

升举法采油工艺

卷 一

油 流 入 井 动 态

多 相 管 流

自 喷 井 及 油 嘴 动 态

〔美〕K. E. 布 朗 主 编

助 理: H. D. 贝 格 斯

石 油 工 业 出 版 社

升 举 法 采 油 工 艺

卷 一

油流入井动态
多相管流
自喷井及油嘴动态

【美】K. E. 布朗 助理：H. D. 贝格斯
张朝琛 译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是四卷六册的巨著，这是卷一。全书系统地总结了现代采油工艺（包括自喷井、气举井及各种机械采油井）的技术理论、实用方法和工艺设施等。

本书先从油流入井动态入手，详细阐述了油藏动态、自喷井动态以及国外各名家所创立的相关式的应用范围，对多相管流的发展历史及现状作了极为详细的描述。

本书集国外各名家之大成，荟萃了各种工艺技术理论的精华；并附有大量例题、习题及图版，对同一问题，往往介绍了各名家所创立的不同计算方法去解决，既适于研究人员使用，也是现场工作人员不可多得的技术参考书。

读者对象：广大采油工程技术人员及石油院校师生。

Kermit E. Brown

Assisted by H. Dale Beggs

THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS

Petroleum Publishing Company

Tulsa 1977

升 举 法 采 油 工 艺

卷 一

油流入井动态

多相管流

自喷井及油嘴动态

【美】K. E. 布朗 助理：H. D. 贝格斯

张朝琛 译

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲36号）

北京燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 39 1/2 印张 984千字 印1—2,450

1987年6月北京第1版 1987年6月北京第1次印刷

书号：15037·2599 定价：9.50元

石油工业常用单位换算表

长度	质量	热导率
1 千米(km)=0.621(英里)	1 吨(t)=1000 千克(kg)=2205 磅(lb)=1.102 短吨(sh.ton)=0.934 长吨(long.ton)	1 千卡/(米 ² ·时·℃)[kcal/(m ² ·h·℃)]=1.16279 瓦/(米·开尔文)[W/(m·K)]
1 米(m)=3.281 英尺(ft)=1.094 码(yd)	1 千克(kg)=2.205 磅(lb)	1 英热单位/(英尺 ² ·时·°F)[Btu/(ft ² ·h·°F)]=1.7303 瓦/(米·开尔文)[W/(m·K)]
1 厘米(cm)=0.394 英寸(in)	1 短吨(sh.ton)=0.907 吨(t)=2000 磅(lb)	比容热
1 埃(Å)=10 ⁻¹⁰ 米(m)	1 长吨(long.ton)=1.016 吨(t)	1 千卡/(千克·℃)[kcal/(kg·℃)]=1 英热单位/(磅·°F)[Btu/(lb·°F)]=4186.8 焦耳/(千克·开尔文)[J/(kg·K)]
1 英里(mile)=1.609 千米(km)	1 磅(lb)=0.454 千克(kg)[常衡]	热功
1 英尺(ft)=0.3048 米(m)	1 盎司(oz)=28.350 克(g)	1 焦耳=0.10204 千克·米=2.778*10 ⁻⁷ 千瓦·小时=3.777*10 ⁻⁷ 公制马力小时=3.723*10 ⁻⁷ 英制马力小时=2.389*10 ⁻⁴ 千卡=9.48*10 ⁻⁴ 英热单位
1 英寸(in)=2.54 厘米(cm)	密度	1 卡(cal)=4.1868 焦耳(J)
1 海里(n mile)=1.852 千米(km)	1 千克/(米 ³) (kg/m ³) =0.001 克/(厘米 ³)(g/cm ³)=0.0624 磅/(英尺 ³) (lb/ft ³)	1 英热单位(Btu)=1055.06 焦耳(J)
1 链=66 英尺(ft)=20.1168 米(m)	1 磅/(英尺 ³)(lb/ft ³)=16.02 千克/(米 ³)(kg/m ³)	1 千克力米(kgf·m)=9.80665 焦耳(J)
1 码(yd)=0.9144 米(m)	1 磅/(英寸 ³)(lb/in ³)=27679.9 千克/(米 ³)(kg/m ³)	1 英尺磅力(ft·lbf)=1.35582 焦耳(J)
1 密耳(mil)=0.0254 毫米(mm)	1 磅/美加仑(lb/gal)=119.826 千克/(米 ³)(kg/m ³)	1 米制马力小时(hp·h)=2.64779*10 ⁶ 焦耳(J)
1 英尺(ft)=12 英寸(in)	1 磅/英加仑(lb/gal)=99.776 千克/(米 ³)(kg/m ³)	1 英马力小时(UKHp·h)=2.68452*10 ⁶ 焦耳(J)
1 码(yd)=3 英尺(ft)	1 磅/(石油)桶(lb/bbl)=2.853 千克/(米 ³)(kg/m ³)	1 千瓦小时(kw·h)=3.6*10 ⁶ 焦耳(J)
1 杆(rad)=16.5 英尺(ft)	1 波美密度=140/15.5℃时的比重-130	1 大卡=4186.75 焦耳(J)
1 英里(mile)=5280 英尺(ft)	API=141.5/15.5℃时的比重-131.5	功率
1 海里(n mile)=1.1516 英里	运动粘度	1 千克力·米/秒(kgf·m/s)=9.80665 瓦(W)
面积	1 英尺 ² /秒(ft ² /s)=9.29030*10 ⁻² 米 ² /秒(m ² /s)	1 米制马力(hp)=735.499 瓦(W)
1 平方公里(km ²)=100 公顷(ha)=247.1 英亩(acre)=0.386 平方英里(mile ²)	1 斯(St)=10 ⁻⁴ 米 ² /秒(m ² /s)	1 卡/秒(cal/s)=4.1868 瓦(W)
1 平方米(m ²)=10.764 平方英尺(ft ²)	1 厘斯(cSt)=10 ⁻⁶ 米 ² /秒(m ² /s)=1 毫米 ² /秒(mm ² /s)	1 英热单位/时(Btu/h)=0.293071 瓦(W)
1 公亩(acre)=100 平方米(m ²)	动力粘度	速度
1 公顷(ha)=10000 平方米(m ²)=2.471 英亩(acre)	1 泊(P)=0.1 帕·秒(Pa·s)	1 英尺/秒(ft/s)=0.3048 米/秒(m/s)
1 平方英里(mile ²)=2.590 平方公里(km ²)	1 厘泊(cP)=10 ⁻³ 帕·秒(Pa·s)	1 英里/时(mile/h)=0.44704 米/秒(m/s)
1 亩市(acre)=0.4047 公顷(ha)		

=4047 平方米(m ²)		
1 平方英尺(ft ²)=0.093 平方米(m ²)	1 磅力秒/英尺 ² (lbf·s/ft ²)=47.8803 帕·秒(Pa·s)	1 达西=1000 毫达西
1 平方英寸(in ²)=6.452 平方厘米(cm ²)	力	1 平方厘米(cm ²)=9.81*10 ⁻⁷ 达西
1 平方码(yd ²)=0.8361 平方米(m ²)	1 牛顿(N)=0.225 磅力(lbf)=0.102 千克力(kgf)	地温梯度
体积	1 千克力(kgf)=9.81 牛顿(N)	1°F/100 英尺=1.8°C/100 米(°C/m)
1 立方米(m ³)=1000 升(liter) =35.315 立方英尺(ft ³)=6.290 桶(bbl)	1 磅力(lbf)=4.45 牛顿(N)	1°C/公里=2.9°F/英里(°F/mile)=0.055°F/100 英尺(°F/ft)
1 立方英尺(ft ³)=0.0283 立方米(m ³)=28.317 升(liter)	1 达因(dyn)=10 ⁻⁵ 牛顿(N)	油气产量
1 千立方英尺(mcf)=28.317 立方米(m ³)	压力	1 桶(bbl)=0.14 吨(t)(原油, 全球平均)
1 百万立方英尺(MMcf)=2.8317 万立方米(m ³)	1 兆帕(MPa)=145 磅/英寸 ² (psi)=10.2 千克/厘米 ² (kg/cm ²)=10 巴(bar)=9.8 大气压(atm)	1 吨(t)=7.3 桶(bbl)(原油, 全球平均)
10 亿立方英尺(bcf)=2831.7 万立方米(m ³)	1 磅/英寸 ² (psi)=0.006895 兆帕(MPa)=0.0703 千克/厘米 ² (kg/cm ²)=0.0689 巴(bar)=0.068 大气压(atm)	1 桶/日(bpd)=50 吨/年(t/a)(原油, 全球平均)
1 万亿立方英尺(tcf)=283.17 亿立方米(m ³)	1 巴(bar)=0.1 兆帕(MPa)=14.503 磅/英寸 ² (psi)=1.0197 千克/厘米 ² (kg/cm ²)=0.987 大气压(atm)	1 千立方英尺/日(Mcfd)=28.32 立方米/日(m ³ /d)=1.0336 万立方米/年(m ³ /a)
1 立方英寸(in ³)=16.3871 立方厘米(cm ³)	1 大气压(atm)=0.101325 兆帕(MPa)=14.696 磅/英寸 ² (psi)=1.0333 千克/厘米 ² (kg/cm ²)=1.0133 巴(bar)	1 百万立方英尺/日(MMcf)=2.832 万立方米/日(m ³ /d)=1033.55 万立方米/年(m ³ /a)
1 英亩·英尺=1234 立方米(m ³)	温度	10 亿立方英尺/日(bcf/d)=0.2832 亿立方米/日(m ³ /d)=103.36 亿立方米/年(m ³ /a)
1 桶(bbl)=0.159 立方米(m ³)=42 美加仑(gal)	K=5/9(°F+459.67)	1 万亿立方英尺/日(tcf/d)=283.2 亿立方米/日(m ³ /d)=10.336 万立方米/年(m ³ /a)
1 美加仑(gal)=3.785 升(l)	K=°C+273.15	汽油比
1 美夸脱(qt)=0.946 升(l)	n°F=[(n-32)*5/9]°C	1 立方英尺/桶(cuft/bbl)=0.2067 立方米/吨(m ³ /t)
1 美品脱(pt)=0.473 升(l)	n°C=(5/9·n+32)°F	热值
1 美吉耳(gi)=0.118 升(l)	1°F=5/9°C(温度差)	1 桶原油=5.8*10 ⁶ 英热单位(Btu)
1 英加仑(gal)=4.546 升(l)	传热系数	1 立方米湿气=3.909*10 ⁴ 英热单位(Btu)
热当量	1 千卡/(米 ² ·时·°C)[kcal/(m ² ·h·°C)]=1.6279 瓦/(米 ² ·开尔文)[W/(m ² ·K)]	1 立方米干气=3.577*10 ⁴ 英热单位(Btu)
1 桶原油=5800 立方英尺天然气(按平均热值计算)	1 英热单位/(英尺 ² ·时·°F)[Btu/(ft ² ·h·°F)]=5.67826 瓦/(米 ² ·开尔文)[W/(m ² ·K)]	1 吨煤=2.406*10 ⁷ 英热单位(Btu)
1 千克原油=1.4286 千克标准煤	1 米 ² ·时·°C/千卡(m ² ·h·°C/kcal)=0.86000 米 ² ·开尔文/瓦(m ² ·K/W)	1 千瓦小时水电=1.0235*10 ⁴ 英热单位(Btu)
1 立方米天然气=1.3300 千克标准煤	1 千卡/(米 ² ·时) kcal/m ² ·h=1.16279 瓦/米 ² (W/m ²)	(以上为 1990 年美国平均热值, 资料来源: 美国国家标准局)

中文版出版序言

我们非常高兴地获悉“采油工艺技术”各卷将在中华人民共和国译成中文出版。我曾有机会访问中华人民共和国和会晤许多石油工业界的人士，也到过华北任丘油田进行参观。

我诚挚地希望这些书将具体有助于中华人民共和国的石油工程师更好地选择、设计及运用他们的各种采油方法。

我深切地盼望，美国和中国的石油工程师能通过各种出版物继续交换看法，促进这两个伟大国家的良好关系。

K. E. 布朗博士

(美国俄克拉荷马州、塔尔萨大学石油工程, F.M. 史蒂文森讲座教授)

KAI 04 / 10

作者简介

K. E. 布朗博士现任美国塔尔萨大学教授，主持石油工程的F.M.史蒂文森讲座。

布朗博士荣获1983年度石油工程师协会（SPE）专门授予“对石油工程进步有推动作用及应用工程原理促进石油事业发展”的约翰·富兰克林·卡尔奖。

作者多年来主持多相上升管流及在采油工艺中的应用研究，在六十年代出版了“气举采油理论及实践”的专著，在七十年代后期迄今，主持编著了四卷六册的巨著《升举法采油工艺》，系统总结了现代的采油方法的工艺理论，包括自喷井、气举井、多种机械采油井的基础理论，实用方法，工艺设施。

作者曾任职于阿莫柯（Amoco）等石油公司及任教于得州大学；先后担任塔尔萨大学石油工程系主任，能源工程部董事长，研究部付总裁，联合国派驻哥伦比亚、玻利维亚及巴西等国的顾问，以及在厄瓜多尔的富布赖特讲座教授。

布朗教授1982年曾来华出席北京国际石油工程会议并担任“人工举升方法”分组会共同主席，并访问了我国的华北任丘油田。

前 言

在以往写的“气举理论及实践”(Gas lift theory and practice)一书告成时,我提醒自己不要再写另一本书了。可这里却又是四卷本的第一册。尽管本书可以单独作为一本教材和工程参考书,但它也是以“人工升举方法(Artificial lift methods)为名的第二本教材的前驱。

简单地说,这第一本书已提供了设计一套人工升举装置所需要的一切资料。

第一章专门谈了一个在石油工程中常遭忽视的领域,即油流入井动态(inflow performance)。我感谢米克·费特柯维奇(Mike Fetkovich)允许在这一章中利用他的许多素材。同样,我的许多已毕业的学生,包括曼苏尔(Mansoor)、优素福(Yousaf)和哈迪(Kadi)也对这一章有所贡献。

第二章是谈多相管流,这是和达勒·贝格斯(Dale Beggs)合写的。我要感谢吉米·比利(Jim Brill)的多方面贡献。关于多相管流还有许多东西需要学习,我引以为荣的是参与塔尔萨(Tulsa)大学在这方面的研究工作,这项工作是在詹姆士·比利(James Brill)博士和达勒·贝格斯博士的主持下进行的。

从第三章可以发现,第一和第二章可以用于预测自喷井的动态。我还要再次感谢我的研究生们的帮助,他们是谢里奥·封悉卡(Celio Fonseca),古斯塔夫·洛佩兹(Gustavo Lopez),佩多·里格劳德(Pedro Regnauld),胡阁·马丁(Hugo Marin),维克多·戈梅兹(Victor Gomez),以及哈里·冯(Harry Hong)。

就像任何一本教材的情况一样,我总是倾向于把发表的材料细分成各种不同章节。

我感谢在塔尔萨大学工作的这十年中,使我得到很多人尤其是校长特威曼(Twyman)先生等的多方鼓励。

最后,我感谢我的家庭的支持和鼓励。

目 录

第一章 油流入井动态	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 油藏类型	(2)
1.21 溶解气驱	(2)
1.22 水驱	(3)
1.23 气顶膨胀驱	(4)
1.24 小结	(5)
1.3 油流入井动态的关系式	(5)
1.31 引言	(5)
1.32 产油指数	(5)
1.321 产油指数的估算	(7)
1.322 产油指数随开发时间而变	(10)
1.33 以往对产油指数的某些论述	(12)
1.34 油流入井动态曲线	(15)
1.341 引言	(15)
1.342 伏格尔的研究结果	(15)
1.343 斯坦汀将伏格尔的关系式推广用于考虑那些污阻井或有改善 流动条件的井	(19)
1.344 预测未来油流入井动态曲线	(30)
1.3441 斯坦汀将伏格尔方法推广用于预测油流入井动态曲线	(30)
1.3442 加拿大大厦山油田的实际解法	(34)
1.3443 预测未来产油指数PI的其他方法	(35)
1.35 油井的等时试井及再次流动试井	(43)
1.351 引言	(43)
1.352 气井的试井	(44)
1.3521 逐次变流量试井	(44)
1.3522 等时试井	(44)
1.3523 修正型等时试井	(50)
1.3524 常规试井分析	(50)
1.353 油井测试	(50)
1.354 费特柯维奇的基本方程和压力函数	(51)
1.355 总的有效表皮效应	(53)
1.3551 引言	(53)
1.3552 表皮效应, S''	(53)
1.3553 随产量及时间而变的表皮效应 $S(q, t)$	(54)

1.3554	非达西流影响 Dq	(54)
1.3555	S值的大小.....	(55)
1.3556	表征S值大小的最终方程式.....	(55)
1.356	动态曲线随时间及累积采出量而变.....	(55)
1.357	例题及现场试验结果.....	(56)
1.3571	等时试井及逐级变流量试井	(56)
1.3572	油井逐级变流量试井及等时试井实例	(56)
1.3573	涉及表皮效应的各种问题	(60)
1.3574	关于未来油流入井动态曲线的若干问题	(63)
1.358	结论.....	(68)
1.36	各种预测和估算油流入动态曲线的方法的比较	(68)
1.361	引言.....	(68)
1.362	威勒的油流入井动态相关式.....	(69)
1.363	各种油流入井动态 (IPR) 曲线的比较和评价.....	(74)
1.364	预测未来的IPR曲线.....	(75)
1.3641	用费特柯维奇的方法来处理伏格尔的无因次IPR关系	(76)
1.3642	用斯坦汀的方法去处理费特柯维奇的渗流方程式	(76)
1.3643	处理结果的讨论及比较	(77)
1.365	结论.....	(83)
1.370	含水率对IPR的影响.....	(83)
1.371	吉尔伯特的论述.....	(83)
1.372	宁德的论述.....	(85)
1.38	多层性地层IPR曲线的形状	(88)
1.39	进行产液指数试井的较好方法	(88)
1.310	小结.....	(88)
第二章	多相管流	(91)
2.1	引言.....	(91)
2.11	多相流简史	(91)
2.12	石油工程中利用多相流计算压力损失	(91)
2.13	本章的目的	(93)
2.2	计算多相流中压力损失的数学物理基础.....	(93)
2.21	单位换算及因次分析	(93)
2.211	引言.....	(93)
2.212	单位.....	(93)
2.213	换算.....	(95)
2.214	确定各变量的因次.....	(95)
2.215	求解使方程式的因次正确无误用的换算系数.....	(96)
2.216	确定无因次的参数组合.....	(98)
2.2161	布金汉 π 定理的使用步骤.....	(98)
2.2162	应用 π 定理的例题.....	(98)

2.22 液体性质	(102)
2.221 液体密度.....	(102)
2.222 压缩率.....	(102)
2.223 粘度.....	(103)
2.224 表面张力.....	(105)
2.23 与多相流有关的气体性质简述	(106)
2.231 引言.....	(106)
2.232 气体性质.....	(108)
2.2321 密度	(108)
2.2322 粘度	(108)
2.2323 压缩率	(108)
2.233 与多相流有关的各种气体问题.....	(108)
2.2331 引言	(108)
2.2332 计算气体密度的实例	(110)
2.2333 气体体积变化的计算实例	(110)
2.2334 气体在管中流速的计算	(113)
2.24 影响多相流压力损失的各种变量	(115)
2.241 油的体积系数.....	(116)
2.242 溶解气量.....	(117)
2.2421 原油	(117)
2.2422 水	(121)
2.243 表面张力.....	(121)
2.244 管壁的接触角.....	(121)
2.245 多相流混合物的粘度.....	(121)
2.25 能量方程一般式的推导	(125)
2.251 引言.....	(125)
2.252 能量方程中各变量的论述.....	(125)
2.253 能量方程的推导.....	(127)
2.254 能量方程通式的讨论.....	(129)
2.255 适用于多相流的方程式.....	(130)
2.2551 滞留效应	(131)
2.2552 液相混合物的性质	(131)
2.2553 两相混合物的特性	(131)
2.2554 摩阻系数	(132)
2.2555 压力分布剖面的计算	(132)
2.26 单相液流	(133)
2.27 单相气流	(135)
2.271 水平气流.....	(135)
2.272 垂向气流.....	(136)
2.3 垂向流动.....	(138)

2.31	引言	(138)
2.32	垂向多相流的历史进展	(138)
2.33	预测压力损失的那些最好的相关式的开拓及运用情况	(139)
2.331	引言	(139)
2.332	有使用限制的一些相关式	(143)
2.3321	引言	(143)
2.3322	普特曼及卡平特方法	(144)
2.3323	范彻及布朗方法 (普-卡法的推广)	(147)
2.3324	将粘滞效应考虑在内的哈格多恩及布朗法 (1½英寸油管) (普-卡法的推广)	(148)
2.333	垂向多相流的四个最佳相关式	(151)
2.3331	引言	(151)
2.3332	哈格多恩及布朗的普适化相关式	(152)
2.3333	顿斯及罗斯的方法	(157)
2.3334	奥克适韦斯基相关式	(170)
2.3335	贝格斯和比利的相关式	(175)
2.34	套管环空流动情况	(181)
2.341	引言	(181)
2.342	柯尼希方法	(182)
2.35	喘喷 (间歇喷油) 现象	(187)
2.351	引言	(187)
2.352	文献评述	(187)
2.353	结论	(190)
2.36	各相关式及其适用范围的评价和概括	(191)
2.361	引言	(191)
2.362	研究成果的讨论	(191)
2.363	结论	(196)
2.37	垂向多相流相关式的实际应用	(197)
2.371	引言	(197)
2.372	各变量的影响	(197)
2.3721	引言	(198)
2.3722	油管口径的影响	(198)
2.3723	自喷产率的影响	(199)
2.3724	气液比的影响	(200)
2.3725	密度的影响	(202)
2.3726	水油比的影响	(203)
2.3727	粘度的影响	(203)
2.3728	滑脱作用的影响	(203)
2.3729	表面张力的影响	(204)
2.37210	动能的影响	(204)

2.373	工作曲线的编绘方法	(204)
2.3731	引言	(204)
2.374	例题	(207)
2.4	水平多相流	(217)
2.41	引言	(217)
2.42	流态谱	(217)
2.43	液相滞留效应	(220)
2.44	水平多相流的发展史	(221)
2.441	引言	(221)
2.442	相关式的历史回顾	(222)
2.45	利用最佳相关式预测压力损耗及确定管线口径	(222)
2.451	引言	(222)
2.452	有限制条款的相关式	(225)
2.4521	洛克哈提及马提尼里相关式	(225)
2.4522	巴克尔的相关式	(226)
2.4523	安德烈斯等人的相关式	(228)
2.453	用于水平多相管流的最佳相关式	(230)
2.4531	引言	(230)
2.4532	杜克列等人的相关式	(230)
2.4533	埃顿等人的相关式	(235)
2.4534	贝格斯及比利的相关式	(239)
2.46	水平管流使用清管球的问题	(239)
2.47	这些最佳相关式及其适用范围的概括	(239)
2.471	引言	(239)
2.472	小结	(239)
2.473	结论	(241)
2.474	建议	(241)
2.48	水平多相流的实际应用	(241)
2.481	引言	(241)
2.482	各变量的影响	(242)
2.4821	引言	(242)
2.4822	管线口径的影响	(242)
2.4823	流量的影响	(243)
2.4824	气液比的影响	(244)
2.4825	粘度的影响	(244)
2.4826	水油比的影响	(244)
2.4827	其他因素的影响	(245)
2.483	例题	(246)
2.5	倾斜的或丘陵地区的多相管线	(253)
2.51	引言	(253)

2.52	用于倾斜流的最佳相关式	(254)
2.521	弗拉尼干相关式	(254)
2.5211	引言	(254)
2.5212	摩阻压降分量	(256)
2.5213	举高的压降分量	(256)
2.522	奥维德·巴克尔的相关式	(257)
2.5221	计算步骤及例题	(258)
2.523	贝格斯及比利的相关式	(258)
2.53	有使用限制的相关式	(258)
2.531	引言	(258)
2.532	勃利汉、霍斯泰因和洪藤顿的相关式	(259)
2.533	雷匿·谢维尼的相关式	(259)
2.534	波内卡兹、埃斯勤尼及格里斯柯维奇等的相关式	(259)
2.535	辛格和格黎菲思的相关式	(260)
2.54	结论及建议	(261)
2.55	实用情况	(261)
2.551	例题	(261)
2.6	定向井的多相流	(267)
2.61	引言	(267)
2.62	定向多相流相关式	(268)
2.621	引言	(268)
2.622	此问题的通解	(269)
2.623	贝格斯和比利的相关式	(269)
2.624	尼埃及休恩提恩的一些解法	(269)
2.625	综合应用垂向及水平多相流相关式的解法	(270)
2.6251	求解步骤	(270)
2.6252	解决定向井流动的例题及步骤	(271)
2.626	卡多苏的相关式	(271)
2.627	小结和建议	(272)
2.628	定向井多相流相关式的实际应用	(272)
2.7	本章总结及结论	(274)
2.71	引言	(274)
2.72	尚需进一步探索的领域	(275)
2.721	定向井的流动问题	(275)
2.722	起伏管流(丘陵地区)	(275)
2.723	自喷井的喘喷(间歇)现象	(275)
2.724	乳化液流	(275)
2.725	结论	(275)
第三章	自喷井及油嘴动态	(277)
3.1	引言	(277)

3.2	自喷的整个过程	(277)
3.3	分析井况的方法	(279)
3.4	不规则产油	(281)
3.41	喘息现象	(281)
3.42	在多分层油藏中完成的井的不正常生产动况	(289)
3.43	油井积液的吹扫	(289)
3.44	小结	(290)
3.5	流体经过油嘴, 节流阀及管路配件的情况	(291)
3.51	引言	(291)
3.52	油嘴节流的相关式	(293)
3.521	引言	(293)
3.522	单相节流	(293)
3.523	多相流的扼流相关式	(296)
3.5231	坦格令等人的方法	(296)
3.5232	吉尔伯特的方法	(296)
3.5233	罗斯的公式(普特曼及贝克的修正式)	(297)
3.5234	谢尔东/舒德的方法	(298)
3.5235	奥玛纳的相关关系	(298)
3.5236	阿洪的相关式	(299)
3.5237	结论和建议	(299)
3.53	流体通过各种阀闸及配件的流动情况	(302)
3.531	引言	(302)
3.532	等当长度的概念	(303)
3.533	流量系数	(303)
3.534	弯管中的二次流动	(304)
3.535	其他类型的流动阻抗	(306)
3.54	小结	(306)
3.6	地面不设油嘴的自喷井(无阻敞喷产油)	(307)
3.61	引言	(307)
3.62	各种变量的影响	(308)
3.63	预测一口无嘴自喷井的可能产率的方法	(308)
3.631	引言	(308)
3.632	在井口压力恒定时选择相应的油管尺寸	(310)
3.633	井口压力有变化的油井如何选择油管半径	(314)
3.64	各例题中所包括的其他变量的影响	(322)
3.641	静压改变的影响	(322)
3.642	产液含水率对自喷井的影响	(323)
3.6421	引言	(323)
3.6422	产液含水的物理含义	(324)
3.6423	如何确定某井在什么样的含水率下将不能以特定的产率自喷	(325)

3.643 影响一口自喷井的各变量组合.....	(327)
3.6431 引言	(327)
3.7 装有地面油嘴的自喷井.....	(330)
3.71 引言	(330)
3.72 确定扼流的自喷产率	(330)
3.73 油嘴动态分析	(332)
3.8 有油嘴及无油嘴自喷井况比较.....	(333)
3.81 引言	(333)
3.82 井底静压变化对井口出油管尺寸的影响	(334)
3.83 油管口径大小的影响	(336)
3.84 气液比的影响.....	(337)
3.85 井深的影响	(339)
3.86 粘度的影响	(340)
3.87 产液含水率的影响	(341)
3.9 自喷井的经济分析.....	(341)
3.91 引言	(341)
3.92 价值衡量尺度	(341)
3.921 引言.....	(341)
3.922 例题.....	(341)
3.9221 资金偿付	(342)
3.9222 净现值	(342)
3.9223 偿还率	(342)
3.9224 利润与投资比值	(343)
3.9225 贴现后的利润与投资比	(344)
3.9226 其他的价值量度	(344)
3.10 小结及结论	(352)
附 录	(354)
附录 A	(354)
附录 B	(380)
附录 C	(401)
附录 D	(494)
附录 E	(561)
附录 F	(577)
附录 G	(585)
附录 H	(597)

第一章 油流入井动态

1.1 引言

一口井的油流入井动态 (inflow performance) ●, 代表该井提供流体的能力。如图 1.1 是一种典型的图解, 它表明油流入井动态曲线是多么的不同。例如, 水驱并且或者压力高于饱和压力的油井, 流动压力与产率的关系基本上是一直线; 而对于溶解气驱或流动压力小于泡点压力的油井, 则此关系呈曲线。对一口井提供流体的能力, 在很大程度上取决于油藏的类型和驱油机制, 以及诸如油藏压力、渗透率等变量。在一般实际场合中, 都是假定在恒定条件下流入某一特定油井的液量与平均油藏压力 ($\bar{p}_R$) 成正比。可以看到, 图 1.1 中的曲线 A 就是一条直线。正常情况下, 如流动压力高于泡点压力确实如此。

对于曲线 A 来说, 该井的产油指数 PI 是一常数, 且可用如图 1.1 中所示直线的斜率倒数来代表。PI 的定义是每当压降为一磅/英寸²时每天产量的桶数, (桶/天/磅/英寸²), 或以符号 $PI = J = \frac{q_o + q_w}{\bar{p}_R - p_{wf}}$ 代表, 这里用 q_o 代表油流量, q_w 为水流量, $\bar{p}_R$ 是井底平均静压; p_{wf} 为井底流动压力。当此斜率为定值时, 就可说该井只有单一的 PI 值。

不过, 对很多井来说, 这一线段实际上都是弯曲的。在这种情况下就不宜说该井具有线性 (直线) 的 PI 值, 因为其斜率将随排量而变。(请注意图 1.1 中的曲线 B 和 C)。图 1.2 展示的是取自一口流压已低于泡点的溶解气驱井的三次流动试井的情况。图 1.3 则是在流压高于泡点时的三次流动试井构成一条直线的情况。图 1.2 和图 1.3 是两种油田情况。

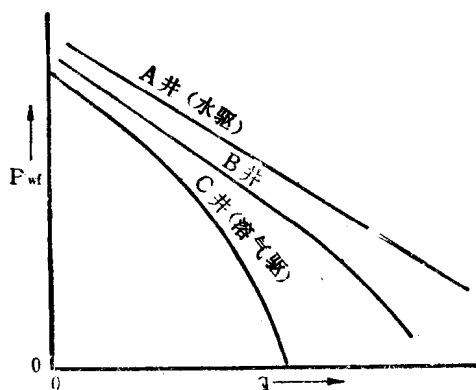


图 1.1 典型的油流入井动态曲线

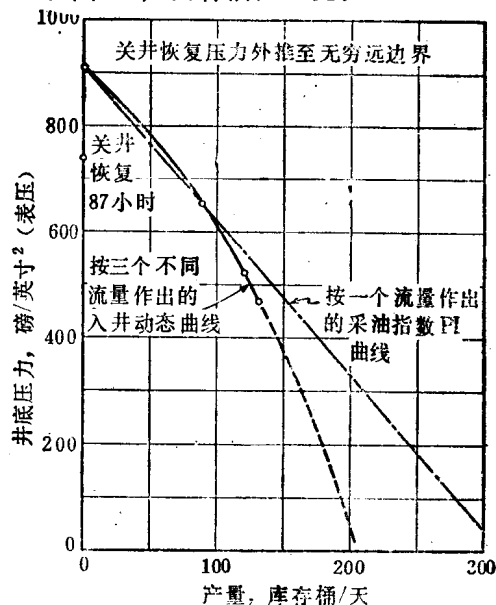


图 1.2 油流入井动态曲线 (引自文献 [3])

● “inflow-performance” 有 “油流入井动态” 和 “向井流动态” 两种译法。——译注