

〔美〕P.D.怀特 J.T.莫斯

热采方法

石油工业出版社

热采方法

〔美〕 P.D.怀特 J.T.莫斯

新疆石油管理局油田工艺研究所 译

王弥康校

石油工业出版社

B

485424

内 容 提 要

本书系统地介绍了热力采油的基本原理、各种热力过程的计算方法、图表数据、举例以及方案设计。讨论了热采工艺中一些特殊问题、动态分析和热采专用设备,并给出部分习题。本书是一本帮助提高热采理论知识的工具书,可供从事热采工作的科研人员和工程技术人员参考,也可作为石油院校的教学参考书。

本书第一、七章由邢伯涛同志译,第二、四章由郎顺宗同志译,第三、五、八章由张崇甫同志译,第六、九章由杨良贤同志译,第十章及附录部分由杨立强同志译,秦强、祝松荣同志对本书进行了初校。全书由王弥康同志校订。

PHILIP D. WHITE JON T. MOSS
THERMAL RECOVERY METHODS
PENN WELL BOOKS 1983
PENN WELL PUBLISHING COMPANY
TULSA, OKLAHOMA

*

热 采 方 法

〔美〕 P. D. 怀特 J. T. 莫斯

新疆石油管理局油田工艺研究所 译

王 弥 康 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

地质印刷厂排版

顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 11⁵/₈印张 305千字 印1—2,000

1988年3月北京第1版 1988年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2870 定价: 2.15元

ISBN 7-5021-0011-3/TE·12

序 言

提高油层原油开采量的增产工艺已有很大的发展。在美国靠热采增产的油量约占总增产量的70%。有许多方案是从1960年开始执行的，目前看来是经济的，因为原油的价格也已上涨了。按今天的油价很有必要扩大原来进行的方案，并建议在其它更多的油田采用热采工艺。

《热采方法》一书是帮助从事热采工作的工程师们提高热采理论知识的参考书。本书叙述热采的基本原理、并且阐明如何根据油层条件布置注入井网。对油藏工程学有关温度引起流态变化的理论也侧重作了介绍。

本书探讨了蒸汽驱和正向火烧驱的能量平衡，并对正向火烧驱反应作了说明。以全书的内容来看，可概括为：热损失、火烧驱、蒸汽驱替以及周期性的蒸汽注入、井下点火、油井加热和低温氧化。本书最后两章还讨论了动态分析和热采专用设备。

书中的举例和给读者留下的作业有助于读者在领会基本原理的基础上学会应用到实际中去的本领。本书还有一个特点是除介绍各种热力过程的计算方法外，还深入探讨了温度对流体和油层岩石的作用。总之，本书是鼓励工程师们去评价各种工艺的应用前景和合理地进行方案设计，而不是简单地提供一种设计计算指南。因此，书中阐述的方法会加快工程师的计算，提高计算的精确性。还值得提出的是书中为各种方案设计给出了详细的参数。

上述特点使《热采方法》一书成为工程师们设计和计算热采方案的重要参考书。

〔美〕P. D. 怀特
J. T. 莫斯

目 录

第一章 热采工艺.....	(1)
第一节 干式向前燃烧驱油.....	(3)
第二节 联合热驱.....	(6)
第三节 急冷燃烧.....	(7)
第四节 注蒸汽.....	(8)
第五节 反向燃烧.....	(9)
第六节 油井激励	(10)
参考文献	(11)
第二章 油层和油藏评价	(12)
第一节 油层深度	(12)
1. 经济性.....	(12)
2. 储层特征.....	(14)
3. 适用性.....	(15)
第二节 构造和地质	(15)
1. 高流动度的油层.....	(15)
2. 低流动度的油层.....	(18)
第三节 油层厚度	(20)
第四节 原油性质	(22)
1. 原油重度.....	(22)
2. 粘度.....	(22)
3. 流动度.....	(23)
参考文献	(25)
第三章 井网和井距	(26)
第一节 中间试验	(26)
第二节 油田开发井网	(28)
第三节 面积扫油效率	(31)
第四节 井距	(32)
参考文献	(34)

第四章 流动和过程方程	(35)
第一节 稳定流动方程	(35)
第二节 瞬变流动	(40)
第三节 不稳定状态的油藏方程	(43)
第四节 油藏及边界条件	(52)
第五节 联合热驱法加热油层	(56)
第六节 热驱的驱油量	(61)
参考文献	(70)
第五章 热力采油的实验室模拟	(71)
第一节 燃烧管装置及操作	(71)
第二节 燃烧管试验结果计算	(77)
参考文献	(81)
第六章 热损失与传热	(82)
第一节 蒸汽发生器效率和蒸汽干度测定	(82)
1. 分离器法	(83)
2. 氯根滴定法	(83)
3. 电导率法	(83)
4. 孔板流量计法	(83)
第二节 地面输送管线的热损失	(86)
第三节 地面管线设计中的几个问题	(92)
1. 井筒热损失	(93)
2. 总传热系数	(97)
3. 管内对流换热系数	(99)
4. 导热	(99)
5. 对流和辐射换热	(100)
第四节 辐射换热系数	(100)
第五节 对流换热系数	(101)
第六节 总传热系数	(102)
第七节 井筒压力损失	(120)
第八节 套管设计	(122)
第九节 地层热损失	(131)
第十节 蒸汽驱油量	(138)
第十一节 其它传热关系式	(145)

参考文献	(151)
第七章 点火和油井激励	(152)
第一节 点火	(152)
1. 工程设计	(152)
2. 点火器操作	(153)
3. 点火显示	(159)
第二节 自燃和低温氧化	(162)
第三节 井筒加热	(169)
第四节 蒸汽吞吐激励	(172)
参考文献	(182)
第八章 驱替量和产量	(183)
第一节 原油驱替量	(183)
第二节 采油量	(184)
第三节 火烧驱油	(185)
第四节 火驱中的热量分布	(193)
第五节 联合热驱	(194)
1. 联合热驱中的温度分布	(196)
2. 干式火烧	(204)
3. 联合热驱	(204)
4. 计算步骤	(207)
5. 工艺改进	(213)
参考文献	(223)
第九章 动态分析	(224)
第一节 资料收集	(224)
第二节 燃烧前缘位置	(228)
第三节 注入率试验	(234)
1. 观察井	(236)
2. 测井工具	(237)
第四节 压力瞬变试验	(238)
第五节 热采安全注意事项	(242)
参考文献	(245)
第十章 设备	(246)
第一节 空气压缩	(246)

第二节 空气压缩机.....	(248)
第三节 气体分析.....	(255)
第四节 蒸汽的产生.....	(256)
1. 水处理	(258)
2. 烟道气的净化.....	(260)
3. 蒸汽分配.....	(262)
4. 蒸汽流量的测量.....	(262)
第五节 温度测量.....	(264)
1. 基础温差电学	(264)
2. 现场应用	(265)
第六节 氧气.....	(266)
第七节 完井.....	(269)
1. 注入井	(269)
2. 生产井	(271)
3. 地面设施	(273)
参考文献.....	(275)

附录

附录A 供现场选用的基础资料	(276)
附录B 燃烧特性的实验室测定	(278)
附录C 油层和流体的热力性质	(287)
附录D 单位换算表.....	(360)
参考文献.....	(362)

第一章 热采工艺

恐怕再没有其它课题能象提高原油采收率那样支配着石油工业。在大多数产油国中，已有成效地应用了许多采油工艺技术，还有许多提高原油采收率的方案已经拟定。热力采油是极为重要的方法之一。许多油田，特别是API重度低到中的原油或者是原油粘度不适宜用常规方法开采的油田，火烧油层或者注蒸汽对最终采收率来说是最佳的工艺技术。

图 1-1 是根据1962年的资料绘制的累积地质储量和可采量的曲线。当时在美国已采出量加证实储量只占总地质储量的29%。工程师们致力以求的事是加速和提高原油开采量。其最初的方案是要使最终采收率达到75%。这只有采用提高采收率的开采方法，例如热力采油等，才能接近这个水平。

过去的二十年里取得了令人鼓舞的成绩。从联邦政府最近的数字估计来看，地质储量为4500亿桶，采出量为1500亿桶。为了达到75%的采收率，必须大力采用各种提高采收率的方法。在所有的方方法中，提高油层温度的热采工艺被人们认为是达到此目的的主要手段。

升温最明显的作用是降低原油粘度。原油API粘度随温度上升而降低，原油粘度越大，这种变化就越明显。原油流动性也随着加热得到了改善，采油速度也随之提高。由于在较高温度下扫油效率的提高，因此热采可以减少原油的残余饱和度。当热膨胀使油层中剩余的罐存油储量减少时，采收率可增加10~15%。其次，火烧油层产生的高温使地层中一些液体汽化和蒸馏。用来作为地下燃烧燃料的残余油焦只是地层中原有原油的一小部分。而且在高温条件下表面张力和毛细管力也都减小或降至最低了。

人们认真考虑利用加热的方法增产原油已近半个世纪。首先

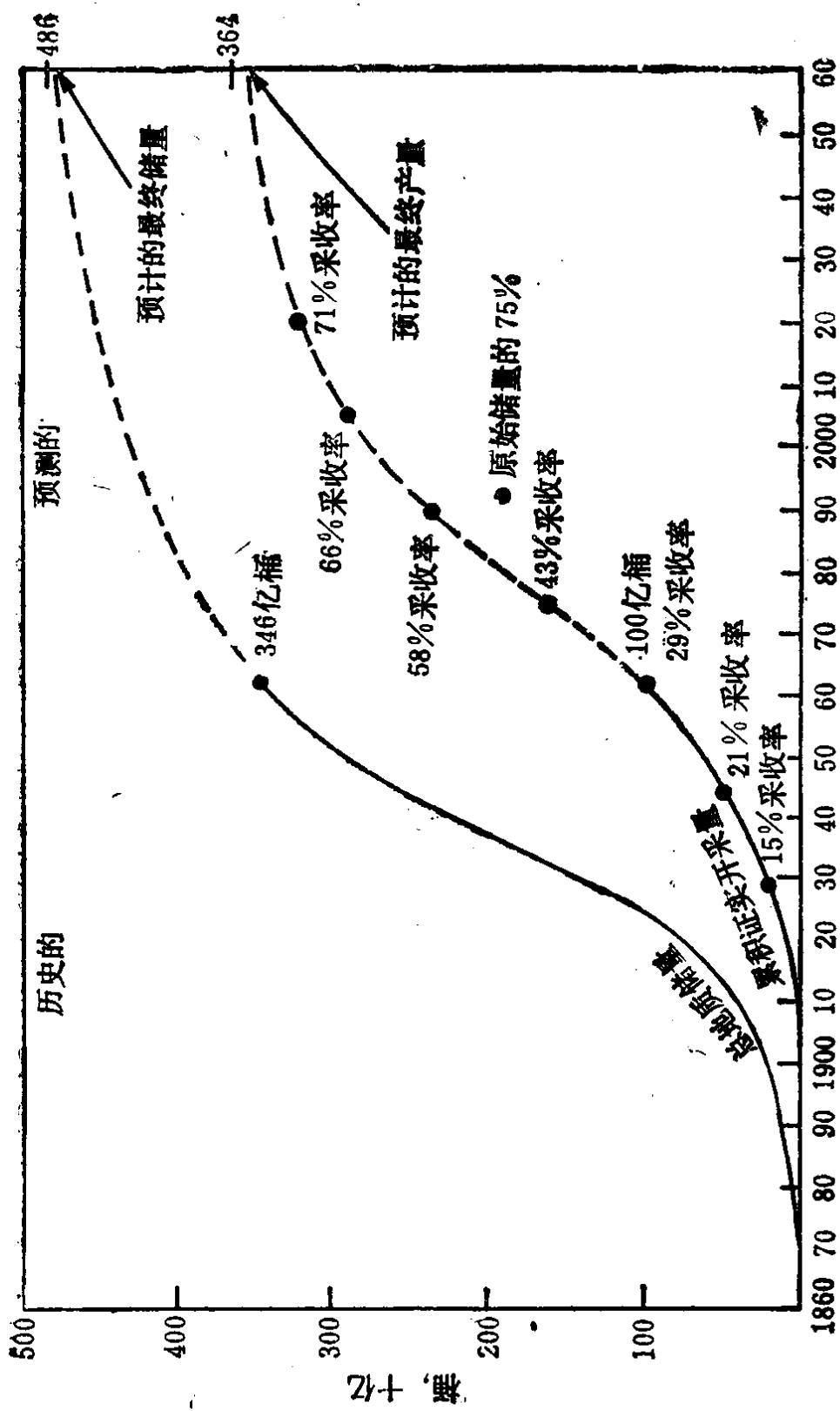


图 1-1 总地质储量和累计探明采出量曲线

开始这项工作的是美国矿务局(the U. S. Bureau of Mines)。人们已做过大量尝试如注入热气体、蒸汽、热水和用电加热器对油层进行加热。在石油工业中,多年来加热方法已广泛用来处理井筒问题,如清蜡或降粘。由于设备和技术改进耗费高,加热方法作为一种采收机理其发展是缓慢的。一些注蒸汽和火烧油层的方案目前正在实施,还有数百口井在进行周期性的热力强化采油。

火烧油层是靠注入空气维持就地原油燃烧来提供能量把原油驱向生产井。烧掉少量就地原油,产生的热量加热油层和油层中的流体。热量是在含油岩层内部产生,其能量损耗最少,因而产生的热量可以得到最充分的利用。

最早的热采工艺技术专利发表于1923年,第一次现场试验是三十年代末期在苏联进行的。自1948年以来,通过实验室研究和大量的现场试验,已取得很大进展,与此同时,莫比尔公司(Mobil)和Sinclair 在1952年分别开始各自的中间试验。这些早期的试验表明,热采方法适用范围很广。莫比尔公司工作目的在于采出一般方法无法开采的重质油,例如:沥青砂;而Sinclair则把目标指向在注水开采后留在油层中的不可采收的轻质油。

早在1933年就开始了注蒸汽现场试验,但是直到1945年新泽西州的标准石油公司(Standard Oil)开始进行一个中间性试验之前,这类方案都尚未取得多大进展。壳牌公司(Shell)在欧洲、加拿大和委内瑞拉进行了一些早期的试验,并于1958年在Yorba Linda 油田开始实施加利福尼亚的第一个注汽工程。此后,注汽方案的数目迅速增加。设备制造商也把轻便的、成套的蒸汽发生器提供给石油工业,这些蒸汽发生器大大地扩大了注蒸汽的应用。

第一节 干式向前燃烧驱油

干式向前燃烧驱油过程基本上是燃烧前缘从注入井向一口或几口生产井缓慢推进的过程。这个过程是从空气注入布置在中心的一个注入井开始的,在注入井周围有一组生产井。在形成了对气

体的渗透能力后,燃烧前缘就由注入井向径向移动。可以用空气、含有不同数量氧的气体或者纯氧维持油层燃烧。

把注入空气加热到 $400\sim1200^{\circ}\text{F}$ 就能在油层开始燃烧,而燃烧的温度主要取决于着火原油的低温氧化特性。通常用气体点火器、电加热器或其它方便的方法在注入井油层面预热空气,然而在一些油层中,当把空气注入一段时间后,原油就自然点燃了。这种反应对温度很敏感,因而井底温度高的深油层能在几小时内点燃,而浅油层则需要几星期才能点燃。也有许多油层总是点不着火。燃烧前缘以一定的速度从注入井径向推进,这个速度主要受燃料类型和数量、空气注入速度以及注入空气中的含氧量等因素决定。

随着燃烧前缘离开注入井向前推进,清楚地形成几个不同的带。这些带的作用机理既有若干差别,又密切相关。这些区带由图 1-2 所示。该图描绘的是在注入井和生产井间燃烧带的横剖面图。图的上部表示对应的油层温度。

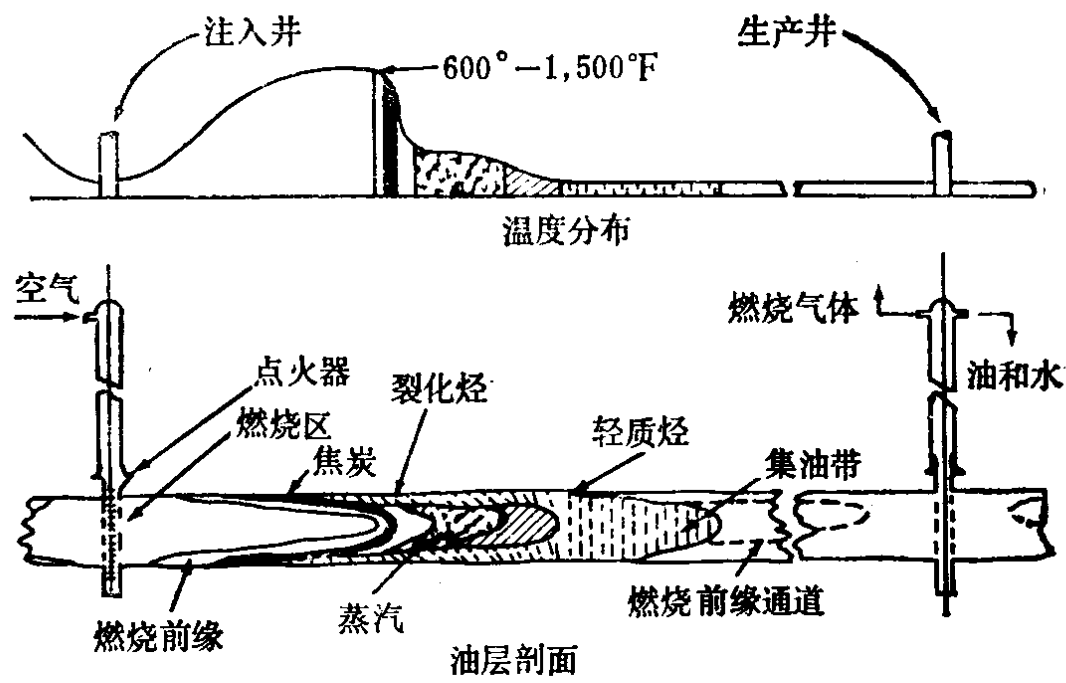


图 1-2 油层中各种不同区带的燃烧驱动机理

燃烧前缘 在高温燃烧前缘前面的原油被碳化成焦炭样物质沉积在砂粒的表面上,这些沉积物是构成此燃烧过程的主要燃料。

留在燃烧前缘后面的是灼热、干净的砂，这些砂有效地加热尚未到达燃烧带的空气。已观测到的燃烧前缘温度最高可以达到600~1500°F。

热裂解 离燃烧带稍远的下游，温度高到足以使较轻质的烃蒸发。这些烃向前运动，进入较冷的油层而冷凝。离燃烧前缘较近处地层的高温把隙间水变成蒸汽，蒸汽也向前移动并在冷的油层中冷凝。燃烧前缘紧前方，高温使留在砂上的重质烃受热裂解。裂解形成的产物是油焦和气态烃。气态烃也在燃烧前缘前头移动，并在较冷的油砂层中部分冷凝。油焦沉积在砂粒上，成为燃烧过程中的燃料。

冷凝蒸汽驱 注入的空气和燃烧带处剩余的燃料起反应时，蒸汽是生成的产物之一。这种蒸汽与地层隙间水蒸发形成的蒸汽一起向前移动，并和前面较冷的砂层接触。蒸汽把热量迅速传给地层，这样就形成了冷凝蒸汽型驱动。蒸汽凝结释放的大量潜热，把相当大的能量传给蒸汽带内和蒸汽带前面的原油，使原油粘度迅速降低，流动性增加，因而提高了原油的驱替能力。

混相驱动 正常蒸馏作用离析出来的气态烃和从裂解反应中形成的气态烃混合；两股气流在前面的集油带处混合并冷凝。这种混合反应和气体冷凝时传递给原油的热量使原油更易流动，因而改善了原油的驱替能力。

气驱 在燃烧过程中，形成了一种很有效的气体驱动。燃烧前缘产生的燃烧气体把热传递给原油。二氧化碳(CO₂)部分地溶解在原油中，使原油粘度进一步降低。蒸汽带前形成的集油带受到燃烧气体的驱替。

热驱 与干式向前燃烧密切相关的驱替机理也形成一种有效的驱动。此外，由于油层流体的对流和通过地层岩石的传导，热能传递到燃烧带的上部、下部和前面的地层，任何其它采油方法都不可能以这种方式越过不可渗透带而驱替流体。

在基本的正向燃烧过程中，燃烧前缘是靠注入压缩空气来维持的。当然也可以用其它气体混合物。在现场试验中都已经成功

地使用了空气、天然气或者再循环气。也曾注入蒸汽、燃烧废气和空气使热量通过地层移动。其它方法是用氧气或富氧空气。

虽然正向燃烧是成功的，但其基本过程存在一个缺点。如图1-3所示，燃烧产生的大部分热量留在已燃带前缘的后面，对采油毫无作用。室内试验和传热计算表明：燃烧前缘没有突破到生产井就可以获得很高的原油开采量。使前缘推进到接近注入井到生产井之间距离的75%处即可取得很高的原油开采量。然后，仅仅通过导热，高温就可以弥补到生产井的剩余距离。

这种部分燃烧能在停止燃烧后几个月到一年以上的期间内增加采油量。注入燃烧废气、水或其它流体也能提高采油量，注入这些流体提高了到未燃烧区的传热速度。

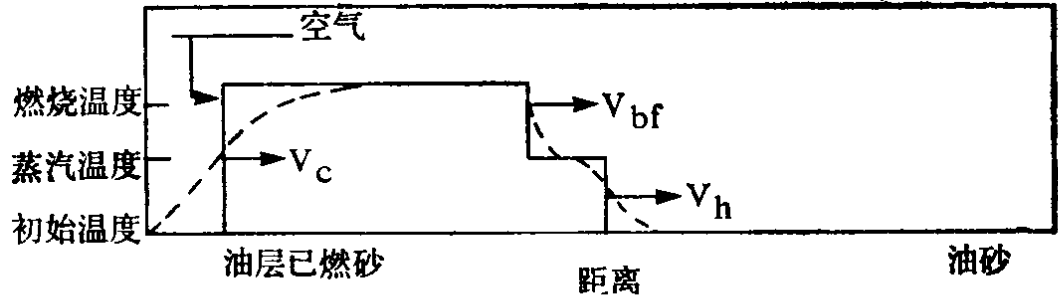


图 1-3 靠注入空气维持的一般火烧油层

火烧油层方法有许多种，但各种方法都非常相似。从根本上说，各种方法都是通过含油地层使高温带移动。

第二节 联合热驱

联合热驱(C T D)是最重大的工艺进展之一。这种方法是同时把空气和水注入地层形成驱动力。如图1-4所示，其燃烧前缘的速度 V_{bf} 和温度峰值都与在正常情况下的相同。因为水闪蒸成蒸汽，所以蒸汽前缘的速度 V_s 接近于 V_{bf} 。由空气和过热蒸汽将已燃油砂层回收的热量传递到燃烧前缘前头的冷凝带。热量的这一传递使 V_h 速度加快。

图1-4表明的是一种利用储存在燃烧前缘后面的废热的有效方法。这些废热就可用于使油层的未燃部分加温。线性系统的燃

烧前缘速度 V_{bf} 直接和空气注入量有关。因为注入空气的热容量低，所以对流冷却前缘速度 V_c 大约仅为燃烧前缘速度 V_{bf} 的 20% (如图 1-3)。热量通过对流或导热向前推移并在燃烧前缘之前建立一个速度为 V_h 的前缘。这个带的温度一般接近于饱和蒸汽温度。

在联合热驱中，燃烧前缘的水-空气的比值要调节到能传递产生的有效热量的 70~90%；这里的有效热是指已考虑了热损失和设计上的各种因素之后的热量。水-空气比的大小取决于油层的燃烧特性。其值大约为 80~250 桶水/10⁶ 标准英尺³ 空气。当已经加热了所要求的那部分油层时，可以停注空气或大大降低空气注入量。以一种不断加速的注入速度注入水，驱动已加热的油以产出最终的可采量。

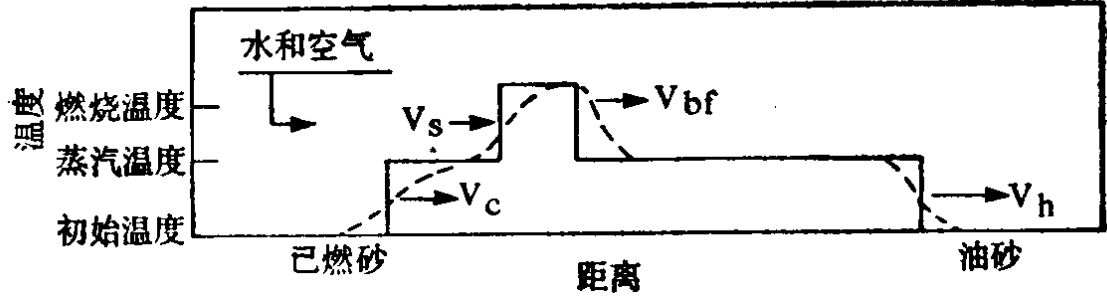


图 1-4 利用注空气和注水（低水-空气比）的联合热驱

第三节 急冷燃烧

如果水和空气的比率增加到 400~500 桶/10⁶ 标准英尺³ 左右时，联合热驱就退化成局部急冷燃烧，如图 1-5 所示。

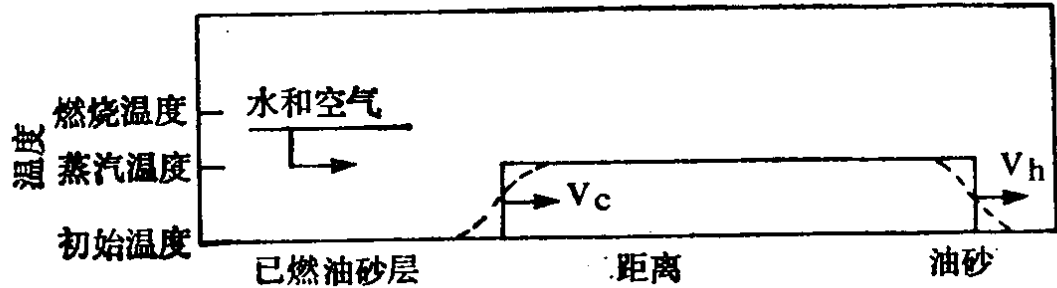


图 1-5 注入高水-空气比的局部急冷燃烧

当对流冷却前缘超过燃烧前缘，即 $V_c(t-t_2) > V_{bf}t$ (t_2 是水注入时间) 时， V_c 就控制前缘的运动。而后，系统的最高温度就接近于在此过程压力下的饱和蒸汽温度。高温区局部急冷，氧气必然向较远的下游移动而在蒸汽温度下与剩余油起作用。这个温度通常高到足以引起迅速氧化，这样仅消耗部分可用燃料。

局部急冷的燃烧特点在于减少二氧化碳 (CO_2) 的发生量，增加了氧化石油产物。如果加热带的温度低于点火温度，反应机理就能转换成仅仅是引起低温度氧化。如果原油对这种反应不敏感，那就不会产生额外的热量。

因为大部分油层仅被加热到饱和蒸汽温度，所以联合热驱能减少总的空气注入量。生产井能在较低温度下工作。注入水能稀释地层中的酸性流体而使其腐蚀影响变得最小。

另外，节省成本的特点也使得联合热驱有更大的发展前景。当油层岩性与注入的空气-水相容时，应当考虑联合热驱工艺。远在高温前缘到达生产井之前，由于加速的热前缘的推进提高了甚至是高粘原油的生产速度，因此联合热驱对于在蒸汽温度下预计具有高开采量的油藏特别有吸引力。

第四节 注蒸汽

注蒸汽是另一种提高油层温度和驱油的方法。图1—6表示的是在饱和温度和压力下，蒸汽进入含油地层后的温度分布。随着蒸汽前缘离开注入井向前推进，由于油层的压力降，温度逐渐降低，驱替前缘的温度也急剧下降。

图 1-6 下部的曲线表示注入形成的各个驱替区。在区 1 内，原油被蒸汽驱扫而降低到残余饱和度。在区 1 前面的区 2 内，蒸汽冷凝，产生的热水驱把原油驱入区 3，此区是一个冷凝集油区。这些饱和度分布说明由于温度升高时原油粘度下降，蒸汽和热水都能有效地驱替原油。原油粘度下降改善了原油的流动性。另外，油层中流体的热膨胀也驱替原油。蒸汽蒸馏也可以驱替很大一部分原油。与注热水相比，这大概是注蒸汽最重要的优点。

室内实验能测定出各个带内的残余油饱和度。诸如蒸汽压力和温度、原油蒸馏特性、粘度、比重等过程变量都引起残余油的很大变化。另一个重要的特征是地层岩石基质的性质。因此室内实验应使用地层岩心进行。许多研究指出，蒸汽区残余油范围为10~40%；较高的残余油饱和度总是与低API重度、高粘原油和粉砂性油藏联系在一起。高孔隙度的油层其扫油和驱替效率也较高。如果在有利的温度、压力和含油饱和度的条件下，蒸汽-油比从0.1到0.25时，蒸汽驱可以获得高的采收率。在更高的蒸汽-油比下还可能采出更多的原油。加利福尼亚州存在上述理想条件，并且采用密集井网，其现场试验表明：采收率往往可以超过50~60%。

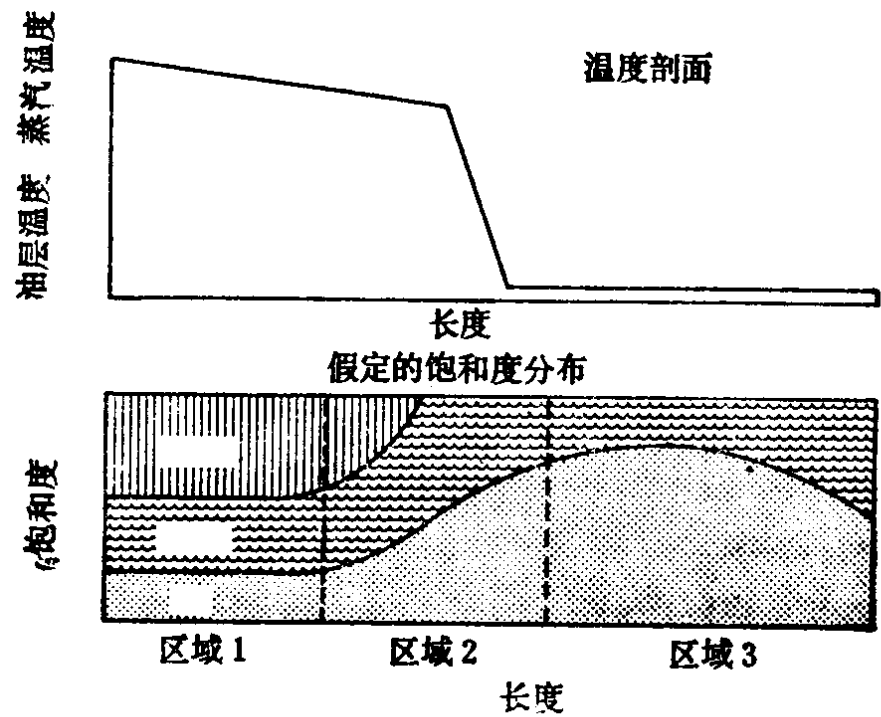


图 1-6 蒸汽驱期间温度和饱和度分布图

注：竖线为蒸汽区；波浪线为水区；网点为油区

第五节 反向燃烧

虽然反向燃烧还未应用于原油工业性生产，但目前正用于地下煤气方案。顾名思义，反向燃烧方向和常规燃烧方向相反。

图 1-7 表示空气以与原始地层相同的温度注入区 1。油层未变，原油物性由于在油层温度下低温氧化可能稍有变化。随着空