

中国深井蒸汽吞吐试验

刘文章等

(石油部石油勘探开发科学研究院)

摘 要

中国东部的大多数重质油藏埋藏较深。从1982年以来,我们对四个较深的油田进行了蒸汽吞吐室内研究及现场试验。高升油田的油层深度是1500~1600米,其余三个油田是1000~1300米。油层温度下的原油粘度是1000~20000厘泊。最近三年,截止85年3月底,我们已经在101口井进行了123次蒸汽吞吐作业。累积注蒸汽约22万吨,产油33万吨。主要是在辽河油区的三个油田进行的。在1000~1300米深度的三个油田,注汽前几乎不产油,注汽吞吐后,初期的高峰产量一般都达到100~200吨/日一井。高升油田虽然注入的是低干度蒸汽,增产效果也很好。

根据井筒传热物理模型及数学模拟结果,上述四个油田的深井采用井筒隔热技术注蒸汽开采是可行的。甚至在长期蒸汽驱情况下也是可能的。本文也论述了利用相似物理模型及数学模拟优选注汽参数的结果(蒸汽干度、注入速度及注入量)。

现场试验表明,这些较深的油藏在接近原始油层压力的情况下,注蒸汽是可行的。根据高升油田的可行性开发方案,这样的油藏进行蒸汽驱时采用井筒隔热技术而不用井底蒸汽发生器不论在技术上及经济上都是乐观的、有良好前景的。

油 藏 简 介

位于中国东北辽宁省的辽河油区,多数油藏是轻质油,近来陆续发现几个重质油藏。这些重质油藏的埋藏深度都超过1000米,最深达到1700米。为了积累开发重质油藏的经验,从1982年以来,先后在高升油田、曙一区油田及欢喜岭油田进行了蒸汽吞吐试验。

位于中国东部山东省的胜利油区,也有几个重质油藏。从1984年开始在单家寺油田进行了蒸汽吞吐试验。该油田埋藏深度1100~1200米。

上述四个蒸汽吞吐试验区的油藏参数见表1,原油粘度与温度关系见图1。这些油藏都是下第三纪沙河街油层组。油层特点是疏松砂岩、油层厚度大,孔隙度、渗透率及含油饱和度都比较高,含油层多,油藏基本上是平缓的,倾角很小。都是探明的新油藏。在常规采油时油井产量很低或者不出油,是在油层压力接近原始压力水平下开始注蒸汽的。

蒸汽吞吐现场试验

中国东部是主要的产油区,轻质油藏占主导地位。发现的大多数重质油藏的埋藏深度都超过1000米,最深的有1800米。这类油藏的储量不断增加,有很大的生产潜力。因此,我们

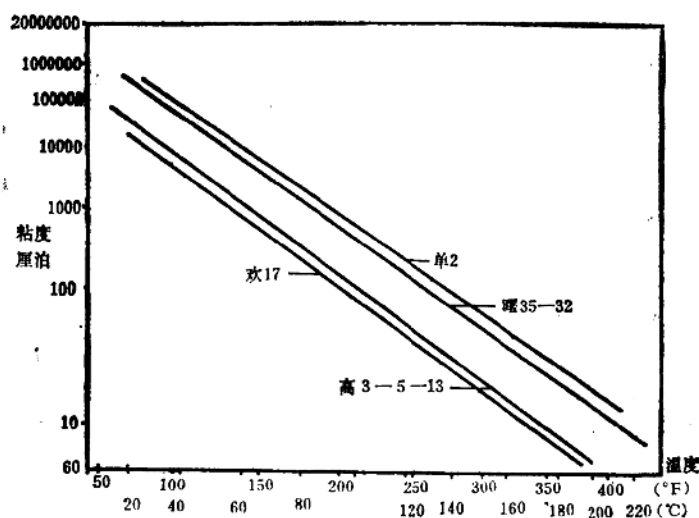


图1 四个重质油田原油粘度温度曲线

表1 四个试验区油藏参数

油 田	高 升	曙 一 区 (1-7-5块)	欢 喜 岭 (欢17块)	单 家 寺 (单二块)
油 层	莲 花 油 层	大 凌 河	兴 隆 台	沙 河 街 I
油层深度, 米	1510~1700	1000~1100	1000~1200	1100~1200
油层温度, °C	56	50	43	56
原油比重	0.94~0.96	0.97~0.98	0.95~0.98	0.97~0.99
油层温度下脱气油粘度, 厘泊	450~4000	8000~14000	2000~3000	8000~10000
平均油层厚度, 米	67.6	44	25~40	28~85
孔隙度, %	20~30	22~30	24	31~34
渗透率, 毫达西	1000~3000	2500~3000	700~2000	900~5000
原始油饱和度, %	65	65	60	65
目前油层压力, 大气压	120~150	104~110	104~120	110~120
泥质含量, %	5~10	6~8	5~13	3~8
沥青胶质含量, %	44	47	35	>28
原油凝固点, °C	10	15~20	11	16~18
原油含蜡量, %	5	2~7	5	2.4
原油含硫, %	0.5	0.5	0.4	0.7

注蒸汽技术试验研究的重点是深井。

按照深井注蒸汽的需要, 我们进行了现场试验的技术准备及室内研究。按照井口注入压力最大达到160大气压, 购置了美国的蒸汽发生器 (设计工作压力182大气压, 500000BTU/

时及250000BTU/时)及注蒸汽井口设备。在室内进行了深井注蒸汽井筒隔热技术设计,研究了深井注汽的可行性方案,研制了耐热封隔器及隔热油管。对深井试验了用耐热水泥完井及预应力完井方法。

在1982年6月首先在辽河油区的高升油田开始蒸汽吞吐试验。高升油田油井由于钻井完井时普遍受到油层损害,因此油井在注蒸汽前的产油量平均7~10吨/日。从1982年6月到1983年底,共在27口井进行了36次吞吐作业。共注入蒸汽43355吨,增加油量35835吨(扣除原有产量)。原油蒸汽比0.83吨/吨。注汽后第一个月的油井产量一般由7~10吨/日增加到20~40吨/日。在油层压力120~140大气压情况下,一般注蒸汽井口压力130~150大气压,井口蒸汽干度20~60%,注入速度100~240吨/日。注汽时每口井采用801-I型隔热油管及耐热封隔器。这批井封隔器深度1560~1630米。经模拟计算及实测井下温度及压力结果,大多数油井井底蒸汽干度是零,是热水吞吐。尽管如此,油井增产效率显著。例如,1506井,油层厚度是64.8米,注汽前油层压力146大气压,油层温度下原油粘度1500厘泊,注入干度为41%的蒸汽2850吨,注入速度204吨/日。焖井3天后开井生产,油井自喷,第一个月的产量在110吨/日以上,见图2。这口井距气顶约200米,注汽前产量仅3吨/日。注汽解堵后,受气顶驱动影响,产量剧增。又如756井,油层厚度67米,注汽前产量7.6吨/日,注入井口干度为58%的蒸汽2100吨,关井5天后开井生产,自喷两天后下泵生产,第一个月的产量为40~50吨/日,生产情况见图3。

从1984年到今年,在高升油田继续试验了蒸汽吞吐,重点是试验改进井筒隔热技术及确定最优的注入参数,以改善增产效果。到今年3月止,又在26口油井吞吐作业30次。其中有一部分井是第二次吞吐作业。共注入蒸汽49479吨,共增加产量73736吨,油气比为1.49吨/吨。

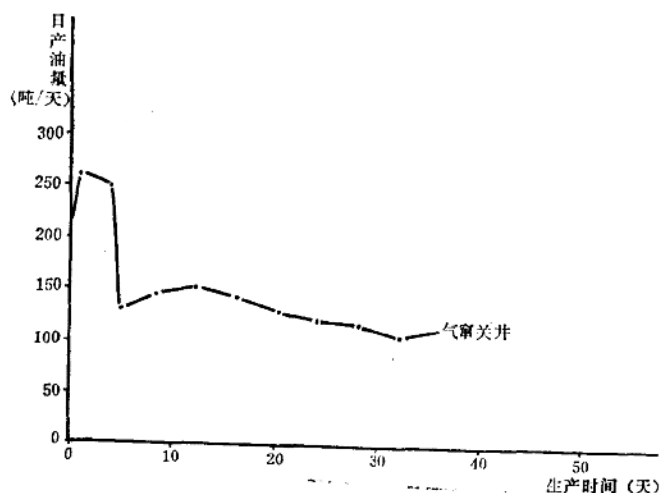


图2 高升油田1506井蒸汽吞吐采油曲线

油层深度1525~1589米	注汽压力147大气压
纯油层厚度64.8米	注汽温度335℃
打开厚度44米/6层	注汽干度66.7%
原油比重0.9373(20℃)	注汽时间335小时
原油粘度1827cp(50℃)	总注入量2850.6万吨

高升油田已有53口井进行了吞吐作业,对于这样深的油藏,尽管大多数油井实际上是热水吞吐,但是得到的增产效果是令人鼓舞的。而且井筒隔热技术已试验了多种隔热油管及耐隔热隔器。预期能够在近期内完善1600米深度的井筒隔热技术。

从1983年6月开始,在辽河油区曙一区油田进行了蒸汽吞吐试验。到85年3月止,共在19口井进行了20次吞吐作业。共注入蒸汽52332吨,增产原油77535吨(所有油井注汽前都不出油),原油蒸汽比1.48吨/吨。试验油层有三个,自上而下是兴隆台层、大凌河层及杜家台层。主要的试验区是1-7-5块的大凌河油层。油藏参数见表1。典型油井是曙1-35-32,也是第一口试验井(注汽前不出油)。射孔井段1012~1074米,油层厚度43米,油层温度58℃下原油粘度8400厘泊。1983年6月27日~7月9日注汽。注汽压力120大气压,井口温度325℃,井口干度74%,注入速度228吨/日,累积注入蒸汽2919吨。采用801-I型隔热管及耐隔热封隔器。计算井底干度约52%。在1983年7月13日开井生产,自喷12天,平均产油87吨/日。含水28%,最高152吨/日。以后用泵抽油生产404天,平均日产原油36.4吨/日,含水0.8%,累积周期产油15745吨。生产情况见图5。接着,在1984年10月29日又进行了第二周期吞吐试验。注汽压力111大气压,井口蒸汽干度73%,注入速度205吨/日,注汽24天,注入蒸汽5084吨。关井3天后开井生产。自喷19天,平均日产量91吨/日,含水32%。接着抽油生产至85年3月底共91天,产量降为30吨/日。第二周期已累积产油5648吨,仍继续生产。

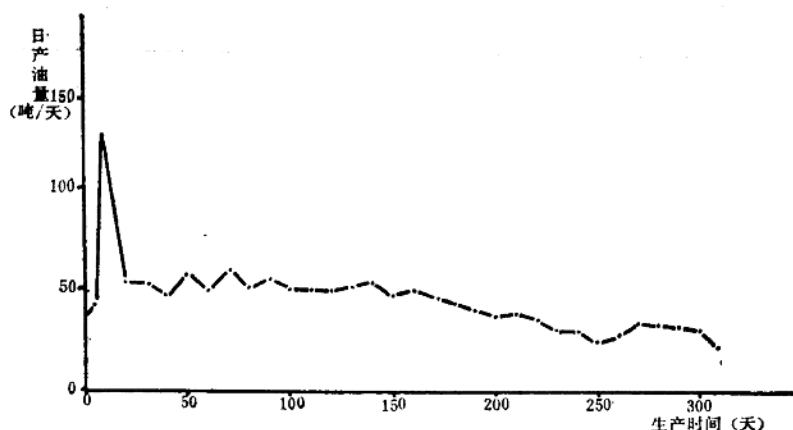


图5 曙光油田1-35-32井蒸汽吞吐采油曲线

射孔井段1012米~1074米	注入温度325~336℃
纯油层厚度43米/3层	注入压力125~144大气压
原油粘度4400厘泊(50℃)	注汽速度9.6T/h
原油比重0.9823(20℃)	注汽干度74~78%(井口)
	注汽时间304小时
	累积注入量2919吨

此外,在辽河油区的欢喜岭油田三个稠油区块,从1984年开始,到1985年3月底,已在30口油井进行了蒸汽吞吐试验,效果更好。这些试验区的典型油层参数见表1中欢17块。所有试验油井注汽前不出油或在5吨/日以下。采用同样的隔热技术。注汽后,油井一般都能自喷1~3个月,第一个月日产量达到100~200吨/日,正常抽油产量30~50吨/日,这30口

井共注入蒸汽58633吨,增产原油82953吨,原油蒸汽比1.41。

胜利油区的单家寺油田,于1984年10月开始,到1985年3月,在单2块试验区的3口井进行了蒸汽吞吐试验。油藏参数见表1。注汽压力140~160大气压,井口蒸汽干度52~74%,注入速度180~240吨/日。焖井3~4天后开井生产,初期都能自喷,每口井产量都在100吨/日以上,最高达191吨/日,自喷期31~80天,每井平均自喷产量60~108吨/日。转用泵抽油后,平均日产量70~102吨/日,到85年3月底,每口井产量是70~95吨/日。三口井累积产油32838吨,共注蒸汽10603吨,原油蒸汽比为3.1吨/吨。这些井在注汽前不出油。典型井单2-1井的生产曲线见图6。

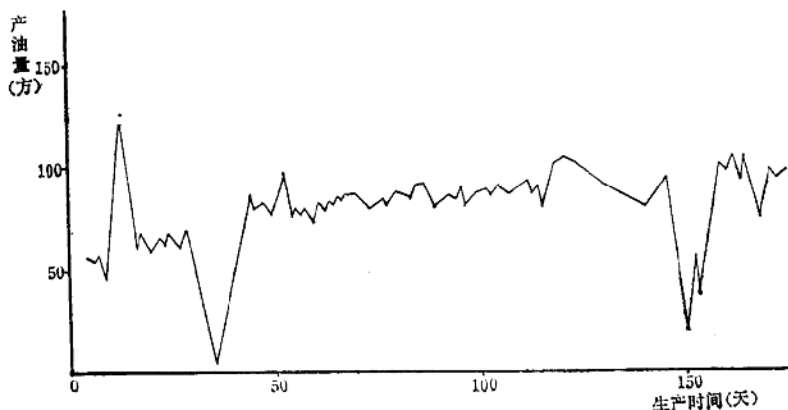


图6 单家寺油田2—1井蒸汽吞吐生产曲线

油层厚度28.9米/1层	注汽温度333~347℃
射开井段1140~1164.8米	注汽压力140大气压
原始地层压力116.5大气压	注汽干度52%
原始地层温度54.0℃	注汽速度7.5吨/小时
	注汽时间14天
	累积注入量2519吨

深井隔热技术

从1979年开始,石油部石油勘探开发科学研究院(RIPED)对深井注蒸汽的关键技术开始了研究。通过井筒传热相似物理模型,模拟试验了5 $\frac{1}{2}$ "及7"套管中分别下入不同尺寸的隔热油管并在环空中充满各种流体情况下的井筒总传热系数。部分结果见表2。利用我们自己研制的井筒传热数学模型,计算了各种井筒隔热方案的井筒热损失率及1600米深井注汽过程中套管最高温度的变化,分别见图7、表3及表4。在1981年,根据深井井筒隔热技术方案^[1]研究报告得出结论,认为1600米深井采用井筒隔热技术(主要是隔热管及耐热封隔器)进行注蒸汽是可行的。此后加速进行了隔热管及耐热封隔器的研制,放弃了井下蒸汽发生器的方案。

在前述四个油田进行的蒸汽吞吐作业中,从1982年到83年,完全采用了801-I型隔热油管。

从1984年到1985年3月止,大多数吞吐作业仍用这种隔热油管,质量有所改进,但在少数油井中试验了801-II型隔热管,并试验了美国派克公司的隔热油管。

经现场试验资料分析,室内模拟得出的井筒总传热系数,计算出的井下注汽参数和现场采用井下温度计及压力计取得的结果基本符合。

表 2 不同井筒结构的总传热系数大卡/米²·时·℃

套管-油管-隔热管 ^③	环空流体	各种油管温度的总传热系数		
		250℃	300℃	350℃
7"-2 ⁷ / ₈ "	清水	33.1	35.7	38.3
7"-2 ⁷ / ₈ "	空气	23.1	23.8	24.5
7"-2 ⁷ / ₈ "-4" ^①	清水	3.9	4.1	4.3
7"-2 ⁷ / ₈ "-4" ^①	空气	3.0	3.3	3.5
7"-2 ⁷ / ₈ "-4" ^②	清水	7.2	7.7	8.1
7"-2 ⁷ / ₈ "-4" ^②	空气	5.3	5.7	6.0

① 7"套管, 2⁷/₈"油管, 4"隔热油管(外径114mm, 内径102mm), 接头处无热点。

② 上述隔热管接头处有热点。

③ 隔热管是801-I型。

表 3 1000米深井筒热损失率(%)计算结果

总传热系数 U _{to} 大卡/米 ² ·时·℃	注汽时间, 5天			注汽时间, 100天		
	q=6	q=8	q=10	q=6	q=8	q=10
10	12.2~12.6	9.2~9.5	7.2~7.5	9.9~10.0	7.5~7.8	6.0~6.3
8	10.3~10.8	7.8~8.0	5.9~6.3	8.8~9.2	6.6~7.0	5.0~5.5
6	8.3~8.6	6.2~6.4	4.9~5.3	7.3~7.6	5.3~5.7	4.3~4.5
4	6.2~6.5	4.5~4.8	3.6~3.8	5.5~5.9	4.1~4.3	3.3~3.8

注入条件: 7"套管, 2⁷/₈"油管, 有隔热管, 注入压力130~150大气压, 井口干度0.7

表 4 1600米深井7"套管最高温度(℃)

井筒隔热条件	注 汽 时 间, 天			
	10	20	100	1000
1. 有封隔器, 无隔热管环空空气	272	276	285	
2. 801-I型隔热管	175	183	196	211
2. 801-II型隔热管	154	160	173	185
4. 新发展隔热技术	127	132	143	157

注入条件: 注汽压力150大气压, 井口干度0.70, 注入速度8吨/时

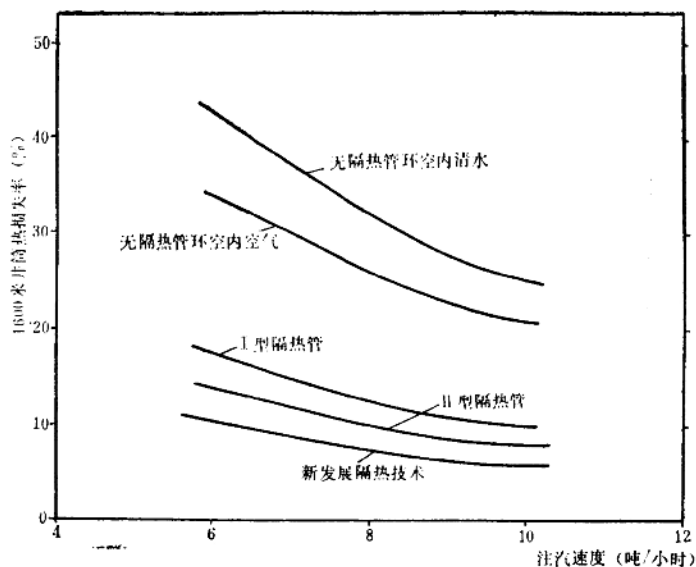


图7 1600米井深采用不同隔热技术的井筒热损失率

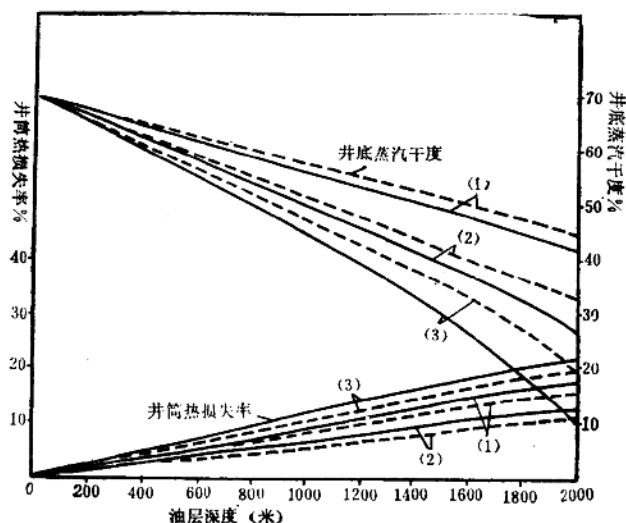


图8 不同油层深度井筒热损失率与井底蒸汽干度变化

参数:
 注汽压力: 150大气压
 井口干度: 70%
 注汽速度: 6吨/时
 注汽时间——5天
100天

由表3、4, 图7及8表明, 1600米深度的油藏采用高质量井筒隔热技术进行蒸汽吞吐及蒸汽驱是可能的。采用I型隔热管进行蒸汽吞吐的井筒热损失率在10~17%。用II型隔热管可以降到9~14%, 而套管温度能够控制在190℃以内。如进一步改进隔热技术, 井筒热损失率能够控制在8%以下。

井底干度损失率高是1600米深井蒸汽吞吐的主要困难。例如, 在注汽压力为150大气压,

井口干度为50~70%，注入速度为8吨/时条件下，采用I型隔热管，井底干度将损失42%~30%，降为29~48%。实际上，由于各种施工作业中的问题及早期制造的隔热管加工质量低，高升油田大多数吞吐作业的井底干度是零，只有少数井达到20~40%。

为了防止油井套管在高温下损坏，新钻的油井，即大部分吞吐过的油井，都采用7"N-80套管，用加30%的石英粉耐热水泥固井上返到地面。到目前为止，未发现套管损坏，而在1978年在未用隔热管注热水的一口井中破坏了套管。

我们已经试验了几种耐热封隔器，也购买了少量的美国贝克公司（Baker Co.）的几种型号（C-2，DGT及HBD-1）耐热封隔器。要求的最大温度是370℃，最大工作压差是250大气压，通过几年的试验及不断改进，上述国产及美贝克公司的封隔器基本上达到了注蒸汽要求，但还需改进，提高一次下井的成功率。

目前止，我们可以说，对于1000~1200米的深井进行注蒸汽的隔热技术已经成熟，但对1600米的技术还要改善，肯定能在近期内完善。

注入参数研究

我们利用相似物理模型及数学模拟研究了深井蒸汽吞吐注入参数对增产效果的影响。相似物理模型是一种高压模型，按高升油层参数饱和和高升油田的原油，采用180℃蒸汽试验。试验得出：

1、井底蒸汽干度对蒸汽吞吐增产效果有决定性的影响。用物理模型模拟蒸汽干度分别为0%、26.5%、63%及100%的吞吐效果见图9。用数学模型模拟的结果见图10。这两组

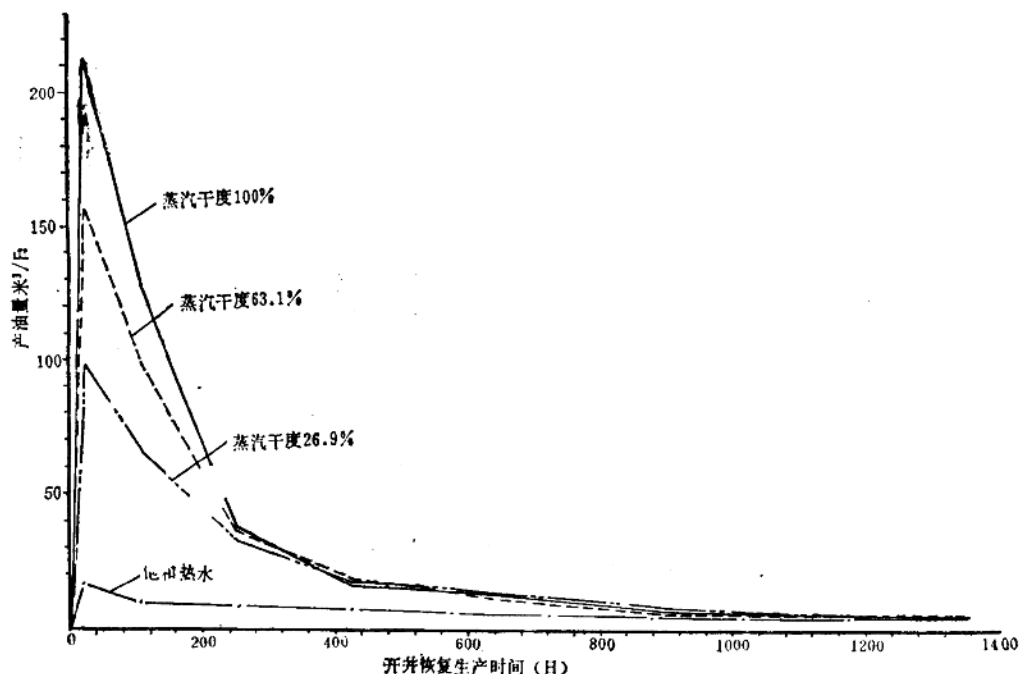


图9 产油量~生产时间曲线(高升油田3-5-13井地面脱气原油)

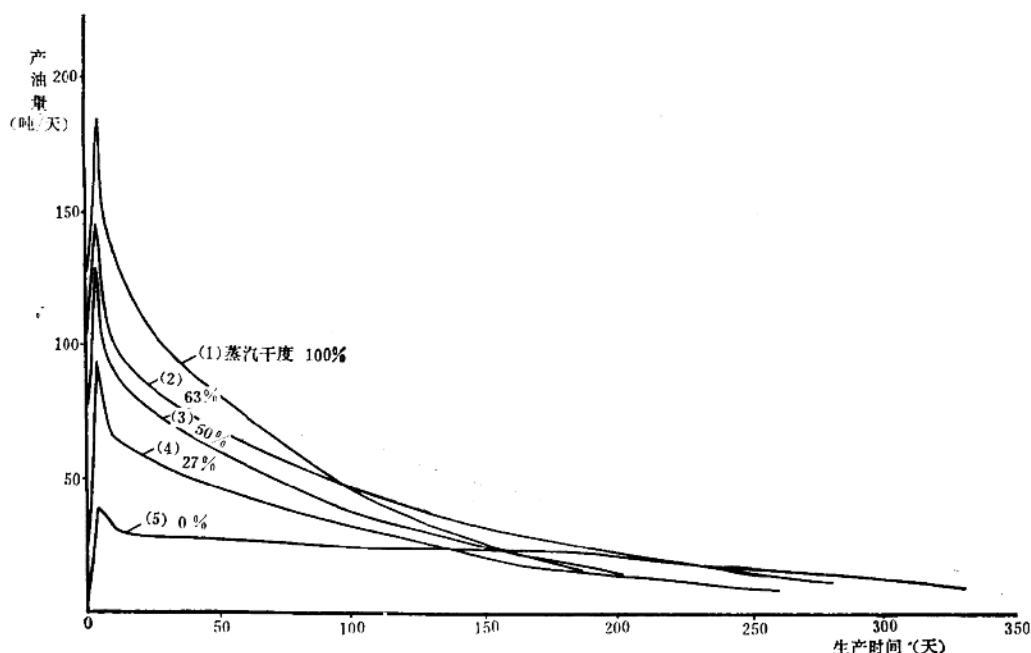


图10 高升油田蒸汽干度对吞吐效果的数学模拟结果

结果		参数:
周期总产油量(吨)	累积油/汽比	注汽时间31天
(1)12.190	2.46	油层总厚度68米
(2)11.984	2.40	净油层厚度44米
(3)9.502	1.92	孔隙度25%
(4)		原始含油饱和度60%
(5)4.312	0.88	注汽温度341℃
		原始油层温度60℃
		注入总量5.000吨
		注入速度160吨/天
		原油比重1.00

模拟结果取得很相近的结果。这些结果表明，热水吞吐的效果很差，最高的峰值产量仅40吨/日，有效期很短。蒸汽干度为27%时，峰值产量达到约100吨/日，干度为63%时，峰值产量达到约150吨/日。

现场资料说明，这些模拟结果是符合的，蒸汽干度越高，效果越好。尤其是深度为1000~1200米的三个油田，蒸汽吞吐时的井底蒸汽干度多数是在40~50%，峰值产量在100吨/日以上。而高升油田的效果较差，因多数井是热水吞吐。

蒸汽干度增加，湿饱和蒸汽的比容成倍增加，加热带体积成倍增大，因而原油受热降粘的范围大。我们用数学模型研究了注入等量蒸汽但蒸汽干度分别为27%及63%的效果，结果见图11。显然，注入的总热量相同，但蒸汽干度高的增产效果较好。

2、蒸汽注入量对增产效果有重要影响。注蒸汽增产机理在于加热油层，大幅度降低原油粘度。因此，注入蒸汽量越多，加热半径越大，增产效果越好，尤其是增产的有效期长，

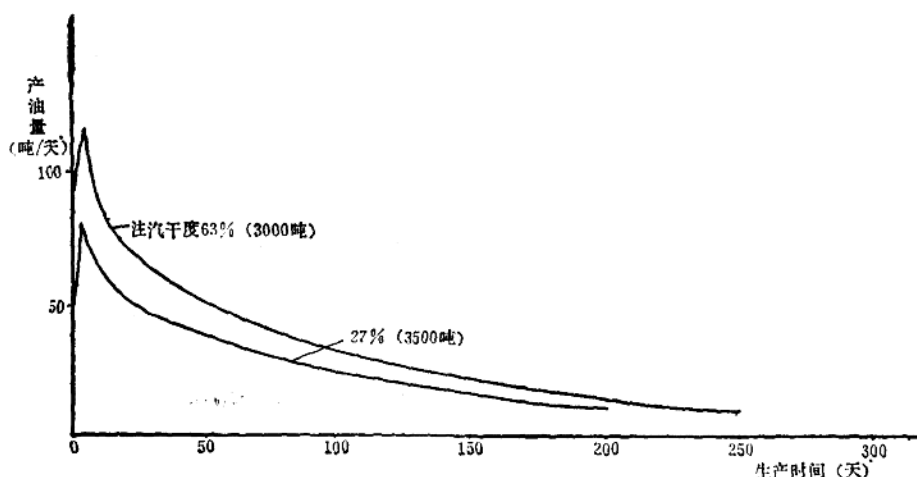


图11 3000吨63%的蒸汽和3500吨27%的蒸汽等给结果

计算参数:

总油层厚度68米
净油层厚度44米
孔隙度25%
原始含油饱和度60%
注汽速度160吨/天
原油比重0.96
注汽温度341℃

比较

干度63% (3000吨)	干度27% (3500吨)
总产油量(200天)7546.26吨	5474吨
累积油/汽比2.48吨/天	1.56吨/吨

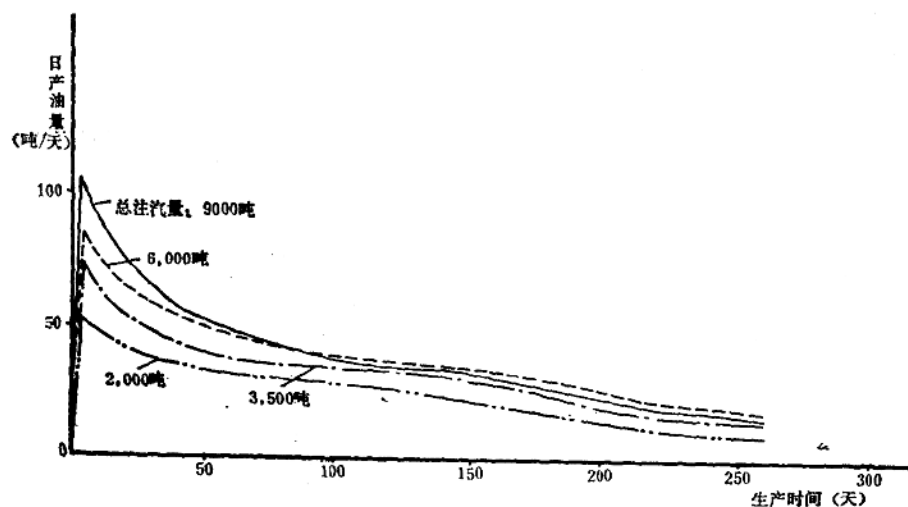


图12 注汽量对蒸汽吞吐效果影响的数学模拟结果

计算参数

油层参数:
总油层厚度: 68米
纯油层厚度: 44米
孔隙度: 25%
原始油饱和度: 59%
地层油粘度: 600厘泊
原始地层温度: 65℃

注汽参数:
注汽速度: 185吨/天
注汽干度: 40%
注汽温度: 341℃

结果一览表

	注汽量 9,000T	注汽量 6,000T	注汽量 3,500T	注汽量 2,000T
周期总产油量(T)	8.997	8.579	7.311	6.014
第一月平均日产(T/D)	78	66	54.0	42
周期平均日产(T/D)	35	33	28	23
油汽比	1.0	1.43	2.1	3.0

周期产量高。数学模拟结果表明。见图12, 在其他同样的注汽条件下, 周期注入量存在一个最优值, 即增产量最高, 原油蒸汽比较高。我们选择注入量在3000~5000吨。现场试验资料也表明, 注入量在1000吨以下效果较差。

3、注入速度对增产效果的影响。如注入速度太低, 则井筒热损失率增加, 井底蒸汽干度下降, 如图7所示。根据高升油田的试验资料, 注入压差(井底压力——油层压力)在40大气压以上时, 一般油井的注入速度都大于100吨/日, 注入率指数一般约为0.1吨/日·大气压·米。其他油田油井注入速率也很高。我们利用数学模型计算了高升油田中等油层条件下, 第一周期注入干度为40%(井底的)的蒸汽5000吨, 注入速度分别为100、160及240吨日的增产效果。如图12所示。在同样的井底蒸汽干度下, 这三种注入速度对吞吐效果影响不大。

因此, 注入速度对增产效果的影响, 主要反映在井底干度值上。

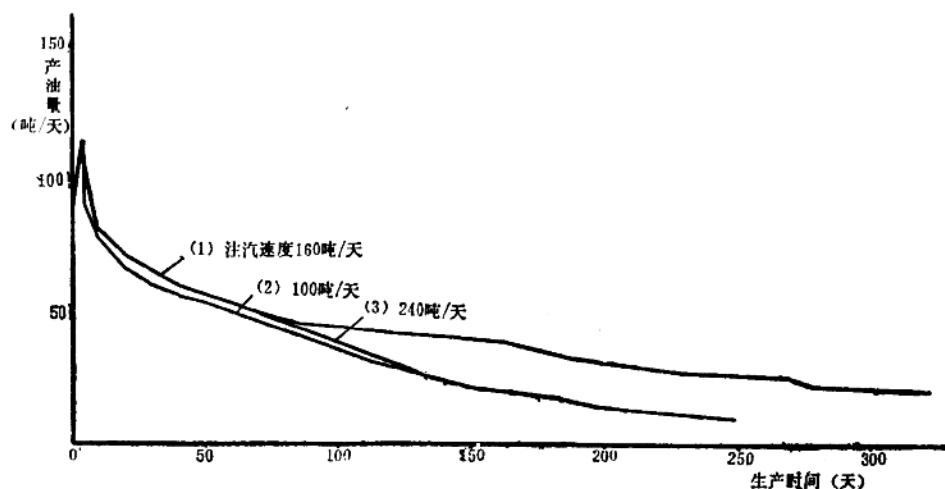


图13 高升油田注汽速度对吞吐效果的影响(数值模拟结果)

结果		计算参数:
周期总产油量(吨)	累积油/汽比	总油层厚度68米
(1)10.873	2.19	净油层厚度44米
(2)8.616	1.90	孔隙度25%
(3)8.935	1.77	原始含油饱和度60%
		原始油层温度
		注汽温度341℃
		原油比重0.96
		总注入量5,000吨
		注汽干度40%

提高深井蒸汽吞吐效果的途径

前述四个油田深井蒸汽吞吐已取得显著增产效果, 深井注汽工艺已取得很大进步, 但仍需要继续改善注汽工艺, 尤其是对1600米深井, 还存在某些问题。根据室内研究及现场试验结果。提高效果的途径是^[2]:

1. 继续改进井筒隔热技术, 降低井筒热损失, 提高井底蒸汽干度。

高升油田大多数油井是热水吞吐, 主要是加热井底, 解除油层污染损害。因而只是恢复油井产能。其它三个油田由于深度仅1000~1200米, 用同样的隔热技术, 井底干度一般都在30~50%, 因此效果很显著。为此, 需要进一步改善井筒隔热油管及耐热封隔器。

2. 利用油层能量, 尽量延长注汽后油井自喷采油期, 可以增加周期产量。

多数油井在注汽后, 仅焖井3~7天, 然后开井投产, 油井能够自喷生产。这主要是油层压力接近原始油层压力, 能量充足。油井自喷能够较好地解除油层污染损害。而且在较大压差下生产, 油层加热后, 原油粘度剧降, 溶解气的作用加强, 增加了峰值产量。

3. 注汽后采用长冲程、大泵强抽。

注汽后油井潜在产能很大, 如果采用排量为100~150米³/日的泵抽, 可以取得很好的增产效果。可惜, 许多油井的泵能量太小。

4. 在油井起下作业中防止油层二次污染。

5. 按油层条件优选注汽参数。

深油层蒸汽驱前景

对深度1000~1600米的油层进行蒸汽驱的技术难度远较吞吐大, 存在许多技术问题。我们以高升油田为目标, 初步研究了蒸汽驱的可行性开发方案^[9]。我们采用相似物理模型与数学模拟研究结果, 认为1600米深油层蒸汽驱的前景是乐观的。

1. 采用更先进的井筒隔热技术, 可以将蒸汽驱阶段的井筒热损失率降低到10%以内, 套管温度控制在200℃以下, 井底蒸汽干度保持在50%以上。

2. 通过常规采油及蒸汽吞吐采油后, 将油层压力降到约70大气压以后开始蒸汽驱是可能的。

3. 蒸汽驱的主要问题是如何提高体积扫油系数。控制打开油层厚度及只打开注采井下部一半是有效的方法。

结 论

1. 深度为1000~1200米的油井进行蒸汽吞吐已取得显著效果, 技术上比较成熟。对1500~1600米深井已取得初步试验结果, 前景是很好的。

2. 采用井筒隔热技术, 包括隔热油管、耐热封隔器以及其他辅助措施, 对于深井进行蒸汽吞吐及蒸汽驱, 远比井下蒸汽发生器简单、便宜、现实。

3. 深井蒸汽驱的井筒隔热技术还需进一步发展。

4. 注蒸汽的油层深度预期可以超过1500米达到1600米。

5. 深度在1000~1600米的深井, 在油层压力接近原始压力水平条件下, 可以采用较低干度蒸汽进行蒸汽吞吐, 提高油井产量。

(参加试验者: 石油部油科院开发所梁人初、占国范、翟建华、蒋琪等)

参 考 文 献

- [1]刘文章等,深井注蒸汽井筒隔热技术方案研究,1981年5月。
- [2]刘文章,提高油井蒸汽吞吐效果的研究,1983年7月8日。
- [3]刘文章、甄 鹏等,辽河高升油田稠油热采开发方案。1984年7月。
- [4]J.Q.Herrera et al Wellbore Heat Losses In Deep Steam Injection Wells S1-B Zone Cat Canyon Field,SPE7117.
- [5]Willhite,P.G.Over-all Heat Transfer Coefficients In Steam and Hot Water Injection Wells,JPT. 1976.5.