

中—加科技合作交流资料

编号:9091—2

ATHABASCA 沥青 CO_2 — CH_4 系统汽—液平衡特性

中国石油天然气总公司
石油勘探开发科学研究院

一九九一年十二月

目 录

表格目录

附图目录

摘要

一、引言

二、实验目的

三、实验设备及实验方法

四、天然气—沥青混合物组分特征参数

五、实验结果及讨论

1) Athabasca 沥青— CO_2 系统

2) Athabasca 沥青— CH_4 系统

3) Athabasca 沥青— CH_4 — CO_2 系统

4) 使用 P-R 和 MSRK 状态方程的预测性计算

六、总结

七、建议

表格目录

表 1. Athabasco 沥青数据表

表 2. 甲烷分析

表 3. CO_2 分析

表 4. 伪两相系统 CO_2 —Athabasca 沥青实验室 VLE 值与计算 VLE 值的比较

表 5. 伪两相系统 CH_4 —Athabasca 沥青实验室 VLE 值与计算 VLE 值的比较

表 6. 伪两相系统 CH_4 —Athabasca 沥青, 实验室 VLE 值与计算所得 VLE 值的比较, 新数据

表 7. 343.15°K 时三相系统 CH_4 — CO_2 —Athabasca 沥青实测的 VLE 组分

表 8. 373.15°K 时三相系统 CH_4 — CO_2 —Athabasca 沥青实测的 VLE 组分

表 9. 423.15°K 时三相系统 CH_4 — CO_2 —Athabasca 沥青实测量的 VLE 组分

表 10. 用于 VLE 计算的 Peng—Robinson 状态方程二元反应系数

表 11. MSRK 状态方程二元反应系数

表 12. 伪二元系统 CH_4 —Athabasca 沥青 VLE 特性, P—R 方程计算

表 13. 伪二元系统 CO_2 —Athabasca 沥青 VLE 特性, P—R 方程计算

附图目录

- 图 1. 汽-液平衡室示意图
- 图 2. 恒温油浴
- 图 3a. 沥青除气装置示意图
- 图 3. 汽液平衡装置(VLE)示意图
- 图 4. Athabasca 沥青- CO_2 系统在 70°C 时, $C_{ij}=0.0671$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 5. Athabasca 沥青- CO_2 系统在 100°C 时, $C_{ij}=0.0449$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 6. Athabasca 沥青- CO_2 系统在 150°C 时, $C_{ij}=0.0042$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 7. Athabasca 沥青- CH_4 系统在 50°C 时, $C_{ij}=0.0671$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 8. Athabasca 沥青- CH_4 系统在 70°C 时, $C_{ij}=0.0501$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 9. Athabasca 沥青- CH_4 系统在 150°C 时, $C_{ij}=0.1444$ 时实验所测 VLE 数据与 PR 方程计算值的函数关系。
- 图 10. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta P\%|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=70^\circ\text{C}$, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 11. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta X_1|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=70^\circ\text{C}$, 4 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 12. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta P\%|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=100^\circ\text{C}$, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 13. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta X_1|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=100^\circ\text{C}$, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 14. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta P\%|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=150^\circ\text{C}$, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 15. Athabasca 沥青- CO_2 系统, $|\Delta X_1|$ 平均误差与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=150^\circ\text{C}$, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 16. Athabasca 沥青- CO_2 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P^*|$ 与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=70^\circ\text{C}$, 4 个数据点, MSRK 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 17. Athabasca 沥青- CO_2 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P^*|$ 与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=100^\circ\text{C}$, 5 个数据点, MSRK 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 18. Athabasca 沥青- CO_2 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P^*|$ 与 C_{ij} 值的函数关系, 温度 $=150^\circ\text{C}$, 5 个数据点, MSRK 状态方程独立推导沥青特性。

- 图 19. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta P\%|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 50°C, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 20. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 50°C, 5 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 21. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta P\%|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 70°C, 4 个数据点, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 22. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 70°C, 4 个数据点, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 23. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta P\%|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 150°C, 6 个数据点, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 24. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 与 Kij 值的函数关系, 温度 = 150°C, 6 个数据点, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 25. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 与 Kij 值的函数关系, 温度 = 50°C, 5 个数据点, MSRK 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 26. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 与 Kij 值的函数关系, 温度 = 50°C, 5 个数据点, 由 MSRK 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 27. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 与 Kij 值的函数关系, 温度 = 150°C, 6 个数据点, 由 MSRK 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 28. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 70°C, 4 个数据点, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 29. Athabasca 沥青-CH₄ 系统, 平均误差 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 与 Cij 值的函数关系, 温度 = 150°C, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 30. Athabasca 沥青-CO₂ 系统优化 Cij 值与温度的函数关系, PR 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 31. Athabasca 沥青-CH₄ 系统优化 Cij 值与温度的函数关系, PR 状态方程独立推导沥青特性。
- 图 32. Athabasca 沥青-CO₂ 系统优化 Kij 值与温度的函数关系, MSRK 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 33. Athabasca 沥青-CH₄ 系统优化 Cij 值与温度的函数关系, MSRK 状态方程独立导出沥青特性。
- 图 34. 三相系统甲烷-CO₂-Athabasca 沥青在 343.15°K 时汽液平衡数据
- 图 35. 三相系统甲烷-CO₂-Athabasca 沥青在 373.15°K 时汽液平衡数据
- 图 36. 三相系统甲烷-CO₂-Athabasca 沥青在 423.15°K 时汽液平衡数据

ATHABASCA 沥青 CO_2 — CH_4 系统 汽—液平衡特性

C. T. Fu, T. Frauenfeld

G. Vilcsak

摘要

沥青和含沥青系统的热力学特性,例如气体溶解度,相态特性,压力,体积,温度是工程师们在研究和设计沥青采收系统时所必需的。因为实验测量耗费时间,所以希望找到一些方法能预测基于实验结果的汽液平衡特性(VLE)。

在这项研究中,在3种温度5种压力下对甲烷—Athabasca 沥青和 CO_2 —Athabasca 沥青二元系统进行了测试。这种伪二元系统的汽液特性的测量使用了一种改进了的 Ruska 摆动室装置。此系统的测量数据可通过状态方程用于开发预测方法。2个三次状态方程用于描述相平衡特性,它们是改进的 Soave—Redlich—Kwong(MSRK)状态方程(1—3)和 Peng—Robinson(PR)状态方程(4)。用 Fu 等人(1,2)提出的沥青特征参数进行了 PR 状态方程计算。

实验室测量的热力学特性与两个系统用上述两种状态方程的计算值进行了比较。

然后,通过相关实验和计算数据确定了二元系统干扰系数。干扰系数用于预测甲烷— CO_2 —Athabasca 沥青三元系统的构成。预测结果再与实验数据比较。

一、引言

为了研究和设计沥青采收系统,工程师们需要沥青和含沥青系统的气液平衡数据。本研究试图找到一些方法,可用来从以实验结果为基础的状态方程预测气液平衡特性。

本研究中,在3种温度5种压力下用实验的方法研究了 CH_4 —Athabasca 沥青系统和 CO_2 —Athabasca 沥青系统。沥青的重要特性为 Fu 等人(1,2)确定的特性。两个状态方程,MSRK 状态方程和 Peng—Robinson 状态方程用于拟合实验数据。通过最小线性误差拟合法确定反应系数,此反应系数能使实验数据得到最佳拟合。然后,用反应系数预测三相系统的特性,并将预测结果与实验数据进行比较。

二、实验目的

此项研究是以实验数据为基础,利用状态方程,开发预测多成分含沥青系统 VLE 特性的方法。

三、实验设备和实验方法

图 1—3 画出了实验装置示意图。VLE 实验装置由以下三部分组成:恒温槽(图 2)并附有一个摆动平衡室,采样部分(图 3a)和分析部分。

搅拌器不停搅动槽中 Dow Corning 210H 油,并保持槽中(图 2)温度均匀。使用这种设计可测试高达 473.2°K 的温度,精度 $\pm 0.01^\circ\text{K}$,测试压力达 13.8Mpa,精度 $\pm 1.0\text{Kpa}$ 。平衡室内(图 1)的自由浮动活塞能使气液两相的多次采样而又对平衡压力保持最小的干扰。

系统温度由一个 Backer oil Tool inc 控制($K \pm 0.01^\circ\text{K}$)。温度用一个 Hewlett Packed 2804A 石英温度计测量。用 Heise 压力计测量系统压力,Hewlett Packard 3054A 自动数据采集系统在达到压力平衡期间,每隔半小时记录一次压力数据。

保证实验成功的重要因素由以下几方面决定,平衡装置的设计,实验的准备工作,采样方法,温度控制,压力,相成分分析和保证达到平衡状态。实验前,首先用溶剂如甲苯清洗实验设备,清除油和其它污垢,然后用于氮交替地洗涤排空。再用实验用气体冲洗设备四次。接着用手泵把 Athabasca 沥青装入平衡装置并进行计量。再用 Ruska 刻度泵在高压下装入预定气体。使平衡槽温度达到预定值后,打开搅拌电机,开始平衡过程。

当压力对每一等温线保持定值达 48 小时后,通过气体采样管从平衡室提取 130CC 气体样品,然后通过液体采样管提取 6.2CC 的液体样品。采样时,为了保持恒定的压力,用 Ruska 刻度泵替代平衡室(图 1 所示)内的活塞。自由浮动活塞下的液压液体也是所研究的沥青,因此消除了容器壁液体污染。

用图 3a 所示的脱气设备测量沥青相中溶解的气体量。含有已知质量和体积的沥青气体混合物的流体取样器与分析设备连接。然后抽空分析设备中的气体,关闭真空泵,并打开采样器的阀门。用磁力搅拌器搅拌容器中的沥青,并加热流体取样器到 373°K,然后冷却到室温重复几次,以便释放溶解的气体。最后在恒定室温下维持系统 5—6 小时。记录系统的温度和负压值用于计算。通过理想状态气体方程由已知的体积、压力、温度计算液相中溶解气体的摩尔值。

研究级别的甲烷由加拿大的 Matheson 提供。供应商报告的甲烷最低纯度是 99.99%,这种气体不需进一步提纯就可用于研究。所用的 Athabasca 沥青是由小于 1%溶剂含量的溶剂提取的。表 1 为所用的沥青的分析,表 2 是甲烷分析,表 3 是 CO_2 分析。

四、天然气—沥青混合物组分特征参数

Reid 等人(3)发表的甲烷和 CO_2 特征参数用于此项研究。

使用三次状态方程计算 VLE 特性需要 Athabasca 沥青特征参数。在达到临界温度前,由于沥青在达到临界条件前热量变化的复杂性,因而不能用实验的方法确定临界温度(T_c)、临界压力(P_c)和离散系数(ω)。在气—液平衡(VLE)计算中 Athabasca 沥青被看作伪纯成分。

在此文献中,从 Lu et al(4)摘录了几组 Athabasca 沥青特征参数。这些参数是通过外推重油的实验平衡数据或拟合气体沥青系统的测量平衡数据来确定的。因此这些参数值主要依赖于状态方程的选择,外推技术和实验数据的质量。

Fu 等人(1)从阿尔伯塔沥青和重油现有的可测量特性,例如沸点和各种成分的比重计算了它们的特征参数。计算的 Athabasca 沥青参数值列表如下:

$$T_c = 963.71^\circ\text{K}$$

$$P_c = 11.18\text{Mpa}$$

$$\omega = 1.2740$$

$$MW = 544(\text{平均分子量})$$

这组参数曾用于 MSRK 和 PR 状态方程气液平衡计算

当前工作的主要任务是确定两个状态方程的干扰系数(C_{ij} 值)。 C_{ij} 值是通过 PR 或 MSRK 状态方程的泡点和闪蒸的迭代计算来确定。算出的泡点压力和闪蒸组分数据与甲烷—Athabasca 沥青或 CO_2 —Athabasca 沥青系统实验数据比较。然后将新的 C_{ij} 值代入计算。重复处理直到确定最小压力误差($|\Delta P^*|$ 平均值)和最小组分误差($|\Delta X_1|$ 平均值)为止。再使用 PR 和 MSRK 状态方程(图 30—33),依照最小点时 C_{ij} 值对温度的关系绘制甲烷—Athabasca 沥青系统和 CO_2 —Athabasca 沥青系统 C_{ij} 值温度曲线。新的二元和三元系统等温线的预测可以通过内插法获得相应的 C_{ij} 值。

五、实验结果和讨论

1) Athabasca 沥青— CO_2 系统

在 343.15°K 等温线上,对 CO_2 —Athabasca 沥青伪二元系统作了四次 VLE 测量,5 对 373.15°K 和 423.15°K 等温线作了 5 次 VLE 测量。6 种 VLE 特性测量值列于表 4。用 MSRK 和 PR 状态方程所做的 VLE 最佳拟合预测也有记录。这些结果绘于图 4,5,6。实验数据和计算的数据点非常吻合。 70°C 时 $|\Delta P\%|$ 均值误差为 1.5%, 100°C 时为 1.1%, 150°C 时为 0.9%。 $|\Delta P\%|$ 最小均值和 $|\Delta X_1|$ 最小均值所确定的 C_{ij} 值也非常吻合。图 10—18 为 CO_2 —Athabasca 沥青系统误差与 C_{ij} 值的关系图。图 30 和 32 分别为 PR 和 MSRK 方程的温度— C_{ij} 曲线。

2) Athabasca 沥青— CH_4 系统

实验求得 CH_4 —Athabasca 沥青系统 343.15°K 4 个 VLE 测量值和 423.15°K 的 6 个测量值。所测的 VLE 数据示于表 5。MSRK 和 PR 状态方程所做 VLE 预测也有记录。还重做了一组 CH_4 —Athabasca 沥青系统 VLE 测量。在 343.15°K 测量了 4 个点, 423.15°K 测量了 6 个点。数据示于表 6,表中还列有 PR 状态方程所做的 VLE 预测。其结果绘于图 7,8,9。实验 VLE 数据点和计算 VLE 数据点的比较如下所示: 70°C , $|\Delta P\%|$ 均值是 5.1%, 150°C $|\Delta P\%|$ 均值是 9.0%。在最高温度,从 $|\Delta P\%|$ 均值(—1.555)计算的 C_{ij} 值和从 $|\Delta X_1|$ 均值(—1.1490)计算的 C_{ij} 值有显著差异。图 19—29 显示了 CH_4 —Athabasca 沥青系统 C_{ij} 值与最小误差关系的寻找方法。图 31 和 33 为 C_{ij} 温度曲线。

3) Athabasca 沥青— CH_4 — CO_2

在 3 种温度下做了这种伪三相系统的 VLE 测量。在 343°K 做了 4 次测量, 373°K 做了 5 次测量, 423°K 做了 6 次测量。结果分别列在表 7,8,9 中。三相系统相图在图 34,35,36 中。

4) 用 PR 和 MSRK 状态方程进行的预测计算

为了把预测结果与实验结果进行比较,用 MSRK 和 PR 状态方程进行了泡点和闪蒸计

算。为了确定产生最小 $|\Delta P\%|$ 均值和 $|\Delta X_1|$ 均值误差的 C_{ij} 值,依次改变 C_{ij} 进行了几轮计算。图 28—29 示出了在 70℃和 150℃重复测量 Athabasca 沥青—CH₄ 系统的误差最小化的过程。PR 状态方程和 MSRK 状态方程的结果非常吻合。这就是说临界参数是一致的。计算的 CH₄—沥青平衡特性误差较大,再加上 150℃时的 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 结果之间的偏差值说明进一步调整临界特性数据是可能的而且是必要的。150℃时 CH₄—沥青系统的 $|\Delta X_1|$ 曲线上有一段“平坦”区域,这一区域使参数调整成为可能。

由图 30,31 表 10,11 得出的 C_{ij} 值最佳拟合曲线用于 PR 状态方程计算一组 VLE 值。表 12 是一组伪二元 Athabasca 沥青—CH₄ 系统三条等温线的计算数据。表 13 是伪二元 Athabasca 沥青—CO₂ 系统在同一等温线的 VLE 值计算数据。这些计算点用于制作三相系统的三条等温线。三相系统的实验结果和计算结果之间有显著差异,尤其在较高压力下。三相数据 $|\Delta P\%|$ 平均误差变化范围从 13%到 15%。

在 C_{ij} 搜寻过程中得出几个重要的观测结果:

图 10、11 显示出 CO₂—Athabasca 沥青系统 C_{ij} 优化值。 $|\Delta X_1|$ 最小值和 $|\Delta P\%|$ 最小值收敛于同一值。对 CO₂—Athabasca 沥青系统,100℃时 C_{ij} 优化值是一较小值(图 12,13),但 $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 两方法的结果吻合很好。150℃时(图 14,15)可得到相同的观测值(低 C_{ij} , $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 吻合)。注意:随着温度升高误差值减小。对于 MSRK 方程(图 16—18)观察到 C_{ij} 随温度增加而减小, $|\Delta X_1|$ 和 $|\Delta P\%|$ 值相吻合,以及误差随温度的增加而减小的结论。

C_{ij} 温度曲线(图 30 和 32),表明 C_{ij} 温度曲线为线性曲线。MSRK 方程曲线稍有偏移,但与 PR 方程曲线的斜率相同。两种计算的相同结果说明参数计算在热力学上是一致的。并且实验数据质量很好。

CH₄—Athabasca 沥青系统求 C_{ij} 的结果显示了某些相似性,但也有一些显著差异。 C_{ij} 值与最小误差曲线图表明,在所研究的温度范围内 C_{ij} 呈负值并随温度增加负值增大,并且温度增加误差增大。(图 19—24)。也可看出 $|\Delta X_1|$ 方法得出的 C_{ij} 值与 $|\Delta P\%|$ 方法得出的 C_{ij} 值的差异也随温度增加而增加。

使用 MSRK 方程求 C_{ij} 值得出了一组相同的观测结果(图 25—27)。此系统(图 31 和 33) C_{ij} 值温度曲线也示出了线性关系与 PR 和 MSRK 状态方程相似的斜率。150℃时 $|\Delta X_1|$ 平均值和 $|\Delta P\%|$ 平均误差数值的不一致性说明此系统对特征参数的小误差更为敏感。图 26—29 得出的重复数据组证实了实验数据的高质量。

VLE 的预测有三个重要结论。第一,使用同一组特征参数,两个状态方程可以获得相近的结果,这说明特征参数的有效性和热力学的一致性。第二,CH₄—Athabasca 沥青和 CO₂—Athabasca 沥青系统,温度对 C_{ij} 都成线性函数关系,提供了 70℃—150℃范围其它等温线预测 VLE 特性的方法。第三,三相系统实验结果和计算结果的显著差异说明,为了能对多组分含沥青系统作出可靠的预测,需要更深入地了解含沥青热力学系统。

六、总结

1)Fu 等人(1)定义的 Athabasca 沥青临界参数在 Athabasca 沥青—CO₂ 系统使用 PR 或 MSRK 状态方程都获得了与实验数据的最佳拟合。而对 Athabasca 沥青—CH₄ 系统同一组临界参数用 PR 和 MSRK 状态方程结果吻合但有较大的误差。计算数据的吻合一致说明 Fu 等

人的特征参数对二元含沥青系统是适用的。

2) 温度和 C_{ij} 值的线性关系可以对 CH_4 —Athabasca 沥青和 CO_2 —Athabasca 沥青系统 70°C — 150°C 范围内的 VLE 特性进行新等温线的预测。用 Peng—Robinson 方程计算:

对于 CO_2 —Athabasca 沥青系统:

$$C_{ij} = 0.12473 - 0.0008062 * T$$

对于 CH_4 —Athabasca 沥青系统:

$$C_{ij} = 0.03494 - 0.001242 * T$$

3) 伪二相计算时, 可以通过调整一个或多个沥青临界参数来提高 150°C Athabasca 沥青— CH_4 系统的精确度。 $|\Delta X_i|$ 对 C_{ij} 曲线图“平缓”区域的存在提供了改变干扰系数余地。含甲烷系统对临界系数的反应比含 CO_2 系统更敏感。

4. 三相系统计算表明实验值的差异显著。这可能由于含沥青系统的复杂性所致。在有效预测三相系统之前, 对复杂的含沥青系统还有更多的工作要做。

七、建议

为了扩大 VLE 预测方法的使用范围, 需要对含沥青三相系统, 包括含水系统的热力学特性作更多的工作。

译者: 黄玉珍

校者: 刘明星

复校: 曾米兰

表 1 Athabasca 沥青数据表

样 品 号: 82-02
 油 田: Athabasca
 地层层组: McMurray
 井 位: 23-92-10-W4M
 开采方案: 溶剂提取
 采样日期: 1982 至 1985
 深 度: 从含油砂层
 资 源: Suncor 公司和 ARC
 样品描述: 样品甲苯含量小于 1%

82-02

API 比重:	8.9	
密度:	1.008	
粘度:	15°C	1010000
	25°C	265000
	60°C	4620
	100°C	114
Ramsbottom 石炭:	9.8	
残渣(重量%):		
灰(重量%):	—	
碳(wt%):	83.48	
氢(wt%):	10.30	
氮(wt%):	0.47	
硫(wt%):	4.20	
氯(wt%):	1.50	
钒(PPm 重量):	204.2	
镍(PPm 重量):	81.0	
沥青烯(重量%):	17.2	
酸值:	2.72	

模拟蒸馏:

初沸点: 123℃

中断温度	累积体积	中断温度	累积体积
150	1.0	175	1.7
195	2.5	225	3.2
250	4.0	275	4.8
300	7.5	325	10.5
343	14.0	375	21.0
400	26.0	425	29.5
450	40.0	475	47.5
500	58.0	524	69.0

残渣: 100%

表 2 甲烷分析

下面是 NO. 133 一组分析结果, 柱体已充满。结果的单位是 PPm(V/V)

氧	3PPm
氮	7
CO ₂	ND10
乙烷	ND1
乙烯	ND1
丙烷	ND2
丙烯	ND2
水	ND1

ND=没测量, 小于

表 3 CO₂ 分析

下面是 NO. 135 一组分析结果, 柱体已充满, 结果的单位是 PPm(V/V)。

氧	2PPm
---	------

氮	17
甲烷	11
一氧化碳	0.7
氮	ND1
氢	ND1
水	1

ND—没测量,小于

表 4 伪两相系统 CO₂Athabasca 沥青实验 VLE 值与计算 VLE 值的比较

温度 (°K)	压力 (MPa)	组别	Xi 指数	MSRK Xi 计算值	PR 同相 Xi 计算值
343.15	3.263	1	0.2524	0.2452	0.2477
		2	0.7476	0.7548	0.7523
	6.138	1	0.4109	0.4051	0.4076
		2	0.5891	0.5949	0.5924
	9.133	1	0.5242	0.5244	0.5261
		2	0.4758	0.4756	0.4739
	11.209	1	0.5767	0.5823	0.5835
		2	0.4233	0.4177	0.4165
	2.372	1	0.1601	0.1576	0.1572
		2	0.8399	0.8424	0.8428
373.15	4.923	1	0.2987	0.2971	0.2957
		2	0.7013	0.7029	0.4073
	6.894	1	0.3855	0.3865	0.3840
		2	0.6145	0.6135	0.6160
	9.043	1	0.4631	0.4681	0.4645
		2	0.5369	0.5319	0.5355
	11.103	1	0.5231	0.5239	0.5281

		2	0.4769	0.4671	0.4719
423.15	2.659	1	0.1440	0.1423	0.1418
		2	0.8560	0.8577	0.8582
	4.688	1	0.2374	0.2362	0.2352
		2	0.7626	0.7638	0.7648
	6.885	1	0.3247	0.3255	0.3239
		2	0.6753	0.6745	0.6761
	8.704	1	0.3876	0.3907	0.3886
		2	0.6124	0.6093	0.6114
	10.594	1	0.4448	0.4510	0.4485
		2	0.5552	0.5490	0.5515

表 5 伪两相系统 CH_4 —Athabasca 沥青实验室 VLE 值与计算 VLE 值比较

温度 (°K)	压力 (MPa)	组别	X_i 指数	MSRK X_i 计算值	PR 同相 X_i 计算值
343.15	2.348	1	0.0997	0.0903	0.0894
		2	0.9003	0.9097	0.9106
	4.414	1	0.1607	0.1608	0.1587
		2	0.8393	0.8392	0.8413
	6.654	1	0.2260	0.2289	0.2255
		2	0.7740	0.7711	0.7745
	8.579	1	0.2619	0.2813	0.2768
		2	0.7381	0.7187	0.7232
423.15	2.443	1	0.0994	0.0870	0.0848
		2	0.9006	0.9130	0.9152
	4.459	1	0.1525	0.1525	0.1486
		2	0.8475	0.8475	0.8514
	6.424	1	0.1951	0.2114	0.2060
		2	0.8049	0.7886	0.7940
	2.053	1	0.0866	0.0737	0.0718
		2	0.9134	0.9263	0.9282
	5.225	1	0.1748	0.1760	0.1715
		2	0.8252	0.8240	0.8285

8.623	1	0.2463	0.2721	0.2652
	2	0.7537	0.7279	0.7348

表 6 仿两相系统 CH_4 —Athabasca 沥青实验室 VLE 值与计算 VLE 值的比较,新数据

温度	压力	组别	X_i 指数	PR 同相 X_i 计算值
(°K)	(MPa)			
343.15	2.348	1	0.0997	0.0899
		2	0.9003	0.9101
	4.414	1	0.1607	0.1598
		2	0.8393	0.8402
	6.654	1	0.2260	0.2269
		2	0.7740	0.7731
	8.579	1	0.2619	0.2785
		2	0.7381	0.7215
	2.443	1	0.0994	0.0863
		2	0.9006	0.9137
423.15	4.459	1	0.1525	0.1513
		2	0.8475	0.8487
	6.424	1	0.1951	0.2087
		2	0.8049	0.7903
	2.053	1	0.0866	0.0731
		2	0.9134	0.9269
	5.225	1	0.1748	0.1746
		2	0.8252	0.8254
	8.623	1	0.2463	0.2699
		2	0.7537	0.7301

表 7 343.15°K 时三相系统 CH_4 — CO_2 —Athabasca 沥青实测的 VLE 组分

压力, MPa	指数(a)	X_i (b)	Y_i (b)
3.263	1	0.0681	0.5750
	2	0.1145	0.4250
	3	0.8174	0.0
6.138	1	0.1470	0.7960
	2	0.0863	0.2040
	3	0.7667	0.0
9.133	1	0.1798	0.7280
	2	0.1318	0.2720
	3	0.6884	0.0

11.209	1	0.1561	0.5080
	2	0.2635	0.4920
	3	0.5804	0.0

(a) 1=甲烷; 2=CO₂; 3=Athabasca 沥青

(b) X_i=i 液体克分子指数

Y_i=i 蒸汽克分子指数

表 8 373.15°K 时三相系统 CH₄-CO₂-Athabasca 沥青实测的 VLE 组分

压力, MPa	指数(a)	X _i (b)	Y _i (b)
2.372	1	0.0573	0.7406
	2	0.0425	0.2594
	3	0.9002	0.0
4.923	1	0.811	0.5920
	2	0.1108	0.4080
	3	0.8081	0.0
6.894	1	0.1177	0.6248
	2	0.1406	0.3752
	3	0.7417	0.0
9.043	1	0.1384	0.6400
	2	0.1561	0.3600
	3	0.7055	0.0
11.103	1	0.1565	0.5520
	2	0.2279	0.4480
	3	0.6156	0.0

(a) 1=甲烷; 2=CO₂; 3=Athabasca 沥青

(b) X_i=i 液体克分子指数

Y_i=i 蒸汽克分子指数

表 9 423.15°K 时三相系统 CH₄-CO₂-Athabasca 沥青实测的 VLE 组分

压力, MPa	指数(a)	X _i (b)	Y _i (b)
2.659	1	0.0612	0.6951
	2	0.0454	0.3049
	3	0.8934	0.0
4.688	1	0.0993	0.7264
	2	0.0644	0.2736
	3	0.8363	0.0
6.885	1	0.1465	0.7815
	2	0.0704	0.2185
	3	0.7831	0.0

8.704	1	0.1703	0.7410
	2	0.0948	0.2590
	3	0.7349	0.0
10.594	1	0.1454	0.5113
	2	0.1896	0.4837
	3	0.6650	0.0
10.594	1	0.1503	0.5345
	2	0.1863	0.4655
	3	0.6634	0.0

(a) 1=甲烷; 2=CO₂; 3=Athabasca 沥青

() X_i=i 流体克分子指数

Y_i=i 蒸汽克分子指数

表 10 用于 VLE 计算的 Peng—Robinson 状态方程的二元反应系数

系统	温度	C _{ij}	最小平均误差
甲烷—Athabasca	343.15	-0.0505	ΔX _i =0.060
		-0.0525	ΔP* =0.0500
沥青	423.15	-0.1490	ΔX _i =0.0111
		-0.1550	ΔP* =0.0902
甲烷—Athabasca 沥青(新数据)	343.15	-0.0510	ΔX _i =0.0069
		-0.0520	ΔP* =0.0509
	423.15	-0.1460	ΔX _i =0.0111
		-0.1560	ΔP* =0.0902
CO ₂ —Athabasca 沥青	343.15	0.0678	ΔX _i =0.0038
		0.0678	ΔP* =0.0155
	373.15	0.0455	ΔX _i =0.0027
		0.0449	ΔP* =0.0107
	423.15	0.0048	ΔX _i =0.0019
		0.0035	ΔP* =0.0089

表 11 MSRK 状态方程二元反应系数

系统	温度(°K)	K _{ij}	最小平均误差
甲烷—Athabasca 沥青	343.15	-0.0630	ΔX _i =0.0073
		-0.0657	ΔP* =0.0529
	423.15	-0.1640	ΔX _i =0.0110
CO ₂ —Athabasca 沥青	343.15	-0.1735	ΔP* =0.0902
		0.0792	ΔX _i =0.0047
	373.15	0.0792	ΔP* =0.0191
		0.0564	ΔX _i =0.0033