

基于 DDPM 的煤层气管道冲蚀磨损研究

赵恒桢 强海亮 王 平

中联煤层气有限责任公司神府分公司 陕西 榆林 719000

摘 要: 为了探究煤层气管道运输过程中所携带的煤粉颗粒对“Z”形管冲蚀磨损的影响规律, 基于 CFD (Computational Fluid Dynamics) 方法, 采用 DDPM (Dense Discrete Phase Model) 耦合 DNV (Det Norske Veritas) 冲蚀模型, 对“Z”形管内气固两相流动及冲蚀特性进行数值模拟。研究揭示了煤粉颗粒的运动规律及管壁冲蚀分布特征, 并分析了颗粒粒径和进口流速对冲蚀行为的影响。结果显示: “Z”形管道的两个弯头外环侧壁面表现出显著的冲蚀倾向; 在单变量控制的条件下, 各弯头的最大冲蚀磨损速率随着煤粉颗粒粒径的增大而减小, 煤粉颗粒粒径较小时, 弯头 II 磨损最为严重; 煤粉颗粒粒径较大时, 由于磨损积累效应, 弯头 I 会更早出现破坏泄漏; 弯头 I 到弯头 II 随着进口流速的增加, 相对最大冲蚀磨损速率几乎呈线性增大, 在进口流速大于 15m/s 时达到最大值。研究结果可为“Z”形管在输运管道系统中的防护和安全运营提供参考。

关键词: 煤层气管道; “Z”形管; 冲蚀磨损; DDPM; 气固两项流

引言

煤层气与煤、石油、常规天然气同属于有机矿藏共存于沉积盆地之中, 煤层气与煤更是同体共生、共存的伴生矿藏^[1], 因其作为一种优质、高效、清洁的矿藏能源具有较高的开发利用价值。同时我国的煤层气总资源量与陆上常规天然气储量相当, 位居世界第三位^[2]。随着近些年大国博弈日益加剧, 各国对能源需求的增大加快了煤层气开采与运输技术的发展。但在煤层气开采与运输的过程中, 由于破坏了煤储层的完整性导致煤储层内岩石骨架结构与矿物组分破坏产生的固体颗粒会随着煤层气在管道内流动^[3], 形成气固两相流。气体携带的固体颗粒在运动时对管壁进行冲击^[4], 造成内管壁材料发生脱落, 即冲蚀磨损。长时间的管道冲蚀磨损会导致管壁材料损耗, 壁厚变薄, 管体强度降低, 严重时会出现管体破裂穿孔。因此对煤层气管道进行冲蚀磨损的研究具有重要的意义。

1 数学模型

1.1 稠密离散相模型

传统离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 是忽略了固体颗粒之间的碰撞及其颗粒破碎的情况, 仅仅适用于固体颗粒体积分数占总体体积分数的 10%~12% 的情

况下。而稠密离散相模型 (Dense discrete phase model, DDPM) 是将离散相模型和颗粒模型相结合, 已经被证实模拟流化床和解决高浓度中颗粒之间相互作用的方面上取得了不错的效果。考虑到煤层气开采过程中的煤粉颗粒之间碰撞及颗粒破碎的情况, 因此使用 DDPM 稠密离散相模型来模拟固体煤粉颗粒对“Z”形管道内部流场的影响以及固体煤粉颗粒之间的相互作用。

1.2 连续介质相运动方程

连续介质相运动方程包括连续性方程以及动量方程, 该方程中包含了离散相固体颗粒在整个内部流场空间中占据的体积效应及连续介质相和离散相之间的动量交换作用。

连续性方程如下所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) = 0$$

公式中, 下标 l 表示连续介质相; α_l 为连续介质相体积分数; ρ_l 为连续介质相密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\vec{v}_l$ 为连续介质相速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

动量方程如下所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l \vec{v}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_l \mu_l (\nabla \vec{v}_l + \nabla \vec{v}_l^T)] + \alpha_l \rho_l \vec{g} + \vec{F}_{ex}$$

2 CFD 模型建立

几何结构

利用 SOLIDWORKS 软件建立管道几何模型，管道结构分别为进口水平管、弯头 I、竖直连接管、弯头 II、出口水平管组成，如图 1 所示。

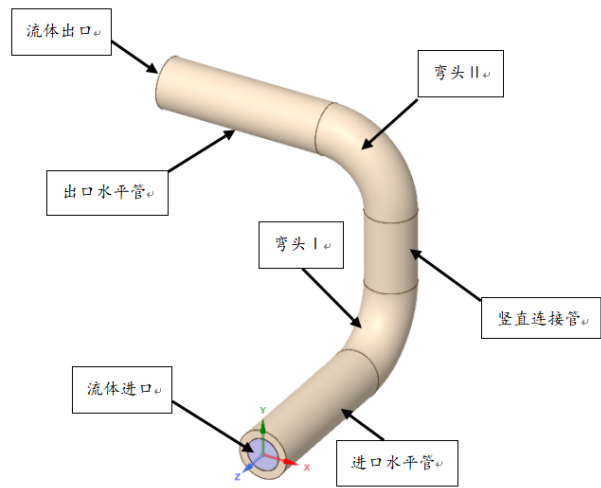


图 1 管道几何结构

使用六面体划分网格方法对“Z”形管道流场域进行网格生成，同时局部细化管道近壁面网格使其满足近壁面^[5]Y⁺系数的要求，“Z”形管道内部流场生成的网格具有较好网格质量，管道网格如图 2 所示。

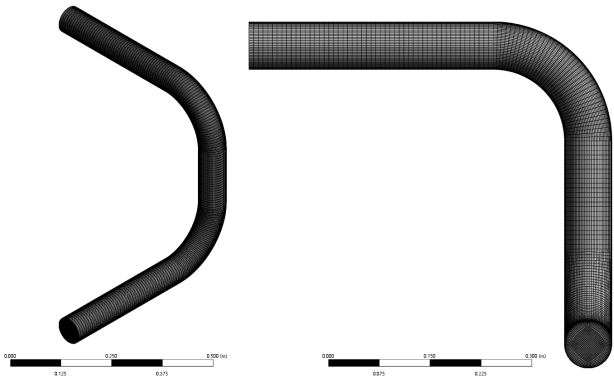


图 2 管道网格划分

3 数值仿真模拟结果及讨论

煤粉固体颗粒粒径的影响

根据实际工况，选用煤粉颗粒直径为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5mm，在相同气体速度及煤粉颗粒速度为 15m/s、煤粉颗粒质量流量为 0.002kg/s 的条件下进行模拟计算，得到煤层气管道整体及各个弯头处不同煤粉

颗粒直径与壁面最大冲蚀磨损速率的关系曲线，如图 3 所示。

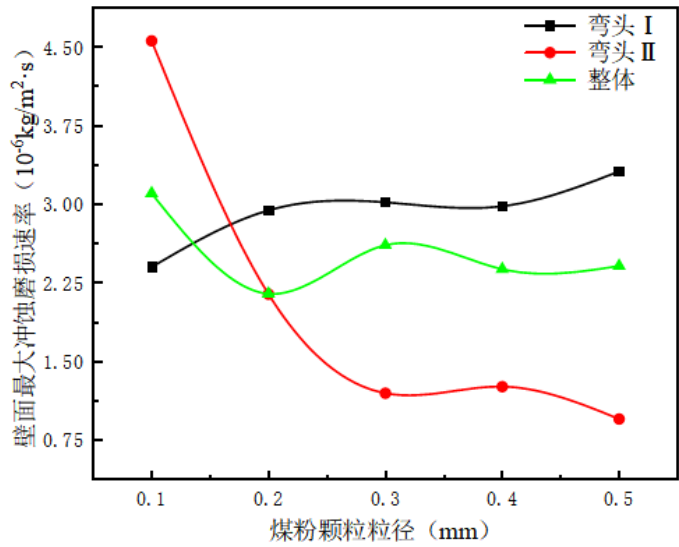


图 3 煤粉固体颗粒粒径与壁面最大冲蚀磨损速率的关系

研究结果表明，煤粉颗粒粒径对管道冲蚀特性具有显著影响规律。随着颗粒粒径的增大，壁面最大冲蚀速率呈现下降趋势，这主要归因于三方面机制：在相同质量流量下，大粒径颗粒数目减少导致碰撞频率降低；气体对大粒径颗粒的携带能力减弱；以及颗粒惯性效应增强。特别值得注意的是，当颗粒粒径为 0.1mm 时，弯头 II 区域表现出最严重的冲蚀损伤；而当粒径超过 0.3mm 后，各部位冲蚀速率趋于稳定，但弯头 I 由于累积效应更易发生泄漏失效。弯头 II 的冲蚀速率对粒径变化最为敏感，这是因为大粒径颗粒难以在竖直管段内侧形成密集料柱，使得冲击作用分散化。图 4 通过对比 0.1mm 和 0.5mm 颗粒的运动分布状态，直观验证了这一粒径效应。数值模拟证实，颗粒粒径通过改变颗粒分布特性，进而显著影响管道的冲蚀行为。

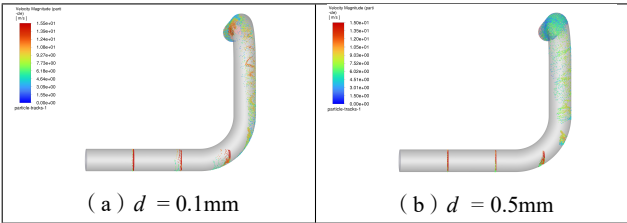


图 4 不同煤粉固体颗粒粒径下颗粒运动分布状态的对比

结束语

(1) 数值模拟研究表明, 在气固两相流作用下, 煤粉颗粒在管道内呈现复合运动特征: 受气流曳力和重力共同作用, 颗粒在直管段做抛物线运动, 在弯头区域发生剧烈碰撞导致动能急剧衰减。这种周期性运动使得弯头外环侧壁面成为冲蚀高危区域, 其中不同弯头部位的冲蚀形貌存在显著差异。工程实践中需重点监测这些区域的冲蚀发展情况, 并采取针对性防护措施。

(2) 粒径效应分析表明, 冲蚀速率与颗粒尺寸呈负相关关系。具体表现为: 小粒径颗粒 ($< 0.3\text{mm}$) 工况下, 弯头 II 表现出最严重的冲蚀损伤; 而当粒径超过 0.3mm 后, 虽然两弯头冲蚀速率趋于稳定, 但弯头 I 因长期累积损伤更易发生失效。这一现象揭示了不同粒径范围下管道冲蚀破坏的差异化机制, 为管道维护策略制定提供了重要依据。

(3) 从整体上看, 壁面最大冲蚀磨损速率随着气体速度的增大而增大, 冲蚀磨损区域随着气体速度的增大而增大。弯头 I 管道外侧壁面呈现“Y”型冲蚀磨损区

域; 弯头 II 管道外侧壁面呈现不规则冲蚀磨损区域、弯头 I “Y”型冲蚀区域随着气体速度的增大逐渐变为“上Y下O”型, 且冲蚀磨损区域向竖直连接管段移动。

参考文献

- [1] 李长俊, 亢春, 刘思斌, 等. 煤层气输送管道仿真技术研究 [C]//中国石油工程建设协会, 中国石油和石化工程研究会. 2010 年中国天然气 (含煤层气/煤制天然气) 产业及系统管网建设发展论坛报告文集. 西南石油大学; 中石油塔里木油田公司, 2010: 8.
- [2] 潘家华. 非常规天然气及其管道输送 [J]. 油气储运, 2008, (11): 1-3+62+10.
- [3] 付英娟, 刘和乐, 张甜莉. 煤层气集输管道内固体颗粒物研究 [J]. 能源与节能, 2021, (08): 77-79.
- [4] 黎伟, 李配, 舒晨旭. 基于 CFD 对 60.3mm 弯管冲蚀仿真预测 [J]. 表面技术, 2020, 49(08): 178-184.
- [5] ZHANG J, ZHANG H, CHEN X H, et al. Gas-solid erosion wear characteristics of elbow pipe with corrosion defects [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2021, 143(5): 051501.