第9卷 第4期 高 压 物 理 学 报 Vol. 9, No. 4
1995年12月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Dec., 1995

二氧化碳在正辛烷、正十四烷中对流扩散系数的测定*

王利生
(北京理工大学化工与材料学院,北京 100081)
董庆田 郎兆新
(石油大学石油工程系,北京 102200)

摘要 建立了由细管驱替实验测定驱替气体在油藏流体中的对流扩散系数的测定方法。测定了CO_2分别在正辛烷、正十四烷中的对流扩散系数,并研究了驱替速度及正辛烷、正十四烷分子量对扩散的影响。

关键词 对流扩散系数 细管驱替 实验测定
中图法分类号 O552.2

符 号 说 明

D_1: 对流扩散系数, cm^2/s;
C': 流出物浓度, 无因次;
C_0: 注入溶剂浓度, 无因次;
u: 流速, cm/s;
C: 内部溶剂浓度, 无因次;
F_g: 气体含量校正系数, 无因次;
y: uL/D, 无因次准数;
L: 盘管长度, cm;
$I=V_i/V_p$: 注入孔隙体积倍数, 无因次;
$GOR=\Delta V_g/\Delta V_o$: 气油比, 无因次;
D_d: 分子扩散系数, cm^2/s;
α: 弥散度, cm。

1 引 言

目前,我国各大油田经过蒸汽驱或水驱开采之后,已普遍进入中后期,但在地层中仍有约50%的残余油由于出水严重而难以回收。采用注气驱替方法进行该类油藏的三次采油在国外已得到广泛的应用,在国内也引起重视。在这一过程中,注入气若不能有效地穿过地层水形成的屏障,并与油藏接触使之膨胀并降低粘度,则难以达到较高的采收率。此时,驱替气体与地层流体之间的对流扩散传质被认为是引起混合的重要机理,在裂缝性油藏的开采过程中,注入的气体穿过裂缝时与油藏原油的接触也是以对流扩散为主要机理的,因此,进行对流扩散现象的实验测定与数值模拟是上述油藏开采方案制定的关键。

已有的研究成果已认识到,对流扩散是在运动的相内(或相间)由于物质微粒的分子扩散和弥散的综合现象。其中,分子扩散是由于浓度差导致的传质,而弥散是由于在流道中或流道间由于速度的变化导致的混合现象。在多孔介质中的连续液相中,当流速很小

* 国家自然科学基金、国家博士后科学基金资助。
1995年4月3日收到原稿,同年6月26日收到修改稿。

时，通常以分子扩散为传质机理，而当流速较大时，则以水力学弥散为主要传质机理。

本文建立了一种利用多功能驱替装置测定多孔介质中对流扩散系数的实验测定方法，并介绍了由驱替数据求取对流扩散系数的理论依据，所测定的数据可以为三次采油数值模拟提供参考。

2　实验理论依据

多孔介质中对流扩散系数可由室内岩芯驱替实验，测定不同注入孔隙体积下的流出物浓度数据，基于一维对流扩散方程的解析解进行确定。当一种流体在均质孔隙介质中被另一种可与其混相的流体（对 CO_2 而言，需在其最小混相压力之上进行驱替流体的实验）进行稳定的、不发生粘滞指进的驱替时，一维对流扩散方程为：

$$D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-u\frac{\partial C}{\partial x}=\frac{\partial C}{\partial t} \qquad (1)$$

其中浓度极限取 0～1，对滞流体取 0，对驱替流体取 1。在短岩芯驱替时，由于混相带与介质长度相近，边界条件对结果有很大影响，而当孔隙介质比混相带长得多时，前人研究结果已证明不同边界条件求得的解给出相同的结果。Coats[1]等定义了无因次准数 $\gamma=ul/D$，其中 u 为流速，l 为介质长度，D 为对流扩散系数。u 可通过体积驱替速度（cm^3/s）除以细管的孔隙截面积求得，而孔隙截面积可以由标定得到的细管孔隙体积除以细管长度求得。细管孔隙体积为仪器常数，对于本实验而言，体积驱替速度是由计算机自动采集 310-FDS 泵数据而得到的，实验装置与条件见下一节。Briham[2]根据不同的边界条件得到不同的解析解，见表 1。

表 1　不同边界条件下线性多孔介质的解析解

Table 1　Analytical solutions for linear porous media under different boundary conditions

Boundary conditions	Analytical solutions	
$x\to\infty, C(x,t)\to 0$	$C=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{1-I}{2\sqrt{I/\gamma}}\right)$	(A-1)
$x=\mu t, C(x,t)=\frac{1}{2}$	$C'=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{1-I}{2\sqrt{I/\gamma}}\right)+\frac{1}{2\sqrt{\pi\gamma I}}\exp\left[-\left(\frac{1-I}{2\sqrt{I/\gamma}}\right)^2\right]$	(A-2)
$x=0, C=1$ $x\to\infty, C\to 0$	$C'=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{1-I}{2\sqrt{I/\gamma}}\right)+\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\exp\left[-\left(\frac{1-I}{2\sqrt{I/\gamma}}\right)^2\right]\cdot$ $\left[\frac{2\sqrt{I/\gamma}}{1+I}-\frac{1}{2}\left(\frac{2\sqrt{I/\gamma}}{1+I}\right)^3+\cdots\cdots\right]$	(A-3)

Note：C—in situs concentration；C'—effluent concentration.

表 1 中列出了 Briham 在不同的边界条件下对式(1)求得的以内部浓度 C 或流出物浓度 C' 表示的解。若采用(A-1)式预测流出液浓度随孔隙体积倍数的变化曲线，在 $1I$ 处作垂直线并检查两侧曲线分别与垂线围成的面积，发现式(A-1)不满足物料平衡。Briham[5]引入流动浓度 C' 以区别于内部浓度 C，且有：

$$C'=C-\frac{D}{U}\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right) \qquad (2)$$

将式(2)代入式(A-1)后可得到以流出物浓度表示的式(1)的解,即(A-2)式,该式可满足物料平衡。

在确定了一维对流扩散方程的解析解之后,用非线性最小二乘法调整 γ 值,拟合实验数据,使每一点的计算值与实验值的误差最小,即通过调整 γ 值,使计算的每一注入孔隙体积对应的浓度值与实验值的误差为最小。

$$\text{误差} = \frac{\text{Exp} - \text{Cal}}{\text{Exp}} \tag{3}$$

式中:Exp——实验值;Cal——计算值。

通过上述过程得到 γ 值以后代入式 $\gamma = ul/D$,便可求得对流扩散系数值

$$D = \frac{ul}{\gamma} \tag{4}$$

3 实验装置与方法

3.1 实验装置

本次实验所用实验装置是我实验室从美国岩芯公司(Core LAB)引进的全自动驱替装置,具有很好的数据采集系统,可进行多种形式的驱替过程。

该实验装置最高工作温度为 350°F,最高工作压力为 68.95MPa(10000 bf/in^2)。测量 CO_2 对流扩散系数所用的主要实验装置为内径 0.635 cm(1/4in),12.192m(40ft)长的填充非胶结砂的盘管及 FDS-200 多功能驱替泵。整个实验的装置及流程图见图 1。

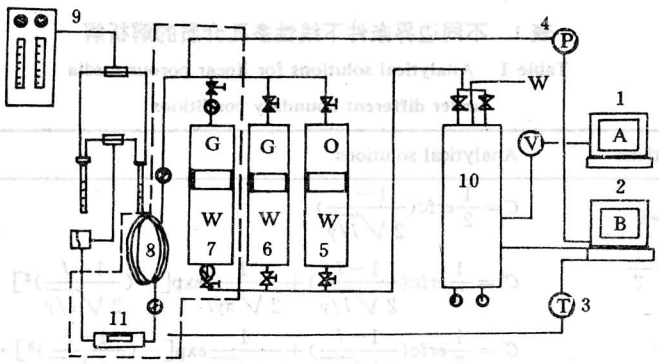

图 1 实验装置流程图

1. 主机 A;2. 主机 B;3. 温度传感器;4. 压力传感器;5. 供油瓶;
6、7. 供气瓶;8. 填砂盘管;9. 气量表;10. 泵;11. 观察窗

Fig. 1 Flowing chart of experimental apparatus

1. Computer aided volume data logger;2. Computer aided pressure and temperature controller;
3. Temperature transducer;4. Pressure transducer;5. Oil cylinder;6,7. Gas cylinder;
8. Slim tube;9. RUSKA gas meter;10. Injection pump(310-FDS);11. Effluent window

3.2 实验方法

实验开始前首先要读下当时的室温 T,测量被驱替油品的密度 ρ_0,并计算气体含量校正系数。由于实验主要是测定流出物中 CO_2 的浓度比,所以要扣除测量之前在饱和盘管时

油相中的残留气体，故引入气体含量校正系数，将实验的 CO_2 浓度比与校正系数之差作为准确的浓度，气体含量校正系数的表达式为：

$$F_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_o} \tag{5}$$

式中：F_g ——气体含量校正系数，ΔV_o ——产出油体积增量，ΔV_g ——排出气体体积增量。气体含量校正系数可在实验进行之前测量并计算，在本实验中发现 F_g 数值很小，对实验结果无明显影响。整个的实验过程如下：

首先打开主机 1，实验开始；开泵并饱和盘管。当驱出油滴中不含气泡时，加背压至预定的驱替压力，并在实验驱替速度下继续加油，并记录瞬时排气量 V_g 及出油量 V_o，利用式(5)计算出气体含量校正系数，向瓶 7 内转入 CO_2 气开泵达到预定驱替压力；将其联通盘管 8 的电磁阀打开，同时打开瓶 7 手动阀开始注入 CO_2 驱替油。记录瞬时出油量 V_o，同时记录气量表瞬时读数 V_g，关闭驱替泵，关盘管及瓶 7，卸背压，然后重新饱和盘管，进行另一驱替条件下的实验。

4　结果与讨论

4.1　数据处理

本次实验是在 38℃及 62℃温度下，高于 CO_2 在正辛烷或正十四烷体系中最小混相压力情况下进行测定的。在 38℃时，CO_2 在正辛烷及正十四烷中的最小混相压力均为 8.5MPa。在 62℃时，CO_2 在正十四烷中的最小混相压力为 12.56MPa[3]。由于实验是在一定的驱替速度下测 CO_2 在均相体系中的对流扩散系数，故要求驱替时的压力必须高于最小混相压力[4]。本实验所采用的驱替条件列于表 2。

表 2　CO_2 与正辛烷或正十四烷体系的驱替条件

Table 2　Displacing conditions for CO_2-normal octane/tetradecane systems

System	T/(℃)	p(MPa)	Volume driving rate/(cm³/min)
CO_2-nC_8	38	10.88	1, 2, 3
CO_2-nC_{14}	38	10.88	1, 2, 3
CO_2-nC_{14}	62	16.33	1, 2, 3

将表(2)所列的各种驱替条件下的 V_o、V_g、V_i 瞬时值列表并计算 I 值及 C/C_0 值，其中 CO_2-nC_{14} 体系在 $T=335.15K$，$p=16.33MPa$ 及驱替速度为 1cm³/min 时的典型驱替数据 V_o、V_g 值列于表 3。

利用表 3 中的实验数据，通过下面公式及理想气体状态方程 $I=(W/M)RT$，算出 I 值及 C/C_0 值：

$$I = \frac{V_i}{V_p}$$

式中 V_p 为盘管孔隙体积。

$$C/C_0 = \frac{GOR \times M}{GOR \times M + \rho_0 \times 82.1 \times T} \times 100\%$$

其中

$$GOR = \frac{V_{g2} - V_{g1}}{V_{o2} - V_{o1}} - F_g$$

为驱替过程中流出物的瞬时气油比，式中：ρ_0 ——被驱替油密度，F_g ——气体含量校正系数，M —— CO_2 分子量，T ——实验温度，K。将计算所得的 I 值及 C/C_0 值列于表 4。

表 3 实验的 CO_2-nC_{14} 体系典型驱替数据

Table 3 Typical displacing data for CO_2-normal tetradecane system

V_i/(cm³)	V_g/(cm³)	V_o/(cm³)	V_i/(cm³)	V_g/(cm³)	V_o/(cm³)
65.910	123	95.0	85.782	2363	107.6
72.384	146	102.0	87.796	2663	107.8
74.130	187	103.0	92.511	4063	108.2
77.714	443	104.8	95.022	4803	108.4
78.231	513	105.2	97.575	5623	108.6
78.664	563	105.4	104.060	7603	109.0
80.048	843	106.2	108.604	9123	109.2
80.480	983	106.4	115.187	11203	109.4
80.940	1123	106.6	122.750	13403	109.6
82.223	1533	107.0	132.146	16293	109.8

表 4 由实验的典型数据确定的流出物浓度比随注入孔隙体积的变化关系

Table 4 Typical experimental data of effluent concentration ratio vs injection volume

I	C/C_0	I	C/C_0
0.90254	0.7050	1.0947	79.4625
0.92431	9.478	1.1535	90.0300
0.96900	26.7746	1.1848	90.5176
0.97544	31.0456	1.2166	91.3632
0.98084	39.1631	1.2975	92.7386
0.99810	47.4182	1.3541	95.1479
1.0034	64.3480	1.4362	96.4072
1.0092	64.3488	1.5305	96.5967
1.0252	72.5542	1.6477	97.3879
1.0696	78.1095		

利用如表 4 所列的数据，将每一体系在预定的压力、温度及驱替速度下的实验数据以

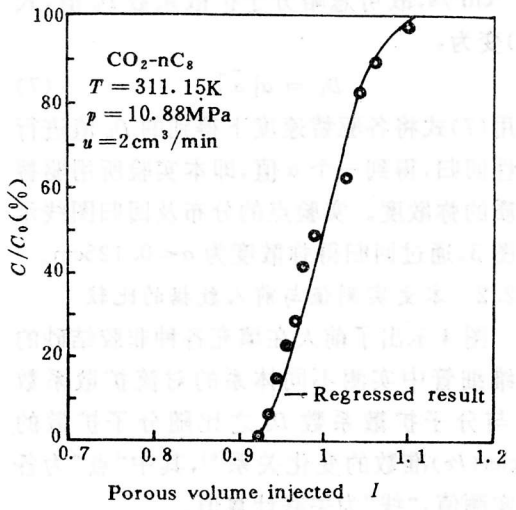

图 2　C/C_0 随注入孔隙体积的变化关系及回归结果

Fig. 2　Experimental C/C_0 vs porous volume injected and regressed results

利用如表 4 所列的数据，将每一体系在预定的压力、温度及驱替速度下的实验数据以注入 CO_2 的孔隙体积倍数 I 为横座标，以流出 CO_2 的浓度比 C/C_0 为纵座标得到如图 2 所示的图线。同时通过式(A-2)利用非线性最小二乘法调整 γ 值，拟合实验数据，并将式(A-2)结合用拟合后的 γ 值计算的浓度比 C/C_0，随注入 CO_2 的孔隙体积倍数的变化一并示于图 2。

将每种情况下的实验数据都用同样的方法处理，得到不同的 γ 值，将 γ 值代入式 $\gamma=ul/D$，求得每种情况下的对流扩散系数 D。计算结果汇总列于表 5。

4.2 讨　论

4.2.1　由对流扩散系数确定介质弥散度

由表 5 可看出，随着 CO_2 注入速度的增加，扩散系数 D_L 的值也增加，并符合下式[5]：

表 5　对流扩散系数的计算结果

Table 5　Correlation results of convective diffusion coefficient

Systems and displacement conditions	Driving rate u /(cm/s)	γ	D_L /(10^{-1}cm²/s)
CO_2-nC_8	0.226	628.52	4.384
$T=311.15K$	0.451	948.88	5.795
$p=10.88MPa$	0.677	1243.75	6.639
CO_2-nC_{14}	0.226	660.5	4.172
$T=311.15K$	0.451	1301.45	4.225
$p=10.8MPa$	0.812	872.76	11.34
CO_2-nC_{14}	0.226	547.86	4.793
$T=335.15K$	0.451	1842.32	2.985
$p=16.33MPa$	0.812	1032.45	9.590

Note: According to that the porous volume equals to 90cm³, the driving rate has been changed into a rate with its unit is cm/s.

$$D_L = D_d + \alpha[\vec{u}] \tag{6}$$

式中：D_d——分子扩散系数，α——介质弥散度，$[\vec{u}]$——驱替流速，cm/s。

由于实验的驱替速度较大，分子扩散系数D_d值与对流扩散系数D_L值相比很小(约为

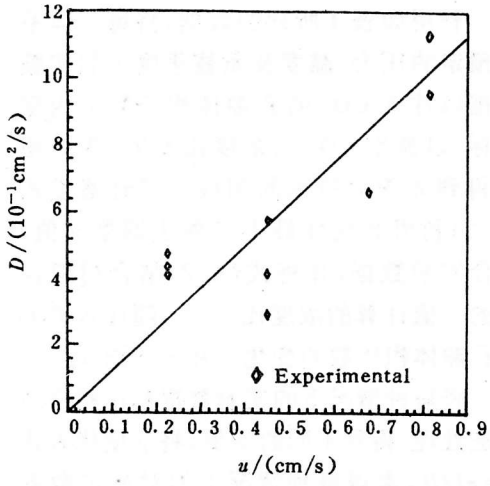

图 3 对流扩散系数随驱替速度的变化关系及回归结果

Fig. 3 D_L vs u and regressed results

$10^{-5}cm^2/s$，故可忽略分子扩散系数 D_d 值，式(6)变为：

$$D_L = \alpha[\vec{u}] \tag{7}$$

利用(7)式将各驱替速度下得到的 D_L 值进行线性回归，得到一个 α 值，即本实验所用驱替介质的弥散度。实验点的分布及回归图线示于图 3，通过回归得弥散度为 $\alpha=0.125cm$。

4.2.2 本文实测值与前人数据的比较

图 4 示出了前人在填充各种非胶结砂的一维细管中实测不同体系的对流扩散系数 D_L 与分子扩散系数 D_d 之比随分子扩散的 Peclet(Pe)准数的变化关系[6]，其中“点”为各种实测值，“线”为关联计算值。

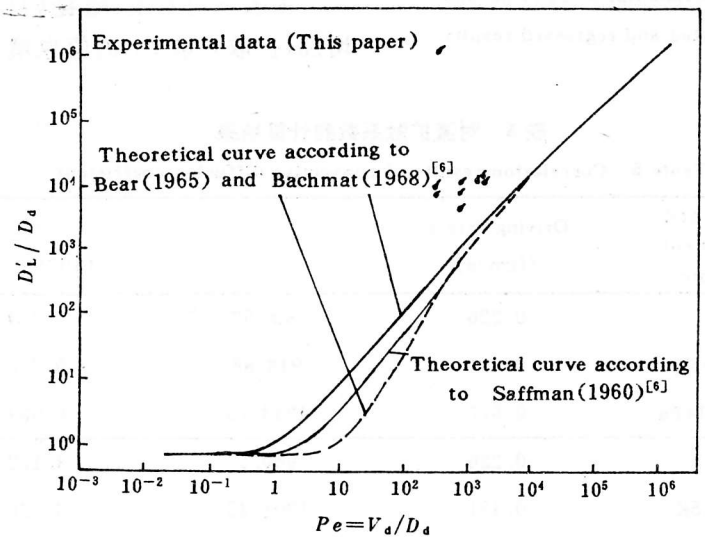

图 4 分子扩散系数与对流弥散的关系

Fig. 4 Relationship between molecular diffusion and convective dispersion

由表 5 可知，本文实测值的典型数量级为：驱替速度 $u=0.5cm/s$，$D_L=5\times10^{-1}cm^2/s$，取 CO_2 在烃类中的分子扩散系数 $D_d=5\times10^{-5}cm^2/s$[7]，砂粒直径 $d=0.1cm$，则可求得，$D_L/D_d=0.5/5\times10^{-5}=10^4$，$Pe=0.5\times0.1/5\times10^{-5}=10^3$，将各种驱替条件下实测的 D_L/D_d 值随 Pe 值的变化标绘于图 4 中的点如“ ”所示，由图可见本文对注 CO_2 体系对流扩散系数的实测值与前人对不同烃-烃体系的实测数据结果基本一致，其中注 CO_2 体系的对流扩散系数略大于其它体系，从理论上分析这是合理的。

4.3 结 论

本文建立了由细管驱替实验测定驱替气体在油藏流体中的对流扩散系数的测定方法，测定了 CO_2 分别在正辛烷、正十四烷中的对流扩散系数，该项测定实验在国内未见有文献报导。所测定的结果与前人实测数据一致。

参　考　文　献

1 Coats K H, Smith B D. Soc Pet Eng J, 1977: 73～84
2 Briham W E. Soc Pet Eng J, 1974: 91
3 王　钰. CO_2 与正辛烷、正十四烷体系最小混相压力的实验测定[毕业论文]. 北京：石油大学，1994
4 杨承志，岳清山，沈平平编译. 混相驱提高石油采收率. 北京：石油工业出版社，1991
5 Perkins T K, Johnson O C. Soc Pet Eng J, 1963: 70～84
6 Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media (Chapter 10). Amsterdam: Elsevier Publ Comp, 1972
7 Wang L S, Long Z X. J Petro Sci & Eng, 1995, 12(1): 247～254

MEASUREMENT OF CONVECTIVE DIFFUSION COEFFICIENTS OF CO_2-NORMAL OCTANE AND NORMAL TETRADECANE SYSTEM

Wang Lisheng

(*Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

Dong Qingtian, Lang Zhaoxin

(*Petroleum Engineering Department, University of Petroleum, Beijing* 102200)

ABSTRACT　The method for measuring convective diffusion coefficients of driving gases in reservoir fluid by slim tube displacement method has been established in this work. The convective diffusion coefficients of CO_2-normal octane and normal tetradecane systems have been measured and the effect of driving rate and the molecular weight of normal octane and normal tetradecane on the convective diffusion have been investigated.

KEY WORDS　convective diffusion coefficient, slim tube displacement, experimental measurement.