

热油管道石蜡沉积层的力学特性研究

张国忠¹ 王志方² 刘刚¹

(1. 中国石油大学(华东); 2. 中国石油西气东输分公司)

张国忠等. 热油管道石蜡沉积层的力学特性研究. 油气储运, 2010, 29(2): 107-109.

摘要:研究了热油管道石蜡沉积层的形态和物质组成,分析了爬坡管道石蜡沉积层微元在停输前后的二维受力情况。爬坡管道停输后,石蜡沉积层受力不平衡,随停输时间的延长,在重力差的作用下,石蜡沉积物结构发生破坏,并向低端滑移和聚集,导致再启动困难。为了使低输量运行热油管道的石蜡沉积层处于临界厚度,必须定期清管,以降低管道停输再启动过程的运行风险。

关键词:原油管道;石蜡沉积;力学特性;分析;停输再启动

1 石蜡沉积层对管道运行的影响

对于地形起伏较大的爬坡管道,分析埋地热油管道的石蜡沉积层受力状况,可将石蜡沉积层视为悬臂结构物。正常运行时,石蜡沉积层在自身重力和油流剪切力的作用下,处于受力平衡的稳定状态。管道停输后,油流对沉积层的作用力消失,石蜡沉积层在重力作用下,处于受力不平衡的非稳状态。如果石蜡沉积层较厚,部分结构强度较低的沉积物会在重力作用下出现结构破坏,产生滑脱,进而向管道低端聚集。由于滑脱的石蜡沉积物温度低,含蜡量高,管内原油和滑脱沉积物混合物的启动特性发生恶化,因此造成存有滑脱沉积物的管段启动困难^[1]。

2 石蜡沉积层的形态

WJ管道,输送NY混合原油,长 $L=286.4$ km,管径 $\phi 427 \times 7$ mm。正常运行时的管道流量为 130 m³/h。反算管道内最大石蜡沉积层厚度 214 km处,石蜡沉积层平均厚度为 115 mm,对应的管道有效流通直径仅有 182 mm,平均流速为 1.39 m/s,管内油温 41.5 °C,为牛顿流体,原油粘度 86 mPa·s,油流作用在石蜡沉积层的剪切应力为 5.25 Pa。

在该管道某位置进行现场割管,可见管内的石蜡沉积层形态,同时对管内不同径向位置石蜡沉积物进行分析(表1)。通过目视观察,可将管道内的

石蜡沉积物分为三层,即贴近管壁处的石蜡沉积物(3号)、远离管壁与管输原油接触的石蜡沉积物(1号)和夹于二者中间的石蜡沉积物(2号)。其中3号沉积物结构细密,蜡和机械杂质含量最高,强度较大;1号石蜡沉积物,与原油形态有较大不同,结构松软,存在大量颗粒状物质。在低流速热油管道中,石蜡沉积主要受蜡晶粒子的剪切扩散和重力沉降的影响。

表1 WJ管道石蜡沉积层的物质组成

石蜡沉积物样品	含蜡量 %	胶质 %	沥青质 %	机械杂质 %
1号	31.9	12.90	0.26	2.70
2号	30.3	13.40	0.45	1.15
3号	45.2	11.01	0.20	9.22

3 爬坡管道石蜡沉积层的力学特性

3.1 受力分析^[2]

对地形起伏地区爬坡管道停输前石蜡沉积层进行受力分析(图1),其中,第I部分是管内流动的原油,第II部分是石蜡沉积层。假设管道是轴对称的,取管道轴剖面的下半部分进行二维简化受力分析。 W 为微元段竖直向下的自身重力, W_1 、 W_2 分别为重力在平行于管道和垂直于管道方向的两个分力, E_r 、 E_l 为前后微元段间的垂直相互作用力, X_r 、 X_l 为上下微元段间的切向相互作用力, P 为流动原油对石蜡沉积层的正压力, S_n 为流动原油对石蜡沉积层的剪切力, S_m 为管道内壁与石蜡沉积层之间的切

作者简介:张国忠,教授,博士生导师,1953年生,1981年博士毕业于华东石油学院石油储运专业,现主要从事长距离管道输送技术方向的教学和研究工作。电话:0532-86981696。E-mail:gzzhang@upc.edu.cn

向作用力, G 为管道内壁对石蜡沉积层的支持力, α 为爬坡管道的倾斜角。

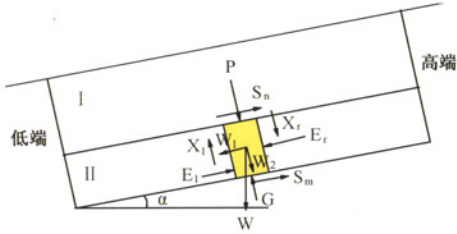


图1 管道停输前石蜡沉积层受力分析示意图

平行于管道壁面方向和垂直于管道壁面方向的受力平衡方程分别为:

$$W_1 + E_r - E_l + S_m - S_n = 0$$

$$P + W_2 + X_r - G - X_l = 0$$

假设前后微元段间的垂直相互作用力 E_r 、 E_l 相等, 于是平行于管道的方向有: $W_1 + S_m - S_n$ 。

管道停输后, 管道内的原油处于静止状态, 油流对沉积层的剪切力 S_n 消失, 于是有 $S_m = -W_1$, $W_1 = W \cdot \sin \alpha$ 。此时, 石蜡沉积层由于自身的重力作用而处于受力不平衡状态, (图2)。

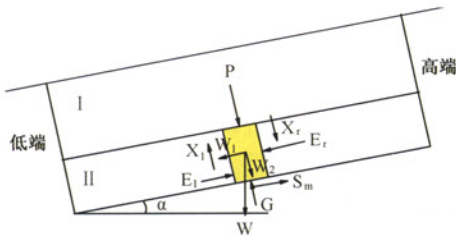


图2 管道停输后石蜡沉积层受力分析示意图

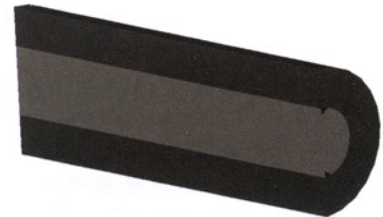
3.2 结构破坏模拟

石蜡沉积层厚度、爬坡角度和沉积物的结构强度是爬坡管道停输后沉积层是否产生结构破坏发生滑脱的关键因素。只有石蜡沉积物的屈服强度小于下滑剪应力, 沉积层才会发生破坏滑脱。

利用 ANSYS/LS-DYNA 程序中的 ALE 多物质耦合算法, 对石蜡沉积层内的沉积物在不同结构强度、不同沉积厚度、不同爬坡角度、不同爬坡距离、不同管径情况下发生的破坏滑脱过程进行数值模拟仿真分析。模拟过程中不考虑石蜡沉积物结构的蠕变破坏特性, 假设沉积层内部的结构强度相同, 当沉积层内部受力大于它的结构强度, 沉积层结构就会发生破坏, 与沉积层脱离。

模拟管道规格 $\phi 426 \times 7$ mm, 管段长 1 m, 沉积层厚度为 0.11 m, 管道爬坡角度为 2° 。在沉积层结构强度为 5 Pa, 原油密度为 850 kg/m^3 , 沉积物密度为 900 kg/m^3 的条件下, 对管道停输后沉积层的破

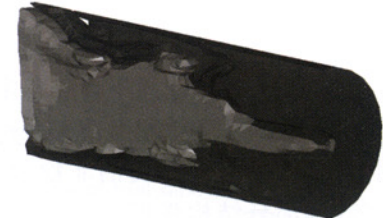
坏过程进行模拟仿真(图3)。其他条件相同, 沉积层结构强度为 10 Pa 时, 对管道停输后沉积层的破坏过程模拟仿真(图4)。图中, 管道中心浅色部分为液态原油, 深色部分为石蜡沉积层。



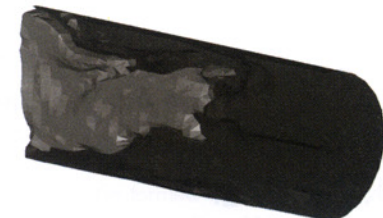
(a) 管道停输 0 s



(b) 管道停输 10 s



(c) 管道停输 15 s



(d) 管道停输 20 s

图3 管道停输不同时刻结构强度为 5 Pa 时石蜡沉积层破坏滑脱状态图

可见, 爬坡角为 2° 的管道停输后, 石蜡沉积层结构强度越低, 停输后越容易发生破坏滑脱。石蜡沉积层结构强度越高, 破坏滑脱后与管内的原油达到置换平衡的时间也越长。对于结构强度为 5 Pa 的沉积层, 管道停输后 20 s, 大部分沉积物发生滑脱, 并堆积于爬坡管道低端。对于结构强度为 10 Pa 的沉积层, 管道停输后 20 s, 可见滑脱现象的发生, 滑脱沉积物向爬坡管道低端堆积, 但尚未充满管道低端截面; 管道停输后 30 s, 石蜡沉积层才完全发生滑脱, 并堆积于爬坡管道低端。

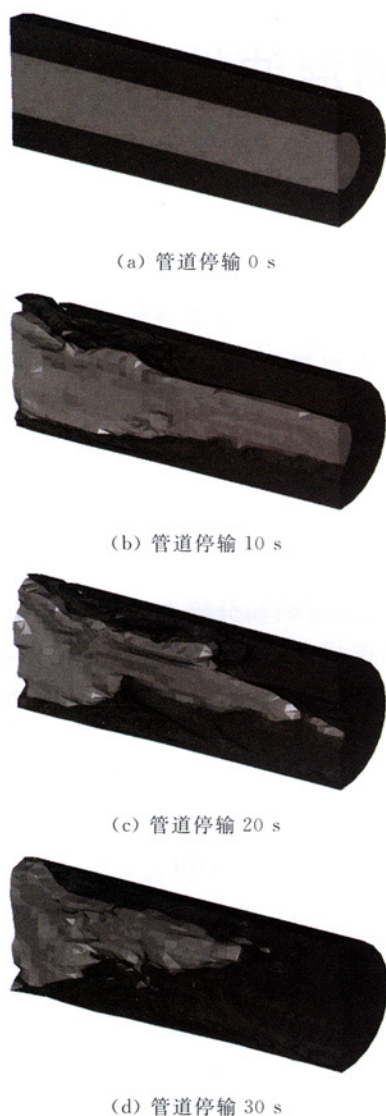


图4 管道停输不同时刻结构强度为10 Pa时石蜡沉积层破坏滑脱状态图

由爬坡管道停输后石蜡沉积层的受力模拟计算结果可知,管道的爬坡角度、沉积层厚度、沉积物的

结构强度和管径等诸多因素,都会影响停输后管道内石蜡沉积层的应力分布和石蜡沉积层的滑脱过程;但石蜡沉积层发生滑脱的厚度(沉积层厚度需小于管道内半径),与管径的相关性不大。

实际在役管道石蜡沉积层的结构强度与假设条件不同,其内部存在一定的温度分布,而且由沉积层的内表面到管道内壁,其结构强度连续增加。由模拟计算结果可知,对于爬坡角度大的管段,如果石蜡沉积层较厚,靠近内表面某一厚度的石蜡沉积层会首先发生滑脱。另外,石蜡沉积层的粘弹特性,使其网络结构在持续不平衡外力的作用下发生蠕变、屈服,最终导致结构破坏,并对实际管道中石蜡沉积层的滑脱破坏过程产生影响。石蜡沉积层的网络结构发生破坏后,在重力差的作用下,向爬坡管道低端聚集,导致管道堵塞,造成停输后的启动困难。

综合分析石蜡沉积管道的传热特性和石蜡沉积层结构的力学破坏特性,从管道安全经济运行的角度考虑,热油管道正常运行时,应使石蜡沉积层处于临界厚度^[3],临界石蜡沉积厚度取决于管道的传热特性、地形变化和停输时间。对于低输量运行的热油管道,特别是爬坡管道,必须定期清管,以降低管道停输再启动过程的运行风险。

参考文献:

- [1] 张秀杰,曹金水,马志祥,等. 魏荆管道停输再启动困难的原因分析[J]. 油气储运, 1998, 17(5): 7-10.
- [2] 王志方. 管内石蜡沉积物的力学响应特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009: 61-72, 107-109.
- [3] 张国忠,李立,刘刚. 热油管道石蜡沉积层的传热特性研究[J]. 油气储运, 2009, 28(12): 10-13.

(收稿日期: 2009-07-01)

(上接第99页)

- [5] 万里平,孟英峰,王存新,等. 西部油田油管腐蚀结垢机理研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(4): 247-251.
- [6] 蒋伟,郑云萍,梁光川,等. 陆梁油田作业区生产系统结垢机理研究[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(6): 516-520.
- [7] 王立. 油田水结垢研究[J]. 石油大学学报, 1994, 18(1): 107-119.
- [8] 陈峰,赵春辉,陈朝林. 油田注水系统结垢机理研究[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(7): 7-8.
- [9] 何志平,韦2断块油田井下结垢分析[J]. 小型油气藏, 2005, 10(3): 50-54.
- [10] 蒋官澄,马先平,纪朝凤,等. 注水系统结垢趋势预测及影响因素研究[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 27(4): 49-55.
- [11] 罗智,苟群芳,刘星. 油田注水开发过程中结垢与水敏的防治[J]. 江汉石油职工大学学报, 2007, 20(6): 48-50.
- [12] 李耀东. 德士古水系统结垢原因分析及解决办法[J]. 中氮肥, 2006, 18(5): 30-32.
- [13] 慕慧. 基础化学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 47-89.

(收稿日期: 2009-04-20)