



空冷器内铵盐颗粒沉积规律与影响因素的数值模拟

邢宏刚, 刘骁飞

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 针对石化行业中频繁出现的铵盐沉积腐蚀的问题, 以某石化企业空冷器为研究对象, 采用雷诺应力模型和欧拉—拉格朗日法, 运用计算流体力学软件 Fluent 进行数值模拟, 研究不同颗粒直径、颗粒密度等情况下, 铵盐颗粒在空冷管箱和换热管束内的沉积规律。结果表明: 铵盐颗粒更易沉积在管箱底部的两侧和各排管束的两侧; 颗粒直径越大, 在空冷器管箱内颗粒分布越稀疏, 沉积在管箱底部越多; 颗粒密度越大, 更容易沉积在管箱底部, 且多数集中在进口管束下部。该研究结果为空冷器中铵盐沉积腐蚀的预防提供了一定的理论支撑和技术支持。

关键词: 空冷器; 铵盐颗粒; 欧拉—拉格朗日法; 沉积规律; 数值模拟

中图分类号: TQ051.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0363-08

Deposition law of ammonium salt particles in air cooler and numerical simulation of influencing factors

XING Honggang, LIU Xiaofei

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To address the issue of ammonium salt deposition corrosion that frequently occurred in the petrochemical industry, taking the air cooler of a petrochemical company as the research object, numerical simulation was performed on computational fluid dynamics software Fluent using Reynolds stress model and Euler-Lagrangian method to study the deposition law of ammonium salt particles with different particle diameters and particle density in the air-cooled tube box and the heat exchange tube bundle, respectively. The results show that the ammonium salt particles are more easily deposited on both sides of the bottom of the tube box and on both sides of each row of tube bundles; the larger the particle diameter, the sparser distribution of particles in the air-cooled tube box, and the more easily deposited on the bottom of the tube box; the greater the particle density, the more easily deposited on the bottom of the tube box, and most are intensively distributed in the lower part of the inlet tube bundle. The research results provide certain theoretical support and technical support for the prevention of ammonium salt deposition corrosion in air coolers.

Key words: air cooler; ammonium salt particles; Euler-Lagrangian method; deposition law; numerical simulation

0 引 言

在炼化工业中,随着原油需求量的增大,含有大量氯、氮元素的酸性原油的比重不断增加,炼化设备也不断大型化,这导致由空冷设备腐蚀失效产生的装置腐蚀泄露的事故多次发生,严重影响设备的稳定运行和企业的经济效益^[1-2]。铵盐沉积结晶造成的空冷器腐蚀已成为影响长周期安全运行的典型因素^[3-4]。

未经加工处理的原油中含有大量的氮、氯的元素化合物,与氢气反应会生成 NH_3 和 HCl 。在炼化工艺中随着物流温度的降低,两种气体会发生反应生成 NH_4Cl ^[5]。当工艺中的水含量减少时, NH_4Cl 会结晶生成固体,很容易沉积在空冷管束的内部壁面,造成管束堵塞;当有水分流过时,沉积在壁面的铵盐颗粒将会吸收水分,生成高浓度的 NH_4Cl 水溶液,造成设备的腐蚀失效^[6]。国内外学者主要从晶相的生成、铵盐结晶的影响因素、形成铵盐颗粒的原因、换热器中主要腐蚀的位置以及通过线注水的方式缓解铵盐结晶等方面研究了铵盐的结晶腐蚀,发现铵盐的结晶受多相流体系和反应工艺模型的影响。Manasha 等^[7]设计了燃料气预热的模拟实验系统,发现硫酸氢铵主要是作为气相中的气溶胶而不是作为通道壁面上的凝结水形成的。Hu 等^[8]分析了 NH_4Cl 的潮解和挥发过程,发现环境湿度是 NH_4Cl 结晶的重要因素, NH_4Cl 的吸湿性是影响晶粒尺寸的关键因素。孙彦霖等^[9]研究了加氢空冷器内 NH_4Cl 的沉积过程,揭示了 NH_4Cl 颗粒的形成原因及沉积机理,发现空冷器内气液相分布和平均流速的变化会影响部分管束中 NH_4Cl 颗粒的沉积。Jin 等^[10]研究了加氢空冷系统的腐蚀特性,发现在换热管中,第二排沉积的颗粒数大于第一排,高危管主要集中在空冷器的中、右侧。何君等^[11]认为,造成装置中高压热交换器和高压空冷器铵盐结晶的主

要原因是注水水质存在问题以及原料中氯、氮质量分数的升高。蒋国权等^[12]为消除铵盐结晶隐患,通过提高脱戊烷塔顶温度来分解 NH_4Cl ,采用在线注水冲洗的方式缓解脱戊烷塔顶铵盐结晶腐蚀。有些学者在研究颗粒运动时常用离散相模型来预测颗粒的沉积情况^[13-15]。Khalilitehrani 等^[13]通过离散元建模,研究了在正常的表面撞击过程中湿尘团聚体的破碎、沉积和附着。Seyfi 等^[14]采用欧拉-拉格朗日离散相模型和剪切应力湍流模型(Shear stress transport, SST),模拟了工业 90 度弯管中湍流气体颗粒的流动。Stone 等^[15]采用 CFD 和离散相模型模拟相结合的方法,预测了颗粒在水平气流中的沉积情况。陈宏霞等^[16]从相变腐蚀机理和腐蚀防护的角度出发,系统地总结了气液相变腐蚀领域的研究进展和相变腐蚀过程的腐蚀预测模型。针对石油化工行业中频繁出现的铵盐沉积腐蚀问题,需要对铵盐颗粒的沉积规律与影响因素进行深入研究。

本文以某石化企业中发生沉积腐蚀的空冷器为研究对象,采用雷诺应力模型和欧拉-拉格朗日法,运用流体力学软件对铵盐颗粒运动进行数值模拟,研究铵盐颗粒在不同直径($d_p=50, 100, 150\ \mu\text{m}$)、密度($\rho_p=800, 1000, 1550\ \text{kg/m}^3$)等情况下颗粒的沉积及分布规律,研究结果可为空冷器的优化运行提供理论支撑,为防止铵盐沉积腐蚀提供防控策略。

1 空冷器几何和网格模型及数值模拟方法

空冷系统作为石油炼化工艺过程中重要的关联系统,发生的腐蚀失效严重,其工艺流程如图 1 所示。重质石油通过加热炉进入反应器,在催化剂的作用下发生反应,反应流出物进入换热器换热,经过空冷器,再经高压分离器分离出循环氢、含硫污水和高分油,高分油经空冷器冷却后进入低压分离器,分离为油、汽、水。

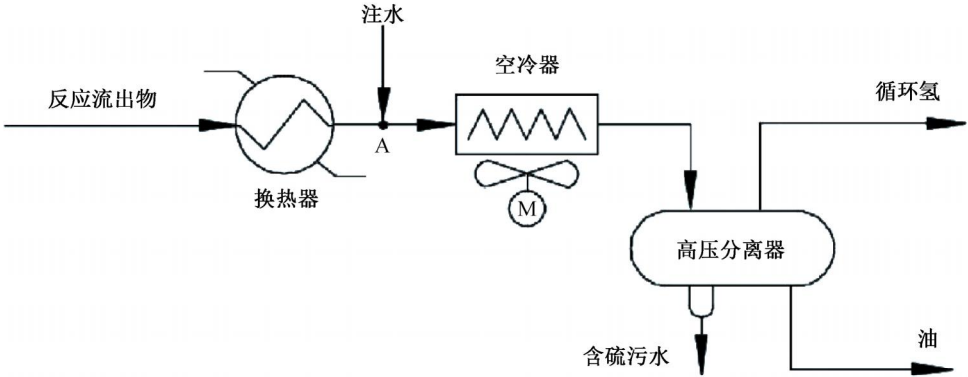


图 1 空冷系统工艺流程简图

1.1 几何模型及网格划分

空冷器是石油化工行业中用来冷却的一种换热设备,由进出口管、管箱以及换热管束组成。本文计算采用的空冷器模型如图2所示,管排从上往下共有两排,第一排有38根管束,第二排有37根管束,对管束从左往右开始编号。选用管束的尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$,第一排和第二排管束间的距离为53 mm,每排管束的管子间的距离为62 mm,箱体的长宽高为 $2450\text{ mm} \times 145\text{ mm} \times 145\text{ mm}$,进口管束尺寸为 $\Phi 145\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 。

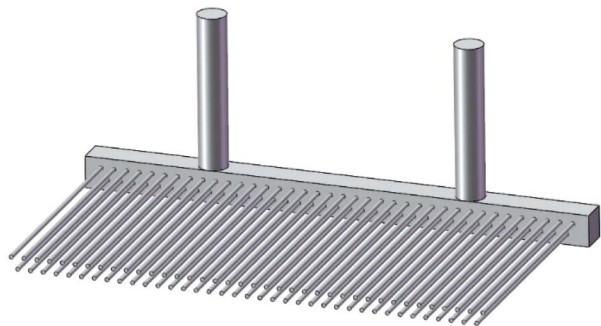


图2 空冷器模型示意图

由于本文研究的空冷系统的几何模型是完全对称的,并且铵盐颗粒的沉积大部分发生在管箱底部和换热管束的入口周围,为了减少计算时间,取空冷器第一管程管束和管箱的部分进行网格划分,划分后空冷器网格如图3所示。其中,方框处的局部放大图可见进口管束、出口管束和管箱在整体网格中的细节。采用结构化网格,网格总数为70万左右,网格质量均在0.5以上。

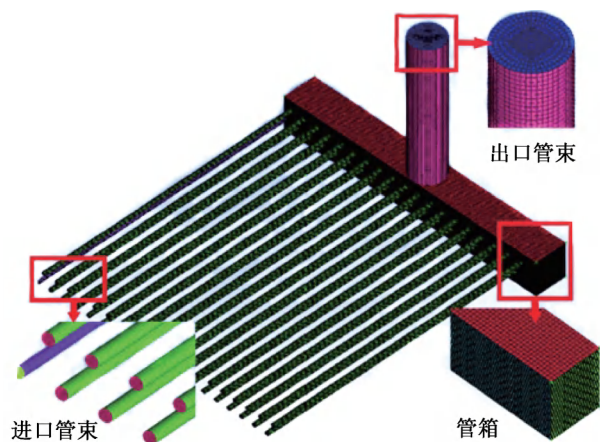


图3 空冷器整体网格示意图

1.2 数值模拟方法

1.2.1 湍流模型

由于空冷器流场的湍流特性具有很强的各向异性特点,因此运用雷诺应力模型进行求解。在该模

型里面,直接建立因变量为 $\overline{u'_i u'_j}$ 的偏微分方程,经过量纲分析,确立雷诺应力的运输方程^[17]为:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_k} = -D_{T,i,j} + D_{L,i,j} +$$

$$P_{i,j} + G_{i,j} + \Phi_{i,j} + \epsilon_{i,j} + F_{i,j} + S_{i,j}$$

其中: ρ 为混合相密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; i 为常数, $i=1, 2, 3$; j 为常数, $j=1, 2, 3$; k 为常数, $k=1, 2, 3$; u_i 为瞬时速率, m/s ; u_j 为瞬时速率, m/s ; u' 为速率脉动量, m/s ; x 表示坐标中 x 轴方向; $D_{T,i,j}$ 为湍动扩散项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $D_{L,i,j}$ 为分子黏性扩散项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $P_{i,j}$ 为剪应力产生项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $G_{i,j}$ 为浮力产生项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $\Phi_{i,j}$ 为压力应变项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $D_{i,j}$ 为扩散项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $\epsilon_{i,j}$ 为黏性耗散项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $F_{i,j}$ 为系统旋转产生项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; $S_{i,j}$ 为源项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ 。

1.2.2 离散相模型

在笛卡尔坐标系下,离散相颗粒受力的平衡方程为^[18]:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{u_f - u_p}{\tau_r} + \frac{g_x(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_x$$

其中: $\frac{u_f - u_p}{\tau_r}$ 为颗粒的曳力; $\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d \text{Re}}$ 为颗粒的松弛时间, s ; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; u_f 为流体的速度矢量, m/s ; u_p 为颗粒的速度矢量, m/s ; g_x 为重力项; C_d 为阻力系数; Re 为颗粒的相对雷诺数; μ 为流体的分子黏度, m^2/s ; F_x 为附加质量力、压力梯度力、Basset力等。

对铵盐颗粒进行离散相处理,假设铵盐颗粒为相同直径的球形,并假设颗粒间不会发生碰撞,取等质量流量的3种不同直径(50、100、150 μm)铵盐颗粒^[19];气相为油气混合物,密度为 $22.3\text{ kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $1.39 \times 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;固相密度 ρ_p 分别为800、1000、1550 kg/m^3 ;散相模型用非稳态颗粒轨迹,颗粒时间步数为0.001~1.000 s。

1.2.3 边界条件及离散方法

空冷器的进口条件为质量进口,根据设计要求,质量流量设置为 $1.11\text{ kg}/\text{s}$ 。出口条件为压力出口,壁面条件采用无滑移壁面,并且用标准的壁面函数法处理^[20]。为了减少计算量,选取整体模型的一半进行计算分析,对称面采用对称边界条件,空冷器模型边界设置如图4所示。体积相分率、湍动能、动量和湍流耗散率采用二阶迎风格式(Second order upwind, SOU)进行离散^[21],压力项采用Standard格式,压力-速度耦合方程的求解采用PISO方法。

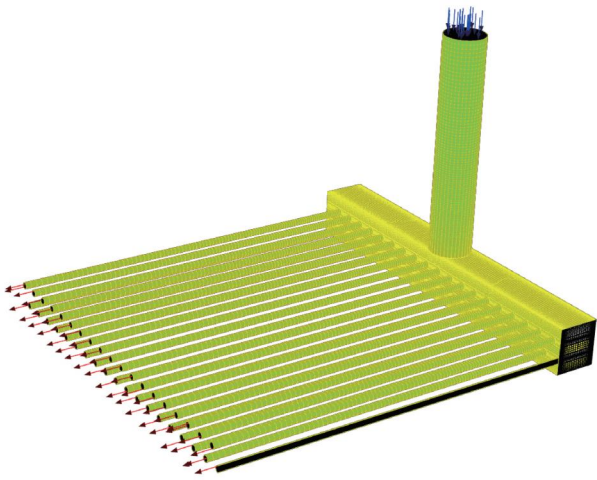


图4 空冷器模型边界设置示意图

2 不同颗粒特性对铵盐颗粒沉积规律研究

2.1 不同粒径条件下铵盐颗粒沉积规律

颗粒停留时间指从颗粒初入流场到某一位置所需要的时间,它与流体介质在流场内形成的流线有关。本文通过离散相模型模拟了 0.001~1.000 s 内铵盐颗粒的在空冷器中停留情况,颗粒停留是指颗粒在上述时间段内静止或滞留在空冷器中。下面分析 $d_p=50、100、150\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_p=800\text{ kg/m}^3$ 时,入口颗粒的加载量统一为 100 万颗的情况下,管箱和换热管束内颗粒停留时间下的沉积规律。

2.1.1 管箱内颗粒沉积规律

$d_p=50\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_p=800\text{ kg/m}^3$ 时颗粒停留时间的分布图如图 5 所示,从图中可以看出,铵盐颗粒在空冷管箱里面的分布呈不均匀状态。位于空冷器管箱入口处的颗粒停留时间最短,沿管箱两侧,离入口管束距离越远,颗粒的停留时间越长;在管箱两侧,由于颗粒进入后与管箱内壁面或者颗粒发生碰撞反弹,并且在该位置处产生旋涡,导致流体的流速下降,造成颗粒在该处的停留时间明显增长。当颗粒受到流体的曳力作用后会随着流体的流线移动,流体的黏度和速度越大,则颗粒的跟随性越好。

在 $\rho_p=800\text{ kg/m}^3$, $d_p=50、100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $150\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下,入口管束和管箱截面上的颗粒分布如图 6 所示。由图可知:颗粒直径越大,在空冷器管箱中上部的颗粒浓度越稀疏,更多的颗粒沉积在管箱底部。在管箱底部边缘处,随着单个颗粒密度的增大,颗粒在该位置处的停留时间增长,因此,颗粒更易于沉积下来,铵盐颗粒在该位置处发生腐蚀沉积的可能性较大。在管箱两侧的上部,颗粒的停留时间最长。当颗粒在两侧发生对撞后,开始反弹从而产生

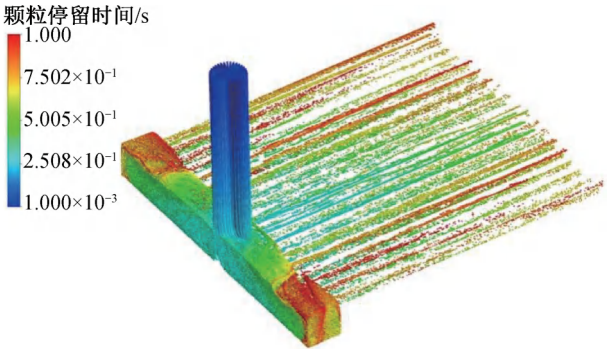


图5 $d_p=50\text{ }\mu\text{m}$ 时管箱内颗粒停留时间分布

颗粒旋涡,管箱上部的颗粒位于旋涡顶部,故在该位置处的颗粒停留时间最长,随后进入两侧的管束。

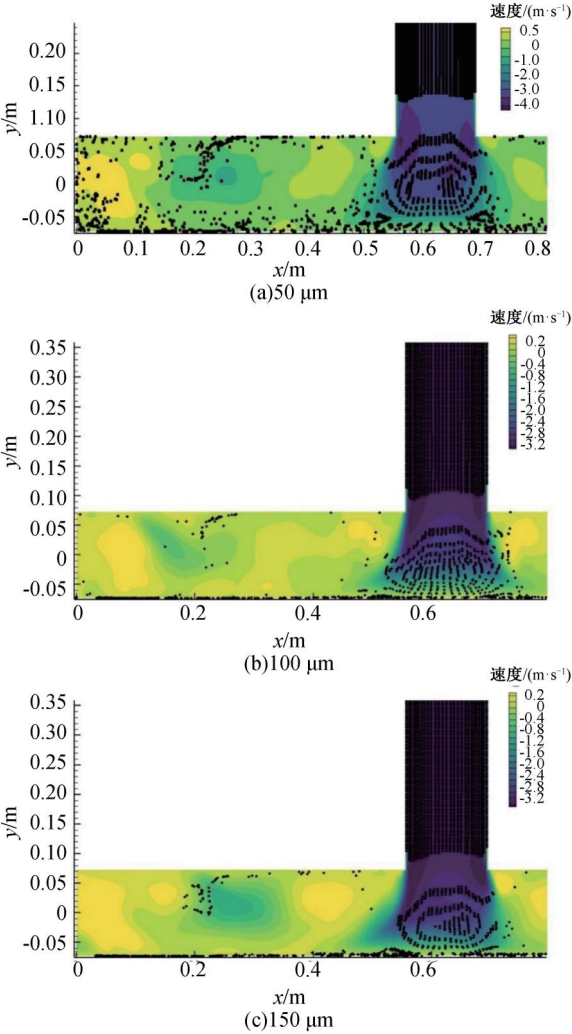


图6 不同粒径时管箱内截面上的颗粒分布

2.1.2 换热管内铵盐颗粒沉积规律

$\rho_p=800\text{ kg/m}^3$, $d_p=50\text{ }\mu\text{m}$ 时,管束内颗粒停留时间的分布云图如图 7 所示。将管束从上往下编号,第一排管束编号为 1-1~1-19,第二排管束为 2-1~2-18,第二排管束在对称面处为半根管束,编号为 2-19。不同粒径时换热管束内颗粒数量分

布如图 8 所示。从图中可以看出,在入口管束附近的管束中颗粒的停留时间最短,越向两边,颗粒在管束中的停留时间增长,而在边缘处的管束中停留时间又开始减短。在第一排管束中,2、3、4 号管束和 16、17、18 号管束中的颗粒停留时间最长,而且相比于其他位置的管束,这些管束中的颗粒数量较少,因为大多数颗粒停留在管束入口附近,形成堆积,后面进入的颗粒流动的速度更加缓慢,该处的颗粒更易于沉积在管束壁面。在第二排管束中,4、5、6 号管束和 12、13、14 号管束中的颗粒停留时间较长,两侧的管束中的颗粒停留时间也较长,但是该处的颗粒数量较少。在 4、5、6、8、9、10、12、13、14 号管束中的颗粒数量较多,但 8、9、10 号管束中的颗粒停留时间最短,该处的颗粒最容易随流体流出管束。随着颗粒直径的增大,整体管束中的颗粒数量减少,两侧边缘的 4 根管束中的密度明显减少,但是停留时间较长。

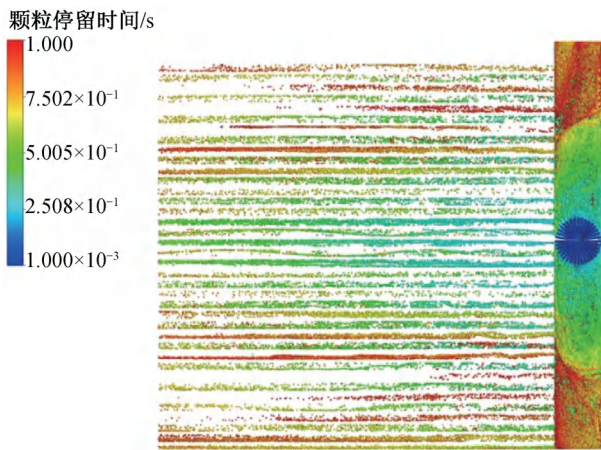


图 7 $\rho_p=800 \text{ kg/m}^3$ 、 $d_p=50 \mu\text{m}$ 时
管束内颗粒停留时间分布

不同粒径下两排管束中的颗粒分布如图 9 所示。从图中可以看出,颗粒直径越小,在管束中分布的颗粒数量越多。在第一排管束中,9 号管束中的颗粒分布较多,进口管束两边的 5 和 15 号管束中的颗粒数量最多。第二排管束中,4、5、13、14 号管束中的颗粒较多,进口管束下方的 8、9、10 号管束中的颗粒最多。因此,当管束中分布更多的铵盐颗粒时,更容易发生腐蚀沉积。第一排管束中的颗粒多数分布在两侧管束的中间位置,而第二排管束中颗粒多数分布在中间管束中。

2.2 不同颗粒密度条件下铵盐颗粒沉积规律

2.2.1 管箱内颗粒沉积规律

$\rho_p=800 \text{ kg/m}^3$ 、 $d_p=100 \mu\text{m}$ 时空冷管箱内颗粒停留时间的分布云图如图 10 所示。由图可知,管

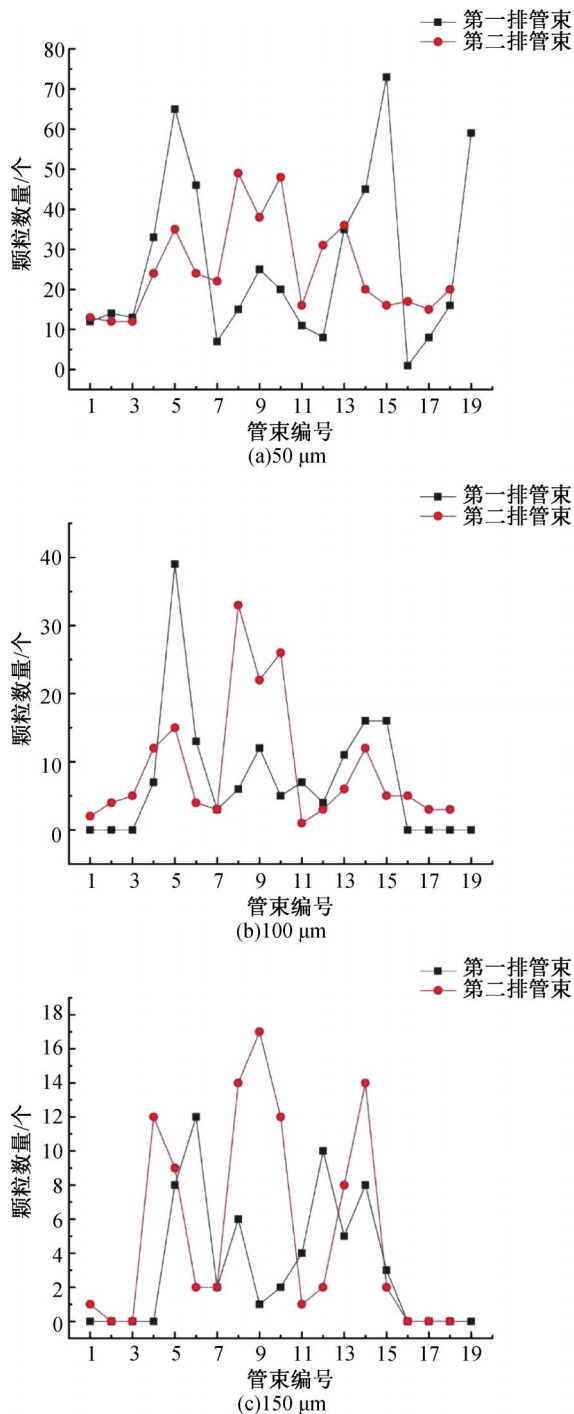


图 8 不同粒径时管束内颗粒数量分布

箱两侧的颗粒停留时间较长^[22],并且沉积在管箱底部的颗粒较多,管箱边缘处的颗粒不易于随流体流入管束,因此,在该位置处铵盐颗粒产生腐蚀沉积的可能性很大。

$\rho_p=800、1000、1550 \text{ kg/m}^3$ 、 $d_p=100 \mu\text{m}$ 时管箱截面上颗粒分布如图 11 所示,颗粒密度越大,颗粒越容易沉积在管箱底部;而在管箱两侧上部的颗粒分布较少,颗粒多数集中在进口管束下部,然后向两侧的管箱流动。颗粒直径较小时,颗粒更容易在

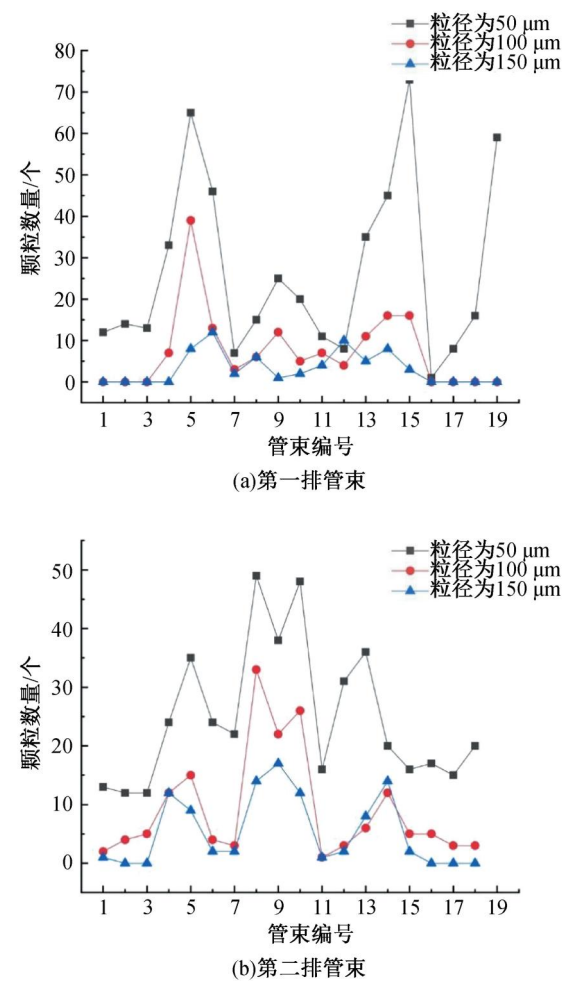


图9 不同粒径下两排管束中的颗粒分布

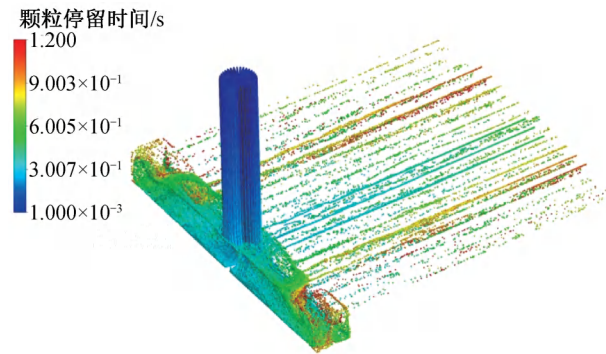


图10 $\rho_p=800\text{ kg/m}^3$ 时管箱内颗粒停留时间分布

管箱内发生碰撞从而分布在管箱中上部。综上,颗粒在管箱内停留时间较长并且分布数量较多的位置为管箱两侧底部位置,管箱两侧底部壁面处的颗粒不易发生流动,故在管箱内这些位置处更易发生铵盐颗粒的沉积腐蚀。

2.2.2 换热管内铵盐颗粒沉积规律

$\rho_p=800、1000、1550\text{ kg/m}^3, d_p=100\text{ }\mu\text{m}$ 时,换热管内颗粒停留时间及颗粒数量的分布如图12所示,由图可以得出:同一排管束中,1、2、3、17、18、19号

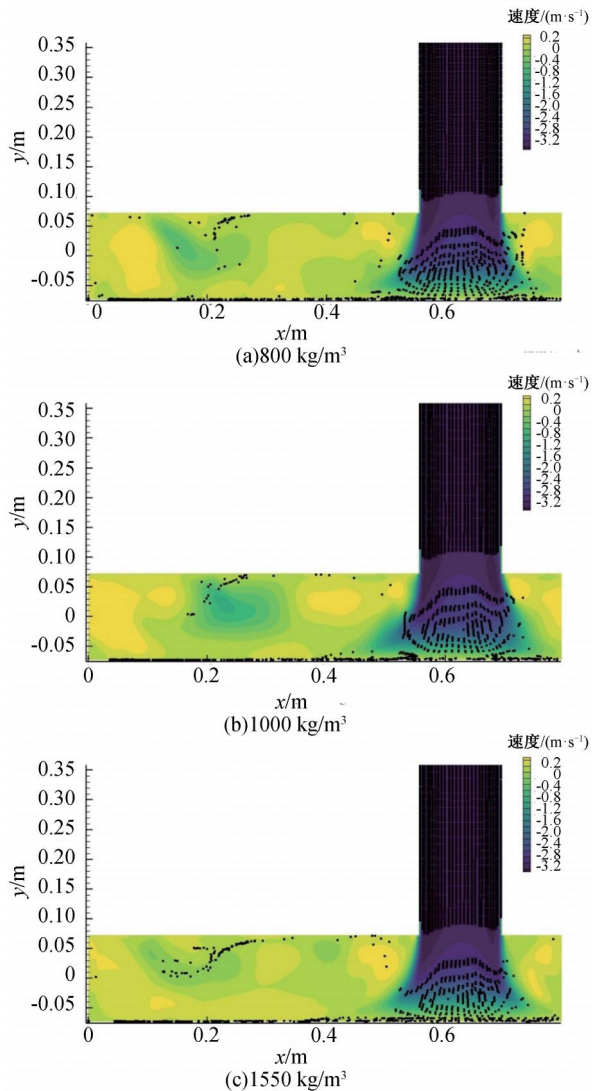


图11 不同密度时管箱内截面上的颗粒分布

管束中的颗粒停留时间最长,但是颗粒数量较少;4、5、6、13、14、15号管束中的颗粒数量较多,而且在该位置处的停留时间较长;随着颗粒密度的增大,所有管束中的颗粒明显增多,而且颗粒的停留时间也增长。

不同颗粒密度下第一排和第二排管束中颗粒的分布情况图13所示。从图中可以看出,在第一排管束中,5、9、14、15号管束中的颗粒数量较多,而5号管束中的颗粒最多。不同密度下,第一排管束中的颗粒分布相差不大。第二排管束中,4、5、8、9、10、14、15号管束中的颗粒较多,但入口管束下面的8、9、10号管束中颗粒最多;颗粒密度越大,中间管束中的颗粒减少,而两侧的管束中将会增多。

3 结论

本文以某石化企业空冷器为研究对象,探索了空冷器内铵盐颗粒的沉积规律,分析了不同颗粒直

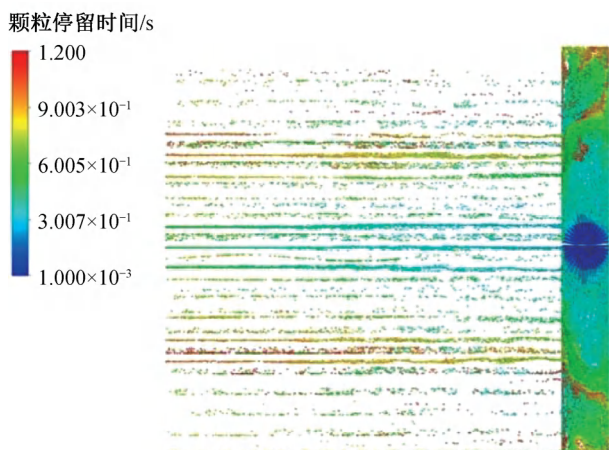


图12 $\rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$ 时换热管束内颗粒停留时间分布

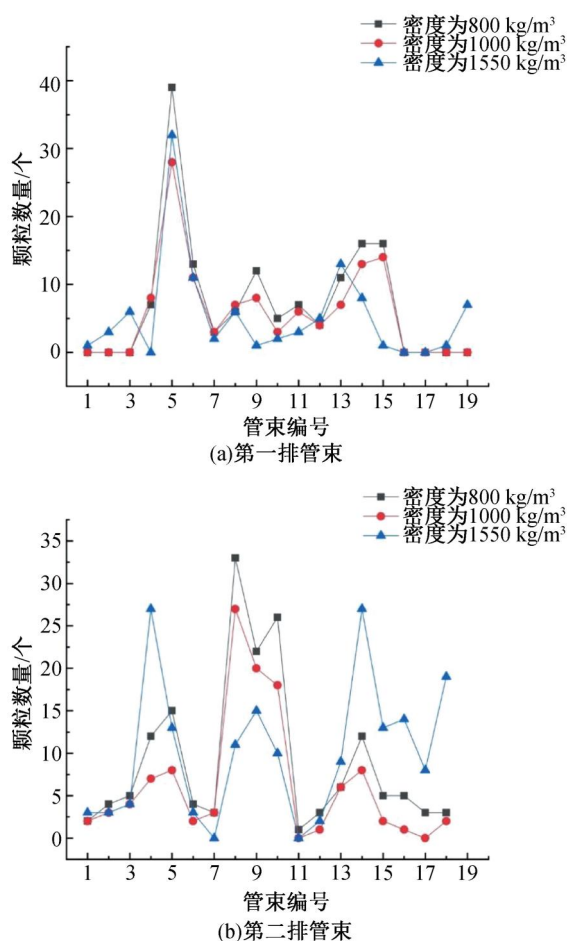


图13 不同颗粒密度下两排管束中的颗粒分布

径与不同颗粒密度情况下颗粒的分布规律,主要得到以下结论:

a) 铵盐颗粒的沉积规律受颗粒直径、颗粒密度的影响,第一排管束和第二排管束中的颗粒分布不均匀,在两侧的管束中颗粒的停留时间较长。

b) 在空冷管箱两侧及中间对撞位置颗粒的停留时间较长,而且颗粒数量较多。颗粒直径越大,在

空冷器管箱中上部的颗粒浓度越稀疏,更多的颗粒沉积在管箱底部;在管箱底部边缘处,随着颗粒密度的增大,颗粒在该位置处的停留时间增长。

c) 颗粒密度越大,颗粒越容易沉积在管箱底部;而在管箱两侧上部的颗粒分布较少,颗粒多数集中在进口管束下部,然后向两侧的管箱流动;颗粒直径较小时,颗粒更容易在管箱内发生碰撞从而分布在管箱中上部。

参考文献:

- [1] 华贵. 低碳经济时代的中国炼油工业[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(6): 835-840.
- [2] 刘小辉, 胡安定. 石油炼制设备腐蚀与防护综述[J]. 中国设备工程, 2010, 7(11): 11-13.
- [3] 李凤生. 重整装置脱戊烷塔分离精度下降和空冷器腐蚀的原因及对策[J]. 石油炼制与化工, 2004, 35(7): 65-67.
- [4] Zheng Z J, Ou G F, Ye H J, et al. Investigation on the deposition failure of a reactor effluent air cooler in hydrocracking unit[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 68: 52-63.
- [5] 偶国富, 谢浩平, 詹剑良, 等. 基于流动分析的加氢空冷系统氯化铵沉积规律研究[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(1): 70-73.
- [6] 偶国富, 王宽心, 刘慧慧, 等. 空气冷却器系统铵盐沉积及影响因素研究[J]. 石油炼制与化工, 2012, 43(12): 39-43.
- [7] Menasha J, Dunn-Rankin D, Muzio L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater[J]. Fuel, 2011, 90(7): 2445-2453.
- [8] Hu D W, Chen J M, Ye X N, et al. Hygroscopicity and evaporation of ammonium chloride and ammonium nitrate: Relative humidity and size effects on the growth factor[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(14): 2349-2355.
- [9] 孙彦霖, 王宽心, 偶国富. 加氢空冷器 NH_4Cl 流动沉积特性数值模拟[J]. 炼油技术与工程, 2017, 47(6): 44-49.
- [10] Jin H Z, Zhou J F, Liu W W, et al. Ammonium salt deposition characteristics in an air cooler system based on the coupling of fluid flow and heat transfer simulation [J]. China Petroleum Processing & Petrochemical Technology, 2019, 21(4): 94-102.
- [11] 何君, 覃君晓. 加氢装置高压热交换器和高压空冷器铵盐结晶原因分析及改进[J]. 石油化工设备, 2018, 47(6): 80-83.
- [12] 蒋国权, 肖建韩. 连续重整脱戊烷塔顶空冷器铵盐结晶

消减措施[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(3): 87-90.

[13] Khalilitehrani M, Olsson J, Daryosh F, et al. The morphology of the deposited particles after a wet agglomerate normal surface impact[J]. Powder Technology, 2019, 345: 796-803.

[14] Seyfi S, Mirzayi B, Seyyedbagheri H. CFD modeling of black powder particles deposition in 3D 90-degree bend of natural gas pipelines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 78: 103330.

[15] Stone L, Hastie D, Zigan S. Using a coupled CFD-DPM approach to predict particle settling in a horizontal air stream[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(4): 869-878.

[16] 陈宏霞, 刘霖, 肖红洋, 等. 气液相变换热过程中界面腐蚀的基础研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5225-5237.

[17] 李建隆, 车香荣, 陈光辉, 等. 新型 α 旋流器流场模拟与实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 371-377.

[18] 李亚林, 袁寿其, 汤跃, 等. 离心泵内示踪粒子运动的离散相模型模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 113-118.

[19] 宗青松, 韩云龙, 陈中. 居住室内颗粒物沉积研究[J]. 安徽建筑, 2012, 19(3): 196-197.

[20] 张人会, 郭广强, 杨军虎, 等. 液环泵内部气液两相流动及其性能分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 99-103.

[21] 徐昆伦. 掘进工作面风流流场和瓦斯分布数值模拟分析[J]. 华北科技学院学报, 2014, 11(10): 28-33.

[22] 南轩, 刘艳慧, 梁爽, 等. 基于泵送混凝土管道堵塞破坏特性 CFD 分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 110-112.

(责任编辑:康 锋)