

非光滑管路中 HPAM 溶液减阻与流变性关系研究

田珍瑞¹, 俞路遥¹, 高航¹, 方波^{1*}, 卢拥军², 许可², 邱晓惠²

(1.上海市多相结构材料化学工程重点实验室,华东理工大学流变学研究室,上海 200237;
2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:通过研究不同分子量、不同浓度的部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)溶液的流变性能,并测试其在大型摩擦阻力测试装置中的压差,探究聚合物浓度、聚合物分子量等因素对 HPAM 溶液在非光滑管路中减阻性能的影响。结果表明,在实验条件范围内,聚合物分子量增大,溶液的减阻率先降低后升高;聚合物的浓度增大,溶液的减阻率降低。通过计算得到了 HPAM 溶液在内径为 0.46 cm 非光滑管路中流动时的摩擦阻力系数 f 和广义雷诺数 Re 并与 HPAM 溶液流型参数 n 相关联,建立了表征非光滑管路中聚合物溶液摩擦阻力系数新方程,同时建立了聚合物溶液摩擦阻力系数 f 与广义雷诺数 Re 、减阻率 DR 与广义雷诺数 Re 的经验关系,便于 HPAM 溶液的工程应用。

关键词:HPAM;滑溜水;流变性;减阻性能;摩擦阻力系数方程

中图分类号:TE3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S1-0173-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.035

Relationship between drag reduction and rheology of HPAM solutions in non-smooth pipelines

TIAN Zhen-rui¹, YU Lu-yao¹, GAO Hang¹, FANG Bo^{1*}, LU Yong-jun², XU Ke², QIU Xiao-hui²

(1.Shanghai Key Laboratory of Multiphase Structural Materials Chemical Engineering, Chemical Engineering Rheology Research Division, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract:The rheological property of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) solution with different molecular weight and different concentrations are studied, the pressure difference of HPAM solution is tested in a large scale frictional resistance testing device, and therefore the effects of polymer concentration and polymer molecular weight on the drag reduction performance of HPAM solution are investigated in non-smooth pipeline. It is found that under the testing conditions, the drag reduction percentage of HPAM solution decreases initially and increases then as the molecular weight of the polymer increases; The drag reduction percentage of HPAM solution decreases as the concentration of the polymer increases. The frictional resistance coefficient (f) and the generalized Reynolds number (Re) of HPAM solution are obtained when it flows in a non-smooth pipeline with an inner diameter of 0.46 cm, and these two parameters are correlated with the flow pattern parameter n of HPAM solution. A novel equation is established for characterizing the friction drag coefficient of polymer solution in non-smooth pipeline. The empirical relationship between f and Re and the empirical relationship between the drag reduction rate (DR) and Re are also established, which is convenient for the engineering application of HPAM solution.

Key words:HPAM; slick fluid; rheological property; drag reduction performance; frictional resistance coefficient equation

美国页岩气革命的成功促进了以滑溜水为代表的体积压裂技术得到空前发展^[1]。由于滑溜水压裂工艺具有泵速高、用量多、排量大等特点^[2],压裂过程中会产生剧烈的湍流而损耗大量动能^[3],因此具有较低摩擦阻力的滑溜水压裂液体系受到了广泛的重视和应用^[4-5],而减阻剂是该类滑溜水体系的核心成分^[6-7]。研究表明,在水溶液中添加少量长链聚合物分子可以显著改变湍流流动中的流动结构,从

而减少流动阻力^[8]。超高分子量的部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)具有优良的增黏性能和理化性质,是最常用的滑溜水减阻添加剂^[9-10]。目前对于聚合物减阻现象的研究主要从微观机理上解释减阻现象发生的原因,主要有伪塑说^[11]、黏弹说^[12]、有效滑移说^[13]、湍流抑制说^[14],或是通过建立数学模型预测溶液减阻性能的变化,主要有非牛顿流体模型法^[15]、改良 Virk 渐进线法^[13]、主流速度降阻比

收稿日期:2023-02-07;修回日期:2023-05-25

基金项目:国家科技重大专项课题(2017ZX05023003);中石油科技管理部项目(2020B-4120);国家自然科学基金(51834010)

作者简介:田珍瑞(1999-),男,硕士生,研究方向为压裂液流变学,y82210076@mail.ecust.edu.cn;方波(1967-),男,博士,教授,研究方向为化工流变学,通讯联系人,fangbo@ecust.edu.cn。

法^[16]。而对于聚合物溶液在非光滑管中的减阻性能与流变性关系的研究较少,而实际工程应用以非光滑管路为主,因此研究 HPAM 溶液的非光滑管减阻性能与流变性的关系对指导聚合物滑溜水体系的工程实践具有重要意义。

本文通过研究不同浓度、不同分子量的 HPAM 减阻剂在非光滑管中的减阻效果和流变性能,探究聚合物浓度、聚合物分子量等因素对 HPAM 溶液在非光滑管中减阻效果的影响。同时研究聚合物摩擦阻力系数与流变学参数之间的关联,建立基于流变学参数的 HPAM 溶液非光滑管摩擦阻力经验方程,同时获得了摩擦阻力系数 f 与广义雷诺数 Re 、减阻率 DR 与广义雷诺数 Re 的关系方程,为指导工程应用提供流变学基础。

1 实验

1.1 材料和仪器

HPAM(黏均分子量分别为 500 万、1 000 万、1 500 万、2 000 万),由中国石油勘探开发研究院廊坊院区提供;配液用水为自来水。

高级旋转流变仪 RheoStress 6 000,赛默飞 HAAKE;室内摩阻测试装置 SHL-1,中国石油勘探开发研究院廊坊院区。

1.2 实验方法

1.2.1 流变性能测试

使用旋转流变仪双夹缝测试系统(DG 41),在温度为 30℃ 条件下,剪切速率以对数变化规律由 50 s^{-1} 增加至 500 s^{-1} ,测定 HPAM 溶液表观黏度随剪切速率的变化。

1.2.2 摩阻性能测试

将 4 种分子量不同的 HPAM 配制为不同质量分数(0.005%、0.01%、0.02%、0.03%、0.04%)的滑溜水溶液,在室内大型摩阻测试装置中,选用内径为 0.46 cm 管路,测定其在不同流量(2.5~5.5 L/min)下的压差数据。

1.2.3 减阻性能研究方法

流变学研究表明,HPAM 溶液的流动曲线可以用幂律模型式(1)描述^[17]:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中: K 为稠度系数, $\text{MPa} \cdot \text{s}^n$; n 为流型参数。

幂律流体的广义雷诺数 Re ^[18] 见式(2):

$$Re = (\rho u^2 d^n) / \{8^{n-1} [(3n+1)/4n]^n K\} \quad (2)$$

其中: n 为幂律模型的流型参数。

直管阻力 Fanning 摩擦阻力系数 f ^[19] 用式(3)

计算:

$$f = (\pi^2 d^5 \Delta p) / (32 \rho l Q^2) \quad (3)$$

用 Prandtl-Karman 方程^[19] 式(4)描述清水摩擦阻力系数 $f-Re$ 变化:

$$f^{-0.5} = 4.0 \lg(Re f^{0.5}) - 0.4 \quad (4)$$

Prandtl-Karman 方程仅适用于描述光滑管道的清水摩阻,在实际实验过程中管路存在一定的粗糙度,并且随着雷诺数的增大,粗糙度的影响越大。所以本文引入适用性更强的 Barr 方程^[20] 式(5)描述清水摩擦阻力系数变化:

$$f^{-0.5} = -4.0 \lg(\Delta/3.7d + 5.1286/Re^{0.89}) \quad (5)$$

式中: Δ 为绝对粗糙度。

减阻率 DR (%) 由式(6)计算:

$$DR = (f_1 - f_2) / f_1 \times 100 \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流速, m/s ; d 为大型摩阻测试管径, m ; Δp 为直管助力压降, Pa ; l 为大型摩阻测试管路长度, m ; Q 为流量, m^3/s ; f_1 为清水摩擦阻力系数,由式(5)计算; f_2 为 HPAM 溶液的摩擦阻力系数,由式(3)计算。

2 结果与讨论

2.1 摩擦阻力测定装置可靠性

采用清水作为测试流体,通过摩阻测试装置获得清水在湍流过程中的压差和流量,计算得到其雷诺数与摩擦阻力系数,采用式(5)对清水摩阻数据进行表征,拟合曲线如图 1 所示。当绝对粗糙度 Δ 为 2.3×10^{-5} 时,相关系数 R^2 为 1。实测清水摩阻与 Barr 方程曲线基本符合,该粗糙度在常见清洁无缝钢管粗糙度范围内^[20],为非光滑圆管,说明 Barr 方程适用于描述该设备的清水湍流摩擦阻力。

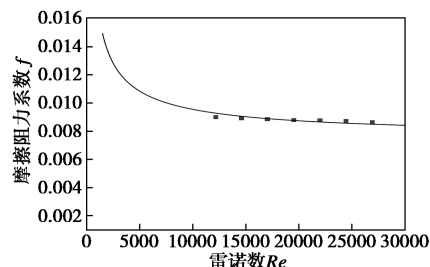
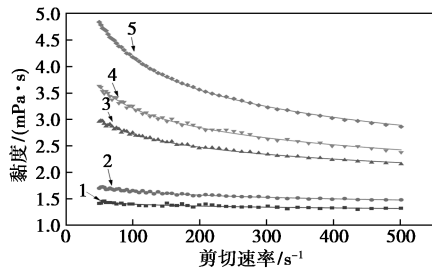


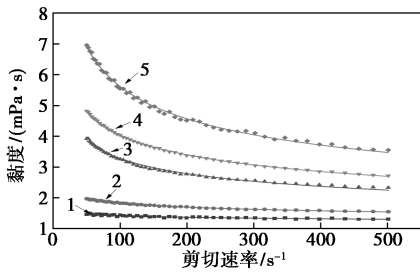
图 1 清水摩阻 Barr 曲线拟合结果

2.2 HPAM 溶液的流动曲线

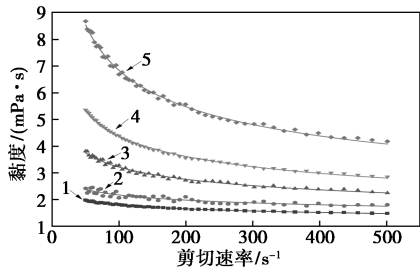
采用式(1)对不同质量分数的 4 种分子量 HPAM 溶液的流动曲线进行拟合,结果如图 2 所示,相关拟合参数见表 1。HPAM 溶液黏度随剪切速率增大而减小,表现出剪切变稀特性。



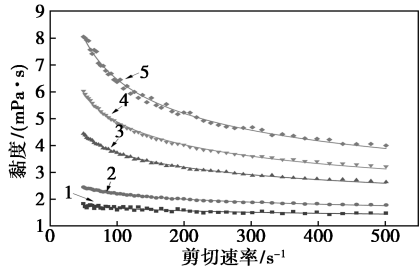
1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(a) 500 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(b) 1 000 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(c) 1 500 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(d) 2 000 万分子量

图 2 不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液流动曲线

表 1 不同分子量下不同质量分数 HPAM 溶液流动曲线幂律模型拟合参数

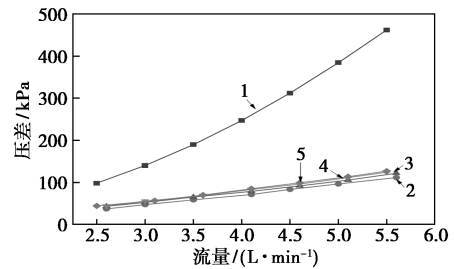
黏均分子量	质量分数/%	$K/(mPa \cdot s^n)$	n	R
500 万	0.005	1.733	0.9557	0.9705
	0.010	2.235	0.9334	0.9850
	0.020	5.114	0.8630	0.9969
	0.030	7.188	0.8252	0.9966
	0.040	11.830	0.7732	0.9996

1 000 万	0.005	1.857	0.9437	0.9878
	0.010	2.984	0.8937	0.9976
	0.020	9.618	0.7663	0.9959
	0.030	12.820	0.7492	0.9997
	0.040	22.200	0.7015	0.9984
1 500 万	0.005	3.195	0.8761	0.9978
	0.010	4.113	0.8614	0.9695
	0.020	8.924	0.7786	0.9930
	0.030	15.760	0.7223	0.9989
	0.040	29.990	0.6791	0.9979
2 000 万	0.005	2.564	0.9074	0.9527
	0.010	4.256	0.8578	0.9977
	0.020	10.620	0.7732	0.9978
	0.030	17.500	0.7230	0.9980
	0.040	27.700	0.6842	0.9968

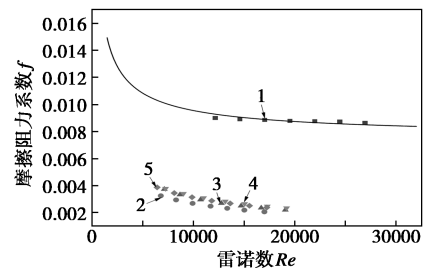
2.3 HPAM 溶液的减阻性能

2.3.1 不同分子量 HPAM 溶液对减阻率的影响

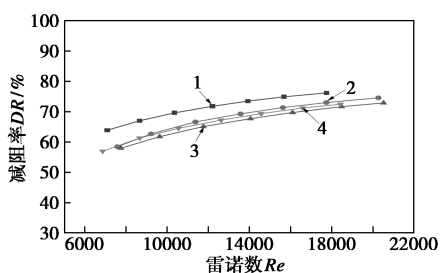
同一质量分数(0.03%)下,在 0.46 cm 非光滑管路中不同分子量的 HPAM 溶液对减阻率的影响如图 3 所示。由图 3(a)、图 3(b)可知,随着聚合物分子量升高压降增大,且加入聚合物后摩擦阻力系数显著降低。由图 3(c)可知随着分子量的增加 HPAM 溶液的减阻率降低,当分子量为 2 000 万时又有所升高,不同分子量溶液的最大减阻率在 72%~77%之间。根据湍流抑制假说^[21],聚合物高分子链在流动过程中的伸展和蜷缩能有效地抑制湍流漩涡的产生,从而有效地降低流动阻力。分子量越大,聚合物的分子链越长,分子链之间越容易发生缠结,不利于分子链频繁的伸展和蜷缩,造成减阻率



1—清水; 2—500 万; 3—1 000 万; 4—1 500 万; 5—2 000 万
(a) 不同分子量 HPAM 溶液压差流量图



1—清水; 2—500 万; 3—1 000 万; 4—1 500 万; 5—2 000 万
(b) 不同分子量 HPAM 溶液摩擦阻力系数曲线



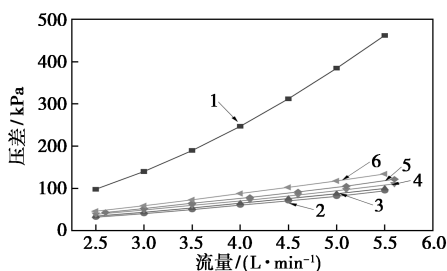
1—500 万;2—1 000 万;3—1 500 万;4—2 000 万
(c) 不同分子量 HPAM 溶液减阻率变化曲线

图 3 不同分子量 HPAM 溶液对减阻率的影响

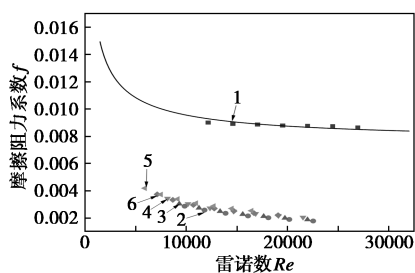
降低。当分子量进一步增加,高分子链之间进一步缠结使得聚合物团聚,拥有更大的水动力体积^[22],降低了溶液的流动阻力,使 HPAM 溶液减阻率提高。

2.3.2 不同质量分数 HPAM 溶液对减阻率的影响

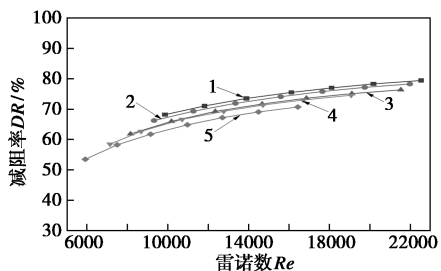
在 0.46 cm 非光滑管路实验中,相同分子量(1 000 万)、不同质量分数 HPAM 溶液(0.005%、0.01%、0.02%、0.03%、0.04%)对减阻率的影响如图 4 所示。由图 4(a)、图 4(b)可知,随聚合物质量



1—清水;2—0.005%;3—0.01%;4—0.02%;5—0.03%;6—0.04%
(a) 不同质量分数 HPAM 溶液压差流量图



1—清水;2—0.005%;3—0.01%;4—0.02%;5—0.03%;6—0.04%
(b) 不同质量分数 HPAM 溶液摩擦阻力系数曲线



1—0.005%;2—0.01%;3—0.02%;4—0.03%;5—0.04%
(c) 不同质量分数 HPAM 溶液减阻率变化曲线

图 4 不同质量分数 HPAM 溶液对减阻率的影响

分数的升高压降增大,且聚合物加入后流体流动的摩擦阻力系数显著降低。由图 4(c)可知,在实验质量分数范围内,随着质量分数的增加减阻率降低,不同质量分数最大减阻率在 70%~80%之间,减阻效果良好。虽然聚合物的存在可以有效地抑制湍流漩涡的形成,但是由于聚合物质量分数升高会导致溶液的黏度增大,黏度增大到一定程度后对流体流动的影响将会占据主导作用,使得流体的流动性变差增加流动阻力^[23],导致聚合物质量分数升高而减阻率降低。

2.4 HPAM 溶液摩擦阻力修正方程的建立

2.4.1 摩擦阻力系数修正方程的提出

Karami 等^[24]提出了原油管道减阻预测模型:

$$f^{-0.5} = (4/n^{0.75} + \xi) \lg(Re f^{1-n/2}) - 0.4/n^{1.2} - 2.1\xi \quad (7)$$

其中: ξ 为关于浓度、温度和管径粗糙度的参数。

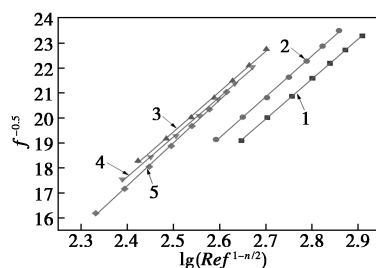
高航等^[25-26]在此基础上,提出了聚合物在光滑管道中的流动的摩擦阻力修正系数方程的形式:

$$f^{-0.5} = (4/n^{0.75} + \xi_1) \lg(Re f^{1-n/2}) - 0.4/n^{1.2} - \xi_2 \quad (8)$$

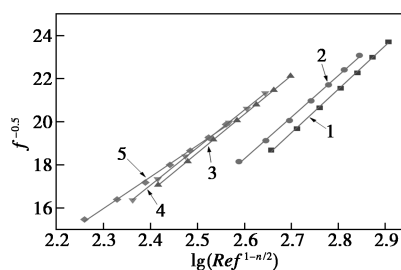
但是并未验证其在 0.46 cm 非光滑管路中的适用性。

2.4.2 不同因素对 HPAM 溶液对方程系数的影响

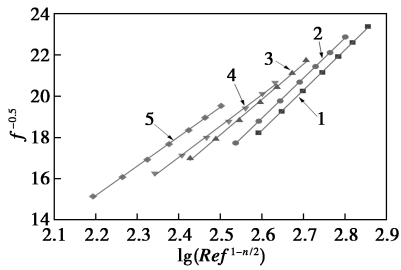
分析了 HPAM 聚合物质量分数与分子量对方程修正系数的影响,根据公式(8)做 $f^{-0.5}$ 与 $\lg(Re f^{1-n/2})$ 的线性拟合,结果如图 5 所示,二者符合线性关系,相关拟合参数如表 2 所示。



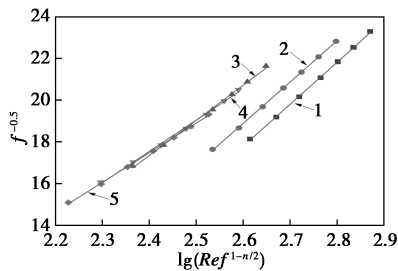
1—0.005%;2—0.01%;3—0.02%;4—0.03%;5—0.04%
(a) 500 万分子量



1—0.005%;2—0.01%;3—0.02%;4—0.03%;5—0.04%
(b) 1 000 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(c) 1 500 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(d) 2 000 万分子量

图 5 不同质量分数 HPAM 溶液的 $f^{-0.5}$ 与 $\lg(Re^{1-n/2})$ 的关系曲线

表 2 不同质量分数 HPAM 溶液的 $f^{-0.5}$ 与 $\lg(Re^{1-n/2})$ 的线性函数拟合参数

黏均分子量	质量分数/%	ξ_1	ξ_2	R^2
500 万	0.005	11.85	22.77	0.9999
	0.010	12.18	22.97	0.9989
	0.020	11.66	20.41	0.9987
	0.030	11.36	20.21	0.9987
	0.040	12.31	23.36	0.9990
1 000 万	0.005	16.03	34.65	0.9990
	0.010	14.96	31.47	0.9984
	0.020	13.05	25.73	0.9999
	0.030	12.48	24.26	0.9998
	0.040	9.43	17.10	0.9980
1 500 万	0.005	15.11	31.95	0.9995
	0.010	14.97	31.15	0.9998
	0.020	12.28	24.09	0.9980
	0.030	10.06	18.78	0.9970
	0.040	8.93	15.60	0.9993
2 000 万	0.005	15.84	34.12	0.9996
	0.010	15.34	32.19	0.9997
	0.020	11.98	22.50	0.9977
	0.030	9.90	17.88	0.9973
	0.040	8.90	16.01	0.9990

由表 2 中的数据可以看到修正系数 ξ_1 和 ξ_2 存在相同的变化趋势,将 ξ_1 和 ξ_2 合并分析,对 ξ_1 和 ξ_2 按照线性函数拟合,结果如图 6 所示,获得 $\xi_2 =$

$2.67\xi_1 - 8.97$,线性相关系数 R^2 为 0.992 6,拟合结果良好。

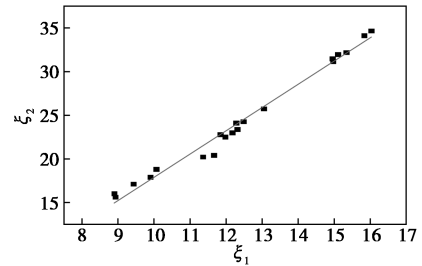


图 6 ξ_1 和 ξ_2 拟合结果

因为 $\xi_2 = 2.67\xi_1 - 8.97$,则方程可以进一步简化得到非光滑管路中聚合物溶液的摩擦阻力系数方程为:

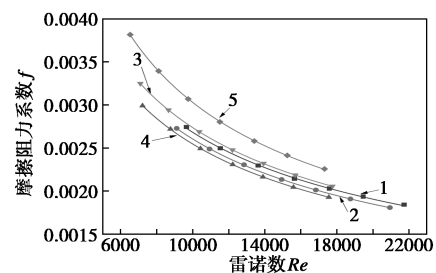
$$f^{-0.5} = (4/n^{0.75} + \xi) \lg(Re^{1-n/2}) - 0.4/n^{1.2} - 2.67\xi + 8.97 \quad (9)$$

式中: f 为摩擦阻力系数; n 为流型指数; Re 为广义雷诺数; ξ 为修正参数,与聚合物分子量、聚合物溶液质量分数、管壁绝对粗糙度等参数相关。

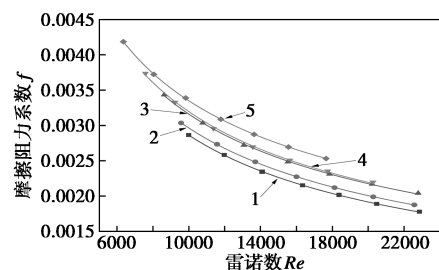
2.5 HPAM 溶液摩擦阻力系数与广义雷诺数关系研究

观察到 HPAM 溶液的摩擦阻力系数存在显著的幂律关系,采用幂律函数形式[式(10)]对摩擦阻力系数与雷诺数关系曲线进行拟合,拟合结果如图 7 所示,拟合参数见表 3。拟合结果良好,相关系数 R^2 均在 0.99 以上。

$$f = aRe^b \quad (10)$$



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(a) 500 万分子量



1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(b) 1 000 万分子量

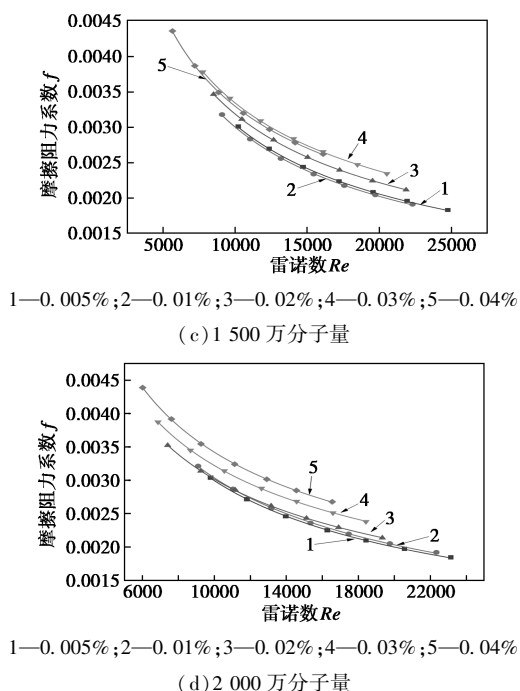


图 7 不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液摩擦阻力系数 f 与广义雷诺数 Re 关系

表 3 不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液 f 与 Re 拟合参数

黏均分子量	质量分数/%	a	b	R^2
500 万	0.005	0.2494	-0.4920	0.9992
	0.010	0.2458	-0.4936	0.9999
	0.020	0.2392	-0.4931	1.0000
	0.030	0.2694	-0.4982	1.0000
	0.040	0.4371	-0.5397	1.0000
1000 万	0.005	0.5905	-0.5786	0.9999
	0.010	0.5274	-0.5625	1.0000
	0.020	0.4502	-0.5384	0.9994
	0.030	0.4709	-0.5421	0.9987
	0.040	0.3111	-0.4920	0.9999
1500 万	0.005	0.5415	-0.5627	0.9998
	0.010	0.5684	-0.5693	0.9996
	0.020	0.3958	-0.5235	1.0000
	0.030	0.3061	-0.4904	0.9999
	0.040	0.2967	-0.4886	0.9999
2000 万	0.005	0.6366	-0.5819	0.9998
	0.010	0.6202	-0.5775	0.9996
	0.020	0.3611	-0.5196	1.0000
	0.030	0.2947	-0.4903	0.9999
	0.040	0.3108	-0.4896	0.9999

观察参数 a, b , 存在一定的线性关系, 进一步尝试对两个拟合参数进行线性拟合, 拟合结果如图 8 所示, 可得 $b = -0.42a - 0.26$, 相关系数 $R^2 = 0.9815$ 。上述方程可以进一步改写为:

$$f = aRe^{-0.42a-0.26} \quad (11)$$

其中: a 与聚合物分子量、聚合物质量分数等因数有关。

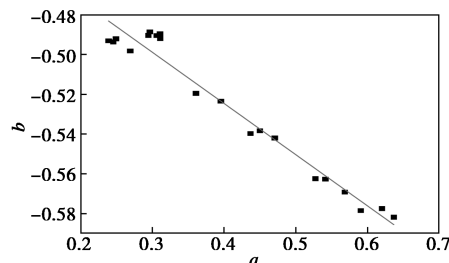
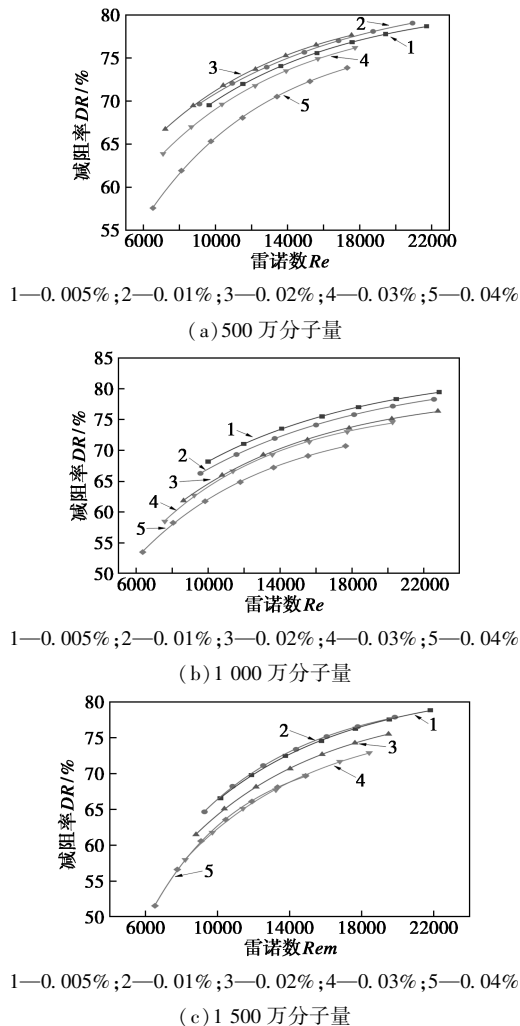


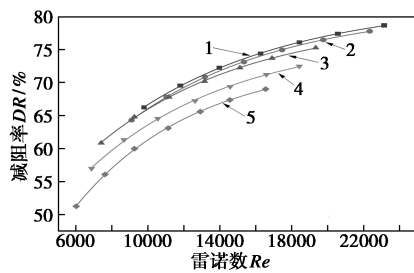
图 8 拟合参数 a, b 关系曲线

2.6 HPAM 溶液减阻率与广义雷诺数的关系

采用式 (11) 描述不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液的减阻率 DR 与广义雷诺数 Re 的关系曲线, 拟合结果如图 9 所示, 拟合参数见表 4。由图 9 和表 4 可知, 拟合结果良好, 相关系数 R^2 均在 0.99 以上, 说明该经验关系可以用于减阻率 DR 的计算, 有利于方便 HPAM 滑溜水压裂液体系的工程应用。

$$DR = A + B^{-Re/C} \quad (12)$$





1—0.005%; 2—0.01%; 3—0.02%; 4—0.03%; 5—0.04%
(d) 2 000 万分子量

图 9 不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液减阻率 DR 与广义雷诺数 Re 关系图

表 4 不同分子量、不同质量分数 HPAM 溶液 DR 与 Re 拟合参数

黏均分子量	质量分数/%	A	B	C	R^2
500 万	0.005	0.8339	-0.4315	9585.02	0.9999
	0.010	0.8260	-0.4352	9760.50	1.0000
	0.020	0.7951	-0.4966	8328.85	0.9996
	0.030	0.7759	-0.5556	7069.23	0.9991
	0.040	0.7538	-0.5152	7387.77	0.9996
1000 万	0.005	0.8152	-0.3749	8450.78	0.9998
	0.010	0.8285	-0.3426	9515.14	0.9998
	0.020	0.8162	-0.3725	7839.98	0.9998
	0.030	0.8027	-0.4096	7717.37	0.9998
	0.040	0.7810	-0.5269	6899.93	0.9998
1500 万	0.005	0.8236	-0.4455	9816.05	0.9997
	0.010	0.8132	-0.4848	8481.33	0.9997
	0.020	0.7999	-0.4549	9432.22	0.9999
	0.030	0.7782	-0.4584	9228.90	0.9996
	0.040	0.7378	-0.5467	6264.12	0.9996
2000 万	0.005	0.8232	-0.4698	9111.39	0.9998
	0.010	0.8134	-0.4958	8508.76	0.9999
	0.020	0.7965	-0.4580	8279.72	0.9996
	0.030	0.7713	-0.4730	8004.71	0.9993
	0.040	0.7352	-0.5489	6655.62	0.9997

3 结论

本文通过研究不同质量分数、不同分子量的 HPAM 溶液在 0.46 cm 管径的粗糙无缝钢管中的减阻性能及其流变性能与摩擦阻力系数关系,可以获得以下结论:

(1) 不同质量分数、不同分子量的 HPAM 溶液流动曲线可以用幂律模型表征。

(2) 聚合物溶液的减阻性能受质量分数和分子量的影响。在本实验质量分数范围内,相同质量分数下,随着分子量升高减阻率先降低后升高,最大减阻率为 76.19%;相同分子量下,随着聚合物质量分数增大减阻率降低,最大减阻率为 79.43%。

(3) 建立了非光滑管路中 HPAM 溶液的摩擦阻力系数新方程[式(9)]。

(4) 建立了非光滑管路中 HPAM 溶液摩擦阻力系数 f 与广义雷诺数 Re 、减阻率 DR 与广义雷诺数 Re 的经验形式[式(11)、式(12)],便于聚合物滑溜水的工程应用,各参数与 HPAM 质量分数和分子量相关。

参考文献

- [1] 刘雨舟,张志坚,王磊,等.国内变黏滑溜水研究进展及在川渝非常规气藏的应用[J].石油与天然气化工,2022,51(3):76-81,90.
- [2] Palisch T T, Vincent M C, Handren P J. Slickwater fracturing: Food for thought[C]. OnePetro, 2008.
- [3] 丁飞,戴彩丽,孙永鹏,等.耐温型聚丙烯酰胺减阻剂研究与应用现状[J].石油化工,2022,51(12):1502-1507.
- [4] Chen H, Liu H, Zhang S, et al. Smart thermoviscosifying polymer for improving drag reduction in slick-water hydrofracking[J]. Fuel, 2020, 278: 118408.
- [5] 孟磊,王力力,刘晓瑞,等.疏水缔合聚丙烯酰胺作为滑溜水压裂液减阻剂的应用性能研究[J].应用化工,2019,48(4):789-793,800.
- [6] Sun Y, Wu Q, Wei M, et al. Experimental study of friction reducer flows in microfracture[J]. Fuel, 2014, 131: 28-35.
- [7] 薛俊杰,郭东红,管保山,等.减阻剂在页岩气压裂中的应用[J].精细与专用化学品,2021,29(5):14-22.
- [8] Al-Yaari M, Soleimani A, Abu-Sharkh B, et al. Effect of drag reducing polymers on oil-water flow in a horizontal pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 516-524.
- [9] Jung J C, Zhang K, Chon B H, et al. Rheology and polymer flooding characteristics of partially hydrolyzed polyacrylamide for enhanced heavy oil recovery[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(6): 4833-4839.
- [10] Zhang M, Zhang L, Jiang B, et al. Rheological properties of salt-tolerant HPAM solutions with ultrahigh molecular weight[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 93-97.
- [11] Toms B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers[J]. Proceedings of the 1st International Congress on Rheology, 1949, 2: 135-141.
- [12] De Gennes P G. Towards a scaling theory of drag reduction[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1986, 140(1-2): 9-25.
- [13] Virk P S. Drag reduction fundamentals[J]. AIChE Journal, 1975, 21(4): 625-656.

(下转第 186 页)

浓度、氧化温度、时间及固液比等因素对页岩氧化溶蚀的影响,结论如下:

(1)3 种氧化剂中 NaClO 对页岩的氧化效果最佳。在 NaClO 浓度为 0.6 mol/L、氧化温度为 60℃、固液比为 1:15、氧化时间为 48 h 的最佳条件下,页岩的溶蚀率达到 12.15%。NaClO 主要与页岩中的白云石、黄铁矿等无机质发生氧化溶解反应,同时将页岩有机质中的噻吩、亚砷等氧化为砷,氧化改性后页岩孔径从 4.54 nm 增大至 14.21 nm。

(2)随着氧化温度的升高,页岩氧化改性反应速率增大。通过实验测定得到了 60℃ 时 NaClO 溶液氧化改性页岩的动力学方程: $J' = 0.003\ 142 \cdot \exp(-31\ 255.6/RT) \cdot C_{\text{NaClO}}^{1.63}$ 。其中,反应活化能 E_c 和指前因子 k_0 分别为 31 255.6 J/mol 和 0.003 142。

参考文献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
- [2] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12.
- [3] 梁兴,徐政语,张介辉,等.浅层页岩气高效勘探开发关键技术——以昭通国家级页岩气示范区太阳背斜区为例[J].石油学报,2020,41(9):1033-1048.
- [4] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, *et al.* Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnett shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [5] Zhang C P, Liu S, Ma Z Y, *et al.* Combined micro-proppant and supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) fracturing in shale gas reservoirs: A review[J]. Fuel, 2021, 305: 121431.
- [6] Alcalde J, Flude S, Wilkinson M, *et al.* Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2201.
- [7] 游利军,杨鹏飞,崔佳,等.页岩气层氧化改造的可行性[J].油气地质与采收率,2017,24(6):79-85.
- [8] You L J, Kang Y, Chen Q, *et al.* Prospect of shale gas recovery enhancement by oxidation-induced rock burst[J]. Natural Gas Industry B, 2017, 4(6): 449-456.
- [9] 杨鹏飞.富有机质页岩与氧化液作用实验研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [10] Zhou Y, Lei Y F, Chen W, *et al.* Enhance low temperature oxidization of shale gas recovery using hydrogen peroxide[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 523-530.
- [11] Chen Q, You L, Kang Y, *et al.* Gypsum-crystallization-induced fracturing during shale-fluid reactions and application for shale stimulation[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(10): 10367-10381.
- [12] Meriem F G, Khemaies B, Ismail K, *et al.* Thermochemistry and kinetics of silica dissolution in NaOH solutions: Effect of the alkali concentration[J]. Thermochimica Acta, 2014, 594: 58-67.
- [13] Kang Y L, She J P, Zhang H, *et al.* Alkali erosion of shale by high-pH fluid: Reaction kinetic behaviors and engineering responses[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 201-210.
- [14] 卢龙,王汝成,薛纪越,等.黄铁矿氧化速率的实验研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2005,35(5):434-440.
- [15] 中国石油和化工标准与质量.GB 19106—2013 次氯酸钠[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [16] Cheng Q Y, You L J, Kang Y L, *et al.* Oxidative dissolution kinetics of organic-rich shale by hydrogen peroxide (H₂O₂) and its positive effects on improving fracture conductivity[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 89: 103875.
- [17] 冯艳琳.HCl/HF 体系与砂岩矿物的反应动力学研究[D].成都:西南石油大学,2015.
- [18] 杨森.宜昌地区产气页岩氧化溶蚀增渗机理研究[D].武汉:中国地质大学,2021. ■
- [19] 方波,邹春昱,何良好,等.阳离子 Gemini 表面活性剂 18-3-18/水杨酸钠胶束体系流变和减阻性能研究[J].高校化学工程学报,2013,27(1):18-23.
- [20] 杨钊.滑溜水压裂液减阻特性及模型研究[D].北京:中国石油大学,2017.
- [21] 蔡伟华.聚丙烯酰胺水溶液减阻特性实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [22] Edomwonyi-Otu L C, Angeli P. Separated oil-water flows with drag reducing polymers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 467-478.
- [23] 朱蒙生.管流添加剂减阻的实验与机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [24] Karami H R, Mowla D. A general model for predicting drag reduction in crude oil pipelines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 111: 78-86.
- [25] 高航,方波,许可,等.HPAM 溶液流变性与减阻关系[J].钻井液与完井液,2022,39(1):100-106.
- [26] 高航.压裂聚合物溶液流变性与减阻和携砂性能关系研究[D].上海:华东理工大学,2022. ■

(上接第 179 页)