

化工气体输送管道长度优化

化工工艺单元产生的含机尾气需输送至火炬系统焚烧处置。火炬管线若全线采用金属管道，工程投资偏高；非金属管道耐热性不足，高温尾气易造成管材老化失效，存在泄漏风险。本研究以尾气降温安全限值为约束，构建传热模型，推演尾气沿程自然对流降温规律，优化金属管段长度，兼顾输送安全与项目经济性，为化工气体输送管线设计提供参考依据。

胡万鹏[1] 何李浩[1,2]

1 嘉兴大学 材料与化学工程研究所 浙江嘉兴 314001

2 浙江正泰工程设计有限公司 技术部 浙江嘉兴 314001

研究背景

化工反应及分离单元在生产过程中会产生含有机物的工艺尾气，该类尾气直接排放会造成大气污染，通常输送至火炬系统燃烧实现无害化处置。工艺装置到火炬的管线总长约 1600 m，若全线选用金属管道，工程投资较高。为控制项目建设成本，拟采用金属与非金属管道组合输送方案。非金属管材耐热性能有限，高温尾气通入易引发管道软化、老化失效，存在泄漏安全风险，因此尾气需预先降温后方可接入非金属管道。

工程规定，尾气在金属管道出口处温度须低于 50 ℃。金属管道兼具承压与换热降温作用，管线长度直接影响尾气冷却效果与工程造价。本研究以尾气温度控制要求为约束，对前段金属管道长度开展优化，在满足尾气降温至安全温度的前提下，最小化金属管段长度，平衡输送安全与工程经济性。

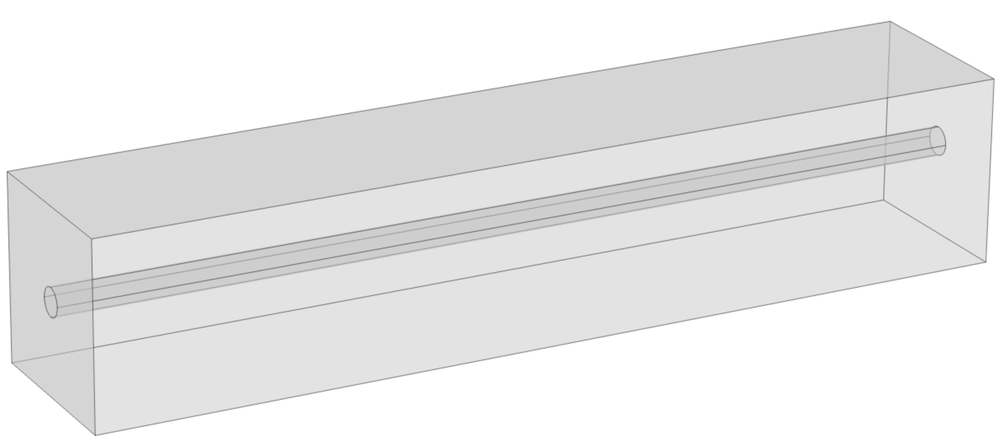


Fig 1 管道及周围环境的几何模型

研究方法

基于COMSOL Multiphysics多物理场计算平台，选取湍流+流体传热模块，建立管道流体传热的模型，管道外部自然对流散热取化工生产装置所在地平均风速、平均气温。

湍流流场、传热方程（数学模型）

$$\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=\nabla\cdot[-p\boldsymbol{I}+\boldsymbol{K}]+\boldsymbol{F}$$

$$\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u})=0$$

$$\boldsymbol{K}=(\mu+\mu_{\mathrm{T}})\left(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}\right)-\frac{2}{3}(\mu+\mu_{\mathrm{T}})(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\boldsymbol{I}-\frac{2}{3}\rho k\boldsymbol{I}$$

$$\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)k=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{T}}}{\sigma_k}\right)\nabla k\right]+P_k-\rho\varepsilon$$

$$\rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\varepsilon=\nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{T}}}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right]+C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k},\quad \varepsilon=\mathrm{ep}$$

$$\mu_{\mathrm{T}}=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$P_k=\mu_{\mathrm{T}}\left[\nabla\boldsymbol{u}:\left(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}\right)-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{u})^2\right.$$
$$\left.-\frac{2}{3}\rho k\nabla\cdot\boldsymbol{u}\right.$$

$$\rho C_p\boldsymbol{u}\cdot\nabla T+\nabla\cdot\boldsymbol{q}=Q+Q_p+Q_{\mathrm{vd}}+Q_{\mathrm{ke}}$$

$$\boldsymbol{q}=-k\nabla T$$

结果

基于 COMSOL 多物理场搭建湍流-流体传热模型，结合现场环境气象条件，对化工工艺尾气管道降温开展数值模拟。工况为废气流率 12000 Nm³/h、入口温度 250 ℃。结果表明，仅 10 m 金属管道即可将尾气冷却至 50 ℃以下，满足工程规范。

总长 1600 m 火炬管线仅前端设置 10 m 金属管段预降温，其余采用非金属管道。该方案避免非金属管高温失效泄漏风险，降低工程投资，兼顾安全与经济性，为同类火炬尾气管道设计提供参考。

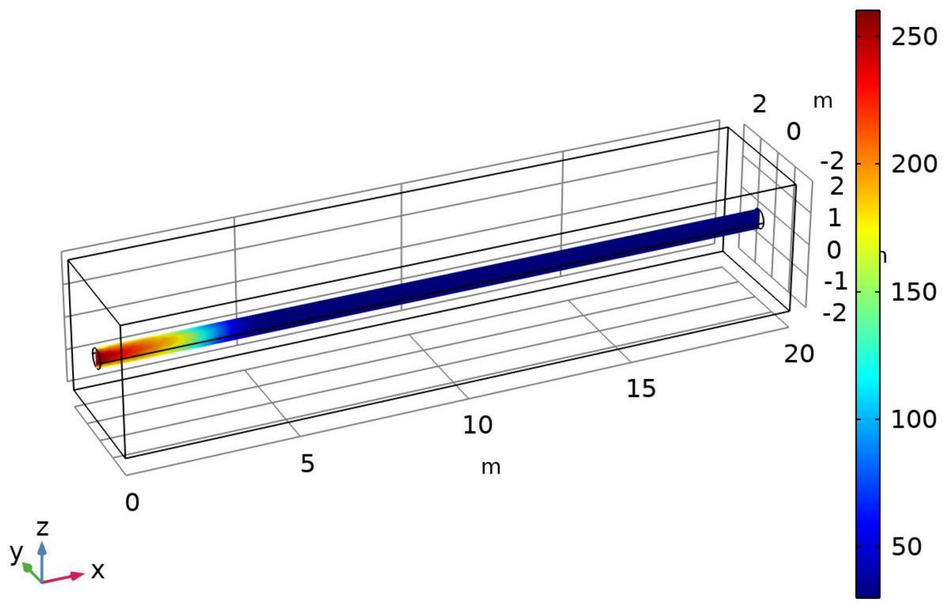


Fig 2 模拟结果显示管道长度与温度分布

参考文献

陶文铨. 传热学(第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.7

化工部. HG/T 21579 聚丙烯-玻璃钢 (PP-FRP) 复合管及管件 [S]. 北京: 化学工业出版社, 1995

嘉兴大学