

流体力学课程五维式教学体系构建与实践

彭维红¹ 刘小雨¹ 敬雅文² 王浩屹¹ 张 薇³

(¹ 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;

² 格罗宁根大学科学与工程学院, 荷兰 格罗宁根 9747 AG;

³ 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要 针对流体力学中韦伯数(We)、雷诺数(Re)等无量纲参数抽象难教的特点,以液滴润湿煤尘为工程载体,构建“思教融合、虚实相济、力美同行、创新创意、实践探索”五维式教学体系。剖析 $We-Re$ 的物理意义,设计虚实协同实验,建立标度律模型,开展参数相关性分析,创新性引入科学诗画辅助理解,注重思教融合。教学实践显示,这种五维式教学体系可以促进教育教学理论的创新与发展,引导学生沉浸在理论创新、实践探索与诗情画意之中,激发学生的学习兴趣、提高学生的学习效果和培养学生的创新能力。

关键词 无量纲参数;液滴润湿;五维式教学体系;科学诗画

CONSTRUCTION AND PRACTICE OF A FIVE-DIMENSIONAL TEACHING SYSTEM FOR FLUID MECHANICS COURSES

PENG Weihong¹ LIU Xiaoyu¹ JING Yawen² WANG Haoyi¹ ZHANG Wei³

(¹ School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116;

² Engineering and Technology Institute, University of Groningen, Groningen 9747 AG, The Netherlands;

³ State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116)

Abstract Addressing the abstract and challenging nature of dimensionless quantities such as Weber number (We) and Reynolds number (Re) in fluid mechanics, this paper uses droplet wetting coal dust as an engineering carrier to construct a five-dimensional teaching system that integrates “thought and education, virtual and real reinforcement, beauty and force, innovation and creativity, and practical exploration.” The physical significance of $We-Re$ is analyzed, virtual-real collaborative experiments are designed, scale-law models are established, parameter correlation analysis is conducted, and scientific poetry and paintings are innovatively introduced to aid understanding, emphasizing the integration of thought and education. Teaching practice shows that this five-dimensional teaching system can promote the innovation and development of educational and teaching theories, guide students to immerse themselves in theoretical innovation, practical exploration, and poetic and pictorial sentiments, stimulate students' learning interest, enhance their learning effectiveness, and cultivate their innovative abilities.

Key words dimensionless quantity; liquid droplet wetting; five-dimensional teaching system; scientific poetry and painting

收稿日期: 2025-07-25

基金项目: 江苏省力学教育教学研究课题“多元协同-多维感知:构建流体力学类课程综合育人新模式”(2024jslxjy206);中国矿业大学“动力中国·课程思政”示范课程“流体力学A”(2023KCSZ13);工程力学示范专业(2022KCSZ02)。

通信作者: 彭维红, pengweihong@cumt.edu.cn。

引文格式: 彭维红,刘小雨,敬雅文,等. 流体力学课程五维式教学体系构建与实践[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 93-102.

Cite this article: PENG W H, LIU X Y, JING Y W, et al. Construction and practice of a five-dimensional teaching system for fluid mechanics courses[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 93-102. (in Chinese)

物理学作为揭示物质运动基本规律的学科,常通过建立理想模型来简化复杂问题。在流体力学研究中,为了描述不同流动特性的相对重要性,科学家们引入了无量纲数群,其中韦伯数和雷诺数作为流体力学理论教学的核心部分,分别表征惯性力与表面张力、气动力与黏性力的相对重要性,是分析界面流动问题的核心参数,也是分析实际工程问题的关键途径^[1-3]。中国矿业大学作为一所具有能源资源特色的高等院校,流体力学课程是连接基础理论与工程实践的关键环节。然而,现行教学普遍缺乏实际工程到模型简化的具体过程,难以将理论知识迁移至实际工程或自然现象,导致学生难以理解其物理本质与应用价值。

针对这一教学瓶颈,本文以液滴润湿煤尘这一典型工程案例为载体,构建“思政融合、虚实相济、力美同行、创新创意、实践探索”的立体化教学体系。教学过程中,通过高速摄像动态捕捉液滴铺展过程,结合计算流体力学仿真,引导学生建立液滴最大铺展系数与 We 、 Re 的标度律关系,并将理论成果转化为喷雾抑尘效果优化方案。同时针对抽象参数的教学难题,创新性引入诗情画意元素作为认知桥梁,将我国优秀传统文化与现代科技文明相结合,强化学生对诗歌传统文化的认知和参数物理内涵的记忆。整个教学过程引导学生沉浸在理论创新、实践探索与诗情画意的交融情境,促进学生形成“唤、学、思、尝、创”学习理念,帮助学生利用“五维式”感知流体世界(图1)。

1 We - Re 的物理意义剖析

1.1 韦伯数: 惯性力与表面张力的竞争

以液滴撞击煤尘为例,韦伯数 We 表示液滴

在煤尘表面铺展过程中的惯性力与表面张力的关系,为惯性力与表面张力的比值,其计算公式如下

$$We = \frac{\rho v^2 D_0}{\sigma}$$

其中, v 为液滴初始速度, ρ 为液滴密度, σ 为液滴的表面张力系数, D_0 为液滴初始直径。 We 通常用来衡量惯性力与表面张力的相对重要性。

在煤尘润湿过程中,当 We 较小时,表面张力主导液滴铺展,液滴铺展速率较慢;随着 We 的增大,惯性力逐渐影响液滴铺展;当 We 较大时,惯性力主导液滴铺展,液滴飞溅且能量耗散严重^[4]。

1.2 雷诺数: 惯性力与黏性力的平衡

雷诺数 Re 表示液滴所受惯性力与黏性力的关系,为惯性力与黏性力的比值,其计算公式如下

$$Re = \frac{\rho v D_0}{\mu}$$

其中, μ 为液滴动力黏度。雷诺数 Re 通常用来表征流体的流动状态是层流还是湍流,决定能量耗散方式^[5]。

在煤尘润湿过程中,当 Re 较小时,黏性力主导液滴铺展,液滴回缩速率较慢;随着 Re 的增大,惯性力逐渐影响液滴铺展;当 Re 较大时,惯性力主导液滴铺展,液滴出现反弹现象^[6]。

此外,煤尘碳含量、粒径分布、表面粗糙度与液滴的表面张力、黏度也会影响煤尘润湿行为^[7-10]。

2 虚实协同实验设计

2.1 煤尘-液体相互作用分层实验体系探究

2.1.1 煤尘-液体基础数据库构建

通过多尺度表征技术系统解析煤尘润湿过程

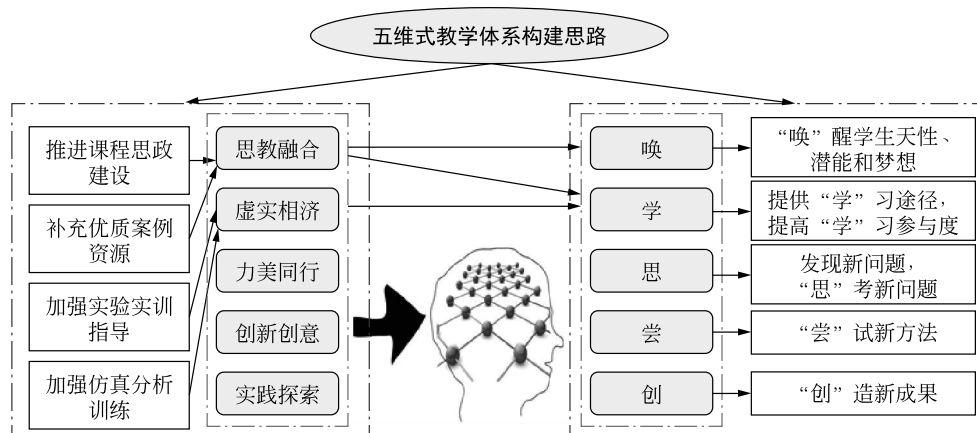


图1 流体力学课程五维式教学体系构建思路

中的 $We-Re$ 作用机制,全面量化煤样理化特性与液滴动力学参数的关联关系,构建煤尘-液体基础数据库,如表 1 所示。

表 1 煤样-液滴表征参数、仪器及教学关联表

| 参数 | 元素含量 | 粒径分布 | 粗糙度 | 表面张力 | 静态接触角 |
|-------|-------|---------|----------|-------|--------|
| 测量仪器 | 工业分析仪 | 激光粒度分析仪 | 3D 轮廓测量仪 | 表面张力仪 | 接触角测量仪 |
| 教学关联点 | 疏水性差异 | 亲疏水性 | 润湿效果 | 液滴飞溅 | 动态铺展 |

煤发生变质会使得煤的元素含量发生一定的变化,元素含量的变化会对润湿性产生巨大影响,其中碳元素的含量会随着煤炭变质化程度的增加而增加,煤炭的润湿难度也会变得更高^[11]。本实验所选用的材料的三种煤尘,分别为烟煤 80 目(神木县)、无烟煤 80 目(巩义市大峪沟煤矿)、无烟煤 200 目(巩义市大峪沟煤矿),三种煤尘分别简称为 YM80、WY80 和 WY200。如表 2 所示,利用 5E-MAG6700 型工业分析仪测试可知 YM80、WY80、WY200 的固定碳含量都大于 50%,变质程度较高,润湿难度较大;水分和灰分含量高、挥发分含量较少,可以提高煤的润湿效果。

表 2 煤样的工业分析

| 样品名称 | 水分/% | 灰分/% | 挥发分/% | 固定碳含量/% | D_{50} |
|-------|------|-------|-------|---------|----------|
| YM80 | 2.71 | 29.07 | 15.8 | 52.42 | 69.962 |
| WY80 | 2 | 8.2 | 3.87 | 85.93 | 105.438 |
| WY200 | 0.78 | 41.32 | 3.59 | 54.31 | 15.68 |

表中 D_{50} 代表小于此粒径的颗粒体积占全部颗粒总体积的 50%。

粒径的减小会增强煤尘的疏水性^[12],降低表面活性剂溶液在煤尘表面湿润效果。利用 GSL-1000 型激光颗粒分布测量仪,通过激光扫描测定煤尘的粒径分布。利用 Gauss 函数对三种煤尘体积频率分布进行分析,其复相关系数均大于 0.92,可作为实验样品。三种煤尘的粒径的大小顺序为:WY80>YM80>WY200,如图 2 所示。

煤粒是不规则的具有一定粗糙度的颗粒,不论是煤堆还是单颗煤粒,其表面十分粗糙且不规则。采用 3D 轮廓测量仪基恩士 VR-5000 测得三种煤样的表面形态和粗糙度如图 3 所示。利用煤

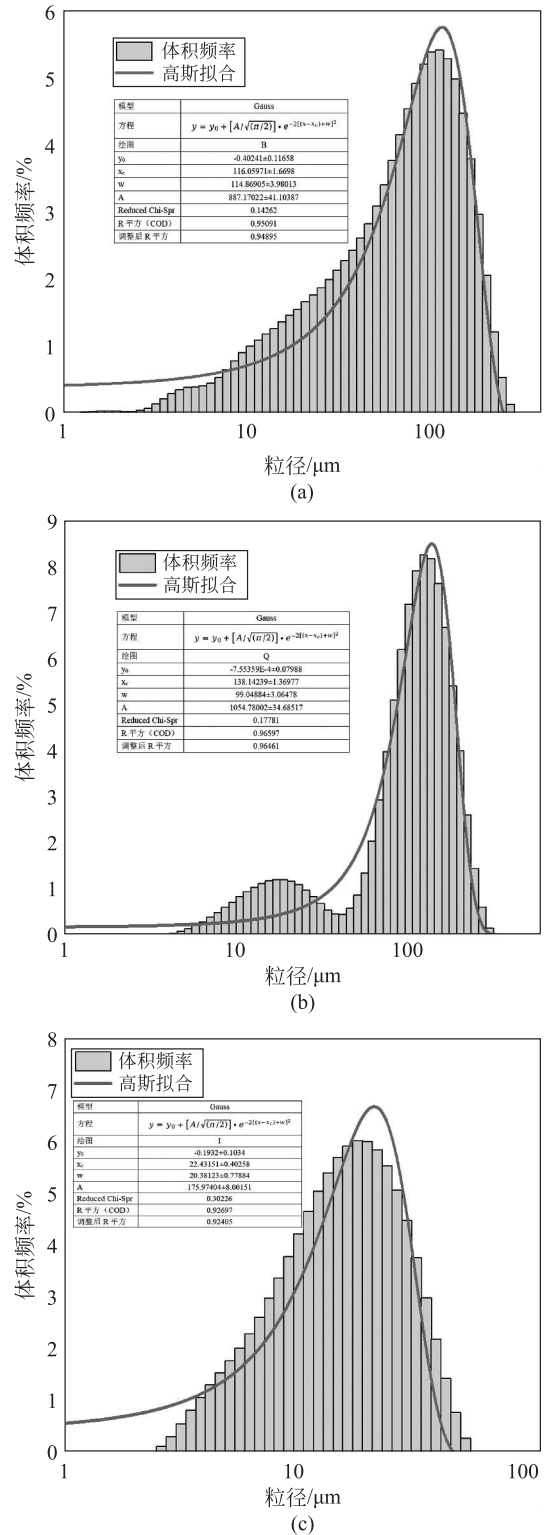


图 2 粒径分布

(a) YM80; (b) WY80; (c) WY200

样表面的算数平均表面粗糙度 S_a 、均方根表面粗糙度 S_q 、峰度 S_{ku} 、偏斜度 S_{sk} 对粗糙度进行量化分析。由表 3 可知, S_a 、 S_q 的大小顺序为:YM80>

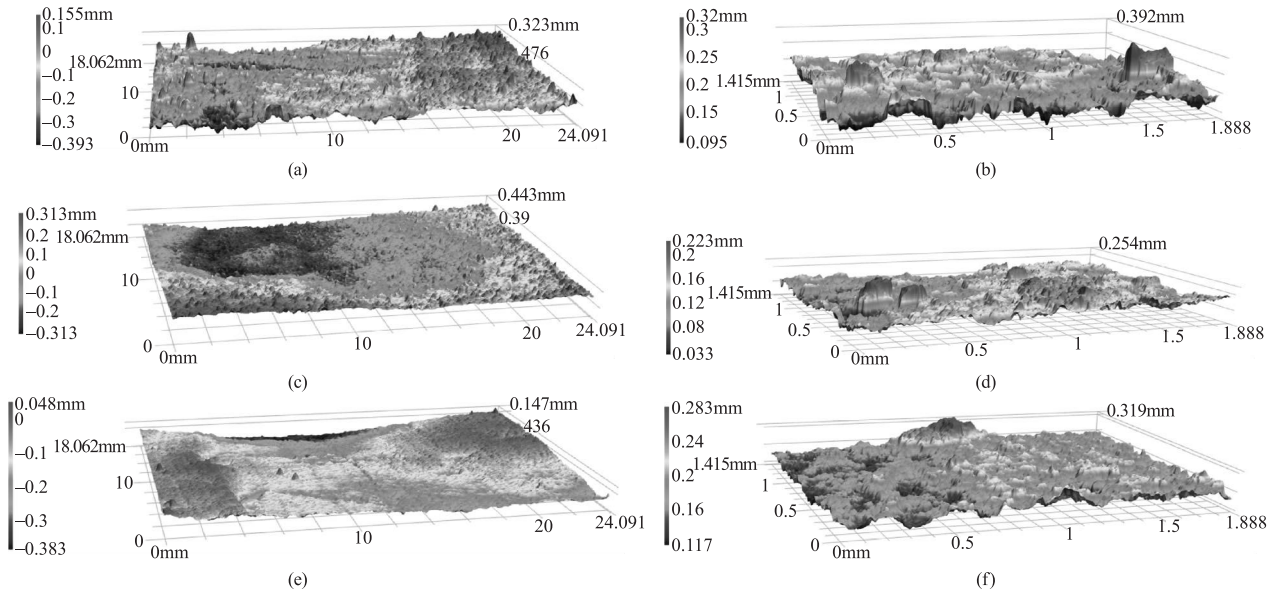


图3 煤样表面粗糙度三维建模

(a) YM80(12×); (b) YM80(160×); (c) WY80(12×); (d) WY80(160×); (e) WY200(12×); (f) WY200(160×)

表3 煤尘颗粒的粗糙度

| | S_a (算数平均表面粗糙度)/ μm | S_q (均方根表面粗糙度)/ μm | S_{ku} (峰度) | S_{sk} (偏斜度) |
|-------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------|
| YM80 | 32.515 | 41.932 | 3.694 | 0.399 |
| WY80 | 27.695 | 35.846 | 3.228 | 0.285 |
| WY200 | 22.113 | 27.246 | 3.912 | -0.595 |

WY80>WY200; S_{ku} 、 S_{sk} 绝对值的大小顺序为: WY200>YM80>WY80。

遵循无毒无害、无腐蚀性、溶解性好、能大幅改善溶液的表面张力、保存时间长且运输方便、经济实惠、环境友好的原则,选用脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9)溶液作为实验溶液,并使其达到临界胶束浓度 0.2%。采用 WLD-300A 电子密度计,NDJ-1 旋转黏度计,Krüss GmbH K100 表面张力仪、Krüss DSA100 接触角测量仪测量溶液密度、黏度、表面张力和液滴在煤样表面的平衡接触角。通常水的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、动力黏度为 $1.01\text{mpa}\cdot\text{s}$ 、表面张力系数为 $71.3\text{mN}/\text{m}$;AEO-9 溶液的密度为 $1.016\text{g}/\text{cm}^3$ 、动力黏度为 $1.303\text{mpa}\cdot\text{s}$ 、表面张力为 $31.867\text{mN}/\text{m}$ 。一般认为 $\theta < 90^\circ$ 为亲水、 $\theta > 90^\circ$ 为疏水,AEO-9 溶液在 YM80、WY80、WY200 三种煤尘表面的静态接触角为 54.4° 、 41.1° 、 47.7° ,说明溶液对三种煤尘的润湿性较好。

2.1.2 进阶实验探究

自主搭建液滴撞击煤样实验平台,如图4所示。采用雷弗 TYD03-01 型实验室注射泵推动注

射器作为微量注射泵,促使液滴从内径 0.2mm、外径 0.4mm 的滴液针管中自由下落,与煤尘发生碰撞,再利用高速相机对液滴在尘堆表面上的动态铺展过程进行记录。设置帧率为 5000frame/s,曝光时间为 $10.0\mu\text{s}$,分辨率为 1024×512 。

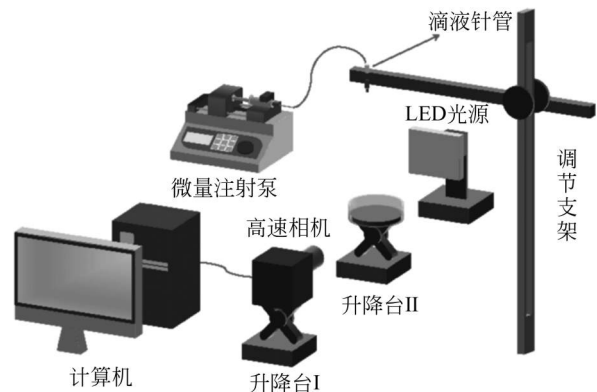


图4 液滴撞击煤样实验平台示意图

装载已制备的煤样和 0.2% 的 AEO-9 表面活性剂水溶液,通过调节支架之上的滴液针管控制液滴直径为 3.3mm、针头垂直高度在 5~50cm

之间,采用高速相机记录动态铺展过程。液滴每次撞击煤样后,需对煤样进行更换,同时再以相同的实验条件重复2次实验,观察液滴的表面形态变化,引入液滴铺展系数、液滴中心高度系数等无量纲参数描述液滴铺展润湿特性。建立液滴最大铺展系数和速度、雷诺数、韦伯数之间的标度律,探究提高煤尘润湿效果的方式。测试多种液滴的理化性质指标,开展参数相关性分析,寻求控制润湿效果的因素。

2.2 仿真实验可视化分析

鉴于煤尘本身疏水且具有一定的粗糙度,利用ANSYS开展数值仿真分析,验证煤尘润湿过程的存在。以AEO-9溶液撞击YM80煤尘表面为例,设定计算域大小为 $30 \times 15 \text{mm}^2$,且左、右、上三个边界均为压力入口,下边界为固定壁面;液滴直径为3.3mm,液滴速度为1.4m/s;网格大小0.2mm,下边界处网格大小为0.1mm;计算时间为 10^{-4}s ,计算步长为1000。

由图5可知,液滴首先在煤尘表面铺展,铺展到最大铺展状态后,反弹至平衡状态。教学过程中注意物理意义可视化,通过慢动作回放液滴铺展模式,感受溶液对煤尘的良好润湿性能。

3 教学实施创新方式

3.1 液滴撞击煤尘表面量化分析

如图6(a1)所示,当AEO-9液滴撞击YM80煤样表面的速度 $v = 0.99 \text{m/s}$ 时,液滴铺展,在3.6ms到达最大铺展状态,随后部分液滴会发生附带微小液滴的反弹,最后会在煤样表面形成半润湿的液滴形状,其中微小液滴的产生是由于溶液的表面张力较小。由图6(a2)可知,液滴的最大

铺展系数和达到会随着速度的增加而增加;液滴的中心高度系数会随着速度的增加而减小。

对于AEO-9液滴撞击WY80表面,当液滴撞击煤样表面的速度 v 较小时,液滴铺展,然后达到最大铺展状态,随后液滴会发生反弹,反弹液滴脱离煤样表面,这是由于WY80煤尘的润湿性较差导致液滴撞击煤样表面的过程中的黏性耗散能 E_v 较大;当液滴撞击煤样表面的速度 v 较大时,铺展过程产生冠状飞溅而不在水平方向上产生微小液滴,这是由于煤尘对液滴的阻力和黏附作用使得液滴难以水平分离。如图6(b1)所示,当 $v = 0.99 \text{m/s}$ 时会在3.6ms到达最大铺展状态。由图6(b2)可知,液滴在WY80表面与YM80表面的无量纲参数变化趋势相似,但当速度 v 较大时,液滴达到最大铺展状态时间会随着速度的增加而减小。

如图6(c1)所示,当液滴撞击煤样表面的速度 $v = 0.99 \text{m/s}$ 时,液滴铺展,在4.6ms到达最大铺展状态,随后部分液滴会发生附带微小液滴的反弹,这些液滴都不会脱离煤样表面,最后在煤样表面形成半润湿的液滴形状。其中,液滴达到最大铺展状态的时间延长是由于AEO-9液滴在WY200煤样表面的润湿性较差。由图6(c2)可知,液滴在WY200表面与YM80表面的无量纲参数变化趋势相似。在当液滴撞击煤样表面的速度相同时,液滴撞击YM80、WY80、WY200表面的最大铺展系数的大小顺序为 $WY80 > WY200 > YM80$ 。

3.2 动态模型修正

由于液滴最大铺展系数与速度正相关,并且在惯性毛细区域遵循 $\beta_m \propto We^{1/4}$ 、 $\beta_m \propto Re^{1/4}$ 标度律^[13],AEO-9液滴撞击三种煤样表面的最大铺展系数和速度、韦伯数、雷诺数之间标度律可表示如下:

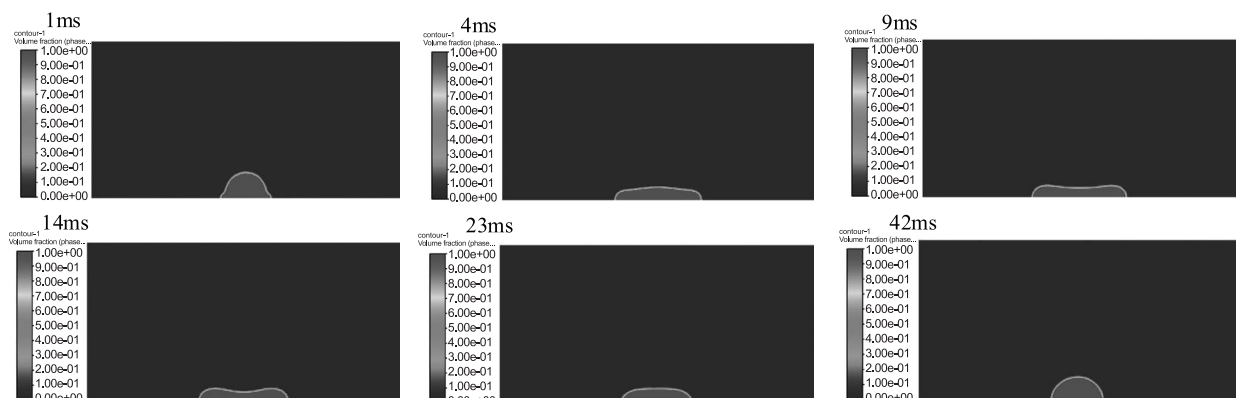


图5 液滴铺展形态图

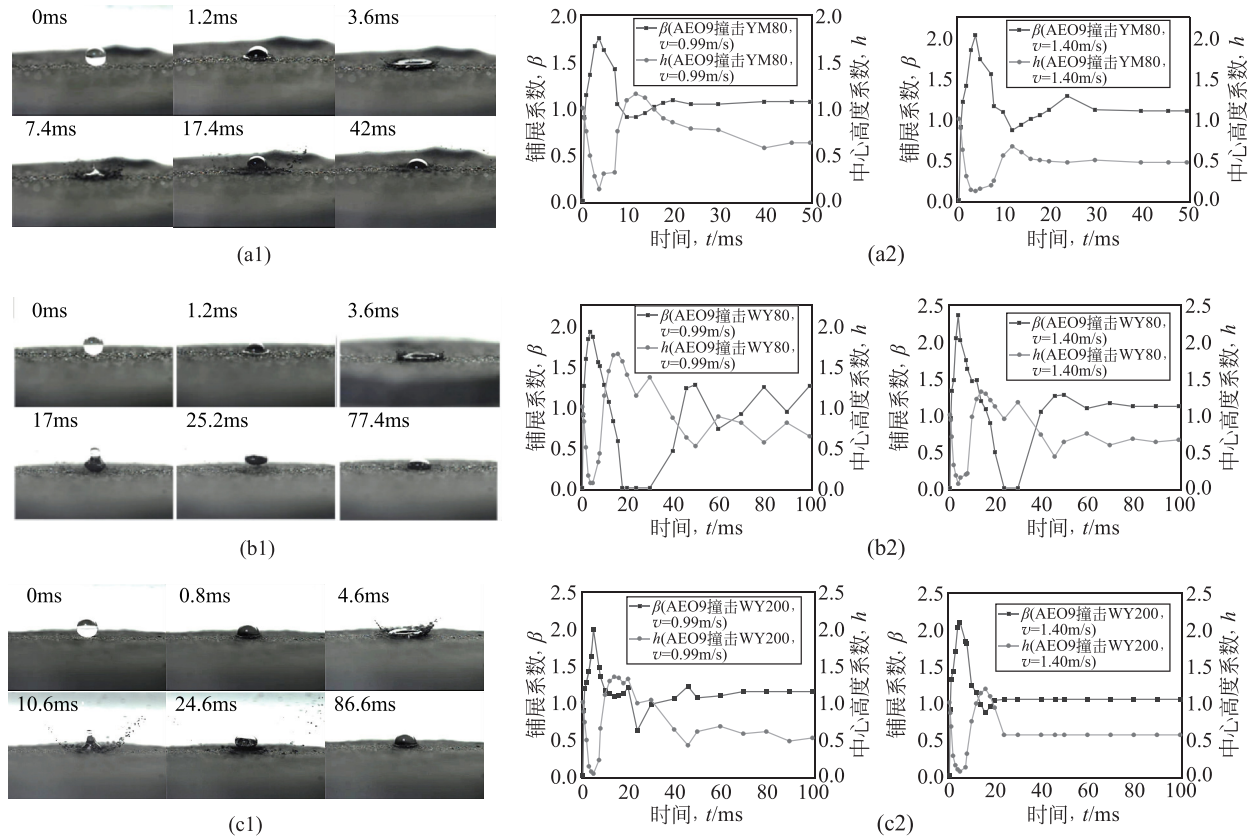


图6 AEO-9液滴撞击煤样表面形态与铺展特性分析

(a1) YM80表面形态图($v=0.99\text{m/s}$); (a2) YM80表面铺展系数和中心高度系数; (b1) WY80表面形态图($v=0.99\text{m/s}$); (b2) WY80表面铺展系数和中心高度系数; (c1) WY200表面形态图($v=0.99\text{m/s}$); (c2) WY200表面铺展系数和中心高度系数

$\beta_m = a_1 \cdot v^{b_1}$; $\beta_m = a_2 \cdot We^{b_2}$; $\beta_m = a_3 \cdot Re^{b_3}$
 式中, $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ 等系数可以通过实验数据分析可得。

由标度律建立液滴最大铺展系数动态模型, 如表4所示, AEO-9液滴在三种煤样表面的最大铺展系数和速度、雷诺数、韦伯数之间的关系如图7至9所示。模型的 b_1 和 b_3 在 $0.30 \sim 0.48$ 之间, b_2 在 $0.15 \sim 0.24$ 之间; a_1 最大为 $1.76 \sim 1.93$, 其次是 a_2 为 $0.63 \sim 0.96$, a_3 最小为 $0.05 \sim 0.19$; $R^2 > 0.97$, 匹配度较好。

表4 AEO-9液滴最大铺展系数动态模型

| 液体种类 | 固体种类 | $\beta_m \sim v$ | $\beta_m \sim We$ | $\beta_m \sim Re$ | R^2 |
|-------|-------|------------------|-------------------|-------------------|--------|
| AEO-9 | YM80 | $1.76v^{0.40}$ | $0.7We^{0.20}$ | $0.08Re^{0.40}$ | 0.9752 |
| | WY80 | $1.90v^{0.48}$ | $0.63We^{0.24}$ | $0.05Re^{0.48}$ | 0.9719 |
| | WY200 | $1.93v^{0.30}$ | $0.96We^{0.15}$ | $0.19Re^{0.30}$ | 0.9746 |

综上所述, 对于喷雾降尘工程, 增大液滴撞击煤样表面速度和提高对煤尘的润湿性可以提高液

滴撞击煤样表面最大铺展系数, 即提高液滴与煤样表面接触面积, 减小液滴的反弹趋势, 从而提高液滴对煤尘的润湿效果。

3.3 参数相关性分析

由于YM80、WY80、WY200为我国的常见煤尘, 具有疏水性强、润湿性差, 普通水的除尘效率差, 抑尘剂的选择对喷雾除尘尤为重要。如表5所示, 分别测量去离子水、0.2% AEO-9和0.2% SDBS表面活性剂的水溶液、黏结剂聚乙烯醇205PVA、217PVA、224PVA的水溶液的密度、黏度、表面张力、静态接触角。采用SPSS软件对上文中液滴密度 ρ 、黏度 μ 和表面张力 σ 、煤尘表面粗糙度 Sa 和粒径 D 、液滴在煤尘表面的静态接触角 θ 进行相关性分析, 如图10所示。静态接触角与液滴表面张力强相关, 与液滴黏度和密度、煤尘粗糙度和粒径弱相关, 使用表面张力小的AEO-9液滴能有效提高提高液滴在煤尘表面静态润湿性。

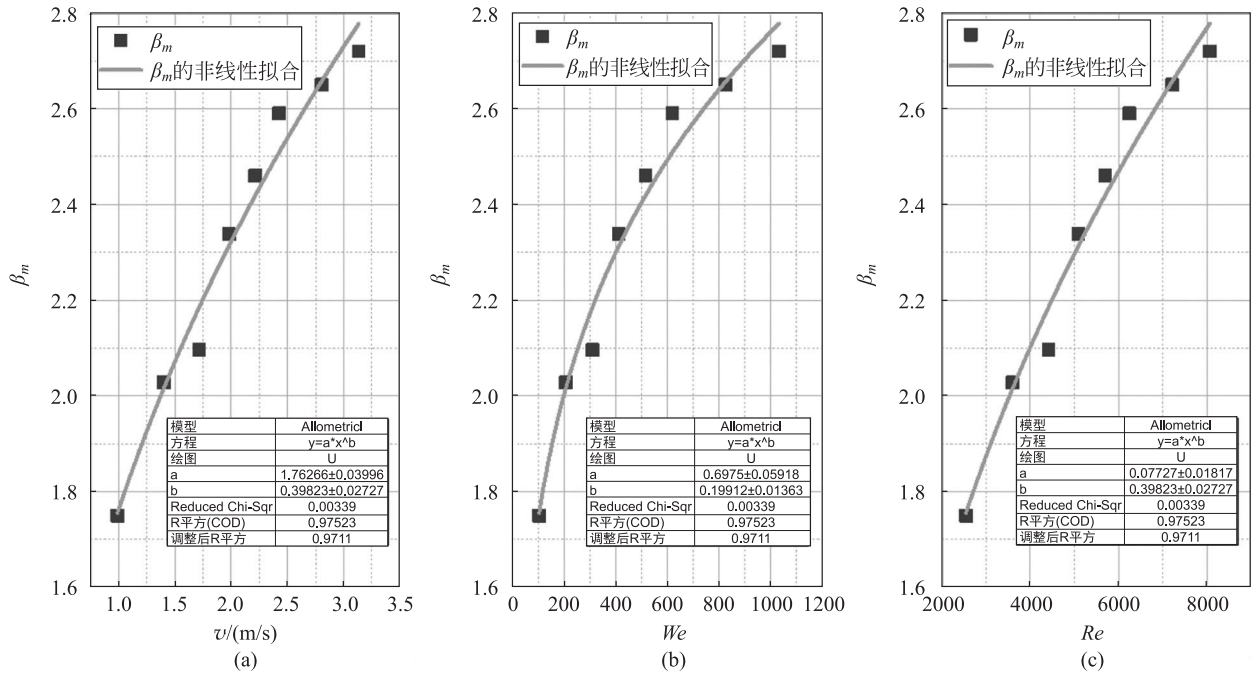


图7 AEO-9液滴在YM80表面最大铺展系数变化曲线
(a) 最大铺展系数与速度; (b) 最大铺展系数与雷诺数; (c) 最大铺展系数与韦伯数

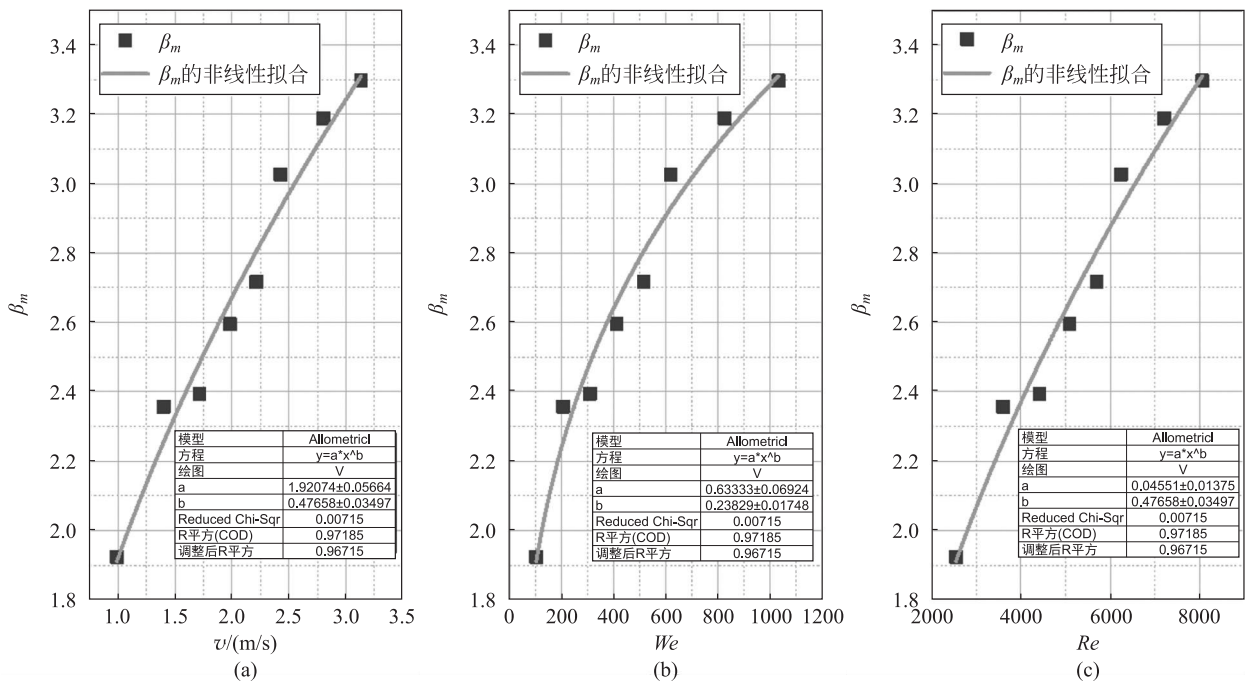


图8 AEO-9液滴在WY80表面最大铺展系数变化曲线
(a) 最大铺展系数与速度; (b) 最大铺展系数与雷诺数; (c) 最大铺展系数与韦伯数

3.4 诗画流体力学破解抽象认知壁垒

针对 We 、 Re 等无量纲参数的教学抽象性,引入“诗画流体力学”跨学科艺术形式,通过视觉化与文学化表达,对比自然与工程中的 $We-Re$ 差

异,破解抽象认知壁垒,构建“参数-现象-工程”的认知桥梁。

- 1) 画作启趣:对比揭示 We 、 Re 物理意义
引入诗画流体力学竞赛书画类获奖作品《芙

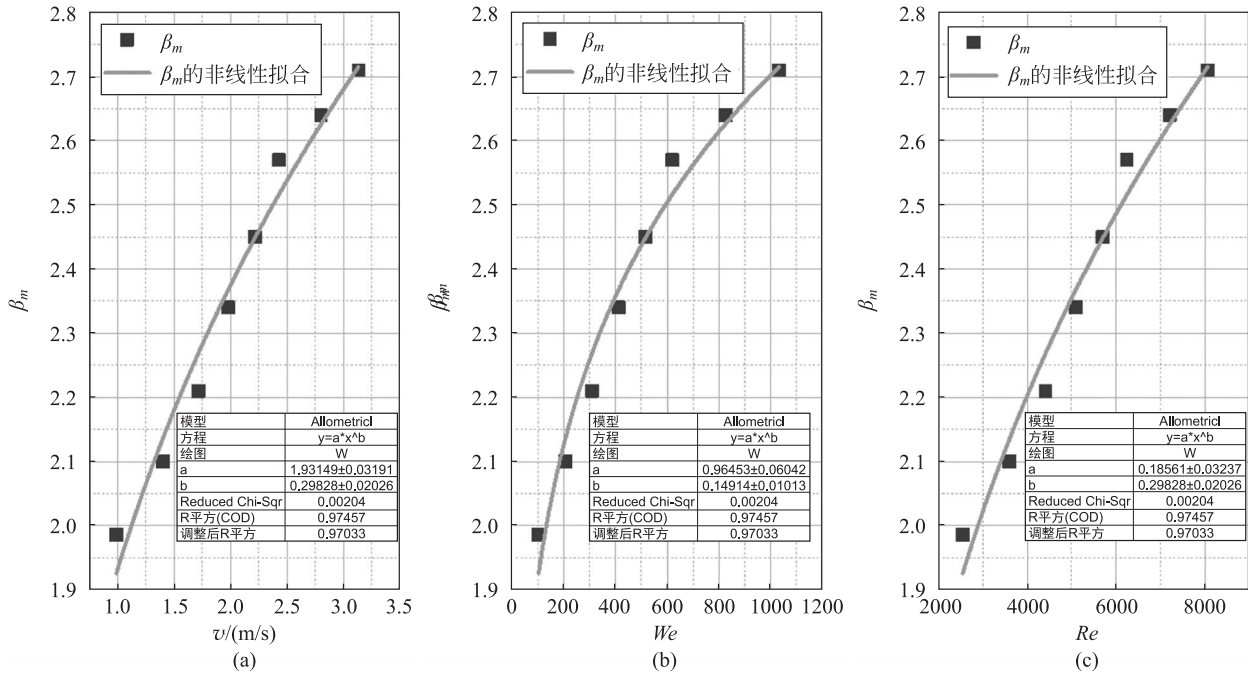


图9 AEO-9液滴在WY200表面最大铺展系数变化曲线
(a) 最大铺展系数与速度; (b) 最大铺展系数与雷诺数; (c) 最大铺展系数与韦伯数

表5 溶液密度、黏度、表面张力、静态接触角测量结果

| | 去离子水 | AEO-9 | SDBS | 205PVA | 217PVA | 224PVA |
|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 密度 $\rho/(g/cm^3)$ | 0.999 | 1.016 | 1.001 | 1.011 | 1.003 | 1.027 |
| 动力黏度 $\mu/(mp \cdot s)$ | 1.278 | 1.303 | 1.283 | 8.533 | 20.067 | 51.733 |
| 表面张力系数 $\sigma/(mN/m)$ | 71.3 | 31.867 | 33.641 | 42.221 | 47.328 | 46.185 |
| YM80煤尘表面接触角 $\theta_1/(^\circ)$ | 85.6 | 41.1 | 62.2 | 76.5 | 77.8 | 78.8 |
| WY80煤尘表面接触角 $\theta_2/(^\circ)$ | 97.3 | 54.4 | 68.9 | 81.8 | 87.8 | 89.1 |
| WY200煤尘表面接触角 $\theta_3/(^\circ)$ | 114.4 | 56.6 | 47.7 | 83.1 | 92.1 | 101.9 |

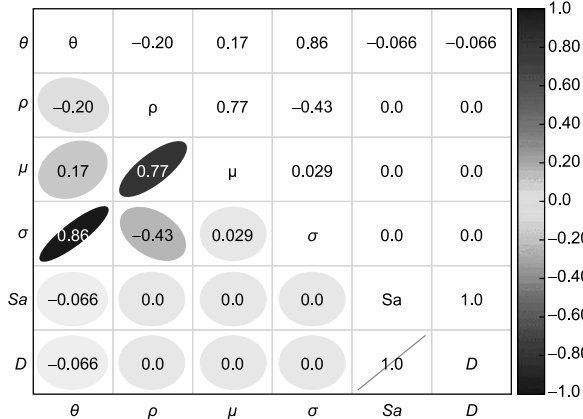


图10 相关性分析热图

蓉朝露》和《童年的七彩肥皂泡》，如图11所示，对比揭示 We 、 Re 物理意义。对比荷叶表面露珠与

煤尘表面 AEO-9 液滴润湿形态，直观呈现表面张力与惯性力的竞争机制，并进行课堂讨论：为何荷叶拒水需低韦伯数，而煤尘润湿需高韦伯数？对比肥皂破裂瞬间与液滴回缩能量耗散过程，直观呈现黏性力和流动的竞争机制，并进行课堂讨论：如何通过黏性力抑制流动？引导学生从无量纲参数出发到分析自然现象，又从自然现象迁移至工程实践优化。

2) 诗词明理：凝练 We 、 Re 工程价值

引入诗画流体力学竞赛诗词类获奖作品《沁园春·涓滴》：“寡力涓滴，不似悬淙，硬撼岩险……携细丝冲极，去液留荷，流连反传”凝练参数工程价值。通过“涓滴”与“悬淙”隐喻缓慢渗透时低韦伯数与剧烈冲击时高韦伯数的工程取舍；利用“细丝冲极”讲解水滴发电中电荷分离中的韦伯数临界



(a)



(b)

图 11 诗画流体力学竞赛书画类作品
(a)《芙蓉朝露》；(b)《童年的七彩肥皂泡》

调控。学生基于 We 、 Re 等无量纲参数,分组解析诗词中的流体力学原理,对比煤尘润湿的 We 、 Re 优化策略,将诗词中的自然现象与实践中的工程优化相结合,讨论“微能源采集”与“煤矿抑尘”的跨领域创新可能性。

3.5 思教融合

为深化课程思政内涵,本研究将科学思维培养、自然环境保护与工程伦理教育融入 We 、 Re 教学体系,通过“理论提炼-案例浸润-实践反哺”三阶模式,实现知识传授、环保宣传与价值引领的同频共振。分析煤尘润湿数据时,引导学生发现问题反思问题,培养学生的批判思考方式;分析画作《芙蓉朝露》中荷叶的超疏水结构以及《童年的七彩肥皂泡》中肥皂的破裂过程,引导学生联系仿生材料研发,强化持之以恒精神;结合水滴发电主题诗词《沁园春·涓滴》,讨论“微能源采集”与“煤矿抑尘”的跨领域创新可能,激发学生创新意识;结

合喷雾降尘工程,鼓励学生分析抑尘所需 We - Re 范围,促进学生的安全与环保意识。

4 结语

本文以流体力学中韦伯数、雷诺数的教学抽象性问题为切入点,以 AEO-9 液滴润湿煤尘为工程实践载体,构建了“思教融合、虚实相济、力美同行、创新创业、实践探索”多维式教学体系,取得以下核心成果。

(1) 通过虚实相济的教学方法,建立了液滴铺展系数与韦伯数、雷诺数的标度律模型,分析了降尘效率与接触角、韦伯数、雷诺数的关系,并进行相关性分析,使学生掌握从“参数定义”到“工程调参”的完整逻辑链。

(2) 以获奖画作《芙蓉朝露》《七彩肥皂泡》对比自然与工程中的 We - Re 差异,破解抽象认知壁垒;通过科学诗词《沁园春·涓滴》凝练参数物理意义,激发跨学科创新思维。

(3) 在知识传授中渗透安全-环保-经济权衡的工程伦理与批判思考方式、持之以恒精神,提升思教融合的育人成效。

(4) 本研究为工科核心参数的教学提供了可复制的创新范式,其“以美启真、以用促学、以思导行”的教学理论,“唤”醒学生潜能与梦想、提高学生“学”习参与度、启发学生“思”考新问题、激励学生“尝”试新方法、促进学生“创”造新成果,对深化新工科建设具有重要参考价值。

参 考 文 献

- [1] 郭鉴锋. 复杂情况下液滴气动变形破碎实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
GUO J F. Experimental study on aerobreakup of droplets under complex conditions[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [2] 李文. 液滴运动的动力学特性及传热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
LI W. Numerical research on dynamics and heat transfer characteristics of droplet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. (in Chinese)
- [3] 李聪, 王佳利, 王志敏, 等. 液滴撞击加热壁面的实验平台设计与教学应用[J]. 实验技术与管理, 2025(1): 238-245.
LI C, WANG J L, WANG Z M, et al. Designing and teaching application of an experimental platform for a droplet impacting on a heated surface[J]. Experimental Technology

- and Management, 2025(1): 238-245. (in Chinese)
- [4] 钟凯, 秦静, 裴毅强, 等. 单液滴撞击薄液膜后冠状结构的破碎过程[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022(4): 1497-1505.
ZHONG K, QIN J, FEI Y Q, et al. Breakup process of crown spray induced by impact on thin oil film of single droplet[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022(4): 1497-1505. (in Chinese)
- [5] 李青林, 王槿, 邓志超, 等. 动态气泡法测量液体表面张力及空气黏滞系数[J]. 物理与工程, 2025(2): 163-169.
LI Q L, WANG J, DENG Z C, et al. Measurement of liquid surface tension and air viscosity coefficient using dynamic bubble method[J]. Physics and Engineering, 2025(2): 163-169. (in Chinese)
- [6] WANG A, SONG Q, YAO Q. Study on inertial capture of particles by a droplet in a wide Reynolds number range[J]. Journal of Aerosol Science, 2016, 93: 1-15.
- [7] 张薇, 宋强, 张帆, 等. 酸洗脱除矿物对煤化学组成及润湿性的影响[J]. 煤炭转化, 2019(3): 1-9.
ZHANG W, SONG Q, ZHANG F, et al. Effects of acid treatment and mineral removal on coal chemical composition and wettability[J]. Coal Conversion, 2019(3): 1-9. (in Chinese)
- [8] 李明, 关子杰. 抑尘液滴与尘堆表面之间的动态接触行为研究[J]. 安全与环境学报, 2021(6): 7.
LI M, GUAN Z J. Research on dynamic contact behavior between dust suppressing liquid drop let and dust pile surface[J]. Journal of Safety and Environment, 2021(6): 7. (in Chinese)
- [9] QUETZERI-SANTIAGO M A, ALFONSO A. Castrejón-Pita, CASTREJON-PITA R. The effect of surface roughness on the contact line and splashing dynamics of impacting droplets[J]. Scientific Reports, 2019(1): 15030.
- [10] YIN Z, SU R, ZHANG W, et al. Oscillation characteristics of single droplet impacting vertically on smooth surfaces using volume of fluid method[J]. Microgravity Science and Technology, 2021(5): 58.
- [11] 罗根华, 李博, 丁莹莹, 等. 煤尘化学组成及结构参数对煤尘润湿性的影响规律[J]. 大连交通大学学报, 2016(3): 64-67.
LUO G H, LI B, DING Y Y, et al. Study on influence of coal dust wettability by chemical composition and structure parameters[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016(3): 64-67. (in Chinese)
- [12] LI C, ZHANG J, HAN J, et al. A numerical solution to the effects of surface roughness on water-coal contact angle[J]. Scientific Reports, 2021(1): 459.
- [13] CLANET C, BEGUIN C, RICHARD D, et al. Maximal deformation of an impacting drop[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 517: 199-208.