

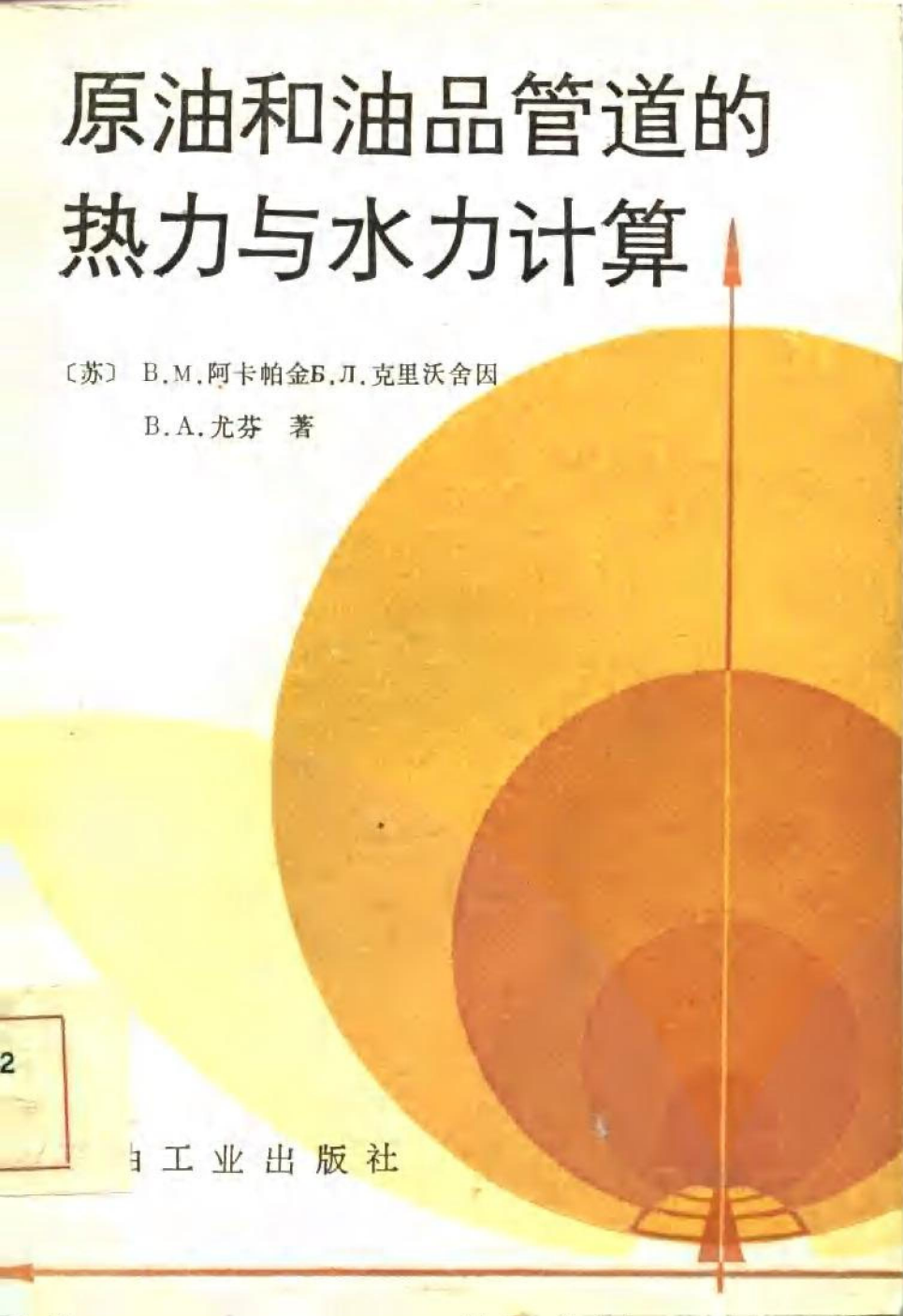
原油和油品管道的 热力与水力计算

〔苏〕 B. M. 阿卡帕金 B. Л. 克里沃舍因

B. A. 尤芬 著

2

石油工业出版社

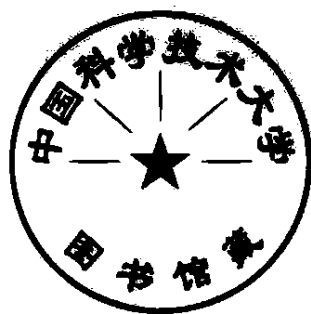


原油和油品管道的 热力与水力计算

〔苏〕B.M. 阿卡帕金

Б.Л. 克里沃舍因 B.A. 尤芬 著

罗塘湖译



石油工业出版社

目 录

绪论

第一章 高粘和易凝原油及油品的输送方法..... 1

第二章 稳定运行状态下输油管道的热力和水力计算方法.....14

第一节 输油管道稳定热力和水力状态的研究简述.....14

第二节 采用的假设和问题的数学描述.....21

第三节 进行输油管道热力和水力计算的原始数据.....32

第四节 地下管道土壤温度场.....46

第五节 确定地下管道的热损失.....55

第六节 原油温度沿输油管道长度的变化.....63

第七节 有中间加热站和沿途原油分输(注入)点时管道的 温度状态.....78

第八节 非等温输油管道的水力稳定状态.....87

第九节 输送非牛顿原油时管道水力计算特点.....97

第三章 土壤热物理特性计算值的选择..... 103

第一节 确定土壤导热系数所需精度的选择..... 103

第二节 各种因素对土壤热物理特性的影响..... 107

第三节 确定土壤热物理特性的方法..... 110

第四节 气象条件对土壤热物理特性的影响..... 114

第五节 土壤导热系数计算值的确定..... 117

第六节 采用积分变换装置确定土壤热物理特性..... 127

第七节 土壤盐碱性对其热物理特性的影响..... 131

第八节 土壤导电性和导热性的关系..... 132

第四章 专门敷设的输油管道的热力状态..... 138

第一节 绝热管道的热力状态..... 138

第二节 填充绝缘的地下输油管道温度状态..... 154

第三节	土堤内输油管道的热力状态·····	156
第四节	地上敷设的输油管道热力计算·····	158
第五节	电加热的原油和油品管道热力计算·····	162
第五章	输送热粘原油管道过渡工作状态计算方法·····	172
第一节	输送热粘原油和油品管道过渡工作状态研究简述 ·····	172
第二节	问题的数学描述·····	175
第三节	非稳定热交换时地下管道热损失的计算方法·····	186
第六章	输油管道运行时的非稳定热力过程·····	214
第一节	非稳定热交换时地下管道热损失的数值模拟·····	215
第二节	地下管道与自然环境热交换的实验研究·····	226
第三节	解析解精度的评价·····	231
第四节	输油管道在启动时的非稳定热力状态·····	234
第五节	关闭(投入)加热站时输油管道的热力计算·····	244
第六节	跳跃式改变输量时输油管道的热力状态·····	247
第七节	地上输油管道的非稳定温度状态·····	251
第八节	输油管道安全停输时间的确定·····	257
第七章	北方地区输油管道与自然环境的热力作用·····	264
第一节	输油管道温度状态对自然环境影响的评价·····	264
第二节	在各种敷设方法下,管道热绝缘的效果·····	271
第三节	管下基础土壤冷却效果·····	287
第八章	管道中热粘原油和油品的非稳定流动·····	289
参考文献	·····	303

第一章 高粘和易凝原油及油品的 的输送方法

由于粘度大，凝固点高以及一系列其它流变特性，输送高粘和易凝原油及油品就困难。因此，为了提高高粘和易凝原油及油品管输效能，必须采用专门的方法，以改善其流变特性。管输高粘和易凝原油及油品的的方法可划分为下列几种：等温输送，加热输送，预先改善流变性输送法，载体流输送，应用气候特点进行输送。图 1 所示为高粘和易凝原油输送法的一种分类方案^[4]。如果包括上述各法的联合使用在内，这一方案可进一步扩充。首先，可将实际上所有可能的加热输送法加以综合。通常在这种情况下可获得最大的经济效益。载体流输送原油方法的分类，同样可以因载体不同而扩充。例如，可用液化气作为载体。在这种情况下，预先冷却成固体的原油质点被液化气流所携带。采用这种或那种输送方法，取决于有无必要专为该法采用新的结构和新的建筑方案。

在讨论上述输送方法实际应用之前，指出下面的问题。

由于输送高粘和易凝原油及油品的的方法很多，有必要对其实用效果作出经济评价，并且选择最优的工艺和结构方案。解决这一问题，就要在决定因素（管径，加热温度，稀释剂浓度，添加剂，油气比，等等）变化的宽阔范围内，通过不同输送方法实施方案的对比，找到输送原油所耗费用的最小值，即

$$\Pi_i = \vartheta_i + E_{\Sigma} K_i \longrightarrow \min \quad (1.1)$$

粘 凝 原 油 输 送 方 法

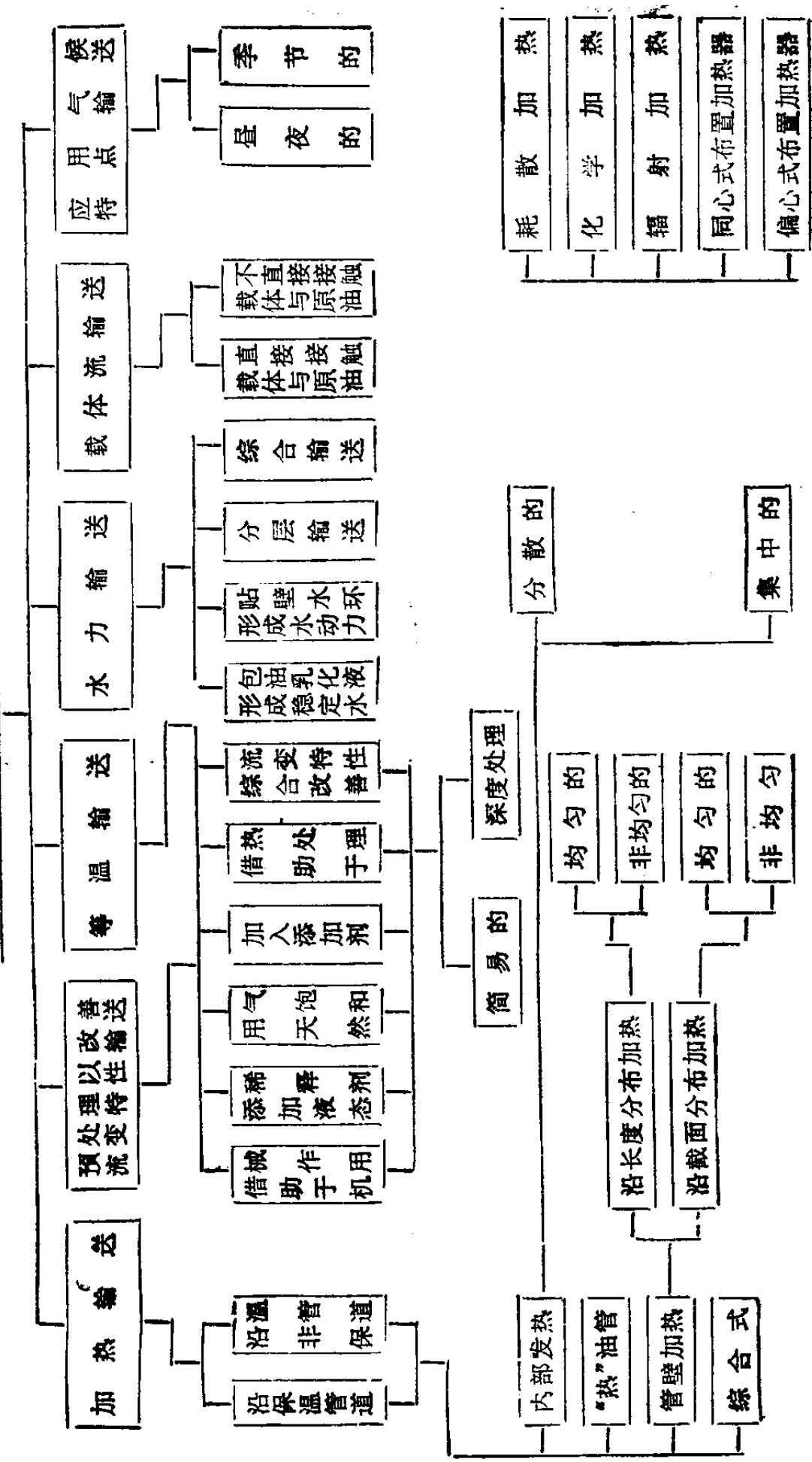


图 1 高粘和易凝原油管输方法分类

式中 Π_i , ϑ_i , K_i ——分别为实施 i 方案时输送原油所耗费用, 运管费用和投资; E_n ——折旧率。

在应用准则 (1.1) 时, 应使所对比方案中的重要指标 (如管道的输送能力、可靠性及对周围自然环境的作用程度等) 具有可比性。如将单位消耗指标代入式 (1.1) 中, 就可保证输送能力的可比性。计算由于设计对象可靠性的提高 (或降低) 而带来的效果 (或损失), 以及为保证规定自然保护要求 (与基础方案比) 所需的费用, 便可实现式 (1.1) 中在可靠性和对自然环境作用程度方面的可比性。对比方案中的任一方案均可作为基础方案。

下面简要介绍输送高粘和易凝原油的某些方法, 这些方法在苏联及其它国家经常采用。

热处理原油的输送 原油热处理在其管输之前进行, 以改善其流变特性。将原油加热到一定温度, 随后在静态下以固定速度冷却至输送温度。

当加热含蜡原油时, 固体蜡全部或部分溶解。随后在静态下冷却原油时, 蜡以结晶形态自溶液中析出, 其数量和形状取决于热处理温度和冷却条件。如能正确选择加热温度和冷却速度, 原油温度在低于凝固点时仍保持其流动性, 它的有效粘度减小。

含蜡原油热处理机理可描述如下。当原油加热至蜡熔点以上时, 蜡完全溶解, 原油成为均相的牛顿液体。随后在静态下冷却原油时, 原油中开始形成蜡晶, 这些蜡晶被沥青-胶质所包围。此时在结晶边上由表面活性的沥青-胶质所构成的保护层阻碍着新的蜡层往结晶表面沉积。沥青-胶质吸附于蜡晶表面的现象及其抑制结晶过程的能力为许多研究工作者所指出, 如波格丹诺夫 (Н.Ф.Богданов), 佩列韦尔泽夫

(А.Н.Перверзев), 福克耶夫 (В.М.Фокеев)等。

由于沥青-胶质妨碍结晶的形成,早先生成的不带沥青-胶质层的结晶的顶尖和棱角可能成为晶核。在溶液过饱和的条件下,往结晶棱角和顶尖上沉积着新的结晶,它们的边同样被沥青-胶质所包围。这就导致结晶在其棱角和顶尖不断增长,也就是说形成树枝状结晶,此时原油中全部的蜡便形成为数不多的大结晶。

还有一种情况可以证实沥青-胶质在热处理过程中的作用,即在脱胶原油和煤油-蜡混合物中观察不到热处理效果。研究曼盖斯拉克原油热处理条件表明,存在最优热处理温度($85\sim 100^{\circ}\text{C}$),此时热处理原油凝固点最低^[21]。

原油加热温度到达最优热处理温度以前,沥青-胶质部分地吸附于难熔蜡的残留结晶上。原油冷却后由于游离沥青-胶质的不足,导致形成低熔点蜡的细小结晶和坚固结构。随着热处理温度的升高,更多的蜡溶解,冷却时沥青-胶质的不足有所减缓,它们在更大的程度上促成了蜡的树枝状结晶。当加热温度超过最优值时,原油中天然乳化剂被破坏,这些乳化剂是表面活性物质,它们与蜡晶的关系如同沥青-胶质。因为天然乳化剂被破坏了,原油中表面活性物质的总量在减少,热处理效果降低。

原油加热后的冷却速度是热处理成功的重要条件之一。晶核形成的速度与已形成的结晶的生长速度之间的比例关系随原油冷却速度的不同而变。众所周知,晶核形成速度超过其生长速度。因此形成许多细小结晶,最终导致形成坚固结构并使原油凝固点升高。曼盖斯拉克原油凝固点与冷却速度的关系曲线在冷速为 $10\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 时具有明显的最小值。该原油的这一冷却速度范围正好与粘度和极限剪切应力

的最小值相符。热处理后经过一定时间通常会发现凝固点、粘度和极限剪切应力有些微升高。上述热处理效果是在原油加热后的静态冷却时取得的。热处理后原油的动态冷却具有一系列特点，这与在运动条件下形成的结晶往更热的层运移变成为结晶中心有关。此外，原油在搅拌条件下冷却更均匀，由此开始结晶的温度在全部容积内几乎同时达到，形成大量的细小结晶，它们均匀地分布在全部容积内，从而降低热处理效果。原油在静态下冷却，只与开始结晶后的时间有关，而在此之前，冷却可在动态下进行。研究表明，曼盖斯拉克原油在加热到 90°C 之后，可在动态下冷却至 60°C ，只是在此以后才过渡为静态冷却。将热处理后的原油重新加热到 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 以上，其流变特性恶化，而凝固点升高。

印度的那霍卡提雅-巴绕尼 (Нахоркатия-Барауни) 输油管道 (长 400 公里，直径 400 毫米) 实现了热处理原油输送。沿这一管道输送原始凝固点为 32°C ，含蜡 11.5% 的原油。热处理后原油凝固点降至 18°C ，相当于管道埋深处的土壤温度。在文献[21,50]中详细描述了热处理工艺和所用设备。在文献[21]中介绍了苏联所用的热处理工艺流程。与其它国家相比，该流程更加完善。其中包括原油加热时对油流进行搅动，使加热温度降到 80°C ；用在层流状态下以 $20^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 的速度在冷却器中连续冷却来替代第二阶段原油周期性冷却。这种工艺的投资和经营费用较低。

还有输送前原油深度热处理法 (在更高的温度和压力下)，即将含蜡原油进行轻度裂化。裂化的结果，得到流变特性很好的馏出物以及粘渣油，它们可用另外的方法输送。

热处理原油管输经验表明，原油输量大且输送距离远时，其管输效果好。热处理效果随时间的延续而减退。

高粘和含蜡原油稀释输送 用低粘产品（气油、柴油）、液化石油气（丁烷、丙烷）或低粘原油来稀释高粘和含蜡原油可以改善它们的流变特性。稀释后原油的粘度和凝固点降低。烃类稀释剂的作用机理如下：当稀释含蜡原油时混合物中蜡的浓度减小，溶液饱和温度和蜡晶析出的温度也降低，从而使混合物的凝固点降低。此外，低粘原油组分中的沥青-胶质作为降凝剂，阻碍了蜡结构网络的形成，同时也降低了混合物的凝固点和粘度。稀释剂的密度和粘度越低，上述机理作用的效果越大。混合的温度和方法对稀释效果有影响。最优混合温度通常比最粘组分的凝固点高 $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 。

加稀释剂输送高粘原油的方法，已进行了相当详尽的研究，并具有广泛的实用性。目前，曼盖斯拉克含蜡原油和罗马什金低粘原油的混合油就是通过古比雪夫-萨拉托夫（Куйбышев-Саратов）输油管道采用不加热输送。科图尔-切佩（Котур-Тепе）和库姆-达格（Кум-даг）油田的混合油通过维什卡-别列克（Вышка-Белек）管道输送。在加拿大沿长为 116 公里的洛伊德莱姆尼斯切尔-哈尔吉斯基（Ллойдлемнистер-Хардисти）输油管道输送掺有 22.5% 凝析油的高粘原油。在美国沿库欣-芝加哥（Кушнт-Чикаго）输油管道（长 1080 公里，直径 300 毫米）输送由 70% 原油、10% 气体汽油、9% 柴油和渣油混合物、6% 丁烷和 5% 丙烷组成的混合物。众所周知，在苏联和其他国家应用低粘稀释剂输送高粘和易凝原油的实践中，还有许多成功的例子。

也可以综合应用几种改善原油流变特性的方法。例如，将乌金原油进行热处理并加入 10% 左右的柴油，不用加热便可输送，因此时其凝固点可降至冬季土壤温度。曾对曼盖斯拉克含蜡原油与烃类稀释剂和低粘原油混合物的流变特性

进行过研究。采用汽油、液化丙烷、煤油和柴油作为烃类稀释剂。上述石油产品和丙烷能很好溶蜡。稀释剂粘度越小及其溶蜡越好，则稀释剂对稀释含蜡原油粘度的作用越有效。在这种情况下，蜡易于溶解在含有烷烃和环烷烃的烃类稀释剂中。分析乌金原油与汽油、煤油和柴油等烃类稀释剂混合物的流变曲线表明，当温度为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、稀释剂浓度在 $30\sim 40\%$ 以内时，这些混合物仍保持其粘塑特性。然而随稀释剂浓度的升高，流变曲线变得更加平缓，说明混合物塑性粘度减小。与此同时，动力极限剪切应力也降低。在更高的温度下，提高稀释剂的浓度可导致动力极限剪切应力的急剧下降（浓度为 $10\sim 20\%$ 时），甚至消失（浓度为 $30\sim 40\%$ 时），也就是说混合物由粘塑性体过渡为假塑性体，之后再过渡为牛顿液体。例如，乌金原油与 20% 汽油的混合物在 10°C 时为粘塑性体，它与 30% 汽油的混合物在 20°C 时则为假塑性液体，而其与 40% 汽油和在 30°C 时该混合物为牛顿液体。

往乌金原油中加入烃类稀释剂时，混合物的温度降低，而且稀释剂的粘度和密度越小，温度降低得越多。掺有烃类稀释剂的乌金原油的初始剪切应力，随着稀释剂浓度的增加而减小。在低温下向含蜡原油中加入稀释剂，初始剪切应力的降低特别显著。当稀释剂浓度高于 20% ，温度为 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 时，初剪力降至很小的数值以至完全消失。增大烃类稀释剂浓度和温度时原油初始剪切应力的降低，是由于蜡的溶解、原油液相粘度的降低，以及稀释剂溶解能力随温度的升高而增强所致。极限剪切应力的降低说明，在管道停输后为恢复输送掺有稀释剂的含蜡原油，与输送未稀释原油的情况相比，只需相当小的压力降。因此，与未稀释原油相比，含蜡

原油与稀释剂的混合物在管道中避免凝油的安全停输时间要长得多。但是，处于静止状态的原油与稀释剂混合物的极限剪切应力，由于其触变性的作用，将随时间的延续而恢复。随着稀释剂浓度的增加，极限剪切应力的这种提高将是相当小甚至可能中断，例如对曼盖斯拉克原油当加入30%煤油时便是如此。

乌金原油及其与烃类稀释剂混合物的有效粘度随稀释剂浓度和温度的增加而减小。由研究结果可知，往乌金型的含蜡原油中加入烃类稀释剂，在不太高的温度下最为有效，因在这种条件下凝固点、极限剪切应力和有效粘度降低的幅度要大。比如，在20℃下往乌金原油中加入20%的丙烷，其

有效粘度是原来的 $\frac{2}{15}$ ，25℃时是原来的 $\frac{10}{77}$ ，而35℃时仅为原来的 $\frac{10}{51}$ 。

当以含蜡原油与低粘原油混合输送时，在改善其流变特性的同时，还可以向炼油厂提供具有严格要求的一定物理化学特性的原油混合物。

采用添加剂（流动促进剂） 近年来为含蜡原油研制了若干添加剂，它们能降低原油的凝固点和改善其输送性。这种添加剂称为降凝剂或流动促进剂。它们是具有长链分子和支链分子的聚合物。往含蜡原油中加入0.02~0.15%的添加剂改变了蜡晶的性状和大小，以及晶体间的附着力。以乙烯共聚物为基础的和以带支链的更为复杂的聚合物为基础的添加剂（ESA型添加剂）是最常用的添加剂。多数添加剂的密度为900~940公斤/米³，50℃的粘度为0.3~7.5×10⁻⁴米²/秒，凝固点为27~42℃。添加剂在高于30~50℃的温

度下加入含蜡原油，能与原油很好混合。添加剂种类的选择及其在原油中的百分含量与许多因素有关，对每种原油要通过专门的研究加以确定。

为输送高含蜡的曼盖斯拉克原油、土库曼原油和阿塞拜疆科米(Коми)油田原油，研制出若干流动促进剂。全苏石油集输科学研究院(ВНИИСПТнефти)和莫斯科古勃金石油化学与天然气工业学院(МИНХ и ГП им.И.М.Губкина)在应用添加剂管输高粘原油方面进行着广泛的研究。应用流动促进剂是一种改善含蜡原油和高粘原油流变特性的很有前景的方法，因为它易于输送和停输后可在低于原油凝固点的温度下启动管道，可以消除输油管道、油罐和油船的结蜡，也可以在输送高粘原油时少用或不用烃类稀释剂。

原油在饱和天然气状态下输送 高压下溶于原油的天然气可以降低其粘度。在压力高于蒸汽压时原油仍以单相状态沿管道输送。由于在采出原油中几乎都有一定数量的伴生气，故提高分离压力可在原油中保留一定数量的溶解气。输送饱和天然气原油在许多情况下可以顺利地解决高粘原油或含蜡原油的管输问题，尤其在不能采用加热输送时，对敷设在多年冻土带或者沼泽地区的输油管道特别重要。

原油混水输送(水力输送) 输送高粘原油时，可采用形成低粘贴壁层(例如水包油型油-水乳化液输送)的办法来降低压头损失。印度尼西亚一条直径500毫米长238公里的输油管道自1962年以来就按这种方法运行，沿这条管道输送凝固点为40℃的高含蜡原油与水的混合物。在终点进行原油脱水。水力输送是在水为30%，油为70%的比例条件下进行。美国加利福尼亚州(Калифорния)一条长40公里的油管，就是依靠在途中向管内注水的办法来形成并保持贴壁

水层的。

为了造成更牢固的贴壁水层和形成更稳定的水包油型油-水乳化液，建议往水中加进表面活性剂。根据全苏石油集输科学研究院的资料，对于曼盖斯拉克原油的水力输送来说，以阴离子型的表面活性剂——ПН-1型烃基苯磺酸钠（浓度为0.15~0.20%）最为适合。正在研究ОП-10，ОП-181及其它非离子型表面活性剂和供矿化水用的阳离子型表面活性剂。已经确定，含有表面活性剂的曼盖斯拉克原油的水乳液在温度高于35℃时为牛顿液体。此时原油在乳化液中的浓度及其有效粘度沿管子截面而变化：在管子中心其值最大，而靠近管壁处其值最小。

原油及油品的预加热管输 这是输送高粘原油和重油最常用的方法。多数用以输送高粘原油和油品的输送干线是在加热状态下工作的。距离最长和直径最大的乌金-古里耶夫-古比雪夫（Узень-Гурьев-Куйбышев）输送干线就属于这类输油管。此外，在苏联还成功地运行着一些加热输送高粘原油的大型输油管，像乌金-舍夫钦科（Узень-Щевченко）、别列克-克拉斯诺沃德斯克（Белек-Красноводск）、奥泽克-苏阿特-格罗兹内（Озек-Суат-Грозный）以及其它一些管道。这些管道的输送工艺，是原油在输入干线之前加热到适宜的温度（一般为40~50℃）并依次输送到中间泵站和加热站。原油在加热站重新加热并用泵输送到下一站。泵站间和加热站间的距离根据温降速度和压力降确定。

加热输送管道的运行具有一系列特点，首先与管道和周围介质间的热交换条件的影响以及原油的粘温关系有关。因此，分析和总结加热输送的工作经验很有意义，这可以发现和解决管道设计和管道运行管理机构所面临的最重要的问

题。

加热管道的特征是加热站和个别加热炉的计划性和事故性关闭，其关闭次数在个别月份可达10次以上。下面是加热管道加热站关闭次数在一年中按月的分配：

月份	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
加热管道加热站切换数	18	8	5	28	9	7	14	16	10	14	17	15

关闭加热站或个别加热炉（换热器）会导致原油加热初始温度的急剧变化，因此，随着粘油充满管道，压头损失增加。初始加热温度急剧波动次数最多是在最冷的月份，此时加热站在最大负荷下工作。空气温度的季节波动引起原油温度的明显变化。加热站间管道末端的温度值在一个月中平均变化3~5%。

输送热粘原油的管道特征是关闭泵站和个别机组的情况，这是由于停电、保护系统失灵、原油收发不平衡、停输维修、线路部分故障等引起的。关停泵站时产生的水击破坏了管道的正常运行，使得原油在泵站管汇法兰连接处漏失，在许多情况下会导致管子破裂。此外，泵站停输时则输量减少引起原油温度下降及其粘度上升。由此而引起的压头损失的增值在一定条件下可以超过由于输量减少而使压头下降的数值。

分析表明，加热输送管道的特征是：原油的流量、压力和温度无论是在一年内和一个月当中，还是每个昼夜间都有变化。

所以，除此而外还应考虑到空气温度和土壤热物理特性的季节性变化，严格地讲，非等温管道的工作状态永远在变化着。

下面介绍引起加热管道过渡工作状态的基本原因：

土壤温度年变化；

计划性的、因泵站装备和线路故障引起的、停电、自动保护系统失灵造成的泵机组及泵站停启；

计划性的，因加热炉（换热器）设备故障引起的加热站或个别加热炉（换热器）的停开；

输油管道建成后的投产和长时间停输后的再启动；

输油管道沿途的原油分输点和注入点的开停；

不同性质的原油顺序输送；

由暴雨、雪的速溶、洪水等引起的土壤导热系数的变化。

在许多场合，上述原因的出现会对管道温度状况产生不利影响，当水力摩阻增加时可能使压头损失超出根据泵的装备能力或管子强度确定的最大允许值而造成事故危险。因此，为确保高粘原油加热输送的可靠性和最优化管理，必须有效地解决在运行参数变化的情况下热力和水力状况的预测问题。在这类众多的问题中，应特别注意下列对实践最为重要的问题：

确定非等温油管启动时原油的压力和温度变化，并论证其投运的最优条件；

预测停输后输油管的热力状况并估计出安全停输时间；

评价关停加热站和减少输量对加热输送管道工作条件的影响；

确定关停加热站的安全时间和输油管道输量的下降值；

确定关闭泵站时阀门关闭瞬间的输油管压力，并选择动载保护系统；

研究顺序输送不同特性的加热原油（油品）时管内流

量、压力和温度的变化，以确定输送的最优参数；

土壤温度和热物理特性季节性变化对干线管道输送热原油技术经济指标的影响。

设计时基本工艺和结构参数以及建设方案的选择，首先是以输油管道的稳定工作为出发点。这就有必要进一步完善管道同周围环境稳定热交换的研究方法，以便解决下列迫切的问题：

确定泵和动力设备的功率和型号；

确定原油（油品）在加热站的最优加热温度及热绝缘层厚度；

选择敷设方法；

论证输油管结构方案以及其它。