

火烧油层采油技术 基础及其应用

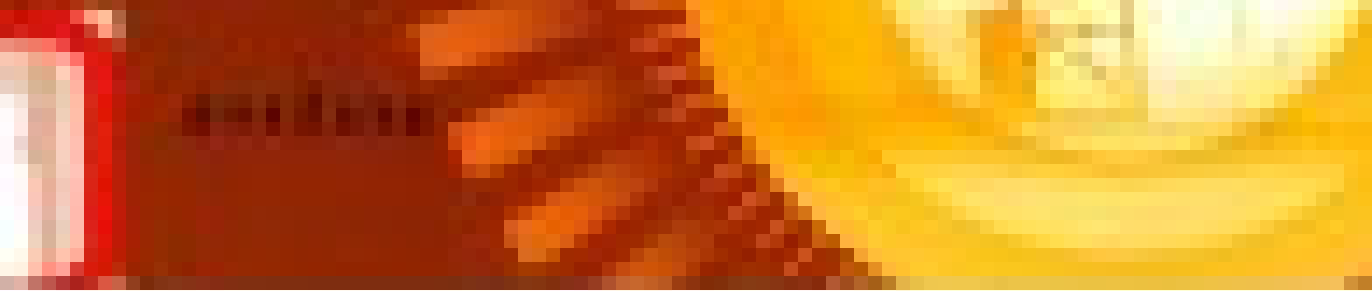
徐克明 刘永建 刘其成 著

石油工业出版社



火烧油层采油技术 基础及其应用

王德林 王德林 王德林 王



火烧油层采油技术 基础及其应用

徐克明 刘永建 刘其成 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细论述了火烧油层采油技术的化学原理,提出了火烧油层燃烧区形状及氧气浓度分布规律,阐述了火烧油层采油技术基础理论和应用方法,从而丰富了火烧油层采油技术的基础研究,加强了火烧油层采油技术的推广和应用。本书的研究结论对油田采油生产具有重要的参考价值和指导意义。

本书可供从事稠油热采工艺的工程技术人员、研究人员和石油院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

火烧油层采油技术基础及其应用 / 徐克明, 刘永建, 刘其成著.
北京:石油工业出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5183-0348-9

I . 火…

II . ①徐…②刘…③刘…

III . 火烧油层 - 石油开采 - 研究

IV . TE357.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 191248 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

编辑部:(010) 64523541 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8

字数:200 千字

定价:52.00 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

前 言

火烧油层采油技术具有适用范围广、物源充足、采收率高及成本低等优势。但由于火驱机理十分复杂，加之对其理论研究和现场试验工作时断时续、不系统，所以至今有关其基础性研究工作仍有很多方面欠缺，影响了火烧油层技术的推广和应用，亟须加强。针对这一实际问题，笔者在总结自己近期科研成果的基础上撰写本书，阐述了火烧油层采油技术基础理论和应用方法。

本书详细论述了火烧油层采油技术的化学原理，提出了定量分析油层多孔介质中氧化反应的方法；测定了温度场变化状态；测定了自燃温度、氧气利用率、燃料消耗量、空气需要量、空气油比值及视氢碳原子比等火烧油层燃烧基础参数，并提出了计算这些参数的方法；确定了燃烧前缘的推进速率及燃烧过程的稳定性影响因素，其结论可以为现场方案设计提供科学依据。

本书通过对采出原油进行有机化学分析，对辽河油田不同区块原油的燃烧参数进行对比分析，发现辽河稠油经过火烧油层后生成了高温裂解作用产物——蒽。因原始地层中不存在物质蒽，所以火烧后采出油中如果存在该化合物则可以认为火驱成功。物质蒽是火驱成功与否的重要标记化合物之一。

本书建立了地下注入氧气浓度为常数或变量两种不同条件下的燃烧区形状方程，研究表明：累计注气量对燃烧区厚度影响严重，空气需要量及油层孔隙度对其影响较轻；建立了火烧油层地下氧气浓度分布方程式，为研究油层燃烧动态、确定火烧波及范围和优化注采井距提供了新方法；建立了火烧油层燃烧区体积方程，对影响燃烧区体积的因素进行了分析。在此基础上建立了火烧油层的体积波及系数计算公式和产油量计算方法。本书的这一成果为火烧油层采油工艺设计和技术参数优化提供了新理论和新方法。

从实用性考虑，笔者在书中不仅提出了火烧油层采油工艺设计基本方法，还详细介绍了近年来辽河曙光油田火烧油层采油的成功经验，而且给出了符合油田实际情况的设计示例。

东北石油大学油气田开发工程专业博士生董龙参加了本书中有关室内实验和大量的数值模拟计算工作，在此表示衷心的感谢。

由于笔者学识有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请专家和广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 火烧油层采油技术简介	2
1.2 火烧油层物理模拟装置研究	3
1.2.1 燃烧釜	3
1.2.2 燃烧管	4
1.2.3 三维比例物理模型	5
1.2.4 热重分析仪 (TG)	5
1.2.5 差示扫描量热仪 (DSC)	5
1.3 火烧油层物理模拟实验及理论研究	6
1.3.1 国外火烧油层室内实验及理论研究	6
1.3.2 国内火烧油层室内实验及理论研究	9
1.4 火烧油层数值模拟研究	12
1.5 火烧油层现场先导试验研究	13
1.5.1 国外火烧油层先导试验与现场工程	13
1.5.2 国内火烧油层先导试验与现场工程	14
第2章 火烧油层化学机理及其影响因素研究	17
2.1 火烧油层过程中的化学反应	17
2.2 火烧油层燃料氧化反应理论模型研究	20
2.2.1 球形燃料几何模型	21
2.2.2 变球形状燃料几何模型	23
2.2.3 低温氧化反应模型	28
2.2.4 氧化反应模型的验算	30
2.3 油层内燃烧区带划分和相关温度的计算	32
2.3.1 燃烧区带的划分	32
2.3.2 已燃区内滞留的热量分析	34
2.3.3 点火温度计算方法探讨	35
2.4 本章小结	39
第3章 火烧油层一维模拟实验和重要技术参数的确定	40
3.1 实验目的	40
3.2 实验方案的制定	41
3.3 实验步骤与实验条件	41
3.3.1 实验步骤	41
3.3.2 实验装置	42

3.3.3 实验条件	43
3.4 一维燃烧管模拟实验结果及分析	43
3.4.1 温度场变化与点火温度	44
3.4.2 气体组分变化	45
3.4.3 驱油效率与空气油比	47
3.4.4 燃料消耗量与空气需要量	49
3.4.5 原油物理化学性质变化	53
3.5 不同区块原油火烧效果对比分析	58
3.6 本章小结	59
第 4 章 火烧油层燃烧区形状及氧气浓度分布规律	60
4.1 基本假设与基本方程	61
4.2 氧气浓度为常数条件下燃烧区形状方程及分析	63
4.3 氧气浓度为变量条件下燃烧区形状方程及分析	63
4.3.1 氧气的质量守恒方程	64
4.3.2 氧气浓度分布方程	65
4.3.3 燃烧区形状方程	66
4.4 火烧油层燃烧区体积方程研究	69
4.5 本章小结	73
第 5 章 火烧油层采油工艺的初步设计方法	74
5.1 火烧油层的筛选标准	74
5.2 火烧油层的重要参数计算	76
5.3 火烧油层的波及系数	79
5.4 火烧油层采油工艺设计内容与设计方法	82
5.4.1 给定井网所需的空气总量 V_{Ta}	82
5.4.2 空气注入速率 i_a	83
5.4.3 空气注入压力 p_{iw}	86
5.4.4 原油产出量 N_p 或 V_T	87
5.5 火烧油层采油工艺设计计算示例	90
5.6 本章小结	94
第 6 章 辽河曙光油田杜 66 北块火烧油层现场试验	95
6.1 火烧油层采油区块筛选标准	95
6.2 火驱采油层系选择	96
6.3 火驱采油井网选择	98
6.4 注蒸汽预热点火助燃技术现场操作	98
6.5 注采工艺优化设计	99
6.6 监测与综合调控工艺	101
6.7 火驱采油辅助工艺措施设计	103
6.8 杜 66 北块先导试验区火驱效果评价	105
6.8.1 温度压力变化情况	105

6.8.2	产出气体组分变化情况	106
6.8.3	油井动液面变化情况	107
6.8.4	产量变化情况	107
6.8.5	先导试验区试验前后对比情况	108
6.8.6	先导试验区火烧前缘推进方向	108
6.9	现场试验取得的几点认识	108
参考文献.....		110
附录 单位换算表.....		115

第1章 绪 论

石油是重要的非再生性战略资源,对我国的国计民生和国家安全具有特殊的意义。我国作为一个发展中的大国,经济持续高速增长,导致了石油需求量大幅增加,缺口不断增大。据权威部门预测,到2020年,我国石油需求的对外依存度有可能接近国内产量的60%,能源问题将成为制约我国经济与社会发展的重要因素之一。

以辽河油田为例,截至2007年底,辽河油田共探明石油地质储量 $22.75 \times 10^8 \text{t}$,动用石油地质储量 $18.62 \times 10^8 \text{t}$,标定采收率为24.5%。其中热采稠油动用 $6.77 \times 10^8 \text{t}$,开发方式以蒸汽吞吐、蒸汽驱及蒸汽辅助重力泄油等技术为主,标定采收率24.7%;非热采动用储量 $11.85 \times 10^8 \text{t}$,开发方式以水驱为主,共有 $9.91 \times 10^8 \text{t}$ 地质储量实现了注水开发,标定水驱采收率26.1%,还有 $1.94 \times 10^8 \text{t}$ 地质储量仍采用天然能量进行开发,天然能量开采标定采收率仅为16.3%。

根据上面所列数据并采用所述开发方式,辽河油田在已动用的石油地质储量中,仍有75%以上的储量滞留在地下无法开采。另外,现有的开发方式也已暴露出一定的问题,如,蒸汽吞吐随着吞吐轮次的增加,平面及纵向非均质性加剧,水浸、套损、产量低、经济效益差;组合式蒸汽吞吐不能充分动用井间剩余油;蒸汽驱和蒸汽辅助重力泄油试验虽然取得了成功,但这两项技术适应范围较窄,不能囊括整个稠油油藏;注水开发油藏已历经了4~5次的综合调整,目前已进入“双高”递减期开发阶段,油层水淹严重,剩余油分布零散,平均井距已加密到100~200m,调整余地逐渐变小,挖潜的难度日益加大。因此,急需解决开发方式转换问题,以便进一步改善开发效果,提高原油采收率。

火烧油层^[1~3](也可称为火驱)是提高原油采收率的重要方法之一,属于热力开采技术。火烧油层驱油效率很高,室内实验证明,已燃烧区残余油饱和度几乎为零,采收率可达85%~90%;在已实施的现场火驱方案中,采收率也能达到50%~80%。火烧油层技术的应用范围较广,在适当条件下,既可应用于稠油油藏,又可用于轻质油藏,还可用于注蒸汽或水驱后的油藏开采残余油。因此,火烧油层是一种适应性强,并能充分利用石油资源的开采技术。

据调查结果得知,辽河油田为了解决目前开发方式下采收率低、经济成本高、可采储量有限的问题,特别是在目前优质储量难以发现、老区产量递减严重等勘探开发形势下,加强了对火烧油层的试验研究,努力探索是否可以用其实现开发方式的有效接替,最大限度地挖掘地下石油资源,实现辽河油田长期稳定发展。

依据火驱目前的筛选标准,辽河稠油油藏适合火驱开发的单元约23个,地质储量约为 $3.57 \times 10^8 \text{t}$,按最低采出程度20%计算,预计火驱开发提高可采储量 $7100 \times 10^4 \text{t}$,有较好的应用前景。因此,辽河油田曾先后在庙5块、杜66块、杜48块、高3-6-18块等开展了先导试验,其中,高3-6-18块效果明显,日产油和日产气量上升。

但是,由于辽河油田乃至我们国内各油田开展火烧油层采油研究起步较晚,加之该技术的驱油机理^[4~8]非常复杂,其驱油效果与地层条件、原油性质、注空气的通风强度、点

火和燃烧温度等因素有密切关系，至今仍有许多基本问题有待进一步认识，该技术向工业化推广应用还存在大量问题需要解决，因此，为了更好地完善与利用火烧油层技术，结合国内油田实际，进一步开展火烧油层技术基础研究和物理模拟实验研究尤为重要。

1.1 火烧油层采油技术简介

如前面所述，火烧油层^[9, 10] 又称火驱或层内燃烧法（本书在后续的阐述中对这3种提法认为是一个意思，不加区分），即在一口或数口注气井（又称火井）中点燃油层后，通过不断向油层注入适量氧化剂（空气或富氧气体）助燃，形成径向移动的燃烧前缘（又称火线）。火线前方的原油受热降黏、蒸馏，蒸馏后的轻质油、汽与燃烧烟气被驱向前方，留下未被蒸馏的重质组分在高温下产生裂化、分解，最后剩下的裂解产物（本书也称其为副产物）——焦炭作为火烧油层的燃料，维持油层继续向前燃烧；在高温下，油层水（包括束缚水）、注入水及燃烧生成水变成蒸汽，携带大量的热量传递给前方油层，并再次洗刷油层原油。这样便在地下油层内形成一个多种驱动机制并存的复杂过程，各种机制共同作用，最终把原油驱向生产井。被当作燃料烧掉的裂解副产物^[11, 12]，约为储量的10%~15%。

根据火烧油层反应温度的不同，火烧油层过程可以分为低温氧化和高温氧化反应过程。一般情况下，油田在实施火烧油层时必须连续监测分析产出气，以确保火驱处于热裂解（高温氧化）燃烧状态^[10~13]。图1-1和图1-2为火烧油层过程中不同组分物质及温度分布示意图。

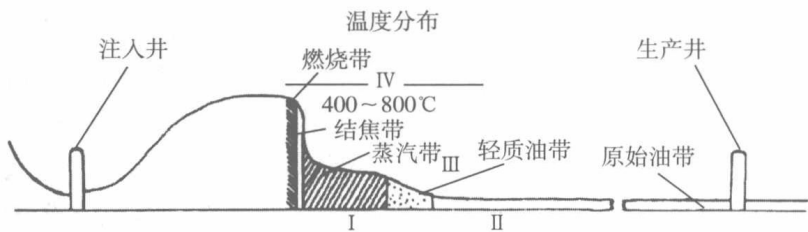


图 1-1 火烧油层地下温度分布示意图

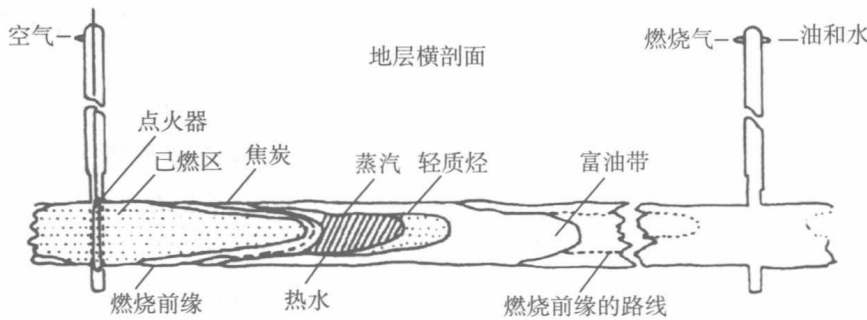


图 1-2 火烧油层地下不同物质区带分布示意图

火烧油层的方法^[13~15]可分为正向燃烧、反向燃烧、干式燃烧及湿式燃烧。正向燃烧是指，在注入井将油层点燃，并将空气注入地层，使燃烧前缘逐渐向生产井推进；反向燃烧是指，燃烧是在生产井开始，燃烧前缘移动方向与空气流动方向相反，燃烧前缘由生产

井向注气井方向逆着空气流移动,被驱替的原油必须经过正在燃烧着的燃烧区和灼热的已燃区才能到达生产井;干式燃烧为注入井只注入空气不注水,称为干式燃烧;湿式燃烧为注入井在注入空气的同时还注入水,称为湿式燃烧。

火烧油层技术(一般可简写为ISC)与注蒸汽采油技术相比,这些年来一直进步缓慢,但它绝不是一无是处。1994年4月,在美国能源部举办的关于火烧油层专题研讨会上,世界著名的热采专家S.M.Faroug Ali认为:火烧油层仍然是最诱人的提高采收率方法。目前该技术具有以下特点^[13~45]:

(1) 具有注气保持油层压力的作用,但面积波及系数比气驱要高得多(五点法井网时气驱为45%,火驱为70%)。

(2) 具有注蒸汽、热水驱的作用,但热利用率和驱油效率更高,并节省了水处理设施及隔热设备,工艺简单。同时由于高温蒸馏、裂解的结果,提高了产物的轻质油组分,部分原油就地改质。

(3) 具有注二氧化碳的作用,但节省了制造二氧化碳的配套装置和投资。

(4) 具有混相驱降低原油界面张力的效果,但驱油效率要高得多。

(5) 由于火烧油层的热源是移动的,因此它的井网、井距大小,不像蒸汽驱、化学驱那样受到严格的限制。

(6) 适用范围较广。火烧油层一般适用于油层较深($\geq 3500\text{m}$)、较薄($< 6\text{m}$)、较致密($\geq 0.035\text{D}$)及含水较高($\geq 75\%$)的水驱油田。在适当条件下,它既可用于重质油藏(密度不大于 1g/cm^3),也可用于轻质油藏(密度不小于 0.825g/cm^3);既可用于一、二次采油,又可用于三次采油,被认为是开采残余油的重要方法。

火烧油层技术^[2, 13]于1920年在美国取得专利,第一次极短期的现场先导试验(实际上是第一次点火作业)于1933—1934年在前苏联进行,而第一次真正的火烧油层(ISC)工艺试验业界认为是于1950—1951年在美国进行的。自1950年以来,已完成了160多个ISC现场先导试验项目^[1]。在1970—1995年期间,最多记录了19个商业化ISC项目,然而,目前这一数字已逐渐减少至4个活跃的商业化项目。在1994年,19个ISC项目中有14个是活跃的。火烧油层技术之所以没有被广泛地推行是由于火驱机理比较复杂,项目风险高,经济性难以把握,但国内外石油界公认,火烧油层是一项具有广阔前景的热采技术。国内外关于火烧油层技术的基础研究始终是备受重视的一个领域。

1.2 火烧油层物理模拟装置研究

火烧油层物理模拟常用装置及其目前的研究现状大体如下。

1.2.1 燃烧釜

燃烧釜及其工作的流程示意图如图1-3所示,其主要用来确定油田原油的自燃温度、研究影响原油的燃料生成量的因素,评价原油的点燃条件、燃烧的质量及空气需要量等。如研究焦炭含量与通风强度、含油饱和度、孔隙度、注气压力等参数的关系,实验结果可为现场火烧方案设计提供最基本的技术参数。

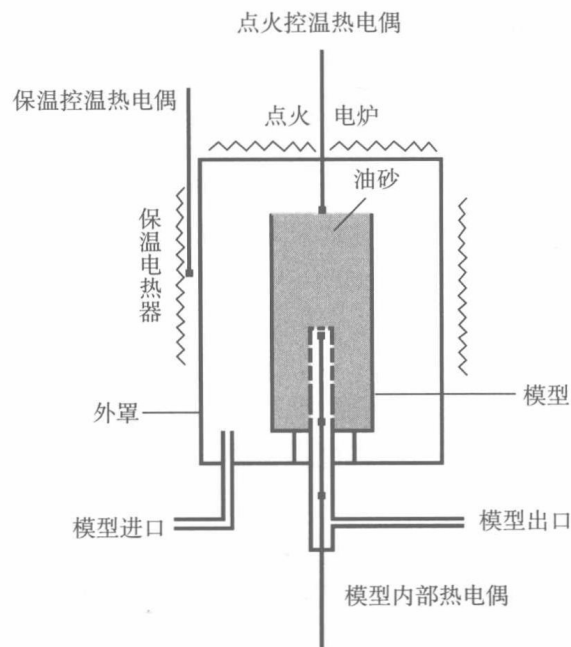


图 1-3 燃烧釜装置及其工作流程示意图

先后有 Burger^[31]、Taber 及 Martin^[46] 等人、中国石油勘探开发研究院^[14, 23]、中国石油辽河油田分公司及中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院^[19, 20, 25, 26] 等均建立了燃烧釜装置。

1.2.2 燃烧管

燃烧管及其工作流程如图 1-4 所示。燃烧管实验不但可以用来确定油藏的燃料消耗量、燃料的视氢碳原子比、空气需要量等燃烧特性参数，加深对火烧油层过程的场特征（温度场、压力场等）、瞬时生产特征（燃烧方式的影响、水气比的影响等）及累计产油特征的认识，而且还可以评定燃烧前缘的推进速度及燃烧过程的稳定性等。

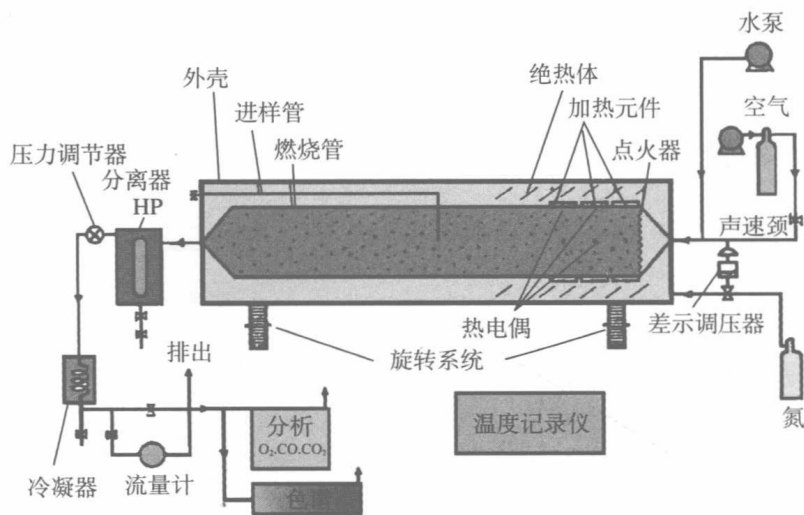


图 1-4 一维燃烧管及其工作流程示意图

国外最具有代表性的是美国的立式燃烧管装置、法国石油研究院的卧式燃烧管装置和加拿大卡尔加里大学的燃烧管装置。国内中国石油勘探开发研究院、中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院、中国石油辽河油田分公司、东北石油大学及中国石油大学^[5, 30]也先后建立了燃烧管装置。

1.2.3 三维比例物理模型

三维比例物理模型可模拟正方形五点井网和九点井网，直井—水平井或水平井组合(TAHI、COSH)的火烧驱油过程。可以反映火烧油层在平面、纵向火驱的温度场分布特征，火烧前缘在空间的展布特征，反映现场油田生产动态特征，预测火烧油层的采收率。

国外具有代表性的是 Greaves^[47]等人建立的三维物理模型，模型呈矩形、薄壁的箱体，箱体几何尺寸为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。设计的最大工作压力约为 500kPa，实际工作压力限制在 270kPa。中国石油勘探开发研究院及辽河油田分公司也自主研制了此类装置。

1.2.4 热重分析仪 (TG)

具有代表性的是美国 PerkinElmer 公司生产的 Diamond TG/DTA 热重分析仪，仪器主要技术指标如下：

- (1) 测量温度范围：室温至 $+1500^{\circ}\text{C}$ ；
- (2) 灵敏度： $0.2\mu\text{g}$ ，最大称重量：200mg；
- (3) 加热速率： $0.01 \sim 100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；
- (4) 实验气体：空气或惰性气体。

主要用于研究样品的以下特性：

- (1) 热稳定性、分解过程；
- (2) 吸附与解吸、氧化与还原；
- (3) 成分分析、添加剂、水分与挥发测定；
- (4) 反应温度、反应热；
- (5) 分解反应动力学。

1.2.5 差示扫描量热仪 (DSC)

具有代表性的是德国耐驰公司生产的 DSC 204HP 高压差示扫描量热仪，如图 1-5 所示。仪器主要技术指标如下：

- (1) 压力范围：真空至 15MPa；
- (2) 温度范围： $-150 \sim 600^{\circ}\text{C}$ (0.1MPa)； $-90 \sim 600^{\circ}\text{C}$ (5.0MPa)。 $-50 \sim 450^{\circ}\text{C}$ (15.0MPa)。
- (3) 升温速率： $0 \sim 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；
- (4) 可选择不同的测量气氛——惰性： N_2 ；还原性： H_2 ；氧化性： O_2 ， CO_2 ，空气等。

主要应用于研究样品的下列特性：

- (1) 熔融温度、熔融热焓；
- (2) 结晶温度、结晶热焓、结晶度；
- (3) 玻璃化转变、比热容；

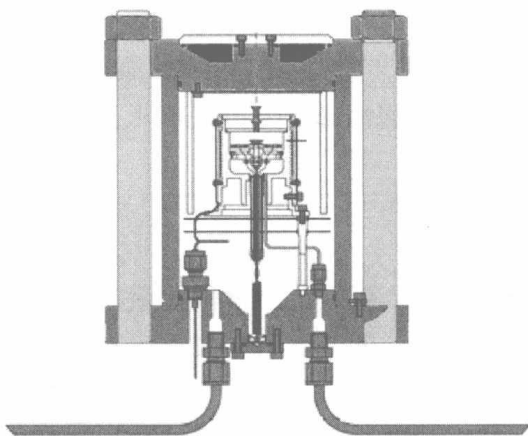


图 1-5 DSC 分析仪结构示意图

- (4) 固相转变、多晶形转变；
- (5) 氧化稳定性、氧化诱导期；
- (6) 交联反应、固化反应。

1.3 火烧油层物理模拟实验及理论研究

1.3.1 国外火烧油层室内实验及理论研究

火烧油层采用的燃烧方式主要有干式燃烧和湿式燃烧，针对这两种燃烧方式的特点，国外已经做了大量的实验及理论研究工作。

1959 年，Tadema 针对干式正向燃烧过程提出了空气需要量的计算方法，以及估算其采收率与已燃容积之间关系的公式。Poettmann 和 Benhand (1956 年)，Ramey (1959 年)，Bailey 和 Larken (1959 年) 等人也提出了这方面的分析结果^[48]。他们的工作奠定了火烧油层室内实验和理论分析的初步基础。

1960 年，Willson^[49] 和 Read 等人在室内开展了干式正向燃烧和正向湿式燃烧实验，建立了相关的计算式，并讨论了主要的影响因素。

1962 年，Alexander^[50] 等人开展了原始含油饱和度对燃烧燃料的影响、燃料与原油密度的关系、燃料对总空气需要量的影响和低温氧化对 426.67℃ 燃烧燃料的影响等试验，探讨了影响火烧油层的主要因素。

1963 年，Showater 也开展了同 Alexander 等人相类似的实验，但其结果的规律性比前者更强^[51]。

1963 和 1964 年，美籍华人朱杰^[52~54] (Chu C.) 在 Two-dimensional Analysis of a Radial Heat Wave 和 The Vaporization-condensation Phenomena in a Linear Wave 这两篇论文中提出了维持燃烧所需要的最低空气流量估算方法——朱氏法。

1963 年，Thomas 提出了比较成熟的火烧油层能量守恒方程^[55]。

1964 年，Ramey^[36] 提出了维持燃烧所需要的最低空气流量估算法——雷米法。同年，Strange 提出了自燃点火的条件和计算式，并介绍了相应的点火实例。

1965 年，Wohlbler 发表了有关燃料与原始原油密度关系^[1] 的研究论文。Wohlbler

(1965), Burger、Sahaguf (1972) 和 Poettmann (1967) 先后撰文公布了氧气和燃料之间的反应关系式及其计算方法^[56]。

1965年, Henderson 等人提出了原油热裂解反应和热裂解产物的燃烧反应速度关系式^[57]。

1966年, Penberthy 等人^[58]曾进行了干式正向燃烧的室内实验, 在实验基础上提出了燃烧前缘附近温度和原油饱和度分布、物质平衡及空气需要量和氧气浓度计算关系式。

1969年, Parrish 等人在前人工作的基础上, 又进行了正向湿式燃烧试验, 深入讨论了各参数的影响因素, 提供了湿式燃烧设计思路^[59]。

1974年, Garon 等人开展了室内反向燃烧试验, 并讨论了与其有关的影响因素^[10]。

1977年, Burger^[64]和 Buesse 也发表了有关火烧油层的研究报告, 并提出了氧气需要量计算式和点火时间方程式。

Vermar (1978), Crookston (1979)^[65]及 Coast (1980) 提出了燃烧反应速度计算式。

1984年, Burger 等人建立了干式燃烧和湿式燃烧过程数学模型, 并据此提出了将火烧油层应用于油田现场的新方法^[6]。

1995年, Ramazan Ocalan 和 Mustafa Versan Kok 研究了在给定油藏的条件下, 用火烧油层模型所得最终产油量、水分、气体室内实验数据来分析油藏火驱的可行性。同时, 运用前缘推进及优化模型得出的数值结果进行分析并与实验结果进行了对比^[13, 77]。

2000年, SuatBagci 和 Mustafa Versan Kok 对干式燃烧方法和湿式燃烧方法做了室内实验, 对两种燃烧的特点进行了仔细的研究, 在干式燃烧实验中, 发现随着原油的 API 值下降, 燃料消耗的速度更快, 在空气与水的比率达到优化值的时候, 燃料消耗的速率呈现下降的趋势。在湿式燃烧里, 采用高的气水比, 随着 API 值的增加, 燃料的消耗量会下降^[78]。他们总结了两种燃烧方式的优缺点, 并提出了两种燃烧方式的适用场合。

在 Petit H.J.M. 的 In-situ Combustion Experiments with Oxygen-enriched Air 学术论文中对富氧条件下的燃烧特性做了研究^[78], 他们的研究结果表明了富氧条件下火烧油层的诸多优点。

M.Greaves^[47]等人使用 Wolf Lake 的稠油, 在三维物理模型上进行了水平井的火烧油层物理模拟实验。模型几何尺寸为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。实验设计了 3 种不同的水平井组合关系, 采用 3 种不同的轻质油、中质油和稠油进行了研究。他们经过研究得到实验结论: THAI—“水平段”注空气是稠油和中质油油藏中应用 HTO-IAF (高温氧化—非混相空气驱) 法的一种非常有效的方法; THAI 法的特点是只在燃烧前缘前面形成窄的可动油带。沿着水平井长度方向进行了完全射孔, 确保了油藏冷油区的流体饱和度保持不变。其作用在于形成“黏滞阻挡层”阻挡热气流, 使所有的流体和燃烧气向下流入水平井射孔段。因而, THAI 是一种重力辅助层内燃烧法; THAI 的强制流动和重力辅助机理保证了这一方法是完全稳定的, 即没有气体重力上窜的影响。采收率非常高, 达到 85% OOIP 的预定目标; 燃烧前缘前面形成的窄可动油带的特点是, 它能维持稠油的热力开采用作用, 使油产量有较大增加。

火烧油层最重要的过程是燃料的燃烧。利用热重分析仪分析原油裂解燃烧理论不仅耗费低廉, 而且实验的周期短, 大约为 1h。国外大批学者在 20 世纪 70 年代从事常压下的热重分析、高压下的热分析, 这批学者给出了原油的动力学参数, 定性地分析了压力、加热

速率及原油性质对反应动力学的影响。

热分析方法定义为随时间或温度的变化对样品的化学或物理性质改变进行测量的一种方法。在过去的 10 多年里, 尽管热分析技术 (DSC、DTA 和 TGA) 用于矿物、黏土、高分子材料、食品和煤炭这些物品的性质分析较为普遍, 但在石油行业里却没有得到大量的运用。试图用热分析的方法 (DTA) 去研究原油的燃烧这种想法可以追溯到 1959 年, 那时, Tadema 通过对砂里面的原油进行燃烧实验获得了 DTA 曲线, 发现了两种不同的燃烧区域。这两种区域被命名为低温氧化和高温氧化, 它们分别在 250℃ 和 350℃ 进行的。此外, Tadema 针对干式正向燃烧过程提出了空气需要量的计算方法, 还建立了估算其采收率与已燃烧容积之间的关系。后来, 又有大量的学者采用了热分析方法对原油进行了研究。例如 Mustafa Versan Kok 利用 DSC 和 DTA 去分析两稠油热解和燃烧性能的特点。在燃烧实验中, 观察到了 3 个不同的反应区域即低温氧化 LTO、原油分解 FD 及高温氧化 HTO 现象, 动力学参数可以通过 TGA 和 DSC 曲线求得。

1964 年, Coats 和 Redfern 运用 TG 和 DTA 数据, 提出了一种基于积分方法的模型, 他们提出的模型需要假定反应级数^[67]。合适的反应级数的假定, 可以满足更好的线性关系, 可以应用他们的模型计算原油反应活化能。

由于火烧油层采油过程所处的环境并不是大气环境, 而是在高压下进行的, 因此为了模拟更真实的油藏条件, 得到可靠的实验结果, 国外的许多学者进行了高压下的原油裂解与燃烧分析 (HPTG)。1995 年, Mustafa Versan Kok 等人进行了原油高压下的热重实验, 在 100psia、200psia 及 300psia 下对原油的燃烧状况和活性进行了研究^[79]。实验表明, 在空气中燃烧, 可以看到 3 种反应区域, 即低温氧化、燃料分解和高温氧化, 这与常压下的热重分析得出的结论类似。在这项研究中, 他们发现燃料固相热分解可以用下列方程来描述:

$$\frac{dx}{dt} = k(1-x)^n$$

$$x = (W_o - W_t) / (W_o - W_f)$$

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}}$$

式中 k ——反应常数;

n ——反应的级数;

W_o ——样品的初始质量;

W_t ——样品在 t 时刻的质量;

W_f ——样品在反应后的质量;

A ——阿累尼乌斯 (S.Arrhenius) 常数;

E ——活化能;

R ——气体常数;

T ——线性加热速度下的绝对温度。

利用上述方程可以求解到原油低温、燃料裂解与高温氧化的活化能。

此外,1996年斯坦福大学化学工程系 S. Indrijarso, D. Price, R. Hughes 三位学者进行了注气压力对原油燃烧动力学影响的研究^[78]。他们在实验中观察到随着注气压力的增大,燃料在相当长的时间内出现了质量增加的现象。他们把这些现象归因为低温氧化或者是气体被燃料吸收的效果。

关于原油裂解问题,许多学者也提出了自己的见解。1986年,Onyeonw^[80]等人提出了热解一级反应分三步进行:沥青质与饱和烃→沥青质;沥青质→焦炭;沥青质→气体。1987年,Lincy等人^[81]提出了低温氧化模型:沥青质与饱和烃+氧气→沥青质;沥青质与饱和烃+氧气→焦炭。另外,Babu和Cormack也提出了低温氧化模型^[78]:芳香烃→树脂→沥青质。考虑到不同原油又产于不同的国家与地区,原油的性质有较大的差异,因此,并不是所有的原油热裂解都具有相同的历程。当然,燃烧动力学过程也不一定具有完全相同的机理。

1.3.2 国内火烧油层室内实验及理论研究

国内开发的火烧油层技术还处在室内实验、理论研究和矿场先导实验阶段。1958—1976年,我国曾先后在新疆、玉门、胜利、扶余等油田开展了火烧油层实验,但由于种种原因,后来中断了实验和相关研究。从1993年开始,胜利油田又将火烧油层列为重点先导实验项目,开展了6井次现场实验,但由于受到技术条件的限制,只进行了干式燃烧实验,未进行湿式燃烧实验。1999年以来,胜利油田在总结干式燃烧实验成果的基础上,又开展了湿式燃烧的实验室内研究,取得了阶段性成果。

2001年,中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院的蔡文斌等人^[18, 19, 82, 83]利用火烧油层燃烧管物理模拟技术,对胜利油田河口油区稠油进行了湿式燃烧实验,研究了湿式燃烧条件下的燃料消耗量、视氢碳原子比、燃烧前缘推进速度和空气需要量等技术参数,以及注水量与注空气的比值对火烧油层性能的影响。他们的研究表明:湿式燃烧较干式燃烧可以更有效地回收已燃区的热量,并大大降低燃料消耗与空气需要量,提高了采收率。

2003年,中国石油大学储运与建筑工程学院杨德伟^[16, 30]、王弥康等人,在一维燃烧管室内模拟实验装置上分别对火烧油层热力采油过程的干式向前和湿式向前燃烧工艺进行了研究,确定了在这两种工艺条件下油样的燃烧特性参数(燃料消耗量、视氢碳原子比和空气需要量等)、燃烧前缘推进速度和原油采收率等,计算了空气/原油比、氧气利用率等数据。杨德伟、王弥康等人还将两种工艺结果进行对比,研究了注入水和空气的体积比(WAR)对火烧油层效果的影响,确定了合适的注水时机与WAR值。实验结果表明,采用湿式向前燃烧法能够有效地回收留在已燃区的热量,提高燃烧反应生成热量的利用率。湿式燃烧工艺能显著地降低燃料消耗量与空气需要量,加快了燃烧前缘推进速度,提高了原油采收率。湿式燃烧的水与空气的比例不应小于 $0.003\text{m}^3/\text{m}^3$ 。湿式燃烧的注水时机选择在稳定燃烧建立后、燃烧前缘推进到燃烧管长的25%左右时较为适宜。

2005年,赵东伟、蒋海岩、张琪^[22, 27, 32, 84]利用室内燃烧管物理模拟技术,对欢127块兴隆台油层原油进行了室内干式燃烧实验。实验分析了产出液性质及产出气体组成,研究了火烧油层温度场分布、注气参数对采收率的影响,提供了数值模拟研究所需的基本参数及控制条件。实验结果表明,欢127块兴隆台油层能够在点火温度 $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下点燃,在一定的注气速度下,能够顺利进行燃烧,室内实验采收率可达83.1%。赵东伟等人的室内研