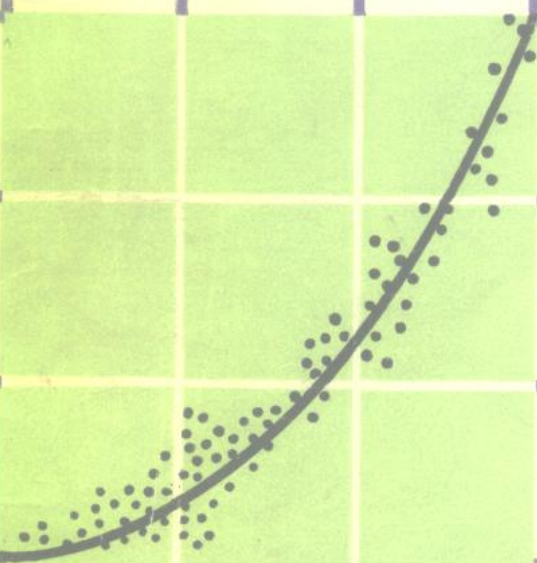


异常石油

〔苏〕B·B 杰夫里卡茨夫

S·A·哈 儿 布 特

M·B·卡 儿 洛 夫 著



石油工业出版社

10578

异常石油

〔苏〕B. B.杰夫里卡莫夫 3.A.哈比布林

M.M.卡比洛夫 著

王传禹 译 赵子亨 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书阐述了异常的地层石油和脱气石油在毛细管和多孔介质中渗流特点的有关实验和理论研究结果。对异常石油中影响结构形成的因素和结构形成的原因作了某些探讨。论述了石油的触变性质和水驱异常石油的特点。提出了异常石油油田开发设计和分析的一些建议。并指出减少异常石油的结构力学性质对石油渗流影响的可能途径。

本书可供从事油田开发设计、分析和采油工程的科研人员和工程技术人员使用。也可供石油院校的师生参考。

В.В. Девликамов, З.А. Хабибуллин,

М.М. Кабиров

АНОМАЛЬНЫЕ НЕФТИ

МОСКВА 《НЕДРА》 1975

异 常 石 油

〔苏〕В.В.杰夫里卡莫夫 З.А.哈比

М.М.卡比洛夫 著

王传禹 译 赵子亨 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 5¹/₈ 印张 129千字 印1—4,600

1983年2月 北京第1版 1983年2月 北京第1次

书号,15037·2393 定价,0.66元

目 录

序言

第一章 石油的结构形式	3
1.1 关于粘度异常石油组分认识	3
1.2 高分子石蜡	4
1.3 石油的胶质和沥青质	8
1.4 石油烃对沥青质状态的影响	11
第二章 研究结构性地层石油流变性的仪器和方法	16
2.1 对测量仪器的一般要求	16
2.2 研究地层石油结构力学性质的装置	18
2.3 液体流变参数误差的估计	26
第三章 地层石油的流变性质	31
3.1 所研究石油的物理-化学性质和气体组分.....	31
3.2 稠度曲线	36
3.3 影响结构性地层石油动极限剪切应力的 因素	39
第四章 结构性地层石油的粘度异常	55
4.1 石油粘度异常的研究	55
4.2 计算异常石油粘度的经验公式	57
4.3 决定石油粘度异常的因素	61
第五章 异常石油的渗流特性	68
5.1 异常石油在多孔介质中渗流的研究现状	68
5.2 含沥青质石油在多孔介质内的渗流特性	72
5.3 异常石油的渗流模型	76
5.4 边界压力梯度	81
5.5 形成结构的石油组分对动剪切压力梯度的	

影响	84
5.6 石油的温度对边界压力梯度的影响	88
5.7 石油的动剪切压力梯度与岩石储油性质的 关系	93
5.8 石油结构极限破坏的压力梯度的计算	98
第六章 地层石油的触变性	99
6.1 胶凝结构的触变性	99
6.2 石油渗流的滞后现象	99
6.3 渗流中断对石油性质的影响	103
第七章 异常石油油田的开发特点	108
7.1 油藏范围内石油和天然气的成分和性质的 变化	108
7.2 石油的异常性质对油-水接触面运动的影响	119
7.3 采液速度对油藏某些开发指标的影响	124
7.4 确定呈现石油异常性质区域的位置和 大小	131
第八章 降低石油的粘度异常对渗流影响的一些措施	139
8.1 提高油藏的压力梯度	139
8.2 石油在地层中部分脱气	147
8.3 利用表面活性剂	149
8.4 热力作用	150

序 言

油藏开发的采收率及油井工艺技术工作在很大程度上与石油的组分和性质，其中包括石油中的高分子组分——胶质、沥青质、石蜡有关。苏联学者在三十年代至四十年代就已确认，在含油岩石的孔隙表面有一层异常粘性的溶剂化吸附层，对石油的渗流及渗流的完善程度有明显的影响。

含蜡的大油田由于采用边外和边内注水开发，石油中的溶解气受冷并从石油中逸出，引起多孔介质中和油井中石油性质的变化。研究表明，当石油冷却到低于蜡饱和温度时，就形成空间结构，因而，石油具有了结构力学性质。此类石油的粘度是随剪切应力变化的。粘度异常在剪切速度低时特别明显。这类石油称异常石油，即是在低速流动时破坏了牛顿定律。

六十年代初苏联和其它国家的研究人员就注意到含沥青质石油在管道内运动时的粘度异常。用溶剂化吸附层的性质解释这种异常已不可能，因为吸附层的厚度与试验管子的直径相比小得可以忽略不计。这类石油粘度异常的原因只能是沥青质微粒形成了网状的体积结构。这点已被研究所证实。

假如含沥青质石油的粘度异常在管道内运动时已能察觉，那么，显而易见，粘度异常对多孔介质内渗流的影响要强烈得多。石油在多孔介质内的渗流实验表明，在低渗流速度条件下石油的流度、粘度均与压力梯度有关。已研究过沥青质含量对石油粘度和渗流的影响。研究过压力、温度、溶解气和胶质的含量，岩石的渗透率对石油流变特性的影响。

由于石油粘度异常破坏了牛顿定律和达西渗流定律，因而油层采收率较低。巴库研究人员所做的大量油田开发分析表明，异常石油油藏的采收率比在渗流条件下未呈现粘度异常的油藏的采收率要低得多。

苏联含沥青质石油的储量很大。为了充分地利用这部分储量，在进行油田开发设计时，必须考虑石油的异常性质。这一点在多数情况下，根据对高含胶质石油流变性的研究资料是能够实现的。

近年来有关含沥青质石油的资料已在有关的杂志、论文集及各种专业会议的报告中发表过。但是，并非所有的专家们都能找到这些出版物。为此，本书作者对这些出版物进行了系统的综合整理。使其更通俗易懂。

为了便于计算，本书中除采用国际计量单位制外，还使用了其它单位制，因为在油气开采工业和实验室中广泛应用的仪表均采用这种单位制。

表1列出了本书使用的计量单位与国际计量单位的换算系数。

表 1 本书所用计量单位与国际计量单位的换算系数

所测物理量	本书所用计量单位		国际计量单位		换算系数
长 度	МК	微米	М	米	10^{-6}
	А·	埃	М	米	10^{-10}
力	ДИН	达因	Н	牛顿	10^{-5}
	КГС	公斤力	Н	牛顿	9.806
剪切应力	ДИН/см ²	达因/厘米 ²	Н/М ²	牛顿/米 ²	10^{-1}
压 力	КГС/см ²	公斤力/厘米 ²	Па	巴	10^{-5}
体 积 流 量	см ³ /С	厘米 ³ /秒	м ³ /С	米 ³ /秒	10^{-6}
密 度	Г/см ³	克/厘米 ³	КГ/см ³	公斤/厘米 ³	10^{-3}
粘 度	сП	厘泊	мПа·с	毫巴·秒	1
渗流速度	см/С	厘米/秒	М/С	米/秒	10^{-2}
渗 透 率	Д	达西	М ²	米 ²	10^{-12}

第一章 石油的结构形成

1.1 关于粘度异常石油组成的认识

石油是由不同成分和性质的组分构成的复杂体系。当脱气时从地层石油中分离出气体成分——气态烃、氮气、二氧化碳气。在通常条件下利用专门的方法能够从石油中分离出固体性物质。它们属于高分子的烃类和沥青质。这些物质在石油中处于高度分散的状态，因此它并不沉淀。从井内采出来的石油主要是液态物质。主要是不同类的、分子量各异的碳氢化合物。

石油的组分决定于它的性质。石油的粘度取决于石油中气体、液体和固体物质的含量，以及固体物质的分散程度。根据这些组分的分散程度石油属于胶体体系。固体组分构成这个体系的分散相，而分散介质是液态烃和溶解于其中的天然气。当石油中固体分散相的浓度很大时，石油具有明显的胶体溶液性质。这种石油呈现异常粘度：粘度与剪切应力有关，而且随着流动速度的改变，粘度的变化范围很大。众所周知，类似的粘度异常是因固体质点或高分子物质在液体中形成结构引起的。近年来发现了许多油田的石油粘度异常。

石油的液态组分通常是甲烷族、环烷族和芳香族的碳氢化合物。根据某种主要碳氢化合物含量来确定石油的族分类型，可把石油划分成烷烃族，环烷族，芳香族三种类型。——已经知道的还有烷烃-环烷族，环烷-芳香族等其它中间类型的石油。

石油中溶解的天然气通常主要是由甲烷和乙烷组成，丙烷、丁烷、戊烷、异丁烷、异戊烷含量很少。在许多石油中（例如，巴什基里亚和鞑靼地区的油田）溶解有大量氮气。这些油田的伴生气中含氮量可达50%的体积。有时，在伴生气里还有少量的二氧

化碳。单位地层石油中溶解的天然气可从几立方米到几百立方米（见表46和47）。

由于石油中溶解的天然气降低了石油的粘度和密度，因而石油的压缩系数增大。此外，溶解气与悬浮在石油中的固相物质能相互作用，所以也就影响到石油的异常性质。

石油的固相组分和数量决定着它的许多物理-化学性质。因此下面对这些物质进行比较详细的研究。

1.2 高分子石蜡

石油中含有的碳氢化合物的分子量变化范围很大，从16（甲烷）到500以上。由于碳氢化合物分子量和分子结构的变化，其熔化和沸腾温度的变化范围也较大。

甲烷族的高分子碳氢化合物的混合物，当其分子中含有16个碳原子以上时，通常叫石蜡。从石油中分离出的石蜡是白色的物质，其密度从0.85到0.95，平均分子量为400~430。根据蜡的组成，蜡的熔化温度从40~100℃，但通常都接近于50℃。

石油的含蜡量不同。在所谓不含蜡的石油里仅含有微量的石蜡。而某些油田，例如乌津油田，油中的含蜡量高达30%。

表2所列苏联几个油田的含蜡量资料。

石蜡能溶解在液态碳氢化合物中，其溶解度与温度有关。当温度降低时，石蜡在轻质甲烷烃中的溶解度急剧下降。在苯、氯仿、二硫化碳中溶解蜡稍多一些。石蜡中含有少量高分子不饱和烃。石蜡的化学性质很不活泼，甚至很活泼的氧化剂，如硫酸、硝酸，在低温下对它也不起反应。

蜡在石油中的状态与温度、溶解气的含量和成分、压力等条件有关。

高分子量石蜡烃聚合的不稳定性可以用其分子的特殊结构来解释：它具有链式锯齿形式〔3〕。图1表示此类烃分子结构图，并标示出相邻的碳原子之间的距离和 CH_2-CH_2 的碳链之间夹

表 2

石油中石蜡、沥青质和胶质的含量

石 油	含 量 (重量百分比)					
	石 蜡		硅 胶 质		沥 青 质	
	变化范围	平均含量 ^①	变化范围	平均含量	变化范围	平均含量
巴什基里亚·····	2.1—6.8	3.71	9.6—26.8	17.32	1.2—9.5	5.18
鞑靼·····	3.3—5.1	4.12	5.1—15.1	11.19	1.8—7.4	4.22
古比雪夫州·····	2.9—10.2	5.74	2.3—32.8	8.61	0.1—18.0	2.52
伏尔加格勒州·····	0.8—8.5	4.26	2.0—13.0	6.47	0.0—1.8	0.71
别尔姆州·····	2.0—10.4	4.61	2.9—29.1	13.50	0.0—8.9	2.90
奥伦堡州·····	1.9—7.1	4.47	2.9—24.8	13.32	0.2—24.0	3.63
乌德穆尔特·····	2.7—7.0	4.69	11.7—30.2	19.40	2.1—16.9	6.88
阿斯特腊汉州·····	3.8—26.0	14.77	2.8—10.4	5.88	0.1—2.5	1.22
科米·····	1.4—7.9	4.03	5.0—29.4	4.62	0.1—3.7	1.56
萨拉托夫州·····	6.6—10.4	8.78	4.4—7.5	9.50	0.2—0.6	0.47
西伯利亚						
沙伊姆油气区·····	0.2—7.8	4.57	0.4—10.9	5.72	0.3—4.5	1.22
下瓦尔托夫油气区	1.7—4.4	2.66	0.7—11.5	7.19	0.3—4.2	1.53
哈萨克 (乌津油田)	15.7—18.6	18.10	0.3—3.3	1.59	12.8—15.8	14.4

① 按油藏数目的算术平均值

角 α 的大小。三个 CH_2 基团构成一个链节。链节中边缘碳原子之间的距离等于 $2.54\text{\AA}$ 。因此,分子链两端的碳原子之间的距离 λ 与相邻碳原子之间的距离在分子轴上投影的大小和分子中碳原子的数目 n 有关:

$$\lambda = 1.27n\text{\AA}$$

分子的全长

$$L = \lambda + \lambda_1 + \lambda_2$$

式中 λ_1 和 λ_2 为末端基团的作用半径。在这种情况下, CH_3 是末端基团,其 λ_1 和 λ_2 接近于 $1\text{\AA}$ 。因此,大于十七个碳原子的石

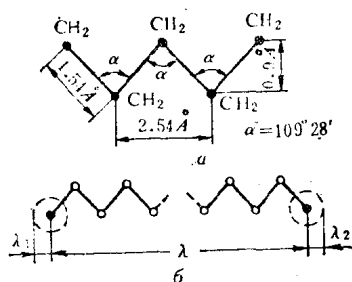


图 1 次甲基链结构〔3〕

a—次甲基链的详细结构;
b—分子长度的确定

蜡烃分子长度则以几十个埃计。

若碳氢化合物的分子中相邻碳原子间的距离和键角保持不变，这种状态下分子的势能最小。

石油中的碳氢化合物分子处于热运动中。同时分子的各部分也处于运动状态：它的链节相对于相邻的链旋转（图2）。

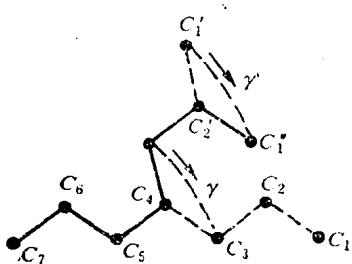


图2 庚烷的反式同分异构物结构

由于分子链节的热运动形成了所谓转动的同分异构物。它可能是平面的，也可能是空间的。显然，在链节旋转运动的情况下，更可能存在着空间转动同分异构物。由于大分子中链节数目多和它们相对于其

它链的旋转运动，转动的同分异构物可能类似于一团乱线。

在链节转动时，氢原子之间的距离要发生某些变化，这是由于发生了斥力和能量消耗的结果。其能量消耗等于转动的分子所感受到的制动能量。

分子的热运动取决于转动同分异构物的生成。而内部分子的制动作用妨碍它的形成。在高温条件下主要形成较复杂的同分异构物，其形状接近于一团乱线。随着温度的降低，蜡分子具有与最小势能相对应的拉长形式。

显然，当温度降低时，形成蜡的结晶要先于它的分子伸长。这种情况就造成了分子之间相互作用的加剧。分子的排列变得更加整齐，其体系的能量相应也最小。并出现由若干个分子组成的很长的大分子。它们之间依靠“范德华”力联系〔3〕。在液态系统中出现相互作用的长分子，同时又形成空间结构。热运动能破坏空间结构，但它又可立即恢复。降低温度其结构将变得更加稳定。在热运动下，分散相质点遭到破坏或触变性恢复的结构称为凝聚结构或触变可逆结构。在足够高的温度下，所研究的

分散体系中实际上没有形成结构，该体系的性质像牛顿液体、真粘度液体一样。在温度降低时，这种液态体系变成结构溶液〔69〕。

由于转动同分异构物的“拆开”，蜡分子长度的增加，它的排列更加整齐，当其尚为液态时液态体系的体积应随之缩小。这个过程的继续发展，导致形成固相——蜡结晶。值得注意的是，用目视法、光学法、体积法确定石油的蜡饱和温度得到了不同的结果。利用体积法确定的蜡饱和温度比用目视法和光学法确定的蜡饱和温度要高〔96〕。显然，体积法可以确定石油中蜡分子开始形成结构的温度。

在1956年，M. A. 盖依曼和P. A. 弗里特曼发表了罗马什金油田含蜡石油在低于蜡饱和温度下渗流的研究结果。作者证实，在低温下石油本身变成了结构性液体。A. X. 米尔扎任扎杰等人也进行了含蜡石油渗流及模型的研究。所得含蜡石油在毛细管和多孔介质中的流动曲线具有突出的特点：延长曲线它不通过座标原点，而与压力差座标相交，其截距的大小与石油在毛细管中的运动条件有关〔11、109〕。

作者们指出，曲线的这种特性是由石油的粘塑性质决定的。在压力差座标轴上的截距，相当于初始压力差或剪切压力，在该压力下液体开始在毛细管中运动。此类石油具有异常粘度的特点。随着温度的升高，剪切压力和异常粘度降低，这是因为热运动减弱了石蜡烃分子之间联系的缘故。

曾研究了溶解在含蜡石油中的天然气对剪切压力的影响〔6、83〕。溶解的天然气是由甲烷、乙烷、丙烷，即低分子的烷烃组成。研究表明，当石油中溶解有天然气时，石油中的蜡分子变得不很坚固。还研究了石油气体的各个组分对蜡开始结晶温度的影响。已经确定，丁烷和更重的碳氢化合物，是石油中蜡的最好溶剂，它明显的降低蜡的结晶温度。甲烷、乙烷和丙烷对蜡开始结晶的温度影响不大。

A. A. 阿巴索夫等人研究了压力对于蜡在石油中形成结构的影响〔11〕。作者指出,体系的压力实际上对剪切压力的大小没有影响。根据该文献中的图表判断,作者是在压力的96公斤力/厘米²的条件下研究的。

含蜡原油渗流的研究表明〔14、68、89等〕,当温度低于蜡饱和温度时,出现粘度异常并破坏了达西渗流定律。在比较高的温度下,蜡在石油中没有形成结构,石油在多孔介质中流动或在毛细管中流动如同牛顿流体一样。

1.3 石油的胶质和沥青质

胶质的组成中含有多种元素,主要是碳、氢、氧、硫、氮。石油中分离出来的胶质具有软膏状的稠度,暗棕色。胶质的密度大约为1克/厘米³。红外吸收光谱和胶质的分子表面性质的研究〔129〕表明,它的分子是由凝聚的环状体系组成。该体系是由芳香族、环烷族的不同的有机物的环构成的。凝聚的环状体系被脂肪族的烃桥联系起来。胶质的分子量可达1200。胶质能很好地溶解于石蜡烃的液体——戊烷以上及环烷族、芳香族的烃中。随着石蜡族烃分子量的降低,其溶解胶质的能力也降低〔44, 106〕。石油中胶质的含量可达30%。例如巴什基里亚油田的石油含有5~25%的胶质。

沥青质的化学组分接近于胶质,其区别是分子量更高。大家知道,在活性吸附剂中,以及在加热或光的作用下,一部分胶质转化为沥青质〔106〕。许多研究人员认为,沥青质是胶质浓集的产物。

沥青质在烃中的溶解性能比胶质小,它溶解于芳香族烃中,而不溶于石蜡族烃中。测定沥青质分子量的结果很分散,这是由于沥青质分子具有缔合的趋势所致。使用冻点测定法,并利用沥青质在其中缔合最小的溶液找出沥青质的分子量达10000〔106〕。当达到很高的分离要素时,离心机可从石油中分出部分沥青质。

美国一些油田的石油，在分离要素达80000g（重力加速度）或更高的情况下，离心试验可形成沉淀，其沉淀的基本部分是沥青质。在重力场中沥青质沉淀物的微粒从40到100埃〔130〕。

借助 33000 倍电子显微镜观察能获得 2 微米的石油沥青质聚集体照片。沥青质聚集体具有粒状结构。这证明，聚集体是较小的沥青质微粒缔合的结果。微小颗粒的形状是不规则的。最小微粒的尺寸是200~300埃〔132〕。当显微镜倍数增至10万倍时，所拍聚集体约0.8微米，是由50~100埃的微粒组成〔128〕。应注意的是，在电子显微镜下研究沥青质时，沥青要经过专门处理，故会影响聚集体的状态。

在足够强的电场条件下，石油中的沥青质呈现电泳移动。在梯度 1200 伏/厘米的条件下，在充电的正电极上发生沥青质的堆积，直至负电极完全干净为止〔128〕。显然，沉积在正电极上的沥青质微粒带负电荷。发生电泳所必需的电场梯度很高，说明沥青质微粒的电荷很小。可能该因素对分散在石油中的沥青质分子的性质和稳定性起第二位的作用。

所列举的因素表明，石油中的沥青质具有很高的分散程度。

美国人做过一些石油沥青质的X射线结构分析〔131〕。得出的沥青质分子结构如图3所示。从图中可以看出，沥青质分子内拥有一个覆盖另一个之上的凝聚的芳香环。环的尺寸

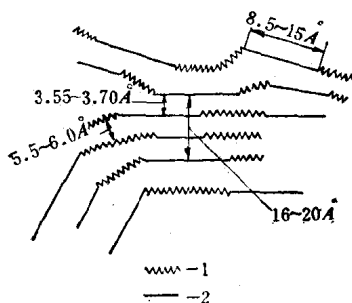


图3 沥青质分子结构图

- 1—饱和烃或环烷烃的小链；
- 2—凝聚的芳香族环

8.5~15埃。环的平面之间的距离从3.55到 3.70 埃。环与环之间被饱和烃或环烷烃结构的小链联系起来。脂肪族或环烷族之间的距离5.5~6.0埃。这些基团本身连结成芳香环。大约五个这样

的彼此联系的环形成一个厚度16~20埃的束。芳香环依靠极性力结合。在强极性分子的溶液中，譬如在胶质中、在芳香族烃中它们可使沥青质的芳香凝聚环与胶质之间的吸引力增加〔100〕。最后将其胶溶。反之，在弱极性的溶液中、譬如在石蜡族烃中，沥青质将缔合。由于缔合使极性芳香环的吸引力增加。因此，

沥青质的分散程度与周围介质的性质关系极大。

胶质和芳香族烃比石蜡族烃的极性強被组成沥青质微粒的分子团所吸附，围绕沥青质微粒形成一个溶剂化层。普菲依菲尔提出了一个描绘沥青质胶粒的结构图〔129〕（图4）。沥青质微粒组成一个胶粒核。吸附在核表面的中性的胶质使胶粒变得稳定。核是由分子量最大和结构上最接近芳香族的物质构成的。核的周围分布着

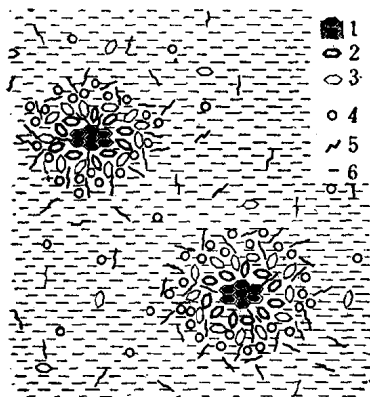


图4 普菲依菲尔的沥青质胶粒的结构图〔129〕

- 1—胶粒核心部分；2—高分子量芳香族化合物；3—低分子量芳香族化合物；4—混合型芳香-环烷族化合物；5—混合型环烷-芳香族化合物；6—脂肪族烃分子

分子量小的芳构化较差的物质。发生逐步向石油脂肪族成分过渡。胶粒与周围介质之间没有明显的界线。胶粒周围的溶剂化膜是稳定的基本因素。这一点已被沥青质在芳香族烃中自发的分散能力所证明。正如已经指出的那样，胶粒的电荷不大，对稳定所起的作用不大。因此，石油中的沥青质构成了所谓亲液胶体体系。在石蜡族烃中，在大大过剩的条件下发生芳香烃组分从胶粒表面解吸作用，稳定作用降低，并发生沥青质的胶凝和沉淀。

沥青质的性质和沥青质胶粒结构以及各种烃对沥青质的影响的研究都是用脱气石油进行的。在地层条件下，石油中含有大量的溶解气，它可能影响地层石油中沥青质的状态和性质。

1.4 石油烃对沥青质状态的影响

为使石油脱掉沥青质，广泛地利用凝聚作用对石蜡族烃中沥青质的影响。石蜡烃的分子量愈小，凝聚作用愈强〔19〕。在地层条件下石油中溶解有大量甲烷~戊烷的气态烷烃。譬如，巴什基里亚油田，在饱和压力下气态烃体积分含量的变化范围从下石炭系含煤岩系石油中的5%到什卡波夫油田 II_{IV}层石油中的29%。可以预料，石油中溶解的气态烃对沥青质有溶解和凝聚作用。由此可见，地层石油中沥青质的分散程度应在脱气石油中更低。

本书作者用离心机和光电比色计研究了石油中轻质烃和氮气对沥青质分散度的影响。对曼恰洛夫油田71井和达依姆尔任油田30井的脱气石油进行了实验。试验温度保持在 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，超过石油的蜡饱和温度。为了清除石油中的机械杂质和污物曾用三号玻璃孔隙滤器过滤。

在油样中溶解有戊烷（达20%重量）。在此戊烷含量的石油中没有发生沥青质的凝聚。当用戊烷稀释到比例1:1时开始凝聚。把原始油样和加了戊烷的油样都放入离心机的试管中。为防止石油轻质组分挥发，试管要仔细封好。离心机在10000分离因数下运转30分钟。在离心作用之后从每个试样的底部和表面各取出两个样品，并确定沥青质的含量。

为了进行对比，还在加有40%（重量比）苯的石油中进行了试验。

石油与戊烷混合液在离心作用之后，试管底部沥青质的浓度比试管表面有明显的增加。在加了17%（重量比）戊烷的71井的石油中，试管底层含有4%（重量比）的沥青质，而在表面层含3.4%。在30井的石油与20%（重量比）戊烷的混合物中，在离心作用之后，在下层中沥青质的浓度是7.7%（重量比），而在上层中是7.2%。没有加戊烷的石油，以及加入40%苯的石油，离心作用没有使试管底部沥青质浓度增加。

此类试验表明, 往石油添加戊烷引起了沥青质胶粒的溶解, 并使沥青质胶粒缔合。在离心力作用之下, 缔合后的微粒聚合体, 在超过地球重力场 10000 倍的人工力场中下沉, 沥青质浓度在液体表面与底部不同。苯与戊烷不同, 它没有引起沥青质微粒的溶解和缔合。

光电比色法研究饱和气石油是在平均波长约 1.5 微米的红外线下进行的。将地层石油放入地层石油试验装置 (УИПН-2) [63] 的高压小室内。高压小室放在具有锗光电管的光电比色计内, 测量石油的光密度。高压小室有保温套, 能保持一定的温度进行试验。

在高压小室内研究了曼恰洛夫油田 71 井和杜玛兹油田 851 井的下石炭系的地层石油, 以及杜玛兹油田 332 井泥盆系的石油。上述石油和溶解气的性质和成分列于表 3。

表 3 石油和溶解气的成分和性质

项 目	石 油		
	71 井	851 井	332 井
在 20℃ 条件下脱气石油的密度, 克/厘米 ³	0.900	0.900	0.865
含 气 量, 米 ³ /米 ³	6	10	55
饱和压力, 公斤力/厘米 ²	28	53	80
含量, 重量 %.....			
沥 青 质.....	8.0	7.1	1.9
硅胶胶质.....	29	20	9.0
石 蜡.....	0.7	2	约 5
收 缩 率, %.....	2	5.4	15
压缩系数, $\beta \times 10^5$, 1/公斤力/厘米 ²	3	6.7	9.5
溶解气的成分, 重量 %			
氮 气.....	100	18	9
甲 烷.....	—	8	25
乙 烷.....	—	12	18
丙 烷.....	—	30	24
丙烷以上.....	—	32	24