

## 第35期：在IMEX中如何输入启动压力梯度

编写人：王建国 李罡

### 一、启动压力梯度定义

有学者认为，低渗透油田流体渗流的基本规律与高渗透油田明显不同。驱动压力梯度较小时流体不能流动，只有当驱动压力梯度达到一定值后，流体才开始流动，此时的驱动压力梯度叫启动压力梯度。

在 IMEX 模拟器中可以模拟启动压力梯度的影响。一旦流动压力梯度超过了网格间连接处的启动压力梯度值，就不会再检测启动压力值。

为了防止由于油藏中水头差异导致的流动，启动压力梯度要用油藏原始压力进行校正。如图 1 所示，在初始状态下，由于水头差异，相邻 2 个网格的原始地层压力不同，分别为  $P_{\text{initial}@i}$  和  $P_{\text{initial}@i+1}$ 。如果不进行压力校正，则刚开始就有驱动压力梯度，显然不符合实际。校正后，将所有网格的压力统一到一个水平上，如图 1 中水平线所示，这就消除了油层水头差异导致的流动。这种压力校正仅仅用于判断启动压力梯度是否起作用，而不影响油藏压力的三维显示。

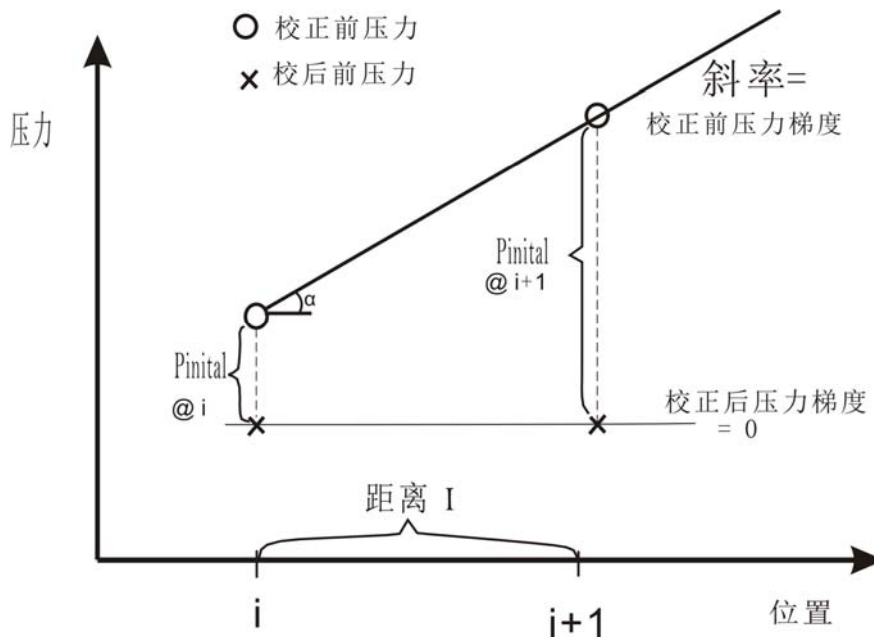


图 1

在重新启动文件中引入启动压力梯度关键字时，用于校正压力梯度的油藏压力，是引入启动压力梯度后第一次重新启动时的油藏压力。（有点绕口，但是为了严谨，还得这样写。如果不用重新启动，此段可忽略。）

启动压力梯度关键字 \*PTHRESHI, \*PTHRESHJ, \*PTHRESHK 必须放在 Rock-Fluid 字段里。该关键字可以在重新启动文件中的该字段使用（不是动态数据字段），用于

模拟注入之后压裂液返排（请参考手册中关于压裂液返排模型的部分）。

## 二、启动压力梯度关键字

### Pressure Gradient Threshold – PTHRESH

启动压力梯度关键字：\*PTHRESHI, \*PTHRESHJ, \*PTHRESHK

目的：

定义网格间流动边界的压力梯度，低于该值时流体不可流动。

排列：

\*PTHRESHI

\*PTHRESHJ

\*PTHRESHK

定义：

\*PTHRESHI

网格I,J,K和I+1,J,K之间的启动压力梯度，单位是(kPa/m | Psi/ft | kPa/cm | kg/cm<sup>2</sup>/m)。

\*PTHRESHJ

网格I,J,K和I,J+1,K之间的启动压力梯度，单位是(kPa/m | Psi/ft | kPa/cm | kg/cm<sup>2</sup>/m)。

\*PTHRESHK

网格I,J,K和I,J,K+1之间的启动压力梯度，单位是(kPa/m | Psi/ft | kPa/cm | kg/cm<sup>2</sup>/m)。

I方向的压力梯度计算公式：

$$DP = [P(I+1,J,K) - P(I,J,K)]/[Distance\_I]$$

Distance\_I是I方向上网格中心之间的距离。

P是当前的压力场。

启动压力梯度是个一次性开关。在某一方向上两网格间的压力梯度一旦超过启动压力梯度后，两网格间永远保持联通。

启动压力梯度为0表示两网格间永远保持联通。

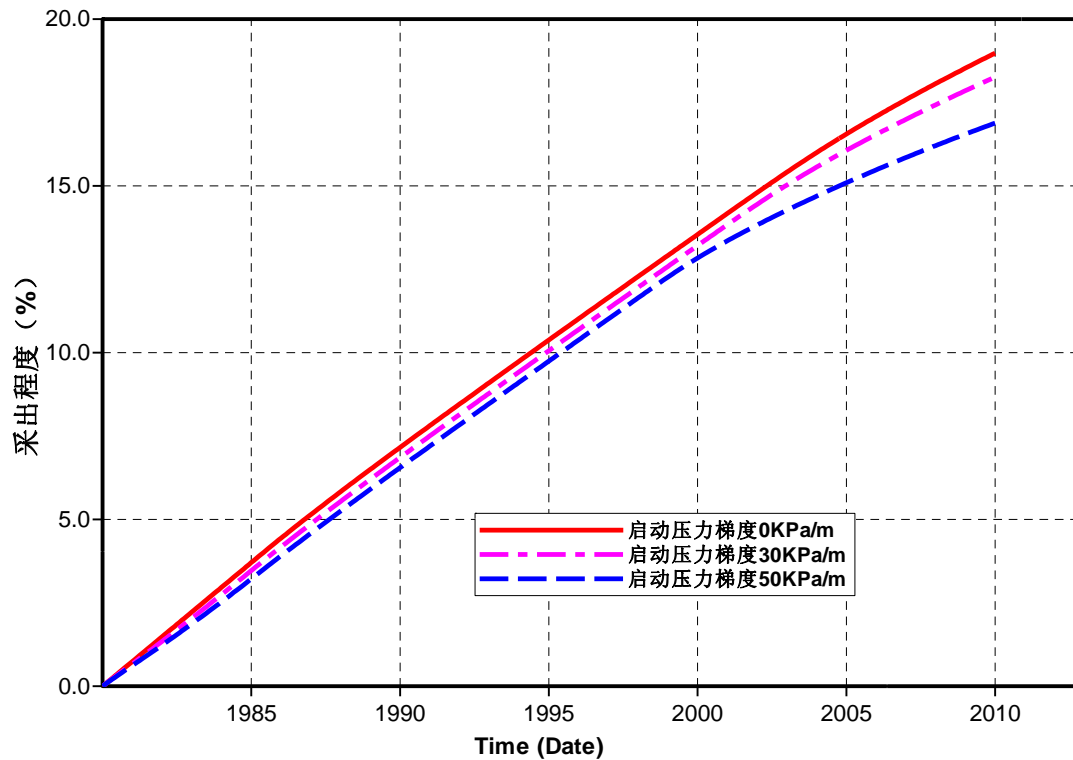
注意：启动压力梯度定义在网格之间的连接/界面上，而不是网格本身。

**缺省值**

缺省值为 0.0。网格间流体的流动不需要克服压力梯度。

### 三、算例研究

参考长庆油田某井组的油藏参数建立地质模型。该井组所在区块地层平均渗透率为  $1.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均孔隙度为 11.78%，属特低渗油田。该区块有效厚度为 13.66m，纵向上分为两个小层。选用 520m×140m 菱形反九点井网进行注水开发，模拟计算 30 年。模拟网格总节点数为  $45 \times 45 \times 2$ ，平面上采用均匀网格， $dx=23.0\text{m}$ ， $dy=12.5\text{m}$ 。研究启动压力梯度对低渗透油田采出程度的影响，在模拟计算时，平均启动压力梯度分别取 0，30 以及 50KPa/m 等 3 种情况。



由上图可以看出，随着压力梯度的增大，采出程度是下降的。对模拟井组，不考虑启动压力梯度时的采出程度为 18.98%，而考虑启动压力梯度为 50KPa/m 时的采出程度为 16.88%。

附：启动压力梯度 50KPa/ m 算例

\*\*\*\*\*输入输出控制数据部分\*\*\*\*\*

```
RESULTS SIMULATOR IMEX 201210
INUNIT SI
WSRF WELL 1
WSRF GRID TIME
WSRF SECTOR TIME
OUTSRF WELL LAYER NONE
OUTSRF RES ALL
OUTSRF GRID SO SG SW PRES OILPOT BPP SSPRES WINFLUX
WPRN GRID 0
OUTPRN GRID NONE
OUTPRN RES NONE
**$ Distance units: ft
RESULTS XOFFSET          0.0000
RESULTS YOFFSET          0.0000
RESULTS ROTATION          0.0000 **$ (DEGREES)
RESULTS AXES-DIRECTIONS 1.0 -1.0 1.0
```

\*\*\*\*\*油藏描述数据部分\*\*\*\*\*

```
GRID VARI 45 45 2
KDIR DOWN
DI IVAR
  45*23
DJ JVAR
  45*12.5
DK ALL
  4050*6.83
DTOP
  2025*1300
PERMI CON          1.04
PERMJ EQUALSI
PERMK EQUALSI
**$ 0 = null block, 1 = active block
NULL CON          1
POR CON          0.1178
**$ 0 = pinched block, 1 = active block
PINCHOUTARRAY CON          1
PRPOR 3600.0
CPOR 1.0E-6
```

\*\*\*\*\*组分属性部分\*\*\*\*\*

```
*MODEL *BLACKOIL          ** Solve three equations.
*PVT 1
```

**	p	Rs	Bo	eg=1/Bg	viso	visg	Co
**	kPa	m3/m3	m3/m3	m3/m3	mPa-s	ngarang	
	101.000	0.0000	0.936125	1.000	1.5890	0.009811	1.6143E-6
	206.844	0.5900	0.967879	2.500	1.4780	0.01097	1.6143E-6
	276.528	0.8600	0.979000	2.690	1.4760	0.01178	1.6143E-6
	289.582	1.1000	0.993700	3.380	1.4740	0.01271	1.6143E-6
	2068.440	1.3200	1.001000	18.685	1.4575	0.01350	1.6143E-6
	2757.920	1.5000	1.008000	23.800	1.4530	0.01420	1.6143E-6
	3447.400	1.6900	1.012900	31.630	1.4500	0.01500	1.6143E-6
	4826.360	1.9000	1.014900	45.860	1.4450	0.01550	1.6143E-6
	6894.800	2.1500	1.018100	69.420	1.4420	0.01600	1.6143E-6

\*DENSITY \*OIL 796.117

\*DENSITY \*GAS 1.06613

\*DENSITY \*WATER 1000

\*CVO 3.0E-4

\*BWI 1.01

\*CW 7.396922E-7

\*REFPW 101.36

\*VWI 0.31

\*CVW 0.0

\*\*\$ Property: PVT Type Max: 1 Min: 1

PTYPE CON 1

\*ROCKFLUID

\*\*\*\*\*岩石-流体属性部分\*\*\*\*\*

RPT 1

\*\* sw krw krow

SWT

\*\*\$ Sw krw krow

	0.2	0	1
	0.24375	0.00149536	0.878906
	0.2875	0.00598145	0.765625
	0.33125	0.0134583	0.660156
	0.375	0.0239258	0.5625
	0.41875	0.037384	0.472656
	0.4625	0.053833	0.390625
	0.50625	0.0732727	0.316406
	0.55	0.0957031	0.25
	0.59375	0.121124	0.191406
	0.6375	0.149536	0.140625
	0.68125	0.180939	0.0976563
	0.725	0.215332	0.0625
	0.76875	0.252716	0.0351562
	0.8125	0.293091	0.015625
	0.85625	0.336456	0.00390625

```

    0.9      0.382812      0
    0.95     0.439453      0
    1         0.5          0
** sl      krg      krog
SGT
**$       Sg         krg         krog
    0         0         1
    0.04375  0.00299072  0.878906
    0.0875   0.0119629   0.765625
    0.13125  0.0269165   0.660156
    0.175    0.0478516   0.5625
    0.21875  0.0747681   0.472656
    0.2625   0.107666   0.390625
    0.30625  0.146545   0.316406
    0.35     0.191406   0.25
    0.39375  0.242249   0.191406
    0.4375   0.299072   0.140625
    0.48125  0.361877   0.0976563
    0.525    0.430664   0.0625
    0.56875  0.505432   0.0351563
    0.6125   0.586182   0.015625
    0.65625  0.672913  0.00390625
    0.7      0.765625   0
    0.75     0.878906   0
    0.8      1         0
PTHRESHI CON      50      ****定义 I 和 I+1 方向的启动压力梯度
PTHRESHJ CON      50      ****定义 J 和 J+1 方向的启动压力梯度
PTHRESHK CON      50      ****定义 K 和 K+1 方向的启动压力梯度
*INITIAL
*****初始化部分*****
VERTICAL DEPTH_AVE WATER_OIL_GAS EQUIL
REFDEPTH 1300.
REFPRES 6000
DWOC 1500.
DGOC 1300.
**$ Property: Bubble Point Pressure (psi)   Max: 400   Min: 400
PB CON      0
*****数值控制部分*****
NUMERICAL
DTMAX 30
RUN
*****动态数据部分*****
DATE 1980 1 1
WELL 'Well-1'

```

```

INJECTOR MOBWEIGHT 'Well-1'
INCOMP WATER
OPERATE MAX STW 15. CONT
OPERATE MAX BHP 30000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-1'
**$ UBA      ff Status Connection
      23 23 1 1. OPEN    FLOW-FROM 'SURFACE' REFLAYER
      23 23 2 1. OPEN    FLOW-FROM 1
**$
WELL 'Well-2'
PRODUCER 'Well-2'
OPERATE MAX STL 1.25 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-2'
**$ UBA      ff Status Connection
      1 23 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      1 23 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
WELL 'Well-3'
PRODUCER 'Well-3'
OPERATE MAX STL 1.25 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-3'
**$ UBA      ff Status Connection
      23 12 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      23 12 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
WELL 'Well-4'
PRODUCER 'Well-4'
OPERATE MAX STL 1.25 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-4'
**$ UBA      ff Status Connection
      23 34 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      23 34 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
    
```

```

WELL 'Well-5'
PRODUCER 'Well-5'
OPERATE MAX STL 1.25 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-5'
**$ UBA      ff Status Connection
      45 23 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      45 23 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
WELL 'Well-6'
PRODUCER 'Well-6'
OPERATE MAX STL 2.5 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-6'
**$ UBA      ff Status Connection
      11 18 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      11 17 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
WELL 'Well-7'
PRODUCER 'Well-7'
OPERATE MAX STL 2.5 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-7'
**$ UBA      ff Status Connection
      11 29 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      11 29 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
WELL 'Well-8'
PRODUCER 'Well-8'
OPERATE MAX STL 2.5 CONT
OPERATE MIN BHP 2000. CONT
**$          rad geofac wfrac skin
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.
PERF GEOA 'Well-8'
**$ UBA      ff Status Connection
      35 17 1 1. OPEN    FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
      35 17 2 1. OPEN    FLOW-TO 1
**$
    
```



---

```
WELL 'Well-9'  
PRODUCER 'Well-9'  
OPERATE MAX STL 2.5 CONT  
OPERATE MIN BHP 2000. CONT  
**$          rad geofac wfrac skin  
GEOMETRY K 0.0762 0.37 1. 0.  
PERF GEOA 'Well-9'  
**$ UBA      ff Status Connection  
      35 29 1 1. OPEN   FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER  
      35 29 2 1. OPEN   FLOW-TO 1  
DATE 1981 1 1.00000  
DATE 1982 1 1.00000  
DATE 1983 1 1.00000  
DATE 1984 1 1.00000  
DATE 1985 1 1.00000  
DATE 1986 1 1.00000  
DATE 1987 1 1.00000  
DATE 1988 1 1.00000  
DATE 1989 1 1.00000  
DATE 1990 1 1.00000  
DATE 1991 1 1.00000  
DATE 1992 1 1.00000  
DATE 1993 1 1.00000  
DATE 1994 1 1.00000  
DATE 1995 1 1.00000  
DATE 1996 1 1.00000  
DATE 1997 1 1.00000  
DATE 1998 1 1.00000  
DATE 1999 1 1.00000  
DATE 2000 1 1.00000  
DATE 2001 1 1.00000  
DATE 2002 1 1.00000  
DATE 2003 1 1.00000  
DATE 2004 1 1.00000  
DATE 2005 1 1.00000  
DATE 2006 1 1.00000  
DATE 2007 1 1.00000  
DATE 2008 1 1.00000  
DATE 2009 1 1.00000  
DATE 2010 1 1.00000  
STOP
```