 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11527

Research on Pneumatic Transportation of Powdered Materials

Jian Wang

China Energy Construction Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

Abstract

Pneumatic conveying of powdered materials is a key technology in industrial powder transportation, representing a complex two-phase gas-solid flow system. This paper elucidates the working principles and system architecture of pneumatic conveying, classifies conveyance modes based on three criteria—solid-to-gas ratio, airflow pressure, and power source—and compares their respective advantages and limitations. It analyzes major influencing factors such as material properties and conveying parameters, and proposes optimization recommendations grounded in numerical simulations and experimental studies. The integration of dense-phase conveying with intelligent control represents a primary trend in technological development, providing theoretical references and practical guidance for engineering design, parameter optimization, and technical advancement in powder pneumatic conveying systems.

Keywords

powdered materials; pneumatic conveying; gas-solid two-phase flow; dense phase conveying

粉状物料气力输送的研究

王剑

中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司，中国·浙江 杭州 310012

摘　要

粉状物料气力输送是工业粉体转运的关键技术，属于复杂气固两相流运动体系。本文阐述了粉状物料气力输送的工作原理与系统构成，依据固气比、气流压力、动力源三大标准划分输送类型并对比各类输送方式优劣，分析了物料特性、输送参数等主要影响因素，从数值模拟和实验研究现状出发，提出了相应的优化建议。密相输送同智能化控制相结合，是技术发展的主要趋向，可为粉体气力输送工程设计、参数调试及技术迭代提供理论参考与实践指导。

关键词

粉状物料；气力输送；气固两相流；密相输送

1 引言

当前，随着“双碳”战略深化与制造业智能化转型，下游产业对于气力输送的节能性、稳定性和安全性有了更高的要求，新能源领域对于高纯度、低破碎率输送的需求更加明显。但是粉状物料气力输送属于气固两相流复杂的运动，存在着输送机理还不清楚、能耗高、管道磨损和堵管风险大等问题，从而影响了技术的推广使用。因此，对粉状物料气力输送的原理、影响因素及优化方法进行深入的研究，解决实际应用中遇到的关键问题，对工业绿色高效发展、产业升级有重要的理论和工程价值。

【作者简介】王剑（1977–），男，中国浙江杭州人，本科，高级工程师，从事物料输送设计研究。

2 粉状物料气力输送的基本原理与系统组成

2.1 基本原理

粉状物料气力输送的基本原理就是用气源设备产生的气流作为动力载体，使粉状物料在封闭管道内克服重力、摩擦力和颗粒间的作用力，随气流一起运动，从供料端到卸料端进行转运。本质上就是气固两相流的运动过程，气流的动能和静压能同时作用于物料颗粒上，使物料颗粒处于悬浮、集团或者栓流等运动状态，具体的运动形态取决于气流速度、物料浓度、物料性质等因素。输送时气流和物料颗粒之间存在着相互作用，气流对颗粒有拖曳力、升力的作用，使颗粒运动，颗粒又会对气流产生阻力，使气流能量消耗增大，管道压力损失也随之增加。颗粒和颗粒之间、颗粒和管道内壁之间的撞击、摩擦会造成颗粒破碎、管道磨损，从而影响输送效率和系统的使用寿命。气力输送要顺利进行，必须合

理地选择气源动力、输送参数和物料性质，使气流动力和能量损耗达到最佳状态，保证物料的稳定输送 [1]。

2.2 系统组成

粉状物料气力输送系统是由多个功能模块共同组成的有机整体，从而保证输送过程的连续性、稳定性、高效性，主要由气源设施、供料设施、输送管道、分离除尘设施、贮料设施和控制系统等六个部分组成，各部分的功能明确、互相联系（图 1 所示）。气源设施是系统的心脏，提供稳定的气流动力，常用罗茨风机、螺杆压缩机等设备，性能直接影响输送距离、输送量和能耗，要根据输送类型和工艺要求选择；供料设施在系统起点，主要作用是把粉状物料均匀稳定地送入输送管道，防止出现团聚、架桥等情况，选型时需要考虑物料的流动性以及粒度分布。输送管道网络是物料和气流的传输通道，材料、直径、距离等参数需要综合考虑设计；分离除尘设施在输送末端分离物料和气流、处理粉尘，是确保系统环保的关键；贮料设施用来临时储存物料；控制系统属于“大脑”，依靠 PLC 等设备对重要参数实施实时监控，从而达成自动化调节，应对各种异常情况，保证系统的正常运作。

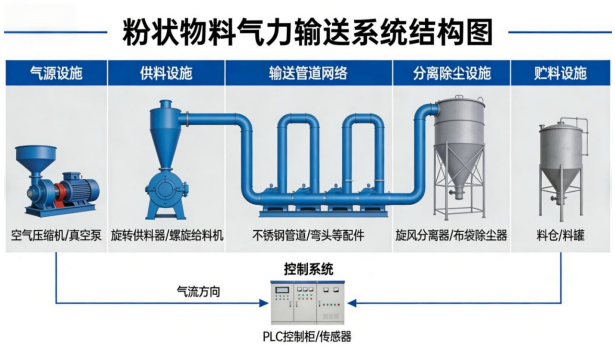


图 1 粉状物料气力输送系统的结构图

3 粉状物料气力输送的主要分类及特点

3.1 按物料浓度（固气比）分类

按输送过程中气固混合浓度即固气比，可将粉状物料气力输送分为稀相、密相、超密相三类，也是工业领域最常用的分类方式，三类模式的运行参数、物料形态与适用场景差异显著。其中稀相输送固气比为 1 ~ 5，气流速度达 18 ~ 40m/s，物料在管道内呈均匀悬浮状态，依靠高速气流动能完成输送，该模式设备结构简单、运维方便、输送连续性好，适用于面粉、普通石灰石粉等流动性佳、耐磨性弱的常规粉体，多用于 300m 以内的中短距离大流量输送场景，但高速运行会造成能耗高、管道磨损、物料破碎等问题，难以适配精细化节能生产需求。密相输送固气比为 15 ~ 50，气流速度控制在 8 ~ 15m/s，依托气流动能与静压能协同驱动物料，物料以密集栓流、集团流形态运动，有效降低了能耗、磨损与物料破碎率，输送稳定性优异，适配锂电池材料、高纯化工粉体等高附加值、易破碎特种物料，可满足 400m 级中长距离输送工况，仅存在设备结构复杂、控制精度与密封性要求高的短板。超密相输送固气比可达 200 以上，气流速度低于 8m/s，完全依靠气流静压能实现栓流输送，能耗为三类最低，但其对物料透气性、流动性、持气性要求极高，仅适用于粉煤灰等易流化轻质粉体，应用场景较为局限，仅用于特种低能耗定点输送工况。

3.2 按气流压力状态分类

根据输送管道内气流的压力状态可以分为正压输送、负压输送和混合式输送三种。正压输送的管道内压力大于大气压，气源设备在供料端，用压缩空气将物料输送到管道中，可以实现长距离、高浓度输送，可以同时把物料输送到多个卸料点，适合大规模、连续化生产，但是供料装置结构复杂，只能从一个供料点供料。负压输送的管道内压力小于大气压，气源设备在卸料端，通过负压将物料从多个供料点吸入管道，供料装置简单，不受供料场地空间限制，适合于分散供料、集中卸料的场合，但是输送距离有限。混合式输送将正压和负压输送的优点结合起来，可以从多个供料点吸料，再通过正压输送到多个卸料点，灵活方便，但是系统结构复杂、投资成本高，适合于复杂工况下的物料输送 [2]。

3.3 按动力源分类

按提供气流动力的设备类型分为离心风机式、罗茨风机式、螺杆压缩机式、真空泵式等输送类型。离心风机式输送适合于低压、大风量的稀相输送，设备成本低、维护方便，但是压力小，输送距离短；罗茨风机式输送压力稳定，适合于中低压、中长距离的稀相或密相输送，是目前应用最广的动力类型；螺杆压缩机式输送压力高，适合高压密相输送，可以实现长距离、高浓度输送，但是能耗和设备成本较高；真空泵式输送主要用在负压输送上，适合分散供料场景，密封性要求高。

4 粉状物料气力输送的关键影响因素分析

4.1 物料特性的影响

物料特性是决定气力输送系统设计方案的关键要素，主导气固两相流运动状态，主要包含颗粒形貌与粒径分布、堆积密度、流动性、湿度及磨损性五大核心指标，不同粉料的物性差异直接决定其输送模式、工艺参数与设备配置。颗粒形貌和粒径是影响输送流畅性的基础条件，球形粉体流动性好、不易团聚，适配稳定输送工况，棱角状粉体易增大气流阻力与管道磨损，纤维状粉料极易缠绕团聚、堵管风险高；粒径小于 100 μ m 的细颗粒易结块扬尘、增大输送阻力，粒径大于 1mm 的粗颗粒悬浮能耗高、设备磨损剧烈。堆积密度直接影响输送能耗与稳定性，高密度矿粉、重钙粉沉降速度快、输送能耗高、管道磨损严重，轻质木屑、粉煤灰等粉体易悬浮、能耗低，但高固气比工况下易出现物料分层、堆积不均问题。物料流动性关乎输送连续性，干燥锂电粉料、

石灰石粉流动性优异、适配性广，潮湿粉体、超细粘性粉体易结块架桥，极易造成输送中断。粉体含水率较高时，颗粒粘结力大幅提升、团聚问题加剧，难以实现稳定输送。同时，物料硬度与颗粒棱角决定磨损性，高硬度棱角粉体易损耗设备，球形轻质粉体对设备损耗极小。

4.2 输送参数的影响

输送参数主要包括气流速度、固气比、输送压力及输送距离，是调控输送效果的关键变量。气流速度是最核心的参数，过低会导致物料无法悬浮，发生堵管；过高则会增加能耗、管道磨损及物料破碎率，需根据物料特性确定临界悬浮速度与最优气流速度，通常稀相输送的气流速度为 12~40m/s，密相输送为 8~15m/s。固气比直接影响输送效率与能耗，固气比过高，物料浓度过大，气流无法提供足够的动力，易导致堵管；固气比过低，能耗增加，输送效率降低，需结合输送物料特性合理匹配。

4.3 系统结构的影响

系统结构是否合理直接影响到输送的稳定性、可靠性，主要与发送装置及管道路由、管径等密切相关。管道直径太小，气流速度太高，能耗和磨损增大；管道直径太大，气流速度太低，容易造成物料堆积堵塞管道，管道直径应根据输送量、气流速度、物料性质等计算确定。发送装置的选择要和物料的特性相适应，对于容易团聚的物料应该选用有流化功能的发送装置。分离除尘设备的配置影响物料回收效率和环保性，应根据物料粒度分布合理组合，保证物料回收率和排放达标 [3]。

5 粉状物料气力输送的现存问题与优化措施

5.1 现存主要问题

虽然粉状物料气力输送技术已经得到广泛的应用，但是在实际工程中还存在着许多问题，限制了它的进一步发展。一是，能耗偏高，气力输送系统的能耗主要集中在气源设备，尤其是稀相输送，能耗是传统机械输送的 2 到 40 倍，不能符合双碳战略的要求；二是，管道磨损和物料破碎问题严重，对于磨损性强、易破碎的物料，管道磨损严重，物料破碎率高，产品质量和系统寿命受到影响；三是，堵管风险大，当物料特性变化、输送参数不合理或者系统维护不到位的时候，容易造成物料堆积堵塞管道，造成生产中断；四是，智能化程度低，部分输送系统还使用人工控制，不能对气固两相流状态进行实时监控，不能实现参数的动态优化。

5.2 优化措施

针对上述问题，并结合目前的技术发展趋向给出如下改善办法。一是，推广密相输送技术，代替传统的稀相输送，提高固气比、降低气流速度来降低系统的能耗，减少管道的磨损和物料的破碎，特别适合于高附加值、易破碎物料的输送；二是，对系统参数及结构进行优化，利用数值模拟和实验研究，确定各种物料的最佳气流速度、固气比等参数，合理设计管道直径、弯头布置，选用耐磨、耐腐蚀的管道材质，减小管道磨损和阻力。三是，提高系统的智能化程度，利用数字孪生、物联网等技术，在管道沿线设置压力、浓度、温度等传感器，对运行情况进行实时监测，用智能控制系统对参数进行动态调节，提前发出堵管预兆，达到设备的预防性维护，从而减少非计划停机造成的损失；四是，改进供料和分离除尘装置，根据不同的物料特性，研发出相应的供料装置，解决物料团聚、架桥的问题，改善分离除尘设备的组合，提高物料的回收率和环保性。

6 结语

综上，粉状物料气力输送作为绿色、高效、灵活的物料转运技术，在新能源、化工、医药等众多工业领域有着不可替代的作用，伴随着制造业智能化、绿色化转型，它的应用范围将会越来越广，技术需求也会越来越高。本文对粉状物料气力输送的原理、系统组成、分类及影响因素进行了系统的分析，对目前技术应用中存在的能耗高、管道磨损、堵管等问题进行了分析，并提出相应的优化措施。气力输送技术今后会向着智能化、节能化、专用化方向发展，数字孪生和智能运维将会成为技术高地，密相输送和特种物料输送技术会不断深入，国产高端设备的竞争力会持续提高。后续的研究要集中于气固两相流机理的深入、智能化控制系统的好坏和特种物料输送技术的突破，促使气力输送技术不断改进，给工业绿色高效发展赋予更强的支持。

参考文献

[1] 张天兵,一种粉状物料倾斜向上输送的空气链式输送机.山西省,山西龙舟输送机械有限公司,2024-11-14.

[2] 甄杰,王锦锋. 粉状物料皮带输送机回转式取样机研究[J].中国金属通报,2024,(06):198-200.

[3] LG料封泵气力提升输送技术的重大突破输送粉状物料的升级换代设备[J].水泥,2022,(01):86.