

引用格式:邓朋飞,李方俊,康敬欣,等.石油磺酸盐对玻璃纤维聚结脱水性能的影响[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(4):31-38.

DENG PengFei, LI FangJun, KANG JingXin, et al. Effect of petroleum sulfonate on water droplet coalescence and shedding on glass fibers[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022,49(4):31-38.

# 石油磺酸盐对玻璃纤维聚结脱水性能的影响

邓朋飞 李方俊 康敬欣 曹家铭 冯乐晖

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:**目前,关于纤维表面水滴聚结与脱落过程的研究多为定性分析,缺乏相关实验数据,并且各种因素对纤维聚结脱水效果的影响并不清晰。针对以上问题,搭建了一套可视化微流道实验系统;在航空煤油-水体系中加入表面活性剂石油磺酸盐,制备了两种不同界面张力的乳状液;利用建立的实验系统观测在不同界面张力下纤维表面水滴的聚结与脱落过程,并讨论了影响水滴聚结与脱落的主要因素。结果表明:在18 mN/m的界面张力下,最大水滴粒径在前3 min增长较快,在3 min后增长较为缓慢;在8 mN/m的界面张力下,在前6 min最大水滴粒径的增长趋势较为平缓,6 min后最大水滴粒径几乎不再增长,并且在聚结初始阶段水滴呈单侧分布;水滴单位面积的表面活性剂分子数存在饱和值,当达到饱和值时,水滴被表面活性剂分子完全包围,很难与其他水滴发生聚结行为;在18 mN/m的界面张力下,流场流速是引起水滴断裂脱落的主要原因;在8 mN/m的界面张力下,水滴的断裂脱落不仅受流场流速的影响,而且还与表面活性剂的含量有关。

**关键词:**玻璃纤维;石油磺酸盐;聚结;水滴脱落;水滴断裂

**中图分类号:** TH137 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.04.004

## 引言

聚结脱水技术是一种利用纤维滤材对油、水两相亲和力的不同来实现乳状液中微小液滴的相互聚并、长大,最终从纤维表面脱落的物理方法<sup>[1]</sup>。聚结脱水法具有处理流量大、分离效率高、维护成本低等优点,广泛应用于油水分离领域<sup>[2-3]</sup>。航空喷气燃料的脱水净化大多使用聚结分离器进行<sup>[4-5]</sup>,然而国产的聚结分离器至今未通过国际标准的认证。聚结分离器的核心材料是纤维滤材,其聚结脱水性能是评价聚结分离器性能好坏的重要指标。

为了保证航空喷气燃料的燃烧效果和使用性能,通常会加入各种表面活性剂,起到抗磨、抗静电、抗氧化等作用<sup>[6]</sup>,但是也使得喷气燃料中的乳化水更加稳定。乳化水不仅会降低燃料的热值,弱化燃料的雾化效果,增大燃料的消耗,而且在低温环境下

容易发生结晶,造成飞机供油管路的阻塞,使得燃料系统供油困难,严重影响飞机的正常运行<sup>[7]</sup>。为了去除油液中的乳化水,国内外学者进行了相关研究。Wang等<sup>[8]</sup>发现随着溶剂油中表面活性剂Span80含量的增大,乳化水的稳定性增加,水滴的聚结难度增大。Zhou等<sup>[9]</sup>研究发现当其他表面活性剂分子插入到油水界面时,原先的表面活性剂分子保护膜会被削弱,相邻水滴更容易发生聚并。Luo等<sup>[10]</sup>发现在三元复合驱油溶液中随着表面活性剂含量的增大,水滴的聚结时间也会不断增加。张倩<sup>[11]</sup>发现柴油中脂溶性表面活性剂的含量越高,乳状液越稳定,油水分离越困难。

目前,对油水分离的研究主要集中在柴油或溶剂油脱水领域,而对航空喷气燃料(原料油)的研究相对较少,并且使用的过滤介质大多为纤维床层,缺乏关于纤维聚结机理方面的研究。航空喷气燃料中加入表面活性剂后,水滴的聚结与脱落过程较为复杂,相关实验数据比较匮乏,各种因素对纤维聚结脱水效果的影响并不清晰。针对上述问题,本文搭建了一套可视化微流道实验系统,

收稿日期:2022-03-10

第一作者:男,1997年生,硕士生

\*通信联系人

E-mail: lifj@mail.buct.edu.cn

以航空煤油为连续相,蒸馏水为分散相,石油磺酸盐为表面活性剂,制备了两种不同界面张力的乳状液,利用建立的实验系统观测在不同界面张力下纤维表面水滴的聚结与脱落过程,讨论了影响水滴聚结与脱落的主要因素,以期纤维聚结脱水方面的研究提供一定的参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与仪器

#### 1.1.1 实验原料

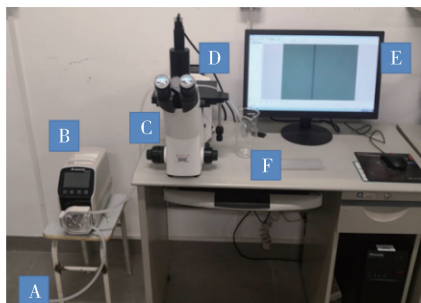
3#航空煤油,常温常压下密度为  $0.78 \text{ g/cm}^3$ ,黏度为  $2.98 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,武汉富鑫远科技有限公司;蒸馏水,实验室自制;石油磺酸盐,纯度 32%,密度为  $1.09 \text{ g/cm}^3$ ,平均摩尔质量为  $380 \text{ g/mol}$ ,山东优索化工科技有限公司;玻璃纤维,直径为  $5 \mu\text{m}$ ,空气中与水的接触角为  $53^\circ$ ,北京承天信达过滤技术有限责任公司。

#### 1.1.2 实验仪器

JET-100 型离心泵,上海阳光泵业制造有限公司;LabV6 型蠕动泵,申辰精密泵制造有限公司;MDS400 型显微镜,上海蔡康光学仪器有限公司;SCZL202 型张力测定仪,山东盛康电器有限公司。

### 1.2 实验系统

实验系统如图 1 所示。乳状液通过蠕动泵送至微流道装置(图 2),微流道装置内排布着纤维丝。纤维表面水滴的聚结脱水主要有 3 个过程<sup>[12]</sup>:乳状液中的水滴与纤维碰撞后被拦截在纤维表面;乳状液中的水滴与纤维表面已附着的水滴发生碰撞或纤维表面相邻水滴发生碰撞,进而聚并为粒径更大的水滴;当水滴粒径增长到一定尺寸后在流场的作用下从纤维表面脱落,流至回收槽中。使用显微镜实时观察微流道装置内水滴的聚结与脱落过程,测定水滴粒径,并通过计算机进行录像。



A—乳状液进料口;B—蠕动泵;C—显微镜;D—微流道装置;E—计算机;F—回收槽。

图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

时观察微流道装置内水滴的聚结与脱落过程,测定水滴粒径,并通过计算机进行录像。

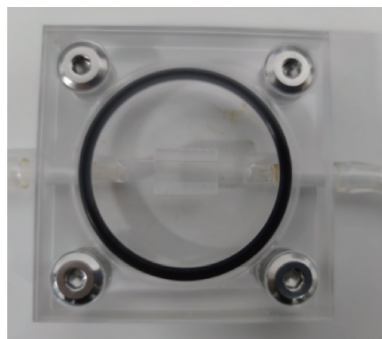


图 2 微流道装置

Fig. 2 Microchannel device

### 1.3 乳状液制备

按照表 1 中各原料的加入量,向油箱中加入航空煤油,将蒸馏水与石油磺酸盐混合均匀,倒入油箱。启动离心泵,转速为  $2\,950 \text{ r/min}$ ,搅拌  $20 \text{ min}$  后,水滴粒径约为  $5 \mu\text{m}$ ,并且均匀地分散在连续相中,得到实验所需的两种乳状液,分别记为 1# 和 2# 乳状液,使用张力测定仪测得其油水界面张力分别为  $18 \text{ mN/m}$  和  $8 \text{ mN/m}$ 。关闭离心泵,取适量乳状液,加入实验系统的进料槽中进行实验。

表 1 乳状液中各原料加入量

Table 1 Amount of each raw material in the emulsions

乳状液	$m(\text{石油磺酸盐})/\text{g}$	$m(\text{蒸馏水})/\text{g}$	$V(\text{航空煤油})/\text{L}$
1#	6.54	41	20
2#	21.8	41	20

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同界面张力下水滴聚结过程

#### 2.1.1 界面张力为 $18 \text{ mN/m}$ 时水滴聚结过程

使用 1#乳状液,流场流速为  $26 \text{ mm/s}$ ,流场流速与聚结分离器中聚结滤芯的表观流速基本一致,通过本文建立的实验系统观测水滴的聚结过程。图 3 为初始阶段的水滴形貌,水滴随着乳状液在流场中运动,与纤维丝碰撞后大部分水滴被拦截在纤维的上游表面,小部分水滴在流场的作用下滑动到纤维的下游。

在聚结阶段,随着纤维表面水滴数量的不断增多,相邻水滴会发生碰撞、滑动,相互聚并形成粒径较大的水滴。实验过程中,每隔  $1 \text{ min}$  记录一

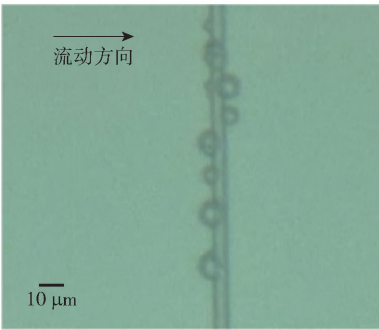


图 3 初始阶段的水滴形貌

状液中的水滴粒径与纤维表面的水滴粒径差距过大,聚并后水滴的体积不会发生太大改变,因此 3 min 后水滴粒径的增长较为缓慢。

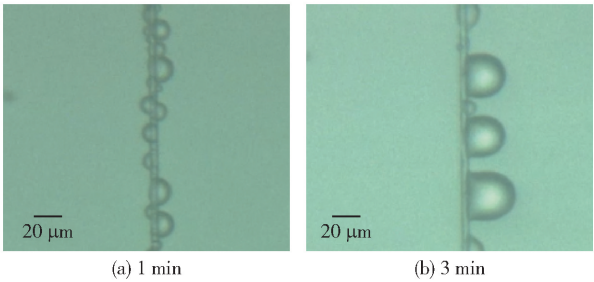


图 5 界面张力为 18 mN/m 时 1 min 和 3 min 的纤维表面水滴分布

次纤维表面的最大水滴粒径,结果如图 4 所示。最大水滴粒径在前 3 min 增长较快,在 3 min 后增长较为平缓。图 5 为 1 min 和 3 min 时纤维表面水滴的实际分布情况。由图 5(a)可以看出,在 1 min 时纤维表面的水滴数量较多,相邻水滴发生聚结现象较为频繁。实验中发现,在前 3 min 水滴粒径的增长不仅依靠乳状液中细小的水滴直接撞击纤维表面已存在的水滴,而且纤维表面的水滴也会发生滑动、碰撞,进而聚并为粒径更大的水滴,因此水滴粒径增长较快。随着粒径较小的水滴不断地聚结,在 3 min 时,最大水滴粒径已经达到 35  $\mu\text{m}$  左右,此时纤维表面分布的大多是粒径较大的水滴,如图 5(b) 所示。两水滴相互聚并之后形成的新水滴的表面积与聚并前两水滴的表面积之和相比将会减小,新水滴单位面积的表面活性剂浓度将会增大。大量的活性剂分子在水滴表面形成一层保护膜,使得相邻水滴不易发生聚并,此时水滴粒径的增长主要依靠乳状液中细小的水滴与纤维表面已存在的粒径较大的水滴直接碰撞,由于乳

Fig. 5 Water droplet distribution on the fiber surface at 1 min and 3 min when the interfacial tension is 18 mN/m

2.1.2 界面张力为 8 mN/m 时水滴聚结过程

使用 2<sup>#</sup> 乳状液,流场流速为 26 mm/s。每隔 1 min 记录一次纤维表面的最大水滴粒径,结果如图 6 所示。在前 6 min 最大水滴粒径的增长趋势较为平缓,6 min 后最大水滴粒径几乎不再增长,此时最大水滴粒径为 13  $\mu\text{m}$  左右。图 7 为 1 min 和 7 min 时纤维表面水滴的实际分布情况。由图 7(a) 可以看出,与界面张力为 18 mN/m 时的情况相比,界面张力为 8 mN/m 时纤维上游的水滴数量明显减少。实验中发现,初始阶段水滴在纤维上游黏附后,停留时间极为短暂,随后在流场的作用下滑动到纤维下游,此时水滴呈单侧分布。水滴单侧分布的主要原因是表面活性剂含量的增大导致乳状液中水滴表面的活性剂分子数量增多,水滴表面的活性剂分子保护膜更加致密,这层保护膜将影响水滴与纤维之间的黏附性。由于表面活性剂含量的增大,水滴聚结长大后单位面积的表面活性剂浓度将会升高,这些活性剂分子将严重阻碍水滴之间的聚并,即使一排水滴彼此相邻也很少发生聚结现象,如图 7(b) 所示。水滴粒径的增长只能依靠乳状液中的水滴与纤维表面已存在的粒径较大的水滴直接碰撞,因此 6 min 后水滴粒径的增长速度减慢。

2.2 表面活性剂含量对最大水滴粒径的影响

为了探究表面活性剂含量与最大水滴粒径之间的量化关系,假设表面活性剂分子均匀分布在水滴表面,且水滴在聚结完成后都能达到最大粒径。水滴聚结实验结果发现表面活性剂含量不同,即乳状

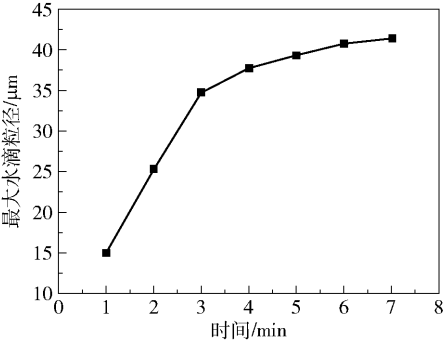


图 4 界面张力为 18 mN/m 时不同时间的最大水滴粒径

Fig. 4 Maximum droplet size at different times when the interfacial tension is 18 mN/m



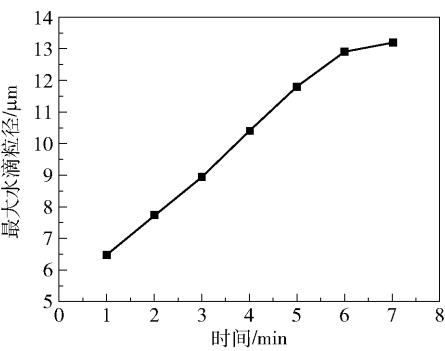


图6 界面张力为8 mN/m 时不同时间的最大水滴粒径

Fig. 6 Maximum droplet size at different times when the interfacial tension is 8 mN/m

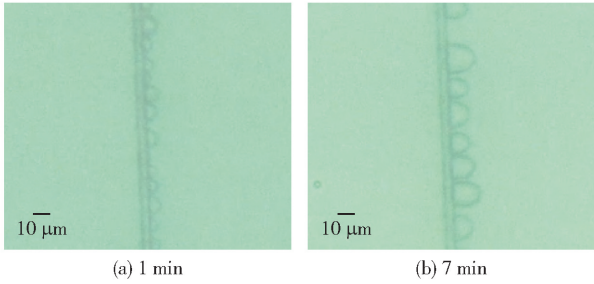


图7 界面张力为8 mN/m 时1 min 和7 min 的纤维表面水滴分布

Fig. 7 Water droplet distribution on the fiber surface at 1 min and 7 min when the interfacial tension is 8 mN/m

液中油水界面张力不同,测得的最大水滴粒径相差较大,图8 为界面张力为18 mN/m 和8 mN/m 时的最大水滴粒径比较。

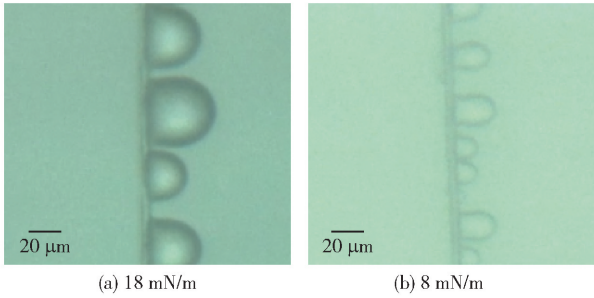
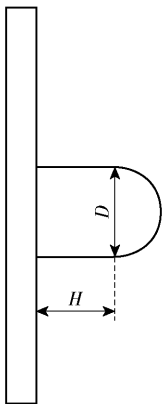


图8 不同界面张力下的最大水滴粒径比较

Fig. 8 Comparison of maximum droplet size for different interfacial tensions

由图8 可以看出,聚结完成后纤维表面水滴的形状不再是球形,而是头部为半球形、尾部为圆柱的组合物,如图9 所示。通过测量组合体的水滴头部粒径  $D$  与圆柱体高度  $H$ ,可以近似得到水滴的体积



$D$ —水滴头部粒径(也是圆柱体直径); $H$ —圆柱体高度。

图9 水滴形状示意图

Fig. 9 Diagram of droplet shape

及表面积。由于水滴是附着在纤维表面的,在计算时需要去除组合体的底面积,从而近似得到表面活性剂在水滴表面的附着面积。表2 为1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>乳状液的最大粒径水滴的尺寸参数及水滴数量。根据两种乳状液中各原料的比例计算出表面活性剂的物质的量,进而得到分子总数,结果如表3 所示。

表2 最大粒径水滴的尺寸参数及水滴数量					
Table 2 Size parameters and number of water droplets with maximum particle size					
乳状液	水滴头部粒径 $D/\mu\text{m}$	圆柱体高度 $H/\mu\text{m}$	水滴体积/ $\mu\text{m}^3$	附着面积/ $\mu\text{m}^2$	水滴数量/个
1 <sup>#</sup>	41.45	26.71	$5.46 \times 10^4$	$6.17 \times 10^3$	$7.49 \times 10^8$
2 <sup>#</sup>	13.58	11.02	$2.25 \times 10^3$	$7.59 \times 10^2$	$1.82 \times 10^{10}$

表3 表面活性剂的物质的量和分子总数			
Table 3 Quantity and total number of the surfactant molecules			
乳状液	表面活性剂/g	物质的量/mol	分子总数/个
1 <sup>#</sup>	6.54	$5.5 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{21}$
2 <sup>#</sup>	21.8	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{22}$

通过以上数据得到1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>乳状液聚结完成后最大粒径水滴单位面积的表面活性剂分子数分别为  $7.14 \times 10^8$  个/ $\mu\text{m}^2$  和  $7.95 \times 10^8$  个/ $\mu\text{m}^2$ 。在其他条件不变、仅改变表面活性剂含量的情况下,1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>乳状液的最大粒径水滴单位面积附着的活性剂分子数基本保持一致。结果表明水滴单位面积的表面活性剂分子数存在饱和值,当达到饱和值时,水滴将被表面活性剂分子完全包围,很难与其他水滴发生聚结行为,此时水滴粒径几乎不再增长。

2.3 不同界面张力下水滴脱落过程

2.3.1 界面张力为 18 mN/m 时水滴脱落过程

纤维表面的水滴聚结长大到一定程度后将从纤维下游表面脱落。实验中发现,在固定流速下,随着时间的推移,水滴粒径不断增大,当水滴粒径增大到某一尺寸时出现断裂脱落现象;随后通过增大流场流速使得不同粒径的水滴相继发生断裂脱落,此时的流场流速即为水滴脱落的临界流速  $v$ 。使用 1# 乳状液,通过本文建立的实验系统观测纤维表面水滴的脱落过程,并截取不同临界流速下水滴在脱落前、脱落过程中以及脱落后的照片,结果如图 10 所示。水滴的整个脱落过程分为 3 部分:脱落前水滴的形状近似为圆柱与半球的组合体,并且能够稳定地附着在纤维表面;当流场流速即将达到水滴脱落的临界流速时,水滴在流场的作用下发生变形,开始反复振荡,逐渐被拉长为锥形,并且在水滴根部附近出现“缩颈”现象;当流场流速达到临界流速时,水滴在“缩颈”位置发生断裂,剩余的细小部分为“水痕”,依然黏附在纤维表面。

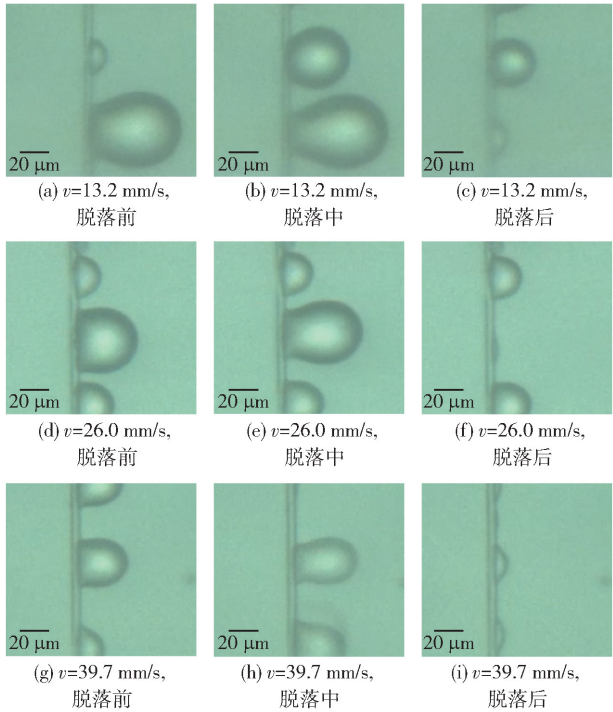


图 10 界面张力为 18 mN/m 时在不同临界流速  $v$  下水滴的脱落过程

Fig. 10 Shedding of water droplets at different critical flow rates when the interfacial tension is 18 mN/m

由图 10 可以看出,水滴从纤维表面脱落的形式

不是直接脱离,而是水滴的自身断裂。液体自身间结合的牢固程度可以用内聚功  $W$  来表示,其表达式为

$$W = 2\gamma \cdot S \tag{1}$$

式中: $\gamma$  为油水界面张力, mN/m;  $S$  为临界断裂面积,  $\mu\text{m}^2$ 。

随着流场流速的增加,脱落部分水滴的动能也在逐渐增大,当动能增大到此时水滴的内聚功时,水滴将被拉断。脱落部分水滴的动能  $E$  的表达式为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2}$$

式中: $m$  为脱落部分水滴的质量, kg;  $v$  为临界流速, mm/s。

由图 10 可得,水滴被拉长后,前端基本保持半球形,主体部分在流场的作用下不断被拉长,近似为锥形,脱落部分的水滴可以看作是两者的组合体。该组合体的模型如图 11 所示,主要参数包括上底半径  $R_1$ 、高度  $H$ 、下底半径  $R_2$ ,半球体半径与锥体下底半径  $R_2$  相同。通过测量这 3 个参数,即可求得脱落部分水滴体积的近似值,从而得到质量及动能。水滴脱落后将恢复为球形,为了便于记录,需要将得到的水滴体积转化为球体体积,根据球体的体积公式,求得转化直径  $D_0$ ,用于表达不规则的脱落部分水滴的大小。脱落部分水滴的动能参数计算结果如表 4 所示。

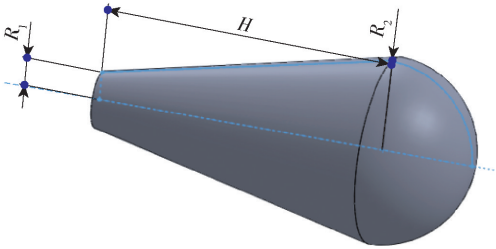


图 11 脱落部分的水滴模型

Fig. 11 Model of a water droplet that breaks away

表 4 界面张力为 18 mN/m 时脱落部分水滴的动能参数和临界断裂面积

转化直径 $D_0/\mu\text{m}$	质量 $m/\text{kg}$	临界流速 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	动能 $E/\text{J}$	临界断裂 面积 $S/\mu\text{m}^2$
53.83	$8.21 \times 10^{-11}$	13.2	$7.14 \times 10^{-15}$	0.20
45.69	$4.99 \times 10^{-11}$	26.0	$1.68 \times 10^{-14}$	0.47
36.43	$2.53 \times 10^{-11}$	39.7	$1.99 \times 10^{-14}$	0.55

纤维表面的水滴在脱落过程中会被不断拉长,“缩颈”处的截面积将不断减小,由式(1)可得,水滴的内聚功也在不断减小,当流场流速增大至临界流速  $v$  时,水滴的内聚功与脱落部分水滴的动能相等,水滴发生断裂。将式(1)与式(2)联立后即可求解出水滴的临界断裂面积  $S$ (表4)。临界断裂面积  $S$  与动能  $E$  的变化规律一致,表明动能是水滴断裂的主导因素。由式(2)可得,脱落部分水滴的动能  $E$  受质量  $m$  和临界流速  $v$  共同控制,由表4可以看出,随着转化直径  $D_0$  的减小,水滴质量  $m$  减小,临界流速  $v$  增大,脱落部分水滴的动能  $E$  增大,动能  $E$  与临界流速  $v$  的变化规律一致,表明临界流速  $v$  是影响水滴动能的主要因素。因此,在 18 mN/m 的界面张力下流场流速是造成水滴断裂的主要原因,为保证纤维表面水滴的聚结效果,应谨慎调节流场流速。

### 2.3.2 界面张力为 8 mN/m 时水滴脱落过程

当使用 2<sup>#</sup> 乳状液进行实验时,由于表面活性剂含量的增大,不同流速下得到的水滴粒径差异较大,较小的流速变化都会引起不同粒径的水滴发生断裂脱落,因此本文在 5 种流速下观察水滴的脱落过程,结果如图 12 所示。可以看出,水滴的整个脱落过程与界面张力为 18 mN/m 时的水滴脱落过程类似,同样为自身断裂。

按照 2.3.1 节的计算方法,得到在 8 mN/m 界面张力下脱落部分水滴的动能参数和临界断裂面积,结果如表 5 所示。临界断裂面积  $S$  的变化规律与动能  $E$  的变化规律一致,表明动能为水滴断裂的主导因素。随着转化直径  $D_0$  的减小,水滴质量  $m$  减小,临界流速  $v$  增大,脱落部分水滴的动能  $E$  减小,动能  $E$  的变化规律与水滴质量  $m$  的变化规律一致,表明水滴质量  $m$  是影响水滴动能的主要因素。水滴质量  $m$  主要与水滴转化直径  $D_0$  有关,根据水滴聚结实验结果可得表面活性剂含量对水滴粒径具有较大影响;根据水滴脱落实验结果可得不同流速下纤维表面的水滴粒径也有较大差异,由此可得水滴转化直径  $D_0$  受表面活性剂含量与流场流速共同控制。因此,在 8 mN/m 的界面张力下水滴断裂的主要因素为表面活性剂含量和流场流速。

## 3 结论

(1) 在 18 mN/m 的界面张力下,最大水滴粒径

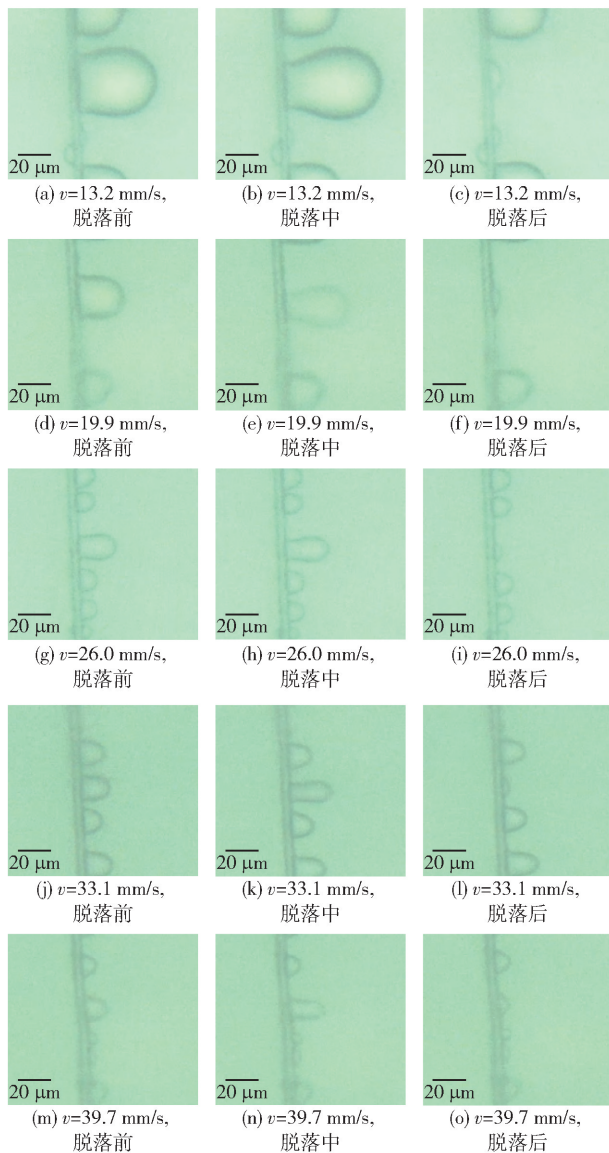


图 12 界面张力为 8 mN/m 时在不同临界流速  $v$  下水滴的脱落过程

Fig. 12 Shedding of water droplets at different critical flow rates when the interfacial tension is 8 mN/m

在前 3 min 增长较快,在 3 min 后增长较为缓慢;在 8 mN/m 的界面张力下,在前 6 min 最大水滴粒径的增长趋势较为平缓,6 min 后最大水滴粒径几乎不再增长,并且在聚结初始阶段水滴呈单侧分布。

(2) 在本文所设定的实验条件下,当水滴单位面积的表面活性剂分子数达到饱和值时,水滴将被表面活性剂分子完全包围,很难与其他水滴发生聚结行为,水滴粒径几乎不再增长。

(3) 在界面张力为 18 mN/m 时,水滴的脱落形式为自身断裂,流场流速是引起水滴断裂的主要原



表 5 界面张力为 8 mN/m 时脱落部分水滴的动能参数和临界断裂面积

Table 5 Parameters related to kinetic energy and critical fracture area of detached droplets when the interfacial tension is 8 mN/m				
转化直径 $D_0/\mu\text{m}$	质量 $m$ / kg	临界流速 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	动能 $E$ / J	临界断裂 面积 $S/\mu\text{m}^2$
44.52	$4.62\times10^{-11}$	13.2	$4.02\times10^{-15}$	0.252
27.16	$1.04\times10^{-11}$	19.9	$2.05\times10^{-15}$	0.128
16.12	$2.19\times10^{-12}$	26.0	$7.41\times10^{-16}$	0.046
12.13	$9.35\times10^{-13}$	33.1	$5.12\times10^{-16}$	0.032
9.99	$5.21\times10^{-13}$	39.7	$4.11\times10^{-16}$	0.026

因。为保证纤维表面水滴的聚结效果,对于流场流速应谨慎调节。

(4)在界面张力为 8 mN/m 时,水滴的脱落形式同样为自身断裂,水滴的断裂不仅与流场流速有关,而且还受表面活性剂含量的影响。为保证水滴的聚结效果,不仅需要合理调控流场流速,还需要控制表面活性剂含量。

参考文献:

[1] 杨玉洁, 陈雯雯, 张倩, 等. 聚结技术及其乳化油水分离性能[J]. 化工进展, 2019, 38(s1): 10–18.  
YANG Y J, CHEN W W, ZHANG Q, et al. Coalescence technology and its application in the separation of oil and water emulsion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(s1): 10–18. (in Chinese)

[2] GOVEDARICA D D, ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ R M, SOKOLOVIĆ D S, et al. A novel approach for the estimation of the efficiency of steady-state fiber bed coalescence [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 104: 268–275.

[3] 杨强, 卢浩, 李裕东, 等. 聚结分离技术在含油污水处理中的应用研究进展[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 767–781.  
YANG Q, LU H, LI Y D, et al. Application and research progress of coalescence separation in oily wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 767–781. (in Chinese)

[4] 张敏霞, 刘涛, 安明明, 等. 油田采出水中油滴的聚结技术与设备[J]. 工业水处理, 2022, 42(3): 33–40.  
ZHANG M X, LIU T, AN M M, et al. Coalescence tech-

nology and equipment of oil droplets in oil field produced water[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(3): 33–40. (in Chinese)

[5] 侯海瑞. 液液聚结分离器原理及石油化工中的应用[J]. 过滤与分离, 2013, 23(3): 29–32.  
HOU H R. The mechanism of liquid–liquid coalescing separator and its application in petrochemical industry [J]. Journal of Filtration & Separation, 2013, 23(3): 29–32. (in Chinese)

[6] 潘光成, 陈庆岭, 江磊, 等. 液相加氢喷气燃料的贮存安定性能[J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(3): 626–634.  
PAN G C, CHEN Q L, JIANG L, et al. Storage stability of liquid-phase hydrogenating jet fuels[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2021, 37(3): 626–634. (in Chinese)

[7] 李金龙. 喷气燃料防冰剂研究进展[J]. 石化技术, 2021, 28(1): 7–10.  
LI J L. The advances of the fuel system icing inhibitors [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021, 28(1): 7–10. (in Chinese)

[8] WANG W, LI K, WANG P Y, et al. Effect of interfacial dilational rheology on the breakage of dispersed droplets in a dilute oil–water emulsion[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 441: 43–50.

[9] ZHOU H, LUO Q, GONG Q T, et al. Interfacial dilational properties of di-substituted alkyl benzene sulfonates at kerosene/water and crude oil/water interfaces [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 520: 561–569.

[10] LUO X M, HUANG X, YAN H P, et al. An experimental study on the coalescence behavior of oil droplet in ASP solution [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 203: 152–158.

[11] 张倩. 特殊氟碳材料对含表面活性剂柴油乳液的聚结分离[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
ZHANG Q. Special fluorocarbon material for surfactant-containing water/fuel emulsion separation by coalescence [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)

[12] MOHAMMADI M, SHAHHOSSEINI S, BAYAT M. Direct numerical simulation of water droplet coalescence in the oil[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 36: 58–71.

# Effect of petroleum sulfonate on water droplet coalescence and shedding on glass fibers

DENG PengFei LI FangJun KANG JingXin CAO JiaMing FENG LeHui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Previous studies of water droplet coalescence and shedding on fiber surfaces have mostly involved qualitative analysis. Relevant experimental data are still lacking, and the influence of various factors on the processes remains unclear. In view of the above problems, a visual microfluidic channel experimental system was built. Two emulsions with different interfacial tensions were prepared by adding petroleum sulfonate to an aviation kerosene-water system. For different interfacial tensions, the coalescence and shedding of water droplets on a glass fiber surface were observed, and the main factors affecting the coalescence and shedding of water droplets were identified. The results showed that for an interfacial tension of 18 mN/m, the maximum droplet size increases rapidly in the first 3 min, and grows slowly after 3 min. For an interfacial tension of 8 mN/m, the growth of the maximum droplet size in the first 6 min is relatively slow, and the maximum droplet size remains essentially constant after 6 min, with the water droplets unilaterally distributed in the initial stage of coalescence. The number of surfactant molecules per unit area of water droplets has a saturation value. When the saturation value is reached the water droplets are completely surrounded by surfactant molecules, which restricts coalescence with other water droplets. For an interfacial tension of 18 mN/m, the flow velocity is the main reason why water droplets break and fall off. For an interfacial tension of 8 mN/m, the breaking and shedding of water droplets is not only affected by the flow velocity of the flow field, but also depends on the amount of surfactant.

**Key words:** glass fiber; petroleum sulfonate; coalescence; water droplet shedding; droplets fracture

(责任编辑:于少云)