

文章编号:1673-5005(2006)04-0126-06

PR 导热系数普遍化模型及其精度预测分析

陈 爽, 郭绪强

(中国石油大学 化学化工学院, 山东 东营 257061)

摘要:在原 PR 导热系数模型基础上,改进建立了一个 PR 导热系数普遍化模型,在温度 80~1 400 K 和压力 0.1~350 MPa 内对油气藏流体中常见的 22 个纯组分的气、液相导热系数总共 3 263 个数据点进行了拟合,总平均相对误差为 7.34%。对 13 个二元和三元混合物总共 260 个数据点预测的总平均相对误差为 7.94%;对 3 个石油馏分总共 22 个数据点导热系数预测的总平均相对误差为 9.68%。对极性纯物质的总共 810 个数据点预测的总平均相对误差为 6.86%;对极性二元混合物的共 439 个数据点预测的总平均相对误差为 6.03%。该模型的计算精度明显优于石油工程中常用的导热系数模型。

关键词:导热系数;普遍化模型;预测

中图分类号:O 362 **文献标识码:**A

General model of PR thermal conductivity and its analysis of precision prediction

CHEN Shuang, GUO Xu-qiang

(College of Chemistry and Chemical Engineering in China University of Petroleum,
Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: A general model of thermal conductivity based on PR EOS was developed. It is applicable to both gas phase and liquid phase in a wide temperature range from 80 to 1 400 K and pressure range from 0.1 to 350 MPa. The calculation results of 3 263 data points for pure hydrocarbons, carbon dioxide and nitrogen indicate a overall average relative error of 7.34%. The overall average relative error of calculated thermal conductivity data for 12 binary mixtures and a ternary mixtures of 260 data points is 7.94%. The overall average relative error of thermal conductivity for three-petroleum cut is 9.68%. The overall average relative error for polar pure substance of 810 data points is 6.86%. The overall average relative error for polar binary mixture of 439 data points is 6.03%. Compared with the existing typical thermal conductivity correlations, significant improvement is showed in precision.

Key words: thermal conductivity; general model; prediction

导热系数是流体的重要物理性质之一,在热采和火烧油层等三次采油过程中,石油的导热系数直接影响到开发方案的确定、实施以及最终采收率。基于 PR 状态方程的导热系数模型^[1]适用于高压、低压非极性流体气、液相,计算结果和油气工业中常用的 API^[2]导热系数关联式及对应状态关联式^[8]相比较,计算精度明显改进。但是 PR 导热系数模型中所包含的 6 个常数还未能建立普遍化关联式,需对各个组分取特定数值,即该模型还不具备预测计算功能,只是表明了方法的可行性。笔者基于 PR 状态方程的导热系数模型,建立普遍化导热系数模

型,同时使模型推广到非极性组分气、液相导热系数的预测。

1 导热系数研究现状

对于流体的导热系数,前人曾进行了许多实验和理论研究。导热系数的计算可分为理论法和经验关联法。

1.1 API 推荐的关联式

对压力低于 3.5 MPa 且 $0.25 < T_r < 0.8$ 的纯烃液体,有

收稿日期:2006-01-15

作者简介:陈爽(1973-),女(汉族),山东东营人,讲师,硕士,从事化学工程方面的教学及科研工作。

$$\lambda = \frac{CM^n}{V} \left[\frac{3 + 20(1 - T_r)^{2/3}}{3 + 20(1 - \frac{528}{T_c})^{2/3}} \right] \quad (1)$$

式中, M 为摩尔质量, g/mol ; V 为体积, m^3 ; $T_r = \frac{T}{T_c}$ 为相对温度; T_c 为临界温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C 和 n 为系数。

对正常沸点以上任一压力下的纯烃液体,有

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\alpha \exp(\beta p_r)}{K}, & p < 10 \text{ MPa}; \\ \lambda = \frac{1.654 \times 10^{-4} p_r^{1.6}}{K} + \alpha \exp(\beta p_r), & p > 10 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{7.137 \times 10^{-3}}{\beta^{3.322}}, \\ \beta &= 0.40 + \frac{0.986}{\exp(0.58K)}, \\ K &= \frac{T_c^{1/6} M^{1/2}}{p_c^{2/3}}. \end{aligned}$$

对组成已知的液体混合物,有

$$\lambda_m = \sum_i \sum_j \varphi_i \varphi_j \lambda_{ij}, \quad (3)$$

其中

$$\lambda_{ij} = 2 \left(\frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_j} \right)^{-1}, \quad \varphi_i = \frac{x_i V_i}{\sum_j x_j V_j}.$$

式中, λ_m 为混合物的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_i 和 λ_j 分别为纯组分 i 和 j 的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; φ_i 和 φ_j 为纯组分 i 和 j 的体积分数; p 为压力, Pa ; p_c 为临界压力, Pa ; $p_r = \frac{p}{p_c}$ 为相对压力。

对纯烃气体,有

$$\begin{cases} \lambda = A + BT + CT^2, & p < 0.35 \text{ MPa}, \\ \frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{C'_v(\frac{\lambda}{\lambda^*})'}{C_v(\frac{\lambda}{\lambda^*})'} + \frac{C''_v(\frac{\lambda}{\lambda^*})''}{C_v(\frac{\lambda}{\lambda^*})''}, & p > 0.35 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (4)$$

式中, A, B, C 为各组分的系数; λ^* 为给定温度、常压下的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; C_v 为实际气体的比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C'_v 为实际气体的平动比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C''_v 为实际气体的内部比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $(\lambda/\lambda^*)'$ 为导热系数比的平动部分; $(\lambda/\lambda^*)''$ 为导热系数比的内部贡献参数。

1.2 基于对应状态理论的导热系数模型

基于对应状态理论的导热系数模型^[8]将导热系数分为两项,分别为平动能的传递 λ_{tr} 和内能的传递 λ_{int} , 即

$$\lambda = \lambda_{tr} + \lambda_{int}. \quad (5)$$

对于组分 i , 有

$$\begin{aligned} \lambda_{tri} &= \left[\frac{T_{ci}}{T_{\infty}} \right]^{(-1/6)} \left[\frac{p_{ci}}{p_{\infty}} \right]^{(2/3)} \left[\frac{M_i}{M_o} \right]^{(-1/2)} \times \\ &\frac{\alpha_i}{\alpha_o} [\lambda_o(T_o, p_o) - \lambda_{into}] + \lambda_{inti}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$T_o = T \left(\frac{T_{ci} \alpha_i}{T_{\infty} \alpha_o} \right)^{-1}, \quad p_o = p \left(\frac{p_{ci} \alpha_i}{p_{\infty} \alpha_o} \right)^{-1}.$$

下标“o”表示参考流体,多数情况下采用甲烷; λ_{into} 和 λ_{inti} 由下式给出:

$$\lambda_{int} = 1.1865 \mu (C_p - 2.5R) f(\rho) / M,$$

$$f(\rho) = 1.005343 \rho_r - 0.030182 \rho_r^2 - 0.029725 \rho_r^3.$$

式中, μ 为 1 个大气压下组分 i 或参考流体的粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; C_p 为 1 个大气压下组分 i 或参考流体的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_r 为组分 i 或参考流体的相对密度。

校正因子 α_i 为

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 1 + \left(\frac{\rho_{ri}}{2.6605} \right)^{2.4049} (\alpha_{TG_i} - 1), \\ \alpha_{TG_i} &= 1 + 0.0006004 \rho_{ri}^{2.043} M_i^{1.086}. \end{aligned}$$

对于混合物,有

$$\alpha_{TG} = \sum_i \sum_j x_i x_j (\alpha_{TG_i} \alpha_{TG_j}).$$

Pedersen 和 Frederslund^[8]提出的甲烷导热系数的计算式如下:

$$\lambda(\rho, T) = \lambda_o(T) + \lambda_1(T) \rho + F_1 \Delta \lambda'(\rho, T) + F_2 \Delta \lambda''(\rho, T) + \Delta \lambda_c(\rho, T), \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta \lambda'(\rho, T) &= \exp(j_1 + j_4/T) \times \\ &\left[\exp(j_2 + \frac{j_3}{T^{3/2}}) + \theta \rho^{0.5} (j_5 + \frac{j_6}{T} + \frac{j_7}{T^2}) - 1.0 \right], \\ \Delta \lambda''(\rho, T) &= \exp(l_1 + l_4/T) \times \\ &\left\{ \exp \left[\rho^{0.1} (l_2 + \frac{l_3}{T^{3/2}} + \theta \rho^{0.5} (l_5 + \frac{l_6}{T} + \frac{l_7}{T^2})) \right] - 1.0 \right\}. \end{aligned}$$

其中

$$F_1 = \frac{1 + HTAN}{2},$$

$$F_2 = \frac{1 - HTAN}{2},$$

$$HTAN = \frac{\exp(\Delta T) - \exp(-\Delta T)}{\exp(\Delta T) + \exp(-\Delta T)},$$

$$\Delta T = T - T_F,$$

$$\theta = (\rho_o - \rho_c) / \rho_c.$$

式中, T_F 为甲烷的冰点, K ; ρ_c 为组分 i 的临界密度, kg/m^3 。

1.3 基于 PR 状态方程的导热系数模型

基于 PR 状态方程的导热系数模型^[1]如下:

$$T = \frac{rp}{\lambda - b'} - \frac{a}{\lambda(\lambda + b) + b(\lambda - b)}. \quad (8)$$

其中,参数 a , b 和 b' 在临界点处的表达式为

$$a = 0.45724 \frac{r_c^2 p_c^2}{T_c}, \quad b = 0.07780 \frac{r_c p_c}{T_c}, \quad b' = b;$$

在其他温度和压力下,有

$$\begin{aligned} r &= r_c \tau(p_r), \quad r_c = \frac{\lambda_c T_c}{p_c Z_c}, \\ \lambda_c &= T_c^{-1/6} M^{-0.5} p_c^{2/3} / 21, \quad b' = b \varphi(T_r, p_r), \\ \tau(p_r) &= [1 - Q_1(1 - p_r^{0.5})]^{-2}, \\ \varphi(T_r, p_r) &= Q_2[(T_r, p_r)^{0.5} - 1]^2 + \\ &\exp[Q_3(p_r^{0.125} - 1)^2] + \\ &\exp[Q_4(T_r^{0.5} - 1) + Q_6(p_r^{0.125} - 1)^2] - \\ &Q_5 \exp\left[\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c}\right)(T_r^{0.5} - 1)(p_r^3 - 1)\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $Q_1 \sim Q_6$ 是各物质的特定化系数。

将式(8)展开成 λ 的多项式后,可用解析法求解 λ 根。 λ 值的选取遵循如下规则:

(1) 在汽、液两相区,饱和气相和液相的导热系数分别取为大于 b' 的最小和最大实根;

(2) 在压缩液相区和超临界区,导热系数取最大实根;

(3) 当压力低于流体所处温度下的饱和蒸汽压时,气相的导热系数取大于 b' 的最小实根。

1.4 导热系数模型的分析

(1) API 导热系数关联式对不同压力和温度范围内的气相和液相导热系数须分别计算,对于液体须分段计算,因而造成计算上的不便,同时还会导致近临界区的不连续,且要求输入比定容热容等参数,在某些情况下不易得到,适用面窄,难以满足油气工程计算的需要。

(2) Pedersen 等对应状态导热系数模型用甲烷作为参考物质,需要输入密度、粘度和比定压热容等参数,这些量需要通过其他的关联式计算,必然会造成误差的累积,且在某些情况下这些数据不易得到,限制了模型的应用。

(3) 基于 PR 状态方程的导热系数模型将状态方程首次扩展应用于流体(包括油气藏流体)导热系数的计算,计算精度显著优于石油工程中现有的导热系数模型,但对导热系数模型中包含的 6 个常

数($Q_1 \sim Q_6$)未能建立普遍化关联式,须对各个组分取特定数值,使该模型的推广应用受到一定限制。

2 PR 导热系数普遍化模型的建立

将基于 PR 状态方程的导热系数模型^[1]及纯物质和混合物的导热系数数据进行回归,得到式(9)和(10)中普遍化系数 Q_i 值分别为: $Q_1 = 0.1270$; $Q_2 = 0.1879$; $Q_3 = -90.2319$; $Q_4 = -4.7582$; $Q_5 = -23.2853$; $Q_6 = 9.8081$ 。以此建立了导热系数普遍化模型。

2.1 纯物质汽、液相导热系数的预测

用式(8)~(10)及所列普遍化系数 Q_i 值,在较宽的温度和压力范围内,对 20 种烷烃、二氧化碳和氮的气、液相导热系数进行了计算。表 1 列出了 PR 导热系数普遍化模型与原 PR 导热系数模型、常用 API 关联式及 Pedersen 等对应状态模型对纯组分气、液相导热系数计算结果的比较。结果表明,3 263 个数据点的总平均相对误差为 7.34%。PR 普遍化模型的计算精度明显优于其他模型。

2.2 混合物导热系数的预测

2.2.1 混合规则

将式(8)应用于混合物时,PR 导热系数普遍化模型可表达为

$$T = \frac{r_m p}{\lambda_m - b'_m} - \frac{a_m}{\lambda_m(\lambda_m + b_m) + b_m(\lambda_m - b_m)}. \quad (11)$$

混合物参数 a_m , b_m , b'_m 和 r_m 采用以下的混合规则:

$$\begin{aligned} a_m &= \sum_i x_i a_i, \quad b_m = \sum_i x_i b_i, \quad b'_m = b_m \varphi_m, \\ \varphi_m &= \sum_i \sum_j x_i x_j \sqrt{\varphi_i \varphi_j}, \quad r_m = \sum_i x_i r_c \tau_i. \end{aligned}$$

类似纯组分计算,在对式(11)求解 λ_m 根时,以 b'_m 作为求根的判据。

2.2.2 二元混合物导热系数的预测

应用式(11)和混合规则,对 13 种二元和三元混合物的导热系数进行了预测计算,并与 PR 模型及对应状态模型进行了对比,结果列于表 2。由表 2 可见,PR 导热系数普遍化模型对 260 个数据点的导热系数,总平均相对误差为 7.94%,明显提高了预测精度。

表 1 用 PR 导热系数普遍化模型对纯组分导热系数的计算结果

物质	温度 T/K	压力 p/MPa	相态	数据点数 n	平均相对误差 $e_r/\%$				数据来源
					PR 普遍化模型	PR 模型	API 关联式	对应状态模型	
甲烷	277 ~ 478	0.1 ~ 34.5	气	98	2.72	4.97	8.21	3.45	文献[4,5]
乙烷	277 ~ 445	0.1 ~ 34.5	气	70	1.91	7.35	20.89	13.88	文献[6]
丙烷	323 ~ 413	0.1 ~ 30.0	气、液	78	3.28	7.98	15.11	11.20	文献[7]
正丁烷	277 ~ 478	0.1 ~ 34.5	气、液	104	4.49	7.98	16.30	14.58	文献[8]
正戊烷	298 ~ 473	0.1 ~ 220.5	气、液	79	3.33	4.77	12.28	9.56	文献[9]
己烷	273 ~ 633	0.1 ~ 50.0	气、液	162	6.20	9.08	11.64	13.56	文献[7]
庚烷	273 ~ 633	0.1 ~ 50.0	气、液	162	6.72	9.66	11.29	12.00	文献[7]
辛烷	273 ~ 633	0.1 ~ 49.0	气、液	162	7.08	10.57	13.78	9.53	文献[7]
壬烷	233 ~ 573	0.1 ~ 34.0	液	63	10.01	1.36	10.56	14.18	文献[9]
癸烷	277 ~ 478	0.1 ~ 350.0	气、液	97	7.29	8.02	14.06	13.94	文献[7]
十一烷	253 ~ 453	0.1 ~ 196.0	液	20	10.17	1.73	11.79	14.77	文献[9]
十二烷	273 ~ 453	0.1 ~ 49.0	液	62	10.28	6.78	7.73	23.54	文献[9]
十三烷	273 ~ 677	0.1 ~ 49.0	液	86	10.36	4.73	8.76	15.99	文献[9]
十四烷	293 ~ 463	0.1 ~ 49.0	液	41	10.39	5.29	8.33	19.57	文献[9]
十五烷	303 ~ 463	0.1 ~ 49.0	液	30	6.96	4.88	15.24	22.53	文献[9]
十六烷	303 ~ 463	0.1 ~ 49.0	液	30	7.08	5.80	19.67	28.86	文献[9]
十七烷	308 ~ 458	0.1 ~ 49.0	液	48	6.32	3.18	30.23	36.66	文献[9]
十八烷	326 ~ 460	9.8 ~ 49.0	液	49	6.57	2.73	33.96	43.15	文献[9]
异丁烷	193 ~ 384	0.1 ~ 50.0	气、液	44	4.48	1.42	13.90	17.07	文献[7]
异辛烷	290 ~ 580	0.1 ~ 4.0	气、液	220	8.53	10.03	26.45	40.87	文献[7]
氮	80 ~ 1400	0.1 ~ 60.0	气、液	610	4.68	13.52	—	—	文献[9]
二氧化碳	220 ~ 140	0.1 ~ 60.0	气、液	948	4.54	21.38	—	—	文献[9]
合计				3263	7.34 ^①	12.53 ^②	15.50	18.45	

注:① 不包括氮和二氧化碳时,其平均相对误差为 7.61%;② 不包括氮和二氧化碳时,其平均相对误差为 8.19%。

表 2 用 PR 导热系数普遍化模型对混合物导热系数的计算结果

物系	温度 T/K	压力 p/MPa	组分 2 的 摩尔分数	数据 点数 n	平均相对误差 $e_r/\%$			数据来源
					PR 普遍化模型	PR 模型	对应状态模型	
甲烷(1) - 乙烷(2)	194 ~ 330	0.13 ~ 2.2	0.32 ~ 0.6	28	10.53	20.66	6.85	文献[10]
甲烷(1) - 丙烷(2)	366 ~ 377	0.1	0.00 ~ 1.00	26	0.94	14.80	12.67	文献[11]
甲烷(1) - 丁烷(2)	366 ~ 377	0.1	0.00 ~ 1.00	26	9.77	14.80	34.00	文献[12]
甲烷(1) - 二氧化碳(2)	371	17.84	0.245	1	4.79	16.86	4.09	文献[11]
二氧化碳(1) - 丙烷(2)	369	0.1	0.00 ~ 1.00	21	7.78	10.23	24.34	文献[13]
氮气(1) - 二氧化碳(2)	273 ~ 523	0.1	0.00 ~ 1.00	20	5.64	13.03	23.32	文献[11]
庚烷(1) - 异辛烷(2)	308 ~ 337	1.5 ~ 44.0	0.26 ~ 0.51	16	9.78	14.77	22.79	文献[14]
庚烷(1) - 异辛烷(2)	288 ~ 345	0.1	0.18 ~ 0.66	18	6.57	9.65	5.63	文献[15]
庚烷(1) - 十一烷(2)	290 ~ 344	0.1	0.13 ~ 0.57	18	8.83	9.75	13.47	文献[15]
正辛烷(1) - 异辛烷(2)	313	0.1	0.00 ~ 1.00	5	17.74	21.45	17.44	文献[16]
异辛烷(1) - 十四烷(2)	303 ~ 370	0.1	0.00 ~ 1.00	18	9.98	12.69	26.18	文献[16]
十一烷(1) - 十六烷(2)	295 ~ 343	0.1	0.19 ~ 0.67	18	2.22	1.84	21.24	文献[15]
庚烷(1) - 十一烷(2) - 十六烷(3)	294 ~ 344	0.1		18	8.72	6.54	8.22	文献[15]
合计				260	7.94	11.19	19.62	

2.2.3 石油馏分导热系数的计算

热系数用 PR 普遍化模型进行了计算,结果列于表按 Twu^[17] 的特征化方法,对 3 个石油馏分的导 3。

表 3 用 PR 导热系数模型对馏分油导热系数的预测

馏分号	相对分子质量	相对密度	压力 P/MPa	温度 T/K	数据点数 n	平均相对误差 $e_r/\%$
1	132	0.781	0.1	303 ~ 494	12	8.75
2	135	0.879	0.1	334 ~ 494	8	9.99
3	115	0.820	0.1	298.81	2	10.29

由表可看出 PR 导热系数普遍化模型可较好地预测石油馏分的导热系数。

3 用 PR 普遍化模型计算极性流体导热系数

在热采过程中,水及其他极性组分对于热量传递会有一定贡献,在某些情况下可能会起主要作用,所以将导热系数模型扩展应用于极性流体导热系数

表 4 用 PR 导热系数普遍化模型对极性纯组分导热系数的预测

物质	温度 T/K	压力 p/MPa	相态	数据 点数 n	平均相对误差 $e_r/\%$			数据来源
					PR 普遍化模型	API 关联式	对应状态模型	
水	273 ~ 1073	0.1 ~ 250	气、液	558	8.37	20.36	19.48	文献[18]
甲醇	290 ~ 448	0.1 ~ 245	气、液	175	6.08	17.44	16.00	文献[18]
乙醇	273 ~ 493	0.1 ~ 40	液	77	6.14	16.06	16.37	文献[19]
合计				810	6.86	17.95	17.28	

3.2 极性混合物导热系数的预测

应用 PR 导热系数普遍化模型,对两个极性二元混合物的导热系数进行了预测计算,结果列于表 5。水和甲醇、水和乙醇二元混合物共 439 个数据点

表 5 用 PR 导热系数普遍化模型对极性二元混合物导热系数的预测

物系	温度 T/K	压力 p/MPa	组分 2 的 摩尔分数	数据 点数 n	平均相对误差 $e_r/\%$			数据来源
					PR 普遍化模型	API 关联式	对应状态模型	
水(1)-乙醇(2)	273 ~ 493	0.5 ~ 3	0.089 ~ 0.86	269	5.82	27.42	21.57	文献[19]
水(1)-甲醇(2)	273 ~ 493	0.5 ~ 3	0.123 ~ 0.897	170	6.24	24.33	20.30	文献[19]
合计				439	6.03	25.87	20.93	

4 结 论

(1)建立了基于 PR 状态方程的导热系数普遍化模型,并将其推广到极性和非极性流体导热系数的预测。

(2)应用 PR 导热系数普遍化模型对纯烷烃、二氧化碳和氮从液相到饱和汽-液相流体导热系数的预测精度明显优于 PR 导热系数模型和石油工程中常用的 API 关联式及对应状态模型。

(3)应用 PR 导热系数普遍化模型对极性纯物质和极性二元混合物导热系数的预测精度令人满意。

参考文献:

[1] 郭绪强,常规及特殊油气藏流体高压下相行为和传递性质的研究[D].北京:石油大学化工学院,1998.
[2] API. Technical data book——petroleum refining[S]. 1980.
[3] PEDERSEN K S, FREDENSLUND Aa. An improved

的预测具有重要意义。

3.1 极性纯物质导热系数的预测

应用 PR 导热系数普遍化模型,分别对水、甲醇、乙醇的导热系数共 810 个数据点进行了计算,结果列于表 4。总平均相对误差为 6.86%,表明用 PR 导热系数模型对极性纯组分气、液相导热系数的预测结果令人满意。

的总平均相对误差为 6.03%,PR 导热系数普遍化模型对极性二元混合物导热系数的预测结果与 API 及 Pedersen 等对应状态关联式相比,预测精度明显提高。

corresponding states model for the prediction of oil and gas viscosities and thermal conductivities[J]. Chemical Engineering Science, 1987,42(1):182-186.
[4] CARMICHAEL L T, REAMER H H, SAGE B H. Thermal conductivity of fluids methane[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1966,11(1):52-57.
[5] JOHNSTON H L, GRILLY E R. The thermal conductivity of eight common gases between 80 and 380 K[J]. Journal of Chemicalphysics, 1946,14(4):233-238.
[6] CARMICHAEL L T, BERRY V, SAGE B H. Thermal conductivity of fluids ethane[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1963,8(3):281-285.
[7] VARGAFTIK N B. Tables on the thermophysical properties of liquids and gases[M]. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
[8] CARMICHAEL L T, SAGE B H. Thermal conductivity of fluids *n*-butane[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1964,9(4):511-515.
[9] JEMIESON D T. Thermal conductivity of gases and liquids[M]. Massachusetts: MIT Press, 1965.
[10] RODER H M, FRIEND D G. Conformal solution theo-

- ry for viscosity and thermal conductivity of mixtures[J]. International Journal of Thermophysics, 1985, 6(6): 607.
- [11] BRETSZNAJDER J M. Transport properties of fluids [M]. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
- [12] CARMICHAEL L T, SAGE B H. Thermal conductivity of liquids propane[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1968, 13(4): 489-493.
- [13] TOULOUKIAN Y S, LILEY P E. Thermal conductivity[M]. New York: Nonmetallic Liquid and Gases, IFI/Plenum, 1970.
- [14] FARELEIRA I M N A, LI S F Y, WAKEHAM W A. Prediction of transport and other physical properties[J]. International Journal of Thermophysics, 1989, 10(5): 1041.
- [15] WADA Y, NAGASKA Y, NAGASHIMA A. Measurements and correlation of the thermal conductivity of liquid *n*-paraffin hydrocarbons and their binary and ternary mixtures[J]. International Journal of Thermophysics, 1985, 6(3): 251-260.
- [16] JAMIESON D T, IRVING J B, TUDHOPE J S. Liquid thermal conductivity, a data survey to 1973[M]. Edinburgh: H M Stationary Office, 1975.
- [17] TWU C H. An internally consistent correlation for predicting the critical properties and molecular weight of petroleum and coal-tar liquids[J]. Fluid Phase Equilibria, 1984, 16: 137-150.
- [18] NATAN B V. Handbook of thermal conductivity of liquids and gases[M]. Moscow Aviation Institute, 1993.
- [19] POPOVA A M, SHABLOV V L. On solutions to some integral[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1978, 35: 145.

(编辑 刘为清)

(上接第 122 页)

- [7] 常文越, 林阳, 王英健. 淀粉—丙烯酸胺接枝共聚物的合成及其污水絮凝实验研究[J]. 环境保护科学, 2000, 99(26): 9-10.
- CHANG Wen-yue, LIN Yang, WANG Ying-jian. Study on the synthesis of starch-acrylamide copolymer and flocculation experiment on wastewater treatment[J]. Environmental Protection Science, 2000, 99(26): 9-10.
- [8] 李旭祥, 周心艳, 王世驹, 等. 改性淀粉絮凝剂处理印染废水[J]. 化工环保, 1994, 14(5): 313-314.

LI Xu-xiang, ZHOU Xin-yan, WANG Shi-ju, et al. Treatment of printing and dyeing wastewater with modified-starch flocculant [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 1994, 14(5): 313-314.

- [9] 杨通在, 刘亦农, 杨君. 阳离子改性高分子絮凝剂对轻工废水的处理[J]. 工业水处理, 1998, 18(3): 27-29.
- YANG Tong-zai, LIU Yi-nong, YANG Jun. Light industry wastewater treatment with modified cationic high molecular flocculant [J]. Industrial Water Treatment, 1998, 18(3): 27-29.

(编辑 刘为清)

(上接第 125 页)

(3)开发的脱水剂能脱除超稠油中大部分水溶性金属和部分油溶性金属,可降低原油的粘度和密度,加速油水的分离,同时会使超稠油中的轻质馏分有所增加,故对超稠油具有一定的改质作用。

参考文献:

- [1] 娄世松, 张鸿勋, 沙欧, 等. 渣油脱除金属杂质工艺研究[J]. 石油化工, 2002(5): 357-360.
- LOU Shi-song, ZHANG Hong-xun, SHA Ou, et al. Study of demetallization technique from resin[J]. Petrochemical Technology, 2002(5): 357-360.
- [2] 宁甲清, 孟伟, 李泽勤. 超稠油脱水工艺试验研究[J]. 特种油气藏, 2000, 7(1): 38-40.
- NING Jia-qing, MENG Yi, LI Ze-qin. The experiment

study on super heavy oil dewatering technique[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2000, 7(1): 38-40.

- [3] 宁甲清, 李泽勤, 孟伟. 超稠油脱水工艺技术的现场应用[J]. 油气田地面工程, 2000, 19(1): 23-25.
- NING Jia-qing, LI Ze-qin, MENG Yi. Applications of extra-heavy oil dewatering technique [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2000, 19(1): 23-25.
- [4] 武本成, 朱建华, 刘红研, 等. 辽河超稠油电化学脱水实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2004, 17(1): 46-51.
- WU Ben-cheng, ZHU Jian-hua, LIU Hong-yan, et al. The electric-chemical deauration technique development for the extra-heavy crude oil in Liaohe Oilfield[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2004, 17(1): 46-51.

(编辑 刘为清)