

高粘高凝原油和成品油管道输送

〔苏〕古宾 B·E· 等著

石油工业出版社

TE832

17

3

高粘高凝原油和成品油 管 路 输 送

〔苏〕古宾 B.E. 等著

陈 祖 泽 译

1.4-106

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是一本专门论述高粘高凝原油和成品油管路输送的新书。书中详细论述了具有非牛顿性质的原油和成品油的流变学特性、流动模型；系统地介绍了管输高粘高凝原油和成品油的各种方法，热输和冷输高粘高凝原油和成品油的热力-水力计算，地下热油管在启动和停输过程中的加热、冷却、顶挤，以及在管路操作中如结蜡、清蜡等实际问题。

本书可作为从事管输原油和成品油的科研人员、工程技术人员和石油院校储运专业师生的参考书。

高粘高凝原油和成品油

管 路 输 送

〔苏〕古宾 B.E. 等著

陈 祖 泽 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开本 13 印张 287 千字 印 1—1,500

1987 年 5 月北京第 1 版 1987 年 5 月北京第 1 次印刷

书号：15037·2729 定价：2.40 元

序 言

苏联在1981~1985年和到1990年期间的经济和社会发展的主要方针中载有如下规定：“加速发展管路输送，特别是成品油、原油和天然气的管路输送。”

近年来在管路输送方面获得了很大的进步。由于原油开采量的增长、以及原油输送量和加工量的增加，管路的直径也进一步增大。目前在燃料平衡中，高含蜡原油所占的比例越来越大，而输送这种原油则要求改善现行的输送工艺、制定新的输送工艺，改进管路的水力计算方法，改进原油输送前的准备工作，以及改善管路本身和泵站的操作。

一般地说，高含蜡原油就是高凝原油。这种原油在进行输送的通常温度下会失去液体通常的性质，在接近凝固点的温度下，在原油中形成的结构使其具有非牛顿液性质，这种性质的外部表现之一是：只有在对原油所施加的剪切应力超过其极限剪切应力、能破坏其结构的情况下，它才开始流动。具有这种异常性质的原油不能应用牛顿定律：“施加于液体的剪切应力与在该应力作用下所产生的剪切速度成正比”，从而使管路的水力计算大大复杂化。

所输原油的这种异常性质也使得管路操作具有某种特殊性，这就要求从事管路输送（无论是从事矿区内原油集输和处理系统、或是从事干线管路系统）的专家掌握非牛顿液体的流动规律，并善于把这些规律应用于实践中。在解决实际问题中如忽视这些规律，就会遇到严重的困难。

在输送高粘原油和成品油的管路的操作方面虽已积累了很多经验，但是有关如下问题的完整而系统的论述还未见于文献：原油在输送前的处理、高粘原油沿管路输送、管路的启动和停输过程、把高粘原油顶挤出管路、以及管路的清蜡等，特别是对输送高粘原油和具有异常性质原油的“热”油管操作问题的论述更是不足，以致给从事原油和成品油管路设计、施工和操作的工程技术人员造成了一定的困难。本书的宗旨就是尽作者所能来填补这一空白。

本书第一至八章、第十一、十二章由古宾 B. E. 所写，第九和第十章由古宾 B. B. 所写。

作者懂得摆在其面前的任务的艰巨性，因此，凡是涉及有关本书内容的批评性意见，作者都表示拜领敬谢。

目 录

序言

第一章	原油的结构-机械特性和流动模型.....	1
§1.1	原油的组成和组分的简要说明	1
§1.2	固态烃的结晶	6
§1.3	凝胶化	9
§1.4	原油和成品油的流动曲线	11
§1.5	牛顿液体的流动	14
§1.6	粘塑性液体的流动	15
§1.7	展塑性液体的流动	17
§1.8	用稠度参数表示的液体流动曲线	17
§1.9	原油的流变参数与温度的关系	20
§1.10	触变性液体的流变学模型.....	22
第二章	液体在渠道和管路初始段中的流动.....	27
§2.1	关于液体在初始段中流动问题的解的简要分析	27
§2.2	液体在渠道和管路初始段中流动问题的解法	31
§2.3	粘滞液体在平坦渠道初始段中的流动	35
§2.4	粘滞液体在圆管初始段中的流动	40
§2.5	粘塑性液体在平坦渠道初始段中的流动	45
§2.6	粘塑性液体在圆管初始段中的流动	50
第三章	输送牛顿液体管路的水力计算.....	59
§3.1	液体稳定流动时的管路水力计算	59
§3.2	自流管路的水力计算	63
§3.3	液体通过短管和喷管的流动	75
§3.4	增加管路输量的方法	88

§3.5	输送原油和成品油的泵的选择.....	91
第四章	输送粘塑性液体管路的水力计算	103
§4.1	布庚格姆方程的近似解法.....	103
§4.2	层流流态的存在区和向紊流流态的过渡.....	114
§4.3	紊流.....	128
§4.4	增加管路输量的方法.....	136
§4.5	自流管路的水力计算.....	145
§4.6	液体通过短管和喷管的流动.....	147
§4.7	输送非线性粘塑性液体管路的水力计算.....	155
§4.8	输送触变性原油管路的水力计算.....	161
第五章	热输管路的热力-水力计算.....	168
§5.1	热力计算.....	168
§5.2	输送粘滞液体时的压头损失计算.....	175
§5.3	输送粘塑性液体时的压头损失计算.....	180
第六章	输送乳化原油的管路水力计算	188
§6.1	乳化原油的流动模型.....	188
§6.2	乳油液在管路中的分层流动.....	196
§6.3	分散相向管路轴线迁移的乳油液流动.....	201
§6.4	输送乳化原油管路的水力计算方法.....	205
§6.5	从层流流态向紊流流态的过渡.....	210
第七章	高粘原油管输前的处理	218
§7.1	原油和成品油的加热.....	221
§7.2	高粘原油与低粘稀释剂混合输送.....	223
§7.3	含蜡原油的热处理.....	227
§7.4	用降凝剂处理原油.....	232
§7.5	高粘原油的热分解处理.....	236
第八章	高粘原油和成品油的水力输送	243
§8.1	能形成近壁水层的高粘原油的输送.....	245
§8.2	高粘原油与表面活性物质水溶液的混合输送.....	264
第九章	热油管的投产	273

§9.1	启动的数学模型和解法概述	273
§9.2	地下热油管当其管壁温度发生突变时的热损失计算	282
§9.3	热油管路在土壤受热过程中的热损失与时间关系的近似算法	286
§9.4	在土壤受热状态下的热损失的试验研究	289
§9.5	在启动管段上原油温度的变化	293
§9.6	管路充装热牛顿液体时的压头损失	298
§9.7	管路充装热粘塑性液体时的压头损失	301
§9.8	管路充装加有降凝剂或稀释剂的粘塑性液体时的压头损失	304
§9.9	管路充装非线性粘塑性液体时的压头损失	308
§9.10	流动方程与能量方程和导热方程的共轭解	312
§9.11	启动过程的控制和对其进行评价的准则	316
第十章	热油管的冷却	319
§10.1	数学模型和最简单的解	319
§10.2	含蜡原油和成品油的传热微分方程	323
§10.3	充满含蜡原油的地下管路的冷却	330
第十一章	从管路中顶挤出原油和成品油	334
§11.1	粘滞(牛顿)液体的顶挤	335
§11.2	粘塑性液体的顶挤	349
第十二章	输油管的结蜡过程及其通过能力	362
§12.1	石蜡在管壁上的沉积过程	362
§12.2	干线输油管中结蜡过程的研究	368
§12.3	结蜡对输油管工况的影响	380
§12.4	管路清蜡	389
§12.5	管路的清蜡装置	398
参考文献		406

第一章 原油的结构-机械特性和流动模型

§1.1 原油的组成和组分的简要说明

原油和成品油的物理性质（密度、饱和蒸汽压、热容、导热性、粘度、在一定条件下形成结构的能力等）在很大程度上与其组成有关，这些性质对管路的输油过程有直接的影响。原油的基本部分是由三种物-化性质互不相同的烃类组成的：石蜡烃、环烷烃和芳香烃。实际上，在原油中总含有相当数量的胶质和沥青质。上述三类烃之间的数量比对不同的原油变化很大，根据这一点，原油可分为石蜡原油、环烷族原油、石蜡-环烷族原油等。

石蜡烃（烷属烃）的分子式为 C_nH_{2n+2} 。根据碳链结构，石蜡烃可分为正石蜡烷和异石蜡烃。

在通常的条件下，从甲烷（ CH_4 ）到丁烷（ C_4H_{10} ）为气体，从戊烷（ C_5H_{12} ）到癸烷（ $C_{10}H_{22}$ ）为液体，从七十烷（ $C_{70}H_{142}$ ）开始为固体晶形物质。

原油中含有气体可降低其粘度，但如果原油中含有太多的气体，其蒸汽压就大大增高，这就要求采取很花钱的措施来防止蒸发损耗。

正液态石蜡属于非极性物质，不易溶解原油中所含的胶质。随着分子量的增加，正石蜡对胶质的溶解能力也随之增加。

与正石蜡相比，异石蜡具有较低的沸点，因而也就具有较高的蒸汽压，但在溶解能力方面接近于正石蜡。

固态石蜡对原油的结构-机械特性和粘度有很大的影响。

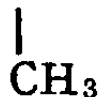
固态纯石蜡为白色结晶物质，不溶解于水，但极易溶于苯。一般说来，原油中所含的石蜡主要是正态结构的单个烃的混合物，夹杂某些异石蜡。单个固态石蜡的熔点处于 $22\sim 85^{\circ}\text{C}$ 的范围内，而对其混合物，则显然定不了这一温度。

分子量相当高的、以高沸点结晶烃占多数（其中包括环烷族烃、芳香烃和异石蜡烃）的固体烃类混合物称为纯地蜡，它的熔点为 $65\sim 90^{\circ}\text{C}$ 。

固态石蜡和纯地蜡易溶于原油，形成真分子溶液。石蜡在原油中的溶解度随石蜡熔点的降低而增加。

正石蜡分子具有拉长的形状，碳原子成曲折形（“之”字形）排列（图1.1），亚甲基碳键 CH_2-CH_2 之间的四面体角为 $109^{\circ}28'$ ，碳原子之间的距离为 $1.54\text{\AA}$ ，它们之间的轴间距为 $1.27\text{\AA}$ 。氢原子与碳原子键合的长度为 $1.1\text{\AA}$ 。分子断面呈椭圆形，面积 $18.5\text{\AA}^2$ ，分子链总长—— $1.27n$ 。正石蜡分子模型表示在图1.2上。

异石蜡分子的特点是原子具有多分子链。从下面的丁烷的结构式可看出正、异石蜡分子结构的差别：正丁烷的结构式为 $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ ，而异丁烷的结构式为



环烷烃的结构式为 C_nH_{2n} ， $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$ 等。环烷烃的分子为一种带有脂肪族（亚甲基）链的封闭环。绝大多数原油中的环烷烃主要是环戊烷和环己烷结构。环烷烃是介于石蜡烃和芳香烃之间的中间一级烃类。环烷烃和石蜡烃的碳原子数虽然相同，但环烷烃的密度比石蜡烃高，而蒸汽压比石蜡烃低。环烷烃及其烷基衍生物的溶解能力比石蜡高得多。

芳香烃 (C_nH_{2n-6} , C_nH_{2n-12} 等) 在其结构基体中含有扁平的苯核心。这一类烃的特点是密度较大、沸点较高 (苯不在其内, 苯的沸点为 80°C)。芳香烃及其烷基衍生物的溶解能力比石蜡烃和环烷烃高得多。

原油中的沥青质和胶质是特殊的一类物质。

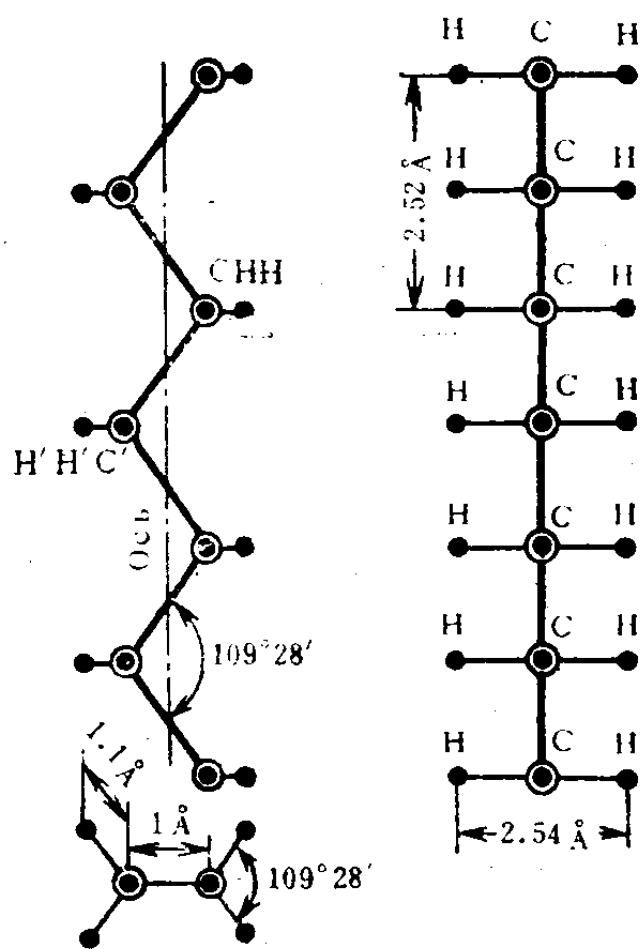


图1.1 石蜡的一段分子链的基本元素和尺寸
C—碳原子; H—氢原子

胶质是一种高极性和表面活性物质,它的分子量为500~1200和1200以上。石油胶质的稠度随着分子量的增加而要发生很大的变化(从有延性的粘性物质到固态物质)。在胶质中主要含有含氧化合物、硫化物、以及通常还含有含氮化合物。

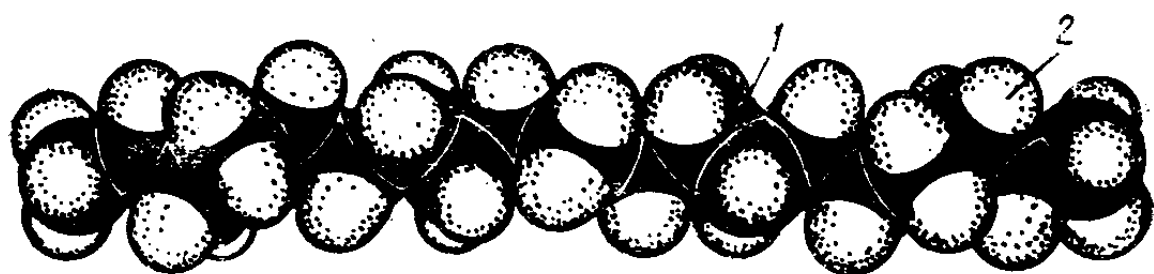


图1.2 正石蜡分子的体积模型

1—碳原子; 2—氢原子

沥青质——原油中分子量最高的组分。按结构,沥青质接近于石油胶质,但其分子量为胶质的2~3倍。沥青质是一种暗色的非晶形固态物质,它具有在溶剂中先发生膨胀、然后再转变为溶液的性质。沥青质在胶质-烃类系统中的溶解度随轻质烃浓度的减少和芳香烃浓度的增加而提高。

由于胶质和沥青质分子量的变化范围很大,因此造成了它们的溶解度的差别。中性的石油胶质易溶于原油中的轻馏分和滑油馏分,形成真溶液。沥青质不溶解于低沸点的甲烷烃,但易分散于苯中,形成胶体溶液。

在表1.1中列出了某些原油的特性。

表1.1 高粘度和高凝固点原油的特性

原 油	密度 ρ_4^{20}	运 动 粘 度 10 ³ ·米 ² /秒			凝固点 °C		蜡熔 点°C	含 量 , %				留 分 量 (至下列温度, °C)		
		ν_{20}	ν_{30}	ν_{50}	°C	石蜡		硫 树	酸 脂	硅 脂	胶 脂	沥青质	200	350
卡梅希尔真斯克(土库曼尼亚)	—	—	—	39.93	32	—	16.00	48.0	15.3	5.50	5.4	29.8		
乌津斯克(哈萨克斯坦)	0.859	—	—	21.70	32	62	21.00	—	15.3	1.11	11.5	33.4		
热蒂巴伊(哈萨克斯坦)	0.849	—	—	15.51	31	60	23.40	—	19.4	1.70	16.4	41.2		
奥卡列姆(土库曼尼亚)	0.874	—	—	13.67	30	53	12.40	31.2	13.1	1.75	13.7	38.0		
卡斯皮(阿斯特拉罕地区)	0.811	—	—	5.24	30	57	26.00	—	3.6	2.50	24.8	52.3		
维利恰耶夫(斯塔夫罗波尔边区)	0.823	—	6.37	3.54	23	56	23.10	—	4.6	1.10	25.5	55.2		
斯捷帕诺夫(萨拉托夫地区)	0.859	—	—	7.45	21	53	9.56	—	5.7	0.49	10.7	39.2		
科图尔捷平(土库曼尼亚)	0.859	—	22.20	6.67	20	55	9.00	9.4	8.8	0.90	17.5	49.2		
奥泽克苏阿茨克(斯塔夫罗波尔边区)	0.823	—	6.28	3.75	20	52	17.50	—	2.1	0.38	24.2	58.1		
齐姆尼亚斯塔夫卡(斯塔夫罗波尔边区)	0.822	—	7.20	3.24	20	51	15.90	—	3.0	0.84	28.2	55.6		
坚古京斯克(阿斯特拉罕地区)	0.816	—	—	2.55	18	57	16.20	—	3.9	1.10	32.5	63.7		
库姆达克(土库曼尼亚)	0.838	38.80	8.41	4.96	14	51	10.80	—	7.1	0.99	22.1	56.2		
奥斯塔什科维奇(白俄罗斯)	0.870	58.19	—	11.39	13	53	6.70	—	14.0	1.93	19.4	40.2		
维尚斯克(白俄罗斯)	0.865	94.22	—	16.46	12	52	8.19	—	15.0	3.43	20.2	42.9		
涅比特达格(土库曼尼亚)	0.862	39.30	—	8.84	8	55	6.50	—	—	0.81	18.0	46.2		
格鲁别绍尔(科米自治共和国)	0.817	—	—	—	8	65	8.65	—	5.8	0.31	—	14.8		
艾亚翁斯克(西西伯利亚)	0.958	—	—	616.20	—11	49	0.80	>60.0	26.9	6.9	—	30.2		
鲁斯卡亚(西西伯利亚)	0.932	—	203.70	63.13	—25	50	0.50	20.0	9.0	1.0	2.2	—		

§1.2 固态烃的结晶

原油中的沥青质处于胶-溶状态，而胶质和固态烃（不仅是石蜡烃、而且还包括某些环烷烃、甚至芳香烃）则只有在足够高的温度下才形成真溶液，但应当指出，这些烃类分子的大小与胶体质点的大小是完全可以相比较的。胶质分子的尺寸可能还要大一些，这样的分子在溶液中的性状象固态胶体质点一样。

当原油温度低于饱和温度时，系统的聚集稳定性就开始下降，从而导致从溶液中析出固态烃，并形成晶体，这种结晶的能力在很大程度上取决于分子的结构、大小、形状和迁移率。

在溶液中的蜡分子的线状结构在热运动的作用下会发生变形，形成所谓的回转同分异构体。在亚甲基链中相对于其在碳原子之间任何单个键的回转都会使碳原子所在点的链发生弯曲，由于这种变形，使得扁平的一维分子可能转变成一维、二维、甚至三维同分异构体。

提高温度可促使形成回转同分异构体；反之，降低温度会导致回转同分异构体的“超转”，反向转变成具有最小势能的、拉长了的反式异构体形状。X射线检查和光谱测定表明，只有反式异构体形状分子才是形成晶体的物质。

形成晶体时，原先在液体中相互平行的分子，其位置要发生某种变动。分子的排列，即它们在晶体中的空间位置要遵循如下原则：当一个分子的凸部填入另一个分子的凹处时，整个系统的势能应具有最小值。

在结晶过程中，可观察到固态石蜡的两种同素异形体（变体）。第一种同素异形体存在于从结晶温度或低于结晶

温度到称之为转变到第二种变体的过渡温度的温度范围内。第二种同素异形体在低于过渡温度的条件下是稳定的。第一种石蜡变体的特性是：具有塑性，当受到压缩时，能使单独的质点连结成一体；第二种石蜡变体的特性是：具有硬度、脆性，受压时不能把单独的质点连结成一体。

已查明，当石蜡的一种变体转变成另一种变体时，其物理性质（密度·热容等）要发生突变。熔点和过渡温度之差为 $3\sim 12^{\circ}\text{C}$ 。石蜡结晶时，第一种变体的晶体呈长纤维状，第二种变体的晶体呈延伸的薄片状，在未变形的情况下，这些薄片具有菱面体的外形，有时具有长椭圆六面体的外形。

影响石蜡晶体尺寸的因素既有石蜡本身的性质，也有结晶的条件，其中包括分散介质的粘度、冷却速度等。随着石蜡分子量的增加，晶体的尺寸就随之减小，这是因为分子的迁移率减小的缘故。分子除与原先已形成的结晶中心作用外，又与新形成的结晶中心交互作用，于是物质就分布在大量尺寸较小的结晶中心中间。对晶体尺寸发生类似影响的有分散介质的粘度，粘度越大，晶体的尺寸越小。冷却速度的增加也会导致晶体尺寸的缩小。

一般说来，晶体数目与尺寸有如下关系：在给定条件下形成结晶中心越多，形成晶体也越多，但晶体的尺寸越小。应当考虑到，在结晶过程中，溶解的石蜡浓度下降既可以是由形成了新的晶核，也可以是由于在已形成的晶体表面沉积了固态石蜡。在较小的溶液冷却速度下，石蜡的溶解度缓慢下降。当从溶液中析出固相的速度足够快时，溶液的过饱和度下降到零，并且不再形成新的晶核。固相只析出在已形成的晶体表面上，因此晶体数目不增加。

在较大的冷却速度下，石蜡的溶解度下降很快，而溶液

中的石蜡浓度却相对地下降得比较慢。结晶是在较高的溶液过饱和度下开始的,形成大量新的晶核,最终以形成许多小晶体而结束结晶过程。

值得指出的是,在冷却终止、并使溶液在恒温下保持一段时间以后,会发生一种缓慢的改组过程——再结晶过程。引起再结晶的原因是由于石蜡晶体的溶解度与晶体的尺寸有关:对小晶体而言,溶液是未饱和的,而对大晶体而言,溶液是过饱和的,因此在溶液的储存过程中,大晶体随小晶体的溶解和消失而增长。

晶体结构的规则性不仅与物质的化学性质有关,而且还与烃链的长度、是否有其它物质的杂质存在等有关。

由于原油含有大量的固态烃,因此难以预料在原油冷却时会不会形成没有缺陷、均匀分布在油体中的晶格。事实上,对形成晶体有重要意义的是分子的长度、形状和迁移率。分子的长度越小,以及其在物质转变为固态时刻的迁移率越大,则分子的相互定位、并排列成晶体的过程也发生得越快。在烃链很长的情况下,分子无能力进行定位,只能在杂乱状态下凝结,这样就形成一种独特的、既有晶状结构、又有非晶状结构的错综混杂组织。

在原油中存在具有碳链边侧支链的同分异构体石蜡也会使晶格产生缺陷,因为这类石蜡的迁移率比正石蜡的迁移率小得多,而边侧支链又阻碍形成规则的结构。

原油中的胶质和沥青质在极大多数情况下对石蜡形成晶体结构的能力也要发生影响,它们会使晶体的形状发生改变。沥青质和胶质对石蜡结晶过程的影响表现在:这些物质很容易被吸附在晶体表面上,从而阻止晶体的生长。如新的结构物质不均匀地进入晶体表面不同的点,则其中可能会发

生这样的情况：当介质冷却很快或粘度很大时，所形成的晶体具有“发育不全”的形状——枝状、球状或枝-球混合状。

枝状结晶是在下列情况下发生的：在由于胶质的闭塞作用而使新的结晶中心的形成受到阻止的条件下，早先产生的晶体的棱线和顶点（闭塞作用最小的地方）就起结晶中心的作用，新的晶体就在这些地方开始生长，直到新晶体的表面重又发生闭塞为止。新形成的晶体的棱线和顶点随后又成为结晶中心。

看来，增加表面活性物质的浓度时，在结晶过程中将形成球状结晶——成径向辐射结构的二维或三维聚集体。球状晶体的形成是由于在最初的晶核周围均匀地长出结晶纤维（纤丝）的结果。纤丝呈片状。

原油中固相浓度的进一步增加将伴随着枝状和球状晶体的增长，并在这两类晶体之间产生结晶键、形成连续的结晶网络，后者具有一定的强度，能把全部液相固定在这一网络的晶胞中。

§1.3 凝胶化

原油在通常的条件下是一种胶体溶液，在这种溶液中沥青质是分散相，而液态烃和胶质是分散介质。

胶体系统的特性就是它的不稳定性。当温度降低时，胶体系统的聚集稳定性也随之下降，这会导致形成所谓的凝聚结构，其强度比结晶结构小。

当固态石蜡的浓度足够高时，在原油中就可能生成结晶结构，并形成如上所述的连续的结晶网络。如果原油中石蜡含量不高，则在结晶过程中形成的一些晶体也会跟沥青质质点一样成为分散相。