

〔苏〕A.M.皮尔维尔江

深井泵 防气与 防砂

石油工业出版社





200348873

45666

深井泵防气与防砂

〔苏〕 A. M. 皮尔维尔江

冯少太 译 李天伟 校



00293204



45666

石油工业出版社

内 容 提 要

本书阐述了深井泵在抽汲含砂和含游离气流体时的复杂工况,研究了砂和气泡进入泵内液流中的运动规律,提出了消除气、砂对深井泵工作不利影响的措施:选择最佳液流上升速度,运用筛砂器、气锚和特殊泵等方法,同时也提出了防治砂和气的综合治理措施。

本书适用于从事油气开采的工程技术人员学习使用。

* * *

本书由冯少太译,李天伟校,并由朱恩灵作最后审校。

А. М. ПИРВЕРДЯН ЗАЩИТА СКВАЖИННОГО НАСОСА ОТ ГАЗА И ПЕСКА

МОСКВА "НЕДРА" 1986

*

深井泵防气与防砂

〔苏〕А. М. 皮尔维尔江

冯少太 译 李天伟 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 47/8印张 107千字 印1-2,000

1990年7月北京第1版 1990年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0379-1/TE·368

定价: 1.25元

目 录

第一章 油井生产条件	(1)
第一节 根据自然因素影响程度进行油井分类	(1)
第二节 用数理统计模式研究油管的腐蚀和机械磨损.....	(5)
第二章 液珠和气泡在流体中的运动	(9)
第三章 游离气对深井泵供液能力的影响	(16)
第四章 深井泵防气	(22)
第一节 基于重力原理的简单气锚中液体脱气的机理.....	(22)
第二节 多级气锚.....	(36)
第三节 高效气锚.....	(48)
第四节 泵下到“口袋”里而不用气锚的工作情况.....	(60)
第五节 基于惯性原理的气锚.....	(62)
第六节 电潜泵的分选系数.....	(68)
第五章 深井泵防砂	(73)
第一节 形成砂堵井的开采水力学.....	(73)
第二节 最有效的携砂方法.....	(82)
第三节 在泵的入口安装滤砂器防止砂进入泵内.....	(92)
第四节 安装在泵入口处的砂锚.....	(96)
第五节 涌塞-泵筒的液体漏失规律	(98)
第六节 活塞-泵筒的磨损.....	(103)
第七节 砂粒在油管内的横向位移	(112)
第八节 深井泵的检泵周期.....	(114)
第九节 估算深井泵的可靠性.....	(118)
第六章 出砂井用泵的结构	(129)
第一节 现用泵的结构分析.....	(129)

第二节	深井泵间隙的检查方法.....	(138)
第三节	采用磁场减少活塞-泵筒间隙漏失量的前景.....	(142)
参考文献		(149)

第一章 油井生产条件

第一节 根据自然因素影响程度进行油井分类

根据各种自然因素对井下设备(泵、油管和抽油杆等)的影响程度,在选择抽油参数时把油井分为正常井和复杂井。

第一类油井:完全使用普通泵,不采取任何防护措施(或者仅装置简单的滤砂器)就能够在充满系数接近1的条件下工作,在这种情况下也不会因砂、气、腐蚀或结蜡等原因造成故障(停产),使整套泵装置或者某些部件损坏,而导致检泵周期缩短。

第二类油井:采用普通杆式泵生产困难,或者不采取特殊工艺(例如向井下灌注液体)和防护设备(滤砂器、气锚)实际不能生产。

生产条件复杂的油井一般分为以下几类:“高气量”、“出砂”、“腐蚀性”、“结盐”、“结蜡”、“高粘流体”(牛顿性流体^①或具有异常性质的流体)及“乳状液”等。

可以根据单独或同时出现的一系列特征,来确定用泵生产的油井是否属于“高气量”井。

“高气量”井或“产气”井的气油比均较高(大于 $60\text{m}^3/\text{m}^3$)。其中这类井中多数的特征是在抽油过程中产生间歇自

^①疑为非牛顿性流体之误。——译者

喷(这样使泵的充满系数可能大于1)。对于“高气量”井的突出特征是在泵入口处安装气锚或者加大泵的沉没度时,可以提高泵的充满系数,以保证达到预期的产量。判断“高气量”井的可靠方法是采用示功图分析。由于动液面急剧下降到泵的入口处而使气体由环形空间窜入泵筒的油井,不能归为“高气量”井,这种情况可根据示功图进行判断。

机械杂质含量超过1 g/L的油井为“出砂”井。如此高的机械杂质含量会造成泵筒中活塞遇卡,凡尔砂卡,活塞-泵筒及凡尔的磨损,同样还会形成周期性(经常出现)的砂堵,需要进行清除和冲洗作业(一年一次以上)。

经常因设备产生腐蚀而导致停产的井称为“腐蚀”型油井。M. A. 苏博京把下述产出液列为非腐蚀性介质或中等弱的腐蚀性介质:不含硫的含气或非含气的原油;不含硫的石蜡型含气原油,混以任何比例的碳酸氢钠型低矿化度水(水中不含 H_2S , CO_2 和 O_2 ,且氯离子含量低于50mg/L)。产液中烃类含量75%以上(无硫、低含硫和石蜡原油)和碳酸氢钠型中等矿化度的地层水(40~60g/L),且水中含微量硫化氢和二氧化碳(20~30mg/L)的油气水体系(含气原油和地层水的混合物)属于中等腐蚀介质。油气水混合体系中含氧地层水占优势(60%以上),矿化度40~100g/L的碳酸氢钠或氯化钙型,且不含硫化氢和二氧化碳,这种流体也属于中等腐蚀性介质。

下述油井产物属于强腐蚀性介质:含硫及高含硫原油,烃类占50%以上,含有各种原生类型的矿化水的油气水体系;氯化钙型或氯化钠型高矿化度的地层水占60%以上,总矿化度100~180g/L,并含硫化氢和二氧化碳气或氧气的油气水体系;硫化氢(含量150mg/L以上),二氧化碳和氧气等气体

达到饱和的任何类型地层水占60%以上的油气水体系。应当指出，过热水蒸汽属于中等腐蚀强度的介质，湿压缩空气属于腐蚀强度很高的介质。

根据介质所含的主要腐蚀性物质，分为含氧、含硫化氢和含二氧化碳气三种基本类型。

“腐蚀”型油井，抽油杆和油管的年平均更换率占油管和抽油杆总长度的20%以上。

一定条件下，在井下设备上产生盐沉积的油井属于“结盐”型油井。这些条件是：

化学组成和类型不相容的水互相混合。形成混合的原因是由于注水时采用长的筛管合采不同形成年代的含硬水和碱水的产层，以及因套管密封性遭到破坏等情况。

油田经长期开发后含水上升。

二氧化碳的温度和分压降低。

产液中含蜡2~3%以上的油井为“结蜡”型油井。И. И. 克拉夫琴科认为，自喷井和抽油井中原油析蜡的主要原因是原油从井底举升到井口过程中逐渐气化。А. Ю. 纳米奥特则认为，油气流在上升过程中，热量传递到井筒周围的岩层，使其湿度降低，从而形成析蜡。即使油井在一年内因蜡堵作业一次，也属于“结蜡”型油井。

下列油井属于“高粘流体”油井：油井流体的粘度为0.03 Pa·s以上(20℃时水的粘度为0.001 Pa·s)。产出液粘度在0.1 Pa·s以上时，会对井下设备、泵和油管产生很高的水力摩阻，造成下行冲程时抽油杆弯曲，上行冲程时负荷增加，以致发生抽油杆故障(断、脱等)。

递常，这么高粘度的原油属于非牛顿性体系，即为具有机械-结构性质的体系。

产液为不能用简单的沉降方法加以破除的乳状液，这类油井属于“乳状液”型油井。

上述各类油井中，产出液含水在50%以下者称为含水井。含水达到80%或80%以上的称为高含水井。

油井内油水流的机构不同，使抽油杆、油管和泵的工作条件也不相同。油包水乳状液(水为分散内相，油为分散介质)对抽油杆、油管和泵都有良好的润滑作用，但视其原油的组分不同，发生结蜡和胶质沉淀的可能性增加了。

水包油乳状液(油为分散内相，水为分散介质)使抽油杆接头和油管内表面磨损严重，连接丝扣渗漏，泵部件磨损。

室内试验结果表明〔2〕，含水率 σ_p 大于0.5时，任何产量的油井均会形成水包油结构。超过产量极限值(临界) Q_{kp} ，则形成油包水结构，其值与含水率的关系如下：

σ_p	0.1	0.2	0.3	0.4
$Q_{kp}, \text{m}^3/\text{d}$	2	4	7	10

这些数据适应于脉动流。正如文献〔2〕所指出的，在抽汲冲数低的情况下， Q_{kp} 应该比上列的值高一些。但文献〔2〕没有说明更具体的数值。

对上述多种因素同时都存在的油井，应根据相应的诸因素来决定其类型。例如，高气量出砂井、腐蚀性出砂井等。随着时间的推移，油井类型可以由这一种转变成另一种，如正常井变为高气量出砂井，又变成正常井等。

分类当然是相对的，因为油井中的各种自然因素的作用及它们对泵的指标(检泵周期和泵的寿命)的影响，都没有严格的界限。

还要简单谈一下有关定向井和弯曲井的问题。在叙述“正常”类型的井时没有谈到井筒的弯曲度问题，对于其它类

型的井也是如此。问题在于个别井眼弯曲的情况下，这个因素对泵的工况影响不大，所以在表达“正常”井的确定条件时，没有指出井必须是垂直的。

有时油井可以按泵挂深度和产量来进行分类^[2]。

第二节 用数理统计模式研究油管的腐蚀和机械磨损

油井系统属于一些所谓的弥散体系，在其内部不能严格地分开各个单一现象^[16]。对于这种体系不适宜采用单因素的实验方法，因为这种方法是基于在研究时，体系内其它无关的变量(因素)在某种程度上保持不变。单因素实验(分析)法实质上是在研究某种因素对过程的影响时，假定其它诸因素对所研究的范围所起作用微乎其微。实际上对于这种弥散体系，这种情况是不可能的，因为很多因素都同时以某种方式影响所研究的现象。

下面我们以油管和抽油杆的腐蚀损坏为例来说明这种过程。这种腐蚀损坏的程度和特征与油井采出液的非均质性有关(金属腐蚀发生在原油—地层水—气系统内)。这种电化学腐蚀的规律由各种不同的物理-化学因素决定：介质的化学组成，各个相的分布特征和量的比值，相界面的润湿性，液流速度，介质的温度和pH值，地层水的稳定性，水中溶解气的影响等等。

因此，油管的腐蚀和机械磨损是由多种因素造成的。许多文献已就单个因素与设备腐蚀和机械磨损程度的关系进行了研究。其中包括：钢材的腐蚀速度、摩擦面、液流速度、滑动件通过的总长度以及时间等。但是对上述因素的综合作用仍没有进行研究。换句话说，上述试验方法是单因素试验

方法, 假定多数变量(因素)不变, 是不正确的。

为了查明油管工作特性与机械和物理-化学诸因素的关系, 我们选用多级积算模型的分组计算变量的概算法^[23]。这种方法与其它数理统计方法相比, 在原始数据较少的情况下具有较高的准确性。

根据所进行的关于测定钢材在油气水介质中腐蚀速度的室内研究及油管工作状况的分析, 整理出了四组原始数据^[23]。经计算机处理后, 得出油管钢材的腐蚀和腐蚀-机械磨损的物理模式。

1. 45*钢在油气水体系内(水为碳酸氢钠型)的腐蚀速度 y [g/(cm²·h)]:

$$y = 0.06441 \frac{x_9 \sqrt{x_6 x_7}}{\sqrt{x_{12}}} + 1.564 \frac{1}{\sqrt{x_{10}}} - 0.1402 \frac{\sqrt{x_{11}}}{\sqrt{x_7 x_8}} - 2.611 \frac{\sqrt{x_{10}}}{x_2 \sqrt{x_7}} + 0.0343 \frac{\sqrt{x_1 x_3 x_8}}{x_6} - 1.142 \frac{\sqrt{x_3 x_{12}}}{x_6 \sqrt{x_8}}$$

2. 45*钢在油气水体系内(水为氯化钙型)的腐蚀速度 y [g/(cm²·h)]:

$$y = 0.1312 x_6 x_{12} \sqrt{x_7} + 2.601 x_8 \sqrt{x_9} - 50.9 \frac{\sqrt{x_5}}{x_8 \sqrt{x_7 x_8}} + 0.8255 \frac{1}{\sqrt{x_{10}}} - 2.968 \frac{x_8 \sqrt{x_1}}{\sqrt{x_2 x_{12}}} - 0.01705 x_{11} \sqrt{x_1 x_4 x_5}$$

3. 用杆式深井泵(阿塞拜疆石油联合公司)生产时, 油管柱的使用寿命 z (天):

$$z = 229.1 \frac{x_{15}}{\sqrt{x_{15} x_{16} x_{18}}} + 0.2924 \frac{x_{14}}{x_{17} \sqrt{x_6 x_{18}}} + 53.48 \frac{x_{13}}{\sqrt{y x_{16}}} - 1285 \frac{x_{13} \sqrt{x_{18}}}{x_{14}}$$

4. 用电潜泵(阿塞拜疆石油联合公司)生产时, 油管柱的使用寿命 z (天):

$$z = 0.03365 \frac{x_{13}^6}{\sqrt{x_{18}x_{19}}} + 7.234 \frac{x_{13}^2}{\sqrt{yx_{17}}} - 0.7678x_{13}^2 x_{18} \sqrt{x_{17}x_{19}}$$

各种因素($x_1 \sim x_{19}$)的符号意义, 大小和变化范围见表 1-1。

表 1-1 各种因素($x_1 \sim x_{19}$)的符号意义、大小和变化范围

因 素	符 号	变化范围
地层水矿化度, kg/m ³	x_1	15~160
水中氯化钠和氯化钾含量, kg/m ³	x_2	6~130
水中碳酸钠和碳酸氢钠含量, kg/m ³	x_3	0.5~11.0
水中氯化钙和氯化镁含量, kg/m ³	x_4	2~33
水中碳酸钙和碳酸镁含量, kg/m ³	x_5	0.1~2.5
pH值	x_6	4.7~8.6
硫化氢浓度, g/m ³	x_7	1~800
介质温度, °C	x_8	20~100
液流速度, m/s	x_9	0.05~1.5
体系内原油含量, %	x_{10}	1~70
金属表面与原油的润湿系数(作为原油和水中有机酸百分含量的乘积来确定的)	x_{11}	0.01~15.0

续表

因 素	符号	变化范围
地层水的稳定系数(介质pH值的变化与pH _{н.в.} 之比 ^[30])	x ₁₂	0.6~1.4
油管壁厚, mm	x ₁₃	4~7
油管外径与抽油杆接箍直径之比	x ₁₄	1.1~1.9
光杆冲程长度与冲数的乘积, m/min	x ₁₅	3~35
泵挂深度, m	x ₁₆	140~1300
产液中机械杂质的含量, kg/m ³	x ₁₇	0.001~10
井筒曲率, rad/m	x ₁₈	0.00001~0.002
腐蚀速度, g/(m ² ·h)	y	0.001~3

注: 井筒曲率按作者推导的公式计算:

$$x_{18} = \frac{1}{l} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\delta_1\delta_2\cos\Delta\beta} \quad \text{①}$$

式中 l ——沿井筒轴线所取分析段的长度;

δ_1, δ_2 ——分别为分析段始端和末端的曲率;

$\Delta\beta$ ——分析段始端和末端的油井方位差。

根据上述所得出的公式, 知道产液的化学组成及油井生产参数, 我们就可以精确地求出油管的腐蚀速度, 以确定油管柱的使用寿命, 并以此安排更换计划等。

值得注意的是, 上述所得出的公式具有很高的相关系数(0.87~0.97), 平均均方误差范围为3~6%。文献[23]对这一问题进行了较详细的报导。

①式中 σ_1 和 σ_2 疑为 δ_1 和 δ_2 之误。——译者

第二章 液珠和气泡在流体中的运动

在一般情况下，即使雷诺数很小($Re \ll 1$)，液珠的运动也不遵循著名的斯托克斯(CTOKC)公式，该公式适用于固体球运动。这是由于在两种介质(液珠和周围介质)的界面，切线分速度仍然存在，而在固体球的界面，周围介质的切线分速度等于零。

已推导出的液珠运动速度方程^[11]：

$$v = \frac{(\rho' - \rho)gd^2}{18\mu} \frac{3(\mu + \mu')}{2\mu + 3\mu'} \quad (\rho' > \rho) \quad (2-1)$$

式中 ρ 和 μ —— 分别为液体介质的密度和粘度；

d —— 液体介质内运动的液珠的直径；

ρ' 和 μ' —— 分别为液珠的密度和粘度。

斯托克斯公式为

$$v_{CT} = (\rho' - \rho)gd^2 / (18\mu) \quad (2-2)$$

式(2-1)仍包含斯托克斯公式。

显然， $v > v_{CT}$ 。在 μ' 比 μ 大得多的情况下， $v \approx v_{CT}$ 。对于固体壁来说，可以认为 $v = v_{CT}$ ，这也适合于固体球降落斯托克斯公式($Re \ll 1$)。

测定水银珠在润滑油中下落速度的某些试验数据与公式(2-1)所推导出的水动力学理论相抵触，其它更详细的试验资料表明，如果液珠表面不存在表面活性物质，那么，这种

液珠的下落速度与根据公式(2-1)的计算结果相一致。在液珠含有表面活性物质时使其下落速度减缓,这种情况对小液珠来说是正确的。在液珠直径较大的情况下,表面活性物质不能保持在其表面上,而是流到其下部,相对表面的移动形成了适合于公式(2-1)的条件,因此,存在表面活性物质时,较小的液珠可以利用斯托克斯公式(2-2)进行计算;而对较大的液珠,在任何情况下($Re \ll 1$),公式(2-1)应能给出比较满意的结果。

下面给出考虑表面张力影响, 计算液珠降落速度的更加通用的公式^[14]:

$$u = \frac{(\rho' - \rho)gd^2}{18\mu} \frac{3(\mu + \mu' + \frac{4e}{3d})}{(2\mu + 3\mu' + \frac{4e}{d})} \quad (2-3)$$

式中 e ——表面张力与液体表面变化速率之比。

从公式(2-3)可以得出,在 $d \rightarrow 0$ 时, v 趋近于 v_{0r} ,这与上述在液珠小时就可以利用斯托克斯公式(2-2)相一致,不管其表面是否存在表面活性物质。

如上所述是指 $Re \ll 1$ 的情况。对于雷诺数 $Re \ll 1$,并考虑了液珠-介质界面的运动公式已为我们所熟知,当 $Re \ll 1$ 时,可以利用下述公式近似地求出阻力 P ($0 < Re < 1000$):

$$P = C \frac{\pi d^2}{8} \rho v^2 = (0.4 + \frac{24}{Re}) \frac{\pi d^2}{8} \rho v^2 \quad (2-4)$$

式中雷诺数 $Re = dv\rho/\mu$ 。

根据已知的阻力 P ,可以求得运动速度 v 。例如,对于在液体(或气体)介质中下落的球体

$$P = (\rho' - \rho)g \frac{\pi d^3}{6} \quad (2-5)$$

如果把液球看作是固体球，那么在 $Re \rightarrow 0$ 时计算下落速度，我们就可以得到斯托克斯公式。

为了求得阻力系数 C ，也可以利用文献〔27〕所提供的该系数的经验公式，但这时与公式(2-4)的计算结果略有出入。

下面研究气泡在液体中的运动。显然对于很小的气泡来说，可以利用公式(2-4)进行计算，这时取 $Re < 2$ 〔12〕。对于大的气泡来说，问题较为复杂，因为这时气泡不呈球形。

非球形气泡(由于变形)有三种不同的运动情况〔12〕：

1. 具有扁平形状，而表面脉动的球形气泡运动范围：

$$v = 0.33 \frac{g^{0.78}}{\nu^{0.52}} r^{1.28} \quad (2-6)$$

$$v = \mu' / \rho, r = d/2$$

2. 具有扁平，而表面相对稳定的气泡运动范围：

$$\delta = 1.35 \left(\frac{\sigma}{r(\rho' - \rho)} \right)^{0.5} \quad (2-7)$$

3. 极普遍的蘑菇状气泡运动范围：

$$v = \left(\frac{4\sigma g(\rho' - \rho)}{\xi^2 \rho'^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2-8)$$

式中 σ ——表面张力；

ξ ——摩擦系数；

μ, ρ ——表示重质相的粘度和密度。

各范围的界限用无量纲基准数 A 确定，

$$A = \frac{\sigma^{3/2}}{\mu'^2 g^{1/2}} \frac{\rho'}{\sqrt{\rho' - \rho}} \quad (2-9)$$

对于第一种范围 $2 < Re < 4A^{0.42}$, (2-10)

$$\text{对于第二种范围 } 4A^{0.42} < Re < 3A^{0.5} \quad (2-11)$$

$$\text{对于第三种范围 } Re > 3A^{0.5} \quad (2-12)$$

系数 ξ 近似地取为1。文献〔7〕认为，在 $Re < 2$ 时可应用斯托克斯公式。

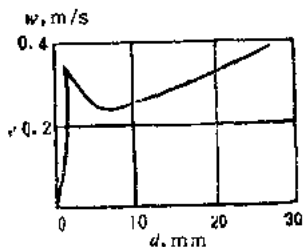


图 2-1 气泡上浮速度
 w 与其直径 d 的关系曲线

图2-1 为根据单个空气泡在水中，当压力为0.1MPa时，上浮速度 $w = v$ 的经验数据绘制的曲线〔15〕。从图中可以看出，这种关系为复杂的复函数曲线。同时，气泡的直径在研究范围约为 $0.5 < d < 30\text{mm}$ 内，其上浮速度不超过0.4m/s。当气泡的直径 d

接近1.5~2.0mm时，其上浮速度 v 最大。在气泡直径 d 为1.5~30mm这种较大的范围内，速度 v 的变化范围为0.2~0.4m/s。

上述曲线仅表示气泡上浮速度值的范围，可以估算各种分离装置中气泡的运动速度(特别是抽油井的气锁中)。

下面研究最大直径 d 的气泡以速度 v 在液体中的运动问题。在 $d > d_k$ 时，气泡开始破裂。破裂的机理如下：如果与 ρv^2 成正比例的外部介质的动压头超过毛细管力 σ/R (R ——气泡的曲率半径)，气泡即发生变形，以至破裂。在气泡薄膜破裂时，可以认为其呈椭圆形。略去推导步骤，直接列出所求直径的最终公式：

$$\frac{d\rho v^2}{\sigma} \sim 3.5 \left(\frac{\rho}{\rho'} \right)^{1/3} \quad (2-13)$$

式中 ρ' ——气泡内的气体密度，
 ρ ——液体密度。