

气井试井理论与实践

加拿大国家能源保护委员会 著

气井试井理论与实践

加拿大国家能源保护委员会 著

石油工业出版社

石油工业出版社

气井试井理论与实践

加拿大国家能源保护委员会著

童宪章 陈元千 史久浩 周维四 译 陈元千 校

8x30/26

石油工业出版社



B520291

内 容 提 要

本书是加拿大国家能源保护委员会在本书第二版的基础上编写的。全书共七章，建立了气井试井的理论基础，介绍了气井产能试井、压降试井和压力恢复试井。阐明了如何从不同类型的试井工作中，建立可靠的气井产能关系式。叙述了成熟的试井技术和试井数据资料的解释方法。附有大量实例，有助于油气工程师解决气井试井中的实际问题。

* * *

本书由史久浩（第一章、第二章的1~6、8和9节）、周维四（第三、四章）、董宪章（第五、六章）、陈元千（第三版序言、第二章的7、10、11节和第七章、附录A、附录B、附录C、符号及单位表和单位换算表）四位同志译，全书由陈元千校订。

ENERGY RESOURCES CONSERVATION BOARD
THEORY AND PRACTICE OF THE TESTING OF GAS WELLS
THIRD EDITION
ENERGY RESOURCES CONSERVATION BOARD 1976

气井试井理论与实践

加拿大国家能源保护委员会 著
董宪章 陈元千 史久浩 周维四 译 陈元千 校

石油工业出版社出版
(北京安门内大街东口二区一号楼)
北京计量印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16 开本 18³/₄ 印张 457千字 印1—2,000

1988年8月北京第1版 1988年8月北京第1次印刷

书号：15037·2935 定价：4.80元

ISBN 7-5021-0083-0/TE·83

11



第三版序言

《气井试井的理论与实践》第三版,是石油与天然气管理局(能源保护委员会的前身)一九六四年出版的手册的修订本。它反映了从一九六五年六月第二版出版以来,天然气工程研究的某些进展,包括地层中的流动特性和井筒中的流动特性这两方面问题的进一步研究。由于前几版已被油气田现场及一些高等院校广泛采用,所以管理局编辑了这第三版本。

这一版改变了前面几版的侧重点,更详细地叙述了气井试井的理论基础。前几版主要内容是回压试井和井底压力计算。在这一版中内容涉及更为广泛,详细地介绍了产能试井,压降试井和压力恢复试井。主要目标之一是阐明如何从不同类型的试井工作中,去建立可靠的产能关系式。在这一版中较多地注意到了一些更新、更成熟的试井技术和试井数据资料的解释方法。在这本手册中还包括了有关试井工作的现场作业的章节,但没有详细介绍。

这一版中,和过去的气井试井工作常采用的解释方法有着一个重要的变更,那就是采用一个“拟压力”(有时称为“真实气体势函数”)来代替在气体流动方程中的压力或压力平方项。本书叙述了这种更严格的处理气体流动的方法原理。虽然大部分的介绍是采用了“拟压力”,但在内容上也作了适当的安排,使读者仍然可以使用习惯的压力或压力平方的近似方法。另外一个与常用方法不同之处是基本的产能方程表达式和基本的产能关系图。本书用拟压力的形式给出产能方程式,并把层流对产量的影响而形成的拟压力降落绘成对数曲线。采用这种方法的原理和与此有关的其它细节,本书均有介绍。

这一版的最初准备工作是由原管理局的工作人员 L. Mattar 先生进行的,并为管理局天然气部的 G. S. Brar 先生所完成。经过加尔格里(Calgary)大学的 K. Aziz 教授,管理局的成员 G. J. Desorcy 先生以及我本人组成的一个委员会对他们的工作进行了指导。管理局天然气部的 M. E. Mumby 先生在工作中帮助过 L. Mattar 和 G. S. Brar 两位先生。

本书使用的单位一般是北美油气工业中通用的单位制。在理论章节中给出了供参考的达西单位制和米制(SI)单位制。而且在“符号名称表”中同时给出了各种矿场单位的米制当量。管理局打算与加拿大油气工业界共同把它们所属各组织中流行的单位制统一改成米制。管理局希望在一九七八年底前后把单位制改正过来。目前,我们决定不让本书的第三版影响油田现行使用的单位。几年内将出版第四版并使单位制全部改成米制(SI)系统的。

本书中收集了一切合适的理论来充实气井试井与结果解释的实际工作。与工业界的直接商讨至今还很有限。但这个第三版还是听取了工业界的评论与建议。尽管在编辑过程中努力消除了印刷方面以及其它方面的一些错误,但难免会有遗漏之处,我们希望能注意发现这些错误。技术方面的评论和对错误的指正可以直接寄给天然气部经理。第四版将加进从工业界收集到的技术意见。

这本书编写成这样一种形式,使它所提出的气井试井程序只作为理论、实践和逻辑思维的参考,而不打算作为管理局的试井工作指令。本书附录中给出了已经被管理局采用了的气井试井数据和结果报告的标准表格。管理局对试井工作的要求,在油气管理条例的有关规定中已有叙述。这个条例采用了本书的部分内容。

管理局感到高兴的是本书的前几版已被工业界所采用，相信第三版本将进一步为我们开始规定的目标服务，这个目标就是，改进气井试井的工艺，并帮助保护资源。

G. W. Govier

能源保护委员会主席

一九七五年九月

目 录

第一章 绪 论.....	(1)
§1 历 史	(1)
§2 试井的种类	(1)
§3 现场作业及试井报告	(2)
§4 试井的选择及周期	(3)
第二章 理论基础.....	(5)
§1 引 论	(5)
§2 动量方程式	(6)
§3 连续方程式	(11)
§4 状态方程式	(12)
§5 流动方程式	(13)
§6 流动方程式的直接解析解	(29)
§7 流动方程式的进一步解析解	(48)
§8 流动方程式的数值解	(62)
§9 理想模型的偏差	(64)
§10 流动方程的图解(典型曲线)法.....	(72)
§11 气体流动方程式分析方法(压力、压力平方或拟压力)的选择.....	(79)
第三章 产能试井.....	(87)
§1 引 论	(87)
§2 基本方程式	(88)
§3 稳定流常数的确定	(91)
§4 涉及到稳定流动的试井	(93)
§5 不涉及稳定流动的试井.....	(106)
§6 井口产能.....	(107)
§7 关于产能试井的重要考虑.....	(107)
§8 产能试井设计指南.....	(110)
§9 计算和绘制试井结果.....	(115)
§10 注 释	(117)
第四章 压降试井	(121)
§1 引 论.....	(121)
§2 基本关系式.....	(122)
§3 利用早期数据的试井.....	(125)
§4 利用不稳定流数据的试井.....	(125)
§5 利用拟稳定数据的试井.....	(138)

§ 6 关于压降试井的重要考虑.....	(140)
§ 7 生产能力.....	(142)
§ 8 压降试井设计指南.....	(143)
§ 9 计算和绘制试井结果.....	(145)
§ 10 注 释.....	(146)
第五章 压力恢复试井	(152)
§ 1 引 论.....	(152)
§ 2 基本关系式.....	(153)
§ 3 应用早期资料的试井方法.....	(155)
§ 4 应用中期和晚期资料的试井方法.....	(155)
§ 5 其他分析方法.....	(165)
§ 6 有关压力恢复试井的重点考虑.....	(167)
§ 7 气井的产能.....	(177)
§ 8 设计压力恢复试井的指导原则.....	(179)
§ 9 试井结果的计算和绘图.....	(180)
§ 10 钻杆测试 (DST) 过程中的压力恢复分析	(180)
第六章 有关试井工作现场实施和报告编写的一般准则	(182)
§ 1 引 论.....	(182)
§ 2 有关气井试井的设施.....	(182)
§ 3 计量和取样.....	(183)
§ 4 现场作业和试井成果报告的编写.....	(188)
第七章 利用有限的资料确定气藏参数和流动特性	(191)
§ 1 引 论	(191)
§ 2 基本理论.....	(191)
§ 3 气藏参数的确定.....	(192)
§ 4 流动状态的估计.....	(201)
§ 5 平均气藏压力的预测.....	(205)
附录 A 天然气的性质	(208)
附录 B 气井井底压力的计算	(237)
附录 C 图和表	(255)
符号及单位表	(268)
单位换算表	(279)
参考文献	(280)

第一章 绪 论

以合理的准确性分析气井的动态，预测气井的产能，并了解气层的特性，这在当今的天然气工业中是至关重要的。在分析气井动态时最有用的方法之一是流动试井。对一次成功试井的结果进行全面的分析和认识，可以使我们确定地层的静止压力；确定在一定管线回压下气井的产量；预测随着地层压力的消耗和降低而导致的产量递减；并确定有效的地层流动特性。

生产管理部门经常利用试井结果来制定最大采气速度。试井结果还被生产和输气部门用来规划气井的供气能力，编制开发方案，设计集输及管线设备，以及设计加工装置，并用于签订供气合同时的谈判。

当计算与一口井或一个井组有关的天然气储量，进行各种储集层专题研究时，试井和在试井时收集的资料也有重要的用途。

§ 1 历 史

过去利用气井放喷和直接测量气井的“绝对无阻流量”的试井方法，现在从保存天然气及安全的观点来看，这种试井工艺是不可取的。为了评价气井的生产能力，我们研制了一种能在合理的和有控制的产量下进行的生产试井方法。第一种这样的试井方法叫做“常规回压试井”。以后又发展了一些其它类型的更为实用的试井方法，其中包括“等时试井”和“修正的等时试井”方法。这些试井方法已经在生产中得到了广泛使用。最近又出现了一种由开井和关井生产两者结合进行的试井，其操作和解释都更为先进，由它可以确定气井的流动特性。另外，对于确定地层压力的方法也有了更多的了解。气井流动试井的历史将在第三章中详细地讨论。如果想要了解和研究更先进的气井试井方法，需要对地层中气体流动的理论有一个系统的认识。因此，本书的第二章中详细地讨论了有关的一些理论，其内容是介绍流体通过多孔介质流动时的基本方程，以及在各种边界条件和各种气层形状下的特解，还有说明这些方程如何应用的例题。

§ 2 试井的种类

气井流动试井基本上有两种：第一种主要是用来测定气井产能的试井；第二种主要是用来了解地层情况的试井。

常规回压试井和等时试井是主要用于测定气井产能的两种试井方法。这些试井方法在本书第三章中有详细的讨论。第三章介绍了产能试井的基本理论。对几种产能试井给出了分析试井数据的不同方法，还附带有解释试井资料所需的主要计算与作图的实例。第三章还详细地介绍了在产能试井中必须考虑的一些重大问题，如达到气井稳定流动所需的时间和试井时确定稳定产量的要求。在第三章、第四章和第五章的末尾附有注释。注释中包含了方程的推

导和某些并非了解本手册所必须的，但又为某些读者感兴趣的其它资料。

以了解地层情况为主的试井，可以进一步分成压降试井和压力恢复试井两大类，它们亦可用于研究气井的产能。这些试井方法常被用来探测地层的外边界状况，并用于确定气井的稳定生产能力。第四章中对压降试井作了详细的讨论。与前一章类似，第四章也是先介绍基本理论，然后再介绍不同种类的压降试井，诸如单一产量的压降试井和多产量的压降试井。与此同时，还介绍了试井结果的分析方法。这一章中还讨论了生产时间和对产量稳定性的要求，以及另外一些关于压降试井的重要问题。这一章还讲述了压降试井的计算、作图和资料分析方法，并附有适当的例子。

压力恢复试井所能了解的地层流动特性与压降试井法相同，并可用来确定一口特定井的供给面积内的平均稳定地层压力。第五章利用与前两章相同的方式，对各种几何形状地层，系统介绍了压力恢复试井的基本理论公式，还讨论了分析数据资料的不同方法，介绍了压力恢复试井的某些重要考虑，并附有说明怎样利用压力恢复资料进行计算、作图和解释的例子。

除了通过专门试井来确定地层的流动能力外，根据短期流动试井、测井或岩心及天然气性质的估计等所取得的有限资料也可以确定地层的流动性质。第七章谈到了这种方法并介绍了这种估算方法的基本理论，并附有适当的例子。

§ 3 现场作业及试井报告

一个成功的试井方案，除了需要全面理解在多孔介质中气体流动的理论外，还需要具有在现场实施试井的知识和一些切合实际的步骤。另外，还应写出试井报告，在报告中应包括所有有关的数据并保证试井结果能得到最大限度的使用。本书第六章详细地叙述了气井试井的现场实施与气井试井报告。其中也讨论了较重要的试井设备，特别是计量产量和测量压力的仪器。第六章还讨论了应该收集的数据，以及试井报告所应该包括的资料。

为了准确地测量或估算产量和压力，必须了解产出气体的性质。在附录 A 中详细讨论了天然气的某些重要性质，并附有阐述如何去计算或估计这些性质的实例。附录中还有在进行试气计算时所需的天然气组分物理性质的记录表格。

在气井试井时压力测量的精度是十分重要的。由于回压试井结果的解释必须以地层中气体流动理论为基础，因此在试井解释工作中最需要的压力数值是地层压力值。最理想的情况是采用一支精确度高，并经过仔细校正过的井底压力计去直接测量地层压力。目前已经有了许多种这类压力计，如果使用得当，足以获得十分精确的直接地层压力。在某些场合下，可能由于机械上的困难或其它原因而无法使用井底压力计。除此之外，某些浅井还可以利用井口压力准确地折算出井底压力，从而就不需要用井底压力计直接测量。所有这些情况，往往是只测量井口压力值，然后换算成井底压力。这样一来，十分重要的是尽可能准确地测量井口压力，通常采用真重仪测量能得到最好结果。

已有许多种把井口压力换算成井底压力的方法，每种方法都有各自的优缺点。附录 B 中详细介绍了一种适用于单相气体从井口压力换算成井底压力的方法。同时还讨论了井筒中存在气液两相的情况。

书中出现的一些比较冗长，但对介绍和理解各章内容并非必需的图表，均放到附录 C 中。

现场实施试井数据的报告和分析要求,在不同的管理部门是不一样的。艾伯塔(Alberta)管理局的这些要求已列入油气规范内,本书就不再重复。

§ 4 试井的选择及周期

不仅有着确定产能和了解地层性质这两种主要的气井试井,而且每种试井还有着各种不同的方法,例如。产能试井就包括常规的、等时的、修正等时的以及单点试井等方法。气井试井的一个很重要的特点就是怎样选择一种合适的试井方案和以什么样的合适周期去进行,同时还应考虑到试井的成本和在整个生产过程中所需了解的地层流动性质。

是否进行试井和用什么方法试井,要由以下几个方面的考虑来确定:试井结果的用途,井为之服务的市场,井是否连接到一个输气管道系统,井在过去是否进行过试井,同一地层中其它井在过去是否进行过测试,井的修井史,是否存在出水问题,以及任何有关生产层位的有意义资料。在试井过程中,或者在决定是否需要进行试井的时候,第一步工作就是去收集所有有关的资料。还要建立一个综合表格,填写全部与井位,完井情况,井的可能生产能力及其它能影响试井方案设计的有关资料。经过对这些资料的仔细评价,提出一个概括的或全面的试井方案。例如,这时可以决定在气藏内几口新井上进行广泛的试井,以取得有关产能和构造特性方面的资料,同时还可以决定在其余的井上进行有限的试井。确定了一般方案后,下一步就可以仔细地设计试井的每个步骤,包括要考虑所使用的设备,恰当的产量和生产持续的时间。

下面给出一个试井时可能建立方案种类的途径。如果要确定在一个新产层中刚完井的新探井的试井方案,而且对此新产层又知之甚少,那末一般的规律是应该进行广泛的测试工作。在这种场合下,由于管线和其它生产设施一般都不能使用,所以产出的天然气就只得放空。事实上,管线的尺寸和生产设施的规模常常是由初始试井的结果所确定。因为天然气将被放空,面对大量的天然气损耗,必须仔细地取得最大限度的有用资料。若钻杆测试,测井解释或其它资料表明了储集层具有相当高的生产能力,则无需大量放空天然气就可以进行广泛的测试。在这种情况下,测试前先进行“清洗”是恰当的,然后再继之以单产量压降测试。压降试井应该是能以最少的产量取得有用的资料,以及用最短的时间周期取得稳定生产的知识。在试验周期里应该收集产量和压力数据。压降数据的分析应该指明储集层的生产能力,并且有助于确定生产设施的恰当规模及井的生产是否经济。在压降试井之后可以接着进行压力恢复试井,压力恢复试井分析可以得出地层生产能力的更进一步的资料,同时还能得到储集层范围的某些知识,这只要利用一个新的关井稳定地层压力就可以办到。在压力恢复试井之后,可以进行多产量测试来建立回压和产量的关系。因为初始试井对建立稳定产能曲线十分有用,所以采用等时试井更为恰当。

上述的试井类型只是许多广泛试井过程中可以被采用的一种。如果天然气只能放空,则只能用来测试一口新产层的新井,并且有关产层的资料又能表明它具有较高的生产能力。如果钻杆测试或其它的资料表明生产能力很低,则可以修改测试工作以减少有关的放空。例如“清洗”阶段可以延伸成单产量压降试井,再接着进行压力恢复试井。而初始生产周期约为“清洗”周期所需时间的十倍左右,这里就不再需要多产量试井。从压降测试和压力恢复测试得到的数据可以用来计算储集层特性和回压-产量关系,同时稳定条件的识别也可以从这

些计算中得出。

上述的试井程序还适用于非常新而未知的气层的新井测试。如果新井是在一个部分开发的层位中钻完,并且有了某些储集层的资料,试井的复杂性就可以减少。例如,如果已知地层具有较高的生产能力,就可以进行四点等时试井。然而,既然已经掌握了地层的某些情况,并且天然气的放空又是必需的,那么就无需进行试井工作。在这种情况下,确定稳定生产点的工作被推迟到井可以接到输气管线系统时再进行。在开发已知生产能力很低的层位时,进行多产量测试造成了天然气的不必要的浪费。因此选择新井有代表性的几口井进行“清洗”并延伸成压降测试,并继之进行压力恢复测试,通过测试可以计算出地层参数。

在一个产层中钻成的附加井,这些新井只要求少许的测试工作。如果所说的是一个几乎完全开发了产层中的一口新的加密井,在它进入输气管线系统生产之前一般无需进行测试。这个时期可以先进行单产量或双产量的生产测试,以便对新井产能和现有井的产能作比较。一口生产井对于随之而来的测试要求,就理论上的考虑来说,在一口井的生产期间只要求一次综合试井就够了。然而,由于理论中的某些缺陷,储集层性质可能会有改变,尤其是在井底附近更会发生变化,所以在四到六年以后,至少增加一次多产量试井看来更合适些。多产量试井在天然气可以进入输气管线的情况下,也可用临时的单产量测试代替,使得在井的产能发生变化以后可以用来确定新的产能。如果变化得到证实,更正确的作法是进行广泛的试井。试井的实际间隔受许多因素的影响。最重要的因素,以及它对一个正确规划了的试井程序的影响如下所述:

1. 在任何修井工作之后,或者生产设备发生了变更而使井的供气能力有显著的改变,或者井的动态表明生产特性发生了显著变化,这些情况下的气井都应进行广泛的试井。
2. 在同一生产层位钻井和生产的井数将对试井方案有影响。应取得足够的可用资料,使试井工作精确地追索生产层的压力史,确定产层的产能潜力。
3. 强采结果导致储集层发生污染的可能性也会影响到生产测试的工作时间。对一个具体的储集层,如果需要严格地控制最大产量,以防止气井污染,那么就应当增加测试次数以确保在全部期间都能取得合格的,确定气井产能动态的资料。
4. 天然气供应的最终市场是个重要的因素。如果所供应的市场要求给出目前气井的高度精确的产能,那就需要大量的测试。

总之,一个合乎要求的试井方案应该规划成能以最经济的方式去取得最多的技术资料,并在一个生产层的整个开采期间有意识地安排一系列的单产量测试、多产量测试和压力恢复测试。如果一口井碰巧是首先钻开一个生产层位,那就极有可能在一开始就进行包括压降和压力恢复等在内的广泛试井。此后,在这口井的生产期间至少要有八到十次单产量测试和一到二次多产量测试。每几年还应确定一次关井稳定地层压力。对于在已开发的产层钻开的气井,初始测试不必过于广泛,事实上这口井的整个试井工作可以包含一到二次多产量试井,确定五到八个稳定地层压力,以及在整个生产周期中合理地分为八到十次单产量试井。

在设计一个试井方案时必须牢记一个重要原则,那就是必须取得充分的可用资料去正确指导气藏的采气工作,同时从每次具体试井取得的资料必须有价值,测试的代价也包括天然气放空的数量。就工业界当前已有的试井情况而言,一般的看法是,即使要求进行较少的测试,但对测试工作的进行也要给予更大的关注,从而在测试期间能收集更多的数据,并对试井数据的分析工作采用更多有效的方法。

第二章 理论基础

§1 引 论

1.1 目的

这一章叙述了气井的流动和压力测试的基本理论。如果仅仅为了实施气井测试,进一步理解这些原理,就不太必要了。但是,测试结果的解释是建立在理论的基础上。因此,提供一个完整的理论知识及其使用条件就有着重要的意义。此外,为了确定所需要的参数,还要在理论考虑的基础上合理地叙述一些特殊的测试,以及在矿场中如何实施这些测试,这就需要对这些测试的有关方程式进行相应的数学处理。

本章推导了流体通过多孔介质流动的基本方程式,对于不同边界条件和地层几何形状提供了有意义的解,这些解在试井设计、流动与压力解释上很需要。

由于无因次形式固有的简单性,无论在哪里应用都是方便的。对于确定的系数和求解微分方程式,所需要的假定和近似,都做了明确的叙述。叠加原理已被用于求解井间干扰、变产量、以及处于非圆形地层内的井等问题。对流动方程式数值解的应用也做了讨论。井的污损或处理,以及井筒储集或卸载等情况,都给予了应有的考虑。在本章中推导的理论,一般适用于单相、层状流动,但对由于惯性和湍流影响所产生的偏差也作了考虑。为了试井的目的,在地层中的两相流动,使用一个等价的单相流度的办法,做了解析上的处理。

1.2 连续介质近似法

当研究通过多孔介质的流动时,可以观察到,在介质中流动孔道的截面积和分布变化很大。通道的方位是随机的,通常有些突然发生终止,形成了封闭的死胡同。这些死胡同只提供介质的孔隙度,而对介质流体的渗透率没有作用。介质的这些随机特性,使得从单一孔隙的几何研究去预测流动的状态变得十分困难。在实际应用中,只能使用统计的平均结果。在这方面,一个有用的概念就是连续介质方法。这种处理方法是把介质看成一个孔隙度、渗透

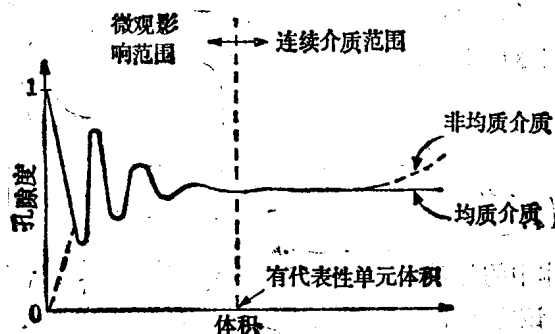


图 2-1 有代表性单元体积的定义

率等性质在每个点上均有定义的连续体。这些性质反映了介质的主要状态。

例如，以介质的孔隙度举例说明，在介质内每一点上作微观研究，孔隙度在0~1之间交替变化。因此，平均孔隙度是体积的一个函数。此变化性质见图2—1所示。由该图看出，假定整个体积的平均孔隙度小于一个确定的数值，此体积叫做受微观影响控制的有代表性的单元体积。当大于这个值时，介质的状态在微观水平上看成为连续的。假若平均值太大，而介质又是非均质的，则孔隙度的微观变化将开始表现出它们的影响。

类似地，在包括流体流动的实际问题中，连续方法可用于流体。流体是由大量的，各个方向运动的分子所组成。放置在容器中的流体分子将彼此碰撞或与容器壁碰撞。若不把流体看成为连续性的，只是在分子的范畴里研究流体的流动，就会使问题复杂化。我们仍然采用流体体积的某个值来定义一个代表性体积单元。当流体体积小于这个数值时，分子效应就变得显著。当大于这个数值时，流体就可能赋予某些总体性质，如密度或粘度等。对于孔隙介质连续近似法，在 Bear (1972, P.15) 和 De Wiest (1969, P.92) 的文章中，作了广泛的讨论。

1.3 基本方程式

关于求解流体流动问题的第一步，是了解它们在数学上的表达式。通过如下叙述的一组五个基本方程式的应用 (Govier 和 Aziz, 1972, P.119)，对问题进行求解。

(1) 结构方程式 (The Constitutive equation)，它叙述了流体动态的流变性质。它是作用于流体上的剪切力和因之而产生的剪切速率之间的关系。正如在附录 A 中作了详细叙述的那样，对于任一给定的温度和压力，用结构方程确定牛顿流体的粘滞性。目前发展的情况是，它合并于运动方程之中，此点在 2.1 中作了讨论。

(2) 动量方程式 (The momentum equation)，它是牛顿的第二运动定律对流体系统的应用。在本质上这是作用在系统上的力平衡。

(3) 连续方程式 (The Continuity equation)，它是质量守恒定律的一个表达式。

(4) 状态方程式 (The equation of state)，它把流体的密度同温度与压力联系在一起。

(5) 能量方程式 (The energy equation)，它是能量守恒定律的一个表达式。它考虑到能量变化的不同类型，以及在非等温流动系统中最关心的问题。在气藏流体的流动中，这些能量的影响可以忽略不计。

由实验和理论研究得到的动量方程、连续方程和状态方程，在下一节中将进一步论述。首先是推导动量方程，其次是连续方程。这两个方程再加上状态方程，就可以用压力代替密度。这样就得到流体通过多孔介质流动的基本偏微分方程式。在普通坐标上，该方程式可以表示为直角的、圆柱的或球形坐标的形式，并用适当的方法求解。

§2 动量方程式

2.1 理论考虑

流体在任意形状导体中的运动，由 Navier-Stokes 方程组描述 (见 Bird, Stewart 和 Lightfoot, 1960, P.79)。该方程组，是由作用于所研究区域内的任一微分单元上的动量平衡推导出来的。然后，将方程组简化为在流体单位体积上的力平衡，即

$$\text{质量} \times \text{加速度} = \text{压力} + \text{粘滞力} + \text{重力}$$

粘滯力是由于作用在流体上的剪切应力产生的。它可以使用流体的结构方程，利用速度梯度和粘度加以表示。

对于流体在多孔介质中的流动，流动孔道有着复杂而未知的形状，而 Navier-Stokes 方程组只能用于平均的观念。甚至可以做出象层流、忽略惯性影响或不可压缩流体等一些必要的近似假定。而与假定的孔道几何形状有关的形状系数，可以由实验确定。这样分析的结果类似于达西定律或某些修正的达西定律，这要取决于所做的假定（见 Hubbert, 1956, Irmay, 1958）。鉴于这些复杂性，为了得到能用于实际的一种形式的动量方程式，通常采用一个压力梯度与流动速度之间的经验关系式。在 2—3 节中所讨论的达西定律，是这样关系的一个例子。

2.2 经验观测

在地层中气体或液体的稳定流动，可能是层流，也可能是湍流或两者的综合。这最初是被 Fancher 和 Lewis (1933) 所论述，此后又被其他人所证明。Fancher 和 Lewis 对于气体通过各种可渗透的实体岩心，在压差与流量的关系上做了广泛的测量，他们利用一个修正的 Fanning 摩擦系数和一个修正的雷诺数，表示了他们的结果。两者分别定义为：

$$f_g = \frac{g_o d_g \Delta p}{2 u^2 \rho \Delta x} \quad (2-1)$$

和

$$Re_g = \frac{\rho u d_g}{\mu} \quad (2-2)$$

式中

- Δp ——压差；
- g_o ——因次变换系数；
- Δx ——x 方向的距离；
- ρ ——流体密度；
- μ ——绝对粘度；
- d_g ——平均颗粒直径；
- u ——表面速度。

对于所研究的每种多孔介质，根据 Fancher 和 Lewis 的实验数据，把 f_g 与 Re_g 的关系绘在双对数坐标纸上，对于低的雷诺数得到了一条斜率为 -1 的直线。随着 Re_g 变为大于 1.0 之后，由于过渡到湍流，直线开始变平。不同介质可由类似的曲线表示。

Cornell 和 Katz (1953) 对于不同类型多孔介质的数据，连成一条简单的曲线，见图 2—2。重新定义的摩擦系数和雷诺数如下：

$$f_{CK} = \frac{64 g_o \Delta p}{\beta \rho u^2 \Delta x} \quad (2-3)$$

$$Re_{CK} = \frac{\beta k \rho u}{6.33 \times 10^{10} \mu} \quad (2-4)$$

式中

- β ——湍流系数，它是一个表征多孔介质特性的常数。它取决于介质的孔隙度、弯曲度、渗透率、孔隙形状和孔隙大小的分布等性质；
- k ——介质的渗透率。

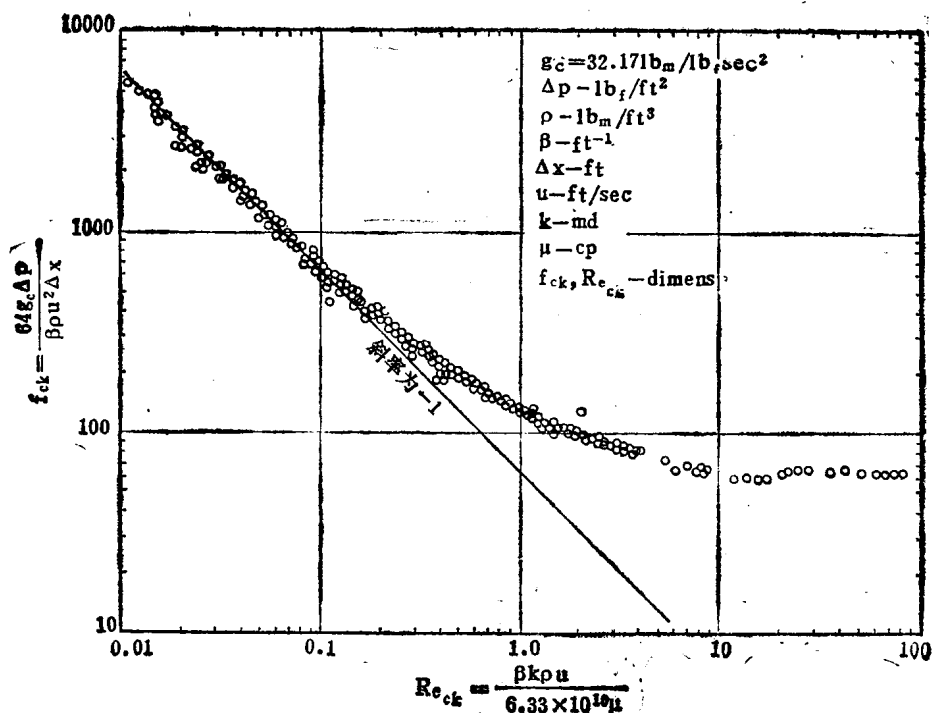


图 2—2 对于在多孔介质中流动所修正的摩擦系数
(引自 Cornell 和 Katz, 1953)

当把图 2—2 同管线中流动的图 B-1 相比较时，其相似性是容易观察到的。也就是说，在低流量时得到了层流，经过一个过渡区，随着流量的增加达到了湍流。对于流体在多孔介质中的流动和对于流体在管线的流动，过渡区的雷诺数是不同的。

因为在低流量下流动主体部分的特性不同于高流量下的特性，因此，对于每个流动范围的运动方程式将分别加以考虑。

2.3 低流量（层流影响）

对于常数流量下水通过多孔介质的一维稳定流动，达西 1856 年通过实验发现，对于给定的多孔介质，压差与流量成正比。这在图 2—2 上相当于斜率为 -1 的直线部分。进而，Led Wyckoff, Botset, Muskat 和 Reed (1934) 对于不同的流体，做了多孔介质中的线性水平流动的实验，并给出了如下的达西定律形式：

$$\frac{q}{A} = u = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2-5)$$

式中

q ——流量；

A ——总的横截面积；

$\frac{dp}{dx}$ ——在 x 方向的压力梯度；

k ——渗透率，当 q 为 cm^3/sec ， A 为 cm^2 ， u 为 cm/sec ， p 为 atm ， μ 为 cp 和 x 为 cm

时, 渗透率的单位为达西。

(2—5) 式可表示为:

$$\frac{\mu}{u} = - \frac{k}{u^2} \frac{dp}{dx} \quad (2-6)$$

该方程式的左边和 $1/Re_g$ 成正比, 右边和 f_g 成正比。于是, (2—6) 式可以写为:

$$\frac{1}{Re_g} \propto f_g$$

该式表明, 在双对数坐标纸上绘制 f_g 与 Re_g 的关系图, 是一条斜率为 -1 的直线。从而证明了在图 2—2 中斜率为 -1 的直线部分是与达西定律等价的。

由 (2—5) 式可以给出广义的一维达西定律形式。对于任何方向的流动为:

$$u = - \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) \quad (2-7)$$

式中

u ——速度矢量;

k ——渗透率张量;

∇ ——梯度算子;

g ——重力矢量, $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$;

g ——重力加速度。

在笛卡尔直角坐标系中, 速度的三个分量可表示为:

$$u_x = - \frac{k_x}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2-8)$$

$$u_y = - \frac{k_y}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (2-9)$$

$$u_z = - \frac{k_z}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \right) \quad (2-10)$$

在写 (2—7) 式的表达式时, 假定 z 是以垂直向下方向为正, 而张量 k 的形式为:

$$\begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

介质假定是各向异性的, 因此, 在三个坐标方向上的渗透率是不相同的。假若介质是各向同性的, 则在所有点有:

$$k_x = k_y = k_z = k$$

假若整个介质的渗透率与位置无关, 则介质称为是均质的。反之, 该系统是非均质的。

Hubbert (1940) 把势 E 定义为:

$$E = \int_0^r \frac{1}{\rho} dp - zg \quad (2-11)$$

式中

ρ ——密度，为压力的函数；

z ——垂直向下的距离；

p^0 ——任意的参考压力。

利用势表示的达西定律为：

$$u = -\frac{k\rho}{\mu} \nabla E \quad (2-12)$$

从在均质价质中流体的流动可以发现，渗透率 k 与流动的流体无关，只是介质的一个属性。但是，在气体流动的情况下，Klinkenberg (1941) 观察到，当介质的孔隙大小与气体分子的平均自由路程的大小相同时，在流体与固体的接触面上会产生滑脱，从而气体的渗透率将不再是常数。在这种条件下，低压下的滑脱变得显著，此时渗透率被表示为：

$$k = k_L \left(1 + \frac{b_1}{p} \right) \quad (2-13)$$

式中

k_L ——在无限大压力下介质对气体的渗透率(它的数值应当等于介质对液体的渗透率)。

b_1 ——取决于气体与多孔介质系统的常数。

Dranchuk 和 Flores (1973) 指出，对于低渗透层 (0.1 md)，在一些边界条件下，Klinkenberg (克林肯贝格) 效应在高地层压力下 (2 000 psi) 也是很显著的。

2.4 高流量 (惯性和湍流影响)

随着流动速度的增加，产生了偏差达西定律的现象。许多研究工作者把它归因于湍流影响 (见 Fancher 和 Lewis, 1933; Elenbaas 和 Katz, 1948; Cornell 和 Katz, 1953) 或惯性影响 (见 Hubbert, 1956; Houpeurt, 1959)。一般公认的解释 (见 Wright, 1968) 是，随着速度的增加，惯性影响引起最初的偏离，湍流影响着更高速度下的流动。Hubbert (1956) 注意到，在流动的雷诺数在 1 附近时 (基于非胶结介质的颗粒半径)，开始偏离达西定律。而在雷诺数一直到接近 600 以前，湍流是观察不到的。从单纯的层流过渡到完全的湍流，包括一个很宽的流量范围。对于水平的稳定流动，该流量范围可由一个如下的二项式 (Forchheimer, 1901) 表示：

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} u + \beta \rho u^2 \quad (2-14)$$

(2-14) 式包括了层流、惯性流和湍流 (LIT) 的影响。对于稳定流动，它是一个一般的动量平衡方程式。该式可以重新整理为下式：

$$u = -\delta \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2-15)$$

式中的 $\delta = 1 / \left(1 + \frac{\beta \rho k u}{\mu} \right)$ 是层流-惯性-湍流 (LIT Flow) 修正系数 (见 Govier, 1961;

Wattenbarger 和 Ramey, 1968)。当 $\delta = 1.0$ 时，(2-15) 式等价于达西定律。

在各向异性的介质中， x 、 y 或 z 方向上的 δ 也是各不相同的。当重力影响可以忽略时，通过这样介质的流动可表示为：