

石油石化职业技能培训教程

SHIYOU SHIHUA ZHIYE JINENG PEIXUN JIAOCHENG

采 油 工

CAIYOU GONG

中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心 编



石油工业出版社

石油石化职业技能培训教程

采 油 工

中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是由中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心,依据采油工职业资格等级标准,统一组织编写的《石油石化职业技能培训教程》中的一本。书中包括采油工应掌握的基础知识、专业知识及其相关知识,介绍了地质基础知识、采油工艺技术、油水井改造、设备维护保养、油水井动态分析以及综合管理知识等。

本书语言通俗易懂,理论知识重点突出,实用性和可操作性较强,是采油工职业技能培训的必备教材。

图书在版编目(CIP)数据

采油工/中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心编.
北京:石油工业出版社,2011.3
(石油石化职业技能培训教程)
ISBN 978-7-5021-7978-6

- I. 采…
- II. 中…
- III. 石油开采-技术培训-教材
- IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 163172 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523585 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:37.5

字数:958 千字

定价:60.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《石油石化职业技能培训教程》

编 委 会

主 任：孙金瑜

副主任：向守源 丁传峰

委 员(以姓氏笔画为序)：

仇国光 王子云 王奎一 申 哲 刘小明

孙春梅 纪安德 何 波 宋玉权 张建国

李世效 李孟州 李禄松 杨明亮 杨峰亭

杨静芬 哈志凌 赵宝红 商桂秋 崔贵维

职丽枫 蔡激扬

前 言

随着企业产业升级、装备技术更新改造步伐不断加快,对从业人员的素质和技能提出了新的更高要求。为适应经济发展方式转变和“四新”技术变化要求,满足员工培训、鉴定工作的需要,中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心坚持动态开发修订技能培训教材和鉴定题库制度,组织力量对“十五”期间开发的第一批职业技能培训教程中的采油工等部分从业人数多的主体工种进行了修订。

本批教程按工种编写,每个工种一本,以新修订颁发的石油石化行业职业资格等级标准为依据,内容范围与鉴定题库基本一致,与公开出版的试题集配套使用。既可用于职业技能鉴定前培训,也可用于员工岗位技术培训和自学提高。

采油工职业技能培训教程由大庆油田有限责任公司组织编写,何登龙、李军任主编,参加编写的人员有杨海波、刘丽、徐忠强、王道远、孙雨飞、裴郭慧、金科友;参加审定的人员有大庆油田有限责任公司关景华、管略、贾福林、李艳玲,辽河油田公司赵文英,大港油田公司蒋远国,长庆油田公司赵东伟、曹振峰、丁巨龙。

由于编者水平有限,书中错误、疏漏之处请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2008年6月

目 录

第一章 石油地质基础知识	(1)
第一节 石油、天然气和油田水的性质	(1)
第二节 石油、天然气的形成	(14)
第三节 储集层及盖层	(24)
第四节 构造圈闭及构造油气田	(37)
第五节 油气运移及油气藏	(46)
第六节 油气储集层的非均质性	(53)
第七节 地质时代及沉积相	(59)
第二章 地质开发基础知识	(73)
第一节 油层的确定与对比	(73)
第二节 石油地质储量计算	(77)
第三节 油田开发方案	(83)
第四节 油田开发驱动方式及井网部署	(105)
第五节 油田开发过程中的调整	(117)
第三章 采油工艺技术	(125)
第一节 油水井完井及试油	(125)
第二节 油水井井口设备结构及原理	(145)
第三节 自喷及气举采油	(151)
第四节 机械采油	(163)
第五节 油田注水	(196)
第四章 三次采油	(203)
第一节 聚合物驱油技术	(203)
第二节 表面活性剂驱油	(209)
第三节 碱性水驱油及复合体系驱油	(212)
第四节 微生物采油	(215)
第五节 热力采油	(216)
第五章 油水井改造工艺	(229)
第一节 分层注采	(229)
第二节 油水井压裂、酸化、堵水技术	(234)

第三节	油井防砂、防蜡、防气	(250)
第四节	注水井调剖与检测	(265)
第六章	油水井、计量间的操作与管理	(272)
第一节	油水井资料录取标准及内容	(272)
第二节	自喷井操作管理	(290)
第三节	抽油机井管理操作	(300)
第四节	电动潜油泵和螺杆泵管理操作	(339)
第五节	注水井操作管理	(355)
第六节	计量间设备管理操作	(367)
第七章	设备维护保养与故障处理	(376)
第一节	设备维护及保养	(376)
第二节	故障的判断与处理	(388)
第八章	仪器仪表与常用工具、用具	(412)
第一节	井站仪器仪表	(412)
第二节	常用工具、用具	(438)
第九章	油水井动态分析	(456)
第一节	动态分析的内容、方法	(456)
第二节	油田开发指标	(495)
第三节	动态监测	(506)
第四节	动态分析实例	(509)
第十章	综合管理知识	(526)
第一节	识读工艺流程图	(526)
第二节	安全生产基础知识	(533)
第三节	HSE 管理体系知识	(552)
第四节	全面质量管理的基本知识	(564)
第五节	技术培训知识	(573)
第六节	编写技术论文	(581)
第七节	编写阶段生产总结报告	(588)
参考文献	(593)

第一章 石油地质基础知识

第一节 石油、天然气和油田水的性质

石油和天然气作为一种重要的能源和战略资源,在现代社会中越来越显示其重要性,在我国国民经济建设中占有举足轻重的地位。

一、石油

石油是赋存于地下岩石孔隙、缝洞中以碳氢化合物即烃类化合物为主要成分的一种可燃有机矿产。广义上,石油是指自然界中存在的气态、液态和固态烃类化合物及少量杂质组成的混合物。狭义上,石油专指主要由各种烃类化合物组成的液态、半固态物质,与原油是同义词。原油是指从油井中开采出来的,或从地表、海底油苗中流出的,脱气后尚未加工的石油。

石油的成分十分复杂,是一种天然有机化合物的混合物。液态石油中通常溶有相当数量的气态烃和固态烃,还有极少量的悬浮物。因此,石油没有确定的化学成分和物理常数。研究石油的化学组成和物理性质,对于查明油气的生成、运移、聚集和分布规律,制定开采、加工方案,评价油品的质量等都具有非常重要的意义。

(一)石油的物理性质

油气藏中的油、气、水通常称为石油、天然气、油田水。石油的物理性质随其化学组成的不同而有明显的差异。不同性质的石油,对开发、集输、储存、加工影响较大,因此其经济评价也各不相同。

1. 地面条件下石油的物理性质

石油的物理性质包括颜色、气味、溶解性、导电性、荧光性、含蜡性、旋光性、热值、粘度和凝点等,其物理性质取决于它的化学组成和演化历史。石油没有固定的化学组成,演化史也非常复杂。不同地区、不同层位,甚至同一层位不同构造部位的石油,其物理性质也是不相同的。所以,了解石油的物理性质,不论对于认识石油的组成,分析它的变化规律,还是对油气田的勘探和开发,都具有重要的意义。

(1) 颜色。

石油的颜色变化范围很广,一般呈棕黑色、深褐色、黑绿色等,也有无色透明的。在透射光下,石油的颜色从无色透明逐渐过渡到淡黄、褐黄、淡红、棕色、黑褐色及黑色,或者介于两种颜色之间的过渡颜色。例如,四川油田川东石油为黑绿色,川中石油为黄色、深色甚至黑色;新疆克拉玛依油田的石油为褐黑色,而华北油田凝析油的颜色则为无色透明。四川黄瓜山和天津大港油田还有白色石油。一般来说,深色石油占绝大多数。石油的颜色深度往往取决于石油中胶质、沥青质的含量,胶质、沥青质含量越高,则颜色越深。一般轻质油微带黄橙色且透明,重质油多为黑色。所以,石油的颜色大致能反映石油重组分的含量。

(2) 气味。

石油通常都有明显的气味。较轻质的石油带有芳香味;浓黑的石油多带柏油味,含硫(S)、氮(N)化合物的石油有一股臭鸡蛋味。

(3)溶解性。

石油的溶解性体现在石油能溶解于多种有机溶剂,如氯仿、苯、石油醚、四氯化碳以及乙醇等。石油在有机溶剂、水和天然气中的溶解性各有特点。石油主要是各种烃类的混合物,由于烃类难溶于水,因此,石油在水中的溶解度是很低的。烷烃的溶解度最小,环烷烃稍大些,芳香烃的溶解度最大。根据石油溶解性,可简易鉴定岩石中有无微量的石油存在。石油和天然气(石油气)可互溶。若以碳数相同的烃类分子进行比较,各种成分在水中溶解度由大到小的顺序是:非烃→芳香烃→环烷烃→烷烃。除甲烷外,烃类在水中的溶解度均随其相对分子质量增大而减小。温度升高或水中溶解 CO_2 量增多,石油在水中溶解度增大,若水中含盐度增大,烃类溶解度下降。石油在水中的溶解度对认识石油初次运移时所处的物理状态是很有意义的。

(4)导电性。

石油的导电性是指石油的导电能力。石油主要由非极性碳氢化合物组成。石油及其产品具有极高的电阻率,是不良的导电物质。石油的导电性极差,石油的电阻率为 $10^9 \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$,比地层水高得多。与周围的矿化水和岩石相比较,石油的电阻率可视为无穷大。地球物理测井就是利用流体的这种导电性确定油层、气层、水层。这一特性也是电阻率测井用来判断油层的基础。

(5)荧光性。

任何物质如果吸收了外加的能量,会由于能量的增加而处于不稳定的状态,而且有放出能量的趋势。如果这些能量以光的形式放出来,就称为发光现象。石油及其大部分产品,除轻汽油和石蜡外,无论是其本身或是溶于有机溶剂中,在紫外线照射下,其中的不饱和烃及其衍生物能吸收紫外光中波长较短、能量较高的电子,随后放出可见光。这种低能量的可见光称做荧光。石油在紫外线照射下可产生荧光的性质称为石油的荧光性。即使是溶于有机溶剂中的微量石油,也能在紫外线的照射下发出荧光。

石油的荧光性与石油内各组分的含量有关,主要是多环芳香烃和非烃发光,而饱和烃则完全不发光。石油的油质组分发浅蓝色明亮的荧光,胶质组分发淡黄色半明亮的荧光,沥青质组分发褐色暗淡的荧光。石油的荧光性随石油组分而变化,不受溶剂性质的影响,而发光强度则与组分含量有关。石油的这种发光现象非常灵敏,即使溶液中含有十万分之一的石油也可发出荧光,因此在油气勘探工作中,人们利用石油的荧光性可以鉴定岩心、岩屑及钻井液中有无微量石油存在,并可粗略地确定其组分和含量。

(6)含蜡性。

石油中以溶解状态和悬浮状态存在的石蜡占石油总质量的百分数称为石油的含蜡量。含蜡量多时,石油相对密度也较大,可使井底和井筒结蜡,给油井管理增加困难。

(7)旋光性。

当偏振光通过天然石油时,石油能将偏振光的振动再旋转一定角度的能力,称为石油的旋光性。当偏振光通过石油时,偏光面会旋转一定角度,这个角度称为旋光角。石油的旋光角一般是 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 。石油具有旋光性的原因是:石油中的含氮化合物、甾烷和萜烷等生物标志化合物常具有特征性碳原子,使石油具有旋光性。

(8)热值。

热值即为发热量。石油燃烧时可产生大量的热量,是优质燃料。燃烧过程中产生热量的主要元素是碳和氢。每千克碳完全燃烧时能放出 8000J 热量,每千克氢放出的热量达 34200J,是碳发热量的 4 倍多。石油中的氢含量比煤和油页岩中氢的含量都高,因此它的热值也高,每千克可达 42000J,比烟煤高出 40% ~ 60%。

2. 地层条件下石油的物理性质

石油储集在地下储油岩层内,油层的压力和温度都比地面高得多,并且油层中的石油又总是溶解一定数量的天然气,因而地层条件下石油与地面条件下石油的物理性质大不相同。地层原油的物理性质直接影响原油在地下的储存状况和流动性能。研究油田驱动类型,确定油田开采方式,计算油田储量,选择油井工作制度等都必须有准确的地层原油物性分析资料(也称高压物性资料)作为依据。在计算油田储量和合理开发油田时,必须掌握地层条件下的石油物理性质,一般要取得原油密度和相对密度、原油粘度、原油凝点、原油收缩率、原油压缩系数、原始气油比、饱和压力以及原油体积系数等参数。

(1) 原油密度和相对密度。

原油密度是指单位体积原油的质量,单位是“千克每立方米”(kg/m³)。

原油的相对密度是指在 0.101MPa 的压力条件下,20℃ 原油的质量与同体积的 4℃ 纯水质量之比值,为无量纲量。在地层条件下,原油的相对密度与原油中溶解的天然气量、地层压力和温度有关。原油中溶解气量多者则相对密度小,溶解气量少者则相对密度大。在其他条件不变的情况下,相对密度随温度的升高、溶解天然气量增加而降低。原油的相对密度一般介于 0.75 ~ 0.98 之间,个别地区相对密度有小于 0.75 或大于 1.00 的。例如,美国加利福尼亚油田原油相对密度高达 1.01,而前苏联苏拉罕油田的原油相对密度却为 0.71。我国各油田的原油相对密度大多数介于 0.82 ~ 0.92 之间。

一般把相对密度小于 0.90 的原油称为轻质油,而相对密度大于 0.90 的原油称为重质油。不同国家和地区划分油质轻重的标准不完全统一。在一般情况下原油比水轻。相对密度小的油质好,相对密度大的油质差。原油相对密度大小取决于原油的化学成分,含烃类多的原油相对密度小,而含胶质、沥青质多的原油相对密度大。相对密度大于 1.00 的原油,用一般方法难以开采。

(2) 原油粘度。

原油分子发生相对位移时所受到的阻力或内摩擦力称为原油粘度。它表示原油流动的难易程度,原油粘度越大越不易流动。通常测定的粘度不是原油的绝对粘度,而是其相对粘度,即原油的绝对粘度与同温度条件下水的绝对粘度的比值,在 20℃ 时水的粘度为 1mPa·s。影响原油粘度的因素很多,取决于温度、压力和原油的化学成分。粘度随温度升高、溶解气量增加而降低,压力升高时则粘度增大;原油中轻质油组分增加,粘度随之降低,而蜡、胶质、沥青质含量高时则粘度亦高;对地下原油,当含有溶解气时,粘度降低。粘度大于 50mPa·s、在 20℃ 时相对密度大于 0.920 的原油称为稠油。

粘度分为动力粘度、运动粘度和相对粘度三种表示方式。

动力粘度又称绝对粘度,在国际单位 SI 制中,单位为帕斯卡秒(Pa·s)和毫帕斯卡秒(mPa·s),其定义为:当压力为 1Pa 的切力作用于液体,使之在相距 1m、面积为 1m² 的两液层间发生相对恒速流动,如果流动的速度恰好为 1m/s,则该液体的粘度为 1Pa·s;1Pa·s = 1000mPa·s。

原油动力粘度的大小取决于原油的化学成分和外界的温度、压力条件。分子小的烷烃、环

烷烃含量多,动力粘度就低;而石蜡、胶质、沥青质含量高,动力粘度就高。随着温度的升高,动力粘度则降低,所以原油在地下深处比在地面其动力粘度小,且易流动;在地下 1500 ~ 1700m 处,原油动力粘度值通常仅为地表的一半。原油的动力粘度和相对密度与产层埋深之间有良好的相关性,从根本上讲是温度影响的结果。压力加大,动力粘度也随之增大。而原油中溶解气量的增加则会使动力粘度降低。

运动粘度为动力粘度与相对密度之比,其单位为 m^2/s 。

在研究原油时,通常用恩氏粘度计直接测定其粘度,故又称恩氏粘度。在恩氏粘度计中,用 200mL 原油与 20℃ 时同体积蒸馏水通过直径为 2.8mm 细管的流出时间(水流出的时间约为 50s)之比可得之,常用“ E_t ”表示。根据实验室测定的“ E_t ”值,可以通过查换算表获得运动粘度,并可计算出动力粘度。

原油粘度的大小是决定其流动能力大小的重要参数,对了解油气运移、油井动态分析、开采及储运都有重要的参考价值。如果粘度过大,原油在地层中或井筒内流动就困难,因此必须采取有效措施,如热力采油、稠油降粘等方法采油。如果原油粘度能降低一半,在其他条件相同时,就能使原油流量增加一倍。

(3) 原油凝点。

由于温度下降,原油由液态开始凝固为固态并失去流动性时的温度,称为原油凝点。凝点在 40℃ 以上的原油称为高凝油。高凝油在常温下就会凝固,流动很困难,给开采和运输带来很多困难。凝点的高低与原油组分含量有关,主要取决于原油含蜡量的多少,一般情况下,含蜡量超过 10% 时,凝点有明显的变化,含蜡量高的,凝点也高。低凝点的原油为优质原油。

(4) 原油收缩率。

地层原油采到地面后,天然气逸出使体积缩小,收缩的体积占原体积的百分数称为原油收缩率。

(5) 原油压缩系数。

单位体积地层原油的压力每增大或减小 1Pa 时体积的变化率称为原油压缩系数,又称压缩率,单位是“每帕或每兆帕”(1/Pa 或 1/MPa)。

(6) 原始气油比。

在地层原始状况下,单位质量(或体积)原油所溶解的天然气量称为原始气油比,单位是“立方米每吨或立方米每立方米”(m^3/t 或 m^3/m^3)。油井生产时,每采出 1t 原油伴随采出的天然气量称为生产气油比,单位是“立方米每吨”(m^3/t)。原始气油比的大小取决于天然气和原油的成分、温度和压力条件。原油中溶解的天然气量多,能使原油的相对密度和粘度减小,体积增大。

(7) 饱和压力。

当油田投入开发后,地层压力也就逐渐降低,但压力降到某一数值以后,原来溶解在原油中的天然气就不断地分离出来,因此把从原油中分离出第一个气泡时的压力称为原油的饱和压力。原始饱和压力是指油田开采初期,地层保持在原始状况下测得的饱和压力。一般所说的饱和压力均是指原始饱和压力。它是确定开发决策的依据之一,单位兆帕(MPa)。

在油层条件下,当地层压力高于一定数值之后,天然气就会完全溶解于原油中,地下的油气就处于单相——液相状态。当地下原油已为天然气所饱和,则多余的天然气就会聚集在油

藏上部形成气顶,地下的油、气就处于两相——液相状态和气相状态。对于有气顶的油藏来说,饱和压力等于原始地层压力,而单相状态的原油未被气体所饱和,地层压力要下降得很多才能出现气相。饱和压力是油田开发所需基本数据之一。

饱和压力的大小与原油和天然气的性质有关。在原油中的天然气含量是决定饱和压力大小的一个重要因素,而地层温度也有一定的影响。如果原油性质、温度基本相同,气油比高者,则饱和压力就大;如原油轻质成分少,重质成分多时,溶解的天然气量少,则饱和压力就低。当温度升高时,饱和压力也随之增大。

(8) 原油体积系数。

地层条件下单位体积原油与其在标准状况下地面脱气后原油体积之比值,称为原油体积系数,为无量纲量。

体积系数用式(1-1)表示:

$$B_{oi} = \frac{V_{\text{地下}}}{V_{\text{地面}}} \quad (1-1)$$

式中 B_{oi} ——体积系数;

$V_{\text{地下}}$ ——地层条件下原油的体积, m^3 ;

$V_{\text{地面}}$ ——与 $V_{\text{地下}}$ 同体积的原油采到地面脱气后的体积, m^3 。

影响体积系数的因素有压力、温度及原油中的溶解天然气量,其中溶解天然气量对原油体积变化起着主要作用,这在油层压力低于饱和压力时反映最明显。

由于油层一般都处于高温、高压下,地层原油中溶有大量的天然气,溶解的天然气量和油层温度对体积系数的影响远远超过弹性压缩的影响,因此地层条件下原油的体积比在地面脱气后的体积要大,一般原油体积系数均大于1。体积系数是计算原油储量、注采比、地下亏空等主要开发指标的换算系数,是进行油田动态研究常用的参数之一。

(二) 石油的化学组成

1. 石油的化学组成

(1) 石油的元素组成。

石油中的主要元素不是呈游离状态,而是以结合成不同的化合物而存在的。石油尽管是多种多样,但它们的元素组成却局限在较窄的变化范围之内,碳(C)、氢(H)占绝对优势。根据对世界各地油田石油化学分析资料统计,石油中含碳量在80%~88%,含氢量在10%~14%,碳、氢含量的总和大于95%,石油的碳氢比(C/H)介于5.9~8.5之间。碳、氢两种元素在石油中组成各种复杂的碳氢化合物,即烃类存在,它是石油组成的总体。

石油中除碳、氢外,还有氧(O)、氮(N)、硫(S)等元素,一般它们总量不超过1%,个别油田可达5%~7%,这些元素在石油中多构成非烃类有机化合物。它们含量虽少,但对石油质量有一定影响,如石油中含硫,则具有腐蚀性,且会降低石油的品质。

除上述元素外,在石油成分中还发现有30余种微量元素,但含量较少,其中以钒(V)、镍(Ni)为主,占微量元素的50%~70%。因此,在石油残渣中提炼某些稀有元素,是一个值得注意的领域。

不同地区、不同时代的石油元素组成比较接近,但也存在一定的差异,见表1-1。

表 1-1 不同地区石油元素组成表

石油产地		元素组成, %				
		C	H	S	N	O
中国	大庆油田(萨尔图混合油)	85.74	13.31	0.11	0.15	0.69
	胜利油田(101混合油)	86.26	12.20	0.80	0.41	—
	胜利油田孤岛地区	84.24	11.74	2.20	0.47	—
	大港油田	85.67	13.40	0.12	0.23	—
	江汉油田(混合油)	83.00	12.81	2.09	0.47	1.63
	克拉玛依油田(混合油)	86.13	13.30	0.04	0.25	0.28
前苏联	雅雷克苏	80.61	10.36	1.05	—	8.97
	乌克兰	84.60	14.00	0.14	1.25	1.25
	老格罗兹尼	86.42	12.62	0.32	—	0.68
	卡拉—布拉克	87.77	12.37	—	—	0.46
美国	文图拉(加利福尼亚州)	84.00	12.70	0.40	1.70	1.20
	科林加(加利福尼亚州)	86.40	11.70	0.60	—	—
	博芒特(得克萨斯州)	85.70	11.00	0.70	2.61	
	堪萨斯州	84.20	13.00	1.60	0.45	0.45

(2) 石油的烃类组成。

目前在石油中已鉴定出的烃类化合物达 420 多种,从有机化学角度来讲,凡是由碳、氢两种元素组成的化合物,称为碳氢化合物,简称“烃”。石油主要是由三种烃类组成,即烷烃、环烷烃和芳香烃,见图 1-1。

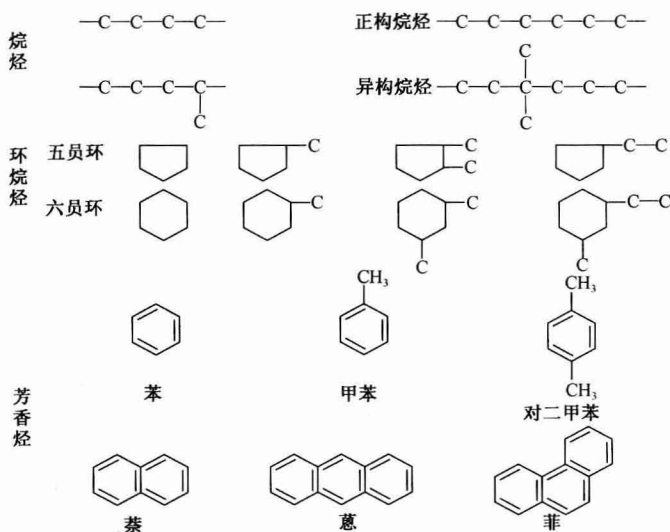


图 1-1 石油中烃类化合物结构式

① 烷烃。

烷烃又称脂肪烃、石蜡烃,属饱和烃,化学性质不太活泼。烷烃的相对密度、熔点及沸点均随相对分子质量增大而上升,所有烷烃的相对密度都小于 1,几乎不溶于水(气态烃除外)。烷

烃分子结构特点是碳原子以单键相连呈链式,按其是否有支链存在,又可分为正构烷烃和异构烷烃。

原油中烷烃的碳原子个数为 15~42 时呈固态的碳氢化合物称为蜡。原油中含蜡的百分数称为含蜡量。

② 环烷烃。

石油中的环烷烃多为五员环或六员环及其衍生物,以单环和双环为主。多环中以四环甾烷和五环萜烷较为重要,其结构与生物体的四环甾族化合物和五环三萜烯类化合物有明显的相似性,也是重要的生物标志化合物,广泛应用于烃源岩成熟度分析和油源对比中。这类化合物有明显的旋光性,它们的存在被认为是石油有机成因的标志。环烷烃的相对密度、熔点和沸点都比碳原子数相同的烷烃高,但相对密度仍小于 1。这类分子中含有碳环结构的饱和烃,它们由许多围成环的多个次甲基组成。按分子中所含碳环数目,环烷烃可以分为单环烷烃、双环烷烃、三环烷烃和多环烷烃。

③ 芳香烃。

芳香烃系指具有 6 个碳原子和 6 个氢原子组成的特殊碳环——苯环的化合物,其特征是分子中含有苯环结构,属不饱和烃。由于此类烃族中许多成分具有一种强烈的芳香气味,故称为芳香族(又称苯族)。根据其结构不同,可分为单环、多环、稠环三类芳香烃。

随着石油成熟度增大,芳香烃系列向低环方向演化。单环芳香烃不溶于水,但溶于汽油、乙醚、乙醇等有机溶剂。它们具有特殊气味,有毒,相对密度一般为 0.86~0.9,比水轻。

(3) 石油的非烃类组成。

石油中所含的非烃类化合物主要包括含硫、氮、氧的化合物,化合物中除含有碳和氢两种元素外,还含有硫、氮、氧等元素。

含硫化合物:硫在石油中的含量变化较大,从万分之几到百分之几均有。通常将含硫量大于 2% 的石油称为高硫石油,含硫量低于 0.5% 的称为低硫石油,含硫量介于 0.5%~2% 之间的称为含硫石油。

石油中所含的硫是一种有害的杂质,因为它容易生成硫化氢、硫化铁、硫醇铁、亚硫酸或硫酸等化合物,对采油、输油、炼制等金属设备会造成严重腐蚀,所以含硫量常作为评价石油质量的一项重要指标。

含氮化合物:石油中含氮量一般在万分之几至千分之几之间。含氮量高于 0.25% 的石油称为高氮石油,含氮量低于 0.25% 的称为贫氮石油。石油中的含氮化合物包括碱性氮化物和碱性氮化物两大类,前者以吡啶、喹啉及其同系物为主;后者以吡咯、卟啉及其同系物为主,尤以金属卟啉化合物最为重要。在石油中发现的卟啉化合物主要为钒卟啉和镍卟啉,我国原油一般以镍卟啉为主。

动物血红素和植物叶绿素都属卟啉化合物,它们的结构同石油中这类化合物相同,在石油中发现卟啉化合物,对研究石油成因有着重要意义。

含氧化合物:氧在石油中的含量一般只有千分之几,均以有机化合物状态存在,其分子结构是由烃基和含氧官能团两部分组成。含氧化合物主要有环烷酸、脂肪酸、酚、醛、酮等,其中环烷酸、脂肪酸、酚总称为石油酸,含量较高;醛、酮含量极少。

环烷酸很容易形成各种盐类,其中碱金属的环烷酸盐能够很好地溶解于水,在与石油接触的油田水中常含这种环烷酸盐,可作为找油的一种标志。

2. 石油的组分组成

根据石油中不同的物质对某些介质有不同的吸附性和溶解性,将石油分为四种组分,即油质、胶质、沥青质和碳质。

(1) 油质。

油质是由烃类(几乎全部为碳氢化合物)组成的淡色油脂状液体,荧光反应为浅蓝色,它能溶于石油醚中,但不能被硅胶吸附。油质是石油的主要组成部分,含油量为 65% ~ 100%。油质含量高,颜色较浅,石油质量好,反之则质量差。

(2) 胶质。

胶质是原油中相对分子质量较大的烃类,并含有氧、氮、硫等杂质。胶质呈浅黄褐色,半固态的粘稠状流体。密度为 $1.00 \sim 1.07\text{g/cm}^3$,它溶解性较差,只能溶于石油醚、苯、氯仿、乙醚和四氯化碳等有机溶剂中,也能被硅胶所吸附,荧光反应为淡黄色,多为环烷族烃和芳香族烃组成。石油蒸发或氧化后,胶质成分增加,在轻质石油中胶质含量一般不超过 4% ~ 5%,而在重质石油中胶质含量可达 20%,原油中所含胶质的百分数称为胶质含量。石油呈褐色或黑褐色的原因之一,就是因为胶质的存在。

(3) 沥青质。

在石油中沥青质含量很少,一般小于 1%,个别情况可达 3.0% ~ 3.5%。沥青质是暗褐色或黑色的脆性固体物质,是含有碳、氢、氧、氮、硫等元素的高分子多环有机化合物,其相对分子质量比胶质大许多倍,温度高于 300°C 时则分解成气体和焦炭。沥青质的组成元素与胶质基本相同。只是碳氢化合物减少了,而氧、硫、氮的化合物增多了,密度大于 1.00g/cm^3 ,不溶于石油醚或酒精,但可溶于苯、三氯甲烷及二硫化碳、氯仿等有机溶液中,也可被硅胶吸附,荧光反应为深黄褐色。

(4) 碳质。

碳质是黑色固体物质,不具荧光,不溶于有机溶剂,也不能被硅胶所吸附,由更高分子碳类物质组成。石油中一般不含或极少含碳质。

石油组分是衡量石油品质的标志之一,质量好的石油含油质高。胶质和沥青质的存在增加了石油的结蜡性,并使石油产品的颜色加深,对石油的炼制是不利的。

3. 石油的馏分组成

石油在升温过程中,当升高到一定温度时,石油中的某些组分就由液体变为气体而蒸馏出来,这种在一定温度下蒸馏出来的组分称为馏分。随温度不同,馏分产物也有所不同,见表 1-2。

表 1-2 石油的馏分产物

温度,℃	产品	温度,℃	产品
95 以下	轻汽油	200 ~ 315	煤油
40 ~ 180	航空汽油	270 ~ 300	润滑油
250	汽车汽油	190 ~ 350	柴油
120 ~ 240	重汽油	350	柏油

二、天然气

天然气从广义上理解,是指以天然气态存在于自然界的一切气体,即包括不同成分组成、

不同成因、不同产出状态的气体。根据存在的环境将天然气分为八大类:大气、表层沉积物中的气体、沉积岩中的气体、海洋中的气体、变质岩中的气体、岩浆岩中的气体、地幔排出气和宇宙气。所以,沉积物中有机物质的生物化学降解及高温裂解、放射性元素蜕变及热核反应、岩石的变质及岩浆活动,乃至宇宙及空气等作用,都可以生成天然气。在石油地质学中所指的天然气是指与石油有相似产状的通常以烃类为主的气体,既可呈聚集状态,也可呈分散状态,既可与石油伴生,也可单独存在,一般指油田气、气田气、凝析气和煤层气等。

(一)天然气的产状类型

1. 气藏气

气藏气是指圈闭中天然气的单独聚集。其成分以甲烷为主,重烃含量很少,一般仅占百分之几。有些气藏气存在于油气田中,与下伏或侧向分布的油藏、油气藏在成因上密切相关。

2. 气顶气

气顶气是指与石油共存于油气藏中呈游离气顶状态聚集的天然气,其成因及分布常与石油密切相关。其成分也以甲烷为主,但重烃气含量也较高,一般占百分之几到百分之十几,甚至可高于甲烷的含量,如格罗兹尼油气田,天然气中重烃含量高达51.3%。

3. 凝析气

凝析气是一种特殊的气藏气。在地层条件下,当温度、压力超过临界条件后,液态烃逆蒸发形成了凝析气。在采出过程中,由于温度、压力降低,气态烃则可逆凝为凝析油,呈液态烃产出。这类油气藏称为凝析油气藏或凝析气藏,如我国板桥凝析油气田,凝析油含量大于 $500\text{g}/\text{m}^3$ 。

4. 煤成气

煤成气是指煤层中所含的吸附或游离状态的天然气,在煤矿中将其称为矿井瓦斯。其成分以甲烷为主,同时也含有氮气和二氧化碳气,重烃含量很少,有时还可见到极少量的氨和硫化氢气体。

5. 溶解气

在地层条件下,天然气可溶于石油或地下水,称其为油内溶解气(油溶气)或水内溶解气(水溶气)。

油内溶解气常见于饱和或过饱和油藏中,化学组成变化较大,以重烃含量较高为其主要特点,可达百分之几十。

水内溶解气包括低压水溶气和高压水溶气。低压水溶气含气量较低,一般为 $1\sim 1.5\text{m}^3/\text{t}$,少数可超过此限。高压水溶气常出现在异常高压带以下的高压地热水中,又称为高压地热水溶气,含气量较高,如美国墨西哥沿岸高压异常带以下的高压水溶气的储量可达 $8.5\times 10^{12}\text{m}^3$ 。

6. 固态气水化合物

固态气水化合物是结晶化合物。甲烷等气体分子存在于水的冰晶体格架之中,即成为固态气水化合物,亦称冰冻甲烷或水化甲烷。固态气水化合物是在冰点附近的特殊温度和压力条件下形成的,主要分布在低温的极地或冻土地带。如西西伯利亚发现的总储量为 $4\times 10^{11}\text{m}^3$ 的美索亚卡气田,54%的天然气呈气水化合物产出。

(二)天然气的物理性质

天然气是以气态碳氢化合物为主的气体组成的混合气体;有的从独立的气藏中采出,有的

是伴生在石油中被采出。天然气通常为无色气体,有汽油味,有时有硫化氢味,均具有可燃性。由于不同油气田天然气的化学组成及所处的地质环境变化较大,因此,不同油气田中天然气的物理性质变化也是相当大的。

天然气的物理性质主要由以下几项参数予以描述。

1. 体积系数

相同质量的天然气在地层条件下所占的体积与在地面标准状况(20℃和0.101MPa)下所占体积的比值,称为天然气的体积系数,为无量纲量,其值远小于1。在计算天然气储量和采出量时,要进行地面条件下和地层条件下体积的换算,就必须了解天然气的体积系数。

2. 天然气压缩系数

天然气压缩系数是指一定质量的气体,当压力改变时,气体的体积则发生变化,压力每变化1MPa时气体体积的变化率。在相同温度、压力下,1mol分子真实气体天然气的体积与理想气体的体积之比,称为天然气的压缩系数,单位是“每帕或每兆帕”(1/Pa或1/MPa)。变化量的大小与压力的变化值有关,与原始气体体积的大小有关,也与气体的性质有关,一般用高压物性实验方法测定。因真实气体比理想气体更容易被压缩,因此压缩系数小于1。压缩系数是气田开采中计算气层压力必不可少的数据之一。

3. 天然气粘度

天然气的粘度是指天然气在流动时气体内部分子间的摩擦阻力,是研究天然气运移、开采和集输的一个重要参数,单位是“毫帕秒”(mPa·s)。粘度是以分子间相互碰撞的形式体现出来的。由于气体内摩擦力与分子热运动有关,故其粘度一般随相对分子质量的增大而减小,而随温度、压力升高而增大。在压力接近0.101MPa的情况下,温度升高时,分子的活动性增强,碰撞的次数增多,粘度也增加。天然气的粘度受气体组成、温度、压力的影响。但在高压与低压下,其变化规律是不同的,在低压下,气体的粘度几乎与压力无关,随温度的升高而增大;在高压下,压力变化是影响粘度的主要因素,气体的粘度随压力的增大而增大,随温度的升高而减小。天然气的粘度很小,比油或水的粘度低得多,在标准状况下仅为0.001~0.09mPa·s。

4. 天然气密度和相对密度

单位体积气体的质量称为天然气密度,单位是“千克每立方米”(kg/m³)。天然气的相对密度是指在标准状态下,即温度为0℃、压力为0.101MPa的天然气与同体积空气质量之比,为无量纲量。天然气的密度与化学组成有关,由于湿气含重烃多,因此,湿气的密度大于干气。一般天然气的相对密度在0.6~1.0之间,比空气轻。含重烃量多的天然气相对密度也大,如中原油田个别油气藏的天然气相对密度高达1.0298,主要是天然气中含重烃所致。相对密度小的天然气其主要成分以甲烷为主,含量约为90%以上。例如,四川油田某气藏,天然气相对密度为0.562,其甲烷含量高达98.15%,相对密度大的天然气中甲烷含量相对较小。

天然气是各种气体的混合物,重组分气体含量高,则相对分子质量和密度越大。因此,密度可以反映出天然气的气体组分。天然气中各组分的相对密度可以根据它的组分含量计算出来。一般天然气液化后,体积缩小1000倍,故在天然气和石油产量、储量中,常采用1000m³天然气相当1m³石油来比较,其利用价值也大致相当。

5. 天然气的溶解度

任何气体均可不同程度地溶解于液体中。在一定压力下,单位体积的石油所溶解的天然气体量,称为该气体在石油中的溶解度。在相同条件下,天然气在石油中的溶解度远远大于在水