

CHOUYOU RELI KAICAI LILUN
YU GONGYIJISHU

「稠油热力开采理论 与工艺技术」

蒋生健 主编



石油工业出版社

稠油热力开采理论与工艺技术

蒋生健 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书论述了稠油热力开采的特点及油田开发中所涉及到的热力学基本知识,并结合生产中的工程实际问题,对目前稠油开采的主要措施——蒸汽吞吐法所涉及的水蒸气的发生与热力过程、蒸汽动力循环过程进行了分析讨论。紧密结合油田开发的热采工艺过程,详细论述了层内燃烧法、热载体法以及热效驱动开发稠油油田,提高稠油油藏采收率方面的知识。书中还列举了美国、加拿大、委内瑞拉和前苏联应用热力法开发油田的工业性试验实例。最后对国外油田开发中常用的热力采油工艺方法、合理的地层改造热力学工艺,以及热力法改造地层的热动力装置作了详尽的介绍。

本书可作为石油院校石油工程专业及相关专业学生的学习参考书,亦可供从事油田开发(尤其是稠油油田开发)的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

稠油热力开采理论与工艺技术/蒋生健主编.

北京:石油工业出版社,2004.1

ISBN 7-5021-4446-3

I.稠…

II.蒋…

III.稠油开采:热力采油

IV.TE355.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 101049 号

稠油热力开采理论与工艺技术

蒋生健主编

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 邮编 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:辽河油田勘探开发研究院印刷厂印刷

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8.25

字数:210 千字 印数:1—1000 册

定价:48.00 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

在我国迄今已发现的 15 个大、中型含油盆地中,有着数量众多的稠油油藏区块。然而由于稠油粘度大,难以流动,因而使得原油开采非常困难。同时由于稠油油藏类型多、埋藏深度不同,油品性质又比较复杂,所以稠油开采成本高。随着找油难度的提高,稠油、高粘油和高含沥青质油田的开发已占据了较高的比例。因此,如何应用更为先进合理的开采方法与技术,对开采难度较大的稠油油田进行开发,以提高储层原油的最终采收率,避免有限资源的浪费是必须解决的实际问题。针对稠油粘度对温度变化敏感,随温度升高而急剧下降的特点,目前我国普遍采用热采法,如蒸汽吞吐、蒸汽驱替和火烧油层等,通过降低稠油的粘度,从而提高稠油在地层条件下的流动性能,使稠油从地层中流出。

本书论述了稠油热力开采的特点及所涉及到的热力学基本知识,结合生产实际及油田开发的热工艺过程,详细讨论了层内燃烧法、热载体法以及以热效驱动开发稠油油田,提高稠油油藏采收率方面的知识。通过对国内外分散在各类文献中有关稠油热采工艺方面资料的收集、整理和分析,书中列举了美国、加拿大、委内瑞拉和前苏联应用热力法开发油田的工业性试验方案及开发结果。希望这些工作对于扩大我国目前热采稠油规模,促进稠油热采领域借鉴国外稠油热采的成功经验,进一步提高稠油油田开发水平和开发的经济效益等起到积极的作用。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编者

2003 年 3 月

目 录

第一章 稠油油田热力法开采概述	(1)
第一节 热力法开发稠油油田的地质物理条件	(3)
第二节 选择生产层和开发系统的基础	(4)
第三节 油藏开采速度对开发指标的影响	(5)
第四节 热力作用地层时的地层热效率	(6)
第二章 水蒸气及蒸汽动力循环	(8)
第一节 基本知识	(8)
第二节 水蒸气的发生过程	(8)
第三节 水蒸气热力性质表和图	(12)
第四节 水蒸气的热力过程	(13)
第五节 蒸汽动力循环	(16)
第三章 利用热载体开发稠油油田	(20)
第一节 热力方法是稠油油田开发的首选	(20)
第二节 等温地层渗透率异常时高粘油油田原油采收率的研究	(22)
第三节 温度对破坏粘弹性体系的机械—结构性质和提高毛细管润湿效果的影响	(24)
第四节 在等温条件下粗大孔隙和微细孔隙储集层中确定原油采收率的实验研究	(24)
第五节 利用各种热载体增加稠油油田原油采收率的有效方法	(28)
第六节 利用不同热载体驱替高粘度原油	(31)
第七节 对水淹层进行周期性蒸汽热力采油的效果	(32)
第四章 层内燃烧法开发稠油油田	(38)
第一节 层内燃烧热力采油的特点	(38)
第二节 利用层内燃烧法时油田的选择	(40)
第三节 层内燃烧湿氧化剂的利用	(40)
第四节 层内燃烧的引燃方法和燃烧的形成	(41)
第五节 同时具有粗大和微细储集层条件下的层内燃烧工艺	(44)
第六节 层内燃烧设备和装置	(47)
第七节 用焦化方法防砂	(52)
第五章 以热效驱动提高稠油油藏采收率	(57)
第一节 油层特性对于加热措施的影响	(57)
第二节 加热方法	(59)
第三节 热水排驱	(61)
第六章 热力法稠油开采工艺技术	(63)
第一节 油井蒸汽热处理效率与产层含水程度的关系	(63)

第二节	地层中连续面积注汽时蒸汽驱油的效率	(65)
第三节	区块周期性蒸汽热力采油法	(68)
第四节	重复性油井蒸汽热处理工艺	(70)
第五节	用常规方法开采天然沥青	(72)
第六节	用采矿法开发	(76)
第七节	美国格林—利维尔盆地页岩加工工艺	(77)
第八节	加拿大应用层内燃烧工艺开发阿塔巴斯卡沥青油田	(80)
第九节	加拿大阿塔巴斯卡油田利用热载体的露天采油法	(82)
第十节	委内瑞拉梯亚·阮纳油田的蒸汽热力采油工艺	(85)
第十一节	前苏联区块—周期性蒸汽热力方法采油的工业试验	(88)
第七章	合理的地层改造热力学工艺	(93)
第一节	蒸汽热力方法采油的发展阶段	(93)
第二节	含油储集层地质—物理性质对工艺选择的影响	(94)
第三节	异常非均质储集层油田建立有效热力作用工艺的研究	(99)
第四节	蒸汽热力方法采油工艺的热动力学监测和调控	(102)
第五节	能耗和注入地层热载体参数的优化	(111)
第六节	改造地层的合理热力学工艺	(114)
第八章	热力法改造地层的热动力装置	(120)
第一节	蒸汽发生装置	(120)
第二节	综合性热载体	(123)
第三节	专用压缩机装置	(124)

第一章 稠油油田热力法开采概述

热力方法是稠油开采的一种有效方法。在地层中，原油随地层温度变化可发生裂化、热解、高温和低温氧化、热力膨胀、蒸馏、汽化等改变采收率的物理、化学变化。

通过从地面向地层中注热介质或在地层中直接产生热都能活跃地层的相变，无论是地层体系的液相（油、水），还是固相（岩石）都具有这一性质。岩石和原油及个别组分能表现出催化性质，也就是说（当层内燃烧时）氧化反应的速度将起变化，在设计和进行工业性推广时，必须予以考虑。在同气相冷凝体接触时，他们膨胀的程度取决于生产层的组分，特别是胶结物质中蒙脱石的含量，从而制约着岩石渗透性的降低和热力工艺的效率。同时，岩石及地层液体的性质影响着氧化反应的速度、岩石侵蚀过程的活化和渗透率的增大；二氧化碳和表面活性物质的形成可以使地层原油采收率增加。

同时，热力开采工艺方法的性质取决于岩石的结构（特别是存在裂缝）和它们的胶结作用。高粘度原油往往就是胶结物质。在热载体冲洗原油时，岩石的结构被破坏，井内出砂现象猛增。关于这一点，前苏联在肯基亚克、马尔郭别克—沃兹聂先斯基、卡拉热巴斯、南部孔德尔等油田上的注汽经验和在巴夫洛夫山及哈萨内油田上应用层内燃烧都证明了这一点。

在大裂缝的岩层中，连续高速注入介质（蒸汽、空气），调整对地层的热力作用这一措施的有效性有所降低。但是，如果正确应用自然条件，可以明显提高热力方法的效率。例如，在碳酸盐岩的裂隙—溶洞的储集层（泽布兹、乌辛斯基）中，可将裂缝作为天然高渗透性通道，使热载体通过这些高渗透通道进入地层和形成各种形态的作用于地层的蒸汽热力循环。

由于热量和物质的传导与转质，使得低渗透性岩层被加热，从而使原油进入到较粗大的孔隙通道中，并沿着通道轻易地进入到生产井中。应该指出，在将工作介质注入地层时，粗大裂缝起到良好作用，这仅仅是热力作用时才如此。

这样，热采工艺的效果在本质上取决于岩石的成分、性质、结构特点和所含的液体。

影响热力法采油技术、经济指标的关键因素是工艺过程的热效率的利用。

在设计时必须考虑到热力开采机理的主要特性之一是热源的水力剩余区。

热采过程中，在地层中形成了某些温度、饱和度、地层体系相态和原油采出程度都不相同的区块。实验和矿场研究指出，在连续供热时地层受热的效率降低。

受注入介质参数、井网、产层的地质、物理特性影响，地层中注入的热量与消耗在周围岩石的热量之间，随着时间的推移，出现动平衡，热源运动明显变小。

除此之外，由于不断地注入热载体，在开发过程结束前，地层中残留着不可能利用的大量热能。因此，使用热力方法进行油田开发设计的主要任务就是在具体的地质—物理条件下，最有效地利用注入地层的热量或在地层中直接产生的热能。

工艺过程的热效率制约着油田开发的合理性。除取决于所应用的工艺外，井网密度、布井方式、开发目的层的地层厚度、层间差异性、非渗透性地层厚度等都对热效率有影响。

在推广提高地层原油采收率的新方法时，应选择出中间试验区，在试验区内，地质学家应该自始至终地参加所有阶段的工作。

对地层进行正确的地质评价，在每一个开发阶段都可能明显地影响到采油方法的顺利应用。对热采方法的油藏设计与开发方案有显著影响的主要地质参数有：地层的连续性、流体性质和含油饱和度、孔隙度和渗透率、含水和含气饱和度、总的矿物特性、粘土矿物以及不透水层、水源地的特性和排出水的可能性。

储集层在平面和垂直方向上的分布是地层特点的重要因素之一，也常常是最难解决的问题之一。地层的非均质性对中间试验区边界的圈定、井网及其作用方法都有影响。其确定方法一般有两种：

- (1) 多用观察井、扩大试验区并延长实验时间是一昂贵的方法，其结果也很难解释；
- (2) 在试验前，详细对地层做好地质研究工作。

关于地层在剖面和平面上的连续性可根据沉积物的沉积条件来确定。按照美国和加拿大所公布的资料，有许多试验区的实验项目由于不同油田地层的非均质性，所得的结果并不令人满意。

含油砂岩的孔隙度很高，在 25% ~ 40% 的范围内变化。即使如此，在很小面积范围内，它们仍有很大的变化。

加尔福公司在瓦巴斯克实验区用了 6 年时间在格兰德—列皮乌斯中试区做了实验。在认为是均质的 A 层上，设计了三种方案：向地层注蒸汽并随之注水；应用溶解剂；层内燃烧工艺。在实验过程中发现，这一地层是由三个彼此隔绝的独立砂体组成的。在试验区范围内，每个砂体平均孔隙度在 30% ~ 40% 的范围内变化。显然，这对工业试验的效果是有影响的，但是影响程度与方向却未能定出。

渗透率这一主要参数很难确定。特别是在胶结不好的饱含高粘度原油和沥青的砂岩中更难确定。

在进行了蒸汽热力作用的试验区的研究工作中，确定了地层渗透率的平均值是 0.6 ~ 2.4 μm^2 。这样的渗透率可在细粒砂岩中发现，并取决于砂岩的沉积条件。细粒砂岩可使孔隙通道的尺寸和形状大为降低，并使渗透率降低。

如果所制定的砂层沉积物模型是正确的，那么就能预测颗粒的方位，也就可能确定出最大渗透率的方向。这在布生产井和注入井时有重要意义。

含油饱和度这一参数在地层范围内的变化为 0 ~ 95%。为了能够弄清这一参数的变化条件，为此研究了从水淹薄层中取出的岩心。结果发现，砂岩由厚度为 1mm 的浅色和棕褐色交互层所构成，含油饱和度在 5% ~ 9% 的范围内变化。这种薄层只能用扫描电子显微镜研究。根据研究资料，高饱和度的薄层由纯多孔的、高磨圆度的砂粒组成，而弱饱和度层则由更加微小的、棱角状明显的、分选差和泥质含量较多的砂粒组成。

在前苏联的阿塔巴斯卡油田，主要利用的是周期性蒸汽热力采油工艺并结合层内燃烧工艺。相关油田蒸汽作用法的工业一试验区特性列于表 1-1。

表 1-1 工业一试验区工作的特性

油 田	工 艺 类 型	储集层	执行公司
阿塔巴斯卡	层内燃烧 + 注水		阿莫卡
皮斯·利维尔	蒸汽驱油	含油砂层	壳牌
加利德湖	周期性蒸汽热力作用建立燃烧源		勃利蒂希石油公司
布失洛	周期性蒸汽热力作用建立燃烧源	碳酸岩	联合石油公司
金 格	蒸汽驱油		彼得——加拿大
金 塞	燃烧源	砂岩	AEC
伏尔费湖	周期性蒸汽热力作用		勃利蒂希石油公司

第一节 热力法开发稠油油田的地质物理条件

自然因素对于热力法采油具有很大的影响。

在矿场应用热采方法提高采收率的经验表明，其应用效率取决于油层地质—物理条件。例如，层内燃烧工艺过程的效率不仅依赖于岩石和液体的性能，而且也与地层的原始温度、石油的组分、它们的反应能力、在岩石中可燃物质（黄铁矿、煤、硫等等）的含量有关。

所有地质—地球物理因素的应用形式，对于热力采油方法的效果起着很大的影响，但是都难于一一列出。因此，在前苏联的泽布兹油田上所进行的有关这些因素对热力方法工艺效率影响的研究经验，对其他油田进行热力方法开发就显得尤为重要。

应用热力方法采油的工业性试验工作是在各种地质—物理条件特征的目的层上进行的。

如果成功地运用了注汽井工艺，就能增产原油和提高原油采收率。国内外所进行的绝大多数工业性试验，其工艺指标的评价都是有效的。

这些试验表明，蒸汽注入深度可达 1000m，个别情况下达到 1400m，并可将层内燃烧工艺在深度 2000m 或更深的地层中进行。热力方法开采低含油饱和度及低粘度（小于 10mPa·s）原油油藏的经验具有重大意义。因此运用注蒸汽及层内燃烧工艺以提高地层原油采收率的方法具有广阔的应用前景。

国内外在矿场实验资料的基础上，以及在一系列工艺参数确定的基础上求出了应用热力方法的一个近似界限（表 1-2）。

表 1-2 工业实验资料

参 数	作用方法	
	注 汽	层内燃烧
地层原油粘度 (mPa·s)	> 30	> 10
原油密度 (g /cm ³)	1.000	0.802 ~ 1.000
孔隙度 (%)	> 20	> 20
平均残余油饱和度 (%)	> 40	> 40
地层压力 (MPa)	< 10	< 15
地层有效厚度 (m)	5 ~ 25	3 ~ 5
水力传导系数 (μm ² ·cm /mPa·s)	3.0	0.6
渗透率 (μm ²)	> 0.1	> 0.1

应该着重指出，从热量在地层周围岩石所允许的最大损失条件出发可确定适用地层的最小厚度。然而，在多层油藏中，一个油层的热量损失可用于相邻油层的开发，热力作用可用于比表 1-2 所列出的更小的地层厚度中。

如果低粘度原油含有大量的石蜡，那么就不允许地层温度降低到一定程度，那么热力方法的应用将是合理的。

同样应该指出，在所含原油粘度大于 1000mPa·s 的油藏中，层内燃烧法也较为合理与有效的。

表 1-2 中给出的数据不是绝对严格的，因为它们基本上是运用了两种工作介质，即蒸汽和空气，在许多情况下蒸汽和空气是单独应用的。但是，随着在地层中应用其他种类的化

学当量混合物，以形成新的热力方法，热力方法的应用领域将大为扩大。应用这样的方法，将能开采出埋藏在任何深度中的烃基原料。

第二节 选择生产层和开发系统的基础

一、选择生产层

应用注水或天然方式的一套井网开发油田时，经常根据经济和工艺因素来对多层系油田进行生产目的层的划分。有时根据实际情况将两个或更多层系合并作为一个井网开发的一个生产层，从而可大量减少钻井和工业管道建设的工作量，使油田开发的技术—经济指标得到改善。

然而，从热力作用地层的特点出发，把它们划分为一个开发层系，对于提高采收率不能有明显效果。因此，应该把注意力放在对提高采收率方法最有效的天然因素的利用上，以提高热力方法的采油效率。在分析热力方法开发油田的基础上，无论是在陆源地，还是在碳酸岩的裂隙和溶洞性储集层中，都应考虑正确利用生产层结构的非均质性。

如果将热力采油方法用于开发埋藏不深的、多层系的、由弱胶结和疏松岩层组成的、易于出砂的油藏，将这些层系归纳为一个开发层系，在应用高效防砂措施时其效果是不理想的。

地层厚度对注入地层或在地层中生成热量的利用程度有一定影响。虽然计算指出，在陆源储集层的连续面积注汽工艺中，当地层厚度不超过 25m 时能确保有最高的采收率，但是，热力作用对地层的汲面积随着厚度值的增加而减少。在层内燃烧时，考虑到氧化剂的高速运动，地层厚度的上限应为 15m 左右。热能的利用程度同样取决于使用独立性非渗透隔层来划分地层。如果层间（层、系等）隔层的厚度相当大、热力区的运移又是层状非均质的，那么层间的热力干扰降低，其结果是工艺总热效率也降低。相邻渗透层间的隔层厚度根据计算资料不应该超过 10m。结论是：合并为一个生产层的地层间的距离应不大于 10m。

在选择生产层系时，应特别注意那些更厚地层形成的油田。在这里，为获得最大的热效率，无论在工艺上还是在打开地层的方法上都要有所改变。

例如，在块状油藏中，可以利用自下而上的定向水平井和直井系统作阶段性改善。在由粗大和微细孔隙储集层组成的碳酸岩地层中这将特别有效。用自下而上的系统开发块状油藏的优越性已为前苏联石油科学研究所进行的实验得以证实。

二、热采开发系统

当用热力方法开发高粘度原油油田时，应偏重于使用面积井网法，因为在此种情况下，当向地层注入热载体时，在注汽井的周围形成了近似于径向性质的驱动前缘，在距离注入井足够远的地方，此前缘会发生变形。除此之外，在面积布井系统中，能迅速分散热能，大量见效采油井立刻进入有效开发状态。依地层的地质—物质特性和原油粘度的不同，可使用不同的热力法地层开发系统（五点法、七点法和九点法）。

这类系统对于裂隙孔隙型和溶洞型储集层所构成的油田最为可取，因为在这样的油田可

以形成均匀的热水力前缘。因此，在这样的条件下，为了增大由热力作用而形成的地层笼罩区，不只是在注入井中，而且也在采油井中注入热载体的工作介质。

按照此种开发系统在第一个阶段可应用面积井网系统。然后，在将热载体注入地层，或者在地层中产生热量而形成大的加热区后，就建立起了转移到线性驱动前缘的条件。当按油藏面积成排状布井时，这可能是最好的形式。在这样的情况下，对于高粘度原油油藏来说，在两排注入井之间布三排采油井，这种三排系统最为合理。在开发大油田时，建议将井排垂直于地层走向布置（沿油藏横剖面），使油田相继投入生产。这种注入井排的布置系统有可能实现面积作用流程，在形成整片密实热缘后，转向单排或多排线性开发流程。在这里，主要条件在于保持排与排及井与井之间距离的平衡。

三、井网密度的选择

如同前面指出的一样，无论是在周期性蒸汽热力作用地层的过程中，还是在连续注入地层或在地层中生成热量时，最大的热效率是在井网密度较大时获得的。

现场实践已证明，在有利的地质条件和热力环沿地层移动的条件下，可以提高工艺过程的技术—经济指标。

现场分析指出，随着井间（井网密度）距离的增加，热力环所需容积也在增加。这样一来在油田开发设计的初期阶段就可以确定出最大允许的井网密度和确定出不超过最大允许井网密度的开发方案。按照所有的方案，井网密度应该低于达到开发热效率条件时所形成的最大允许值。为此，需要满足下述条件：作为极限允许距离，应等于在既定温度下，当常温水移动的空隙体积的热环体积形成的热缘距离。这样的距离首先将取决于地层厚度及地层渗透率。然后，确定出井间距离最小的计算方案，并对每一方案，即对每一井网密度求出在采油井线上达到既定温度所必须的热力环相对体积。

第三节 油藏开采速度对开发指标的影响

众所周知，热力方法在井网密度足够大时最为有效。因此，面积作用系统每一统一单元在比较短的时期采完，而油田（油藏）开发的时间总的来说，不仅由各统一单元的开发时间，而且由钻开目的层所必须的时间来确定。这在开发井总井数达数千口的大油田的条件下，表现得最为明显。

图 1-1 显示了开采速度对原油产量水平和油田开发期限的影响。这里设计了 7 种速度方案：I、II……VII 适用于前苏联的卡拉让巴斯油田的条件。观察发现，无论是按照最大原油产量水平，还是按照开发期限，方案 I 都是效率最低的。钻新井仅仅用于补充报废了的采油井，并未引起原油产量的急增。

在确定油藏开采速度时，不仅必须考虑到原油

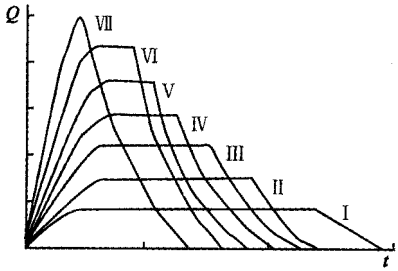


图 1-1 在不同钻井方案中原油产量 Q 与开发时间 t 的关系曲线

的产量，而且还要考虑到必须合理利用工艺装备——压缩机与蒸汽发生装置。建立热力环这一工艺首先是由注入工作介质的时间所决定的，因为工艺装备是可以多次利用的。

在热力方法开发油田（特别是大油田）的设计过程中，对于保证设计成功的技术问题，应该进行全面地和仔细地研究。为提高油田储层的原油采收率，不仅必须利用热力方法工艺的优越性，而且也要实际地估评那些能够获得明显提高现有原油产量的条件。与此有关的不仅有开采速度、新能力的投产及与之有关的新建产能速度，而且还有其它技术问题的解决，即井身结构、采油技术与工艺、原油处理及环境保护等。

无疑，在这一节中论述的热力法油田开发设计中的某些原则问题，虽然也反映了所掌握的工业应用经验的主要特点，但仍然要求在各种地质物理条件下全面补充进行实践、分析和实际成果的综合。在前苏联的卡拉让巴斯、肯基亚科、乌辛斯基、哥列米辛斯基等油田上所进行的有目的的、大面积的热力方法采油所涉及到的各种工艺与技术的工业试验工作，在很大程度上充实与完善了热力法采油工艺设计的概念。

从热力方法应用的局限条件出发，按下述方式对油田进行模拟与分类：

I 级——陆相储集层油藏，易出砂、埋深达 800m。

II 级——埋深为 800 ~ 1500m 的陆相稳定储集层的油藏。

III 级——具有复杂的裂隙—溶洞—孔隙型储集层的碳酸岩油藏。

第四节 热力作用地层时的地层热效率

所谓热力作用的效率系指在一定的时间内保持在地层中的热量与注入地层中或在地层中产生的总热量之比。这个指标通常称为热量的有效利用系数。

按照 A. A. 勃科西尔曼的资料，对于层内燃烧工艺，除了热能的有效利用系数之外，还可以用再生系数，即在燃烧源之前区域中积累的热量与地层中积累的热量之比来表达热效率。

在注热水实验的基础上证明了总的热量损耗与流道几何形状的关系。基于此点，可以认为，热效率主要由注入井或在井下生成热的速度及地层的热容能力，和饱含于地层中的热载体的容量求出。这一热力作用地层工艺结论的重要性是应实现以最小可能的速度往地层中注热，利用加密井网法以缩短开发的时间。

同时，随着地层加热区的扩大，向周围地层的热损耗也在增加，并且在离注汽井一定距离处，在某一排量下热源速度将接近于零。即在注入热与热损耗之间出现动平衡。在此期间，地层的受热效率降低。

前苏联在开发卡拉让巴斯油田时，每米地层有效厚度注汽速度为 10t /d。根据洛维列方法计算结果制出的图（图 1-2）可以得出当进行蒸汽热力作用工艺时热量损失的变化特性。

在以上述速度连续注入蒸汽时，出现动力平衡时刻前温度的变化如图 1-3 所示。如果把 70℃ 当作热载体驱油温度，那么在此情况下，决定蒸汽作用效率的距注汽井最大距离（按半径）为 180m。此时，热量利用系数不会超过 15%。

然而，由于将热量不断地注入地层，当工作结束时在油藏内残留有大量不能利用的能量。

上述这一不良结果可以在一定程度上用建立热力环的方法消除。这样的工艺最初由前苏联学者 Э. Б. 契卡柳科、К. А. 奥加诺夫和 А. Н. 斯纳尔斯基提出，并由 А. А. 巴克西尔曼和 Ю. П. 热尔托夫在工作中扩大发展。

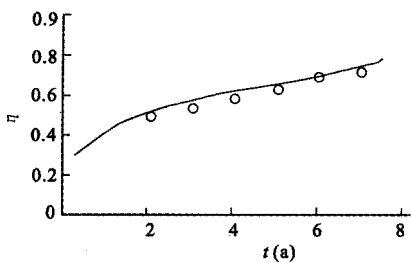


图 1-2 热量损失系数“ η ”与注汽时间 t 的关系曲线

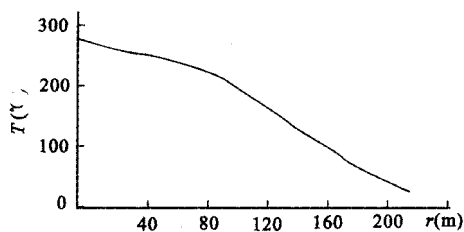


图 1-3 连续长期注汽的温度 T 与半径 r (m) 的关系曲线

热力环及随后使用其他驱动介质（例如水）移动热力环的方法，是提高热力工艺效率最重要的手段。

在非均质地层中，热力采油工艺中的热力作用，有助于提高驱油效率的其他方法（例如泵入聚合物液体）的实施。

热力环在平面和地层剖面上的大小，首先取决于油层的地质—物理参数、注入地层和地层中再生热能的速度和采油井与注汽井之间的距离。从图 1-4 中可见，随着井间距离的增加，需要的热力环容积也增加，而在较大的井网中建立热力环工艺将失去其自身的优势。

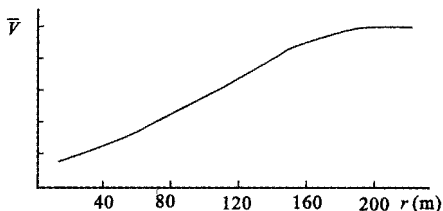


图 1-4 卡拉提巴斯油田（加热区接近热源前的最高温度为 90°C ）注汽时热力环容积 $\bar{V}$ 与生产井和注汽井之间的距离 r 的关系曲线

在地层中增加热交换速度，可以确保热力方法的高效率。在层内燃烧时，往地层中同时注入比空气的热容量还大的氧化剂，同样可以促使提高热交换速度。也就是说，形成了称之为层内燃烧的条件。依注入水和空气的体积比，可以区分为湿和超湿的层内燃烧。这两种工艺区别在于温度与形成热力区大小的不同。但是，带有热力环的热力作用法，对于同时具有粗大和微细孔隙储集层，以及厚度大于 $50 \sim 60\text{m}$ 巨厚地层油藏是低效的。如前苏联乌辛斯基油田的地层厚度超过 200m ，而在井距为 $200 \sim 250\text{m}$ 时热效率与井距是可比的。

由于在平面上和剖面上都存在着高渗透裂隙与溶洞，在连续向注汽井注入热载体时很容易形成突进，并不能保证波及整个地层。因此，为了提高热效率，在类似的油藏中应用了某些局限于剖面和平面上一定区块范围内的热力工艺，以保证热力对低渗透性、含油储集层产生作用。其中包括结合蒸汽油井热处理工艺的周期性蒸汽热处理技术，及其他更为完善的、基于周期性地层注热原则的工艺过程。

按照这种工艺，全部油井都可用作生产井和注汽井。因此，要求条件之一就是其井身结构应该能承受住热力负荷。

为了计算出区块周期性热力作用，及油井蒸汽热处理工艺，和实现工艺的改进，必须建立数学模型，并在建模的基础上编制出适用于粗大和微细孔隙储集层油田的计算程序。

第二章 水蒸汽及蒸汽动力循环

水蒸汽是热力工程上应用极广的一种实际气体。在蒸汽动力装置中就是采用水蒸汽作为工质的。本章将讨论水蒸汽的性质、水蒸汽的热力过程及蒸汽动力循环。

工程上所用水蒸汽的各种热力过程还经常要涉及到水蒸汽的集态变化。如果直接应用实际气体的有关方程式来求解水蒸汽的问题,则是相当复杂的。因而一般是由专门研究机构通过大量的实验及理论分析研究,制成水蒸汽的热力性质表和图,从而在工程实际中可直接用这些表和图来进行计算。

第一节 基本知识

由液体转为蒸汽的过程称为汽化。在液体表面进行的汽化的过程称为蒸发。在任何温度下,液体表面总是有一些能量较高的分子,它们可以克服邻近分子的引力而脱离液体,逸入液体外的空间,这就是蒸发现象。温度越高,能量较高的分子就越多,蒸发也越激烈。既然能量较高的分子在蒸发时离开了液体,液体内分子的平均能量减少而使液体温度降低,如要保持温度不变则必须对它加热。在液体表面不断有液体蒸发到空间中,而空间中的蒸汽分子撞击到液体表面时,它又被液体的分子吸住而回到液体中。当空间中蒸汽分子的密度达到一定程度时,在单位时间内逸出液面与回到液体的分子数相等,蒸汽与液体的数量保持不变,汽液两相达到平衡。这种状态称为饱和状态,这时蒸汽和液体的压力称为饱和压力,而它们的温度称为饱和温度。对应于一定的饱和压力,有一定的饱和温度。

如果液体所受的压力小于液体温度所对应的饱和压力,则液体内部就会发生汽化,并形成汽泡升到表面爆破而飞入空间。这种液体内部发生汽泡的剧烈汽化过程称为沸腾。例如和压力 0.1013MPa 对应的水的饱和温度为 100°C ,则在 0.1013MPa 压力下,当水温达到 100°C 时就会沸腾。

由蒸汽转变为液体的过程称为凝结。凝结与汽化是相反的过程。在一定压力下,当蒸汽温度降到相应的饱和温度时就发生凝结。凝结生成的液体称为凝结液。

处于饱和状态的蒸汽称为饱和蒸汽。处在饱和状态的液体称饱和液体。饱和蒸汽与饱和液体的混合物称为湿饱和蒸汽,简称湿蒸汽,相应地不含有饱和液体的饱和蒸汽又称为干饱和蒸汽。如果蒸汽的温度高于其压力所对应的饱和温度时,则这种蒸汽称为过热蒸汽。过热蒸汽的温度和其压力所对应的饱和温度之差,称为过热度。

第二节 水蒸汽的发生过程

工程上所用的水蒸汽,都是在各种锅炉中定压加热产生的,因而水蒸汽的发生过程,也就

是定压汽化过程。

如图 2-1(a) 所示,在容器中有 1kg 水,其温度为 0℃,其压力为 p 。当在定压下对水加热时,水将逐渐升温汽化。开始时,水因受热而温度升高,水的比容也略有增加,直到水温升高到压力 p 相应的饱和温度 t_s 时变成饱和水,如图 2-1(b) 所示。若继续加热,水就开始汽化,一部分水由饱和水变成为饱和水蒸汽,如图 2-1(c) 所示。在汽化过程中始终保持为饱和温度,但随着饱和水蒸汽的数量增多,比容增加很快,直到水全部汽化,如图 2-1(d) 所示。再继续加热,水蒸汽的温度便开始上升,比容继续增大,饱和水蒸汽变成了过热蒸汽,如图 2-1(e) 所示。

综上所述,水蒸汽的定压发生过程可分为三个阶段。如图 2-2 所示, $a-b$ 为水的定压预热过程, $b-d$ 为饱和水的汽化过程, $d-e$ 水蒸汽的定压过热过程。

一、水的定压预热过程

若将 1kg 水由 0℃ 定压加热到该压力 p 下的饱和温度 t_s ,则所加入的热量称为水的液体热 q' 。其计算公式为

$$q' = \int_{273.15}^{T_s} c_p dT = \int_0^{t_s} c_p dt$$

(2-1)

式中 c_p ——水的比热,它是温度及压力的函数。

表 2-1 列出了不同压力 and 不同温度下水的比热值。从表中数据可以看出,压力对水的比热影响不大,而温度对水的比热的影响较大,但在温度比较低时,水的比热仍可近似地作为常数计算,其值为

$$c_p \approx 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

表 2-1 不同压力、温度下水的比热值 c_p

温度 (℃)	$c_p(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$				
	0.0981MPa	4.90MPa	9.80MPa	19.61MPa	24.51MPa
0	4.2174	4.204	4.195	4.178	4.162
100	4.2156	4.203	4.187	4.158	4.128
200	—	4.484	4.455	4.396	4.342
300	—	—	5.661	5.300	5.120
350	—	—	—	8.219	6.431

如图 2-2 的 $T-s$ 图所示水的液体热 q' 可用定压预热过程 $a-b$ 线下面的面积表示。

在定压预热过程中,水所吸收的热量可表示为

$$q' = \Delta h' = h' - h_0$$

(2-2)

式中 h' ——压力为 p 时饱和水的焓;

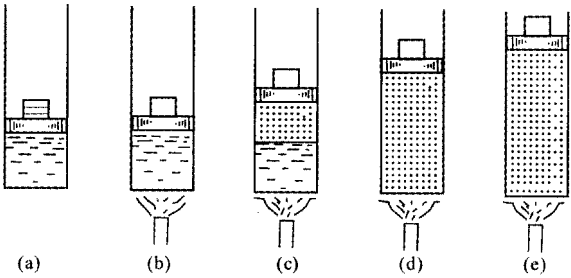


图 2-1 水蒸汽的生成

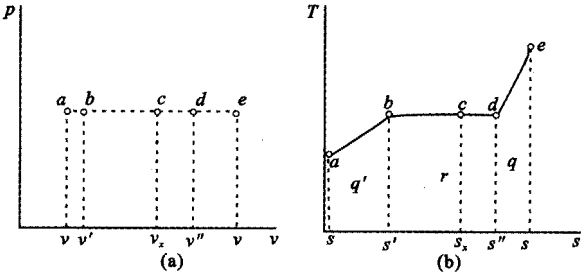


图 2-2 水蒸汽的定压发生过程

h_0 ——压力为 p 及温度为 0°C 时水的焓。

因而从式(2-2) 可得到饱和水的焓为

$$h' = h_0 + q' \quad (2-3)$$

当加热过程的压力较高时,对应的饱和温度也较高,为使水温由 0°C 升到该饱和温度成为饱和水,必须加入较多的热量,即液体热 q' 随压力的增高而增高,其关系如图 2-3 所示。

二、饱和水的定压汽化过程

在定压下使 1kg 饱和水汽化成干饱和水蒸汽时,所加入的热量称为水的汽化潜热,用符号 Q 表示。定压汽化过程同时也是在定温下进行的,所以在图 2-2 的 $T-s$ 图中,汽化过程 $b-d$ 为水平线,而汽化潜热相应于该线段下的矩形面积。

定压汽化过程中水的汽化潜热可按下式计算:

$$Q = \Delta h'' = h'' - h' \quad (2-4)$$

式中 h'' —— 饱和水蒸汽的焓。

因而从式(2-3) 和(2-4) 可得饱和水蒸汽的焓 h'' 的计算式为

$$h'' = h' + Q = h_0 + q' + Q \quad (2-5)$$

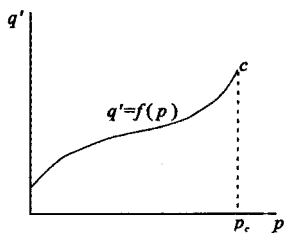


图 2-3 液体热与压力的关系

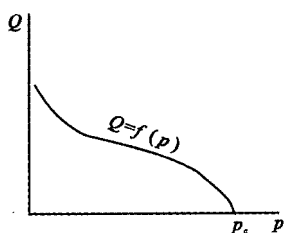


图 2-4 潜热与压力的关系

水的汽化潜热是由实验测定的。在不同的压力下,汽化潜热的数值也不相同。压力愈高水的汽化潜热愈小,而当压力达到临界压力时,汽化潜热变成为零。图 2-4 示出了汽化潜热随压力而变化的关系。

汽化潜热可分为外汽化潜热和内汽化潜热。外汽化潜热为蒸汽容积增加时用于对外作功的能量,用 ψ 表示;内汽化潜热则为用于增加水蒸汽分子的位能,用 ρ 表示。因此,汽化潜热 Q 可表示为:

$$Q = \psi + \rho \quad (2-6)$$

在汽化过程中,同时存在饱和液体和干饱和蒸汽,干饱和蒸汽在湿饱和蒸汽中所占的质量成分称为干度,用 x 表示。

$$x = \frac{m_s}{m_s + m_w} \quad (2-7)$$

式中 m_s —— 湿蒸汽中饱和蒸汽的质量;

m_w —— 湿蒸汽中饱和液体的质量。

干度 x 是湿蒸汽的一个重要参数。根据湿蒸汽的干度,并按分析混合气体时相同的方法,就可得到按饱和水和饱和蒸汽的状态参数来计算湿蒸汽状态参数的公式如下:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= (1-x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v') \\ u_x &= (1-x)u' + xu'' = u' + x(u'' - u') \\ h_x &= (1-x)h' + xh'' = h' + x(h'' - h') = h' + xQ \\ s_x &= (1-x)s' + xs'' = s' + x(s'' - s') = s' + x\frac{Q}{T_s} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

式中上角标“'”指饱和水的参数,“''”指干饱和蒸汽的参数,而下角标 x 指湿蒸汽的参数。

三、饱和蒸汽的定压过热过程

若在定压下加热 1kg 饱和蒸汽使它成为过热蒸汽,则所加入的热量称为过热热量,设过热蒸汽的温度为 t ,则过热热量的计算公式为

$$\begin{aligned} q &= \int_{T_s}^T c_p dT = \int_{t_s}^t c_p dt \\ &= c_{pm} \Big|_{t_s}^t (t - t_s) = c_{pm} \Big|_{t_s}^t \cdot D \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 c_p ——过热水蒸汽的定压比热,它是温度及压力的函数;

$c_{pm} \Big|_{t_s}^t$ ——当压力为 p 、温度由 t_s 到 t 时,过热水蒸汽的平均定压比热;

D ——过热度。

过热水蒸汽的定压比热随温度及压力的变化关系如图 2-5 所示。从图中可以看出:过热水蒸汽的定压比热和压力及温度有关,当过热度不大而压力较高时,水蒸汽的比热数值很大,但随着温度的升高,比热值急剧下降。

如图 2-2 的 $T-s$ 图所示,过热蒸汽的过热热量 q 可用定压过热过程 $d-e$ 下面的面积表示。在定压过热过程中所加入的热量也可表示为

$$q = \Delta h = h - h'' \quad (2-10)$$

式中 h ——当压力为 p 、温度为 t 时过热水蒸汽的焓。

由式(2-10)及(2-5)可得

$$h = h'' + q = h_0 + q' + r + q \quad (2-11)$$

因而,在压力不变的条件下, 1kg 水由 0°C 加热成为温度 t 的过热蒸汽,所需加入的总热量等于液体热、汽化潜热及过热热量之和。

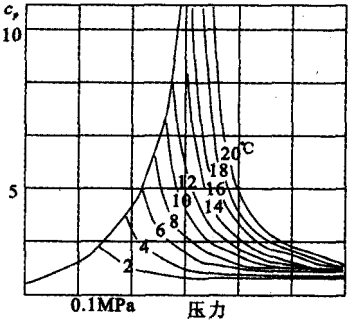


图 2-5 过热水蒸汽定压比热随温度、压力的变化关系

四、水蒸汽的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图

如果把各种压力下水蒸汽的发生过程表示在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上,如图 2-6 所示,则可以看到:

(1) 相应饱和水状态的各点可连接成一条曲线 A_1-c ,称为饱和水线或称为下界线,显然它也是 $x = 0$ 的等干度线。

(2) 相应饱和蒸汽状态的各点可连接成另一条曲线 A_2-c ,称为饱和水蒸汽线或称为上界线,显然它也是 $x = 1$ 的等干度线。

(3) 上界线与下界线相交于临界点 c ,在临界状态下,水与蒸汽没有明显差别。水的临界温度 $t_c = 374.15^\circ\text{C}$ 、临界压力 $p_c = 22.1\text{MPa}$ 、临界比容 $v_c = 0.00317\text{m}^3/\text{kg}$ 。

(4) 饱和水线 A_1-c 和饱和水蒸汽线 A_2-c 所包围的区域称为饱和区,或称为湿蒸汽区。只有在饱和区的范围内,才有汽液两相共存的汽化过程。

(5) 如果定压加热过程的压力 p 大于临界压力 p_c ,则如图 2-6 中过程 1-2 所示,当水的