



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201810183

中图分类号 X53

文献标识码 A

耿坤宇, 孟敏, 丁焱梁, 等. 石油烃污染土壤颗粒运动状态与脱附关系数值模拟[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1940-1948.
GENG Kunyu, MENG Min, DING Yanliang, et al. CFD numerical simulation of the relationship between particle movement and desorption of petroleum hydro-carbon contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1940-1948.

石油烃污染土壤颗粒运动状态与脱附关系数值模拟

耿坤宇¹, 孟敏¹, 丁焱梁¹, 许萧¹, 杨强^{1,2,*}

1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237

2. 华东理工大学, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237

第一作者: 耿坤宇(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 土壤强化修复技术。E-mail: 13946105435@163.com

*通信作者: 杨强(1983—), 男, 博士研究生, 教授。研究方向: 三相分离技术。E-mail: qyang@ecust.edu.cn

摘 要 针对土壤中石油烃污染的脱附, 采用计算模拟方法对污染土壤颗粒的运动状态与脱附关系进行了研究。结果表明, 颗粒中污染物的脱附效果与其运动状态有关, 脱附效果由低至高排序为颗粒静止<直线运动<螺旋运动, 且颗粒做螺旋运动对污染物的脱附较其他运动状态更为均匀; 螺旋运动的脱附效果与旋向无关, 但与运动圈数有关, 单位时间内螺旋运动的圈数越多, 颗粒的脱附效果越好。基于上述结果, 设计了一种管式涡流结构以期实现颗粒的螺旋运动, 实现了土壤颗粒中石油烃污染物的强化脱附。利用 Fluent 模拟了不同管式涡流结构的流体流动形态及颗粒运动轨迹, 发现螺旋叶片的旋向能够调控颗粒的运动旋向, 螺旋叶片的导程能够调控颗粒的运动圈数。

关键词 石油烃; 土壤颗粒; 运动状态; 脱附; 数值模拟

石油是一种由饱和烃、芳香烃、胶质及沥青质等组成的复合体, 故石油污染具有环境体系复杂、波及范围广、治理困难、修复周期长、产生危害大的特征。石油烃污染物进入土壤后会改变土壤的理化性质, 威胁地下水安全, 致使动植物死亡, 甚至危害人类健康^[1-3]。石油在加工和运输过程中产生的三泥、罐底泥、船舱底泥等油泥污染物中主要成分都是石油污染土壤和泥沙^[4-6], 我国每年因石油造成的污染土壤近 1×10^5 t, 所以石油烃污染土壤的修复治理已迫在眉睫。

目前, 污染土壤的修复方法主要分为物理修复、化学修复和生物修复。常见的修复方法有土壤洗涤法^[7-8]、化学氧化法^[9-10]、电动修复法^[11]、生物强化法^[12-13]、机械洗脱法等。其中, 机械洗脱法以其修复周期短、修复彻底而被广泛应用于土壤修复中。机械洗脱法的前期研究主要集中在超声、微波、喷射反应^[14-17]等方面, 这些技术均通过外加场强的方法进行污染物的脱附, 故普遍存在高能耗的弊端^[18]。目前, 有研究^[19]表明颗粒运动可以提高其中污染物的脱附效果。因此, 在低能耗下, 依靠特殊物理结构调控土壤颗粒自身运动状态强化污染物脱附, 对于石油烃污染土壤的修复具有重要意义。

收稿日期: 2018-10-30; 录用日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1801904-02, 2018YFC1802704); 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(51722806)

本研究将使用 CFD 软件 Fluent(UDF) 对石油烃污染土壤颗粒的不同运动状态进行模拟, 得到颗粒运动状态与脱附效果之间的关系, 并基于此结果, 设计一种管式涡流结构, 满足颗粒的运动状态, 探究在不同结构参数下, 颗粒运动状态的变化及石油烃脱附效果。

1 CFD 模拟研究

1.1 颗粒运动状态与脱附关系 CFD 模拟

1.1.1 模型建立及网格划分

以流体仿真的方法研究颗粒运动状态与脱附效果之间的关系, 利用 SW 软件建立三维几何模型(如图 1 所示)。其中, 直径为 2 mm 的小球代表土壤颗粒, 内径为 25 mm 且长度为 75 mm 的圆柱代表管路。

利用 ICEM 对几何模型进行网格划分, 设置小球与圆柱之间的封闭区域为 SUR, 小球所在的封闭区域为 SUR2, 球面为 interior。采用四面体网格, 设置网格密度为 $8.6 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 并保证网格质量均在 0.45 以上, 这样才符合计算要求。划分后的网格如图 2 所示。为消除网格数目对计算结果的影响, 对网格进行无关性检测。进一步增大网格密度, 以脱附后土壤颗粒含油量为特征参数, 通过比较发现, 增大网格密度后, 误差始终保持在 1% 以内。综合考虑计算精度及计算成本, 选取网格密度为 $8.6 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ 。

1.1.2 求解模型的选择及设置

使用 Fluent 中的组分输送模型, 通过计算每种物质的扩散、对流以及反应热源守恒方程来模拟混合和组分的输运。污染土壤颗粒的洗脱过程就是将污染物由颗粒转移到洗涤液中的过程, 故选用组分输送模型来模拟这一过程。选择混合组分为柴油-丙酮, 选择密度为体积-质量混合定律, 选择质量扩散率为 $2.88 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于不涉及传热过程, 比热、热导率等其余参数均保持默认值。

土壤颗粒是一种典型的多孔介质, 故需要开启多孔介质模型对小球封闭区域 SUR2 进行定义。多孔介质模型的本质是在标准动量方程的基础上, 添加了一个动量方程源项。动量源项又由黏性损失项和惯性损失项组成, 计算方法如式 (1) 所示。

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (1)$$

式中: S_i 为 $i(x, y, z)$ 动量方程的源项; $|v|$ 为速度; D 、 C 为矩阵。

Fluent 中动量源项表现形式分为 2 种: 一种为一元二次方程形式; 另一种为幂函数形式。本研究多孔介质模型采用一元二次方程形式, 计算方法如式 (2) 和式 (3) 所示。

$$S_i = \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (2)$$

$$A = 1/\alpha \quad (3)$$

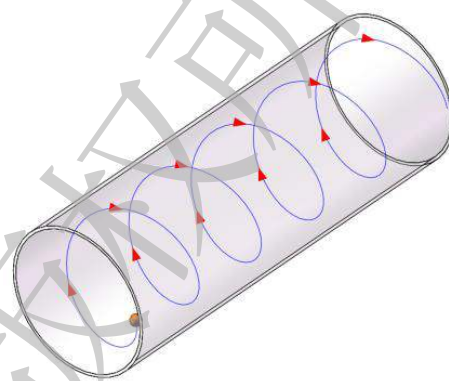


图 1 三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional geometric model

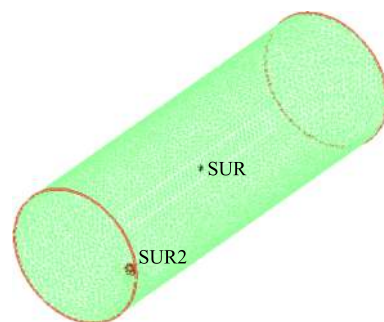


图 2 ICEM 网格

Fig. 2 ICEM meshing

式中： α 为渗透系数； C_2 为惯性阻力系数； v_i 为表观速度； A 为黏性阻力系数。

根据经验，设置黏性阻力系数为 $2\times10^{12}\text{ m}^{-2}$ ，惯性阻力系数为 $2\times10^{12}\text{ m}^{-1}$ 。由于模拟过程不涉及传热，故传热设置保持为默认值。

湍流模型中常用的方程模型如表 1 所示。模拟过程中，只有颗粒的运动，流体无旋转运动。综合考虑计算精度及成本，湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型。

1.1.3 动网格及求解器的设置

动网格用于解决流场形状因边界的运动而随时间变化的问题。动网格的设置首先要确定网格的更新过程。动网格的网格更新方式有弹簧光滑、扩散光滑、局部网格重构等多种方法。弹簧光滑相对于扩散光滑计算量小，且适用于四面体网格，但其无法改变网格拓扑结构，边界发生大幅运动时，易产生负体积，常与局部网格重构方法结合使用以模拟旋转运动过程，故选择弹簧光滑及局部网格重构的方法进行网格更新。更新后动网格质量的好坏主要由模型的参数设置决定。经过多次调整，最终确定弹簧常数为 0.6，Laplace 节点松弛因子为 0.4，其余采用默认值。重构方法选择局部单元重构，重构参数采用默认值。其次是设置动网格运动区域，设置 SUR2 及球面为运动区域，形式为刚体。利用 UDF 中的 Define_CG_MOTION 宏设置颗粒的运动形态，分别为静止、直线运动、1 圈顺时针螺旋运动、2 圈顺时针螺旋运动、2 圈逆时针螺旋运动、4 圈顺时针螺旋运动，并保持土壤颗粒在管路中运动的位移及停留时间相同。

求解器采用三维双精度解算器，压力速度耦合项采用 SIMPLE 算法。由于模拟为瞬态模拟，故离散格式采用精度更高的二阶迎风格式。设置完成并进行初始化后，利用 Patch 功能，将柴油组分赋予到 SUR2 上，柴油初始含量设置为 20%。

1.2 管式涡流结构调控下流场及颗粒轨迹 CFD 模拟

1.2.1 模型建立及网格划分

管式涡流结构由圆柱形直管和螺旋叶片 2 部分组成，如图 3 所示。根据螺旋叶片的导程及旋向不同可分为 3 种形式，如表 2 所示。对模型进行网格划分并进行无关性检测，最终确定网格密度为 $4.43\times10^8\text{ m}^{-3}$ ，网格质量保持在 0.4 以上。

1.2.2 求解模型的选择及设置

Fluent 中离散相模型 (DPM) 可以通过对拉格朗日坐标系下颗粒作用力微分方程进行积分，进而得出连续相湍流涡旋作用对颗粒运动轨迹的影响。故本研究利用 DPM，研究在管式涡流结构的作用下土壤颗粒的运动轨迹。设置颗粒形式为惰性颗粒，射流源类型选择点源注射，其余保持默认值。其中，颗粒初始速度绝对值为 $0.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，颗粒的密度为 $2\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，颗粒直径为 2 mm。

由于模拟流体存在旋转运动，而相比于标

表 1 湍流模型比较

Table 1 Comparison of turbulence models

湍流模型	适用范围
标准 $k-\varepsilon$ 模型	完全湍流的流动过程模拟，计算量小
重整化群 $k-\varepsilon$ 两方程模型	强流线弯曲、漩涡和旋转等，计算量大
可实现型 $k-\varepsilon$ 模型	旋转均匀剪切流，自由流(射流和混合层)，腔道流动和边界层流动等，计算量大

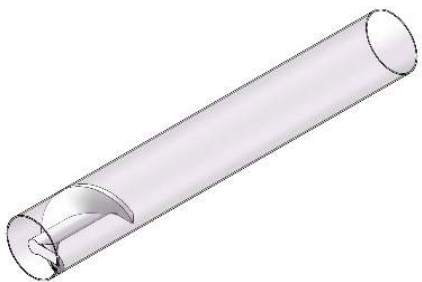


图 3 三维几何模型

Fig. 3 Three-dimensional geometric model

表 2 管式涡流结构形式

Table 2 Tube vortex structure

序号	叶片旋向	叶片导程/mm
1	左旋	37.5
2	右旋	37.5
3	左旋	18.75

准 $k-\varepsilon$ 模型, 可实现型 $k-\varepsilon$ 模型可以更好地解决旋转剪切流动和漩涡问题^[20]。考虑到计算精度, 故湍流模型选择可实现型 $k-\varepsilon$ 模型。

1.2.3 边界条件及求解器设置

入口边界条件为速度入口, 液相流速为 $0.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据计算, 设置水力直径为 2.5 mm , 湍动强度为 5% 。出口边界条件为压力出口, 压力为标准大气压。出口水力直径为 2.5 mm , 湍动强度为 5% 。入口及出口的离散相边界条件为逃逸, 壁面的离散相边界条件为反射。

求解器采用三维双精度解算器, 压力速度耦合项采用 SIMPLE 算法。离散格式采用二阶迎风格式。设置完成后进行初始化, 通过迭代计算得到管式涡流结构作用下的流场及颗粒运动轨迹。

2 结果与分析

2.1 颗粒运动状态与脱附关系分析

2.1.1 颗粒运动状态与脱附关系模拟分析

土壤颗粒初始含油量三维云图如图 4(a) 所示。图 4(b)~(g) 反映了土壤颗粒经不同状态的运动后颗粒内部最终含油量情况。分析图 4(a) 和图 4(b) 可知, 对于静止的颗粒, 初始状态与最终状态相差不大, 含油量的变化并不明显。这表明单独依靠浸泡的方法, 石油烃污染土壤的脱附效果较差。分析图 4(b) 和图 4(c) 可知, 相对于静止状态, 运动颗粒的除油率更高, 脱附效果更好。推测这是由于相比静止状态, 运动的颗粒会受到液相冲刷或剪切等力的作用, 导致石油烃污染物从颗粒上脱附。且随着颗粒的运动, 颗粒表面液相不断更新, 增强了传质效果。分析图 4(c)~(e) 可知, 运动颗粒的脱附效果与颗粒的运动状态有关, 螺旋运动颗粒的脱附效果要优于直线运动。推测这是由于相比直线运动, 螺旋运动除了受到冲刷及剪切力外, 还受到离心力的作用, 强化了石油烃污染物的脱附。且螺旋运动颗粒表面的液相更新速率更快, 传质更为剧烈。分析图 4(d)、图 4(e) 和图 4(g) 可知, 螺旋运动颗粒的脱附效果与相同时间下颗粒做螺旋运动的圈数有关。相同时间下做螺旋运动的圈数越多, 颗粒的脱附效果越好。推测这是由于相同时间下, 颗粒做螺旋运动的圈数越多, 颗粒表面的液相更新速率越快, 传质越剧烈。相应地, 颗粒的脱附效果越好。分析图 4(e)

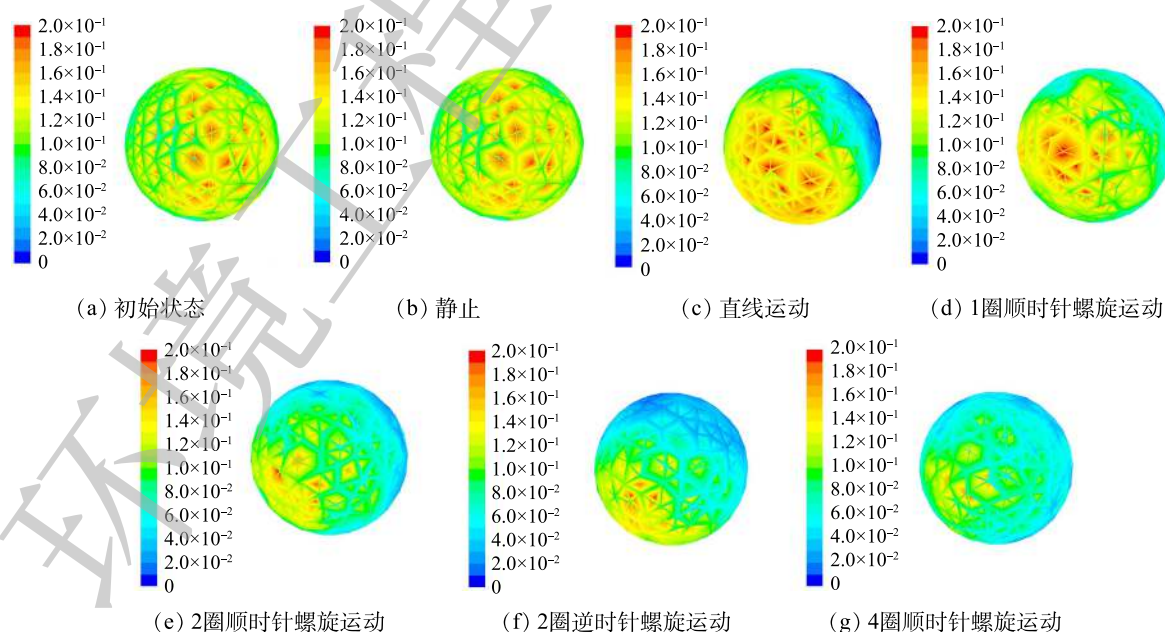


图4 土壤颗粒内部含油量三维云图

Fig. 4 Three-dimensional cloud image of oil content in soil particles

和图4(f)可知,相同圈数下,顺时针螺旋运动颗粒与逆时针螺旋运动颗粒的脱附效果相差不大。这表明颗粒的脱附效果与螺旋运动的旋向无关。

三维云图只对土壤颗粒含油量的始末状态进行了分析。为研究土壤颗粒含油量随时间的详细变化情况,将Fluent中的监测数据导出,利用Origin2017进行数据整理,整理后数据如图5所示。由图5可知,运动颗粒含油量-时间曲线斜率的绝对值随着时间的增长而逐渐减小。这表明随着时间的增长,颗粒的脱附效率逐渐降低。推测这是因为随着脱附时间的增长,颗粒含油量逐渐减小,颗粒与液相中石油烃污染物的浓度梯度减小,扩散过程减弱进而降低了脱附效率。

分析图5还可以发现,对于直线运动和做1圈顺时针螺旋运动的颗粒,脱后含油量相差不大。但分析脱后颗粒的正面(以 x 、 y 、 z 坐标轴正方向围成的颗粒表面)含油量云图(图4(c)和图4(d))及反面(以 x 、 y 、 z 坐标轴负方向围成的颗粒表面)含油量云图(图6)后可知,无论颗粒是做直线运动还是螺旋运动,脱后颗粒中石油烃污染物均存在浓度梯度。但螺旋运动颗粒的脱附相对于直线运动更为均匀。

图7反映了土壤颗粒初始状态以及经不同状态的运动后,颗粒表面最终含油量情况。对比图4与图7发现,对于被石油烃完全浸透的单一土壤颗粒而言,颗粒内部油含量要高于表面油含量。且内部油的脱附较表面油更为困难,表面油含量很低时,内部油可能仍然保持较高浓度。

2.1.2 实验验证

为了验证模型的可靠性,本研究单独做了运动状态与脱除率关系实验。为便于颗粒运动形态的控制,防止其以小颗粒的形式分散在洗涤液中,实验以强度大、孔隙发达、对污染物吸附效果好的麦饭石作为实验材料,经过除杂、筛分后,将麦饭石加入过量的柴油中,并不断搅拌,使麦饭石表面及内部孔道被柴油充分浸润至饱和。经充分搅拌后,在常温避光条件下保存备用。实验时,将污染后的麦饭石颗粒置于金属筛网上沥干不能被吸收的柴油,然后将制备好的颗粒分别加入到不同结构的管式涡流洗涤器中,并以相对脱除率作为研究对象,将模拟结果与实验结果进行了比较,结果如图8所示。其中相对脱除率的计算如式(4)所示。

$$E = \frac{E_n}{E_{\max}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: E 代表相对脱除率; E_n 代表该运动状态下的脱除率; $E_{\max}$ 代表所有运动状态中最大脱除率。

由图8可知,模拟值与实验值有着相似的趋势且吻合程度较好。由此说明,本研究模拟在颗粒运动状态与脱附关系的趋势上具有很强的可靠性。

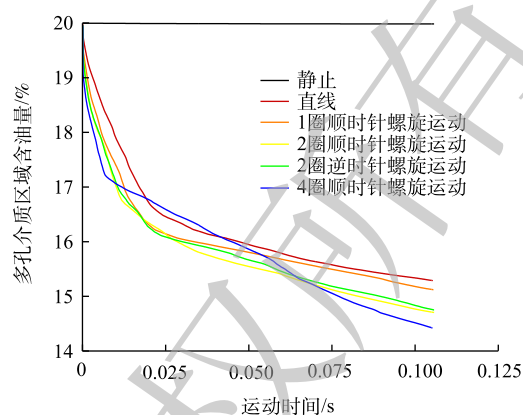


图5 不同运动形态下土壤含油量变化曲线

Fig. 5 Curve of soil oil content under different motion patterns

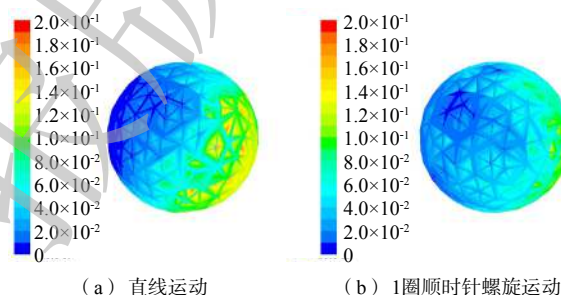


图6 土壤颗粒反面含油量三维云图

Fig. 6 Three-dimensional cloud image of oil content on the reverse side of soil particles

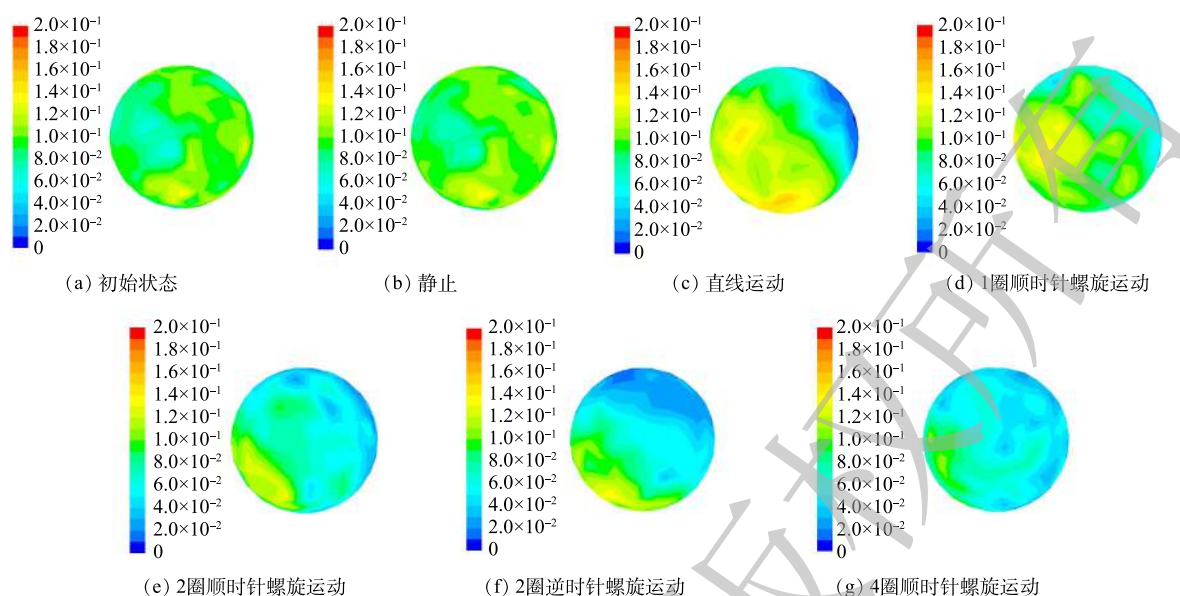


图7 土壤颗粒表面含油量三维云图

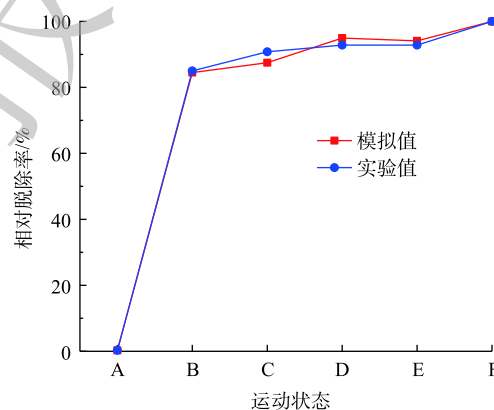
Fig. 7 Three-dimensional cloud image of oil content on the surface of soil particles

2.2 管式涡流结构调控下的流场分析

分别截取直径为 D_0 的直管 $V1(z=0)$ 、 $V2(z=0.75D_0)$ 和 $V3(z=1.6D_0)$ 处的截面, 获取截面上的速度矢量图, 如图 9 所示。由图 9(b) 和图 9(c) 可知, 当流体刚进入直管时, 速度方向与轴线方向平行, 流体呈水平流动。由图 9(d) 可知, 在管式涡流结构的调控下, 流体由水平运动变为旋转运动, 且旋转方向与螺旋叶片的旋向一致。并且在接近螺旋叶片处湍动加剧, 产生漩涡。由图 9(e) 可知, 流体流过螺旋段后, 仍保持旋转运动且伴随着涡的产生, 但强度相对于螺旋段有所减弱。由图 9 综合分析可知, 螺旋叶片可以通过自身特殊的几何结构, 调控流体运动状态, 使流体由水平流动变为螺旋转动。

2.3 管式涡流结构调控下的颗粒轨迹分析

图 10 反映了颗粒在不同管式涡流结构调控下的运动轨迹。由此可知, 3 种结构参数不同的管式涡流结构都能调控颗粒做螺旋运动。但不同的结构参数会产生不同的颗粒运动轨迹。螺旋叶片的旋向会调控颗粒螺旋运动的旋向, 螺旋叶片的导程会调控颗粒在单位位移下螺旋运动的圈数。推测这是由于螺旋叶片可以调控管内流体的流动形态, 产生涡流。颗粒在涡流的作用下, 进而也会做螺旋运动。不同结构参数的管式涡流结构会产生不同的流体运动状态, 进而会导致不同的颗粒运动轨迹。



注: A. 静止; B. 直线运动; C. 1圈顺时针螺旋运动;
D. 2圈顺时针螺旋运动; E. 2圈逆时针螺旋运动;
F. 4圈顺时针螺旋运动。

图8 模拟与实验结果比较

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results

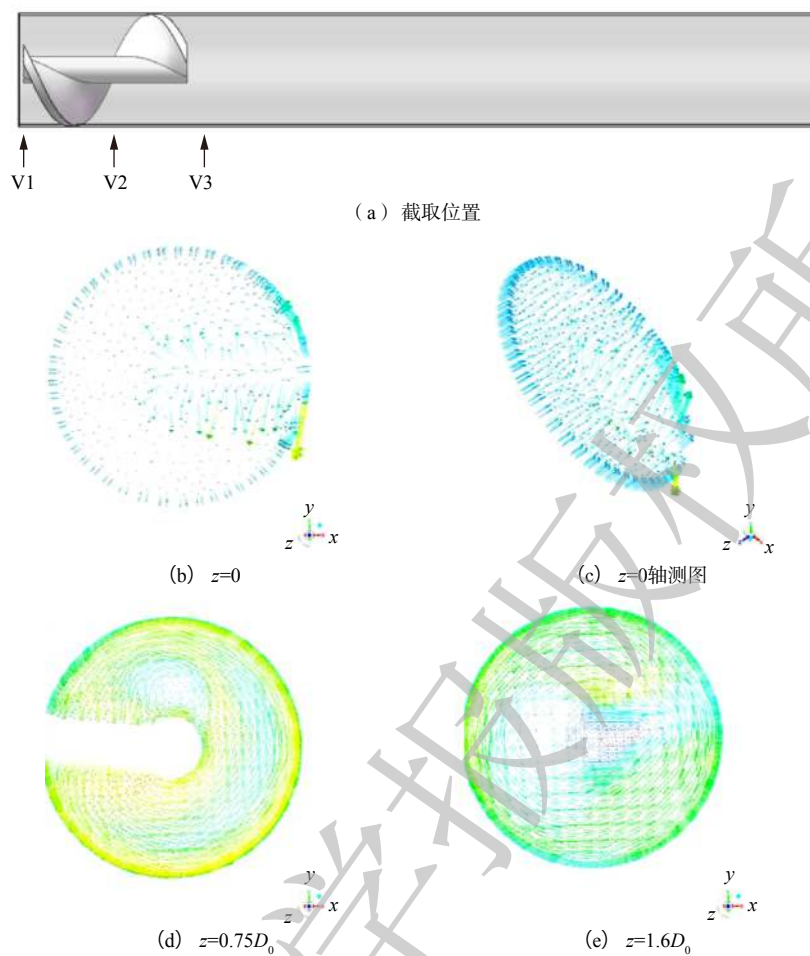


图9 截取位置及截面速度矢量图

Fig. 9 Interception position and cross section velocity vector

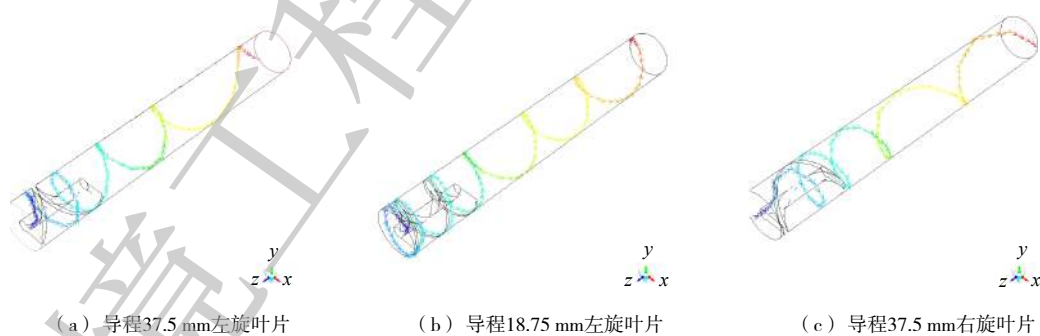


图10 颗粒运动轨迹

Fig. 10 Particle motion trajectory

3 结论

1) 不同运动状态的土壤颗粒脱附效果不同, 脱附效果由低至高排序为静止<直线运动<螺旋运动。螺旋运动的脱附效果与旋向无关但与运动圈数有关。相同时间下做螺旋运动的圈数越多, 颗粒的脱附效果越好。但无论何种运动方式, 随着时间的增长, 颗粒的脱附效率都会逐渐降低。

2) 无论颗粒是做直线运动还是螺旋运动, 脱附后颗粒中石油烃污染物均存在浓度梯度。但相

对于直线运动,螺旋运动脱附后颗粒中污染物的浓度梯度较小,脱附更为均匀。

3) 对于被石油烃完全浸透的单一土壤颗粒而言,颗粒内部油含量要高于表面油含量。且内部油的脱附较表面油更为困难,表面油含量很低时,内部油可能仍然保持较高浓度。

4) 通过添加螺旋叶片,可以改变流体的流动形态,产生涡流,进而调控颗粒做螺旋运动。不同结构的螺旋叶片会产生不同的颗粒运动轨迹。螺旋叶片的旋向能够调控颗粒的运动旋向,螺旋叶片的导程能够调控颗粒的运动圈数。

5) 通过设置管式涡流结构,能够调控颗粒做螺旋运动。通过运动状态的改变,能够增强土壤颗粒中污染物的脱附。这为今后低耗、高效修复石油烃污染土壤提供了新思路。但仿真模型只考虑到流体与颗粒间的传质作用,未考虑到流体对颗粒的剪切力以及颗粒转动产生的离心力等力的作用影响。后续工作将继续针对模型进行优化,使模拟结果更为精确。

参 考 文 献

- [1] BUZMAKOV S, EGOROVA D, GATINA E. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 38-48.
- [2] KHODARY S M, NEGM A M, TAWFIK A. Geotechnical properties of the soils contaminated with oils, landfill leachate, and fertilizers[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(2): 13-29.
- [3] ZHU H, GAO Y, LI D. Germination of grass species in soil affected by crude oil contamination[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(6): 567-573.
- [4] MULLAKAEV M S, VEXLER G B, MULLAKAEV R M. Sonochemical technology for separating oil sludge and oil-contaminated soil[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2018, 36(8): 604-608.
- [5] EGAZAR'YANTS S, VINOKUROV V, VUTOLKINA A, et al. Oil sludge treatment processes[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2015, 51(5): 506-515.
- [6] LIU C, ZHANG Y, SUN S, et al. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 170: 14-20.
- [7] GITIPOUR S, HEDAYATI M, MADADIAN E. Soil washing for reduction of aromatic and aliphatic contaminants in soil[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2015, 43(10): 1419-1425.
- [8] LI G, GUO S, HU J. The influence of clay minerals and surfactants on hydrocarbon removal during the washing of petroleum-contaminated soil[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 286: 191-197.
- [9] WU H, SUN L, WANG H, et al. Persulfate oxidation for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(2): 851-857.
- [10] CHEN K, CHANG Y, CHIOU W. Remediation of diesel-contaminated soil using in situ chemical oxidation (ISCO) and the effects of common oxidants on the indigenous microbial community: A comparison study[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2016, 91(6): 1877-1888.
- [11] 李婷婷, 郭书海, 王加宁, 等. 周期切换电极极性对电动-微生物修复石油污染土壤的影响[J]. *环境工程*, 2016, 34(1): 159-163.
- [12] LOMZA P, POSZYTEK K, SKŁODOWSKA A, et al. Evaluation of bioremediation of soil highly contaminated by petroleum

- hydrocarbons[J]. *New Biotechnology*, 2016, 33: 141.
- [13] 张秀霞, 滕芝, 吴佳东. 生物强化修复石油污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(4): 1573-1577.
- [14] FENG D, LORENZEN L, ALDRICH C, et al. Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods[J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14(9): 1093-1100.
- [15] SON Y, CHA J, LIM M, et al. Comparison of ultrasonic and conventional mechanical soil-washing processes for diesel-contaminated sand[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(4): 2400-2407.
- [16] 刘琰, 王殿生, 曾秋孙, 等. 微波修复石油污染土壤升温特性影响因素的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(4): 898-902.
- [17] GAO Y, DING R, WU S, et al. Influence of ultrasonic waves on the removal of different oil components from oily sludge[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(14): 1771-1775.
- [18] 孙荣江, 侯峰, 丁焱梁, 等. 重金属污染土壤旋流洗脱设备的设计及性能评估[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(4): 1208-1217.
- [19] HUANG Y, LI J, ZHANG Y, et al. High-speed particle rotation for coating oil removal by hydrocyclone[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 177: 263-271.
- [20] 竺嘉斌. 变径式微混器结构参数的优化研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.
- (本文编辑: 金曙光, 王萌萌, 郑晓梅)

CFD numerical simulation of the relationship between particle movement and desorption of petroleum hydro-carbon contaminated soil

GENG Kunyu¹, MENG Min¹, DING Yanliang¹, XU Xiao¹, YANG Qiang^{1,2,*}

1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

*Corresponding author, E-mail: qyang@ecust.edu.cn

Abstract In this study, the CFD software Fluent was used to study the relationship between the motion status and desorption efficiency of petroleum hydrocarbon contaminated soil particles. The results showed that the pollutant desorption efficiency was related to particle motion status, and the desorption efficiency ranked in ascending order as stationary<linear motion<spiral motion. The desorption effect created by spiral motion status was more evenly around the particle than that by other motions. The desorption effect of particles in spiral motion was independent of the direction of rotation but related to the number of revolving circles. The more the number of turns of spiral motion, the better the desorption effect of particles. Based on these findings, a tube with spiral fans was designed to create the spiral motion of particles to achieve the enhanced desorption of pollutants. Fluent was used to simulate the fluid flow patterns and particle motions trajectory of different spiral structures. It was found that the rotating direction and the lead of the spiral fans could regulate the direction and number of revolving circle of particles, respectively.

Keywords petroleum hydrocarbons; soil particles; motion state; desorption; numerical simulation