

井下蒸汽发生器的研究进展和应用前景

徐进良 陈听宽 陈宣政

(西安交通大学)

〔摘要〕 首先阐述了应用井下蒸汽发生器进行稠油开采的背景及意义,综述了井下蒸汽发生器研究和应用的发展概况,并将这种稠油热采新工艺与传统的注汽热采工艺进行了比较,最后探讨了在我国开展井下蒸汽发生器研究和应用的前景。

关键词 井下蒸汽发生器 稠油开采 高压燃烧 综述

1 背景与意义

从1931年美国得克萨斯州的一口油井首次采用蒸汽吞吐取得成功以后,注蒸汽采油法(包括蒸汽吞吐和蒸汽驱)至今已经历五十多年的发展过程。业已确认,注蒸汽是当今提高原油采收率的一个主要方法。全世界应用提高采收率方法采出的原油中,用注蒸汽方法的采出量约占70%。它已经成为一种成熟的既定的采油工艺,用在含有高重度、高粘度和高孔隙度的油藏中,它几乎成为常规的采油方法。

注蒸汽采油法的潜力很大,大有用武之地。世界上焦油砂或重油蕴藏量极为丰富,我国储量也很丰富。加拿大和委内瑞拉各有1万亿桶数量的焦油砂或重油的蕴藏量。它们很稠或基本上呈半固体状态,靠一次开采几乎采不出来,用注汽开采却能取得显著成效。

但是,注蒸汽采油法还远未发挥出它的最大潜在能力,还有许多因素阻碍了其潜力的发挥,主要表现在:

1. 目前极大多数蒸汽发生器使用当地

原油作为燃料,运行经验表明,注蒸汽每生产3桶原油,需要用其中一桶作为燃料耗掉,这等于降低了注蒸汽的采收率。

2. 蒸汽发生器排入大气的废气污染严重,其中主要是 SO_2 , NO_x 等有毒性气体。另一方面,废气的热量不能利用,这项热损失高达20%左右。

3. 蒸汽从蒸汽发生器到工作油层,地面管线和井筒两项热损失相当大。其中井筒热损失占10%以上,注汽管线热损失在(5—10)%之间,因而能量总利用率不超过68%。

4. 蒸汽发生器燃气侧一般是在接近常压的条件下运行的,燃气的密度小,再加上燃气与水是间接传热,传热系数较小,使得蒸汽发生器体积庞大,需要用许多贵重的金属钢材。

针对上述影响注蒸汽工艺发展的主要限制因素,国外在注蒸汽工程和作业上已经做了许多有效的改进,如改进蒸汽发生器设计以提高其热效率;设计了各种高效隔热油管以减少井筒热损失;采用预应力套管和高温固井水泥以防止高温引起井筒热损失等等。

收稿日期 1991-05-02 收修改稿 1991-07-30

本文联系人 徐进良 25 西安交大能源系多相流研究室 西安 710049

除此之外,目前国外已在试验和研究几项新技术,这些项目的成功将会使注蒸汽采油工艺更具有生命力,因为这些新技术与迄今为止已使用的某些改进不同,它们不限于局部性效率的提高或损失的减少,而是采取具有变革性的措施。其中一项令人瞩目的技术是开展井下蒸汽发生器的研究和应用。

R.V.Smith在1969年就提出井下蒸汽发生器的设想并获得专利。美国能源部从1978年起投资2500万美元进行井下蒸汽发生器研究工作,目前已在几个油田进行过现场试验,运行可靠,没有发现油层堵塞现象。

直接接触式井下蒸汽发生器是将燃油和空气高压注入井下,在井下燃烧室内燃烧,将水冷却燃烧室壁,然后直接喷入燃烧产物中产生蒸汽并将其混合物一同注入油层。由于高压燃烧和直接进行交换,使得井下蒸汽发生器尺寸很小(其典型尺寸内径为100 mm,可装入内径为180 mm的井筒内),这样,大大节省了优质耐高温高压钢材。

与目前普遍采用的地面蒸汽发生器相比,井下蒸汽发生器最大的优点是能量利用率高,对于井下蒸汽发生器,能量损失主要发生在多级空气压缩机上,因为空气经过多级压缩,要进行级间冷却,这项损失估计占总能量消耗的20%左右,也就是说,井下蒸汽发生器总能量利用率为80%左右,比起地面蒸汽发生器来说,要优越得多。

井下蒸汽发生器由于将燃气和蒸汽一同注入油层,不存在大气污染问题。

在产生同样数量蒸汽的前提下,由于燃气一同注入,所以它能大大提高蒸汽驱动能力。

2 国外研究与应用概况

R.V.Smith于1969年获得井下蒸汽发生器(英文全称为Downhole Compact High Pressure Combustion Direct steam Generator)的专利。后由美国能源部投资桑迪

安(SANDIA)国家实验室研制,桑迪安实验室在1978年经论证后认为DSG方案是可行的,可与SSG(地面蒸发器)竞争,在井深超过760 m应优先选择井下蒸汽发生器。1978年10月桑迪安实验室研制出一台热容量为2200 kW,能生产22.6 m³/h蒸汽的高压燃烧DSG,并投入了持续半年的地面模拟试验。它的直径为152 mm,总长为5.5 m,试验表明燃烧稳定,结构可靠。1981年3月在Kern River油田进行现场试验,DSG直径为114 mm。试验结果是良好的。后来又在wilmington油田作深井(约760 m)的现场蒸汽驱试验,结果也很令人满意,证明高压燃烧DSG长期工作是可靠的,从产液分析表明,燃烧产物保留在油层中,没有观察到油层堵塞现象,而又基本上消除了大气污染问题。

美国化学采油公司(Chemical Oil Recovery Company)已生产出7300 kW的高压燃烧DSG,将使用于委内瑞拉1500 m井深的蒸汽驱工程。也有其它公司生产类似的产品。

由于高压燃烧DSG具有能量利用率高,消除污染和占地少等优点,日后随着结构、设备和控制仪器等逐步改进和完善,它可望在深井蒸汽驱领域内占得一定的地位。表1是地面蒸汽发生器和井下蒸汽发生器两种系统的比较。

DSG要能放置在油井内工作,并要求供给相当于地面蒸汽发生器所能提供的热量,它必须具有极高的发热强度,其容积热强度至少为140 kW/m³,大约比普通地面蒸汽发

表1 典型的热效率比较

| | 地面发生器 | 井下发生器 |
|-----------|----------|-------|
| 发生器废气温度 | 220°C | 390°C |
| 发生器废气热损失 | 0.2 | 无 |
| 注汽管线热损失 | 0.05~0.1 | 无 |
| 井筒热损失 | 0.1 | 无 |
| 表面热损失 | 无 | 0.2 |
| 燃烧热损失 | 数据不详 | 0.02 |
| 系统能量总利用率 | <0.68 | 0.8 |
| 进入地层的蒸汽干度 | 0.71 | 0.80 |

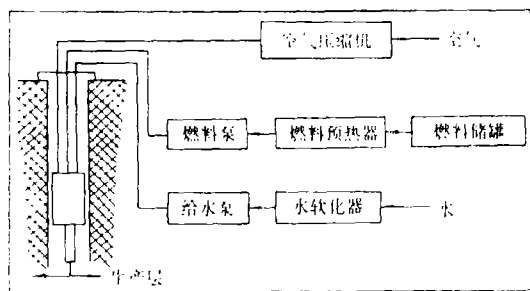


图 1 高压燃烧DSG工作原理示意图

生器大 3 个数量级，与燃气涡轮燃烧室的热强度相似，因此DSG实际上是小型燃气涡轮燃烧室和燃气—水换热器的组合体。（请参见图1）。

3 井下蒸汽发生器系统

表2是Rocketdyne分公司开发的井下蒸汽发生器的初步设计要求。这项工作是美国能源部的深井注蒸汽工程项目的一部分，试验是在桑迪安研究所进行的。

井下蒸汽发生器有三套动力系统：燃油供应系统、水供给系统和空气供应系统，另外还有点火控制系统。三套动力系统的主要设备均放在地面上，由微机实现对流体流量、压力等参数的自动检测和控制。

表 2 井下蒸汽发生器的初步设计要求

| | |
|-----------|------------------------|
| 能量输出 | 2 930—5 860 kW |
| 蒸汽输出 | 6.6—13.2 t/h |
| 蒸汽干度 | >80% |
| 工作压力 | 7.0—21.0 MPa |
| 工作深度 | 760—1 520 m |
| 外形体积 | 可装入 180 mm 的套管中 |
| 适应性 | 能与目前的油田作业相配合，易为油田职工使用。 |
| 井下工作寿命 | 10年以上 |
| 两次维修的最短间隔 | 18个月 |

在地面上，燃烧的燃料油经过过滤由一台燃油泵供给，空气由地面的空气压缩机组供给，水经过软化由水泵供给。主要的燃烧

液流由氢焰点火，通过可燃的氢氧混合物从井口传到井底，实现井下燃烧器的远距离点火。对其它一些点火装置，如使用自燃性液体，也进行了研究，其中一种TEB的自燃性液体能稳定地工作。

4 我国研究和应用前景

当前，我国的胜利、辽河，新疆及河南油田等均使用地面直流锅炉，将水加热并产生干度为80%的湿蒸汽注入到油层，加热稠油以降低其粘度，然后将其开采出来。不言而喻，开展井下蒸汽发生器研究并推广使用具有重大意义。西安交通大学工程热物理所正着手开展对这种新式的井下蒸汽发生器研究。井下蒸汽发生器的研究涉及到高压燃烧，传热及多相流动传热传质的研究，这些过程相互影响，相互制约，具有重大的学术价值。

笔者认为，鉴于井下蒸汽发生器是燃气涡轮燃烧室和燃气与水换热器的组合体，组织燃烧方面可借鉴一些燃气轮机燃烧方面的研究成果，但与燃气轮机中的燃烧又存在许多差别，从某种意义上来说，这些差别也是今后井下蒸汽发生器研究所要解决的问题。

4.1 井下蒸汽发生器燃烧室比起燃气轮机燃烧室来说，要小得多，这就要求井下蒸汽发生器的设计既要合理组织燃烧，又要求结构简单，体积小。

4.2 在燃气轮机燃烧室中，空气是从主燃区，补燃区及掺混区分批送入燃烧室内，但这在井下蒸汽发生器燃烧室内是不可能的，空气只能一次性送入燃烧室，其空气动力学特性与燃气轮机燃烧室内的特性有很大差异，由此对燃烧中火焰着火、火焰稳定及燃烧效率等问题均需进行研究。另一方面，燃烧室内空气与油雾须有良好的配合，燃烧的空气须具有合适的旋流强度及合适范围的回流区以使得强化及稳定燃烧。油雾除

了要保证雾化细度外,扩散角也要合适,扩散角过小,燃油浓度在轴线附近过于集中而在其它区域过小,扩散角过大,未燃尽的油滴极易打到燃烧室壁(因为燃烧室内径很小),若这些打在燃烧室壁的油滴不能及时再次蒸发燃烧,则极易引起结焦。

4.3 用水冷却燃烧室壁,将发生过冷膜态沸腾过程,且与燃烧室内燃烧构成耦合传热过程,这种冷却的有效性、壁温特性及对燃烧过程的影响也有待于探讨。强化水对室壁的冷却,壁温降低,影响了打在室壁上的油滴的蒸发,结焦加剧;显然高温对燃烧有好处,但受室壁材料高温性能的限制。

此外,井下蒸汽发生器中预热水直接喷入高温烟气中,到目前为止,还没有见到有文献报道这种复杂的多相流动与传热传质问题,这个过程的研究对井下蒸汽发生器产汽室的优化设计及在学术上均有重大价值。

以上粗略地提出了井下蒸汽发生器的研究方向。总之,井下蒸汽发生器具有一系列优点,其研制过程有一定困难,但也是可以逐步克服和解决的。我国井下蒸汽发生器的研究还刚起步,可望取得满意成果,并为增加原油产量,为我国的原油开采事业助一

臂之力。

参 考 文 献

- 1 美国井下蒸汽发生器研究动向,胜利油田科委情报室编,1982
- 2 Christian U. Okoye et al. Enhanced of oil by ALKALINE steam flooding, SPE 6523
- 3 Albuquerque N M. Downhole steam generator technology, Enhanced Energy Systems, Inc. P. O. BOX 6582, 87197(505)345-8971, 1982. 4
- 4 Thermal efficient steam producing systems. Published by the brunswick company, Enhanced Energy Systems, Inc.
- 5 RONALDL. FOX, A. BURL DONALD-SON. Production of heavy crude oil using downhole steam generators. Enhanced Energy Systems, Inc. New Mexico.
- 6 [美]怀特 P D, 莫斯 J T. 热采方法. 新疆石油管理局油田工艺研究所译, 王弥康校. 北京: 石油工业出版社, 1988年3月
- 7 金如山. 航空燃气轮机燃烧室. 宇航出版社, 1988: 220-370
- 8 燃油锅炉燃烧设备及运行编写组编. 燃油锅炉燃烧设备及运行. 北京: 水利电力出版社, 1976: 14-94

Research Progress of Underground Steam Generators and their Application Prospects

Xu Jinliang, Chen Tingkuan, Chen Xuanzheng

(Xian Jiaotong University)

Abstract

This paper describes the background and significance of high viscosity crude production by use of underground steam generator with an overview of its research and applications being presented. A comparison of the new technology of high-viscosity crude production process and the traditional steam injection hot production method is made. Finally, the paper discusses the prospect of the development and application potentiality of such underground steam generators in China.

Key words: *underground steam generator, high-viscosity crude recovery, high-pressure combustion, overview*