

文章编号: 1001-4888(2017)03-0439-06

水击谐波流场中乳化油液滴粒径的 PIV 测量^{*}

陈盈洁¹, 刘 阁²

(1. 重庆市第八中学校, 重庆 400030; 2. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067)

摘要: 为了掌握乳化油液滴在水击谐波流场中的碰撞、破裂、聚集和变形等微观形态的变化规律, 采用粒子图像测速(PIV)技术对水平方管中乳化油液滴的水击谐波流场进行了测量, 分析了在水击谐波流场中, 不同激振力作用下乳化油液滴的粒径变化。测量结果表明, 在水击谐波流场作用下, 乳化油液滴平均粒径的增长率随着激振力的减小而减小, 随着作用时间的增大呈增加趋势, 直至粒径处于一种动态平衡; 乳化液滴随着激振力增大到达波节聚集位置的时间减少, 可见增大水击谐波激振力有利于乳化液滴的聚集并合并为大尺度的液滴, 从而有效地提高了水击谐波流场作用下的油水分离效果。

关键词: 乳化油液滴; 水击谐波流场; 粒径; 激振力; PIV

中图分类号: TH815

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-135

0 引言

液压油在使用的过程中极易混入水分^[1], 影响系统的正常工作, 油中水分含量是仅次于固体颗粒物的一种污染。因此对油中含水量的检测成为工业用油的研究热点之一。常见的油水分离技术存在着一定的选择性和可靠性问题, 在应用方面受到一定的限制^[2]。

水击现象产生的压强是交替变化的, 即是脉冲波动的^[3-5], 称作水击谐波力, 应用水击谐波力处理油水分离的方法是一种新型的分离技术^[6-8]。油中乳化液滴粒子在水击谐波场中受到的作用力不同, 会产生聚集和破裂等微观动态变化, 同时粒径也发生变化, 如在水击谐波的作用下乳化液滴相互聚集可以克服油水界面能, 使多个油包水粒子合并为大尺度液滴; 反之油包水粒子可分裂或发散“逸出”成小尺度液滴^[9]。而且由于油液中的乳化液滴粒子运动过程的随机性^[10,11], 这些情况可能同时发生。因此, 在水击谐波的作用下油中乳化液滴粒径的变化情况反映了乳化液滴碰撞、破裂、聚集或变形等微观状态的变化规律, 考察乳化液液滴的粒径变化规律对于掌握液滴的微观运动特性具有重要作用。

随着电子技术、计算机技术、图像处理技术和激光技术的发展, 粒子图像测速法(PIV)已成为研究流体流场的先进手段, 具有能够实现无扰动, 有效测量流场的流速分布等特点。如 Geng 等^[12]使用 PIV 对管状光催化反应器中粒子的运动和分布进行了研究, 发现粒子的数量随流量增加而降低, 粒度分布主要受径向速度的影响。Zou 等^[13]利用欧拉-欧拉仿真与 PIV 实验研究了混合泵内流场的变化情况, 分析了叶轮速度流速以及液滴粒径对连续相流场和分散相分布的影响, 表明较小的叶轮速度、流速和粒径有助于分散相分布的均匀性。Ayati 等^[14]利用 PIV 对两相流模型进行了验证研究, 分析了两相流体的流速动态情况。Barthès 等^[15]应用 PIV 测量研究了液体循环和声波的垂直传播之间的相互作用。Shi 等^[16]利用 PIV 提出了一种基于灰度统计水平和颗粒大小的两阶段识别方法。

^{*} 收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375516); 重庆基础与前沿研究资助项目(cstc2016jcyjA0185)

通讯作者: 刘阁, 女, 副教授, 主要从事流体动力学方面的研究。Email: lycy9945@163.com

本文基于水击谐波的油水分离实验平台,采用 PIV 技术对不同谐波作用力下水平方管中乳化油液的流速分布进行测量,对不同谐波作用力下液滴的聚集等微观状态的变化进行深入探讨,获取乳化液液滴的粒径变化规律,为采取有效的控制措施来提高水击谐波场中油水分离效果提供前期研究基础。

1 实验装置与方法

1.1 水击谐波场实验装置

实验采用的水平方管(如图 1 所示),由有机玻璃制成,其管壁厚度为 8mm,管的总长度为 524mm,两端设置有 $\phi 42\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的连接圆槽,两端为 $\phi 24\text{mm} \times 8\text{mm}$ 的进出口。

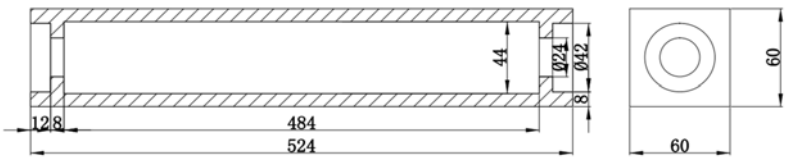


图 1 水平方管的几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometry model of Horizontal square pipe (unit: mm)

整个实验在 25℃下进行,采用液压油做实验介质(连续相),以蒸馏水作为离散相,含量为 0.1%。为保证油样中水分能够形成均匀稳定的油水分散系,对所有油样进行 8h(60℃)超声波振荡,再进行 PIV 测试实验。连续相和离散相的主要参数如表 1 所示。

表 1 连续相和离散相的主要参数

Tab. 1 Main parameters of continuous phase and discrete phase

连续相密度(kg/m^3)	895	连续相粘度($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)	1.074
连续相速度(m/s)	0.0362	离散相浓度(%)	0.1
离散相密度(kg/m^3)	1000	离散相粒径范围(μm)	50~100
离散相中值粒径(μm)	75		

在水平方管中,主要有信号发生器、功率放大器、激振器等组成水击谐波场。其参数性能如表 2 所示。通过信号放大器将信号发生器输出的信号放大后输入到激振器,控制激振器形成一定频率和激振力的振动波,施加到水平方管中形成水击谐波。根据课题组前期的研究结果^[17],在水击谐波场中具有一定运动速度的大粒径分散相液滴所受到的谐波作用力较大,所以运动速度较大,趋于波节的时间越来越短,其聚结时间随液滴粒径的增大而缩短,可见不同的水击谐波作用力对油中乳化液滴的粒径变化有着重要的影响。实验中通过控制信号发生器形成 12N、10N、8N、6N 共 4 个工况,使水平方管中的乳化液滴在不同的激振力作用下产生碰撞、破裂、聚集或变形等微观运动以进行 PIV 测量。

表 2 产生水击谐波场的装置参数

Tab. 2 The parameters of devices to obtain water hammer harmonic

名称	型号	厂家	性能参数
信号发生器	VC2003	宝应宝飞振动仪器厂	频率范围:1Hz~3MHz,幅度范围:10mV~16V,正弦波输出
功率放大器	GF200	宝应宝飞振动仪器厂	额定输出电流:15A,额定输出电压:14V,输出信号削波指示
电动式激振器	JZQ-20	宝应宝飞振动仪器厂	最大激振力:200N,频率范围:4~8kHz,最大电流:14A

1.2 PIV 测量实验

PIV 测量采用美国 TSI 公司生产的粒子图像测速系统,激光器(双钕:钇铝石榴石激光器功率为 200mJ,脉冲频率为 15Hz,激光波长为 532nm)发出的激光束通过柱面透镜形成片光,与流向平行从垂直于方管的顶面射入流场。CCD 相机(50mm/F1.8 镜头,频率为 15 帧/秒,像素分辨率为 2K×2K)安放在与入射激光垂直的壁面处,拍摄流场中的乳化液滴图像,共拍摄 200 对图像,拍摄频率为 7.5Hz。

数据处理采用 TSI 公司的 INSIGHT 4G 系统,粒子图像采用互相关方法处理,查询区大小为 32×32 像素,2 个相邻查询区之间 50% 重叠,空间分辨率为 $1.41\text{mm} \times 1.41\text{mm}$ 。PIV 测试装置如图 2 所示。

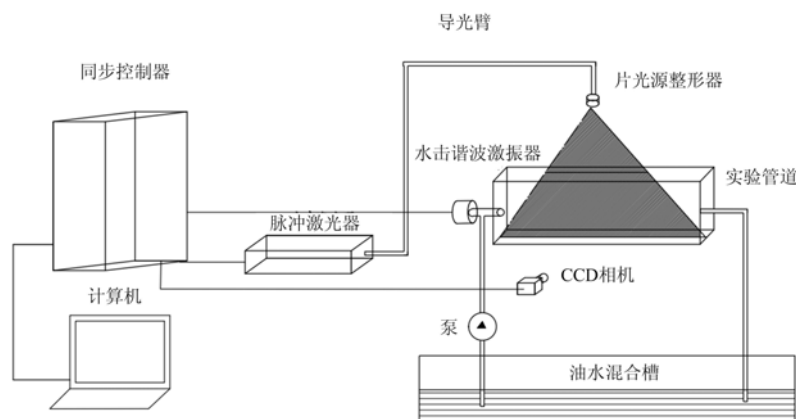


图 2 PIV 测试装置

Fig. 2 PIV testing device

实验测量区域为水平方管的中间部分,以水平方管的左上部为原点建立笛卡尔坐标系,待测平面为方管的径向和轴向构成的水击谐波流场的展向平面。

PIV 测试实验的图像拍摄范围是在水平方管的轴向距离为 119.9843mm ,径向距离为 -4.0149mm 处对油中乳化液滴粒子的粒径变化进行相关的统计测量,实验的图像采集系统轴向坐标的数值间隔为 0.74mm ,因而在特定位置处 $-0.74 \sim 0.74\text{mm}$ 范围内所有粒子的粒径进行统计平均作为该位置粒子的平均粒径,表达式为:

$$\bar{d}|_{(x,y)} = \sum_{i=1}^n d_i|_{(x,y)} / n \quad (1)$$

式中, $u, \bar{d}|_{(x,y)}$ 为某一位置处的粒子粒径、平均粒径; n 为指定位置处所有粒子的数量。

2 实验结果分析

2.1 12N 水击谐波激振力作用下乳化液滴平均粒径的变化

图 3 为 12N 水击谐波激振力作用下油中乳化液滴粒子的粒径随着时间的变化趋势。

由图 3 可以看出,在 12N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径随着时间的增大呈增加趋势,平均粒径由最初的 $97.47\mu\text{m}$ 增加到最后的 $198\mu\text{m}$,增长率为 103.14%。其中在 $0 \sim 2\text{s}$ 时间段内平均粒径的增幅最大,15s 以后平均粒径在 $198\mu\text{m}$ 附近振荡,变化趋势比较平稳。这是由于在水击谐波作用初期($0 \sim 2\text{s}$),该位置是水击谐波的波节位置(轴向距离为 119.9843mm ,径向距离为 -4.0149mm 处),附近的小粒径的粒子受到水击谐波作用力在此处聚集的数量较大,它们在水击谐波的作用下克服油水界面能,由小粒径的液滴聚集为粒径较大的液滴;但随着时间的延长,达到 15s 以后,在提供能量的水击谐波场中,液滴需要克服更大的油水界面能才可以达到平衡状态,变化趋势比较平稳,因而此刻以后粒径处于平稳变化状态。

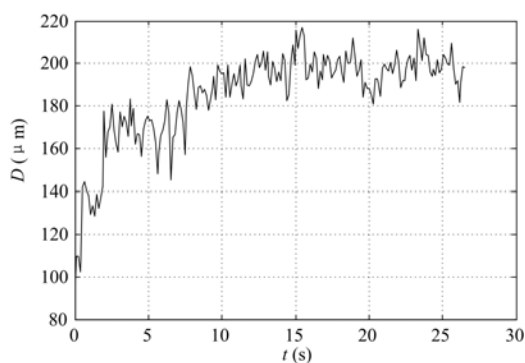


图 3 12N 激振力作用下乳化液滴粒子的粒径随着时间的变化趋势

Fig. 3 The trend chart of particle size of emulsion droplets under the action of 12N exciting force

因而此刻以后粒径处于平稳变化状态。

2.2 10N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径的变化

图 4 是同一位置处在 10N 激振力作用下粒子的平均粒径随着时间的变化趋势。

由图 4 可以看出,在 10N 激振力作用下该处的粒子平均粒径随着时间的增大呈增加趋势,平均粒径由最初的 $132.6\mu\text{m}$ 增加到最后的 $221.3\mu\text{m}$,增长率为 66.89%。其中在 $0.8\sim 2.8\text{s}$ 时间段内平均粒径由 $108.6\mu\text{m}$ 增至 $196.1\mu\text{m}$,增幅最大;5s 以后平均粒径在 $221\mu\text{m}$ 附近振荡。这是由于在水击谐波作用初期($0\sim 2.8\text{s}$),该位置是波节位置,附近的小粒径的粒子受到的水击谐波作用力足以克服油水界面能,使得液滴的粒径在此处增长较大;随着时间的延长,达到 5s 以后,粒子的粒径基本不变,在一定的水击谐波作用力下,液滴粒子的油水界面能与水击谐波作用能此刻以后处于一种伪平衡状态。可见液滴所处的位置不变,减小了水击谐波场中激振力的大小,其粒径的增长率变小,但达到平衡状态的时间也减小。

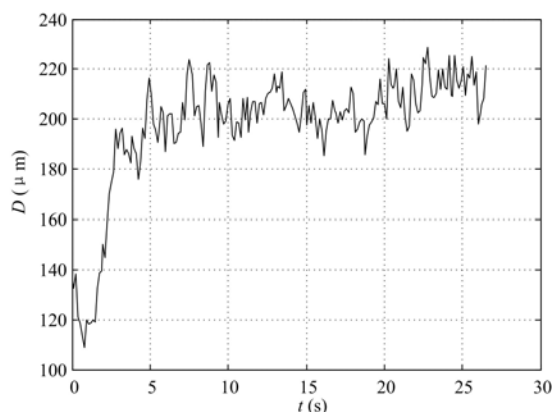


图 4 10N 激振力作用下乳化液滴粒子的粒径随着时间的变化趋势

Fig. 4 The trend chart of particle size of emulsion droplets under the action of 10N exciting force

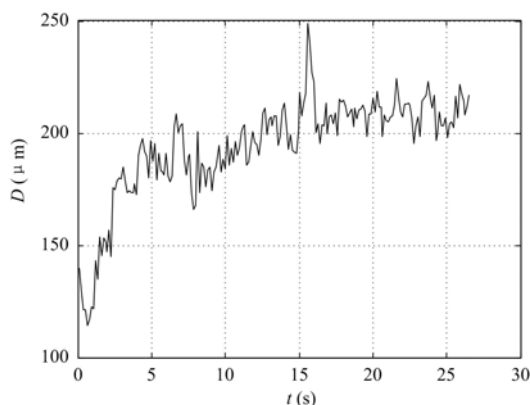


图 5 8N 激振力作用下乳化液滴粒子的粒径随着时间的变化趋势

Fig. 5 The trend chart of particle size of emulsion droplets under the action of 8N exciting force

2.3 8N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径的变化

图 5 是轴向距离为 119.9843mm , 径向距离为 -4.0149mm 处, 在 8N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径随着时间的变化趋势。

由图 5 可见,该位置处的粒子平均粒径随着时间的增大呈增加趋势,平均粒径由最初的 $130.7\mu\text{m}$ 增加到最后的 $216.9\mu\text{m}$,增长率为 65.95%。其中在 $0.67\sim 4.4\text{s}$ 时间段内平均粒径由 $114.3\mu\text{m}$ 增至 $197.4\mu\text{m}$,增幅最大;4.4s 以后平均粒径增加缓慢。这是由于在水击谐波作用初期($0\sim 4.4\text{s}$),该位置是波节位置,附近的小粒径的粒子由于受到水击谐波作用力在此处聚集的数量较大,水击谐波作用能克服油水界面能,使液滴的粒径增加;随着时间的延长,达到 4.4s 以后,粒子在 8N 的水击谐波作用力下,需要克服更大的油水界面能,因而此刻以后粒径处于一种缓慢增长趋势。

与 12N 水击谐波激振力作用下乳化油液滴的变化趋势相比,激振力减小到一定值后,虽然在作用初期,液滴粒径的快速增长期有所减小,但随着作用时间的延长,其粒径的增加幅度会大幅下降。

2.4 6N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径的变化

图 6 是轴向距离为 119.9843mm , 径向距离为 -4.0149mm 处, 在 6N 激振力作用下乳化液滴粒子平均粒径随着时间的变化趋势。

由图 6 可以看出,该位置处的粒子平均粒径随着时间的增大呈两阶段增加趋势,第一阶段(在 $0\sim 8.5\text{s}$ 时间段)平均粒径由最初的 $121\mu\text{m}$ 增加到 $197.7\mu\text{m}$,增长率为 63.39%;第二阶段(在 $8.5\sim 26\text{s}$ 时间段)平均粒径由 $197.7\mu\text{m}$ 增加到最后的 $220.5\mu\text{m}$,增长率为 11.53%。其中在 $0.533\sim 2.13\text{s}$ 时间段内平均粒径由 $112.3\mu\text{m}$ 增至 $193.1\mu\text{m}$,增幅最大。

可见激振力持续减小到 6N 后,在作用初期,液滴粒径的快速增长期有所减小,但随着作用时间的

延长,其粒径的增加幅度会大幅下降。激振力的大小对粒子的聚集位置没有影响,粒子的聚集位置是由水击谐波的波节位置决定的,增大水击谐波激振力可以有效地增加液滴克服油水界面能的作用,使其粒径得到增长,从而可以有效地提高油水分离效果,但是其最快增长期的时间较长。

3 结论

(1) 水击谐波场作用下,在实验测试的位置(波节)处,随着激振力减小,油中乳化液滴的平均粒径的增长率减小,即粒子的平均粒径的增长率随着激振力的减小而减小。

(2) 在实验时间段内平均粒径的最快增长期随着激振力的减小呈减小趋势,随着时间的延长,粒径处于一种平稳变化趋势。

(3) 激振力的大小对粒子的聚集位置没有影响,粒子的聚集位置是由水击谐波的波节决定的。

(4) 提高激振力的大小可以有效地增加液滴克服油水界面能的作用,有利于粒子的聚集,可以有效地提高油水分离效果。

参考文献:

- [1] 陈彬,刘阁. 基于 HHT 包络谱的油中水分含量检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2):337—342 (CHEN Bin, LIU Ge. Study on the detection of the water content in oil based on the envelope spectrum of HHT[J]. Chinese Journal of scientific Instrument, 2014, 35(2):337—342(in Chinese))
- [2] 刘阁,陈彬,张贤明,等. 物理破乳技术在废油处理中的应用[J]. 应用化工, 2011, 40(2):25—28 (LIU Ge, CHEN Bin, ZHANG Xianming, et al. Applied in processing waste oil of physical technology in breaking emulsion [J]. Applied Chemical Industry, 2011, 40(2):25—28.
- [3] Streeter V L, Lai C. Water-hammer analysis including fluid friction[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 2015, 128:1491—1523.
- [4] Conejero J A, Lizama C, Rodenas F. Dynamics of the solutions of the water hammer equations[J]. Topology & Its Applications, 2016, 203(4):67—83.
- [5] Tian W, Su G H, Wang G, et al. Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump system[J]. Annals of Nuclear Energy, 2008, 35(12):2280—2287.
- [6] 刘阁,陈彬,张贤明. 水击驻波场中乳化油液分散相颗粒的运动分析[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2):120—126 (LIU Ge, CHEN Bin, ZHANG Xianming. Analysis of dispersed phase particle movement under the action of water-hammer standing wave field [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(2):120—126 (in Chinese))
- [7] 刘阁,陈彬,沈顺祥. 水击谐波条件下乳化油液滴聚集过程影响因素初探[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5):36—40 (LIU Ge, CHEN Bin, SHEN Shunxiang. Research for the effect of some factors in accumulating process of emulsified oil droplets by water hammer harmonics[J]. Journal of Beijing University of Chemical Industry (Natural Science Edition), 2014, 41(5):36—40(in Chinese))
- [8] 刘阁,陈彬,张贤明. 化工管路系统的耦合振动瞬态特性研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(3):312—317 (LIU Ge, CHEN Bin, ZHANG Xianming. Chemical piping system transient coupled vibration characteristics[J]. Mechanical Science and Technology, 2010, 29(3):312—317(in Chinese))
- [9] Alinezhad K, Hosseini M, Movagarnejad K. Experimental and modeling approach to study separation of water in crude oil emulsion under non-uniform electrical field[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(1):

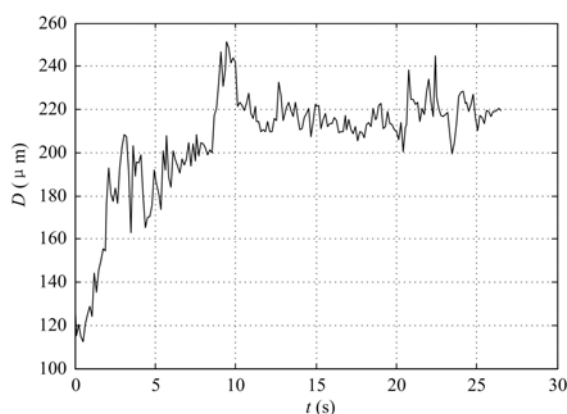


图6 6N激振力作用下乳化液滴粒子的粒径随着时间的变化趋势

Fig. 6 The trend chart of particle size of emulsion droplets under the action of 6N exciting force

- 198—205.
- [10] Ngu L H, Law P L, Wong K K. Effects of co-current and cross flows on circular enhanced gravity plate separator efficiencies[J]. *Environmental Engineering Research*, 2014, 19(2):151—155.
- [11] Binner E R, Robinson J P, Silvester S A, et al. Investigation into the mechanisms by which microwave heating enhances separation of water-in-oil emulsions[J]. *Fuel*, 2014, 116(15):516—521.
- [12] Geng J, Wang Y, Hu X, et al. Insights into the hydrodynamic properties of slurry flow in a tubular photocatalytic reactor by PIV combined with LSIA[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 152:127—139.
- [13] Zou Y, Ye S, Wang Y, et al. CFD simulation and PIV measurement of liquid-liquid two-phase flow in pump-mix mixer[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 60:15—25.
- [14] Ayati A A, Kolaas J, Jensen A, et al. Combined simultaneous two-phase PIV and interface elevation measurements in stratified gas/liquid pipe flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 74:45—58.
- [15] Barthès M, Mazue G, Bonnet D, et al. Characterization of the activity of ultrasound emitted in a perpendicular liquid flow using Particle Image Velocimetry (PIV) and electrochemical mass transfer measurements [J]. *Ultrasonics*, 2015, 59:72—78.
- [16] Shi B, Wei J J, Zhang Y. Phase discrimination and a high accuracy algorithm for PIV image processing of particle-fluid two-phase flow inside high-speed rotating centrifugal slurry pump [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, 45:93—104.
- [17] 刘阁, 陈彬, 张贤明, 等. 油水乳化液分散相动力学研究进展[J]. *石油化工*, 2012, 41(11):1336—1339 (CHEN Bin, LIU Ge, ZHANG Xianming, et al. Progress in kinetics of disperse phase in oil-water emulsion [J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 41(11):1336—1339 (in Chinese))

On the Measurement of Emulsified Oil Droplet Size in Water Hammer Harmonic Flow Field Based on PIV Technology

CHEN Ying-jie¹, LIU Ge²

(1. Chongqing No. 8 Secondary School, Chongqing 400030, China; 2. Engineering Research Centre for Waste Oil Recovery Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to grasp the microscopic morphology variation regularity of emulsified oil droplets, such as collision, rupture, gathering and deformation etc. in a water hammer harmonic flow field, water hammer harmonic flow field with emulsified oil droplets was measured in a horizontal pipe with square cross-section and based on particle image velocimetry (PIV) technology; the variation of emulsified oil droplet size induced by exciting force action in water hammer harmonic flow field was analyzed. Results show that under the action of water hammer harmonic flow field, the growth rate of average particle size decreases with the decrease of exciting force, but increases with the increase of action time, until the particle size is in a dynamic equilibrium. The time needed for emulsified oil droplets gathering at wave nodes decreases with the increase of exciting force. So, the increase of harmonic excitation force of water hammer is beneficial to the aggregation of emulsion oil droplets and the formation of large scale droplets, which can effectively improve the oil-water separation effect under the action of water hammer harmonic flow field.

Keywords: emulsified oil droplets; water hammer harmonic flow field; particle size; exciting force; particle image velocimetry