

双弯头煤层气集输管道气液固三相冲蚀磨损特性研究

赵桓祯 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: 在研究双弯头煤层气管道的冲蚀磨损规律时, 主要围绕气固及固液两项流开展, 往往忽略气液固三相流冲蚀磨损特性的分析。考虑煤层气集输管道内气液固三相流耦合的现实工况, 基于多相流理论, 使用CFD方法建立并求解了双弯头煤层气集输管道内气液固两相及三相流冲蚀磨损模型, 探究了含水体积分数、煤粉颗粒直径、煤层气入口速度、煤粉颗粒质量流量等关键因素对双弯头管道冲蚀磨损位置及冲蚀磨损速率的影响。

关键词: 煤层气集输管道; 双弯头; 气液固三相流; 煤粉颗粒; 冲蚀磨损; 含水体积分数

引言: 近些年随着传统化石能源在世界范围内的供给形式日益加剧, 能源安全关乎着国家的发展的经济命脉。从古至今我国都是产煤大国, 但随着改革开放以及国民经济的快速发展, 煤炭资源的消耗量也是成倍增加^[1]。近些年, 国家大力倡导节能减排战略目标, 煤层气作为储存在煤层中, 以甲烷为主要成分、吸附在煤基颗粒表面为主并部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体^[2], 其热值与天然气相等, 是煤炭的二至五

倍, 并且燃烧后无污染^[3], 因此推进煤层气开发利用, 对优化能源结构、保障煤炭安全生产、减少温室气体排放进而助力“双碳”目标实现具有重要意义^[4]。

1 数学模型

1.1 连续介质相控制方程

煤层气集输管道内流体中的煤层气和液态水在管道内部流动过程中遵循物理守恒定律即质量守恒方程和动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k \right) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}'_k + \boldsymbol{\tau}_k)] + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + M_k + (F_i)_k \quad (2)$$

式中: α_k 为第 k 相的体积分数; ρ_k 为第 k 相的密度, kg/m^3 ; \mathbf{v}_k 为第 k 相的速度, m/s ; t 为时间, s ; p 为压力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}'_k$ 为分子动力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}_k$ 为紊动应力, Pa ; M_k 为单位体积相间动量传递, N/m^3 ; $(F_i)_k$ 为内内力, N/m^3 ; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 。

1.2 离散相控制方程

本文研究的煤层气集输管道的含液煤层气介质看作连续介质相, 将煤粉固体颗粒的运动看作离散相介质分布, 煤层气集输管道的煤粉颗粒在管道弯头内的运动满足牛顿第二定律, 考虑煤粉颗粒在运动过程中受到的升力、曳力(阻力)建立煤粉颗粒的运动控制方程^[5]。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}_y(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F}_y \\ F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \\ Re_p = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \\ C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: \mathbf{u}_p 为离散相速度, m/s ; \mathbf{u} 为连续介质相速度, m/s ; ρ_p 为离散相密度, kg/m^3 ; ρ 为连续介质相密

度, kg/m^3 ; \mathbf{g}_y 为 Y 方向上的重力加速度, m/s^2 ; F_D 为单位质量力, N ; F_y 为 Y 方向的其他作用力, N ; μ 为流动黏

性系数； Re_p 为相对雷诺数； C_D 为曳力系数； d_p 为煤粉颗粒直径，m；在一定雷诺数范围内，对于球型颗粒， a_1 、 a_2 、 a_3 为常数。

2 数值模型建立

2.1 几何模型和网格划分

以煤层气集输管道的90°弯头为研究对象，其管道内径尺寸为78mm，弯径比为1.2。为保证流入管道弯头内的煤层气处于充分发展、稳定的湍流状态，在弯头上下游分别增加长度 $L = 5D$ 的直管段（ D 为管道内径尺寸），几何模型见图1。使用Ansys mesh进行煤层气集输管道内流场网格划分，并插入膨胀层边界进行管道近壁面边界层的网格细化。

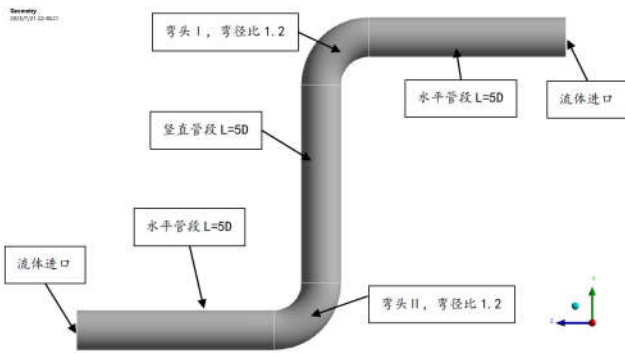


图1 弯管几何模型

2.2 网格无关性验证及求解模型有效性验证

为了进行网格无关性验证，共使用2mm、4mm、6mm、8mm及10mm网格尺寸对煤层气集输管道弯头进行网格划分。计算连续相介质流速为10m/s，煤粉颗粒直径为0.25mm，煤粉颗粒质量流量为 8×10^{-4} kg/s，含水体积分数为1%条件下，不同网格划分尺寸下煤层气集输管道弯头壁面的最大冲蚀磨损速率，结果如表1所见。针对煤层气集输管道弯头网格尺寸由4mm减小为2mm时，弯头壁面的最大冲蚀磨损速率没有显著变化^[1]，因此，从节约计算资源的角度出发，选择4mm网格尺寸作为后续计算的网

格划分尺寸。

表1 不同网格尺寸划分弯头最大冲蚀磨损速率

网格尺寸 (mm)	10	8	6	4	2
最大冲蚀磨损速率 (10^{-7} kg/m ² ·s)	1.11	1.21	1.37	1.48	1.53

由于实际煤层气集输管道弯头处的流场流动状态十分复杂，因此为保证数值计算模型的有效性，使用Wood实验结果来验证本文章的冲蚀磨损模型^[1]，实验使用的管道材料为304L不锈钢90°弯管^[21]，其实验相关设置参数见表2。

表2 实验参数表

实验编号	流量 (m ³ /s)	管径尺寸 (m)	颗粒速度 (m/s)	颗粒密度 (kg/m ³)	颗粒直径 (m)
1	0.01	0.078	3.0	2650	5.0×10^{-4}
2	0.002	0.05	1.0	1480	1.0×10^{-3}

3 冲蚀模拟结果分析

3.1 含水体积分数对双弯头管道冲蚀磨损的影响

3.1.1 对双弯头管道冲蚀磨损位置的影响

当含水体积分数设置为0%时，煤层气集输管道弯头内部流场退化为气固两相流；当含水体积分数设置为100%时，煤层气集输管道弯头内部流场退化为两相流。因此分别计算气固两项流、固液两项流及气液固三相流（含水体积分数为1%）条件下煤层气集输管道弯头的冲蚀磨损区域。管道弯头在以上3种多相流条件下的冲蚀磨损结果云图如图2所见。

由图2可知，含水体积分数对煤层气集输管道弯头的冲蚀磨损位置区域分布影响较为显著。气固两相流时，冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 I 外侧靠近下方垂直管段进口^[4]，弯头 II 处的冲蚀磨损较轻，靠近上方垂直管段出口；液固两相流时，冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 I 内侧靠近水平管段进口以及弯头 II 水平管段外侧处于管段中心线位置；气液固三相流时，冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 II 靠近水平管道进口处，沿水平管段中心线呈对称分布。

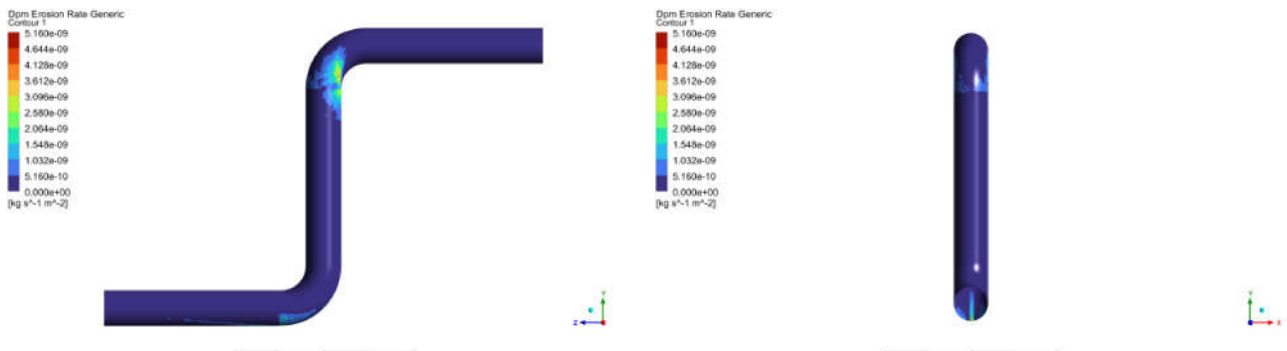


图2 液固两相流冲蚀磨损云图

3.1.2 对双弯头管道冲蚀磨损速率的影响

随着煤层气的含水体积分数的增大,煤粉颗粒对管道的冲蚀磨损速率逐渐减小;针对双弯头煤层气集输管道来说,气液固三相流条件下对其冲蚀磨损速率最大;液固两相流条件下的冲蚀磨损速率最小。因此,煤层气双弯头集输管道内含水体积分数会直接影响管道弯头的冲蚀磨损位置及冲蚀磨损速率的大小^[1]。

为进一步探究分析煤层气集输管道双弯头的冲蚀磨损速率随含水体积分数的变化规律,因此分别设置1%、3%、5%、7%和9%含水体积分数工况下的煤层气双弯头集输管道冲蚀磨损计算条件,模拟不同含水体积分数条件下的双弯头管道冲蚀磨损情况。由图4可知,煤层气双弯头集输管道的壁面最大冲蚀磨损速率随着煤层气内部含水体积分数的变化而明显变化。在煤层气入口流速为5m/s~10m/s条件下,壁面最大冲蚀磨损速率随着含水体积分数的减少而增大,但当煤层气入口流速大于15m/s,含水体积分数为3%的煤层气对双弯头集输管道的壁面冲蚀磨损速率最大,这是因为此时双弯头煤层气集输管道内部的流动状态接近分层雾状流,因此煤粉颗粒高速冲击管道内壁且无液膜缓冲,因此具有较高动能及与管道内部直接接触。当含水体积分数为5%~9%时,壁面最大冲蚀磨损速率随着含水体积分数的减小而增加,既液相体积分数越小,壁面最大冲蚀磨损速率越大。

3.2 煤粉颗粒直径对双弯头管道冲蚀磨损的影响

为分析煤粉颗粒直径对双弯头管道冲蚀磨损的影响,将煤粉颗粒直径与质量流量两种因素进行耦合分析,探究煤粉颗粒直径对双弯头的冲蚀磨损规律。设置耦合计算工况为:煤层气入口流速15m/s,煤粉颗粒直径0.15~0.75mm,以0.15为间隔依次增加,煤粉颗粒质量流量 $1.25 \times 10^{-4} \sim 6.25 \times 10^{-4} \text{kg/s}$,以 1.25×10^{-4} 为间隔依次增加,含水体积分数1%。计算得出双弯头管道壁面最大冲蚀磨损速率与煤粉颗粒直径的变化关系。

煤粉颗粒直径对双弯头煤层气集输管道壁面最大冲蚀磨损速率影响规律基本相同。当煤层气入口速度、煤粉颗粒质量流量及含水体积分数条件相同时,由于煤粉颗粒直径影响,双弯头煤层气集输管道壁面最大冲蚀磨损速率随着煤粉颗粒直径的增大先减小在增大最后趋于稳定,当煤粉颗粒直径为0.15mm时对管道的冲蚀磨损作用最大。

3.3 煤层气入口速度对双弯头管道冲蚀磨损影响

为分析煤层气入口速度对双弯头管道冲蚀磨损的影

响,将煤粉颗粒直径与煤层气入口速度两种因素进行耦合分析,探究煤层气入口流速对双弯头的冲蚀磨损规律。设置耦合计算工况为:煤层气入口流速5~20m/s,以5为间隔依次增加,煤粉颗粒直径0.15~0.75mm,以0.15为间隔依次增加,煤粉颗粒质量流量 $1.25 \times 10^{-4} \text{kg/s}$,含水体积分数1%。计算得出双弯头管道壁面最大冲蚀磨损速率与煤层气入口速度的变化关系^[2]。

4 结论

(1) 煤层气集输管道含水量会直接影响双弯头管道冲蚀磨损位置,而气固两相流时,冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 I 外侧靠近下方竖直管段进口,弯头 II 处的冲蚀磨损较轻,靠近上方竖直管段出口;液固两相流时,冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 I 内侧靠近水平管段进口以及弯头 II 水平管段外侧处于管段中心线位置;气液固三相流时,冲蚀磨损严重区域主要分布在弯头 II 靠近水平管道进口处^[5],沿水平管段中心线呈对称分布。

(2) 煤层气集输管道含水量会直接双弯头管道冲蚀磨损速率的大小,对于气液固三相流,弯头冲蚀磨损速率最大,而固液两项流时冲蚀磨损速率最小。对于气液固三相流,煤层气含水体积分数为3%时,双弯头煤层气集输管道壁面冲蚀磨损速率最大。当煤层气含水体积分数为5%~9%时,煤层气含水体积分数越大,双弯头煤层气集输管道壁面冲蚀磨损速率越小,煤层气入口流速为15m/s时,随着含水体积分数按照9%、7%及5%依次递减,其冲蚀磨损速率呈1.00、1.176及1.63倍增加。

参考文献

- [1] 刘寒月.煤层气井煤粉产出机理及运移规律研究[D].辽宁工程技术大学,2017.
- [2] 滕吉文,王玉辰,司蓼,等.煤炭,煤层气多元转型是中国化石能源勘探开发与供需之本[J].科学技术与工程,2021.DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2021.22.001.
- [3] 李勇,熊先钺,徐立富,et al.中国煤层气商业开发典型案例及启示[J].Coal Science & Technology (0253-2336),2025,53(3).DOI:10.12438/cst.2025-0109.
- [4] 周小金,张帅,段希宇.长宁地区页岩气井出砂原因分析初探[J].钻采工艺,2018,41(4):3.DOI:10.3969/J.ISSN.1006-768X.2018.04.20.
- [5] WEI Yarong,LI Changjun,WU Xia.基于贝叶斯网络的页岩气集输管道失效概率计算方法研究[J].中国安全生产科学技术,2019(001):015.