

文章编号: 0253-2409(2013)01-0046-07

沙特减压渣油临氮热反应过程中沥青质聚集体尺寸变化研究

张龙力¹, 刘动动², 赵愉生³, 杨国华¹, 杨朝合¹, 邢雪青⁴

(1. 中国石油大学(华东)重质油国家重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 日照中燃船舶燃料供应有限公司, 山东 日照 276826;
3. 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 100195; 4. 中国科学院高能物理研究所 同步辐射实验室, 北京 100049)

摘要: 将沙特轻质原油的减压渣油在 395 °C 临氮条件下进行热反应, 利用在线取样装置得到不同热反应时间的样品, 借助小角 X 射线散射(SAXS)技术, 测定了各液相残渣油中沥青质聚集体尺寸。结果表明, 热反应生焦诱导期的初期沥青质聚集体的尺寸逐渐减小, 为 29 ~ 21 nm; 在生焦诱导期后期, 其尺寸急剧增大, 在热反应进行到 150 min 时达到 43 nm; 达到生焦诱导期后, 沥青质聚集体尺寸变化较小, 在 46 ~ 42 nm 变化。在渣油热反应过程中沥青质聚集体的尺寸受沥青质热裂解、沥青质解缔和缔合等过程的共同影响, 与沥青质含量无明显关系。

关键词: 减压渣油; 热反应; 生焦率; 沥青质聚集体尺寸

中图分类号: TE62 **文献标识码:** A

Study on asphaltene aggregate size of ALVR thermal reaction samples under nitrogen atmosphere

ZHANG Long-li¹, LIU Dong-dong², ZHAO Yu-sheng³, YANG Guo-hua¹, YANG Chao-he¹, XING Xue-qing⁴

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. China Marine Bunker Supply(Rizhao) Co. Ltd., Rizhao 276826, China;

3. Petrochemical Research Institute, CNPC, Beijing 100195, China;

4. Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vacuum residue from Saudi Arabia light crude oil (ALVR) was thermally reacted at 395 °C under the atmosphere of nitrogen. Thermal reaction samples were obtained by online sampling device at different reaction times, and the asphaltene aggregate size was determined by small-angle X-ray scattering (SAXS) measurements. The aggregate size of asphaltene decreases from 29 ~ 21 nm in the initial stage of coke induction period; during later stage of coke induction period, the asphaltene aggregate size increases rapidly and reaches to 43 nm when thermal reaction time reaches to 150 min. After the stage of coke induction period, the asphaltene aggregate size changes little and is in the range of 46 ~ 42 nm. In the thermal reaction process of residue, the aggregate size of asphaltene is jointly affected by the thermal cracking and association-disassociation of asphaltene, but does not show obvious relationship with asphaltene content.

Key words: vacuum residue; thermal reaction; coke ratio; asphaltene aggregate size

随着世界石油资源的减少, 重质油的热加工和催化加工工艺成为研究的热点, 然而, 无论何种重油加工工艺, 都面临生焦、结焦问题。渣油加氢催化剂的活性位大多在孔道内部, 当沥青质聚集体通过催化剂的孔隙, 扩散到催化剂的活性位上, 发生转化反应, 就会明显抑制焦炭的生成。如果沥青质聚集体聚集在孔道口, 会使催化剂迅速失活。在渣油加氢反应中, 总是伴随着热反应, 因此, 研究热反应过程中沥青质聚集体尺寸的变化对于研究其扩散问题和催化工艺设计具有重要意义。

研究者对沥青质的聚集体尺寸进行了大量研

究。石油沥青质聚集体的大小和形状信息可用多种方法直接或间接地获取, 如流体力学参数法^[1-3](增比黏度、特征黏度、扩散系数)、散射法(SAXS、SANS、动态光散射)和光电显微分析法^[4](SEM、TEM、AFM、STM)等。除显微分析技术可直接观察到粒子的形貌外, 其他方法都需要建立在已知形状的基础上进行拟合比较。因此, 不同方法研究得到的沥青质聚集体形状和尺寸差异较大, 有的认为胶束结构是单分散的球状、椭球形, 有的则认为是具有多分散性的球形或扁平片状等, 聚集体的尺寸从几纳米到几十纳米不等^[5]。

收稿日期: 2012-04-19; 修回日期: 2012-06-29。

基金项目: 国家自然科学基金(20776160); 中石油重大科技专项专题(固定床渣油加氢处理催化剂研究开发); 中国石油大学(华东)“青年教师拔尖人才建设工程”基金; 重质油国家重点实验室开放课题。

联系作者: 张龙力(1974-), 男, 河南镇平人, 博士, 副教授, 从事物理化学、石油化学研究, E-mail: llzhang@upc.edu.cn。

Dwiggins 等^[6]利用 SAXS 技术研究石油中的胶体本质。使用 Cu $K\alpha$ 辐射, 试样放在开有 0.000 64 cm 厚的 Mylar 薄膜窗口的容器中, 试样的厚度根据吸收系数调节到最佳值。分别研究了几种未处理原油, 在原油中加入溶剂稀释后和未处理原油在不同温度下的回转半径(R_G)大小。此外, 还将 Hosemann、Shull、Roess、反傅里叶变换法及其他方法进行了对比。结果表明, 温度对回转半径大小的影响不明显, 然而某些溶剂对胶粒粒径影响较大, 其他溶剂对其基本无影响。

Storma 等^[7]在 93 °C 条件下研究了庚烷沥青质的宏观结构, 认为沥青质的形状和尺寸与沥青质的含量无关。同时, 也认为沥青质胶粒呈现球形, 平均半径为 3 ~ 6 nm, 服从施瓦兹分布。

Herzoga 等^[8]用 SAXS 技术对沥青质分散体的宏观结构进行了研究, 认为苯中的沥青质是以 0.34 nm 厚的盘状胶粒形式存在的多分散体系。

Liu 等^[9]利用小角中子散射技术(简称 SANS)对模型化合物进行了测定, 相同条件下对石油沥青质甲苯溶液也进行了散射实验。将两者的散射数据进行比较, 可以推测出沥青质胶粒在甲苯溶液中的存在形式有扁平状和层状, 片层的厚度为 L , 可得 $0.6 < L < 0.8$ nm; 沥青质颗粒的直径为 d , 可得 $6 < d < 20$ nm^[10]。沥青质胶粒在不同极性溶剂中的胶粒粒径有明显的差异, 热反应后生成的次生沥青质胶粒粒径变小。

Qverfield 等^[11]用 SANS 技术测定了在不同温度下沥青质胶粒粒径的变化。结果表明, 沥青质胶束在较高的温度下发生解缔, 造成沥青质的平均分子量和胶粒粒径降低。Espinat 等^[12]研究了 25 ~ 287 °C 不同温度下, 沥青质胶粒粒径的变化。温度升高, 沥青质的胶粒粒径减小; 压力增大, 沥青质的胶粒粒径也有所降低, 但是压力对沥青质胶粒粒径的影响没有温度的影响显著。同时还发现, 沥青质胶束的缔合过程是可逆的。

在本实验中, 应用小角 X 射线散射技术研究热反应过程中沥青质聚集体尺寸的变化, 揭示了沥青质聚集体尺寸与沥青质的含量、结构性质以及渣油热反应体系生焦特性之间的相关性。随着所处环境及体系性质的改变, 沥青质聚集体的聚集形态会发生变化。小角 X 射线散射技术可在不破坏沥青质原始状态下测定沥青质聚集体尺寸, 中国目前利用小角 X 射线散射技术研究渣油沥青质聚集体尺寸的报道还较少。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验原料采用沙特轻质原油的减压渣油(简称 ALVR), 基本性质见表 1。

表 1 沙轻减渣的主要性质

Table 1 Main properties of a vacuum residue made from Arabian light crude

Property	ALVR
Density (20 °C) $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.0317
Viscosity (100 °C) $\mu / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2 482.5
Condensation point $t / ^\circ\text{C}$	43
C w/%	84.77
H w/%	10.04
S w/%	4.64
N w/%	0.32
Ni $/ (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	31.0
V $/ (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	59.8
Fe $/ (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	132
Ca $/ (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	21.0
Ash content w/%	0.119
Molecular weight $/ (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	1009
Saturate w/%	9.99
Aromatics w/%	52.12
Resin w/%	27.78
C ₇ -Asphalten w/%	10.11

1.2 高温高压釜反应

将 320 g 油样装入釜中, N_2 初始压力为 2.0 MPa, 搅拌器转速设为 400 r/min。热反应温度达到预定反应温度 395 °C 时开始计时, 利用插入液相的取样管, 在线取得液相油样。10 min 后取第一个样, 以后每隔 20 min 取一个样, 取九个样品; 然后每隔 30 min 取样, 取三次; 共得到热反应样品 14 个。

1.3 临氮热反应样品焦炭含量测定

焦炭是重质油热转化中生成的固体产物, 在研究中常以甲苯不溶物作为焦炭。取 15 ~ 20 g 沙轻减渣热反应样品用甲苯稀释后过滤, 并用甲苯抽提; 将抽提后的滤纸置于真空烘箱中, 在 110 °C、真空度为 93.3 kPa 下加热烘干 1.5 h, 然后趁热转移至干燥器冷至室温, 并准确称重; 滤纸增重质量占所取样品的百分率即为该样品的生焦率^[13,14]。

1.4 渣油沥青质聚集体尺寸的测定方法

渣油临氮热反应后, 得到的液相残渣油中同时含有可溶质、沥青质和焦炭。李生华等^[15]以渣油介观均匀体系作为参照系, 将三类新相态统称为第二

液相。三类新相态的来源分别为,新相态 I 是原生沥青质的聚集体,新相态 II 和 III 是次生沥青质的聚集体。利用小角 X 射线散射技术对临氮热反应不同时间段渣油样品的沥青质聚集体尺寸进行测定,选取相应的可溶质作为背底。渣油热反应过程中生成的焦粒一般大于 100 nm^[16],通过调节样品到探测器的距离借助电荷耦合探测器前的 Beam-stop 挡住焦炭的散射光,从而消除焦炭颗粒的影响。

X 射线波长 0.154 nm,电子能量 2.5 GeV,样品到探测器的距离 2 160 mm。实验装置为 1W2A 小角散射站(中国科学院高能物理研究所)。

渣油在 110 °C、真空度为 93.3 kPa 条件下真空干燥 1.5 h,目的是除去渣油中的气泡。渣油热反应样品在烘箱中加热到 80 °C,以便转移渣油样品。用刮刀将加热后的渣油样品平整地涂在样品池中,然后用进口 3 M 胶带封装。考虑到样品量的多少、光束尺寸和样品对光的吸收等方面,对于渣油样品选取圆孔直径 1 cm,厚度 1.1 mm 的涂抹聚四氟的样品池。将样品池放于样品架上,确保样品处在光路上。安全连锁后,提起光子光闸,将光引入实验站。根据探测器上的最大计数来确定最佳的曝光时间。一般取 Max = 5000 左右时对应的曝光时间,对于渣油样品曝光时间一般为 500 s。曝光并保存图像。同时应记录样品名称、曝光时间、后电离数值等信息。

对于石油体系的数据处理,可以采用 Guinier(纪尼叶)理论求解。单分散体系是指由稀疏分散、随机取向的、大小和形状一致的,并且每个粒子内部具有均匀电子密度的粒子组成的体系;多分散系是指形状相同、大小不一样,它们随机地、稀疏分布在试样中,每个粒子具有相同的均匀电子密度^[17]。

用 Fit2d 程序处理谱图得到散射强度与相对位置的关系,首先要找出散射中心,在彩色环内侧的粉色环上确定各个点,然后找出圆心,见图 1。

用扇形积分法得到散射强度与相对位置的关系,见图 2。由于 SAXS 技术的所有理论分析是关于散射强度与散射矢量的关系,首先根据公式 $2\theta = \arctan \frac{|x-x_0|}{l}$ 将相对位置转化成相应角度,然后把

相对角度再转化成散射矢量 $q = \frac{4\pi\sin\theta}{\lambda}$,可溶质(背底)做相同处理后,得到的每个散射强度都除以对应的后电离常数,实现归一化^[18],然后再作差扣除背底。

图 3 为沙轻减渣的散射强度与散射矢量关系曲线。由图 3 可知,散射强度随着散射矢量的增大而变小,并且样品的散射强度大于背底(可溶质)的散射强度,与样品中含有沥青质聚集体是一致的。

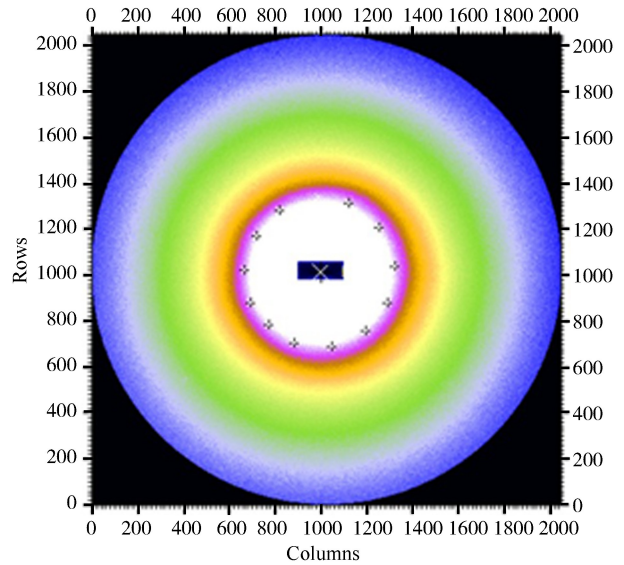


图 1 散射图样的光束中心

Figure 1 Beam of light scattering design center

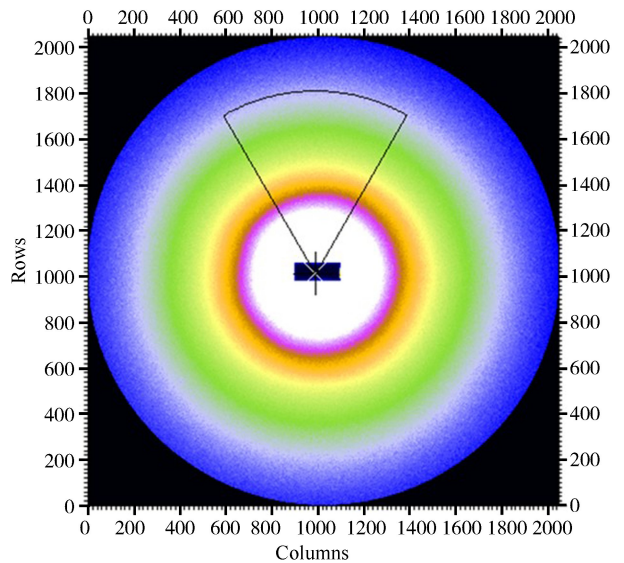


图 2 扇形积分法求散射强度与相对位置数值
Figure 2 Fan-shaped integral for the scattering intensity and the relative position

假设沥青质聚集体在渣油中是以球形颗粒存在的单分散系,采用 Guinier(纪尼叶)理论求解渣油沥青质聚集体尺寸。

$$\text{Guinier 近似方程: } I(q) = I_e N n^2 e^{-q^2 R_G^2/3} \quad (1)$$

式中, $I(q)$ 为扣除背底后样品的总散射强度值, a. u.; I_e 为扣除背底后一个电子的散射强度, a. u.; R_G 为粒子的回转半径, nm; n 为一个粒子中的总

电子数; N 为被 X 射线照射到的粒子数目。

根据公式(1), 由 $\ln I \sim q^2$ 作图, 得到低角直线部分的斜率 k , 具体见图 4。

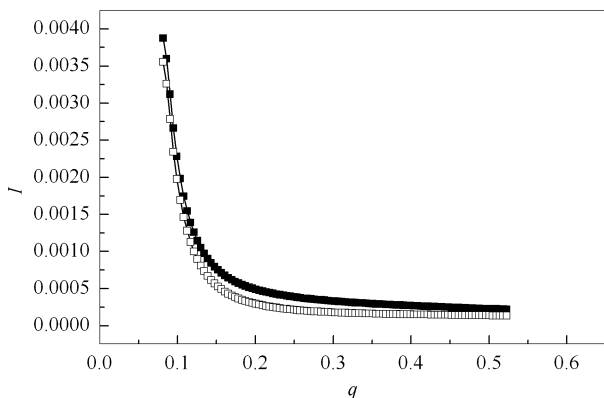


图3 沙轻减渣的散射强度与散射矢量的曲线

Figure 3 Scattering intensity and scattering vector relation curves of ALVR and background

■: ALVR; □: background

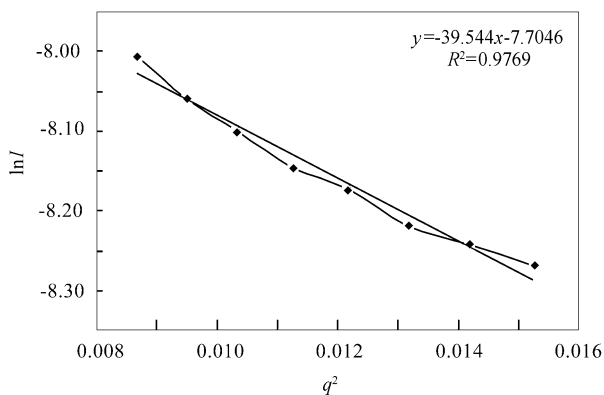


图4 扣除背底后沙轻减渣的 $\ln I$ 值随 q^2 的变化

Figure 4 Guinier plots of $\ln I$ versus q^2 after background correction

由图4可以得到低角直线部分的斜率值 k , 将斜率 $k = -39.54$ 带入到公式(2)中, 可以得到沥青质聚集体的回转半径 $R_G = 10.89 \text{ nm}$; 对于球形粒子, 纪尼叶近似方程在 $q \cdot R_G < 1.3$ 均成立。

$$R_G = \sqrt{-3k} \quad (2)$$

对于球形粒子, 利用公式(3)可以将纪尼叶近似公式中的 R_G 换算成沥青质聚集体的半径 R , 进一步可以得到沥青质聚集体的直径 $d = 28 \text{ nm}$ 。

$$R = \sqrt{\frac{5}{3}} R_G \quad (3)$$

用同样的处理方法可以得到沙轻减渣热反应不同时间段的渣油沥青质聚集体尺寸。

2 结果与讨论

2.1 沙轻减渣热反应生焦率的测定

图5为生焦率和庚烷沥青质含量随热反应时间的变化曲线。由图5可知, 在 $395 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 沙轻减渣样品在 150 min 之前, 生焦量增加的幅度较小, 基本上不生焦; 之后, 生焦量迅速增加。随着热反应时间的延长, 到 170 min 时渣油中焦炭含量达到 0.1% , 说明在该热反应条件下, 沙轻减渣的生焦诱导期为 170 min 。在生焦诱导期内, 庚烷沥青质的含量逐渐增大; 之后变化平缓。在此过程中存在拐点, 拐点所对应的时间为 170 min , 主要是因为, 一方面, 部分胶质缩合生成次生沥青质; 另一方面, 沥青质聚集体发生聚沉生成焦炭。

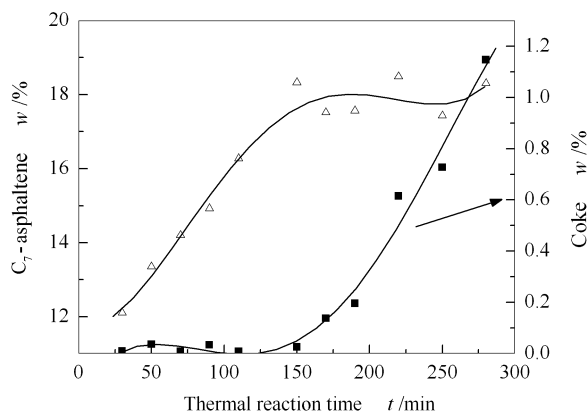


图5 生焦率和庚烷沥青质含量随热反应时间的变化曲线

Figure 5 Coke formation and C_7 -asphaltene content as a function of reaction time

■: coke; Δ : C_7 -asphaltene

2.2 沙轻减渣热反应样品沥青质的平均分子结构参数

表2为沙轻减渣热反应样品沥青质的平均分子结构参数^[19]。由表2可知, 随着热反应的进行, 沙轻减渣热反应样品沥青质的芳香度 f_A 、环烷碳分率 f_N 和环烷碳数 R_N 都有所升高, 但是芳香环数 R_A 、烷基碳分率 f_p 和结构单元数 n 却有所降低, 芳香环系的缩合度参数 H_{AU}/C_A 呈现下降的趋势, 表明随热反应的进行芳香环系的缩合程度一直在增加。一个结构单元中芳碳数 C_A^* 和碳链的分支程度 BI 无明显变化。

随着热反应时间的延长, 沙轻减渣热反应样品沥青质组分的缩合程度增强, 达到生焦诱导期后, 沥青质聚集体发生聚沉, 这一过程使得沥青质分子的缩合程度保持一个动态平衡。

表2 沙轻减渣热反应样品沥青质的平均分子结构参数
Table 2 Average structural parameters of asphaltene of ALVR's thermal reaction

Thermal reaction time t/min	H w/%	C w/%	f_A	H_{AU}/C_A	f_N	f_P	R_A	R_N	C_A^*	n	BI
Before thermal reaction	6.80	83.82	0.59	0.31	0.10	0.31	53.81	9.00	64.55	2.56	0.77
50	6.31	84.33	0.66	0.43	0.03	0.31	101.37	4.56	33.86	9.10	0.51
110	6.11	84.46	0.68	0.46	0.03	0.29	78.28	2.92	29.48	8.10	0.57
150	5.90	84.57	0.67	0.36	0.09	0.23	69.44	9.60	49.04	4.33	0.56
190	5.80	84.61	0.69	0.37	0.07	0.24	93.08	9.83	44.73	6.33	0.46
220	5.33	83.83	0.71	0.34	0.12	0.17	53.52	9.53	55.61	2.96	0.53
250	5.49	84.13	0.65	0.28	0.25	0.11	45.99	18.00	80.17	1.77	0.53
280	5.40	84.09	0.71	0.36	0.10	0.19	54.93	7.65	49.30	3.42	0.65

f_A : aromatic carbon ratio; H_{AU}/C_A : condensation parameter of aromatic rings;

f_N : cycloparaffin carbon ratio; f_P : paraffin carbon ratio; R_A : number of aromatic rings;

R_N : number of cycloparaffin rings; C_A^* : average number of carbon in a structural module;

n : mean structural module number; BI : degree of alkyl branching

2.3 热反应不同时间段的沥青质聚集体尺寸研究

选取英国马尔文公司的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为模型化合物, 其理论直径 $d = (60 \pm 2.7) \text{ nm}$ 。利用 SAXS 技术测得 PMMA 样品的直径 $d = 61.07 \text{ nm}$ 。比较可得 SAXS 技术测量样品直径的相对误差为 1.78%, 所以用该技术测得的各渣

油沥青质聚集体尺寸是可信的。

表3为热反应不同时间段的沥青质聚集体尺寸变化, 由表3与图5中沥青质含量变化情况比较可得, 在渣油热反应过程中沥青质聚集体的尺寸与沥青质含量没有明显关系。

表3 热反应不同时间段的沥青质聚集体尺寸变化
Table 3 Aggregate size of asphaltenes change in different thermal reaction time

Thermal reaction time t/min	Slope / k	Radius of gyration / nm	Diameter d/nm
Before thermal reaction	-39.54	10.89	28
10	-41.88	11.21	29
30	-26.64	8.94	23
50	-25.02	8.66	22
70	-24.60	8.59	22
90	-22.73	8.26	21
110	-35.01	10.25	26
130	-58.77	13.28	34
150	-94.59	16.85	43
170	-91.67	16.58	43
190	-88.53	16.30	42
220	-98.01	17.15	44
250	-98.57	17.20	44
280	-106.99	17.92	46

由表3还可以看出, 沥青质聚集体尺寸在生焦诱导期前期 (110 min 之前) 略有减小, 为 29 ~

21 nm, 主要由于在反应初期, 沥青质聚集体受热产生解缔并伴随发生热裂解反应, 沥青质在热裂解时,

其稠合芳香-环烷核周边的烷基侧链以及 C_{芳香}-C_{环烷}键均能发生断裂反应,同时还发生环烷环脱氢反应^[1];在受热解缔和热裂解过程的综合作用下,沥青质聚集体尺寸呈现小幅的减小。在生焦诱导期后期,当反应进行到 130 min 时,沥青质聚集体尺寸有较大幅度的增大,150 min 达到 43 nm,主要是因为随着热反应时间的延长,沥青质的缔合性增强,沥青质发生聚并,聚集成第二液相,造成沥青质聚集体尺寸的增大。170 min 之后沥青质聚集体尺寸变化较小,为 46~42 nm。这可能是因为在在线取样得到的是液相残渣油,当沥青质聚集体较大时会沉降到反应釜底部,所以 170 min 之后得到的液相残渣油中沥青质聚集体尺寸的变化很小。

3 结论

沙轻减渣在 395 °C 条件下进行热反应,在生焦诱导期前期沥青质聚集体尺寸略有减小,在 29~

21 nm。在生焦诱导期后期,沥青质聚集体生成第二液相,使沥青质聚集体的尺寸急剧增大,当热反应进行到 150 min 时达到 43 nm;达到生焦诱导期后,沥青质聚集体尺寸变化较小,为 46~42 nm。研究还发现,在渣油热反应过程中沥青质聚集体尺寸与沥青质含量无明显关系。

随着热反应时间的延长,沥青质组分的芳香环系缩合度参数 H_{AU}/C_A 呈现下降的趋势,表明其缩合程度一直在增加,达到生焦诱导期后,沥青质聚集体发生聚沉,生成焦炭,沉降到反应釜底部;这一过程使得热反应后期沥青质聚集体尺寸保持一个动态平衡。

致谢: 在实验中,中国科学院 1W2A 小角散射站的吴忠华研究员和中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院的于双林给予了大力帮助。研究生王国辉,本科生陈寒焯、朱艳秋、李晓宁完成了部分测试,在此向他们表示感谢。

参考文献

- [1] 杨朝合,徐春明,杜峰,林世雄. 重质油宏观尺寸表征的初步研究[J]. 石油学报(石油加工), 1998, **14**(3): 6-9. (YANG Chao-he, XU Chun-ming, DU Feng, LIN Shi-xiong. Primary study on the macroscopic size characterization of heavy oil[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum processing section), 1998, **14**(3): 6-9.)
- [2] NORTZ R L, BALTUS R E, RAHIMI P. Determination of the macroscopic structure of heavy oils by measuring hydrodynamic properties[J]. Ind Eng Chem Res, 1990, **29**(9): 1968-1976.
- [3] 王治卿,王宗贤,郭爱军,姜阿娜,张会军. 渣油中沥青质分子颗粒尺寸及其聚集体模型研究[J]. 燃料化学学报, 2004, **32**(4): 429-434. (WANG Zhi-qing, WANG Zong-xian, GUO Ai-jun, JIANG A-na, ZHANG Hui-jun. Molecular size and micellar particle size of asphaltene in vacuum residues[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, **32**(4): 429-434.)
- [4] 秦匡宗,郭少辉. 石油沥青质[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 44-50. (QIN Kuang-zong, GUO Shao-hui. Petroleum asphaltenes[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 44-50.)
- [5] 丁福臣,王宇航,靳广洲,何广湘,高俊斌. 石油沥青质胶态粒子宏观结构尺寸的研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2001, **14**(2): 31-34. (DING Fu-chen, WANG Yu-hang, JIN Guang-zhou, HE Guang-xiang, GAO Jun-bin. Macro-size of asphaltene colloidal particles in organic solvent[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2001, **14**(2): 31-34.)
- [6] DWIGGINS C W Jr. A small angle X-ray scattering study of the colloidal nature of petroleum[J]. J Phys Chem, 1965, **69**(10): 3500-3506.
- [7] STORMA D A, SHEU E Y, DeTAR M M. Macrostructure of asphaltenes in vacuum residue by small-angle X-ray scattering[J]. Fuel, 1993, **72**(7): 977-981.
- [8] HERZOGA P, TCHOUBARA D, ESPINAT D. Macrostructure of asphaltene dispersions by small-angle X-ray scattering[J]. Fuel, 1988, **67**(2): 245-250.
- [9] LIU Y C, SHEU E Y, CHEN S H, STORM D A. Fractal structure of asphaltenes in toluene[J]. Fuel, 1995, **74**(9): 1352-1356.
- [10] RAVEY J C. Asphaltene macrostructure by small angle neutron scattering[J]. Fuel, 1988, **67**(11): 1560-1567.
- [11] OVERFIELD R E, SHEU E Y, SINHA S K, LIANG K S. SANS study of asphaltene aggregation[J]. Fuel Sci Tech Int, 1989, **7**(5/6): 611-624.
- [12] ESPINAT D, FENISTEIN D. Effects of temperature and pressure on asphaltenes agglomeration in toluene: A light, X-ray, and neutron scattering investigation[J]. Energy Fuels, 2004, **18**(5): 1243-1249.
- [13] 张龙力,杨国华,张庆轩,杨普江,阙国和. 渣油胶体稳定性与热反应生焦性能的关系[J]. 石油化工高等学校学报, 2005, **18**(1): 4-6. (ZHANG Long-li, YANG Guo-hua, ZHANG Qing-xuan, YANG Pu-jiang, QUE Guo-he. The relationship of residue colloidal stability and thermal reaction performance[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2005, **18**(1): 4-6.)
- [14] 张龙力,杨国华. 中东常压渣油热反应过程中沥青质的缔合性变化规律[J]. 燃料化学学报, 2004, **32**(2): 171-173. (ZHANG Long-li, YANG Guo-hua. Study on the conglomerating characteristics of Middle East ar asphaltenes during thermal reaction[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, **32**(2): 171-173.)
- [15] 李生华,刘晨光,阙国和,梁文杰,朱亚杰. 渣油热反应体系中第二液相的存在性: II 第二液相及其表征[J]. 燃料化学学报, 1997, **25**(1): 1-6. (LI Sheng-hua, LIU Chen-guang, QUE Guo-he, LIANG Wen-jie, ZHU Ya-jie. Occurrence of the second liquid phase in the thermal

- reaction system of vacuum residua: II Second liquid phase and its characterization[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1997, 25(1): 1-6.)
- [16] 张龙力, 杨国华, 阙国和. 中东常压渣油热反应样品 Zeta 电位的研究[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(1): 125-128. (ZHANG Long-li, YANG Guo-hua, QUE Guo-he. Study on the Zeta potential of Middle East atmospheric residue and thermal reaction samples[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(1): 125-128.)
- [17] 孟昭富. 小角 X 射线散射理论及应用[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1996. (MENG Zhao-fu. Small-angle X-ray scattering theory and application[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1996.)
- [18] 赵辉, 董宝中, 董宇辉. 北京同步辐射装置小角散射站实验数据归一化[J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, 19(4): 433-435. (ZHAO Hui, DONG Bao-zhong, DONG Yu-hui. Normalization of experimental data from small angle scattering station at Beijing synchrotron radiation facility[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2002, 19(4): 433-435.)
- [19] 梁文杰, 阙国和, 陈月珠. 我国原油减压渣油的化学组成与结构: II 减压渣油及其各组分的平均结构[J]. 石油学报(石油加工), 1991, 7(4): 1-11. (LIANG Wen-jie, QUE Guo-he, CHEN Yue-zhu. Chemical composition and structure of vacuum residua of Chinese crudes: II Average structure of vacuum residues and their fractions [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum processing section), 1991, 7(4): 1-11.)

欢迎订阅第41卷(2013年)《燃料化学学报》

《燃料化学学报》是中国化学会和中国科学院山西煤炭化学研究所主办, 科学出版社出版的学术性刊物。创刊于1956年, 公开发行。本刊是我国能源领域中重要的学术性期刊。设有研究快报、研究论文、研究简报、综述和知识介绍等栏目。主要报道国内在燃料化学、化工及其交叉学科的基础研究等领域内的科技新成就和最新进展, 刊登具有较高学术水平和应用价值的论文, 既传播知识, 交流学术思想, 又促进了经济发展并为培养人才作贡献。

《燃料化学学报》已连续多年入选国内外检索系统, 国外如: “CA” “Ei” “AJ” “International Chemical Engineering” “Fuel and Energy Abstract” “Coal Abstracts” 美国“American Petroleum Institute Central Abstracting and Information Services” “美国剑桥科技文摘(CSA)”等。国内如: 《中国学术期刊文摘》《中国化学化工文摘》《中国科学引文数据库》《中国化学文献数据库》《中国科技期刊题名数据库》《中国科技论文统计与分析数据库》《中国矿业文摘》《中国科技论文统计与分析》等; 连续几年入选“CA”千种表。已成为《中国期刊网》《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊、《万方数据系统期刊数据库》源期刊, 2001年度获新闻出版总署授予的“中国期刊方阵双效期刊”。并多次获国家、中国科学院、华北地区优秀期刊奖。

《燃料化学学报》为月刊, A4开本, 128页, 全部为铜版纸印刷, 每册定价25元, 全年300元(含邮资)。欢迎广大读者在当地邮局订阅(邮政代号: 22—50)。若需过刊或漏订, 可随时与编辑部联系。

联系地址: 太原市桃园南路27号《燃料化学学报》编辑部

邮政编码: 030001

电话: 0351-2025214 4066044

传真: 0351-2025214

电子信箱: rlhx@sxicc.ac.cn