

260437

易炭原油的输送

苏联B·H·卓尔尼金著



石油工业出版社

3
717:1

易炭焦油的输送

苏联B·И·庫尔尼金著

最大凡譯 張英校訂

石油工业出版社

內 容 提 要

本書從理論上闡述了用管路輸送粘滯而易凝的(含蠟的)原油和產品的各種問題:原油的主要物理性質和流變性、最优参数、輸油管的热力和水力計算,分析了用管路輸送高凝固定含蠟原油和高粘度瀝青質原油和產品的工艺問題。本書以比較大的篇幅介紹了“熱”輸油管加熱站和輸油站的設備、建造特点和運轉問題,對我國輸油管的設計、施工和操作有理論和实际的指導意义。

本書可供從事原油管路輸送的工程技術人員和石油院校的師生參考和學習。

В. И. ЧЕРНИКИН

ПЕРЕКАЧКА ВЯЗКИХ И ЗАСТЫВАЮЩИХ НЕФТЕЙ

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1958年莫斯科版翻譯

統一書号, 15037·790

易凝原油的輸送

严大凡譯 張 英校訂

石油工業出版社出版(社址:北京大柵欄石油工業部內)

北京市書刊出版業營業許可證出字第08號

石油工業出版社印刷廠印刷 新华書店發行

850×1168 $\frac{1}{32}$ 開本 * 印張5 $\frac{1}{2}$ * 133千字 * 印1 1,500冊

1959年10月北京第1版第1次印刷

定價(10) 0.86元

目 录

緒論

第一章 原油的物理性質和流变性	6
§ 1. 反常粘度和可塑性	6
§ 2. 結構的形成	10
§ 3. 結構恢复性(触变性)	15
§ 4. 原油的溫度性質	17
第二章 粘滯的和易凝的冷原油的輸送	20
§ 5. 粘滯的和含蜡的原油輸油管的最优参数	20
§ 6. 含蜡原油管路輸送的特性	31
§ 7. 輸油管的最优埋置深度 $h_{\text{онт}}$	38
第三章 高粘度和高凝固点原油的加热輸送	43
§ 8. 需要加热輸送的原油种类	43
§ 9. 輸油管的热力情况	44
§ 10. “热”輸油管的水力情况	68
§ 11. 逐級变徑式“热”輸油管	88
§ 12. “热”輸油管生产能力的提高	93
§ 13. “热”輸油管站的设备及其佈置	102
§ 14. “热”輸油管建造上的特点	112
§ 15. “热”輸油管的運轉	116
参考文献	167

原 序

在苏联用大型管路輸送原油和产品的数量逐年都在增長，并將新建更多长达数千公里的大型輸油管。在用管路輸送輕質原油和产品的同时，輸送易凝含蜡原油和高粘度原油的管路的数目显著增加。为了經營这些輸油管，需要大批的工程师、技術員和工人。

为了进一步在技術上改善易凝和粘滯原油的輸送情况，进行理論性的研究和积累輸油管的設計和經營方面的經驗，必須总结国内外在这个方面的經驗。

本書主要介紹原油和产品在犬型管路中的輸送；但也能够应用于矿場、煉厂和油庫的短距离輸油管。

本書將介紹現代輸送易凝的和高粘度的原油管路的技術情况。这是初次的嘗試。作者向提出意見和批評的讀者預致謝意，并相信这些意見和批評將有助于修正本書的缺点。

作 者

緒 論

近年来，在苏联和外国，高凝固点含蜡原油和高粘度原油的开采量激增。东部地区石蜡含量达 6—8% 的含蜡原油是苏联主要的原油来源。北美、南美和中东的不蜡含量为 5—6% 的原油开采量也显著增长。

指 标	1940年	1945年	1950年	1955年
中东原油的开采量 百万吨/年	13.7	26.6	85.0	158.0
佔世界开采量的百分比	4.77	7.10	16.9	20.5

在苏联的伊尔斯科-霍尔姆斯克地区、美国的加利福尼亚、委内瑞拉和其他国家中，高粘度的瀝青質的原油的开采量显著增长。与此同时，在原油加工时，輕馏分和中間馏分的提取率不断增加。致使重油的含蜡量和粘度增高。

运送含蜡的和高粘度的原油及石油产品存在一系列的困难。如果它們的粘度随着温度的降低而显著增长，輸送高粘度原油將很复杂；輸油管在停止輸送以后启动复杂，可能自发地减少輸油管的生产能力直到几乎完全停止等等。很多含蜡原油在輸送温度下具有一系列反常的性質。这种反常的性質可能破坏輸送情况。远在粘度开始增长并影响輸送情况以前，就会使輸油管停止輸油和“冻结”。如果对这种原油的流变性和其他的物理性質沒有正确的認識，可能会减小管路的設計生产能力，安裝多余的泵站和加热站，增大輸送机組的功率等等。

由此可見，研究在技术文献中很少談到的用管路輸送高凝固点含蜡原油和高粘度瀝青質原油的工艺問題，具有特別重要的意义。在很多石油工業高度發达的国家里(表1)，用管路輸送这些原油，但是輸送的規模不很大。主要的原因在于，对原油的流变性

世界上某些“热”输油管的主要资料

表 1

编 号	输 油 管 名 称	长 度 公 里	直 径 时	泵站 加热站 数	原油加 热温度 °C	在输油管 终点的原 油温度 °C	生产能力 米 ³ /小时	系 压 大气压	原油的特性: γ —比重; η —运动粘度; μ —绝对粘度。
1	阿拉克-苏阿脱-格罗兹内 (苏联)	198	12	2/7	~55	~30	—	—	高凝固点(+22—23°C), 含蜡(17~36%)
2	卡尔斯卡亚-克拉斯诺达尔 (苏联)	47	10	2/2	~50	10~20	—	40~50	高粘度 $\eta_{20}=3.0$ 沱, $\eta_{20}=0.98$ 沱/米 ³
3	库姆达瓦-威什卡(苏联)	39.5	12	1/1	~50	~30	—	16~18	高凝固点(+25°C), 含蜡 (18.5%), $\mu_{60}=0.1$ 沱, $\eta_{20}=0.88$ 沱/米 ³
4	贝开尔-斯菲利德-马尔其内赤 (美国)	413	10/12	11/11	~80 (到 104)	35~40	~200	70	高粘度的加利福尼亚原油
5	卢别尔顿-摩比利(美国)	142	14	2/10	~60	25~30	~280	70	高粘度的巴克斯杰尔威尔 $\eta_{60}=1.5$ 沱, $\eta_{15}=0.96$ 沱/ 米 ³
6	列别克-摩依瓦(美国)	84	8	4/4	~90	~40	~110	60	高粘度, η_{20} 达 5.0 沱, $\eta_{20}=0.97$ 沱/米 ³
7	塞梅丽亚-阿摩拉(美国)	48	10	2/2	达 107	—	160	—	高粘度, $\eta_{15}=460$ 沱, $\eta_{15}=0.965$ 沱/米 ³
8	巴恩科-托列斯(墨西哥)	38	8	2/2	~70 (到 105)	~50	125	60	高粘度, $\eta_{15}=0.985$ 沱/ 米 ³
9	利里克-布阿塔恩 ① (印度 尼西亚)	150	8	5/5	~70	—	~220	70	高凝固点(+40°C), $\mu_{60}=0.25$ 沱, $\eta_{15}=0.8$ 沱/米 ³

① 用 3.4 吋水管预热加热。

和輸送工艺还很少研究。輸送粘度和含蜡量在很大范围内变化的原油具有下述特点。

原 油 的 特 性	輸 送 的 特 点
1. 低凝固点, 較高的粘度	1. 增大泵站压力(約达 120 大气压)
2. 低凝固点, 很高的粘度	2. 增大輸油管直徑
3. 高粘度(依尔斯克, 聖-阿尔多)和高凝固点(庫姆达葛斯克, 坏明俄)	3. 加热原油或用低粘度和低凝固点原油或馏分混合
4. 半固体(高粘度和高凝固点的重油和瀝青等)	4. 加热和增大管徑

在美国, 根据 B. Л. 涅利松的意見, 不加热輸送原油的較适宜和經濟的極限粘度 $\nu_{\text{ог}}^{\text{макс}}$ 等于:

管路直徑, 吋	4	6	10	20
$\nu_{\text{ог}}^{\text{макс}}$, 厘米 ² /秒	0.9	2.2	4.5	10

在油庫里, 如果原油的粘度不超过 8—10 厘米²/秒, 能够不預热而进行灌裝作業。

如果对原油提出的加工要求允許的話, 高粘度和高凝固点原油同輕的低凝固点原油相混合, 能够降低它的粘度和凝固溫度(表 2)。

將原油在 38°C (100°F) 时的粘度降低到 0.2 厘米²/秒所需的溶剂的試驗含量 (根据 B. Л. 涅利松的数据) 表 2

溶 剂	重原油的粘度 $\nu_{\text{ог}}$, 厘米 ² /秒									
	110	55	27.5	15	8.5	5	3.2	2.2	1.5	0.75
$\nu_{\text{ог}} = 0.018$ 厘米 ² /秒的輕原油	47	45	43	41	39	36	33	30	28	22
$\nu_{\text{ог}} = 0.075$ 厘米 ² /秒的輕原油	71	69	68	67	65	63	61	58	55	46

精确确定应用这些輸送方法的界限是很困难的。因此采用这种或那种輸送方法应该根据各方案的技术經濟比較。在本書中关于这个問題沒有列許多周詳的材料, 仅探討了下述主要問題。

1. 原油的流变性;
2. 在冷状态(在周围介质温度的情况下)下输送的工艺特征;
3. 热原油的输送工艺。

第一章 原油的物理性質和流变性

§ 1. 反常粘度和可塑性

根据牛頓定律，原油的絕對粘度

$$\mu = \tau : \left(\frac{dw}{dr} \right), \quad (1.1)$$

式中 τ ——剪切应力；

$\frac{dw}{dr}$ ——管路徑向的速度梯度或剪切速度。

在管路的內壁上根据內力与外力相等的条件，

$$\pi R^2 p = 2\pi R l \tau_0,$$

因而

$$\tau_0 = \frac{pR}{2l}, \quad (1.2)$$

式中 τ_0 ——最大剪切应力(見圖 8)；

l ——長度；

R ——管路半徑；

p ——压力。

根据普阿傑里公式，在管壁处

$$\frac{dw}{dR} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (Q——原油流量)$$

因而

$$\mu = \left(\frac{pR}{2l} \right) : \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right). \quad (1.3)$$

方程式(1.3)右边的全部数值能够由实验确定。在 τ_0 和 $\frac{dw}{dR}$ 的座标上，方程式(1.3)的关系是直綫(圖 1, a)。它对横座标的斜率就表示原油的絕對粘度 μ (正常的真实粘度)。这个圖解表示了原油在相当高的溫度 t_0 情况下的特性。此时原油中不含有呈網狀結

構狀的固体石蜡（凝膠）。这样的原油被認為是牛頓液体。在一定的溫度下粘度是常数，不受剪切速度的影响。这种原油总是液态，在很小的压力差下就开始流动。

在比較低的溫度 t_0 情況下，从原油中分离出固体石蜡，原油轉入凝膠狀，变成非牛頓液体，性質反常。它的粘度 $\mu \neq$ 常数，随剪切速度而变化（如圖 1 中的曲綫 6）。

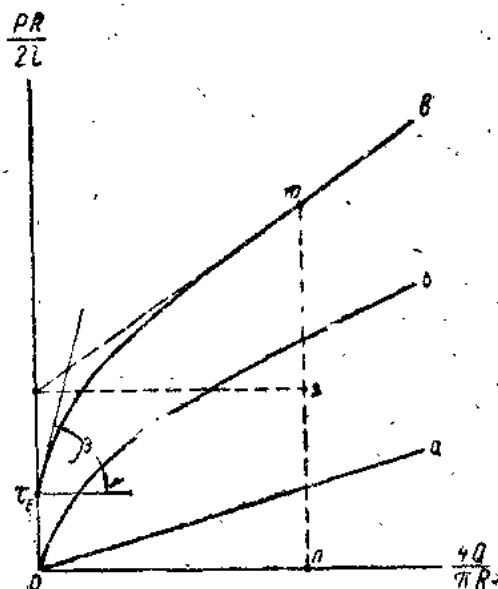


圖 1 原油的反常粘度

由于破坏了石蜡顆粒間的联系，粘度 μ 随剪切速度的增大而减小。在剪切速度足够大的情況下， $\mu \approx$ 常数（曲綫的直綫部分）。在溫度接近原油凝固点的溫度 t_0 时，可以看到这种形狀的曲綫。在更低的溫度 t_0 下，原油中形成了足够坚固的石蜡結構網格，使原油获得了反抗剪切力（压力差）的性質，只有当剪切应力 $\tau_0 > \tau_0$ 时才开始流动（見圖 1 中的曲綫 6）。这样的原油称作可塑性原油。它們具有固体的性質。当压力小时，在管路中不流动；当压力提高到 p_0 。而相应的剪切应力大于或等于 τ_0 时，才开始流动。由方程式 (1.2) 可得出

$$p_0 = \frac{2\tau_0 l}{R}. \quad (1.3a)$$

在压力 p_0 下，原油的剪切（即石蜡結構網格破坏）沿着管子的內表面进行。在这以后抗剪阻力下降，可以在 $p < p_0$ 的情況下

进行輸送。

在溫度 t_0 下，原油繼續保持不動的最大剪切應力 τ_0 称作原油的流动極限。在 t_0 或較高的溫度下，流动極限 $\tau_0 = 0$ 。在反常的曲線上(圖 1 的曲線 δ 和 σ)可以將原油的粘度区別为三类：

1. 有效粘度(結構粘度) $\frac{m}{\sigma n}$ 在不同数值的應力和剪切速度下粘度不同；
2. 角粘度 $\frac{m}{\sigma}$ 适用于在曲線的直線部分的任何数值的剪切速度和剪切應力，角粘度总是小于有效粘度；
3. 起始粘度 等于 $1/g\beta$ ，相当于在剪切速度接近于零时曲線 σ 的切線的斜率。在 $\tau_0 < \tau_c$ 时，可塑性原油的起始粘度为無穷大。

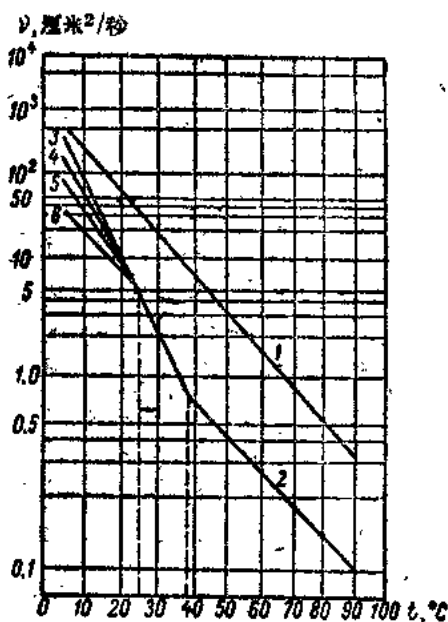


圖 2 原油的粘度和溫度及剪切應力的关系

同一种原油在高溫时是牛頓液体，而在低溫时却是非牛頓液体，性質反常甚至是可塑性的。高粘度原油常在很大的溫度範圍內都具有真實粘度的特性。例如粘度 $\eta_{20} = 55$ 厘米²/秒的伊爾斯克的巧克拉克地層的原油在溫度为 -10°C 甚至更低的情況下仍然是牛頓液体。含有大量石蜡的高凝固点原油則相反，甚至在相当高的溫度下也呈現反常粘度。例如含蜡 18.5% 凝固点为 25°C 的庫姆达葛斯克原油在溫度小于 52°C 时就呈現反常粘度。

圖 2 所示为牛頓液体的原油和非牛頓液体的原油的粘度曲

綫 1 和 2, 后者在 $t < 38^{\circ}\text{C}$ 时有反常粘度, 而当 $t < 25^{\circ}\text{C}$ 时它的粘度有力的决定于剪切应力 (曲綫 3 相当于 $\tau_0 = 100$ 达因/厘米²; 曲綫 4 相当于 200 达因/厘米²; 曲綫 5 相当于 400 达因/厘米²; 曲綫 6 相当于 τ_0 为無穷大)。

实地观察原油在管徑为 16 吋長 200 米的管子內的輸送情况 (輸送油温为 $+3^{\circ}\text{C}$, 原油凝固点为 $+18^{\circ}\text{C}$, 粘度 $\eta_{20} = 0.75$ 厘米²/秒), 得到下述結果:

泵 压 p 公斤/厘米 ²	原油流量 Q 米 ³ /小时	剪切应力 τ_0 公斤/厘米 ²	有效粘度 η_s 厘米 ² /秒
0.98	不动	0.00045	—
1.76	开始运动	0.00083	沒有測定
0.98	234	0.00045	28.2

从这些数目字中可以得到一个有趣的結論: 在运动着的原油中动剪切应力 $\tau_n = 0.00045$ 公斤/厘米² 比流动極限 $\tau_0 = 0.00083$ 公斤/厘米² 几乎小一半。这个現象可用石蜡結構網格的破坏来解釋。因此, 結構的破坏相当于在黏度曲綫上过渡到較高的温度 (圖 1)。因而, 在凝結原油的剪切压力 p_0 下 (相应于 $Q \approx 0$ 的流动極限 τ_0), 也能够以高流量輸送原油 ($Q = 234$ 米³/小时見上表) 如果輸油管在某些时候曾以大于 p_0 的压力工作过。这个現象將在 § 6 中詳細解釋。因此 τ_0 闡明了在起動期間原油的运动能力。可由方程式 (1.3a) 根据 τ_0 确定起動压力 p_0 。

由于泵的吸入高度的限制 (4~6 公尺水柱), 長的吸入管綫的启动几乎是最困难的。在某些实际情况下 (見 [1] C. M. Cawley), 原来 $\tau_0 < 300$ 达因/厘米² 而在吸入管路中則劇烈上升到 500 达因/厘米²。应该采取預热措施来改善吸入情况。在启动大型管路前, 尽管泵压很高, 也会遇到类似的困难。根据方程式 (1.3a), 具有相同的 $\frac{l}{R}$ 关系的管路当 τ_0 一定时, 起動压力 p 將是一样的。但是, 必須考慮到在品种更換、热处理等等情况下原油的流变性的

改变。因而，为了确定原油沿管路的流动性能，必须知道它的流动极限和在管路工作的温度范围内粘度曲线变化的特征。圖 1 的曲线能够用 CHC-1、B. C. 菲拉托夫、Φ. H. 什維多夫、申勃来和其他型号的旋轉(扭力)粘度計求出。

目前还是普遍应用称作原油凝固温度的 t_3 来表示原油的流动性能。从概念上說， t_3 应该表示原油不能流动时的温度。但并非如此（見 § 6），在低于 t_3 的温度下原油能够流动。这是由于 t_3 不能表示結構强度。在 t_3 时的剪切应力是不同的，虽然从推理上判断它們应该是一样的。大部分原油在 $t > t_3$ 时就具有反常粘度，具有同样的 t_3 的同一种原油在不同的热处理以后有不同的流动性和 τ_0 。用簡單方法决定的 t_3 只能表示原油可能流动的某些概念。这便于原油的分类。但为了水力計算应该用比較可靠的依据——流动极限 τ_0 来代替 t_3 。必須說明， t_3 和 τ_0 都随原油所曾經受到的热处理情况而变化。但是，統計材料指出， τ_0 的数值的重复性比 t_3 要好得多（由于对原油的流变性还研究得不够，在今后的討論中还是用 t_3 代替 τ_0 ）。

§ 2. 結構的形成*

出現原油的反常粘度和可塑性的主要原因是，在温度降低时溶解度减小并析出石蜡。在高温下全部石蜡溶解于溶液中。在开始结晶的温度下，因为溶液过饱和，它开始从原油中析出。繼續降低温度，石蜡的结晶数量增加，并形成类似海绵的將液相包含于其中的空間網狀结晶，致使完全丧失流动性——原油凝結。原油中的瀝青膠質吸附在石蜡结晶的表面上，能阻碍结晶的成長并形成不同的結構。随着原油中瀝青膠質含量的减少，形成数量不大的粗的石蜡结晶。結構的形成过程較快。在高瀝青質的原油中形成細小的结晶，結構的成長較慢。原油的粘度对阻碍结晶的成長也有类似的影响。通常，在管路上沉积石蜡的原油的黏度小。

●* 所述的有关第二巴庫原油的流变性的問題見 B. Φ. 涅热文科, Г. Т. 尼基金亞娜和 И. А. 切維脫考夫等人的文章[2]和[3]。

于 0.2 厘米²/秒。当格罗兹内原油用 36% 的煤油稀释以降低其黏度时，在管壁上发现结蜡情况。在由于提高黏度而使原油乳化的情况下，石蜡停止析出。

颗粒的形状和分散程度比结晶物质的绝对数量将在更大的程度上决定石蜡结晶形成的结构的机械性质。细小结晶的结构比粗大的结晶坚固。因此随着沥青胶质数量的增多，结构的强度增高。流动极限 τ_0 能足够好地表示结构的强度。在表 3 所示为东部地区和其他矿区的原油的某些流变性。

某些原油的流变性

表 3

原 油	比重 γ_{20} 吨/米 ³	黏度 μ_{20} 厘泊	凝固 温度 °C	含量, %		温 度, °C			
				石蜡	沥青 膠質	出現 石蜡 結晶	出現 反常 黏度	出現 流動 極限	
波克洛夫斯克	第二巴 庫[2]	0.80	2.6	- 7	5.6	3.0	47	15	10
基哈諾夫斯克		0.84	8.2	- 8	7.5	11.4	49	20	13
苏丹古罗米斯克		0.88	26.7	-17	5.1	16.1	42	0	15
拉达也夫斯克		0.90	89.5	-23	7.9	20.0	47	低于0	很低于 0
米努辛斯克	[3]	—	—	+17	22.0	22.3	—	33	21
庫姆达萬斯克		0.88	$\mu_{80}=10$	+25	18.5	11.4	—	52	32
斯尔斯克		—	80	+11	10.6	10.9	—	22	16
什尔斯克		0.98	5500	低于 -29	0	48	—	—	—

表 3 指出：1. 在很大的温度范围内原油中存在石蜡结晶，但原油并不呈现出流变性。例如，波克洛夫斯克原油在温度从 +47°C 降低到 +15°C 的情况下，虽然有石蜡析出，它仍然是牛顿液体；2. 随着沥青胶质含量的增多和原油黏度的升高，石蜡开始结晶的温度、出现反常黏度和可塑性的温度均降低，结构形成的过程转入 0°C 以下的温度范围内。在 0°C 时，高沥青胶质原油（沥青胶质含量大于 12—15%）具有正常黏度；含有中等含量和少量沥青胶质的原油（沥青胶质含量到 10—12%）具有反常黏度和可塑性。

由于高瀝青質原油結晶的条件不利，在一定的溫度下析出的石蜡較之在同样条件下的低黏度和低瀝青質的原油为少。在这个情况下，由于被高黏度介質所隔离的石蜡結晶高度分散，不能由結晶構成引起黏度反常和可塑性的致密的結構。

必須指出，在儲存过程中，原油出現反常黏度和可塑性的溫度不是常数，是随着輕馏分的蒸發而逐漸升高的。表示結構強度的流动極限 τ_0 和黏度一样是溫度的函数(表4)。

原油的 τ_0 和溫度的关系

表 4

原 油	溫 度 $^{\circ}\text{C}$					凝固溫度 $^{\circ}\text{C}$
	-20	-10	0	10	20	
波克洛夫斯克	0.55	0.15	0.03	0.01	沒有	-7
洛瑪什金	1.75	0.73	0.08	0.01	沒有	-3
拉达也夫斯克	0.95	0.38	沒有	沒有	沒有	-10

由表4看出，通常在溫度高于原油的凝固溫度10—15 $^{\circ}\text{C}$ 时，呈現流动極限。在 t_0 时所形成的結構的強度在很大的范围(从0.08到0.4克/厘米²)內变化。少瀝青質和中等瀝青質含量的原油流动極限的溫度曲綫具有平緩的特性；这些原油出現流动極限 τ_0 和凝固溫度 t_s 間的溫度范围比高瀝青質原油的寬得多。高瀝青質原油的結構強度是从出現 τ_0 到 t_s 間比較窄的溫度間隔內增加的。

原油的流动極限 τ_0 (克/厘米²) 每時間的变化关系

表 5

原 油	試驗溫度 $^{\circ}\text{C}$	時 間, 小 時					
		0.5	1	2	3	4	5
波克洛夫斯克	-14	0.10	0.16	0.08	—	—	—
拉达也夫斯克	-23	0.18	0.27	0.30	0.35	0.44	0.45

含蜡原油結構形成的時間是不同的(表5);少瀝青質的原油結構形成過程結束得很快。在這以後由於結晶變粗,結構的強度甚至會下降。隨著瀝青膠質含量的增多,結構形成的時間增長。

用 τ_0 (或用比較不可靠的 t_0) 表示的含蜡原油或重油的流動性能決定於它們曾經受過的热力情況 (如曾經過熱處理)。熱處理的影響在 1923—1924 年首先被 A. H. 薩哈諾夫, A. A. 卡沙也夫 [4], 羅傑爾和阿傑爾松 [5] 等發現。曾經遇到這樣的情況, 將含蜡原油預熱到大約 35—45°C 時, 有效黏度 μ_0 和凝固溫度 t_0 總是增大到最大值, 繼續把預熱溫度增高到 60°C 或 60°C 以上, 則引起 μ_0 和 t_0 的劇烈下降 (圖 3)。在熱處理時所發生的物理過程還沒有完全搞清楚。一般對它的影響作這樣的解釋: 在溫度高於石蜡開始結晶的溫度時, 在液相中分子重新排列, 石蜡結晶網絡進行調整。熱處理僅對具有反常黏度和可塑性的原油才有效。對於牛頓液體的原油, 熱處理是無效的。這同樣適用於剛生產出來的含蜡重油, 只有當保存幾週或幾個月以後, 或預先很快冷卻到低溫時 (見 C. M. Cawley [1]), 熱處理才有效。在低溫時, 熱處理對 μ_0 的影響最激烈。大部分東部地區的少瀝青質原油 (除了高瀝青質的拉達也夫斯克原油) 在熱處理到 $t > 50^\circ\text{C}$ 時, 0°C 時的有效黏度幾乎降低 50%。瀝青膠質能降低 t_0 。很多原油去掉瀝青膠質以後, 熱處理的影響就不灵敏。

除了預熱溫度以外, 原油的冷卻速度和終了溫度對熱處理有很大的影響。表 6 所示為 $\nu_{60} = 0.3$ 厘米²/秒的中東重油的凝固溫

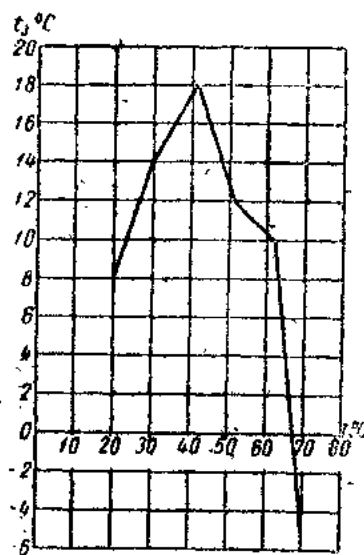


圖 3 熱處理對格羅茲內原油凝固溫度 t_0 的影響