

重质油及渣油加工的 几个基础理论问题

杨光华 著



A0967232

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

重质油及渣油加工的几个基础理论问题/杨光华著. —东营:石油大学出版社, 2001. 9

ISBN 7-5636-1185-1

I. 重… II. 杨… III. ①重油-石油炼制-生产工艺-理论研究②渣油-石油炼制-生产工艺-理论研究 IV. TE626.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 070197 号

重质油及渣油加工的几个基础理论问题

杨光华 著

责任编辑:周洁韶 邓春生

出版者:石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱: upcpress@mail.hdpu.edu.cn

印刷者:青岛胶南印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本: 787×1092 1/16 印张 14 字数: 262 千字

版 次: 2001 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—800 册

定 价: 86.00 元

内 容 提 要

本专著是集辑近 10 多年来在我国石油大学重质油加工国家重点实验室内进行的有关重质油加工的基础理论方面的研究成果而成的。它包括了以下诸方面的研究内容:我国重质油和渣油的物性组成与结构;渣油在热反应、催化裂化反应和加氢裂化反应中的化学反应机理和反应动力学;渣油溶剂脱沥青过程的机理和所得产品——沥青的性质。本书始终把这些重质油加工过程的基础理论方面的讨论放在中心位置。同时也介绍了这方面的珍贵的部分实验数据和该实验室提出的先进的实验方法和加工方法。为迎接第 15 届世界石油大会(1997 年)在我国的召开,本书的主要内容已经以英文版付印出版。在做了重大修订和补充最新获得的重要内容后,现在以中文版出版。本书将对从事重质油及渣油加工的科技研究人员、生产技术人员、高等学校的教师和研究生有所帮助。

前言

本书是石油大学有关重质油加工基础理论方面的研究成果的汇集、整理和提炼。自 80 年代以来,我开始意识到重质油加工对我国的重要性,因为中国的多数原油都偏重,减压渣油收率高达 40%~50%,而运输燃料和石油化工原料对轻质油品的需求却在迅速增长。我的不少同事,如林世雄教授、王光坝教授、施侠教授、史济群教授和贾宽和教授都与我有同感。我们决定在石油大学内启动一项关于重质油、渣油研究的长期计划。这一计划经过多年的努力逐渐现出眉目,它的研究内容包含我国重质油和渣油的物性、组成和特征化方法,渣油的热转化、催化裂化和加氢裂化,重质油和渣油的溶剂处理以及沥青的应用。

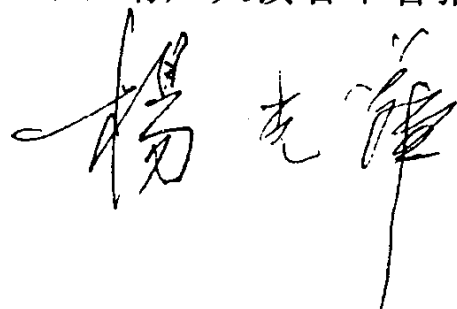
整个工作是从对催化裂化中结焦催化剂再生研究开始的,因为它比较容易在高等学校里启动。当我们得到的人力与物力方面的支持增大时,这一计划就扩大到涵盖了上述的全部内容。到了 80 年代的中期至 90 年代初,在石油大学内就形成了一个专门的研究机构——重质油研究所,它是国家重质油研究室或重质油加工国家重点实验室的前身。我被任命为该所的第一任所长和国家重点实验室的学术委员会主任,林世雄教授被任命为国家重点实验室的主任。

经过近 15 年全体同仁和研究生的努力,珍贵的实验结果和理论分析不断积累,这使我想应该把这些宝贵的材料归纳和提炼成一本专著,以使后继者在从事这一领域的研究时有一个坚实的起点。

在本书撰稿期间,适值第 15 届世界石油大会(1997)在北京召开,为迎接这一盛会,促进石油科技的国际交流,已将本书的主要内容于 1997 年 8 月以英文版出版发行。在补充了油品物性关联,重质油和减压渣油的组成、结构和相态,重质油和减压渣油热转化及石油沥青等四章后,现在以中文版出版发行。

由于本书是以论述石油大学重质油加工国家重点实验室在基础理论方面的研究结果为出发点的,对于国内外同行在这方面的的工作,除了为说明我们的成果而有所引用外,其他的一般不作涉及,敬请读者谅解。

本书由于出版匆促,以及本人水平有限,难免有谬误之处,请广大读者不吝指正。



目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	6
第 2 章 石油物性	7
2.1 相对分子质量	9
2.2 石油馏分的气-液平衡	13
2.3 石油馏分的临界性质	21
2.4 石油馏分的表面张力	32
2.5 用于石油物性预测的基团贡献法	37
参考文献	42
第 3 章 重质油和渣油的特征化新方法 with 重质油和渣油的评价	44
3.1 原油的实沸点蒸馏和 UOP 特性因数	45
3.2 渣油的超临界流体萃取分馏	46
3.3 特性因数 K_H	56
参考文献	60
第 4 章 重质油和减压渣油的组成、结构与相态	61
4.1 重质油和减压渣油的组成与结构	62
4.2 重质油和减压渣油的相态	68
4.3 减压渣油在热作用下的相分离	69
参考文献	70
第 5 章 重质油和减压渣油的热转化	71
5.1 渣油全馏分的热转化反应	72
5.2 渣油窄馏分的热转化反应	74
5.3 重质油和减压渣油在接触剂上的高温热转化	80
参考文献	81
第 6 章 裂化催化剂上焦炭的生成和结焦催化剂的再生	82
第一部分 渣油催化裂化催化剂上焦炭的生成	84
6.1 裂化催化剂上焦炭的生成	84
6.2 裂化催化剂上结焦的物理化学模型和数学模型	88
第二部分 结焦失活后裂化催化剂的再生	94
6.3 焦炭中碳的燃烧机理和动力学	94

6.4	焦炭中氢的燃烧机理和动力学	99
6.5	催化剂上燃碳和燃氢的反应速度比较	103
6.6	影响再生速度的因素	104
	参考文献	105
第7章	渣油催化裂化的应用基础理论	108
7.1	RFCC 装置中裂化反应前期过程	110
7.2	RFCC 的化学行为	123
7.3	渣油催化裂化反应-再生系统的实际运转性能	126
7.4	催化裂化提升管反应器-再生器的模拟	130
	符号表	156
	参考文献	161
第8章	重质油及减压渣油的加氢过程	164
8.1	减压渣油悬浮床加氢裂化的催化剂筛选	166
8.2	分散型钼催化剂存在下影响渣油加氢反应的因素	169
8.3	钼催化剂作用下,孤岛减压渣油加氢裂化的反应动力学和机理 ...	171
8.4	渣油加氢脱硫与流化催化裂化组合工艺的可行性	175
	参考文献	177
第9章	渣油的超临界流体脱沥青	178
9.1	渣油的超临界流体萃取分离的热力学	179
9.2	超临界溶剂萃取由实验室到工业化规模的开发	186
	参考文献	191
第10章	石油沥青	192
10.1	石油沥青的使用性能与化学结构的关系	193
10.2	石油沥青抗老化性能和老化机理	198
10.3	石油沥青中蜡的作用和分布	201
	参考文献	206
后记		214

第 1 章 绪 论

***** * 主 要 内 容 * *****

★中国重质油及渣油的组成特点

★重质油轻质化的趋势

★本书的内容总顾

中国原油一般偏重。这点可以从表 1-1^[1]所示的几种主要的国产原油的实沸点蒸馏(TBP)数据看出。表中列举的国产原油中,除新疆原油外, $>500^{\circ}\text{C}$ 的减压渣油所占比例一般均在 40% 以上,它们都需要进一步的轻质化处理。

表 1-1 几种国产原油的实沸点蒸馏数据(质量分数/%)

馏分	大庆	胜利	孤岛	辽河	华北	中原	新疆
$<200^{\circ}\text{C}$	11.5	7.6	6.1	9.4	6.1	19.4	15.4
$<350^{\circ}\text{C}$	31.2	25.1	21.0	30.9	26.0	44.5	41.4
$<500^{\circ}\text{C}$	57.2	52.6	48.2	60.1	60.9	67.7	70.3

幸运的是,虽然减压渣油在全部原油中占有很大的比例,但它们都表现出适合二次加工的特性,这一点可以从表 1-2~1-4 的数据中看出。在这些表中还列举阿拉伯轻质原油的数据作为比较。

表 1-2 减压渣油的元素组成

原油	渣油产率 ω /%	氢碳比 $N_{\text{H}}/N_{\text{C}}$	硫含量 ω_{S} /%	氮含量 ω_{N} /%	镍含量 ω_{Ni} /($\mu\text{g/g}$)
大庆	42.8	1.74	0.41	0.53	8.5
胜利	42.4	1.63	1.95	0.92	47
中原	32.2	1.61	1.18	0.60	15
孤岛	51.8	1.49	2.86	1.18	35
单家寺	65.6	1.50	0.87	1.42	67
高升	64.1	1.60	0.77	1.19	144
阿拉伯	—	1.44	3.93	0.22	14

表 1-3 几种减压渣油的 SARA 组成(质量分数/%)

原油	饱和分	芳香分	胶质	C_{7-} 沥青质
大庆	40.8	32.2	26.9	<0.1
胜利	19.5	32.4	47.9	0.2
中原	23.6	31.6	44.6	0.2
孤岛	15.7	33.0	48.5	2.8
单家寺	17.1	27.0	53.5	2.4
高升	22.6	26.1	50.8	0.2
阿拉伯	21.0	54.7	18.5	5.8

表 1-4 几种减压渣油的结构参数

原 油	C_A	C_N	C_P	R_T	R_A	$L^{\circ} \text{①}$
大 庆	0.16	0.11	0.73	5.2	3.0	6.6
胜 利	0.22	0.17	0.61	6.3	3.2	4.7
中 原	0.23	0.16	0.61	7.1	4.0	/
孤 岛	0.29	0.23	0.48	9.2	4.9	3.7

① L° —— 平均链长。

表 1-2~1-4 的数据表明,和进口原油生产的减压渣油相比,国产原油的减压渣油中含有更多的饱和烃、相对少的芳烃和较多的胶质,其氢碳含量比(含量以摩尔分数计,以下均简称氢碳比,以 N_H/N_C 表示)值比较高,而沥青质含量则显著的低。把它们不利于轻质化的因素,以及氮含量和镍含量高等因素都考虑进去,无论是采用催化加工还是非催化加工,国产减压渣油肯定比进口原油的渣油更适于二次加工。

中国也是重质原油(或称稠油)的生产大国,每年生产的 API 度小于 20 的重质稠油约 1 千万吨。中国稠油的一个很大特征就是它的轻质油含量比国外稠油的低。图 1-1 显示了国产稠油和国外稠油的实沸点曲线。如果也用 $>500^{\circ}\text{C}$ 馏分含量来定量地估计减压渣油产率的话,那么国产稠油生产的减压渣油所占的比例将达 55%~65%,而国外稠油的相应馏分的含量只有 20%~30%。

随着我国经济迅速发展,对轻质油品的需求量迅速增长,许多渣油轻质化过程的开发和应用在我国也得以迅速展开,其中有沿着“脱碳”方向的,也有沿着“加氢”方向的,多数是自主开发,也有引用国外技术的。在对本实验室的重质油加工基础理论研究工作作充分的介绍之前,有必要对国内当前重质油加工技术的发展动向作一回顾。

重质油轻质化的过程可以归纳为五个方向:

(1) 渣油减粘或称轻度热裂化过程

其目的是制取船用燃料油或锅炉燃料油。在重质渣油的热转化过

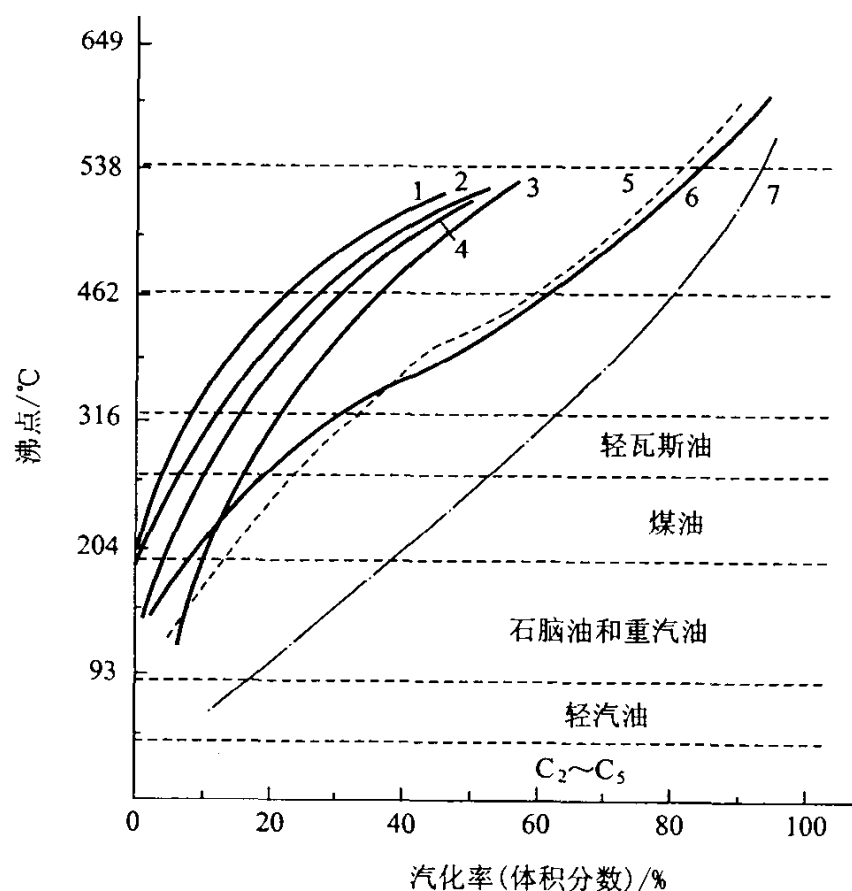


图 1-1 部分国产和国外稠油实沸点蒸馏曲线

1—乌鲁木齐; 2—羊三木; 3—孤岛; 4—孤东 1-19;
5—日落中途; 6—克特峡谷; 7—北坡

程方面,在我国曾使用过上行式转化反应器,实践证明其效果是成功的。

(2) 重质渣油的催化裂化(RFCC)

我国减压渣油比较容易催化裂化。它们几乎不含有戊烷不溶物,而庚烷不溶物含量也很低。因此,在考虑如何提高我国大庆原油的加工深度时,首先想到的就是把减压渣油的一部分混兑到减压瓦斯油(有时也称为减压蜡油,简记为 VGO)中,作为流化催化裂化的原料,发现效果很好。其后就出现了把全部减压渣油都兑入减压瓦斯油的做法,效果依然不错。后来这一实践就被延伸至其他原油的减压渣油上,当然随原料渣油的特性不同,混兑的比例有所减少。这一提高加工深度的方法后来几乎成为全国各个大炼油厂都采用的方法。对特别重的重质原油,在 80 年代也开发出了一种两段催化裂化的过程,第一段对特重的重质原油使用一种低裂化活性的脱金属和脱碳的接触剂,第二段将来自第一段的经过预处理的原料催化裂化成轻质产品。我国自行开发的两段催化裂化工艺目前尚处于半工业化阶段。

(3) 加氢过程

从产品质量和液体产品收率来看,加氢过程是重质油轻质化的首选过程。但由于制氢的成本太高和高压设备造价昂贵,加氢过程,特别是高压下的加氢裂化过程,在我国炼油厂的装置构成中往往采用不多。但进入 90 年代以来,由于环境法规对油品质量要求严格和原油品质的日益重质化、劣质化,加氢工艺变为不得不采用的加工手段。目前,我国已有两类加氢过程在炼油厂中投入使用并获得成功,它们采用了我国的以及引进的技术。一类是在镇海炼化公司和齐鲁石化公司炼油厂采用的加氢裂化装置,它们用减压瓦斯油或减压渣油作原料。作为这一技术的核心设备——加氢裂化反应器,既有本国制造的,也有引进外国的。另一类是缓和加氢裂化(MHC),目的是为乙烯生产装置提供原料石脑油及为催化裂化装置提供原料油。MHC 的原料可以是各种来源的减压瓦斯油,如从胜利原油或孤岛原油得到的重瓦斯油。

(4) 重质油脱沥青

从前面的分析可以看出,多数中国原油的渣油很适于用常规的炼制方法,特别是催化裂化方法来处理。因此,催化裂化装置成了我国炼油厂装置构成中的核心装置,我国也成为了世界上催化裂化装置生产能力最大的国家。再从另一方面看,我国已证实的所有烃类资源中,油气比很高,达 10 : 1,这与国外的油气比 1 : 1 有很大的差别。虽然天然气的发现量近几年来迅速增加,但这一总体比例还没有重大改变,因此作为廉价氢的主要来源的天然气的相对不足,就成为我国石油化工规划设计人员在考虑是否采用高耗氢的加氢过程作为重质油轻质化的最佳途径时的一个重要因素。同时我们也注意到,在我国经济快速发展中存在一个很大的建筑沥青和道路沥青的市场。减压渣油的溶剂脱沥青过程,一方面能生产出催化裂化和加氢裂化的原料,另一方面又能生产出合格的建筑沥青和道路沥青,因

此不失为一个合理的选择。对这一过程,目前在我国的发展有两条途径:一是使用常规的溶剂脱沥青来加工减压渣油,再在超临界条件下回收溶剂;二是用戊烷作溶剂来脱沥青,其萃取及溶剂回收都在戊烷溶剂的超临界条件下进行,这一途径在石油大学胜华炼油厂已试运转过,证明是成功的。

(5) 组合工艺

各种重质油轻质化过程能够组合起来达到优化的目的。如图 1-2 就是把脱沥青过程与催化裂化过程组合起来的工艺过程。

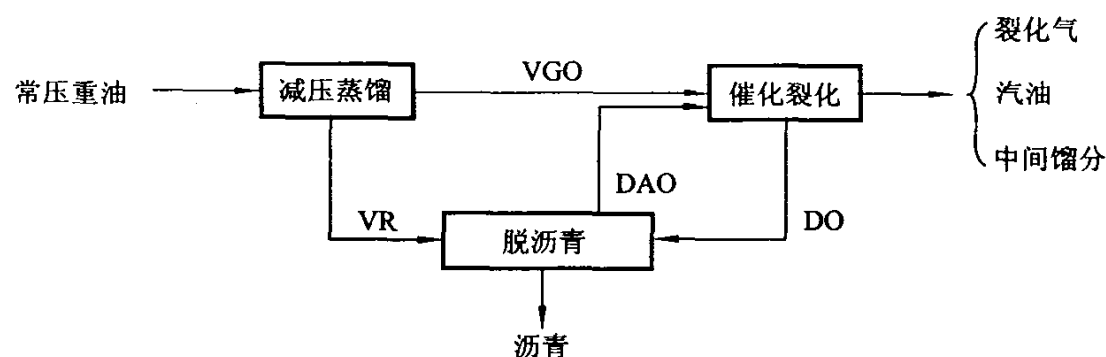


图 1-2 脱沥青与催化裂化组合工艺

图中常压重油经减压蒸馏得到催化裂化原料——减压瓦斯油,而减压渣油(VR)则去脱沥青装置制取脱沥青油(DAO)和沥青。催化裂化装置排出的澄清油(DO)重新回到脱沥青装置,这样一方面可以增加催化裂化进料——脱沥青油的收率,另一方面抽余油在脱沥青装置中与沥青自然混合,又可以提高沥青的品质。

图 1-3 是一个减压渣油加氢脱硫(VRDS)与催化裂化(FCC)的组合工艺的简要流程图。原油经过常减压蒸馏得到减压瓦斯油及减压渣油。前者是 FCC 的进料,后者将进入 VRDS,由 VRDS 生产出的轻馏分油将和原油蒸馏与催化裂化所产生的轻馏分油经过精制混兑后成为产品。而由 VRDS 产生的加氢尾油由于中国原油的特征可以和直馏的减压瓦斯油混合作为 FCC 的混合进料,这样就大大地提高了整个组合装置的加工深度,从而也就提高了它的经济性。

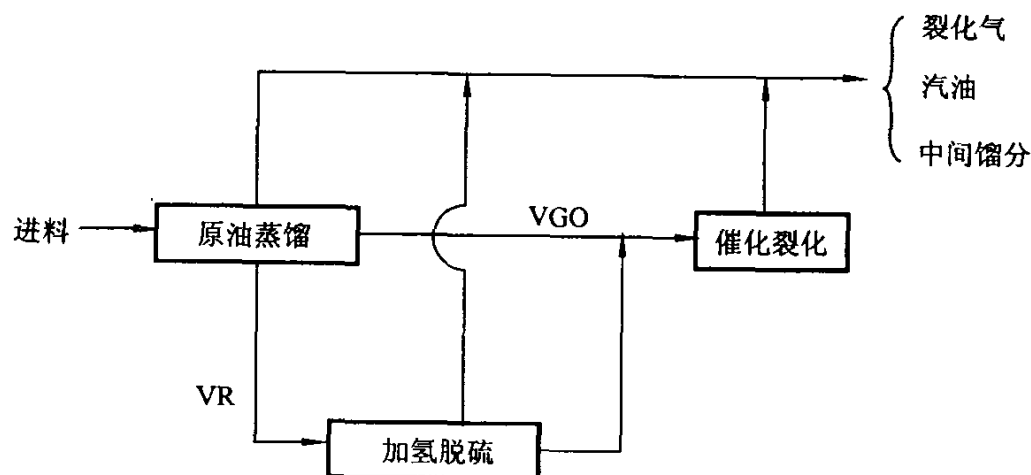


图 1-3 减压渣油加氢脱硫与流化催化裂化组合工艺

石油大学的重质油加工的研究工作,从重质油研究所创建开始,其间经历了

国家重质油研究室阶段,及至后来又发展成为重质油加工国家重点实验室,这是石油炼制学科里一个志同道合的群体团结协作、长期努力的结果。我们共同的认识是高等学校内的研究应该侧重于基本理论的研究。因此,对现代重质油加工技术的发展,我们立足于从石油化学、化学工程热力学、传递原理和化学反应工程等方面来深入探讨。我们的目标是通过种种努力,能够对重质油的加工从“知其然”阶段到“知其所以然”的阶段。这本专著将对我们沿着这个方向已经做到的以及还没做到的都做一个回答。

从以上的论点出发,本书的第2章将首先讨论石油产品的物性,它也应是我们研究石油加工的一个出发点。第3章将全面介绍本实验室开发的一整套重质油的特征化方法,因是本实验室首先提出,我们希望它能逐步为海内外同行所接受。第4章涉及的渣油的组成、结构和相态是进行渣油加工(催化的和非催化的)的另一个出发点。第5章将讨论重质油加工的热转化过程,可以说,到目前为止,重质油加工的第一步还属于热加工过程,其中有条件较为缓和的减粘工艺,也有条件苛刻的焦炭化过程等,在这里将做一叙述。第6章专门就石油催化剂的结焦和再生问题叙述本实验室的研究成果。这样就使得第7章的渣油催化裂化过程的讨论比较清楚些。加氢精制过程和加氢裂化过程是石油炼制行业里颇受重视的加工手段,随着环境对燃料质量要求的日趋严厉以及社会对轻质油品需求的急剧增加,将起着日益重要的作用,在本书的第8章中将结合我国原油的特点和资源条件来讨论本实验室在这方面所做的工作。本书的第9章将集中介绍本实验室开发的脱沥青过程,其他的脱沥青过程就不予赘述。第10章将专门介绍作为石油加工重要产品之一的沥青。

参 考 文 献

- 1 侯祥麟. 中国炼油技术. 北京:中国石化出版社,1991 年
- 2 Yang Guanghua, Gao Jinsen. Characteristics and Upgrading Technologies of Chinese Heavy Oils. Proceedings of UNITAR International Conference on Heavy Oils and Tar Sands, Feb. 12-17 1995, Houston Texas:329

第 2 章 石油物性

* 主 要 内 容 *

★相对分子质量、气-液平衡、临界性质、表面张力

★石油物性的预测——基团贡献法

石油物性的测定是认识石油的起点。由于石油是一种大容量、大吨位的战略物资,在勘探、开采、储存、运输和转化中都必须及时地、准确地、精确地掌握石油及其产品的物性。举个例子来说,一个载重 10 万吨的油轮,如果测定它所装载原油的相对密度误差超过万分之一,就有可能损失近 10 吨原油。石油产品多数是易燃、易爆、有毒物品,安全、防火、防爆、防毒的要求十分高。同时还应注意到,石油及其产品多数是组成复杂的混合物,它们的性质会随着外界条件的改变而发生变化,这也就增加了掌握石油物性的难度和紧迫性。

在解放初期,我国石油物性的数据都是沿用西方发达国家和前苏联的石油物性测定方法取得的;对设计、规划所需的物性关联,产品使用规范也大都取自于他们的通用方法和数据。

随着我国原油的产量逐年增加,我们对它的认识也越来越深入,逐渐发现我国原油的物性和化学组成有其独特之处,我国的多数原油又属于陆相生油,由此对西方的有关石油物性测定的诸多方法和结论是否适用于我国原油提出了疑问。

70 年代末,在石油大学内,周佩正、寿德清、向正为等就开始对中国原油物性进行研究,这是一个可喜的开始。80 年代初期,中国石油化工总公司(SINOPEC)在浙江大学、石油大学、华东化工学院(华东理工大学的前身)三所大学里启动了一项关于石油物性测定和关联的研究计划。三所大学协调一致,分工合作。分工大致如下:石油大学重点在油品气-液平衡常数、临界参数和表面张力以及其他基础物性,共 12 种的测定和关联^[1]上,这些工作主要在重质油加工国家重点实验室里完成;浙江大学的主要方面则是石油馏分热性质的测定和关联,由浙江大学的石油烃类热力学物性研究室完成;华东化工学院的重点在气-液平衡的测定、实沸点曲线和闪蒸曲线以及石油馏分其馏程曲线换算方法的研究上,主要由华东化工学院的石油加工研究所完成。

经过以上三个单位 10 多年的努力,在我国已经形成了一支石油物性研究队伍,完成了我国多数有代表性的原油及二次加工油品的物性测定,提出了很多成功的关联方法。在本章里将只对石油大学所承担的工作部分加以介绍,也仅局限于对这些物性的测定方法、所取得的数据举例和关联公式加以表述。至于本项工作的全部数据,由于篇幅过大只能在以后的专门图表集上发表;在测定方法上也只介绍一些特殊的方法,对于已有国家标准的,只列出标准的序号和参考文献,请读者自行查阅。

由于重质油结构组成本身的复杂性和它们在高温下易于分解的特点,带来了

它们物性测定,特别是高温下物性测定的艰巨性,使直接测定重质油物性受到许多限制,因此,目前重质油物性数据的测定多是由轻质油的物性测定出发,逐渐延伸到大分子的重质油物性测定来完成的,读者从本章所介绍的物性研究中可以看出这一点。

2.1 相对分子质量

油品的相对分子质量(也称分子量)的测定一般采用冰点下降法,在苯的稀溶液中出现微晶的油样时改用蒸气压渗透法(Vapor Pressure Osmosis,简称 VPO 法),所用的仪器为 KNAUER 相对分子质量测定仪。

2.1.1 实测相对分子质量举例

本实验室的寿德清、向正为、王从岗等对国内 15 种原油和二次加工馏分油进行了相对分子质量的测定。油样的来源见表 2-1-1。

表 2-1-1 石油大学所测油样的来源

序 号	油 样 名 称	取样时间	取 样 地 点
1	大庆原油	1981.10	上海炼油厂脱盐脱水装置出口
2	胜利原油	1981.10	胜利炼油厂脱盐脱水装置出口
3	任丘原油	1982.1	鲁沪输油管道临盘转油站
4	大港原油	1982.2	大港油田
5	孤岛原油	1982.3	华东石油学院胜华炼油厂脱盐脱水装置出口
6	羊三木原油	1982.2	大港油田炼油厂
7	辽河原油	1989.12	锦西石油五厂
8	新疆九区稠油	1992.8	克拉玛依炼油厂
9	大庆催化裂化馏分油	1983.4	上海炼油厂催化裂化装置
10	大庆重整生成油	1983.4	上海炼油厂重整装置
11	大庆重整抽余油	1983.4	上海炼油厂重整装置
12	胜利催化裂化馏分油	1983.4	胜利炼油厂联合装置催化裂化车间
13	胜利焦化馏分油	1983.4	胜利炼油厂联合装置焦化车间
14	胜利重整生成油	1983.4	胜利炼油厂重整装置
15	胜利重整抽余油	1983.4	胜利炼油厂重整装置

实测了 8 种原油的共 240 组直馏馏分和 7 种原油的共 102 组二次加工馏分油

的相对分子质量,部分实测结果见表 2-1-2 和表 2-1-3。

2.1.2 关联式

寿德清、向正为等建议了以下的相对分子质量 M_r 关联式^[2, 4]:

1) 以中沸点 T_b 和 20℃ 密度 ρ 为参数的关联式

$$(1) \quad M_r = a + bT_b + cT_b^2 \quad (2-1-1)$$

仅适用于直馏馏分油。

$$(2) \quad M_r = a + bT_b + cT_b^2 \quad (2-1-2)$$

$$(3) \quad M_r = a + bT_b + cT_bK_w + d(T_bK_w)^2 + eT\rho \quad (2-1-3)$$

表 2-1-2 部分实测大庆馏分油的相对分子质量

序 号	沸点范围 / °C	中沸点 / °C	密度(20 °C)/(g/cm ³)	相对分子质量
1	34~70	52	0.666 7	74.36
2	70~80	75	0.687 9	80.23
3	80~90	85	0.703 4	85.18
4	90~100	95	0.714 2	86.54
5	100~110	105	0.721 7	94.19
6	110~120	115	0.728 5	96.79
7	120~130	125	0.734 7	98.82
8	130~140	135	0.740 6	103.34
9	140~150	145	0.746 0	110.77
10	150~160	155	0.752 7	114.52
11	160~170	165	0.758 4	116.55
12	170~180	175	0.764 8	126.93
13	320~340	330	0.832 2	266.42
14	340~350	345	0.833 8	268.09
15	350~360	355	0.834 2	286.60
16	360~370	365	0.834 2	291.44
17	370~380	375	0.835 5	306.83
18	380~390	385	0.837 7	324.48
19	390~400	395	0.840 9	335.64
20	400~410	405	0.844 4	341.55
21	410~420	415	0.846 1	361.31
22	420~430	425	0.844 6	396.00
23	465~485	475	0.869 9	402.11
24	485~495	490	0.874 7	425.31
25	350~500	425	0.858 4	370.00

表 2-1-3 部分实测胜利催化裂化馏分油相对分子质量

序 号	沸点范围 / °C	中沸点 / °C	密度(20°C)/(g/cm ³)	相对分子质量
1	340~360	350	0.907 4	296.70
2	360~380	370	0.895 7	320.61
3	380~400	390	0.886 4	325.60
4	400~420	410	0.888 6	355.80
5	420~440	430	0.901 1	380.70
6	60~200	130	0.763 5	124.56
7	200~300	250	0.882 2	201.73
8	300~360	330	0.903 3	266.80
9	360~440	400	0.889 2	335.06
10	400~440	420	0.893 1	365.08

2) 以运动粘度 ν_{100} 和 ν_{50} (或 T_b) 为参数的关联式

$$(1) \quad M_r = a \nu_{50}^b \nu_{100}^c \quad (2-1-4)$$

$$(2) \quad M_r = a \nu_{100}^b T_b^c \quad (2-1-5)$$

式中 M_r ——馏分油的相对分子质量；

T_b ——馏分油的中沸点；

K_w ——馏分油的特性因数；

ρ ——馏分油的 20°C 密度, g/cm³；

ν_{50}, ν_{100} ——分别为馏分油 50°C 和 100°C 的运动粘度, mm²/s；

a, b, c, d, e ——系数, 值见表 2-1-4。

表 2-1-4 式(2-1-1)~(2-1-5)的系数

序号	关联式	a	b	c	d	e
1	式(2-1-1)	$0.205\ 141 \times 10^3$	$-0.920\ 702$	$0.166\ 358 \times 10^{-2}$	—	—
2	式(2-1-2)	$0.166\ 787 \times 10^3$	$-0.747\ 857$	$0.149\ 503 \times 10^{-2}$	—	—
3	式(2-1-3)	$0.184\ 534 \times 10^3$	2.294 51	$-0.233\ 246$	$0.132\ 853 \times 10^{-4}$	$-0.622\ 170$
4	式(2-1-4)	$0.268\ 753 \times 10^3$	$-0.516\ 566$	1.113 25	—	—
5	式(2-1-5)	$0.220\ 870 \times 10^4$	$-0.027\ 092\ 9$	2.547 05	—	—

他们提出的关联式与本实验室的实测值以及国内其他单位的实测值相比较, 其偏差一般 $<6.0\%$, 均方差 $<7.0\%$, 详见表 2-1-5。