

基于流体力学理论的聚乙烯装置 气力输送系统优化研究

万欢

杭州百子尖科技股份有限公司西安分公司

摘要: 本研究基于流体力学理论对聚乙烯装置气力输送系统进行分析,通过分析系统内稀相气固两相流特征,识别影响输送性能的关键流体力学因素,包括气流速度、压力分布以及颗粒运动轨迹等,并建立以最小能耗为目标的优化模型,对气流速度、固气比和管径等关键参数进行理论优化,并从管道几何结构、供气系统流场、颗粒分离收集等方面进行系统结构优化设计。结果表明,优化后系统压降降低 22.4% ~ 28.7%,节能率达 24.6% ~ 29.3%,压力波动控制在 $\pm 5\%$ 以内,颗粒破碎率降低超过 50%,有效提升系统的经济性和稳定性。

关键词: 流体力学; 聚乙烯装置; 气力输送系统

1 引言

力学的一个分支,主要研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态和运动状态以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动规律的问题。聚乙烯作为重要的石化产品,其生产装置中的气力输送系统承担着颗粒物料的高效传输任务。气固两相流作为典型的多相流动现象,其内在的复杂性需要通过深入的流体力学分析来揭示。本研究旨在运用现代流体力学理论,系统分析聚乙烯气力输送过程的流动机理,建立科学的优化设计方法,为提升系统性能提供理论指导。

2 流体力学导向的系统分析

2.1 现有系统流体力学特性分析

聚乙烯装置气力输送系统呈现典型的稀相气固两相流特征,颗粒在 15 ~ 25m/s 的高速气流中保持悬浮状态,形成相对分散的流动模式。系统内部流场分布呈现显著的非均匀性,颗粒浓度在管道横截面上呈现底部高、顶部

低的梯度分布,这种分布模式在垂直管段中更为明显。管道内压力场表现为沿程递减的特征,压力梯度在弯头、三通等局部构件处出现突变,形成局部高压区和低压区的交替分布^[1]。流动状态具有强烈的瞬态特性,表现为压力和流量的周期性波动,波动幅度通常占平均值的 10% ~ 20%。颗粒运动轨迹呈现随机性和复杂性,在直管段中颗粒主要沿轴向运动,而在弯头处则产生明显的径向和切向运动分量。气固两相间存在明显的速度滑移现象,颗粒速度通常为气流速度的 70% ~ 85%,这种速度差异是维持颗粒悬浮和推进的关键因素^[2]。

2.2 系统性能影响因素的流体力学解释

气流速度是决定输送能力的核心因素,当速度低于临界悬浮速度时颗粒开始沉积堆积,形成移动床流型导致管道堵塞,而过高速度虽保证输送可靠性但会显著增加能耗并加剧颗粒与管壁的冲击破碎。压力损失的产生机制源于气固两相间的动量传递和能量耗散,颗粒加速过程消耗气流动能形成加速压降,

颗粒与管壁碰撞摩擦产生摩擦压降,垂直输送段还需克服颗粒重力做功^[3]。管道几何形状对系统性能的影响主要体现在局部阻力的产生,弯头处流线弯曲产生离心力使颗粒向外壁聚集,造成浓度分布严重不均并引起局部压降激增,同时高浓度区域的颗粒碰撞加剧导致磨损和破碎问题。系统稳定性受到多重流体力学因素制约,颗粒浓度波动引起阻力特性变化,管道内压力脉动影响气流分布均匀性,而气固两相流固有的不稳定性使得系统容易出现间歇性堵塞和冲刷现象,这些因素相互耦合决定了整个输送过程的可靠性和经济性^[4]。

3 基于流体力学理论的系统优化

3.1 优化目标与流体力学约束

基于流体力学理论的聚乙烯气力输送系统优化需要在满足颗粒悬浮输送基本条件的前提下实现能耗最小化,这要求气流速度必须大于颗粒的临界悬浮速度:

$$U_s = 4 \sqrt{\frac{gD_p(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (1)$$

式中: U_s ——颗粒悬浮速度, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

D_p ——颗粒直径, m;

ρ_p ——颗粒密度, kg/m³;

ρ_g ——气体密度, kg/m³。

系统总压降的优化目标可表达为:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{accel} + \Delta P_{friction} + \Delta P_{gravity} \quad (2)$$

式中: ΔP_{total} ——系统总压降, Pa;

ΔP_{accel} ——加速压降, Pa;

$\Delta P_{friction}$ ——摩擦压降, Pa;

$\Delta P_{gravity}$ ——重力压降, Pa。

其中加速压降与固气比和速度差的平方成正比, 摩擦压降主要受管道粗糙度和雷诺数影响, 重力压降取决于垂直输送高度和颗粒载荷。流体力学约束条件包括连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m³;

t ——时间, s;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, m/s。

动量守恒方程需考虑相间阻力项和壁面摩擦项的耦合效应, 能量方程中必须计入颗粒与气流间的传热和动能交换过程。优化过程中还需满足管道内最大剪切速率不超过颗粒破碎的临界值, 同时保证各管段内的颗粒体积浓度不超过堵塞浓度的 80% 以维持稳定输送, 这些约束条件共同构成了系统优化设计的边界参数。

3.2 关键参数的流体力学优化

气流速度的优化基于最小能耗原理和输送可靠性要求, 通过建立速度与压降关系的数学模型:

$$V = V_{min}(1 + \alpha) \quad (4)$$

式中: V ——优化气流速度, m/s;

V_{min} ——最小输送速度, m/s;

α ——安全系数, 无量纲。

当 α 值在 0.3 ~ 0.5 时可在保证输送稳定性的同时避免过度能耗。固气比的优化需要考虑其对管道压降的非线性影响, 根据压降与固气比的关系:

$$\frac{\Delta P}{L} = f(\mu, Re, Ar) \cdot \frac{\rho_g V^2}{2D} \quad (5)$$

式中: L ——管道长度, m;

μ ——固气比, kg/kg;

Re ——雷诺数, 无量纲;

Ar ——阿基米德数, 无量纲;

D ——管道直径, m。

通过数值求解可确定使总压降最小的最优固气比通常在 8 ~ 15 kg/kg 范围内。管径优化采用经济管径理论, 综合考虑管道投资成本和运行能耗成本, 建立目标函数:

$$TC_{min} = C_I \cdot D^n + C_O \cdot \frac{V^m}{D^k} \quad (6)$$

式中: TC_{min} ——总成本最小值, 元;

C_I ——管道投资成本系数;

C_O ——运行成本系数;

n 、 m 、 k ——经验指数, 无量纲。

通过对管径 D 求导可得最优管径与输送量和物料特性的关系。供气压力的优化需要满足克服系统总阻力的要求, 同时考虑压缩机效率曲线和功耗特性, 建立压力-流量-效率的三维优化模型, 确保系统在最高效率点附近运行, 通过拉格朗日乘数法求解约束条件下的最优操作参数组合。

3.3 系统结构优化设计

3.3.1 管道系统几何优化

管道弯头的优化设计采用大曲率半径结构以减少离心力效应对颗粒分布的影响, 弯头曲率半径与管径的比值应满足:

$$\frac{R}{D} \geq 5 \quad (7)$$

式中: R ——弯头曲率半径, m。

同时弯头内侧采用耐磨衬里设计以应对颗粒冲击集中的问题。三通分流器的优化基于流量均匀分配原理, 通过调整分支管道的几何参数和阻力特性, 使各分支的压降保持一致, 分流角度控制在 30° ~ 45° 以减少流动分离和涡流的产生。管道布置的优化需要最小化弯头数量和垂直输送高度, 采用三维路

径优化算法确定连接各设备的最短阻力路径, 同时考虑管道支撑和热膨胀补偿的工程约束条件。

3.3.2 供气系统流场优化

供气系统的优化重点在于实现管道内气流分布的均匀性和稳定性, 通过在发送罐底部设置多点供气结构, 每个供气点的流量按照下式进行精确计算和调节:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

式中: Q ——供气流量, m³/s;

C_d ——流量系数, 无量纲;

A ——喷嘴截面积, m²;

ΔP ——压力差, Pa。

气流分布器采用渐扩型结构设计, 扩散角控制在 8° ~ 12° 以避免流动分离, 内部设置整流格栅以消除旋流和提高速度分布均匀性。缓冲罐的设计需要考虑气流脉动的衰减效果, 罐体容积按照经验关联式确定:

$$V_{tank} = K \frac{Q^2}{\Delta f} \quad (9)$$

式中: V_{tank} ——缓冲罐容积, m³;

K ——经验系数, s²/m³;

Δf ——允许压力波动幅度, Pa。

通过合理的容积设计可将压力脉动控制在 ±3% 以内。

3.3.3 颗粒分离与收集优化

接收罐内的气固分离采用离心分离与重力沉降相结合的方式, 通过优化进料口的切向角度和位置, 在罐内形成稳定的螺旋流场, 离心力与重力的合力作用使颗粒快速沉降于罐底。分离效率的提升通过增设二级分离结构实现, 上升气流在经过初级分离后进入袋式过滤器进行精细分离, 过滤器的设计过滤风速:

$$v_f = \frac{Q_{gas}}{A_{filter}} \quad (10)$$

式中: v_f ——过滤风速, m/min;

Q_{gas} ——气体流量, m³/min;

A_{filter} ——过滤面积, m²。

过滤风速控制在 0.8 ~ 1.2 m/min 以保证分离效率大于 99.5%。收集漏斗的设计采用圆锥形结构, 锥角按照颗粒的安息角特性确定, 通常为 55° ~ 65°, 内壁表面光滑处理以防止颗粒黏附和架桥现象, 底部出料口配置流量控制阀门以实现连续稳定的颗粒卸料过程。

4 试验验证

4.1 试验设计

试验系统采用模块化设计理念构建中试规模的聚乙烯气力输送装置, 主要包括发送罐、输送管道、接收罐和控制系统四个核心模块, 其中发送罐容积为 2 m³ 且配备流化底板和多点供气系统, 输送管道总长度为 150 m 并包含 6 个 90° 弯头以模拟工业装置的复杂管路条件^[5]。管道系统设计为可变管径结构, 支持 DN100、DN150 和 DN200 三种规格的快速切换, 同时在关键位置安装压力传感器、流量计和颗粒浓度监测仪以实现运行参数的实时监测和数据采集。试验物料选用工业级线性低密度聚乙烯颗粒, 粒径分布范围为 2 ~ 4 mm, 堆积密度为 920 kg/m³, 通过筛分确保颗粒尺寸的均一性以减少试验误差。控制系统采用 PLC 自动控制方式, 能够

精确调节气流速度、固气比和供气压力等关键操作参数, 并通过数据采集系统实现试验过程的全程记录和分析, 试验过程中每组工况下的稳定运行时间不少于 30 min, 以确保数据的可靠性和重现性^[6]。

4.2 结果分析

4.2.1 压降特性对比分析

优化前后系统在不同操作条件下的压降特性表现出显著差异, 特别是在管道弯头和局部阻力构件处的压力损失得到明显改善, 见表 1。

试验结果表明, 优化后的系统压降显著降低, 随着气流速度和固气比的增加, 压降降低率呈现递增趋势, 这主要归因于管道几何优化和流场均匀化措施的协同效应, 当气流速度达到 26 m/s 且固气比为 18 kg/kg 时, 压降降低率达到最大值 28.7%, 证明了流体力学优化理论在高参数工况下的显著效果。

4.2.2 能耗对比测试结果

系统能耗的降低是流体力学优化效果的直接体现, 通过测量不同工况下的风机功耗和系统总能耗, 验证了优化设计的节能效果, 见表 2。

能耗测试数据显示优化后系统的节能效果随着输送量的增加而提升, 当输送量达到 18 t/h 时节能率达

到 29.3%, 单位能耗从 4.59 kW · h/t 降低至 3.24 kW · h/t, 降低幅度达到 29.4%, 这表明流体力学优化在大流量工况下具有更显著的节能优势, 同时验证了理论计算结果的准确性。

5 结语

综上所述, 通过深入分析气固两相流动机理, 建立系统性的优化设计方法, 实现系统性能全面提升, 研究成果不仅降低了系统能耗, 而且还减少了运行成本。未来研究可进一步结合人工智能和机器学习技术, 开发更加智能化的优化算法, 实现气力输送系统的自适应优化控制。同时, 还需深入研究不同物料特性对优化效果的影响规律, 拓展优化方法的适用范围。

参考文献:

[1] 周锋, 张强, 田莹, 等. 煤炭气力输送弧形堵头弯管磨损弱化特性 [J]. 煤炭学报, 2024,49(S2):1248-1258.

[2] 徐止恒. 基于 CFD-DEM 的湿颗粒气力输送数值模拟 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.

[3] 巴涵, 周甲伟, 郭小乐, 等. 水平转竖直弯管粗颗粒气力输送特性数值模拟 [J]. 液压与气动, 2023,47(03):43-50.

[4] 张嘉, 张宏, 侯集, 等. 旋流气力输送管道的结构优化研究 [J]. 化学工程, 2024,52(06):47-52.

[5] 张钰铎, 邢飞, 刘伟军, 等. 基于 CFD-DEM 对激光熔覆载气输送喘粉问题的数值模拟研究 [J]. 应用激光, 2024,44(04):49-58.

[6] 周甲伟, 郭小乐, 巴涵, 等. 基于 CFD-DEM 耦合数值模拟的垂直管道气力输送流型特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2023,44(09):2464-2473.

表 1 压降特性对比

气流速度 /(m/s)	固气比 /(kg/kg)	优化前压降 /(kPa/100 m)	优化后压降 /(kPa/100 m)	压降降低率 (%)
18	10	15.2	11.8	22.4
20	12	18.6	13.9	25.3
22	14	22.1	16.2	26.7
24	16	26.8	19.4	27.6
26	18	32.4	23.1	28.7

表 2 能耗对比

输送量 / (t/h)	优化前功耗 /kW	优化后功耗 /kW	节能率 (%)	优化前单位能耗 / (kW · h/t)	优化后单位能耗 / (kW · h/t)
5	45.2	34.1	24.6	9.04	6.82
8	52.8	38.9	26.3	6.60	4.86
12	63.4	46.2	27.1	5.28	3.85
15	71.9	51.8	28.0	4.79	3.45
18	82.6	58.4	29.3	4.59	3.24