

第二十七期：灵活井模型的使用

近年来随着钻井技术的快速发展，出现了各种复杂的井，如多分支井，多管柱井，波浪井等。在数值模拟计算中，常规的源汇井模型已经不能满足模拟的需求。为了更加精确的模拟这些复杂井，CMG在STARS 2010版正式推出灵活井（FLEX WELL）功能，并将在更高版本中逐步完善。本文将介绍STARS 2010.10版中灵活井的特点及使用方法。

一、什么是灵活井模型？

1.灵活井模型与模拟器是相互独立的，同时与模拟器又是完全耦合的。

2.灵活井最多可以模拟环空中的3个管柱，这些管柱可以是任意方向的（垂直的、水平的、倾斜的、波状的），还可能带有分支。这些管柱可能有不同的长度，可以全部或部分隔热，沿着井身轨迹可以有不同的直径。每个管柱既可以作为生产井，也可以作为注入井。环空中可能有套管、水泥，不同井深处有不同的直径。径向热流受壁厚、隔热层和水泥的影响。

3.对油管长度以及油管与油藏网格结合的位置没有限制。

多个油管通过环空相互影响。通常情况下，每个油管只在趾端与环空有流体交换，但是可以选择在油管的不同位置进行流体交换。油管和环空之间的径向热传导是沿着整个油管长度的。

环空和油管可以根据射孔被分成多个段。每个灵活井的所有液流和射孔段的方程都是同步求解的；每个灵活井方程组与其它灵活井方程组是分开求解的，并且与油藏无关。空间上，所有灵活井都通过环空-油藏流动相与油藏完全耦合。

4.流态是液体和气体流速的函数，可用于计算摩擦压降以及轴向和径向上的传热。

这里用一个机理模型来计算压降。首先根据气体和液体流速和流动方向确定

流态, 然后计算摩擦压降和持液量。径向热传导速率 Q 是总传热系数和相邻井筒部分之间的温差之乘积。总传热系数与热阻反比, 包括: a) 油管流体, b) 油管壁, c) 环空流体, d) 环空壁, e) 油藏网格。

油管和套隔壁的热阻取决于壁厚和金属的导热性, 这在计算中都是恒定不变的。另一方面, 流体和油藏网格的热阻取决于流体组成, 这在计算中可能是变化的。油管和环空流体的热阻还取决于流速 (较快的流速会造成较高的导热性), 因为计算中使用了无因次雷诺数和努塞尔数等。

5. 该模型可以处理井筒不稳定流动, 这一点对蒸汽吞吐很重要。

每个化学组分的质量和能量都是守恒的。这对于模拟流体隔离和井筒不稳定流动是必须的。

6. 与离散井模型相比, 灵活井有以下优点:

1) 能够更加灵活的处理井的轨迹

灵活井的井轨迹可以与源汇井一样灵活, 可以精确描述波浪井, 而离散井不能实现纵向的跨层。

2) 灵活井井筒中可以有最多 3 个管柱, 离散井只支持 1 个管柱。

3) 灵活井模型能够将井筒的数值求解与油藏网格的数值求解分开, 收敛性互不影响。而离散井模型中井筒与油藏网格是完全耦合在一起的, 其数值稳定性也相互关联。所以井筒计算收敛性变差时会增加整个网格的数值求解循环。

二、灵活井的适用范围

1. 目前只能在 STARS 中使用。

2. *FLX_WELLBORE 不能与 *ISOTHERMAL 同时使用。

3. *FLX_WELLBORE 不能与 *TFORM 选项的 *ZT 和 *ZH 同时使用。

4. *FLX_WELLBORE 不能与改变网格的选项（即动态网格）同时使用。

三、定义灵活井的关键字

1. Well and Recurrent 数据段

在 Well and Recurrent Data 部分,有以下关键字:

1) *PERF_FLX

用于定义井筒中各个管柱的轨迹和射孔信息, 其用法与*PERF 一样。

2) *FLX_WELLBORE

用于将一个或多个管柱连接起来, 并定义其它信息, 比如管柱直径及其热性质等。

如果没有*FLX_WELLBORE 关键字, 那么定义的井作为源汇井处理。

使用格式如下:

```
*FLX_WELLBORE fw_name *ATTACHTO well_list
  { tubular_type *ATTACHTO well_name
    *TUBULARS tubular_diam }
  *WALL_CP x
  *WALL_HCN x
  *INSULATION_HEAT_PROP hcapi hcndi
  *CEMENT_HEAT_PROP hcapc hcndc
  *REL_ROUGH x
  *SOLID_BLOCK ( *ON | *OFF )
```

其中:

tubular_type = (*TUBING | TUBING_CON | ANNULUS)

tubular_diam =

*CONSTANT *ID idv (*OD odv)

或

***VARIABLE**

{ *idv* *odv* (*insd* | *cemd*) }

fw_name 灵活井筒的名称

ATTACHTO *well_list

定义属于灵活井筒 *fw_name* 的所有井（即井筒内的管柱名称）。*well_list* 中包括每口井的 *well_nam*，中间用空格隔开。最多可以有 3 口井，其中 1 个可以是同心管。接下来是对 *well_list* 中每口井的特征进行描述，包括管柱类型、名称、尺寸。

tubular_type

定义管柱类型。

- *TUBING 常规油管
- *TUBING_CON 同心油管
- *ANNULUS 环空

well_name

井名。该井名必须出现在 *well_list* 中。

***CONSTANT *ID *idv* (*OD *odv*)**

定义管柱的直径，该值沿整个井筒是不变的。关键字 ***CONSTANT** 强制规定内径 *idv* (m | ft | cm) 是不变的。若定义外径 *odv* (m | ft | cm), $odv \geq idv$ ，则模拟的壁厚大于零。

***VARIABLE**

定义随井筒变化的管柱直径，输入一个表，每个射孔点占一行，顺序与 ***PERF_FLX** 的顺序一样。第三个数是可选的，用于定义绝缘层（对于油管）或水泥层（对于环空）的外径。

- idv* 内径 (m | ft | cm)
- odv* 外径 (m | ft | cm), $odv \geq idv$

insd 绝缘层直径, 对油管 (m | ft | cm), $insd \geq odv$

cmd 水泥环直径, 对环空 (m | ft | cm), $cmd \geq odv$

*WALL_CP *x*

管壁热容 (J/m³-C | Btu/ft³-F | J/cm³-C)。

*WALL_HCN *x*

管壁导热系数 (J/m-day-C | Btu/ft-day-F | J/cm-min-C)。

*INSULATION_HEAT_PROP *hcap* *hcn*

绝缘层热性质。

hcap 热容 (J/m³-C | Btu/ft³-F | J/cm³-C)

hcn 导热系数 (J/m-day-C | Btu/ft day-F | J/cm-min-C)

*CEMENT_HEAT_PROP *hcapc* *hcnc*

水泥层热性质。

hcapc 热容 (J/m³-C | Btu/ft³-F | J/cm³-C)

hcnc 导热系数 (J/m-day-C | Btu/ft day-F | J/cm-min-C)

*REL_ROUGH *x*

相对粗糙度 (无因次)。

*SOLID_BLOCK (*ON | *OFF)

固相沉积造成的井筒堵塞。只有反应生成的固相才能沉积下来。使用*ON 时, 若发生固相沉积, *fw_name* 的所有井的水力直径都会减小。

缺省条件:

若没有 *FLX_WELLBORE, 每口井都当成源汇井处理。

若有 *TUBULARS *CONSTANT, 没有*OD, 那么 $odv = idv$, 也就是说, 管壁厚度为 0, 对径向导热没有阻力。

若没有定义绝缘层直径，油管就没有绝缘层。

若没有定义水泥层直径，环空外就没有水泥层。

其它缺省值:

<u>空缺的关键字</u>	<u>缺省值</u>
*WALL_CP	(mild steel) $3.63 \cdot 10^6$ J/m ³ -C (54.13 Btu/ft ³ -F)
*WALL_HCN	(mild steel) $3.888 \cdot 10^6$ J/m-day-C (622.46 Btu/ft-day-F)
*INSULATION_HEAT_PROP (glass wool)	$hcapi = 3.283 \cdot 10^4$ J/m ³ -C (0.49 Btu/ft ³ -F) $hcndi = 1.68 \cdot 10^4$ J/m-day-C (2.69 Btu/ft-day-F)
*CEMENT_HEAT_PROP (concrete stone mix)	$hcapc = 1.184 \cdot 10^5$ J/m ³ -C (1.77 Btu/ft ³ -F) $hcndc = 1.848 \cdot 10^6$ J/m-day-C (296 Btu/ft-day-F)
*REL_ROUGH	0.0001
*SOLID_BLOCK	*OFF

3) *DE-ACTIVATE, *ACTIVATE

用于将灵活井中的各管柱解散或集合起来，使用*SHUTIN 和 *OPEN 来关掉或打开单个管柱。

2. I/O Control 数据段

在 I/O Control 数据段，通过以下关键字控制灵活井信息的输出:

*WPRN *FLEXWELL

往*.out 文件中输出计算结果及数值收敛性信息。

***OUTSRF *FLEXLAYER**

往*.mrf 文件中输出结果信息，用于在 Results Graph 划曲线。

四、灵活井文件制作示例

要将源汇井转成灵活井，只需要将源汇井的*PERF 关键字替换成*PERF_FLX，再加一个*FLX_WELLBORE 即可。这对有多个射孔段并且使用*GRAV-FRIC-HLOS 的源汇井（比如，SAGD 中的长水平井）非常有用。

下面这个例子是环空中有 2 个油管的灵活井定义。

五、查看计算结果

CMG 自带算例 stwwm059.dat, stwwm060.dat, ..., stwwm066.dat 都是关于灵活井的算例。其中 stwwm062.dat 展示了计算从井口到第一个射孔点，以及整个射孔段不同位置处的温度、干度等参数。

要查看结果，打开*.out 文件，查找“Pressure drop and heatloss for well”，显示的就是从井口到第一个射孔点不同位置的干度、压力、温度等。

```

*WELL 'Tub-1'
  *INJECTOR MOBWEIGHT 'Tub-1'
  *INCOMP WATER 1. 0. 0.
  *TINJW 242.6
  *QUAL 0.85
  *OPERATE MAX BHP 3500.
  *OPERATE MAX STW 500.
*PERF_flx GEO 'Tub-1'
  6 4:24 20 1.
  
```

```

*WELL 'Tub-2'                                **Tubing 2 is shorter
  *INJECTOR MOBWEIGHT 'Tub-2'
  *INCOMP WATER 1. 0. 0.
  *TINJW 242.6
  *QUAL 0.85
  *OPERATE MAX BHP 3500.
  *OPERATE MAX STW 500.
*PERF_flx GEO 'Tub-2'
  6 4:15 20 1.

*WELL 'Annulus'
  *PRODUCER 'Annulus'
  *OPERATE MIN BHP 3000. CONT REPEAT
*PERF_flx GEO 'Annulus'
  6 4:24 20 1. OPEN

*FLX_WELLBORE 'inj_flw' *ATTACHTO 'Tub-1' 'Tub-2' 'Annulus'
*TUBING *ATTACHTO 'Tub-1'
  *TUBULARS constant
  *ID 0.076
  *OD 0.0889

*TUBING *ATTACHTO 'Tub-2'
  *TUBULARS constant
  *ID 0.076
  *OD 0.0889

```

*ANNULUS *ATTACHTO 'Annulus'

*TUBULARS constant

*ID 0.224

*OD 0.2445

```

8339
8340
8341 Pressure drop and heatloss for well injtb.
8342
8343
8344
8345 Depth Quality Pressure Fluid Temperature Enthalpy Formation Temperature Heatloss Flow pattern Friction
8346 (m) (gas frac.) (kPa) (C) (J/kg) (rhole) (J/kg) (kPa)
8347 0.0 D 90.0 2544.995 224.0 2.5089E+06
8348 24.4 L 90.0 2543.600 224.0 2.4873E+06 14.08 889.9 ANNULAR MIST -3.53
8349 48.8 L 88.8 2542.298 224.0 2.4650E+06 14.08 882.1 ANNULAR MIST -3.45
8350 73.2 L 87.7 2541.087 223.9 2.4448E+06 14.09 874.7 ANNULAR MIST -3.37
8351 97.6 L 86.5 2539.965 223.9 2.4238E+06 14.09 867.2 ANNULAR MIST -3.29
8352 122.1 L 85.4 2538.932 223.9 2.4030E+06 14.10 859.1 ANNULAR MIST -3.21
8353 146.5 L 84.2 2537.985 223.9 2.3824E+06 14.11 850.0 ANNULAR MIST -3.14
8354 170.9 L 83.1 2537.124 223.8 2.3621E+06 14.12 839.2 ANNULAR MIST -3.07
8355 195.3 L 82.0 2536.346 223.8 2.3421E+06 14.13 825.6 ANNULAR MIST -3.00
8356 219.7 L 80.9 2535.650 223.8 2.3226E+06 14.14 807.4 ANNULAR MIST -2.93
8357 244.1 L 79.9 2535.032 223.8 2.3037E+06 14.16 781.2 ANNULAR MIST -2.87
8358 268.5 L 78.8 2534.489 223.8 2.2859E+06 14.19 732.5 ANNULAR MIST -2.80
8359 292.9 L 77.9 2534.019 223.8 2.2694E+06 14.17 726.0 ANNULAR MIST -2.75
8360 317.4 L 76.9 2533.633 223.8 2.2479E+06 14.12 845.6 ANNULAR MIST -2.68
8361 341.8 L 75.8 2533.347 223.8 2.2238E+06 14.05 994.9 ANNULAR MIST -2.60
8362 366.2 L 74.5 2533.180 223.8 2.1951E+06 13.96 1183. ANNULAR MIST -2.50
8363 390.6 L 72.9 2533.156 223.7 2.1606E+06 13.85 1421. ANNULAR MIST -2.39
8364 415.0 L 68.8 2533.305 223.7 2.1186E+06 13.71 1727. ANNULAR MIST -2.26
8365
8366 Pressure drop and heatloss for well injan.
8367
8368
    
```

查找“Pressure (kPa) Temperature(C)”, 显示的是整个射孔段不同位置处的压力、温度等参数。

```

19979
19980 *****
19981 FLEXIBLE WELLBORE - ' prd_flw'
19982 *****
19983 Pressure (kPa) Temperature(C) Water Saturation Oil Saturation Gas Saturation Quality (%) Depth(m) Length(m)
19984
19985
19986 2480.02 222.565 0.445594E-01 0.548056 0.407385 42.1563 293.500 100.000
19987 2480.09 222.575 0.325342E-01 0.381577 0.585899 58.9494 293.500 200.000
19988 2480.22 222.586 0.298712E-01 0.325598 0.644831 63.5042 293.500 300.000
19989 2480.37 222.593 0.263276E-01 0.267032 0.706641 68.1873 293.500 400.000
19990 2480.55 222.601 0.226887E-01 0.205292 0.772019 73.1164 293.500 500.000
19991 2480.73 222.608 0.186829E-01 0.140401 0.840916 78.2701 293.500 600.000
19992 2480.92 222.615 0.141422E-01 0.702763E-01 0.915582 83.8470 293.500 700.000
19993 2499.17 223.013 0.895857E-02 0.00000 0.991041 89.9467 293.500 100.000
19994 2497.00 222.966 0.898183E-02 0.00000 0.991018 89.9175 293.500 200.000
19995 2494.12 222.904 0.899729E-02 0.00000 0.991003 89.8944 293.500 300.000
19996 2490.97 222.835 0.900577E-02 0.00000 0.990994 89.8777 293.500 400.000
19997 2487.71 222.765 0.900754E-02 0.00000 0.990992 89.8675 293.500 500.000
19998 2484.42 222.693 0.900287E-02 0.00000 0.990997 89.8638 293.500 600.000
19999 2481.11 222.621 0.893458E-02 0.00000 0.991065 89.9251 293.500 700.000
20000
20001 TOTAL ITERATION WELLBORE 446
20002
20003 *****
20004 FRICTION & HEAT FOR FLEXIBLE WELLBORE - ' prd_flw'
20005 *****
20006
20007 delP (kPa) Fluid_Res (day-C/J) Slip Flow_Regime Reynolds Perforation
20008
20009 0.169886E-01 0.190168E-08 0.494352 STRATIFIED 4942.59 1,3,2 'prd'an'
20010 0.753683E-01 0.199314E-08 0.655390 STRATIFIED 8283.76 1,4,2 'prd'an'
20011 0.126232 0.183249E-08 0.709069 STRATIFIED 9288.08 1,5,2 'prd'an'
    
```

六、使用灵活井模型的注意事项

注入井的类型只能选择*MOBWEIGHT, *PERF_FLX 不能用于 *INJECTOR *UNWEIGHT.