

变压器油

苏联 Б. П. 布里亞諾夫著

电力工业出版社

前 言

在电力網中应用的許多介質中，变压器油引起运行人員的特別注意。

其原因在于：a)变压器油是最常用的介質，成千累万吨的变压器油在动力系統中运行着；б)很多而且非常重要的設備（变压器、开关等）的工作可靠性有賴于油的質量；в)油是最不安定和最不可靠的介質。在运行中油的性質并非固定不变，而是迅速地劣化。

所以，油的保养和净化是运行人員主要工作的一部分。考虑到关于油务管理方面知識的一本通俗易懂的参考書的要求，像以前發行的四本同名的書一样，這本書也敘述了电气設備內油的基本工作原理、油的运行方式和規程。

作者向审校者 M.B.庫尔林教授和莫斯科动力化学試驗室 A.M.日魯德珂娃主任在审閱手稿时所做的宝貴指示，致以深摯的謝意。

所有对于改进本書的意見和願望，請寄至：莫斯科水閘河岸街 10 号国立动力出版社。

作 者

讀者对于本書內容和譯文的意見，請寄至“北京府右街 26 号电力工業出版社”。

目 录

前言

第一章 关于变压器油成分和制备的一般概念

1-1. 油的化学成分和制备	5
1-2. 油的性質	7

第二章 主要的物理化学性質

2-1. 比重	9
2-2. 粘度	10
2-3. 凝固点	15
2-4. 閃点	17
2-5. 灰分	18
2-6. 硫含量	19
2-7. 油的外貌	19

第三章 表征新油安定性和运行中的油老化程度的性質

3-1. 水溶性酸与碱的測定(水抽出物反应)	22
3-2. 酸值	23
3-3. 苛性鈉試驗	24
3-4. 油的安定性	24

第四章 油的电学性質

4-1. 主要的电学性質	27
4-2. 油的容积导电率和电阻系数	27
4-3. 介質損耗	30
4-4. 油的介質强度	34
4-5. 击穿电压与各种因素的关系	35
4-6. 击穿电压与水和纖維含量的关系	37
4-7. 击穿电压的測定	38
4-8. 击穿电压的分散性	44

第五章 油的其他性質

5-1. 油內的髒污和雜質	44
5-2. 油內的石臘	45
5-3. 油內的炭	46
5-4. 沉澱和渣滓	43
5-5. 油內的水分	49
5-6. 油內水分的測定	53
5-7. 油的吸收和排出氣體	54
5-8. 油做為冷卻介質的性質	57

第六章 運行中油的老化

6-1. 油老化的原因和象征	59
6-2. 氧和其他因素對於油氧化的影響	61
6-3. 催化劑和抗氧化劑	64
6-4. 油在變壓器和開關內的工作	66
6-5. 變壓器的冷卻和油過熱的防止	75
6-6. 變壓器和開關的低溫作業	77
6-7. 高壓進綫中的油	78
6-8. 充注變壓器用的不可燃的合成液體和氣體	80

第七章 油的定額和保養

7-1. 油的定額	85
7-2. 採取油樣的期限	90
7-3. 運行中油的消耗定額	93
7-4. 變壓器油的保養	95
7-5. 開關油的保養	97
7-6. 油樣的採取	98
7-7. 油的混合和添加	102

第八章 油的淨化、干燥和再生

8-1. 油的淨化方法	104
8-2. 澄清	106
8-3. 离心分离	107
8-4. 油在真空中霧化干燥	115
8-5. 過濾器	117

8-6. 再生的方法	122
8-7. 油的水洗	123
8-8. 按照“酸—碱—白土”法再生	125
8-9. 簡單的再生法	127
8-10. 油用漂白土和矽膠再生	128
8-11. 熱虹吸和吸附器	132
8-12. 廢矽膠和廢活性氧化鋁的還原	133
8-13. 變壓器內油的干燥	142

第九章 油務管理機構的組織

9-1. 油務管理機構的組織和任務	145
9-2. 油務管理機構和變電所的油管系統	147
9-3. 油料實驗室的作用和任務	151
9-4. 油的儲存	152
9-5. 防火措施和安全技術	156
附錄	160

第一章 关于变压器油成分 和制备的一般概念

1-1. 油的化学成分和制备

变压器油是从石油中制取的，石油主要由烃及其含硫、氧和氮的衍生物所组成。

油不是单体的简单物质，而是各种烃、树脂、酸和其他杂质的混合物，其成分因制成变压器油之石油的来源和其净化程度而变化无常。在空气中的氧、高温和其他因素的作用下，油内不断地进行着氧化过程，或即所谓“老化”过程。

所有已经知道的烃可以分为四类：

烷烃或石蜡烃，具有高度的化学安定性、高闪点和其他优越的性质。但在室温时便失去流动性。

环烷烃几乎是一切石油的主要成分，也是润滑油的主要部分之一。环烷烃不如石蜡烃安定，容易氧化。

芳香烃分为对称结构的烃（例如苯、萘、蒽）和带短侧链的芳香烃（例如甲苯）。一切润滑油的成分中皆含有芳香烃，而且它是生成渣滓的主要物质。但是欲完全除去芳香烃而不使油过度净化是不可能的。

烯烃在化学结构方面是不饱和的，因其安定性低，故为油的有害成分，所以应完全从油中除去。

通常在石油内含有一切主要的烃类。最好的含润滑油的石油含有75—83%的环烷烃，这样的石油称为环烷基石油。可以制取较好的变压器油的爱姆本油田的道苏尔石油和巴拉哈石油是典型的环烷基石油。

烷烃含量超过25—30%的石油称为烷基石油。格罗兹聶和苏拉哈石蜡基石油属于此类。

芳香烴的含量变动于原油的 14—30% 之間。

原油內不飽和的烯烴的含量相当少(0.1—0.5%), 而在潤滑油內則主要于其老化过程中出現。

原油加工的第一个工序是真空分餾。石油蒸餾时借汽化分成許多餾分, 其中每一餾分含有沸点接近、性質相似的烴。

最初从石油內分离出最輕的烴: 汽油、里格罗因^①、煤油; 然后蒸餾出較重的餾分, 即所謂重油。重油在管狀裝置內进一步蒸餾便得到索拉油的餾出油。变压器油即由索拉油制得。

下列重油是制取餾出油的原料: a) 含潤滑油的巴拉哈石油的一級含潤滑油的重油; б) 一級含潤滑油的重油、罗曼尼和比比-恩巴輕質重油三者的混合物; в) 比比-恩巴輕質重油。

为了得到有充分价值的产品, 使餾出油淨化除去石油酸、树脂、硫和其他有害的化合物。这一操作称为精制。餾出油用 92.5—95.6% 的濃硫酸处理一定的时间, 硫酸便氧化全部不飽和的化合物和树脂, 使它們变为不溶性的酸渣而沉淀。硫酸分数次小量地加入。为了完全淨化, 硫酸用量应不少于餾出油重量的 10—12%。

过量的硫酸和环烷酸用碱(苛性鈉)的水溶液处理而除去之; 此时生成的鹽、肥皂和乳濁液以澄清法分离。澄清之后, 油应当仔細地用水洗滌和吹气干燥。洗滌不良十分危險, 并可呈現灰分增加、安定性不够和存在有水溶性酸与碱。

油最后的淨化是在 70—80° 下与磨細的漂白土在一起进行攪拌。漂白土除去殘余的树脂和酸, 使油得到其正常的淡黃色。

如果用發烟硫酸进行深度的处理, 則芳香烴將被除去而得到像水一样無色的油, 这样的油氧化时不产生固体沉淀, 但是具有極大的生成酸的傾向。这样“淨化过度”的油, 在英国曾一度被广泛地采用过, 但是我們認為不适于运行。

随着电气設備电压和容量的增加, 对于油的要求也不断的提

① 里格罗因 (лигроин) 介于汽油与煤油之間的石油餾分, 主要用作拖拉機燃料。——譯者

高。現在常常發生這樣的情況：精制後得到的油不能原樣地交出去運行。

為了使油具有所希望的性質，還需要把油進行補充的脫臘、與其他油以各種比例混合和摻加某些被稱為添加劑的化學物質，以使油具有一些原材料中所沒有的性質。借助添加劑能夠提高油的氧化安定性、降低凝固點、減低吸濕性、改善油的粘度曲綫。

1-2. 油的性質

為了使油在貯存期間不喪失其花費了大量勞動代價所獲得的質量，必須保護它不受髒污，不雜亂的混合。

在運行之中，油並不能長久保持它原有的性質，自運行的第一天起便開始老化，並且有一些油老化得較快，另外一些油老化得較慢。

如前指出，油是複雜的混合物，其性質在運行中經常地改變，因而為了鑑定它的性質，比鑑定結構簡單的物質需要更多的可作為特征的數值。運行中的油按照蘇聯國家標準 982-53 所載標準特性的總和和按照當時這些性質發生了些怎樣的變化來進行鑑定。如下所述，油的檢查是按照一定的計劃和範圍進行的。

在特殊的情況下，除標準測定之外還補充許多其他的測定（皂化值、樹脂含量^①、透明度、嗅、脫乳速度、介質損耗等），以及精密的化學分析。

油的性質可以習慣地分為三類，我們將按這樣的順序來敘述它們。

a) 基本的物理和化學性質

屬於此類的是這樣的性質，它們主要取決於原材料和淨化的質量，而且在運行過程中很少改變。

^① Акцизные смолы 根據石油產品中所含瀝青、樹脂及其他物質與硫酸作用而測定的樹脂含量。——譯者

这些性質指：比重、粘度、凝固点、閃点、灰分、硫含量、油的顏色和氣味，可是后面兩種性質在运行中發生劇烈的变化。

6) 表徵新油安定性和运行的油老化程度的性質

这些性質是：水抽出物反应、酸值、皂化值、苛性鈉試驗、油在人工氧化下的安定性。

б) 决定油純度的性質

水是油中最常見的髒污，可通过油的电學特性或直接把水檢查出来。除水外，新鮮的油可能含有机械雜質，而运行的油則可能含有炭、渣滓和树脂。电學性質在第四章內敘述，其他髒污的測定則在第五章內敘述。

變壓器和开关內的油，其特性的改变(閃点降低，出現瓦斯氣、膠态炭、水、变色等)預示这些設備在工作中損坏或者油本身开始威胁設備的正常工作。

在运行中，油于兩種情況下导致故障：

1) 当油失去原来的化学性質时，亦即变为腐蝕性并开始析出沉淀时；

2) 当油失去其絕緣性質时。

油的保养和所有鑑定的目的都是在于及时察覺油內所發生的变化和根据这些变化采取必需的措施。

列在 а) 項內的油的基本性質保証新油应有的質量和正确的淨化。

列在 б) 項內的特性主要是为了不让油的化学性質变坏到对設備發生危險的限度。

б) 項內所指出的特性控制油的絕緣性質达到应有的水准。

第二章 主要的物理化学性質

2-1. 比 重

油在溫度 $+20^{\circ}$ 時的重量對於同體積的水在 $+4^{\circ}$ 時重量的比，稱為油的比重 γ_4^{20} 。

如果比重之測定不是在 $+20^{\circ}$ 而在任何其他溫度 t 時，則按照下列公式換算：

$$\gamma_t = \gamma_4^{20} - \alpha(t - 20^{\circ}), \quad (2-1)$$

式中 α ——校正數，從表2-1查得。

表 2-1

溫度不是 20°C 時，求其比重的
公式(2-1)中的係數 α

油在溫度 20° 時的 比重	係數 $\alpha \cdot 10^{-6}$
0.840—0.850	712
0.860—0.870	686
0.880—0.890	660
0.890—0.900	647
0.900—0.910	633

混合油的比重依下式求得：

$$\gamma_{\text{混合油}} = \frac{\gamma_1 v_1 + \gamma_2 v_2 + \gamma_3 v_3}{v_1 + v_2 + v_3}$$

式中 v_1 、 v_2 、 v_3 ——各種被混合的油的體積；
 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 ——各種油的比重。

只要不損害油的其他性質，最好比重儘可能地低一些。如果油的比重不大，油中

生成的沉淀、炭和游离水分能較迅速地沉到底部。開關里油內的游离水分，低溫時能形成晶體的冰，其比重為0.92，在具有同樣或較大比重的油中，冰向上浮起，並在兩帶電部分之間形成導電的通路。

在計算儲油罐、計算變壓器的冷卻和製備混合油等工作時，都需要知道比重。

測定比重有三種方法：

- 1) 比重計法(全苏标准/ВКС 7872 МИ 36-35);
- 2) 比重天平法(全苏标准/ВКС 7872 МИ 3в-35);
- 3) 比重瓶法(全苏标准/ВКС 7872 МИ 3г-35)。

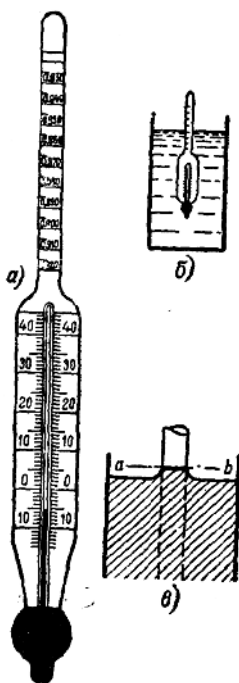


圖 2-1 附有溫度計之
比重計

a—外形; б—浮于液体中的
比重計; в—依照上面的液
面讀數。

不需要高度精确性的試驗, 采用比
重計(圖 2-1)。比重計下部的球內充滿
一定量的水銀。水銀之上, 在管之寬闊
部分內有測油溫的溫度計。管上部狹窄
部分有測定比重的刻度。

比重計放入盛有溫度為 20° 的試驗
油樣的玻璃量筒內。必須注意勿使比
重計觸及筒壁。油面上生成的泡沫应当以
濾紙除去。按照上面的液面 a—b 讀數。
如油溫高于或低于 20° , 則每超过一度
增加 0.0007, 而每低一度減去 0.0007。

2-2. 粘 度

液体流动时, 液体分子对其相互間
的相对运动表現有一定的阻力。此阻力
称为液体的內摩擦或运动粘度。

粘度可根据其測定方法分为三种
(全苏标准/ВКС 7872 МИ 5а-35)。

动力粘度或绝对粘度 η , 面积各为
1 平方公分的兩液体薄層, 相互間的距
离为 1 公分, 当其以 1 公分/秒的速度
相对移动时所需要的力以达因表示, 即
为动力粘度。动力粘度的單位是泊, 1
泊等于 100 厘泊或 1 克/公分秒。

动力粘度应用于科学研究工作, 并借烏別勞德-哥 尔德粘度
計測定之(全苏标准/ВКС 7872 МИ 5в-35)。

运动粘度或內摩擦系数 ν , 即温度为 t 时的动力粘度 η_t 与其

密度 d_t 的比值:

$$\nu_t = \frac{\nu_{t_1}}{d_t}, \quad (2-2)$$

运动粘度的单位是沱, 1 沱等于 100 厘沱或 1 公分²/秒。运动粘度应用于计算润滑油管道、油泵和轴承内的摩擦, 并且在新的苏联国家标准 33-53 中被采用作为新鲜油的特征。

条件粘度 是抽象的数值, 为 50° 的油的流出时间对于温度 20° 的水的流出时间的比值, 以恩格勒度量之。

粘度是绝缘油最重要的性质之一; 对于注入变压器中的油, 其粘度尽可能地低一些是重要的。贴近绕组的油受热而上升, 而温度较低的油则从器底及器壁流来。这样, 就发生了油的经常流动(对流), 使绕组散出热量。粘度愈低, 变压器的冷却愈为良好。

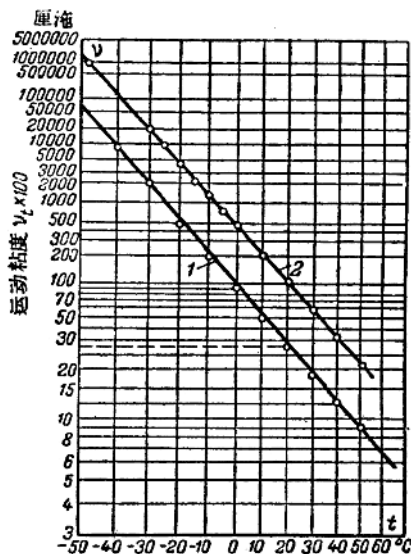


图 2-2 油粘度变化与温度的关系

1—变压器油; 2—透平油。

开关内的油也必须流动性大、粘度低，不然，接触点断开时电弧火花将行滞后而损毁开关。

由上述可见，在任何情况下，都希望用低粘度的油；但是制备油的工厂只能将粘度降低到一定的限度，因为油的闪点也是随着粘度的降低而降低的。

粘度大大地取决于温度(圖 2-2)，因而表示粘度值时总是說明相当于什么温度。按照苏联国家标准 982-53，粘度在 $t = +20^{\circ}$ 和 $t = +50^{\circ}$ 时测定。

适用于 1923 至 1953 年的苏联国家标准曾建議利用以恩格勒度表示的条件粘度来鑑定变压器油。条件粘度在今后的一个时期内仍将被利用，所以把它的测定方法简单地說明一下。

条件粘度以 BY 型粘度計(苏联国家标准 1532-42)测定。此仪器由两个圆筒形容器構成，一个圆筒嵌在另一个圆筒的里面，其間以具有标准流孔的短管联接起来，油即从此流孔内流出(圖 2-3)。流孔用長木栓堵塞。里面的容器盛油。外面的容器用作水浴槽，并有攪拌器。浴槽内的水借圓形煤气灯保持必需的温度。

用粘度計的“水值”除 200 公分³油的流出時間便得到条件粘度。所謂“水值”，就是温度 20° 的蒸餾水，从仪器内流出 200 公分³所需要的时间，以秒为單位。“水值”应不小于 50 秒，亦不大于 52 秒。每次試驗前，里面的容器依次用乙醚、酒精和蒸餾水洗滌。然后用秒表測定温度 20° 的水流滿标准量瓶所需要的时间。此后，容器内注油至指示液面必需高度的定位梢；把油加热到温度 50° ，再測定其流出時間。每一測定应重复三次，求其平均值，而且各次試驗的誤差不应大于 1 秒(苏联国家标准 6258-52)。

运动粘度在毛細管粘度計内测定。此种粘度計为特殊形狀的、鑲接着毛細管并有数处膨脹部分的“U”形玻璃管。測定温度在 0° 以上时的粘度，使用一套 6 支的宾克維奇和米特洛發諾娃粘度計(圖 2-4)；而測定 0° 以下时的粘度則采用一套 7 支的伏拉洛維奇和米特洛發諾娃粘度計(苏联国家标准 33-46)。

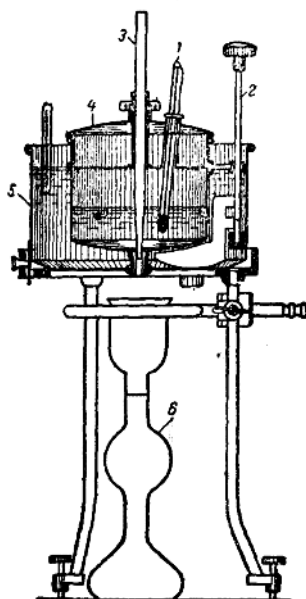


圖 2-3 測定條件粘度的粘度計
1—溫度計；2—攪拌器；3—閉堵微孔的插
梢；4—油容器；5—水浴槽；6—量瓶。

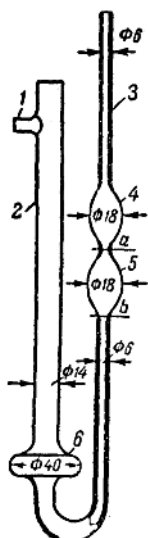


圖 2-4 測定運動粘
度的賓克維奇和米
特洛發諾娃粘度計

使用之前，粘度計先用石油醚、鉻酸混合液和蒸餾水洗滌并
使干燥。然后用特殊的校准液体校准粘度計，重新洗淨、干燥，
再測定試驗油樣的粘度。

所有校准过程和測定粘度过程的細节都完全相同，其步驟如
下：在准备好的粘度計支管 1 上套接 橡皮管，以手指 堵住 弯管
2 的管口，翻轉粘度計，將其弯管 3 放进試驗油樣內。

以水流抽气泵吸油入弯管 3，使膨脹部分 4 和 5 裝滿油，液
面恰至标高 b ，然后翻轉粘度計至正常位置，讓油流进下面的膨
脹部分 6，从弯管 2 的支管上取去橡皮管，套在弯管 3 上，并把
粘度計以精确垂直的位置放在 恒温器 內。試驗温度为 20° 时，

粘度計在恒温器內保持10分鐘，溫度為 50° 時，保持15分鐘。

其次將油從下面的膨脹部分 G 吸入 S ，使油充滿毛細管，且使液面稍高於標高 a 。確証粘度計灌注得正確而且液體內無氣泡和薄膜後，令油自由地從膨脹部分 S 經過毛細管流入膨脹部分 G 。油面恰與標高 a 相等時，開動秒表，經過標高 b 時停止秒表。流過的時間應在200—360秒的範圍以內。如時間不在此限度以內，則另取一支粘度計。每裝一次試樣至少試驗3次。試驗前油先脫水和過濾以除去機械雜質。

溫度 t 時油的運動粘度 ν_t ，單位厘沱，依下式計算：

$$\nu_t = C \tau_t, \quad (2-3)$$

式中 C ——粘度計常數；

τ_t ——三次流過時間讀數的算術平均數。

粘度計常數 C 在其校准时依下式求之：

$$C = \frac{\tau_{20}}{\nu_{20}} \quad (2-4)$$

式中 ν_{20} ——校淮液 20° 時的運動粘度，厘沱，已知數；

τ_{20} ——校淮液4次試驗流過時間的算術平均數。

表2-2載有粘度單位從厘沱換算為條件度的數值。全表載于蘇聯國家標準中。

換算較高的粘度值利用公式：

$$\mathcal{D}_t = 0.135 \nu_t \quad (2-5)$$

式中 $\mathcal{D}_t$ ——恩格勒度；

ν_t ——粘度，厘沱。

有時除蘇聯國家標準指示的兩種溫度($+20^{\circ}$ 和 $+50^{\circ}$)下的粘度外，還補充測定 $+5^{\circ}$ 、 0° 和 -5° 時的粘度，以便繪出粘度曲綫。這時是根據推理：粘度的差別在低溫時能夠最精確地檢查出來，而且知道整個粘度曲綫的變化比知道兩個孤立的粘度值更為重要。

2-3. 凝 固 点

凝固点就是某一温度，在此温度下油变稠到如此的程度，以至盛着被冷却的油的試管傾斜成 45° 角时，油面在 1 分鐘內仍保持不变。

为了测定凝固点，將油样細心地干燥，注入試管，管口塞以插有溫度計的軟木塞(苏联国家标准 1533-42)。盛油的試管固定在另外一个直徑較大的套管里，勿使兩管的管壁相接触，再把兩管一同放入酒

精和固体二氧化碳的混合冷却剂內(圖 2-5)。混合冷却剂的温度应低于油的預期的凝固点 5° 。

当油温等于混合冷却剂的温度时，不必从恒温器內取出試管，而將仅傾斜成 45° 角，保持此种状态 1 分鐘。然后小心地取出試管，观察油面有無移动。在不同的混合冷却剂的温度下重复試驗，直至确定了凝固点为止，凝固点亦即这一温度，在此温度下重复試驗时，油面保持不变，而温度升高 2° 油面即行移动。

对于在露天工作的开关，凝固点具有重大的意义：变稠的油对开关手柄的移动有較大的阻力，因而破坏电弧的熄灭过程。

油在低温时的性能依其来源而不同。甲基基的油凝固时分离为兩相：石臘形成結晶格子，油运动須穿过格子。这就是为什么石臘基油在比較高的温度下便由流动的状态急剧轉变为糊狀的解釋，因为石臘在 $+4^\circ$ 时就开始从油中分离出来。

只有在凝固点时改变自身結構的液体，其粘度曲綫才急剧断折，尤其是含有石臘的黑油。

淨化良好的矿物油冷却时不析出石臘格子而逐漸地轉变为較

表 2-2
粘度單位从厘沲变为条件度
的換算表

运动粘度，厘沲	条件粘度，度
1.0	1.0
5.0	1.39
10.0	1.86
15.0	2.37
20.0	2.96
30.0	4.2
40.0	5.5
50.0	6.81
60.0	8.13
70.0	9.48
75.0	10.15

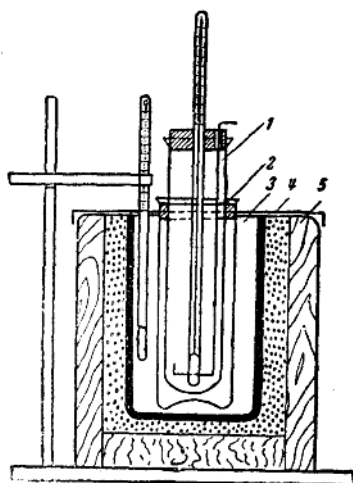


圖 2-5 測定凝固点的儀器
1—盛試油的試管；2—套管；3—盛混合冷却剂的玻璃容器；4—保温層；5—木箱。

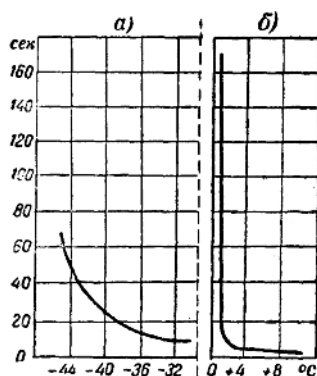


圖 2-6 油流出時間與溫度的關係
a—環烷基油；б—石臘基油。

稠的狀態(圖 2-6)。

运行的油常常被水、石臘和其他雜質所髒污，這些雜質在低溫時能够生成結晶網而使粘度增加數倍。應該指明，在電場里，結晶網的生成更為加劇，粘度也增加得更多。

從油中除去石臘或採用特種的添加劑(降凝劑)能够降低凝固點。降凝劑的作用是它們能够限制石臘結晶的生成和破壞結晶空間結構的強度。

提出石臘有一些困難，而且只能達到一定的限度，因為全部脫臘會降低油的安定性。所以最好採取第二種辦法，現在工廠直接出產的油含有達 0.2% 的降凝劑 $A_3HИИ$ 。

С.Э. 克林教授所採用的借壓延作用測定油在低溫時粘度性質的方法很有趣。

為了鑑定油的壓延性，在容積為 7 公升油的油箱的壓力下，測量油在一定溫度時，于 30 秒鐘內流過內徑 13 公厘、長 1 公尺的螺旋管的油量，以克計。30 秒流出 50 克油的溫度視作壓展性的臨界溫度。