

地质介质中热和溶质 传输过程的数学模型

黄振群 王亨君 译



青岛海洋大学出版社

地质介质中热和溶质 传输过程的数学模型

C·H·Lai(Cheng-Hsien Lai)著

王亨君 黄振群 译

(中国地质大学)

青岛海洋大学出版社

MATHEMATICAL MODELS OF
THERMAL AND CHEMICAL
TRANSPORT IN GEOLOGIC MEDIA
C·H·Lai (Cheng-Hsien Lai) 著

地质介质中热和溶质
传输过程的数学模型
王享君 黄振群 译

青岛海洋大学出版社出版发行
青岛市鱼山路5号)
泰安师专印刷厂印刷

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷
32开(187×1092毫米) 4.5印张 9.5千字
印数1—1100

ISBN 7-81026-084-7/P·11

定价: 2.90元

符号表

A	矩形的长度	L
A_r	硅—水反应的表面反应面积	L^2
A_x	x 方向的横断面积	L^2
A_z	z 方向的横断面积	L^2
b	裂隙宽度	L
$\overline{b}$	有效裂隙宽度	L
B	矩形的宽度	L
$\overline{B}$	地层体积因子	
c	流体和岩石压缩系数之和	$T/(ML^2)$
c_1	岩石基体的储存系数	$T/(ML^2)$
c_2	裂隙的储存系统	$T/(ML^2)$
c_f	流体的比热	$L^3/(TK)$
c_r	岩石的比热	$L^3/(TK)$
C	浓度	M/L^3
C_c	三次方定律之常数	
C_D	无量纲储存系数	
C_{eq}	平衡浓度	M/L^3
C_s	流体源的浓度	M/L^3
C_w	井筒影响系数	
$\overline{C}$	无量纲浓度	
D	立方体的边长	L
$D_{i,j}$	水动力弥散系数	L^2/T
D_1	轴向弥散系数	L^2/T
D_m	分子扩散常数	L^2/T

D_{num}	数值弥散常数	L^2/T
D_t	垂向弥散系数	L^2/T
D_x	x 方向上的数值弥散常数	L^2/T
D_y	y 方向上的数值弥散常数	L^2/T
E	地质介质中的总能量	M/T
g	重力加速度	L/T^2
h	地层厚度	L
H	多孔板的宽度	L
I_0	第一类、零阶修正的贝塞尔函数	
$I_{1/2}$	第一类、 $\frac{1}{2}$ 阶修正的贝塞尔函数	
I_1	第一类、一阶修正的贝塞尔函数	
$I_{2/3}$	第一类、 $\frac{3}{2}$ 阶修正的贝塞尔函数	
k	多孔介质的渗透率	L^2
k	硅-水反应的速度常数	
$\bar{k}_1$	岩石基体的渗透率	L^2
k_2	裂隙的渗透率	L^2
K_0	第二类、零阶修正的贝塞尔函数	
K_1	第二类、一阶修正的贝塞尔函数	
K_h	地质介质的有效热传导系数	$ML^2/(T^2K)$
$\bar{K}$	硅-水反应的平衡浓度	
$\bar{K}$	无量纲的渗透率	
L	系统或多孔板的长度	L
M_r	硅-水反应时水的质量	M
$\bar{n}$	单位外法线方向	

N_u	Nusselt数	
p	Laplace参数	
P	压力	M/LT ²
P_1	岩石基体的压力	M/LT ²
P_2	裂隙的压力	M/LT ²
P_b	边界上的压力	M/LT ²
P_D	无量纲压力	
P_{Df}	无量纲的井筒压力	
P_i	初始压力	M/LT ²
P_{wf}	流入井的压力	M/LT ²
P_{Ds}	无量纲的关井压力	
$\overline{P}_{D1}$	拉普拉斯区域中岩石基体的无量纲压力	
$\overline{P}_{D2}$	拉普拉斯区域中裂隙的无量纲压力	
$\overline{P}_{Df}$	拉普拉斯区域中井筒的无量纲压力	
P_e	Peclet数	
q	体积流量	L ³ /T
q_D	无量纲的体积流量	
q_m	流量的回灌率	M/T
$\overline{q}_{cond}$	传导的热流量	ML/(T ² K)
$\overline{q}_{conv}$	对流的热流量	ML/(T ² K)
Q	入口处流量	L ³ /T
Q_i	入口处的初始流量	L ³ /T
Q_h	单位厚度的总热流量	ML ² /T ²
r	径向距离	L
r_D	无量纲径向距离	
r_e	系统的外半径	L

r_{ed}	无量纲的外半径	
r_i	系统的内半径	L
r_l	管道半径	L
r_w	井筒半径	L
R	地质介质中的任意区域	
R_d	Rayleigh数	
S	井壁因子	
S_A	某一体积的边界表面积	L^2
S_i	对任意应变量的符号	
t	时间	T
t_c	均匀能量清除时间	T
t_D	无量纲时间	
T	温度	K
T_0	初始温度	K
T_1	岩石的温度	K
T_2	裂隙的温度	K
T_b	边界处的温度	K
T_c	冷壁的温度	K
T_D	无量纲温度	
T_{D1}	岩石基体的无量纲温度	
T_{D2}	裂隙的无量纲温度	
T_H	热壁上的温度	K
T_i	回灌流体的温度	K
T_{ref}	参考温度	K
T_s	流体源的温度	K
$\overline{T}$	无量纲温度	

$\bar{u}$	管道中过水断面上的平均流速	L/T
v_m	m 方向上的渗透流速(实际流速)	L/T
v_n	n 方向上的渗透流速(实际流速)	L/T
v_x	x 方向上的达西流速	L/T
v_y	y 方向上的达西流速	L/T
$\bar{v}$	达西流速	L/T
$\bar{v}_c$	对流质量流	M/(TL ²)
$\bar{v}_T$	对流热流量	ML/(T ² K)
$\bar{v}_t$	总渗透速度	L/T
$ \bar{v}_t $	总渗透速度的绝对值	
V_e	地质介质中的任一体积元	
$\bar{V}$	总流速向量	
$ \bar{V} $	总流速绝对值	
W	区域 R 中的任一子域	
$\bar{W}$	系统的宽度	L
x	x 坐标	
x'	无量纲的 x 距离	
y	y 坐标	
y'	无量纲的 y 距离	
z	z 坐标	
z'	无量纲的 z 距离	
α_{ijmn}	多孔介质中的几何向量	L ²
α_t	轴向弥散率	L ²

α_1	垂向弥散率	L^2
β	流体热膨胀系数	$1/K$
$\frac{\beta}{\beta}$	矩形的长宽比	
$\bar{s}$	无量纲径向距离	
ξ_c	均匀能量清除的径向距离	L
ϵ	岩石的压缩系数	$T/(ML^2)$
ϕ	地质介质的孔隙度	
ϕ_1	岩石基体的孔隙度	
ϕ_2	裂隙的孔隙度	
γ	<i>Euler</i> 常数	
γ	岩石的热膨胀系数	$1/K$
θ	裂隙的含能量与岩石的含能量之比	
λ	由 <i>Warren—Root</i> 定义的孔隙间流动因子	
$\frac{\lambda}{\lambda}$	孔隙间流动因子	
μ	流体的粘滞度	M/LT
ψ_1	拉普拉斯区域中岩石的无量纲温度	
ψ_2	拉普拉斯区域中裂隙的无量纲温度	
ρ_f	流体的密度	M/L^3
ρ_r	岩石的密度	M/L^3
ρ_{ref}	参考流体密度	M/L^3
σ_c	单位体积的溶质量	M/L^3
σ_T	单位体积的热容量	M/L^3
τ	无量纲时间	
ω	比储存系数	
η	无量纲垂直距离	
ζ	流体的压缩系数	T/ML^2

目 录

第一章	绪 言	1
第二章	文献的评论	6
2.1	地质介质中的流体运动	6
2.1.1	单个裂隙中的流体运动	6
2.1.2	裂隙网络中的流体运动	8
2.1.3	双重的多孔介质中的流体运动	9
2.2	混合运移	14
2.2.1	毛细管中的混合运移	14
2.2.2	地质介质中的混合运移	15
2.3	数值方法	17
第三章	天然裂隙储集层中传输过程的理论研究	21
3.1	引言	21
3.2	MINC近似方法的检验	21
3.2.1	多孔立方体中的流体运动	22
3.2.2	规则多孔板中的流体运动	25
3.3	天然裂隙储集层中瞬变流压力分析	30
3.3.1	基本模型	31
3.3.2	数学模型	31
3.3.3	渐近解	36
3.3.4	模型的数值检验	37
3.3.5	天然裂隙储集层中各种模型的比较	37

3.4	新模型的瞬变流压力的理论分析	39
3.4.1	无限延伸的储集层中试井资料分析	39
3.4.2	无限延伸的储集层中压力上升分析	46
3.4.3	封闭或常压外边界储集层中压力降特性	47
3.4.4	新模型在野外实际资料中的应用	49
3.5	天然裂隙储集层中的热传播	53
3.5.1	基本模型	53
3.5.2	数学模型	54
3.5.3	热锋面的传播	56
3.5.4	回灌系统的设计	60
3.6	结论	61
第四章	热和溶质传输过程的数学模型	63
4.1	引言	63
4.2	数学模拟PTC	63
4.3	数学模型	64
4.3.1	质量守恒	64
4.3.2	能量守恒	66
4.3.3	溶质均衡	67
4.4	解的步骤	68
4.5	控制数值弥散误差和网络方向影响的方法	71
4.6	数值方法的有效性	78
4.6.1	一维对流—扩散问题	78
4.6.2	具有轴向和垂向弥散的二维对流	80
4.7	网格方向的影响	83
4.7.1	渗流场与计算网格斜交时的对流过程	86
4.7.2	五眼井中的溶质运移过程	88

4.8 结论	92
第五章 应用	93
5.1 引言	93
5.2 多孔板中的自然对流	95
5.3 单个裂隙中的反应硅的传输	102
5.3.1 硅-水反应的动能模型	103
5.3.2 硅沉积作用对瞬变流特性的影响	104
5.4 地热系统中的多组分模型	109
5.5 结论	114
第六章 结论和建议	116
6.1 结论	116
6.2 建议	118
*参考文献	
附录	119

第一章 绪 言

近年来, 由于开发地质资源、强化石油回收过程及核废料的地质处理的需要, 在地质介质中化学物质的非等温传输过程的研究受到了极大的重视。为了获得地质介质中传输过程的积分解, 必须建立起相应的物理和数学模型。许多传输模型都是以均质各向同性的多孔介质假设为基础的, 而在裂隙化的地质介质中可出现高渗透性和次生的孔隙现象。这种传输过程的分析对传统的均质地质层的模型来说是大复杂了。

此外, 鉴于地质介质中的复杂性, 化学物质的传输过程总是与水和热的传输连系在一起的。流动的液体所携带的热和化学物质大大地改变了地下流场。流体的性质受温度和矿物质的沉淀或溶解所引起的化学反应的影响, 并引起地质介质的一些重要性质, 诸如渗透性和孔隙度的变化。这些耦合过程一般都表现为非线性的性质。于是数学技术就成了解释这些问题的有力工具。然而, 在发展一个程序的时候必须同时解决该方法在计算上的有效性以及控制数学弥散误差的技术。在以对流为主的传输过程的数值模型中, 数字弥散误差的控制是一个最重要的问题。传统的有限差分法所固有的数字弥散误差可能得出不正确的计算结果。例如, 在示踪试验或强化石油回收过程中, 数字弥散可以得出错误的贯穿时间预测。最严重的是可能导致物理过程的失真。为了避免数值计算的

不稳定性,任何显式数值方法必须满足计算的稳定性条件。隐式算法没有时间步长的限制,它允许在数值模拟过程中采用大时间步长。但是,大时间步长将导致瞬时截断误差和不精确的数值结果。同时隐式方法在解一组非线性方程时须要同时解一个大型的代数方程组。这个矩阵之大,即使对于超级计算机来讲也难以快速求逆。众所周知,在使用传统的显式或隐式差分方法时,除非采用极细小的计算网格,否则是很难避免数字弥散的。这就是说,传统的方法难以模拟大面积地质系统中化学物质的传输过程。我们在这里发展了一种被称为成本—效果数值方法来处理上述问题。

我们的研究可以分成两部份。第一部分考虑半解析法用于分析非耦合的等温与非等温流体在天然裂隙系统中的运移过程。由Barenblatt等(1960)和Warren—Root(1963)所建议的天然裂隙化的储集层模型考虑了立方体形状的岩石基体的粒间孔隙流体的瞬变运动。但是他们宁愿在相互作用的孔隙间采用准稳定流的假设来代替瞬变流的假定。其他一些学者(Kazemi,1969;Boulton和Streltsova,1977, Streltso, 1982;Serra等, 1982;Javandel和Witherspoon,1983)提出在天然裂隙系统中相互作用孔隙间瞬变流的层状模型。现行模型与层状模型之间由于在一个给定的体积中相互作用的表面积是不同的,这二种模型孔隙间瞬变流的强度也是不同的。与层状模型不同,在岩石基体与裂隙间的粒间孔隙流应作为三维问题来处理,并牵涉到更复杂的数学问题。然而,从多重相互作用连续介质法(MINC),(Pruess和Narasimhan, 1982)发展起来的简单的一维模型可以精确地计算孔隙间相互作用的瞬变流。

根据现行模型发展了一种分析天然裂隙系统中试井资料的半解析法。这个方法考虑到了在不同边界条件下压力升降的井筒和井壁的影响。这些边界条件包括有限与无限系统的定流量和定压力的外界条件。裂隙系统与岩石基体系统之间的压力解可以使用拉普拉斯变换技术得到。由于拉普拉斯区域内的解太复杂以至于不能用解析的方法变换到真实的空间中去,只好采用数值方法求解。目前已经取得了在无限系统中无井筒及井壁影响的真实空间内的瞬变压力的简单近似解。Ershaghi和Aflaki(1985)使用这个近似解发展了一种在降压试验的压力瞬变期间观察到的被称为“半斜率”法的技术。根据这个近似解,分析裂隙储集层性质(如贮水系数、导水系数、孔隙间流体因子和贮水率)的方法也得到了发展。这些结果显示,根据现行模型计算的孔隙间流体因子和贮水率较Warren—Root(1963)模型小得多。井筒及井壁对瞬变压力行为影响的定量分析显示,现行模型与Mavor和Cinco—Ley模型(1979)之间存着极大的差异。这也许是Mavor和Cinco—Ley模型在岩石基体和裂隙之间使用了准稳定流假设的缘故。

天然裂隙储集层中非等温流体的运动是地热田研究中极有意义的课题。各种依据层状模型的理论研究已经完成。这些研究结果表明,在地热田开采期间向地热田注水可以大大地强化地热田的热能回收。回灌有助于保持地热田内的压力和提供从储热岩体中提取剩余热的高温水。然而,通过商业规模的回灌获得的经验证明,回灌工艺必须仔细地加以设计。Horne(1981)报导:在日本的一些地热田中,由于回灌导致了所产出流体的热焓的降低。这种干扰促使了回灌的冷水加快在裂隙中的流动,这一现象已被高流速示踪试验所证

实。这就是为什么在商业化回灌工艺设计投入运行之前仍然需要对裂隙化地热田中冷水运动规律进行基础研究的理由。现在天然裂隙储集层中半解析模型对于回灌流量和回灌地点的分析方法已经建立。我们所设计的一种回灌系统可以从地热田中获得最大的热能回收。

我们研究的第二部份是用数值方法研究地质介质中耦合的非等温化学物质传输过程。描述这个过程的基本方程是对流—扩散方程。传统的有限差分技术不能用来解这类方程。因为该方法本身即可能引起显著的数字弥散，也可以在以对流为主的传输过程中于锋面处发生附加的振荡。我们采用显式的二次Godunov法和因子分解技术的巧妙结合方法。利用因子分解技术，对流—扩散方程可以被分成两部份，并分二部求解。用二次的Godunov法求解的第一部份是纯双曲线型方程，它仅考虑了对流过程。用传统的中心差分技术求解的第二部份是一个抛物型方程，它从对流—扩散方程中省略了对流项。计算结果显示，采用这种新方法后，数字弥散误差和计算网格方向的影响可以大大地减小。特别是这种方法可以保证在高Peclet数时近锋面处不再发生附加的振荡。这个方法已被编成一个研究在多孔板中自由对流和模拟地热系统硅—水动力反应的二维程序。多孔板中服从水平温差的自然对流长期以来为水文地质学家和石油工程师所关心。同时也提出了许多困难和问题，它既涉及到了垂直的冷热壁之间的总热流量的理论研究，也涉及到了在这个系统中的质量流和温度分布问题。在前人的工作中尚未见到作为温度与压力函数的流体性质对对流过程解的影响的研究。我们研究了当雷诺参数分别为25、50、100和200时的热传输量以及质量流与温

度分布的数值预报。计算结果显示, 介质中的热传输行为不受松弛的Boussinesg近似法的影响, 而质量流与温度分布则强烈地受与压力和温度有关的流体性质的影响。

为了研究硅沉淀对瞬变流性质的影响, 根据Rimstidt和Barnes(1980)的建议把硅-水反应的动能模型编进了计算程序。根据硅-水反应模拟的结果, 硅的沉淀对介质的渗透性和液流量的减小起到一定的作用。同时, 为了阐明地热储集层在开采过程中的特性, 使用了包含压力、温度和硅浓度在内的多组分模型。该模型应用于冰岛的Ellidaar地热田后得到了热储集层的体积、渗透性和孔隙度等值。它同时可以提供地热田与相邻冷水层之间相互作用的信息, 而这恰恰是传统方法不可能做到的。