

多相流在油田集输中的传输特性及影响因素分析

马 妍 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 在油田集输系统中, 多相流的存在具有相当的普遍性。多相流复杂的气-液-固相互作用, 会实质性的影响到油气集输的效率与系统稳定性。本文出于安全集输考量, 对多相流在集输过程中的传输特性进行了系统分析, 针对多相流的流型分布、相间作用机制、压降特性、流动稳定性等关键传输特性进行了概述总结; 同时对影响多相流动行为的各种主要因素, 包括流体物性、管道结构参数、环境与操作条件、多相流设备特性等内容, 进行了深入探讨与分析。

关键词: 多相流; 油田集输; 流型特性; 压降机制

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 025-0109-03

Analysis of the Transmission Characteristics and Influencing Factors of Multiphase Flow in Oilfield Gathering and Transportation

Ma Yan (Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The existence of multiphase flow is quite common in the oilfield gathering and transportation system. The complex gas-liquid-solid interaction of multiphase flow can substantially affect the efficiency and system stability of oil and gas gathering and transportation. This paper, considering safety in gathering and transportation, systematically analyzes the transmission characteristics of multiphase flow during the gathering and transportation process. It summarizes and outlines the key transmission characteristics of multiphase flow, including flow pattern distribution, interphase interaction mechanism, pressure drop characteristics, and flow stability. At the same time, it conducts in-depth discussions and analyses on various main factors influencing multiphase flow behavior, including fluid properties, pipeline structural parameters, environmental and operating conditions, and multiphase flow equipment characteristics.

Keywords: Multiphase flow; Oilfield gathering and transportation; Flow pattern characteristics; Pressure drop mechanism

关于各地油田的开发, 目前也已逐渐进入中后期阶段, 原油中含水率升高的问题、气油比波动增大问题以及原油黏度升高等各类问题, 都使得集输管道中多相流动的现象变得更加复杂。跟单相流模式对比来看, 多相流集输模式很显然在传输过程中, 会表现出更强的非线性、非稳态特征, 流型也会更加多样、界面作用会更加显著。在这种情况下, 往往很容易会引发流动阻力增加的问题, 还是使得压降波动剧烈变化, 甚至出现设备磨损加剧等情况。因此, 深入研究多相流的流动特性及其影响因素, 是提升油田集输效率与运行稳定性的关键环节之一。

1 油田集输中多相流的传输特性

1.1 流型分布特性

在集输管道中, 多相流的流型受流速、相含量、管径与管道倾角等因素影响, 主要可划分为泡状流、段塞流、环状流与雾状流等四类^[1]。其中, 泡状流主要出现在低气液比的水平段, 气体以细小气泡形式分散在连续液相中, 流动较为稳定。段塞流则略有不同, 基本的表现是气泡聚并过程, 然后形成大气塞, 一般还会伴有显著的液段与气段交替的问题, 很容易就会引发周期性压力脉动现象, 这种流型是油气水三相流

动中, 最具破坏性的流型, 一定要着重避免这类问题的产生。在集输系统运行中, 段塞流会比较容易引发设备疲劳问题, 后续影响比较也是比较严重, 必须要重点监测此类问题的发生。而环状流一般是在高气液比条件下产生的, 液体会形成一种管壁薄膜, 中心气相会夹带小液滴做高速前行状, 该流型在一定条件下, 有良好的稳定性, 对于降低能耗也有一定的帮助^[2]。

1.2 相间作用机制

多相流的核心特性之一还包括了相间界面的复杂作用机制这一点。因为物质之间的相互作用会导致各种不确定性问题, 气液两相之间本身就存在显著的速度差, 会引发曳力效应, 气泡或者液滴的运动轨迹就会在这个作用下发生偏移, 改变流体的整体流型。在油田集输管道中, 这种速度差甚至还可能会引发一种较为明显的压力波动现象, 对流体流动过程产生明显影响。而且, 界面张力实际上还会对相间稳定性有决定性的影响作用, 它会让乳状液滴的聚并与破裂行为更加频繁起来, 然后改变集输系统的流动状态^[3]。再加上温度与压力的变化, 很容易就会诱发质量与能量之间复杂的交换过程, 比如说, 产生气体凝析液或者析出原油蜡晶等现象, 从而直接就会影响到油田集输

设备的运行工况，让相同集输条件下的多相流系统，变得更加不稳定与复杂化。

1.3 压力与能量特性

多相流中的压降机制是显著区别于单相流的，这也是多相流的一大传输特性。一般来说，多相流的压降机制可以分为摩阻压降、重力压降与加速压降三部分。摩阻压降的话，主要由相间剪切与壁面摩擦所引起的。重力压降的话，则主要是受管道高程变化的影响比较明显。加速压降的来源，基本就是由相含量变化所引起的速度变化所产生的。总体来看，多相流的能量耗散是要普遍高于单相流的，一般实践中，工程人员会添加一些减阻剂来调整压降机制，或者是通过一定的方法去优化整个流型的分布情况，这样也能一定程度上降低集输阻力的系数，提升集输系统能效，延长集输设备使用寿命^[4]。

1.4 流动稳定性

多相流较差的流动稳定性也是其比较明显的传输特性之一，主要表现就是多相流会产生瞬态波动、界面扰动、流型突变等各种问题。比如，在段塞流条件下，气液交替流动，会引发强烈的压力与流量波动。而这种波动很快就会传导到下游的相关集输设备中，让整个集输系统变得十分不稳定，严重的时候甚至可能会让集输管道破裂，造成严重的集输系统瘫痪问题。而且，不同段的集输系统的温度与流体浓度有梯度差异，界面扰动也会增强，那么相间传质与能量损耗也会进一步放大，这就很可能会引发更大范围的不稳定性问题。而且，流型转换是有明显滞后效应的，也就是说，前期的参数变化可能并不会很大程度引起流型突变，可一旦操作参数接近了某个临界值，哪怕是再微小的扰动，也可能会一下子就引发剧烈的流型变化，系统也会因此而剧烈扰动，甚至导致一些设备失效，整体集输流程直接宕机，危险性极大^[5]。

2 多相流传输的关键影响因素

2.1 流体物性参数

在油田集输系统中，多相流的传输特性会受到流体物性参数的显著影响。一般来说，像黏度、密度、界面张力、蜡含量和含水率等物性指标，在油气水多相集输过程中不仅会单独发挥作用，还往往会存在显著的耦合关系，把控着整个集输管道中的流型结构与稳定性。比如，高黏度原油在集输工况下很容易就会产生一种黏滞阻力，不仅会让压降升高，还会增加泵送能耗，而如果集输温度过低，黏度就会升高，流体可能就会中断流动，此时就要通过加热等手段才能继续集输。再比如，在一些倾斜或起伏的集输管线中，密度差的问题会加剧相分离的发生，让气体更加聚集

于管顶、让液体尽量沉积于管底，破坏整个流型稳定性。而界面张力的变化也同样会影响气液界面的稳定性发展情况，比如，当张力高时，流动形态就会较为稳定，张力较低的话，就可能会引发流型突变，影响集输流程的调控效果。蜡含量和含水率的影响也差不多，蜡含量高形成蜡垢层，就会增加摩阻，缩小有效管径，含水率低时集输体系一般就多表现为水包油体系，黏度会比较高、能耗也会更大。

由此可以看出，流体物性参数的变化，在油田多相流集输工程中，是有决定性作用的。这些参数不仅会影响到多相流的流动稳定性、压降特性与设备选型，还会直接关系到整体集输系统的可靠性，以及相应的运行经济性。所以，从系统角度综合分析这些参数的耦合效应，建立一套完善的“物性—流型—集输行为”关联分析模型，对于提高油田集输运行效率，有重要的研究意义。

2.2 管道结构条件

在油田集输系统中，管道结构条件对多相流行为同样有着重要作用。一般来看，集输过程中涉及到的一些主要的管道结构影响因素，包括管径大小、倾角变化、壁面粗糙度及管件布局等，都会对整个集输过程产生交互作用，是不能独立来分析的。比如说，管径的大小就是首要影响因素，小管径的话集输流速就更快，气液剪切效果也会更强，气液混合会更加均匀，对于泡状流或者是乳状流的集输，就会更加稳定。但很显然，小管径集输的能耗受摩阻压降影响肯定也更大，特别是在一些高黏或者是含蜡集输的过程中，就更容易堵塞管道。但是，相对而言，大管径虽然说是可以降低压降，但在低速段气液分层会更加明显，积液与段塞的出现概率也会更大，所以，管径选择不能一概而论，得根据多相流的实际情况来选择和匹配调整。至于倾角的话，其实影响也是很显著的。因为上倾段通常来说，液体滞留会比较严重，就容易频繁段塞，如果说角度超过了 $+15^\circ$ ，段塞频率就会比水平段要高出40%~60%，这个对集输效率的影响就非常大了。所以，在低压气井集输过程中，就要合理的减少上倾段的长度。但下倾段也有问题，因为液体积聚就会引发液塞冲击，同样也会对管道和多相流造成比较严重的影响，低点位置还是要做好排液结构的设计，保障集输畅通。管内壁粗糙度的影响主要是对摩阻的影响比较大，一般来说，高粗糙度相间混合与乳化程度会更好，但是摩阻会更大，集输能耗会增加，蜡晶沉积风险也会变大，要做好防蜡涂层的设计。至于管件布局，在集输实践中就可以发现，一般急转弯像是 90° 的弯头，就可能会导致气液分布不均的问

题发生,在集输过程中很容易就会形成积液或者是扰动问题;而Y型或者是 45° 的弯头,就能更好的维持流型的稳定性。

所以总的来看,单靠改变某一管道的结构参数,是很难直接解决多相流不稳问题的。集输设计要从系统的角度高度统筹,既要考虑管径、倾角、粗糙度与管件组合方式等因素的影响,又要结合集输经验与仿真分析,才能排除结构问题,有效控制压降,抑制段塞风险,预防蜡堵问题,提高整个集输系统的长期稳定性。

2.3 环境与操作参数

在多相流集输系统中,环境与操作参数作为关键的外部可控因素,对流动稳定性、设备安全性以及集输能耗水平都会产生深远的影响。比如,温度和压力场就是直接作用于集输介质物性的决定性因素。低温的话,原油的黏度就会大幅提升,流动性就会变差,蜡晶析出可能性会增加,严重的话还可能堵塞集输系统。而高压对集输系统而言,一方面是有利于维持雾状流等稳定流型的,但过高压也会导致气液过度混合,增加计量误差和仪表读数不确定性。还有气液比(GLR)的环境问题,高GLR下,系统容易保持环状流状态,集输流态稳定性更好,但能耗上升会更明显,低GLR就会让多相流变成泡状或者是段塞流,威胁设备运行安全。而多相流的不同流动状态,对集输系统也同样会构成显著的差异化影响。比如,在层流条件下,气液易分层滑脱,而湍流条件下,则会增强扰动和混合,但能耗会更高。所以,一般的集输过程中,也可以注入一些微气泡,或者多一些轻微局部扰动,想办法促进“层—湍”流转变的发生,增强集输系统的整体流动均匀性。还有非稳态操作也是类似的,比如集输启动初期,相分布还不够均匀,此时就容易引发瞬时段塞流,造成压力激增问题,所以如果没有配备有效的缓冲机制,就很容易会出现集输系统突压风险,对管道造成结构性伤害。

由此可见,环境与操作变量的变化,对集输系统是会产生系统性影响的,要充分提升集输运行的可靠性,就要将这些变化因素,纳入到全过程智能调度与控制框架中,真正让集输系统在多风险影响下,利用智能调控,做到高效、安全与长周期稳定运行目标。

2.4 多相流设备特性

多相流集输系统的稳定运行,需要高度依赖设备性能与集输需求之间的匹配关系。不同设备在结构设计、响应特性及适应能力上的差异,会对集输效率、流型控制以及计量精度产生严重的影响。比如,段塞捕集器可以防范集输突发波动,其在设计上就要优先满足缓冲空间和分离效率两方面的要求。为保障高频

段塞场景下的集输稳定,立式与卧式捕集器可联合使用,前者可以对密度分布进行一定的调节,后者更好的进行排液与二次分离,二者配合使用,效果更好更快。而另一种关键设备——多相泵,其类型与调节能力对集输系统运行状态也同样有直接的影响。比如,容积式泵就具有良好的抗气锁能力,对高GLR集输场景更加实用,而离心泵效率更高,但在高含气环境下易汽蚀,这种情况下就最好并联气液分离段共同运行。而在计量环节,多相流量计的重要性就相对比较突出。比如,复杂集输流态下,传统测量仪器往往可能会让误差扩大,所以,引入多传感器融合机制,对含水率、总流速与持液率等关键参数进行综合分析,在集输流态剧烈波动或阶段性段塞形成时,多相流量计的智能算法就能展现出更强的追踪能力,使集输数据有更高的分析可靠性。

所以,从全局来看,集输设备性能与系统协同能力会直接影响到整个多相流集输工程的安全与效率。为了构建稳定的集输体系,就不能继续依赖单一设备功能,而是要让设备形成协同调控机制,推动集输全过程的智能一体化演进,从而保障整体集输系统的稳定性和高效性。

3 结语

油田集输过程中多相流动的传输特性有极强的复杂性与非线性特征,多相流的行为,通常会受到流体物性、管道结构、环境参数及操作工况等多种因素的协同制约。不同变量之间的相互作用,常常会引发流型突变、压力脉动与能量损耗等非稳态现象。因此,必须从系统工程角度出发,深入的去理解和分析多相流的本质特征,在设计与运行层面,要构建出一套适合多参数协同的调控机制,才能真正有效的提升集输系统的运行稳定性与经济性,为深层油气资源的高效开发,提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 邱江源.石油地面集输管网系统的优化设计分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2025,45(08):103-105.
- [2] 李成龙,李岩,苟利鹏,姬忠文.油田集输管道检测技术研究及应用[J]. 广州化工,2024,52(03):135-137.
- [3] 朱红波,王伟,孙立强,周永新.油田集输管道多相流冲刷腐蚀机理与影响因素研究进展[J]. 石油工程建设,2023,49(03):1-9.
- [4] 吴超,丰劲松,宫彦双,张爱良,李茜茜.油田集输管道缓蚀剂效率主控因素研究[J]. 科技和产业,2022,22(10):394-399.
- [5] 马立波.油气集输管道内腐蚀及内防腐对策研究[J]. 全面腐蚀控制,2021,35(11):110-111.