

升举法采油工艺

卷 四

用节点分析法
使油气井最佳化生产

〔美〕K.E.布朗 主编

石油工业出版社

TF=355
002-4

• 071232

升 举 法 采 油 工 艺

卷 四

用节点分析法使油气井最佳化生产

[美] K. E. 布德 主编

孙学龙等 译 王德民 校



石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是四卷六册的巨著,这是卷四,也就是这套巨著的最后一册,全书系统地总结了现代采油工艺(包括自喷井、气举井及各种采油井)的技术理论、实用方法和工艺设施。

本册介绍了自喷井和人工举升油气井正确设计和最佳化生产的最新资料,从分离器开始,对原油生产系统中的每个因素都进行了评价,对节油管线、油嘴、油管安全阀、井中的各种节流、升举方法、完井程序、井的产能、油藏动态、水锥和水窜等问题进行了反复解释和详细举例说明,并把这些因素综合考虑,使整个生产系统最佳化。

本书既适用于采油工艺研究人员,也是现场采油工程技术人员、石油院校师生的一套理想参考书。

本书由孙学龙(第一~三章)、王晓屏(第四章)、许柯(第五章)、王环(第六章)和孙战(第七章)翻译,全书由王德民校订。

THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS

Volume 4

Kermit E. Brown

Penn Well Publishing Company

Tulsa, Oklahoma, 1984

升举法采油工艺

卷四

用节点分析法使油气井最佳化生产

[美] K. E. 布朗 主编

孙学龙等 译 王德民 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 41印张 1079千字 印1-2,500

1990年1月北京第1版 1990年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0226-4/TE·222

定价: 14.70元

前 言

本书为《升举法采油工艺》卷四(第六册),其名字为“用节点分析法使油、气井最佳化生产”。书中提供了自喷和人工升举油气井正确设计和最佳化生产的最新资料。从分离器开始,对原油生产系统中的每一个因素都进行了评价。这些因素有:节油管线、油嘴、油管安全阀、井中的各种节流、人工升举方法、完井程序(裸眼井、射孔井或砾石充填井)、井的产能和油藏平均压力等。未来的油藏动态,象水窜和水锥等也都包括在内。书中对上述因素都做了反复解释和详细举例说明。最后,把这些因素综合考虑,使整个生产系统最佳化。

整个系统举例,象海底完井也包括在内。书中参考了大量以前出版的书籍和资料。对于允许我使用他们的资料的社会各界人士、石油出版社和众多的个人表示衷心地感谢。

本书是多人参加,集体劳动的结晶。在这里,我愿感谢对本书做出贡献的每一个人。同时,感谢他们所在的公司,在时间上给他们提供了方便。下面是每章的作者及他们所在公司:

第二章 流入特性

Mr. Pudjo Sukarno, Ph. D. Candidate, University of Tulsa

Dr. Jim Lea, Amoco Production Research

第三章 多相管流

Dr. Zelimar Schmidt, University of Tulsa

Dr. Dale R. Doty, University of Tulsa

第四章 节点系统分析

Dr. Dale R. Doty, University of Tulsa

Mr. Carl Granger, Flopetrol-Johnston/Schlumberger

Mr. Joe Mach, Flopetrol-Johnston/Schlumberger

Mr. Lewis Ledlow, Conoco

Mr. Eduardo Proano, Flopetrol-Johnston/Schlumberger

Dr. Zelimar Schmidt, University of Tulsa

Dr. A. Paul Szilas, University of Miskolc (Hungary)

第五章 人工举升

Mr. Bashir Agha, Ph. D. candidate, University of Tulsa

第六章 气井负载

Dr. Jim Lea, Amoco Production Research

Mr. Bob Tighe, Amoco Production Research

第七章 水锥与指进

Dr. Roterto Aguilera, Consultants Ltd.

Mr. Luis Acevedo, Consultants Ltd.

另外,对于为第五章气举准备敏感性图表的 Himanta Murkejee 博士、帮助打字的 Betty Finnegan 和 Nelda Whipple 以及精细绘制曲线的 Laura Passiglia 表示衷心地感谢。

本书附录中有大量的压力曲线,供解例题和习题时参考。卷三(上)和卷三(下)中包括世界上任何类型井的曲线。卷一中详细地讲解了多相流。卷二(上)和卷二(下)中详细简述了所有人工举升方法。本卷不能取代其它几卷中的任何一册。它是一本单独介绍最佳生产方法的大学教科书,或者是为生产第一线石油工程师提供的教科书。

好了,就介绍上面这些吧!现在我在考虑出一本长篇小说,并试图能列入畅销书单之中。我已经有剧情了,但没有时间。

此书能得以出版,还应感谢我的家庭,特别是 Katherine (我的终生伴侣),是他们给了我勇气、耐心和友爱。

很显然,还有一些其它资料应包括在本卷中,但这是不可能的。正如已故 Carl Gatlin 博士说过的一样:“谁要是想在他出版的书中囊括所有最新的资料,那么他的这本书永远也不会得到出版。”

最后,对 Penn Well 出版公司中,所有为此书的出版积极努力工作的人员,表示衷心地感谢。

K. E. 布朗

表 5.9 泵最大尺寸 (据布朗、戴和伯德)^[7]

泵类型	油管尺寸			
	1.900	2 ³ / ₈	2 ⁷ / ₈	3 ¹ / ₂
与油管成一体, 薄壁筒 (TW)	1 ¹ / ₂	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄	2 ³ / ₄
与油管成一体, 厚壁筒 (TH)	1 ¹ / ₂	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄	2 ³ / ₄
油管衬筒 (TL)	—	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄	2 ³ / ₄
与杆成一体, 薄壁筒 (RW)	1 ¹ / ₄	1 ¹ / ₂	2	2 ¹ / ₂
与杆成一体, 厚壁筒 (RH)	1 ¹ / ₁₆	1 ¹ / ₄	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄
杆衬筒 (RL)	—	1 ¹ / ₄	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄

表 5.10 抽油杆数据 (布朗、戴和伯德提供)^[7]

1	2	3	4
杆尺寸	金属面积英寸 ²	空气中杆重磅/英尺	弹性常数英寸/磅·英尺 E _r
1/2	0.196	0.72	1.990 × 10 ⁻⁶
5/8	0.307	1.13	1.270 × 10 ⁻⁶
3/4	0.442	1.63	0.883 × 10 ⁻⁶
7/8	0.601	2.22	0.649 × 10 ⁻⁶
1	0.785	2.90	0.497 × 10 ⁻⁶
1 ¹ / ₈	0.994	3.67	0.393 × 10 ⁻⁶

S_p ——柱塞有效冲程, 英寸 ;

N ——泵速, 冲次/分。

如果泵的常数确定为下式:

$$K = 0.1484A_p \quad (5.115)$$

则对于一定柱塞尺寸和在一定的泵送速度和冲程下, 泵的理论排量可由下式确定:

$$V = K S_p N \quad (5.116)$$

柱塞的有效冲程大约是地面冲程的 80%。这样, 上述方程可写成:

$$V = 0.8 K S N \quad (5.117)$$

式中 S 是地面冲程, 用英寸表示:

泵的理论排量 V 系指采出流体的体积 (液加气)。它是根据方程 5.4 在吸入压力下确定的。在泵送略具压缩性流体时, 比如液体可将其视为与地面产量相同并恒定不变。

5. 泵送过程 (周期)。图 5.69 表示在一个泵送过程中各个不同阶段的示意图。该周期适于油管式泵、杆式或套管式泵。

6. 柱塞下移。在图 5.69 中, 柱塞下落靠近冲程底部。流体经由开启的游动阀上移, 而流体柱的重量则由固定阀支撑, 因此, 固定阀关闭。

宁德 (Nind) 发现^[8], 促使抽油杆柱负荷增加的向下加速度的最大值, 在冲程底部附近。该值可由下式求得:

$$\alpha_1 = \frac{SN^2}{70\,500} (1 \pm c/p) \quad (5.118)$$

式中加号适用于普通装置，而减号适用于空气或 Mark 2 号装置， c/p 则是曲柄与拉杆比。

如假设在柱塞下移加速度达到最大值的瞬间，游动阀关闭而固定阀开启，与此同时，由于力的平衡，使光杆负荷达到最高值。

$$\begin{aligned} \text{PPRL} = & (\text{流体液柱重}) + (\text{柱塞重}) \\ & + (\text{杆重}) + (\text{加速度因素}) \\ & + (\text{摩阻因素}) - (\text{由下部对} \\ & \quad \text{柱塞造成的上冲力}) \end{aligned}$$

摩阻因素和柱塞重与其它条件相比较小，所以可忽略不计。由下部对柱塞造成的上冲力即采出流体的压力乘以柱塞面积，因此：

$$\text{PPRL} = \frac{62.4\gamma_f D_p (A_p - A_r)}{144} + W_r + \alpha_1 W_r - P_3 A_p \quad (5.119)$$

$$\text{或} \quad \text{PPRL} = \frac{62.4\gamma_f D_p A_p}{144} - \frac{62.4\gamma_f D_p A_r}{144} + W_r + \alpha_1 W_r - P_3 A_p \quad (5.120)$$

式中 p_3 即指泵吸入压力（见图 5.69）

方程右侧第一项是在整个柱塞面积上的流体负荷，用 W_r 表示：

$$W_r = \frac{62.4}{144} \gamma_f D_p A_p = 0.433 \gamma_f D_p A_p \quad (5.121)$$

第二项是抽油杆承受的浮力。该条件可写成：

$$F_b = \left(\frac{62.4\gamma_f}{\rho_s} \right) \left(\frac{D_p A_r \rho_s}{144} \right) = \frac{62.4\gamma_f}{490} W_r = 0.1273 \gamma_f W_r \quad (5.122)$$

式中 ρ_s 是钢材的密度（490 磅 / 英寸³）。

浮力实际是表示光杆最大负荷这一表达式中的负值项（见方程式 5.120）。因此，为了留有余地，应选取该项最低值^[8]。API 重度为 50 的原油，其相对密度为 0.78，在此情况下， $0.1273\gamma_f$ 等于 0.1。因此：

$$F_b = 0.1 W_r \quad (5.123)$$

将方程 5.121 和 5.123 代入方程 5.120，可得到：

$$\text{PPRL} = W_r + 0.9 W_r + \alpha_1 W_r - p_3 A_p \quad (5.124)$$

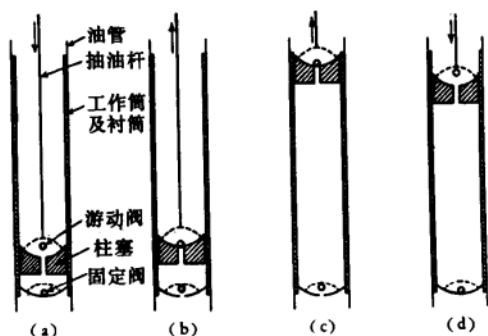


图 5.69 抽油循环（据宁德^[8]）：(a) 柱塞下落，接近冲程底部；(b) 柱塞上移，接近冲程底部；(c) 柱塞上移，接近冲程顶部；(d) 柱塞下落，接近冲程顶部。

7. 柱塞上移。在图 5.69b 中, 柱塞是在靠近冲程底部的位置上移。游动阀因此关闭而固定阀开启。流体柱造成的负荷由杆柱支撑。

宁德还发现, 可以降低对抽油杆柱造成的负荷的向上加速度的最高值是在冲程顶部附近。该值可由下式求出:

$$\alpha_2 = \frac{SN^2}{70\,500} (1 \mp c/p) \quad (5.125)$$

式中减号适于普通装置, 而加号适于空气或 Mark 2 号装置。

假设在上移加速度达到最高值的瞬时, 游动阀开启而固定阀关闭, 那么, 与此同时, 由于力平衡, 会使光杆负荷降到最低^[8]。

$$\text{MPRL} = (\text{杆重}) + (\text{柱塞重}) - (\text{摩阻}) - (\text{加速度条件}) - (\text{浮力条件})$$

如前所述, 柱塞重量和摩阻项可忽略不计。浮力由方程 5.123 求出。因此,

$$\text{MPRL} = W_r - 0.1W_r - \alpha_2 W_r = 0.9W_r - \alpha_2 W_r \quad (5.126)$$

8. 泵尺寸。泵的尺寸(柱塞)直接受油管或套管尺寸及预定产量的限制。如果打算使一口井的产量达到最高值, 则应采用最大尺寸的柱塞(见表 5.9)。但是, 如果柱塞尺寸选得过大, 便会对设备施加不必要的过高负荷; 而柱塞本身的行程不足也会使其工作效率降低。但相反, 如果柱塞尺寸选得过小, 泵送速度可能会过高, 因此, 由于增加的加速度的影响, 须会使设备的最高负荷增加^[7]。

5.62 泵吸入曲线

5.621 简介

预测游梁泵的吸入曲线, 主要考虑了两种情况: (1) 只泵送液体; (2) 气体与液体一起泵送。对于这两种情况, 都是假设泵下在井底并且流体流路(油管式套管)尺寸、泵尺寸、抽油杆柱及曲柄与拉杆比都是固定不变的。对于第二种情况是假定所有伴生气是与液体一起泵送的。

为游梁举升系统所选择的数据参数, 实质是泵速与冲程长度的综合参数。

解方程 5.124 求 p_3 , 可得到:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} [W_r + 0.9W_r + \alpha_1 W_r - \text{PPRL}] \quad (5.127)$$

在方程 5.127 中, 间接地表示出了 p_3 和 V 之间的关系。将 PPRL 和 α_1 的数值代入该方程, 可明显地表示出 p_3 和 V 的关系。将方程 5.112 代入方程 5.110, 得到:

$$\text{PPRL} = \frac{T}{4} \text{SF} A_{tr} + 0.5625 \text{SF} A_{tr} \sigma_{\min} \quad (5.128)$$

将方程 5.126 代入方程 5.111, 得到:

$$\sigma_{\min} = \frac{0.9W_r}{A_{tr}} - \frac{W_r}{A_{tr}} \alpha_2 \quad (5.129)$$

将方程 5.125 代入上面的方程, 可得到:

$$\sigma_{\min} = \frac{0.9W_r}{A_{ir}} - \frac{W_r}{A_{ir}} \frac{SN^2}{70\ 500} (1 \mp c/p) \quad (5.130)$$

将方程 5.130 代入方程 5.128, 得到:

$$PPRL = \frac{T}{4} SF A_{ir} + 0.5063SF W_r - 0.5625SF W_r \frac{SN^2}{70\ 500} (1 \mp c/p) \quad (5.131)$$

将由方程 5.131 求得的 PPRL 值和由方程 5.118 求得的 α_1 值代入方程 5.127, 并经一些代数运算, 可得到:

$$P_3 = \frac{1}{A_p} \left[W_r + (0.9 - 0.5063SF)W_r - \frac{T}{4} SF A_{ir} \right] + \frac{W_r SN^2}{70\ 500 A_p} [1 + 0.5625SF \pm (1 - 0.5625SF)c/p] \quad (5.132)$$

式中加号适用于普通装置而减号适于空气或 Mark 2 号装置。

方程 5.132 中的 SN^2 可写成:

$$SN^2 = \frac{(0.8KSN)N}{0.8K} \quad (5.133)$$

但 $(0.8KSN)$ 等于采出流体的体积 V (见方程 5.117), 因此

$$SN^2 = \frac{N}{0.8K} V \quad (5.134)$$

将方程 5.134 代入方程 5.132, 得到

$$P_3 = \frac{1}{A_p} \left[W_r + (0.9 - 0.5063SF)W_r - \frac{T}{4} SF A_{ir} \right] + \frac{W_r N}{56\ 400KA_p} [1 + 0.5625SF \pm (1 - 0.5625SF)c/p] V \quad (5.135)$$

方程 5.135 可写成:

$$p_3 = a + bV \quad (5.136)$$

式中

$$a = \frac{1}{A_p} \left[W_r + (0.9 - 0.5063SF)W_r - \frac{T}{4} SFA_{ir} \right] \quad (5.137)$$

$$b = \frac{W_r N}{56\ 400KA_p} [1 + 0.5625SF \pm (1 - 0.5625SF)c/p] \quad (5.138)$$

SN^2 也可写成:

$$SN^2 = \frac{(0.8KSN)^2}{(0.8K)^2 S} = \frac{V^2}{(0.8K)^2 S} \quad (5.139)$$

将上述 SN^2 值代入方程 5.132, 然后按方程 5.136 的格式, 写出所得方程:

$$p_3 = a + cV^2$$

式中 a 由方程 5.137 求得, c 由下式求得, 即

$$c = \frac{W_r}{45 \cdot 120K^2 A_p S} [1 + 0.5625SF \pm (1 - 0.5625SF)c/p] \quad (5.141)$$

在上述假设条件下, a 是个常数。对于每个固定的 N 值, b 也是常数。在此情况下, 方程 5.136 则是线性方程, 而 c 对于每个固定的 S 值也是常数。既然如此, 方程 5.140 则是二次方程。应该指出, 在 N 值固定时, 方程 5.136 中 V 的变化只意味着 S 的变化, 因此, 可以确定 p_3 是 S 的线性函数, 斜率等于 $(0.8KNb)$, 截据等于 a 。相反当 S 固定时, 方程 5.140 中 V 的变化只意味着 N 的变化, 因此, 可以确定 p_3 是 N 的二次函数。

所以, 对于每一假设的 N 值, 都存在着 p_3 与 V 的直线型关系。同样, 对于每一假设的 S 值, 也存在着二次方的关系。如果将直线关系式或二次方曲线按相同刻度绘在绘有 IPR 曲线的同一图上, 它们同 IPR 曲线的交点则表示可能的产量。

最低的允许吸入压力 (或最大允许产量) 可根据以下条件确定, 即顶部抽油杆的最大应力不得超过所使用抽油杆钢号的允许应力。将方程 5.116 代入方程 5.115, 可得到:

$$\sigma_{\max} = \frac{PPRL}{A_{tr}} \leq \sigma_a \quad (5.142)$$

或

$$PPRL \leq \sigma_a A_{tr} \quad (5.143)$$

将方程 5.131 代入上述不等式:

$$\frac{T}{4} SF A_{tr} + 0.5063SF W_r - 0.5625SF W_r \frac{SN^2}{70 \cdot 500} (1 \pm c/p) \leq \sigma_a A_{tr}$$

或

$$SN^2 \geq \frac{70 \cdot 500}{0.5625SF W_r (1 \pm c/p)} \left[\left(\frac{T}{4} SF - \sigma_a \right) A_{tr} + 0.5063SF W_r \right] \quad (5.144)$$

式中减号适用于普通装置, 而加号适于空气或 Mark 2 号装置。

由不等式 5.144 可知 SN^2 的最小允许值, 如果将其代入方程 5.132, 可求出最低允许吸入压力。

5.622 抽油杆式泵油管吸入曲线的标绘步骤 (只泵送液体)

对于抽油杆泵, 其油管吸入曲线的标绘步骤确实很复杂, 很难有确切的解法。为了废弃在被认为确实完全正确再出版的被推荐的原则, 特拟写本节, 以便使其它人通过进行 API 计算等方法继续此项工作。这里列出我们的解法。

由于液体只是稍具可压缩性, 所以方程 5.136 和 5.140 的 V 值可由地面产量 q_{sc} 代替, 即:

$$p_3 = a + b q_{sc} \quad (5.145)$$

$$p_3 = a + c q_{sc} \quad (5.146)$$

另外, γ_r 可视为等于在标准条件下的值:

$$\gamma_{fc} = wc \gamma_{wc} + (1 - wc) \gamma_{osc} \quad (5.147)$$

吸入曲线的标绘步骤如下:

- (1) 确定地面抽油装置的类型 (普通、空气, Mark 2 号装置等)。
- (2) 选择泵尺寸、抽油杆柱及 c/p 比。
- (3) 计算 A_p 、 K 和 W_r 。由方程 5.147 确定 γ_r , 然后根据方程 5.121 计算 W_r 。
- (4) 由方程 5.137 计算 a 。由方程 5.138 计算作为 N 的函数的 b , 由方程 5.141 计算作为 S 的函数的 c 。
- (5) 假设泵的不同速度, 对于每一种假设的速度, 计算 b ; 然后根据方程 5.145 给出的 p_3 和 q_{sc} 的值, 绘出二者关系曲线。
- (6) 假设各种冲程长度、对于每种冲程长度, 计算出 c 值; 然后根据方程 5.146 给出的值, 绘出 p_3 与 q_{sc} 的关系曲线。
- (7) 绘出标准桶液 / 日 IPR 曲线。
- 注: 上面第 5、6、7 步中的曲线应该按相同比例绘在同一图上。
- (8) 确定适合所用抽油杆钢号的最大允许应力; 然后根据方程 5.144 计算 SN^2 的最小允许值。根据方程 5.132, 用 SN^2 的这一值来计算出最低允许吸入压力。将这一 p_3 值 (平行值) 标在第 5、6 和 7 步绘出的曲线图上。
- (9) 读出泵吸入曲线 (第 5 步中的直线或第 6 步中的二次方曲线) 与 IPR 曲线的交点的产量数。读出最低允许吸入压力与 IPR 曲线交点的最高允许产量。
- (10) 绘出产量与 S 和 N 的关系曲线。并在同一图上标出最高允许产量。
- (11) 选择合适的产量。

例题 (1 号井) (只泵送液体)

井的流体和油层数据列在表 5.1 中。配备地面普通抽油装置的插入式泵下在井底。采用 API D 级钢号的锥型抽油杆柱。在附录 5 中对 100% 注气百分比的 VF 进行了计算 (表 5A.1)。图 5.8 中表示出了标准桶液 / 日 IPR 曲线和桶 / 日 IPR 曲线。结果表示在图 5.70 和 5.71 中。

假设泵下在井底, 并且泵尺寸、油管尺寸、抽油杆管柱及曲柄与拉杆比都是固定的。

为了得到最高产量, 应使用最大的可能栓塞。对于 $2\frac{7}{8}$ 英寸油管及配有薄壁工作桶的插入式泵, 图 5.9 介绍了 2 英寸柱塞。因此:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (2)^2 = 3.1416 \text{ 英寸}^2$$

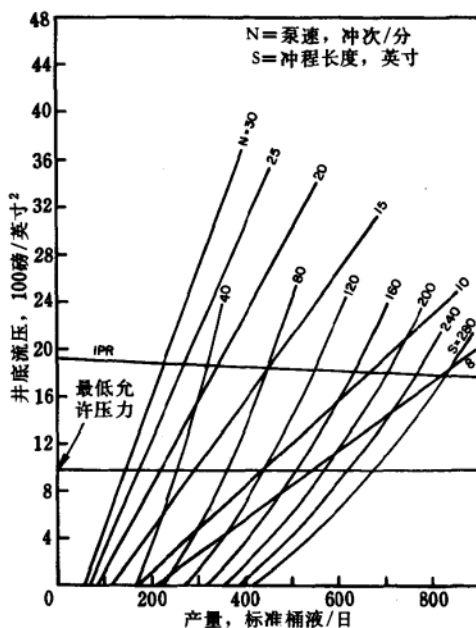


图 5.70 1 号井游梁泵的吸入曲线 (泵送液体)

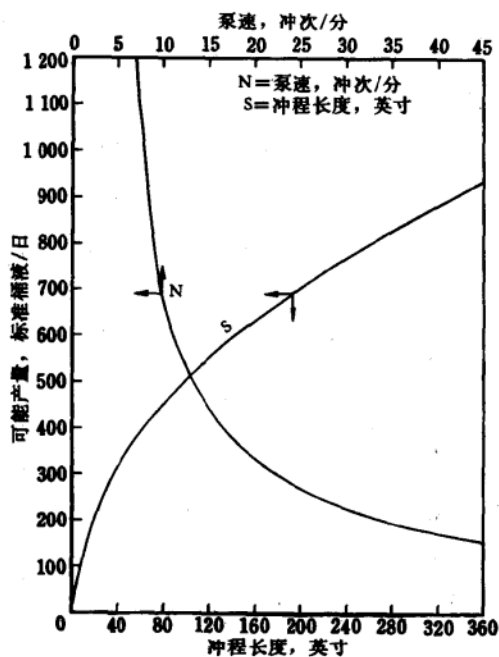


图 5.71 1 号井游梁泵抽油的可能产量与泵速和冲程长度的关系曲线 (泵送液体)

由方程 5.115, 可得到:

$$K = (0.1484)(3.1416) = 0.4662$$

对于 86 号抽油杆和 2 英寸柱塞, 表 5.7 介绍了 1 英寸抽油杆占 32.8% 7/8 英寸占 33.2% 及 3/4 英寸占 34%。这些抽油杆分别重 2.9、2.22 和 1.63 磅/英尺 (见表 5.10)。因此:

$$W_r = 8\,000 (0.328 \times 2.9 + 0.332 \times 2.22 + 0.34 \times 1.63) = 17\,940 \text{ 磅}$$

由于水是同油一起采出的, 所以采用大约 0.9 的使用系数。(见表 5.8) 因此, 由方程 5.138 可得到:

$$b = \frac{17\,940N}{(56\,400)(0.4662)(3.1416)} [1 + (0.5625)(0.9) + (1 - 0.5625 \times 0.9)(0.33)] = 0.3625N \quad (5.148)$$

由方程 5.141 可得到:

$$c = \frac{17\,940}{(45\,120)(0.4662)^2(3.1416)S} [1 + (0.5625)(0.9) + (1 - 0.5625 \times 0.9)(0.33)] = 0.972/S \quad (5.149)$$

由于 1 英寸抽油杆置于顶部：

$$A_{tr} = \frac{\pi}{r} (1)^2 = 0.7854 \text{ 英寸}^2$$

因此，由方程 5.137 可得到：

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{3.1416} \left[W_r + (0.9 - 0.5063 \times 0.9)(17\,940) - \frac{(11.5 \times 10^4)}{4} (0.9)(0.7854) \right] \\ &= \frac{1}{3.1416} (W_r - 12\,351) \end{aligned} \quad (5.150)$$

由于泵下在井底，所以泵的吸入压力等于井底流压，因此，图 5.8 所示标准桶液 / 日 IPR 曲线是适用的：

$$\gamma_{osc} = \frac{141.5}{131.5 + 35} = 0.8498$$

于是，由方程 5.147 可得到：

$$\gamma_{isc} = (0.5)(1.074) + (0.5)(0.8498) = 0.9619$$

由方程 5.121 可得到：

$$W_r = (0.433)(0.9619)(8\,000)(3.1416) = 10\,468 \text{ 磅}$$

然后，由方程 5.150 可得到：

$$a = \frac{1}{3.1416} (10\,468 - 12\,351) = -600 \text{ 磅 / 英寸}^2$$

将方程 5.148 求出的 b 值代入方程 5.145，可得到：

$$P_3 = -600 + (0.3625N)q_w \quad (5.151)$$

将方程 5.149 求出的 c 值代入方程 5.146，可得到：

$$P_3 = -600 + \left(\frac{0.972}{S} \right) q_w^2 \quad (5.152)$$

通过假设出 q_w 值，可由方程 5.151 确定出在任何假设 N (泵速) 值条件下的吸入压力，或可由方程 5.152 确定出在任何假设 S 值条件下的吸入压力。将这些方程按相同比例绘在图 5.70 中。标准桶液 / 日 IPR 曲线也按相同比例绘在同一图上。直线代表方程 5.151，而

二次曲线代表方程 5.152。注意：直线和二次曲线应源于相同的 600 磅/英寸²的截距。

如果抽油杆的最大允许应力取为 35 000 磅，那么由不等式 5.144 可得到：

$$SN^2 \geq 11\,678$$

将 SN^2 值代入方程 5.132 可得到：

$$p_3 \geq 980 \text{ 磅/英寸}^2$$

将 p_3 的限制值标在图 5.70 上（水平线）。在井底流压为 980 磅/英寸²时，IPR 曲线表明产量为 4 350 标准桶液/日（见图 5.8）。因此，泵应该在最低吸入压力为 980 磅/英寸²和最高产量为 4 350 标准桶液/日的范围内的任何一处运转。

产量由泵吸入曲线（直线或二次曲线）与 IPR 曲线的交点表示。比如，一口井可采用 228 标准桶液/日、泵速为 30 冲程/分（图 5.70）。在这一产量下所需冲程长度可直接由图 5.70 中读出，或者由方程 5.117 或 5.152 计算。采用方程 5.117 ($V=q_x$)，可得到：

$$S = \frac{228}{(0.8)(0.4662)(30)} = 20.38 \text{ 英寸}$$

对于其它可能的产量所需冲程长度表示在表 5A.33 中。将可能产量 q_p 与 N 和 S 之比的关系曲线绘在图 5.71 中。由图可明显地看出，冲程长度及泵速在高产量的情况下便不现实了。如果冲程长度限定在 180 英寸的实用值，便可得到 668 标准桶液/日的产量（图 5.71）。为达此产量：

$$N = \frac{668}{(0.8)(0.4662)(180)} = 10 \text{ spm} \quad (\text{方程 5.117})$$

$$\alpha_1 = \frac{(180)(10)^2}{70\,500} (1 + 0.33) = 0.3396 \text{ 英尺/秒}^2 \quad (\text{方程 5.118})$$

$$\alpha_2 = \frac{(180)(10)^2}{70\,500} (1 - 0.33) = 0.1711 \text{ 英尺/秒}^2 \quad (\text{方程 5.125})$$

$$P_3 = 1\,800 \text{ 磅/英寸}^2 \text{ (IPR 曲线)}$$

$$PPRL = 10\,468 + (0.9 + 0.3396)(17\,940) - (1\,800)(3.1416) = 27\,052 \text{ 磅}$$

由此

$$\sigma_{\max} = \frac{27\,052}{0.7854} = 34\,443 \text{ psi (Eq. 5.110)}$$

由方程 5.126 可得到：

$$MPRL = (0.9 - 0.1711)(17\,940) = 13\,076 \text{ lb}$$

由此

$$\sigma_{\min} = \frac{13\,076}{0.7854} = 16\,649 \text{ 磅/英寸}^2 \quad (\text{方程 5.111})$$

例题 (2 号井)(泵送液体)

油井、流体及油层的数据列在表 5.1 中。配有普通地面抽油装置的插入式泵下在井底。采用 API D 级钢材锥型抽油杆柱 (杆号 86, 列在表 5.7 中)。在附录 5 中, 对注气百分比为 100% 的 VF 进行了计算 (表 5A.2)。标准桶液 / 日 IPR 曲线和桶 / 日 IPR 曲线绘在图 5.9 中。见图 5.72 和 5.73。

本井也进行与 1 号井一样的计算。由表中可知最大可能柱塞尺寸为 1.5 英寸 (表 5.9)。对于此柱塞尺寸及 86 号抽油杆, 抽油杆柱的尺寸是 1 英寸, 占 26.8%, 7/8 英寸的占 27%, 3/4 英寸的占 46.2% (见表 5.7)。采用 0.9 的使用系数。

吸入压力与流量之间的关系, 经计算可由下式表示:

$$P_3 = -4763 + (1.0219N)q_{sc} \quad (5.153)$$

$$P_3 = -4763 + \left(\frac{4.8716}{S} \right) q_{sc}^2 \quad (5.154)$$

将这些方程按相同比例绘在图 5.72 中。标准桶液 / 日 IPR 曲线也按相同比例绘在同一图上。为达到可能产量所需要的冲程长度 (由图 5.72 可知) 列在表 5A.34 中。图 5.37 是可能产量与 S 及 N 的关系曲线图。

如果顶部抽油杆最大允许应力为 35 000 磅 / 英寸², 最低允许吸入压力则是负数。因此, 从抽油杆的应力来考虑, 油井吸入压力可降到零, 并可保证安全运转。

但是, 为了使油井吸入压力合理地下降, 则应选择 380 标准桶液 / 日的产量。为达此产量:

S = 140 英寸 (图 5.73)

N = 13 冲程 / 分 (方程 5.117)

$p_3 = 240$ 磅 / 英寸² (IPR 曲线)

PPRL = 25 914 磅 (方程 5.124)

MPRL = 10 800 磅 (方程 5.126)

$\sigma_{\max} = 32\,994$ 磅 / 英寸² (方程 5.110)

$\sigma_{\min} = 13\,751$ 磅 / 英寸² (方程 5.111)

5.623 泵送气体和液体时油井的油管吸入压力曲线的标绘

如前所述, 方程 5.136 和 5.140 中的 V 是指采出流体 (液体加气体) 量的体积。因此,

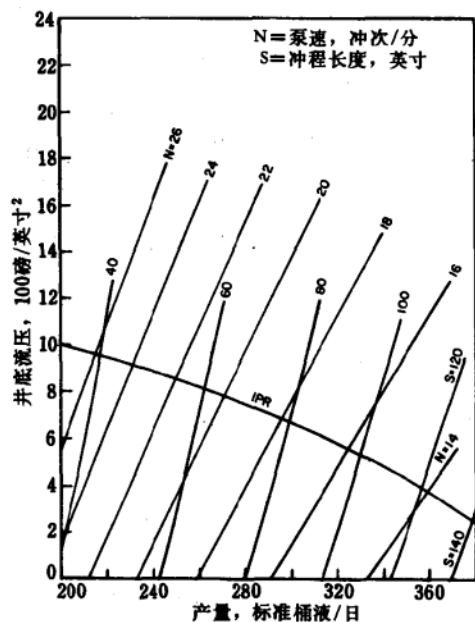


图 5.72 2 号井游梁泵的吸入曲线 (泵送液体)

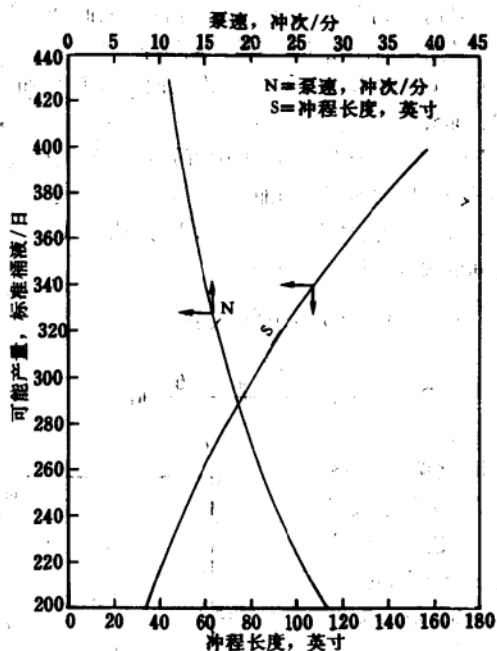


图 5.73 2号井游梁泵抽油的可能产量与泵速和冲程长度之相关曲线 (泵送液体)

在将气体与液体一起泵送时, 就不能如同只泵送液体时那样将 V 值视为常数, 而必须由方程 5.4 在吸入压力条件下确定。再者, 在此情况下, 由方程 5.121 来确定 W_r 是困难的, 因为井口与泵下入深度之间的 γ_r 值是变化的。然而 W_r 值在求光杆最高负荷的表达式中是作为一个整数出现的 (见方程 5.120), 因此, 为了留有余地, 可以考虑使 γ_r 达到其最高值。 γ_r 的较好的近似值是在原油饱和压力下的值:

$$\gamma_{rb} = \frac{350wc\gamma_{wsc} + 350(1-wc)\gamma_{osc} + (GLR)(GIP)\rho_{gs}}{350[wc + (1-wc)B_{ob}]} \quad (5.155)$$

式中 GIP —— 与液体同时泵送的地面气液比百分比;

B_{ob} —— 在饱和压力下的油层体积系数。

在 γ_r 的这一近似值下, p_3 和 V 之间的关系对每个固定的 N 值来说都是线性关系 (方程 5.136), 而对于每个固定的 S 值则是二次方关系 (方程 5.140)。

吸入曲线的标绘步骤同前面在只泵送液体时所概述的相同, 只是在此条件下绘出 p_3 与 V 的关系曲线, 而不是与 q_{sc} 的关系曲线。因而可能的产量则是泵的吸入曲线与桶/日 IPR 曲线的交点, 而不是与标准桶液/日 IPR 曲线的交点。但是, 在同一图上将标准桶液/日 IPR 曲线包含进去还是可行的, 这样可易于将产量转换成标准桶液/日。

例题 (1号井)(泵送气体)

由于泵是下在井底并且所有气体与液体一起泵送, 所以图 5.8 所示 IPR 曲线和表 5A.1

$$p_{\text{msc}} = (0.0763)(0.7) = 0.0534 \text{ lb/scf}$$

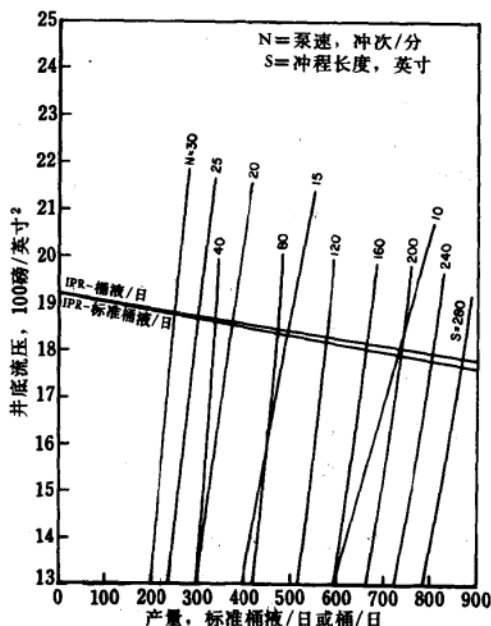


图 5.74 1 号井游梁泵的吸入曲线 (泵送液和气)

$$W_f = (0.433)(0.8917)(8000) \times (3.1416) = 9704$$

将 W_f 的这一值代入方程 5.150, 可得到:

$$a = \frac{1}{3.1416} (9704 - 12351) = -843 \text{ 磅/英寸}^2$$

然后, 将方程 5.148 的 b 值代入方程 5.136, 得到:

$$p_3 = -843 + (0.3625N)V \quad (5.156)$$

中的体积数据是实用的 (见图 5.74 和 5.75)。

在此条件下, 将采用只泵送液体时所采用的相同的泵和抽油杆柱。

在饱和压力下油层原油体积系数大约为 1.266 桶液 / 标准桶油 (见附录 5 的表 5A.1)。因此, 由方程 5.155 可得到:

$$\gamma_{fb} = \frac{\{(350)(0.5)(1.074) + (350)(0.5)(0.8498) + (200)(0.0534)\}}{350[0.5 + (0.5)(1.266)]} = 0.8917$$

于是, 由方程 5.121 可得到:

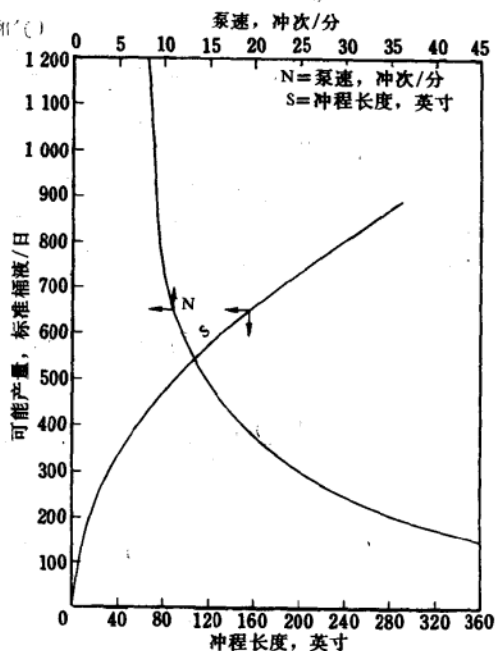


图 5.75 1 号井游梁泵抽油的可能产量与泵速和冲程长度之相关曲线 (泵送液和气)