

大庆原油流变性及其管输应用

严大凡 罗哲鸣

(华东石油学院)

摘 要

本文以实验为依据,论述了大庆含蜡原油的流变性对热力条件的敏感性及其随温度变化的规律。当油温低于某一值时,大庆原油的流变结构有出现时间效应及出现结构强度的特点。提出了管输大庆原油时恰当地利用热处理方法改善其低温流动性,以提高经济效益的可行性,并提供了确定经济运行参数的数学模型。

前 言

为降低管道输送含蜡原油的能耗,确保安全经济地输油,深入研究原油的流变力学特性已成为必不可少的基础工作^[1]。

在易凝含蜡原油中有影响原油相态变化的蜡、胶、沥青质,这些物质的含量比和分子量的分布,直接影响着原油的流变力学特性。不同的热力条件,可使原油形成不同的流变体结构,反映出不同的流变行为。高温下,蜡全溶于液态烃中,原油可视为单相液体。随着温度降低,蜡晶析出,胶质、沥青质与蜡晶相互吸附,原油由液态逐渐变成悬浮液。油温再降低,蜡晶之间形成网络结构成为连续相,液态烃则被隔而成为分散相,达到条件性凝固,失去了流动性。这一相态的发展变化,使原油逐渐偏离牛顿流变力学特性,表现出剪切稀释性、触变性和结构强度。究其流变行为的宏观表现,含蜡原油的流变体类型随着温度的下降可分为牛顿流体、假塑性体、触变假塑性体、触变屈服假塑性体。导致流变体类型变化的因素除了原油自身组成的影响外,还受热历史、剪切历史的制约。本文根据华东石油学院储运教研室多年来对大庆原油流变性的测试结果,论述其变化规律和在管输中的应用。

大庆原油的流变力学特性

1. 实验条件简述

大庆原油属高含蜡原油,其蜡含量在25%左右。为探索这种复杂流体的流变特性,采用下述测定参数:(1)用“凝点法”确定原油失去流动性的条件性凝固温度;(2)用RV-II测定原油的流变性(粘度或表观粘度)以描述原油流动状态下的力学特性;(3)用U型管装置等方法确定屈服应力来描述原油冷凝后恢复流动时的难易程度。大量实验证明,此种复杂流体的实验条件性较强,故规定了统一的取样和试验条件:(1)全部试样都要在80℃预处理后,静态放置48小时以上才能使用。(2)往仪器中装入试样,实际上是一次剪切作用,故规

定统一的装样温度为50℃。(3)大量实验证明,加热温度是影响原油内部物理结构变化的最主要因素,故油样的加热温度视实验要求而变。(4)降温要求:油样从加热温度降至测定温度,规定在静态下(即无剪切作用下),以0.5~1℃/分的冷却速度进行。显然此实验研究是在其它条件相同的情况下,摸索热力条件对原油流变力学性质的影响为主要目的。

2. 热力条件对大庆原油流变结构的影响

含蜡原油经加热后,其中所含的蜡晶将全部溶解或部分溶解,而在冷却过程中,随着蜡晶的析出和受胶质、沥青质的制约,改变着原油内部的物理结构,从而改变其流变特性。现以其在规定的冷却方式、冷却速度和不同加热温度下测得的流变性数据,宏观地论述流变性变化的特点。

(1)大庆原油在45~55℃之间对热力条件的敏感性特强(见图1、2和表1)。

加热温度在45~53℃范围内,随着加热温度的上升,其凝固点、表观粘度、屈服值都有增大

表 1

油样的加热 温度,℃	凝固点 ℃	屈服值 ^① Pa	27℃的表观粘度		粘度降低值	
			$\eta_{13.5}$ 1/S ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$\eta_{121.5}$ 1/S ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$(\eta_x/\eta_{60})_{13.5}$ 1/S	$(\eta_x/\eta_{60})_{121.5}$ 1/S
45	32.1	276.97	1134.4	268.9	9.3	2.7
50	34.7	343.91	1742.3	335.3	14.3	3.3
53	35.0	/	1789.9	365.1	14.7	3.6
54	32.2	/	671.6	198.2	5.5	2.0
55	25.4	23.81	145.7	109.0	1.2	1.1
60	24.6	29.62	122.0	101.0	1.0	1.0
70	24.5	33.39	136.2	109.8	1.1	1.1
90	24.9	34.66	118.5	95.2	1.0	0.9

①指20℃测试下的静屈服值; η —表观粘度

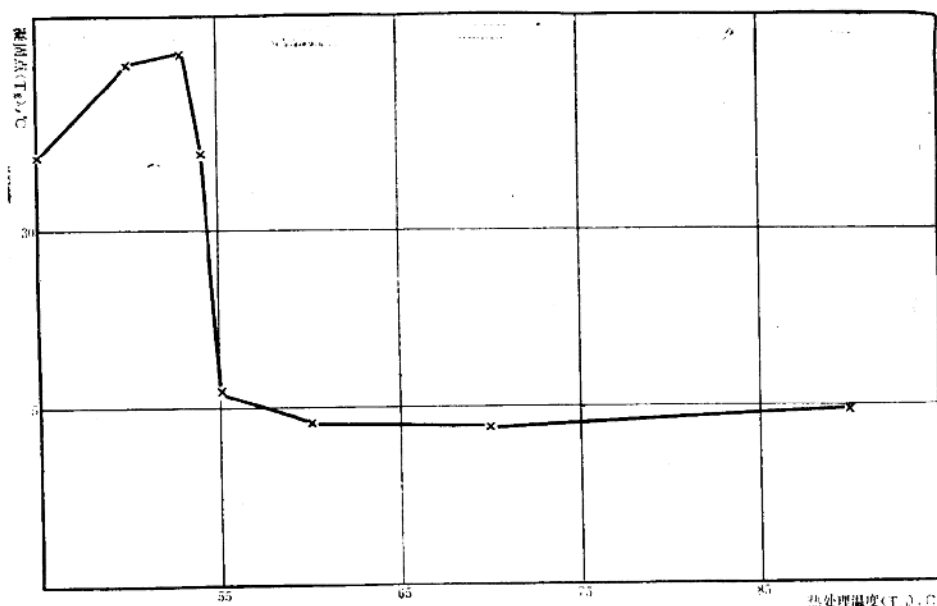


图 1 大庆原油 $T_s - T_{ch}$ 曲线

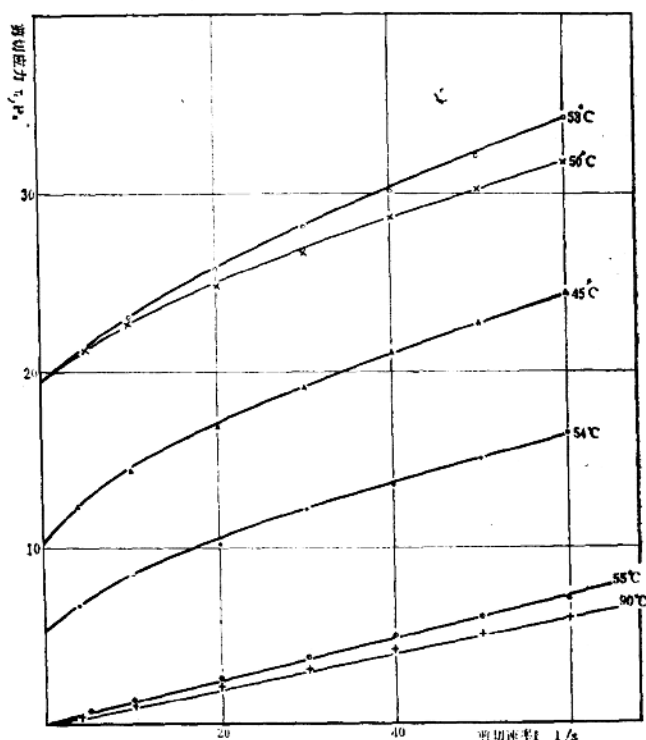


图2 大庆原油 τ — $\dot{\gamma}$ 曲线 (不同热处理温度, 27℃测试)

的趋势。加热温度在53℃~55℃范围内, 仅2℃之差, 其流变力学特性的变化特别敏感, 表现粘度、凝固点、屈服值都迅速下降。加热温度高于55℃以后, 随着加热温度的升高, 原油的流变力学特性基本相同, 表现出良好的低温流动性能, 与其它含蜡原油相比更富有特色^[2]。这是由于大庆原油的低分子蜡含量高, 蜡胶比适中特有的组成所致。

(2) 不同的加热温度下, 引起流变结构变化的分界特征温度不同。含蜡原油在降温过程中, 经历着析蜡、蜡晶成长和蜡晶连成网络的过程, 这个过程的流变力学特性可用几个特征温度 (即析蜡点、反常点和失流点) 来划分。当 $T > T_{反}$ 时, 原油属牛顿型流体, 可用 $\tau = \mu \dot{\gamma}$ 模式方程来描述其流变力学特性。当 $T_{失} < T < T_{反}$ 时, 原油为假塑性或触变假塑性流体, 可用 $\tau = K \dot{\gamma}^n$ 模式方程来描述达到动平衡流变结构时的流变力学特性。当 $T < T_{失}$ 时, 原油为触变屈服假塑性体, 可用 $\tau = \tau_R + K \dot{\gamma}^n$ 模式方程来描述达到动平衡流变结构时的流变力学特性 (见表2)。

表2

热油 温度℃	参数	牛顿流体 $T > T_{反}$	触变假塑性 $T_{反} \sim T_{失}$	触变屈服假塑性 $T_{失}$ 以下	凝固点, ℃	析蜡点, ℃
45		>42	42~35	<32	32.1	/
50		>42	42~35	<35	34.7	/
55		>35	35~25	<25	25.4	52.9
60		>35	35~25	<25	24.6	50.5
70		>35	35~25	<25	24.5	49.1
90		>35	35~25	<25	24.9	49.6

符号说明

- T —— 测试温度, $^{\circ}\text{C}$
 $\dot{\gamma}$ —— 剪切速率, $1/\text{s}$
 $T_{\text{失}}$ —— 失流点, $^{\circ}\text{C}$
 τ_R —— 表观屈服值, Pa
 n —— 流变行为指数
 K —— 流变稠度系数, $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}^n$
 τ —— 剪切应力, Pa
 μ —— 粘度, $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$
 $T_{\text{反}}$ —— 反常点, $^{\circ}\text{C}$

(3) 不同的加热温度, 可得到不同的全粘温曲线 (见图 3)。这些粘温曲线大体可划分为两组, 加热温度在 53°C 以下为一组, 加热温度在 55°C 以上为另一组 (见图 4)。当原油呈现出非牛顿流特性后, 前者对剪切速率的稀释作用特别敏感, 后者则变化较平缓 (见图 5)。但在

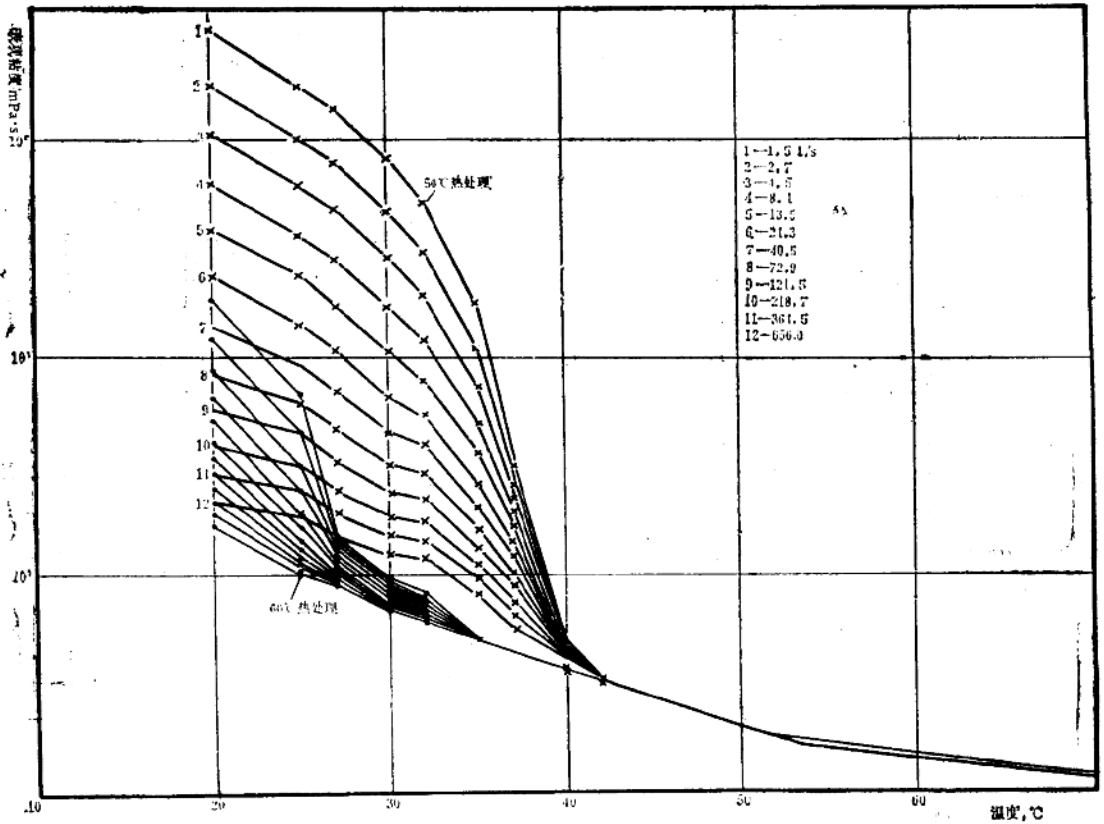


图 3 大庆原油 $\mu, \dot{\gamma}$ — T 曲线

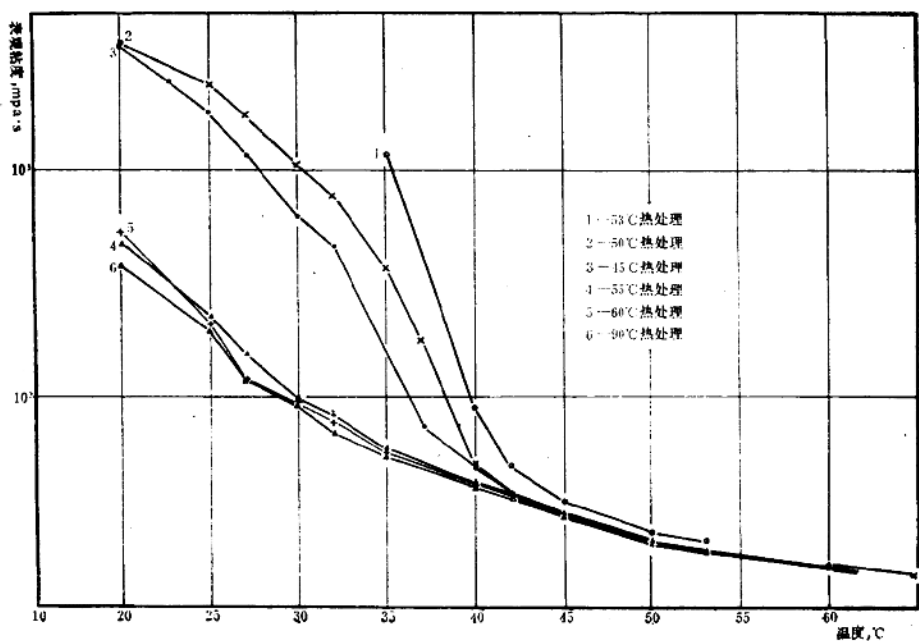


图4 不同热处理下大庆原油粘—温曲线 (剪切速率 $D_r = 13.5$ 1/S)

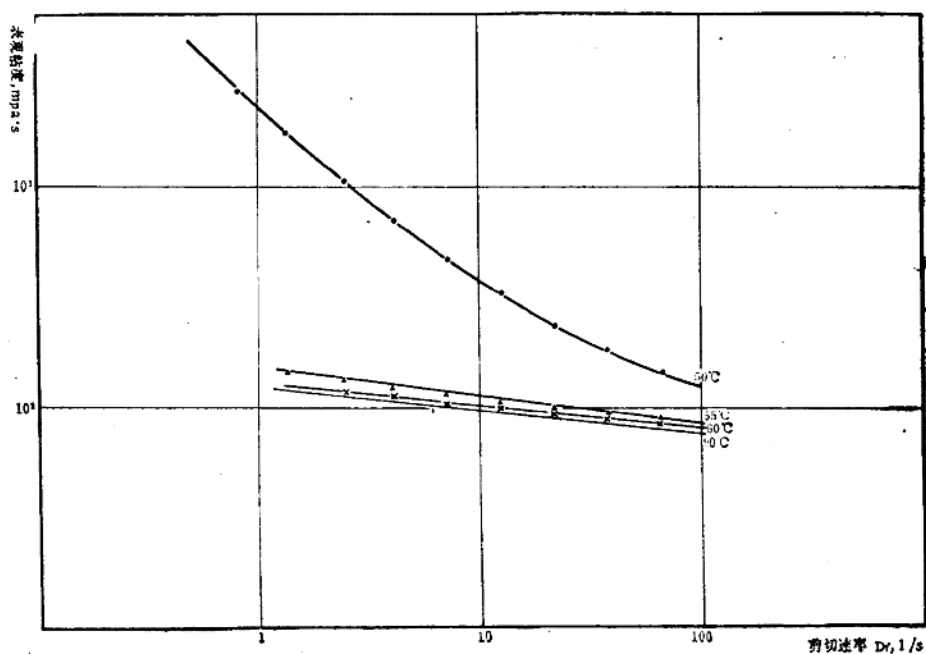


图5 大庆原油 27°C 的 $\mu_p - D_r$ 曲线 (不同热处理温度)

牛顿流体特性的温度范围内，即油温在42℃以上时，不管在那种加热温度下，各对应温度的粘度值基本相同（见表3）。

表 3

粘度 10⁻³ Pa.s 测温 ℃ 热油 温度 ℃	40	42	46	50	52	56	60
50	45.6	32.9	26	22.6	19	16.5	15
60	37.0	32.0	26	22.3	19.2	17.0	15

加热温度高于55℃的大庆原油，其牛顿流温度范围的粘温关系，可用下列粘温方程计算：

$$T \geq 50.5^{\circ}\text{C} \qquad \lg \mu_T = 1.9527 - 0.0129T$$

$$35 < T < 50.5^{\circ}\text{C} \qquad \lg \mu_T = 2.5799 - 0.0253T$$

加热温度低于53℃时，其牛顿流温度范围的粘温关系，可用如下方程计算：

$$42 < T < 53^{\circ}\text{C} \qquad \lg \mu_T = 2.4675 - 0.0231T$$

3. 大庆原油流变性的时间效应

低于某温度下的大庆原油，其析出的蜡晶成为大分子、小颗粒、处于可溶性边缘的溶质，液态烃则为溶剂，形成有时间效应的复杂混合物时，实验证明呈现触变性，即在 恒 定 剪 切 速率作用下，发生剪切应力随剪切作用时间的延长而逐渐减少，直至出现剪切应力值不变的动平衡现象。在停止流动时，结构单元将发生缔合而恢复，反抗流动的阻力将增加，这种现象称为流体的触变性^[3]。

(1) 不同热力条件下的大庆原油，显示触变性的温度见(表4)。

表 4

加 热 温 度 (℃)	45	50	55	60	70	90
呈现触变性的温度(℃)	<37	<40	<35	<30	<30	<30

(2) 任何一种热力条件下，测温在显触温度以下时，在每个剪切速率下都能测出一条剪切应力随时间变化的衰减曲线，衰减曲线有最大值，剪切10分钟的衰减值、平衡值和达到平衡值所需时间等参数。这些数值受热历史、测试温度，剪切速率的制约（见图6、7和表5、6、7）。可见大庆原油呈现触变性时，触变时间约为20～130分钟，一般为60分钟左右。剪切应力突降发生在10分钟内。即在10分钟内，结构单元的破坏和缔合已基本上调整到与流动阻力相平衡的程度。

表 5

平衡时间， 分 γ 1/S	1.5	2.7	4.5	8.1	13.5	24.3	40.5	121.5	364.5	656.0
热油温度，℃										
50	125	95	40	45	50	55	45	50	50	55
60	50	45	15	60	15	50	45	45	35	30

(测试温度为20℃)

表 6

参 数	$\dot{\gamma}$ 1/S	364.5	121.5	24.3	8.1	1.5	备 注
τ_M		182.001	152.646	129.162	105.678	57.624	加热温度为50℃, 测试温度为32℃
τ_{10}		62.8	28.694	14.582	12.936	10.231	
τ_{∞}		61.508	25.989	13.583	8.75	7.29	
t		40	65	45	60	50	

表 7

参 数	$\dot{\gamma}$ 1/S	364.5	121.5	24.3	8.1		备 注
τ_M		105.678	47.05	24.278	10.44		加热温度为60℃, 测试温度为22℃
τ_{10}		65.755	28.52	7.781	2.925		
τ		64.581	22.638	6.903	2.691		
t		35	40	35	35		

注: τ_M ——最大剪切应力值, Pa;

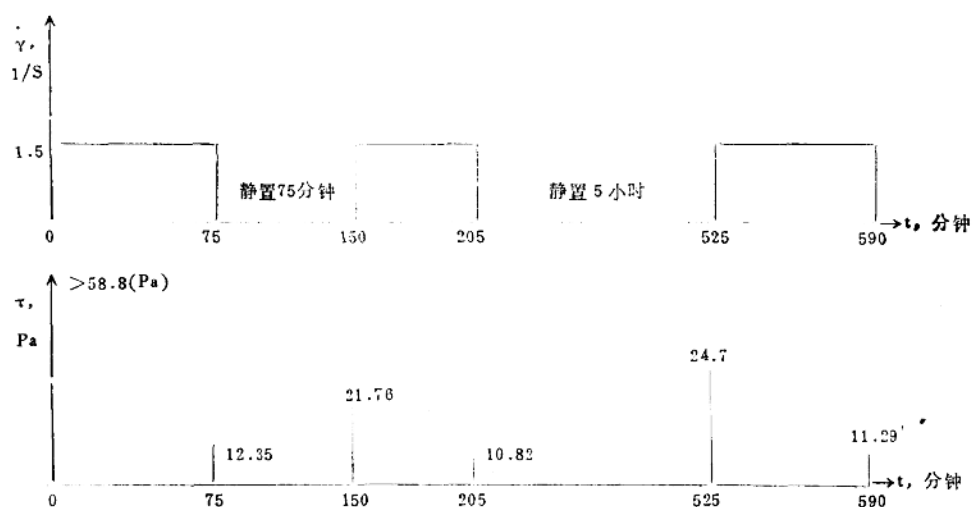
τ_{10} ——剪切10分钟后的剪切应力值, Pa;

τ_{∞} ——达到动平衡的剪切应力值, Pa;

t——达到动平衡的时间, 分。

(3) 用某一剪切速率剪切流体达平衡状态后, 静置一段时间, 用相同剪切速率再作剪切, 视其剪切应力的回升情况, 可看出大庆原油流变结构恢复的特点, 见如下示意图⁽⁴⁾。

1) 将原油加热至50℃, 冷却至30℃测试:



示图表明: 在 $\dot{\gamma} = 1.5$ 1/S 剪切达平衡后, 剪切应力恢复的平均速率为 0.125 Pa/分。再剪切作用55分钟达平衡后, 然后静置5小时, 再次剪切, 剪切应力恢复的平均速率为 0.046 Pa/分。

在相同的测温和静置时间条件下, 用 $\dot{\gamma} = 24.3$ (1/S) 剪切原油时, 剪切应力恢复的平均速率从 0.218 Pa/分降至 0.082 Pa/分。

2) 将原油加热至60℃, 冷却至20℃测试:

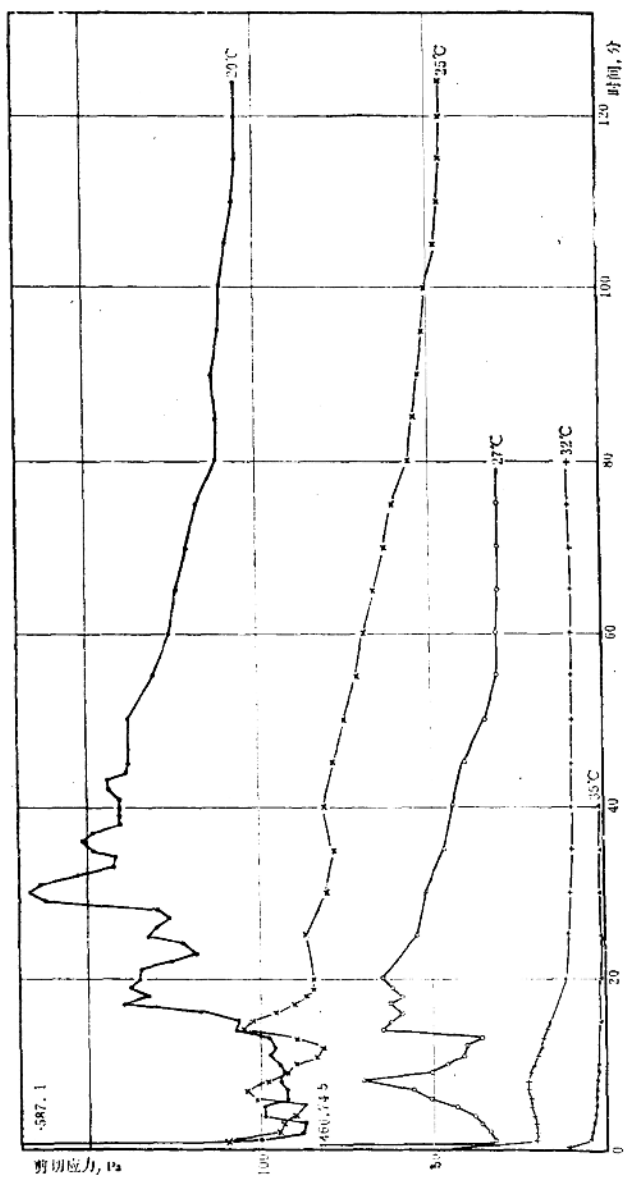
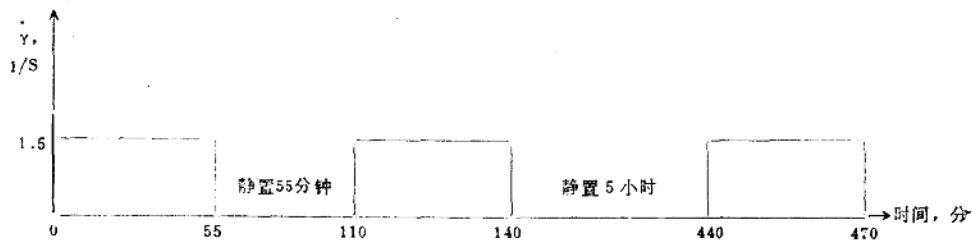


图 6 大庆原油触变曲线 (50°C 热处理, $D_r = 1, 5, 1/S$ 测)

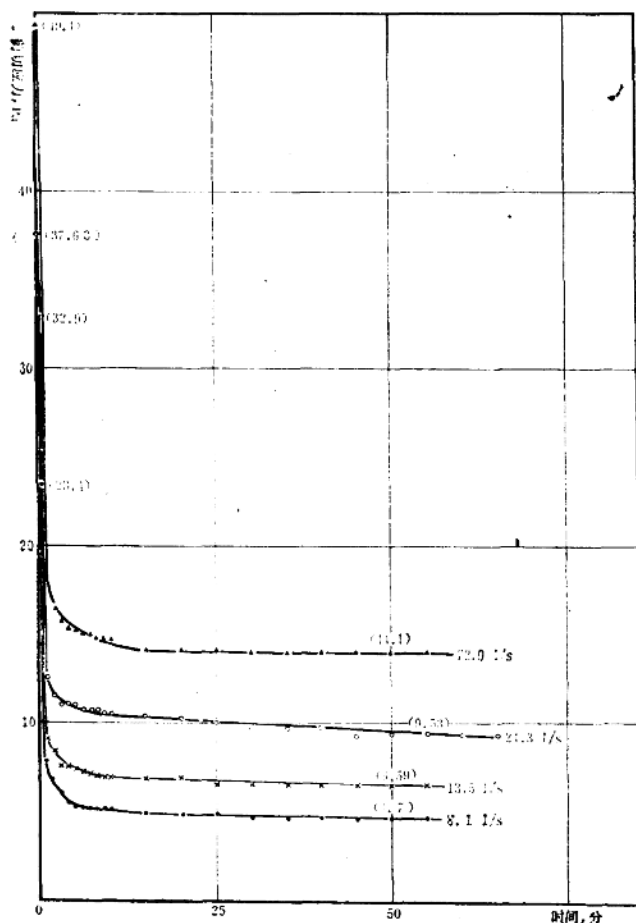
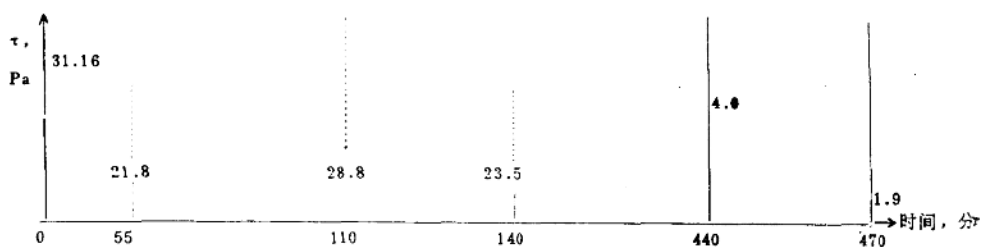


图7 大庆原油触变曲线 (50℃热处理, 35℃测试)

用 $\dot{\gamma} = 1.5 \text{ 1/s}$ 剪切达平衡后, 静置55分钟, 再剪切, 剪切应力恢复的平均速率为 0.013 Pa/分 , 再剪切作用40分钟达平衡后, 静置5小时, 再次剪切, 应力恢复的平均速率为 0.005 Pa/分 。若改变剪切速率, 使油样在 $\dot{\gamma} = 24.3 \text{ 1/s}$ 作用下剪切, 则剪切应力恢复的平均速率由 0.121 Pa/分 降到 0.032 Pa/分 , 说明不同热历史、不同测温、不同剪切速率都对流变结构的恢复产生影响, 且恢复的平均速率随静置时间的延长而变慢。

(4) 对于已具有触变性的大庆原油, 可从低剪切速率到高剪切速率, 逐级改变剪切速率测

出各对应的平衡剪切应力值,以此作为描述原油已消除时间效应影响的平衡流变曲线(见图8)。我室历年所测的大庆原油的平衡流变曲线,具有较好的重现性和规律性,能较好的符合幂律方程式或Herschel-Bulkley模式方程。

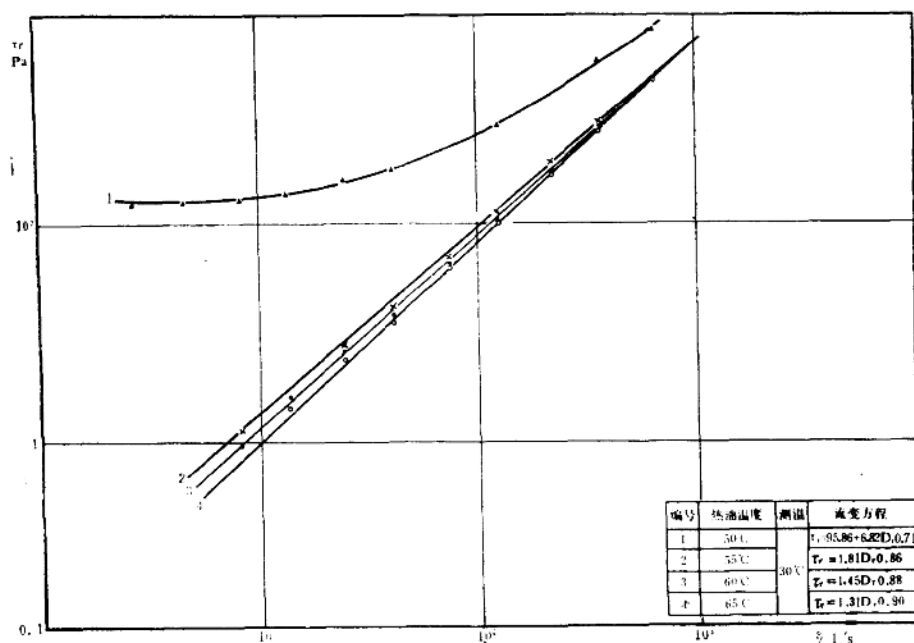


图8 大庆原油流变曲线

4. 大庆原油的流变结构强度

大庆原油低于某温度时,流变结构就呈现出类似固体的力学特性。当外加剪力小于某值时,蜡晶连成的三维网络结构只产生变形而不流动,直至外力大于某值时,开始流动,出现屈服现象。通常以屈服应力来衡量其结构的强弱。不同热力条件下,大庆原油开始呈现结构强度的温度不同(见表2,失流点值)。表中可见将油样加热到50℃,然后冷却至35℃时,原油就显示出结构强度。而将油样加热到60℃,则冷却至25℃时,原油才显示结构强度,说明不同的热力条件出现结构强度的温度不同。

很明显,原油的屈服值大小,对管道设计和运行有重大意义,然而要确切获得蜡晶三维网络结构的屈服强度非常困难,结合管输原油的特点,目前有三种确定条件性屈服值的方法,其所得的数值有不同的含义^[5]。

(1) 方程回归法:它是用带屈服应力的模式方程(如:Herschel-Bulkley方程)来拟合达到动平衡流变结构时的实验数据而获得的,称为表观屈服值,以 τ_R 表示。

(2) 旋转粘度计直接测定法:用尽量低的剪切速率,剪切在某特定条件下已形成结构的含蜡原油,将内圆筒刚转动时显示的最大剪切应力值,定义为动屈服应力,记为 τ_y' 。

(3) U型管直接测定法:施加外压顶挤装于特制U型管内的含蜡原油,将刚发生流动时管壁处的剪切应力值定义为静屈服值,记为 τ_y 。测试结果详见表8。

表 8

τ 值 Pa	测温 ℃	热动 温度 ℃	45	50	55	60	70	90	备 注
τ_y	20		276.97	343.91	23.89	29.62	33.39	34.66	静态
	24		153.18	290.80	3.93	3.57	5.35	10.78	
τ_y'	20		>587.1	>587.0	34.69	27.99	50.27	58.8	动态
	25		246.58	>587.1	5.17*	8.82*	8.23*	11.76	
τ_R	20		30.69	46.93	1.64	1.68	1.30	1.029	动平衡状态
	25		15.86	21.22	1.17	0.762	0.639	0.79	

注: 测 τ_y' 时, “*” 者用 $\dot{\gamma}=8.1 \frac{1}{S}$ 测, 其余用 $\dot{\gamma}=1.5 \frac{1}{S}$ 测

从表 8 可见, 三种表示方法都说明大庆原油在所规定条件下, 确实形成了网络结构, 显示了结构强度, 其值都与热历史相关, 各种表示方法的数值和意义虽有差异, 但数值的变化规律却是一致的。加热到 50℃, 然后冷却至 20℃ 的大庆原油, 各种屈服应力值都最大, 说明此种条件下所形成的流变结构强度最大。这种结构一旦形成, 会给管输原油带来较大威胁。

U 型管测定的静屈服应力, 可用作管输时计算再启动压力的参考。因为两者的顶挤方式较接近, 其屈服值随测温的变化规律见表 9。

表 9

τ_y , Pa	测温 ℃	热油 温度 ℃	18	20	22	24	27	30	35
50			413.78	343.91	/	29.08	161.24	63.91	5.31
60			48.64	29.62	7.15	3.57	0	0	0

由表可见, 流体结构的屈服强度受热力条件的影响很大。

5. 大庆原油流变力学特性的现场实测值

鉴于大庆原油的上述流变特性, 热油管道在运行过程中的温度和剪切历史, 势必将影响油温低于析蜡点时的流变性, 为了验证实验室内测定的流变性变化规律与管输过程的热力条件下是否一致? 曾在京秦、湛茂、铁大等长距离热油输送管道沿线取样测定。结果表明, 在生产管道的缓慢冷却的热力条件下, 大庆原油流变性的变化规律与实验室条件下类同。

(1) 不同加热温度下的凝固点及表观粘度, 见表 10。

(2) 泵及管道剪切原油的历史对表观粘度的影响, 见表 11。

表 10

参 数	取样地点	秦 皇 岛 泵 站			鞍 山 泵 站		实验室数据(1984年)	
		进 站 处	进主泵前	出 站 处	进 站 处 (冷热油掺合)	加热炉出口		
取 样 油 温, ℃		35.0	37.0	61.0	38	54~56	45	60
凝 固 点, ℃		31.0	29.5	23.0	33.4	21.3	32.1	24.6
表观粘度 10^{-3} Pa.s		80.0*	54.7*	42.6*	187.4**	62.66**	145*	50*

注: ** 35℃ 测试; *** 34℃ 测试, $\dot{\gamma}=24.47 \frac{1}{S}$

表 11

取 样 地 点	取 样 温 度 $^{\circ}\text{C}$	凝 固 点 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$ 表观粘度, $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$
漠 江 (首 站) 储 罐	37.5	30.4	376.4
漠 江 泵 站 出 口	43	31.3	898.9
化 州 (中 间 站) 泵 进 口	32.8	28.8	316.4
化 州 泵 出 口	34.0	28.8	276.9

表11的数据表明,大庆原油在43 $^{\circ}\text{C}$ 左右经泵强烈剪切和因摩擦热略有升温后,将使流动性能恶化,但在较低温度下经受泵和管道剪切,则可改善其低温流动性能。

(3) 静置时间对屈服值的影响

在漠茂线末站(茂名站)进口处取样,并恒温在28 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中,静置不同时间后,测28 $^{\circ}\text{C}$ 的大庆原油的动态屈服应力 τ_y' ,所测结果见表12。

表 12

静 置 时 间, 分	10	20	180	备 注
τ_y', Pa	18.72	24.57	38.89	$\gamma=1.5 \text{ 1/S}$

综上所述,当大庆原油的加热温度在45~55 $^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,其凝固点、反常点及非牛顿段的表观粘度均会有显著不同。而这正是目前热输大庆原油管道上最常见的出站温度,故在确定加热输送管道的经济运行参数和安全停输时间时,必须考虑不同出站温度对沿线原油流变性的影响,鉴于把大庆原油加热到55 $^{\circ}\text{C}$ 以上后,原油的低温流动性能可得到明显的改善,故可利用该热处理效果来降低输油成本。

热油管道的经济进出站温度

对于某一运行中的热油管道,当输量、油品、地温和沿线的传热情况一定时,管道摩阻的大小决定于油温的高低,提高加热站的进站和出站油温,摩阻就可减少;即多耗加热用的燃料,就可节省泵送的动力,反之亦然。在上述情况下,进、出站油温又是互相关联的,即当选定进站油温时,出站油温就被降温方程限定了,故摩阻是进(或出)站油温的一元函数。

热油管道的能耗费是燃料费和动力费两者的和,当输量、地温等一定时,如仅从沿线干管的耗能考虑,则能耗费用 S 是进站(或出站)油温的一元函数。其中的燃料费和动力费两者随进站油温的变化趋势是相反的,故作为两者之和的能耗费用随进站油温的变化关系是下单峰函数,即有一个能耗费最低的进站(或出站)油温。

上述分析是仅从干管耗能考虑的,但当干管的压力能一定时,如何供给这些压力能,还有一个如何选择泵站数和各站的泵机组组合的问题,故全管道的总能耗费是各站的进(或出)站油温和泵机组组合的函数。求解管道的经济运行方案,就是要找出各站油温和泵机组的最优组合。

当输量、油品和地温一定时,求解长输热油管道经济运行参数的数学模型为如下的二级递阶模型:

$$\text{Min } S = f_1 [T_R, C_P^*(T_R)] + f_2 [T_R, C_P^*(T_R)]$$

$$\text{约束条件为: } f_2 [T_R, C_P^*(T_R)] = \text{Min } f_2 [T_R, C_P(T_R)]$$

$$t_{R\min} \leq t_{Ri} \leq t_{R\max} \quad i = 1 \sim n$$

式中: T_R 为出站油温向量, $T_R = (t_{R1} \dots t_{Ri} \dots t_{Rn})$, t_{Ri} 是第 i 站的出站油温; C_P 为全线的泵组合矩阵, $C_P = [P_{ij}]_{n \times m}$, 该矩阵的行数 n 是全线的泵站数, 列阵 $m = \max_{i=1 \sim n} \{m_i\}$, m_i 为第 i 站可供选用的单泵台数, 矩阵中的元素 P_{ij} 代表第 i 站第 j 号泵的运行状态数, 例如该泵有 4 种直径的叶轮可供选用, 从最大的原始叶轮开始, 四种叶轮的状态数分别为 1、2、3、4, 该泵停运的状态数为 0; 若矩阵 C_P 中的元素 $P_{ij} = 2$, 表示第 i 站的第 j 号泵以第二种叶轮投入运行; f_1 、 f_2 分别为全线的燃料费和电费。 $t_{R\min}$ 和 $t_{R\max}$ 为加热站允许的最低和最高温度。

上述数学模型中取出站油温作温度参数, 主要是为了便于考虑热处理条件的影响, 因为每一个加热站的出站油温就是其所供热的站间油流的热处理温度, 因而应取其相应的流变特性作为计算的原始数据。

由该数学模型的求解可得出, 长输热油管道的经济运行方案中, 各参数间的相互变化关系为: 随着输量的增大, 经济进站油温的变化趋势是逐渐上升的。就我国的含蜡油管道而言, 一般当流速低于 1 米/秒时, 其经济进站油温常接近其安全下限 (相应热处理条件下的凝固点), 当流速接近和超过 1.4~1.5 米/秒时, 经济进站油温随输量上升而显著升高。

因而对于在低输量下运行的热含蜡油管道其经济进站油温常比原油的反常点低很多, 加热站间管道的后段为非牛顿流动, 其流变性将取决于油流所经受的热处理条件, 有可能利用最优热处理条件, 使其发挥最好的经济效益, 避开最坏的热处理情况。

对于大庆原油, 鉴于其在 55℃ 以上的热处理温度下, 原油的流变特性变化不大, 均属最佳条件, 为简化优化的迭代过程, 可取相同的物理参数, 统归之为“60℃ 热处理”。在 45~53℃ 的热处理温度范围内, 流变特性也大致相近, 均属最差条件, 统归之为“50℃ 热处理”。

为充分利用热处理的经济效果, 如根据最优热处理条件下的粘温特性由优化模型确定的经济出站油温 t_{Ri} 低于最优热处理温度 t_{RH} (对大庆原油为 55℃), 可在每个加热站上加热到 t_{RH} , 再与进站原油换热, 将出站油温降至 t_{Ri} 。如我国的克独、濮临等管道在低输量阶段都是采用这一方法输送的, 取得了显著的经济效益。

对于大庆原油, 其最优热处理温度比濮阳原油 (为 90℃) 低得多, 更有可能发挥热处理的经济效益。

以 $\phi 529$ 输送大庆原油的湛江—茂名管道为例, 当地温为 23℃ 时, 在 50℃ 和 60℃ 两种热处理条件下, 计算所得的经济运行参数见表 13^[6]。

表 13

输 泵, 吨/时	400		500		600	
	0.631		0.789		0.947	
流 速, 米/秒						
热处理条件℃	经济参数		经济参数		经济参数	
	t_{zj} °C	s_j 分/吨·公里	t_{zj} °C	s_j 分/吨·公里	t_{zj} °C	s_j 分/吨·公里
50	29	0.3893	30	0.3406	32	0.3641
60	26	0.2558	28	0.2841	30	0.3367

注: 燃油单价按 160 元/吨; 电费按 0.09 元/度计算

t_{zj} ——进站温度 (°C), s_j ——能耗费

对于改造为密闭输送后的 $\phi 720$ 的铁岭一大连管道,分别按大庆原油的两种典型热处理条件——“60℃热处理”和“50℃热处理”进行了对比计算,其经济能耗费用与输量的关系见图9(油价按120元/吨,电价按0.08元/度计算)。均未包括换热装置的能耗^[7]。

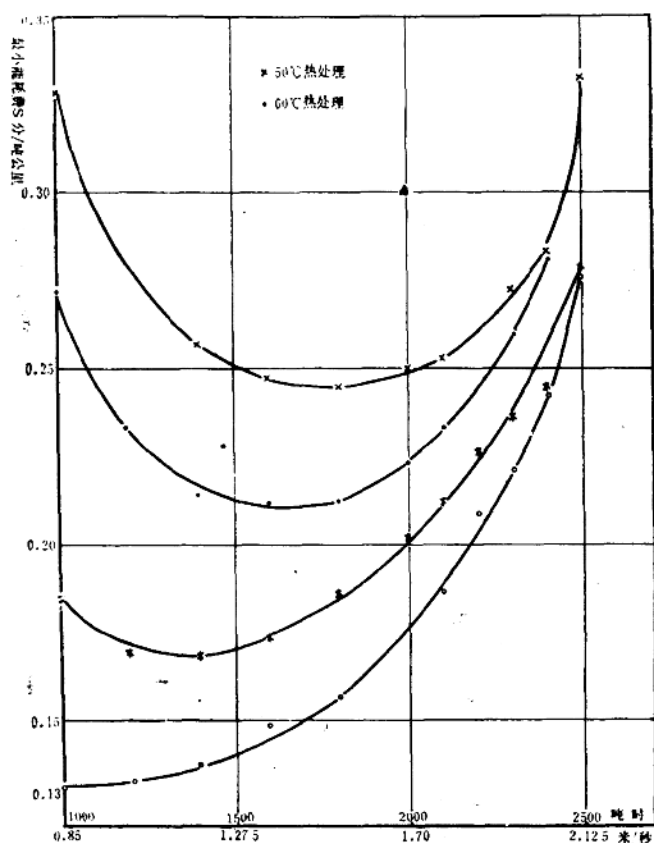


图9 铁大线的最低能耗费与输量的关系

由上述两例可见:(1)“60℃热处理”输送的经济能耗费用总是比“50℃热处理”时低。输量愈小二者的差值愈大,即经济效益愈明显,当输量增加到一定程度时,由于进站油温升高至高于反常点,不同的热处理条件就没有什么影响了。以铁大线为例,当输量大于2400吨/时时,由于进站油温已接近或高于反常点,不同热处理条件的经济能耗费用基本相同。(2)对某一管道,同一季节,不同热处理条件下的经济输量不同,最优热处理条件时的经济输量小,

设计热油管道时,要掌握各不同热处理条件下原油的流变参数,据以确定管径、泵站数、加热站数和加热温度的最优组合,当管道的输量要随着油田的开发逐步增长至最大输量时,可按大输量选择管径,在低输量阶段用最优热处理条件维持较低的经济进站油温,随着输量的增大,经济进站油温升高,可将加热站改造为泵站,以使管道在各个输量阶段均保持较高的经济效益。

综上所述可见,在输送大庆原油的管道的设计和运行管理工作中,充分注意原油流变特性,利用其有利条件,尤其在低输量下,可收到显著的经济效益。

结 论

1. 大庆原油的流变性对热力条件非常敏感。油温高于55℃以后, 会显著改善原油的低温流动性能。但加热温度低于53℃, 会使原油的低温流动性能变得很坏。加热温度仅差2℃, 对流变结构的影响很大。

2. 同一热力条件下, 大庆原油的流变力学特性随温度的变化, 符合一般含蜡原油的变化规律。不同热力条件下的大庆原油的粘温关系可用两组曲线来归纳。

3. 大庆原油流变结构的时间效应, 在刚受剪切的10分钟内特别敏感。一般在60分钟内流体结构单元的破坏和缔合可调整到与流动阻力相平衡的程度。

4. 大庆原油的结构强度随热力条件而变。在原油结构强度的测试温度为20℃的条件下, 加热温度低于53℃时的原油结构强度比加热温度为60℃时增大约10倍。

5. 实验室和现场测试的流变规律基本类同。实验室所提供的数据可用于设计和运行调度。

6. 在热含蜡油管道的设计和运行管理中, 恰当利用热处理效果, 可显著提高经济效益。

参 考 文 献

1. 流变力学的理论与实践 袁龙蔚 1985年2月
2. 含蜡原油热处理输送工艺研究 鲍冲、严大凡 1983年6月
3. The Flow of complex Mixtures in Pipes
——G.W. GOVIER, Sc. D. and K. AZIZ, Ph.D. 1972年
4. Thixotropy—A General Review.....J. Mewis
——Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 6(1979)1—20
5. Yield Stress Measurement For Concentrated Suspensions —— Nguyen Quoc Dzuy and D.V. Boger, Department of Chemical Engineering, The University of Melbourne, Parkville Victoria, 3052 Australia
6. 湛茂管道常温输送测试总结(讨论稿)
——严大凡、罗哲鸣 1983.8
7. 长输热油管道稳态运行的最优化研究
——吴长春、严大凡