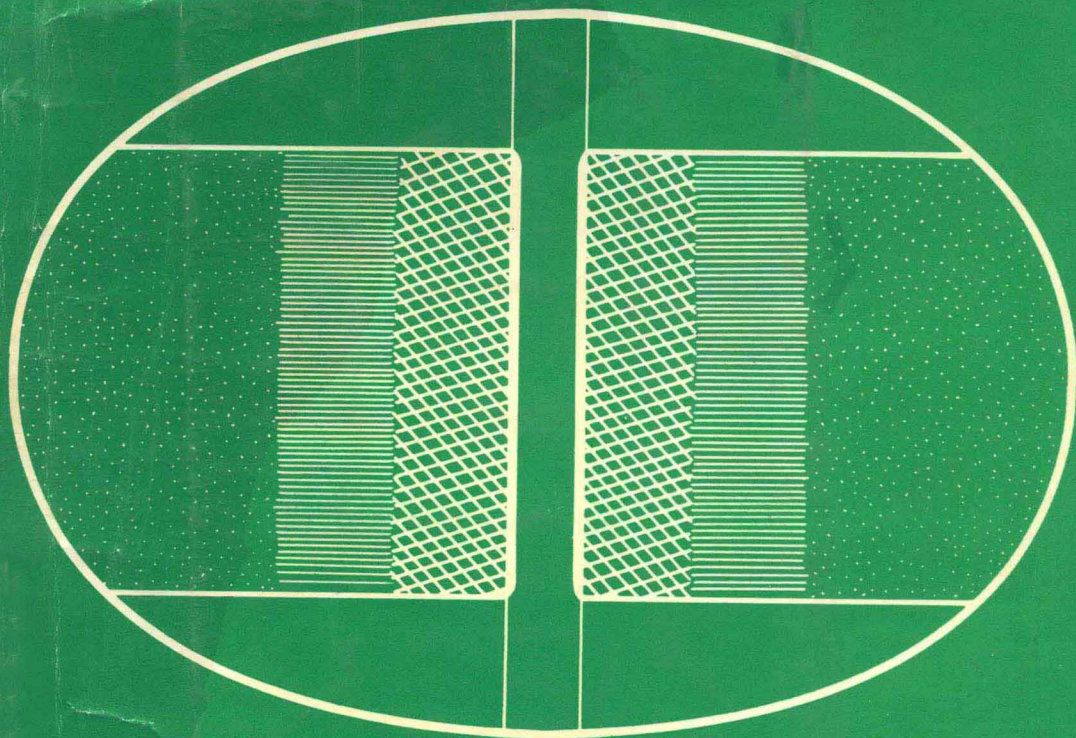


“油气藏地质及开发工程”系列著作
国家重点实验室

污染引起的渗流异常机理 与SLUG试井分析原理

冯文光 著



成都科技大学出版社

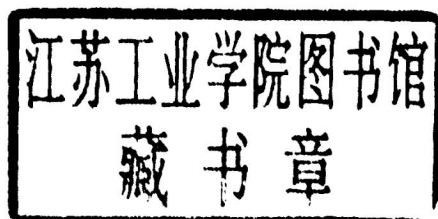
污染引起的渗流异常机理 与 SLUG 试井分析原理

The Mechanism of the Abnormal Seepage
Flowing from the Well Damage and the
Principle of the Slug Well Test Analysis

冯文光 著

by Wen-guang Feng

(国家自然科学基金 资助项目)
(地质行业科学基金)



成都科技大学出版社

Press of Chengdu University of Science and Technology

(川)新登字 015 号

内 容 提 要

本书为科研专著。专著对新井污染诊断、分析、评价进行了系统论述,主要包括:单一介质、双重介质地质模型—连续的多孔介质;定产量生产井污染引起的渗透异常机理与应用;污染引起的微产量或无产量井渗流异常机理;单一介质、双重介质中一开、一开一关、二开二关、三开三关 Slug 试井污染分析新方法原理,介绍了应用实例;定产量生产试井与 Sulg 试井边界分析原理;单一介质、双重介质组合油气藏定产量试井、Slug 试井分析原理;最优化自动匹配原理。

本书可供从事油藏工程、石油地质、水文地质的本科生、研究生、科研人员和现场技术人员参考。

污染引起的渗流异常机理 与 SLUG 试井分析原理

冯 文 光 著

责任编辑 袁顺生

成都科技大学出版社出版发行

西南冶金地质印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16

印张 13.5

1993 年 9 月第一版

1993 年 9 月第一次印刷

印 1-500 册

字数 346 千字

ISBN 7-5616-2698-3/TE·7

定价: 8.00 元

前 言

本书是国家自然科学基金和地质行业基金资助项目的科研总结。

钻井、完井、固井等工艺措施会污染井壁周围储层，使放喷产量急剧下降，甚至放喷无产量，给人们造成储层评价错觉。对于探井，会对整个地区勘探造成错觉，其经济损失难以估计。本书专门对废弃井、新井污染诊断、分析、评价进行系统论述：本书阐述了建立试井地质模型的方法，定产量生产污染引起的渗流异常机理，提出了单一介质单参数考虑污染的麦金利图版、双重介质双参数考虑污染的麦金利图版；还论述了定产量试井解与一开 Slug 试井解、一开一关 Slug 试井解、二开二关 Slug 试井解、三开三关 Slug 试井解之间的数学关系式；分别提出了单一介质、双重介质中一开 Slug 试井，一开一关 Slug 试井、二开二关 Slug 试井、三开三关 Slug 试井考虑污染的麦金利图版、积分图版、乘积图版、积分乘积比图版的匹配方法与分析方法，以及相应的一般分析方法；提出了 Slug 试井曲线诊断方法、污染评价方法、产量预测方法，修正了边界定压、边界封闭双重介质圆柱形油气藏定产量生产的精确解；提出了长方形油气藏（四边封闭、一边定压三边封闭、两邻边定压两邻边封闭、两对边定压、两对边封闭、三边定压、一边封闭、四边定压）、三角形油气藏（三边封闭、三边定压等边三角形，三边封闭、斜边定压两直角封闭、斜边和一直角边定压另一直角边封闭、两直角边定压斜边封闭、三边定压的等腰直角三角形）、菱形油气藏、正六边形油气藏压力恢复、压力降落边界试井分析方法；提出了近井污染区和远井渗透区单一介质、双重介质组合油气藏定产量生产试井 Slug 试井分析方法和最优化匹配技术。

作者郑重声明，上述成果系作者研究所得，如若利用本书提出的方法编制计算机程序、软件，请与作者联系，否则作者有权追究。

全书由冯文光撰著。其中成都理工学院冯文光负责提出科研思路、技术路线与方法，编制程序，实例计算。罗雨田博士提出地质模型。梁书敏讲师、董伟讲师参加了早期论证工作。川西北矿区庞家黎高工出现场应用思路，詹廷选高工负责现场应用，廖仕孟高工帮助实例分析，樊建军工程师负责收集、整理 Slug 试井资料，牛善政高工、所长出现场应用建议。吐哈石油勘探开发会战指挥部都善采油厂李国诚高工、宋晋林高工负责油井现场应用。

特别要感谢罗蛰谭教授、庞家黎高工、总工程师的热情指导。

感谢成都理工学院院长贺振华教授的热情关心和支持。感谢成都理工学院、成都理工学院石油系、川西北矿区、川西北矿区研究所等领导的关心和支持。

感谢王星锦、程本合、陈青、张云贵等研究生的耐心校对，张思富绘制了部分图件。感谢王爱蓉不辞辛劳排版。

感谢我尊敬的导师葛家理教授在西南石油学院学习期间给予我终身获益的知识营养。

由于著者水平有限，敬请读者指正。

冯文光

1993 年 9 月于成都

目 录

绪 言	1
第一章 单一介质、双重介质地质模型——连续的多孔介质	5
一、连续流体	5
二、连续的单一介质	8
三、连续的双重介质	9
第二章 定产量生产井污染引起的渗透异常机理与应用	12
第一节 单一介质中污染引起的定产量生产渗流异常边值问题	13
一、油藏柱坐标下	13
二、气藏柱坐标下(理想气体)	13
第二节 双重介质中污染引起的定产量生产渗流异常边值问题	14
一、油气柱坐标下	14
二、气藏柱坐标下(理想气体)	15
第三节 污染引起的定产量生产渗流异常的数学模型	16
一、单一介质污染引起的定产量生产渗流异常的数学模型	16
二、双孔隙型双重介质污染引起的定产量生产渗流异常的数学模型	16
第四节 单一介质定产量生产污染引起的渗流异常问题的解	18
一、对 t_D 进行拉氏变换的拉氏空间解	18
二、对 t_D / C_D 进行拉氏变换的拉氏空间解	20
第五节 单一介质污染试井分析原理	22
一、Horner 公式和 MDH 公式	22
二、单一介质格林卡顿图版	23
三、单一介质导数图版	24
四、单一介质压导比图版	25
第六节 双重介质定产量生产污染引起的渗流异常问题的解	26
一、双孔隙型双重介质数学模型对 t_D 进行拉氏变换的拉氏空间解	26
二、双孔隙型双重介质对 t_D / C_D 进行拉氏变换的拉氏空间解	28
第七节 双重介质污染试井分析原理	29
一、双重介质 Horner 公式与 MDH 公式	29
二、双重介质格林卡顿图版	32
三、双重介质导数图版	33
第八节 麦金利图版与冯文光提出的单一介质、双重介质考虑污染新图版	35
一、单一介质考虑污染问题的麦金利图版	35
二、双重介质考虑污染的麦金利图版制作原理	37
三、单一介质单参数考虑污染的麦金利新图版	38
四、双重介质双参数考虑污染的麦金利新图版	40

第三章 单一介质中污染引起的微产量或无产量渗流异常机理

——单一介质一开 Slug 试井新方法原理	43
-----------------------	----

第一节 DST 试井卡片	44
--------------	----

第二节 单一介质一开 Slug 试井数学模型	46
------------------------	----

一、单一介质气井一开 Slug 试井的边值问题	46
-------------------------	----

二、单一介质油井一开 Slug 试井的边值问题	46
-------------------------	----

三、单一介质一开 Slug 试井数学模型	47
----------------------	----

第三节 单一介质一开 Slug 试井对 t_D 拉氏变换的解	48
----------------------------------	----

一、单一介质一开 Slug 试井对 t_D 进行拉氏变换、无穷大地层的解	48
--	----

二、单一介质一开 Slug 试井定压边界的解	50
------------------------	----

三、单一介质一开 Slug 试井封闭边界的解	51
------------------------	----

第四节 单一介质一开 Slug 试井对 t_D / C_D 进行拉氏变换的解	51
--	----

一、单一介质一开 Slug 试井对 t_D / C_D 进行拉氏变换、无穷大地层的解	51
--	----

二、单一介质一开 Slug 试井对 t_D / C_D 进行拉氏变换、定压边界的解	53
---	----

三、单一介质一开 Slug 试井对 t_D / C_D 进行拉氏变换、封闭边界的解	53
---	----

第五节 单一介质一开 Slug 试井曲线的诊断	54
-------------------------	----

一、对污染的诊断	54
----------	----

二、对径向流的诊断	55
-----------	----

三、对地层介质属性的诊断	56
--------------	----

四、对井周围垂直裂缝的诊断	56
---------------	----

第六节 单一介质一开 Slug 试井解与定产量生产试井解之间的关系	57
-----------------------------------	----

第七节 单一介质一开 Slug 试井的一般分析方法	58
---------------------------	----

一、库珀图版	58
--------	----

二、RAM 图版	58
----------	----

三、几种简便分析法	59
-----------	----

第八节 单一介质一开 Slug 试井新图版及匹配方法	60
----------------------------	----

一、单一介质一开 Slug 试井麦金利图版及匹配方法	60
----------------------------	----

二、单一介质一开 Slug 试井积分图版及匹配方法	62
---------------------------	----

三、单一介质一开 Slug 试井乘积图版及匹配方法	63
---------------------------	----

四、单一介质一开 Slug 试井积分乘积比图版及匹配方法	64
------------------------------	----

第九节 一开 Slug 试井导数图版	65
--------------------	----

一、半对数坐标中的一开 Slug 试井导数图版	65
-------------------------	----

二、双对数坐标中一开 Slug 试井对数导数图版	66
--------------------------	----

三、双对数坐标中的一开 Slug 试井余对数导数图版	66
----------------------------	----

第四章 单一介质一开一关 Slug 试井污染分析新方法原理	67
-------------------------------	----

第一节 单一介质一开一关 Slug 试井的数学模型	67
---------------------------	----

第二节 单一介质一开一关 Slug 试井无穷大地层关于 t_D / C_D 的拉氏空间解	68
--	----

第三节 任意渗流模型的一开一关 Slug 试井解	70
--------------------------	----

第四节 一开一关 Slug 污染试井分析方法与定产量污染试井分析方法之间的数学关系	73
第五节 单一介质一开一关 Slug 试井曲线的诊断	74
一、对污染的诊断	74
二、诊断径向流	75
三、诊断介质属性	76
第六节 单一介质一开一关 Slug 试井的一般分析法	76
第七节 单一介质一开一关 Slug 试井新图版分析方法	79
一、一开一关 Slug 试井麦金利图版及匹配方法	79
二、一开一关 Slug 试井积分图版及匹配方法	80
三、一开一关 Slug 试井乘积图版及匹配方法	81
四、一开一关 Slug 试井积分乘积比图版	82
第八节 一开一关 Slug 试井分析的应用实例	82
第五章 单一介质多开多关 Slug 试井污染分析原理	89
第一节 单一介质多开多关 Slug 试井数学模型与通解	89
一、单一介质多开多关 Slug 试井数学模型	89
二、任一渗流模型多开多关 Slug 试井通解	90
第二节 单一介质二开二关 Slug 试井污染分析	93
一、直角坐标中的晚期直线分析法	94
二、乘积半对数坐标上中后期直线分析法	95
三、单一介质二开二关 Slug 试井乘积图版与匹配法	96
四、单一介质二开二关 Slug 试井积分图版与匹配法	97
五、单一介质二开二关 Slug 试井积分乘积比图版与匹配法	98
第三节 单一介质三开三关 Slug 试井污染分析	98
一、直角坐标中的晚期直线分析法	99
二、单一介质三开三关 Slug 试井乘积图版与匹配法	100
三、单一介质三开三关 Slug 试井积分图版与匹配法	102
第四节 单一介质 Slug 试井考虑污染的单参数麦金利图版	103
一、单一介质一开 Slug 试井考虑污染的单参数麦金利图版与匹配法	103
二、单一介质一开一关 Slug 试井考虑污染的单参数麦金利图版与匹配法	104
三、单一介质二开二关 Slug 试井考虑污染的单参数麦金利图版与匹配法	105
四、单一介质三开三关 Slug 试井考虑污染的单参数麦金利图版与匹配法	106
第六章 双重介质多开多关 Slug 试井污染分析原理	108
第一节 双重介质多开多关 Slug 试井数学模型与通解	108
一、双重介质多开多关 Slug 试井数学模型	108
二、双重介质多开多关 Slug 试井的通解	109
第二节 双重介质一开 Slug 试井污染分析	112
一、双重介质一开 Slug 试井解与双重介质定产量生产试井解之间的关系	113
二、双重介质一开 Slug 试井的简便分析法	113

三、双重介质一开 Slug 试井积分半对数分析法	114
四、双重介质一开 Slug 试井积分图版与匹配法	116
五、双重介质一开 Slug 试井乘积图版与匹配法	118
六、双重介质一开 Slug 试井考虑污染的双参数麦金利图版与匹配法	120
第三节 双重介质一开一关 Slug 试井污染分析	122
一、双重介质一开一关 Slug 试井积分图版与匹配法	122
二、双重介质一开一关 Slug 试井乘积图版与匹配法	124
三、双重介质一开一关 Slug 试井考虑污染的双参数麦金利图版与匹配法	125
第四节 双重介质二开二关 Slug 试井污染分析	126
一、双重介质二开二关 Slug 试井在直角坐标中的简便分析法	126
二、双重介质二开二关 Slug 试井在积分半对数坐标中的简便分析法	128
三、双重介质二开二关 Slug 试井积分图版与匹配法	129
四、双重介质二开二关 Slug 试井乘积图版与匹配法	130
五、双重介质二开二关 Slug 试井考虑污染的双参数麦金利图版与匹配法	131
第五节 双重介质三开三关 Slug 试井污染分析	132
一、双重介质三开三关 Slug 试井在直角坐标中的直线分析法	132
二、双重介质三开三关 Slug 试井在积分半对数坐标中的简便分析法	134
三、双重介质三开三关 Slug 试井积分图版与匹配法	135
四、双重介质三开三关 Slug 试井乘积图版与匹配法	136
五、双重介质三开三关 Slug 试井考虑污染的双参数麦金利图版与匹配法	137
第七章 边界试井分析法	139
第一节 定产量生产试井中有界地层的解	139
一、圆柱形油气藏中心布井封闭边界定产量生产的试井解	139
二、圆柱形油气藏中心布井定压边界定产量生产的试井解	144
第二节 单一介质边界影响的镜象法	145
一、镜象法的一般原理	145
二、边界试井图版制作的一般原理	146
三、利用压力降落曲线获得形状系数的简便方法	148
四、利用压力恢复曲线获得形状系数的简便方法	149
五、平均地层压力与形状系数	150
第三节 单一介质镜象法实例	152
一、四边封闭长方形油气藏镜象法	153
二、一边定压三边封闭长方形油气藏镜象法	154
三、两相邻边定压两相邻边封闭长方形油气藏镜象法	155
四、一对对边定压、一对对边封闭长方形油气藏镜象法	156
五、三边定压一边封闭长方形油气藏镜象法	157
六、四边定压长方形油气藏镜象法	158
七、三边封闭的等边三角形油气藏镜象法	160
八、三边定压的等边三角形油气藏镜象法	161

九、三边封闭的等腰直角三角形油气藏镜像法	162
十、斜边定压两直角边封闭的等腰直角三角形油气藏镜像法	164
十一、斜边和一直角边定压的等腰直角三角形油气藏镜像法	165
十二、两直角边定压的等腰直角三角形油气藏镜像法	168
十三、三边定压的等腰直角三角形油气藏镜像法	169
十四、四边封闭的菱形油气藏镜像法	171
十五、六边封闭的正六边形油气藏镜像法	172
第四节 SLUG 试井边界分析法	173
一、一开 Slug 试井边界分析法	173
二、一开一关 Slug 试井边界分析法	174
三、二开二关 Slug 试井边界分析法	174
四、三开三关 Slug 试井边界分析法	175
第八章 组合油气藏试井分析	177
第一节 单一介质组合油气藏的数学模型与试井解	177
一、单一介质组合油气藏的数学模型	177
二、单一介质组合油气藏的试井解	180
三、单一介质组合油气藏的双对数试井图版	181
四、单一介质组合油气藏的导数图版	182
第二节 双重介质组合油气藏的数学模型与试井解	182
一、双重介质组合油气藏的数学模型	182
二、双重介质组合油气藏的试井解	185
三、双重介质组合油气藏的双对数试井图版	187
四、双重介质组合油气藏的导数图版	188
第三节 组合油气藏的 SLUG 试井解	189
一、组合油气藏的一开 Slug 试井解	190
二、组合油气藏的一开一关 Slug 试井解	191
三、组合油气藏的二开二关 Slug 试井解	191
四、组合油气藏的三开三关 Slug 试井解	191
第九章 试井分析最优化自动拟合原理	193
一、最优化自动匹配技术的基本原理	193
二、最优自动匹配的收敛性	195
三、最优自动匹配的敏感性	196
四、最优自动匹配的可靠性	196
五、最优自动匹配的步骤	197
符号说明	199
参考文献	201

绪 言

为了获得在动态条件下的储层特征参数和流体特征参数,及时准确的对产层进行动态储层评价、污染评价,在钻井过程中或完井之后对油气层进行测试,这就是钻杆测试 DST (Drill Stem Testing),又叫地层测试。

地层测试又分为中途测试和完井测试。中途测试是指钻井过程中的地层测试,完井测试是指套管完井后对油气层进行的测试,又称为套管测试。测试中,用钻杆柱或油管柱将地层测试器下入待测储层井段,测得产层的产量、温度、开井流动时间、关井流动时间,取得流体样品作高压物性分析,获得实测井底压力与时间关系卡片,进行动态储层评价、污染评价等试井分析。

根据开井、关井次数,地层测试又分为一开一关制,二开二关制、三开三关制,显然一次开井一次关井的地层测试是一开一关制,其余类推。

储集性、渗透性较好的储层,地层测试将获得产量(产量是变量)。通过折算,将变产量折算为定产量,同时对生产时间进行折算,将产量、时间折算后的地层测试压力-时间数据,按定产量生产的试井分析方法进行动态储层评价、污染评价。我们曾编制 GDT 气井污染检测试井软件,编制了 OGWD T 油气水同产井污染检测试井软件,并出版了《气井污染检测试井理论与矿场应用》一书。

对储集性或渗透性较差的储层,地层测试不能获得产量或获得微产量。这种地层测试称为 Slug 试井,有人又称为段塞流试井。

一口探井钻井费用高达几百万乃至上千万元,个别井钻探费上亿元,如塔中 1 井。地层测试中遇到放喷没有产量或微产量,往往被人们遗弃,使之成为废井。如果不是储油层,地层测试当然不能获得产量。但是,在钻井过程中,由于泥浆侵入,泥浆滤液进入孔隙。滤液与孔道壁上岩石反应生成牢固水化膜等化学膜,使喉道半径减小乃至堵死。另外,泥浆固相颗粒进入大孔隙、大洞、大缝,在井壁上形成泥饼堵死孔隙、洞、缝。由于污染引起渗流异常,从而使地层测试放喷无产量或微产量。

一口探井由于污染放喷无产量或微产量,不只是造成成千上万元的钻井费用浪费,严重的会造成有利的高产油气田被人们忽视、遗弃,造成勘探错觉,其经济损失是难以估计的。

Slug 试井分析正是用于地层测试中无产量或微产量的试井分析。Slug 试井不但可以进行动态储层评价,获得储层的渗透率、流动系数、原始地层压力、地层非均质性(窜流系数、弹容比)等油气田开发设计的关键参数;而且可以进行污染评价,获得表皮系数等参数,预测产量,以利于为储层改造措施、方案设计提供依据。自 50 年代以来,国际上石油地质专家、油藏工程专家对 Slug 试井极为重视,地下水资源专家也对 Slug 试井极为关心。

Slug 试井研究可分为四个阶段。第一阶段(1954-1960),主要研究均质地层不存在续流和表皮效应的 Slug 试井分析。Ferris, J.G.和 Knowles, D.B.求出了一开期间的 Slug 试井瞬时线源解,是这一阶段的主要代表作。第二阶段(1960-1975),主要研究均质地

层存在井筒续流的 Slug 试井分析,特别是 Carslaw, H.S.和 Jaeger, J.C.提出了拉氏解。Cooper, H.H.Jr.作出了一开期间的中期半对数典型曲线。第三阶段 (1975-1988), 主要研究均质储层存在井筒续流和表皮效应双重影响的 Slug 试井分析,尤其是 Ramey, H.J.Jr., Agarwal, R.G.和 Martin, I.提出了以 $C_D e^{2S_{skin}}$ 为相关参数适合于一开期间的 RAM 典型曲线。第四阶段, 1988 年以来, 开始研究裂缝-孔隙性储层一开期间的 Slug 试井特征。Abraham, S.G.和 Ramey, H.J.Jr.在这方面作出了有益的工作, 但很难用于实际的 Slug 试井分析, 特别是弹容比 ω 和窜流系数 λ 的求取较难。这一时期, 另一重大进展就是法朗卡 (Franca)、柯瑞拉 (Corra) 和雷米 (Ramey) 将一开 Slug 试井和一关 Slug 试井作为整体的一关系统分析法, 将一开 Slug 试井、一关 Slug 试井和二关 Slug 试井作为整体的二关系统分析法, 可以称为 FCR 法。FCR 法可以求取地层渗透率和原始地层压力, FCR 法比较简便, 但不能进行污染评价。

1975 年以来, 国内开始引用国外的 Slug 试井分析方法, 1985 年以来, 国内主要引用 RAM 典型曲线匹配方法, 有些称为短时试井。近两年, 国内关于 Slug 试井分析方法的研究有些报道, 但仍没有灵敏度高, 分辨率好, 唯一性强的好方法文章发表。

Slug 试井分析还没有广泛推广, 主要因为现有 Slug 试井分析方法很难应用。其主要困难有:

1. 目前, Slug 试井分析方法主要适用于一开 Slug 试井曲线, 而一开时间极短, Slug 试井曲线不能应用。由于放喷微产量或无产量, 压力波很微弱, 使 Slug 试井更难分析。

2. Slug 试井放喷无产量或微产量, 现场人员不重视 Slug 试井测试、收集、整理工作。Slug 试井曲线、基础资料质量较差。

3. 在现有的 Slug 试井分析方法中, RAM 典型曲线匹配是较好的方法。RAM 法的主要缺点是, RAM 典型曲线中相邻典型曲线是很相似的。由于 RAM 典型曲线的相似性, 引起实测曲线匹配的模糊性, 使分析结果出现多解性。RAM 法只适用于一开 Slug 试井, 而一开时间特别短, Slug 试井曲线往往很短, 这就更难应用。

4. 虽然提出了综合一开一关、二开二关的 Slug 试井 FCR 系统分析法。由于这种方法分析简单, 只能求取原始地层压力和地层渗透率, 不能求取表皮系数等污染参数。实际上, 多数一关、二关的 Slug 试井时间长, 现在还没有适用于一关、二关的 Slug 试井分析的有效方法, 更没有适用于一关、二关 Slug 试井曲线分析的灵敏度高、分辨率好、唯一性强的 Slug 试井分析图版匹配方法。

5. Slug 试井放喷没有产量或微产, 主要是由于污染极为严重, 有产量井的试井分析求得的表皮系数 S_{skin} 一般小于 20, 而 Slug 试井分析的表皮系数大于 20, 甚至使计算机溢出中断。

6. Slug 试井时间短, 泄流区域范围小, 再加上污染严重, 求取的渗透率只是污染区的渗透率, 而不是地层渗透率, 预测产能准确性不够高。

由于这些困难, 多数出乎我们的预料, 尽管我们不分昼夜, 没有节假日的繁忙工作, 提出了分辨率强、灵敏度高、唯一性强的一开 Slug 试井乘积图版、一开 Slug 试井麦金利图版、一开 Slug 试井积分图版、一开 Slug 试井积分乘积比图版, 但由于开井时间短不能应用, 再推敲并提出一关 Slug 乘积图版分析法、一关 Slug 试井麦金利图版分析法、一关

Slug 试井积分乘积比图版分析法以及一关 Slug 试井积分图版分析法等, 对于 Slug 试井资料质量好的 Slug 试井曲线很容易分析; 但对于质量差的 Slug 试井曲线, 这些方法也失敏。对于 Slug 试井基础资料差的井, 即使 Slug 试井曲线质量好, 使用这些方法的分析结果可信度差。这些方法, 国内外未见报道, 初次应用, 有待积累经验进一步改进。

Slug 试井的数学模型与定产量试井的数学模型, 连续性方程相同、初始条件相同、外边界条件相同、表皮效应影响的井内边界条件相同, 仅仅续流影响的井内边界条件不同。在 Slug 试井数学模型中, 续流影响的井内边界条件中井口产量项为零。这就说明 Slug 试井典型曲线与定产量试井的典型曲线有着必然的联系。在定产量试井的无量纲数学模型中, 产量项为 1, 拉氏变换后为拉氏变量的倒数。这提示我们, 对 Slug 试井通过对自变量, 即测试时间进行某种变换, 必然会得到定产量生产的试井分析典型图版。也就是说, 定产量的试井典型图版通过一定的变换, 必然可以用于 Slug 试井分析。由此可见, 定产量试井典型曲线必然可以用于 Slug 试井, 当然坐标轴代表的物理意义不同, 分析方法不同。

Slug 试井一开也与一关有必然的联系。既然定产量试井典型曲线可以用于一开 Slug 试井曲线分析, 则必然可用于一关 Slug 试井曲线分析。当然典型曲线的坐标必然不同, 分析方法也必然不同。同样, 定产量试井典型曲线也可以用于二开二关 Slug 试井曲线分析和三开三关 Slug 试井曲线分析, 但典型曲线坐标轴代表的意义、分析方法不相同。

这些想法好象很好实现, 但要真正搞清楚 Slug 试井一开、一关、二关、三关曲线分析的相应的典型曲线坐标的物理意义与分析方法, 其困难程度很难想象, 加上上述困难混杂一起, 其难度更难想象。

试井分析方法可分为三类: 第一类是由工程长时渐近解获得直线分析法, 第二类是由典型图版长时渐近解制作典型图版的图版匹配法, 第三类是最优化自动匹配技术。我们将分别讨论 Slug 试井的这三类分析方法。

冯文光制作了一系列适用于定产量生产井压降曲线和压力恢复曲线且类似于麦金利曲线的单一介质考虑污染新图版、双重介质考虑污染新图版; 推导出 Slug 试井积分解与定产量生产井的解之间的关系式, Slug 试井解和时间的乘积与定产量生产井导数解之间的关系; 制作了一开 Slug 试井乘积图版, 类似于麦金利图版的一开 Slug 试井考虑污染图版, 一开 Slug 试井积分图版, 一开 Slug 试井积分乘积比图版; 制作了一关 Slug 试井乘积图版, 类似麦金利图版的一关 Slug 试井考虑污染图版, 一关 Slug 试井积分图版, 一关 Slug 试井积分乘积比图版。这些图版既适用于单一介质 Slug 试井, 又适用于双孔隙型双重介质 Slug 试井。提出了相应的诊断方法和求取污染参数、地层参数的分析方法, 并进行了一开一关 Slug 试井和产量预测的实例分析。获得了单一介质多开多关 Slug 试井任一渗流模型的通解, 提出了单一介质二开二关、三开三关 Slug 试井的简便分析法, 制作了单一介质二开二关、三开三关 Slug 试井积分动图版、乘积动图版、积分乘积比动图版、考虑污染的麦金利动图版。获得了双重介质多开多关 Slug 试井任一渗流模型的通解, 提出了双重介质二开二关、三开三关 Slug 试井的简便分析法, 制作了双重介质二开二关、三开三关 Slug 试井积分动图版、乘积动图版、考虑污染的麦金利动图版。修正了边界定压、边界封闭双重介质圆形油气藏的精确解。提出了长方形油气藏(四边封闭、一边定压三边封闭、两邻边定压两邻边封闭、两对边定压两对边封闭、三边定压一边封闭、四边定

压)、三角形油气藏(三边封闭、三边定压等边三角形,三边封闭、斜边定压两直角边封闭、斜边和一直角边定压另一直角边封闭、两直角边定压斜边封闭、三边定压的等腰直角三角形)、菱形油气藏、正六边形油气藏压力恢复边界试井方法。提出了近井污染区和远井渗透区单一介质、双重介质组合油气藏的定产量生产试井、Slug 试井分析方法和试井最优拟合方法。这些在国内外至今未见报道。系统地阐述 Slug 试井的专著,国内外还没有面世。

第一章 单一介质、双重介质地质模型

——连续的多孔介质

地下流体的渗流是地下流体在地层岩石多孔介质中的流动。如果用分子观点研究地下多孔介质中的流体，其几何形状难以描述。由于分子随时都在作布朗运动，分子运动是随机的，因此地下多孔介质中的流体在时间上是不连续的。可见，分子运动规律、受力状况在时空中的变化，很难准确描述。每克分子气体有 10^{23} 个分子，要研究较大渗流区域内的分子，其数目巨大，不可能研究制造满足以分子为研究对象，研究巨大数目分子运动所需要的大内存高速计算机。如果用微观水平研究地下岩石这种多孔介质，也是极为困难的。首先，地下岩石这种多孔介质中孔、缝、洞的分布极其复杂，孔、缝、洞的几何形状极不规则，孔、缝、洞空间内的流体形状和流动状况也极其复杂。就单个孔隙或单根毛细管而言，液固两相交界面上的流体流速应为零，因此边界形状和边界条件也极为复杂。孔隙数目之多，毛细管数目之巨，多孔介质固体表面几何形状之复杂，也不可能有满足这样要求的大内存高速计算机面世，同时也没有必要。

这些都说明多孔介质是不连续的，多孔介质中的流体也是不连续的。作为连续函数的精确数学理论就不可能引进多孔介质中的流体渗流力学。

可不可以将连续函数的精确数学理论引进多孔介质中的流体渗流力学？怎样才能将连续函数的精确数学理论引进多孔介质中的流体渗流力学？

我们将油气在地下流动的多孔介质进行分类，建立多孔介质模型。所谓地质模型，是指油、气、水连续流体在地下岩石这种连续的多孔介质中流动的多孔介质模型。这就是说，要研究地下流体的连续性，地下多孔介质的连续性。

一、连续流体

以物质分子作为研究对象，研究物质的运动规律的方法、观点称为分子水平。将分析或试验结果只用统计形式表示的方法，称为统计法。摒弃分子水平，以大量分子的“系统”作为研究对象，用统计方法把流体作为连续流体，研究流体流动平均性质，这种研究方法、观点称为微观水平。

1. 地下流体在空间上的连续性

连续流体在空间上的坐标点，称为连续流体的数学点。摒弃分子水平，用微观水平以数学点为质量中心，可把流体作为连续流体的特征体积，称为该数学点的物理点。

可见，数学点无体积无质量，是物理点的质量中心，是坐标点。

如图 1.1，在流体中任取一数学点 $R(x, y, z)$ ，以 $R(x, y, z)$ 为质量中心任取一体积 ΔV_i ，该体积为内物质的质量为 Δm_i ，密度 $\rho_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta V_i}$ 。以 ΔV_i 逐渐增大或减小可得到一个体积序列 $\{\Delta V_i\}$ ，一个质量序列 $\{\Delta m_i\}$ 和一个密度序列 $\{\rho_i\}$ 。以 ρ_i 为纵坐标，以 ΔV_i 为横坐标作图（如图 1.2），可以发现：当 $\Delta V_i < \Delta V_0$ 时，若 ΔV_i 中包含的流体分子多， ρ_i 取上峰值。若 ΔV_i 中流体分子少， ρ_i 取下峰值； ρ_i 是随机起伏波动变化，当 ΔV_0

$\triangle V_i < \triangle V_a$ 时, ρ_i 为一常数, ρ 是在关于空间上是连续的。当 $\triangle V_i > \triangle V_a$ 时, 对于均质流体, ρ 仍为常数; 对于非均质流体, ρ 随 $\triangle V$ 增大呈线性上升。

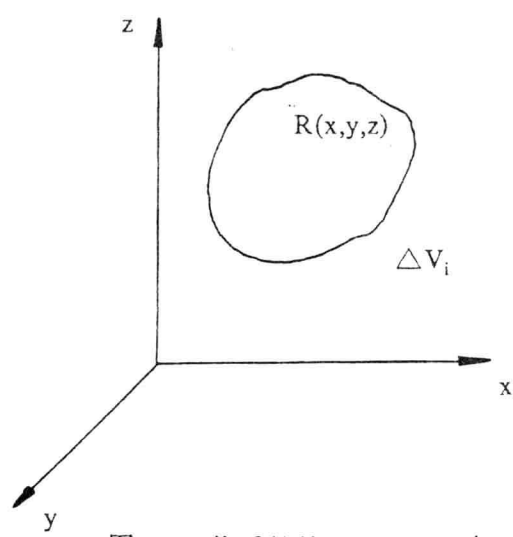


图 1.1 物质的数学点与物理点

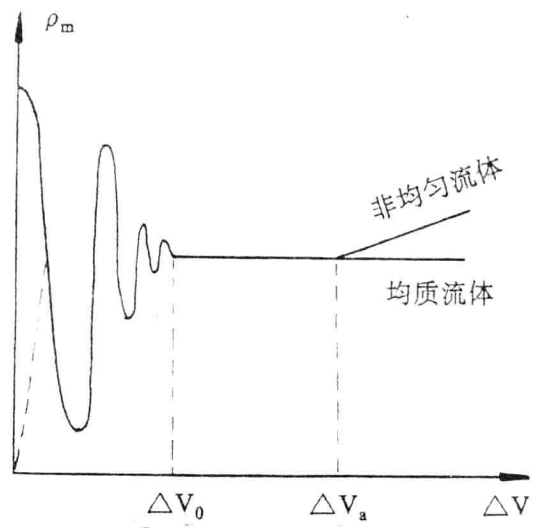


图 1.2 流体空间的连续性

$$\text{若 } \rho_m = \lim_{\substack{\triangle V' \rightarrow \triangle V \\ \triangle V_0 \leq \triangle V < \triangle V_a}} \frac{\triangle m}{\triangle V'} = \text{常数}, \quad (1.1)$$

则 $\triangle V$ 称为以数学点 $R(x, y, z)$ 为质量中心的物理点的特征体积, $\triangle V_0$ 称为特征体积下限, $\triangle V_a$ 称为特征体积上限。

用微观水平的观点, 以特征体积内的流体作为物理点, 把流体看作由这些物理点组成。这种由物理点组成的流体, 称为空间上连续的流体。流体密度在空间上是连续的。

物理点有五个特征:

- (1) 物理点有一定的体积、质量、密度, 是物质点, 而不是数学点。
- (2) 物理点的体积有一定范围, 上限为 $\triangle V_a$, 下限为 $\triangle V_0$, 且满足 (1.1) 式。
- (3) 物理点内的流体是连续的, 流动性很小。
- (4) 物理点的质量中心是数学点。
- (5) 物理点是一定数量分子的分子团集合体。

假定 $\Omega(R, \triangle V_0, \triangle V_a) = \{R | R \in \triangle V, \triangle V_0 < \triangle V < \triangle V_a\}$ 是以 $R(x, y, z)$ 为质量中心, 空间上其体积大于或等于 $\triangle V_0$ 而小于 $\triangle V_a$ 的特征体积集合, 则,

$$R' \in \Omega(R; \triangle V_0, \triangle V_a), \quad \rho(R) = \lim_{R' \rightarrow R} \rho(R') \quad (1.2)$$

特征体积刻划分了密度在流场三维空间中的体积宏观变化, 它表示密度 ρ 变化的快慢。特征体积在空间各个方向上的长度称为特征长度。若 L_x 、 L_y 、 L_z 分别为 x 方向、 y 方向、 z 方向上的特征长度, 则

$$L_x = \rho \frac{1}{\partial \rho / \partial x}, \quad L_y = \rho \frac{1}{\partial \rho / \partial y}, \quad L_z = \rho \frac{1}{\partial \rho / \partial z} \quad (1.3)$$

若 L_{xinf} 、 L_{yinf} 、 L_{zinf} 分别为 x 、 y 、 z 方向的特征长度下限, L_{xsup} 、 L_{ysup} 、 L_{zsup} 分别为

x、y、z 方向特征长度上限，则

$$\Delta V_0 = L_{xinf} \cdot L_{yinf} \cdot L_{zinf}, \Delta V_a = L_{xsup} \cdot L_{ysup} \cdot L_{zsup} \quad (1.4)$$

设 L_{inf} 、 L_{sup} 为某种平均意义下的特征长度下限、上限，则克鲁德森 (Knudsen) 数为

$$K_n = L_{inf} / L_{sup} \quad (1.4)$$

实际上， L_{inf} 等于分子运动的平均自由程。当 $K_n < 0.01$ 时，流体的流动遵循达西定律。当 $L_{inf} \approx 1$ 时，流体流动出现克林贝尔 (Klinkenberg) 效应。当 $L_{inf} > 1$ ，流体流动规律符合 Knudsen 流动。

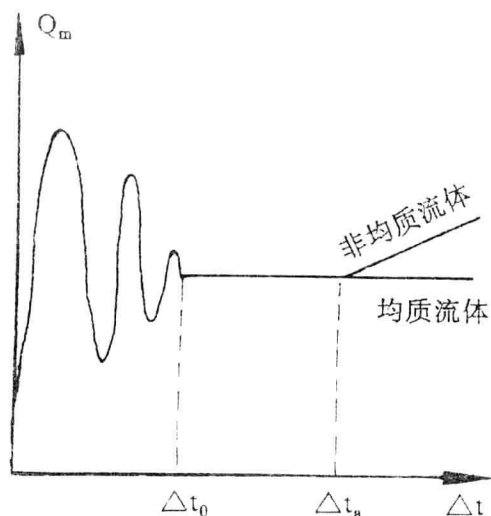
特别要区别，数学上密度的定义为 $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$ ，而连续流体中物理点的密度按 (1.1) 式定义。

2. 流体在时间上的连续性

实际上，在以数学点 R 为质量中心的物理点内，流体分子随机地连续不断流入流出物理点。在物理点内，分子运动在时间上是不连续的，无规则。

同样，以特征体积为研究对象，任取时间间隔序列 $\{\Delta t_i\}$ ，分子运动引起质量变化序列 $\{\Delta m_i\}$ ，则得相应的质量流量 $\{Q_{mi}\}$ ，仍然可得图 1.3。

$$\text{若 } Q_m = \lim_{\substack{\Delta t' \rightarrow \Delta t \\ \Delta t_0 \leq \Delta t' < \Delta t_a}} \frac{\Delta m}{\Delta t'} = \text{常数}, \quad (1.5)$$



则 Δt 称为物理点的特征时间， Δt_0 称

图 1.3 流体在时间上的连续性

为物理点的特征时间下限， Δt_a 为物理点的特征时间上限。 Q_m 是关于时间连续的。因为单位时间内流量 Q_m 等于密度 ρ 与体积的乘积，即

$$Q_m = \lim_{\substack{\Delta t' \rightarrow \Delta t \\ \Delta t_0 \leq \Delta t' < \Delta t_a}} \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} \quad (1.6)$$

(1.6) 式说明流体密度 ρ 在时间上是连续的。

总之，流体的密度 $\rho(x, y, z, t)$ 是空间上、时间上的连续函数；流体的物理性质和运动要素在空间上、时间上是连续可微的，并允许在孤立的点、线、面上不连续。我们完全有理由在微观水平的观点基础上，用连续函数研究流体的性质、运动规律。反过来，也可以了解分子运动的宏观现象和规律。

从微观水平出发，流体在空间上、时间上是连续的。

二、连续的单介质

地下流体在地下岩石这种多孔介质中流动，地下的多孔介质必须具备两个最基本的条件，第一是储集性，第二是渗透性。孔隙度是储集性的表征参数，孔隙喉道是渗透性的表征参数。所谓地下流体在地下多孔介质中流动的地质模型，主要是以孔隙结构为基础，再结合油气藏的几何形状、渗流方式、参数模式进行分类。试井分析研究的几何形状是圆柱形油、气藏中心布一口井，渗流方式为径向流，表征渗透性的渗透率是常数或分区常数。所以，试井分析的地质模型主要以孔喉结构分类。孔喉结构性质决定连续性方程的形式和数量。

油气储层的孔喉几何结构相当复杂。一般分为两大类：一类是原生孔隙结构，孔隙间相互连通。这类孔隙喉道分布均匀，通常被看作均匀介质。另一类是由成岩后生作用、地质运动和化学作用生成裂缝、溶洞等次生孔隙。

如图 1.4，在频率-喉道半径坐标中，出现类似正态分布的单峰曲线。频率-喉道半径坐标图上呈单峰型曲线的多孔介质称为单一介质。孔隙型油气藏一般属于单一介质，通常称为均质油气藏。以裂缝为主的油气藏，在频率-喉道半径坐标图上若呈单峰的曲线，也属于单一介质。如图 1.5，孔隙型油气藏通过以中值喉道半径的孔隙为基础，简化为单一介

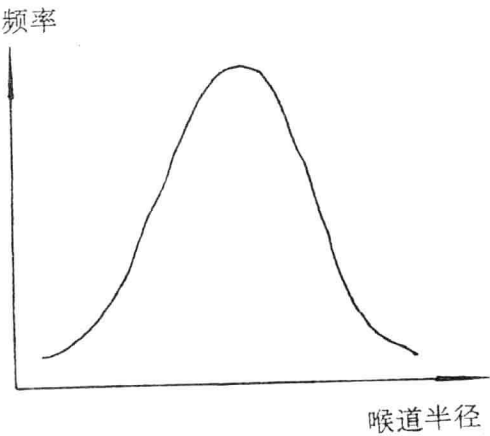


图 1.4 单一介质喉道分布

质。如图 1.6，开井生产后，单一介质中的流体直接流入井筒。

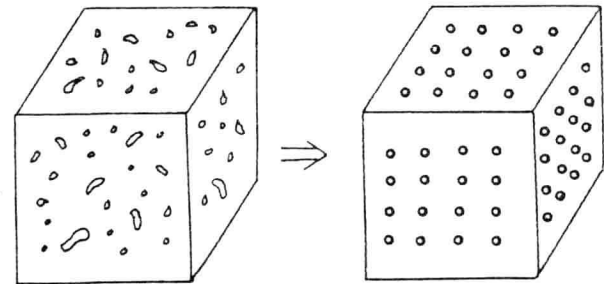


图 1.5 单一介质理想模型

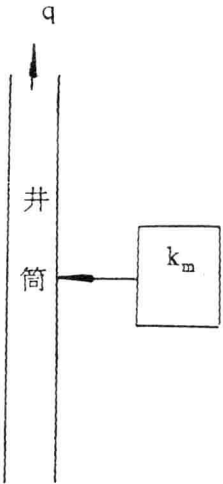


图 1.6 单一介质中的流体流向

如果分子水平或微观水平取体积系列，很可能在 ΔV 中只有极少数或只有单个孔隙或