

液滴冲击作用下的微塑料颗粒飞溅机制

钱尚拓¹, 胡 可¹, 叶 涵^{2,3}, 苑 敏⁴, 曾 琴², 董姝楠¹, 冯建刚¹, 徐 辉¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 宁波市奉化区水利局农村水利管理中心;
4. 威海市水利事务服务中心)

摘要:为揭示降雨对微塑料污染扩散的潜在作用机理,开展了液滴冲击微塑料颗粒层试验,利用高速摄影捕捉液滴冲击微塑料颗粒层后的流态,建立了流态分区图用以确定各流态之间的阈值,并分析了特征参数对液滴冲击后流态的影响。结果表明:液滴冲击微塑料颗粒层后的流态包括弹跳、铺展、冠状飞溅和快速飞溅;增大液滴雷诺数 Re_0 、韦伯数 We_0 、微塑料颗粒相对尺寸 D^* 或颗粒层相对厚度 h^* 能够促使流态从弹跳向铺展再向冠状或快速飞溅转变;基于 Buckingham π 定理提出了无量纲数 $M=D^*h^*We_0Re_0^{-2/5}$ 用于识别各流态之间的阈值;液滴冲击对微塑料颗粒飞溅的作用机制包括前向碰撞和黏性携带,前者在各流态均存在,后者存在于弹跳、冠状和快速飞溅流态,相较于黏性携带,前向碰撞驱动更容易导致微塑料颗粒大范围传播。

关键词:降雨;微塑料污染;液滴冲击;飞溅机制;流态;高速摄影

Splashing mechanism of microplastic particles under drop impact//Qian Shangtu¹, Hu Ke¹, Ye Han^{2,3}, Yuan Min⁴, Zeng Qin², Dong Shunan¹, Feng Jiangang¹, Xu Hui¹(1. College of Agriculture Science and Engineering, Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Rural Water Conservancy Management Center, Fenghua District Water Resources Bureau, Ningbo City; 4. Weihai Water Conservancy Affairs Service Center)

Abstract: To reveal the potential mechanism of rainfall on the diffusion of microplastic pollution, a drop impact experiment was conducted on the microplastic particle layer. High-speed photography was used to capture the flow regime after drop impact on the microplastic particle layer, and a flow zone map was established to determine the threshold between each flow regime. The influence of characteristic parameters on the flow regime after drop impact was also analyzed. The results indicate that the flow regime of drops after impacting the layer of microplastic particles includes bouncing, spreading, coronal splashing, and prompt splashing. Increasing the Reynolds number Re_0 , Weber number We_0 , relative size D^* of microplastic particles, or relative thickness h^* of particle layers can promote the transition of the flow regime from bouncing to spreading and then to coronal splashing or prompt splashing. A dimensionless number $M=D^*h^*We_0Re_0^{-2/5}$ is proposed based on Buckingham π theorem for identifying the threshold between different flow regimes. The mechanism of drop impact on the splashing of microplastic particles includes forward collision and viscous carrying. The former exists in all flow states, while the latter exists in bouncing, coronal, and prompt splashing flow states. Compared with viscous carrying, forward collision driving is more likely to cause large-scale propagation of microplastic particles.

Key words: rainfall; microplastic pollution; drop impact; splashing mechanism; flow regime; high-speed photography

微塑料是指粒径小于 5 mm 的塑料碎片和颗粒,具有尺寸微小、化学性质稳定等特性,在日常生活和自然环境中广泛存在^[1-2]。微塑料在风、降雨、地表径流等外力作用下能够在水体、土壤、空气中远距离传播^[3-6]。已有研究表明,降雨时的液滴冲击是造成微塑料大范围传播的潜在因素,如 Rehm 等^[7]通过降雨模拟试验发现雨滴能够促进微塑料颗粒的输

运,且相较于矿物颗粒,微塑料颗粒更容易被运输;Zhang 等^[8]通过降雨模拟试验发现土壤中粒径小于 0.1 mm 的微塑料颗粒更容易在雨滴冲击作用下发生溅射;Yu 等^[9]的研究表明雨滴冲击产生的飞溅能够携带滞留在土壤中的微塑料颗粒至大气中,并通过地表径流将微塑料输运至水体;Lehmann 等^[10]通过数值模拟研究发现雨滴冲击海面后产生的飞溅液

基金项目:国家自然科学基金项目(52279063);江苏省自然科学基金项目(BK20231462);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201055)

作者简介:钱尚拓(1988—),男,副教授,博士,主要从事工程水力学理论与应用研究。E-mail:qshttc@163.com
通信作者:叶涵(1999—),男,助理工程师,硕士,主要从事工程水力学理论与应用研究。E-mail:hanyehhu@163.com

滴能够将表层海水中的微塑料携带至大气中,加剧海洋微塑料的输运扩散;褚裕良等^[11]提出小粒径微塑料能够反映微塑料碎片化程度,并且在水环境污染的严重程度较高时,水生生物的摄食概率会增加,进而导致微塑料在食物链中传递,破坏生态系统;孙梦瑶等^[12]研究发现微塑料颗粒可通过多种驱动方式进入空气及水体,并通过皮肤接触、消化道摄入等方式进入人体,对各器官或组织造成潜在损害。因此,了解降雨时液滴冲击作用下微塑料扩散的机制对科学评估微塑料传播范围及风险具有重要意义。

鉴于此,本文通过试验对液滴冲击微塑料颗粒层后的流态及微塑料颗粒飞溅的作用机制进行研究,利用高速摄影捕捉液滴冲击微塑料颗粒层后的流态,建立流态分区图用以确定各个流态之间的阈值,并分析特征参数对液滴冲击后行为的影响,旨在为评估和控制降雨等液滴冲击导致的微塑料污染传播的风险提供理论依据。

1 理论基础

液滴冲击微塑料颗粒过程中,不同流态下颗粒飞溅的形式、强度与扩散特征均存在明显差异,因此液滴流态是影响微塑料颗粒飞溅过程的关键因素。液滴流态主要受液滴性质(密度 ρ_l 、黏度 μ_l 、表面张力 σ_l)、冲击特性(冲击速度 u_0 和液滴直径 D_0)和接触表面性质的影响^[13-18]。液滴性质和冲击特性可用无量纲特征参数韦伯数(We_0)和雷诺数(Re_0)表示^[19],韦伯数可反映冲击液滴惯性力与表面张力的相对大小,可用于判断液滴冲击后是否发生破碎与飞溅;雷诺数可反映惯性力与粘黏性力的相对大小,决定了液滴流动的黏性耗散强度与稳定性特征。对于固体接触表面,液滴冲击后的流态还受固体表面粗糙度和润湿性的影响^[20-22]。当液滴冲击颗粒介质时,颗粒的相对密度(ρ^*)、相对直径(D^*)和堆积系数(φ)是影响液滴行为的主要特征参数^[23]。 ρ^* 和 D^* 分别反映了液滴与颗粒的尺寸相对大小和密度相对大小, φ 反映了颗粒堆积的松散程度。

对于固体表面,Mundo等^[24]将液滴冲击后的流态分为飞溅和不飞溅两种情况,建立了固体表面上的飞溅预测模型,提出了无量纲数 $K = We_0^{1/2} Re_0^{1/4}$,当 $K > 57.7$ 时,液滴冲击后会发生飞溅。Riboux等^[25]认为飞溅由液膜边缘与固体表面之间形成的气体升力 F_g 与表面张力之间的相对大小决定,建立了固体表面飞溅预测模型,提出无量纲数 $\beta = (F_g/\sigma_l)^{0.5}$,当 $\beta > 0.14$ 时,液滴冲击后会发生飞溅。Rioboo等^[26]进一步将飞溅分为冠状飞溅和快速飞溅,不飞溅流态分为沉积、铺展和破碎。Yarin^[27]在液滴冲

击固体表面时观察到了铺展、部分弹跳和完全弹跳等流态。对于颗粒介质,Zhao等^[28]在液滴以较低动能冲击颗粒介质时,观察到了铺展和弹跳流态;在液滴以较大动能冲击颗粒介质时,观察到了冠状飞溅流态。Marston等^[29]在液滴冲击高堆积系数的颗粒介质时,观察到了铺展、弹跳和冠状飞溅流态;在低堆积系数下观察到了颗粒喷射。Nefzaoui等^[30]将液滴冲击颗粒介质后的流态分为了飞溅和不飞溅两种情况,当 $K > 120$ 时,液滴冲击后会产生飞溅,且颗粒介质上的飞溅阈值高于固体表面上的飞溅阈值。Qian等^[31]将液滴冲击颗粒介质后的流态划分为直接渗透、铺展、快速飞溅和冠状飞溅,并提出用参数 $Oh_0^{-0.5} D^*$ 描述各个流态间阈值,其中 $Oh_0 = We_0^{1/2}/Re_0$,为液滴的奥内佐格数,反映黏性力与惯性力、表面张力之间的相对关系。

液滴冲击颗粒介质后的飞溅可造成微塑料远距离传播。Zhan等^[32]研究了液滴冲击固体表面时产生的飞溅液滴尺寸分布,发现飞溅液滴的尺寸可用对数正态分布描述。Qian等^[33]研究了连续液滴冲击固体表面时产生的飞溅液滴特性,通过统计方法得到飞溅液滴的速度和尺寸均可用对数正态分布描述,飞溅角度也可用正态分布描述。Zeng等^[34]通过试验发现飞溅液滴的尺寸与速度总体上呈负相关关系,液滴尺寸越小,速度分布范围越宽、最大速度值越大;飞溅液滴的尺寸和飞溅角度总体上呈负相关关系,液滴尺寸越小,飞溅角度的分布范围越广、最大飞溅角度越大。Long等^[35]研究了液滴冲击颗粒介质导致的颗粒飞溅,发现颗粒的运动轨迹可用三次函数进行描述。Qian等^[31]通过试验发现了颗粒介质有前向碰撞和挤压碰撞两种颗粒喷射机制,其中前向碰撞产生的喷射颗粒具有更大的飞溅速度和飞溅角度;喷射颗粒的速度可用对数正态分布描述,且喷射颗粒的速度、尺寸分别大于和小于携带颗粒的飞溅液滴的速度、尺寸。

2 试验设计

本文设计了液滴冲击微塑料颗粒层试验,图1为试验装置示意图。试验液体为蒸馏水, $\rho_l = 998 \text{ kg/m}^3$, $\mu_l = 0.89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\sigma_l = 72 \text{ mN/m}$ 。采用注射器抽取50 mL蒸馏水,将其置于针筒注射泵(SPM/1 * ZU-I,度科)中。一个平头针通过橡胶管连接至针筒注射泵,并固定在可自由调节高度的升降台上。针头末端在针筒注射泵的作用下产生毫米直径的液滴。液滴在重力作用下垂直下落至容器内的微塑料颗粒层上。试验采用3种不同尺寸的针头,产生的液滴直径范围为2.7~4.5 mm。通过调节

针头末端与微塑料颗粒层表面的冲击高度来控制液滴的冲击速度,冲击高度(H)的范围为 5~150 cm,冲击速度的范围为 1.05~5.20 m/s。根据 Serio 等^[36-37]的研究,试验所选用的液滴直径和冲击速度能够代表真实雨滴的典型尺寸和降落速度,并且通过对比能够反映这些参数的具体影响。所有试验在室温环境下进行。

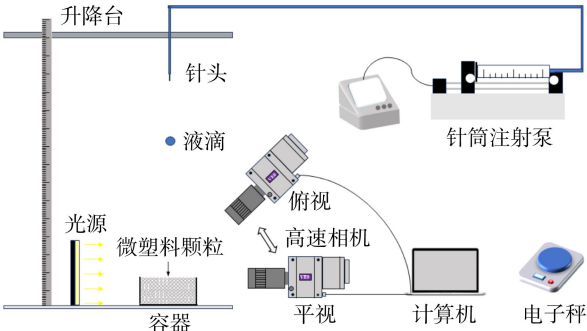


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

试验采用 3 种不同材质的微塑料颗粒,包括聚乙烯(PE)、聚酰胺(PA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),颗粒密度(ρ_p)分别为 0.9、1.1、1.3 g/cm³。其中,PA 选用了 3 种不同的颗粒粒径(D_p),分别为 20、30、50 μm ,PE 和 PET 的颗粒粒径为 20 μm 。密度信息由中国石油化工有限公司(广州分公司)提供。Tian 等^[38-40]的采样和分析结果表明,农田土壤、空气、地表淡水、地下水中的微塑料种类主要为 PE、PA、PET、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)等,粒径范围为 0.02~5 mm,表明本文选取的微塑料种类和颗粒粒径具有较好的环境代表性。将微塑料颗粒装入圆柱容器中以制备微塑料颗粒层。在自然堆积铺满后,采用载玻片轻刮表面,以确保微塑料颗粒层的表面平整且均匀。制备了 3 种不同厚度的微塑料颗粒层,厚度(T_p)分别为 1、3、5 mm。3 种微塑料颗粒的雷诺数范围均为 3 185~26 292,韦伯数范围均为 41~1 690。试验液滴直径为 2.7~4.5 mm,每种工况均进行 3 次重复试验,以排除偶然性对试验的

干扰。

液滴冲击微塑料颗粒层的过程通过安装显微镜头(atx-i 100 mm F/2.8, Nikon)的高速相机(Phantom v211, Vision Research)拍摄。将 LED 灯(SP-E-360D SpectroLED, Genaray)置于高速相机正前方作为光源。采用正拍和俯拍两种方式,详细记录液滴冲击微塑料颗粒层后的流态。正拍用以观察液滴冲击后的流态和微塑料颗粒作用机制,俯拍用于观察液膜在微塑料颗粒层上的铺展及收缩。图像采集帧率为 2 200 帧/s。在重力作用下,液滴近似为球形,采用 $D_0 = (D_x^2 D_y)^{1/3}$ 计算液滴的初始直径,其中 D_x 为液滴水平方向直径, D_y 为液滴竖直方向直径^[41]。以液滴冲击颗粒层前一帧的速度作为冲击速度 u_0 ,可根据两帧之间的时间间隔以及“TrackMate”插件测量前后两帧液滴的位置坐标进行计算^[42]。根据 Okawa 等^[43]的研究,利用二维平面测得的液滴直径和冲击速度与真实值之间的误差分别为 4%和 2%。通过精准调焦,液滴始终位于高速相机的对焦平面,液滴直径和冲击速度从三维空间投影到二维平面进行测量的误差可以忽略不计。

3 试验结果与分析

3.1 液滴流态及微塑料颗粒作用机制

液滴冲击微塑料颗粒层后的流态有 4 种:弹跳、铺展、冠状飞溅和快速飞溅。图 2 为弹跳流态的典型快照。液滴与颗粒层表面接触后,会受到颗粒层表面的反作用力而发生形变,整个液滴被压缩成扁平状的液膜。随着液滴与颗粒表面接触时间增加,液膜会逐渐收缩并脱离颗粒表面,竖直向上运动呈现为弹跳。随后,液滴会在重力作用下落回至微塑料颗粒层表面,形成液滴-颗粒混合物。此时,液滴-颗粒混合物基本滞留于颗粒层之上,形成一个中心略微凹陷且深度较浅的平坑。在整个弹跳流态中,液膜始终保持结构完整,且液膜表面未观测到明显破裂。一方面,液滴的冲击动能较小,加之微塑料

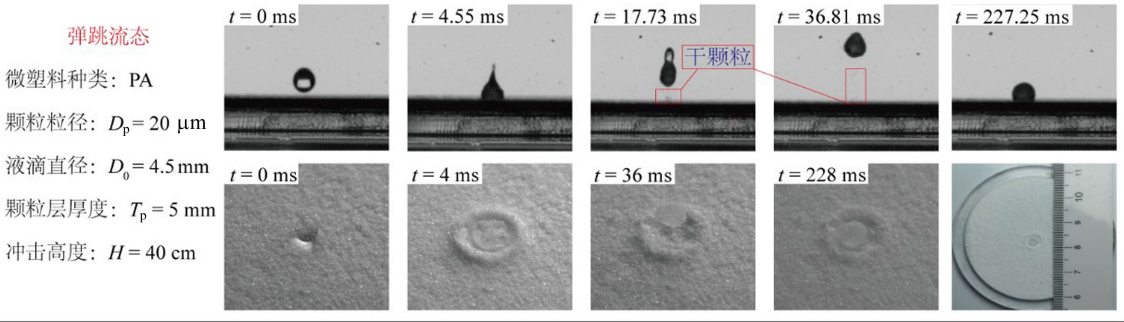


图 2 弹跳流态的典型快照

Fig. 2 Typical snapshots of bouncing regime

颗粒层表面具有疏水性,液滴难以通过颗粒层之间的孔隙渗透至颗粒层内部^[44],从而在颗粒层表面形成一个扁平的液膜;另一方面,较小的冲击动能使得液膜径向铺展的动能不足以克服表面张力,在表面张力作用下,液膜收缩为球状,并克服自身重力向上发生弹跳。在弹跳流态中,液滴与微塑料颗粒层的相互作用会导致大量的微塑料颗粒喷射。微塑料颗粒的喷射存在两种作用机制:前向碰撞和黏性携带。在前向碰撞作用中,液膜前端的颗粒将动能传递给微塑料颗粒层表面上的颗粒。颗粒层表面上的颗粒在获得动能后沿着斜上方运动,形成喷射。这种作用机制是液滴冲击微塑料颗粒层后颗粒传播的主要方式。在黏性携带作用中,由于液体的黏性,液滴发生弹跳时会携带部分颗粒层表面的颗粒一起向上运动。随后,在颗粒重力作用下,颗粒会与液滴发生分离,并落回至颗粒层表面。这种作用机制产生的喷射颗粒主要形成于液滴冲击中心附近,不会造成远距离传播。

图3为铺展流态的典型快照。铺展流态通常发生于液滴冲击动能较低的情形下。液滴在与颗粒层的碰撞挤压过程中会形成一层薄液膜并迅速沿着径向向外铺展。当液膜前端颗粒的动能传递给微塑料颗粒层表面上的颗粒,并被液膜与颗粒层之间的摩擦力、液膜内部的表面张力和黏滞力所消耗殆尽时,液膜达到最大铺展直径。随后,表面张力开始发挥

主导作用,拉动液膜边缘向内回缩,最后在颗粒层表面形成一个薄饼状的液滴-颗粒混合物。薄饼状液滴-颗粒混合物部分位于颗粒层之上,部分会渗入至颗粒层之中,形成一个具有中等深度的凹凸坑。与弹跳流态类似,铺展流态中的液膜同样能够保持结构完整,液膜表面未观测到明显破裂。铺展流态中,微塑料颗粒主要通过前向碰撞作用产生喷射。由于液滴的冲击动能较大,传递给颗粒的动能也相应较大。因此,相较于弹跳流态,铺展流态下的颗粒喷射更加剧烈,能够造成更大范围的微塑料颗粒传播。

图4为冠状飞溅流态的典型快照。随着液滴冲击动能进一步增加,液滴冲击后的流态会逐渐从铺展流态转向为冠状飞溅流态。在冠状飞溅流态中,液膜边缘会逐渐抬升。由于表面张力无法维持液膜边缘稳定性,整个边缘会发生破裂并形成手指状凸起,类似于皇冠状。随着时间推移,手指状凸起逐渐演变为细丝状,在表面张力和重力的作用下脱离液膜边缘,形成裹挟微塑料颗粒的二次液滴。随后,整个冠状结构会塌陷,液膜逐渐收缩形成薄饼状的液滴-颗粒混合物。液滴-颗粒混合物的周围会形成一个更深、更大的凹凸坑。与弹跳、铺展流态明显不同的是,冠状飞溅流态中的冲击液滴能够穿透微塑料颗粒层并触碰到容器底部,并在铺展过程中液膜边缘失稳破裂形成大尺寸的二次液滴。冠状飞溅中微塑料颗粒的作用机制包括前向碰撞和黏性携带。其

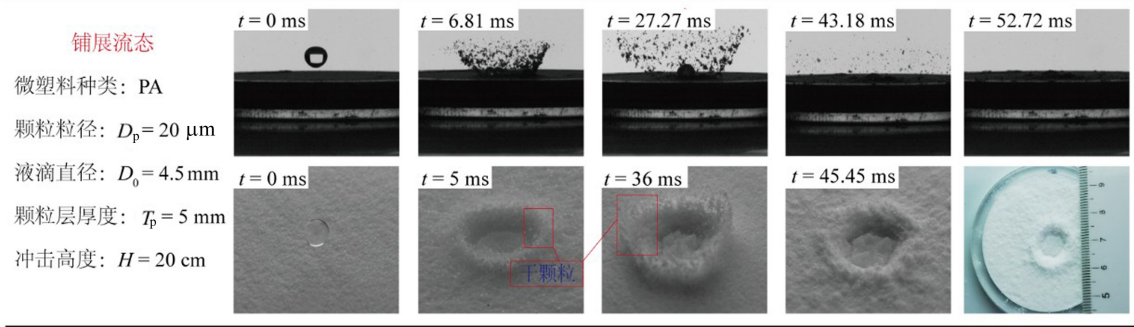


图3 铺展流态的典型快照

Fig. 3 Typical snapshots of spreading regime

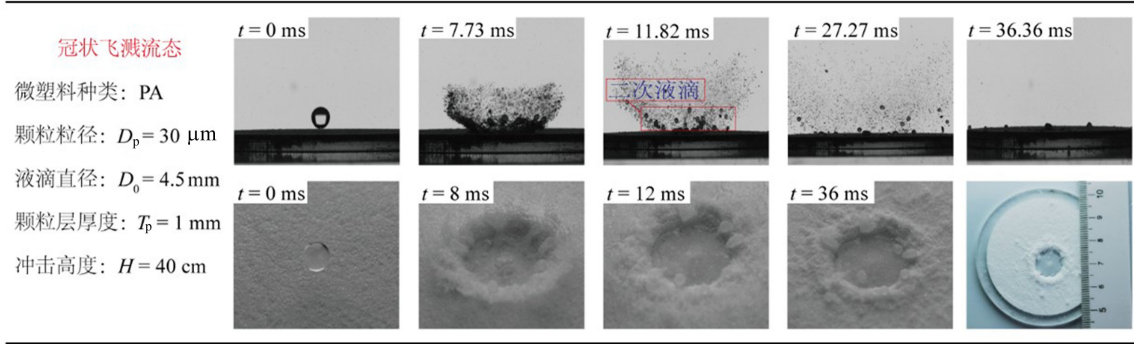


图4 冠状飞溅流态的典型快照

Fig. 4 Typical snapshots of crown splashing regime

中,黏性携带主要通过二次液滴的黏性作用产生。相较于喷射颗粒,冠状飞溅流态中产生的裹挟微塑料颗粒的二次液滴具有更大的尺寸、更低的速度以及更小的传播范围^[45]。虽然二次液滴的传播范围较小,但较大的尺寸意味着液滴中包含着更多的微塑料颗粒^[46]。因此,这类裹挟微塑料颗粒的二次液滴飞溅同样值得关注。

图 5 为快速飞溅流态的典型快照。快速飞溅流态主要发生在液滴冲击较厚微塑料颗粒层的情况。在快速飞溅流态中,液膜在铺展过程中边缘不会产生手指状的凸起以及皇冠状结构,而是直接以较快的速度发生破裂,向外飞溅出裹挟微塑料颗粒的二次液滴。相较于冠状飞溅,快速飞溅流态下产生的二次液滴速度更快、尺寸更小,可以传播至更远的距离,但携带的微塑料颗粒更少。快速飞溅中微塑料颗粒的作用机制也包括前向碰撞和黏性携带两种。液膜在达到最大铺展直径后会发生收缩,形成半球形的液体-颗粒混合物。液体-颗粒混合物会完全没入颗粒层表面中,形成一个沉坑。相较于弹跳流态中的平坑、铺展和冠状飞溅流态中的凹凸坑,快速飞溅流态下形成的沉坑深度更大。

弹跳和铺展流态中的液滴冲击动能较低,使得前向碰撞的作用机制产生的微塑料颗粒飞溅距离较小且数量较少,因此造成微塑料大范围传播的风险较低。随着液滴冲击动能增大,冠状飞溅和快速飞溅流态中的前向碰撞作用机制产生的微塑料颗粒的飞溅距离逐渐增大,且飞溅数量明显增多,对应于较大的传播范围和较高的传播风险。此外,冠状飞溅和快速飞溅流态中产生的裹挟颗粒的二次液滴,由于自身较大的重力,不会造成微塑料远距离传播;但由于较大体积,二次液滴内可能携带大量微塑料颗粒,在近距离范围内造成微塑料污染。弹跳流态中,冲击液滴黏性携带形成的微塑料颗粒大多聚集在冲击中心附近,不会造成微塑料远距离传播。冠状飞溅和快速飞溅流态中,由二次液滴黏性携带形成的

微塑料颗粒重力和尺寸较小,会随着气流在空气中运动,造成远距离的微塑料污染。

3.2 液滴和微塑料颗粒特性参数对流态的影响

为分析液滴和微塑料颗粒的特征参数对冲击后流态的影响,建立特征参数与 K 之间的关系,如图 6 所示。特征参数包括无量纲颗粒密度 $\rho^* = \rho_p / \rho_0$ 、无量纲颗粒相对尺寸 $D^* = D_p / D_0$ 、雷诺数、韦伯数、无量纲颗粒层厚度 $h^* = T_p / H$; $K = We_0^{1/2} Re_0^{1/4}$; $L_1 \sim L_9$ 代表流态之间转变的阈值,其中 L_1 、 L_2 分别为弹跳、铺展、飞溅流态间的临界 K 值, $L_3 \sim L_9$ 为流态间不同特征参数临界值。由图 6(a) 可见, K 增大会导致流态从弹跳向铺展再向冠状飞溅或快速飞溅转变。当 K 是确定的, ρ^* 的变化对流态影响有限,表明流态对微塑料颗粒的无量纲密度无依赖性。由图 6(b) 可见,当 $0.004 < D^* \leq 0.012$ 时, K 增大会导致流态从弹跳向铺展再向冠状飞溅或快速飞溅转变;当 $D^* > 0.012$ 时, K 增大会导致流态从弹跳向铺展再向快速飞溅转变。一方面,随着 K 增大,液滴的冲击动能也随之增大,形成的液膜有足够的动能克服液体表面张力和黏滞力,从而形成铺展,甚至产生飞溅;另一方面, D^* 较大时仅产生快速飞溅流态可被解释为:颗粒层表面的粗糙度可以用颗粒粒径衡量,较大的颗粒粒径对应较大的粗糙度^[47];液膜沿径向铺展时,液膜边缘更容易被较大尺寸颗粒所形成的孔隙阻碍,不利于指状凸起及冠状结构的形成,从而抑制了冠状飞溅流态的发生。由图 6(c)(d) 可见,当 $Re_0 \leq 8100$ 或 $We_0 \leq 238$ 时,液滴冲击颗粒层后的流态为弹跳或铺展。随着 Re_0 或 We_0 增大,当 $Re_0 > 8100$ 或 $We_0 > 238$ 时,流态会逐渐从弹跳或铺展向冠状飞溅与快速飞溅转变。可见, Re_0 和 We_0 对流态的相似影响是可以预测的。本试验中使用的液体为蒸馏水,其密度、黏度和表面张力均未发生变化,因此 Re_0 或 We_0 的增大均可归结为冲击动能的增加。由图 6(e) 可见,当 $81 < K \leq 144$ 时,随着 K 增大,液滴冲击颗粒层后的流态逐渐从弹跳转向为铺

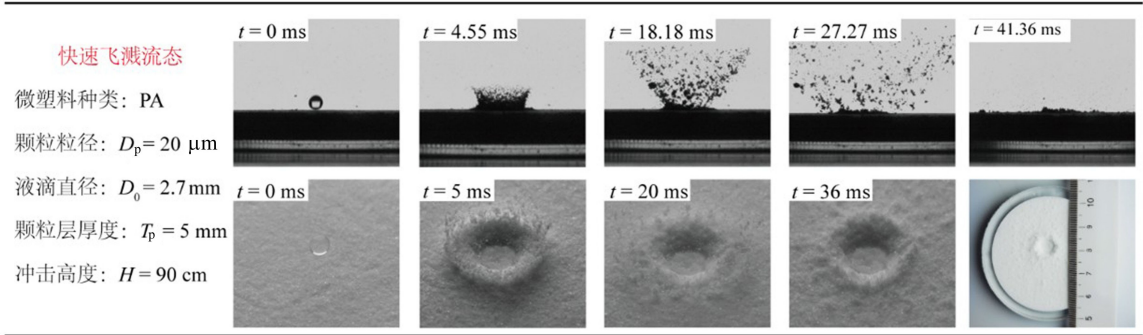


图 5 快速飞溅流态的典型快照

Fig. 5 Typical snapshots of prompt splashing regime

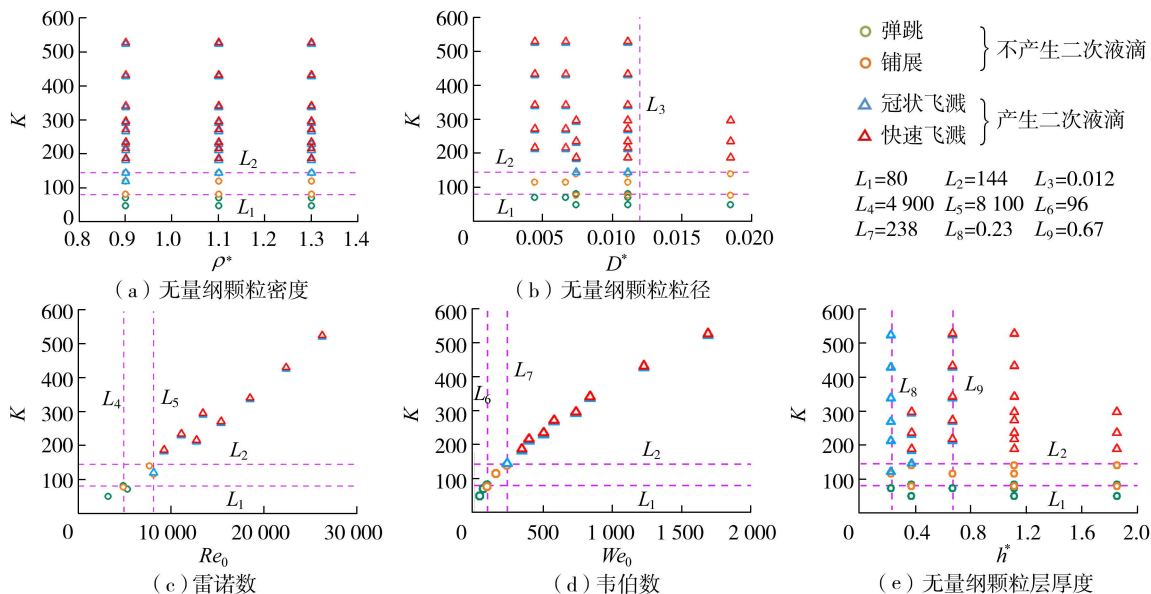


图 6 特征参数对流态的影响分析结果

Fig. 6 Analysis results of impact of feature parameters on flow regime

展, h^* 变化对流态转变的影响有限。随着 K 进一步增大, 当 $K > 144$ 时, 流态会由铺展转变为冠状飞溅或快速飞溅, 当 $h^* < 0.23$ 时主要向冠状飞溅流态转变, 当 $h^* > 0.67$ 时主要向快速飞溅流态转变, 当 $0.23 \leq h^* \leq 0.67$ 时处于过渡状态, 可能向冠状或快速飞溅流态转变。 h^* 对冠状飞溅和快速飞溅流态的影响可被解释为: 在微塑料颗粒层厚度较大时液滴无法穿透颗粒层; 液膜铺展渗过过程和冲击坑形成过程会耗散大量冲击动能^[48], 导致铺展液膜的惯性驱动不足, 无法形成冠状射流, 从而抑制液滴破碎而产生大尺寸二次液滴。当颗粒层厚度较低时, 液滴可以穿透颗粒层并直接作用于容器底部, 形成的液膜下表面与容器表面直接接触, 并径向铺展; 铺展过程中, 液膜边缘推动挤压微塑料颗粒, 最终液膜边缘失稳破裂, 形成大尺寸的二次液滴。

3.3 液滴冲击微塑料颗粒层后流态的阈值

除无量纲颗粒密度外, 液滴和微塑料颗粒的其他特征参数对液滴冲击后的流态均具有显著影响, 但单一的特征参数难以表征各流态之间的阈值。为了进一步得到各流态之间的阈值, 根据 Buckingham π 定理^[49], 提出一个新的无量纲数 $M = D^* h^* \times (We_0 Re_0^{-2/5})$, 其中 D^* 、 h^* 用于反映颗粒粒径、颗粒层厚度与液滴尺寸的相对大小, $We_0 Re_0^{-2/5}$ 用于反映液滴冲击动能与液膜铺展动能之间的能量和动量转换^[50-51], 因此 M 能够综合反映颗粒层对液滴动能的响应能力。图 7 为 $K-M$ 平面上液滴冲击微塑料颗粒层的流态分区和阈值。由图 7 可见, 当 $K \leq 80$ 时 (浅黄色区域), 液滴冲击微塑料颗粒层后呈弹跳流态; 当 $80 < K \leq 144$ 时 (浅蓝色区域), 液滴冲击微塑

料颗粒层呈铺展流态; 对于 $K > 144$, 当 $K \geq 5700M + 45$ 时 (灰色区域), 发生的流态为冠状飞溅, 当 $K < 5700M + 45$ 时 (绿色区域), 发生的流态为快速飞溅。

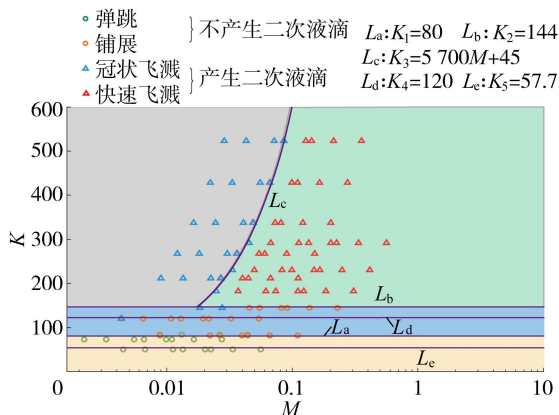


图 7 $K-M$ 平面上液滴冲击微塑料颗粒层的流态分区和阈值

Fig. 7 Flow regime partitioning and threshold of droplet impact on microplastic particle layer on $K-M$ plane

图 7 中还给出了 Nefzaoui 等^[30] 提出的颗粒介质表面上的液滴飞溅阈值 $K_4 = 120 (L_d)$ 以及 Mundo 等^[24] 提出的固体表面上的飞溅阈值 $K_5 = 57.7 (L_e)$ 进行对比。结果发现, 液滴飞溅流态 (包括冠状飞溅和快速飞溅) 与铺展流态之间的阈值 $K_2 = 144$ 非常接近于颗粒介质表面上的飞溅阈值 K_4 , 并且显著高于液滴在固体表面上的阈值 K_5 。上述分析表明, 相对于固体表面, 颗粒层表面上所需的飞溅阈值更高。一方面, Riboux 等^[25, 52] 认为液滴冲击表面后的飞溅是由液膜边缘与接触表面之间形成的楔形空间内的垂直空气升力导致的; 当空气升力足以克服液膜边缘的表面张力时, 便会使液膜边缘脱离, 形成飞

溅;微塑料颗粒层的表面会形成孔隙,根据 Qian 等^[31,53]的研究,这种孔隙会抑制楔形结构的形成,从而抑制液滴的飞溅,提高飞溅的阈值。另一方面,颗粒表面产生的粗糙度使液膜薄层在铺展过程中受到了更多阻碍,耗散大量液膜铺展的动能^[54-55]。此外,液膜在铺展过程中会与微塑料颗粒发生碰撞,从而消耗掉一部分的铺展动能,使得飞溅所需的 K 值进一步提高。对比球形玻璃珠堆积成的颗粒层上的液滴飞溅阈值 K_4 ^[56-57],液滴冲击微塑料颗粒层上具有略高的液滴飞溅阈值 K_2 ,表明在微塑料颗粒层上,液滴需要更大的冲击动能才能产生飞溅液滴并携带微塑料颗粒传播。另外,由于微塑料具有疏水性,微塑料颗粒不易被液体润湿,颗粒间的毛细黏结力更低,加之微塑料密度低,惯性更小,导致微塑料颗粒除通过飞溅液滴黏性携带传播,还可通过弹跳中的黏性携带作用机制、铺展中的前向碰撞作用机制进行传播。因此,对于微塑料颗粒层达到液滴飞溅阈值前,即在弹跳和铺展流态仍能够产生大量的喷射微塑料颗粒。可见,若根据前人建立的液滴冲击颗粒介质的飞溅阈值模型预测降雨雨滴冲击驱动微塑料扩散,将会导致微塑料污染扩散的发生条件和通量的预测发现显著偏差。需进一步通过定量测量不同冲击条件下微塑料颗粒的传播距离,来确定微塑料颗粒的实际传播范围和风险。

4 结 论

- a. 基于对液滴冲击微塑料颗粒的现有理论研究,设计了液滴冲击微塑料颗粒层试验,利用高速摄影捕捉液滴冲击微塑料颗粒层后的流态,发现液滴冲击微塑料颗粒层后有 4 种流态:弹跳、铺展、冠状飞溅和快速飞溅。
- b. 液滴和微塑料颗粒的特征参数对流态的影响分析表明,当 $Re_0 \leq 8\ 100$ 或 $We_0 \leq 238$ 时,液滴冲击颗粒层后的流态为弹跳或铺展;随着 Re_0 或 We_0 增大,当 $Re_0 > 8\ 100$ 或 $We_0 > 238$ 时,流态会逐渐从弹跳或铺展向冠状飞溅与快速飞溅转变;当 $0.004 < D^* \leq 0.012$ 时,增大 K 会导致流态从弹跳向铺展再向冠状飞溅或快速飞溅转变;当 $D^* > 0.012$ 时,增大 K 会导致流态从弹跳向铺展再向快速飞溅转变;当 $K > 144$ 且 $h^* < 0.23$ 时,流态主要向冠状飞溅转变;当 $K > 144$ 且 $h^* > 0.67$ 时,流态主要向快速飞溅转变。
- c. 结合 Buckingham π 定理提出了无量纲数 $M = D^* h^* (We_0 Re_0^{-2/5})$,在 K - M 平面上建立了流态分区图并得到流态临界方程:当 $K < 80$ 时发生弹跳流态;当 $80 < K < 144$ 时发生铺展流态;对于 $K > 144$ 的

- 情况,流态由 K 与 $(5\ 700M + 45)$ 的相对大小决定, $K > 5\ 700M + 45$ 流态为冠状飞溅, $K < 5\ 700M + 45$ 流态为快速飞溅。微塑料颗粒表面的飞溅阈值高于固体平面。
- d. 液滴冲击微塑料颗粒的作用机制包括前向碰撞和黏性携带。相较于黏性携带,大尺寸液滴冲击较厚微塑料颗粒层下的前向碰撞驱动,有能力驱动微塑料颗粒更大范围的传播,意味着更大的微塑料污染扩散的风险。
- 参考文献:
- [1] Cole M, Lindeque P, Halsband C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62 (12) : 2588-2597.
- [2] 孙昊,陈求稳,丁珏,等. 基于 EFDC 模型的太湖微塑料迁移规律及污染概率分布模拟 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6) : 169-177. (Sun Hao, Chen Qiuwen, Ding Jue, et al. Simulation of microplastic migration regularity and pollution probability distribution in Taihu Lake based on EFDC model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6) : 169-177. (in Chinese))
- [3] Zhang Jiajia, Ding Wencheng, Zou Guoyuan, et al. Urban pipeline rainwater runoff is an important pathway for land-based microplastics transport to inland surface water: a case study in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2023, 861 : 160619.
- [4] Severe E, Surridge B W J, Fiener P, et al. The transport of microplastics from soil in response to surface runoff and splash erosion [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59 (27) : 14063-14074.
- [5] 苏磊. 微塑料在内陆至河口多环境介质中的污染特征及其迁移规律 [D]. 上海:华东师范大学, 2020.
- [6] 包旭辉,闫振华,陆光华. 我国淡水中微塑料的污染现状及生物效应研究 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (6) : 115-123. (Bao Xuhui, Yan Zhenhua, Lu Guanghua. Study on pollution status and biological effect of microplastics in fresh water of China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6) : 115-123. (in Chinese))
- [7] Rehm R, Zeyer T, Schmidt A, et al. Soil erosion as transport pathway of microplastic from agriculture soils to aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795 : 148774.
- [8] Zhang Xiaoting, Chen Yingxin, Li Xinyu, et al. Size/shape-dependent migration of microplastics in agricultural soil under simulative and natural rainfall [J]. Science of the Total Environment, 2022, 815 : 152507.
- [9] Yu Hui, Zhang Weiqing, Zheng Lixia, et al. A review of the migration mechanisms of microplastics in terrestrial environments [J]. Environmental Engineering Research,

- 2024,29(5):230734.
- [10] Lehmann M, Oehlschl gel L M, H usl F P, et al. Ejection of marine microplastics by raindrops; a computational and experimental study [J]. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, 1(1): 18.
- [11] 诸裕良, 张鹏, 沈晓腾. 南京城市水体中微塑料的赋存特性及其影响因素 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(4): 236-243. (Zhu Yuliang, Zhang Peng, Shen Xiaoteng. Occurrence characteristics and influencing factors of microplastics in urban water bodies of Nanjing [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4): 236-243. (in Chinese))
- [12] 孙梦瑶, 郭家阳, 王欣奕, 等. 微塑料来源、分布及其对植物、动物和人体危害研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(8): 2301-2312. (Sun Mengyao, Guo Jiayang, Wang Xinyi, et al. Sources and distributions of microplastics and the hazards to plants, animals and human health; a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8): 2301-2312. (in Chinese))
- [13] 秦梦晓, 张旭辉, 汤成龙. 液滴撞击不同粗糙度固体表面动力学行为实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(9): 26-31. (Qin Mengxiao, Zhang Xuhui, Tang Chenglong. Experimental study on the droplet impact on solid surface with different roughness [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(9): 26-31. (in Chinese))
- [14] 王桥, 赵献礼, 刘森云, 等. 粗糙度对水滴飞溅特性的影响规律研究 [J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(1): 147-152. (Wang Qiao, Zhao Xianli, Liu Senyun, et al. Effects of roughness on splashing characteristics of water droplet [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2019, 37(1): 147-152. (in Chinese))
- [15] Wang Qiao, Lin Xiaodan, Lin Yujing, et al. Effects of surface roughness on splashing characteristics of large droplets with digital inline holographic imaging [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 191: 103373.
- [16] Almohammadi H, Amirfazli A. Droplet impact: viscosity and wettability effects on splashing [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 553: 22-30.
- [17] Azimi Yancheshme A, Enayati S, Kashcooli Y, et al. Dynamic behavior of impinging drops on water repellent surfaces; machine learning-assisted approach to predict maximum spreading [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2022, 139: 110743.
- [18] Ye Han, Qian Shangtuo, Zhu D Z, et al. Machine learning-based splash prediction model for drops impact on dry solid surfaces [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(9): 093312.
- [19] Shah P, Driscoll M M. Drop impact dynamics of complex fluids; a review [J]. *Soft Matter*, 2024, 20(25): 4839-4858.
- [20] Azimi Yancheshme A, Hassantabar S, Maghsoudi K, et al. Integration of experimental analysis and machine learning to predict drop behavior on superhydrophobic surfaces [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417: 127898.
- [21] Du Jiayu, Zhang Yiyang, Min Qi. Numerical investigations of the spreading and retraction dynamics of viscous droplets impact on solid surfaces [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 609: 125649.
- [22] Li Jiangfeng, Zhao Chen, Wang Chengyao. Experimental study on the dynamics of droplet impacting on solid surface [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2023, 27(10): 69.
- [23] Emady H N, Kayrak-Talay D, Litster J D. Modeling the granule formation mechanism from single drop impact on a powder bed [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 393: 369-376.
- [24] Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions; experimental studies of the deformation and breakup process [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(2): 151-173.
- [25] Riboux G, Gordillo J M. Experiments of drops impacting a smooth solid surface; a model of the critical impact speed for drop splashing [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(2): 024507.
- [26] Rioboo R, Marengo M, Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(1): 112-124.
- [27] Yarin A L. Drop impact dynamics; splashing, spreading, receding, bouncing [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38: 159-192.
- [28] Zhao Runchen, Zhang Qianyun, Tjugito H, et al. Granular impact cratering by liquid drops: understanding raindrop imprints through an analogy to asteroid strikes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(2): 342-347.
- [29] Marston J O, Thoroddsen S T, Ng W K, et al. Experimental study of liquid drop impact onto a powder surface [J]. *Powder Technology*, 2010, 203(2): 223-236.
- [30] Nefzaoui E, Skurtys O. Impact of a liquid drop on a granular medium: inertia, viscosity and surface tension effects on the drop deformation [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 41: 43-50.
- [31] Qian Shangtuo, Ye Han, Zhu D Z, et al. Experimental study of liquid drop impact on granular medium; drop spreading/splashing and particle ejection [J]. *Water Research*, 2024, 267: 122486.
- [32] Zhan Yi, Kuwata Y, Okawa T, et al. Experimental study on secondary droplets produced during liquid jet impingement onto a horizon solid surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 120: 110249.
- [33] Qian Shangtuo, Zhu D Z, Xu Hui. Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate [J]. *Experimental*

- Thermal and Fluid Science,2022,130:110518.
- [34] Zeng Qin,Zhu D Z,Qian Shangtuo,et al. Size and velocity correlation for splashing droplets generated by jet impingement[J]. Experiments in Fluids, 2024, 65 (4) : 52.
- [35] Long E J, Hargrave G K, Cooper J R, et al. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking[J]. Physical Review E, 2014, 89 (3) : 032201.
- [36] Serio M A, Carollo F G, Ferro V. Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies: a review [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 210-228.
- [37] Jones B K, Saylor J R, Testik F Y. Raindrop morphodynamics[M]. Washington: American Geophysical Union, 2010: 7-28.
- [38] Tian Wenjie, Song Pingan, Zhang Huayang, et al. Microplastic materials in the environment: problem and strategical solutions[J]. Progress in Materials Science, 2023, 132: 101035.
- [39] Ya Haobo, Jiang Bo, Xing Yi, et al. Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 798: 149338.
- [40] Chia R W, Lee J Y, Kim H, et al. Microplastic pollution in soil and groundwater: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(6) : 4211-4224.
- [41] 范绪君. 水滴撞击油池动力学特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [42] 叶涵. 洗手飞溅及飞溅液滴传播特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2025.
- [43] Okawa T, Kawai K, Kubo K, et al. Fundamental characteristics of secondary drops produced by early splash during single-drop impingement onto a thick liquid film [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 131: 110533.
- [44] Karatza Z, Buckman J, Medero G M, et al. Evolution of meniscus structures in hydrophobic granular systems[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126954.
- [45] Allen R F. The mechanics of splashing[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1988, 124(1) : 309-316.
- [46] Succar A, Lefebvre X, Prévost M, et al. Characterization of the aerosol produced from an aerated jet [J]. Water Research, 2023, 229: 119432.
- [47] Nikuradse J. Strömungswiderstand in rauhen Röhren[J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1931, 11(6) : 409-411.
- [48] 李斯琪. 粘性液滴冲击粉床的动态行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [49] Pierzyna M, Burzynski D A, Bansmer S E, et al. Data-driven splashing threshold model for drop impact on dry smooth surfaces [J]. Physics of Fluids, 2021, 33 (12) : 123317.
- [50] Laan N, De Bruin K G, Bartolo D, et al. Maximum diameter of impacting liquid droplets[J]. Physical Review Applied, 2014, 2(4) : 044018.
- [51] 张磊, 王健, 陈晨. 雨滴冲击下浮床微塑料的飞溅与喷射动力学[J]. 环境科学学报, 2024, 44 (5) : 189-197. (Zhang Lei, Wang Jian, Chen Chen. Splashing and microplastic ejection dynamics from floating rafts under raindrop impact[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(5) : 189-197. (in Chinese))
- [52] 谢俊, 李润东, 赵冰姿. 微塑料表面液滴冲击的界面动力学与能量传递[J]. 化工学报 2025, 76(1) : 112-121. (Xie Jun, Li Rundong, Zhao Bingzi. Interfacial dynamics and energy transfer of droplet impact on microplastic surfaces[J]. CIESC Journal, 2025, 76 (1) : 112-121. (in Chinese))
- [53] 黄辉龙, 黄汉雄. 液滴冲击 PP/PE 混合微塑料的破碎与迁移行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40 (3) : 98-105. (Huang Huilong, Huang Hanxiong. Fragmentation and migration behavior of droplet impact on PP/PE mixed microplastics [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40 (3) : 98-105. (in Chinese))
- [54] Chen Xinwen, Du Aimin, Liang Kun, et al. Interaction between droplet impact and surface roughness considering the effect of vibration[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220: 125018.
- [55] 蔡国辉, 陈晓东, 吴二军. 液滴冲击固体表面的动量传递与能量耗散机理[J]. 力学学报, 2024, 56 (4) : 890-901. (Cai Guohui, Chen Xiaodong, Wu Erjun. Momentum transfer and energy dissipation mechanism of droplet impact on solid surfaces [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56 (4) : 890-901. (in Chinese))
- [56] 钟哲晗, 姚强. 颗粒-液滴碰撞的动量交换与能量分配规律[J]. 工程热物理学报, 2025, 46 (2) : 412-419. (Zhong Zhehan, Yao Qiang. Momentum exchange and energy partition in particle-droplet collision[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46 (2) : 412-419. (in Chinese))
- [57] 刘乔, 黄家晨, 王浩. 前进接触线附近薄膜结构与动力学[J]. 物理学报, 2024, 73 (1) : 016801. (Liu Qiao, Huang Jiachen, Wang Hao. Structure and dynamics of thin liquid films near the advancing contact line [J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(1) : 016801. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 12 - 05 编辑: 王芳)