

常压塔空冷器管道腐蚀解决方案研究

郑 帅（中国石化上海石油化工股份有限公司，上海 200540）

摘要：针对常减压装置空冷器集合管管道腐蚀问题，利用计算流体力学方法（CFD, Computational Fluid Dynamics）对装置、管道建模，分析设备及管道腐蚀成因，并定位设备腐蚀位点、确定腐蚀速率，提出改进措施，延长设备使用寿命，从而节省生产成本并保障生产安全。根据实际工况经过雷诺数等效建立了可视化管道实验装置，通过可视化实验对模拟结果提供直接观测，探索了管道内多相体系流体分布情况，印证模拟分析结果。

关键词：空冷器；腐蚀；CFD 模拟；可视化

0 引言

石油石化行业空冷器众多，每一台空冷器的正常运行对于安全生产以及产品连续生产至关重要。在这众多的空冷器中，由于进入空冷器的流体中含有腐蚀性物质，如硫化氢、氨盐，以及流体本身流速较快、温度高，都会使空冷器管道发生腐蚀，造成空冷器管道泄露而影响正常生产运行。某石化厂常减压装置常压塔多台塔顶空冷器管道出现不同程度的泄漏，本文利用 CFD 仿真模拟和搭建可视化管道实验装置相结合的手段，提出解决方案并通过实验验证其效果。

1 常压塔空冷器基本情况

1.1 常压塔空冷器工艺流程

原油（30℃）自装置外原油罐区，经原油泵后进入常减压装置。经原油脱前换热系统、原油电脱盐罐脱盐、原油脱后换热系统进入初馏闪蒸塔，初底油经闪蒸换热后在常压炉内被加热至约365℃进入常压塔，常压塔顶油气经塔顶馏出管线依次进入常顶干空冷器（EC-3001A ~ H），常顶水冷器冷凝冷却后进常顶回流及产品罐。

1.2 常压塔空冷器腐蚀情况

经过多年使用，常压塔塔顶空冷器 EC-3001 管道出现不同程度的泄漏。EC-3001A、EC-3001B、EC-3001D、EC-3001F、EC-3001G 的主体材质为全衬钛管，EC-3001C、EC-3001E、EC-3001H 的主体材质为碳钢。塔顶常顶油和常顶水的硫含量比较大，所以对碳钢材质的管道腐蚀较严重。

2 常压塔空冷器腐蚀原因分析

2.1 腐蚀机理检测

经对管道腐蚀部位的 X 射线衍射分析、能谱分析检测结果可知，腐蚀表面试样的主要成分为 FeS_2 ，少量的 FeS ，同时还含有硫、氮元素^[1]，综合考虑确定造成管道泄漏的原因是 H_2S 腐蚀与铵盐结晶垢下腐蚀

的化学反应与冲刷腐蚀协同作用造成的^{[2][3]}。

2.2 CFD 模拟分析

通过 CFD 对空冷器集合管管道按照工况尺寸进行建模，采取冲刷与沉积模型，创建冲刷速率与颗粒流速的指数关系，确定边界条件的输入类型为 Reflect。对模拟结果进行处理后发现，集合管肘部外侧湍流动能、剪切力以及速度最大，这是因为管道内流体经过肘部运动方向发生改变，由于曲率半径较小的原因，过多的还未来的改变运动方向的动能撞击在了管道肘部下侧，流体对管道壁面不断冲击，因此造成了管道泄露^[4]。

选取管道肘部外侧左右两条线以及对称线等三条线段壁面的冲刷以及电化学的腐蚀速率。模拟结果显示最大冲刷腐蚀速率为 4.26mm/year，电化学腐蚀速率为 0.78mm/year，因此冲刷占据主导地位。

3 改进措施 CFD 模拟分析

根据原因分析，考虑通过增大管道曲率半径和设置多孔稳流器两种方法降低管道腐蚀速率。

3.1 改变曲率半径模拟结果分析

管道最初曲率半径为 0.125m，当曲率半径增加到 0.25m 时。同样选择管道肘部外侧左右两条线和对称线三条线段的壁面，模拟三处冲刷速度和电化学腐蚀速度。通过 CFD 模拟显示，最大冲刷速度为 4.0135mm/year，最大电化学腐蚀速度为 0.56mm/year。对比分析改变曲率半径前后，冲刷速率变小，分析原因是增大曲率半径使管内流体在改变流动方向时整体变化相对平缓，因而冲刷速率变小。

3.2 设置多孔稳流器模拟结果分析

通过 CFD 模拟显示，多孔稳流器设置在弯管入口后，最大冲刷速率为 3.98mm/year，最大电化学腐蚀速率为 0.52mm/year。

将稳流器安装到弯管入口后分析发现，安装稳流

器虽然对弯管的腐蚀情况有所缓解，但效果不明显。故引入了无量纲数弗劳德数对稳流器安装位置进行确定，从而提高安装稳流器后对腐蚀缓解的效果。不同操作条件下惯性力和重力的相对大小可用弗劳德数(Fr数)表示，根据弯管位置内Fr数分布得到稳流器的安装位置。在弯管发生偏转的部位Fr数出现了最大值，在此位置惯性力起的作用相对较大，使得大量液体在惯性力的作用下打向弯管外壁面造成管壁的腐蚀。故在此处加装稳流器其最为合理。

通过CFD模拟显示，多孔稳流器设置在弯管偏转处后，最大冲刷速率为 1.03mm/year ，最大电化学腐蚀速率为 0.07mm/year 。相较于将稳流器安装在管道弯头入口，将稳流器安装在管道弯头中间对腐蚀的缓解作用更好。

通过对正常工况、增大曲率半径和增加多孔稳流器三种模拟结果的分析，在整个过程中，中心线腐蚀速率最大，冲刷腐蚀占主导，电化学腐蚀起到辅助作用。在管道适当位置加入多孔稳流器可以有效降低腐蚀速率，对设备整体改动也较小。

4 可视化实验验证

4.1 实验方案设计

根据实地采集的数据，构建可视化管道实验装置，直接观测集合管内多相流体的流动状况。实际工况下流量为 16893.75kg/h ，管道腐蚀部位管材外径 250mm ，壁厚 8mm 。实验过程中按照等雷诺数的原则将流量缩小至 4613.5kg/h ，对应管道内径为 65mm 。

整套实验装置主要由加热装置、流体输送装置、实验段以及辅助控制显示装置组成。其中加热装置为最大功率为 90kW 导热油电加热器，流体输送装置为额定功率 1.5kW ，流量 $6.5\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程为 20m 的离心泵，试验段由两根长 670mm 、内径 65mm 相互垂直的玻璃管道组成，辅助控制显示装置主要由导热油控温系统、 1.5kW 变频器、温度计、压力表和流量计组成。

实验从加热储罐开始，加热罐体上方装有防爆电动机，通过不断搅拌，使罐体内的水与常顶油均匀地混合在一起。通过导热油控温装置将热量供给蒸发罐，通过温度控制系统对试验段的温度进行控制。流量控制系统包括变频器和阀门，通过变频器来控制泵的转速从而精确控制泵出口流量。试验段由两根透明玻璃管道组成，试验介质通过泵在试验段和加热罐之间形成循环。

经模拟分析后得知，管道腐蚀是化学腐蚀和冲刷

腐蚀交互产生的结果，其中冲刷腐蚀占主导地位，而冲刷腐蚀的成因则是由于偏流现象。故本实验主要研究内容为探究不同温度下各个流量的偏流情况，以及如何减缓偏流现象对管道腐蚀的影响。

流量：实际工况下温度为 80°C ，经缩放后的标准流量为 4614kg/h ($6.5\text{m}^3/\text{h}$)，实验环节选择增产 10% 、增产 20% 以及减产 20% 为研究对象，即流量选择为 4152kg/h ($5.5\text{m}^3/\text{h}$)、 5075kg/h ($7\text{m}^3/\text{h}$)、 5536kg/h ($8\text{m}^3/\text{h}$)。

温度：实际工况下管道进口温度为 80°C 。实验时，进口温度选取为 75°C 、 80°C 和 85°C 。

4.2 可视化试验结果分析

4.2.1 不同温度流量下流体分布情况

分别将温度调至 75°C 、 80°C 、 85°C ，流量分别选择 0.8 倍标准流量、标准流量、 1.1 倍标准流量和 1.2 倍标准流量，通过控制变频器和阀门对不同温度不同流量下透明管道内流动情况进行观察。

当温度不同时，管道内流动情况变化不大，从各个温度下不同流量的流动状态可以看出，由于水平分速度的存在使得管内试验介质在由水平段经过弯头转向向下流动进入竖直段的时候，在惯性力和重力的作用下，不可避免地会打在外侧壁面的不同区域，流体长时间对外侧管壁不停冲击从而导致管道的泄漏。

4.2.2 振动测试分析

为了获取不同流量下流体冲击位置的变化，采用型号为LMS SCADAS XS的数据采集设备对管道外侧管壁不同位置的振动情况进行测量。某个位置处，振幅越大说明该位置受到的流体的冲击力越大，冲刷腐蚀情况越严重。振动测试旨在通过对比振幅的变化找到流体冲击管壁的位置。

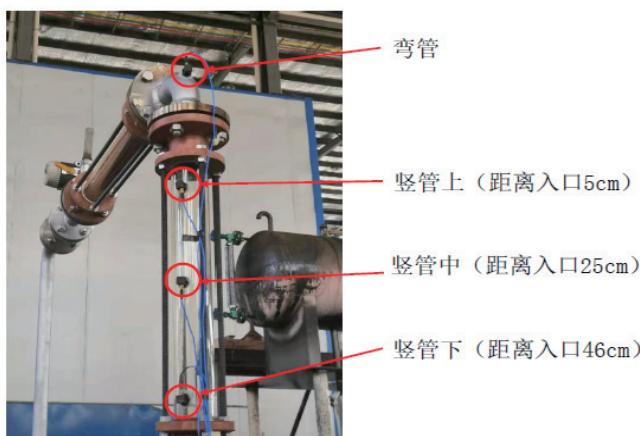


图 1 可视化装置振动传感器布置图

通过对不同流量下四个测试点的振动情况进行测试来分析管壁受到冲击位置的变化情况。经过前期试验发现温度对流体的流动情况的影响较小，故振动测试只是在温度为80℃下进行测试，结果如下：

通过对不同流量下四个测试点的结果进行分析，表明当流量在 $1.5\text{m}^3/\text{h}$ ~ $3.5\text{m}^3/\text{h}$ 时流体对管壁的冲击集中在竖管的下部；当流量增至 $4.5\text{m}^3/\text{h}$ 时流体对管壁的冲击的位置由下侧逐渐转移到竖管的中上部；当流量增加至 $5.5\text{m}^3/\text{h}$ 时，流体开始对弯管的外壁面进行冲击；而当流量为 $6.5\text{m}^3/\text{h}$ （实际工况）时流体对管壁的冲击位置集中在竖管中上部，与现场实际泄漏位置相符；随着流量继续增加到 $7.5\text{m}^3/\text{h}$ ，流体对弯管外侧管壁的冲击程度继续增加，由此可见随着流量的进一步增加，管道的泄露部位将由竖管中上部向弯头部位转移。

4.2.3 加装稳流器实验结果分析

根据模拟分析结果可知，加装稳流装置相对于改变弯管的曲率半径对腐蚀效果的抑制作用更为明显，故在流体进入弯头即将改变流动方向的位置加装稳流器。

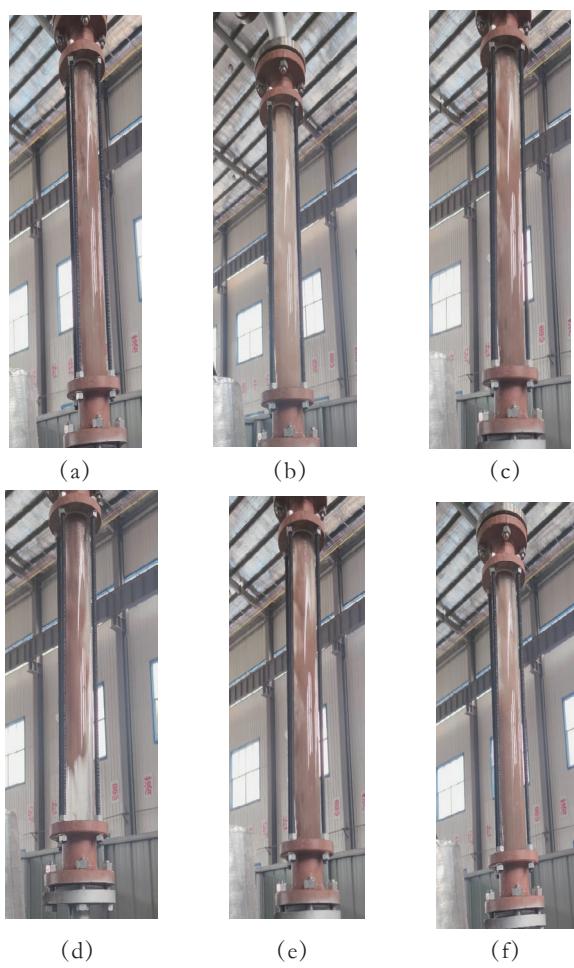


图2 加装稳流器与未加装稳流器可视化实验对比

(a) 75℃未加稳流器管内流体分布情况；(b) 75℃加稳流器管内流体分布情况

(c) 80℃未加稳流器管内流体分布情况；(d) 80℃加稳流器管内流体分布情况

(e) 85℃未加稳流器管内流体分布情况；(f) 85℃加稳流器管内流体分布情况

通过对比可以看到，加装了稳流器，试验介质在进入竖直管以后，流动方向由偏向于外侧壁面且较为分散变成较为集中的分布在管道中间的位置，试验介质对管壁的冲击作用减少从而相应地降低了冲刷腐蚀对竖直管壁的影响。故稳流器可以较为有效的减缓流体对管道壁面的冲击，从而延长管道使用寿命。

5 结语

本文利用CFD仿真模拟和搭建可视化管道实验装置相结合的手段，得出以下结论。

通过对空冷器出口管束集合管正常工况下CFD模拟分析，可以发现管道肘部外侧中心壁面的腐蚀最严重，两侧的腐蚀程度逐渐降低。通过增大弯管曲率半径、添加多孔板稳流器可以使腐蚀速率变小，而添加多孔板稳流器的效果更好。

根据实际工况经过雷诺数等效建立了可视化管道实验装置。通过可视化实验可以看出，在实际生产中，由于偏流造成对外侧管壁的冲击使得管壁腐蚀较为严重；通过管壁振动测试发现流体冲击位置集中在外侧管壁上侧；加装稳流器后偏流现象得到有效缓解。

参考文献：

- [1] 张建文,赵红烨,王佳录,等.常减压塔顶空冷器出口集合管段腐蚀失效机制研究[J].能源化工,2020,41(1):54-59.
- [2] 李凤安.常压塔顶空冷器腐蚀与防护[J].价值工程,2010,29(4):55-55.
- [3] 王海博,李云,程光旭,等.常压塔塔顶冷凝系统铵盐腐蚀及控制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(3):177-182.
- [4] 赵红烨.常减压塔顶空冷器出口管道腐蚀失效机制研究[D].北京:北京化工大学,2020.

作者简介：

郑帅(1989-)，男，汉，辽宁省抚顺人，硕士研究生学历，工程师，研究方向：炼油化工科研项目管理工作。