



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106600442 A

(43)申请公布日 2017.04.26

(21)申请号 201611107501.5

(22)申请日 2016.12.06

(71)申请人 中国海洋石油总公司

地址 100010 北京市东城区朝阳门北大街  
25号

申请人 中海油研究总院

(72)发明人 李紫晗 何玉发 高飞

(74)专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 徐宁 何家鹏

(51)Int.Cl.

G06Q 50/02(2012.01)

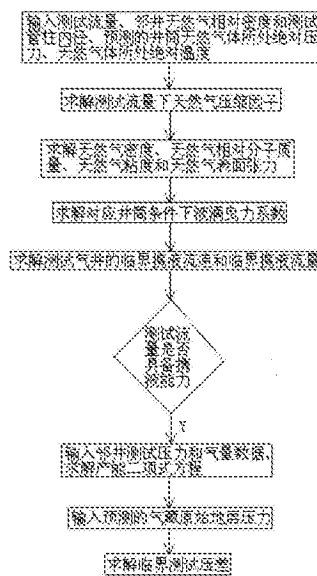
权利要求书4页 说明书9页 附图1页

(54)发明名称

一种深水气井测试临界携液条件优化方法

(57)摘要

本发明涉及一种深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在于,它包括以下步骤:1)确定井筒的测试流量,根据邻井天然气相对密度和测试管柱内径数据,以及预测的井筒天然气所处绝对压力、天然气所处绝对温度,计算井筒内各点处的天然气压缩因子,接着根据获得的井筒内各点处天然气压缩因子计算井筒内相应点处的天然气密度、天然气相对分子质量、天然气粘度和天然气表面张力,并利用获得的天然气粘度确定井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数;2)计算深水测试气井的临界携液流速和临界携液流量;3)根据邻井测试压力和气量数据,计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压,利用井底流压计算深水测试气井所需临界测试压差。



CN 106600442 A

1. 一种深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在于,它包括以下步骤:

1) 确定井筒的测试流量,根据邻井天然气相对密度和测试管柱内径数据,以及预测的井筒天然气所处绝对压力、天然气所处绝对温度,计算井筒内各点处的天然气压缩因子,接着根据获得的井筒内各点处天然气压缩因子计算井筒内相应点处的天然气密度、天然气相对分子质量、天然气粘度和天然气表面张力,并利用获得的天然气粘度确定井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数;

2) 依据邻井采集液体密度数据,并根据步骤1)中求得的井筒内各点处天然气压缩因子、天然气密度、天然气粘度和天然气表面张力以及井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数,计算深水测试气井的临界携液流速和临界携液流量;

3) 根据邻井测试压力和气量数据,将步骤2)中求得的临界携液流量与步骤1)中确定的测试流量进行比较,当测试流量大于等于临界携液流量时,并根据预测的气藏原始地层压力,进一步计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压,接着利用井底流压计算深水测试气井所需临界测试压差。

2. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在于:在所述步骤1)中,计算视临界压力和视临界温度所依据的视临界参数经验公式:

$$\text{当 } \gamma_g \geq 0.7: P_{pc} = 4.8815 - 0.3861 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (1)$$

$$\text{当 } \gamma_g < 0.7: P_{pc} = 4.788 - 0.2482 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (2)$$

计算视对比压力和视对比温度所依据的视对比压力和视对比温度公式:

$$P_{pr} = P/P_{pc}, T_{pr} = T/T_{pc} \quad (3)$$

计算天然气压缩因子所依据的LXF-RMP的公式:

$$\text{当 } 0 \leq P_{pr} \leq 5 \text{ 且 } 1.25 \leq T_{pr} \leq 3, Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } a &= -0.02T_{pr}^3 + 0.05T_{pr}^2 - 0.07T_{pr} + 0.04, \quad b = -0.02 \times T_{pr}^4 + 0.20T_{pr}^3 - 0.66T_{pr}^2 + 0.94T_{pr} - 0.48, \\ c &= 0.11 \times T_{pr}^4 - 0.99T_{pr}^3 + 3.21T_{pr}^2 - 4.52T_{pr} + 2.33, \quad d = -0.21 \times T_{pr}^4 + 1.85T_{pr}^3 - 5.97T_{pr}^2 + 8.32T_{pr} - 4.22, \\ e &= 0.16 \times T_{pr}^4 - 1.17T_{pr}^3 + 3.64T_{pr}^2 - 4.85T_{pr} + 2.31, \quad f = -0.11 \times T_{pr}^4 + 0.99T_{pr}^3 - 3.31T_{pr}^2 + 4.92T_{pr} - 2.80, \\ g &= 0.03 \times T_{pr}^4 - 0.21T_{pr}^3 + 0.64T_{pr}^2 - 0.82T_{pr} + 1.38; \end{aligned}$$

$$\text{当 } 0 \leq P_{pr} \leq 1.4 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25, Z = a \times P_{pr}^2 + b \times P_{pr} + c \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } a &= 344.09 \times T_{pr}^4 - 1536.27T_{pr}^3 + 2557.39T_{pr}^2 - 1879.43T_{pr} + 513.82, \\ b &= -445.88 \times T_{pr}^4 + 2016.42T_{pr}^3 - 3409.01T_{pr}^2 + 2553.46T_{pr} - 715.17, \\ c &= 27.64 \times T_{pr}^4 - 124.58T_{pr}^3 + 209.89T_{pr}^2 - 156.59T_{pr} + 44.63; \end{aligned}$$

当  $1.4 \leq P_{pr} \leq 5$  且  $1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25$ ,

$$Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } a &= 2.40 \times T_{pr}^3 - 8.18 \times T_{pr}^2 + 9.24 \times T_{pr} - 3.46, \\ b &= -54.24 \times T_{pr}^3 + 185.07 \times T_{pr}^2 - 209.59 \times T_{pr} + 78.76, \quad c = 492.57 \times T_{pr}^3 - 1684.46 \times T_{pr}^2 + 1912.01 \times T_{pr} - 720.27, \\ d &= -2295.35 \times T_{pr}^3 + 7867.61 \times T_{pr}^2 - 8952.02 \times T_{pr} + 3380.75, \quad e = 5766.41 \times T_{pr}^3 - 19816.36 \times T_{pr}^2 + 22608.71 \times T_{pr} - 8561.99, \end{aligned}$$

$$f = -7371.52 \times T_{pr}^3 + 25411.36 \times T_{pr}^2 - 29086.96 \times T_{pr} + 11052.43, \quad g = 3721.72 \times T_{pr}^3 - 12880.47 \times T_{pr}^2 + 14806.69 \times T_{pr} - 5651.26;$$

$$\text{当 } 5 \leq P_{pr} < 9 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (7)$$

$$\text{式中, } a = -0.03 \times T_{pr}^6 + 0.36 \times T_{pr}^5 - 1.71 \times T_{pr}^4 + 4.18 \times T_{pr}^3 - 5.54 \times T_{pr}^2 + 3.64 \times T_{pr} - 0.77,$$

$$b = 0.19 \times T_{pr}^6 - 2.17 \times T_{pr}^5 + 10.36 \times T_{pr}^4 - 26.04 \times T_{pr}^3 + 36.15 \times T_{pr}^2 - 25.25 \times T_{pr} + 6.81;$$

$$\text{当 } 9 \leq P_{pr} < 15 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (8)$$

$$\text{式中, } a = 0.01T_{pr}^3 + 0.02T_{pr}^2 - 0.15T_{pr} + 0.24, \quad b = 0.10 \times T_{pr}^4 - 0.86 \times T_{pr}^3 + 2.37 \times T_{pr}^2 - 2.11 \times T_{pr} + 0.63;$$

$$\text{当 } 15 \leq P_{pr} < 30 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (9)$$

$$\text{式中, } a = 0.02 \times T_{pr}^4 - 0.15T_{pr}^3 + 0.52T_{pr}^2 - 0.83T_{pr} + 0.57, \quad b = -0.14 \times T_{pr}^4 + 1.35T_{pr}^3 - 4.78T_{pr}^2 + 7.72T_{pr} - 4.21。$$

3. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在於:在所述步骤1)中,计算天然气密度所依据的公式:

$$\rho_g = 3.884 \times 10^3 \times \frac{P\gamma_g}{ZT} \quad (10)$$

式中, $\rho_g$ 为天然气所处绝对压力、绝对温度条件下的密度, $Z$ 为天然气压缩因子。

4. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在於:在所述步骤1)中,计算天然气相对分子质量所依据的公式:

$$M_g = \frac{ZT\rho_g}{0.12037P} \quad (11)$$

式中, $M_g$ 为天然气相对分子质量。

5. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在於:在所述步骤1)中,计算天然气粘度所依据的公式:

$$\mu_g = 10^{-4} K * \exp(X\rho_g^Y) \quad (12)$$

$$K = \frac{2.6832 \times 10^{-2} (470 + M_g) T^{1.5}}{116.1111 + 10.5556 M_g + T} \quad (13)$$

$$X = 0.1009 \times \left( 350 + \frac{54777.7}{T} + M_g \right) \quad (14)$$

$$Y = 2.447 - 0.2224X \quad (15)$$

式中, $\mu_g$ 为天然气在一定压力 $P$ 和温度 $T$ 条件下的粘度。

6. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在於:在所述步骤1)中,计算天然气表面张力所依据的公式:

$$\sigma = \frac{1.8(137.78 - T)}{206} [\sigma(23.33) - \sigma(137.78)] + \sigma(137.78) \quad (16)$$

$$\sigma(23.33) = 76 \times e^{-0.0362575P} \quad (17)$$

$$\sigma(137.78) = 52.5 - 0.87018P \quad (18)$$

7. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在於:在所述步骤1)中,采用全域非线性拟合方法和雷诺数修正的曳力系数公式:

$$C_d = \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \quad (19)$$

$$Re = 1.766 \times 10^{-2} \frac{q_{sc} \gamma_g}{d_{ti} \mu_g} \quad (20)$$

式中,  $q_{sc}$  为测试流量,  $Re$  为雷诺数,  $d_{ti}$  为测试管柱内径。

8. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法, 其特征在于: 在所述步骤2) 中, 保证深水测试气井具备携液能力所依据的计算公式:

$$F_g + F_D = G_w \quad (21)$$

$$\frac{\pi}{4} d^2 C_d \frac{u_{cr}^2}{2} \rho_g + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_g g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_l g \quad (22)$$

式中,  $F_g$  为液体浮力,  $F_D$  为液体曳力,  $G_w$  为液体重力,  $d$  为液滴直径,  $C_d$  为曳力系数,  $u_{cr}$  为气井临界携液流速,  $\rho_g$  为气体密度,  $g$  为重力加速度,  $\rho_l$  为液体密度; 深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_l - \rho_g)}{3C_d \rho_g}} \quad (23)$$

式中,  $u_{cr}$  为测试气井临界携液流速;

计算最大液滴直径所依据的公式:

$$N_{we} = \frac{u_{cr}^2 \rho_g d}{\sigma} = 30 \quad (24)$$

$$d = \frac{30\sigma}{u_{cr}^2 \rho_g} \quad (25)$$

式中,  $N_{we}$  为韦伯数,  $d$  为最大液滴直径;

确定深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$u_{cr} = \left[ \frac{40g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2 \left( \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \right)} \right]^{0.25} \quad (26)$$

计算临界携液流量所依据的公式:

$$q_{cr} = 2.5 \times 10^8 \times \frac{APu_{cr}}{ZT} \quad (27)$$

$$A = \frac{10^{-6} \pi d_{ti}^2}{4} \quad (28)$$

式中,  $q_{cr}$  为测试气井临界携液流量,  $A$  为测试管柱面积。

9. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法, 其特征在于: 在所述步骤3) 中, 根据邻井测试压力和气量数据, 确定深水测试气井拟稳态产能二项式方程:

$$P_R^2 - P_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \quad (29)$$

$$A = \frac{\sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q^2 - \sum \Delta p^2 \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (30)$$

$$B = \frac{N \sum \Delta p^2 - \sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (31)$$

式中,  $p_{wf}$  为井底流压,  $p_R$  为地层压力,  $A$  为层流项系数,  $B$  为紊流项系数,  $\Delta p^2 = p_R^2 - p_{wf}^2$ ,  $N$  为测试点数,  $q$  为邻井测试气量;

根据预测的气藏原始地层压力, 计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压所依据的公式:

$$P_{wf} = \sqrt{P_R^2 - (Aq_{cr} + Bq_{cr}^2)} \quad (32)。$$

10. 如权利要求1所述的深水气井测试临界携液条件优化方法, 其特征在于: 在所述步骤3) 中, 计算临界测试压差所依据的公式:

$$\Delta p_{test} = p_R - p_{wf} \quad (33)。$$

## 一种深水气井测试临界携液条件优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种深水气井测试临界携液条件优化方法,属于油气田勘探开发技术领域。

### 背景技术

[0002] 深水测试是深水油气勘探开发的重要环节,也是获取地层物性参数和边界情况的最直接手段。在深水气井测试期间,如果清井阶段测试液垫和诱喷液垫无法从井底彻底返排,则会对气藏储层造成污染,导致深水测试无法获得流体样本。在深水测试放喷阶段,井筒内压力和温度降低,导致凝析液大量析出,容易在井底形成积液,从而产生一定回压,限制气井生产能力,以至于无法精确评价储层产能,甚至造成深水测试期间完全停喷,最终导致深水测试失败。由于目前我国深水油气田开发尚处于摸索阶段,因此缺乏一套合理的深水测试临界携液流动条件和深水测试压差优化设计方法。

[0003] 临界携液流动条件计算极大地依赖于液滴曳力系数选取和天然气高压物性参数的准确计算。目前常规方法是使用经验图版法对天然气高压物性参数进行计算,采用临界携液Turner模型对所处井口温度和压力条件进行临界携液流动条件设计,并预测测试压差。但是,在深水气井测试过程中,由于井筒内压力和温度变化范围较大,因此易导致凝析液大量析出,如果沿用常规方法设计临界携液流动条件和测试压差势必存在较大误差,则容易导致现场测试作业存在失败风险。针对天然气高压物性参数计算和临界携液流动条件预测,国外虽然已经存在较为成熟的商业软件PIPESIM(多相流稳态模拟软件)和WELLFLO(水力学模拟软件),但是采用PIPESIM和WELLFLO软件进行天然气高压物性参数计算和临界携液流动条件预测,它们通常会存在以下缺点:一是计算天然气高压物性参数模型适用压力范围小,需要多次迭代计算,且精度明显偏低;二是两者由于采用定值曳力系数Turner模型对全井段进行临界携液流动条件预测,使得设计结果偏小,因此导致无法对深水气井全井段携液情况进行合理判断。

### 发明内容

[0004] 针对上述问题,本发明的目的是提供一种适用于变压力、变温度的井筒环境且能够对深水气井全井段携液情况进行合理判断且精度高的深水气井测试临界携液条件优化方法。

[0005] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:一种深水气井测试临界携液条件优化方法,其特征在于,它包括以下步骤:1) 确定井筒的测试流量,根据邻井天然气相对密度和测试管柱内径数据,以及预测的井筒天然气所处绝对压力、天然气所处绝对温度,计算井筒内各点处的天然气压缩因子,接着根据获得的井筒内各点处天然气压缩因子计算井筒内相应点处的天然气密度、天然气相对分子质量、天然气粘度和天然气表面张力,并利用获得的天然气粘度确定井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数;2) 依据邻井采集液体密度数据,并根据步骤1)中求得的井筒内各点处天然气压缩因子、天然气密度、天然气粘度和

天然气表面张力以及井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数,计算深水测试气井的临界携液流速和临界携液流量;3)根据邻井测试压力和气量数据,将步骤2)中求得的临界携液流量与步骤1)中确定的测试流量进行比较,当测试流量大于等于临界携液流量时,并根据预测的气藏原始地层压力,进一步计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压,接着利用井底流压计算深水测试气井所需临界测试压差。

[0006] 在所述步骤1)中,计算视临界压力和视临界温度所依据的视临界参数经验公式:

$$[0007] \text{ 当 } \gamma_g \geq 0.7: P_{pc} = 4.8815 - 0.3861 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (1)$$

$$[0008] \text{ 当 } \gamma_g < 0.7: P_{pc} = 4.788 - 0.2482 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (2)$$

[0009] 计算视对比压力和视对比温度所依据的视对比压力和视对比温度公式:

$$[0010] P_{pr} = P/P_{pc}, T_{pr} = T/T_{pc} \quad (3)$$

[0011] 计算天然气压缩因子所依据的LXF-RMP的公式:

$$[0012] \text{ 当 } 0 \leq P_{pr} \leq 5 \text{ 且 } 1.25 \leq T_{pr} \leq 3, Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (4)$$

$$[0013] \text{ 式中, } a = -0.02T_{pr}^3 + 0.05T_{pr}^2 - 0.07T_{pr} + 0.04, b = -0.02 \times T_{pr}^4 + 0.20T_{pr}^3 - 0.66T_{pr}^2 + 0.94T_{pr} - 0.48, \\ c = 0.11 \times T_{pr}^4 - 0.99T_{pr}^3 + 3.21T_{pr}^2 - 4.52T_{pr} + 2.33, d = -0.21 \times T_{pr}^4 + 1.85T_{pr}^3 - 5.97T_{pr}^2 + 8.32T_{pr} - 4.22, \\ e = 0.16 \times T_{pr}^4 - 1.17T_{pr}^3 + 3.64T_{pr}^2 - 4.85T_{pr} + 2.31, f = -0.11 \times T_{pr}^4 + 0.99T_{pr}^3 - 3.31T_{pr}^2 + 4.92T_{pr} - 2.80, \\ g = 0.03 \times T_{pr}^4 - 0.21T_{pr}^3 + 0.64T_{pr}^2 - 0.82T_{pr} + 1.38;$$

$$[0014] \text{ 当 } 0 \leq P_{pr} \leq 1.4 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25, Z = a \times P_{pr}^2 + b \times P_{pr} + c \quad (5)$$

$$[0015] \text{ 式中, } a = 344.09 \times T_{pr}^4 - 1536.27T_{pr}^3 + 2557.39T_{pr}^2 - 1879.43T_{pr} + 513.82, \\ b = -445.88 \times T_{pr}^4 + 2016.42T_{pr}^3 - 3409.01T_{pr}^2 + 2553.46T_{pr} - 715.17, \\ c = 27.64 \times T_{pr}^4 - 124.58T_{pr}^3 + 209.89T_{pr}^2 - 156.59T_{pr} + 44.63;$$

$$[0016] \text{ 当 } 1.4 \leq P_{pr} \leq 5 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25, Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (6)$$

$$[0017] \text{ 式中, } a = 2.40 \times T_{pr}^3 - 8.18 \times T_{pr}^2 + 9.24 \times T_{pr} - 3.46, \\ b = -54.24 \times T_{pr}^3 + 185.07 \times T_{pr}^2 - 209.59 \times T_{pr} + 78.76, c = 492.57 \times T_{pr}^3 - 1684.46 \times T_{pr}^2 + 1912.01 \times T_{pr} - 720.27, \\ d = -2295.35 \times T_{pr}^3 + 7867.61 \times T_{pr}^2 - 8952.02 \times T_{pr} + 3380.75, e = 5766.41 \times T_{pr}^3 - 19816.36 \times T_{pr}^2 + 22608.71 \times T_{pr} - 8561.99, \\ f = -7371.52 \times T_{pr}^3 + 25411.36 \times T_{pr}^2 - 29086.96 \times T_{pr} + 11052.43, g = 3721.72 \times T_{pr}^3 - 12880.47 \times T_{pr}^2 + 14806.69 \times T_{pr} - 5651.26;$$

$$[0018] \text{ 当 } 5 \leq P_{pr} < 9 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (7)$$

$$[0019] \text{ 式中, } a = -0.03 \times T_{pr}^6 + 0.36 \times T_{pr}^5 - 1.71 \times T_{pr}^4 + 4.18 \times T_{pr}^3 - 5.54 \times T_{pr}^2 + 3.64 \times T_{pr} - 0.77, \\ b = 0.19 \times T_{pr}^6 - 2.17 \times T_{pr}^5 + 10.36 \times T_{pr}^4 - 26.04 \times T_{pr}^3 + 36.15 \times T_{pr}^2 - 25.25 \times T_{pr} + 6.81;$$

$$[0020] \text{ 当 } 9 \leq P_{pr} < 15 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (8)$$

$$[0021] \text{ 式中, } a = 0.01T_{pr}^3 + 0.02T_{pr}^2 - 0.15T_{pr} + 0.24, b = 0.10 \times T_{pr}^4 - 0.86 \times T_{pr}^3 + 2.37 \times T_{pr}^2 - 2.11 \times T_{pr} + 0.63;$$

$$[0022] \text{ 当 } 15 \leq P_{pr} < 30 \text{ 且 } 1.05 \leq T_{pr} < 3, Z = a \times P_{pr} + b \quad (9)$$

$$[0023] \text{ 式中, } a = 0.02 \times T_{pr}^4 - 0.15T_{pr}^3 + 0.52T_{pr}^2 - 0.83T_{pr} + 0.57, b = -0.14 \times T_{pr}^4 + 1.35T_{pr}^3 - 4.78T_{pr}^2 + 7.72T_{pr} - 4.21。$$

[0024] 在所述步骤1)中,计算天然气密度所依据的公式:

$$[0025] \quad \rho_g = 3.884 \times 10^3 \times \frac{P\gamma_g}{ZT} \quad (10)$$

[0026] 式中,  $\rho_g$  为天然气所处绝对压力、绝对温度条件下的密度,  $Z$  为天然气压缩因子。

[0027] 在所述步骤1) 中, 计算天然气相对分子质量所依据的公式:

$$[0028] \quad M_g = \frac{ZT\rho_g}{0.12037P} \quad (11)$$

[0029] 式中,  $M_g$  为天然气相对分子质量。

[0030] 在所述步骤1) 中, 计算天然气粘度所依据的公式:

$$[0031] \quad \mu_g = 10^{-4} K * \exp(X\rho_g^Y) \quad (12)$$

$$[0032] \quad K = \frac{2.6832 \times 10^{-2} (470 + M_g) T^{1.5}}{116.1111 + 10.5556 M_g + T} \quad (13)$$

$$[0033] \quad X = 0.1009 \times \left( 350 + \frac{54777.7}{T} + M_g \right) \quad (14)$$

$$[0034] \quad Y = 2.447 - 0.2224X \quad (15)$$

[0035] 式中,  $\mu_g$  为天然气在一定压力  $P$  和温度  $T$  条件下的粘度。

[0036] 在所述步骤1) 中, 计算天然气表面张力所依据的公式:

$$[0037] \quad \sigma = \frac{1.8(137.78 - T)}{206} [\sigma(23.33) - \sigma(137.78)] + \sigma(137.78) \quad (16)$$

$$[0038] \quad \sigma(23.33) = 76 \times e^{-0.0362575P} \quad (17)$$

$$[0039] \quad \sigma(137.78) = 52.5 - 0.87018P \quad (18)$$

[0040] 在所述步骤1) 中, 采用全域非线性拟合方法和雷诺数修正的曳力系数公式:

$$[0041] \quad C_d = \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \quad (19)$$

$$[0042] \quad Re = 1.766 \times 10^{-2} \frac{q_{sc} \gamma_g}{d_u \mu_g} \quad (20)$$

[0043] 式中,  $q_{sc}$  为测试流量,  $Re$  为雷诺数,  $d_{ti}$  为测试管柱内径。

[0044] 在所述步骤2) 中, 保证深水测试气井具备携液能力所依据的计算公式:

$$[0045] \quad F_g + F_D = G_w \quad (21)$$

$$[0046] \quad \frac{\pi}{4} d^2 C_d \frac{u_{cr}^2}{2} \rho_g + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_g g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_l g \quad (22)$$

[0047] 式中,  $F_g$  为液体浮力,  $F_D$  为液体曳力,  $G_w$  为液体重力,  $d$  为液滴直径,  $C_d$  为曳力系数,  $u_{cr}$  为气井临界携液流速,  $\rho_g$  为气体密度,  $g$  为重力加速度,  $\rho_l$  为液体密度; 深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$[0048] \quad u_{cr} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_l - \rho_g)}{3C_d \rho_g}} \quad (23)$$

[0049] 式中,  $u_{cr}$  为测试气井临界携液流速;

[0050] 计算最大液滴直径所依据的公式:



$$[0051] \quad N_{we} = \frac{u_{cr}^2 \rho_g d}{\sigma} = 30 \quad (24)$$

$$[0052] \quad d = \frac{30\sigma}{u_{cr}^2 \rho_g} \quad (25)$$

[0053] 式中,  $N_{we}$  为韦伯数,  $d$  为最大液滴直径;

[0054] 确定深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$[0055] \quad u_{cr} = \left[ \frac{40g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2 \left( \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \right)} \right]^{0.25} \quad (26)$$

[0056] 计算临界携液流量所依据的公式:

$$[0057] \quad q_{cr} = 2.5 \times 10^8 \times \frac{APu_{cr}}{ZT} \quad (27)$$

$$[0058] \quad A = \frac{10^{-6} \pi d_{li}^2}{4} \quad (28)$$

[0059] 式中,  $q_{cr}$  为测试气井临界携液流量,  $A$  为测试管柱面积。

[0060] 在所述步骤3) 中, 根据邻井测试压力和气量数据, 确定深水测试气井拟稳态产能二项式方程:

$$[0061] \quad P_R^2 - P_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \quad (29)$$

$$[0062] \quad A = \frac{\sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q^2 - \sum \Delta p^2 \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (30)$$

$$[0063] \quad B = \frac{N \sum \Delta p^2 - \sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (31)$$

[0064] 式中,  $p_{wf}$  为井底流压,  $p_R$  为地层压力,  $A$  为层流项系数,  $B$  为紊流项系数,  $\Delta p^2 = p_R^2 - p_{wf}^2$ ,  $N$  为测试点数,  $q$  为邻井测试气量;

[0065] 根据预测的气藏原始地层压力, 计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压所依据的公式:

$$[0066] \quad P_{wf} = \sqrt{P_R^2 - (Aq_{cr} + Bq_{cr}^2)} \quad (32)$$

[0067] 在所述步骤3) 中, 计算临界测试压差所依据的公式:

$$[0068] \quad \Delta p_{test} = p_R - p_{wf} \quad (33)$$

[0069] 本发明由于采取以上技术方案, 其具有以下优点: 1、本发明根据邻井天然气相对密度、井筒测试管柱内径数据, 以及预测的井筒天然气所处绝对压力、天然气所处绝对温度, 利用天然气参数经验公式, 同时基于Turner模型, 并采用全域非线性拟合方法和雷诺数修正曳力系数计算模型, 建立了求解深水测试气井的临界携液流速和临界携液流量模型, 本发明适用于变压力、变温度的井筒环境且能够对深水测试气井全井段携液情况进行合理判断, 解决了商用软件计算天然气高压物性参数不准确, 以及Turner模型采用定值曳

力系数对预测携液临界值偏小的问题,结果可靠,准确度高。2、本发明根据邻井测试压力和气量数据,确定深水测试气井拟稳态产能二项式方程,并根据预测的气藏原始地层压力,进一步计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压,接着利用井底流压计算深水测试气井所需临界测试压差,提高了预测精度,能够满足深水测试气井的测试设计要求,保证实际测试作业过程中能够正常携液,本发明可以广泛地应用于石油勘探过程中。

## 附图说明

[0070] 图1是本发明的流程结构示意图

## 具体实施方式

[0071] 下面结合附图和实施例对本发明进行详细的描述。

[0072] 如图1所示,本发明提出的深水气井测试临界携液条件优化方法,它包括以下步骤:

[0073] 1) 确定井筒的测试流量,根据邻井天然气相对密度和测试管柱内径数据,以及预测的井筒天然气所处绝对压力、天然气所处绝对温度,计算井筒内各点处的天然气压缩因子,接着根据获得的井筒内各点处天然气压缩因子计算井筒内相应点处的天然气密度、天然气相对分子质量、天然气粘度和天然气表面张力,并利用获得的天然气粘度确定井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数;

[0074] 在步骤1)中,计算井筒内各点处的天然气压缩因子的具体过程如下:

[0075] ①根据视临界参数经验公式,获取视临界压力和视临界温度,其中,计算视临界压力和视临界温度所依据的视临界参数经验公式:

$$[0076] \text{ 当 } \gamma_g \geq 0.7: P_{pc} = 4.8815 - 0.3861 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (1)$$

$$[0077] \text{ 当 } \gamma_g < 0.7: P_{pc} = 4.788 - 0.2482 \gamma_g, T_{pc} = 92.2222 + 176.6667 \gamma_g \quad (2)$$

[0078] 式中,  $\gamma_g$  为天然气相对密度,  $P_{pc}$  为天然气的视临界压力,  $T_{pc}$  为天然气的视临界温度;

[0079] ②确定视对比压力和视对比温度,计算视对比压力和视对比温度所依据的视对比压力和视对比温度公式:

$$[0080] P_{pr} = P/P_{pc}, T_{pr} = T/T_{pc} \quad (3)$$

[0081] 式中,  $P_{pr}$  为对比压力,  $T_{pr}$  为对比温度,  $P$  为天然气所处绝对压力,  $T$  为天然气所处绝对温度;

[0082] ③根据视对比压力和视对比温度,计算天然气压缩因子,其中,计算天然气压缩因子所依据的LXF-RMP(“高精度、全压力、全温度范围”天然气偏差系数解析模型)的公式:

$$[0083] \text{ 当 } 0 \leq P_{pr} \leq 5 \text{ 且 } 1.25 \leq T_{pr} \leq 3, Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (4)$$

[0084] 式中,  $a = -0.02T_{pr}^3 + 0.05T_{pr}^2 - 0.07T_{pr} + 0.04$ ,  $b = -0.02 \times T_{pr}^4 + 0.20T_{pr}^3 - 0.66T_{pr}^2 + 0.94T_{pr} - 0.48$ ,  
 $c = 0.11 \times T_{pr}^4 - 0.99T_{pr}^3 + 3.21T_{pr}^2 - 4.52T_{pr} + 2.33$ ,  $d = -0.21 \times T_{pr}^4 + 1.85T_{pr}^3 - 5.97T_{pr}^2 + 8.32T_{pr} - 4.22$ ,  
 $e = 0.16 \times T_{pr}^4 - 1.17T_{pr}^3 + 3.64T_{pr}^2 - 4.85T_{pr} + 2.31$ ,  $f = -0.11 \times T_{pr}^4 + 0.99T_{pr}^3 - 3.31T_{pr}^2 + 4.92T_{pr} - 2.80$ ,  
 $g = 0.03 \times T_{pr}^4 - 0.21T_{pr}^3 + 0.64T_{pr}^2 - 0.82T_{pr} + 1.38$ ;

[0085] 当  $0 \leq P_{pr} \leq 1.4$  且  $1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25$ ,  $Z = a \times P_{pr}^2 + b \times P_{pr} + c$  (5)

[0086] 式中,  $a = 344.09 \times T_{pr}^4 - 1536.27T_{pr}^3 + 2557.39T_{pr}^2 - 1879.43T_{pr} + 513.82$ ,

$b = -445.88 \times T_{pr}^4 + 2016.42T_{pr}^3 - 3409.01T_{pr}^2 + 2553.46T_{pr} - 715.17$ ,

$c = 27.64 \times T_{pr}^4 - 124.58T_{pr}^3 + 209.89T_{pr}^2 - 156.59T_{pr} + 44.63$ ;

[0087] 当  $1.4 \leq P_{pr} \leq 5$  且  $1.05 \leq T_{pr} \leq 1.25$ ,

$$Z = a \times P_{pr}^6 + b \times P_{pr}^5 + c \times P_{pr}^4 + d \times P_{pr}^3 + e \times P_{pr}^2 + f \times P_{pr} + g \quad (6)$$

[0088] 式中,  $a = 2.40 \times T_{pr}^3 - 8.18 \times T_{pr}^2 + 9.24 \times T_{pr} - 3.46$ ,

$b = -54.24 \times T_{pr}^3 + 185.07 \times T_{pr}^2 - 209.59 \times T_{pr} + 78.76$ ,  $c = 492.57 \times T_{pr}^3 - 1684.46 \times T_{pr}^2 + 1912.01 \times T_{pr} - 720.27$ ,

$d = -2295.35 \times T_{pr}^3 + 7867.61 \times T_{pr}^2 - 8952.02 \times T_{pr} + 3380.75$ ,  $e = 5766.41 \times T_{pr}^3 - 19816.36 \times T_{pr}^2 + 22608.71 \times T_{pr} - 8561.99$ ,

$f = -7371.52 \times T_{pr}^3 + 25411.36 \times T_{pr}^2 - 29086.96 \times T_{pr} + 11052.43$ ,  $g = 3721.72 \times T_{pr}^3 - 12880.47 \times T_{pr}^2 + 14806.69 \times T_{pr} - 5651.26$ ;

[0089] 当  $5 \leq P_{pr} < 9$  且  $1.05 \leq T_{pr} < 3$ ,  $Z = a \times P_{pr} + b$  (7)

[0090] 式中,  $a = -0.03 \times T_{pr}^6 + 0.36 \times T_{pr}^5 - 1.71 \times T_{pr}^4 + 4.18 \times T_{pr}^3 - 5.54 \times T_{pr}^2 + 3.64 \times T_{pr} - 0.77$ ,

$b = 0.19 \times T_{pr}^6 - 2.17 \times T_{pr}^5 + 10.36 \times T_{pr}^4 - 26.04 \times T_{pr}^3 + 36.15 \times T_{pr}^2 - 25.25 \times T_{pr} + 6.81$ ;

[0091] 当  $9 \leq P_{pr} < 15$  且  $1.05 \leq T_{pr} < 3$ ,  $Z = a \times P_{pr} + b$  (8)

[0092] 式中,  $a = 0.01T_{pr}^3 + 0.02T_{pr}^2 - 0.15T_{pr} + 0.24$ ,  $b = 0.10 \times T_{pr}^4 - 0.86 \times T_{pr}^3 + 2.37 \times T_{pr}^2 - 2.11 \times T_{pr} + 0.63$ ;

[0093] 当  $15 \leq P_{pr} < 30$  且  $1.05 \leq T_{pr} < 3$ ,  $Z = a \times P_{pr} + b$  (9)

[0094] 式中,  $a = 0.02 \times T_{pr}^4 - 0.15T_{pr}^3 + 0.52T_{pr}^2 - 0.83T_{pr} + 0.57$ ,  $b = -0.14 \times T_{pr}^4 + 1.35T_{pr}^3 - 4.78T_{pr}^2 + 7.72T_{pr} - 4.21$ ;

[0095] 在步骤1)中,计算天然气密度所依据的公式:

[0096] 
$$\rho_g = 3.884 \times 10^3 \times \frac{P \gamma_g}{ZT} \quad (10)$$

[0097] 式中,  $\rho_g$  为天然气所处绝对压力、绝对温度条件下的密度,  $Z$  为天然气压缩因子;

[0098] 在步骤1)中,计算天然气相对分子质量所依据的公式:

[0099] 
$$M_g = \frac{ZT \rho_g}{0.12037P} \quad (11)$$

[0100] 式中,  $M_g$  为天然气相对分子质量;

[0101] 在步骤1)中,计算天然气粘度所依据的公式:

[0102] 
$$\mu_g = 10^{-4} K * \exp(X \rho_g^Y) \quad (12)$$

[0103] 
$$K = \frac{2.6832 \times 10^{-2} (470 + M_g) T^{1.5}}{116.1111 + 10.5556 M_g + T} \quad (13)$$

[0104] 
$$X = 0.1009 \times \left( 350 + \frac{54777.7}{T} + M_g \right) \quad (14)$$

[0105] 
$$Y = 2.447 - 0.2224X \quad (15)$$

[0106] 式中,  $\mu_g$  为天然气在一定压力  $P$  和温度  $T$  条件下的粘度;

[0107] 在步骤1)中,计算天然气表面张力所依据的公式:

$$[0108] \quad \sigma = \frac{1.8(137.78 - T)}{206} [\sigma(23.33) - \sigma(137.78)] + \sigma(137.78) \quad (16)$$

$$[0109] \quad \sigma(23.33) = 76 \times e^{-0.0362575P} \quad (17)$$

$$[0110] \quad \sigma(137.78) = 52.5 - 0.87018P \quad (18)$$

[0111] 在步骤1)中,采用全域非线性拟合方法和雷诺数修正的曳力系数公式:

$$[0112] \quad C_d = \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \quad (19)$$

$$[0113] \quad Re = 1.766 \times 10^{-2} \frac{q_{sc} \gamma_g}{d_{ti} u_g} \quad (20)$$

[0114] 式中,  $q_{sc}$  为测试流量,  $Re$  为雷诺数,  $d_{ti}$  为测试管柱内径。

[0115] 2) 依据邻井采集液体密度数据,并根据步骤1)中求得的井筒内各点处天然气压缩因子、天然气密度、天然气粘度和天然气表面张力以及井筒内各点处液滴携带出井口的曳力系数,计算深水测试气井的临界携液流速和临界携液流量;

[0116] 如果使深水测试气井中的液体均被气体携带出井筒,根据液滴模型假设,排出深水测试气井积液所需最低条件是使气流中的最大液滴连续向上运动。根据最大液滴受力情况可以确定深水气井临界携液流速,即最大液滴所受浮力与曳力之和等于自身重力,保证深水测试气井具备携液能力所依据的计算公式:

$$[0117] \quad F_g + F_D = G_w \quad (21)$$

$$[0118] \quad \frac{\pi}{4} d^2 C_d \frac{u_{cr}^2}{2} \rho_g + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_g g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_l g \quad (22)$$

[0119] 式中,  $F_g$  为液体浮力,  $F_D$  为液体曳力,  $G_w$  为液体重力,  $d$  为液体直径,  $C_d$  为曳力系数,  $u_{cr}$  为气井临界携液流速,  $\rho_g$  为气体密度,  $g$  为重力加速度,  $\rho_l$  为液体密度。

[0120] 根据公式(20)和(21),整理得到深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$[0121] \quad u_{cr} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_l - \rho_g)}{3C_d \rho_g}} \quad (23)$$

[0122] 式中,  $u_{cr}$  为测试气井临界携液流速。

[0123] 由于液滴直径受气流的惯性力和液体表面张力的控制,气流惯性力试图使液滴破碎,表面张力试图使液滴聚集,因此根据韦伯数能够确定最大液滴直径。韦伯数超过临界值30后,气流的惯性力和液滴表面张力间的平衡被打破,液滴会破碎,计算最大液滴直径所依据的公式:

$$[0124] \quad N_{we} = \frac{u_{cr}^2 \rho_g d}{\sigma} = 30 \quad (24)$$

$$[0125] \quad d = \frac{30\sigma}{u_{cr}^2 \rho_g} \quad (25)$$

[0126] 式中,  $N_{we}$  为韦伯数,  $d$  为最大液滴直径。

[0127] 将公式(18)和(24)代入公式(22),进一步确定深水测试气井临界携液流速的计算公式:

$$[0128] \quad u_{cr} = \left[ \frac{40g\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2 \left( \frac{24}{Re} + 3.409 \times Re^{-0.3083} + \frac{3.68 \times 10^{-5} \times Re}{1 + 4.5 \times 10^5 \times Re^{1.054}} \right)} \right]^{0.25} \quad (26)$$

[0129] 计算临界携液流量所依据的公式:

$$[0130] \quad q_{cr} = 2.5 \times 10^8 \times \frac{APu_{cr}}{ZT} \quad (27)$$

$$[0131] \quad A = \frac{10^{-6} \pi d_w^2}{4} \quad (28)$$

[0132] 式中,  $q_{cr}$  为测试气井临界携液流量,  $A$  为测试管柱面积。

[0133] 3) 根据邻井测试压力和气量数据, 将步骤2) 中求得的临界携液流量与步骤1) 中确定的测试流量进行比较, 当测试流量大于等于临界携液流量时, 并根据预测的气藏原始地层压力, 进一步计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压, 接着利用井底流压计算深水测试气井所需临界测试压差;

[0134] 在步骤3) 中, 根据邻井测试压力和气量数据, 确定深水测试气井拟稳态产能二项式方程:

$$[0135] \quad P_R^2 - P_{wf}^2 = Aq + Bq^2 \quad (29)$$

$$[0136] \quad A = \frac{\sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q^2 - \sum \Delta p^2 \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (30)$$

$$[0137] \quad B = \frac{N \sum \Delta p^2 - \sum \frac{\Delta p^2}{q} \sum q}{N \sum q^2 - \sum q \sum q} \quad (31)$$

[0138] 式中,  $p_{wf}$  为井底流压,  $p_R$  为地层压力,  $A$  为层流项系数,  $B$  为紊流项系数,  $\Delta p^2 = p_R^2 - p_{wf}^2$ ,  $N$  为测试点数,  $q$  为邻井测试气量;

[0139] 在步骤3) 中, 根据预测的气藏原始地层压力, 计算深水测试气井临界携液流量下对应的井底流压所依据的公式:

$$[0140] \quad P_{wf} = \sqrt{P_R^2 - (Aq_{cr} + Bq_{cr}^2)} \quad (32)$$

[0141] 在步骤3) 中, 计算临界测试压差所依据的公式:

$$[0142] \quad \Delta p_{test} = p_R - p_{wf} \quad (33)$$

[0143] 下面列举一具体实施例以说明确定产能二项式方程的过程:

[0144] 表1 邻井测试压力和气量数据

[0145]

测试层位气藏原始地层压力: $p_R = 2.8145 MP_a$ (兆帕)		
测试点	$p_{wf} MP_a$	$q$ (立方米/天)
1	2.7794	121350
2	2.7166	262200
3	2.6098	440120
4	2.5001	571010

[0146] 其中,N等于4,根据公式(29),求得 $A=0.01275$ ,根据公式(30),求得 $B=0.00029$ ;将A和B代入公式(28),求得深水测试气井拟稳态产能二项式方程:

$$[0147] \quad P_R^2 - P_{wf}^2 = 0.01275q + 0.00029q^2。$$

[0148] 上述各实施例仅用于说明本发明,其中各部件的结构、连接方式等都是可以有所变化的,凡是在本发明技术方案的基础上进行的等同变换和改进,均不应排除在本发明的保护范围之外。

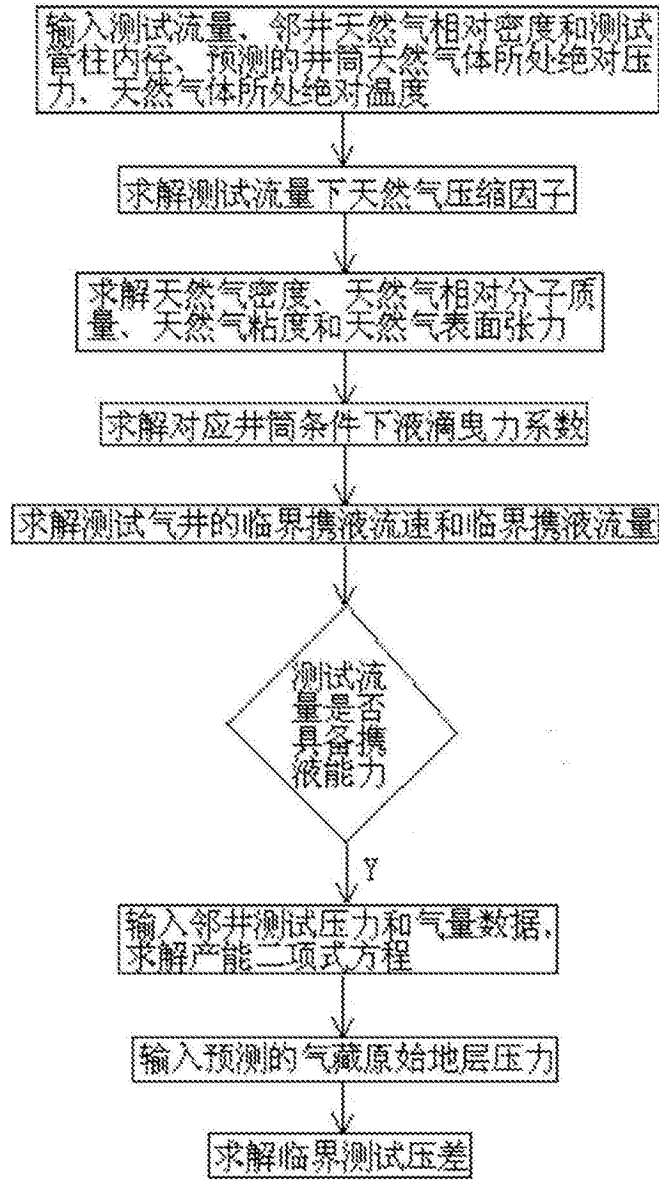


图1