

输氢管道起伏段变形对流场的影响研究

文/李 静¹ 孙传禹¹ 梁 谷² 费 腾³ 张春林⁴ 杨文英¹ 宋 凯¹

1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院；2. 上海机电工程研究所；
3. 哈尔滨工业大学建筑设计研究院；4. 陆军装备部驻北京地区军事代表局

摘要：掺氢管道运输是降低氢气长距离运输成本的主要手段。本文利用FLUENT探究输氢管道起伏段凹坑、凸起和压痕等变形方式对10%、20%、30%和40%掺氢流动的影响。结果表明：变形形态和速度死区形成位置有关；压降受掺氢比和起伏管段重力势能变化影响；起伏管有助于气相融合均匀；压力脉动对压痕变形敏感。研究为氢气大规模运输提供了理论基础。

关键词：输氢管道；变形；掺氢比；数值模拟

将氢气掺入天然气管网，可降低氢气长距离、大规模运输成本，解决制约氢能产业化发展的瓶颈问题。长距离运输管线经过地形起伏区更易出现管道变形，危害输氢安全。因此，探究起伏管道变形对掺氢输送的影响十分必要。

针对掺氢的输送过程，已有学者进行了实验和数值模拟研究。在掺氢体积分数与管网压力方面，华中科技大学仿真发现掺混比例和位置对压降有影响；斯法克斯国立工程学院发现掺氢导致压降和流速增加。在运输能量方面，西里西亚工程大学通过改变掺氢比，考虑能量损失，得出不同内径管道的最大安全传输距离；华沙工业大学发现，为保证传输能量而增加流量，使压力降增大。在管道结构方面，中国石油工程建设有限公司对混氢天然气起伏管道和直管的气体浓度变化进行模拟，出现明显的气体分层现象；东北大学分析了不同凸起形状对氢气管道流场的影响。

现有研究多集中于光滑直管道掺混比例对输送能力的影响，但现有的天然气管网结构复杂，且长时间使用后的管道缺陷难以预测。因此，本文针对起伏管的掺氢输送进行模拟研究，同时考虑弯管处三种典型变形方式，给出管网流动时空演化特性，为氢气高效运输提供理论基础。

数值模拟方法

1. 模型建立

利用UG对起伏管道建立三维模型，如图1所示。管道为 λ 形，上、下管道高度差为10 m，掺氢入口水平流段为30 m，其余两处水平段均为10 m。倾斜段拐角处半径均为2 m，倾角均为45°。假设三种典型的变形方式均发生在起伏管转弯处内侧，于图1中B位置。类型1、2为向管道内侧的半球形凸起、凹陷，直径为0.1 m；类型3为管道受到外部挤压产生的压痕，向管道内侧变形0.05 m。

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助（2022FRFK060001）

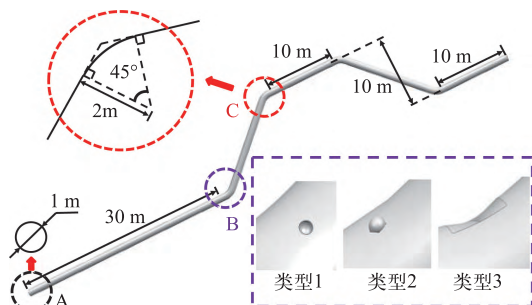


图1 管道模型及变形示意图

2. 网格划分

利用ICEM进行结构化网格划分，并对近壁面及转弯处的网格局部加密，如图2所示。选择网格节点数分别为115万、258万和586万个进行网格无关性验证。对转弯处流道中心点各参数进行监测，结果见表1，三套网格的计算结果接近。进一步对比近壁面及转弯处流场，节点数为258万个的网格已能准确反映流场特征。为提高计算效率，定常计算最终选择网格节点数为258万个。为保证收敛，非定常计算最终选择网格节点数为499万个。

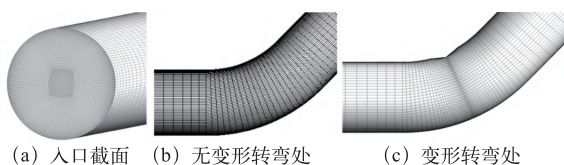


图2 网格划分示意图

表1 不同网格数监测对比

网格数/ 万个	测点速度/ (m/s)	测点相对压力 /Pa	X向作用力 /N	Y向作用力 /N
115	10.06	-164.97	65.60	-916.75
258	10.12	-165.11	65.52	-917.26
586	10.12	-164.97	65.50	-917.53

模拟参数设置

计算中简化天然气组分为96%甲烷、2%乙烷和2%氮气，采用的掺混氢气的体积分数分别为10%、20%、30%和40%。管道内流动状态为湍流，选择标准 $k-\varepsilon$ 模型。近壁面处理方法选择Enhanced Wall Treatment。管道入口边界条件设置为速度入口，流速为10 m/s。出口边界条件设置为Outflow。管道背压为4 MPa。由于管道长度有限，流体流经该段的温度变化较小，忽略其影响，流体温度设置为300 K。压力速度耦合算法选择SIMPLEC算法，压力、

动量等均采用二阶方法进行空间离散。计算时间步长为0.001 s。

结果与分析

1. 速度变化分析

气体经过起伏管道转弯处受到冲击，导致气体流速变化，影响流体稳定性。绘制掺氢比为10%的四种管道流速云图如图3所示。受到惯性作用，流体流经转弯处时，流体偏向中心线外侧。与之对应，流体在转向时受到管壁作用力，靠近管壁的位置形成低速区，在中心线靠近转弯内侧的区域形成向外侧发散的椭圆状高速区。低速区容易发生气体的分层，对管道安全产生威胁。为了防止氢气聚集，应更关注速度死区的位置。对于凹坑变形，速度死区出现在变形的左侧；对于压痕变形，速度死区出现在变形的右侧；对于凸起变形，速度死区出现在变形的上侧。这是由于凸起的半球体容纳了流入其中的气体，在流速方向又形成了阻拦，导致气体滞留，在变形处形成了速度死区。凹坑的半球体虽然在管道截面处的流速方向形成了阻拦，但是在三维空间，流体在半球体附近形成了绕流，减少了气体的堆积，但是还存在一部分气体未疏通，因此在到达变形前出现了速度死区。压痕变形受到切面的影响，背风区壁面方向的流体都受到了限制，阻止了补充气体的汇流，因此在到达变形后出现了速度死区。

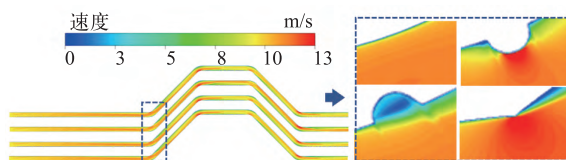


图3 管道截面速度云图

2. 压力变化分析

管道在转弯处力学性能相对较差，为了避免管材失效，要保证压力在合理的范围内。在管道中心线位置设置100个等分监测点，将所有位置的压力与入口值相减，得出不同工况下的压力变化，如图4所示。掺氢比相同时，不同变形引起的压力变化不大。掺氢比为10%的四种管道压力云图如图5所示。流经起伏管入口水平段、倾斜上升段和高处水平段时，流体压力随着距离的变大而降低。到了倾斜向下段，流体压力随着距离的变大而升高。这是

由于随着距离变化,高度下降重力势能转化为压力势能。当到达出口水平段时,又恢复随距离的变化,高度下降重力势能转化为压力势能。当到达出口水平段时,又恢复随距离变大压力降低的规律。对于敏感部位的转弯处,压力在靠近中心线外侧的数值高于内侧。这是由于惯性作用,流体受到偏离改变方向壁面的力,与速度的变化规律对应。

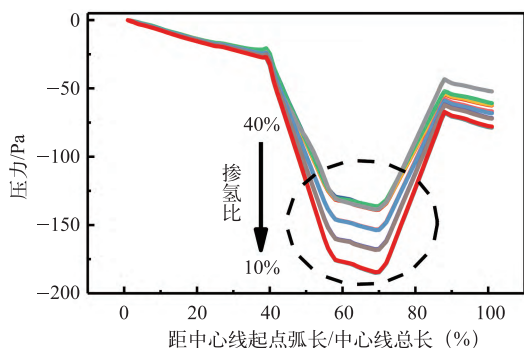


图4 管道中心线压力变化

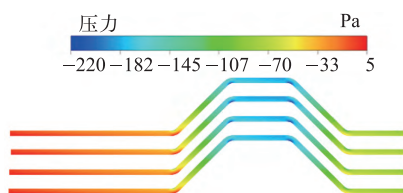


图5 掺氢比10%的管道压力云图

为了保证输气能力,需要进一步分析管道起伏段对流体压降的影响。在起伏管道转弯入口处和出口处5 m设置监测点,观察不同掺氢比的流体流经四种类型起伏管道的压降,如图6所示。影响压降的主要因素是掺氢比,管道压降随着流体浓度的升高而降低,掺氢比为30%的压痕管道例外,这与压痕在背风区的规律相符。相比于原型管道,凹坑和凸起变形引起压降的变化可以忽略。

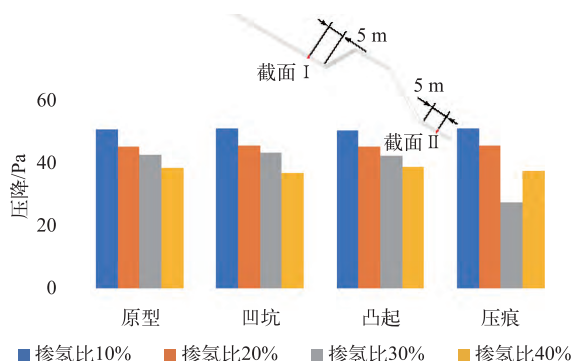


图6 流经起伏管段压降

3. 氢浓度分布演化分析

在长距离管道运输中,由于氢气的密度比天然气小,在重力作用下管道上部氢气浓度更高。局部氢浓度饱和发生氢脆或者氢腐蚀,为了保证管材强度,需要严格控制气体浓度的分布。因此本研究考虑不同掺氢比、不同变形对气体分布的影响。对10%掺氢比的四种类型管道及不同掺氢比的原型管道绘制浓度云图,如图7所示。发现保持掺氢比一定,变形对氢浓度分布的影响不显著。对原型管道增加氢含量,从得出的浓度变化可以看出,长距离输送在到达起伏管前出现明显的分层现象,起伏管道促进气体融合成均相。结合涡量图可以看出,气体在由水平管道流经第一转角处时涡量显著增大,形成的涡对不断把密度较小的氢气往下方卷,把密度较大的天然气往上方卷,解释了均相的由来。由此可见,起伏管道对于长距离输送的掺混是利因素。

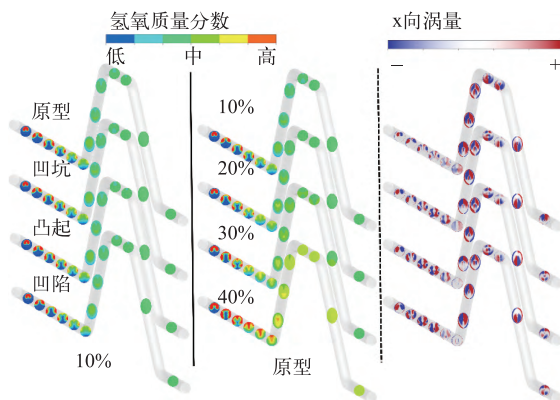


图7 压力及涡量变化图

4. 非稳态管道压力脉动分析

在起伏管下部的两个转弯处设置两组测点,如图8所示。按图中方式命名,共计82个测点。在计算收敛后提取测点1 s内的压力变化,如图9所示。为更好地对比各测点压力脉动强弱,计算压力脉动时域信号的标准差,并绘制在极坐标等高线图中,如图10所示。起伏管出口转弯截面B的规律很统一,压力脉动幅值大的地方集中于管道上半部分。而入口转弯截面A,变形形态的影响较大。凸起和原型管道在管道下方的压力波动最剧烈,凹坑、压痕管道除了在管道下方有比较强烈的压力脉动外,变形区附近的压力脉动也很明显,其中压痕表形区的影响最大。

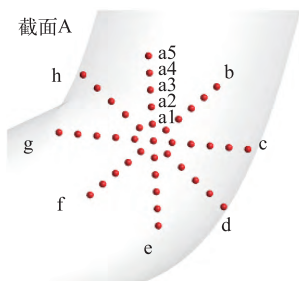


图8 压力测点

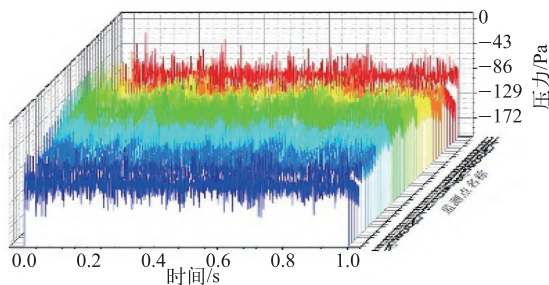


图9 压力脉动时域信号

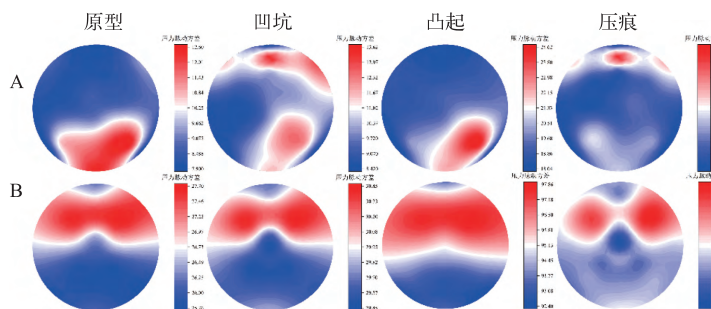


图10 压力脉动标准差

结束语

1) 气体偏向管道中心线外侧形成低速区，内侧为高速区。变形形态对速度死区的影响明显。凹坑速度死区出现在变形上游，凸起速度死区出现在变形区内部，压痕速度死区出现在变形下游。

2) 气体浓度分布受变形的影响不大，掺入氢气导致的气体分层现象在经过起伏管段时减弱。起伏管有助于气相融合均匀。

3) 压降随着氢气体积分数增高而降低，当掺氢比超过20%时，压降对压痕变形较敏感。在水平和上升管段，压降随运输距离增大而降低。在下降管段，压降随运输距离增大而升高。对于非稳态流动，流体在流经起伏管出口转弯截面的压力脉动集中于管道上半部。在入口转弯截面，凹坑、凸起和原型管道在管道下方的压力波动最剧烈，压痕管道在变形区压力脉动幅值最大。EA

参考文献

[1] 闫喻婷. 氢气储运方式的经济性对比研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
[2] Velázquez, Julio, César, et al. Probabilistic and statistical techniques to study the impact of localized corrosion defects in oil and gas pipelines:

A review[J]. Metals, 2022, 12(4): 1-40.

[3] 吴嫦. 天然气掺混氢气使用的可行性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
[4] Zahreddine Hafsi, Sami Elaoud, Mohsen Akrou, et al. Numerical approach for steady state analysis of hydrogen-natural gas mixtures flows in looped network[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(5): 1941-1950.
[5] Andrzej Witkowski, Andrzej Rusin, Mirosław Majkut, et al. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 166: 24-34.
[6] UILHOORN F E. Dynamic behaviour of non-isothermal compressible natural gases mixed with hydrogen in pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(6): 6722-6729.
[7] 陈俊文, 尚谨, 刘玉杰, 等. 混氢天然气管道安全设计要点探讨[J]. 天然气与石油, 2020, 38(6): 8-13.
[8] 吕超, 刘艳龙, 陈绪鑫, 等. 氢气管道内部凸起对流场影响的数值模拟研究[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(6): 477-481.