Ca_{\text{crit}}=0.995, R_{\text{crit}}=\frac{0.092}{\dot{\gamma}}$$

De Bruijn 理论:

$$Ca_{\text{crit}}=1.005, R_{\text{crit}}=\frac{0.093}{\dot{\gamma}}$$

临界乳化理论:

$$R_{\text{crit}}=\frac{0.187}{\dot{\gamma}}$$

对于本实验条件及介质的物理性质, Taylor 理论与 De Bruijn 理论的预测非常接近, 由于临界乳化理论是以假设乳化液发生严重乳化为极限条件, 所以临界半径会大一些。

内筒以不同的转速旋转, 当剪切力为 5.93N/m^2 时, 根据实验观察, 此时液滴的长短径比为 1.6, 液滴已经开始发生破裂, 由于此时 $\alpha=0.608$, 则修正的临界乳化理论临界半径为 $R_{\text{crit}}=\frac{0.113}{\dot{\gamma}}$, 基本接近 Taylor 理

论与 De Bruijn 理论的预测值。内筒转速继续增大, 当剪切力为 8.83N/m^2 时, 液滴的长短径比为 2.87, $\alpha=0.92$, 乳化液已经发生严重乳化现象, 与临界乳化理论基本吻合。

2.2 实际应用

若将临界破裂理论应用于油水旋流分离器, 则首先分析其轴向、径向和切向速度场的分布特点。轴向和径向速度有利于加速分散相液滴分离, 对液滴形变影响不大; 切向速度场的剪切率较大, 对液滴变形、破裂或聚合有较大影响。为此, 通过分析其切向速度场的剪切率或剪切应力, 并根据欲分离的乳化液物性特点, 确定不同剪切条件下液滴发生破裂作用的最小半径, 由此来确定乳化液能否被有效分离; 或者根据旋流器的分离能力, 分析对于给定油水乳化液滴破裂的临界剪切率, 根据此来控制旋流器转速或流量, 形成适当的流

场分布 (不同条件下的流场分布情况可通过数值模拟获得), 防止乳化液进一步乳化, 以便实现油水乳化液的有效分离。为此, 临界破裂条件的研究可为目前正在应用的油水分离设备的剪切力场的合理分布提供理论依据。

3 结论

1) 分析纯剪切流场中, 分散相液滴破裂机理及临界破裂条件, 给出相应经验公式, 通过实验加以验证并进行适当修正, 与 Taylor 理论及 de Bruijn 理论的预测值相符。

2) 提供临界破裂理论的实际应用方法和方向, 可为评价油水旋流分离器的分离效果或其内部流场的合理分布提供理论依据。

参考文献(References)

- [1] TAYLOR G I. The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid [J]. Proc Roy Soc, 1932, A138: 41-48.
- [2] TAYLOR G I. The formation emulsions in definable fields of flow[J]. Proc Roy Soc, 1934, A146: 501-523.
- [3] COX R G. The deformation of a drop in a general time-dependent fluid flow [J]. J Fluid Mech, 1969, 37 (3): 601-623.
- [4] BARTHSES -BIESEL D, ACRIVOS A. Deformation and burst of a liquid droplet freely suspended in linear shear field[J]. J Fluid Mech, 1973, 61: 1-21.
- [5] RALLISON J M. A note on the time-dependent deformation of a viscous drop which is almost spherical[J]. J Fluid Mech, 1981, 98: 625.
- [6] TOMOTIKA S. On the instability of a cylindrical thread of a viscous liquid surrounded by another viscous fluid[J]. Proc Roy Soc, 1935, A150: 322-337.
- [7] DE BRUIJN R A. PhD Thesis. Eindhoven, the Netherland: Eindhoven University Technology, 1989.
- [8] 胡盟明, 董守平. 油水乳化液中分散相液滴的力学行为初探 [J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(4): 46-50.
HU Mengming, DONG Shouping. Investigation of mechanical behaviors of droplets in the discrete phase of oil-water emulsion[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(4): 46-50.

(责任编辑 岳臣)