

多相流工况下化工管道设计的关键参数确定方法

周红星 刘非凡 逢发 (中石油华东设计院有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 多相流在化工生产环节中普遍可见, 其复杂的特性给化工管道设计带来了颇高挑战, 本文着重研究多相流环境里化工管道设计时关键参数的确定方式, 涉及流量、流速、压力降、管径、相分布等参数, 借助理论剖析、经验公式运算和数值模拟等途径, 为多相流条件下化工管道实现安全高效设计提供理论支撑, 进而保障化工生产能够平稳进行。

关键词: 多相流; 化工管道设计; 关键参数; 确定方法

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0079-03

Determination method of key parameters for chemical pipeline design under multiphase flow condition

Zhou Hongxing, Liu Feifan, Pang Fa (East China Design Institute of CNPC, Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: Multiphase flows are ubiquitous in chemical production processes, where their complex characteristics pose significant challenges for pipeline design. This study focuses on determining key parameters in multiphase flow environments for chemical pipelines, including flow rate, velocity, pressure drop, pipe diameter, and phase distribution. Through theoretical analysis, empirical formula calculations, and numerical simulations, the research provides theoretical support for achieving safe and efficient pipeline designs under multiphase flow conditions, thereby ensuring stable chemical production operations.

Key words: multiphase flow; chemical pipeline design; key parameters; determination method

在化工领域, 多相流现象十分常见, 气液两相流可见于蒸馏塔与冷凝器间的管道、石油输送管道; 液固两相流在矿物加工、污水处理等流程中应用广泛; 气液固三相流则在流化床反应器的管道系统中较为多见, 相较于单相流, 多相流的流动特性更为复杂, 包含相间的相互作用、相分布变化等, 这极大提升了化工管道的设计难度, 精准确定多相流工况下化工管道设计的关键参数, 对保障管道系统安全运行、提升生产效率、减少能耗与成本意义重大, 参数确定若不合理, 可能引发管道堵塞、磨损、腐蚀、压力波动过大等问题, 干扰化工生产的稳定性与经济性, 当前, 随着化工产业向大型化、精细化方向发展, 多相流管道系统日趋复杂, 对关键参数精准确定的需求更为迫切, 相关确定方法亟待深入研究, 以满足化工生产不断发展的需求。

1 多相流的基本特性及对管道设计的影响

1.1 多相流的基本特性

多相流中各相的物理性质, 像密度、粘度、表面张力等存在明显不同, 气体密度低、粘度小, 液体密度和粘度相对较高, 固体颗粒则有着不同的粒径分布和形状, 这些不同使得相间存在速度差, 形成复杂的流动结构, 气液两相流中, 气体和液体的速度不同, 会呈现泡状流、柱塞流、环状流等多种流型; 液固两相流中, 固体颗粒的沉降速度与液体流速相关, 可能

造成颗粒在管道底部沉积或分布不均匀, 相间还存在质量、动量和能量交换, 让多相流的复杂性进一步增加, 气液两相流的蒸发或冷凝过程中, 会出现质量传递; 管道的弯头、变径处, 各相的动量交换会致使压力和流速发生变化, 另外, 多相流的流型转变并非简单的线性过程, 受流量、物性、管道几何形状等多种因素耦合影响, 其转变机制仍需深入探索, 这也加大了对多相流特性的把握难度。

1.2 对管道设计的影响

多相流的复杂特性在化工管道设计的多个层面产生作用, 管道选材环节, 必须纳入多相流的腐蚀性、磨损性等考量因素, 液固两相流里固体颗粒的冲刷可能造成管道内壁磨损, 故而要选用耐磨材料; 气液两相流若包含腐蚀性介质, 例如含有酸性气体的气液混合物, 管道材料就得具备耐腐蚀能力, 流型的改变会作用于管道的压力降和流量分布, 不同流型下的相间相互作用存在差异, 使得压力降的计算方式和数值各不相同, 泡状流与环状流的压力降特性有区别, 设计时需准确判断流型以合理计算压力降, 多相流的不稳定特性可能引发管道振动, 诸如气液两相流中的间歇流可能导致管道内压力周期性变化, 进而引起管道振动, 这就需要在管道支撑和固定设计中纳入减振措施, 由于多相流特性的复杂性, 管道设计中还需着重关注材料的耐疲劳性能, 以此应对长期复杂应力作用, 保

障管道在整个服役周期内的安全。

2 关键参数确定方法

2.1 流量与流速的确定

2.1.1 流量计算

多相流流量计算要考虑各相流量，针对气液两相流，可分别测量气相和液相流量，再相加得到总流量，常用测量手段包括差压式流量计、电磁流量计、超声波流量计等，差压式流量计依据伯努利方程，通过测量流体流经节流装置时产生的差压来计算流量，但在多相流中，因各相密度和流速不同，需要进行修正，对于液固两相流，固体颗粒流量可借助称重法、核子秤法等测量，液体流量则依据具体情况选择合适的流量计测量，实际工程里，还能根据物料衡算原理，结合化学反应的进料和出料关系，计算多相流的流量，不过在一些复杂的多相流体系中，像伴有化学反应的气液固三相流，物料衡算需考虑反应进度、副反应等因素，这让流量计算更为复杂，对测量和计算精度的要求也更高。

2.1.2 流速计算

流速是管道设计的关键参数，它关联着管道的压力降、磨损和流型，多相流中各相流速不同，通常要计算平均流速，气液两相流的平均流速可根据各相体积分数和流量计算，若已知气相体积分数和流量、液相体积分数和流量，以及管道横截面积，可分别算出气相和液相的流速，再通过加权平均得到混合流速，液固两相流中，固体颗粒的流速与液体流速存在滑移，需要考虑滑移系数来计算颗粒的实际流速，滑移系数与颗粒粒径、流体性质、管道壁面粗糙度等因素相关，可通过经验公式或实验确定，需要留意的是，在非牛顿流体参与的多相流中，其流变特性对流速分布影响明显，传统的流速计算方法需要进行针对性修正，以准确反映流速情况。

2.2 压力降的计算

2.2.1 单相流压力降计算方法回顾

单相流压力降计算有成熟方法，如达西-韦斯巴赫公式，适用于层流和湍流，层流时，压力降与流速成正比；湍流时，压力降与流速的平方成正比，同时要考虑管道的粗糙度、长度、直径等因素，但多相流压力降计算不能简单套用单相流公式，单相流中流体物性相对均一，而多相流各相物性差异大，相间相互作用复杂，导致压力降影响因素成倍增加。

2.2.2 多相流压力降计算模型

多相流压力降计算模型复杂，涉及因素多，气液两相流常用的有均相流模型、分相流模型，均相流模型假设气液两相均匀混合，将其当作一种具有平均物

性的单相流体来计算压力降，该模型适用于泡状流等气液混合较均匀的流型，分相流模型则分别考虑气相和液相的流动，兼顾相间的相互作用，如摩擦力、重力等，对于环状流、柱塞流等流型计算较为准确，液固两相流的压力降包括液体的摩擦阻力、固体颗粒与管道壁面的摩擦阻力以及颗粒的提升阻力等，可通过相关经验公式或半经验公式计算，如杜兰德公式，该公式纳入了颗粒直径、浓度、密度以及液体性质等因素对压力降的影响，但这些经验公式往往有其适用范围，对于特殊工况下的多相流，如高温、高压、高浓度的液固两相流，公式的准确性有待进一步验证和改进。

2.3 管径的确定

2.3.1 根据流量和流速确定管径

依据连续性方程，流量为流速与管道横截面积的乘积，由此可推导出管径的计算公式，多相流工况下，需参照计算得出的平均流速和设计流量确定管径，鉴于多相流的波动特性，设计流速通常会选定一个适宜范围，防止流速过高造成压力降过大、磨损加剧，或流速过低引发相分离、管道堵塞等问题，气液两相流的设计流速还需考虑避免液泛现象，液泛指垂直管道中气体流速过高导致液体无法正常下流的现象，因此需根据具体气液物性和管道参数，通过相关液泛关联式确定最大允许流速，进而选定合适的管径，实际工程中，还需纳入流量的波动系数，以应对生产过程中可能出现的流量变化，确保管道在不同工况下都能稳定运行。

2.3.2 考虑压力降和经济因素对管径的影响

管径大小直接关系到压力降，管径越小，压力降越大，运行能耗越高；管径越大，投资成本越高，因此确定管径时，需综合权衡压力降和经济因素，通过构建经济模型，计算不同管径下的投资成本与运行成本之和，选择总成本最低的管径作为最优管径，投资成本包含管道材料费用、安装费用等，运行成本主要是输送流体所需的能耗费用，同时需考虑管道的使用寿命、维护成本等因素对经济模型的影响，采用耐腐蚀但价格昂贵的管道材料，虽初期投资高，却能延长管道使用寿命，降低长期维护成本，在经济模型中需综合权衡这些因素。

2.4 相分布的考虑

2.4.1 相分布对管道设计的重要性

相分布指多相流中各相在管道截面上的分布状况，它影响管道的压力降、流速分布、磨损和腐蚀等，气液两相流中，相分布不均匀可能加剧管道局部腐蚀，如环状流中液膜在管道壁面分布不均匀，可能使液膜

较薄的部位更易受到气相中腐蚀性成分的侵蚀，液固两相流中，固体颗粒的不均匀分布可能导致管道局部磨损严重，如颗粒集中在管道底部时，底部壁面的磨损会加剧，因此准确掌握相分布情况，对合理设计管道结构、选择适宜材料以及制定有效的防腐蚀、防磨损措施意义重大，相分布还会随管道运行时间发生变化，如固体颗粒的沉积、气液界面的波动等，这就要求在管道设计寿命内持续关注相分布动态变化，适时调整设计和维护策略。

2.4.2 确定相分布的方法

确定相分布的方法包括实验测量和数值模拟。实验测量方法有射线法、电导法、光学法等，射线法利用射线穿过两相流时的衰减特性测量各相的浓度分布；电导法通过测量两相流的电导率变化确定相分布；光学法利用光的折射、散射等特性观察相分布，数值模拟方法通过建立两相流的数学模型，借助计算流体力学（CFD）软件求解，可得到管道内相分布的详细信息，常用的两相流模型有欧拉-欧拉模型、欧拉-拉格朗日模型等，欧拉-欧拉模型将各相视为连续介质，通过求解各相的守恒方程得到相分布；欧拉-拉格朗日模型则将一相视为连续相，另一相视为离散相，通过跟踪离散相颗粒的运动轨迹确定相分布，但数值模拟的准确性依赖于模型的选择和参数的设定，需通过实验数据不断验证和优化。

2.5 其他关键参数

2.5.1 温度对两相流参数的影响

温度变动会改变两相流中各相的物理性质，气体的密度与粘度会随温度上升而改变，液体的粘度则随温度上升而减小，这些物性的改变会作用于流速、压力降等参数，高温环境下的气液两相流中，气体发生膨胀会造成流速增大，压力降也会随之出现变化，所以在两相流管道设计工作中，必须考虑温度对各项参数的影响，借助相关的物性计算公式或图表，获取不同温度条件下的物性数据，为参数计算提供依据，部分涉及相变的两相流过程，比如气液两相流的冷凝或蒸发，温度的细微变动就可能导致相平衡状态改变，进而对相分布和流动特性产生显著影响，这对参数计算的精度提出了极高要求。

2.5.2 管道粗糙度对两相流的影响

管道粗糙度会作用于两相流的摩擦阻力。两相流环境中，粗糙的管道壁面会强化相间的相互作用，使压力降有所增加，液固两相流里，粗糙的壁面更易让固体颗粒产生附着和磨损现象，从而影响管道的使用年限，进行管道设计时，要依据两相流的特性和要求，挑选合适的管道粗糙度，并且在压力降计算过程中纳

入粗糙度的影响，可通过相关的粗糙度修正系数来调整压力降的计算结果，管道在长期运行期间，由于受到腐蚀、磨损等因素影响，粗糙度会发生改变，这一点也需要在管道维护和再次设计时加以考虑，以保障管道性能保持稳定。

3 参数确定过程中的相互关系与优化策略

流量、流速、压力降、管径和相分布等参数存在内在关联，流量出现变动会直接作用于流速，流速又与压力降和管径密切相关，当管径缩小时，若流量保持不变，流速会随之上升，压力降也会相应加大，相分布发生改变会影响各相的流速和压力降，进而对整个管道系统的性能产生作用，气液两相流中，若气相分布不均，可能造成局部流速和压力降出现异常，温度和管道粗糙度等因素也会通过改变物性和摩擦阻力，间接对其他参数产生影响，温度升高会使气体密度下降，相同流量下流速会有所增加；管道粗糙度增大则会导致压力降上升。

4 结论

两相流工况下化工管道设计关键参数的确定是一个复杂且系统的过程，涉及两相流的基本特性、多种参数的计算方式以及参数间的相互关联，通过合理运用流量与流速的计算方法、准确选用压力降计算模型、综合考量管径确定的各类因素、充分关注相分布的影响以及重视温度和管道粗糙度等其他关键参数，并对各参数间的关系进行优化，能够实现两相流工况下化工管道的安全、高效设计，随着计算技术和实验技术的持续发展，两相流理论和管道设计方法将不断完善，为化工行业的发展提供更坚实的技术支持，保障化工生产在两相流工况下稳定、可靠地运行，未来，针对两相流复杂特性的深入研究，特别是对多参数耦合作用机制的探索，将为化工管道设计关键参数的精准确定开辟新路径，进一步提升化工生产的安全性、经济性与环保性。

参考文献：

- [1] 王丹青. 化工管道设计与工程实践 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45(5):1-6.
- [2] 李明伟. 多相流压力降计算方法综述 [J]. 石油化工设备, 2020, 49(3):1-8.
- [3] 于宪. 基于 CFD 的多相流相分布模拟研究 [J]. 计算机与应用化学, 2021, 38(4):1-10.
- [4] 王欢, 王瑞, 张淑洁. 非开挖管道修复技术及相关建议 [J]. 油气储运, 2008, 27(1):43-46.
- [5] 林泽泉, 王文奎, 刘爽, 等. 小口径管道旋风法腐蚀治理技术 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6):590-593.