

当代有杆泵 抽油系统

刘合 王广韵 王中国 编译
孙喜寿 徐国民



石油工业出版社

当代有杆泵抽油系统

刘合 王广昀 王中国 编译
孙喜寿 徐国民

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以编译的方式介绍了有杆泵抽油系统,对当代有杆泵抽油系统的理论和实用性进行了全面系统的介绍。详细介绍了一个采油工程师所具备的有杆泵抽油系统方面的基本知识,讨论了梁式抽油系统的不同部分,解释了每个部件的技术细节。给出了各个部件的操作原理及其可能变量,以及关于选择和设计各个系统部件的建议。论述了当前可以用来找到抽油系统或各个部件的动态参数的方法和步骤。创新性地讨论了大庆油田聚驱井有杆泵抽油技术的进展和应用。

本书对于从事油田开发和采油工程的管理人员、技术人员和操作人员,以及大专院校师生有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

当代有杆泵抽油系统/刘合等编译.

北京:石油工业出版社,2000.7

ISBN 7-5021-3030-6

I. 当…

II. 刘…

III. 抽油杆-抽油-研究

IV. TE355.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 63796 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京林地排版厂排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 370 千字 印 1—1500

2000 年 7 月北京第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3030-6/TE·2337

定价: 25.00 元

前 言

世界上大多数油井需要采用某种人工升举把流体采到地面。过去，首先使用的人工升举法是有杆泵抽油技术，把此技术引入油田已有一百多年了，至今还是一个很普及的采油方法，它占世界上油井的三分之二还多。如果只考虑人工升举井，那么有杆泵抽油系统的相对数量更高，达到了80%以上。虽然从这些油井中产出的总液量没有达到上述比例，但有杆泵抽油技术还是一种很受欢迎且很普及的采油技术。

本书全面介绍了有杆泵抽油系统。此技术是最普遍和最为人所知的采油技术，它采用了游梁式抽油机，这在全世界的采油区里是一个为人所熟悉的景观。此书的出版，我们有几个目的，最重要的是对当代有杆泵抽油系统的理论和实用性进行全面系统的介绍。为了达到这个目标，我们大量参考了在专业文献上所能找到的优秀文章，其中包括近几年有杆泵抽油系统所有的重要发展。在第二章详细地介绍了有杆泵抽油系统方面的基本知识，包括讨论流体的基本特性、井中单相流和多相流、井下流入动态及其系统分析的基本原理。在第三章，讨论了游梁式抽油系统的不同部分，解释了每个部件的技术细节，给出了各个部件的操作原理及其可能变量，以及关于选择和设计各个系统部件的建议。

第四章综述了抽油系统或各个部件的动态参数的计算方法和步骤。努力注意到囊括当前使用的所有方法，并通过这些计算步骤的详细论述以起到指导读者的作用。为达到这个目的，所选的实例也突出了重要的计算步骤。在很多实例中，讨论了用不同方法解决同一问题的优点。

再后两章包括抽油系统的设计和分析这两个重要的部分。从技术和经济出发，设计最佳有杆泵抽油系统的设计目标。在第五章详细讨论抽油系统的设计理论。无论原始抽油装置设计的多么好，如果不定期检查运行情况，由于井况和机械问题，抽油系统的性能可很快遭到损坏。因此，定期分析抽油系统的运行情况，防止效率的损失很重要。第六章中包括适用于抽油机井的特殊的试井方法，以及分析抽油系统机械问题的各种方法。如前所述，最重要的计算步骤用实例进行了说明。第七章概述聚合物驱有杆泵采油技术理论设计与应用实例及井下特殊工艺。

目前，越来越多的计算方法促使采油工程师在日常工作中使用计算机。所以我们还为在本书中叙述的设计和分析方法研制了几个程序。运用这些程序解决了在本书中介绍的许多实例，我们希望这些程序能被读者尝试使用。

本书的第一章是由刘合、王中国编译；第二章由王广昀、徐国民、陈宏编译；第三章由孙喜寿、王清发编译；第四章由辛福国、鲁明延编译；第五章由刘合、高甲善编译；第六章由丁健、张惠殊编译；第七章由刘合、袁涛编写。全书由大庆石油学院机械系朱君副教授主审。在此表示感谢！

刘 合
2000.5

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 人工举升法	(1)
一、气举法	(1)
二、泵抽法	(1)
第二节 有杆抽油系统的基本特征	(2)
第二章 采油工程的基本要素综述	(4)
第一节 流体特性	(4)
一、术语	(4)
二、流体特性	(6)
三、天然气的特性	(9)
第二节 基础水力学	(13)
一、单相液流	(15)
二、多相流	(17)
三、静态气柱压力	(18)
第三节 油井的流入动态	(24)
一、术语	(24)
二、生产指数概念	(25)
三、流入动态关系	(26)
第四节 生产系统	(28)
一、描述生产系统	(29)
二、系统分析的基础	(30)
第三章 抽油杆与抽油泵	(31)
第一节 井下泵	(32)
一、泵的循环	(32)
二、泵的基本形式	(34)
三、API 系列泵	(35)
四、泵的结构	(40)
五、专用泵	(43)
六、材料的选择	(46)
第二节 油管锚	(48)
第三节 井下气体分离器 (气锚)	(49)
第四节 抽油杆柱	(52)
一、钢质实心抽油杆	(52)
二、其他类型钢质抽油杆	(57)
三、玻璃纤维抽油杆	(57)

四、抽油杆柱的设计	(59)
五、抽油杆柱的断裂	(74)
六、辅助设备	(78)
第五节 井口设备	(80)
第六节 抽油机	(81)
一、部件结构	(82)
二、抽油机的几何尺寸	(82)
三、抽油机的设计	(84)
四、抽油机动力学	(84)
五、特殊抽油机	(94)
第七节 减速箱	(96)
第八节 驱动机	(97)
一、内燃机	(97)
二、电动机	(97)
第四章 计算动态参数	(101)
第一节 近似计算模型	(101)
一、光杆负荷	(102)
二、最大净扭矩	(104)
三、柱塞冲程长度	(104)
第二节 API RP 11L 方法	(107)
一、杆柱的动态特性	(108)
二、计算方法	(109)
三、计算机计算	(117)
四、计算精确度	(118)
五、完善的 API RP 11L 模型	(119)
六、复合抽油杆	(122)
第三节 模拟杆柱动态	(124)
一、波动方程的基本形式	(124)
二、波动方程的解	(127)
三、阻尼系数的确定	(134)
四、应用模拟模型	(138)
五、特殊问题	(141)
第四节 产量计算	(142)
一、泵排量	(142)
二、漏损	(142)
三、泵的体积效率	(143)
第五节 减速箱上的扭转载荷	(144)
一、扭矩计算的理论	(144)
二、实际扭矩的计算	(150)
三、最佳平衡	(153)

四、抽油机几何形状的影响·····	(155)
第六节 抽油用的功率需求量·····	(157)
一、能量损失·····	(157)
二、整个抽油循环期间的功率需求·····	(161)
三、原动机的选择·····	(162)
第五章 抽油系统的设计·····	(163)
第一节 抽汲模式的选择·····	(163)
一、最佳抽汲模式·····	(164)
二、获得最大泵排量·····	(172)
第二节 排量与井底流入动态的匹配·····	(178)
一、连续抽油·····	(178)
二、间抽·····	(184)
第六章 抽油井动态监测·····	(189)
第一节 井的测试·····	(189)
一、环空液面的计算·····	(189)
二、计算井底压力·····	(194)
三、静态情况·····	(196)
四、井的来液性质·····	(204)
第二节 动力仪的原理·····	(206)
一、动力仪的基本类型·····	(206)
二、使用光杆动力仪·····	(208)
三、解释示功图·····	(211)
第七章 聚驱井有杆泵抽油技术·····	(219)
第一节 聚驱抽油机的悬点载荷·····	(219)
一、悬点静载荷·····	(219)
二、悬点动载荷·····	(221)
三、聚驱井中的摩擦力·····	(222)
四、悬点最大载荷与最小载荷的计算·····	(224)
第二节 聚合物驱抽油机井机、杆、泵的设计和选择·····	(224)
一、抽油机的设计选择·····	(224)
二、抽油杆的设计选择·····	(224)
三、抽油泵的设计选择·····	(226)
第三节 聚驱井下配套工具和工艺·····	(226)
一、井下能量阻尼补偿器·····	(226)
二、抽聚泵·····	(228)
三、扶正器·····	(229)
四、应用聚驱采出液降粘防蜡剂·····	(231)

第一章 绪 论

第一节 人工举升法

在开发初期大多数油井的原油自喷到地面，这叫做自喷井。自喷采油的先决条件是井底压力要足够大，能够克服沿着流动路线逸到地面的总压力损失。如果不能满足此条件，油井就会停止自喷，成为停产井。

油井不能自喷有两个主要原因：要么井底流压降到不足以克服井中的压力损失，要么是流压损失大于油井产油所必需的井底压力。由于采出了地下储层的流体，引起储层压力逐渐下降，此时第一种情况会发生。当机械问题（油管尺寸太小、井下受限等）或流体成分的变化（通常采气可降低）使得井中的流动阻力增加时，第二种情况会发生。地面状况，如分离器的压力或管线尺寸也直接影响总压力损失，阻止油井自喷。

要开采已经不能自喷的井或要增加自喷井的产量，需要一些人工举升设备。举升设备可进行选择，这都遵循地面供给的能量能把井中的流体举升到地面的原则。人工举升的一个基本机理就是为了克服流压损失，使井下泵增加井中的压力。其他举升方法是使用压缩气体，周期性地往井中流体的下方注入，然后运用气体的膨胀能量把流体段塞驱替到地面。第三个机理是运用了一个完全不同的原理，它不是增加井中的压力，而是通过往井内油、气流中连续注入高压气体来降低流压损失，这就使得井底实际压力能够把井中的流体举升到地面。

尽管根据前面所述的三个基本机理可以区分所有的人工举升方法，但通常的分类只是稍微有所不同，在下文中进行了讨论。

一、气举法

气举法是最主要的人工举升方法之一，它使用了压缩气体，这些压缩气体被注入到井下某一处的油、气流中。在连续流动气举中，往油管里注入固定的气体量，这些气体把流体分解，从而减少了沿着流动路线所产生的压力损失。由于油管流动阻力的减少，原始井底压力足以把气/液混合物举升到地面。从这个举升方法的机理可以看出：为了能够进行连续流动的气举需要相对较高的井底压力。

在间歇气举中，无论何时当油管中的流体积聚到足够长的液柱时，就周期性地往里注入气体。较大容量的气体注入到液柱下方从而把液体段塞举升到地面。然后停止注气，一直等到又达到了一个适当的液面再开始注气。就这样如此反复循环进行开采中的液体。

柱塞气举与间歇气举非常相似，它使用了可在井下油管中移动的一个特殊的活动柱塞来分离来自柱塞下方的气体中的向上移动的液体段塞。实际上这个气举就是驱替积聚在井中的流体，它完全不同于连续流动气举的采油机理。

二、泵抽法

泵抽法是另一种广泛使用的人工举升法。它是利用安装在井下的泵来增加井中的压力。

增加的压力必须足以克服井中的总压力损失。运用不同的法则，如使用泵的工作原理不同，可把泵抽法进一步分类。普遍使人接受的分类法是依据驱动井下泵的方式而定的，把它分成有杆泵和无杆泵抽油。

有杆泵抽油利用了一根连接井下泵和地面驱动机械的抽油杆柱。有杆泵抽油的主要类型是游梁式抽油或简称为有杆泵抽油。这种类型的人工举升使用了容积式柱塞泵和通过机械连接来转换电动机旋转运动的地面驱动装置，其中包括旋转式游梁。

随着流体容量的增加，需要开采越来越深的井使得发展长冲程有杆泵抽油成为必要。使用游梁式抽油机中泵和杆柱的公共特点，研制出了几个不同的抽油装置，但却大大增加了泵的冲程长度。理想的长冲程不允许使用游梁，必须研制完全不同的驱动机理。根据使用的地面驱动形式的不同，对基本类型进行了分类：气动传动式、液压驱动式或机械驱动式长冲程抽油。

新兴起的有杆抽油系统使用了螺杆泵，此泵需要旋转螺杆进行运转。此种泵，就像在其他类型的有杆抽油系统中使用的柱塞泵一样也遵循了容积原理，但没有一个凡尔。

无杆泵抽油法就像它的名字暗示的一样，从地面开始没有使用一个杆柱操纵井下泵。所以，要用其他手段（包括机械式）驱动井下泵，如电驱动或液压驱动。各种类型的泵适应于无杆泵抽油，包括离心泵、容积泵水力活塞泵。

电潜泵利用一个潜油电机驱动多级离心泵。通过从地面下入的电缆向电机供电。这样的装置应用于抽汲大排量液体较理想。

无杆泵抽油系统中其他的举升装置都是使用往井下泵送高压动力液的方法。水力活塞泵是首先被研制出来的，这样的装置含有一个水力发动机驱动的容积泵，它被装在一个井下装置中。发动机或马达提供一个往复运动使泵部分运转。水力涡轮机驱动的抽油装置由一个多级涡轮和一个串联的多级离心泵组成。涡轮机由从地面泵送的动力液提供动力，以高的旋转速度驱动离心泵，把井中的流体举升到地面。

尽管射流泵举升流体方法采用的是液压驱动法，但它完全不同于迄今所讨论的无杆泵抽油的原理。它的井下设备把高速射流能转换成有用功来举升井液。射流泵的井下部分是至今所知的不含有运动部件的惟一油井抽油装置。

尽管还有其他类型的人工举升设备，但与上面刚提到的相比，就显得微不足道了。从先前的讨论中可清楚的看到，当工程师选择举升方法时，有许多种方法可供选择。即使象井深、所期望的产量、流体特性等实际现场情况可能限制或甚至禁止使用某些举升设备，但通常不止一种举升系统在技术上证明上可行的。那么选择举升方式以使用最有效的方法使油井获得所期望的产液量便是采油工程师的责任。决定使用何种举升办法之后，接下来就是要考虑原始条件和将来的情况来进行完整的设计。

第二节 有杆抽油系统的基本特征

石油工业诞生不久，人工举升采油的历史就开始了。在那时使用顿钻钻具钻井，此技术是依靠悬在一根钢丝绳上的能够升降钻头的木制游梁来实现的。当油井停止自喷时，用游梁操纵井下的柱塞泵很简单。把顿钻钻具钻机留在井上以便以后可用来抽油，这成为一普遍的作法。有杆抽油系统诞生了，但它的工作原理并没有改变。

虽然今日的有杆抽油设备不依赖木制材料和蒸汽能，但它的基本部分还保留不变。游梁一泵抽法的标志，人们还用它把原动机的旋转运动转换成驱动泵所需的往复运动。另一个保

留不变的部分是杆柱，它是用来连接地面上的抽油机和井下泵的。第三个基本部件是泵本身，它就运用了容积原理，由固定缸筒和活动柱组成。这整个系统已经受到了时间的考验，对大多数人工举升抽油装置而言，它仍是一个可靠的选择方法。

有杆抽油装置的生产能力适合于高产、低产油井。大约最大排量如图 1-1 所示，最初是由 Clegg 提供的。当使用最大常规抽油机时，图上所标的值代表可得到的最高排量。当举升深度增加时，可清楚观察到有效产量快速下降。在任一特定深度时，根据所使用的抽油杆的强度，可举升不同的排量。较高级别的材料使杆柱有较大的拉应力，从而可获得较高产液量。这些事实可以得出如下结论：限制有杆抽油系统产液量的主要因素是举升深度和抽油杆强度。

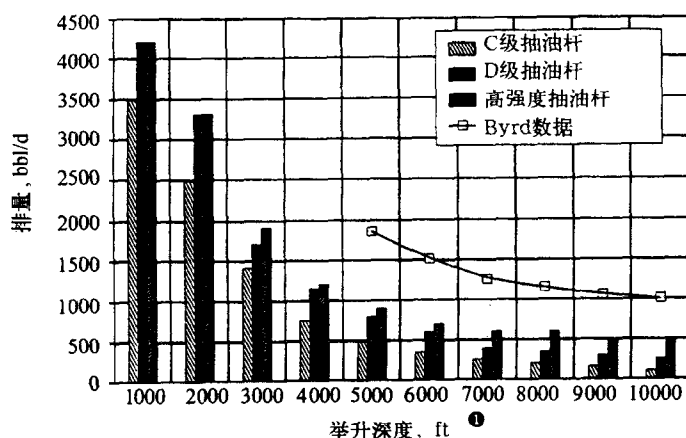


图 1-1 有杆抽油系统可得到的最大排量

图 1-1 给出了有杆泵抽油装置的最大理论排量，却没有考虑常规抽油机。这些值可看作是正确设计运行的抽油装置的极限能力。

总结绪论这一章的要点为，根据 Brown 的观点，列出下列有杆泵抽油装置的优缺点。

优点：

- (1) 它是油田工作人员所熟知的举升方法，操作简单，易于分析。
- (2) 安装设计较简单，适于现场安装。
- (3) 在一般条件下，它可使用到油井使用寿命的终点，直到报废。
- (4) 在极限范围内，可很容易地改变泵排量以适应井下流入动态的变化。用泵抽空控制设备进行间抽也是可行的。

(5) 系统的组件和更换的部件易于得到，全世界范围内通用。

缺点：

- (1) 由于抽油杆材料的机械强度问题使抽油深度受限。
- (2) 在泵入口处存在游离气大大地降低了产液量。
- (3) 在斜井或弯曲井中，金属部分的摩擦可引起机械故障。
- (4) 地面上的抽油机占据空间大，且笨重。

① 1ft=0.3048m

第二章 采油工程的基本要素综述

第二章简明扼要地介绍了一些抽油系统方面的基本知识。本章不包括整个范围的采油工程，只是与有杆泵抽油相关的知识。其中包括在泵抽时遇到的流体特性并详细地介绍了最普遍的水力问题及其解决方法。油井的生产能力对设计有杆抽油装置是最重要的，因此文中介绍了一套描述井底流入动态的方法。

第一节 流体特性

在油井采油作业中最常遇到的流体是烃和水。由于不同的条件他们呈液体或气体状态。当压力和温度沿着流动路程发生变化时（当流体从井底向地面移动时），流动流体的相态关系和物理参数也同时发生变化。因此，为了确定工作条件或设计生产设备，描述对流体举升过程有影响的那些流体参数是必要的。下面将详细介绍确定油、水、气的物理特性的计算方法，只包括计算有杆泵抽油所需的参数。

计算精确流体特性的最可靠方法自然是使用井实际数据。采集这样的数据通常涉及PVT测量，有必要使用精密仪器。这就是在大多数情况下为什么这样的数据不全或完全遗失的原因。在这些情况下，必须依据先前出版的对比数据。这些对比数据有助于解决流体特性方面信息不足的问题。本文没有对可使用的方法进行全面综述，就是对已知的好方法也没有完全提到。只打算为计算有杆抽油需要的流体特性提供某些理论背景和实用方法。并于这一点，由于这些通常在抽油井中遇到，因而只调查了黑油烃类系统。

在介绍对不同的对比数据进行详细地处理前，下面先介绍通常遇到的流体物理特性的定义和相关方程。

一、术语

1. 密度 ρ

密度是流体的质量与所占据的体积之比。通常随着压力和温度的变化而变化。可用下式表示：

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2-1)$$

2. 相对密度 γ

液体的相对密度 γ_l 是在标准情况下液体密度与纯水的密度之比。

$$\gamma_l = \frac{\rho_{lsc}}{\rho_{wsc}} \quad (2-2)$$

气体的相对密度是用标准情况下的空气密度计算出。

$$\gamma_g = \frac{\rho_{gsc}}{\rho_{asc}} = \frac{\rho_{gsc}}{0.0764} \quad (2-3)$$

从公式 (2-2) 和 (2-3) 中可以看出, 相对密度是对液体或气体密度的无因次测量。它广泛地应用在与相关物理参数中并被定义为液体或气体的一个常数。

在石油工业中, 液体的相对密度通常是以 API 度为单位, 用 API 重度表示的。相对密度和 API 重度的关系式用下式表示。

$$\gamma_l = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}} \quad (2-4)$$

3. 粘度 μ

粘度, 更确切的称之为动力粘度, 它直接与液体的流动阻力有关。此阻力是由于移动的液体分子相互发生摩擦而引起的。给定液体的粘度通常随着压力和温度的变化而变化, 并对单相流或多相流的压降有很大的影响。粘度的常用单位 cP^①。

4. 泡点压力 p_b

在多组分烃流体系统中, 压力和温度的变化会导致相变。如果我们从液相开始, 在常温下降压, 那么在此系统的泡点压力下, 气泡开始从溶液中逸出。在较高压力下, 只存在液相; 在较低压力下, 存在两相混合物。因此, 泡点压力是一个非常重要的参数, 可用来确定占优势的相位状态。

5. 溶解气油比 R_s

在压力上升时, 原油溶解现存的气体, 当压力下降时, 再把它释放出来。要确定在给定情况下原油可溶解的气体体积, 应使用溶解气油比 GOR。此参数给出了标准状态下原油溶解气体的体积。油的体积是在大气条件下按标准桶数测量的, R_s 的测量单位是 scf/stb^②。

R_s 是系统组分、压力和温度的函数, 它被定义为:

$$R_s = \frac{V_{\text{溶解}}}{V_{\text{osc}}} \quad (2-5)$$

水中的气体溶解度也可用这些原理描述, 但是由于当量较低而通常忽略不计。

6. 体积系数 B

利用已知流体 (气、油或水) 的体积系数, 按标准条件下测量的体积数, 计算任何条件下的流体的实际体积。它包括对实际体积有影响的压力和温度的影响。在液体状态下, 体积系数也表达了溶解气体的影响。体积系数有时被称作地层体积系数 (FVF), 因为它隐含着地层这个特定条件, 所以它属于名称使用不当。因此 FVF 应该只用来表示储层状态下的体积系数。

一般来讲, 体积系数可被定义为:

$$B = \frac{V(p, T)}{V_{\text{sc}}} \quad (2-6)$$

式中 $V(p, T)$ ——温度 T 和压力 p 下的流体体积, bbl^③ 或 ft³;

V_{sc} ——在标准状态下的流体体积, stb 或 scf。

① 1cP = 10^{-3} Pa·s

② scf = 标准立方英尺; stb = 地面标准桶数

③ 1bbl = 0.159m³

用公式 (2-1), 把 V 代进公式 (2-6), 体积系数的定义可写成:

$$B = \frac{\rho_{sc}}{\rho(p, T)} \quad (2-7)$$

式中 $\rho(p, T)$ ——给定 p, T 时的流体密度;

ρ_{sc} ——标准状态下的流体密度。

二、流体特性

1. 水

液体通常与纯水相比, 在标准状态下的基本特性是:

相对密度 $\gamma_w = 1.00$

API 重度 = 10°API

密度 $\rho_{wsc} = 1000 \text{ kg/m}^3$

流体静压梯度 = 9.8 kPa/m

动力粘度 $\mu_w = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

在采油工程计算中, 通常忽略地层水中的气体溶解度, 而假定水的粘度为常数。这就是为什么不给定水的 R_s 和 μ 的相关。

水的体积系数:

用 Gould 的相关式, 可近似计算水在 p 和 T 下的体积系数:

$$B_w = 1.0 + 1.2 \times 10^{-4} T_x + 10^{-6} T_x^2 - 3.33 \times 10^{-6} p \quad (2-8)$$

式中 $T_x = T - 60^\circ\text{F}$ ①

例 2.1

计算高度为 61m 的静态水柱的压力。水柱中的平均温度和平均压力分别是 $p = 344.5 \text{ kPa}$, $T = 120^\circ\text{F}$ (322K ②)。水的相对密度为 1.12。

解: 从公式 (2-2) 中, 计算标准状态下水的密度:

$$\rho_{isc} = \gamma_w \rho_{wsc} = (1.12) 1000 = 1120 \text{ kg/m}^3$$

用 $T_x = 120 - 60 = 60^\circ\text{F}$, 代入公式 (2-8) 中, 可得出给定条件下的水的体积系数:

$$\begin{aligned} B_w &= 1.0 + (1.2 \times 10^{-4}) (60) + (10^{-6}) (60^2) - (3.33 \times 10^{-6}) (50) \\ &= 1.01 \text{ bbl/stb } (1.01 \text{ m}^3/\text{m}^3) \end{aligned}$$

把 p 和 T 代入公式 (2-7) 中得出密度为:

$$\rho(p, T) = 69.9 / 1.01 = 69.2 \text{ lb/ft}^3 \text{ } (1109 \text{ kg/m}^3)$$

在水柱底部的流体静压力是:

① $1^\circ\text{F} = \frac{5}{9}^\circ\text{C}$

② $1\text{K} = 1^\circ\text{C}$

$$p = \rho h = (69.2)(200) = 13840 \text{ lb/ft}^2 = 13840/144 = 96 \text{ psi}^{\text{①}} (662 \text{ kPa})$$

2. 原油

1) 泡点压力

人们广泛采纳 Standing 相关式来评估原油的泡点压力：

$$p_b = 18 (R_b/\gamma_g)^{0.83} (10^y) \quad (2-9)$$

式中 $y = 0.00091T - 0.0125^\circ \text{API}$;

R_b ——在压力超过 p_b 时的溶解气油比 GOR, scf/stb。

例 2.2

确定油井中有杆泵处是泵存在游离气体，此处 $p = 700 \text{ psi}$ (4.83MPa)， $T = 100^\circ \text{F}$ (311K)。产出油是 30°API 重度， R_b 的总溶解气油比 GOR， $R_b = 120 \text{ scf/stb}$ (21.4m³/m³，气体相对密度为 0.75)。

解：用公式 (2-9) 计算泡点压力：

$$y = (0.00091)(100) - (0.0125)(30) = -0.285$$

$$p_b = 18 (120/0.75)^{0.83} (10^{-0.284}) = 631 \text{ psi} (4.35 \text{ MPa})$$

因为已知压力超出了所计算出的泡点压力，所以可知只存在液相。

2) 溶解气油比 GOR

在某些情况下，如果原油和释放气共存，那么他们以平衡状态共存。这就意味着压力有一点下降就会导致气体从溶液中逸出与油分离。因此，在原油处于普通温度时的泡点压力下时，可用 Standing 泡点压力相关式。把局部压力和温度代入公式 (2-9) 中可解出 R_s 。

$$R_s = \gamma_g \left[\frac{p}{(18)(10^y)} \right]^{1.205} \quad (2-10)$$

式中 $y = 0.00091T - 0.0125^\circ \text{APT}$

也可用 Lasater 和 Vazquez-Beggs 相关式估算出 R_s 。

在压力大于泡点压力的情况下，GOR 是常数，油是不饱和体。这就意味着如果可能的话，油可溶解更多的气体。

3) 体积系数

有几个相关式对计算油的相关系数有用。在此，讨论 Standing 的 B_o 相关式，它是在与泡点压力相同的数据库上研究出的。它在压力小于泡点压力的情况下有效，例如在两相状态情况下。

$$B_o = 0.972 + 1.47 \times 10^{-4} F^{1.175} \quad (2-11)$$

式中 $F = R_s (\gamma_g/\gamma_o)^{0.5} + 1.25T$

在不饱和情况下，例如压力大于泡点压力时，不存在气相。原油的体积受到热和压力的作用而膨胀和压缩。由于这些因素互相制约，对于任何超过泡点压力的原油，可把 B_o 估计

① 1psi = 6.895kPa

成一个常数。

例 2.3

在有杆泵抽油状态下计算它的排液量为 $q = 600 \text{ bbl/d}$ ($95 \text{ m}^3/\text{d}$) 油, 其中 $p = 800 \text{ psi}$ (5.52 MPa), $T = 120^\circ \text{F}$ (322 K)。求出在地面标准状态下测得的原油体积。原油重度为 30°API , 气体相对密度为 0.6 。

解: 在地面标准状态下的原油体积可从原油体积系数 (3-6) 中得出:

$$q_{\text{osc}} = q(p, T) / B_o$$

要求出 B_o , 必须先从式 (2-10) 计算出 R_s :

$$y = (0.00091)(120) - (0.0125)(30) = -0.266$$

$$R_s = (0.6) \left[(800) / (18 \times 10^{-0.266}) \right]^{1.205} = 121.4 \text{ scf/stb} \quad (21.9 \text{ m}^3/\text{m}^3)$$

在应用 Standing 的 B_o 相关式之前, 要用公式 (2-4), 从 API 重度中计算出油的相对密度:

$$\gamma_o = 141.5 / (131.5 + 30) = 0.876$$

应用上述值, 从公式 (2-11) 中求出:

$$F = 121.4 (0.6/0.876)^{0.5} + (1.25)(120) = 250.5$$

$$B_o = 0.972 + 1.47 \times 10^{-4} (250.5)^{1.175} = 1.07 \text{ bbl/stb} \quad (1.07 \text{ m}^3/\text{m}^3)$$

最后, 计算出标准状态下的油体积:

$$q_{\text{osc}} = 600 / 1.07 = 561 \text{ stb/d} \quad (89 \text{ m}^3/\text{d})$$

原油体积从泵抽 600 bbl/d ($95 \text{ m}^3/\text{d}$) “收缩”成地面标准状态下的 561 stb/d ($89 \text{ m}^3/\text{d}$)。体积的变化是由于气体不断地从油井和储罐的溶液中逸出, 它也是由于压力和温度的变化引起的。

4) 粘度

当非牛顿性流体的原油或乳状液不能单独用粘度确定它的特性时, 下列适用于展示牛顿流体特性的原油。

影响牛顿流体的粘度的因素是组分、压力、温度和溶解气体的总量。根据 Beal 在图 2-1 中所述, 在地面压力状态下脱气原油 (无气体) 的粘度与 API 重度和温度相关。

溶解气体的体积对含气原油的密度有很大的影响。通常人们计算此密度所采纳的方法是由 Chew 和 Connally 研制出的相关式。他们运

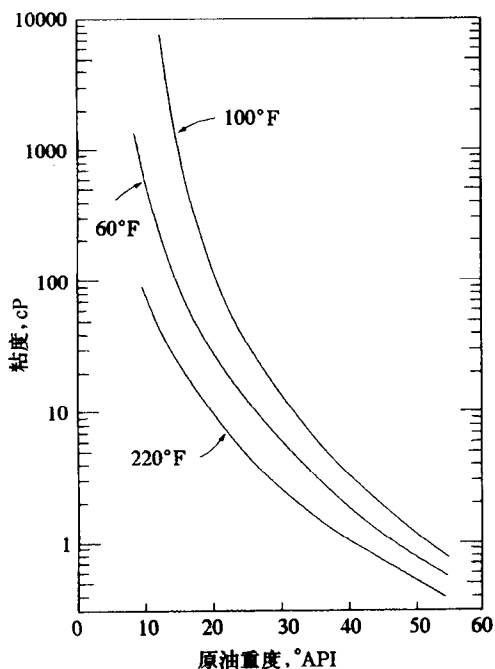


图 2-1 大气压状态下脱气原油的粘度

用了下列公式：

$$\mu_o = A (\mu_{od})^b \quad (2-12)$$

式中 μ_o ——含气原油的粘度，cP；

μ_{od} ——脱气（无气）原油的粘度，cP。

作者在图中给出了系数 A 和 b ，他们是随着溶解 GOR 的变化而变化的。用下列所给出的方程可较近似地得出这两条曲线。

$$A = 0.2 + 0.8 \times 10^{-0.00081R_s} \quad (2-13)$$

$$b = 0.43 + 0.57 \times 10^{-0.00072R_s} \quad (2-14)$$

三、天然气的特性

1. 气体的特性

在讨论天然气的特性前，关于理想气体的一些问题需要详细考虑。与气体所占据的空间相比，理想气体的分子是很小的，这类气体的动用理论阐述了给定理想气体体积的体积、绝对压力、绝对温度和所包括的总分子数之间的关系。这个关系由理想气体定律所描述。依据这一关系，在其他三个参数已知时，可计算任何参数。

天然气是气体混合物，主要含有烃类气体以及浓度通常较低的其他组分。由于他们的性质和成分复杂，不能把他们看做是理想气体，不能用理想气体定律进行描述。因此建议用几个不同的方法来描述气体的特性，这些被称作状态方程，通常试图描述所谓的气体状态参数：绝对压力、绝对温度及体积之间的关系的经验方程。最广泛使用的最简单真实气体状态方程是工程状态方程：

$$pV = ZnRT_a \quad (2-15)$$

式中 p ——绝对压力，psi；

V ——气体体积，ft³；

Z ——天然气偏差系数；

n ——摩尔数；

R ——气体常数， $R = 10.73$ ；

T_a ——绝对温度，°R = $T(^{\circ}\text{F}) + 460$ 。

仅仅由于含有气体偏差系数，有时候指的是含有压缩因数或超压缩因数，而使工程状态方程与理想气体定律不同。它是造成真实气体体积在同等条件下与理想气体有偏差的原因，所以它被定义为：

$$Z = \frac{V_{\text{真实}}}{V_{\text{理想}}} \quad (2-16)$$

这样，描述天然气特性的问题就缩小到恰当地确定偏差系数这个问题上了。

确定偏差系数最普通的方法是依对应状态定理而定。此定理阐明了对于象天然气这样的真实气体混合物，如果他们的拟对比参数相同，那么他们的特性也相似。拟对比压力和温度的定义为：

$$p_{pr} = p/p_{pc} \quad (2-17)$$

$$T_{pr} = T_a / T_{pc} \quad (2-18)$$

在公式 (2-17) 和 (2-18) 中, p_{pc} 和 T_{pc} 是气体的准临界压力和温度。他们可作为加权平均值从单个气体组分的临界参数中确定。

运用此定理, 普通天然气混合物的偏差系数可能是拟对比参数的函数。人们普遍采纳的 Z 因数相关式是 Standing 和 Katz 所给的, 见图 2-2 是复制图。

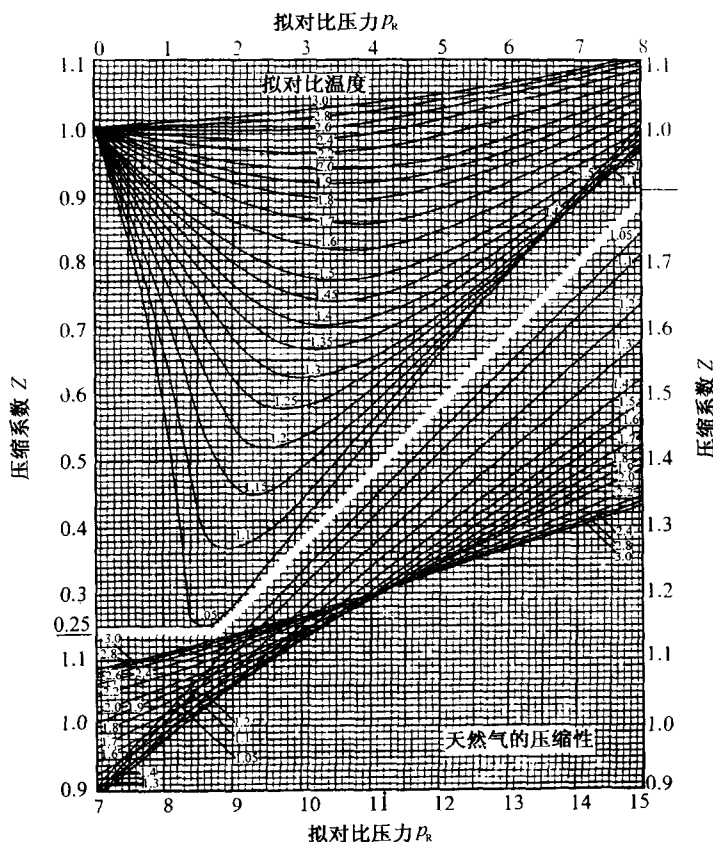


图 2-2 天然气的偏差系数

例 2.4

如果准临界参数 $p_{pc} = 630 \text{ psi}$ (4.35 MPa), $T_{pc} = 420^\circ \text{ R}$ (233 K), $p = 1200 \text{ psi}$ (8.28 MPa), $T = 200^\circ \text{ F}$ (366 K), 求出天然气的偏差系数。

解: 拟对比参数是:

$$p_{pr} = 1200 / 630 = 1.9 \text{ psi}$$

$$T_{pr} = (200 + 460) / 420 = 1.57^\circ \text{ R}$$

运用这些值, 从图 2-2 中可知 $Z = 0.85$ 。

2. 气体体积系数 B_g

工程状态方程使其能够直接计算气体的体积系数。在已知摩尔数的情况下, 公式 (2-