

农药液滴撞击移动液膜和非对称冠状水花形成机理分析

赵可¹ 王瑜² 蒋彦龙¹

(1. 南京航空航天大学飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;
2. 南京工业大学城市建设学院, 南京 210009)

摘要: 研究农药液滴在植物表面的撞击规律对于提高农药喷雾效率、促进农业病虫害治理具有重要意义。采用 CLSVOF (Coupled level set and volume of fluid) 方法建立单液滴撞击水平运动液膜的数值模型, 通过分析撞击后液体内部的压力分布、速度分布和涡量云图, 验证了运动间断、射流形成和射流顶部末端飞溅机制, 揭示了非对称水花形成机理。由计算结果可知, 液膜流动产生冠状水花主要体现在两侧射流发展行为不一致、冠基厚度不均匀和两侧射流末端飞溅现象不对称, 并且受液膜流动惯性的影响, 冠基随着液膜流动发生迁移, 当无量纲速度 $U = 0.8$ 、无量纲时间 $T = 3.47$ 时, 冠基完全迁移至撞击点右侧; 颈部压差机制导致射流形成, 射流的发展由液滴的径向运动和射流端部的旋涡共同决定, 随着液膜流速的增大 ($0 \sim 0.8$), 上游的射流沿水平方向快速生长, 下游射流则倾向于垂直向上延伸, 两侧射流末端运动速度均增大; 液滴径向运动速度和铺展速度之间的速度差决定了射流末端飞溅状态, 上游液膜流动方向与液滴铺展方向相反, 故上游末端飞溅行为比下游显著。

关键词: 移动液膜; 液滴撞击; 射流; 冠状水花; 非对称; 机理分析

中图分类号: S499; TK124 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0083-09 OSID: 

Mechanism Analysis of Pesticide Droplets Impacting Moving Liquid Film and Asymmetric Crown Behavior Formation

ZHAO Ke¹ WANG Yu² JIANG Yanlong¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Clarifying the impact law of pesticide droplets on the surface of plants is of great significance for improving the efficiency of pesticide spraying and pest control. A numerical model of the horizontal liquid moving liquid film with single droplet impinging was established by the method of coupled level set and volume of fluid. The motion characteristics and dynamic mechanism of the liquid droplet impacting the moving liquid film was studied, by analyzing the pressure distribution, velocity distribution and vortices cloud map inside the liquid after impact, the mechanism of kinematic discontinuity, jet flow formation and jet top-end splash were verified, and the asymmetric crown formation mechanism was revealed, it had guiding significance to explore the effective deposition and loss law of pesticide spraying. It can be seen that the flow of liquid film caused crown showed obvious asymmetric characteristics, such as the development of the upstream and downstream jets flow were inconsistent, uneven crown base thickness and different splashing degree at the end of jet flow on both sides, the crown base migrated with the flow of the liquid film, under the influence of the flow inertia of the liquid film, when the dimensionless velocity U was 0.8 and the dimensionless time T was 3.47, the crown base completely migrated to the right of the impact point; the neck pressure difference mechanism led to the formation of jet flow, and the development of the jet flow was determined by the radial movement of the droplet and

收稿日期: 2020-07-17 修回日期: 2020-09-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51806096)、飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室项目(KLAECLS-E-201902)和江苏高校优势学科建设工程项目
作者简介: 赵可(1991—),男,博士生,主要从事喷雾冷却技术研究,E-mail: nuaazhaok@126.com
通信作者: 蒋彦龙(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事高热流密度散热技术研究,E-mail: jiang-yanlong@nuaa.edu.cn

the vortex at the end of the jet flow, with the increase of liquid film velocity(U is 0 ~ 0.8), the jet flow in the upstream grown rapidly along the horizontal direction, while the jet flow in the downstream tended to extend vertically upward, and the end velocity of the jet flow on both sides was increased; the velocity difference between the radial movement velocity and spreading velocity determined the splashing state at the end of the jet flow, the flow direction of the upstream liquid film was opposite to the spreading direction of the droplet, therefore the splash behavior at the upstream end was more significant than that at downstream.

Key words: flowing liquid film; droplet impact; jet flow; crown behavior; asymmetric; mechanism analysis

0 引言

目前,喷雾防治是我国治理农业病虫害的主要手段。在喷洒过程中,通过喷头将农药输送到靶标植物上,该过程不仅要关注有害生物数量的变化,还应评估农药对周围环境的影响^[1]。研究发现,喷洒的农药仅有 20% ~ 30% 沉积在靶标植物表面^[2],大量农药流入土壤及水环境,从而引发邻近作物药害事故。研究农药在靶标植物上的沉积流失规律对获得农药最佳使用效益、降低农药负效应具有重要意义^[3]。

农药在植物叶片上的最终沉积分布取决于药液雾化参数(粒径、运行速度)、药液的物理或化学特性(黏度、表面张力、密度)^[4]、喷洒系统^[5]、操作参数、气象环境、叶片表面结构、冠层结构等^[6]。已有研究者对农药的雾化特性及液滴分布进行了研究,结果表明:农药的喷雾效率和有效性与喷嘴型号、喷量流速、喷雾压力密切相关,增大压力、风速容易引发农药脱靶飘移^[7-12]。

农药的喷洒过程可归结为多个液滴冲击植物叶片的复杂物理场耦合,属于典型的多相流问题。因此,明晰单个液滴对植物叶片的冲击行为是研究农药沉积机理的基础。现有研究多集中于农药液滴的空间分布,缺乏对液滴冲击植物叶片的动力学行为研究。另外,受喷洒工况和农药种类的影响,药液在植物叶片上的沉积结构随之发生改变。研究发现,药液动态表面张力、粘度、密度对药滴反弹、铺展、飞溅扩散具有影响,静态表面张力决定药滴的铺展和最终形成的沉积结构^[13]。在农药喷洒过程中,液滴碰触植物叶片并迅速铺展成液膜,随后液滴持续冲击液膜的过程属于流体力学中的液滴撞击液膜过程。

目前,撞击液膜研究主要借助高速摄像机和液滴发生器进行相关试验,或利用计算机技术对撞击过程进行数值分析。由于成像技术和微尺度测量技术的局限性,相关参数无法准确控制,如液滴撞击参数(直径、撞击速度)、液膜流动参数(液膜厚度、液

膜流动速度、液膜表面微观结构)等,而且更难以获得撞击过程中涉及的流体内部微观数据。因此,数值方法已逐渐成为研究流体运动过程的重要手段。数值研究无需试验成本,不受试验过程中不确定性因素的影响,并且可以准确捕捉液膜内的压力场和速度场等信息。常用的数值模拟方法包括 CLSVOF 法(Coupled level set and volume of fluid)、格子-玻尔兹曼方法(Lattice - Boltzmann method, LBM)、光滑粒子动力学方法(Smoothed particle hydrodynamics method, SPH)、界面追踪法(The front tracking method, FTM)等。许多学者采用数值方法建立了液滴撞击液膜的二维物理模型,并取得令人满意的结果^[14-21]。

在农药实际喷洒过程中,多采用飘移式喷雾。通常植物叶片呈一定倾角,这导致在植物叶片上形成的药液膜以不同速度沿径向向四周运动。目前,关于液滴撞击移动液膜的研究非常有限,由于液滴与液膜之间存在剪切应力,碰撞的动力学行为变得更加复杂,产生不同于冲击静态液膜的独特动态特征,因此针对液滴在静止液膜上的撞击研究具有更广泛的应用和物理意义。一些学者研究发现,液滴撞击运动液膜后会发生合并、形成喷射、喷射破碎、冠状飞溅和冠状喷射等现象,并认为这和液滴撞击速度与液膜移动速度之比、液膜厚度、液膜表面的结构(平面膜、毛细波和波峰)以及液体的物理性质有关,而且流动液膜的冲击还会引发壁面上的热流分布不均匀^[22-26]。

可以看出,相关研究主要集中于冲击静态液膜的试验观测与理论分析上,针对流动液膜的研究非常有限。本文利用 CLSVOF 方法模拟单液滴撞击移动液膜的运动过程,结合冲击后的形貌演变和液体内部流场状态,揭示非对称水花的形成机理,并对二次液滴的产生和细射流的形成机制进行验证,深入研究农药在靶标植物上动态沉积过程,分析农药在植物叶片上的沉积机理,为探究农药的最终有效沉积和流失规律提供理论支撑。

1 计算模型

CLSVOF 方法包括 Level Set 函数和 VOF 函数初始化、流动控制方程求解、Level Set 函数和 VOF 相函数(ϕ 函数和 F 函数)的对流输运方程求解、相界面重构以及函数再次初始化等。在 VOF 方法中, F 函数表示计算单元中液相占据单元空间的体积分数, Level Set 方法中用 ϕ 函数代数值来区分计算域中的各相, CLSVOF 方法可有效解决 VOF 和 Level Set 两种气液两相流动相界面追踪方法存在的计算收敛性、稳定性及准确性不高等问题^[27-28]。

CLSVOF 方法通过 ϕ 函数和 F 函数共同构造相界面, 采用分段线性界面重构思想, 在法向方向上移动界面使得单元液态区域面积比率和 F 函数值相匹配, 单元中心到相界面的垂直距离由割线法迭代求解得到。

界面法向量 $\mathbf{n}$ 计算公式为

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \tag{1}$$

界面曲率 $\kappa(\phi)$ 为

$$\kappa(\phi) = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \tag{2}$$

对流输运方程为

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) F = 0 \tag{3}$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi = 0 \tag{4}$$

式中 $\mathbf{u}$ ——流动速度, m/s

t ——时间, s

ϕ 函数经过对流输运方程求解后, 将不再保持距离函数的性质, 因此必须对 ϕ 函数重新初始化, 再次重新初始化主要包括 ϕ 函数符号以及 ϕ 函数值的确定。 ϕ 函数值是单元中心到相界面最小距离, 而 ϕ 函数的符号由 F 函数值决定^[27]

$$S^\phi = \text{sign}(0.5 - F) \tag{5}$$

当 $F < 0.5$ 时, 单元中心在气态区域中, ϕ 函数为正; $F > 0.5$ 时, 单元中心在液态区域中, ϕ 函数为负; 当 $F = 0.5$ 时, 表示相界面, $\phi = 0$; $\text{sign}()$ 是符号函数。

流动控制方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{6}$$

$$\rho(\phi) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p - \mathbf{F}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho(\phi) \mathbf{g} \tag{7}$$

其中

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu(\phi) \mathbf{S}$$

式中 ρ ——密度, kg/m³

p ——压力, Pa

$\mathbf{g}$ ——重力加速度, m/s²

$\boldsymbol{\tau}$ ——黏性应力张量

$\mathbf{F}_s$ ——表面张力源项

表面张力采用 CSF (Continuum surface force) 模型

$$\mathbf{F}_s = \sigma \kappa(\phi) \nabla H(\phi) \tag{8}$$

式中 σ ——表面张力系数, N/m

$H(\phi)$ ——Heaviside 函数

引入 Heaviside 函数来光滑界面处的密度和黏度^[28]

$$H(\phi) = \begin{cases} 1 & (\phi \geq h) \\ 0 & (\phi \leq -h) \\ 0.5 + \phi/(3h) + \sin(2\pi\phi/(3h))/(2\pi) & (|\phi| < h) \end{cases} \tag{9}$$

式中 h ——网格尺寸, mm

μ ——黏度, Pa·s

应变率张量 $\mathbf{S}$ 表达式为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \tag{10}$$

则不同区域密度 ρ 和黏度 μ 可由 Heaviside 函数计算^[28], 即

$$\rho(\phi) = \rho_l(1 - H(\phi)) + \rho_g H(\phi) \tag{11}$$

$$\mu(\phi) = \mu_l(1 - H(\phi)) + \mu_g H(\phi) \tag{12}$$

式中 ρ_l ——液相密度, kg/m³

ρ_g ——气相密度, kg/m³

μ_l ——液相黏度, Pa·s

μ_g ——气相黏度, Pa·s

初始时刻如图1所示, 本文在 xoz 平面建立二维计算模型, 初始时刻圆形截面底部与液膜截面相切, 初始直径 D_0 、初始速度 U_0 的液滴垂直向下撞击厚度为 h_f 、速度为 u_f 的液膜, 流动方向向右, 液膜和液滴均以水作为流动介质, x 表示铺展前端距离中心轴的长度, “-”、“+”分别代表运动方向, 以对称中心为原点, 左侧铺展长度记为负, 右侧记为正, 则铺展直径 $D_t = x_+ - x_-$ 。考虑重力的影响, 顶部及两侧为压力出口边界, 底部为无滑移壁面, 将气液两相均视为不可压缩流体。

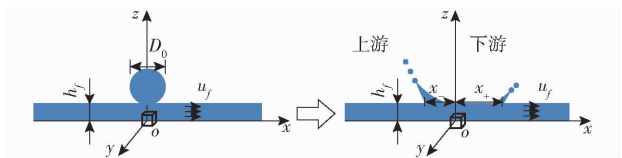


图1 初始时刻液滴撞击液膜的几何模型及形貌演变示意图

Fig.1 Model of droplet impact on liquid film at initial time and evolution of morphology

计算相关参数见表1, 其中液滴撞击参数(直径、撞击速度)和液膜流动参数(液膜厚度、液膜流

表 1 相关参数
Tab.1 Related parameters

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	1 000
表面张力系数/(N·m ⁻¹)	7. 14 × 10 ⁻²
液滴黏度/(Pa·s)	1 × 10 ⁻³
液滴初始速度/(m·s ⁻¹)	4
液滴初始直径/mm	1. 5
无量纲厚度	0. 2
无量纲速度	0 ~ 0. 8

速)参照文献[29]试验数据,本文着重考察液膜流动的影响,涉及的液滴初始直径和速度均为恒定,为了便于对比分析,将相关计算参数无量纲化,具体公式为

$$\varphi = \frac{D_t}{D_0} \quad X = \frac{x}{D_0} \quad T = \frac{tU_0}{D_0}$$
$$U = \frac{u_f}{U_0} \quad H = \frac{h_f}{D_0} \quad We = \frac{D_0 U_0^2 \rho}{\sigma}$$

- 式中 φ ——无量纲铺展因子
 X ——无量纲长度
 T ——无量纲时间
 U ——无量纲速度
 H ——无量纲厚度
 We ——液滴韦伯数

利用 Fluent 17. 0 软件求解数值模型,控制方程采用有限体积法进行离散,压力与速度耦合采用 Coupled 方法,压力求解采用 PRESTO 方法,采用 QUICK 算法对 Level Set 方程进行求解,采用 Geometric - Reconstruction Scheme 求解 VOF 方程,动量和能量方程采用二阶迎风格式,时间步长 $\Delta t = 10^{-6}$ s, Δt 内迭代次数为 20。

2 单液滴撞击壁面运动特性分析

2.1 计算模型验证

二维网格划分包括三角形单元网格和四边形单元网格,四边形均匀网格在离散域逼近,计算精度以及网格质量等方面均优于三角形单元网格,故本文采用四边形网格对计算域进行划分,为了对网格进行无关性验证,模型网格数分别划分为 80 000、180 000、320 000、500 000,选择铺展因子作为比较参数,图 2 给出了不同网格数的无量纲铺展因子随无量纲时间的变化曲线,对比分析 4 种网格的无量纲铺展因子随无量纲时间的变化曲线可见,当网格数为 320 000 时计算结果与网格数不再相关,因此在后续计算中网格数均采用 320 000。

另外,本文以文献[29]试验结果为参照,在相同试验条件下(无量纲厚度 $H = 0. 05$,无量纲速度

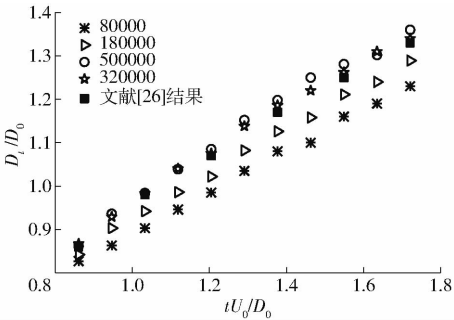


图 2 不同网格数的无量纲铺展因子随无量纲时间的变化曲线

Fig.2 Changing curves of spreading factor of different grids with time

$U = 0. 31$)对模拟结果进行定量对比,对比结果见图 2,试验采用高速摄像机记录撞击过程(帧率为 5 000 f/s,快门速度 30 μ s),通过注射泵产生小液滴,液滴直径 D_0 由注射泵下端毛细管孔径控制,调节生成液滴高度来控制液滴撞击速度 U_0 ,利用加压罐垂直向下供应液体射流并在基底表面形成径向流动液膜,液膜的流动参数(液膜厚度 h_f 和流速 u_f)根据 WATSON 理论^[30]计算(该理论计算预测结果已被 AZUMA 等^[31-32]采用多普勒相位仪验证),计算式为

$$h_f =$$
$$\begin{cases} 1.7668 \sqrt{\frac{\mu \chi a^2}{V} + \frac{a^2}{2\chi}} & \left(\chi \leq 0.3155 \left(\frac{Va^2}{\mu}\right)^{1/3}\right) \\ \frac{2\pi^2 \mu \left(\chi^3 + \frac{0.1823 Va^2}{\mu}\right)}{3\sqrt{3} \chi V} & \left(\chi > 0.3155 \left(\frac{Va^2}{\mu}\right)^{1/3}\right) \end{cases}$$

(13)

$$u_f = \frac{V}{2\pi\chi h_f}$$

(14)

- 式中 χ ——撞击点到射流中心距离,mm
 a ——射流喷嘴的孔半径,mm
 V ——射流体积流率,cm³/s

由图 2 可以看出铺展因子曲线的模拟结果与试验结果线较为接近,说明计算结果与试验结果一致性良好。

图 3a 为相同试验条件下单液滴撞击静止液膜的模拟结果与试验结果^[29]的定性对比(无量纲厚度 $H = 0. 26$,无量纲速度 $U = 0$)。 $t = 0. 4$ ms 时,液滴撞击静止液膜后在液滴周围形成小水花,随着撞击过程持续,水花不断外延,并产生竖直向上运动的薄膜射流, $t = 6. 0$ ms 时,形成完美对称冠状水花,在冠状水花顶部边缘形成指状结构,并在顶部边缘发生飞溅,产生二次小液滴,模拟结果与试验结果吻合较好。图 3b 为相同试验条件下单液滴撞击水平右移

液膜模拟结果与试验结果^[29]的定性比较,其中无量纲厚度 $H = 0.058$ 、无量纲速度 $U = 0.479$ 。不同于液滴在静止液膜上的冲击,在移动液膜上观察到非对称的冠状水花的独特特征,这种非对称行为在 xoz 平面上尤为显著; $t = 1.0\text{ ms}$ 时,在液滴周围观察到不对称的细射流并逐渐演变成非对称的冠状水花,且伴有二次小液滴;在 5.0 ms 时,撞击上游细射流仍斜向上移动,而在撞击下游射流在流动液膜中逐渐淹没,并在铺展边缘作波状运动,与试验结果吻合。事实上,试验结果和模拟结果存在一定差距,原因可能是试验中液膜流动参数和液滴撞击参数的控制难度较大,流动液膜表面不可能为绝对平面且生成的液滴达不到完美球形,这与模型中液膜和液滴的几何参数存在一定差距。尽管如此,由图 2 和图 3 的定量及定性对比可以看出,本文建立的二维模型仍可以捕捉到相关现象的基本特征,如在 xoz 平面上,撞击上下游射流的不对称、二次液滴的产生等主要特征,说明本文建立的液滴撞击移动液膜的二维数值模型是可行的。

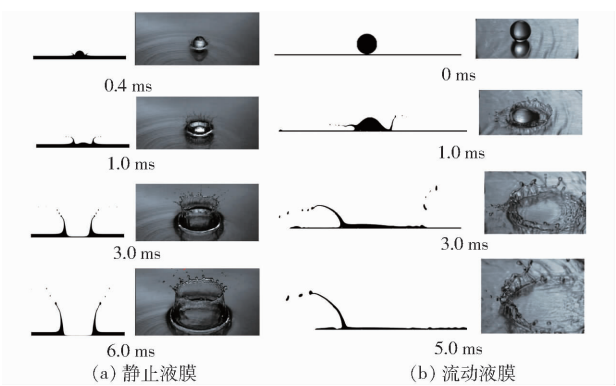


图3 单液滴撞击静止液膜和水平右移液膜的模拟结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison of simulation and experimental results of single droplet impacting static liquid film and horizontal right-moving liquid film

2.2 液膜流动速度的影响

农药喷洒工况的调整、大气环境的改变以及靶标植物叶片的倾斜都会引起液膜流动,为了深入研究液膜的流动对撞击行为的影响,图 4 给出了液滴撞击不同流速液膜的形貌演变(红色虚线为 z 轴),其中无量纲速度 U 为 $0, 0.4, 0.8$,无量纲厚度 $H = 0.2$,液滴韦伯数 $We = 333$,液膜流动方向水平向右。可以看出,液膜的流动对撞击行为影响显著,液膜流速越大,水花的非对称特征越明显,在撞击初期(0.2 ms),液滴惯性力驱使液滴迅速冲击液膜,在液滴与液膜交界处产生小的细射流,形成冠状水花的冠壁,并伴随飞溅的二次液滴,液滴底部不断挤压周围液膜形成了冠基;随着撞击过程的持续($0.5 \sim$

1.0 ms),冠壁高度和冠基直径逐渐增大;提高液膜流速后,两股撞击流体在冠基中心的左侧聚集,撞击上游的冠壁呈现水平运动的趋势,而撞击下游的冠壁下部与液膜几乎垂直,非对称行为愈加显著;而且上下游射流端部的飞溅现象也不一致,液膜流速越大,撞击上游的飞溅现象越明显,而撞击下游则与之相反。

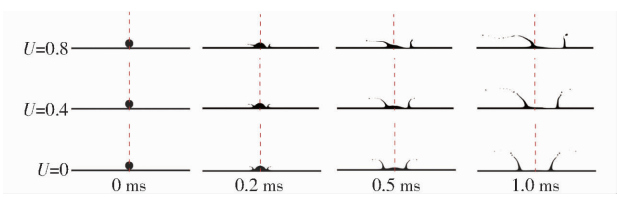


图4 不同流动速度液膜上的水花形貌
Fig.4 Splash morphology on liquid film of different velocities

农药液滴在植物叶片上的沉积实质上是液滴在液膜上的铺展,图 5 为不同移动速度下无量纲铺展长度随无量纲时间的变化曲线,无量纲厚度 $H = 0.2$,液滴韦伯数 $We = 333$ 。由图 5 可知,液膜流动方向与撞击上游液滴的铺展方向相反,阻碍液滴的铺展,但与撞击下游的铺展方向相同,故液膜流速固定时撞击下游的无量纲铺展长度(x_+)总大于撞击上游(x_-),液膜流速与上游的无量纲铺展长度成反比,与下游成正比;进一步分析发现,冠基中心随着液膜的流动逐渐向右推移,冠基中心与 z 轴不再重合,且冠基中心右移幅度随着流动速度增大而增大,当无量纲速度 $U = 0.8$,无量纲时间 $T = 3.47$ 时,非对称冠状水花完全迁移至 z 轴右侧,这是因为本文模拟工况中 $0 < HU < 0.16 \ll 1$,液滴的惯性远小于流动液膜的惯性,导致冠状水花在液膜惯性力的作用下沿着液膜流动方向快速迁移。因此,喷施农药防治病虫害时,在保证药液充分雾化的前提下,应适当降低农药的进液压力,其有益效果是可以降低植物叶片上的液膜沉积量及液膜流动速度,从而削弱液膜流动惯性的影响,最终达到提升农药利用率的效果。

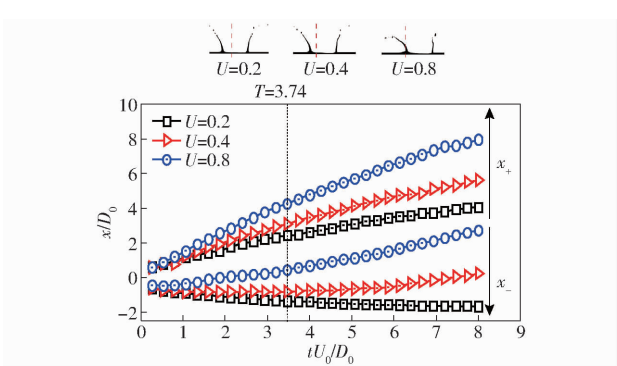


图5 无量纲长度随无量纲时间变化曲线
Fig.5 Curves of dimensionless spreading length with dimensionless time

2.3 非对称冠状水花形成机理

由上述模拟结果可以看出,液滴撞击移动液膜产生的非对称水花主要体现在左右两侧射流发展行为不一致、冠基液体厚度不均匀以及射流端部的飞溅现象不对称。对于农药喷雾防治而言,这种非对称特征容易引发靶标植物叶片上面农药分布不均匀,尤其是飞溅行为将直接导致植物叶片上农药的流失。目前,关于液滴撞击移动液膜的试验或理论研究相对较少,更缺乏非对称水花演变机理研究。为了对液滴撞击移动液膜产生水花演变过程进行深入分析,图6(图中压差单位为Pa)分别给出了液滴撞击静止和移动液膜(无量纲速度 $U=0.8$)的压差分布图,其中红线为相界面,黑线为等压线,无量纲厚度 $H=0.2$ 。梁刚涛等^[27]研究认为液滴撞击后的颈部位置较大的压差导致细射流的发生。观察图6a发现,在0.05 ms时,液滴冲击静止液膜后在两侧颈部出现压力较大的滞止点,越靠近滞止点压力越大,而在两相界面处压力接近大气压,在颈部与相界面产生13 700 Pa的压差,出现颈部凸起;较大的压差足以克服表面张力的束缚,当撞击持续至0.2 ms时,颈部凸起演变为高速运动的细射流,此时压差快速下降至4 250 Pa。

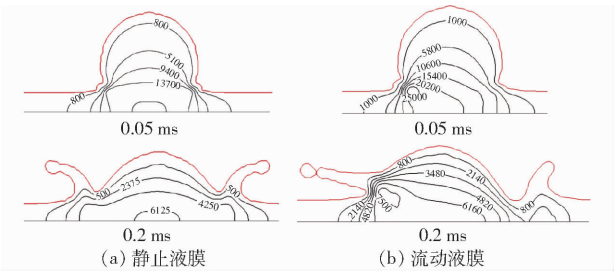


图6 不同时刻的压差分布
Fig.6 Pressure distribution at different times

对于移动液膜,液体内的压力分布与静止液膜截然不同,由图6b可以看出,0.05 ms时流体内部高压区集中在撞击上游颈部,压差为25 000 Pa,远高于撞击下游,且约为静止液膜的1.8倍。如图6b所示,在较大压差的驱动下,聚集在高压区的大量液体向外部气流的低压区流动,在撞击上游颈部位置形成斜向上微小凸起。相反的是,在撞击下游颈部位置附近的压力梯度较小,液体凸起不明显。随着撞

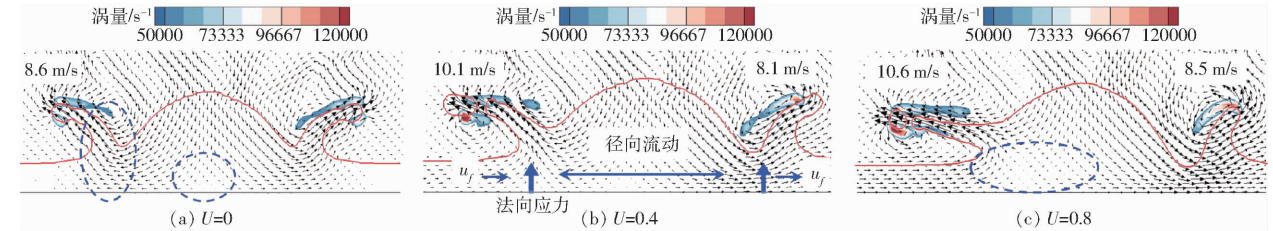


图7 速度分布和涡量云图

Fig.7 Velocity distribution and vorticity cloud diagram

击过程的持续,撞击颈部位置的压差迅速下降,凸起不断增大演变成射流,撞击上下游射流的演化不再对称,说明射流产生的压差机制同样适应于流动液膜。

由图4和图6发现,液滴撞击静止液膜时,两侧射流顶部末端射流呈现水平运动的趋势,梁刚涛等^[27]将其归因于液膜内部流体的径向运动作用。而当液滴撞击移动液膜时,随着液膜流速的增大,撞击上游的射流水平运动更显著,而撞击下游射流更倾向于垂直向上延伸,似乎径向运动不再主导下游射流的延伸方向。为了进一步探究上述现象,图7给出了0.2 ms时在不同液膜流速下的速度分布和涡量云图,其中红线为相界面,无量纲厚度 $H=0.2$ 。

YARIN等^[33]提出液滴撞击静止液膜产生的冠状水花是由于流体内部的运动间断(Kinematic discontinuity)导致的;由图7a可知,静止液膜流体内部速度分布呈现较好的对称性,对于不可压缩的液体,液滴撞击液膜后导致流体向下运动,流体碰撞到固壁后出现流动滞止区^[34](右侧蓝色虚线圈),随后液体的流动方向发生改变,形成径向运动,径向运动的液滴流冲击周围静止液膜时导致运动间断,出现速度不连续现象(左侧蓝色虚线圈),并沿着速度不连续前沿产生流出的细射流,射流速度达到8.6 m/s。

对于流动液膜而言,液滴撞击移动液膜时流体内部速度分布会出现非对称特征。由图7b可知,当无量纲速度 $U=0.4$ 时,撞击上游液膜流动方向与液滴的铺展方向相反,液滴的铺展受阻,运动间断现象非常明显,两股流体在运动间断处汇聚,汇聚的流体因壁面的法向应力(向上蓝色箭头)垂直向上运动^[34-35],由于流动液膜和液滴的铺展相互挤压,导致汇聚的流体与液滴接触区域增大,液滴内部径向运动对射流延伸方向的影响被加剧,因而表现出上游射流沿水平方向运动较明显;但在撞击下游液滴铺展方向与液膜流动方向相同,在液膜流动剪切力的作用下,运动间断被明显削弱,汇聚的流体沿着液膜流动方向迅速迁移,此时液滴与汇聚的流体与液滴接触区域减小,径向运动效应对下游的射流影响随之减弱,故表现在图4中撞击下游的射流更倾向于向上运动。另外,运动间断处汇聚的流体既是质

量又是动量的汇聚^[23],显然上游汇聚流体的质量和动量高于下游,这意味着有更多的液体进入上游射流,且上游射流末端速度达到 10.1 m/s,高于下游射流末端速度 8.1 m/s。分析图 7c 可知,提高液膜流速至无量纲速度 $U = 0.8$ 时,液膜水平流动惯性显著增大,运动间断区逐渐沿着液膜流动方向迁移,最终在撞击上游运动间断区和滞止区发生合并(蓝色虚线圈),大量液体在此处聚集,这与图 4 中冠基左侧液膜隆起,而右侧液膜凹陷是一致的;液膜流速的增加导致汇聚的液体质量和动量均迅速增加,因而更多的流体进入射流,两侧射流速度分别增长至 10.6 m/s 和 8.5 m/s;图 7 中速度分布总体上表现出撞击上游射流末端速度、静止液膜射流末端速度、撞击下游射流末端速度依次增大的趋势。

从涡量的角度分析,如图 7 所示,当液滴撞击静止液膜时,在射流端部上下两侧出现一对顺时针(上方)和逆时针(下方)的反向旋涡。可以看出,随着液膜的流动和射流的发展,在撞击上游射流的下方出现逆时针旋涡比上方的顺时针旋涡更剧烈,并且随着液膜流速的增大,在下游射流下方的旋涡逐渐消失,而上方的旋涡逐渐增强,LIU 等^[36]研究认为旋涡方向和大小对射流发展有较大的影响;在撞击上游较强逆时针旋涡驱使射流向液膜方向弯曲^[37],即有利于射流沿着水平方向运动,而撞击下游仅在射流上方出现逆时针旋涡有利于射流端部向上运动;总体看来上游射流向水平方向运动显著,下游射流更倾向于垂直向上发展,但在下游射流末端仍有水平运动的趋势;可见在移动液膜上,射流发展受径向运动和涡量共同作用,但径向运动对射流发展趋势影响较大。结合分析涡量云图和速度分布可知,增大液膜流速加剧射流向液膜流动相反方向延伸的趋势,这对药液在植物叶片上有效沉积及沉积均匀性是不利的。因此在实际农药喷洒过程中,需尽可能保持农作物叶片表面液膜处于静止或低速流动状态,减少农药的射流损失。

飞溅行为直接影响药液在靶标植物叶片上的沉积量,本文研究发现飞溅行为在撞击上、下游表现不

一致,戴剑锋等^[19]在研究液滴撞击倾斜液膜时也发现两侧射流端部飞溅现象不同,并将其归因于被撞击液膜流动方向的改变,而 SHETABIVASH 等^[38]提出层间流体的剪切作用导致流体中发生界面不稳定是射流端部发生飞溅的关键,THORODDSEN 等^[39]发现剪切失稳源于铺展的速度与液滴径向流速的速度差,二者速度差越大越容易发生飞溅;这说明射流端部发生飞溅与液膜的流速密切相关;对液膜施加水平运动速度后,撞击上游的液滴径向流动方向与液膜流动方向相反,二者速度差较大,沿着射流端部分离出较多的二次小液滴,而在撞击下游二者同向运动导致速度差减小,撞击下游的飞溅迟缓,故水花两侧的飞溅现象不一致。对于农药喷洒而言,撞击下游的飞溅迟缓意味着药液脱靶率低,这对于提高农药喷洒效率是有利的。

3 结论

(1)液滴撞击移动膜产生的非对称冠状水花主要体现在两侧射流发展行为不一致、两侧射流末端飞溅现象不对称和冠基厚度不均匀,随着液膜流动速度的增大这种非对称行为愈发显著。

(2)受液膜流动惯性的影响,非对称冠状水花随着液膜流动发生迁移,迁移幅度随着液膜流速增大而增加。

(3)射流的延伸发展由液滴径向运动和射流端部旋涡共同决定,径向运动起主要作用,射流长度和冠基厚度取决于液滴径向运动与液膜流动的方向。

(4)射流末端形成的飞溅现象源于液滴径向运动速度与铺展速度的速度差而导致层间流体的剪切失稳。

(5)通过分析液滴在移动液膜上的沉积机理可以看出,降低液滴撞击速度和液膜流动速度可以抑制飞溅现象。因此,在进行农药喷洒时,应尽量选择雾化效果好的喷洒系统,从而抑制液滴的飞溅脱靶和飘移;同时,还应降低农药的进液压力,以减小在植物叶片上形成液膜的厚度及液膜的流动速度,从而削弱液膜流动带来的不利影响。

参 考 文 献

- [1] GEIGER F, BENGTSOON J, BERENDSE F, et al. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland[J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(2): 97–105.
- [2] COUPE R H, CAPEL P D. Trends in pesticide use on soybean, corn and cotton since the introduction of major genetically modified crops in the United States[J]. Pest Managementence, 2016, 72(5): 1013–1022.
- [3] 徐德进, 徐广春, 许小龙, 等. 施液量、雾滴大小、叶片倾角及助剂对农药在稻叶上沉积的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2056–2062.
- XU Dejin, XU Guangchun, XU Xiaolong, et al. Effect of application volume, droplet size, rice leaf incline angle and spray adjuvant on pesticide deposition[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 2056–2062. (in

Chinese)

- [4] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 农药助剂对空中和地面防控林业有害生物的雾滴粒径影响[J]. 林业科学, 2020, 56(5): 118–129.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Adjuvant's influence to droplet size based on forestry pests' prevention with ground and air chemical application[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(5): 118–129. (in Chinese)
- [5] 文晟, 韩杰, 兰玉彬, 等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127–137.
WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127–137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180815&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.015. (in Chinese)
- [6] 王潇楠, 何雄奎, 宋坚利, 等. 助剂类型及浓度对不同喷头雾滴飘移的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 49–55.
WANG Xiaonan, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Effect of adjuvant types and concentration on spray drift potential of different nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 49–55. (in Chinese)
- [7] 肖丽萍, 刘木华, HEPING Z, 等. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 100–106.
XIAO Liping, LIU Muhua, HEPING Z, et al. Spray droplet size characteristics of different biological pesticides with different hydraulic nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 100–106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180213&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.013. (in Chinese)
- [8] 张慧春, GARY D, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53–57.
ZHANG Huichun, GARY D, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 53–57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120610&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)
- [9] 张慧春, 郑加强, 周宏平, 等. 农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 114–122.
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition distribution and off-target drift during pesticide spraying operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 114–122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170812&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.012. (in Chinese)
- [10] 梁昭, 范国强, 王光明, 等. 基于双峰分布的风胁迫雾滴沉积分布模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 28–37.
LIANG Zhao, FAN Guoqiang, WANG Guangming, et al. Distribution model of wind-stressed droplet deposition based on bimodal distribution[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 28–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200403&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.003. (in Chinese)
- [11] 李继宇, 郭爽, 姚伟祥, 等. 气流作业下雾滴粒径稻株间分布特性与风洞模拟试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 148–156.
LI Jiyu, GUO Shuang, YAO Weixiang, et al. Distribution characteristics of droplet size in rice field and wind tunnel simulation test under airflow operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 148–156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190817&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.017. (in Chinese)
- [12] 刘冬梅, 周宏平, 郑加强, 等. 茶叶叶片表面喷雾液滴斜撞击行为研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 96–103, 195.
LIU Dongmei, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Oblique impact behavior of spray droplets on tea tree leaves surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 96–103, 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190511&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.011. (in Chinese)
- [13] 顾中言, 徐广春, 徐德进, 等. 稻田农药科学减量的技术体系及其原理[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 1016–1024.
GU Zhongyan, XU Guangchun, XU Dejin, et al. Technical system for scientific reduction of pesticide use in rice field and its principle[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(5): 1016–1024. (in Chinese)
- [14] LIANG G T, ZHANG T, YU H, et al. Simultaneous impact of multiple droplets on liquid film[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 65: 51–61.
- [15] LIANG G T, GUO Y L, SHEN S Q. Crown behavior and bubble entrainment during a drop impact on a liquid film[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2014, 28(2): 159–170.
- [16] 郑志伟, 李大树, 仇性启, 等. 柴油液滴撞击倾斜壁面碰撞速度效应数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 317–324.
ZHENG Zhiwei, LI Dashu, CHOU Xingqi, et al. Numerical analysis of effect of impacting velocity on diesel droplet impacting on inclined surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 317–324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160817&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.017. (in Chinese)

- // www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160842&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.042. (in Chinese)
- [17] GUO J H, DAI S Q. Numerical simulation on the mechanism of the normal impact of two droplets onto a thin film[J]. Journal of Shanghai University, 2007, 11(3): 210 – 212.
- [18] RAY B, BISWAS G, SHARMA A. Oblique drop impact on deep and shallow liquid[J]. Communications in Computational Physics, 2012, 11(4): 1386 – 1396.
- [19] 戴剑锋, 樊学萍, 蒙波, 等. 单液滴撞击倾斜液膜飞溅过程的耦合 Level Set – VOF 模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 406 – 411.
- DAI Jianfeng, FAN Xueping, MENG Bo, et al. A coupled Level-Set and volume-of-fluid simulation for splashing of single droplet impact on an inclined liquid film[J]. Acta Physical Sinica, 2015, 64(9): 406 – 411. (in Chinese)
- [20] LI D, DUAN X. Numerical analysis of droplet impact and heat transfer on an inclined wet surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 459 – 468.
- [21] GUO Y L, WEI L, LIANG G T, et al. Simulation of droplet impact on liquid film with CLSVOF[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 53: 26 – 33.
- [22] ALGHOUL S K, EASTWICK C N, HANN D B. Normal droplet impact on horizontal moving films: an investigation of impact behaviour and regimes[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(5): 1305 – 1316.
- [23] CASTREJONPITA J R, MUNOZSANCHEZ B N, HUTCHINGS I M, et al. Droplet impact onto moving liquids[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 809: 716 – 725.
- [24] WANG Y B, WANG X D, WANG T H, et al. Asymmetric heat transfer characteristics of a double droplet impact on a moving liquid film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 649 – 659.
- [25] BURZYNSKI D, BANSMER S. Droplet splashing on thin moving films at high Weber numbers[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 101: 202 – 211.
- [26] ADEBAYO I, MATAR O. Droplet impact on flowing liquid films with inlet forcing: the splashing regime[J]. Soft Matter, 2017, 13(41): 7473 – 7485.
- [27] 梁刚涛, 郭亚丽, 沈胜强. 液滴撞击液膜的射流与水花形成机理分析[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 27 – 30.
- LIANG Gangtao, GUO Yali, SHEN Shengqiang. Analysis of liquid sheet and jet flow mechanism after droplet impinging onto liquid film[J]. Acta Physical Sinica, 2013, 62(2): 27 – 30. (in Chinese)
- [28] HONG W, WANG Y B. A coupled level set and volume-of-fluid simulation for heat transfer of the double droplet impact on a spherical liquid film[J]. Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals, 2017, 71(4): 359 – 371.
- [29] GAO X, LI R. Impact of a single drop on a flowing liquid film[J]. Physical Review E, 2015, 92(5): 053005.
- [30] WASTON E J. The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20(3): 481 – 499.
- [31] AZUMA T, HOSHINO T. The radial flow of a thin liquid film; 2nd report, liquid film thickness[J]. Bulletin of JSME, 1984, 27(234): 2763 – 2770.
- [32] AZUMA T, HOSHINO T. The radial flow of a thin liquid film; 3rd report, velocity profile[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 1984, 27(234): 2755 – 2762.
- [33] YARIN A L, WEISS D A. Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 283(1): 141 – 173.
- [34] LI J X, ZHANG H, LIU Q F. Characteristics of secondary droplets produced by a single drop impacting on a static liquid film [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 119: 42 – 55.
- [35] ROISMAN I V, TROPEA C. Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 472: 373 – 397.
- [36] LIU C, SHEN M, WU J. Investigation of a single droplet impact onto a liquid film with given horizontal velocity[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2018, 67: 269 – 279.
- [37] MARIE J, THORAVALL M, KOHSEI T, et al. Von Karman vortex street within an impacting drop[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(26): 1 – 5.
- [38] SHETABIVASH H, OMMI F, HEIDARINEJAD G. Numerical analysis of droplet impact onto liquid film[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(1): 179 – 200.
- [39] THORODDSEN S T, SAKAKIBARA J. Evolution of the fingering pattern of an impacting drop[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(6): 1359 – 1374.