近水平管道内 CO_2 两相流研究
A study of CO_2 two-phase flow in a near horizontal pipe

刘朝阳
国家管网集团科学技术研究总院分公司

CO_2 与油气流体在热力、物理性质方面均存在很大差异，导致其流动特性存在差异显著，给商业流动预测工具在 CO_2 输送和加注系统的某些流动场景进行流体运行参数预测中的应用增加了新的挑战。Yang 等[1]与 Andersen 等[2]针对近水平管道中的稳态 CO_2 两相流开展实验研究，研发了可用于测量油-水、气-液以及气-油-水流体管道横截面相体积分数及其分布的 X 射线检测仪，该仪器可精确测量 CO_2 两相流管道横截面（水平方向上从管道底部到顶部）的持液率。根据 X 射线仪测量的沿管道横截面相分数曲线，结合视频观察，可定义气液流界面的几何特性和流型。基于此，挪威国家石油公司的 Yang[3]于 2023 年在《Journal of Pipeline Science and Engineering》发表《A study of CO_2 two-phase flow in a near horizontal pipe》（近水平管道内 CO_2 两相流研究）。文章对 Yang 等[1]与 Andersen 等[2]关于近水平管道中 CO_2 两相流实验进行对比分析，力图完善上述预测工具，改进层状流气泡夹带模型，从而更好地预测 CO_2 两相流管道运行参数。

对于近水平管道 CO_2 流动，Yang 等[1]给出以下流型定义：S 代表界面较平顺的层状流，SW 代表具有小振幅界面波的层状流；SD 代表浓度分布曲线无明显界面分层的扩散流；D 代表扩散流；DB 代表气泡扩散在液相中的气泡流；DD 代表扩散在气相中的液滴。SD、D、DB 流型均为管壁被液相润湿的液体连续流动。该 CO_2 两相流型定义中涉及诸多细节信息，很难将其用于建模。Andersen 等[2]在其实验研究中对 CO_2 两相流型提出更直观的定义：ST 代表气液界面处产生气泡的层状流；ST/CH 代表上部为气泡和搅拌流层、下部为液层的层状流；BB 代表泡状流；ST/BB 代表上部为气层、下部为泡状流的层状流。除液滴流型外，Yang 等[1]与 Andersen 等[2]在实验研究中观察到的流型高度一致。在系统压力高于 3.5 MPa 的工况下，Yang[3]重新同步定义了近水平管道中 CO_2 两相流型：ST 代表界面光滑或呈波浪形且界面附近有气泡的层状流；CL 泡状流是指有液层的泡状流，即上部为泡层、下部为液层；BB 代表气泡分布在整个管道横截面上的泡状流；CG 泡状流是指具有连续气层的泡状流，其具有气液界面，液层为气泡近乎均匀分布的泡状流；滴状或环状流是指液体多呈液滴状的流型，管壁表面可能存在连续的液膜。划分 BB 泡状流、CL 泡状流、CG 泡状流以及 ST 流型边界的主要作用机制是气泡夹带。Yang 等[1]与 Andersen 等[2]的研究均表明：随着 CO_2 两相流管输系统压力降低，可观察到更多的层状和波形结构。界面波振幅随系统压力的降低而增大。当系统压力低至 3.5 MPa 以下时，预计会出现水动力段塞流。在此条件下，气液密度比相对较小，界面张力较大，有利于形成水动力段塞流。

将 Yang 等[1]的 X 射线测量结果用于研究近水平管道中 CO_2 两相层状流的气泡夹带现象。获得 ST 层状流或 CG 泡状流中液层的气泡体积分数，发现该分数是两相流弗劳德数的函数。弗劳德数的定义考虑了气体密度与管道倾斜度。结果表明：连续气液界面处气体的体积分数越大，液层中的平均气泡体积分数越大；液层中气泡夹带量虽随管道倾斜度增大而增大，但实验中管道倾斜度差异不大，在实验测量误差范围内。

对近水平管道中 CO_2 两相流中的气泡夹带行为进行参数研究发现，上倾管道管径越大，液体积聚越多；对于水平管道，管径对持液率的影响不大；在相同流量条件下，管道管径越大，管流的弗劳德数越小，气泡夹带也越少。内径 44 mm 的管道中存在明显的气泡夹带；内径大于 200 mm 时，可观察到管流的气泡夹带变少。

在文章最后，Yang[3]对 Yang 等[1]与 Andersen 等[2]近水平管道中 CO_2 两相流型实验进行总结：液层中夹带的气泡体积分数随混合物流量的增加而增大，系统压力越高，气泡夹带量越大，导致气液密度比升高，气泡与液层分离。气泡浮力（气泡分离）和动能（气泡扩散）的平衡可采用液层两相流弗劳德数进行描述，但是该研究所得弗劳德数的简单函数关联式未涵盖界面张力效应，如将其应用于其他流体系统，可能产生较大误差。“随着管道内径增大，进入液层的气泡夹带量显著减少”这一结论的前提是文章提出的弗劳德数函数关联式对管径较大的管流有效，今后需通过较大管径管道的实验数据对该结论进行验证。

参考文献：

[1] YANG Z, FAHMI A, DRESCHER M, TEBERIKLER L, MERAT C, SOLVANG S, et al. 2021. Improved understanding of flow assurance of CO_2 transport and injection[C]. Abu Dhabi: 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2021: 15-18.

[2] ANDERSEN H, SVENDSEN H E S, SOLUM S, YANG Z, TEBERIKLER L, SOLVANG S, et al. Experimental study of CO_2 two-phase flow regime in a large diameter pipe[C]. Trondheim: 11th Trondheim Conference on CO_2 capture, Transport and Storage, 2021: 1-6.

[3] YANG Z L. A study of CO_2 two-phase flow in a near horizontal pipe[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2023, 3(2): 100106. DOI: 10.1016/j.jpse.2022.100106.

• 原文链接：https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100106

©《油气储运》编辑部（CC BY-NC-ND 4.0）