

超声波原油消泡技术的国内外研究进展*

王少松¹

摘要: 在油气分离环节, 因为冲击震荡和溶解气的解析导致原油发泡, 产生的泡沫会影响油气分离的效率和油气计量的准确性, 严重时还可能破坏油气分离设备。为了探索超声波在原油消泡上的应用价值, 通过分析泡沫衰变的机理, 研究了泡沫能够溃灭的主要原因。超声波消泡研究分前后两个阶段, 前期研究指出超声波能够促进消泡, 并为后期研究提供了理论基础; 后期研究以采用新技术和改进装置提高消泡效率为重点, 指出了超声波在原油消泡上存在的优势, 并为下一步的研究方向提出了建议。

关键词: 超声波; 原油消泡; 衰变机理; 研究进展

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.8.003

Research Progress of Ultrasonic Defoaming

Wang Shaosong

Abstract: The impact of the shock and the release of dissolved gases cause oil foaming in the phase separation. The foam will affect the efficiency of phase separation and the accuracy of oil and gas measurement, it also may lead to the damage of the separation equipment. In order to explore the value of ultrasound in the defoaming, this paper analyzed the mechanism of foam decay and showed the main reason to foam collapse. The research progress of ultrasonic wave is divided into two stages. The preliminary study shows that ultrasonic wave can promote the defoaming, which provides a theoretical basis for the later research. the later study emphasizes on the improvement of the efficiency of defoaming by using the new technology and the improved device. The research points out the advantages of ultrasonic defoaming in the crude oil, and puts forward some suggestions for further research.

Key words: ultrasonic wave; defoaming of oil; decay mechanism; research progress

泡沫在日常生活和工业生产中都十分常见, 在油气分离过程中由于原油泡沫会影响油气分离效率和油气计量, 人们希望泡沫能够快速溃灭。目前, 常用的消泡方法可分为物理消泡和化学消泡^[1]。物理方法主要有静置法、减压法、升温法、机械搅拌法、流体喷射法和超声波法等; 化学方法主要有添加消泡剂、添加使稳泡剂凝聚或沉淀的物质以及改变稳泡剂溶解度的物质等。从工业应用的情况来看, 由于方法的高效和便捷性, 化学方法在工业应用中占主要地位, 但是对于原油处理行业, 添加消泡剂虽然能够提高消泡速率, 但会使原油中增加新的杂质, 可能会影响后续的处理流程, 降低整个处理过程的效率^[2-3]。所以, 研究清洁高效的物理消泡方法对于提高原油处理效率有重大的意义。

1 泡沫衰变机理

在很早之前就有学者对泡沫衰变的机理进行了研究, 泡沫的衰变与其稳定性是紧密相关的, 通过总结前人研究的成果发现泡沫的衰变机理有两个^[4, 9-11]: 排液和 Ostwald 熟化。

1.1 排液

泡沫排液是指泡沫中液体的流失。泡沫中的液体主要是存在于 Plateau 边界内, 有少部分存在于气泡的薄膜里。相邻两气泡间的薄溶液膜叫泡膜, 多个气泡 (通常三个气泡) 交界区叫 Plateau 边界区^[4]。泡沫稳定的一个重要指标就是液体分数, 液体分数越低泡沫越不稳定, 所以排液是泡沫衰变的一个重要机理^[5-6], 图1为排液机理示意图。谢剑耀

*基金论文: “十二五” 国家科技重大专项课题 “CO₂超临界输送及循环注气技术” (2011ZX05016-004-001)。

¹中国石油大学 (北京)

和樊世忠^[7]在研究泡沫稳定性时，认为泡沫排液主要是曲面压力引起的。他们假定气泡都具有相同的半径 R_1 ，气泡内压力都为 p_0 ；Plateau 边界表面曲率半径为 R_2 ，压力为 p_2 （图 1 中的 2 区）；薄膜中液体的压力为 p_1 （图 1 中的 1 区），表面张力都为 σ ；根据 Laplace 方程可以得到 p_1 与 p_0 、 p_2 与 p_0 的关系为

$$p_1 = p_0 - 2\sigma/R_1 \quad (1)$$

$$p_2 = p_0 - \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

$$p_1 - p_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (3)$$

因为对于液态泡沫其 Plateau 边界内液体量很少，故 $R_2 \ll R_1$ 则 $1/R_1$ 可忽略不计，(3) 式可改写成 $p_1 - p_2 = \sigma/R_2$ 。该式表明，薄膜内液体的压力较 Plateau 边界内液体的压力大，在这种压差作用下，泡沫中的液体自动地从液膜处流向 Plateau 边界，使液膜变薄，最终导致泡沫溃灭。Plateau 边界内的液体在重力作用下也会与泡沫发生分离，谢剑耀等^[7]指出泡沫的膜越厚，重力作用排液越明显。J.J. BIKERMAN^[8] 针对重力的影响进行了说明，主要是因为液相密度大向下运动的速度快于气相，从而导致液体从泡沫中流失。从上述分析可以看出，泡沫排液主要是压差引起的，重力也会产生一定的作用，但是影响泡沫排液的因素还有很多，如泡沫柱的高度、泡沫膨胀比、表面活性剂种类和浓度等，一般泡沫柱的高度越高排液越快^[9]，对于其他因素的影响规律目前还没有统一的认识。

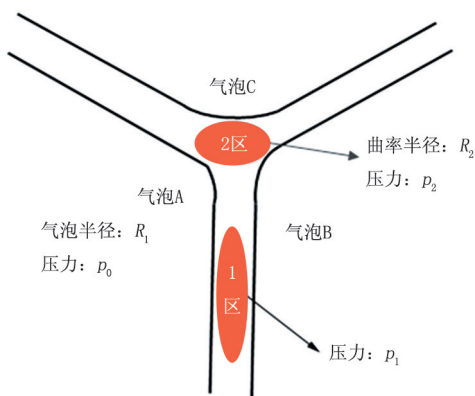


图 1 排液机理示意图

1.2 Ostwald 熟化

Ostwald 熟化是 Wilhelm Ostwald 在 1900 年提出的熟化理论。最初的研究是针对固溶体，过饱和溶液中析出的晶体颗粒大小不同，小颗粒消溶而大颗粒继续长大，因而颗粒的平均尺寸变大，这样一种固体颗粒的长大机制，称为 Ostwald 熟化^[10]。后来

人们在研究泡沫的稳定性时，针对小的气泡消失，大的气泡变大的现象也称之为 Ostwald 熟化^[11]。

在泡沫的研究上很多研究者将 Ostwald 熟化简单地称之为气体在气泡间的扩散。因为无论用什么方法产生泡沫，其大小总是不均匀的，根据 Laplace 方程可知泡沫内部压力为

$$p_i = p_l + \frac{\sigma}{r} \quad (4)$$

式中： p_i 为气泡内部压力， p_l 为液体压力， σ 为气泡的表面张力， r 为气泡的半径。在液体压力相同的情况下可以看出小气泡内的气体压力比大气泡的高，因而小气泡内的气体会透过液膜扩散到大气泡中去，造成小气泡变小，大气泡变大，最终均趋于溃灭^[12]。

2 超声波促消泡的实验研究

超声波促消泡的研究起步较早，在前期实验研究中采用的超声波装置效率低，取得的成果没得到工业生产的重视，但为后期的研究提供了理论支撑。后期研究主要从采用新技术和改进超声波装置来提高消泡的效率方面进行了探索。

最早开展超声波消泡研究的是在 1959 年，DORSEY^[13] 等人利用“air-driven”超声波发生器进行超声波消泡的实验探究。他们的实验装置是将超声波发生装置放置在发酵罐上部，然后探究 3 个不同频率（26、29 和 34 kHz）的超声波对泡沫的作用。他们的研究证明了超声波有促进消泡的作用，并指出超声波的空化效应是促进消泡的主要原因。但是通过对比“air-driven”超声波发生器所消耗的能量与促进消泡产生的效益，发现采用该种超声波发生器进行消泡是不经济的。

受 DORSEY 等人的研究影响，N. SANDOR^[14] 等人重新设计实验开展超声波消泡实验的研究，他们采用十二烷基硫酸钠（SDS）溶液中通入氮气的方式产生泡沫，然后探究超声波探针直径和超声波功率对消泡效果的影响。在其他条件相同的情况下，超声探针尖端直径越大超声波功率越大，其促进消泡的效果越明显。他们还提到探针尖端在距泡沫的距离为 10~15 mm 时超声波促消泡的效果最好。同时，系统地分析了超声波促进泡沫溃灭的原因，认为主要是超声波的空穴作用和声压作用，热机制和谐振作用也是促进消泡的原因。上述研究属于前期研究，他们的研究证实超声波能够加速泡沫溃灭，并分析了超声波促进消泡的原因，为后期研究提供了理论支撑。

随着压电晶体换能器的出现，增加了超声波消

泡潜在的应用价值。DEDHIA^[15]等人也利用该种换能器重新研究超声波消泡的效果,通过改变溶液黏度、通气速率和初始泡沫的高度来验证超声波消泡的效果。他们的研究首次通过对泡沫排液情况的精确测量来分析实验结果,但是对实验结果进行的能量成本分析表明,他们设计的超声波消泡装置消耗的能量与搅拌法消泡相比高出了3个数量级,所以很难被工业所采用。如何提高消泡效率,降低能量消耗成为研究超声波消泡的重点。VLADIMIR N. KHMELE^[16]等人针对啤酒泡沫研发了一种托盘式超声波消泡设备,该设备在实验中表现出很好的消泡效果,消泡速率达到20 cm³/s。有人通过改进把此设备应用到了发酵罐中,并且有效控制了泡沫体积。这种消泡设备采用压电晶体换能器和托盘设计与DORSEY的“air-driven”超声波发生器、N. SANDOR的超声波探针相比大大提高了超声波的效率。但是,该设备的超声波发生装置与泡沫不直接接触,导致两者之间存在空气-泡沫界面,界面的反射作用削弱了超声波消泡的效果。

J.B. WINTERBURN^[17]综合分析前人的成果和研究中的问题,重新设计了一套新的实验装置,该装置是在塑料杯下面安装超声波换能器使其与泡沫之间不存在空气间隙,同时采用WAVETEK信号发生器和FLC电子线性放大器驱动超声换能器。然后选用27.72 kHz和40.00 kHz 2个频率进行实验,产生泡沫的空气速率分别为1 L/min和0.5 L/min。他们测定了不同鼓气速率和超声波频率下泡沫的排液量、排液速率、泡沫高度以及溃灭速度等物理量。通过分析实验结果,表明超声波能够促进泡沫溃灭的速率主要是因为它加快了泡沫的排液速率。他们研究的一大突破就是有效降低了超声波消泡的功率,在实验中超声换能器的平均电功率为4 W,而且泡沫的溃灭速率也较大,这为超声波消泡技术在工业上的应用提供了有力支持。后期的研究重点是采用新的技术和改进超声波装置,用于提高超声波消泡效率,为工业化的应用做准备。

3 结论

在油气分离环节产生的原油泡沫会影响分离效率和计量精度,采用添加化学消泡剂的方式,使原油处理中引入的新杂质影响整个处理过程的效率,因此开发清洁高效的消泡方法成为必然。超声波具有空化、声压、谐振和热机制等作用,能够有效地

促进泡沫排液和Ostwald熟化,加速了泡沫的溃灭,而且绿色清洁不会引进新的污染物。超声波消泡研究分为前期和后期两部分研究,前期研究证实了超声波能够促进消泡并为后期研究提供了理论支持。后期研究的重点是提高消泡的效率,但是对于超声波在原油消泡上的应用还很少,所以改进设计消除空气-泡沫界面的反射作用,调整超声波的频率与功率,发挥两者的协同作用提高消泡效率将是下一步研究的方向,同时针对原油泡沫需要特殊的发泡和消泡装置进行了相关的实验探究。

参考文献

- [1] 吴达华. 消泡剂和消泡机理[J]. 油田化学, 1992, 9(1): 65-72.
- [2] 魏淑敏. 原油发泡问题的情况介绍[J]. 国外油田工程, 1996, 12(1): 19-24.
- [3] 张亨. 消泡研究进展[J]. 精细石油化工进展, 2000, 1(7): 44-48.
- [4] 万里平, 孟英峰, 赵晓东. 泡沫流体稳定性机理研究[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(1): 70-73.
- [5] KRUGLYAKOV P M, KARAKASHEV S I, NGUVEN A V. Foam drainage [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2008, 13(3): 163-170.
- [6] AMAUD Saint. Physical chemistry in foam drainage and coarsening [J]. Soft Matter, 2006, 2(10): 836-849.
- [7] 谢剑耀, 樊世忠. 泡沫稳定性[J]. 油田化学, 1988, 5(1): 59-63.
- [8] BIKERMAN J J. Foams [M]. New York: Springer-Verlag Berlin, 1973: 1-337.
- [9] ASHOK Bhakta, ELI Ruckenstein. Decay of standing foams: drainage, coalescence and collapse [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1997, 70(1): 1-124.
- [10] VOORHEES P W. The Theory of Ostwald Ripening [J]. Journal of Statistical Physics, 1985, 38(1): 231-252.
- [11] STEVENSON Paul. Inter-bubble gas diffusion in liquid foam [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2010, 15(5): 374-381.
- [12] MARKWORTH Alan. Comments on foam stability, Ostwald ripening, and grain growth [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1985, 107(2): 569-571.
- [13] DORSEY Arthur. Control of foam during fermentation by the application of ultrasonic energy [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1959, 1(3): 289-295.
- [14] SANDOR N, STEIN H N. Foam destruction by ultrasonic vibrations [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1993, 161(1): 265-267.
- [15] DEDHIA Anjali, AMBLUGEKAR Pankaj, PANDIT Aniruddha. Static foam destruction: role of ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11(2): 67-75.

(下转第15页)