

抑尘液滴对煤表面动态润湿特征模拟评估方法

韩方伟^{1,2}, 彭莹莹¹, 张金宜¹, 赵月¹, 李建¹

(1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要:在煤体表面喷洒抑尘液是涉煤工业企业常用抑尘手段, 而抑尘液滴撞击煤表面的润湿过程对抑尘效果具有重要意义。为研究抑尘液滴在煤表面动态润湿过程以及进一步评估液滴润湿性能, 提出了液滴撞击煤表面过程中动态润湿指标, 基于 CLSVOF 数值模拟法研究了液滴在煤表面动态润湿过程; 利用无量纲润湿长度和无量纲润湿面积评价该过程中体现的润湿性能, 并得出最大无量纲润湿长度与最大无量纲润湿面积相关理论表达, 同时与表面张力的润湿性评估能力进行了比较。结果表明: CLSVOF 方法能够较好地模拟液滴在煤表面的撞击以及动态润湿过程, 可用于评估液滴对煤的动态润湿能力。液滴滴落在煤表面上, 首先展铺为圆盘状, 达到最大展铺时, 圆盘边缘与中心存在速度差。当速度差较小时, 液滴回缩汇聚成为一个液滴; 当速度差较大时, 液滴出现断裂行为, 形成许多微小液滴。液滴粒径越大, 断裂行为越早出现、现象越明显。一旦液滴在煤表面发生破裂, 无量纲润湿长度与无量纲润湿面积并不是保持着一致性变化趋势, 无量纲润湿面积评估能力更佳。液滴粒径相同时, 撞击煤表面的韦伯数越大, 润湿能力越好; 相同速度下增加粒径对液滴润湿能力影响较小。与表面张力相比, 无量纲润湿长度和无量纲润湿面积具有更好的液滴润湿性评估能力, 体现出在润湿剂评价、优选中的潜在应用价值。

关键词:液滴撞击; 动态润湿; 无量纲润湿参数; 润湿性评估; CLSVOF

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-1931-10

Simulation and evaluation method of dynamic wetting characteristics of dust suppression droplets on coal surface

HAN Fangwei^{1,2}, PENG Yingying¹, ZHANG Jinyi¹, ZHAO Yue¹, LI Jian¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamical Disaster and Prevention, Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Spraying dust suppression liquid on the coal surface is a common dust suppression method for coal-related industrial enterprises, and the wetting process of dust suppression droplets impacting the coal surface is of great significance to the dust suppression effect. In order to study the dynamic wetting process of dust suppression droplets on the coal surface and further evaluate the wetting performance of droplets, the index of dynamic wettability during droplets impacting on the coal surface is proposed. The dynamic wetting process of droplets on the coal surface is investigated based on CLSVOF numerical simulation method. The wetting performance in the process is evaluated by using the dimensionless wetting length and the dimensionless wetting area, and the theoretical expressions of the maximum dimensionless wetting

收稿日期: 2023-04-18 修回日期: 2023-07-29 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0504

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上资助项目 (2022-MS-396); 国家自然科学基金面上资助项目 (52074192)

作者简介: 韩方伟 (1986—), 男, 黑龙江鹤岗人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: hanfangweixinxiang@163.com

引用格式: 韩方伟, 彭莹莹, 张金宜, 等. 抑尘液滴对煤表面动态润湿特征模拟评估方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1931-1940.

HAN Fangwei, PENG Yingying, ZHANG Jinyi, et al. Simulation and evaluation method of dynamic wetting characteristics of dust suppression droplets on coal surface[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1931-1940.



移动阅读

length and the maximum dimensionless wetting area are derived. At the same time, they are compared with the wettability evaluation ability of surface tension. The results show that the CLSVOF method can better simulate the impact and dynamic wetting process of droplets on the coal surface, and can be used to evaluate the dynamic wetting ability of different droplets on the coal surface under different conditions. The droplet drops on the coal surface, and first spreads as a disk. When the maximum spreading is reached, there is a velocity difference between the edge and the center of the disk droplet. When the velocity difference is small, the droplet retracts and coalesces into a sphere. When the velocity difference is large, the droplet breaks and forms many tiny droplets. And the larger the droplet size is, the earlier the breakage behavior appears and the more obvious the phenomenon is. Once the droplet breaks on the coal surface, the dimensionless wetting length and the dimensionless wetting area do not maintain the consistent trend, and the evaluation ability of the dimensionless wetting area is better. When the droplet size is the same, the larger the We number of droplet impacting the coal surface, the better the wetting ability. Increasing the droplet size at the same velocity has less effect on its wetting ability. Compared with surface tension, the dimensionless wetting length and dimensionless wetting area have better ability to evaluate wettability of droplets, which reflects the potential application value in the evaluation and optimization wetting agents.

Key words: droplet impact; dynamic wetting; dimensionless wetting parameters; wettability evaluation; CLSVOF

煤尘是影响煤矿安全生产和职工身体健康的重要危险因素之一^[1]。在中国、美国、澳大利亚等主要产煤国家,煤尘灾害防治一直是研究热点。在煤表面喷洒水基抑尘材料是常用的煤粉尘抑制方法。国内外学者对水基抑尘材料进行了富有成效的研究,其成分常含有表面活性剂、水溶性高分子等。抑尘材料配方与应用工艺随着实践背景的变化而有不同。如李明等^[2]讨论了不同性质粉尘与抑尘剂各组分间的匹配协同关系,研究了复合型水雾抑尘剂。YAN等^[3]在NaAlg-g-poly中加入乳化剂OP-10和渗透剂JFC-S两种表面活性剂,提高了抑尘剂的控尘效率。JIN等^[4-7]利用接枝共聚等方法合成了高效成膜抑尘剂。当前评估抑尘剂润湿性主要使用表面张力、静态接触角、沉降时间、毛细上升高度、渗透速率等参数。在使用表面张力评价抑尘剂润湿能力时,其数值越小表明液滴捕获粉尘的能力越强,反之则越低^[8]。在利用接触角评价抑尘液滴润湿能力时,将液滴缓慢滴落在尘粒压片上而形成三相接触。接触角小于 90° 意味着高润湿性,而接触角大于 90° 对应低润湿性^[9]。当使用沉降时间评价抑尘剂润湿能力时,将粉尘均匀洒在抑尘溶液表面上,观测粉尘全部沉降至溶液所需的时间。沉降实验受到粉尘粒度分布、洒粉均匀程度等影响,需要重复3~5次以提高准确性。当使用毛细上升高度时,将装有粉尘颗粒的试管底部置于抑尘溶液中,测定抑尘液在试管中的毛细上升高度来评估^[10]。当使用渗透速率时,将抑尘剂溶液置于粉尘床上,测定其在重力下对粉尘床的渗透速度^[11]。然而,使用以上参数来评估抑尘液滴对煤的润湿能力具有明显的局限性。这是由于在抑尘工程实践中,液滴是具有喷射

速度的。液滴在煤表面缓慢润湿的时间尺度远高于液滴与煤的撞击接触时间。为此,深入分析抑尘液滴撞击过程,开发新的评价指标具有重要意义。

抑尘液滴撞击煤表面过程中常会出现铺展、破碎、飞溅等现象^[12]。其中,抑尘液滴撞击煤表面的展铺过程无疑是十分重要的,展铺面积大意味着对煤表面的高效覆盖,有利于提高抑尘效率。目前,对液滴展铺边界开展研究的方法主要有数值模拟法和实验法。VOF、Level set、CLSVOF等是可用来追踪液滴界面变化的数值模拟法。如笔者^[13]考虑了液滴撞击粉尘颗粒过程中的展铺特性,利用VOF方法对抑尘液滴撞击球形粉尘过程中的无量纲展铺系数进行了分析。MURAMATSU等^[14]利用Level set方法捕捉气液界面的时空演化,研究了正庚烷和正癸烷双组液滴的蒸发现象。梁刚涛等^[15]采用CLSVOF方法对单液滴撞击平面液膜初期的飞溅过程进行了数值模拟,探讨了撞击速度和液膜厚度对撞击后形成冠状水花形态及扩展直径的影响。MENG等^[16]二次重构CLSVOF方法,并利用改进的方法模拟了具有高表面张力效应的不可压缩两相流动问题。陈善群等^[17]运用CLSVOF方法数值模拟了自由剪切层问题和气泡在静止水体中上升问题,并对比数值模拟结果、理论分析和实验结果得出CLSVOF方法能够精确追踪多介质流运动界面。高速摄像是研究液滴撞击过程的重要实验方法,刘双科等^[18-23]利用该技术分析了液滴撞击不同润湿性表面的润湿现象以及相互作用。目前,对于液滴在煤表面动态润湿特性的实验研究还亟待增强。

笔者分析了抑尘液滴撞击煤表面动态润湿过程中的特征参数,并提出动态润湿性能评估方法。利用

CLSVOF 方法模拟液滴在煤表面的润湿过程, 对比分析了一维指标无量纲润湿长度与二维指标无量纲润湿面积, 探讨了 2 者的润湿性表征差异。同时推导出最大无量纲润湿长度与最大无量纲润湿面积的理论表达。最后, 与表面张力的润湿性评估能力进行对比分析, 探讨了动态润湿指标在抑尘液滴润湿性能评估中的应用。

1 液滴动态润湿过程中的特征参数

液滴处于空间直角坐标系内, 接触到煤表面的瞬间为润湿的开始。如图 1 所示, 假设液滴撞击前为球状, 液滴润湿煤表面时, 量取液滴在煤表面 (xoz 平面) 覆盖长度, 将其定义为润湿长度 D_t 。液滴润湿时, 亦可捕获其在煤表面 (xoz 平面) 投影平面图, 计算液滴覆盖总面积, 将其定义为润湿面积 S_t 。

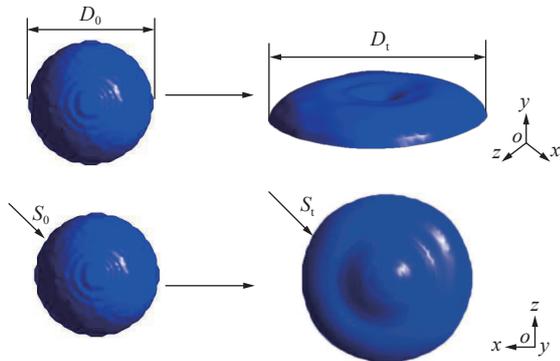


图 1 液滴撞击煤表面动态润湿过程中的特征参数

Fig.1 Characteristic parameters in dynamic wetting process of droplets impacting the coal surface

进一步对润湿长度和润湿面积进行无量纲化, 无量纲润湿长度 D^* 定义为

$$D^* = \frac{D_t}{D_0} \quad (1)$$

式中, D_0 为液滴撞击煤表面前最后时刻的等效直径, m; D_t 为润湿过程中任意时刻的润湿长度, m。

无量纲润湿面积 S^* 定义为

$$S^* = \frac{S_t}{S_0} \quad (2)$$

式中, S_0 为液滴撞击煤表面前最后时刻的等效面积, m^2 ; S_t 为润湿过程中任意时刻的润湿面积, m^2 。

2 数值模拟方法及验证

2.1 数值模拟方法与参数设置

两相界面追踪的实质是根据每个单元的相态属性给定其相态标志, 最后通过相态标志的差异对相界面的位置及形状进行判定。当前用来追踪两相界面

的方法有 VOF、Level set 以及 CLSVOF 等。其中, VOF (Volume of Fluid) 方法由 HIRT 等^[24]于 1981 年提出, Level set 方法最早由 OSHER 等^[25]于 1988 年提出。VOF 方法与 Level set 方法的基本思想和实现过程几乎一致, 都是使用“相函数”作为相界面追踪的工具。

VOF 函数具有体积的含义, 为不连续函数, 用于复杂界面结构和变化的追踪, 能够保证守恒, 但在相界面处的不连续性会导致流动中参数振荡或陡峭变化被抹平, 难以精确计算法向方向、曲率、与曲率有关的物理量。Level set 函数则具有距离的含义, 为连续函数, 能够精确计算相界面曲率、法向向量等参量, 但无法保证流体质量守恒。

CLSVOF (Coupled Level Set and Volume of Fluid Method) 方法对相界面构造采用分段线代替曲线的方式, 其中分段线到网格中心的位置由 VOF 函数值获取, 分段线的方向 (法向向量) 通过 Level set 函数计算获得。该方法兼具 VOF 方法良好的守恒性和 Level set 方法对界面曲率和法向向量的精确计算能力, 可精准捕捉两相界面^[26-28]。为此, 笔者使用 CLSVOF 方法跟踪两相界面处液滴的形态, 其流动控制方程详见参考文献^[29]。

已有研究表明, 除尘实践中, 粒径在 $10 \sim 150 \mu m$ 内的液滴被证明是最有效的^[30]。为此, 选择粒径 30、50、80 μm 的液滴作为数值模拟研究对象。将气相作为主相, 液相作为次相。煤表面粗糙度、接触角数值参照实验所用煤样的实测数据进行设置, 计算域温度设置为室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。湍流模型选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 利用高阶离散格式二阶迎风格式对控制方程进行离散化, 在计算控制体积界面参数值时考虑更多相关节点, 提高了计算精度。对相界面构造采用“几何重构”的方法, 利用 PISO 算法实现压力-速度耦合, 在每个时间步长内, 求解 2 次压力修正方程。其余各参数具体设置见表 1。

表 1 数值模拟参数设置

Table 1 Parameters setting of numerical simulation

参数	数值
空气压力/Pa	101 325
液滴密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	998.200
液滴黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.003×10^{-3}
液滴表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.072
液滴粒径/ μm	30、50、80
空气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.225
空气黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.789×10^{-5}
煤表面接触角/ $^\circ$	60
煤表面粗糙厚度/nm	24.300
煤表面粗糙度常数	0.500

2.2 网格无关性验证

在计算过程中,对相界面的追踪与捕捉尤为重要,网格质量直接影响着相界面的精确程度,也决定了液滴在煤表面润湿模拟结果的可靠性。为消除网格数量对模拟计算结果的影响,对所用的网格进行无关性验证,以确定最佳网格密度。选取了3种网格数量,分别为106万、216万、324万,采用液滴在煤表面润湿过程中的无量纲润湿参数作为监测量,分析液滴润湿煤表面过程中不同网格数量下的无量纲润湿长度与无量纲润湿面积随时间的变化情况。在本文的结果讨论中,采用韦伯数(We)综合表示液滴润湿煤表面的初始条件。 We 的定义为

$$We = \frac{\rho v_0^2 D}{\sigma} \tag{3}$$

式中, D 为液滴的初始粒径, m; v_0 为液滴的初速度, m/s; σ 为液滴的表面张力, mN/m; ρ 为液滴的密度, kg/m^3 。

图2为 $We=155.969$ 时液滴润湿煤表面过程中的

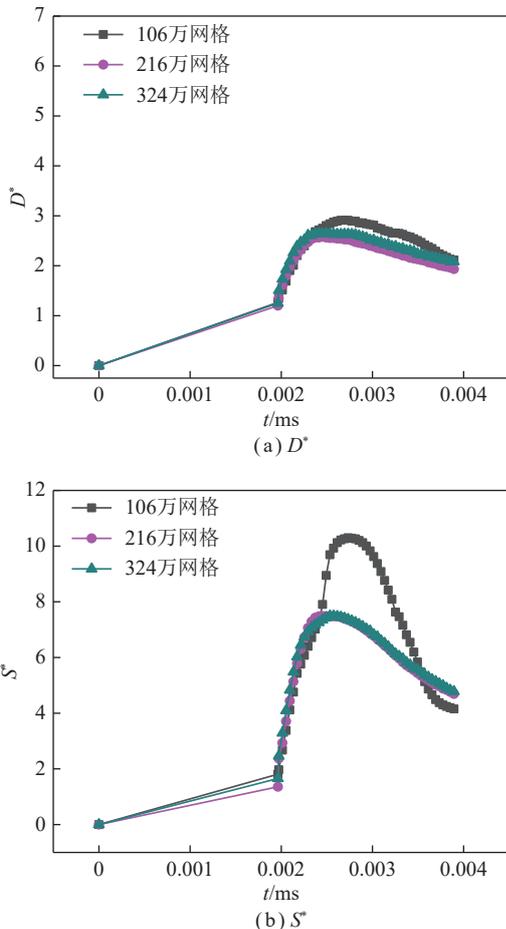


图2 不同网格数量下无量纲润湿参数变化曲线

Fig.2 Change curves of dimensionless wetting parameters under different mesh numbers

最大无量纲润湿参数变化,当网格数量为106万时,液滴的 S^* 、 D^* 均与其他曲线有明显差异,分辨率不高。提高网格数量后,网格数量为216万和324万时的 S^* 、 D^* 曲线近乎重合,证明此时的模拟计算结果达到了精度要求。综合考虑计算时间与计算资源后,在本文模拟研究中,选择216万网格用于数值模拟。

2.3 数值模拟方法验证

为了验证数值模拟方法的科学性与可行性,采用液滴动态润湿实验系统进行实验验证。实验系统(图3)主要包括液滴发生器、载样台、支架、高速摄像机等。利用VEO340S型高速摄像机记录液滴撞击煤表面的动态润湿过程,通过微流量蠕动泵和针头来控制液滴发生。通过调节液滴初始下落高度获得不同撞击速度,液滴以自由落体形式垂直撞击煤表面,配合显微镜镜头对液滴撞击煤表面过程进行高速显微拍摄。

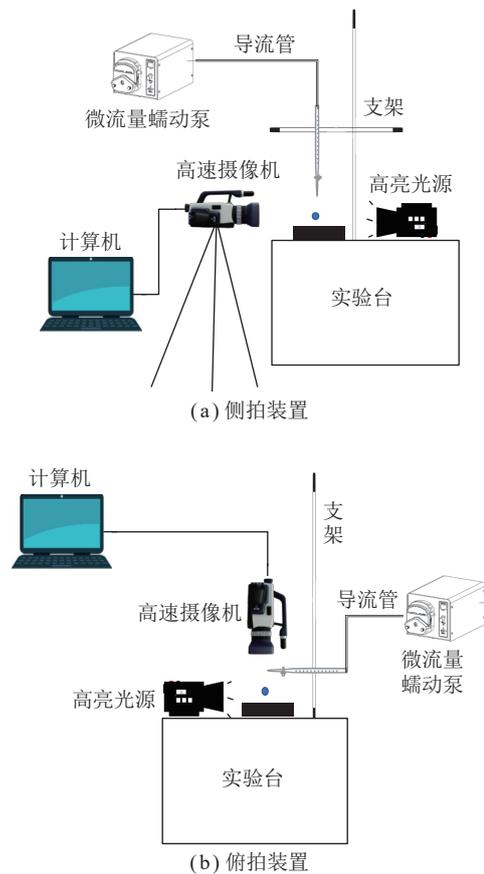


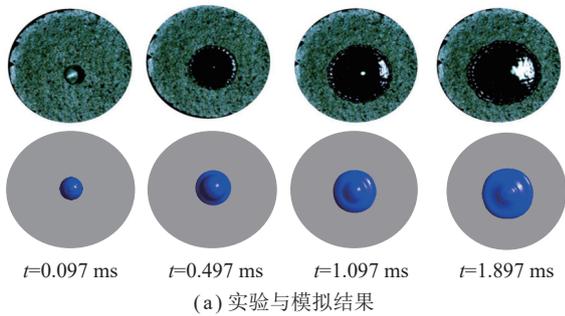
图3 液滴动态润湿实验装置

Fig.3 Dynamic wetting experimental device for droplets

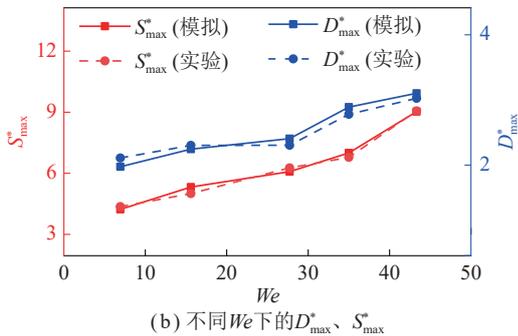
实验煤样来自西山煤电集团官地煤矿。整个采样过程严格按照国家标准 GB/T 475—2008《商品煤样人工采取方法》进行。为保障实验的科学性和可重复性,综合考虑评估方法未来的实践需求,煤样处理为片状型煤。处理过程为:采用碎煤机将煤样粉碎,然

后使用标准筛选取粒径为 180~250 μm 煤粉。使用台式粉末压片机, 在 20 MPa 工作压力下将定量煤粉压制尺寸为直径 20 mm、高 5 mm 的圆柱形薄片。使用接触角测量仪测得液滴在煤表面接触角为 60°, 使用扫描电镜测得煤表面平均粗糙厚度为 24.3 nm。

图 4(a) 为 $We=27.728$ 时的实验结果与模拟结果对比。实验和模拟获得的 D^*_{max} 分别为 2.224 和 2.366, S^*_{max} 分别为 6.265 和 6.041。通过观测与对比可知, 在相同的物性参数下, 实验和模拟中液滴在煤表面的变形趋势具有很好的一致性, 模拟结果与实验结果基本相符。



(a) 实验与模拟结果



(b) 不同 We 下的 D^*_{max} 、 S^*_{max}

图 4 液滴润湿煤表面实验与模拟结果对比分析

Fig.4 Comparison of experimental and simulation results of droplets wetting the coal surface

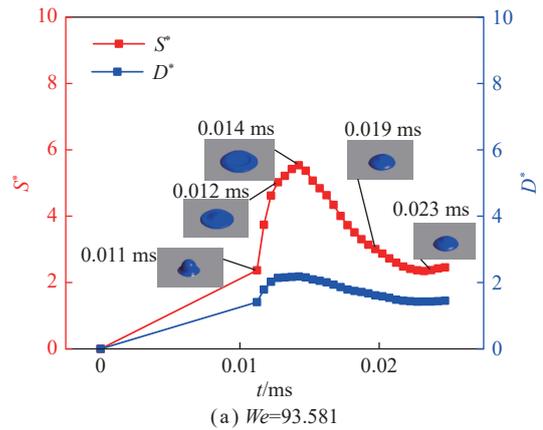
图 4(b) 为不同 We 下的最大无量纲润湿长度与最大无量纲润湿面积。可见, 通过实验研究、数值模拟得出的 D^*_{max} 与 S^*_{max} 变化趋势基本相同, 各参数在数值上仅存在细微差异。实验、模拟之间细微差异的存在是由于液滴在煤表面的动态润湿过程复杂, 存在一定实验误差与模拟简化。但 2 者之间变化趋势相同、数值相近, 说明基于 CLSVOF 方法的抑尘液滴撞击煤表面模拟仿真计算具有科学合理性。

3 结果和讨论

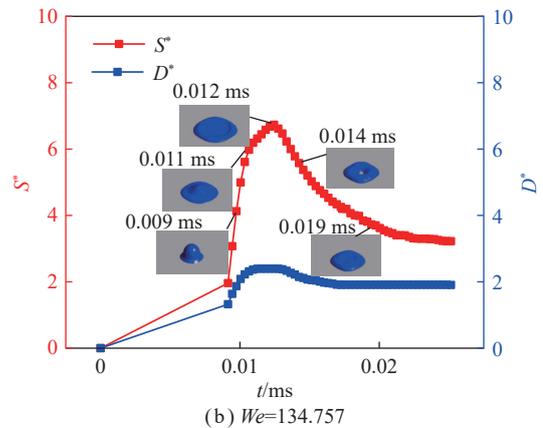
3.1 液滴在煤表面动态润湿模拟结果分析

图 5 所示粒径为 30 μm 的液滴对煤表面动态润湿过程中 S^* 、 D^* 变化曲线。可以发现, 液滴下落到煤

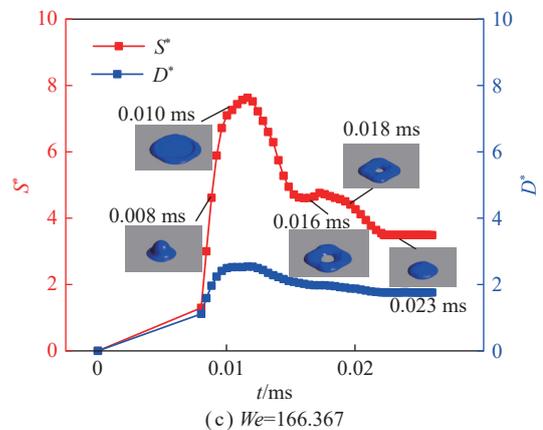
表面, 先展铺为圆盘状, 并在动能的作用下迅速达到最大展铺, S^* 与 D^* 迅速变化到峰值, 其 S^*_{max} 与 D^*_{max} 分别为 5.534 与 2.182, 此时液滴边缘速度变为 0。之后, 在黏性力与表面张力的作用下, 回缩汇聚成为一个液滴, S^* 与 D^* 也逐渐减小。当 We 增加到 134.757 与 166.367 时, 由于圆盘边缘与内部速度差较大, 液滴达到最大展铺之后, 从中心断裂形成液环。相比 $We=93.581$ 时, S^*_{max} 增加到了 6.731 与 7.629, D^*_{max} 增加到了 2.393 与 2.539, 这表明粒径相同时, We 越大,



(a) $We=93.581$



(b) $We=134.757$



(c) $We=166.367$

图 5 $D=30 \mu\text{m}$ 动态润湿过程中不同 We 下的 S^* 、 D^* 变化曲线

Fig.5 Change curves of S^* and D^* under different We during the dynamic wetting process of $D=30 \mu\text{m}$

液滴的润湿能力越强。此外, $We=166.367$ 时的液滴撞击速度较大, 相比 $We=134.757$ 时的液滴更早断裂成液环, 且形成的液环较大, 导致 S^* 在 $t=0.015$ ms 时发生小幅度振荡, D^* 几乎没有变化。

图 6 所示粒径为 $50\ \mu\text{m}$ 的液滴对煤表面动态润湿过程中的 S^* 、 D^* 变化曲线。可以发现, $We=155.969$ 时液滴先展铺为圆盘状。之后, 迅速达到最大展铺, S^* 与 D^* 也迅速变化到峰值, 其 S^*_{max} 与 D^*_{max} 分别为 7.491 与 2.578。随后, 回缩汇聚成为一个液滴, S^* 与 D^* 逐渐

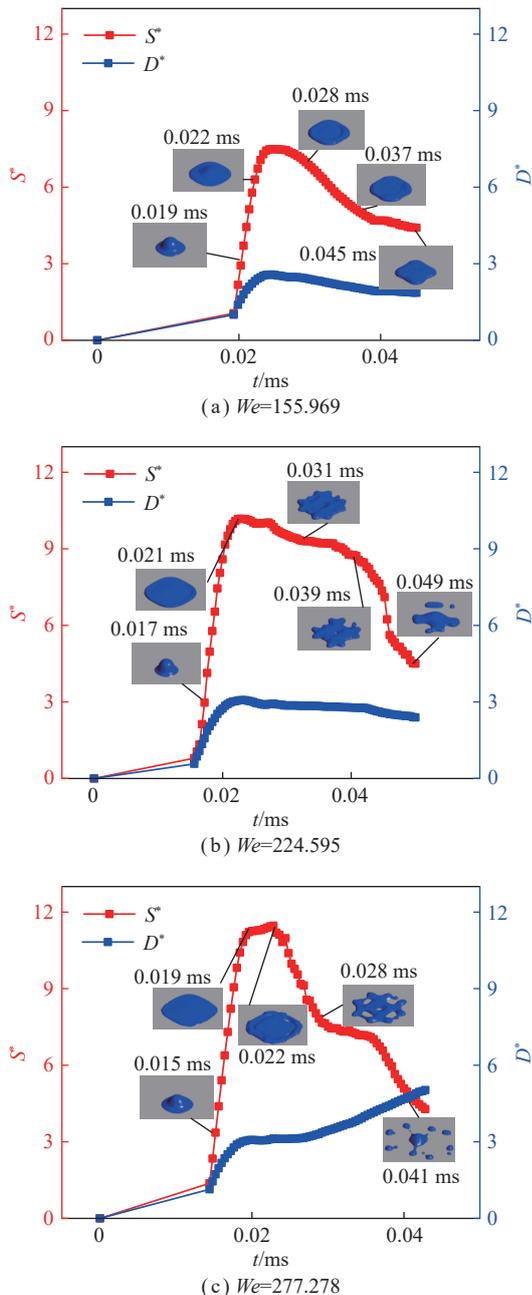


图 6 $D=50\ \mu\text{m}$ 动态润湿过程中不同 We 下的 S^* 、 D^* 变化曲线

Fig.6 Change curves of S^* and D^* under different We during the dynamic wetting process of $D=50\ \mu\text{m}$

减小。 $We=224.595$ 时的液滴达到最大展铺时, S^*_{max} 与 D^*_{max} 为 10.173 与 3.068, 之后, S^* 急剧减小, 而 D^* 几乎没有变化。这是由于边缘与内部速度差较大, 液滴断裂为液环, 最终分裂出子液滴。显然, 此时液滴的 S^* 减小。当 We 增加到 277.278, 达到最大展铺时, 其 S^*_{max} 与 D^*_{max} 分别为 11.464 与 3.125, 可见, 随着 We 的增加, 液滴的润湿能力增加。之后, 由于边缘与内部存在更大的速度差, 导致液滴出现的断裂行为更加明显, 形成的微小液滴数量也更多。 S^* 急剧减小, 但 D^* 却持续增加。这是因为 We 越大, 出现的液滴断裂行为越明显, 液滴扩散范围越大, 从而测得的无量纲润湿长度 D^* 出现持续增加的趋势。

图 7 所示粒径为 $80\ \mu\text{m}$ 的液滴对煤表面动态润湿过程中的 S^* 、 D^* 变化曲线。可以发现, $We=249.550$ 时, 液滴展铺为圆盘状, 并在动能的作用下迅速达到最大展铺, S^* 与 D^* 也迅速达到峰值, 其 S^*_{max} 与 D^*_{max} 分别为 7.668 与 2.804。随后, 回缩汇聚成为一个液滴, S^* 与 D^* 逐渐减小。同样的, We 为 359.352 与 443.644 时, 液滴撞击后首先展铺为圆盘状, 之后, 随着展铺的进行, S^* 与 D^* 迅速达到峰值, 其 S^*_{max} 增加到 10.415 与 11.830, D^*_{max} 增加到 3.266 与 3.476, 表明其润湿性能增强。不同的是由于 $80\ \mu\text{m}$ 的液滴体积较大, 展铺过程中液滴中心与边缘存在较大速度差, 导致在未达到最大展铺之前液滴便开始从边缘断裂, 且 We 越大断裂行为越早发生、现象越明显。此外, 同 $50\ \mu\text{m}$ 液滴撞击结果相比, 液滴的断裂行为在未达到最大展铺之前就已发生, 且以相同速度润湿煤表面, 液滴的 S^*_{max} 与 D^*_{max} 变化不大。可见, 此时随着 We 增加, 液滴粒径对润湿能力影响较小。为此, 在实际工程应用中, 应综合控制液滴粒径与速度, 以获得最佳液滴润湿能力。

3.2 动态润湿评估方法与能量转换

3.2.1 动态润湿评估方法

去离子水在不同 We 下表面张力与动态润湿实验结果如图 8 所示。可以看出, 在不同 We 下, 去离子水表面张力不变, 若利用表面张力来评价, 则其润湿能力相同。但动态润湿实验结果显示, 随着 We 的增加, D^*_{max} 与 S^*_{max} 不断增加, 表明液滴的润湿能力不断增加。可见利用表面张力来评价液滴润湿性能具有明显局限性, D^*_{max} 与 S^*_{max} 能够更好评估液滴对煤表面润湿性能。这是因为表面张力等静态评估方法忽略了撞击速度在动态润湿过程中的作用, 且液滴在煤表面缓慢润湿的时间尺度远高于液滴与煤的撞击接触时间。

依据 3.1 节的模拟结果, 液滴润湿煤表面, 首先展

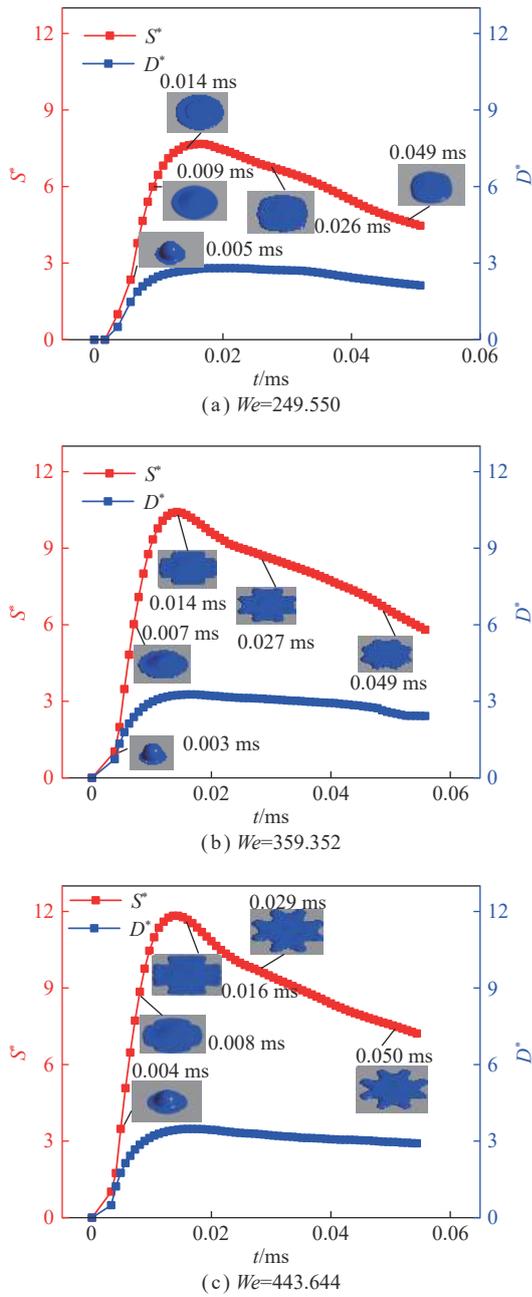


图 7 $D=80\ \mu\text{m}$ 动态润湿过程中不同 We 下的 S^* 、 D^* 变化曲线

Fig.7 Change curves of S^* and D^* under different We during the dynamic wetting process of $D=80\ \mu\text{m}$

铺为圆盘状, 当液滴达到最大展铺, 圆盘边缘速度变为 0, 此时, 圆盘边缘与中心存在速度差, 当速度差较小时, 液滴回缩汇聚成为一个液滴; 当速度差较大时,

$$\left\{ \begin{aligned} \rho\pi D_0^3 &= \rho\pi H(3D_0^2 D_{\max}^2 + 4H^2)/4 \\ \frac{\pi\rho v_0^2 D_0^3}{12} + \frac{\pi\rho g D_0^4}{12} + \pi D_0^2 \sigma &= \frac{\pi\rho g D_0^3 H(D_{\max}^2 D_0^2 + 2H^2)}{6(3D_{\max}^2 D_0^2 + 4H^2)} + \frac{\pi\sigma D_{\max}^2 D_0^2}{2(1 + \cos\theta)} - \frac{\pi\sigma D_{\max}^2 D_0^2 \cos\theta}{4} + \frac{\pi v_0^2 D_{\max}^3 D_0^3 \rho}{16\sqrt{Re}} + \\ &\frac{\pi D_{\max}^2 D_0^2 (1 - \cos\theta)}{4} - \frac{\pi D_{\max}^* D_0 H \sigma \sin\theta}{2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

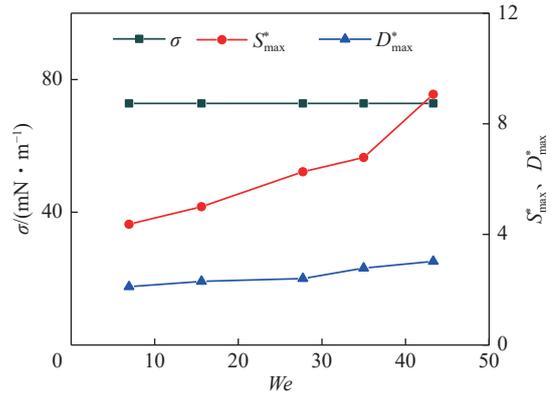


图 8 去离子水在不同 We 下表面张力与动态润湿实验结果
Fig.8 Experimental results of surface tension and dynamic wetting of deionized water at different We

液滴出现断裂行为, 并形成液环, 进而断裂为许多微小液滴, 此时润湿性能出现明显下降。显然, 此时无量纲润湿长度不宜用于表征润湿行为。而无量纲润湿面积的意义是煤表面上液滴覆盖的总面积, 恰好不受液滴断裂的影响。可见, 无量纲润湿长度适用于液滴未发生断裂情况下的润湿性评估, 而无量纲润湿面积在液滴发生断裂后, 依然可用于润湿性评估。此外, 在相同的条件下, 无量纲润湿面积表征液滴润湿效果的变化趋势更为明显, 具有更好的表征能力。

3.2.2 动态润湿过程中的能量转换

液滴以初速度 v_0 润湿煤表面, 根据能量守恒可知, 在达到最大润湿瞬间, 撞击前液滴的机械能和表面能转化为此刻的机械能、表面能、黏性耗散能与三相接触耗散能^[31-33]。能量守恒可表达为

$$E_{k1} + E_{g1} + E_{s1} = E_{k2} + E_{g2} + E_{s2} + E_{vis} + E_{sprd} \quad (4)$$

式中, E_{k1} 、 E_{k2} 为液滴撞击前后的动能, J; E_{g1} 和 E_{g2} 为液滴撞击前后的重力势能, J; E_{s1} 和 E_{s2} 为撞击前后的表面能, J; E_{vis} 为撞击过程中的黏性耗散能, J; E_{sprd} 为三相接触耗散能, J。

液滴撞击煤表面前后的质量守恒, 可表达为

$$M_1 = M_2 \quad (5)$$

其中, M_1 、 M_2 为液滴撞击前后的质量, kg。将能量守恒与质量守恒公式联立, 可得关于最大无量纲润湿长度 D_{\max}^* 的联合方程为

式中, H 为液滴撞击煤表面后达到最大润湿时的高度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为液滴的接触角, $(^\circ)$ 。

$$\begin{cases} \rho\pi D_0^3 = \rho H(3S_0^* S_{\max}^* + \pi H^2) \\ \frac{\pi\rho v_0^2 D_0^3}{12} + \frac{\pi\rho g D_0^4}{12} + \pi D_0^2 \sigma = \frac{\pi\rho g D_0^3 H(2S_{\max}^* S_0 + \pi H^2)}{6S_{\max}^* S_0 + 2\pi H^2} + \frac{2\sigma S_{\max}^* S_0}{1 + \cos\theta} \\ \sigma S_{\max}^* S_0 \cos\theta + \frac{v_0^2 S_{\max}^* S_0 \rho \sqrt{S_{\max}^* S_0/\pi}}{2\sqrt{Re}} + S_{\max}^* S_0 \sigma(1 - \cos\theta) - \sqrt{\pi S_{\max}^* S_0} H \sigma \sin\theta \end{cases} \quad (7)$$

选取不同 We , 利用式 (6)、(7) 分别计算得出最大无量纲润湿长度 D_{\max}^* 与最大无量纲润湿面积 S_{\max}^* 的数值, 绘制成散点图并进行非线性拟合, 可得 D_{\max}^* 、 S_{\max}^* 与 We 的关系分别满足式 (8)、(9)。

$$D_{\max}^* = 1.559We^{0.182} \quad (8)$$

$$S_{\max}^* = 2.369We^{0.373} \quad (9)$$

图 9 为去离子水在不同 We 下实验、模拟及通过式 (8)、(9) 得出的最大无量纲润湿长度 D_{\max}^* 、最大无量纲润湿面积 S_{\max}^* 结果。可以看出, D_{\max}^* 与 S_{\max}^* 数值变化趋势基本相同, 表明其在抑尘评估过程中能够辅助预测液滴的润湿性能。

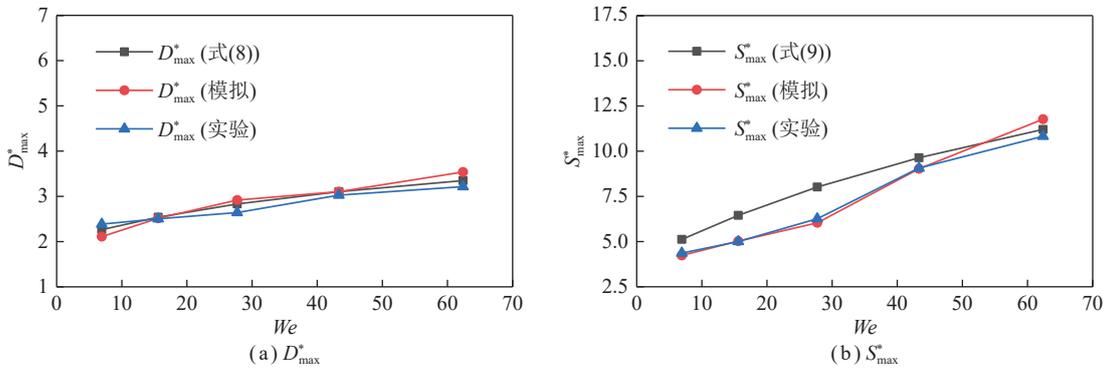


图 9 不同 We 下液滴的 D_{\max}^* 与 S_{\max}^*

Fig.9 D_{\max}^* and S_{\max}^* of droplets at different We

3.3 动态润湿评估方法应用

表面张力是液体表面层受不平衡分子引力而产生的使液体表面向内部收缩的力^[34]。在利用表面张力衡量液体对固体表面的润湿性时, 通常认为表面张力越低, 试剂润湿性越好; 表面张力相同时, 润湿能力相同。为此, 选用表面张力数值不同的不同试剂进行液滴动态润湿实验, 并将实验结果进行对比分析, 检验动态润湿评估方法在评估抑尘试剂润湿性中的应用效果。

3.3.1 表面张力测试实验

选取质量分数为 0.010%~0.080% 十二烷基硫酸钠 (SDS)、0.010%~0.080% 十二烷基磺酸钠 (SDDS) 与 0.100%~0.200% 失水山梨醇单油酸酯聚氧乙烯醚 (Tween-80) 溶液, 利用全自动张力仪 (JK99D) 并采用 Wilhelmy 铂金板法测量溶液的表面张力。每种溶液测量 3 次获取平均表面张力数值, 且 3 次测量结果之间差异在 0~0.200 mN/m。在每次测量之前, 用蒸馏水洗涤铂金板, 并用酒精灯进行干燥。图 10 为不同质量分数溶液表面张力测试结果。选取溶液表面张

力均为 36 mN/m(± 0.200 mN/m) 的 0.030% SDS 溶液、0.054% SDDS 溶液和 0.200% Tween-80 溶液进行液滴动态润湿实验。煤样的制备与动态润湿实验过程与 2.3 节所述一致。

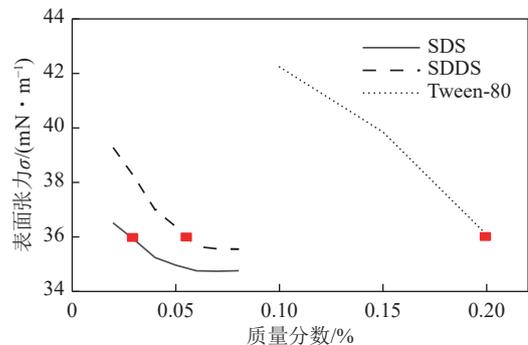


图 10 不同质量分数溶液的表面张力

Fig.10 Surface tension of solutions with different mass fractions

3.3.2 动态润湿评估方法应用效果分析

图 11 为不同溶液在初速度 $v_0=1$ m/s 下的动态润湿实验结果与表面张力数值, 可见, 0.030% 的 SDS 溶

液在3者中拥有最大的 D_{\max}^* 与 S_{\max}^* 。通常认为,表面张力越低,试剂润湿性越好,表面张力接近的试剂,其润湿性能也接近。实验中所用3种试剂表面张力相同,可见表面张力这一评价指标未能有效区分0.030% SDS溶液、0.054% SDDS溶液、0.200% Tween-80溶液的润湿性能。而在动态润湿实验中,动态润湿指标显示了较好的区分度,且最大无量纲润湿面积具有更好的灵敏性。这可能是由于3种试剂溶液的表面张力是在接近稳定的状态下测得的,在测试过程中表面活性剂分子在溶液表面的分布相对稳定。而在润湿实验过程中,液滴的动态润湿伴随着表面活性剂分子的快速动态转移,且表面活性剂分子在固液界面也与煤分子之间存在相互作用。液滴的表面张力并不是影响液滴润湿效果的唯一因素。润湿实验中,液滴的动态润湿特征反应了液滴撞击煤表面过程中的实际润湿性能,其更能体现各影响因素共同作用下的实际润湿性能。

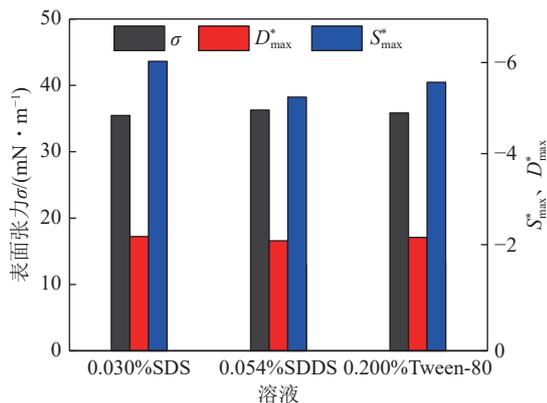


图11 不同溶液的表面张力与 S_{\max}^* 、 D_{\max}^* 数值比较
Fig.11 Comparison of surface tension and S_{\max}^* and D_{\max}^* values of different solutions

4 结 论

(1) 实验分析与数值模拟的对比结果显示, CLSVOF方法可以较好地模拟液滴在煤表面的动态润湿过程,可以用来评估不同液滴对煤表面的动态润湿能力。

(2) 液滴滴落在煤表面上,首先展铺为圆盘状,圆盘边缘与中心存在速度差,当速度差较小时,液滴回缩汇聚成为一个液滴;当速度差较大时,液滴出现断裂行为,形成许多微小液滴。液滴粒径越大,断裂行为越早出现、现象越明显。

(3) 液滴粒径相同时,撞击煤表面的 We 越大,润湿能力越好;速度不变增加液滴粒径对其润湿能力影响较小。

(4) 基于CLSVOF的数值模拟结果显示,高速撞击时一旦液滴发生破裂,无量纲润湿长度与无量纲润湿面积并不是保持着一致性变化趋势。无量纲润湿面积具有更好的评估能力。

(5) 动态润湿评价法能够有效评估液滴润湿性能。与表面张力相比,无量纲润湿长度和无量纲润湿面积润湿评估能力更佳。

参考文献(References):

- [1] 程卫民,周刚,陈连军,等.我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):1-20.
CHENG Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 1-20.
- [2] 李明,赖慧楠,关子杰,等.复合型水雾抑尘剂作用机理与优选方法研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(6):143-148.
LI Ming, LAI Huinan, GUAN Zijie, et al. Study on action mechanism and optimal selection method of compound water mist dust suppressant[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(6): 143-148.
- [3] YAN Jiayi, NIE Wen, XIU Zihao, et al. Development and characterization of a dust suppression spray agent based on an adhesive NaAlgln-poly/polysaccharide polymer[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785(1): 147192.
- [4] JIN Hu, ZHANG Yansong, WU Guangan, et al. Optimization via response surface methodology of the synthesis of a dust suppressant and its performance characterization for use in open cut coal mines[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 121: 211-223.
- [5] LI Ming, QIU Linling, YANG Huaizhen, et al. Performance test and application research of new gemini wetting dust suppressant[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(4): 042015.
- [6] MA Yunlong, ZHOU Gang, LI Shuailong, et al. Synthesis and properties of a conglomeration-wetting spray agent for dust suppression[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(42): 13940-13951.
- [7] LIU Zongqi, ZHOU Gang, DUAN Jinjie, et al. Preparation of composite high-efficiency dust suppressant and relevant molecular dynamics simulation for wetting coal surface[J]. Fuel, 2021, 296(15): 120579.
- [8] 周刚,程卫民,王刚,等.综放工作面表面活性剂除尘工艺[J].工业安全与环保,2009,35(11):17-19.
ZHOU Gang, CHENG Weimin, WANG Gang, et al. Dedusting technique of surfactant for fully mechanized and roof caving coal face[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2009, 35(11): 17-19.
- [9] 刘晓磊,吴其辉,姚思远,等.接触角理论模型与测量方法[J].化工时刊,2020,34(8):11-14.
LIU Xiaolei, WU Qihui, YAO Siyuan, et al. Theoretical models and measurement methods of contact angle[J]. Chemical Industry Times, 2020, 34(8): 11-14.
- [10] 曾康生,胡乃联,程卫民,等.综放工作面湿润剂喷雾降尘机理及高效降尘湿润剂的试验[J].煤炭学报,2009,34(12):1675-1680.
ZENG Kangsheng, HU Nailian, CHENG Weimin, et al. Dedusting mechanism by water-cloud of wetting agents and the relevant tests

- for fully-mechanized and roof caving coal face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1675–1680.
- [11] 吴超, 左治兴, 欧家才, 等. 不同实验装置测定粉尘湿润剂的湿润效果相关性[J]. *中国有色金属学报*, 2005(10): 136–141.
WU Chao, ZUO Zhixing, OU Jiakai, et al. Relevance of wetting effects to dust by using various wetting devices in investigating wetting agents[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005(10): 136–141.
- [12] YARIN A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38(1): 159–192.
- [13] 韩方伟, 张金宜, 赵月, 等. 液滴在球形粉尘表面的动力润湿特性[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2614–2622.
HAN Fangwei, ZHANG Jinyi, ZHAO Yue, et al. Kinetic wetting characteristics of droplet on the surface of spherical dust[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2614–2622.
- [14] MURAMATSU Hiroki, PILLAL Abhishek L, KITADA Kenya, et al. Numerical simulation of bicomponent fuel droplet evaporation using Level Set method[J]. *Fuel*, 2022, 318(15): 123331.
- [15] 梁刚涛, 沈胜强, 杨勇. 单液滴撞击平面液膜飞溅过程的 CLSVOF 模拟[J]. *热科学与技术*, 2012, 11(1): 8–12.
LIANG Gangtao, SHEN Shengqiang, YANG Yong. CLSVOF simulation for splashing of single drop impact on flat liquid film[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2012, 11(1): 8–12.
- [16] MENG Wenkang, LIAO Lei, CHEN Min, et al. An enhanced CLSVOF method with an algebraic second-reconstruction step for simulating incompressible two-phase flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 154: 104151.
- [17] 陈善群, 廖斌. 基于 CLSVOF 方法的多介质流运动界面追踪 (英文)[J]. *船舶力学*, 2012, 16(3): 203–217.
CHEN Shanqun, LIAO Bin. A coupled level set and volume of fluid method for tracking moving interface in multiphase flow[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(3): 203–217.
- [18] 刘双科, 徐旭常, 邓国强, 等. 高速摄像技术在循环床锅炉出口区域颗粒运动测量中的应用[J]. *流体力学实验与测量*, 2001, 15(3): 62–66.
LIU Shuangke, XU Xuchang, DENG Guoqiang, et al. Measuring particles motion at the exit zone in circulating fluidized bed boilers by high-speed video camera system[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2001, 15(3): 62–66.
- [19] 杨磊, 杨向龙, 王甫军. 液滴撞击柔性材料表面铺展特性的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(3): 83–89.
YANG Lei, YANG Xianglong, WANG Fujun. On the maximum spreading of liquid droplets impacting on soft surfaces[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2019, 33(3): 83–89.
- [20] 郭亚丽, 陈桂影, 沈胜强, 等. 盐水液滴撞击固体壁面接触特性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(7): 1547–1552.
GUO Yali, CHEN Guiying, SHEN Shengqiang, et al. Experimental research on contact characteristics after droplet impacting onto solid surface[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(7): 1547–1552.
- [21] HE Chengyu, LIU Tie, TIAN Lei, et al. Effect of crystal orientation on droplet wetting behavior on single-crystal Al_2O_3 substrates: An experimental study[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32: 127110.
- [22] AIDHALEAI Ahmed, TSAI Peichun Amy. Effect of a cationic surfactant on droplet wetting on superhydrophobic surfaces[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2020, 36(16): 4308–4316.
- [23] FARSHCHIN Bahador, PIERCE Jacoby, BEHESHTI Mohammad S, et al. Droplet impinging behavior on surfaces with wettability contrasts[J]. *Microelectronic Engineering*, 2018, 195: 50–56.
- [24] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225.
- [25] OSHER Stanley, SETHIAN James A. Fronts propagating with curvature-dependent speed; Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1): 12–49.
- [26] 王春海. 基于 CLSVOF 方法的单液滴碰撞壁铺展过程的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 13–18.
WANG Chunhai. Simulation analysis on spreading process of single droplet impingement based on CLSVOF Method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011: 13–18.
- [27] SUSSMA Mark, PUCKETT Elbridge Gerry. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 162(2): 301–337.
- [28] SUSSMA Mark. A second order coupled level set and volume-of-fluid method for computing growth and collapse of vapor bubbles[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 187(1): 110–136.
- [29] 廖斌, 陈善群. 基于 CLSVOF 方法的界面追踪耦合[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2013, 43(9): 106–111.
LIAO Bin, CHEN Shanqun. Interface tracking coupled based on CLSVOF method[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(9): 106–111.
- [30] ANDREW B C, ANDREW D O, JOSEPH S, et al. Dust control handbook for industrial minerals mining and processing[M]. Pittsburgh: Department of Health and Human Services, 2012: 63.
- [31] 春江, 王瑾萱, 徐晨, 等. 液滴撞击超亲水表面的最大铺展直径预测模型[J]. *物理学报*, 2021, 70(10): 248–258.
CHUN Jiang, WANG Jinxuan, XU Chen, et al. Theoretical model of maximum spreading diameter on superhydrophilic surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 248–258.
- [32] LEE Jae Bong, DEROME Dominique, GUYER Robert, et al. Modeling the maximum spreading of liquid droplets impacting wetting and nonwetting surfaces[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2016, 32(5): 1299–1308.
- [33] YONEMOTO Yukihiko, KUNUGI Tomoaki. Analytical consideration of liquid droplet impingement on solid surfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2362.
- [34] 蒋权, 王建江, 王珊, 等. 不同反应条件及表面活性剂对氨水表面张力的影响研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(6): 1726–1729.
JIANG Quan, WANG Jianjiang, WANG Shan, et al. Study on the effect of different reaction conditions and surfactants on the surface tension of ammonia solution[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(6): 1726–1729.