

泄漏油品在雨水作用下渗透范围模拟计算

马跃 王岳 宋士祥 张国军 孙宪航

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113000

摘要:

对埋地管道下部泄漏油品在雨前、雨中和雨后的不同水分分布土壤中油品渗透扩散进行模拟分析,借助 CFD 软件建立土壤多孔介质中油水两相流动的三维流动传质耦合模型。模拟计算结果表明:油品在地下渗透扩散范围受水分分布影响明显,泄漏油品在下雨前的土壤中地下扩散区域以不倒翁状向四周渗透;雨中泄漏油品受雨水冲带后在地下四处流窜并以极不规则形状区域向四周扩散;雨后泄漏油品以烧瓶状区域向四周扩散。在雨前、雨中和雨后三种工况下,扩散速率稳定后,雨后的泄漏范围及地表扩散面积均是最小;雨中油品泄漏范围最大且增长速率比雨前高约 3%;雨前油品地表扩散范围最大且增长速率比雨中高约 2%。

关键词:

油品;水分分布;扩散范围;渗透;模拟;泄漏;冲带

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)04-0080-04

0 前言

埋地管线泄漏环境复杂多变,在寒冷地区泄漏油品因温度低而部分凝固^[1],在炎热地段因温度高而蒸发,在多雨地段受雨水冲带和自身重力作用而四处流窜等,给污染范围的确定造成了巨大困难。目前对于油品泄漏范围的判断方式^[2]主要集中于土壤取样分析和数值模拟。取样法虽有效,但其操作周期较长且无法准确估算出地下土壤污染范围;模拟计算主要集中于对管道二维径向与土壤区域的传热传质研究,为计算方便,常常忽略轴向的研究,这影响了整个模拟计算的精度^[3-5]。针对油品泄漏问题建立土壤多孔介质中油水两相流动的三维流动传质耦合模型,利用 CFD 仿真软件模拟分析了泄漏油品在雨前、雨中和雨后土壤中不同水分分布下油品渗透规律计算不同时刻油品在地下、地表的扩散范围。

1 计算模型

1.1 埋管泄漏的物理模型

全国成品油管线途经区域土壤类型主要分为粘质与砂质粉土两种,粘质粉土的特点是含水率略高而孔隙度偏低,反之为砂质粉土的特性。本文研究建立的是三维粘质粉土埋管下部泄漏模型,泄漏模型土壤区域采用结构化六面体网格和非结构化四面体网格进行单元划分。模拟埋地管道在雨前、雨中和雨后土壤中不同水分分布时油品的扩散情况。

1.2 数学模型

土壤作为一种多孔固体介质,自然状态下,孔隙中含有部分湿空气、液态水等^[6],在地表温度与地下温度明显差异及流体自身重力作用下,孔隙中流体的分布呈上下不均的梯次分布,流体在其中流动将受到毛细作用力、表面张力和重力的综合作用。埋地管道发

收稿日期:

2012-02-10

基金项目:

辽宁省自然科学基金资助项目(20082186)

作者简介:

马跃(1986-),男,吉林通化人,硕士研究生,主要从事油品泄漏污染土壤范围估算及土壤处理的研究。

生泄漏时,油品在多孔介质中的流动比较复杂,以下将应用有限容积法处理该类问题^[7-8]。油品渗流符合达西定律,根据控制体理论^[9],建立质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i U) = 0 \quad (1)$$

式中 U ——流体速度, m/s;

ρ_i ——流体密度, kg/m³;

t ——时间, s。

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_i u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i uw)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\mu}{\alpha} u + C_2 \frac{1}{2} \rho_i |u| u \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_i v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i vw)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho_i |v| v \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_i w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i ww)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \\ & \left(\frac{\mu}{\alpha} w + C_2 \frac{1}{2} \rho_i |w| w \right) - \rho_i g \end{aligned} \quad (4)$$

式中 u —— x 方向的速度分量, m/s;

v —— y 方向的速度分量, m/s;

w —— z 方向的速度分量, m/s;

α ——多孔介质的渗透率, $\alpha = D_p^2 \varepsilon^3 / 150(1-\varepsilon)^2, m^2$;

C_2 ——惯性损失系数, $C_2 = 3.5(1-\varepsilon) / (D_p \varepsilon^3), m^{-1}$;

ε ——多孔介质的孔隙比;

p ——多孔介质的孔隙压力, Pa;

D_p ——多孔介质粒子的直径, mm;

μ ——流体的动力粘度, Pa·s。

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_i E_i + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho_i E_i + p)) = \\ & \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - (\sum_j h_j \vec{J}_j) + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})] + S_i^h \end{aligned} \quad (5)$$

式中 E_i ——流体总能, J;

E_s ——多孔介质总能, J;

γ ——多孔介质孔隙度;

S_i^h ——流体焓源项, J/kg;

k_{eff} ——多孔介质的有效导热率, $k_{eff} = \gamma k_i + (1-\gamma) k_s, W/(m \cdot K)$;

k_i ——流体热导率, $W/(m \cdot K)$;

k_s ——固体热导率, $W/(m \cdot K)$ 。

1.3 边界条件设定

埋管底部泄漏口设置恒定常量为速度入口 (Velocity Inlet), 雨前土壤含水率利用 UDF 编写程序计算各深度水分分布, 地表空气边界设置大气压为压力出口 (Pressure Outlet); 雨中雨水向下渗透可视为地表压力将雨水压入土壤孔隙向下扩散, 地表空气边界设置恒定压力为压力入口 (Pressure Inlet); 雨后泄漏模拟将雨水灌入土壤数日后使土壤含水处于饱和状态后管道再泄漏, 地表空气边界设置大气压为压力出口 (Pressure Outlet)。

2 数值模拟与结果分析

根据工程实测数据参数, 本文模拟计算在粘质土壤地区覆土深度 2 m, DN 500 mm 的成品油管道泄漏, 其埋管下部存在一平均直径 3 cm 的腐蚀穿孔泄漏口, 泄口流速为 2 m/s。土壤孔隙度为 0.45, 其土壤颗粒平均直径 0.019 mm, 计算区域为 6 m×6 m×6 m。

雨前油品在土壤中泄漏 300 s 时的油品浓度云图见图 1。由于土壤中水分呈上下梯次分布, 越靠近地表, 其水分蒸发量越大, 所以水分含量分布相对稀疏, 泄漏之初, 油品会在漏口压力、自身重力及表面张力等综合作用下, 驱替土壤中水分向四周扩散。随着油流持续进入土壤多孔介质, 受漏口压力及表面张力的作用明显下降, 此时毛细阻力增大, 在与重力综合作用下, 再向下方缓慢扩散, 但深度越大水分含量越高, 水分对油品向上的反作用力越明显, 最终向下的扩散将处于动态平衡的状态, 而漏口上部水分含量低, 在尾流效应作用下, 油品克服重力向上渗透, 整体泄漏的区域以不倒翁状逐渐向四周扩大直至地表。

雨中雨水向下渗透过程中冲带油品泄漏 300 s 时

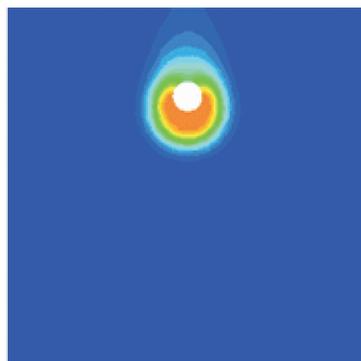


图 1 雨前泄漏扩散

的扩散云图见图2。与无雨水冲带时的扩散相比,雨水在土壤孔隙中向下方含水非饱和区域扩散流动,与泄漏油品相遇时,油品多受一个向下的冲带作用力,当冲带作用力大于油品分子在土壤颗粒表面的附着力后,就使得油品分子与水分子粘合后向下扩散运动。泄漏的初始阶段,扩散深度会略大于无水冲带,但由于油品的密度小于雨水密度,随着雨水向地下持续涌入,水分子间的粘合力明显大于水分子与油品分子的粘合力,以致被雨水冲带到深处的油流会被逐渐向下填充的雨水挤到上部,在诸多作用力的综合作用下,油品的运移变得杂乱无章,整体扩散范围以一种极不规则形状向四周扩散。

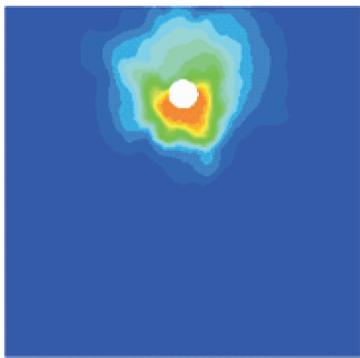


图2 雨中雨水冲带扩散

雨后土壤含水处于饱和状态时油品泄漏300 s时的扩散云图见图3,泄漏前土壤中所有空隙均被水占据,土壤的通透性极低,泄漏过程中油流凭借漏口压力排挤孔隙中的水分后,其粘度、密度迅速降低,表面张力及毛细驱动力对油流的扩散影响降低,以致所受扩散动力相对单一。在泄漏前期,以圆形区域向四周扩张,随着泄漏范围的持续增大,受漏口压力作用降低,在尾流效应作用下,克服重力,向水压低的地表方向运移,整体扩散范围以烧瓶状区域向四周扩散直至地表。

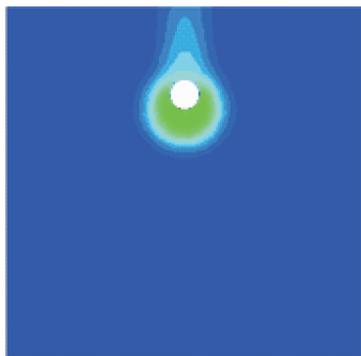


图3 雨后含饱和水土土壤泄漏扩散

从图4中三种不同水分分布状况下油品在5 h内的地下泄漏范围可知,泄漏油品在有雨水冲带作用时其扩散范围明显高于雨前和雨后。泄漏3 h之前,雨中

扩散范围增长率比雨前高约11%,说明雨水的冲带对整个污染范围的扩大有重要影响,但在泄漏3 h之后,雨中增长率开始下降,主要原因在于油品虽然有雨水冲带,但距泄漏口越远,其密度越小,而雨水的横向渗透冲带能力有限,加上油品已经向上扩散至地表,油品向地表扩散的通道畅通,所以地下扩散率下降。且此时雨中比雨前的渗透范围增长率仅高约3%。雨后含有饱和水的土壤中渗透扩散范围最小,原因是油品在地下渗透需要克服水的挤压力,迫使油品向地表压力薄弱方向运移直至地面,地下扩散范围较小。

油品泄漏5 h内的地表泄漏范围见图5,雨后油品地表扩散范围仍为最小,从图3可知,由于油品扩散到地表的出口面积较小,在雨前和雨中两种扩散状况中,油品向地面扩散的地表出口面积远大于雨后。但是,下雨过程中土壤的通透性明显不如雨前,且有向下冲带油品作用力,所以油品向地表的扩散速度小于雨前的扩散速度。虽然雨后土壤的通透性并不比雨中低,但初期扩散速度却比雨中高,原因是在横向扩散受限明显的情况下,势必导致向地表压力薄弱方向加快扩散,所以雨后泄漏油品向地表方向的扩散大于雨中的扩散。泄漏2.8 h后,雨后地表的污染面积因向地表扩散的出口小而出现小于雨中情况。在泄漏2 h之前,雨前比雨中的地表扩散面积增长率高约21%,但在2 h后,雨前比雨中的增长率仅高约2%,说明雨水地下冲带作用对泄漏初期雨水的的海表扩散有抑制作用。

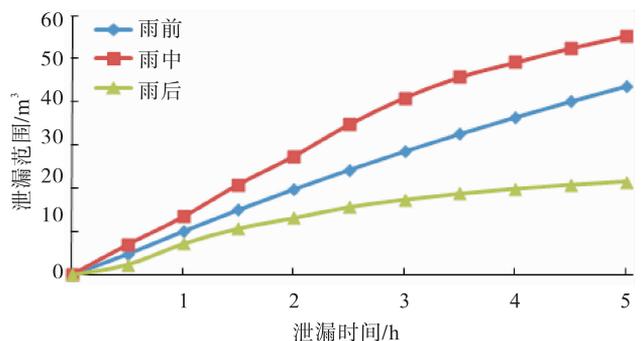


图4 三种水分分布的地下泄漏范围

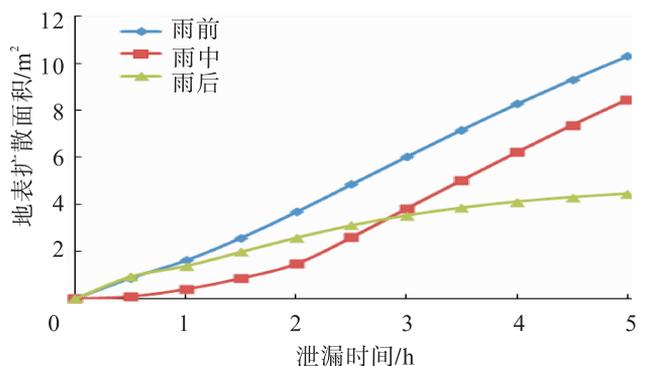


图5 三种水分分布的地表泄漏范围

3 结论

根据油品在不同水分分布土壤中泄漏扩散过程的流动传质耦合数值计算结果可知,油品在地下渗透扩散范围受水分分布影响明显。雨前、雨中和雨后三种工况下,扩散速率稳定后,雨后的泄漏范围及地表扩散范围均是最小,相比雨前的土壤,在泄漏 3 h 后,雨中雨水向下渗透冲带泄漏油品扩散范围的增长率相比雨前高约 3%;油品在地表的扩散面积则是在雨前的土壤中增长迅速且其扩散面积的增长速率比雨中高约 2%。建议油品泄漏后及时封堵漏油口,尤其在管道途经多雨地区、沼泽湿地及穿越河流等地段,以免水分向下冲带泄漏油品,造成更大的污染区域。

参考文献:

[1] 杜明俊,马贵阳,张春生,等. 多年冻土区埋地管道周围土壤

温度场数值模拟[J]. 油气田地面工程,2010,29(10):12-14.
 [2] 王 喜. 汽油在土壤中运移规律研究[D]. 北京:中国地质大学,2009,15-16.
 [3] 陈云涛,陈宝东,杜明俊,等. 埋地输气管道穿孔泄漏扩散浓度的数值模拟[J]. 石油工程建设,2010,36(4):1-5.
 [4] 叶 峰,廖开贵,张亚明,等. 天然气管道泄漏数值模拟的研究[J]. 油气田地面工程,2008,27(6):19-20.
 [5] 雷 超. 输油管道泄漏检测系统的设计与优化[J]. 天然气与石油,2010,28(5):19-21.
 [6] 鹿鑫峰. 寒区地下输油管道泄漏热影响区域温度场数值模拟[J]. 油气田地面工程,2008,27(6):31-33.
 [7] 苑伟民,袁宗明,毕建伟,等. LNG 泄漏扩散模拟研究[J]. 天然气与石油,2011,29(4):1-5.
 [8] 李朝阳,马贵阳,刘 亮. 埋地输油管道泄漏油品扩散模拟[J]. 油气储运,2011,30(9):674-676.
 [9] 罗惕乾. 流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2007,298-304.

