

低真空气体分离系统管道内颗粒团聚和沉积仿真研究

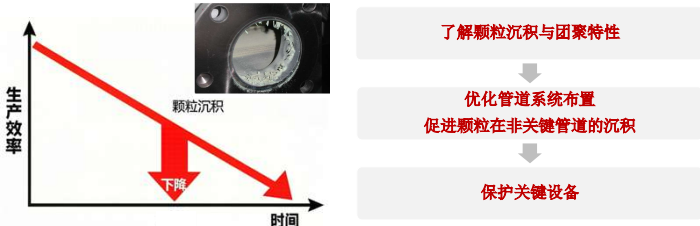
魏永春^{1,2}, 王泽涛², 储怡鑫^{1,2}, 张睿², 车军², 周明胜¹

1 清华大学

2 同位素制备与辐照技术山西省重点实验室

背景和目的

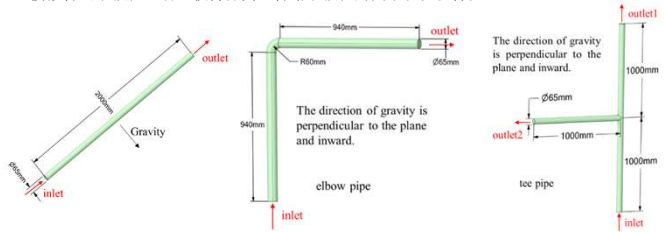
在低真空运行的气体分离系统中, 气体可能会夹带微颗粒, 导致颗粒在管道及阻力元件内逐渐沉积。颗粒堆积可能引发流道堵塞、局部压降升高, 甚至改变气体动力学特性, 降低分离效率。



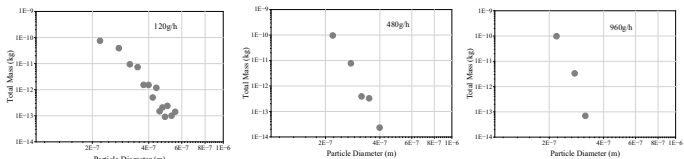
在低真空条件下, 气体密度和粘性减弱, 对颗粒携带能力弱, 同时气体分子平均自由程增大, 颗粒更易因惯性碰撞等作用而附着在管壁表面。

通过研究粉末在低真空管道内的运动行为, 优化关键设备入口管道结构, 提高颗粒团聚和沉积比例, 减少进入主设备的粉末以延长设备元件使用寿命, 将能有效提高系统稳定性和分离效率。

模拟管道中颗粒运动, 获得低真空管路中颗粒的团聚和沉积特性。

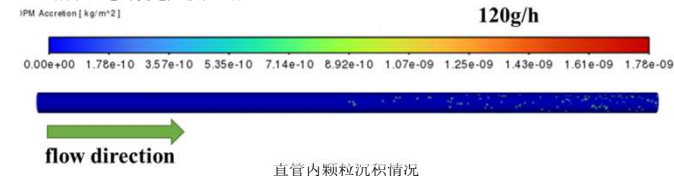


模拟结果-直管



颗粒团聚

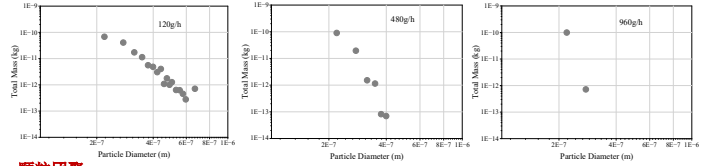
- 流速增大, 颗粒团聚效果减弱。
- 通过增大管道长度促进直管内颗粒团聚而促使颗粒重力沉降时, 所需管道长度较长, 可行性较低。
- 通过减小流速而促进大颗粒生成。



颗粒沉积

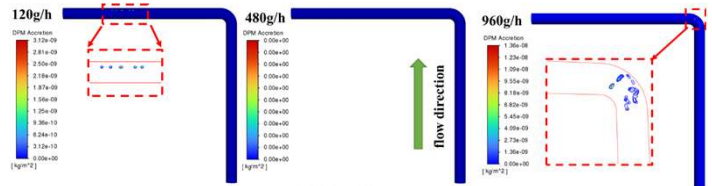
- 仅在120g/h时, 管道后半段底部出现沉积, 总沉积量很小。
- 颗粒直管中主要受曳力作用, 重力作用不明显, 故直管中颗粒曳力是颗粒沉积的主要机制。
- 增加直管长度可使颗粒沉积, 而在实际应用中无法为使颗粒沉积而故意在较大程度上延长管道。

模拟结果-弯管



颗粒团聚

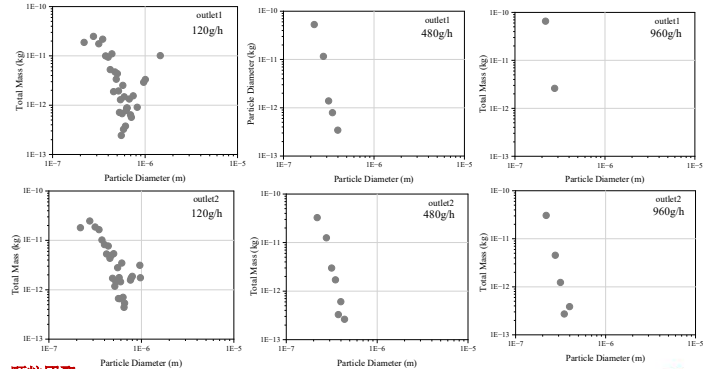
- 流速增大, 颗粒团聚效果减弱。
- 直接考虑弯管内颗粒团聚而促使颗粒重力沉降可行性较低。



颗粒沉积

- 120g/h时, 沉积率为0.2%; 480g/h时, 颗粒未发生沉积; 960g/h时, 沉积率达到0.9%。
- 弯管中颗粒曳力与惯性力竞争主导颗粒沉积。低流速时曳力主导; 高流速时惯性力主导。
- 在设备前增设弯管使颗粒沉积于管道而保护设备, 但需结合工艺设计现状与实际流速。

模拟结果-三通管

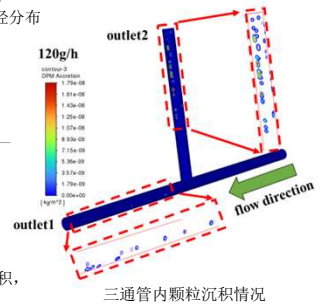


颗粒团聚

- 上图为三通管出口颗粒直径分布与流速的关系。
- 流速增大, 颗粒团聚效果减弱。
- 通过减小流速以促进团聚发生。

颗粒沉积

- 仅在120g/h时, 管道内出现沉积现象, 沉积率8.3%。
- 出口1管道中自然沉降发生少量颗粒沉积。
- 出口2管道中由于流体运动方向的改变导致较多颗粒沉积, 沉积机制与弯管中类似。



结论

- 颗粒在管道中的团聚效果均较弱, 仅考虑促进颗粒团聚而增大颗粒直径促进沉积的概率较小。
- 直管内曳力是颗粒的沉积机制; 弯管和三通管内曳力和惯性力竞争是颗粒沉积的主导机制。
- 增大管道直径而降低流速或优化三通管结构可以促进颗粒团聚和延长重力沉降时间, 加快颗粒沉积。
- 气体分离系统中管路体系大, 设计要求高, 难以针对性优化管路结构时建议加装专业除尘设备。

