

# SAGD 技术应用于陆域冻土天然气水合物 开采中的理论研究

王志刚, 张永勤, 梁 健, 王汉宝, 吴纪修, 李 宽, 李鑫森, 尹 浩, 李小洋  
(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**天然气水合物被誉为最有研究价值和开采价值的清洁能源, 已经成为当今世界能源研究的热点。但到目前为止还未形成成熟稳定的天然气水合物开采技术体系, 仍处于研究和试采阶段。陆域冻土天然气水合物开采与海域天然气水合物开采相比相对比较容易, 在钻进过程中能够形成较稳定的孔壁。天然气水合物开采的主要方法有热激法、降压法、置换法和化学抑制剂法。SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage) 技术也叫蒸汽辅助重力驱油技术, 在重油、油砂开采中得到了迅速发展, 取得了非常有效的成果, 被认为是目前重油开采最有效的方法。对 SAGD 技术应用到陆域冻土天然气水合物开采中进行理论分析研究, 经过分析发现将 SAGD 技术应用到天然气水合物开采中是可行的, 但确定两口水平井之间的距离是关键, 且在应用时要把上部井变为生产井, 下部井变为注汽井。

**关键词:** SAGD 技术; 天然气水合物; 陆域; 冻土区; 试采(井)

**中图分类号:** TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0014-05

**Theoretical Study on the Application of SAGD Technology in Exploitation of Natural Gas Hydrate in Land Permafrost Region/WANG Zhi-gang, ZHANG Yong-qin, LIANG Jian, WANG Han-bao, WU Ji-xiu, LI Kuan, LI Xin-miao, YIN Hao, LI Xiao-yang** (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Natural gas hydrate is regarded as clean energy with research and production value, which has become a hot research topic in the world. But so far, it is still in the research and production stage, no mature and stable gas hydrate production technology system has formed. The exploitation of natural gas hydrate in land permafrost region is relatively easy in contrast with the exploitation of natural gas hydrate in sea area, and the stable hole wall can form during the drilling process. The main natural gas hydrate exploitation methods are thermal stimulation method, depressurization method, displacement method and chemical inhibitor method. SAGD technology is also known as steam assisted gravity drainage, it has been rapidly developed in heavy oil and oil sands mining with very effective results, and is considered to be the most effective way of heavy oil exploitation. In this paper, the application of SAGD technology in natural gas hydrate exploitation in land permafrost region is analyzed, it is found that SAGD technology is feasible in the application of natural gas hydrate mining; however, it is very important to determine the distance between the 2 horizontal wells, and in the application, the upper well should be changed into a production well, while the lower one into the steam injection well.

**Key words:** SAGD technology; natural gas hydrate; land area; permafrost region; producing test (well)

## 0 引言

天然气水合物是在一定的低温高压环境下, 由水分子和甲烷气体形成的一种笼状晶体化合物, 其特点是储量大、分布广、能量高, 一经发现就受到了世界各个国家的重视。据估计, 天然气水合物资源当量约为石油、煤炭及天然气等常规能源的 2 倍, 被视为是 21 世纪最有研究价值和开采价值的清洁能源。因此, 对勘探、开发水合物技术方法的研究已经成为当今世界的研究热点。我国是石油消费大国,

特别是在改革开放以后, 我国已经由石油出口国转变为石油进口国, 对外依存度达到了 60%。经济的发展离不开能源的支持, 能源对外依存度越大对我国安全和经济造成的威胁就越大, 因此, 寻找新的清洁替代能源已经迫在眉睫。天然气水合物的发现对于我国经济和国家安全具有十分重要的意义, 为我国新能源替代旧能源提供了有力的支持。

虽然天然气水合物的勘探开发具有广泛的发展前景, 但到目前为止, 世界各国都没有成熟的天然气

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“陆域冻土区天然气水合物钻采技术方法集成”(编号: DD20160225); 地质调查子项目“《钻探工程孔内事故处理技术规程》制定”(编号: 121201108000150012-09)。

作者简介: 王志刚, 男, 汉族, 1987年生, 硕士, 油气井工程专业, 从事石油及天然气水合物钻井工艺技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, 1036821833@qq.com。

水合物开采技术,只有俄罗斯、加拿大、美国、日本进行了试采,因此,天然气水合物开采所引发的地质及环境问题,特别是海洋天然气水合物开采产生的影响,还没有完全弄明白,需要进一步的研究和试验。就勘探开发来看,陆域冻土天然气水合物储层相对稳定,开采难度与海洋水合物开采相比相对比较容易,但就目前的研究情况来看,还没有一种完全适用于陆域水合物开采的开采技术。本文主要探讨 SAGD 技术可否在陆域冻土天然气水合物开采中应用。

## 1 陆域冻土区天然气水合物基本特征

### 1.1 成因及产出层位特征

天然气水合物中的气体为有机成因,除了部分来源于微生物分解发酵外,还来源于原油裂解气、原油伴生气、少量的凝析油伴生气、煤层气以及干酪根裂解气。有了充足的气源保证,在一定的温度和压力条件下极有可能形成天然气水合物。青海省木里地区有多个小型含煤盆地,为水合物的形成提供了丰富的气源。青海省木里地区水合物实物取出位置为冻土带以下的煤系中。

### 1.2 赋存特征

冻土区天然气水合物赋存于固结的沉积岩中,存在方式主要有孔隙填充物、结核裂隙填充物、胶结物、颗粒包壳等,其中以孔隙填充物、结核或裂隙填充物最为普遍。水合物呈薄片状、片状、团块状,分布受控于地质构造和地层温压条件,测井时呈现高电阻率特征。例如青海省木里地区水合物层分布于细粉砂岩夹层内,赋存状态为孔隙或裂隙中分布,裂隙宽一般为 0.5 ~ 1 mm,最宽可达 3 mm。

### 1.3 物理化学特征

从青海省木里地区取出的天然气水合物实物样品呈白色冰状,混有泥浆时呈烟灰色,用火可直接点燃,生成二氧化碳和水。密度为 0.8 ~ 0.95 g/cm<sup>3</sup>。主要成分以甲烷为主,并含有一定量的乙烷和丙烷。

## 2 天然气水合物的开采方式

天然气水合物在地下的存在形式是固态,在开采的过程中会发生相态的变化,分解成天然气和水,基于这个原理,目前研究的天然气水合物开采方式都是以改变水合物的相平衡状态来实现的。

### 2.1 热激法

热激法是在保持水合物层压力基本不变的条件

下,通过提高水合物储层的温度来改变相平衡,破坏氢键,使水合物发生分解。主要的加热方式有高温热水或者盐水、电磁加热、微波加热等。采用热激法开采天然气水合物有明显的优势,不仅提高了开采效率,还可以将注入流体进行重复循环使用,对环境影响小,适用于任何类型的天然气水合物开采。但是也存在一定的缺陷,例如热损失大,能量利用效率低等。

### 2.2 降压法

降压法开采是最经济直接的方式,通过改变水合物储层的压力来控制水合物的分解。主要的降压方法有 2 种:(1) 采取低密度钻井液钻井;(2) 通过泵将水合物层下方的游离气或者水抽出来以降低压力。降压法不仅成本低、操作简单,而且不需要连续激发,适合大规模开发。但是单纯采用降压法开采也有其缺点,速度慢、效率低,容易二次形成水合物。

### 2.3 置换法

目前研究最热的是向水合物储层注入二氧化碳气体置换水合物中的甲烷。采用二氧化碳置换甲烷不仅可以达到开采水合物的目的,还可以将二氧化碳封存存在地下,减少二氧化碳的排放,缓解温室效应。二氧化碳置换甲烷的机理是在一定压力范围内,水合物会发生分解,形成甲烷和水,而二氧化碳则易与水结合形成固态物质并保持稳定。二氧化碳与水的亲和力在相同条件下要优于甲烷。同时置换过程也是放热的过程,释放出的热量可以促进天然气水合物的分解。虽然二氧化碳置换甲烷具有双重优势,但是在室内实验时发现置换过程非常缓慢,且受到储层渗透率的限制,注入的流体可能会避开储层直接进入井口,同时在收集和运输上也存在着安全问题。

### 2.4 化学抑制剂法

化学抑制剂法是将盐类、甲醇类、乙醇类药剂注入到水合物层,打破天然气水合物原有的相平衡状态,改变储层孔隙压力和温度,分解水合物。在初期开采时只需要注入较少的量即可,但是水合物分解速度缓慢;制备化学抑制剂需要高昂的费用,还会污染环境,发展潜力不大。

### 2.5 其他方法

固体开采法又称水力提升法,是将水合物在储集层以固态形式进行挖掘采集,并进行输送,而不是在原地进行分解。这种方法主要针对的是海底水合物的开采,结合了海底采矿技术而提出的一种水合物开采方法,但是并不适合陆域水合物的开采。

### 3 SAGD技术在天然气水合物试采中应用理论探讨

#### 3.1 SAGD技术介绍

SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)技术最早的提出者是 Butler 和 Stephens,他们采用计算和实验的方法证实了采用该技术进行稠油开采可获得很好的采收率。我国最早采用 SAGD 技术进行稠油开采的油田是辽河油田,随后许多学者对该技术进行了深入详细的研究。

SAGD 技术,也就是蒸汽辅助重力泄油技术。主要用来开采粘度非常高或者沥青含量非常高的稠油油藏,被认为是目前重油开采最有效的方法。一般定义为:在水平井上方的一口或多口直井或水平井内注入蒸汽加热稠油,使稠油在重力作用下流入到下方的水平井中进行开采的技术。SAGD 技术开采基本原理如图 1 所示。

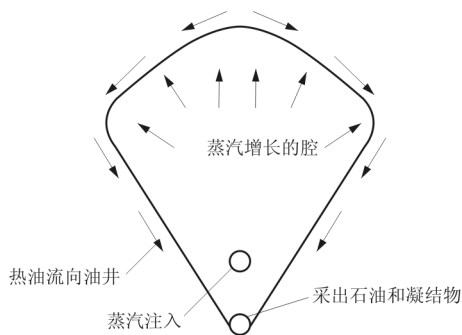


图 1 SAGD 技术开采基本原理

SAGD 技术的采油机理是以蒸汽作为热源,通过热传导和热对流相结合,实现蒸汽和油水之间的对流,再依靠原油和凝析液的重力进行采油。其生产过程包括 3 个阶段,分别是预热、降压生产和 SAGD 生产。开始时上部井与下部井同时注入蒸汽进行吞吐生产,各自形成独立的蒸汽腔(预热阶段);随着蒸汽吞吐生产的进行,上部井与下部井的蒸汽腔不断扩大,最后实现连通(降压生产阶段);转入 SAGD 生产阶段,这时上部井转为注汽井,持续向油藏内注入蒸汽,蒸汽向上、向下四周流动,最终形成一个连通且完整的蒸汽腔,注入的蒸汽会在蒸汽腔内冷凝并释放热量,加热稠油,稠油和冷凝水在重力作用下向油藏内部推进,这样不仅保持了油藏的压力和驱动力,同时还提高了蒸汽的波及范围,因此,SAGD 技术要比单纯的蒸汽吞吐获得的采收率高。目前已经在稠油开采中得到了广泛的应用。

#### 3.2 SAGD 技术主要布井方式

实现 SAGD 技术的布井方式主要有以下几种。

(1) 双水平井 SAGD 模式(见图 2),由上下 2 口平行的水平井组成,在进行地质建模以后,根据油藏特征选择合适的井间距布井,进入 SAGD 生产后,上部水平井为注蒸汽井,下部水平井为生产井。

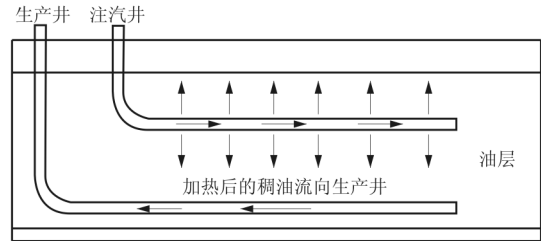


图 2 双水平井布井方式

(2) 若干直井和水平井的组合(见图 3),这种 SAGD 布井组合针对的主要是已经布置直井进行开发的稠油油藏,为了更好地利用现有直井,可在直井下方钻一口水平井转变成 SAGD 技术进行开采,这样不仅节约了钻井成本,还提高了油藏的采收率,更好地提高了经济效益。

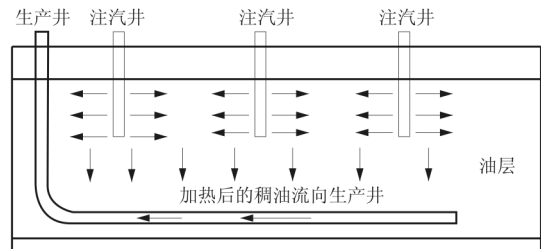


图 3 直井和水平井组合布井方式

(3) 双水平井与直井连通布井方式(见图 4)。这种布井方式属于新型 SAGD 技术,3 口井当中一口井为注蒸汽井,一口井为泄油井,另一口井为生产井。这种布井方式主要是为了解决抽油泵沉没度不够;沥青及井眼轨迹使泵偏磨严重等问题。

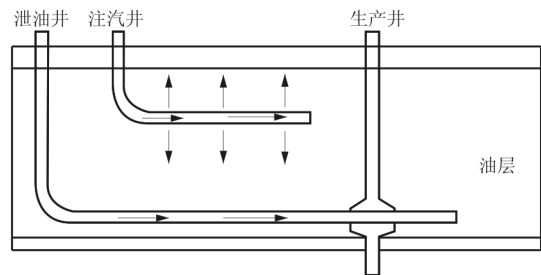


图 4 双水平井+连通直井布井方式

(4) 双水平井与直井不连通布井方式(见图 5)。首先布置常规的双水平井,然后在其一侧布置一口直井作为蒸汽吞吐井。双水平井先进行开采,

待蒸汽腔到达的储层顶部以后,向偏置直井注入蒸汽,且注入速率和压力要明显高于双水平井,但低于地层破裂压力,待偏置直井的蒸汽腔与双水平井的蒸汽腔连通以后,直井作为生产井进行原油生产。此种布井方式类似于上述双水平井与直井连通布井方式,但是该布井方式可以减少钻井成本。

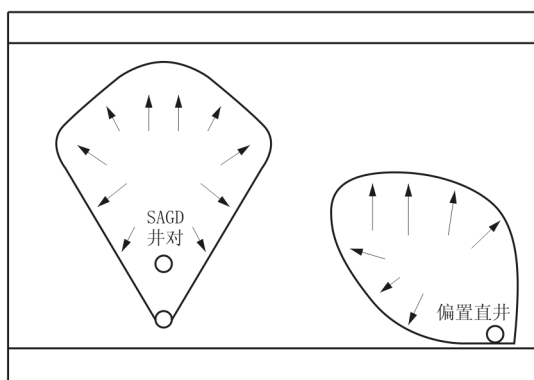


图5 双水平井+偏置直井布井方式

(5)汽液同向布井方式(见图6)。这样布井方式主要是为了控制汽窜和产出液温度,还允许低温泵举升系统。

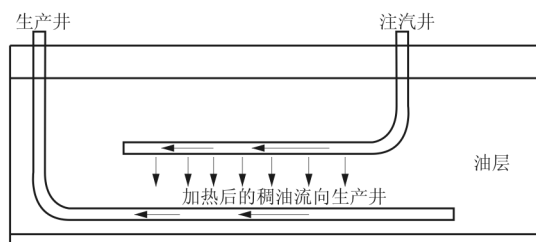


图6 汽液同向布井方式

前2种布井方式是SAGD技术中最常见的布井方式,已经在国内外各大油田得到了广泛的应用。后3种为不常见的SAGD布井方式。

### 3.3 SAGD技术在天然气水合物试采中的应用分析

SAGD技术已经在石油开采中得到了广泛的应用。与其他布井开采方式相比,SAGD技术具有非常明显的优势,能够有效提高石油的采收率,是目前稠油开采选择最多的一种开采模式。在天然气水合物相平衡影响因素中,温度是最重要的影响因素之一。同时陆域冻土天然气水合物储层地层相对稳定,在钻井过程中能够形成稳定的孔壁,且已经进行过蒸汽吞吐试采试验,而SAGD技术的基本原理是首先注入蒸汽进行蒸汽吞吐,然后上下2口水平井形成连通的蒸汽腔,上部井为注汽井,下部井为开采井,实际上利用的基本原理还是蒸汽加热开采,因

此,在陆域冻土天然气水合物开采中可以尝试采用SAGD双水平技术进行开采。加热方式采用经济效益好、对套管腐蚀性低的蒸汽注入方式。不过采用SAGD双水平井进行天然气水合物开采时,要将上部井变为生产井,下部井转变为注汽井。这是因为天然气水合物分解后变为水和甲烷,甲烷密度低会向上运移,所以应把上部井调整为生产井。SAGD技术应用到陆域冻土天然气水合物开采中的原理如图7所示。

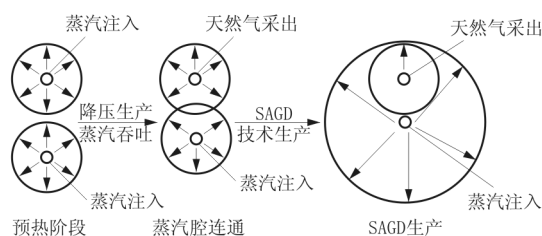


图7 SAGD技术在天然气水合物开采中的应用原理

采用双水平井SAGD技术进行天然气水合物开采的主要优点有如下几个。

(1)SAGD技术布井是一口井在储层的底部,另一口井在其上部位置,随着蒸汽的注入,上下2口井之间以及以上一部分地方都会形成蒸汽腔,蒸汽腔提高了储层的导流能力和开采面积,可以有效地分解所控范围内的天然气水合物,提高采收率,扩大经济效益。

(2)一口为生产井,一口为注汽井,减少了井间干扰。

(3)在注入蒸汽时采用双管注蒸汽,一根隔热管插入水平井底部注蒸汽,另一根隔热管在水平井前部注蒸汽,可以提高蒸汽辐射范围,减少热量损失,加快水合物的分解。

SAGD工艺技术已经成熟,将其应用到陆域冻土天然气水合物开采中理论上是可行的。但是天然气水合物开采与重油开采存在着许多差异(如:天然气水合物吸热分解,体积膨胀等),因此,不能完全按照重油开采的模式来开采天然气水合物,特别是在上下2口水平井井间距的确定上区别最大,如果按照重油开采的井间距确定方式来确定水合物开采的井间距,则极有可能造成上下2口水平井形不成连通的蒸汽腔,达不到采用SAGD技术开采天然气水合物的目的,降低经济效益。

### 3.4 注采水平井间距计算

采用SAGD技术开采天然气水合物时井间距的

确定很关键,注采井间距离太小时,汽液面很难控制,蒸汽容易直接产出。但是注采井间距离太大时,又很难形成连通的蒸汽腔,因此,注采井间距离的确定对于SAGD技术在天然气水合物开采中的应用具有十分重要的意义。下面就对2口双水平井之间的井间距离的确定进行探讨。

首先假设:

(1)地层为各向同性均质地层;

(2)水蒸汽在地层中传热忽略沿井身方向的纵向传热。

输送到天然气水合物层的热量,一部分被水合物矿层吸收,一部分用于天然气水合物的分解,因此,在极坐标系下单位时间内天然气水合物层吸收的总热量为:

$$dQ_1 + Q_2 = -\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r} = -\frac{\rho c \partial T}{\lambda \partial \varepsilon} \quad (1)$$

初始条件: $\varepsilon = 0$  时,  $T = T_D + mH$

边界条件: $r \rightarrow \infty$  时,  $\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = 0$

$$r = r_1 \text{ 时, } dQ_1 = -2\pi\lambda r_1 dz \frac{\partial T}{\partial r} - Q_2$$

式中: $Q_1$ ——水合物层吸收热量, kJ;  $Q_2$ ——水合物分解时吸收的热量, kJ;  $T$ ——地层内某处温度, °C;  $T_D$ ——地表温度, °C;  $\lambda$ ——地层导热系数, W/(m·°C);  $\rho$ ——地层密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c$ ——地层介质的比热;  $r$ ——蒸汽线半径, m;  $H$ ——垂深, m;  $m$ ——地温梯度, °C/m;  $r_1$ ——某时刻蒸汽线半径, m。

利用公式(1)和边界条件可以求出水蒸汽线的控制半径  $r$ 。

天然气水合物在地层中的赋存状态为固态,受热分解后会体积膨胀,这将对井壁稳定产生很大的影响,所以前期应进行蒸汽吞吐作业,进行地层预热并稳定井壁。在地层各向同性均质条件下,地层主应力变化与孔隙压力变化关系为:

$$\Delta\sigma_{II} = \Delta\sigma_{II} = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \alpha \Delta p \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma_{II}$ ——最大主应力变化量, MPa;  $\Delta\sigma_{I}$ ——最小主应力变化量, MPa;  $\Delta p$ ——孔隙压力变化量, MPa;  $\mu$ ——岩石的泊松比;  $\alpha$ ——有效应力系数。

结合气体的状态方程可得:

$$\sigma_{\max} = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \alpha \cdot \frac{r_p + \Delta r_p}{2r_p + \Delta r_p + r_1} CP \quad (3)$$

式中: $C$ ——天然气水合物分解后体积扩大倍数;

$P$ ——原始地层孔隙压力, MPa;  $r_p$ ——蒸汽吞吐半径, m;  $\Delta r_p$ ——蒸汽吞吐半径增量, m。

对公式(3)在  $\Delta r_p \rightarrow 0$  时求取极限可以得到蒸汽吞吐半径。在确定SAGD双水平井间距时首先要保证井壁稳定,所以井间距要大于蒸汽吞吐半径,但是井间距不应超过蒸汽线控制半径,否则很难形成连通的蒸汽腔,即:

$$r_p < r_{\text{间}} < r \quad (4)$$

#### 4 结语

SAGD技术已经在石油开采中得到了广泛的应用,技术体系成熟,取得的效果显著。将其应用到陆域冻土天然气水合物开采中理论上是可行的,可以有效地分解所控范围内的天然气水合物,提高采收率,扩大经济效益。尽管SAGD技术应用到陆域冻土天然气水合物开采中理论上是可行的,但是目前还没有进行现场验证。且本文只对SAGD技术应用到水合物开采时的井间距进行了计算,没有对注入蒸汽干度、注采比、排液速度、注入压力等影响因素进行计算。因此,虽然采用该技术进行水合物开采具有十分明显的优势,但还应加强室内和室外试验研究,进行进一步的验证。

#### 参考文献:

- [1] 董刚,龚建明,王家生. 从天然气水合物赋存状态和成藏类型探讨天然气水合物的开采方法[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 59-64.
- [2] 卢振权,祝有海,张永勤,等. 青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 182-190.
- [3] 卢振权,祝有海,张永勤,等. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 581-587.
- [4] 胡志兴. 天然气水合物相平衡研究及其应用[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2011.
- [5] 思娜,安雷,邓辉等. 天然气水合物开采技术研究进展及思考[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 52-60.
- [6] 张洋,李广雪,刘芳. 天然气水合物开采技术现状[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 63-67.
- [7] 李浩哲,梁琳琳,钱永娟. 新型SAGD技术在稠油开采中的应用[J]. 中外能源, 2016, 21(9): 52-55.
- [8] 恩娜,安雷,光新军. SAGD重油、油砂开采技术的创新进展及思考[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 98-103.
- [9] 刘尚奇,王晓春,高永荣,等. 超稠油油藏直井与水平井组合SAGD技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 35(2): 234-238.
- [10] 杨睿,关志刚,蒋刚,等. 新疆凤城油田SAGD平行水平井钻井技术[J]. 石油机械, 2009, 37(8): 79-82.
- [11] 张文波,路宗羽,王朝飞,等. SAGD平行水平井和直井连通钻井技术[J]. 石油机械, 2011, 39(6): 8-11.