

# 苏里格气田泡沫和井下工具类排水采气工艺研究现状

王瑞<sup>1,2\*</sup>, 张宁生<sup>1</sup>, 刘晓娟<sup>1</sup>, 陈洁<sup>3</sup>, 窦亮彬<sup>1</sup>

1 西安石油大学石油工程学院, 西安 710065

2 川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 西安 710018

3 西安交通大学数学与统计学院, 西安 710049

\* 通信作者, ruiwang\_01@outlook.com

收稿日期: 2016-07-23

国家自然科学基金(51374172), 陕西省教育厅科研计划项目(15JK1566) 和陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JQ5147) 联合资助

**摘要** 苏里格气田随着逐年开发, 低压低产井越来越多。此类井产能较差, 部分存在严重积液, 排水采气工艺已在该区块广泛应用, 但是各类工艺的参数优化, 以及不同类型、不同时期产水气井对各种工艺的适用性如何, 仍是急待解决的现实问题。该区块应用较多的是泡沫排水采气和井下工具类排水采气(速度管柱、雾化和涡流工具), 本文对其工艺原理、工艺应用、工艺优化与适用性分析和室内及现场实验研究现状进行了综述, 并提出了目前该领域研究需要关注和待解决的相关问题。

**关键词** 排水采气; 泡沫; 速度管柱; 雾化; 涡流工具

## 0 引言

苏里格气田低压低产气井产能普遍较差, 不能满足携液要求, 部分气井井底或井筒存在积液, 严重影响了气井连续稳定生产。为应对此问题, 排水采气工艺已在气田广泛应用。但不同类型产水气井对各种排水采气工艺的适用性, 以及如何提高现有排水采气工艺的理论分析精度和深度以解释苏里格气田实际生产中所出现的特有现象, 最终有针对性的优化各种工艺的设计参数, 并达到更好的增产效果是待解决的现实问题。

目前国内应用的排水采气工艺主要有泡排、速度管柱(连续油管和小直径管)、气举(气举、柱塞气举和球塞气举)、涡流、超声雾化和泵抽汲(有杆泵、电潜泵、螺杆泵、水力射流泵和气体加速泵)等。国外主要着眼于降低成熟排水采气工艺的成本, 以及发展单井排水与气藏工程相结合的治水技术<sup>[1]</sup>。在苏里格

气田, 近年来则形成了以泡沫排水采气为主, 速度管柱、柱塞气举和气举复产为辅, 以及发展雾化和涡流等新技术的系列排水采气工艺<sup>[2]</sup>。其中, 泡排、速度管柱、雾化和涡流井下工具排水采气工艺, 不涉及复杂的井口及地面动力设备, 且井下工具中没有机械运动部件, 排液原理都仅基于单纯的气液两相流动, 研究方法也相近, 适合集中进行分析。

苏里格气田应用较多的是泡沫排水采气和井下工具类排水采气(速度管柱、雾化和涡流工具), 本文对其工艺原理、工艺应用、工艺优化与适用性分析和室内及现场实验研究现状进行了综述, 并提出了目前该领域研究需要关注和待解决的相关问题。

## 1 文献调研简况

经文献调研发现, 国内排水采气工艺的研究始于1992年, 2005年和2015年前后文献量处于峰值, 现

引用格式: 王瑞, 张宁生, 刘晓娟, 陈洁, 窦亮彬. 苏里格气田泡沫和井下工具类排水采气工艺研究现状. 石油科学通报, 2016, 02: 241-256  
WANG Rui, ZHANG Ningsheng, LIU Xiaojuan, CHEN Jie, DOU Liangbin. Review of liquid unloading technology: Foam, velocity string, atomizing and vortex flow, for gas wells in the Sulige gas field. Petroleum Science Bulletin, 2016, 02: 241-256. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.020

今期刊论文数量仍在逐年增长(见图1),说明此方向仍是一个研究热点。国内的企业研究单位主要有:西南油气田公司采气工程研究院、长庆油田公司油气工艺技术研究院和中国石油勘探开发研究院。代表性研究人员有:白晓弘、黄艳和曹光强等。国内研究高校主要有西南石油大学李颖川教授团队和中国石油大学(北京)。国外高校有University of Tulsa等。研究涉及的排水采气工艺主要有:泡排、气举、速度管柱、涡流和雾化5种。涉及到的机理研究主要有临界携液流量和产水气井井底节点分析等。

排水采气相关专利中,涉及到的工艺主要有:泡沫、柱塞气举、涡流、雾化和速度管柱等。排水采气相关的国家自然科学基金主要针对气井的携液机理研究。软件著作权主要针对排水采气工艺的优选和工艺设计。成熟的排水采气工艺行业标准主要有泡排和气举。

为满足苏里格气田气井排水系统工艺技术需求,长庆油田在2013-2014年期间引进大量研究人员,开展了深入的研究工作,形成数量众多的专利。

## 2 泡沫排水采气工艺优化研究现状

泡沫排水采气工艺的基本原理为:起泡剂加入后,气井内的液柱将变为泡沫柱,形成稳定的充气泡沫(泡沫由充气泡、泡膜和液沟构成),这样就降低液体

表面张力,改变井底及油管内的气液分布结构,减少油管内液相滑脱损失,降低油管内混合流体的相对密度,减小井底回压,减少井筒积液,从而增加气井产气量,延长气井后期生产时间,提高采收率。

对泡沫排水采气工艺,研究的核心为起泡剂及其加注方式。起泡剂的效应有4种<sup>[3-4]</sup>:①分散效应。降低液相表面张力,液滴在相同动能条件下更易分散;②泡沫效应。使水和气形成水包气的乳状液,这样将液柱变为泡沫柱,可以减少井底回压、减少水的滑脱,使气和水同步流出井口,而且因为气泡壁形成的水膜较厚,泡沫携液量较大;③增加鼓泡高度。加入发泡剂后增加了泡沫的稳定性,使泡沫柱的增高数倍;④促进流态的转变。表面张力下降,促使水相分散。起泡剂的性能参数包括表面张力、起泡力、动态性能(起泡高度和携液能力)和热稳定性等。使用的仪器主要有罗氏米乐泡沫仪和动态性能评价仪。Jiang Yang等(2013)认为泡沫柱测试比搅拌法更适合评价泡排剂的动力表面活性<sup>[5]</sup>。关于新型泡排剂,武俊文和雷群等(2016)通过加入纳米二氧化硅球作为固态稳泡剂,形成了耐高温、高矿化度和凝析油的泡排剂<sup>[6]</sup>。李兆敏等(2015)也开展了纳米颗粒稳定泡沫压裂液的研究<sup>[7]</sup>。泡排剂的加入方式严重影响其工艺效果,已形成多项加注装置专利<sup>[8-10]</sup>。

工艺气井井筒内泡沫流的流动特性是分析泡排工艺携液机理和工艺优化研究的基础,对其的分析多

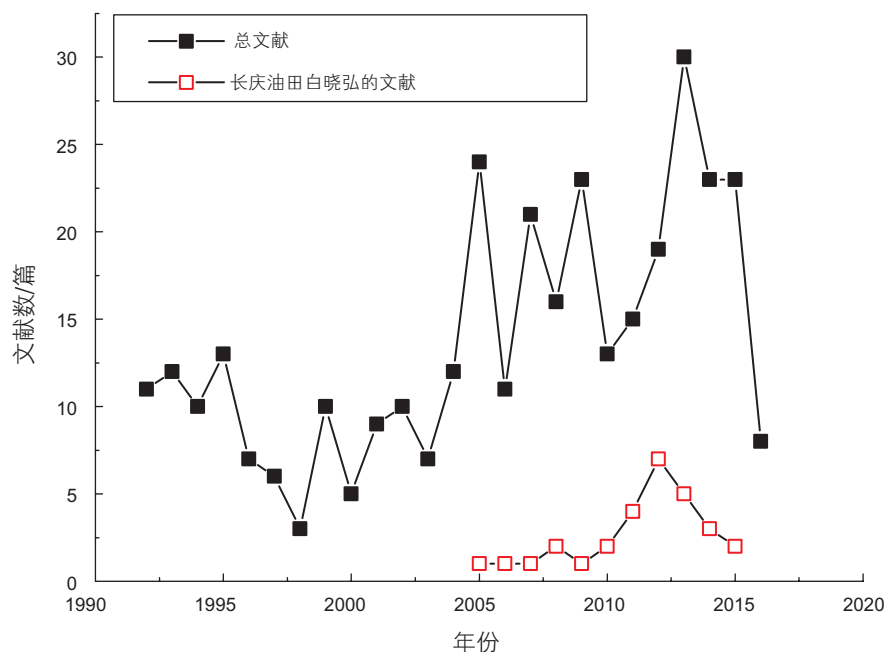


图1 1990-2016年所发表的排水采气相关论文数

Fig. 1 The published literatures in 1990-2016

是通过理论计算和在模拟井筒上进行实验来完成的。M. Solesa等(2006)认为研究泡排工艺的关键在于如何模拟泡排剂注入后井筒内压力梯度的变化。他计算发现若泡排井筒内多相流体处在段塞流区,泡排效率较低。若多相流体在泡沫区,因不存在两相边界,携液效果最好<sup>[11]</sup>。王燕和周芳德等(2008)年在模拟管柱中观测了不同浓度和气液比下泡排剂对两相流态的影响,发现管柱内流态由弹状流转变成了泡沫两相流<sup>[12]</sup>。A. T. Van Nimwegen等(2016)在有机玻璃井筒上进行了泡沫排水采气模拟实验。观察发现,表面活性剂可以增加高气流速时的井筒压力梯度,减小低气流速时的井筒压力梯度。而且在高浓度表面活性剂时,搅动流不再出现,环状流直接转变为段塞流<sup>[13]</sup>。泡排在水平井上效果欠佳,程金金和李颖川(2014)针对此问题,进行了水平井的泡沫排水采气模拟实验(图2),发现泡沫流型与泡排剂浓度、进液量和气体流速都有关系,

并用实验回归建立了泡沫流压降模型<sup>[14]</sup>。

泡排工艺的参数优化,主要是确定起泡剂的类型、用量、浓度、加注方式和制度。常将起泡剂性能评价、泡沫流动特性、临界携液模型和气井流入流出动态节点分析结合起来进行。W. Jelinek等(2005)认为泡排井的携液分析应将临界流量模型和节点分析结合起来进行<sup>[15]</sup>。M. Solesa等(2006)推荐的泡沫排水采气用节点分析流程如图3所示<sup>[11]</sup>。B.P. Reice等(2007)提到泡排并非在所有井上都有效果,应注重井的诊断、泡排剂的选择和恰当的生产管理<sup>[16]</sup>。H. Li等(2007)测定了表面张力和泡沫密度随表面活性剂浓度的变化,并将其与临界携液流速模型和井筒流入动态结合,以最大产气量和最少泡排剂用量为目标建立了泡排工艺优化模型<sup>[17]</sup>。M. Farooq等(2015)分析了泡排井工艺现场问题,提出应注意缓蚀和防垢剂与泡排剂的配伍性、优化井口装置、减小回压、优化不同地层压力下的注入



图2 泡沫排水采气模拟实验结果<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Simulate experiment results of foam unloading liquid<sup>[14]</sup>

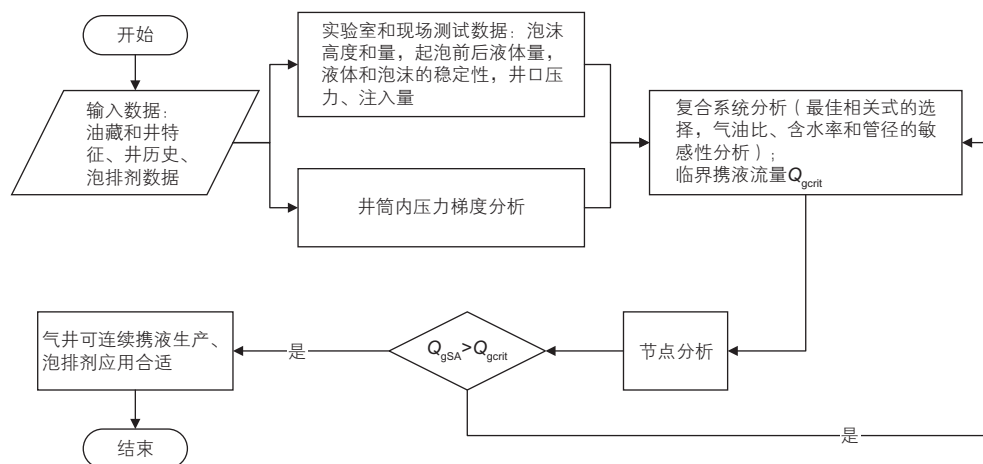


图3 泡排工艺井节点分析流程图<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Nodal analysis of foam unloading liquid technique<sup>[11]</sup>

速度和与其它工艺相结合等4点认识<sup>[18]</sup>。

可见,对泡沫排水采气工艺,泡排剂的性能评价研究较多,但井筒内泡沫流的流态、持液率和压降等流动特性及泡排剂的用量和浓度、气井产气量和水气比对其的影响研究还不充分。泡排工艺的优化常根据经验进行,缺少可靠的理论依据,如节点分析、泡沫管流和渗流耦合等。

### 3 速度管柱等工具类排水采气工艺优化研究现状

#### 3.1 速度管柱排水采气工艺

速度管柱(Velocity String)排水采气工艺的基本原理为:在原有生产管柱内下入小直径油管作为生产管



图4 长庆油田速度管柱排水采气施工现场图  
Fig. 4 Working yard of unloading liquid using velocity string in Changqing oil field

柱,减少液体滑脱,提高气井排液能力,使气井恢复自喷生产<sup>[19]</sup>。

速度管柱排水采气的井下工具为速度管柱。具体又可分为挠性管(连续管)速度管柱、连接管速度管柱和微管柱<sup>[20]</sup>。与常规小尺寸油管相比,速度管柱强度相对较高,可下入较深的井。此工具施工现场图见图4。国内相关专利有橇装式小直径管和机抽-速度管复合装置<sup>[21-22]</sup>等。

速度管内的气液两相流动特性是分析速度管柱工艺携液机理和工艺优化研究的基础。相关管流理论模型研究就是在常规井筒内气液两相流模型的基础上通过减小管径进行的,与优选管柱排水采气工艺相同<sup>[23-24]</sup>。S.A.Putra(2002)认为,速度管柱排水采气的临界流速可用Chen-Brill段塞-搅动流动边界。室内管流模拟实验有在气井携液模拟实验装置上,使用小直径模拟井筒进行的(图5),没有考虑速度管-油管环空间的流动。

速度管柱排水采气工艺优化,主要是确定合适的管径、下放位置和采气方式。P. Oudemans(2007)认为,速度管柱的尺寸是工艺成败的关键,可通过节点分析来选择,需准确计算速度管柱内和速度管柱-油管环空内的气液两相流压降<sup>[26]</sup>。赵彬彬和白晓弘等(2012)根据现场试验,分析了速度管柱排水采气工艺在苏里格气田的适用性,优选出 $\varnothing 38.1$  mm连续管作为速度管柱,该工艺可解决产气量大于 $0.3$  万  $\text{m}^3/\text{d}$  气井的积液问题<sup>[27]</sup>。Juan Quintana等(2015)通过气井流入流出动态节点分析,结合临界携液模型来确定速度管柱尺寸<sup>[28]</sup>。相关工艺优化研究未考虑速度管柱排水采气的方式,如速度管柱或速度管柱-油管环空生产方式等(图6)。

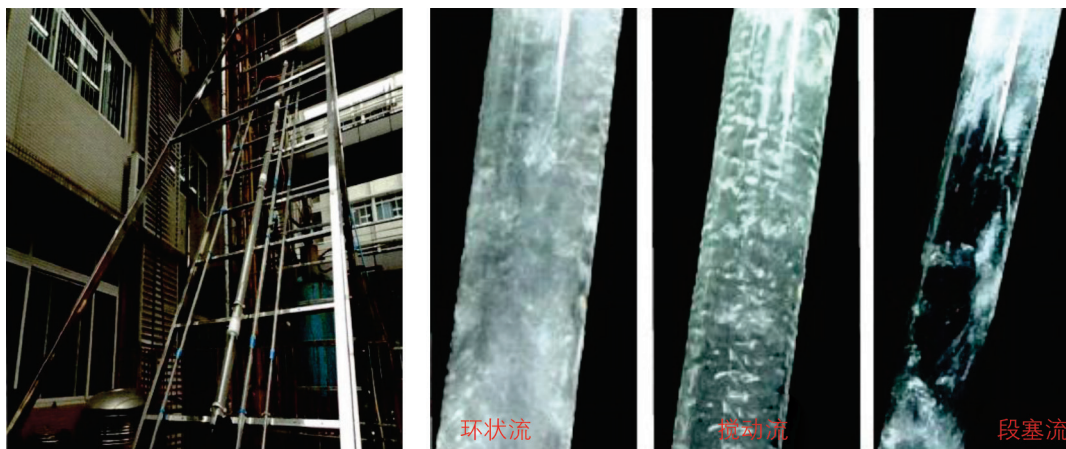


图5 速度管柱排水采气模拟实验<sup>[25]</sup>  
Fig. 5 Simulate experiment results of unloading liquid using velocity string<sup>[25]</sup>

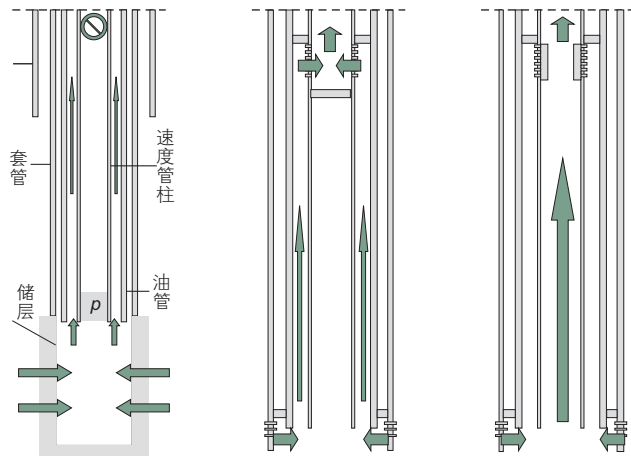


图6 速度管柱排水采气不同的生产方式<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Producing pattern of unloading liquid using velocity string<sup>[26]</sup>

可见，速度管柱排水采气工艺，相关理论模型可在常规井筒内气液两相流模型的基础上通过减小管径来实现。有的室内实验就是使用小直径模拟井筒来模拟气井携液，不涉及速度管-油管环空间的流动。

### 3.2 雾化排水采气工艺

雾化(Atomizing)排水采气工艺的基本原理为，使气流中的液滴雾化，即让其变为更小的液滴，从而提高气井的携液能力，达到排水采气的目的。

雾化排水采气的井下工具为雾化喷嘴。分为气泡(流)雾化、直射雾化、离心旋流雾化和超声波雾化喷嘴等多种<sup>[29]</sup>。其中，直射雾化喷嘴与井下节流器有一定的相似性，使用较多。杜坚和秦崑等(2004)提出可以在井下建立人工功率超声波场，通过功率超声对地层积水的空化作用，使地层积水局部的温度和压

力升高实现快速雾化<sup>[30-31]</sup>。有关雾化器的专利已有多项<sup>[32-35]</sup>。

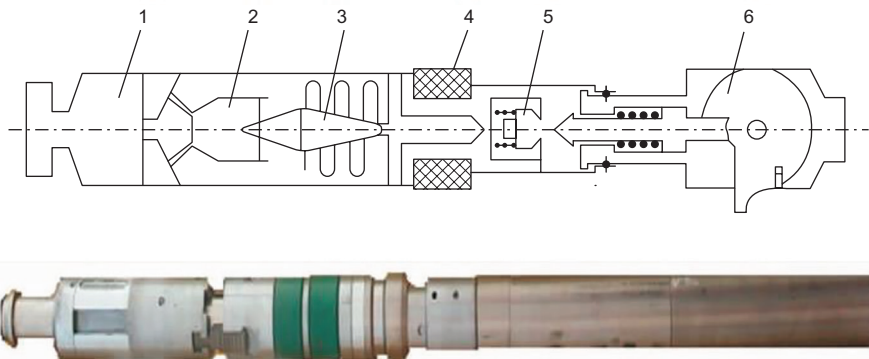
加装雾化喷嘴后井筒内的气液两相流动特性，是分析雾化工艺携液机理和工艺优化研究的基础，具体涉及气液两相变径管流或节流。李虎和李增亮(2009)用流体力学软件Fluent，对雾化效果进行了仿真研究，证明了喷嘴能减小液滴粒径<sup>[36]</sup>。相关的室内模拟实验和CFD数值模拟还较少，更多只是现场直接的应用<sup>[29]</sup>，以及其它工程中喷嘴雾化后液滴的粒度分析研究(图8)。文献中还有雾化技术在医药、农业、锅炉和水雾降尘等领域的实验研究<sup>[37-39]</sup>。

喷嘴雾化排水采气工艺的优化，主要是确定喷嘴的尺寸、结构和下放位置。此方面研究较少，更多的是现场应用的分析。

### 3.3 涡流排水采气工艺

井下涡流(Swirl/Vortex Flow)排水采气的工艺原理为，通过改变流体介质流体的运动方式，使原有的垂直向上紊流流态变为可使流体流动截面减小的螺旋向上的涡旋层流，这可有效降低油管的流动摩阻与滑脱损失，充分依靠气体自身膨胀能量提高流体的携液举升能力<sup>[41]</sup>。涡流原理的应用不仅仅在排水采气工艺上，在钻井过程中的水平段岩屑携带、压裂中支撑剂运移、储运中的油气水混输、气液分离及两相计量<sup>[42]</sup>、管道弯曲处减压<sup>[43]</sup>和其它工程中的固体颗粒的管道输送等都有涉及。

涡流排水采气的井下工具为涡流工具，依据工作原理不同又分多种。涡流“起涡方式”文献中有螺杆式<sup>[44]</sup>、叶片式<sup>[45]</sup>、飞轮式<sup>[46]</sup>、漏斗式<sup>[42]</sup>和分流式<sup>[47]</sup>等，见图9。长庆油田使用的是螺杆式<sup>[48]</sup>，具体由打



注：1 雾化喷嘴总成，2 交叉分离器，3 锥体分离器，4 胶筒密封装置，5 打捞装置，6 卡钉器

图7 长庆油田的雾化排水采气工具<sup>[29]</sup>

Fig. 7 Tool of unloading liquid using atomizer in Changing oil field<sup>[29]</sup>

捞头、绕流器、导流筒和座落器 4 部分组成,其工具实物见图 10。作业时用钢丝或测井电缆连接在涡流工具打捞头上部,然后缓慢、平稳地下入油管,到设计位置时,上提钢丝,卡簧弹开,下放钢丝,工具沿油管下滑,接箍挡环在油管接箍处自动卡住,完成涡流工具的安装<sup>[41]</sup>。其它的相关专利有螺旋流、多螺线涡流和双向卡瓦涡流等<sup>[49-51]</sup>。

加装涡流工具后,井筒的气液两相流动为螺旋分层流,其流动机理十分复杂,给分析其携液机理并进行工艺优化研究造成较大困难。对用于制冷或制热效应的“涡流管”的研究<sup>[53]</sup>虽与此有联系,但本质不同。G. Falcone(2003)在分析“漏斗型”的气液旋转分离器时,使用了相关环膜流的流动模型<sup>[42]</sup>。Ahsan J. Ali(2005)进行了涡流工具排水采气室内模拟实验,获

得了气体流量与液体流量、持液率、井筒压降和井口压力间的关系曲线,发现涡流工具适用于低压气井,它使气井临界流速降低,压降减小了 17%,同时提出涡流工具所能影响或控制的流动区域还有待分析<sup>[54]</sup>。Jacobssons S 等(2006)为了改进天然气分离洗涤器的设计,进行了一系列涡流管内流体流动实验和 CFD 数值模拟,发现数模无法模拟涡流管出口处的复杂流动<sup>[46]</sup>。Surendra M 等(2009)分析了涡流在排水采气、砂泥传输对管道弯曲段的冲蚀和湿气计量中的应用,并进行了相关模拟计算<sup>[55]</sup>。Meher Surendra(2009)用 CFD 初步模拟了气液两相涡流流动过程,相关初始参数取自 G. Falcone(2003)和 Falcone. G.(2006)的实验结果<sup>[56]</sup>。Texas A&M University 的 BOSE R 等人,进行了涡流排水采气室内模拟实验研究<sup>[44]</sup>(图 11)。国内,王

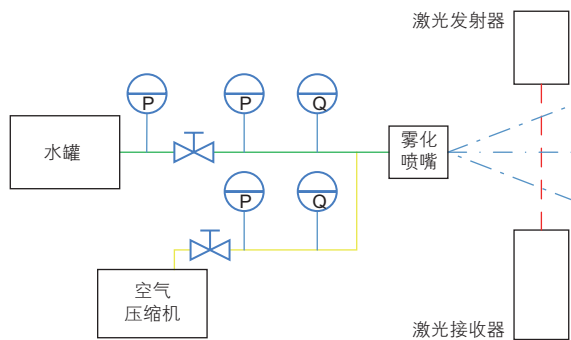


图 8 雾化器室内实验<sup>[39-40]</sup>

Fig. 8 Laboratory experiment of atomizer<sup>[39-40]</sup>

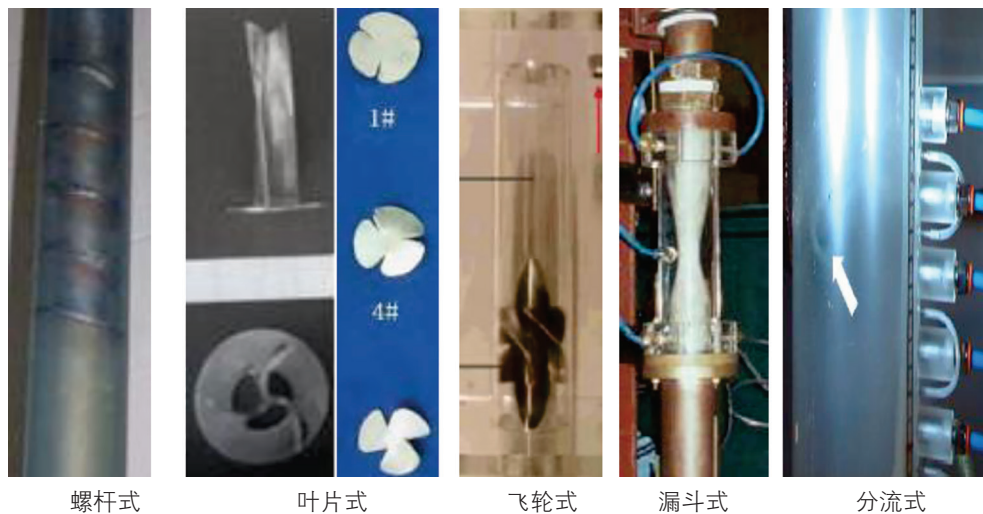


图 9 5 种涡流起涡方式

Fig. 9 Five types of swirl flow tool



注: 1 打捞头, 2 绕流器, 3 导流桶, 4 座落器, 5 螺旋带, 6 出口口, 7 挡环, 8 卡簧轴销, 9 卡簧

图 10 长庆油田的井下涡流排水采气工具<sup>[52]</sup>

Fig. 10 Swirl flow tool from Changqing oil field<sup>[52]</sup>



图 11 Texas A & M University 涡流排水采气模拟实验<sup>[44]</sup>

Fig. 11 Simulate experiment of unloading liquid using swirl flow in Texas A & M University<sup>[44]</sup>

树立等(2013)出于研究螺旋输送的目的,开展了水平圆管气液两相螺旋流实验<sup>[45]</sup>,但采用的是类似风扇一样的叶片“起涡”。李颖川和徐建宁等进行了涡流排水采气工艺的室内实验,如图 12 和图 13 所示。

涡流工具排水采气工艺优化,主要是确定涡流工具的结构、下放深度和级数。近 2 年,国内相关单位对此进行了大量研究,主要是集中在数值模拟方面,涉及涡流工具的现场应用效果评价<sup>[41, 59]</sup>、室内模拟实验<sup>[60]</sup>和 CFD 模拟及优化工具结构<sup>[61-63]</sup>等,研究发现涡流工具的螺旋角度是影响工艺效果的关键参数<sup>[64-65]</sup>。如,冯崔菊等(2013)用 Fluent 软件进行仿真计算,分析天然气流速、井底含水率和涡流工具结构对其排液效果的影响<sup>[61]</sup>。需注意,涡流工具具有气液分离的作

用,将井内气液分离后,如果是多层合采,还有用油套环空生产,油管收集产层积液后,再自动注入产层下一层的做法<sup>[66]</sup>,思路新奇,值得关注。

可见,涡流排水采气工艺的携液理论模型涉及气液两相螺旋分层流,其流动机理复杂,相关室内实验研究不多。涡流工具排水采气工艺优化,目前国内主要是集中在数值模拟以及现场应用方面。

#### 4 不同类型排水采气工艺的适用性研究现状

关于排水采气工艺适应性的选择,通常是基于现场工艺效果统计和经验。Fitrah Arachman(2004)比较了气举、间歇生产和速度管柱 3 种工艺相场的应用效

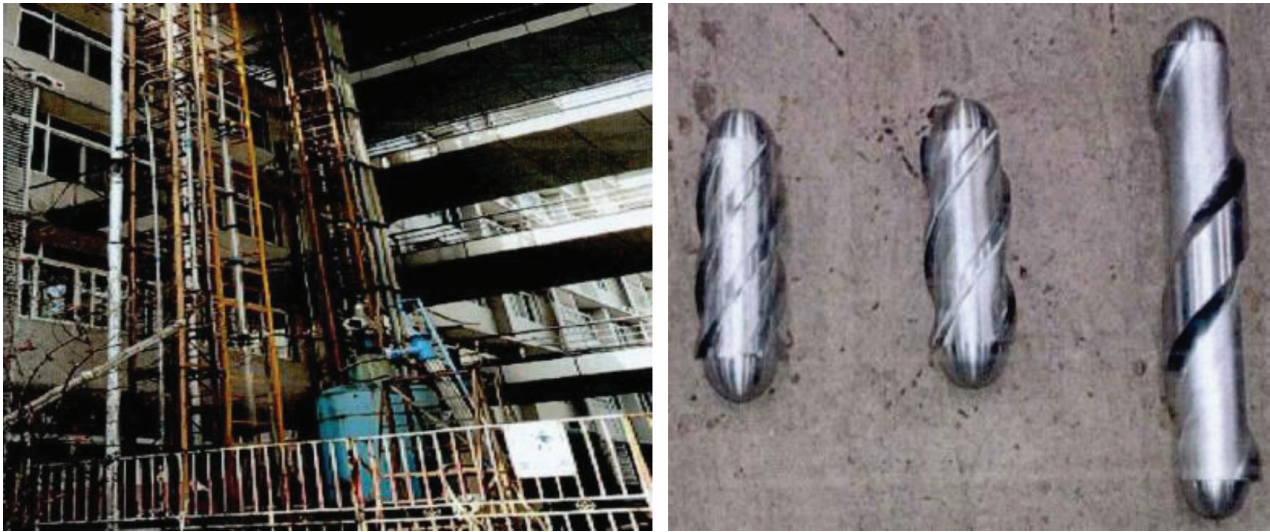


图 12 西南石油大学涡流排水采气模拟实验<sup>[57]</sup>

Fig. 12 Simulate experiment of unloading liquid using swirl flow in Southwest Petroleum University<sup>[57]</sup>



图 13 西安石油大学涡流排水采气模拟实验<sup>[58]</sup>

Fig. 13 Simulate experiment of unloading liquid using swirl flow in Xi'an Petroleum University<sup>[58]</sup>

果<sup>[67]</sup>。曲林<sup>[68]</sup>(2004)提了的四川气田气井排水采气工艺的选型方法,根据地层压力、日产气量和日产水量3项参数分析(表1)。黄艳(2008)<sup>[69]</sup>和曲林(2004)<sup>[68]</sup>提出了针对四川盆地的几种常用排水采气工艺适应性及其技术界限,结合文献<sup>[3]</sup>中的相关表述,汇总列于见表2。李文魁(2009)根据产气量和气水比2项参数提出了涪北气田排水采气优选控制图<sup>[70]</sup>。针对苏里格气田,张书平(2005)<sup>[71]</sup>提出低低压低产气井可采用优选管柱、柱塞气举、泡排、产水井复产等单一排水采气工艺,以及常规泡排接替小直径管复产的复合排水采气工艺。

以上都是一些较简单的选择标准,巩艳芬(2007)<sup>[72]</sup>认为这些方法“考虑问题角度单一,停留在定性分析基础上”,她将TOPSIS方法应用到排水采气技术的优选中,充分利用原始数据信息,使排序结果定量反映不同评价对象的优劣程度。郑新欣(2008)<sup>[73]</sup>针对目前比较常用的泡排、气举、优选管柱、机抽、电泵和射流泵等6种排水采气工艺,确定了以工艺成本、投资回收期 and 最短作业周期为主的排水采气工艺方法优选的经济指标体系和以产气量、产水量和举升效率为主的排水采气工艺方法优选的技术指标体系,并根据模糊评价理论建立了以模糊一致矩阵为基础的排水



表 1 四川气田气井排水采气工艺的选型方法<sup>[68]</sup>Table 1 Selection of unloading liquid technologies in Sichuan gas field<sup>[68]</sup>

日产水量/(m <sup>3</sup> /d)	≤100		>100	
日产气量/(万 m <sup>3</sup> /d)	≤1.5	>1.5	≤1.5	>1.5
地层压力>10 MPa	中压、小水、小气井 泡排	中压、小水、大气井 泡排	中压、大水、小气井 气举	中压、大水、大气井 气举
地层压力≤10 MPa	低压、小水、小气井 深抽	低压、小水、大气井 气举-泡排	低压、大水、小气井 电潜泵	低压、大水、大气井 气举-泡排

表 2 几种常用排水采气工艺适应性及其技术界限

Table 2 Applicability of unloading liquid technologies

出处	工艺类型	适应条件				
		井深/m	地层温度/°C	气水比/(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	产水量/(m <sup>3</sup> /d)	其它
黄艳(2008) <sup>[69]</sup>	泡排	≤5 000	≤120	180~1 400	≤100	液烃≤50%，矿化度≤150 g/L，间弱喷井
	优选管柱			≥250	≤100	自喷，小水量
	气举	≤5 000			50~350	水淹井复产，助排及强排水
曲林(2004) <sup>[68]</sup>	泡排	≤3 500		适宜	120	
	气举	≤3 500		适宜		
李仕伦 <sup>[3]</sup>	泡排	≤3 500	≤120		≤100	气流速度≤0.1 m/s，液烃≤30%，矿化度≤10 g/L

采气工艺优选模型。

可见，目前对排水采气工艺的适用性研究，各种工艺适用性准则划分较为粗糙，只涉及到部分产能和储层参数，如产气量、水气比、井深和地层压力等，还未落实到最终的携液和增产效果上，工艺种类的选取更多还是凭借经验进行。

## 5 排水采气工艺实验装置和方法研究现状

因为气井携液及排水采气工艺机理涉及到的气液两相管流较复杂，如果没有实验观察和验证，理论模型计算的结果可信度低，所以很有必要对研究的实验手段进行调查。

### 5.1 室内气井携液和排水采气模拟实验

室内气井携液和排水采气模拟实验是在模拟井筒内，用模拟排水采气井下工具以空气和水为流体介质，进行携液和排水采气工艺实验。它的优势在于透过有机玻璃模拟井筒可直观的观察两相的流态和液滴、液膜的形状及运动轨迹，以用于理论计算。缺点则在于模拟井筒承压能力有限，特别是其长度与真实气井的

井深差别很大。调研文献中及相关研究单位的实验装置信息如表 3 所示，实物图如图 14 所示。

可见，排水采气工艺优化的室内实验研究多是在气井携液模拟实验平台(图 7-9)的基础上，加装相应的工具管段进行的，安装位置多在模拟井筒(直垂直或倾斜段)底端。模拟排水采气工具，不必与直实井下工具一致，而只要原理相同即可，也不用考虑与真实井况类似的工具下放和提取问题。

对于模拟气井井筒，其材质为有机玻璃和钢质，以有机玻璃居多。井筒放置有垂直、水平和倾斜 3 种方式，以垂直居多。井筒的尺寸多为  $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ m}$ 。玻璃井筒所配气泵压力 1~3 MPa 排量，45~653 m<sup>3</sup>/h，水泵排量 0.6~30 m<sup>3</sup>/h，钢质井筒所配气泵压力 1~3 MPa，排量 45~653 m<sup>3</sup>/h，水泵排量 0.6~30 m<sup>3</sup>/h。对持液率的测量，普遍的计量方式是测量井筒里的液体量或气、液流量，即所得为整个井段的体积持液量或质量持液率，模拟井筒通常为单个圆管，安装有套管和模拟储层装置的较少，特别是模拟储层，如 G. Falcone(2007)所提<sup>[86]</sup>，这是模拟井筒实验普遍存在的缺憾。

对泡沫排水采气，通常的室内实验是在较短的模拟管柱内进行泡沫性能动态评价实验。泡排剂由模拟

表3 文献中的相关室内气井排水采气和携液模拟实验装置

Table 3 Experimental apparatus of unloading liquid from literatures

单位和装置名称	工艺	模拟井筒材质、放置和结构等	气、水泵压力和排量参数
西南石油大学, 排水采气装置 — [14, 25, 57, 74-75]	泡排 速管	有机玻璃, 垂直、倾斜和水平放置, $\phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ m}$ , 有液膜分离装置和套管	气泵 3 MPa, 144 m <sup>3</sup> /h; 水泵 1 MPa, 0.6 m <sup>3</sup> /h
西南石油大学, 排水采气装置二 [74-75]	涡流	钢制, 垂直放置, $\phi 50 \text{ mm} \times 18 \text{ m}$	水泵 8 MPa, 12 m <sup>3</sup> /h
西安交通大学, 石油工程多相流实验 系统 [76]	雾化	有机玻璃, 垂直、倾斜和水平放置, 内径 65 mm, 环路, 有流型识别仪 两相流量 计和持液率仪	气泵 360 m <sup>3</sup> /h; 压力 2.5 MPa; 水 泵 30 m <sup>3</sup> /h
中国石油, 涡流模拟可视化装置 [77]	涡流	有机玻璃, 垂直放置	气泵 30 m <sup>3</sup> /h, 气瓶供气; 水泵 1.5 m <sup>3</sup> /h, 1.0 MPa
中国石化, 定向井泡排模拟井筒实验 装置 [78]	泡排	有机玻璃, 倾斜放置, 垂直倾斜两段, 有 恒温套筒	
川庆钻探, 可视化定向井气液流态井 筒模拟装置 [79]	泡排	有机玻璃, 倾斜放置, 有机玻璃柔性管连 接	
江苏华安石油仪器厂, 高压泡排剂动 态评价仪	泡排	透明高分子制, 垂直放置, $\phi 19/63 \text{ mm} \times 3.14 \text{ m}$	气泵 0.6 m <sup>3</sup> /h, 2.0 MPa; 水泵 0.1 m <sup>3</sup> /h
江苏华安石油仪器厂, 泡排剂动态评 价仪	泡排	透明高分子制, 垂直放置, $\phi 50 \text{ mm} \times 3.14 \text{ m}$	气泵 0.3 m <sup>3</sup> /h, 0.3 MPa; 水泵 0.01 m <sup>3</sup> /h
西安石油大学, 涡流排水采气装 置 [58, 80]	涡流	有机玻璃、钢制, 垂直放置, $\phi 62 \text{ mm} \times 10 \text{ m}$	气泵 6 MPa
Texas A & M University, 涡流排水采 气装置 [44]	涡流	有机玻璃, 垂直放置	
Texas A & M University, Vortex Flow LLC 涡流排水采气装置 [54]	涡流	PVC, 垂直放置, $\phi 2 \text{ in} \times 125 \text{ ft}$	
Imperial College, 气液分离计量装 置 [42]	雾化		
Delft University of Technology, 泡沫排 水采气装置 [13]	泡排	有机玻璃, 垂直放置, $\phi 50 \text{ mm} \times 12 \text{ m}$	
西安石油大学, 垂直携液装置 [81]	携液	有机玻璃, $\phi 50 \text{ mm} \times 14 \text{ m}$	气泵 1.3 MPa, 400 m <sup>3</sup> /h; 水泵 1.6 MPa, 6.3 m <sup>3</sup> /h
University of Tulsa, 排水采气装置 — [82]	携液	有机玻璃, 倾斜 60°~80° 放置, $\phi 76 \text{ mm} \times 18 \text{ m}$	气泵 653 m <sup>3</sup> /h(40 m/s); 水泵 1.63 m <sup>3</sup> /h(0.1 m/s)
University of Tulsa, 排水采气装置二	携液	有机玻璃、钢制, 垂直并列放置, $\phi 40/50 \text{ mm} \times 168 \text{ m}$	气泵 135 m <sup>3</sup> /h(30 m/s); 水泵 0.2 m <sup>3</sup> /h(0.05 m/s)
Texas A & M University, 排水采气装 置 [83]	携液	钢制, 垂直放置, 有套管、有模拟储层	
SPE NAM, 排水采气装置 [84]	携液	有机玻璃, 垂直放置, $\phi 20 \text{ mm} \times 3 \text{ m}$	气泵 45 m <sup>3</sup> /h(40 m/s); 水泵 0.1 m <sup>3</sup> /h(0.09 m/s)
Louisiana State University, 排水采气 装置 [85]	携液	有机玻璃, 垂直放置, $\phi 50 \text{ mm} \times 42 \text{ m}$	气泵 254 m <sup>3</sup> /h(36 m/s); 水泵 2.2 m <sup>3</sup> /h(0.31 m/s), 0.6 MPa

油套环空加入,不再涉及专门的工具,即目前的研究对泡沫流的流动特性,如流态和压降等关注较少。对工具类排水采气:①速度管柱相关室内实验中,仅完全用不同尺寸的小管径有机玻璃管来模拟速度管柱(图5),未考虑速度管柱-油管的环空问题;②雾化排水采气室内实验中,多进行经喷嘴雾化后液滴的粒度分析(图8),未见有在室内模拟井筒进行模拟采气实验的,可能因为雾化要求气压较高,模拟井筒无法承受。对室内实验用雾化器,可用有机玻璃加工成拉瓦尔管进行模拟;③涡流排水采气室内实验中,有利用多种起涡原理加工成的简易工具装入井筒进行模拟实验的(图11-13)。

## 5.2 实验气井或现场工艺井的实验

实验井实验即在干井上进行气井携液和排水采气

实验,它的优点是井身结构与真实井相同,特别是井深,也可测井筒内压力和温度沿井身的分布。缺点是,无法观察两相流态,持液率沿井身的分布也不可测。国内相同采油采气实验井的信息见表4。

可见,国内实验井的建设很少,多出于井控研究的目的,基本都为直井。西南油气田分公司建设有采气工艺模拟井,但还未见详细介绍。也没有在实验井上进行的排水采气工艺研究的报道。

对于实验井上的排水采气实验,所用井下工具与真实排水采气工具完全相同。

需注意,目前无论气井携液、排水采气室内模型实验还是实验井平台,一个共同突出的问题是,都无法准确模拟储层中气-液两相流动与井筒中两相流动通过井底节点的耦合,此问题还需深入研究。

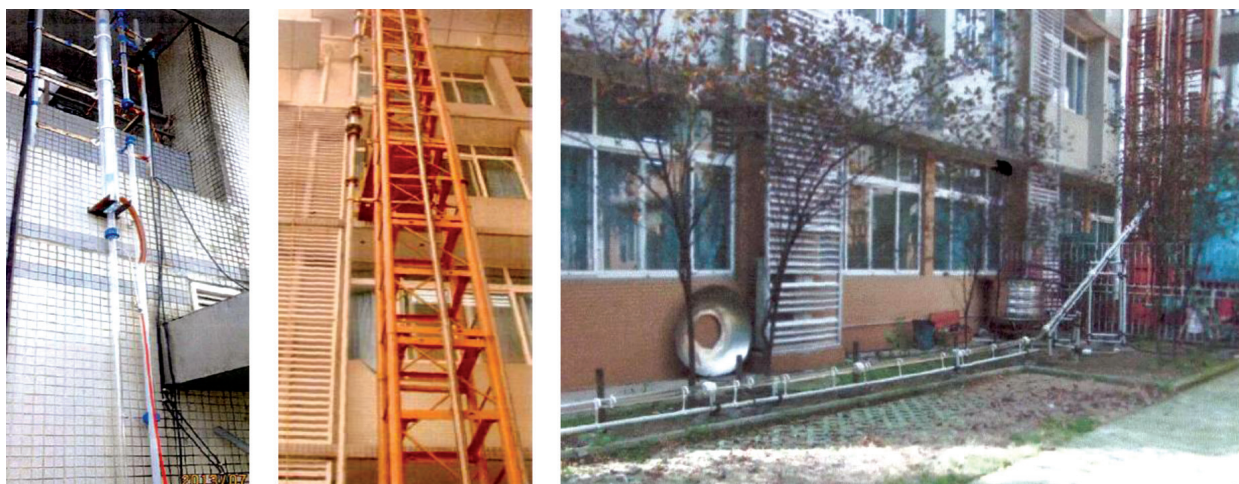


图14 西南石油大学的垂直、水平和倾斜排水采气实验装置<sup>[74-75]</sup>

Fig. 14 Experimental apparatus of unloading liquid from literatures from prof. Li Yingchuan<sup>[74-75]</sup>

表4 文献中的采油采气实验井信息

Table 4 Experimental wells of unloading liquid from literatures

单位	年份	井身结构	实验井用途	备注
石油大学、中原油田 <sup>[87-89]</sup>	1994	直井, 井深1 003 m	自喷、气举和有杆泵等人工举升; 井控、压井、流动摩阻和钻井液性能实验; 井下工具测试	套管注入油、气、水; 气包井内注气至70 MPa, 再经支管进入主井筒, 模拟储层气侵
延长油田井下作业公司 <sup>[90]</sup>	2008	直井	测井模拟, 测井设备校验	无注入流体
西南石油大学、西南油气田 <sup>[91]</sup>	2007		采气工艺模拟	测控系统设计, 气15 MPa, 3万 m <sup>3</sup> /d, 水220 m <sup>3</sup> /d
渤海钻探工程技术研究院 <sup>[92]</sup>	2009	直井	井喷和井控模拟	调研了国内外井控模拟井, 先向储层注气再反喷

## 6 结论

综上所述,目前所应用的排水采气工艺种类虽多,但多局限在试剂评价和工具的现场试用,缺少相应室内模拟实验和理论计算分析,这会造成部分工艺使用不当,甚至导致排液效果不佳,具体问题有:

(1) 泡沫排水采气方面。泡排剂的性能评价研究较多,但井筒内泡沫流流动特性及影响因素的研究还不充分。泡排工艺的优化常以经验进行,缺少可靠的理论分析依据,如节点分析、泡沫管流和渗流耦合等。

(2) 井下工具类排水采气方面。①速度管柱理论建模可通过减小常规井筒内气液两相流模型里的管径参数来实现。室内实验有用小直径模拟井筒进行的,但还未涉及速度管-油管环空间的流动,即相关工艺优化研究未考虑速度管柱排水采气的方式;②雾化排水采气。加装雾化喷嘴后井筒内的气液两相流动为气液

两相变径管流或节流,相关携液机理和工艺优化的室内模拟实验和CFD数值模拟研究还较少,更多只是工具的现场直接应用;③涡流排水采气。携液理论模型涉及到的为气液两相螺旋分层流,其流动机理复杂,相关室内实验研究不多,其工艺优化目前国内也主要集中在数值模拟方面。此外,这3种工具类排水采气工艺相关室内模拟实验多在直井筒中进行,没有考虑不同井型的影响。

(3) 各种排水采气工艺的适用性准则划分较为粗糙,只涉及到部分储层和气井产能参数,未落实到最终的携液和增产效果上,工艺种类的选取更多还是凭借经验进行。

(4) 气井排水采气工艺的室内模拟实验研究,目前主要集中在泡沫性能动态评价和涡流工艺上,水平和倾斜放置的模拟井筒以及安装有套管和模拟储层装置的实验平台较少。国内还未见有在实验井上进行排水采气工艺研究的详细报道。

## 参考文献

- [1] 黄艳,余朝毅,钟晓瑜,等.国外排水采气工艺技术现状及发展趋势[J].钻采工艺,2005,28(04):57-60,18.[HUANG Y, SHE C Y, ZHONG X Y, et al. The resent situation and development tendency on the foreign technology of dewatering gas production[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(04): 57-60, 18.]
- [2] 谭中国,卢涛,刘艳侠,等.苏里格气田“十三五”期间提高采收率技术思路[J].天然气工业,2016,36(03):30-40.[TAN Z G, LU T, LIU Y X, et al. Technical ideas of recovery enhancement in the Sulige Gasfield during the 13th Five Year Plan[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(03): 30-40.]
- [3] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000.[LI S L. Engineering of natural gas[M]. Beijing: Press of Petroleum Industry, 2000.]
- [4] 闫云和.气井带水条件和泡沫排水实践[J].天然气工业,1983,3(02):27-33.[YAN Y H. The conditions for gas well continuous dewatering and gas well dewatering using foaming agent[J]. Natural Gas Industry, 1983, 3(02): 27-33.]
- [5] YANG J, GUAN B, YANG G, et al. Effect of dynamic surface activity of surfactant on performance of foam for gas well deliquification[C]. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [6] 武俊文,雷群,熊春明,等.适用于深层产水气井的纳米粒子泡排剂[J].石油勘探与开发,2016,43(04):1-5.[WU J W, LEI Q, XIONG C M, et al. A nano-particle foam unloading agent applied in unloading liquid of deep gas well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(04): 1-5.]
- [7] LI Y, DICARLO D, LI X, et al. An experimental study on application of nanoparticles in unconventional gas reservoir CO<sub>2</sub> fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 133: 38-244.
- [8] 李莲明,李强,刘帮华,等.用于泡沫排水采气的投棒投球装置:CN102022103A[P].2011-04-20.[LI L M, LI Q, LIU B H, et al. Caber throwing device of gas recovery by foam unloading: CN102022103A[P]. 2011-04-20.]
- [9] 刘毅,吴革生,魏克颖,等.用于泡沫排水采气的泡排剂远程自动加注装置:CN202531145U[P].2012-11-14.[LIU Y, WU G, WEI K Y, et al. Foaming agent for gas recovery by foam drainage automatic filling device: CN202531145U[P]. 2012-11-14.]
- [10] 钟海全,刘通,朱沫,等.一种泡沫排水采气井下自动加药装置及方法:CN103291266A[P].2013-09-11.[ZHONG H Q, LIU T, ZHU M, et al. A kind of bubble draining gas automatic dosing device and method: CN103291266A[P]. 2013-09-11]
- [11] SEVIC S, SOLESA M. Production optimization challenges of gas wells with liquid loading problem using foaming agents[C]. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [12] 王燕,刘磊,周思怡,等.小液体流量下的气井持液及其减排规律研究[J].工程热物理学报,2008,29(7):163-166.[WANG Y, LIU L, ZHOU S Y, et al. Liquid holdup reduction for gas well with small load of liquid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008 (07): 163-166]

- [13] VAN NIMWEGEN A T, PORTELA L M, HENKES R A W M. The effect of surfactants on vertical air/water flow for prevention of liquid loading[J]. SPE Journal, 2016, 484-500.
- [14] 程金金. 水平气井泡沫管流模拟实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014. [CHENG J J. Experimental study on horizontal gas well pipes bubbly flow simulation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.]
- [15] JELINEK W, SCHRAMM L L. Improved production from mature gas wells by introducing surfactants into wells[C]. International Petroleum Technology Conference, IPTC, 2015.
- [16] PRICE B P, GOTHARD B. Foam assisted lift-importance of selection and application[C]. Society of Petroleum Engineers, 2007
- [17] LI H, YANG D, ZHANG Q. A theoretical model for optimizing surfactant usage in a gas well dewatering process[C]. Petroleum Society of Canada: PETSOC, 2007.
- [18] UDDIN M F M, TAYYAB I, KOONDHAR N H, et al. Production optimization of foam assisted lift (FAL) wells and evaluation of good and bad practices to ensure maximum production[C]. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [19] 曹和平, 张书平, 白晓弘, 等. 速度管柱系统研制与应用[J]. 石油机械, 2011, 39(10): 113-115. [CAO H P, ZHANG S P, BAI X H, et al. The development and application of the velocity string system[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(10): 113-115.]
- [20] DE JONGE R M, TOUSIS U A M. Liquid unloading of depleted gas wells in the North Sea and Continental Europe, using coiled tubing, jointed pipe velocity/insert strings, and microstrings[C]. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [21] 李现东, 张庆, 文涛, 等. 机抽-速度管复合排水采气装置: CN203022700U[P]. 2013-06-26. [LI X D, ZHANG Q, WEN T, et al. Velocity string- gas pumping device for liquid unloading: CN203022700U[P]. 2013-06-26.]
- [22] 张书平, 吴革生, 白晓弘, 等. 橇装式小直径管排水采气装置: CN201057026[P]. 2008-05-07. [ZHANG S P, WU G S, BAI X H, et al. Skid-mounted gas recovery by water drainage device for small-diameter pipe: CN201057026[P]. 2008-05-07.]
- [23] 杨桦, 杨川东. 优选管柱排水采气工艺的设计程序及应用[J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(01): 70-82. [YANG H, YANG C D. Design programme and its application of optimum tubing string for water drainage-oil recovery[J]. Journal of Southwest-China Petroleum Institute, 1995, 17(01): 70-82.]
- [24] 杨桦, 杨川东. 优选管柱排水采气工艺的理论研究[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(04): 56-65. [YANG H, YANG C D. Theoretical study of optimum tubing string for water drainage -oil recovery[J]. Journal of Southwest-China Petroleum Institute, 1994, 16(04): 56-65.]
- [25] 田云. 速度管排水采气实验及模型研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [TIAN Y. Research on velocity string drainage gas recovery by experimental and model[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.]
- [26] OUDEMAN P. On the flow performance of velocity strings to unload wet gas wells[C]. Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [27] 赵彬彬, 白晓弘, 陈德见, 等. 速度管柱排水采气效果评价及应用新领域[J]. 石油机械, 2012, 40(11): 62-5. [ZHAO B B, BAI X H, CHEN D J et al. Effect assessment of drainage gas recovery through velocity string and its new application area[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(11): 62-5.]
- [28] QUINTANA J, DUQUE E, DIAZ J D, et al. Coiled tubing velocity string hang-off solves and prevents liquid-loading problems in gas well: Case study in the Gulf of Guayaquil, Ecuador[C]. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [29] 刘鹏. 榆林气田南区旋流雾化排水采气工艺技术研究与应[D]. 西安: 西安石油大学, 2013. [LIU P. Study and application of rotary atomized drainage gas recovery technology in the Southern District of Yulin gas field[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.]
- [30] 杜坚, 周洁玲. 深井低压底水超声排水采气方法研究[J]. 天然气工业, 2004(06): 86-88, 12. [DU J, ZHOU J L. Water-removing and gas-recovering method of deep wells with low pressure and bottom water[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(06): 86-88, 12.]
- [31] 秦崑崑, 杜坚, 乔雨. 超声排水采气换能器研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(01): 86-88, 8. [QIN W W, DU J, QIAO Y. Research on transverter for ultra sonic drainage gas recovery[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(01): 86-88, 8.]
- [32] 邓继学, 孙虎, 王祖文, 等. 低压气井双流体超音速雾化排水采气系统及其工艺: CN105443088A[P]. 2016-03-30. [DENG J X, SUN H, WANG Z W, et al. Low pressure drainage gas recovery system and its two-fluid supersonic gas atomization process: CN105443088A[P]. 2016-03-30.]
- [33] 刘磊, 刘伟, 常鹏, 等. 一种天然气井超音速喷管雾化排水采气装置和方法: CN104329057A[P]. 2015-02-04. [LIU L, LIU W, CHANG P, et al. A gas atomization in supersonic nozzle of gas recovery by water drainage devices and methods: CN104329057A[P]. 2015-02-04.]
- [34] 田伟, 张书平, 吴革生, 等. 天然气井排水采气用井下雾化装置: CN201620862U[P]. 2010-11-03. [TIAN W, ZHANG S P, WU G S, et al. Underground gas drainage gas atomizing device: CN201620862U[P]. 2010-11-03.]
- [35] 郑维师, 张承武, 韩婧婧, 等. 一种雾化装置及其泡排启动雾化排水采气方法: CN104100239A[P]. 2014-10-15. [ZHENG W S, ZHANG C W, HAN J J, et al. A spray device and start foaming aerosol gas recovery by water drainage methods: CN104100239A[P]. 2014-10-15.]
- [36] 李虎, 李增亮. 井下排水采气用雾化喷嘴的数值仿真研究[J]. 石油机械, 2009, 37(08): 18-20. [LI H, LI Z L. Digital simulation research on the downhole atomized nozzle for dewatering gas recovery[J]. China Petroleum Machinery, 2009( 08): 18-20.]

- [37] 陈斌, 郭烈锦, 张西民, 等. 喷嘴雾化特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(2): 237-240. [CHEN B, GUO L J, ZHANG X M, et al. Experimental investigation of spray characteristics of different nozzles[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, (02): 237-240.]
- [38] 刘乃玲, 张旭. 压力式螺旋型喷嘴雾化特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(5): 505-507. [LIU N L, ZHANG X. An experimental study of pressure-type spiral nozzle atomization characteristics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, (05): 505-507.]
- [39] 聂涛, 高贵军. 压力旋流喷嘴雾化特性的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 162-164, 72. [NIE T, GAO G J. An experimental study on the spray characteristics of pressure swirl nozzle[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7): 162-164, 72.]
- [40] 薛亮, 罗天雨, 李俊鹏. 一种气井排液用井下雾化器: CN102797437A[P]. 2011-05-23. [XUE L, LUO T Y, LI J P. A gas well cleanup using downhole ultrasonic nebulizer: CN102797437A[P]. 2011-05-23.]
- [41] 杨涛, 余淑明, 杨桦, 等. 气井涡流排水采气新技术及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(08): 63-66. [YANG T, YU S M, YANG H, et al. A new technology of vortex dewatering gas recovery in gas wells and its application[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(08): 63-66.]
- [42] FALCONE G, HEWITT G F, LAO L, et al. Anumet: A novel wet gas flowmeter[C]. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [43] WOOD R J K, JONES T F, MILES N J, et al. Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends[J]. Wear, 2001, 250(1-12): 770-778.
- [44] BOSE R. Unloading using auger tool and foam and experimental identification of liquid loading of low rate natural gas wells[D]. College Station: Texas A & M University, 2007.
- [45] 王树立, 饶永超, 魏鸣姣, 等. 水平管内气液两相螺旋流压降规律实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 28(3): 77-86. [WANG S L, RAO Y C, WEI M J, et al. Experimental research on law of pressure drop of gas-liquid two-phase spiral flow in the horizontal pipe[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 28(3): 77-86.]
- [46] JACOBSSON S, AUSTRHEIM T, HOFFMANN A C. Experimental and computational fluid dynamics investigation of the flow in and around once-through swirl tubes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(19): 6 525-6 530.
- [47] PENG W, HOFFMANN A, DRIES H, et al. Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: The nature of the vortex end[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(24): 6 919-6 928.
- [48] 陈勇, 张书平, 吴革生. 气井井下涡流排水采气工具: CN201020605046.3[P]. 2010-11-11. [CHEN Y, ZHANG S P, WU G S. Downhole eddy currents and drainage gas recovery tool: CN201020605046.3[P]. 2010-11-11.]
- [49] 江尧, 郑永哲, 刘学甫, 等. 整体式双向卡瓦涡流排水采气工具: CN204186372U[P]. 2015-03-04. [JIANG Y, ZHENG Y Z, LIU X P, et al. Integral two-way slip eddy currents and drainage gas recovery tool: CN204186372U[P]. 2015-03-04.]
- [50] 江尧, 郑永哲, 刘学甫, 等. 多螺旋涡流排水采气工具: CN204126608U[P]. 2015-01-28. [JIANG Y, ZHENG Y Z, LIU X, et al. Spiral vortex drainage gas recovery tool: CN204126608U[P]. 2015-01-28.]
- [51] 杨旭东, 白晓弘, 于志刚, 等. 低压气井涡流柱塞排水采气装置: CN104514522A[P]. 2015-04-15. [YANG X D, BAI X H, YU Z G, et al. Vortex of low pressure gas well of plunger gas recovery by water drainage device: CN104514522A[P]. 2015-04-15.]
- [52] 陈勇, 张书平, 吴革生, 等. 气井井下涡流排水采气工具: CN201843590U[P]. 2011-05-25. [CHEN Y, ZHANG S P, WU G S, et al. Downhole eddy currents and drainage gas recovery tool: CN201843590U[P]. 2011-05-25.]
- [53] 丁永钢, 侯予, 熊联友. 涡流管的应用[J]. 低温工程, 2004, 137(1): 56-59. [DING Y G, HOU Y, XIONG L Y. The application of vortex tube[J]. Cryogenics, 2004, 137(1): 56-59.]
- [54] ALI A J, SCOTT S L, FEHN B. Investigation of new tool to unload liquids from stripper-gas wells[C]. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [55] SURENDRA M, FALCONE G, TEODORIU C. Investigation of swirl flows applied to the oil and gas industry[J]. SPE Projects, Facilities & Construction, 2009, 4(1): 1-6.
- [56] SURENDRA M, FALCONE G, TEODORIU C. Investigation of swirl flows applied to the oil and gas industry[C]. Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [57] 杜汶浓. 川西气田涡流排水采气工艺技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [DU W L. Research on drainage gas recovery technology of vortex tool in Western Sichuan gas field[D]. Chendu: Southwest Petroleum University, 2015.]
- [58] 晏显炜. 射流涡流排水采气模拟实验台设计及试验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015. [YAN X W. Research on vortex tool liquid unloading experiment instrument[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.]
- [59] 杨旭东, 卫亚明, 肖述琴, 等. 井下涡流工具排水采气在苏里格气田探索研究[J]. 钻采工艺, 2013, 36(6): 125-127. [YANG X D, WEI Y M, XIAO S Q, et al. Research of gas well vortex tool in Sulige gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(6): 125-127.]
- [60] 陈德春, 韩昊, 姚亚, 等. 气井涡流工具作用效果分析与临界携液流量实验研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2 137-2 741. [CHEN D C, HAN H, YAO Y, et al. An experimental study on the effect of the vortex tool and its influence on critical velocity[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2 137-2 141.]
- [61] 冯翠菊, 王春生, 张黄. 天然气井下涡流工具排液效果影响因素分析[J]. 石油机械, 2013, 41(1): 4. [FENG C J, WANG C S,

- ZHANG H. Influencing factor analysis of the liquid discharge effect of downhole vortex tool in natural gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(1): 4.]
- [62] 杨旭东, 李丽, 张军, 等. 井下涡流工具排水采气机理研究[J]. 石油机械, 2015, 43(5): 81-86. [YANG X D, LI L, ZHANG J, et al. Mechanism study of downhole vortex tool for water drainage during gas production[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(5): 81-86.]
- [63] 李隽, 李楠, 李佳宜, 等. 涡流排水采气技术数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2013, 11(6): 65-68. [LI J, LI N, LI J Y, et al. Numerical simulation research on eddy current drainage gas recovery technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 11(6): 65-68.]
- [64] 于淑珍, 胡康, 宋渊娟, 等. 涡流排水采气技术机理研究及应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(03): 49-51. [YU S Z, HU K, SONG Y J, et al. Mechanism research and application of vortex drainage gas recovery technology[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(03): 49-51.]
- [65] 吴丹, 颜廷俊, 谢双喜, 等. 气井涡流排液采气工具参数仿真及结构优化[J]. 石油机械, 2014, 42(08): 111-115. [WU D, YAN T J, XIE S X, et al. Numerical simulation and structural optimization of vortex tool for liquid discharge in gas well[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(08): 111-115.]
- [66] SHAH D B, PATEL H R. Effective down hole gas-liquid separation to eliminate liquid loading problem in gas wells[C]. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [67] ARACHMAN F, SINGH K, FORREST J K, et al. Liquid unloading in a big bore completion: A comparison among gas lift, intermittent production, and installation of velocity string[C]. Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [68] 曲林, 曲俊耀. 排水采气工艺选型的探讨[J]. 钻采工艺, 2005, 28(02): 49-51, 113-114. [QU L, QU J Y. Research on lectotype of drainage gas recovery technique[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(02): 49-51, 113-114.]
- [69] 黄艳, 余朝毅, 马辉运, 等. 四川盆地气田排水采气工艺技术研究与应[J]. 钻采工艺, 2008, 31(05): 66-69, 72, 168-169. [HUANG Y, SHE C Y, MA H Y, et al. Research and application of drainage gas recovery technology in Sichuan Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5): 66-69, 72, 168-169.]
- [70] 李文魁, 周广厚, 毕国强, 等. 涩北气田排水采气优选模式[J]. 天然气工业, 2009, 29(09): 60-63, 137-138. [LI W K, ZHOU G H, BI G Q, et al. The optimal method selection for dewatering production at Sebei gas field[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(09): 60-63, 137-138.]
- [71] 张书平, 白晓弘, 樊莲莲, 等. 低压低产气井排水采气工艺技术[J]. 天然气工业, 2005, 25(04): 106-109, 17-18. [ZHANG S P, BAI X H, FAN L L, et al. Techniques of gas recovery by water drainage for gas wells with low pressure and production[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(04): 106-109, 17-18.]
- [72] 巩艳芬, 王琳琳, 瞿亮, 等. TOPSIS方法在排水采气技术优选中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(05): 58-60, 4, 122. [GONG Y F, WANG L L, QU L, et al. Application of TOPSIS method in the optimum selection of drainage gas recovery technology[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(5): 58-60, 4, 122.]
- [73] 郑新欣. 排水采气工艺方法优选[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008. [ZHENG X X. Optimization of liquid unloading technology on gas well[D]. Qing Dao: China University of Petroleum-East China, 2008.]
- [74] 刘通. 产液气井两相流机理模型研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014. [LIU T. Study on the mechanism of liquid-gas two-phase flow model[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.]
- [75] 王琦. 水平井筒气液两相流动模拟实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014. [WANG Q. Experimental study on horizontal wellbore in gas-liquid two-phase flow simulation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.]
- [76] 西安交通大学. [EB/OL].[2016-08-01]. HTTP://WWW.MFPE.LABS.GOV.CN/KXYJ/SYXT-SY.PHP. [Xi'an Jiaotong University[EB/OL].[2016-08-01]. HTTP://WWW.MFPE.LABS.GOV.CN/KXYJ/SYXT-SY.PHP.]
- [77] 张永平, 马品刚, 马文海, 等. 涡流流态模拟可视化试验装置: CN103924948A[P]. 2014-04-02. [ZHANG Y P, MA P G, MA W T, et al. visualization of Vortex flow simulation test device: CN103924948A[P]. 2014-04-02.]
- [78] 刘大永, 周兴付, 张仕强, 等. 定向井泡沫排水井筒模拟实验装置: CN101539009[P]. 2009-04-21. [LIU D Y, ZHOU X F, ZHANG S Q, et al. Directional drilling foam drainage shaft simulation device: CN101539009[P]. 2009-04-21.]
- [79] 廖东, 谢军, 文涛, 等. 全可视化定向井气液流态井筒模拟实验装置: CN202970645U[P]. 2012-11-30. [LIAO D, XIE J, WEN T, et al. Visual simulation equipment in gas-liquid flow patterns wellbore directional wells: CN202970645U[P]. 2012-11-30.]
- [80] 徐建宁, 晏显炜, 邵乐. 射流涡流排水采气模拟实验台研制与应用[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(01): 205-208. [XU J N, YAN X W, SHAO L. Development and application of jet and vortex tool drainage simulation experimental platform[J]. Experiment Science and Technology, 2015, 13(01): 205-208.]
- [81] 宋鹏举. 气体携液能力的液体临界含量实验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013. [SONG P J. Content of the experimental study of the gas liquid critical liquid carrying[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.]
- [82] ALSAADI Y, PEREYRA E, TORRES C, et al. Liquid loading of highly deviated gas wells from 60° to 88° [C]. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [83] FERNANDEZ J J, FALCONE G, TEODORIU C. Design of a high-pressure research flow loop for the experimental investigation of

- liquid loading in gas wells[J]. SPE Projects, Facilities & Construction, 2010, 76-88.
- [84] VEEKEN C A M, BELFROID S P C. New perspective on gas-well liquid loading and unloading[J]. SPE Production & Operations, 2011, 343-56.
- [85] WALTRICH P J, POSADA C, MARTINEZ J, et al. Experimental investigation on the prediction of liquid loading initiation in gas wells using a long vertical tube[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 254: 1 515-1 529.
- [86] FALCONE G, TEODORIU C, REINICKE K M, et al. Multiphase flow modelling based on experimental testing: A comprehensive overview of research facilities worldwide and the need for future developments[C]. Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [87] 吴晓东, 张琪, 王木乐. 全尺寸模拟实验井供液系统及其设备的设计[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(S1): 72-75. [WU X D, ZHANG Q, WANG M L. Design of liquid giving system and the equipments for all dimension simulation testing well[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(S1): 72-75].
- [88] 李允子, 张世同, 高建清. 中原全尺寸科学实验井介绍[J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(04): 54-58. [LI Y Z, ZHANG S T, GAO J Q. Brief introduction to a full-size scientific experimental well in Zhongyuan[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(04): 54-58.]
- [89] 李相方, 马秀军, 韩国庆, 等. 全尺寸实验井井下多点多参数测量数据传输系统[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(03): 33-38. [LI X F, MA X J, HAN G Q, et al. Data transmission for multi-point multi-parameter measurement in full-scale experimental well[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1993, 17(03): 33-38.]
- [90] 谭文胜, 高新奎, 庞广应, 等. 石油测井模拟井的应用与维护[J]. 测井技术, 2010, 34(06): 592-596. [TAN W S, GAO X K, PANG G Y, et al. The application and maintenance of the logging simulation well in oilfield[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(06): 592-596.]
- [91] 廖开贵, 李颖川, 刘永辉, 等. 采气工艺模拟实验井测控系统研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(03): 46-48. [LIAO K G, LI Y C, LIU Y H, et al. Monitoring system study on gas production process simulating experiment well[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(03): 46-48.]
- [92] 周树新, 张永忠. 井控模拟实验井设计方案探讨[J]. 钻采工艺, 2009, 32(03): 9-11, 124. [ZHOU S X, ZHONG Y Z. Discussion on design proposal of well control simulated test wells[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(03): 9-11, 124.]

## Review of liquid unloading technology: Foam, velocity string, atomizing and vortex flow, for gas wells in the Sulige gas field

WANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ningsheng<sup>1</sup>, LIU Xiaojuan<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>3</sup>, DOU Liangbin<sup>1</sup>

*1 Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, China*

*2 Changqing Downhole Technology Company, Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China*

*3 School of Mathematics and Statistics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

**Abstract** There are many low-pressure gas wells in the Sulige gas field. These wells have low production efficient and serious liquid loading problems. Various techniques have been utilized to solve this problem in the area, but their process optimization and applicability still need to be investigated. In this paper, we reviewed the principles, process optimization, applicability and experimental apparatus for four liquid unloading processes: foam, velocity string, atomization and swirl flow.

**Keywords** liquid unloading; foam; velocity string; atomize; swirl flow

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.02.020

(编辑 马桂霞)