

一种评估致密砂岩气藏水相返排率及合理返排压差的方法

技术领域

本发明涉及油气田开发技术领域，特别涉及非常规天然气开发技术领域，具体是一种评估致密砂岩气藏水相返排率及合理返排压差的方法。

背景技术

天然气是一种清洁的能源，在目前的世界经济中扮演着重要的角色，随着非常规天然气勘探技术的不断发展，新增探明天然气储量中有大量致密砂岩气田，广泛分布于我国各大盆地，储量十分丰富，其所蕴含的巨大经济价值逐渐被人们所认知，成为当今非常规天然气开发的重点领域。致密砂岩气储层发育微米纳米级孔喉，具有连通性差，毛管压力高，非均质性强，低含水饱和度等特征，只有经过压裂改造等增产措施才能获得具有工业价值的气流。致密砂岩气藏因其独特的地质条件和渗流特征，在钻完井、压裂改造等过程中，水相易于自吸，且难以返排，这种由于水相滞留所诱发的水相圈闭损害是致密砂岩气藏最主要的损害类型之一，严重制约了致密砂岩气藏的开发。解除水相圈闭损害需要明确合理的返排压差范围，在克服毛管压力等返排阻力的同时避免速敏等敏感性损害。而对于水相返排率以及合理返排压差的计算模型，本领域技术人员进行过一定的研究，并形成部分学术成果，如胡景宏等的论文《压裂液返排率的理论计算》，公开了一种压裂液返排率的计算模型，公开号为 CN 111914494 A 的中国发明专利《一种致密储层水平井压后压裂液返排率预测方法及系统》也公开了一种压裂液返排率的计算模型。由于致密砂岩气藏具有岩石低孔低渗、气体高度可压缩性的特点，现有技术方案计算模型复杂，计算方法难度大，且均不能与致密砂岩气藏的特性有很好的结合，难以针对性的分析致

密砂岩气藏环境下的水相返排率问题，无法指导计算出合理的返排压差，导致难以为致密砂岩气藏开发提供最优的设计施工方案。

发明内容

为了克服现有技术中的问题，本发明提供一种评估致密砂岩气藏水相返排率及合理返排压差的方法，能适应致密砂岩气藏的具体情况，为解除致密砂岩气藏水相圈闭损害，制定合理的水相返排制度提供依据。

本发明的具体技术方案如下：

一种评估致密砂岩气藏水相返排率的方法，包括：

步骤一、对岩心样本进行加工，并测试其孔隙结构分布数据，包括各个孔隙的孔隙半径 R_i 和孔隙度分量 a_i ；

步骤二、求取不同孔径 R_i 的压裂压力作用长度 L_i ，作为毛管中气体的流动长度；

步骤三、求取不同孔径 R_i 的孔隙渗吸长度 l_i ；

步骤四、求取不同孔径 R_i 在某返排压差 ΔP_k 下的孔隙排液长度 x_i ；

步骤五、基于上述步骤所得孔隙结构分布数据、不同孔隙渗吸长度 l_i 和不同孔隙排液长度 x_i ，以不同孔隙在其渗吸长度 l_i 下所渗吸的水相体积总量为总渗吸量，不同孔隙在其孔隙排液长度 x_i 下所返排的水相体积总量为总返排量，求返排压差 ΔP_k 下的返排率 ξ_k ；

步骤六、重复步骤四和步骤五，求取一系列返排压差 ΔP_k 下的返排率 ξ_k ，并绘制返排压差与返排率的关系曲线图，在该关系曲线图中，可以得到某返排压差下对应的返排率；

步骤六中，该压差不大于步骤四中所采用的返排压差 ΔP_k 的最大值。

优选的，步骤一具体包括：将岩心样本清洗干净后，饱和水。将饱和水后

的岩心样本进行核磁共振测试，获取 T_2 图谱并进行反演，确定孔隙结构分布数据，即各个孔隙的孔隙半径 R_i 和孔隙度分量 a_i ， i 越大孔隙半径越大，作为毛管束模型的基础参数；

优选的，所述步骤一具体包括：

- (1) 按照岩心样本制备方法，切割直径 3.8cm 长度 5-10cm 的岩心样本；
- (2) 将岩心样本按照《岩心分析方法（GB/T 29172-2012）》进行洗油、洗盐并烘干；测量岩心样本的长度、直径、孔隙度和渗透率；
- (3) 为避免岩心样本水敏，饱和水为 2% 的 KCl 溶液；将饱和后的岩心样本放入核磁共振探头中，进行核磁共振信号采集，采样结束后，获取 T_2 图谱；
- (4) 对 T_2 图谱进行反演获得孔隙结构分布数据。

优选的，步骤二具体包括：考虑压力波在不同孔隙中的传播速度，基于单孔渗透率，求取不同孔径 R_i 的压裂压力作用长度 L_i ，作为毛管中气体的流动长度，计算公式为：

$$L_i = \sqrt{2h_i T / \Phi \mu c} \quad (1)$$

其中， h_i 的计算步骤如下：

$$h_i = \frac{R_i^2}{8} \quad (2)$$

式中， R_i 为某一尺寸孔隙的孔隙半径，m；

h_i 为地层条件下的半径为 R_i 的单孔的渗透率，D；

T 为压裂与闷井的总时间，ks；

Φ 为地层条件下的岩石孔隙度；

μ 为地层流体粘度，mPa·s；

c 为储层总压缩系数，MPa⁻¹。

优选的，步骤三具体包括：考虑气藏岩石孔隙中空气的压缩膨胀特性，求

取不同孔径 R_i 的孔隙渗吸长度 l_i ，公式为：

$$l_i = \frac{(P_f - P_e)R_i}{P_f R_i} L_i \quad (3)$$

式中， P_f 为地层侵入流体压力，Pa；

P_e 为地层原始压力，Pa。

优选的，步骤四具体包括：基于返排过程中的动力、阻力分析，毛管力为返排阻力，返排压差、气体膨胀能提供动力，求取不同孔径 R_i 在某返排压差 ΔP_k 下的孔隙排液长度 x_i ，其中， $0 \leq x_i \leq l_i$ ，公式为：

$$x_i = \frac{P_e L_i}{P_e - \Delta P_k + \frac{2\sigma \cos \theta}{R_i}} - L_i \quad (4)$$

式中， θ 为侵入流体与岩石的润湿角，°；

σ 为侵入流体与甲烷的界面张力，Pa。

优选的，步骤五具体包括：基于上述步骤所得孔隙结构分布数据、不同孔隙渗吸长度 l_i 和不同孔隙排液长度 x_i ，以不同孔隙在其渗吸长度 l_i 下所渗吸的水相体积总量为总渗吸量，不同孔隙在其孔隙排液长度 x_i 下所返排的水相体积总量为总返排量，求返排压差 ΔP_k 下的返排率 ξ_k 为：

$$\xi_k = \frac{\sum_1^n a_i \pi R_i^2 x_i}{\sum_1^n a_i \pi R_i^2 l_i} \quad (5)$$

式中， n 为孔隙类型的总数目。

一种评估致密砂岩气藏合理返排压差的方法，将根据步骤五所述的一种评估致密砂岩气藏水相返排率的方法所得到的不同返排压差 ΔP_k 与得到的致密砂岩气藏水相返排率 ξ_k 形成两者的关系曲线图；选取返排率曲线斜率趋于0的点的返排压差 ΔP_c ，若此返排压差 ΔP_c 不大于临界最大返排压差 P_{\max} ，将此返排压差 ΔP_c 作为得到的合理返排压差 ΔP_{opt} ；若此返排压差 ΔP_c 大于临界最大返排压差 P_{\max} ，则取临界最大返排压差 P_{\max} 为合理返排压差 ΔP_{opt} 。

优选的，所述 $P_{\max} = \tau_c l_m$ ，进行速敏实验，获取速敏临界压力梯度 τ_c 作为

临界最大返排压力梯度，则临界最大返排压差为 $P_{\max} = \tau_c l_m$ ，其中 l_m 为主力孔隙的渗吸长度， l_m 的计算方法与 l_i 相同，所述主力孔隙为步骤一核磁共振测试所得占比最大的孔隙。

优选的，所述速敏实验的具体步骤为：

(1) 根据所需配置相应的侵入流体，如果评价钻井液返排合理压差及返排率预测，则采用钻井液；如果评价压裂液合理返排压差及返排率预测，则采用压裂液；

(2) 将岩心样本浸泡在配置的液体中，抽真空加压饱和；

(3) 将岩心样本放入岩心夹持器，按照等有效应力原则施加围压，保持围压稳定，用不同的氮气压力驱替岩心样本，记录对应的渗透率和压力梯度，当压力梯度大于或者等于某值时，表现为渗透率急剧下降，则该压力梯度为速敏临界压力梯度 τ_c 。

其中步骤 (3) 的压力梯度计算方法为：

如果压力梯度 τ_j 对应渗透率 K_j 与 τ_{j+1} 对应渗透率 K_{j+1} 满足式：

$$\frac{K_j - K_{j+1}}{K_j} \geq 0.05$$

说明已经发生速敏损害， τ_j 则为速敏临界压力梯度 τ_c 的值。

本发明具有以下有益效果：

1、本发明针对性的设计了适应致密砂岩气藏的水相合理返排压差评价及返排率预测方案，基于毛管束模型，将致密砂岩各孔隙视为不同半径的毛细管，首先获取各个孔隙的孔隙半径和孔隙度分量；其次，获取毛管束模型中单根毛管的压裂压力作用长度，作为毛管中气体的流动长度；再次，考虑水相渗吸造成毛细管中气体的压缩，水相返排时压缩的气体能够提供返排能量，分析渗吸和返排过程中的动阻力，分别求取不同孔径的渗吸长度和排液长度；然后，以

不同孔隙在其渗吸长度下所渗吸的水相体积总量为总渗吸量，不同孔隙在其排液长度下所返排的水相体积总量为总返排量，求取不同压差下的返排率，获取返排率与返排压差的关系曲线；最后，根据目标返排率，以返排压差不超过最大返排压差为原则，由返排率曲线和临界最大返排压差选择合理返排压差。通过这些步骤，能有效地预测致密砂岩气藏的返排率，同时结合返排率确定对应的合理返排压差，为施工提供技术指导。

2、本发明的步骤，充分考虑致密砂岩气藏压力波在不同孔隙中的传播速度、岩石孔隙中空气的压缩膨胀特性、以及返排过程中的动力阻力，求取不同返排压差下对应的不同孔隙的渗吸长度、排液长度以及储层返排率；同时考虑了速敏对气藏开发的影响，针对每一步骤，均独立推导设计出新的计算公式，最终得到所需的返排率和合理返排压差，让本发明能符合现场施工的实际情况，且求解过程计算简单、实验方便、准确度高。

3、在本发明的实验过程中，无需设计制造新的实验设备和构建新的实验方法，可基于现有实验体系进行实验，结合新的计算方法和步骤，完成相关计算并得到所需结果。

4、本发明能对钻井、压裂等施工流程的返排都进行预测和评价，满足更多施工种类的需求。

附图说明

图1是本发明的流程框图；

图2是返排压差与返排率关系曲线。

具体实施方式

下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实

施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他施例，都属于本发明保护的范围。

本发明所提供的一种评估致密砂岩气藏水相返排率的方法，评价对象为水力压裂后的致密砂岩气藏，在本施例中，选取国内某区块的岩层作为实验对象，所在储层深度为 1700-1800 米，平均压力为 14MPa，上覆地层压力为 40MPa，如图 1 所示，具体实施方式包括以下步骤：

步骤 S1、钻取致密砂岩储层岩石，按照《岩心分析方法(GB/T 29172-2012)》，将其制作成直径约 3.8cm（误差不超过 0.1cm）、长度约 5-10cm 的岩心样本；将岩心样本按照《岩心分析方法（GB/T 29172-2012）》中的方法洗油洗盐、烘干。因为致密砂岩低孔低渗，用标准岩心分析方法较难获得准确的孔隙度，因此本技术方案设计并采用压力衰减法测试其渗透率，准确获取渗透率的同时避免液体对岩心样本物性的影响。在本施例中，制备并选取 4 块实验用的岩心样本，所得实验岩心样本的基本参数见表 1 所示。

表 1 实验岩心样本基础参数

岩心样本 编号	长度 (cm)	直径 (cm)	孔隙度 (%)	气测渗透率 (mD)
1	6.977	3.797	10.2	0.393
2	6.523	3.823	9.1	0.261
3	6.444	3.789	10.4	0.425
4	6.247	3.811	8.7	0.362
平均	6.548	3.805	9.6	0.360

步骤 S2、将岩心样本清洗干净后，抽真空加压 2%的 KCl 溶液作为饱和水，选择合适的核磁共振探头，将饱和后的岩心样本放入核磁共振探头中，进行核磁共振信号采集，采样结束后，获取 T_2 图谱，对 T_2 图谱进行反演获得孔隙结构分布数据。对各岩心样本孔隙结构分布做评价，得到平均孔隙结构分布，孔隙结构分布即各个孔隙的孔隙半径 R_i 和孔隙度分量 a_i (i 越大孔隙半径越大)，通过核磁共振测试所得具体数据见表 2。

说 明 书

表 2 平均孔隙结构分布

序号	孔隙半径 R_i (μm)	孔隙度分量 a_i (%)	序号	孔隙半径 R_i (μm)	孔隙度分量 a_i (%)
1	0.0002	0.000236343	43	0.070224	1.493372
2	0.000229952	0.000756935	44	0.08074	1.41743
3	0.000264388	0.002038598	45	0.092832	1.353118
4	0.000303982	0.005301032	46	0.106734	1.302152
5	0.000349506	0.01214185	47	0.122718	1.265806
6	0.000401846	0.024918353	48	0.141096	1.244886
7	0.000462026	0.0465132	49	0.162226	1.239725
8	0.000531218	0.080728914	50	0.186521	1.250139
9	0.000610772	0.129427295	51	0.214454	1.275389
10	0.000702238	0.195348997	52	0.24657	1.314121
11	0.000807404	0.279917124	53	0.283494	1.364338
12	0.000928318	0.383487239	54	0.32595	1.423365
13	0.00106734	0.505297796	55	0.374764	1.487892
14	0.001227182	0.643541182	56	0.430886	1.554065
15	0.00141096	0.795537458	57	0.495416	1.617646
16	0.001622262	0.957971089	58	0.569608	1.674232
17	0.001865206	1.127169974	59	0.65491	1.719504
18	0.00214454	1.299366265	60	0.752988	1.74951
19	0.0024657	1.470892344	61	0.865752	1.76091
20	0.00283494	1.638355136	62	0.995404	1.751187
21	0.0032595	1.798660778	63	1.144474	1.71878
22	0.00374764	1.949061399	64	1.315866	1.663133
23	0.00430886	2.087098058	65	1.512926	1.584649
24	0.00495416	2.210589503	66	1.739498	1.484553
25	0.00569608	2.317596123	67	2	1.364675
26	0.0065491	2.406416306	68	2.29952	1.227172
27	0.00752988	2.475606826	69	2.64388	1.074218
28	0.00865752	2.52401752	70	3.03982	0.90774
29	0.00995404	2.550839836	71	3.49506	0.729199
30	0.01144474	2.55569782	72	4.01846	0.539511
31	0.01315866	2.538705636	73	4.62026	0.350166
32	0.01512926	2.514227245	74	5.31218	0.153004
33	0.01739498	2.455724239	75	6.10772	0.061356
34	0.02	2.379240583	76	7.02238	0.007635
35	0.0229952	2.287296105	77	8.07404	0.012097
36	0.0264388	2.182856471	78	9.28318	0.017639
37	0.0303982	2.069216726	79	10.6734	0.021909
38	0.0349506	1.959600335	80	12.27182	0.023637
39	0.0401846	1.864806303	81	14.1096	0.022485
40	0.0462026	1.76754282	82	16.22262	0.018514
41	0.0531218	1.671147473	83	18.65206	0.012019
42	0.0610772	1.578792423	84	21.4454	0.003427

说明书

步骤 S3、求取不同孔径 R_i 的压裂压力作用长度 L_i (m) , 公式为:

$$L_i = \sqrt{2k_i T / \Phi \mu c}$$

$$h_i = \frac{R_i^2}{8}$$

式中, R_i 为某一尺寸孔隙的孔隙半径, m;

h_i 为地层条件下的半径为 R_i 的单孔的渗透率, D;

T 为压裂与闷井的总时间, ks;

Φ 为地层条件下的岩石孔隙度;

μ 为地层流体粘度, mPa·s;

c 为储层总压缩系数, MPa⁻¹;

下标 i 为取值顺序, 其值为 1, 2, 3, , , n ; n 为孔隙类型的总数目, 本例中 n 为 84。

计算得到的各孔隙的压裂压力作用长度 L_i 见表 3。

表 3 各孔隙压裂压力作用长度

序号	孔隙半径 (μm)	压裂压力作用长度 (m)	序号	孔隙半径 (μm)	压裂压力作用长度 (m)
1	0.0002	0.0929516	43	0.070224	32.63707295
2	0.000229952	0.106872032	44	0.08074	37.52474695
3	0.000264388	0.122876439	45	0.092832	43.14432185
4	0.000303982	0.141278067	46	0.106734	49.60548054
5	0.000349506	0.16243571	47	0.122718	57.03426539
6	0.000401846	0.186761144	48	0.141096	65.57549499
7	0.000462026	0.21473028	49	0.162226	75.39592451
8	0.000531218	0.246887816	50	0.186521	86.6869413
9	0.000610772	0.283861174	51	0.214454	99.66921246
10	0.000702238	0.326370729	52	0.24657	114.5953804
11	0.000807404	0.375247469	53	0.283494	131.7561049
12	0.000928318	0.431443218	54	0.32595	151.4878706
13	0.00106734	0.496054805	55	0.374764	174.1745677
14	0.001227182	0.570342654	56	0.430886	200.2577163
15	0.00141096	0.65575495	57	0.495416	230.2485501
16	0.001622262	0.753959245	58	0.569608	264.7298757
17	0.001865206	0.866869413	59	0.65491	304.3746628

说 明 书

18	0.00214454	0.996692125	60	0.752988	349.9571981
19	0.0024657	1.145953804	61	0.865752	402.3651694
20	0.00283494	1.317561049	62	0.995404	462.6219738
21	0.0032595	1.514878706	63	1.144474	531.9034491
22	0.00374764	1.741745677	64	1.315866	611.5592525
23	0.00430886	2.002577163	65	1.512926	703.1444642
24	0.00495416	2.302485501	66	1.739498	808.4456142
25	0.00569608	2.647298757	67	2	929.5160031
26	0.0065491	3.043746628	68	2.29952	1068.72032
27	0.00752988	3.499571981	69	2.64388	1228.764385
28	0.00865752	4.023651694	70	3.03982	1412.780668
29	0.00995404	4.626219738	71	3.49506	1624.357101
30	0.01144474	5.319034491	72	4.01846	1867.611439
31	0.01315866	6.115592525	73	4.62026	2147.302804
32	0.01512926	7.031444642	74	5.31218	2468.878161
33	0.01739498	8.084456142	75	6.10772	2838.611741
34	0.02	9.295160031	76	7.02238	3263.707295
35	0.0229952	10.6872032	77	8.07404	3752.474695
36	0.0264388	12.28764385	78	9.28318	4314.432185
37	0.0303982	14.12780668	79	10.6734	4960.548054
38	0.0349506	16.24357101	80	12.27182	5703.426539
39	0.0401846	18.67611439	81	14.1096	6557.549499
40	0.0462026	21.47302804	82	16.22262	7539.592451
41	0.0531218	24.68878161	83	18.65206	8668.69413
42	0.0610772	28.38611741	84	21.4454	9966.921246

步骤 S4、求取不同孔径 R_i 的孔隙渗吸长度 l_i ，公式为：

$$l_i = \frac{(P_f - P_e)R_i}{P_f R_i} L_i$$

式中， P_f 为地层侵入流体压力，Pa；

P_e 为地层原始压力，Pa。

计算的各孔隙渗吸长度见表 4。

表 4 各孔隙对应渗吸长度

序号	孔隙半径 (μm)	孔隙渗吸长度 (m)	序号	孔隙半径 (μm)	孔隙渗吸长度 (m)
1	0.0002	0.052285275	43	0.070224	18.35835353
2	0.000229952	0.060115518	44	0.08074	21.10767016
3	0.000264388	0.069117997	45	0.092832	24.26868104
4	0.000303982	0.079468913	46	0.106734	27.9030828
5	0.000349506	0.091370087	47	0.122718	32.08177428

说明书

6	0.000401846	0.105053143	48	0.141096	36.88621593
7	0.000462026	0.120785783	49	0.162226	42.41020754
8	0.000531218	0.138874397	50	0.186521	48.76140448
9	0.000610772	0.15967191	51	0.214454	56.06393201
10	0.000702238	0.183583535	52	0.24657	64.4599015
11	0.000807404	0.211076702	53	0.283494	74.112809
12	0.000928318	0.24268681	54	0.32595	85.21192721
13	0.00106734	0.279030828	55	0.374764	97.97319433
14	0.001227182	0.320817743	56	0.430886	112.6449654
15	0.00141096	0.368862159	57	0.495416	129.5148094
16	0.001622262	0.424102075	58	0.569608	148.9105551
17	0.001865206	0.487614045	59	0.65491	171.2107478
18	0.00214454	0.56063932	60	0.752988	196.8509239
19	0.0024657	0.644599015	61	0.865752	226.3304078
20	0.00283494	0.74112809	62	0.995404	260.2248602
21	0.0032595	0.852119272	63	1.144474	299.1956901
22	0.00374764	0.979731943	64	1.315866	344.0020795
23	0.00430886	1.126449654	65	1.512926	395.5187611
24	0.00495416	1.295148094	66	1.739498	454.750658
25	0.00569608	1.489105551	67	2	522.8527517
26	0.0065491	1.712107478	68	2.29952	601.1551798
27	0.00752988	1.968509239	69	2.64388	691.1799666
28	0.00865752	2.263304078	70	3.03982	794.6891259
29	0.00995404	2.602248602	71	3.49506	913.7008692
30	0.01144474	2.991956901	72	4.01846	1050.531434
31	0.01315866	3.440020795	73	4.62026	1207.857827
32	0.01512926	3.955187611	74	5.31218	1388.743965
33	0.01739498	4.54750658	75	6.10772	1596.719104
34	0.02	5.228527517	76	7.02238	1835.835353
35	0.0229952	6.011551798	77	8.07404	2110.767016
36	0.0264388	6.911799666	78	9.28318	2426.868104
37	0.0303982	7.946891259	79	10.6734	2790.30828
38	0.0349506	9.137008692	80	12.27182	3208.177428
39	0.0401846	10.50531434	81	14.1096	3688.621593
40	0.0462026	12.07857827	82	16.22262	4241.020754
41	0.0531218	13.88743965	83	18.65206	4876.140448
42	0.0610772	15.96719104	84	21.4454	5606.393201

步骤 S5、求取不同孔径 R_i 在某返排压差 ΔP_k 下的排液长度 x_i ($0 \leq x_i \leq l_i$)，
公式为：

$$x_i = \frac{P_e L_i}{P_e - \Delta P_i + \frac{2\sigma \cos \theta}{R_i}} - L_i$$

式中， θ 为侵入流体与岩石的润湿角，°；

σ 为侵入流体与甲烷的界面张力，N/m。

式中，所述 ΔP_k 的确定方法是，根据该储层的储层压力，以储层压力 14MPa 为最大取值，设定 0-14MPa 为计算取值范围，在 0-14MPa 中按照等差数列依次取值，每次取值的公差为 0.5MPa。 ΔP_k 中下标 k 表示取值顺序，其值为 1, 2, 3, , , m ； m 为 ΔP_k 的取值总数目，本例中 m 为 29。

步骤 S6、该返排压差 ΔP_k 下的返排率 ξ_k 为：

$$\xi_k = \frac{\sum_1^n a_i \pi R_i^2 x_i}{\sum_1^n a_i \pi R_i^2 l_i}$$

式中， n 为孔隙类型的总数目。

步骤 S7、进一步的，根据上述内容，还可以进一步求得返排率曲线，重复步骤 S5 和步骤 S6，求取一系列返排压差 ΔP_k 下的返排率 ξ_k ，以返排压差 ΔP_k 作为横坐标，返排率 ξ_k 作为纵坐标，得到返排压差 ΔP_k 与返排率 ξ_k 的关系曲线图，如图 2 所示。

步骤 S8、根据所需配置相应的侵入流体；将岩心样本浸泡在配置的液体中，抽真空加压饱和；将岩心样本放入岩心夹持器，按照等有效应力原则施加围压，施加围压为 26MPa，保持围压稳定，用不同的氮气压力驱替岩心样本，具体是，按照行业实验标准，用 0.01MPa/cm、0.03MPa/cm、0.06MPa/cm、0.10MPa/cm、0.15MPa/cm、0.20MPa/cm、0.25MPa/cm、0.30MPa/cm、0.35MPa/cm、0.40MPa/cm、0.45MPa/cm、0.50MPa/cm、0.60MPa/cm 的压力梯度依次增加岩心样本压力梯度，记录对应的渗透率和压力梯度，如果压力梯度 τ_j 对应渗透率 K_j 与 τ_{j+1} 对应渗透率 K_{j+1} 满足式：

$$\frac{K_j - K_{j+1}}{K_j} \geq 0.05$$

说明已经发生速敏损害， τ_j 则为速敏临界压力梯度 τ_c 。其中 τ_j 与 K_j 下标 j 表

示取值顺序，其值为 1, 2, 3, , , w ; w 为 τ_j 与 K_j 取值总数目，本例中 w 为 13。压本次实验中，当压力梯度大于或者等于 0.20MPa/cm，且渗透率急剧下降满足上式，则可得到速敏临界压力梯度 τ_c 为 0.20MPa/cm。而临界最大返排压差的计算公式为 $P_{\max} = \tau_c l_m$ ，式中 l_m 为主力孔隙的渗吸长度，所述主力孔隙为步骤一核磁共振测试所得占比最大的孔隙。由表 2，本例主力孔隙为半径 0.01144474 μm ，由表 3 可知，该主力孔隙的渗吸长度 l_m 为 2.992m。

因此，根据上述判断方法和计算公式，得到本实施例的临界最大返排压差 P_{\max} 为 59.8MPa。

步骤 S9、为避免储层速敏损害，以返排压差不超过最大返排压差为原则，选取返排率曲线斜率趋于 0 的点的返排压差作为所需求得的合理返排压差 ΔP_{opt} 。在本例中，在返排压差为 2MPa 时，返排率曲线斜率趋于 0，且 2MPa 小于临界最大返排压差 P_{\max} ，因此本例选择 2MPa 作为合理返排压差 ΔP_{opt} 。

本发明基于毛管束模型，相对于其他模型不需要复杂的迭代编程计算，计算简便；在实验过程中，只需做常规的核磁共振测试和速敏测试，测试方法简便，且为行业通用测试方法，无需额外购置设备和培训；计算过程考虑了致密砂岩气藏不同大小孔隙中压力波的传播差异，同时考虑了气藏气体的可压缩性，能够更贴合致密砂岩气藏低孔低渗、气体可压缩膨胀的特殊性质；对致密砂岩气藏水相渗吸返排过程中的动阻力进行分析和计算，相比于现有技术的返排率计算方法，本方案针对致密砂岩气藏的特性，考虑了各个孔隙的渗吸返排长度及体积，计算更加精确。

通过计算获取返排压差与反排率的关系曲线，并以返排压差不超过临界最大返排压差、避免速敏损害为原则，选取返排率曲线斜率趋于 0 的点的返排压差作为合理返排压差，既能实现较大返排率，又能最高效地利用地层能量，能

有效支持致密砂岩开发的现场施工方案的设计和操作。

以上所述，并非对本发明作任何形式上的限制，虽然本发明已通过上述实施例揭示，然而并非用以限定本发明，任何熟悉本专业的技术人员，在不脱离本发明技术方案范围内，可利用上述揭示的技术内容作出些变动或修饰为等同变化的等效实施例，但凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本发明技术方案的范围。