

天然气井多相流强化携液理论及排液采气关键技术

白博峰¹, 田伟², 赵昆鹏¹, 贾友亮², 李丽², 杨旭东²,

赵峥延², 李旭日², 沈志昊², 刘磊¹

(1. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院, 710018, 西安)

摘要: 天然气田稳产是保障我国能源安全的重大需求,气井积液是制约稳产的瓶颈,排液采气是保障稳产的关键。我国60%气井因积液年均产气量递减23%以上,且积液井数以年均5%的速率快速增长。由于对气井多相流动特性认识不足,传统排液采气技术仅适用于积液轻微的浅直井且排液率较低。研究团队近年来聚焦天然气井排液采气难题,构建了基于气液流动结构调控的强化携液理论,突破了经典临界流速携液理论仅适用于环雾状流的局限;发明了抗油耐矿化度泡沫排液、复杂井筒速度管柱排液、超声速喷嘴雾化排液、气举柱塞接力举升排液等适用气井不同积液状态的高效低成本排液采气系列关键技术。研究成果已推广至长庆气田、中外合作开发区等11个气区,累计应用近12 000口气井,占我国积液气井总数的30%以上。

关键词: 多相流动;强化携液;排液采气;气田稳产;能源安全

中图分类号: TE37 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405002 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0010-09

Theory of Enhanced Liquid Carrying with Multiphase Flow and Key Technologies of Drainage Gas Recovery in Gas Wells

BAI Bofeng¹, TIAN Wei², ZHAO Kunpeng¹, JIA Youliang², LI Li², YANG Xudong²,

ZHAO Zhengyan², LI Xuri², SHEN Zhihao², LIU Lei¹

(1. National Key Laboratory of Green Hydrogen and Clean Electricity, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Ensuring a continuous supply of gas resources is a crucial requirement for China's energy security. However, the steady production of gas wells is often hindered by the issue of liquid loading. To maintain a consistent gas production, it is important to implement effective drainage and gas recovery technologies. In China, 60% of the gas wells undergo liquid loading, resulting in production declining by more than 23% per year, and the worse part is that the number of liquid loading wells annually increases by 5%. The conventional method of drainage gas recovery is only appropriate for shallow vertical wells with minimal gas outflow and brings about a low drainage efficiency since the multiphase flow characteristics of gas wells are not well understood. Therefore, this paper will highlight the current research conducted by our team on the theory of enhanced liquid carrying in multiphase flow and the key technologies of drainage gas

收稿日期: 2023-12-24。 作者简介: 白博峰(1971—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51121092);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51425603);中国石油重大科技专项资助项目(2011E1306)。

网络出版时间: 2024-03-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240301.1536.010>

recovery in gas wells. We proposed the theory of enhanced liquid carrying, which revolves around the regulation of gas-liquid flow structure. It overcomes the constraint of the traditional critical liquid carrying theory, which is only applicable to annular-mist flow. We developed a set of key technologies for efficient and cost-effective drainage gas recovery that is suitable for various liquid loading states in gas wells under different liquid loading conditions, including oil-resistant and salinity-resistant foam drainage, complex wellbore velocity string drainage, supersonic nozzle atomization drainage, plunger relay lift drainage, and more. The theoretical and technical achievements have been applied to 11 gas fields and 12 000 gas wells, accounting for more than 30% of all the liquid-loading gas wells in China.

Keywords: multiphase flow; enhanced liquid carrying; drainage and gas recovery; gas production; energy security

1 研究背景

2021 年 10 月,习近平总书记在胜利油田考察时强调:“油气能源建设对我们国家意义重大,能源的饭碗必须端在自己手里”。低碳清洁的天然气资源是能源结构转型与可持续发展的重要支柱,国际能源署发布的《世界能源展望(2020 年版)》预测,未来 20 年全球天然气需求的增长速率将与可再生能源相当^[1]。目前,天然气在我国能源消费结构中的比例仍低于全球平均水平,中国国家发改委和能源局联合印发的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》明确指出,截至 2030 年,天然气在我国能源消费结构中的占比应提高到 14% 以上^[2]。与之相对应的是,我国天然气对外依存度仍高达 44% (见图 1)。因此,大力提升天然气资源开发力度,是保障国家能源安全的重要途径。

天然气资源的开采往往伴随着地层中游离水和烃类凝析液的不断产出,气藏产出液在井筒中沉积导致井底回压增大,引发气井产量急剧下降甚至提前停产,是制约天然气田稳产的重大瓶颈^[3]。我国半数以上气井因积液大幅减产、停产,以我国产量最高(占比 1/4)、井数最多(占比 2/3)的长庆气田为例,60% 气井自投产至废弃的完整采气周期之内都受到积液问题困扰,导致产气量年均递减率达 23% 以上,且积液井数仍以每年 5% 的速率快速增加。我国天然气井普遍具有井型结构复杂(竖直井、水平井、倾斜井及其组合)、井筒内流体属性复杂(水、气、油多相并存)且多相流动结构随积液状态多变(雾状流、段塞流、鼓泡流)等特征,开发适用于复杂井型结构、不同积液状态气井的排液采气系列关键技术是天然气田持续稳产的迫切需求。

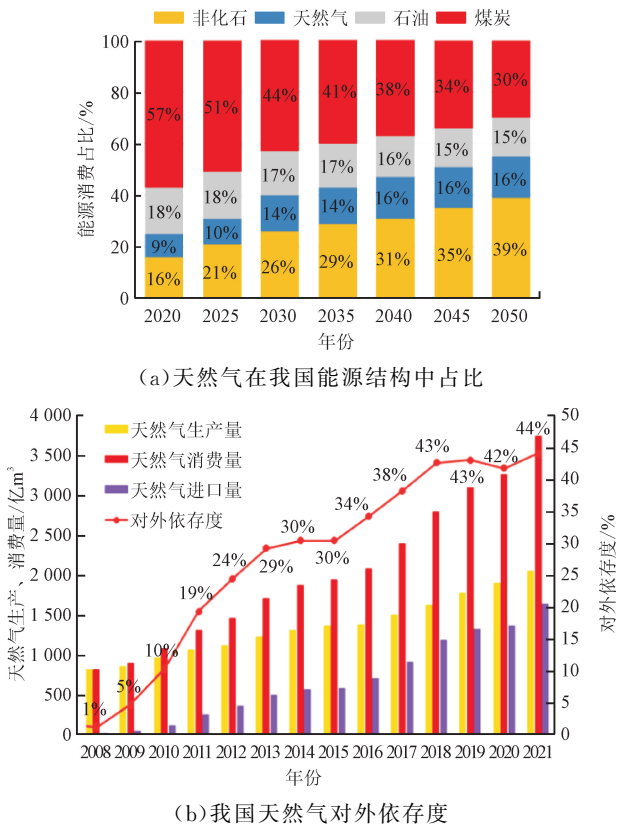


图 1 我国天然气消费情况

Fig. 1 Natural gas consumption in China

2 难点问题

受限于对气井内多相流动特性与强化携液的理论认识不足,前人已有研究以定性或宏观的现场实验为主,以借鉴国外经验为主要的传统排液采气技术仅适用于积液轻微的浅直井且排液率低,无法满足气田持续稳产的战略要求。

2.1 井筒内多相流强化携液理论

发展井筒内多相流强化携液理论,揭示天然气开

采过程中气井内的复杂多相流动特性,是实现高效低成本排液采气的理论基础与难点问题。气井早期积液呈雾状流动状态,随着持液率变化,逐渐演变为中期的段塞流以及后期的鼓泡流状态,气液相分布及其相间作用机制随流态变化具有不同特性,气流携液能力与气液相分布、持液率等密切相关,携液机理复杂。传统的井筒内气流携液理论主要是在 Duggan 提出的“最小气体流速”概念基础上发展起来的,即以井筒内的液滴或液膜为研究对象,通过受力分析预测能够实现连续携液的最小气流速度或气体流量^[4]。当下应用最为广泛的是 Turner 提出的液滴模型,其假设井筒中多相流动为雾状流且液滴为圆球形,通过分析球形液滴所受重力与曳力的力学平衡,提出了气井携液临界流量和产量预测模型^[5]。虽然相关学者在 Turner 模型的基础上进一步考虑并修正了井筒压力梯度、液滴形状、井筒结构等因素对气流携液能力的影响,但是传统的临界流速携液理论仅适用于环雾状流,无法考虑流态、持液率及气液相界面时空分布等特性,更难以解释井筒中的多相流强化携液机理。

因此,需要深入研究气井多相流相界面现象及动力学机制,从多相流相界面本质属性及气井多相流动特性出发来揭示多相流携液机理,提出通过调控多相流动结构强化携液的新途径,从而为排液采气技术创新提供理论支撑。

2.2 气井全生命周期排液采气技术

天然气井自开发初期至废弃的完整采气周期内积液状态变化大,单一排液采气技术无法覆盖整个采气周期,开发高效低成本、覆盖气井全生命周期的排液采气技术,是保障天然气田稳产的另一个难

点^[6]。我国传统排液采气技术主要以复制国外经验为主,具体可分为两类:①基于额外能量输入的排液采气技术,如注气举升、机械抽液等,该类技术能耗大、经济性差,单井排液成本甚至远超采气收益,推广应用难度大;②利用气藏自身能量携液的排液采气技术,该类技术虽然无需引入额外能量输入,但目前其适用性、有效期及效果都无法满足工程应用要求。我国应用广泛的泡沫排液采气技术,仅适用于积液轻微、矿化度低且含油量少的浅直井且排液率较低,而借鉴国外的柱塞气举排液采气技术仅适用于浅直井。现有排液采气技术均针对积液早期、积液轻微、井深较小的竖直井,缺乏适用于开发中后期严重积液气井的排液采气技术。

因此,迫切需要自主研发针对复杂井型结构、不同积液状态气井的排液采气系列关键技术,并且实现排液采气系列技术集成、智能切换与自动控制,为我国天然气田持续稳产提供核心技术装备保障。

3 主要科技创新

针对上述难点问题,西安交通大学联合中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司,组建校企合作研究团队,历经十余年,自主研发了复杂结构井筒多相流特性及流态调控实验平台与先进的多相流测试技术,构建了井筒内多相流强化携液理论,提出了针对不同积液阶段的多相流动结构调控方法,首创了面向复杂井型结构、不同积液状态气井的排液采气系列技术及智能化集成系统,初步解决了气井完整采气周期高效、低成本持续稳产的重大难题。总体研究路线如图 2 所示。

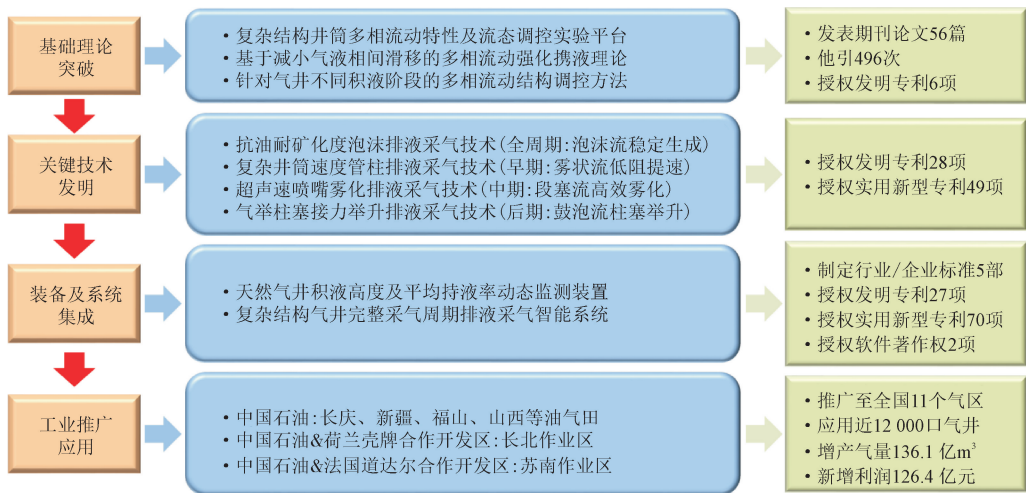


图 2 天然气井多相流强化携液排液采气研究技术路线

Fig. 2 Technical route of enhanced liquid carrying with multiphase flow in gas wells for drainage gas recovery

3.1 基础理论突破

研究团队自主设计搭建了针对复杂结构井筒的多相流动特性及流态调控实验平台,开发了基于光学反射的截面相含率非接触在线测量技术,为科学模拟气井内多相流动过程及排液采气工作过程,并实现对气液相分布及其演化的高精度动态捕捉提供了先进手段^[7-8],见图 3(a)、3(b)。系统研究了不同流型下相界面演变的非线性动力学特征,揭示了多相流动结构转变、界面波运动与液滴生成等机理,建立了气液相界面波运动与失稳的动力学模型,提出了液滴夹带率与沉积率、粒径分布等计算公式,实现了井筒内界面波失稳的动力学边界及液滴夹带率、沉积率、粒径分布等准确预测^[9-16],见图 3(c)。研究发现,气液相间滑移增加了两相流重位压降,该效应导致了不可逆损失,证明了气流携液需要同时克服摩擦压降和气流滑移损失,对于积液严重、自主携液能力差的鼓泡流与段塞流而言,气液滑移损失是携液阻力的主控机制,这为通过调控多相流动结构来减小气液相间滑移进而强化携液能力指明了方向^[17-18],见图 3(d)。积液泡沫化可显著改变气液相分布、有效降低气液相间滑移、提高携液能力,抑制气液界面失稳是关键。揭示了油敏效应加速表面活

性剂分子迁移是气液界面失稳的主导机理,阐明了通过亲油基团精准匹配、离子液体科学复配抑制表面活性剂分子迁移、增强气液界面稳定性的微观机制,为泡沫排液采气技术中的抗油耐矿化度表面活性剂开发奠定了理论基础^[19],见图 3(e)。

针对雾状流动时提高气速抑制气液滑移效应与同时加剧流动摩擦压降的矛盾,提出了以提高携液率和降低摩擦压降为核心的多目标优化方法,实现了基于井筒管径优选的雾状流低阻提速携液。针对段塞流动时气液时空分布极度不均的难题,利用气、液可压缩性差异大的自然属性,提出了气相膨胀增大气液速度差、液相被高速气流剪切破碎形成雾状流的流动结构调控方法,通过优化喷嘴型线,实现了对段塞流来流的高效雾化及强化携液^[20]。发现了举液过程中,运动柱塞与井壁环缝内气液两相始终处于环状流动结构,揭示了液膜破碎与液滴夹带是实现流动密封的主控机制。建立了考虑气体上窜与液体漏失的柱塞举升多相流动力学模型,提出了通过优化柱塞举升速度与几何结构来调控环缝内气液两相流动结构、促进气液流动密封进而减小相间滑移的方法,为柱塞气举强化携液技术创新提供理论支撑^[21-24],见图 3(f)。

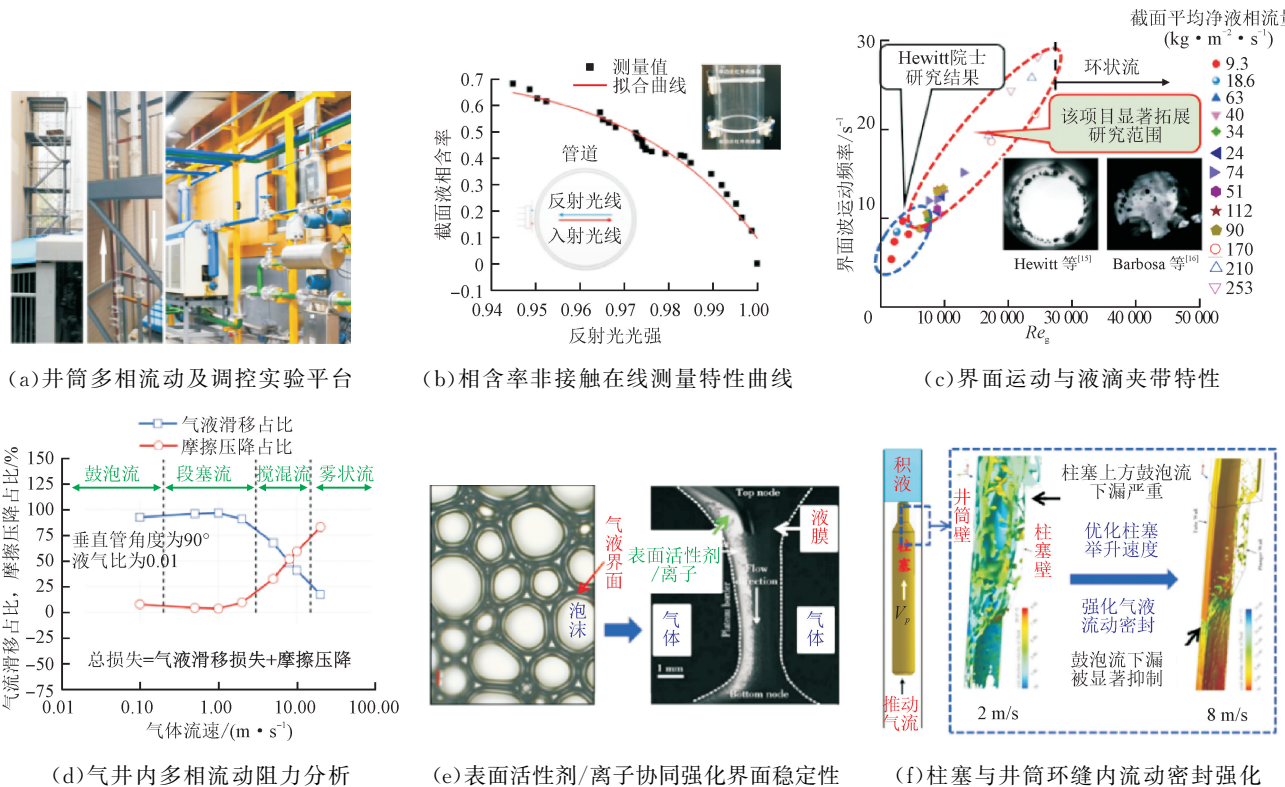


图 3 多相流强化携液基础理论研究进展

Fig. 3 Research progress on the basic theory of enhanced liquid carrying in multiphase flow

3.2 关键技术发明

团队自主研发了同源混合疏水碳链的两性氧化胺表面活性剂,提出了氧化胺表面活性剂和离子液体复合稳泡体系,解决了因油敏效应加剧表面活性剂分子迁移导致的界面失稳难题,突破了高含油(凝析油质量分数>30%)、高矿化度(矿物质质量浓度>100 g/L)积液稳定泡沫化的瓶颈,使得泡沫排液采气技术的排液率提高 33%、成本降低 30%,见图 4(a)。发明了雾状流低阻提速携液的管柱装置(即速度管柱),其中设计的主副双卡瓦井口悬挂结构及筛管阻塞结构,使速度管柱满足了带压安装及取出的要求。解决了大斜度井、水平井中速度管柱重复使用问题及其与油管摩擦导致的漏气问题,实现了积液早期(液气体积比<0.002)复杂结构井筒内速度管柱携液能力的显著提升,成本降低 53%。发明了具有引射功能结构的超声速雾化喷嘴,创新设计了喷嘴与井

壁间的回流环隙结构及喷嘴喉部的引射孔布局,显著缓解了液滴撞壁沉积导致的二次积液问题,实现了积液中期($0.002<\text{液气体积比}<0.008$)段塞流的高效雾化。另外,提出了利用压差力驱动喷嘴自主脱落的新方法,避免了人工打捞,解决了积液后期(液气体积比>0.008)复杂结构井筒内鼓泡流举升携液的重大难题,见图 4(c),排液率提高 40%、成本降低 70%。形成了适用于复杂结构气井不同积液状态的排液采气系列技术,在性能、经济性等指标上全面领先国内外相关技术,为天然气田持续稳产提供了核心关键技术支撑。

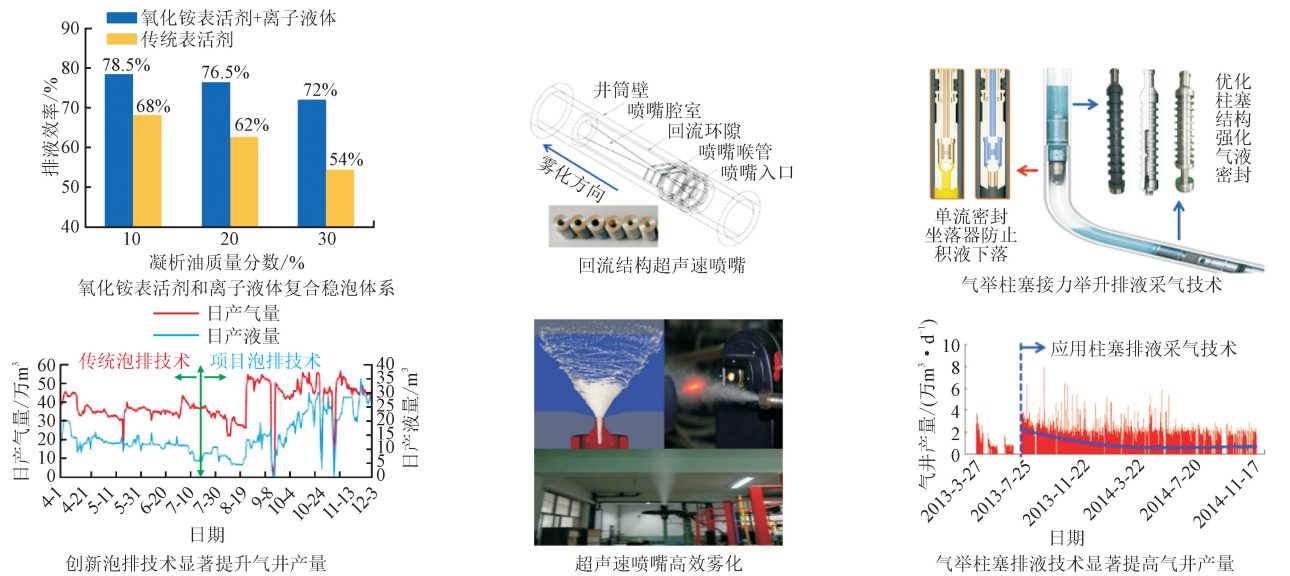


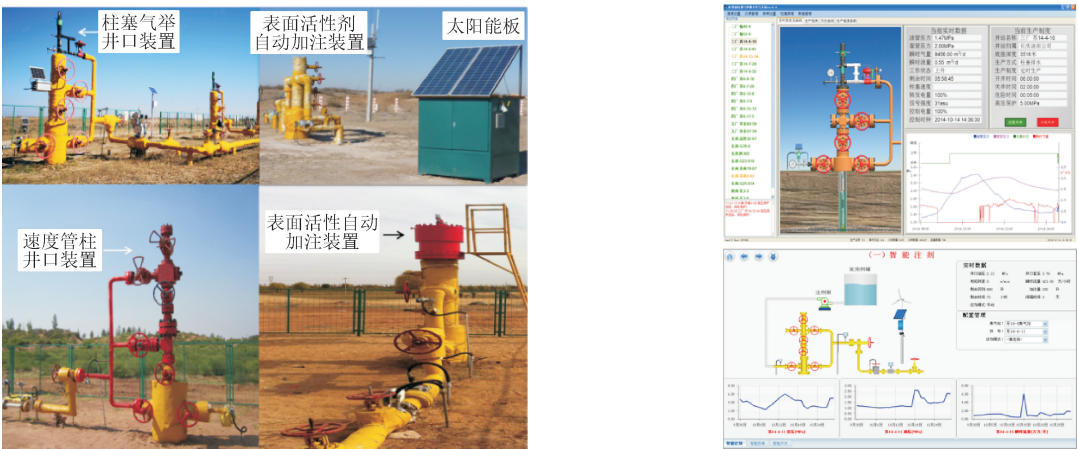
图 4 排液采气关键技术研究进展

Fig. 4 Research progress of the key technology for drainage gas recovery in gas wells

3.3 装备及系统集成

团队研发了气井内积液面次声波自动实时诊断方法和监测装置,建立了基于液面数据的积液高度及平均持液率计算模型,实现了积液早、中、后期井筒内积液高度及平均持液率的在线测量。发明了宽工况可视化泡沫性能评价装置及表面活性剂井口自动加注装置,实现了药剂的高精度评价与自适应加注,见图 5(a)。针对传统速度管柱排液气井切换为柱塞举升排液后,井筒中安全接头、水力锚等工具阻碍柱塞坐落器安装的瓶颈问题,发明了速度管柱配套柱塞气举排液采气装置,利用滚压方式连接坐落

器与速度管柱,并通过连续油管作业机,将柱塞坐落器安装至工具以下,实现了速度管柱与柱塞的长期配套使用与便捷切换。发明了泡沫与柱塞组合排液采气装置,中空柱塞内部充填表面活性剂并联通外部积液,实现了泡沫在柱塞与油管壁间隙的致密填充,显著减少了液体滑脱和气体上窜,提升了积液后期气举柱塞技术的排液性能。开发了气井积液诊断及排液采气智能化集成系统见图 5(b),实现了泡沫排液、速度管柱排液及气举柱塞排液等关键系列技术的智能切换及自动控制,初步解决了气井完整采气周期持续稳产的重大难题。



(a)气井全生命周期排液采气稳产关键技术及装备

(b)气田全生命周期排液采气智能控制系统界面

图 5 气井全生命周期排液采气装备及系统研究进展

Fig. 5 Research progress on the equipment and the system of gas well life cycle drainage and gas production

4 国内外研究对比

团队研究的相关基础理论成果获得了国内外多位院士、专家的积极评价与引用。英国皇家工程院院士、帝国理工学院杰出教授 Hewitt 先生引用并评价本研究关于井筒内多相流动结构调控强化携液的研究成果为:“极具挑战性的、为数不多的代表性工作”^[25]。加拿大工程院院士、纽芬兰纪念大学工程和应用科学学院院长 Naterer 教授将本研究关于气井内多相流射流雾化的研究成果作为代表性前沿工作多次引用^[26-27]。美国工程院院士、约翰霍普金斯大学 Katz 教授发表在地球物理领域顶级国际期刊 *Reviews of Geophysics* 的综述文章,推荐本研究关于气井内夹带液滴尺寸及夹带率预测的研究成果作为

后续研究的模型和数据基础^[28]。中国科学院院士、北京大学工学院魏悦广教授引用并评价本研究关于管内多相流动特性预测及流动结构调控的研究成果:“为多相流固耦合研究提供了创新思路”^[29]。2017 年,世界人工举升与排液采气大会主席、路易斯安娜州立大学 Waltrich 教授多次引用本研究关于气井内搅混流与段塞流转变机理的理论研究成果并评价:“为数不多的实现大管径、高流速条件实验验证的工作”^[30-31]。瑞典皇家理工学院 Anglart 教授课题组在发表的学术论文中评价本研究提出的气井内液滴夹带率预测模型“是已有研究中的最优选择。”^[32]

本研究的关键技术成果获得了国内外诸多第三方机构的积极评价与推荐,成果技术及经济性指标与国外同类技术的对比如表 1 所示。

表 1 研究成果技术及经济性指标与同类技术对比

Table 1 The technical and economic indicators of the present research compared with the previous technologies

技术	对比指标	同类技术指标	本项目指标	对比结果
泡沫排液采气	排液率	<54%	>72%	增效 33%
	泡排剂成本	>2 万元/t	<1.4 万元/t	降本 30%
速度管柱排液采气	安装工艺	停井装卸 单次利用	带压装卸 重复利用	显著优于
	技术成本	>96 万元/井	<45 万元/井	降本 53%
气举柱塞排液采气	单次排液率	<50%	>70%	增效 40%
	技术成本	>45 万元/井	<13 万元/井	降本 70%
	适用性	仅适用直井	适用直井、倾斜井、水平井	显著优于

美国贝克休斯石油天然气公司出具的第三方检测报告评价,本研究自主研发的表面活性剂对含凝析油积液具有优异的泡沫化及携液效果,排液率相比国内外已有表面活性剂提升了33%以上。由中国石油和化工自动化应用协会组织的科技成果鉴定会认为,本研究成果显著提升了泡沫排液采气技术有效率及自动化水平,泡沫排液成本相比传统技术降低了30%。由中国石油、中国石化等勘探开发相关部门组成的联合鉴定委员会评价,本研究成果满足大斜度井、不同产量井排液采气需求,柱塞气举排液率平均提高40%以上,对国内外同类气田开发起到了示范引领作用。中国石油和化工自动化应用协会鉴定本研究成果并评价,创新性地将不同的排液采气技术相结合,其中柱塞气举排液采气关键技术及装置属国内首创研制,且成本较国外技术降低了70%,打破了国外技术的垄断地位,填补了国内空白。中国石油天然气股份有限公司应用成果后评价,本研究形成了泡沫排液、速度管柱、柱塞气举等低压低产气井排液采气工艺系列,基本解决了3 000 m³以上气井的排液采气问题,支撑了长庆气田持续稳产。

5 推广应用情况

本研究成果已成功在我国长庆气田、福山油田、新疆油田、山西煤层气,以及中国石油与荷兰壳牌、法国道达尔的国际合作开发区等11个气区进行了规模化应用,累计应用近12 000口气井,占我国积液气井总数的30%。自主研发的排液采气系列装备与产品,如表面活性剂、速度管柱装置、柱塞装置等,已在国内相关企业进行了规模化销售,累计销售额超过2亿元,为长庆油气田年产油气当量突破6 000万t、攀上我国油气田产量新高峰做出了重要贡献。

6 研究前景与市场价值

我国半数以上气井受积液问题困扰,随着气田开发的深入,低产积液井数将持续增加。此外,随着常规天然气田可采储量和产量的逐渐趋稳,我国天然气增储上产的主力方向正逐步转向压力更低、分布更散、井深更大、出液更多的煤层气、致密气等非正规气藏,对于覆盖气井全生命周期的高效低成本排液采气技术及装备需求将更加迫切。因此,本研究的应用前景十分广阔,市场价值巨大,可为我国天然气田持续稳产提供了强有力的核心关键技术保障。

参考文献:

- [1] 国际能源署. 世界能源展望(2020年版)[EB/OL]. (2020-09-14)[2022-05-01]. [https://www. bp. com. cn/zh _ cn/china/home/news/press-releases/news-09-14. html](https://www.bp.com.cn/zh_cn/china/home/news/press-releases/news-09-14.html).
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)[EB/OL]. (2016-12-29)[2022-05-01]. [https://www. gov. cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568. htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm).
- [3] 贾爱林. 中国天然气开发技术进展及展望[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 77-86.
JIA Ailin. Progress and prospects of natural gas development technologies in China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 77-86.
- [4] DUGGAN J O. Estimating flow rates required to keep gas wells unloaded [J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(12): 1173-1176.
- [5] TURNER R G, HUBBARD M G, DUKLER A E. Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(11): 1475-1482.
- [6] LEA J F Jr, ROWLAN L. Gas well deliquification [M]. 3rd ed. Cambridge, MA, USA: Gulf Professional Publishing, 2019.
- [7] ZHAO Kunpeng, BAI Bofeng. Transient liquid leakage during plunger lifting process in gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 59: 250-261.
- [8] ZHAO Kunpeng, MU Lijun, TIAN Wei, et al. Gas-liquid flow seal in the smooth annulus during plunger lifting process in gas wells [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104195.
- [9] LIU Li, WANG Ke, BAI Bofeng. Experimental study on flow patterns and transition criteria for vertical swirling gas-liquid flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 122: 103113.
- [10] WANG Ke, BAI Bofeng, MA Weimin. Huge wave and drop entrainment mechanism in gas-liquid churn flow [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 104: 638-646.
- [11] WANG Ke, YE Jing, BAI Bofeng. Entrained droplets in two-phase churn flow [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 164: 270-278.
- [12] 王科. 气液搅拌流大振幅界面波与液滴夹带[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.

- [13] 刘雯. 垂直上升管内气液螺旋流动特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2016.
- [14] 刘莉. 气液螺旋环状流液膜流动与界面波特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [15] HEWITT G, MARTIN C, WILKES N. Experimental and modelling studies of annular flow in the region between flow reversal and the pressure drop minimum [J]. *Physicochem Hydrodyn*, 1985, 6(1/2): 69-86.
- [16] BARBOSA J R Jr, GOVAN A H, HEWITT G F. Visualisation and modelling studies of churn flow in a vertical pipe [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2001, 27(12): 2105-2127.
- [17] LIU Lei. A new method for evaluating drag reduction in gas-liquid two-phase flow based on energy dissipation [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 95: 54-64.
- [18] LIU Lei. The phenomenon of negative frictional pressure drop in vertical two-phase flow [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2014, 45: 72-80.
- [19] LIU Lei, LI Xiaobai, TONG Li, et al. Effect of surfactant additive on vertical two-phase flow [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 115: 1-10.
- [20] BAI Bofeng, ZHANG Haibin, LIU Li, et al. Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in crossflow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(6): 1012-1020.
- [21] ZHAO Kunpeng, TIAN Wei, LI Xuri, et al. A physical model for liquid leakage flow rate during plunger lifting process in gas wells [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 32-40.
- [22] 赵昆鹏, 慕立俊, 田伟, 等. 柱塞气举过程中气液瞬态密封性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(5): 1133-1138.
- ZHAO Kunpeng, MU Lijun, TIAN Wei, et al. Transient process of gas liquid flow sealing in plunger lift method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(5): 1133-1138.
- [23] 赵昆鹏, 田伟, 张存社, 等. 运动柱塞与油管内壁环缝间的气液逆流特性 [J]. *天然气工业*, 2023, 43(5): 56-62.
- ZHAO Kunpeng, TIAN Wei, ZHANG Cunshe, et al. Countercurrent gas-liquid flow characteristics in the annular gap between moving plunger and inner tubing wall [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(5): 56-62.
- [24] 赵昆鹏. 气举柱塞排液砂采气中的多相流动力学 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- [25] DASGUPTA A, CHANDRAKER D K, KSHIRASAGAR S, et al. Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn and annular regime [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 81: 147-163.
- [26] JIANU O A, WANG Z, ROSEN M A, et al. Experimental investigation of particle dissolution rates in aqueous solutions for hydrogen production [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52(10): 2067-2073.
- [27] NATERER G F, SUPPIAH S, STOLBERG L, et al. Progress in thermochemical hydrogen production with the copper-chlorine cycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(19): 6283-6295.
- [28] BOUFADEL M C, SOCOLOFSKY S, KATZ J, et al. A review on multiphase underwater jets and plumes: droplets, hydrodynamics, and chemistry [J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(3): e2020RG000703.
- [29] YE X, GAO F, CHEN X, et al. Full-scale finite element analysis of deformation and contact of a wire-wrapped fuel bundle subject to realistic thermal and irradiation conditions [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, 364: 110676.
- [30] POSADA C, WALTRICH P J. Effect of forced flow oscillations on churn and annular flow in a long vertical tube [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 81: 345-357.
- [31] CAPOVILLA M S, COUTINHO R P, DE SOUSA P C, et al. Experimental investigation of upward vertical two-phase high-velocity flows in large-diameter pipes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 102: 493-505.
- [32] RADDINO S. CFD modeling of annular flow with a three-field approach [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2017.

(编辑 杜秀杰)

团队介绍:

先进动力能源多相流研究团队长期专注于能源动力领域多相流热物理热化学基础理论及关键技术研究,团队成员包括教授 4 人、副教授 3 人、助理教授 3 人、硕博研究生 70 余人。团队负责人白博峰,二级教授、领军学者、国家杰出青年科学基金项目获得者。现任中国工程热物理学会理事,多相流分会秘书长,中国锅炉压力容器标准委员会换热设备分会副主任委员,热交换器安全与能效专业委员会副主任委员。担任 *Physics of Fluids* 顾问委员会专家,英国机械工程师协会会刊 *JMES* 及测量领域的 *Measurement*、*Measurement: Sensors* 等副主编,及《计算物理》《中国石油大学学报》等中文学术期刊编委。团队代表性研究成果包括:高温气液掺混组织技术,应用于某新概念发动机;高速气液掺混气流总温探针技术,应用于航发高空试验台;百千瓦级超临界二氧化碳循环发电技术,获重大项目资助并取得突破;发明热交换器能效评价方法及指标,被编入国标及规范并被节能政策采用;发明多相流相参数测量技术,应用于多家能源企业。研究成果获国家技术发明二等奖 1 项,省部级科学技术奖一等奖 3 项,其他省部级奖励 4 项。



团队负责人:白博峰教授



团队合影