第11卷 第28期 2011年10月
1671—1815(2011)28-6883-04

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 11 No. 28 Oct. 2011

化工技术

基于MATLAB的水溶建腔数值模拟

丁 华 王明刚

(南京师范大学泰州学院,泰州 225300)

摘 要 分析了岩盐储气库水溶建腔机理,运用Matlab语言开发了水溶建腔数值模拟软件。利用此软件对溶腔的体积和形状进行了动态的模拟。将模拟结果与东淮3井实际施工数据进行了对比,结果表明模拟结果精度较好,从而能够为岩盐储气库的溶腔设计与生产提供理论依据和决策手段,以便科学合理地进行设计和生产。

关键词 数学模型 水溶建腔 数值模拟 Matlab

中图法分类号 TQ115; **文献标志码** A

水溶采矿是一门综合性、多学科的工程应用技术,它主要是研究盐类矿床中的盐类矿物(矿石)被溶剂(水)就地溶解,转变成流动状态的溶液(即卤水),并被输送到地表的一门实用科学。是介于地质、采矿、钻探、物理、化学和流体力学等学科之间的边缘科学[1],盐类矿床长期开采实践中形成和发展起来的。

无论是国内还是国外,水溶法采矿的历史都十分久远,并且现在越来越受到人们的重视。国外对于岩盐溶腔数值计算模型的研究工作较早,大致经历了从岩盐溶解机理的数值模拟到双井情况的数值计算再到模拟大型溶腔的形成和如何控制溶腔形状的发展三个阶段,这方面的研究目前仍在继续深入中[2]。本文通过对水溶建腔机理的分析,对水溶建腔数学模型进行了化简,运用Matlab语言开发了水溶建腔数值模拟软件,利用此软件对溶腔的体积和形状进行了动态的模拟。并对结果进行了分析,得到了一些有益的结果。

2011年7月4日收到,7月11日修改

第一作者简介:丁 华,男,南京师范大学泰州学院硕士研究生。研究方向:软件工程。E-mail:lmal013@yeah.net。

1 溶腔模型的建立与求解

溶腔模型是用以描述水溶建腔过程中的流体输运规律、腔体溶蚀速率以及溶腔形态发展的规律。模型由连续性方程、动量方程、对流扩散方程以及溶解速度方程构成,其描述公式为[1]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \\ \rho \dfrac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{F} - \nabla P + \dfrac{1}{3}\mu \nabla(\nabla \vec{v}) + \mu \nabla^2 \vec{v} \\ \dfrac{\partial C}{\partial t} + (\vec{v}\nabla) C = D\nabla^2 C = D\nabla^2 C \\ \dfrac{\partial R}{\partial t} = -\dfrac{D}{\alpha}\dfrac{M}{\rho_s}\dfrac{\partial C}{\partial n}\Big|_{\Gamma_1} \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中:ρ—溶液的密度;$\vec{v}$—流体速度;p—流体的压力;$\vec{F}$—流体的体力;μ—动力黏性系数;C—溶液的摩尔浓度;D—扩散系数;R—溶腔半径;ρ_s—岩盐密度;α—岩盐品味;Γ_1—溶腔侧壁壁面。以上方程组再加上定解条件就构成了完备的方程组,可以进行求解。但由于速度场和浓度场的耦合关系,对于方程组(1),很难获得解析解,因而我们选用交替方向隐式格式[3,4],将模型进行简化处理,可得式(2)的数值求解模型。

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial C}{\partial t} = -U\dfrac{\partial C}{\partial r} - V\dfrac{\partial C}{\partial z} + D\left\{\dfrac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial C}{\partial r} + \dfrac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right\} \\
\dfrac{\partial U}{\partial t} = -U\dfrac{\partial U}{\partial r} - V\dfrac{\partial U}{\partial z} + \dfrac{\mu}{\rho}\dfrac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \dfrac{\mu}{\rho}\dfrac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial r} \\
\dfrac{\partial V}{\partial t} = -U\dfrac{\partial V}{\partial r} - V\dfrac{\partial V}{\partial z} + \dfrac{\mu}{\rho}\dfrac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \dfrac{\mu}{\rho}\dfrac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial z} \\
\rho = \rho \quad + CM\left(1 - \dfrac{\rho_\omega}{\rho_s}\right)
\end{cases}
\tag{2}
$$

上述数学模型辅以必要的初边值条件,可在计算机上进行数值求解,为此,我们利用 Matlab 软件编制了岩盐储气库数值模拟应用程序,主要程序框架如图 1 所示。

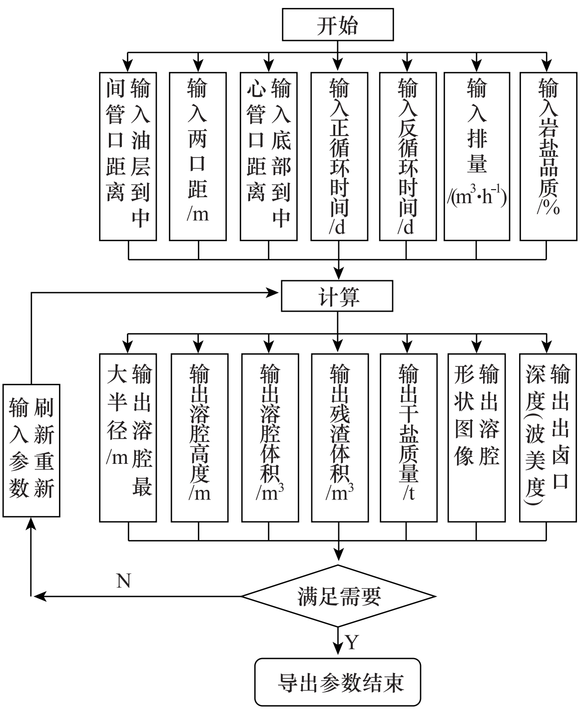

图 1 岩盐储气库数值模拟程序框图

2 模拟结果分析

利用建立的数学模型,结合有关盐矿的地质资料,确定计算参数,可以对溶腔的形状变化进行模拟。我们取岩盐纯度为 65% ,中心管半径为60 mm,中间管与中心管环空半径为60 mm,中心管和中间管距离为10 m。泵排量为25 m^3/h,中心管至底部的距离0. 5 m,油层至中间管管口距离0. 1 m,采用正循环的生产方式。利用模型进行模拟结果如表 1。

表 1 300 d 模拟结果

时间/d	溶腔体积/m^3	残渣体积/m^3	干盐质量/t
10	232. 564 6	81. 397 61	377. 917 4
20	416. 449	145. 757 2	676. 729 7
30	594. 046 5	207. 916 3	965. 325 5
40	800. 201 5	280. 070 5	1 300. 327
50	978. 067 3	342. 323 6	1 589. 359
60	1 218. 908	426. 617 7	1 980. 725
70	1 395. 414	488. 395 1	2 267. 548
80	1 590. 636	556. 722 8	2 584. 784
90	1 806. 089	632. 131 2	2 934. 895
100	2 359. 733	825. 906 7	3 834. 566
110	2 604. 266	911. 493 2	4 231. 932
120	2 826. 329	989. 215 3	4 592. 785
130	3 056. 006	1 069. 602	4 966. 009
140	3 296. 234	1 153. 682	5 356. 379
150	3 511. 333	1 228. 967	5 705. 916
160	3 759. 461	1 315. 812	6 109. 124
170	3 977. 599	1 392. 16	6 463. 599
180	6 181. 264	2 163. 442	10 044. 55
190	6 648. 565	2 326. 998	10 803. 92
200	7 518. 015	2 631. 305	12 216. 77
210	7 975. 74	2 785. 909	12 934. 58
220	8 451. 722	2 958. 103	13 734. 05
230	8 943. 016	3 130. 056	14 532. 4
240	9 434. 701	3 302. 146	15 331. 39
250	9 928. 11	3 474. 839	16 133. 18
260	10 420. 64	3 647. 224	16 933. 54
270	1 091. 55	3 819. 744	17 734. 53
280	11 408. 38	3 992. 935	18 538. 62
290	11 902. 14	4 165. 749	19 340. 97
300	12 396. 28	4 338. 698	20 143. 95

将生产数据(见表 2)与模拟结果进行比较,其中 M 表示实际产盐量的平均值; S 表示实际产盐量与平均值偏差的平方和; A 表示残差平方总和; r^2 表示模拟精度。

表 2　实际生产数据与模拟结果的比较

时间/d	30	60	90	120	150	180	210	240
模拟产盐/t	965.33	1 980.73	2 934.90	4 592.78	5 705.92	10 044.55	12 934.58	15 331.39
实际产盐/t	639.24	1 345.18	2 846.58	4 447.98	6 731.98	9 321.94	11 368.24	13 999.24

*M*6 337.5,S—166 220 000,*A*6 342 000,$r^2$0.961 8

因此,模型对于干盐质量的模拟精度可以达到 96.18%,精度较好。

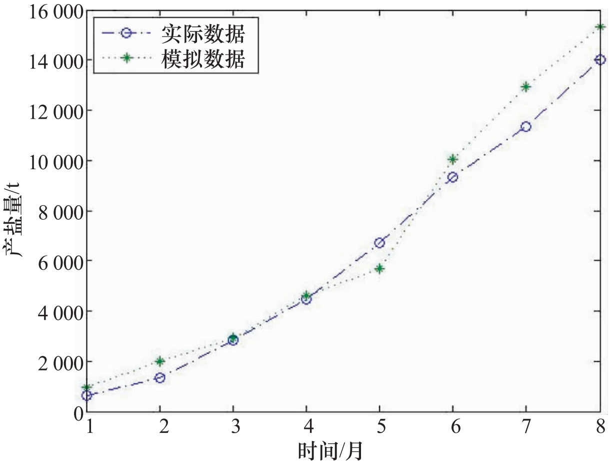

图 2　实际产盐量数据与模拟数据对比图

由此利用模型我们可以得出,在溶蚀过程中溶腔体积随溶蚀时间的关系图(见图 3,图 4)

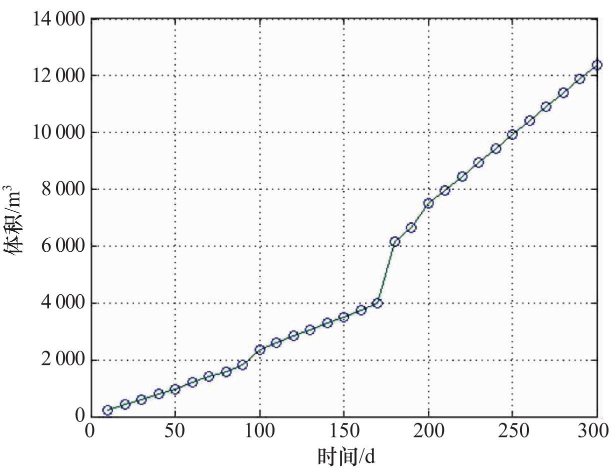

图 3　溶腔体积随时间模拟图

利用模型我们模拟天内溶腔形状结果如图 5—图 8。

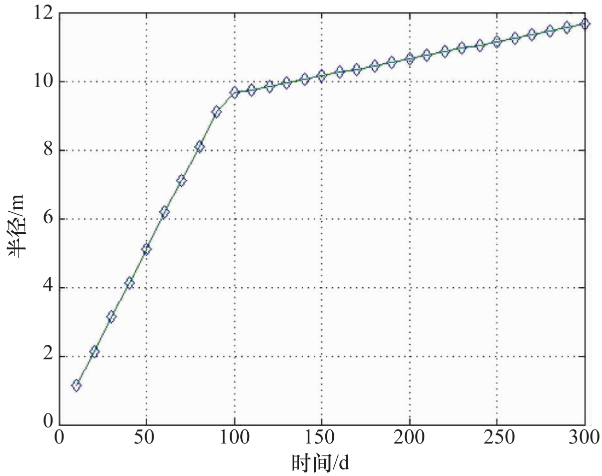

图 4　溶腔最大半径变化模拟图

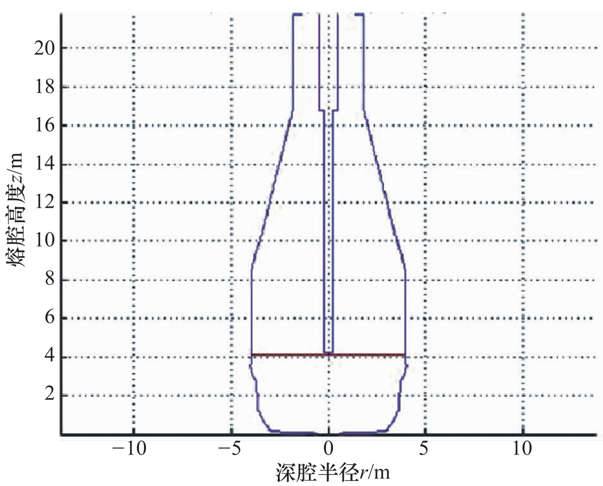

图 5　溶蚀 9 d 图像

根据所建立的溶腔数学模型,通过数值方法,对溶腔形态进行了模拟研究,数值模拟表明,不同的生产工艺(如调整两口距、油层高度等)可导致溶腔形状的不同,采卤过程中,可根据需要,调整生产方式,以获得最佳的溶腔形状。

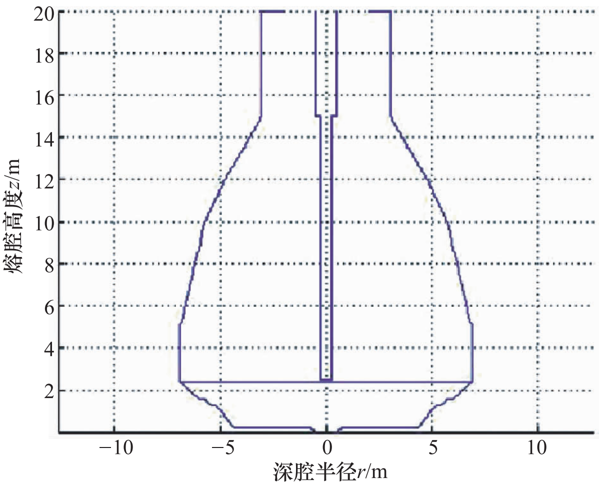

图6 溶蚀15 d图像

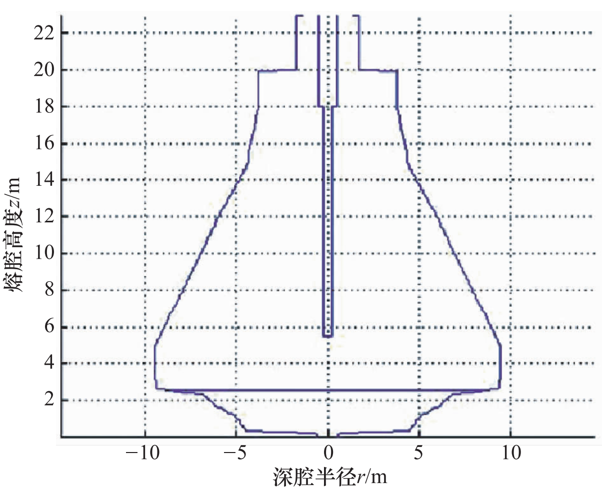

图7 溶蚀21 d图像

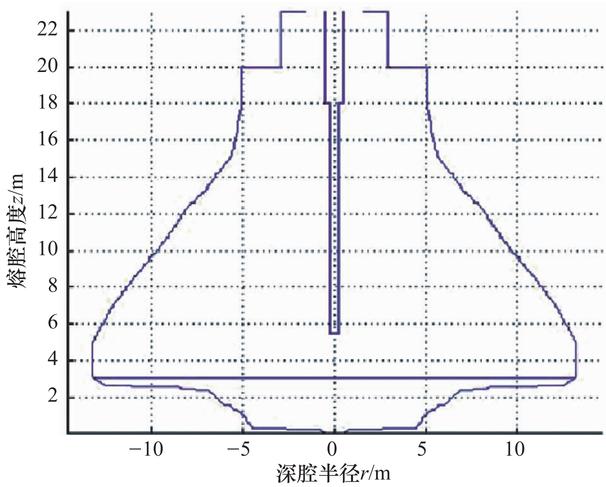

图8 溶蚀30 d图像

参 考 文 献

1 赵志成,朱维耀,单文文.岩盐储气库溶腔数学模型研究.中国科学技术大学学报,2004;(34):224—227

2 杨俊六,王登芝.水溶采矿中溶腔形状变化的数值模拟.四川联合大学学报(工程科学版),1997;(6):21—24

3 特里顿 D J.物理流体力学.董务民,等译.北京:科学出版社,1992;52—79,165—173

4 Thoms R L, Gehle R M. Survey of caverns in salt domes of the U.S. The Solution Mining Research Institute Meeting. CO, Denver, October,1983:16—19

The Computer Simulation of Salt Cavity Washing Based on MATLAB

DING Hua, WANG Ming-gang

(Nanjing Normal University Taizhou College, Taizhou 225300, P. R. China)

[**Abstract**] The mathematical model of solution cavem shape devloping, the method of calculation and the analysis of results in solution mining were discussed. The results of numerical calculation coincide with the results of physical analog experiments. Therefore, this investigation results lay a foundation for optimization of design parameters and control of mining process in solution mining.

[**Key words**] mathematical model solution mining numerical simulation Matlab