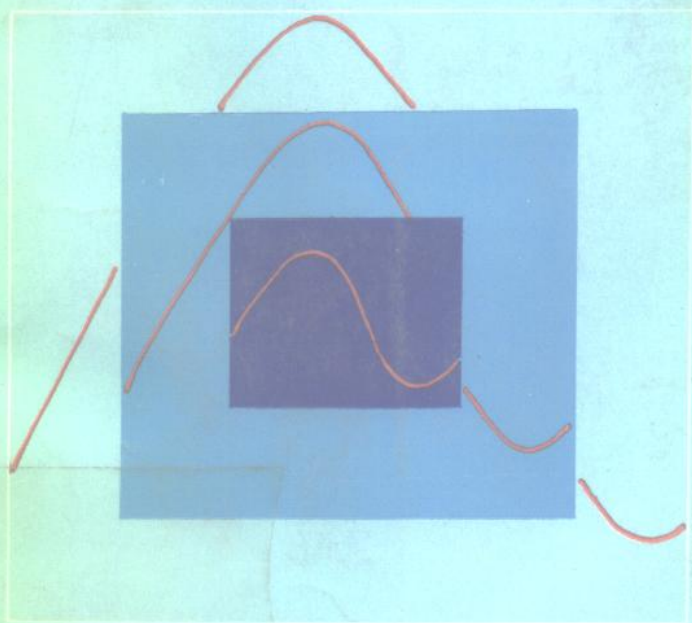


[苏] Г.Г.瓦希托夫 Э.М.西姆金 著
蔡天成 译 袁庆峰 校

利用物理场从 地层中开采石油



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书指出了实际应用热场、声场及电磁场提高井生产能力和油层原油采收率的可能性。总结了利用热场激励油层和井筒方面的研究成果,并指明了提高其效果的途径。研究了声场的应用及计算方法。介绍了电磁场的研究成果及其应用方法。论证了各种物理场相互作用的效果。

本书可供为强化采油和提高原油采收率而从事油层及油井处理方法研究的科学工作者参考。

*

本书在翻译过程中得到赵耀五同志的热情帮助,译者谨此深表谢忱。

Г.Г.ВАХИТОВ
Э.М.СИМКИН
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
НЕФТИ ИЗ ПЛАСТОВ

Издательство «Недра», МОСКВА, 1985

*

利用物理场从地层中开采石油

〔苏〕Г. Г. 瓦希托夫 Э. М. 西姆金 著
蔡天成 译 袁庆峰 校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京顺义燕华印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开本 9 印张 196 千字 印 1—1,000

1993 年 3 月北京第 1 版 1993 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0822-X/TE · 768

定价: 6.20 元

(国内发行)

引 言

利用所钻的一组井在地面上可以实现的现代油田开发方法，即便是在获得巨大经济效益和迅速收回投资的情况下，也具有严重的缺陷，甚至在最有利的条件下油层采出程度也不超过地质储量的50%，而在高粘油田，其采出程度变化范围则为2%~10%。

同时，国民经济燃料—动力部门的长期发展计划也要求石油工作者进一步提高采油量。解决这个问题，不仅需要寻找和开发新油田，而且还需要提高油层原油采收率（原油采收率表征油层采出程度及石油资源开发与开采方法的效果）。如果使油田的总产油量只增加百分之几，那么就可以多得到几百万吨的石油和凝析油。而要发现有同样多储量的新油田，则开发，勘探和地面建设所需要的费用就是几十亿卢布，并且还要耗费大量的物资。由此可见，力争提高油层原油采出程度是一项最重要的国民经济任务，可以通过下面两种途径来解决这项任务。

1. 进一步完善传统注水方法（热水驱油，聚合物溶液驱油，胶束溶液驱油，利用边外和边内注水等）。

2. 应用以改善油层及饱和流体天然性质为基础的新方法（富气驱油，高压气驱油，二氧化碳驱油，水蒸汽驱油，应用火烧油层方法等）。

无论是传统开发方法还是新的开发方法，其所固有的共同缺陷是：一方面，都达不到百分之百的原油采收率，另一

方面，应用这些方法还会造成不可逆转的后效应，因而使我们以后无法采用将来出现的更有发展前途的其它方法进一步采出剩余油。同时，由于向油层注水、气和化学剂以及现有打开和开发油层的技术与工艺条件，显然有可能破坏生态平衡。

随着油层的开采以及对开发地下资源的生态学要求更加严格，“无缺陷的”（从损害油层自然状态的观点来看）处理方法的作用将变得愈来愈重要。目前我们所知道的只有一组这样的方法，即物理场激励法。

从理论上说，可以利用热场、声场（宽频带）、静电场、磁场及交变电场来激励油层。其中，只有热场已经得到了比较广泛的工业性应用。其余的物理场，有的处在室内试验阶段，有的处于用极少数井进行的工业试验中。在这种情况下应当指出的是，所研究的工艺正在通过石油工业所有新方法所经过的传统发展道路——首先研究和试验近井地带处理方法，然后再建立整个油层的处理工艺。声学方法就是这方面的一个明显例子。到目前为止已经建立这项工艺，并且即将完成处理近井地带声学方法和振动（低频）方法设备的研制工作。现在有可能建立整个油层的低频处理工艺，而且已经着手进行这方面的工作。地球——是一个复杂的电性综合体。

地球周围的大气层电场与地球深层电场有密切关系。因此，看起来很有可能，我们利用套管井使具有不同电位的岩层短路来干扰大气层和深层电场的稳定动态，从而影响某些地区的气象情况。

根据以上所述，我们认为，必须以另一种态度来对待现有的油田开采和开发技术与工艺，尤其是对待一些与物理场

激励油层有关的方法更应当如此。

就理论而言，所研究的方法是建立在物理学与化学基本部分的接合处之上的。针对开发问题，必须把声学、热力学、磁化学等方面的问题同技术和工艺问题结合起来解决。此外，迄今以查明和解释在连续介质中，比如说在饱和多孔体、水溶液、油水乳化液中，以及在连续介质与声场、磁场、电磁场、热场及其组合的相互作用条件下产生的物理—化学现象和流体热力学现象为目的的理论研究及试验研究还完成得不够好。

但是，到目前为止，甚至所进行的少量试验研究的结果也可证明，有些方法有利于提高原油渗透性，由于极性油渗流，泥浆污染或者水与泥浆滤液侵入，原油渗透性受到了破坏。有些方法则可以用来防盐和天然气水化物，还可用来探测地层中是否有上述物质存在。上述方法均有利于提高探井和油井地球物理测井方法的信息量。

最近几年，由于地面电工学和地震声学技术的飞速发展，现已查明应用物理场处理整个油层是有发展前途的方向，例如，可以应用物理场改造水淹油田，改善地层油相渗透率，同时降低水相渗透率。

目 录

第一章 井与岩层中的电物理现象	(1)
第 1 节 在固相和液相界面上电位跃变的产生	(1)
第 2 节 地层液体相对于固体表面流动时电离	(6)
第 3 节 岩层的自然电场	(23)
第 4 节 岩层的磁场	(35)
第二章 地层骨架的静电场及其对烃类介质渗流的 影响	(42)
第 1 节 静电场孔隙内的能量	(42)
第 2 节 孔隙内静电力	(44)
第 3 节 地层的介电系数	(54)
第 4 节 带电介质渗流时的静电位分布	(58)
第 5 节 地层骨架静电场内的流动	(61)
第 6 节 带电极性相与地层骨架相互作用	(69)
第 7 节 磁场对极性相渗流的影响	(74)
第三章 物理场内热与质传递及其对地层自然电场和原油 流变性的影响	(77)
第 1 节 温度的影响	(77)
第 2 节 声场的影响	(112)
第 3 节 电场和磁场的影响	(141)
第四章 井下热处理工艺	(152)
第 1 节 井下加热器处理方法	(152)
第 2 节 停产井中加热方法	(152)
第 3 节 生产井中加热方法	(164)
第 4 节 周期性热蒸汽处理方法	(177)

第5节 井底连续产生热量方法	(207)
第五章 油层物理场处理工艺	(221)
第1节 地震声学处理	(221)
第2节 电磁处理	(234)
第3节 综合法	(238)
第六章 在物理场作用下饱和油层性质的变化	(243)
第1节 对地层骨架矿物的影响	(243)
第2节 对饱和介质的影响	(264)

第一章 井与岩层中的电物理现象

井与地层内热量质量传递机理，是建立在开发过程中液体及气体流动时产生的电学现象基础上的。这种现象对于多相系统的渗流过程，毛细管效应，以及在地层条件下渗流系统的相渗透率和流变性变化起着特别重要的作用。

第1节 在固相和液相界面上 电位跃变的产生

当固体与液体接触时，可观测到两者之间的电荷不等价交换^[16]，这种交换不仅发生在地层中固相和液相的界面上，而且还发生在井下设备与地层液体之间。例如，当管子与水接触时，由于金属可稍微溶于水，所以就会失去阳离子 Fe^{3+} 或者 Al^{3+} ，剩下多余电子，因而金属带负电荷。在这种情况下产生的电位大小取决于金属和液体的化学成分。

因为离子电荷比较多，而相分界面上电容量又很小，所以，甚至在少量离子跃迁的情况下，在相分界面上也会产生很大的电位差。对于用 $40\times\text{H}$ 及 D16T 号钢制成的管子和氯化钠水溶液系统来说，电位差可达到 IV ，而在上述管子与饱和无水原油的石英砂之间，电位差则超过 100mV 。此种情况下，各相表面层中所聚集的电荷数量相等，符号相反。

在液相中会形成偶电层，视固相的化学成分而定，可以几种方式在液相和固相界面上形成偶电层。第一种方式以吸附溶液中的离子为先决条件，当固体表面上有多余的离子存

在时可观测到这种方式，依靠多余的离子形成静电场，在分子引力球半径范围内，存在于液相中的离子为固体所吸附。此时，首先被吸附的是能够建成晶格的离子。如果没有上述离子，则可观测到选择吸附化合价较高而半径较小的离子。这种离子可在固相表面上形成不动的吸附层。例如，在含有复矿储层细粒成分的各种沸石中，一部分 Si^{4+} 离子为 Al^{3+} 离子所取代。在这种情况下，还剩下一个不可补偿的负电荷，这个电荷就是形成电位的离子^[23]。在这样的表面上，吸附层就是由液相中的阳离子形成的。

偶电层形成的另一种方式是，固相质点的表面分子在液体中离解为离子。例如，镉硅酸 H_2SiO_3 给溶液一个氢离子，结果留在表面上的是形成电位的带负电荷离子，而在固体表面上，氢离子形成带正电荷的吸附层^[42]。此外，在某些矿物不带电的表面上还可能发生液相之中“特有的”吸附作用。这种吸附作用是由范德华分散力或者伦敦分散力所引起的，该种分散力取决于液体中离子使孔隙固体表面原子的电极化强度及离子本身的极化强度。在上述情况下，首先吸附的是多电荷离子。比如说，在石灰岩中可能存在这样的机理。不论偶电层形成方式如何，其结构都是一样的。最早说明偶电层结构的是昆克和格尔姆戈尔茨。

目前有下列一些对偶电层结构的认识。如上所述，两相接触便会导致在接触界面上产生异性电荷。液相中直接接近固相表面的离子和分子由于受到强静电力的作用而形成吸附层。该层范围以外的离子受到反向力的作用。分子热运动的力趋向于使离子均匀分布，而且有固相电荷面密度与吸附层电荷密度差的电荷静电场，则趋向于按符号把离子分开。结果，离子浓度随着离开吸附层界面而降低，根据博尔茨曼统

计定律，这种情况和重力场内气体分子的分布状态相似。离子扩散性分布的层称为扩散层。

当液体相对于固体表面流动时，滑动面在吸附层范围以外，处于扩散层之中。扩散层中和吸附层相邻的部分离子保持不动，固相运动时，同固相一起移动。在固体表面与滑动面之间的液相层称为流体动力层。用下列近似关系式确定扩散层的稳定厚度：

$$\delta = \sqrt{D \epsilon_0 \epsilon \rho_v}$$

式中 D ——离子扩散系数， m^2/s 。

对球形质点来说，利用爱因斯坦方程确定扩散系数。

$$D = T k_0 / 6 \pi \mu r_0$$

式中 ϵ_0 ——绝对介电系数，等于 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

ϵ ——液体的相对介电系数；

ρ_v ——电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

k_0 ——波尔茨曼常数，等于 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

T ——温度， K ；

μ ——动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

r_0 ——质点半径， m 。

实例：已知 $T = 293 \text{K}$ ， $\mu = 10 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ， $\epsilon = 80.4$ ， $\rho_v = 8.26 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ ，求金属管与浓度 10% 的 NaCl 水溶液接触面上的偶电层厚度及电场强度。

如果把水分子看成是半径 $r_0 = 0.5 \times 10^{-10} \text{m}$ 的球形，那么扩散系数就等于 $D = 4.3 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ ，而偶电层厚度 $\delta = 1.6 \times 10^{-10} \text{m}$ 。

假如金属管与液体之间的电位差 $\varphi = 1 \text{V}$ ，偶电层范围内电场强度一定很大，即

$$E = \varphi / \delta = 6.25 \times 10^2 \text{V/m}$$

对煤油与石英板界面上偶电层厚度及电场强度的类似计算得到下列结果。

偶电层厚度 $\delta = 1.44 \times 10^{-4} \text{m}$ 。当相界面上的电位差等于 100mV 时，电场强度等于

$$E = 69 \text{kV/m}$$

可以看出，在此种情况下，偶电层厚度与孔隙孔道的尺寸很接近，而该层范围内电场强度非常大。

在带电粒子是由不带电分子和一个或者几个离子（胶质粒子）组成的情况下，偶电层厚度可以达到几厘米。

表征偶电层不动与可动厚度的基本测量参数就是介质的动电位，即 ξ -电位。 ξ -电位值代表偶电层范围以外固相与液相之间总电位 φ 的一部分。 ξ -电位表示扩散层可动部分的电位降（在流体动力滑动面与扩散层范围以外液相之间，图1）。

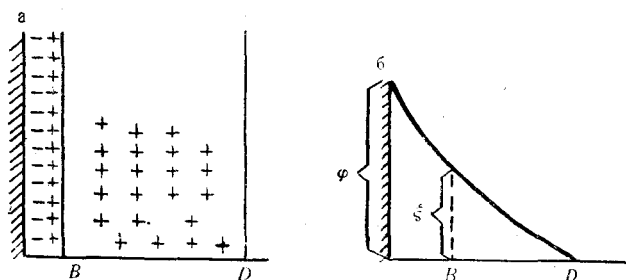


图 1 固体介质与液体介质界面上电位的产生

a—偶电层示意图、b—电位产生示意图；B—不动小层厚度；

D—偶电层厚度

由图1可见， ξ -电位值与扩散层厚度有密切关系，通常该层被冲刷得越厉害， ξ -电位值就越大。如果该层被挤压

在固体表面与流体动力滑动面之间这个范围内，那么很显然， $\xi=0$ 。

对异相介质来说，通常根据流动电势或者电渗的测量数据来确定 ξ -电位值。

对饱和电解质的均匀石英粉来讲，格霍什修正的格尔姆戈尔茨—斯莫卢霍夫斯基经典公式可给出最佳结果。

$$\xi = \frac{\kappa_0 q \mu}{\varepsilon \varepsilon_0 J} \left(1 + \gamma \frac{\kappa}{\kappa_0} \right)$$

式中 q ——容积流速， m^3/s ；

μ ——动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

κ_0 ——液体的电导率， Ω/m ；

κ_s ——储集层的表面电导率， Ω/m ；

J ——电流强度， A ；

γ ——经验系数，其大小变化范围由1.25~1.35。

对异相介质来说，这个公式不过是大致可靠而已，原因是未将描述毛细管—多孔介质结构特点的参数列入该公式中。

起初 ξ -电位随着孔隙尺寸增加而增大，在达到最大值后减小。在一定范围内， ξ -电位之所以能随着孔隙尺寸增加而增大，是因为象粘度、介电系数和电导率这样参数的变化。一些研究人员认为，粘度随着孔隙尺寸降至一定范围以下而增大。根据许多研究人员的资料，在偶电层内，介电系数(ε)要比游离状态液体的介电系数小得多^[44]。例如，对偶电层内的水来说，所得到的 ε 值在2~8范围内。在把这个问题基本弄清楚以前，没有理由排除 ε 对 ξ -电位在孔隙达到一定值以前随着其尺寸增加而增大的影响。电导率也能引起电位因孔隙大小而发生变化。有人指出，孔隙内溶液和游离

液体的电导率值各不相同。在孔隙空间与偶电层厚度很接近的情况下，电导率等于液体与偶电层的电导率之和。

由于偶电层内离子浓度大，所以其电导率可能很高。随着孔隙尺寸减小，表面电导作用增大，因而使电位降低。在小孔隙尺寸范围内， ξ -电位降低，也可能是由于扩散层收缩造成的，因为在这种情况下该层中一部分离子转入吸附层。除结构因素之外，同时还应该指出固相化学性质，极性组分的组成和浓度的作用。

第2节 地层液体相对于固体表面流动时电离

应用偶电层理论可以解释众所周知的液体相对于固相流动时的电离现象。通常这是因为液流将偶电层扩散部分冲走，同时也把电荷迁移。此种情况下，电荷迁移有三种方式：对流，电导和扩散。但是，在电离过程中，与前两种迁移方式相比，扩散迁移率要低得多。

脱水脱气无机械杂质原油的电导率，通常即是离子电导率。油水乳化液的电导率取决于原油的离子电导率、分散质点的电泳电导率及乳化水滴结构。这种结构有时具有链条形状，因此是良好的导电结构。在低含水（大约30%~60%）情况下，油水乳化液的电导率低于无水原油的电导率。但是，在含水率继续上升的情况下，其电导率会增加1~2个数量级。

油气混合物的导电性最差。其电导率主要取决于原油的离子电导率，而气体的电导率是微不足道的。油气混合物的电导率随着气体含量及其分散度的提高而降低。其电导率比脱气原油的电导率低2~3个数量级。

井和地层中流动的地层液体电离机理及特性具有本质上的区别。

1. 液体在井中的流动

我们可以按一级近似把采油井中油管看作是接地的金属管线，在其中有同气体、水及固相（石蜡、砂子等）混合的原油流动。从理论上说，如果假定液流把偶电层扩散部分的电荷能完全带走，并且仅通过对流方式实现电荷迁移，那么就可以写出电离电流方程

$$J = \frac{\pi r_0 \varepsilon \varepsilon_0 \xi}{2\mu} \Delta p$$

式中 J ——电离电流强度，A；

r_0 ——管线半径，m；

μ ——动力粘度，Pa·s；

Δp ——压力差，Pa。

把电离过程仅仅解释为偶电层扩散部分电荷的对流迁移，是与试验观测到的液体在管线内流动时产生电荷的连续性相矛盾的。确实，在液流把电荷从整个管线中带走以后，电荷流动就应该停止，并且在第一批带电液体流出之后，再流到管线出口处的应是不带电液体。用试验方法未能观测到这种现象。

为了消除上述矛盾，曾试图引入“近壁电流”概念，同时甚至假定把电离过程看作与偶电层无关。根据现代电离理论，管壁上发生的氧化还原反应便是近壁电流的来源。根据以上所述，为了明确起见，假定吸附在管壁上的是阴离子，就能以下列方式来阐述液体在油管内流动时的电离机理。

一批“新的”（不带电的）液体流入油管柱上的过滤器，便把带有多余阳离子的液体从那里排出来。因而引起吸

附在管壁上的阴离子放电。这批阴离子扩散到管壁上，并被吸附在上面，结果在液流中产生多余的阳离子。因而，随着液体的推进，液流中多余的阳离子浓度就会逐渐增大，而管壁上原有的离子放电速度降低。在某一距离内，液流中阳离子浓度达到平衡值，而管壁上的阴离子放电也会停止。如果油管柱长度大于上述距离，那么带正电荷液体便会流入井口受油器，该液体中离子浓度最大。

假定偶电层扩散部分的电荷全部进入流动的液流中，液流从管线中所带出来的电荷数量与偶电层扩散部分总的离子电荷相符；液体的电导率恒定不变；

阳离子和阴离子的扩散系数相同，并且液体中多余电荷对离子向管壁扩散的速度不产生影响；

可以迁移的离子是同性离子，紊流脉动对其电导迁移率无影响；

在介电系数小的介质能发生电极氧化还原反应，在这种情况下，电流强度往往与井的深度无关，可用下列半经验关系式来确定

$$J = 274 \times 10^{-4} \alpha \varepsilon_0 \varepsilon T \frac{q^{1.875}}{\nu^{0.625} r_0^{2.875}}$$

式中 α ——经验粗糙系数；
 ν ——运动粘度， m^2/s ；
 r_0 ——管柱半径， m ；
 T ——温度， K 。

由此可见，在井筒条件下，经过几十米距离，液流中离子浓度即可达到平衡值，因此电离电流强度不再取决于井的深度。

实例

比较利用上述关系式计算的液体电离值和参考文献〔4〕中所列举出的阿布德拉赫曼诺夫区19号井的试验研究结果。计算用的原始数据如下：

$$\alpha=10, \varepsilon=2.1, T=298\text{K}, q=1.1\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s},$$

$$\nu=15\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}, r_0=0.025, r_k=0.075\text{m},$$

其中的 r_k 为套管半径，m。

利用上述关系式计算，结果得到 $J=3\times 10^{-9}\text{A}$ 。参考文献〔4〕中测量的油管与套管之间的电位，视产量而定，其变化范围由IV至3V。一般说，油管与套管就电而会相互连接得很好。因此，最初在油管表面上产生的电荷，分布在油管与套管之间是如此均匀，以至于使电荷面密度始终保持不变。如果根据描述无限充电的扁圆筒场位关系曲线，那么在这种情况下可用下列关系式确定电荷线密度。

$$\kappa=2\pi\Delta\varphi\varepsilon_0\varepsilon/(\ln r_k/r_0)$$

式中 $\Delta\varphi=3\text{V}$ 。

油管柱上电荷面密度 (C/m^2) 等于

$$\sigma=\frac{\kappa}{2\pi r_0}=2\times 10^9$$

因此，实际电流强度 (A) 为

$$j=\frac{2\sigma q(r_k+r_0)}{r_0^2}=0.7\times 10^{-9}$$

如果注意到，计算电荷分布时不考虑有井内设备存在，那么就应当认为计算数据与矿物数据吻合是十分令人满意的。

根据这个结果来估算井内液体中基本带电粒子的大小是很有意义的。

为此，我们首先确定 1m^3 液体中的电荷 (Q_3)

$$Q_3 = J/q = 6.3 \times 10^{-7} \text{C/m}^3$$

因此，液体中基本带电粒子的平均体积等于

$$V_3 = e/Q_3 = 2.5 \times 10^{-13} \text{m}^3$$

式中 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ——电子电荷（元电荷）。

如果把基本带电粒子想象为小球形，那么其半径就等于

$$r_3 = \sqrt{\frac{3V_3}{4\pi}} = 2.4 \times 10^{-7} \text{m}$$

2. 液体在地层中的流动

尽管在地层中和井筒内液体极化具有共性，但是液体在地层中流动与其在井筒内流动有所不同。这是因为多孔介质具有以下特点：

液体流动相对的表面极其发育；

与冲洗多孔介质的液体相比，电阻率比较高；

表面力和毛细管力的作用占优势。

对有机液体在过滤器、吸收器及换热器中流动时的电离现象研究得最好。通常人们可以发现，与在接地管线中流动相比，有机液体的电离度要高得多。例如，当航空燃料和柴油流经过滤器时的电离度比流经引入管线时大9~199倍。在经过多次使用、吸附以前流过液体中杂质的过滤器里比在新过滤器里会发生更为强烈的电离。这很可能既与同液体相互作用的表面性质变化有关，也很可能与表面有效面积的扩大有关。在局部污染的孔隙孔道中，液体实际流速的增加也会对电离度的提高有所影响。如果管壁材料的电阻率比液体大，那么在相界面上形成偶电层以及液体携至管表面的电荷逸出时产生的瞬间现象就会使电离过程复杂化。

在参考文献〔44〕中，对85m钢管、玻璃管及氟塑料管中电阻率为 $(1.2 \sim 1.5) \times 10^{-12} \Omega \cdot \text{m}$ 有机液体电离的比较