

单分散液滴流生成的实验研究

于磊, 仇性启, 李大树

(中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:基于惯性力破碎液柱,设计出一种简易均匀单分散液滴流发生器。利用该发生器研究了不同给液高度、不同喷嘴直径等条件下的液滴生成特性。通过高速相机对生成液滴进行记录,辅以配套的图像处理软件,获取液滴的相关参数,发现单分散液滴的液滴间距随相对高度的变化呈现峰值变化规律,同时生成液滴的直径随喷嘴的外径变化而改变,而给液高度的变化对液滴的生成直径没有影响。

关键词:液滴蒸发;单分散液滴;液滴发生器;高速相机
中图分类号:TQ016.1 **文献标志码:**A

文章编号:0253-4320(2014)12-0135-03

Experimental research on production of mono-disperse droplets

YU Lei, QIU Xing-qi, LI Da-shu

(College of Chemical Engineering, China University of Petroleum(Huadong), Qingdao 266580, China)

Abstract: A simple mono-disperse droplet stream generator is designed based on the liquid column breakup by inertial force. The effects of relative height and nozzle diameter of this generator on the characters of droplets are studied. The droplets formation is recorded by high speed camera. The related parameters of droplets are provided with the matching image processing software. The distance between droplets presents the variation of peak with the change of relative height. The droplet diameter is influenced by the outer diameter of injector. Moreover, different relative height doesn't change the droplet diameter.

Key words: droplet evaporation; mono-disperse droplets; droplet generator; high speed camera

喷雾燃烧多为扩散燃烧,其影响因素有液体燃料的破碎、蒸发,以及与空气的混合等,其中液滴蒸发是关键因素^[1]。然而,由于多液滴蒸发研究的复杂性,目前国内外对于液滴蒸发的研究主要集中在单液滴的蒸发过程。对于多液滴的蒸发为数不多的研究主要集中在单分散液滴的蒸发方面,其研究关键就在于单分散液滴流的产生。

单分散液滴流发生系统在流体力学等基础科学研究以及喷墨打印、燃烧喷嘴等相关工程技术中都有应用^[2-5]。单分散液滴的产生首先是射流液柱的产生,液滴在产生过程中主要受到表面张力^[6]、惯性力和重力的作用,由于液滴的体积很小,认为其受到的表面张力远大于其重力,在受力分析时可忽略重力。分析单分散液滴流的产生过程,结合液滴的受力情况,发现液滴的产生可以近似认为是一个具有初速度 V_0 的射流液柱在下落过程中惯性力克服表面张力形成的。这个过程可以用流体力学中的无量纲韦伯数(Weber number)来表征^[7]。韦伯数的定义如下:

$$W = \rho v^2 l / \sigma \sim \text{惯性力} / \text{表面张力} \sim \text{动能} / \text{表面能} \quad (1)$$

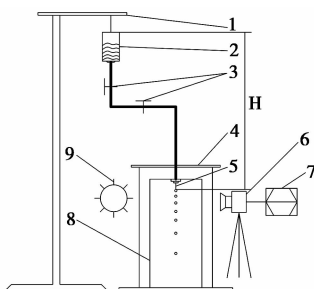
式中, ρ 为流体密度,kg/m³; v 为特征流速,m/s; l 为特征长度,m; σ 为流体表面张力系数,N/m。韦伯数代表惯性力与表面张力效应之比。

根据上述理论,本文中设计了一种利用高度差产生压差形成射流液柱的简易单分散液滴发生装置,并利用该装置对液滴的产生机理进行了相关研究。

1 实验系统

实验所设计的单分散液滴发生装置包括2部分,液滴发生装置主体和观测设备,实验系统见图1。对于单分散液滴而言,其生成的基本原理是瑞利破碎理论。当有以静态压力加于喷嘴内的液体时^[8],只要压力大于喷嘴出口小孔处液体的表面张力,给液瓶中的液体将从喷嘴出口喷出而形成射流液柱。根据瑞利原理^[9],射流液柱受到表面张力的作用,很容易发生崩解而变成液滴。该装置利用液柱惯性力及重力克服液体的表面张力,使得射流崩解,形成均匀的单分散液滴流。单分散液滴的直径通过改变喷嘴的规格来控制。同时,在该装置中,可以通过改变给液瓶的悬挂高度,即改变图1所示的相对高度 H (相对压力),从而改变射流液柱的射流速度,进而改变单分散液滴的初速度,从而可以改变单分散液滴的间距。

给液瓶悬挂于支架上,通过导管将液体传递给下部的喷嘴,喷嘴可拆卸更换,在液体导管上有2个



1—支架;2—给液瓶;3—节流阀;4—支架;5—喷嘴;
6—高速相机;7—图像采集系统;8—透明玻璃管;9—恒定光源

图 1 实验系统示意图

节流阀,用来控制液体流量,上部节流阀用于细调,近喷嘴段节流阀用于粗调,喷嘴出口处生成的单分散液滴在透明玻璃管中下落。实验共选取 9 种不同规格的喷嘴来研究单分散液滴的生成。喷嘴直径参数如表 1 所示。

表 1 喷嘴相关参数 mm

直径	喷嘴								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
内径 D_0	0.68	0.58	0.51	0.41	0.34	0.30	0.26	0.23	0.21
外径 D_1	1.00	0.88	0.81	0.71	0.64	0.54	0.49	0.44	0.37

实验过程中单分散液滴的观测采用高速相机 + 恒定光源的手段。本实验中,高速相机为德国 Basler 公司 A504KC 型数字面阵摄像机。配套的图像采集卡由 EPIX 公司生产,图像处理软件亦采用该公司提供的 XCAP 软件。该软件的操作界面如图 2 所示。通过该软件可设置相机的帧数、分辨率、曝光时间。本次实验中,设置高速相机的帧数为 500 fps,分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,曝光时间为 0.5 ms。



图 2 XCAP 软件操作界面

2 实验结果分析

实验中采用的液体为乙醇,实验均在常温下进行。图 3 是通过高速相机观测到的不同规格喷嘴生成的单分散液滴的图像。利用已知喷嘴外径作为尺

寸基准,通过 XCAP 图像处理软件测量出图像中喷嘴外径以及液滴直径等参数对应的像素值,实际尺寸与图片所占像素值对应呈比例,据此可以求得对应液滴相关参数的实际尺寸。对这些参数进行分析,可以得到液滴直径、间距的影响因素,并且可以计算出液滴的初速度与生成时间。

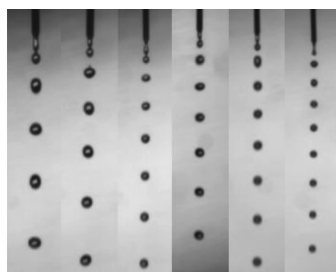
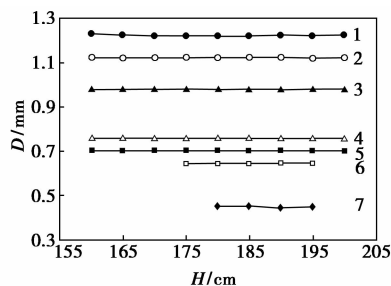


图 3 不同规格喷嘴产生的单分散液滴流

2.1 液滴直径的影响因素

实验对表 1 所述 9 种喷嘴采用不同的相对高度生成单分散液滴,利用高速相机进行记录。通过控制变量法分析相对高度以及喷嘴外径对液滴直径的影响。

图 4 是 3 号 ~ 9 号喷嘴不同相对高度生成的单分散液滴直径与相对高度的关系曲线,实验生成了 7 种不同直径的单分散液滴,最小可达 $450\ \mu\text{m}$,从图 4 中可以明显看出,改变相对高度对单分散液滴的生成直径基本没有影响,据此,说明相对高度不是液滴直径的影响因素。

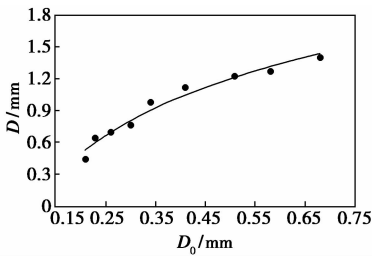


喷嘴:1—3 号;2—4 号;3—5 号;4—6 号;5—7 号;
6—8 号;7—9 号

图 4 液滴直径 D 与相对高度 H 的关系曲线

实验数据处理过程中,利用相关数据处理软件拟合出了生成的单分散液滴直径与喷嘴内径的关系曲线,见图 5,该曲线的相关系数为 0.97,但需要注意的是,该拟合曲线仅在实验所用喷嘴内径范围 ($0.16 \sim 0.68\ \text{mm}$) 内适用,当喷嘴内径减小时,生成的单分散液滴直径以对数形式减小。

从图 4 与图 5 可知,实验中生成的单分散液滴的直径的影响因素是喷嘴的内径,二者呈现对数关系,而相对高度或者说是给液高度对于同一规格的



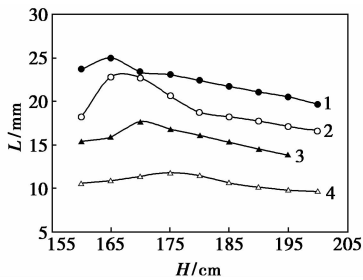
$$y = 0.7726 \ln(x) + 1.7347, R^2 = 0.97$$

图 5 液滴直径 D 与喷嘴内径 D_0 拟合曲线

喷嘴所生成的单分散液滴的直径没有影响。但结合图 4 和图 5 可以看出,随着喷嘴内径的减小,生成单分散液滴所需的高度也在不断增大。由于单分散液滴的生成是射流液柱的惯性力克服表面张力的过程,由式(1)韦伯数的定义可知,射流液柱的惯性力与液柱的直径和射流速度有关,当喷嘴直径减小,射流液柱的直径也随之减小,而为了维持破碎液柱所需的惯性力,则必须增大射流液柱的初速度,由伯努利方程可知,当增大给液瓶与喷嘴出口的相对高度时,射流液柱的初速度亦随之增大。

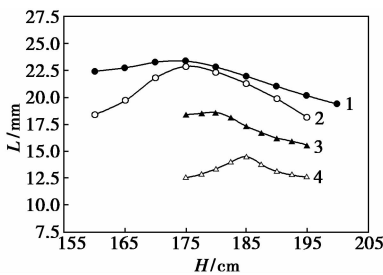
2.2 相对高度对液滴间距的影响

在实验中,由于高速相机拍摄范围的限制,当更换内径更大的喷嘴时,在同样的拍摄范围内所能拍摄到的液滴是变少的,所以,在利用 XCAP 软件提取数据时,分别测量了 3 号~6 号喷嘴生成的前 5 个液滴的间距(图 6),以及 6 号~9 号喷嘴生成的前



喷嘴:1—3 号;2—4 号;3—5 号;4—6 号

图 6 5 个液滴间距 L 与相对高度 H 关系曲线



喷嘴:1—6 号;2—7 号;3—8 号;4—9 号

图 7 8 个液滴间距 L 与相对高度 H 关系曲线

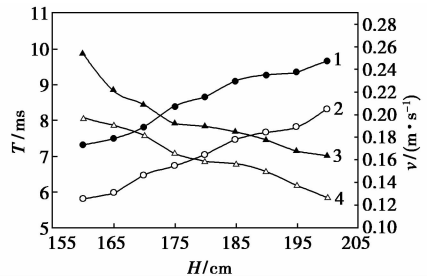
8 个液滴之间的间距(图 7)。

分析图 6 与图 7,液滴的间距随相对高度的增加呈现先增大后减少的趋势,每个喷嘴生成的液滴间距均存在 1 个峰值点,且峰值点随着喷嘴内径的减小向后迁移。这是由于液滴间距受液滴的生成时间与液滴初速度两者相互作用,当相对高度增加时,液滴的初速度增加,同时液滴的生成时间降低,液滴初速度增加必然导致液滴间距增大,然而,液滴生成时间降低则会导致液滴间距减小,这 2 个因素共同作用于液滴的间距,必然导致液滴的间距存在 1 个峰值点。同时纵向对比不同喷嘴的液滴间距,同一相对高度下,随着喷嘴内径的降低,液滴间距也随之降低。

2.3 液滴初速度与生成时间的计算

对于生成的单分散液滴的初速度与生成时间的计算,实验中,取喷嘴生成的前 2 个液滴作为研究对象,认为第一个液滴运动到第二个液滴的位置过程中,液滴的加速度为重力加速度,当第二个液滴还在生成时,第一个液滴已经向下运动,由于存在液滴的生成时间,两液滴之间的间距正是前一个液滴在该段时间内向下运动形成的。同时,以喷嘴生成的第一个液滴为研究对象,刚离开喷嘴的那一时刻的图像作为第一帧,测量该液滴在 2 帧之间下落的距离,即可求出液滴的初速度。

以 6 号和 7 号喷嘴生成的液滴为例,利用所测得液滴参数计算得到液滴的初速度和生成时间随相对高度的变化曲线,如图 8 所示。



1—7 号喷嘴液滴初速度;2—6 号喷嘴液滴初速度;
3—6 号喷嘴液滴生成时间;4—7 号喷嘴液滴生成时间

图 8 液滴的初速度 v 和生成时间 T 随相对高度 H 的变化曲线

对于同一喷嘴生成的单分散液滴,随着相对高度的增大,液滴的初速度随之增大,生成时间逐渐降低,初速度与生成时间 2 条曲线的交点正是液滴间距最大的点,这与上述图 6 和图 7 液滴间距随高度变化的趋势一致。纵向比较 6 号与 7 号喷嘴生成液滴的初速度与生成时间,当喷嘴内径降低时,其生成的液滴的初速度增大,而液滴生成时间减小。

(下转第 139 页)

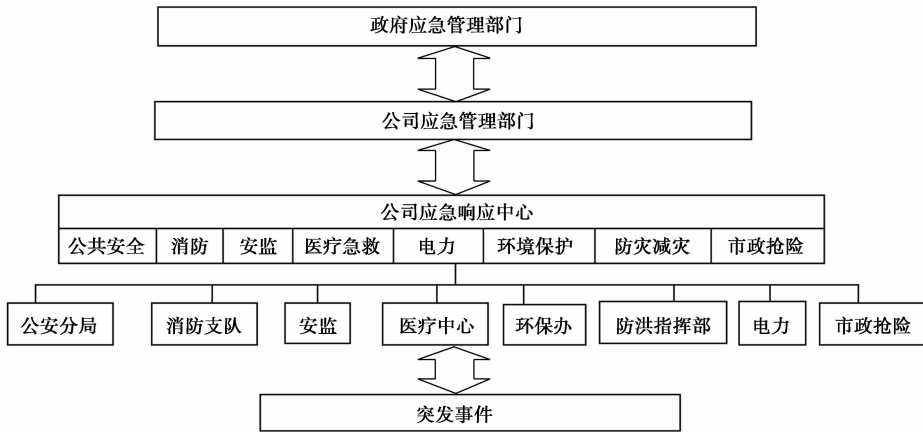


图 1 技术体系框架图

全生产管理系统 DCS 接入、企业消防装置 FAS 接入等)通过信息采集系统接入到应急响应中心,报警通过电话经接处警系统接入应急指挥,并将信息通过网络传给联动单位,如公安、消防、安监局、医疗中心和环保办等。值班长(或指挥长)在分析、处理和评估相关数据后,对事件性质、等级进行分类和上报,并利用应急平台系统的地理信息平台调用相关信息和预案,进行必要的专业模型计算,获得有效辅助决策信息,根据授权决定启动已有的预案,或基于经验做出最初的应急处置的决策,调度救援力量和救援物资,并对事件救援信息进行广播和

发布,如图 2。

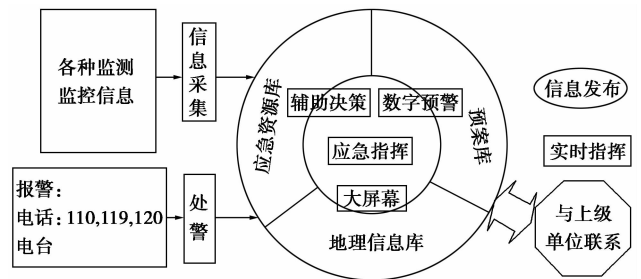


图 2 应急信息处理流程图

(上接第 137 页)

3 结论

设计了一种简易单分散液滴发生器,利用高速相机对不同喷嘴生成的液滴图像进行采集,利用 XCAP 软件对液滴的相关参数进行测量,研究了不同喷嘴内径和相对高度条件下单分散液滴的生成特性,主要结论如下。

(1) 对于固定规格的喷嘴,其生成的单分散液滴的直径与相对高度无关。液滴的直径与喷嘴的内径有关,液滴直径随着喷嘴内径的减小而减小。

(2) 液滴的间距随相对高度的变化呈现峰值变化规律,同时对于同一相对高度,液滴的间距随着喷嘴内径的减小而减小。

(3) 液滴的初速度随着相对高度的增加而增加,生成时间随着相对高度的增加而降低。

参考文献

[1] 傅维标,张永康. 燃烧学[M]. 北京:高等教育出版社,1989:

158 - 159.

[2] Riefler N, Wriedt T. Generation of mono-disperse micron-sized droplets using free adjustable signals [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2008, 25(2): 176 - 182.

[3] Orme M, Liu Q, Smith R. Molten aluminum micro-droplet formation and deposition for advanced manufacturing applications [J]. Aluminum Transactions Journal, 2000, 3(1): 95 - 103.

[4] Luo J, Qi L H, Jiang X S, et al. Research on lateral instability of the uniform-charged droplet stream during droplet-based freeform fabrication [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3/4): 289 - 294.

[5] Shu D H, Qi L H, Luo J, et al. Design and realization of measurement system for charge on the droplet in uniform droplet deposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(10): 2150 - 2155.

[6] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,1986:9.

[7] 刘文巍,黄云,李水清. 适用于稳态蒸发和燃烧的定频率单液滴发生器的研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(8):1570 - 1573.

[8] 周守荣,黄建群. 压电式共振腔均匀液滴发生器的设计与研制 [J]. 四川联合大学学报:工程科学版,1999,3(2):65 - 67.

[9] Richard N Berglund, Benjamin Y H Liu. Generation of monodisperse aerosol standards [J]. Environmental Sci & Technology, 1973, 7(2):147. ■