

〔美〕 T·C·博贝格著

热力采油工程方法

石油工业出版社

热力采油工程方法

〔美〕T·C·博贝格

田科技处 译

葛 琛 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了国外主要是美国有关热力采油方面的现场实验、科研成果和实践经验。书中着重阐述了注热水、注蒸汽等注热流体法和火烧油层方法的基础理论及有关经验公式、图表数据和计算方法。书末附有自热法采油出现以来到目前为止有关文献目录。

本书供广大石油开采工程技术人员、科研人员及有关院校师生参考。

T. C. Boberg

Thermal Recovery Methods Manual

ESSO PRODUCTION RESEARCH COMPANY

1972 Texas

热力采油工程方法

[美]T. C. 博贝格

辽河油田科技处 译

张朝琛校

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $10^{13/16}$ 字数282千字印数1—2,100

1980年7月北京第1版1980年7月北京第1次印刷

书号15037·2164定价1.40元

目 录

第一章 热力采油方法导论	1
第1节 各种热力驱油法	4
1. 注热流体	4
2. 火烧油层	7
第2节 热力激励出油法	10
1. 用注热流体法激励出油	10
2. 用火烧法激励出油	11
第二章 预测井筒的热损失和套管温度	12
第1节 雷米-威利海特方法	12
第2节 胡根-休伊特方法	16
第3节 井下蒸汽质量的估算	22
第4节 注热流体时的井下温度	22
第5节 影响井筒热损失参数的实例	23
第6节 油管压力降的影响	26
第7节 热井的完成方法	27
1. 保持套管膨胀的自由度	27
2. 预应力套管	28
参考文献	30
附 录 求 U_{10} 的方程式	31
第三章 用注热流体的方法传送热能	32
第1节 注热流体	32
劳威尔的解法	33
第2节 注热流体的其他解法	34
第3节 注蒸汽	36
1. 马克斯-兰根海姆的解法	37
2. 曼德尔-伏里克的解法	40
3. 威尔曼的解法	40

4. 数值解法	41
参考文献	42
附录A 马克斯-兰根海姆方程式中所用的函数	43
附录B 图3.3和3.4的试验室模型数据	45
附录C 用于可变注汽流量情况下的马克斯-兰根海姆解法	46
第四章 注蒸汽激励油井出油	47
第1节 基本概念	47
热力激励作用和堵塞的消除	48
第2节 各种作业因素对蒸汽激励态势的影响	50
第3节 各种油层因素对蒸汽激励态势的影响	51
1. 表层污阻的影响	51
2. 原油粘度的影响	53
3. 砂-页岩比和砂岩厚度的影响	54
第4节 油藏压力、产油机理及含油饱和度的影响	54
第5节 冷油产率、水-油比及气-油比的影响	55
第6节 储层深度	57
第7节 处理规模的影响	58
第8节 影响热处理效应的各种作业因素小结	59
1. 处理规模	59
2. 注汽流量	59
3. 热焖时间	59
4. 井底生产压力	59
参考文献	59
附录 热力激励后油井的产油指数与激励前定常流态 下冷产油指数比值的推导	60
第五章 蒸汽激励出油动态计算	62
第1节 博贝格-兰茨法	62
第2节 受热区的大小	63
第3节 受热区的温度演化	63
1. 径向传导损失	64
2. 垂向热传导损失	64
3. 被采出流体带出的能量	66

第4节 采油量的计算	68
1. 产油指数的定态近似值	63
2. 表皮系数的影响和意义	69
3. 加热对表皮系数的改变	70
4. 逐次汽激周期的热损失估算	70
参考文献	71
附 录 基里基雷油田Q-594井的手算实例	71
1. 注蒸汽时的井筒热损失	71
2. 受热区的温度演变	73
3. 产油率的确定	75
4. 产液带走的能量	77
符号说明	81
希腊字母说明	82

★第六章 蒸汽激励出油方案的现场实施过程及

其经济分析

第1节 第一个注采周期的动态	83
第2节 随后各注采周期的动态	84
第3节 失败的原因	86
第4节 标准的成本费用	87
参考文献	90

第七章 用舒特勒(Shutler)一维解析法预测注热水或注蒸汽的采油量

第1节 一般方法	92
第2节 油藏的传热	93
第3节 热水驱油情况下的流体渗流	95
第4节 蒸汽驱油情况下的流体渗流	97
第5节 原油采出量	99
第6节 效果	100
1. 注热水驱油	100
2. 注蒸汽驱油	106
参考文献	110
符号说明	111

希腊字母说明	111
附录A 跃迁方程式的推导	112
附录B 热传递算法	114
1. 注热水	114
2. 注蒸汽驱油	115
附录C 两相饱和分布的特性	116
1. 各受热层带	116
2. 冷带	118
附录D 注蒸汽驱油计算实例	121
1. 日注水量	122
2. 油藏的热传递	123
3. 油层流体渗流情况	125
4. 注入油-汽比, R_{os}	129
第八章 利用克恩模型在有重力分异流条件下进行蒸汽驱油	131
方法的简述	131
符号说明	134
希腊字母说明	134
参考文献	135
第九章 用数值方法计算蒸汽驱油情况	136
第1节 蒸汽驱油数值模型的数学描述	137
第2节 热传递	138
第3节 选择计算结果	139
1. 与试验结果的比较	139
2. 与一维计算的比较	140
3. 垂向渗流的重要性	142
4. 受效面积的计算	144
第4节 蒸汽驱油模型小结	144
参考文献	145
附录A 计算数据	145
附录B	147
*第十章 为蒸汽激励出油和蒸汽驱油挑选对象的 简捷估算法	149

第1节 选择最合适的搞蒸汽激励出油的井	149
第2节 现场蒸汽激励出油效果的相关性	152
第3节 选择最宜于搞蒸汽驱油的砂层	153
附录A 活塞式驱替时, 蒸汽窜入产油端后油- 汽比简化方程式的推导	159
附录B 马克斯-兰根海姆热效表达式的推导	161
第十一章 蒸汽驱油方案的现场典型例证	162
第1节 油层特性的重要性	163
第2节 方案经营特点	166
第3节 朔恩贝克方案的细节	167
第4节 方案的比较	169
1. 油-汽比	169
2. 井网类型和范围	170
参考文献	171
第十二章 干式向前燃烧法设计原理	172
第1节 影响火烧前沿形状的各种因素	172
第2节 燃烧前沿附近的温度和饱和度分布	176
第3节 估计干式燃烧的空气需要量	179
第4节 燃料浓度的估算	181
1. 燃烧管试验	181
2. 试验室燃烧管数据的相互关系	182
3. 现场表观燃料沉积量的相关式	185
第5节 维持燃烧所需最低空气流量的估算	187
1. 朱氏法	187
2. 雷米法	194
第6节 用朱氏和雷米解法算出值的比较	196
第7节 厚砂层情况下燃烧前沿温度	197
第8节 点火期的设计	198
1. 自燃发火	198
2. 人工点火	199
第9节 火烧油层生产井特征	202
参考文献	203

第十三章 干式向前燃烧法的现场实施情况及其经济205

第1节 各方案情况简述205

1. 堪萨斯州亨博尔特-夏努特油田205
2. 加利福尼亚州南贝里瑞奇油田205
3. 俄克拉荷马州彭托特戈油田209
4. 怀俄明州汕农油田209
5. 荷兰的朔恩贝克油田209
6. 伊利诺斯州弗利油田209
7. 俄克拉荷马州德拉华-奇尔德斯油田210
8. 得克萨斯州北部政议当局辖井区210
9. 加利福尼亚州中途-日落油田212
10. 委内瑞拉梅隆尼斯油田213
11. 路易斯安那州德希油田213
12. 加利福尼亚州西新港油田215

第2节 实测和计算的空气-油比的比较216

第3节 经济上需要考虑的问题216

参考文献223

附 录224

第十四章 七十年代以前湿烧法的研究状况226

第1节 湿式燃烧的简化一维绝热描述226

第2节 实验室试验结果228

第3节 局部淬灭(超湿)燃烧法的数学分析结果230

第4节 局部淬灭燃烧法未能驱出的残烃232

第5节 现场试验结果232

第6节 工艺问题234

第7节 结 论235

参考文献235

第十五章 估计油藏用蒸汽和空气加热及驱油的比价236

第1节 高粘度-厚砂层情况236

1. 火烧加热的费用236

2. 蒸汽加热的费用237

第2节 中厚砂层和中等粘度原油的情况238

第3节 计算实例·····	239
参考文献·····	240
第十六章 总附录：岩石和流体的基本热力数据 ·····	241
第1节 蒸汽、水和原油的密度随温度和压力的变化情况·····	241
1. 蒸汽-水·····	241
2. 石油烃 ·····	241
第2节 蒸汽-水系统的焓,以及水、各类石油和石油气的比热·····	243
1. 蒸汽-水·····	243
2. 液态石油的比热 ·····	243
3. 石油蒸汽和其他气体的比热 ·····	246
第3节 饱含液体的储油岩石的比热和导热系数·····	249
1. 岩石比热(Cr)随温度的变化 ·····	249
2. 饱含流体的岩石的体积热容 ·····	250
3. 含液储集岩的导热系数和热扩散系数 ·····	251
第4节 其他材料的热力性质·····	252
1. 各种材料的导热系数和热幅(发)射系数 ·····	252
2. 各种保温材料的热力特性 ·····	253
3. 用硅酸盐泡沫使井筒绝热 ·····	253
4. 蒸汽、水和空气的热力特性 ·····	253
第5节 蒸汽、水、各种气体和各类石油的粘度数据·····	256
1. 蒸汽-水的粘度·····	256
2. 各种气体的粘度 ·····	258
3. 各类石油的粘度 ·····	260
第6节 石油的各种烃类的燃烧热和热裂化动力数据·····	265
1. 燃烧热 ·····	265
2. 石油烃类的热裂化数据 ·····	265
参考文献·····	268
热法采油文献目录 ·····	270

第一章 热力采油方法导论

不熟悉热力采油的工程师，往往被大量有关加热油层的方法弄得无所适从。因此，我们将这些方法按一定的逻辑予以分类。这些方法基本上可分为两类，即热力驱替（或驱动）法和热力激励出油法。

所谓驱动法，通常指的是象注水那样将储层流体驱向邻井。热力驱油法就是用热降低原油粘度，从而提高注水或注气的驱油效率。一般地讲，热驱法通常都是使热力推移过注采井之间的整个距离。注入的流体既可携带在地面产生的热量，如注蒸汽和注热水；或者在油层里产生的热量，诸如注入空气使油层燃烧。

所谓热力激励出油法，我们指的是把生产井周围有限区域加热以降低原油粘度，并通过清除粘土及沥青沉淀物来提高井底附近地带的渗透率。在蒸汽处理使井增产的情况下，井底受热区的半径可能只有几英寸，诸如用井底加热器通过热传导来加热地层的情况；受热区的半径也可能达好多英尺（10~100英尺），诸如在蒸汽加热的情况下。无论那种情况，这些方法的主要的效益都是为了使生产井的产能有所改善。油井蒸汽处理就是对生产井进行周期性的注蒸汽激励出油。这种热力增产法在某些方面与热驱法也差不多，只不过是各处理井的距离都比较近并且处理次数相当多，而驱替的效果却小些。周期性的注蒸汽激励出油有很多别名，这往往使工程师们感到困惑，经常使用的名称是“蒸汽热焖”，“吞吐法”以及“热汽抽油”。所有这些名称和蒸汽激励出油都是同义语。也可以用其他流体，如空气、热水、热油或热天然气来代替蒸汽以加热井底附近的油层。这些液体所以未被广泛使用，后面将讨论其原因何在。

工程人员必须熟悉一些术语，如比容（容积/磅）及比焓。表

表 1.1 饱和蒸汽的热力特性

绝对压力	温 度	比 容		热 焓		
磅/英寸 ²	OF	饱和液体	饱和蒸汽	饱和液体	汽化潜热 E _{WV}	饱和蒸汽
P	T	V _w	V _s	H _w	H _{wv}	H _s
170	368.41	0.01822	2.675	341.09	854.9	1196.0
172	369.35	0.01823	2.645	342.10	854.1	1196.2
174	370.29	0.01824	2.616	343.10	853.3	1196.4
176	371.22	0.01825	2.587	344.09	852.4	1196.5
178	372.14	0.01826	2.559	345.06	851.6	1196.7
180	373.06	0.01827	2.532	346.03	850.8	1196.9
182	373.96	0.01829	2.505	347.00	850.0	1197.0
184	374.86	0.01830	2.479	347.96	849.2	1197.2
186	375.75	0.01831	2.454	348.92	848.4	1197.3
188	376.64	0.01832	2.429	349.86	847.6	1197.5
190	377.51	0.01833	2.404	350.79	846.8	1197.6
192	378.38	0.01834	2.380	351.72	846.1	1197.8
194	379.24	0.01835	2.356	352.64	845.3	1197.9
196	380.10	0.01836	2.333	353.55	844.5	1198.1
198	380.95	0.01838	2.310	354.46	843.7	1198.2
200	381.79	0.01839	2.288	355.36	843.0	1198.4
205	383.86	0.01842	2.234	357.58	841.1	1198.7
210	385.90	0.01844	2.183	359.77	839.2	1199.0
215	387.89	0.01847	2.134	361.91	837.4	1199.3
220	389.86	0.01850	2.087	364.02	835.6	1199.6
225	391.79	0.01852	2.0422	366.09	833.8	1199.9
230	393.68	0.01854	1.9992	368.13	832.0	1200.1
235	395.54	0.01857	1.9579	370.14	830.3	1200.4
240	397.37	0.01860	1.9183	372.12	828.5	1200.6
245	399.18	0.01863	1.8803	374.08	826.8	1200.9
250	400.95	0.01865	1.8438	376.00	825.1	1201.1
255	402.70	0.01868	1.8086	377.89	823.4	1201.3
260	404.42	0.01870	1.7748	379.76	821.8	1201.5
265	406.11	0.01873	1.7422	381.60	820.1	1201.7
270	407.78	0.01875	1.7107	383.42	818.5	1201.9
275	409.43	0.01878	1.6804	385.21	816.9	1202.1
280	411.05	0.01880	1.6511	386.98	815.3	1202.3
285	412.65	0.01883	1.6228	388.73	813.7	1202.4
290	414.23	0.01885	1.5954	390.46	812.1	1202.6
295	415.79	0.01887	1.5689	392.16	810.5	1202.7
300	417.33	0.01890	1.5433	393.84	809.0	1202.8
310	420.35	0.01894	1.4944	397.15	806.0	1203.1
320	423.29	0.01899	1.4485	400.39	803.0	1203.4
330	426.16	0.01904	1.4053	403.56	800.0	1203.6
340	428.97	0.01908	1.3645	406.66	797.1	1203.7

续表

绝对压力	温 度	比 容		热 焓		
磅/英寸 ²	OF	饱和液体	饱和蒸汽	饱和液体	汽化潜热 E _{WV}	饱和蒸汽
P	T	V _w	V _s	H _w	H _{wv}	H _s
350	431.72	0.01913	1.3260	409.69	794.2	1203.9
360	434.40	0.01917	1.2895	412.67	791.4	1204.1
370	437.03	0.01921	1.2550	415.59	788.6	1204.2
380	439.60	0.01925	1.2222	418.45	785.8	1204.3
390	442.12	0.01930	1.1910	421.27	783.1	1204.4
400	444.59	0.0193	1.1613	424.0	780.5	1204.5
410	447.01	0.0194	1.1330	426.8	777.7	1204.5
420	449.39	0.0194	1.1061	429.4	775.2	1204.6
430	451.73	0.0194	1.0803	432.1	772.5	1204.6
440	454.02	0.0195	1.0556	434.6	770.0	1204.6
450	456.28	0.0195	1.0320	437.2	767.4	1204.6
460	458.50	0.0196	1.0094	439.7	764.9	1204.6
470	460.68	0.0196	0.9878	442.2	762.4	1204.6
480	462.82	0.0197	0.9670	444.6	759.9	1204.5
490	464.93	0.0197	0.9470	447.0	757.5	1204.5
500	467.01	0.0197	0.9278	449.4	755.0	1204.4
520	471.07	0.0198	0.8915	454.1	750.1	1204.2
540	475.01	0.0199	0.8578	458.6	745.4	1204.0
560	478.85	0.0200	0.8265	463.0	740.8	1203.8
580	482.58	0.0201	0.7973	467.4	736.1	1203.5
600	486.21	0.0201	0.7698	471.6	731.6	1203.2
620	489.75	0.0202	0.7440	475.7	727.2	1202.9
640	493.21	0.0203	0.7198	479.8	722.7	1202.5
660	496.58	0.0204	0.6971	483.8	718.3	1202.1
680	499.88	0.0204	0.6757	487.7	714.0	1201.7
700	503.10	0.0205	0.6554	491.5	709.7	1201.2
720	506.25	0.0206	0.6362	495.3	705.4	1200.7
740	509.34	0.0207	0.6180	499.0	701.2	1200.2
760	512.36	0.0207	0.6007	502.6	697.1	1199.7
780	515.33	0.0208	0.5843	506.2	692.9	1199.1
800	518.23	0.0209	0.5687	509.7	688.9	1198.6
820	521.08	0.0209	0.5538	513.2	684.8	1198.0
840	523.88	0.0210	0.5396	516.6	680.8	1197.4
860	526.63	0.0211	0.5260	520.0	676.8	1196.8
880	529.33	0.0212	0.5130	523.3	672.8	1196.1
900	531.98	0.0212	0.5006	526.6	668.8	1195.4
920	534.59	0.0213	0.4886	529.8	664.9	1194.7
940	537.16	0.0214	0.4772	533.0	661.0	1194.0
960	539.68	0.0214	0.4663	536.2	657.1	1193.3
980	542.17	0.0215	0.4557	539.3	653.3	1192.6

续表

绝对压力	温 度	比 容		热 焓		
磅/英寸 ²	OF	饱和液体	饱和蒸汽	饱和液体	汽化潜热 EwV H _{wv}	饱和蒸汽 H _g
P	T	V _w	V _s	H _w		
1000	544.61	0.0216	0.4456	542.4	649.4	1191.8
1050	550.57	0.0218	0.4218	550.0	639.9	1189.9
1100	556.31	0.0220	0.4001	557.4	630.4	1187.8
1150	561.86	0.0221	0.3802	564.6	621.0	1185.6
1200	567.22	0.0223	0.3619	571.7	611.7	1183.4
1250	572.42	0.0225	0.3450	578.6	602.4	1181.0
1300	577.46	0.0227	0.3293	585.4	593.2	1178.6
1350	582.35	0.0229	0.3148	592.1	584.0	1176.1
1400	587.10	0.0231	0.3012	598.7	574.7	1173.4
1450	591.73	0.0233	0.2884	605.2	565.5	1170.7
1500	596.23	0.0235	0.2765	611.6	556.3	1167.9
1600	604.90	0.0239	0.2548	624.1	538.0	1162.1
1700	613.15	0.0243	0.2354	636.3	519.6	1155.9
1800	621.03	0.0247	0.2179	648.3	501.1	1149.4
1900	628.58	0.0252	0.2021	660.1	482.4	1142.4
2000	635.82	0.0257	0.1878	671.7	463.4	1135.1
2100	642.77	0.0262	0.1746	683.3	444.1	1127.4
2200	649.46	0.0268	0.1625	694.8	424.4	1119.2
2300	655.91	0.0274	0.1513	706.5	403.9	1110.4
2400	662.12	0.0280	0.1407	718.4	382.7	1101.1
2500	668.13	0.0287	0.1307	730.6	360.5	1091.1
2600	673.94	0.0295	0.1213	743.0	337.2	1080.2
2700	679.55	0.0305	0.1123	756.2	312.1	1068.3
2800	684.99	0.0315	0.1035	770.1	284.7	1054.8
2900	690.26	0.0329	0.0947	785.4	253.6	1039.0
3000	695.36	0.0346	0.0858	802.5	217.8	1020.3
3100	700.31	0.0371	0.0753	825.0	168.1	993.1
3200	705.11	0.0444	0.0580	872.4	62.0	934.4
3206.2	705.40	0.0503	0.0503	902.7	0	902.7

1.1 给出了饱和蒸汽的这些特性与压力的函数关系。

第 1 节 各种热力驱油法

1. 注热流体

注热水法 注热水恐怕是所有热驱法中用起来最简单的一种方法。操作容易, 和一般注水差不多。但由于对驱油的机理有

限，故未广泛应用。由于温度的增加，原油流动性的改善比水好，（因为随着温度的增加，重原油的粘度下降速度比水快）。此外，由于热膨胀还会使油也有所膨胀。就从油的热膨胀这点来看，这种注热水方法，采出的油量终归比注冷水要多。无论如何，如注入水量一定时，由于注热水改善了原油的流动性，注热水的采油量将高于注冷水的采油量。与注蒸汽相比，注热水的主要缺点是：热能最大的注入率一般比较低。由于注入井筒和油砂层两者的热损失，限定了从注入井向外加热油层的速率。如注热流量低而油砂层又较薄，这种影响将更加严重。注热水驱油的工业性应用，始于荷兰的舍恩贝克油田，该油田的砂层厚度为80英尺左右，而油的粘度为180厘泊。

注蒸汽法 这种方法是用注热流体进行热力驱油法中最广泛使用的方法。这种方法和注热水相比，主要优点是可以得到更多的采油量，而注入地层的热流量也较高。采油量较高是因为有大量的气态蒸汽通过油砂到达凝析前沿，所以在冷凝前沿处会发生最大限度的蒸汽侵刺。在汽侵区，凝析气可以驱油，再加上原油的汽化作用，以及在蒸汽前方推移的热水（蒸汽的冷凝水）的作用联合发挥影响。图1.1是一个理想的一维蒸汽驱的温度分布和流体饱和度分布示意图。将实验室的岩心中注蒸汽，注热水以及注冷水的采油量与注入流体量（蒸汽也以冷凝水量表示）的关系比较结果列于图1.2。

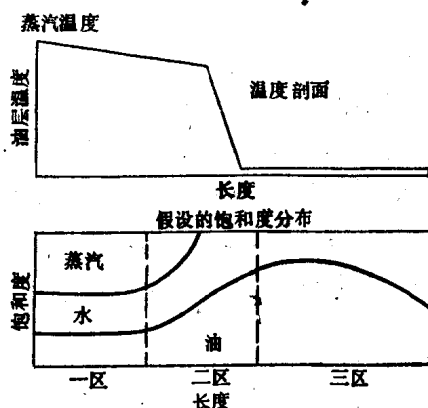


图 1.1 蒸汽驱的概念

如图所示，比较了在340°F温度下的注蒸汽和注热水。结果表明，注入单位孔隙体积的蒸汽，它所携入油层的热量将是注入单位孔隙容积热水所携入热量的三倍左右。图中还同时表明了

60°F（原始油层温度）和340°F两种情况下等温注水结果的比较。由于上下盖层及油层温度都为340°F，不需耗用热能把60°F

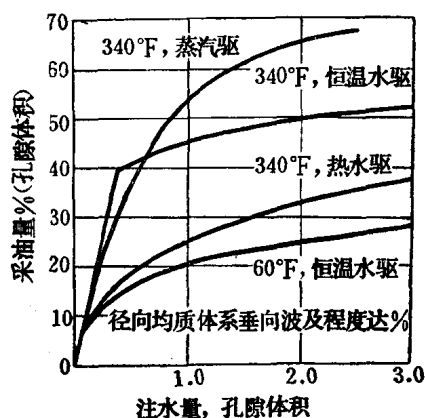


图 1.2 热驱法采油量的预测

彼此之间没有差别。但现有设备使我们只能把最大蒸汽注入压力限制在只有 2500 磅/英寸²（绝对）（668°F）左右。如所需要的注入压力高于 2500 磅/英寸²（绝对）（668°F）时，则须使用注热水或用其他方法。

正如注热水的一样，设计注蒸汽时，热损失也是个应考虑的重要问题。比较理想的是，注汽量较高、油层较厚而井网较密，那么可使热损失减少到最低限度。无论如何，在厚砂层中，如果井距过密，注汽量又过高，则将引起窜槽。通常，这种窜槽的发生，一般是由于重力作用和蒸汽有升越到油柱上方的趋势所致。因此，在过密的井网中，生产井可能发生蒸汽的过早入窜，以致后来使大部分注入热量都被排出。合理的井网密度和注入量，是这种热驱方法有满意的注入动态和良好的经济效果所必不可少的。本书的主要部分就是阐述热采法的各种预测方法，使工程师能选择出理想的蒸汽驱油的方案及估算出不同井网密度的效果和井的注采速度。

注燃气法 因为天然气体的载热能力很低，并且要加热较大

体积的油砂层将需要庞大的压缩量，所以这种方法几乎从未被人所使用。在所讨论的三种注入热流体方法中，这种方法的热损失最严重。今后将不再作进一步的讨论。但由于高温天然气可以用于油页岩的地下干馏，所以仍受到人们一定程度的注意。

不论哪一种热流体注入法（热水、蒸汽或热天然气），都可在驱替的后期改注一段时期的冷水，把地下的蓄热带继续推往尚未加热的油砂段。在注热水的情况下，这种做法做为降低注入成本的手段看来是特别有利的。但蓄热的蒸汽带则不宜用这种方法来推动；因为注冷水将很快地败坏油层中的蒸汽，并使之转化成注热水驱油的状态。一旦发生这种情况，我们就失去了注蒸汽所伴随而来的热凝析气驱的有利作用。不过，在注蒸汽过程中，在驱替过程的某一阶段转注冷水，在经济上仍然是有利的。关于此种方法的更详细的讨论可参阅第三章。

2. 火烧油层

干式向前燃烧法 此方法在于，注入含氧气体（主要是空气），在油层内点火，并将燃烧前沿向油层内扩展。油被走在燃烧前沿先头的烟气（氮气，二氧化碳）和共存水因燃烧及汽化所形成的蒸汽所驱替。其驱替机理除了和蒸汽驱一样，主要是靠原油汽化和热裂化的气体对受热原油的驱动。已汽化的轻质馏分在远距燃烧前沿的前方再次凝析，由于它对未受燃烧影响的原油的溶剂稀释作用，所以对随后的驱替也有一些帮助。驱油的速度与燃烧前沿的前进速度是很一致的。图 1.3 为理想的一维情况下的温度分布及各个区带的位置示意图。对

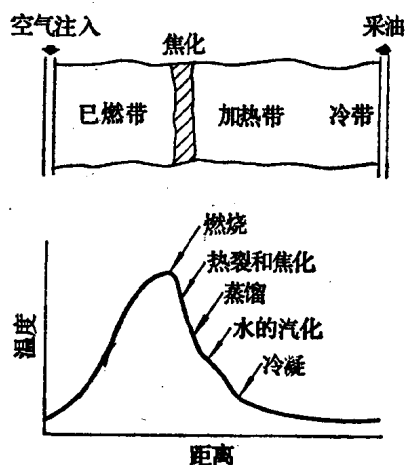


图 1.3 地下燃烧机理