

文章编号: 1000-8241 (2011) 07-0501-03

稠油管输起始加热温度熵产最小优化设计

盖平原

(胜利油田采油工艺研究院, 山东东营 257061)

盖平原. 稠油管输起始加热温度熵产最小优化设计. 油气储运, 2011, 30(7): 501 - 503.

摘要: 基于熵产率最小化原理, 分析了原油在输送过程中散热损失和摩擦阻力引起的熵产情况, 优化了熵产率最小所对应的管输起始加热温度。研究表明: 最小熵产率与输送流量、起始温度和管道管径有关, 输量对熵产率有一定的影响, 输量越高, 输送单位质量原油的熵产率越低, 但随输量的增加, 熵产率降低的幅度逐渐减少; 只有适当的起始加热温度才能保证单位质量原油输送单位距离所产生的熵产率最小; 对应最小熵产率的原油起始温度随管径的增大而降低。最小熵产率优化设计方法克服了热经济设计方法需要材料价格、施工费用等参数难于准确选取和所得结果与当前物价及贷款利率有关的缺点。

关键词: 稠油; 管道; 最小熵产率; 加热温度; 优化设计

中图分类号: TE86

文献标识码: A

DOI: CNKI:13-1093/TE.20110711.1013.007

稠油的粘度随温度变化敏感, 降温将导致摩擦阻力快速增加, 故需要加热或伴热集输, 因而提高了稠油输送成本。就长输管道而言, 无论是输送稠油还是易凝原油, 原油的起始加热温度每变化 1 °C, 就将引起几千万的年运行费用变化, 因此, 优化设计原油管输起始加热温度具有重要意义。近 20 多年来, 优化稠油集输参数、降低加热能耗的相关课题一直备受关注。

稠油加热输送过程中, 加热温度越高, 原油粘度越低, 在管内流动的摩擦阻力越低, 则泵功耗越少。但加热温度高, 与环境温度差大, 散热速度快, 将造成更多的燃料消耗; 若降低原油加热温度, 消耗的加热燃料少, 但摩擦阻力大, 需要更多的泵功耗。平衡加热燃料和泵功耗的稠油集输管道设计属于热经济优化设计问题, 优化结果与当时的材料价格和原油价格有关。Bejan^[1] 提出的最小熵产率 (Entropy Generation Minimization, EMG) 热力学分析优化技术在工业热设计领域得到了广泛应用, 但未见用于优化稠油集输参数研究的报道。该技术利用不可逆过程热力学原理^[2], 平衡摩擦熵产率和温差传热熵产率, 使两者之和最小。根据热力学原理^[3], 可用能的损失等于环境温度与熵产之积。熵产最小^[4-6] 意味着完成这一过程所致的可用能损失最小, 其结果不依赖于当前物价、贷款利率等因素, 不同于热经济优化设计。

1 分析模型

根据热力学第二定律, 若孤立系统经历了不可逆过程, 必然导致熵产生。熵是热力学状态参数, 其经典热力学定义为: 在可逆的条件下, 系统熵的增加量等于吸收的热量与热源温度之比^[2]。而熵的统计热力学意义则是指系统分子微观态数的自然对数与玻耳兹曼常数之乘积, 其数值由玻耳兹曼公式给出。自然界的熵不守恒, 所有的不可逆过程都造成自然界的熵增加, 即有熵产。

熵产可由各种原因造成, 就稠油集输管道^[7] 而言, 主要是由温差传热造成的熵产和摩擦阻力造成的熵产。取管道某一位置的微元体, 假设流体的截面平均温度为 T , 环境温度为 T_0 (图 1), 则微元体的熵产率 S_g 由摩擦和散热两部分构成, 其计算公式^[1] 为:

$$dS_g = \frac{0.5mfv^2}{Td} dx + k_1(T-T_0) \frac{T-T_0}{TT_0} dx \quad (1)$$

式中: 等号右边第 1 项为摩擦阻力造成的熵产率, 第 2 项为温差传热造成的熵产率; m 为管内流体的质量流量, kg/s; f 为摩擦因数; v 为流速, m/s; T 为温度, K; d 为管道内径, m; k_1 为基于管道长度的总传热系数, W/(m²·K)。

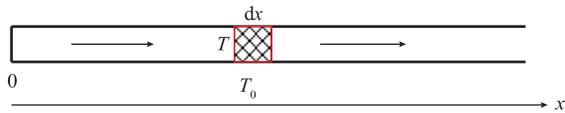


图1 管道流动熵产计算推导示意图

根据式(1)计算整个管道的熵产需要积分,并需要计算流体的温度和流体物性。利用能量守恒和动量守恒方程计算流体的温度分布和压力分布。

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} = \frac{k_1}{m \cdot c_p} (T_0 - T) \\ x=0, T=T_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_p 为原油的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; T_s 为原油起始加热温度, $^{\circ}C$ 。

传热系数计算公式为:

$$k_1^{-1} = \frac{1}{\pi d h} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) + \frac{1}{2\pi \lambda_{ins}} \ln\left(\frac{d_0 + 2\delta}{d_0}\right) + \frac{1}{\pi (d_0 + 2\delta) h_{air}} \quad (3)$$

式中: λ 为钢管导热系数, $W/(m \cdot K)$; λ_{ins} 为保温层导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; δ 为绝热层厚度, m ; h 为管内油流对流换热系数, $W/(m \cdot K)$; h_{air} 为管外空气对流换热系数, 一般取为常数 $12 W/(m \cdot K)$; d_0 为管道外径, m 。

管内原油的对流换热系数和摩擦因数计算公式分别为式(4)和式(5):

$$h = \frac{\lambda_0}{d} 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$f = \begin{cases} 64 / Re, & Re < 2000 \\ 0.3164 / Re^{0.25}, & 2000 < Re < 10^5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_0 为原油导热系数, $W/(m \cdot K)$; Pr 为普朗特数。

在管道长度不能改变的情况下,可以改变管径、保温层厚度和起始加热温度等因素,在完成输量任务的前提下使熵产率达到最小。

2 计算结果与分析

以长度 $1 km$ 、内径 $160 mm$ 、保温材料导热系数 $0.1 W/(m \cdot K)$ 的国内某原油管道为例,对不同输量和不同保温层厚度情况下的熵产率进行计算。不同温度下管输原油的表观粘度通过其粘温曲线拟合公式计算:

$$\mu_0 = 3.893 \times 10^{-11} \exp[8435 / (T + 273.15)] \quad (6)$$

2.1 摩阻压降和温差传热熵产率对总熵产率的影响

当保温层厚度为 $30 mm$, 输量为 $100 t/d$ 时, 摩阻压降导致的熵产随起始温度的升高而降低, 温差传热导致的熵产率随起始温度的升高而升高, 总熵产先降低后升高, 在 $50^{\circ}C$ 时达到最小, 即可用能损失最小; 当原油起始温度高于 $70^{\circ}C$ 时, 摩阻压降导致的熵产率与温差传热导致的熵产率相比可忽略不计(图2)。

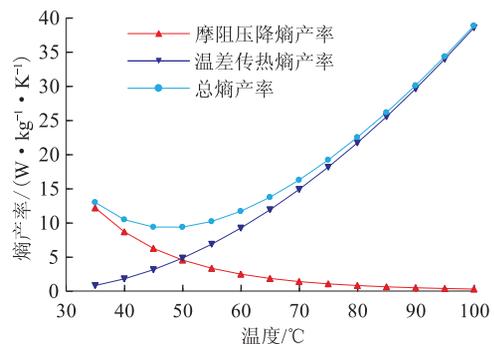


图2 摩阻压降和温差传热熵产率对总熵产率的影响

2.2 保温层厚度对总熵产率的影响

在输量为 $200 t/d$, 管道长度为 $1 km$ 的情况下, 输送单位质量原油的总熵产率随起始温度由低到高呈抛物线型分布; 在同样的起始输油温度下, 总熵产率随保温层厚度增大而降低, 即不考虑制造保温层所产生的熵产率, 保温层有利于降低总熵产率; 保温层厚度越大, 最小熵产率对应的原油起始加热温度越高(图3)。

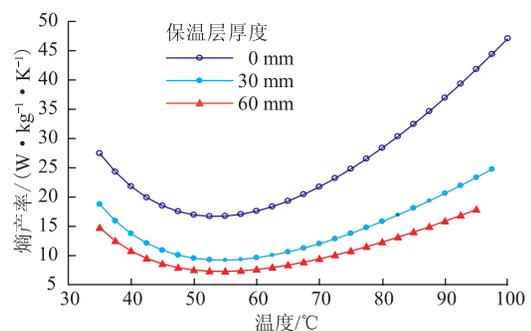


图3 总熵产率与起始温度和保温层厚度的关系

2.3 管道内径对总熵产率的影响

在输量为 $300 t/d$, 保温层厚度为 $60 mm$ 的情况下, 当原油起始温度低于最小熵产率温度时, 熵产率随管径的增大而减小; 当原油起始温度高于一定值时, 熵产率随管径的增大而增大; 对应最小熵产率的原油起始温度随管径的增加而降低, 即输送同样的原油, 采用大管径时, 可以采用较低的原油起始温度(图4)。

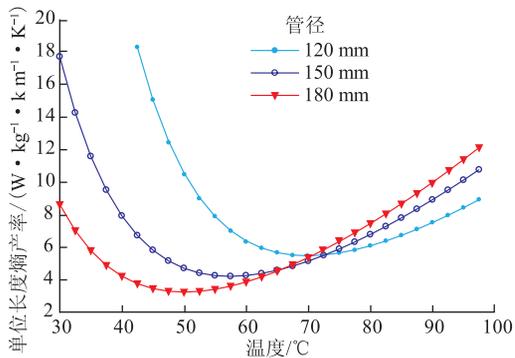


图4 熵产率与管径的关系

2.4 输量对总熵产率的影响

管道内径为 100 mm, 保温层厚度为 60 mm 的情况下, 输量越高, 输送单位质量原油的熵产率越低, 但随着输量的增加, 熵产率降低的幅度逐渐减小(图 5)。

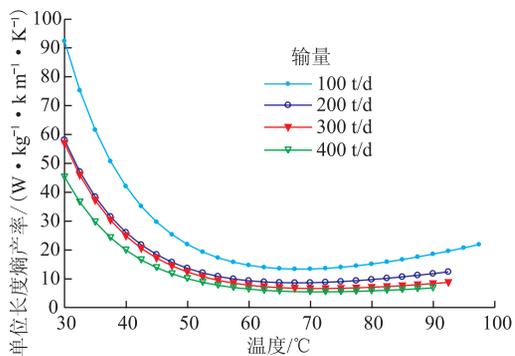


图5 输量对熵产率的影响

2.5 与热经济优化设计结果的对比

定义的热经济损失为散热量与热价之积, 功耗经济损失为功耗与电价之积, 而总的经济效果为热经济损失和功耗经济损失之和。以管道输量 $Q=200$ t/d, 管道内径 $d=160$ mm, 电价格是热价格的 3.5 倍, 取 0.55 元/(kW·h), 保温材料价格取 600 元/m³, 贷款年利率 12% 为例, 计算管道输送单位质量原油的费用 E_o 与起始温度 T_s 和保温层厚度之间的关系(图 6)。

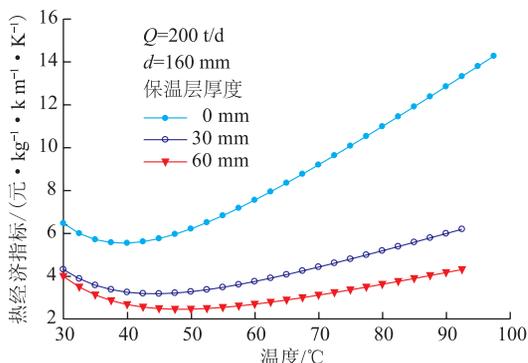


图6 热经济指标随起始加热温度的变化曲线

计算结果表明: 热经济优化结果与熵产率最小优化结果相同, 也是最佳起始加热温度对应最低年运行费用, 只是热经济优化涉及保温材料、电价格、燃料价格、贷款利率, 以及施工费用等因素, 故热经济优化结果虽然比较直观, 但会随这些因素变化而变化, 而熵产率优化设计的结果不依赖于材料价格和贷款利率。

综上所述, 稠油集输熵产最小优化设计与热经济设计有类似的对应关系, 只是从熵产率的角度出发而不是从投资和运行费用的角度研究问题。在给定管道长度的情况下, 通过分析起始加热温度、保温层厚度和管径对稠油集输过程熵产率的影响, 得到了最小熵产率所对应的设计参数, 其结果不依赖于当前物价、贷款利率等因素, 比热经济优化的设计结果更具适用性, 值得在稠油管输起始温度的优化计算中推广应用。

参考文献:

- [1] Bejan A. Entropy generation minimization[M]. Boca Raton: CRC Press, 1996: 24-68.
- [2] 沈维道, 童均耕. 工程热力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 175-197.
- [3] 苏长荪. 高等工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980: 233-247.
- [4] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization[M]. New York: Wiley, 1996: 39-107.
- [5] Bejan A. Advanced engineering thermodynamics[M]. New York: Wiley, 1988: 658-680.
- [6] Bejan A, Reis A H. Thermodynamics optimization of global circulation and climate[J]. Int J Energy Res, 2005, 29: 303-316.
- [7] 万仁溥, 罗英俊. 采油技术手册(第八分册: 稠油热采工程技术)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 77-94.

(收稿日期: 2010-12-20)

基金项目: 国家 863 计划资助项目“高含硫气藏安全高效开发技术”, 2008Z05017。

作者简介: 盖平原, 高级工程师, 1968 年生, 1991 年毕业于石油大学(华东)机械系, 现主要从事稠油开采技术的试验研究工作。

电话: 0546-8705220; Email: gaipingyuan.slyt@sinopec.com