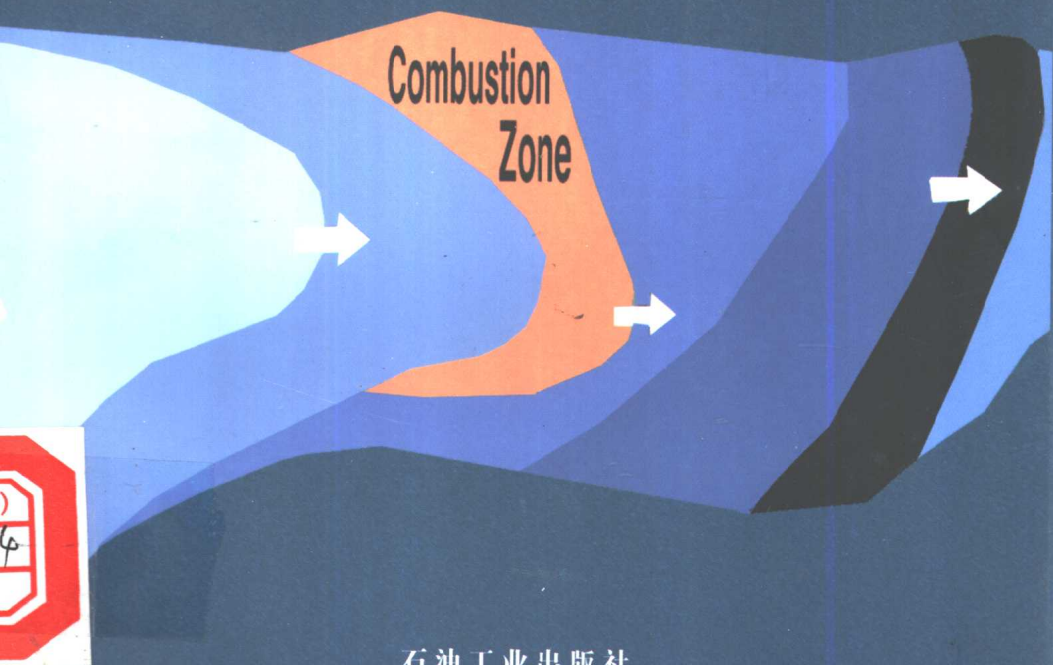


火烧油层采油

张敬华 杨双虎 王庆林 编著



石油工业出版社

火 烧 油 层 采 油

张敬华 杨双虎 王庆林 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从读者的需要和矿场实用的角度出发,阐述了火烧油层的采油原理,并以丰富的国内外火烧油层资料,较系统、全面地介绍了火烧油层采油工艺技术、火烧油层先导试验设计、矿场应用实例,以及生产操作的经验。本书可供从事采油现场工作的技术人员,以及科研、大专院校的科研人员和相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

火烧油层采油/张敬华等编著.

北京:石油工业出版社,2000.9

ISBN7-5021-3094-2

I. 火…

II. 张…

III. 火烧油层-石油开采

IV. TE357.44

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第44856号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 8.5 印张 228 千字 印 1—1000

2000 年 9 月北京第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3094-2/TE·2368

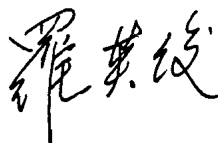
定价: 15.00 元

序 言

火烧油层采油是一种特殊的采油方式，同时又是过程十分复杂的生产技术。因此，自从 20 世纪 50 年代初进入矿场试验以来，在全世界尽管已有不少应用火烧油层采油的成功实例，但是，确实亦有很多失败的实例。然而，同其他热力采油方法相比，对于不同类型的油层而言，火烧油层采油具有独特的优点，而使其具有较强的竞争力和广阔的发展前景。

本书作者从读者的需要和矿场实用的角度出发，阐述了火烧油层的采油原理，并以丰富的国内外火烧油层资料，较系统、全面地介绍了火烧油层工艺技术、火烧油层先导试验设计、矿场应用实例，以及生产操作的经验。毫无疑问，本书的出版不仅对矿场的工程师和作业者有较强的实用性，而且对石油院校相关专业的师生亦有一定的参考价值。

我由衷地祝贺本书的出版。



2000 年 7 月

前 言

随着我国石油工业的不断发展,石油开采工艺技术逐渐完善、配套。但随着我国国民经济的不断高速发展,石油需求量也逐渐增加。要提高原油产量,就必须依靠技术进步,一方面,可以从开采过的油藏中采出更多的原油,另一方面,可经济地开采难以动用的石油资源,因此,研究和试验新的提高石油采收率(EOR)技术尤为重要。21 世纪初,我国已经到了加入 WTO 的关键时期,同时面临着 21 世纪的全球化经济新格局、新形势,通过科技创新不仅能提高我国的石油开采技术水平,还能提高我国石油企业的国际竞争能力。

火烧油层是提高石油采收率的方法之一,亦是作为油田开采中、后期转换开发方式的有途途径。它不仅适用于重质油藏,也适用于轻质油藏,而且还具有较高的驱油效率。国外自 50 年代开始研究,80 年代取得了较快的发展和应用。主要有美国、罗马尼亚、加拿大、委内瑞拉和前苏联等国开展了或正在开展大规模的工业性开采试验,并有的取得了显著的经济效果。我国自 1958 年起,已开始开展火烧油层技术的研究和现场试验工作。20 世纪末,新疆克拉玛依、辽河、胜利和河南等油田又陆续开展了火烧油层的技术研究和现场试验。辽河油田是我国主要的稠油生产区,通过多年来的研究和生产实践,已形成了配套的稠油开采工艺技术。为了探索中、后期稠油油藏经济、合理和高效开发的有效途径,1996 年,辽河石油勘探局成立了由张桐义、张敬华、贾庆仲、赵政敏、杨双虎等人组成的火烧油层先导试验项目组,并于 1996 年和 1997 年先后两次在科尔沁油田马家铺庙 5 块进行了火烧油层现场试验,形成了配套的油藏工程、数物模、点火、管火和动态监测等技术。

本书是以国内外多年来的火烧油层技术研究资料为基础,以现场应用为宗旨,结合国内外火烧油层现场试验的实例而编写的。

本书较系统地阐明了火烧油层技术的基本原理和选井选层标准，详细地介绍了火烧油层点火、管火等工艺技术，同时为便于现场应用和实际操作，在先导试验方案设计、设备选型、现场试验中的问题及对策等方面进行了详细阐述。本书可供从事石油开采工程工作的技术人员阅读，以及科研、大专院校研究人员和有专专业师生学习参考。

本书由张敬华、杨双虎、王庆林编著。初稿编写历时两年半的时间，在初稿完成后，征求了有关专家的意见，对书稿进行了补充和完善。全书由沈燮泉、胡智勉对书稿审校，最后由张桐义定稿。

本书在编写过程中得到了北京石油勘探开发科学研究院、石油工业出版社和辽河石油勘探局相关单位等的大力支持和帮助，这是本书编写能够顺利进行的有力保证。在书稿的资料收集、整理和编写过程中，刘安建、蔡建华、周全兴、赵传家、鲍锋、李洁、张洪梅、王德有、郭惠民、林平、安久全、孙培国、咸玥瑛等给予了宝贵的支持，并参与了部分编写工作，作出了积极的贡献。在此，谨向所有提供指导、支持与帮助的单位 and 有关人致以衷心的感谢。

限于作者的水平，疏漏和失误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2000年2月

目 录

第一章 绪 言	(1)
第一节 本书内容的范围和结构特点.....	(1)
第二节 热力采油与火烧油层.....	(3)
第三节 火烧油层的发展概况.....	(6)
一、探索时期 (1958~1961)	(7)
二、理论研究时期 (1962~1964)	(7)
三、工业试验时期 (1965~1976)	(7)
第二章 火烧油层的基本原理及选井选层	(11)
第一节 干式正向火烧油层	(11)
一、驱油机理	(11)
二、驱油特点	(14)
第二节 湿式正向火烧油层	(15)
第三节 反向火烧油层	(17)
第四节 火烧油层的选井与选层	(19)
一、油藏对火烧油层的适应性	(21)
二、适宜于火烧油层的油层厚度	(23)
三、适宜于火烧油层的油层深度	(23)
四、适合火烧油层的油层物性及原油物性	(24)
第三章 火烧油层工艺技术	(28)
第一节 油层点火技术	(28)
一、人工点火方法	(28)
二、层内自燃点火方法	(33)
三、判断油层点燃的方法	(36)
四、油层点火操作及注意事项	(38)
第二节 管火技术	(40)
一、影响油层均匀、稳定燃烧的因素	(41)
二、管火经验	(43)

第三节	空气压缩设备的选用	(44)
第四节	火烧油层的井口和井身结构	(47)
一、	火烧油层点火井井口装置	(47)
二、	注入(火)井	(47)
三、	生产井	(51)
第五节	火烧油层的资料录取和动态分析	(54)
一、	火烧油层矿场资料录取	(54)
二、	燃烧动态指标计算方法与评价	(57)
第四章	火烧油层先导试验方案设计	(67)
第一节	先导试验的目的和依据	(67)
第二节	燃烧方式的选择	(68)
第三节	试注作业	(69)
第四节	火烧油层的主要设计参数	(71)
一、	燃烧消耗量	(71)
二、	湿式燃烧时机的选择	(73)
三、	风水比(AWR)的选择	(74)
四、	注气速度和燃烧时间	(75)
五、	注入压力	(75)
六、	燃烧效果预测	(78)
第五节	对相关问题的考虑	(79)
一、	完井	(79)
二、	监测	(79)
第六节	火烧油层方案研究与设计实例	(83)
一、	新疆克拉玛依油田六东 ₂ 区克下组油藏	(83)
二、	河南井楼油田零区试验区	(102)
三、	辽河科尔沁油田马家铺庙5试验区	(106)
第五章	火烧油层现场试验中的问题与对策	(121)
第一节	火烧油层的监测问题	(121)
一、	火烧油层的监测项目	(121)
二、	火烧油层的监测问题	(122)

第二节 火烧油层现场试验中常见的问题与对策·····	(124)
一、点火问题及对策·····	(124)
二、燃烧问题及对策·····	(126)
三、构造与井网的问题及对策·····	(128)
四、井下设备损坏及对策·····	(131)
五、地面设备故障及对策·····	(133)
六、操作问题及对策·····	(134)
七、精心设计火烧油层方案·····	(135)
第六章 火烧油层的发展与前景·····	(139)
第一节 火烧油层的发展综述·····	(139)
一、火烧油层发展历程·····	(140)
二、火烧油层采油技术的发展·····	(142)
第二节 火烧油层的前景·····	(156)
第七章 美国典型的火烧油层现场试验·····	(160)
第一节 Appalachian, Paris Valley, Bellevue 油田	
火烧油层试验·····	(160)
一、宾夕法尼亚 Appalachian 区火烧油层试验 ·····	(160)
二、Paris Valley 油田湿式火烧油层试验 ·····	(166)
三、Bodcau 火烧油层试验 ·····	(168)
四、Bartlett 油田火烧油层试验 ·····	(170)
第二节 Teapot Dome 油田火烧油层试验 ·····	(172)
一、油田开发情况·····	(172)
二、油藏描述·····	(173)
三、火烧油层项目准备情况·····	(174)
四、点火试验·····	(178)
五、先导试验分析·····	(181)
六、生产动态分析·····	(190)
第八章 罗马尼亚、委内瑞拉和前苏联的火烧油层现场试验	
·····	(193)
第一节 罗马尼亚火烧油层现场试验·····	(193)

一、Suplacu de Barcău 油田火烧油层试验	(194)
二、Bălăria 油田火烧油层试验	(203)
三、东 Videle 油田火烧油层试验	(205)
四、西 Videle 油田火烧油层试验	(208)
第二节 委内瑞拉和前苏联火烧油层现场试验	(212)
一、委内瑞拉火烧油层现场试验	(213)
二、前苏联火烧油层现场试验	(226)
第九章 新疆克拉玛依油田火烧油层现场试验	(237)
第一节 克拉玛依油田火烧油层现场试验	(237)
一、8001 井组试验	(237)
二、2001 井组试验	(241)
三、黑四区行列井组试验	(243)
第二节 对管火的基本认识	(248)
一、试验井组的开发方案	(248)
二、燃烧动态的掌握和调整	(249)
三、移风接火	(255)
四、余热利用	(259)

第一章 绪 言

第一节 本书内容的范围和结构特点

尽管在国外已经公开发表了很多有关火烧油层(又称火驱)采油的论文和专著,但是,在国内由于开展火烧油层采油的研究与试验起步较晚,并且也没有像注水或注蒸汽采油那样进入到大规模的工业应用。因此,同其他采油方法相比较而言,公开发表的有关火烧油层采油的文章和专著是比较少的。此种情形,已远远不能适应我国石油工业发展的要求。

本书的主要目的是从矿场实用的角度出发,介绍火烧油层采油技术及其发展。因此,作者在本书中除了简明地介绍了火烧油层采油的原理与选井选层外,较详细地阐述了火烧油层采油工艺技术;讨论了如何进行其先导试验方案设计;同时对于火烧油层采油现场试验中的常见问题与对策、火烧油层应用前景进行了讨论。值得一提的是,作者收集了较为丰富的国内外火烧油层采油现场试验资料,用了较大的篇幅(第七、八、九三章)介绍了这些典型的火烧油层现场试验,旨在帮助读者加深对火烧油层采油技术的复杂性、适应性的认识,并从这些典型的现场试验中得到有益的启示及宝贵的矿场作业经验。

从上面的介绍不难看出,作者突出了本书的通俗性、资料性以及矿场上的可应用性。因此,无论是对火烧油层的基本知识、工程技术、方案设计,还是矿场作业等的介绍,省去了繁杂的数学公式推演,尽可能作到通俗易懂。因此,本书的主要读者将是全国各油田矿场上的专业技术人员、技术人员,以及在矿场负责项目管理、维修和作业的人员。

资料性,系指作者在本书中汇集了十分丰富的火烧油层资料。

在先导试验方案设计一章中，除了一般性地介绍外，还注重通过实例开展进一步讨论。如上所述，作者在本书中用三章篇幅介绍了国内外火烧油层采油典型的现场试验，无疑，这些丰富的、系统的资料，对于专门从事火烧油层技术研究的科研人员以及石油院校油藏工程及开发专业的师生，亦有一定的参考价值。

本书旨在为工程师们在进行火烧油层采油初步设计时提供必要的资料，读者可以从本书找到一些关于处理特殊问题的详细资料，但并未提供解决特殊问题的特殊方法。

本书第二章讲述火烧油层的基本原理及如何进行选井选层。第三章系本书的重点之一，讲述了矿场上实用的火烧油层采油工艺技术，侧重于围绕油层点火、维持油层燃烧的管火和不间断地提供助燃剂（空气或富氧）的压缩设备、完井、资料录取以及日常动态分析方法等配套的工艺技术的讨论。对于矿场上的工程师们而言，这是十分重要的一章，因为它对现场火烧油层项目的实施与操作会大有帮助，读者应该至少通读这一章。第四章讨论了火烧油层采油先导试验方案的设计。作者除了围绕着与先导试验方案设计有关的几个问题展开讨论之外，还通过对设计实例的介绍，较为详细地讲述了其先导试验方案的设计方法与步骤，这同样是十分重要的一章。第五章对火烧油层现场试验中常出现的问题以及解决这些问题的对策进行了讨论，无疑这对矿场的工程师们将会是大有帮助的。作者在第六章讨论火烧油层采油技术的现状和前景。值得注意的是，作者为了实现本书的编写宗旨，以三章（第七、第八和第九章）的篇幅对美国、罗马尼亚、前苏联、委内瑞拉和中国的典型的火烧油层采油现场试验，进行了较为详细而系统的介绍。通过阅读这三章，读者不但可以进一步加深对火烧油层采油技术的认识，而且还可以从这些典型的现场试验中，获得十分有益的启发与帮助。

综上所述，本书特别注重理论与实践的统一，注重其通俗性以适应矿场广大读者的需求。因此，本书可以说是一本实用的火烧油层采油技术工作指南。

第二节 热力采油与火烧油层

众所周知,原油受热后,其粘度降低并且变得更容易流动。基于原油的这一重要特性,人们进行了大量的研究,开发了向油层注入热量的各种技术,以改善重质高粘油的开采效果。图 1—1 示出了不同密度的原油和水的粘度对温度的敏感性。原油粘度,特别是稠油的粘度随温度的升高而急剧下降,这在很大程度上说明了热力提高原油采收率(EOR)的方法应用得非常广泛和成功的原因。

尽管人们也曾尝试过热水驱,但应用得非常有限(参见表 1—1)。其原因是热水的热焓小,因此加

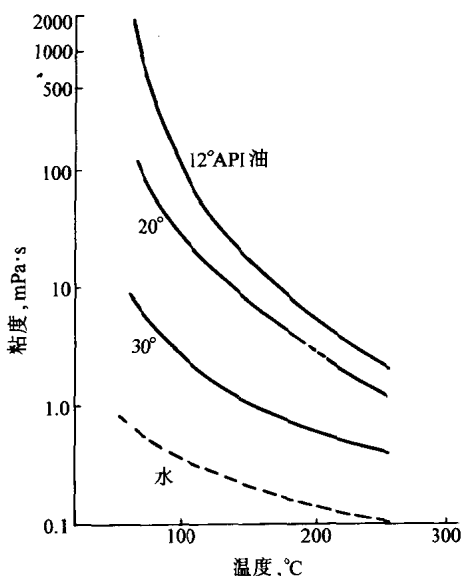


图 1—1 油、水粘度随温度的变化

热油藏中的原油和岩石的速度太慢。要想获得较高的效率,需要很高的注热速度。

蒸汽含有大量潜热。自 50 年代后期用蒸汽激励高粘油(稠油)井的生产成功以来,注蒸汽在石油工业界已得到了广泛的应用。其方法有两种,一种是蒸汽吞吐,另一种是蒸汽驱。在我国,自 80 年代初注蒸汽开采稠油的工业试验获得成功以来,近年来注蒸汽开采的稠油年产量一直保持在 1000 万吨以上。

不难看出,热力采油主要包括注蒸汽和火烧油层。注蒸汽和火烧油层都是利用热量加热油层和油层中的流体,降低原油粘度以达到减小油层中原油流动阻力的目的。所不同的是蒸汽是在地

表 1—1 美国热力 EOR 和工程项目表 (引自 OGJ 特刊 1992)

热采方法	1980	1982	1984	1986	1988	1990	1992	与 1990 年 相比, %
------	------	------	------	------	------	------	------	-------------------

产量, m³/d

注蒸汽	38710	45852	56936	74516	72417	70612	72182	2.2
火烧油层	1929	1626	1025	1633	1037	968	748	-29.5
注热水	—	—	—	112	460	634	315	-101.3
合 计	40639	47478	57961	76261	73914	72214	73245	1.4

工程项目数

注蒸汽	133	118	133	181	133	137	117	-17.1
火烧油层	17	21	18	17	9	8	8	0
注热水	—	—	—	3	10	9	6	-50.0
合 计	150	139	151	201	152	154	131	-17.6

面上的蒸汽发生器(热采锅炉)中产生,通过地面管道和油井注入油层,而火烧油层的热量则是在油层内部产生,因而也称为就地加热或就地燃烧过程,这是按产生热量的方式或地点而区分的。

如果按注采工艺区分,可以把热力采油分为热驱(thermal

drive) 和热力激励或增产 (thermal stimulation) 两类。所谓热驱, 是指在一定的井网模式下, 由注入井将热流体连续地注入油层, 由生产井采油。维持热流体注入所需的压力会加快原油向生产井的流动, 增大了油藏中的驱动力, 因此, 热驱不仅由温度升高而降低流动阻力, 而且为增加产量提供动力, 消耗热量多, 但能获得较高的最终采收率。注蒸汽的热驱称为蒸汽驱 (steam drive 或 steamflood), 注入空气火烧油层的热驱称为火驱 (fireflood)。

热力激励或增产只能加热井筒附近的油层。一旦热处理半径以内原油流动阻力降低, 较远处油层内的驱动力, 如重力、溶解气和天然水等, 就可以引起该井产油速度的增加。注蒸汽的热力激励称之为蒸汽吞吐。注空气火烧油层用作油井激励的增产措施很少采用, 有时仅作为一种特殊的方法使用^[1]。

由表 1—1 可以看出, 尽管火烧油层和注蒸汽在相同年代起步, 但是从一开始至今, 无论在工程项目数量和原油产量方面, 都无法与注蒸汽相比, 少数国家 (如罗马尼亚) 除外。火烧油层工艺发展缓慢有技术和经济诸方面的原因。怀特 (P. D. White) 认为: 一是初期投资少而见效快的蒸汽吞吐的出现; 二是火烧油层项目设计和操作要求较高的技术水平^[2]。火烧油层施工比注蒸汽困难, 地面无法及时控制和了解油层内复杂的燃烧和低温氧化反应。此外, 火烧油层的技术费用 (主要是钻井和完井、注入和采油设备、地面装置、施工和维护费以及特殊施工费等) 比注蒸汽高。这些原因也影响火烧油层热采的发展比注蒸汽热采的发展缓慢。

但是, 火烧油层与注蒸汽相比, 具有的下列优点是注蒸汽方法无法比拟的:

- 1) 它所使用的注入剂——空气是到处都有, 是取之不尽用之不竭的; 而注蒸汽则需要大量的水, 水的资源在某些地区可能匮乏。

- 2) 火烧油层烧掉的是原油中约 10% 的重组分, 并可使其余的原油改质。

3) 火烧油层比注蒸汽有更宽广的油藏适用条件。

4) 火烧油层的热量是就地产生的,比注蒸汽的热能利用率要高,并可节省地面和井筒隔热措施的投资。

1994年4月,在美国能源部举办的一次火烧油层专题讨论会上,著名的热采专家 S. M. Faroug Ali 指出:火烧油层仍是最诱人的提高原油采收率的方法^[3]。

第三节 火烧油层的发展概况

美国早在1917年J. O. 李威斯就提出了采用热力或注溶剂方法,驱替地层中原油以提高采收率的概念。1923年霍华德(Howard)正式提出了火烧油层(火驱)方法的专利^[4]。当时,由于新油田勘探成功率较高,投资商无意进行试验,直到1947年才开始了实验室试验研究。进入50年代后,美国石油资源日渐枯竭,新油田勘探成功率渐低,才开始注意这项新技术。从1951年起,各石油公司在油田竞相开展试验,使得火烧油层技术得到了较快发展^[5]。

加拿大为了解决阿萨巴斯卡(Athabasca)沥青砂的开发问题,从1964年起在阿尔伯达(Alberta)省开展了各种火驱方式的试验,并取得了较好的效果。

罗马尼亚于1964年在苏甫拉库·巴尔克乌(Suplacu de Barcău)油田也成功地进行了火烧油层试验。并于1969年同法国合作,先后在17个油田上进行了试验,其中有4个油田投入了大规模的工业生产。试验表明:火烧油层采收率可由5%~9%提高到50%以上,生产每 m^3 原油的空气量(AOR)为 2000m^3 ,耗电量为 $250\sim 315\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,空压机动力的消耗只占采出原油量17%的好效果。因此,该国在提高原油采收率的规划中,决定以发展火烧油层采油为主。

前苏联远在1933年试验了煤的地下气化的方法^[6],到1966年在巴甫洛夫油田开始了第一个火烧油层现场试验。

在国外开展火烧油层采油的还有委内瑞拉、荷兰、德国、匈牙利、土耳其、日本、印度等 40 余个国家。

我国自 1958 年起，先后在新疆、玉门、胜利、吉林和辽河等油田开展了火烧油层试验研究，其中以新疆克拉玛依油田持续的时间最长（1958~1976 年），积累的经验 and 资料较为丰富，大致可分为三个发展时期。

一、探索时期（1958~1961）

为了获得感性认识，探索克拉玛依稠油油层能否点燃、如何点燃的问题，进行了一系列实验室和现场中间试验。三年内研制成功了一套汽油点火器，完成了两次中间试验。1959 年当试验汽油点火器时，在黑油山露头 2.5m 深的坑中点燃了油层，持续燃烧 37h，剖视油层之后，丰富了火烧油层的感性认识。为了加深对油层点火和油层燃烧过程的规律的认识，1960 年在黑油山点燃了深 14m 的浅层，燃烧 24d；1961 年在同一地区又点燃了深 18m 的油层，燃烧 34d。通过两次中间试验，使难于用常规方法开采的稠油油田，井组采收率达到 50% 以上的好效果。

二、理论研究时期（1962~1964）

为了进一步掌握油层燃烧过程的内在变化规律，了解影响油层燃烧参数的诸因素，以及火烧油层对油品性质的影响程度等问题，进行了一系列实验室物理模拟试验研究。

三、工业试验时期（1965~1976）

1965 年 6 月在黑油山三区点燃了油层深度为 85m 的 8001 井组，油层燃烧获得初步效果之后，原石油工业部决定扩大试验规模。1966 年在二西 1 区点燃了 414m 深的自喷井组；1969 年在黑油山四区同时点燃了三口井油层的行列火驱井组，并拉成了火线；1971~1973 年又开辟了三个面积井组。在此期间，为了配合解决先导试验中出现的问题，进行了一次大规模的露头直观燃烧试验和百余次模拟试验，研制成功了管状元件的电热点火器。各次试验均采用正向干式或湿式燃烧方式（详见表 1—2）。