

# 产水气井井筒携砂机制及携砂能力 评价试验与应用

董长银<sup>1</sup>, 陈新安<sup>1</sup>, 阿雪庆<sup>2</sup>, 陈宇<sup>1</sup>, 康瑞鑫<sup>2</sup>, 冯胜利<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油青海油田公司钻采院, 甘肃敦煌 736200)

**摘要:**对垂直井筒不同水气比和含砂体积分数下的气水砂三相流动机制及气水携砂能力进行系统的试验研究。通过试验得到单相气体携砂和气水携砂临界流速与砂粒径的定量关系和规律。根据试验数据揭示的气液携砂机制, 建立不产水和产水气井的临界携砂流速模型, 用于预测给定生产条件下的携砂条件和携砂能力, 并提出考虑井筒携砂的新型气井综合协调曲线用于实际气井工况分析和制度调整。结果表明:一旦气井见水, 气井携砂能力将比不产水条件下严重降低, 气体流速和水气比是控制携砂动态的主要因素; 随着水气比从零开始升高, 流型依次为无携砂现象的泥状流、具有携砂能力的环雾流、段塞流, 以及其他相同水气比条件下的气水两相流型; 气液两相流要达到携砂条件, 气体流速必须达到携液流速, 并且液相流速要达到基本的单相液体携砂条件。

**关键词:**产水气井; 出砂; 气液固三相流动; 携砂能力; 携砂机制

**中图分类号:**TE 375 **文献标志码:**A

**引用格式:**董长银, 陈新安, 阿雪庆, 等. 产水气井井筒携砂机制及携砂能力评价试验与应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 90-96.

DONG Changyin, CHEN Xin'an, A Xueqing, et al. Experimental study on mechanism and capability of sand-carrying in water-producing gas wells and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 90-96.

## Experimental study on mechanism and capability of sand-carrying in water-producing gas wells and its application

DONG Changyin<sup>1</sup>, CHEN Xin'an<sup>1</sup>, A Xueqing<sup>2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, KANG Ruixin<sup>2</sup>, FENG Shengli<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Drilling and Production Engineering, Qinghai Oilfield, PetroChina, Dunhuang 736200, China)

**Abstract:** The gas-liquid-solid multi-phase flow in vertical wells was experimentally simulated to study the mechanism and capability of sand-carrying for gas wells with water production, in which the effects of gas and water flow rate, water-gas ratio (WGR) and sand volume fraction were investigated. Based on experimental results, the critical gas flow rate for sand-carrying and the relationship between the size of sands and gas and water flow rate were obtained. A sand-carrying evaluation model for gas well with and without water production was developed. The model can be used to predict the critical gas flow rate for sand-carrying with various sand sizes and the maximum sand rate that can be carried by gas at a certain flow rate. A new integrated coordination chart was figured out for the evaluation of sand-carrying capability in gas wells with water and sand production. The results show that, once the well starts to produce water, its sand-carrying capability will be reduced compared with that no water production. Gas flow rate and WGR are the dominant factors affecting the flow mechanism. As the WGR increases, different flow patterns tend to appear in wellbore in sequence, including mud-gas flow without sand-carrying capability, annular and plug flows with sand-carrying capability, similar to the flow patterns observed in normal gas-liquid two phase flow with the same WGR. The prerequisite for sand-carrying in gas wells with water producing is that high gas flow

收稿日期:2014-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51374226); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2011E-0309)

作者简介:董长银(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事采油工程与技术、多相流理论、油气井防砂理论与技术研究。E-mail: dongcy@upc.edu.cn。

rate is needed to make or carry water flow at sufficiently high velocity for sands to start moving upward.

**Key words:** water-producing gas well; sand production; gas-liquid-solid three-phase flow; sand-carrying capability; sand-carrying mechanism

出砂与井底沉砂是困扰疏松砂岩气藏开发的主要问题之一,地层砂随井筒流体产出会改变井筒内流动机制和形态。对于已经见水的出砂气井,井筒流动实质上是气液固三相流动,流动机制和气水携砂能力将直接影响产水气井的工况分析和系统举升设计。针对井筒携砂的研究,目前主要集中在油井和不产水气井方面。对于出砂油井,即使含有自由气,由于气液比一般比较低,井筒流动主要为固液流动,众多研究者也得到了系列油井临界携砂能力模型<sup>[1-5]</sup>,并对井筒中的泡沫流体携砂机制开展了研究<sup>[6-7]</sup>。相对而言,气井尤其是产水气井的井筒携砂规律方面开展的研究不多,部分研究集中在气固两相流动即不产水气体携砂<sup>[8-9]</sup>,而高气液比气液固三相流动尤其是产水气井携砂机制及规律研究较少。对于疏松砂岩气藏,气井出砂是普遍现象。一旦气井开始产水,井筒中的流动由气固两相流动转变为气液固三相流动,井筒携砂也由气体携砂变为气液两相携砂,其携砂机制及携砂能力是产水气井工况分析和系统设计必须要考虑的因素。笔者针对垂直井筒不同水气比和含砂体积分数下的气水砂三相流动机制及气水携砂能力进行系统的试验研究,根据

试验揭示的气液携砂机制和试验数据,建立不产水和产水气井的临界携砂能力评价模型,用于预测给定生产条件下的携砂条件和携砂能力;提出一套考虑井筒携砂的新型气井综合协调曲线用于实际气井工况分析和生产制度调整。

## 1 垂直井筒气水携砂试验

### 1.1 试验装置

气水携砂试验的主要目的是测量不同地层砂粒径条件下的纯气体携砂和含水气体携砂的临界流速,以及测量给定气体流速条件下的最大携砂能力及其影响因素。

气水携砂试验使用垂直井筒多相流试验装置进行,由模拟井筒、气液混合器、空气压缩机、泵、储液罐以及数据采集与处理系统等组成,如图1所示。为了便于观察各相流动形态,模拟井筒使用透明材料制成。

水气比是影响气液固三相流动形态的主要因素之一。试验中,可以灵活控制气体和液体流量以模拟气井不同的水气比。地层砂被放置在管路底部,其粒径在试验前通过地层砂粒度筛析试验得到。

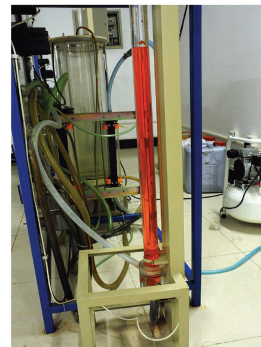
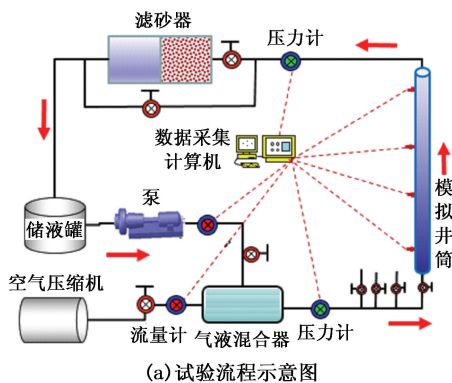


图1 气液携砂试验装置

Fig. 1 Sand-carrying experimental apparatus

### 1.2 试验材料

试验在室内条件下进行,使用清水和空气作为流体介质。模拟地层砂的固相材料是不同粒径的石英砂或陶粒,粒径为0.05~0.9 mm,材料密度2630 kg/m<sup>3</sup>,如图2所示。为了便于观察地层砂在井筒中的流动形态,部分地层砂使用鲜艳颜色剂着色。

### 1.3 试验过程

气液携砂试验过程:

- (1) 每次试验将200 g地层砂放置于模拟井筒底部。
- (2) 根据设定的水气比调整试验流程和设定流量。
- (3) 启动空气压缩机储备空气,启动液体泵。
- (4) 逐步提高气体和液体流量(注意读数保持基本恒定的水气比),观察井筒内携砂动态,直至达到携砂条件。

(5) 记录能够达到携砂的临界条件,然后继续提高流量到本次试验设定的流量,测量该流量下的最大携砂速度。

(6) 记录实际最终的气体 and 液体流速以及累积的携砂量和时间。

(7) 试验完成后关闭泵和空气压缩机。

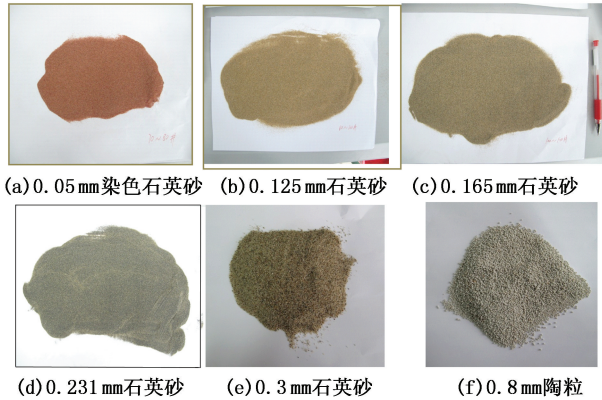


图2 试验用固相材料

Fig. 2 Sands used in experiment

## 2 试验结果分析

根据试验目的共进行了 53 次携砂试验,其中 15 次纯气体携砂试验, 20 次测量不同气体流速下的最大携砂量试验, 18 次气液固三相流动试验,用于测量含水气井携砂临界流速。

### 2.1 纯气体携砂临界流速试验

为了对比不含水气体和含水气体条件下的携砂能力差异,首先分析了纯气体携砂试验测量得到的携砂临界流速与地层砂粒径的关系,试验砂量为 200 g。垂直井筒纯气体携砂过程如图 3 所示。在携砂早期,气体开始驱动沉积的地层砂,随着流速增加大量的砂粒被悬浮并开始向上流动;继续提高气体流速,绝大部分地层砂被顺利携带并沿井筒向上流动,直至全部携砂完毕。

根据试验结果得到纯气体携砂临界流速和流量随砂粒径的关系如图 4 和 5 所示。对于不含水的纯气体,携砂临界流速随着地层砂粒径的增大而升高;对于地层砂粒径低于约 0.3 mm 的细砂,纯气体携砂临界流速保持在一个较低值,并且随着粒径增大其增加的速率并不高,在这个范围内,砂粒类似于粉状,对于纯气体而言非常易于携带。当地层砂粒径超过 0.3 mm 后,纯气体携砂临界流速随着砂粒径的增加快速增高,粒径对气体携砂能力的影响比粒径小于 0.3 mm 时更加明显。

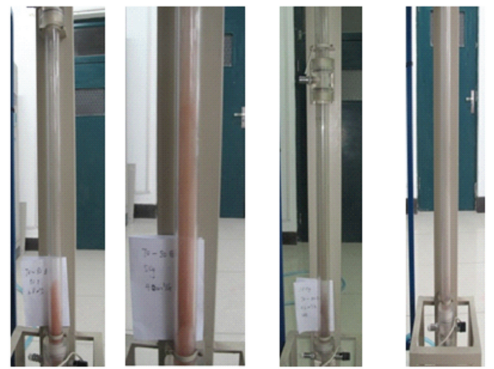


图3 典型的纯气体携砂过程

Fig. 3 Typical gas sand-carrying process

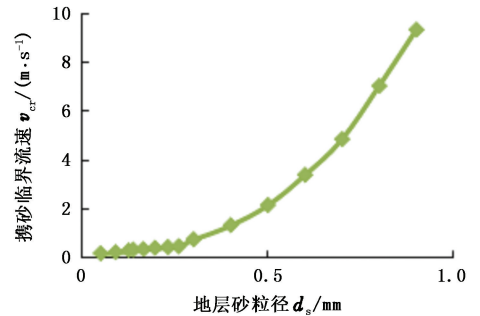


图4 纯气体携砂临界流速随粒径变化

Fig. 4 Variation of critical sand-carrying gas velocity with sand diameter

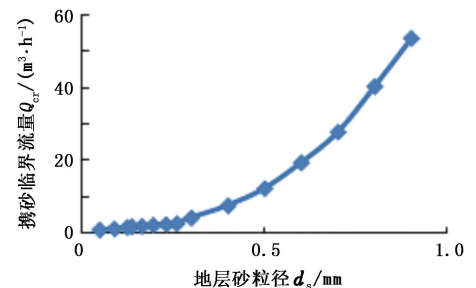


图5 纯气体携砂临界流量随粒径变化

Fig. 5 Variation of critical sand-carrying gas flow rate with sand diameter

### 2.2 纯气体最大携砂能力试验

纯气体最大携砂能力试验中共使用了 4 种粒径的地层砂。表 1 为不同地层砂粒径、不同气体流速下的最大携砂量试验结果。当气体流速超出携砂临界流速后,随着气体流速增加,能够携带的最大砂量增加;地层砂粒径越大,气体最大携砂量越小。

对于不产水的出砂气井,井筒携砂机制和规律相对简单。影响井筒携砂临界流速以及最大携砂量的主要因素是气体流速和携砂粒径。本试验中未能考虑流动压力对携砂动态的影响,压力越高,气体密度越大,降低了流动相和被携带相之间的密度差异,

会直接影响携砂动态。

表1 纯气体最大携砂量试验结果

Table 1 Experimental results of the maximum sand carrying volume with gas flow

序号	地层砂粒径/ mm	携砂临界流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	携砂临界流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均气体流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均气体流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	携砂时间/ s	携砂流量/ ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	0.050	0.9	0.157	1.0	0.175	83	2.410
2	0.050	0.9	0.157	1.3	0.227	67	2.985
3	0.050	0.9	0.157	1.6	0.279	56	3.571
4	0.050	0.9	0.157	2.0	0.349	32	6.250
5	0.050	0.9	0.157	2.2	0.384	26	7.692
6	0.090	1.2	0.210	1.3	0.227	95	2.105
7	0.090	1.2	0.210	1.6	0.279	69	2.899
8	0.090	1.2	0.210	1.9	0.332	58	3.448
9	0.090	1.2	0.210	2.2	0.384	46	4.348
10	0.090	1.2	0.210	2.5	0.437	32	6.250
11	0.125	1.6	0.279	1.9	0.332	128	1.563
12	0.125	1.6	0.279	2.2	0.384	100	2.000
13	0.125	1.6	0.279	2.6	0.454	76	2.632
14	0.125	1.6	0.279	3.0	0.524	67	2.985
15	0.125	1.6	0.279	3.4	0.594	54	3.704
16	0.196	2.2	0.384	2.7	0.472	156	1.282
17	0.196	2.2	0.384	3.1	0.541	110	1.818
18	0.196	2.2	0.384	3.5	0.611	86	2.326
19	0.196	2.2	0.384	4.0	0.699	75	2.667
20	0.196	2.2	0.384	4.5	0.786	66	3.030

### 2.3 低水气比下的气液固流型试验

对于一般气井,完全无水生产期一般比较短。大部分气井在产水条件下生产,因此研究产水条件下的井筒携砂机制和动态更具有实际意义。

气井的产气量远高于产水量,即使对于产水量很高的气井,其水气比相对于油井的液气比还是很低,因此在气水携砂试验中设定的水气比从接近于0开始逐步提高,模拟携砂动态,以更加符合实际产水气井的产水条件。

根据气水携砂试验观察结果,从水气比由低到高,低水气比的气液固三相流动(或气液携砂动态)的流动形态可分为极低水气比情况下的泥状流、低水气比条件下的环雾流和中水气比以上的段塞流。

#### 2.3.1 极低水气比情况下的泥状流

当水气比极低(几乎接近于零)时,水不能或刚可以饱和地层砂。地层砂首先被液相润湿,但由于水量不大,地层砂没有足够的流动能力而形成类似于泥状物。在流动过程中,砂水混合而成的泥状物一般是紧贴在管壁上,气体难以携带,如图6所示。可将这种极低水气比下的气液固三相流动形态称为泥状流,其特点是气体为流动相,液相润湿固相形成泥状物附着于管壁等机械部件上,难以被携带。水气比极低时的泥状流条件下,井筒携砂基本是不可

能的。



图6 极低水气比条件下的气液固泥状流  
Fig.6 Gas-liquid-solid three-phase mud flow under extremely low WGR condition

#### 2.3.2 低水气比条件下的环雾流

从极低的水气比开始,增加泵入的水量,原来紧贴管壁的泥状物被水充分饱和并具有一定的流动性,如试验中水气比约为0.1。如果气体流速足够高,管壁上水砂混合物会被气流携带沿管壁向上流动,而气体则表现为单向流体在管中心流动,如图7(a)和(b)所示。这种流型称为环雾流或环状流,非常类似于不含砂情况下的气液两相环状流(图7(c)),不同的是前者在环形的液流中含有固相地层砂。对于气液固

三相流动的环雾流,其携砂机制是井筒中间的气流携带附于管壁上的环状水流,水流携带地层砂。地层砂只存在于液相中,在气相中无地层砂存在。这表明,对于产水气井,井筒携砂的基本条件是气体在达到临界携液流速后带动液相以一定的流速流动,而液相流速必须达到单相液体的携砂流速,从而最终能够携带包含在液相中的地层砂流动。

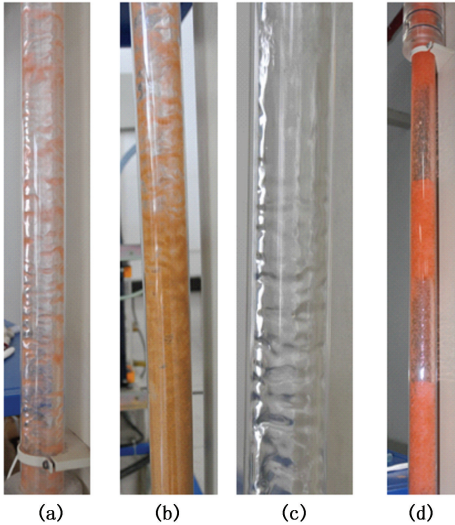


图7 低水气比和中水气比下的气液固三相环状流型

Fig.7 Gas-liquid-solid three-phase annular flow under low and middle WGR condition

### 2.3.3 中水气比以上的段塞流

随着水气比的进一步提高(试验中达到0.6左右),即使有地层砂固相的存在,气液固三相流动形态的变化规律与无固相的气水两相流型变化趋于一致。井筒中水相体积增加,原本为紧贴管壁的环状液流开始聚合,逐步形成段塞流,如图7(d)所示。气液固三相的段塞流与气液两相段塞流基本相似,不同之处在于气液固三相段塞流中液体段塞中携带有固相地层砂;固相仅存在于液相中。段塞流条件下,井筒携砂的基本条件与环雾流相似,即气体流速足以驱动液体段塞达到一定流速,而液相流速必须达到单相液体的携砂流速,以能够携带包含在液相中的地层砂流动。

根据上述试验现象分析,在一定水气比条件下,气液固三相流动形态与相同水气比下的气液两相流动相似。液相和固相混合形成拟液相。只有液相流速达到携砂条件井筒才能携砂,否则地层砂将会在井筒底部沉积,造成气井产量下降。

### 2.4 气液携砂临界流速试验

共进行了18次气液固三相流动试验,试验流体

为空气和水,测量得到的含水气井携砂临界流速如图8所示。

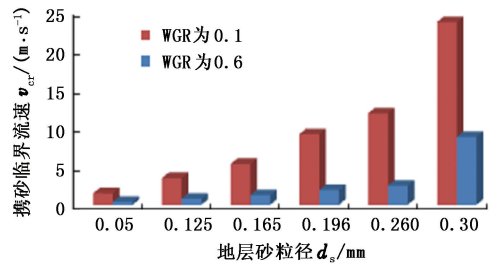


图8 两种水气比条件下气液携砂临界流速与砂粒径的关系

Fig.8 Critical sand-carrying gas velocity of gas-water flow with different WGR and sand size

结果表明,相同地层砂粒径下水气比为0.1(环雾流)条件下的携砂临界流速均明显高于水气比为0.6(近似段塞流)的情况。在低水气比(如0.1)或环雾流条件下,携带地层砂的水相趋向于附着在管壁上流动,流动阻力较大而被气体的携带力相对较小;在高水气比形成段塞流的情况下,液体段塞的流速和气体段塞基本接近,携砂相对容易。

与图4所示的不含水条件下的纯气体携砂临界流速对比可知,对于出砂气井,不产水时井筒携砂临界流速较低,携砂相对容易;当气井产水后,携砂临界流速明显高于不产水的情况,产水气井的携砂变得困难,即气井产水不利于井筒携砂。另外,对产水气井,在极低的水气比条件下,井筒携砂几乎是不可能的;井筒携砂会随着水气比的升高而变得越来越容易,但总比不产水时携砂条件苛刻。

## 3 产水气井携砂临界流速预测模型

一般的产水气井水气比位于不产水或环雾流的范围内。根据上述试验揭示的产水气井气液携砂机制,环雾流条件下的气液固流动中,地层砂只存在于液相中,井筒携砂的基本条件是气体携带液体达到一定流速,使液体能够携砂流动。

为了建立产水气井携砂临界流速预测模型,将气水携砂分解为两个步骤:首先气相达到临界携液条件以上,以流速  $v_g$  带动环状液相达到流速  $v_1$ ,以流速  $v_1$  流动的液相携带其中的地层砂,使地层砂流速达到  $v_s$ 。这样根据预期的地层砂流速  $v_s$  以及气液固三相流速之间的定量关系就可以得到对应气体流速  $v_g$ 。对应于  $v_s = 0$  的气相流速,就是气水携砂临界流速。

针对绝大多数产水气井的环雾流情形,很多学者基于环雾流流动机制研究提出了一系列气井携液模型<sup>[11-12]</sup>,其中应用最广泛的是 Turner 模型,其携液临界流速<sup>[11]</sup>为

$$v_{cr} = 6.6 \left[ \frac{(\rho_l - \rho_g) \sigma}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

$$q_{sc} = 2.5 \times 10^8 \frac{A p v_{cr}}{Z T}. \quad (2)$$

式中, $\rho_l$ 为液相密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_g$ 为气相密度,kg/m<sup>3</sup>;  $A$ 为流动截面积,m<sup>2</sup>;  $p$ 为井筒当地压力,MPa;  $T$ 为井筒当地温度,K;  $Z$ 为气体压缩因子;  $\rho_{sc}$ 为273 K、0.1 MPa下气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $v_{cr}$ 为无砂条件下的气井携液临界流速,m/s;  $q_{sc}$ 为无砂条件下的气井携液临界产量,m<sup>3</sup>/d;  $\sigma$ 为气液表面张力,N/m。

对于产水气井,如果气相流速  $v_g < v_{cr}$ ,则达不到携液条件,肯定也难以携砂。在达到携液条件的前提下,可以继续使用 Alves<sup>[12]</sup>提出的气液环雾流模型预测给定水气比条件下气液两相的流速。Alves的气液两相环雾流模型主要用于预测给定水气比、产气量、管径、温度和压力条件下的管壁液膜厚度和气液相的流速,即建立气相流速  $v_g$  和液相流速  $v_l$  间的定量关系<sup>[12]</sup>:

$$v_g = f(v_l). \quad (3)$$

由于 Alves 的气液环雾流模型相对复杂,在此不再赘述,可参考文献[12]。气液固三相流动中的液相携砂动态可近似处理为环空中的固液两相流动。文献[1]中针对牛顿流体中的固体颗粒受力分析,提出了流动流体中的固相颗粒运动速度计算模型,用于根据要求的固相颗粒流速计算所需要的液体流速。固液流速关系为

$$v_s = v_l - \sqrt{\frac{4}{3} d_s g \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \frac{1}{C_D}}, \quad \rho_s \geq \rho_l. \quad (4)$$

对于给定的地层砂粒径  $d_s$  以及期望设定的地层砂固相流动速度  $v_s$ ,首先使用方程(1)判断携砂临界流速,然后使用方程(4)计算所需要的液体流速  $v_l$ ,再使用 Alves 模型(3)计算所需要的气体流速  $v_g$  和产量。如果设定  $v_s = 0$ ,则计算得到的气体流速  $v_g$  即为携砂临界流速。反之,也可以使用上述组合模型判断给定的产气量能否携带地层砂,以判断井筒流动状况。

使用上述气液携砂临界流速模型采用本文试验条件进行计算,与试验结果对比发现,各条件下计算结果比试验结果普遍偏低 15% 左右。经修正后得到的临界流速模型,并经过温度和压力校正后可用

于实际产水气井的井筒携砂动态分析。

## 4 模型应用

### 4.1 涪北气田产水气井携砂临界流速预测

涪北一号气田为疏松砂岩气藏,气井产水且出砂严重,气井出砂粒度中值约为 0.07 mm。为了优化井筒举升系统参数及工作制度,需要准确预测单井携砂条件。利用本文的模型计算得到该气田部分井号(编号)临界携液产量和临界携砂产量分别约为  $(2.0 \sim 3.0) \times 10^4$  和  $(4.0 \sim 6.0) \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,如图 9 所示。实际产量高于此临界产量的气井,在地面出砂监测中有 90% 以上的气井观察到了地面出砂现象。

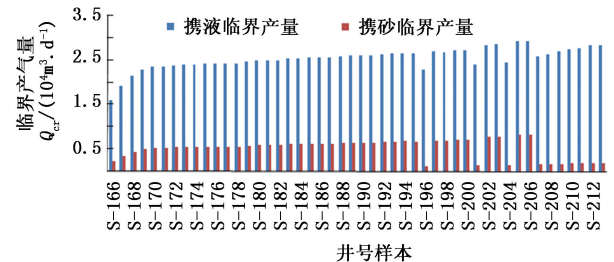


图9 涪北一号气田气水携砂临界产气量分布预测结果

Fig. 9 Predicted results of critical liquid-carrying and sand-carrying gas flow rate for Sebei gas filed

### 4.2 在产水气井综合协调图版中的应用

产水气井携砂临界流速的预测也应用在涪北一号气田的出水出砂气井新型综合协调曲线图版中,如图 10( $d$ 为油嘴直径, $D$ 为油管直径)所示。该图版在传统的 IPR 曲线、油管工作曲线、油嘴工作曲线等传统曲线的基础上,增加了临界携液曲线和临界携砂曲线。

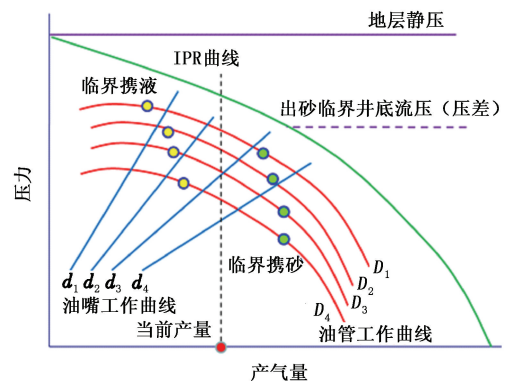


图10 考虑携液携砂临界条件的出砂出水气井新型综合协调曲线图版

Fig. 10 Synthesis coordination diagram for gas well with sand and water production

携砂曲线,其中给定油管直径下的气水临界携液和携砂产量是该图版的关键参数。利用该新型综合协

调图版可以判断实际产量条件下的井筒携液和携砂动态,或根据开采需求对气井的工作制度进行调整和工况预测。

## 5 结 论

(1)对于不产水出砂气井,气体携砂机制及现象相对简单,影响携砂动态的主要因素是气体流速及砂粒径。对于粒径小于0.3 mm的细砂,砂粒径对携砂临界流速影响较小;对于粒径大于0.3 mm的粗砂,携砂临界流速随砂粒径增大急剧升高。

(2)对于产水气井,气体流速和水气比是影响气水携砂动态的主要因素。随着水气比从零开始逐步增加,气液固三相流动形态在泥状流(无携砂能力)、环雾流和段塞流之间逐步转换。环雾流和段塞流才可能携砂。水气比越大,气液固三相流动流型趋近于同水气比下的气液两相流动。

(3)不产水的纯气井携砂相对容易。气井产水后不利于井筒携砂。对产水气井,在极低的水气比条件下,井筒携砂几乎是不可能的;井筒携砂随着水气比的升高而变得越来越容易,但比不产水时携砂条件苛刻。

(4)对于产水出砂气井,井筒携砂的基本条件是气体在达到临界携液流速后带动液相以一定的流速流动,而液相流速必须达到单相液体的携砂流速,从而最终能够携带包含在液相中的地层砂流动。

### 参考文献:

- [1] 董长银,栾万里,周生田,等. 牛顿流体中的固体颗粒运动模型分析及应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(5):55-59.  
DONG Changyin, LUAN Wanli, ZHOU Shengtian, et al. Analysis and application of model for solid particle movement in Newton fluid[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(5):55-59.
- [2] MAZUREK K A, CHALATURNYK R J, RAJARATNAM N, et al. Transport of fine sand from a wellbore[J]. JPT, 2002,41(4):53-61.
- [3] 李明忠,王卫阳,何岩峰,等. 垂直井筒携砂规律研究[J]. 石油大学学报:自然科学,2000,(24)2:33-35.

LI Mingzhong, WANG Weiyang, HE Yanfeng, et al. Experimental study on the performance of sand moving in vertical wellbore[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000,24(2):33-35.

- [4] 李爱芬,王士虎,王文玲. 地层砂粒在液体中的沉降规律研究[J]. 油气地质与采收率, 2001,8(1):70-73.  
LI Aifen, WANG Shihu, WANG Wenling. Study on settling rule of formation sand in the liquid fluids[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2001 8(1):70-73.
- [5] PIETER O. Sand transport and deposition in horizontal multiphase trunklines of subsea satellite developments [R]. SPE-25142-PA, 1993.
- [6] LI Songyan, LI Zhaomin, LIN Riyi, et al. Modeling of sand cleanout with foam fluid for vertical well[R]. SPE 120449-PA, 2010.
- [7] 杨肖曦,李松岩,林日亿,等. 泡沫流体携砂能力的数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(3):89-92.  
YANG Xiaoxi, LI Songyan, LIN Riyi, et al. Numerical simulation fro prop-carrying capacity of form fluid[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(3):89-92.
- [8] 张书平,王晓荣,樊莲莲,等. 气井携砂理论研究与应用[J]. 断块油气田, 2007,14(1):50-52.  
ZHANG Shuping, WANG Xiaorong, FAN Lianlian, et al. Study and application of sand-carrying theory in gas well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007,14(1):50-52.
- [9] COLEMAN S B. A new look at predicting gas well load up[J]. JPT, 1991,43(3):329-333.
- [10] BELFROID S P, SCHIFERLI W, ALBERTS G J N, et al. Prediction onset and dynamic behaviour of liquid loading gas wells[R]. SPE 115567, 2008.
- [11] TURNER R G. Analysis and prediction of minimum flow ratefor the continuous removal of liquids from gas wells [J]. JPT, 1969,21(11):1475-1482.
- [12] ALVES I N, KAZULOSHL M. Modeling annular flow behavior for gas wells[J]. SPE Production Engineering, 1991,6(4):435-440.

(编辑 李志芬)