

支撑剂回流控制方法及现场应用

王 宇¹, 付 天², 彭金梅¹, 孙辉正³, 曹建启¹, 龚 跃¹, 金炜翔¹, 夏楚翔¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²辽河石油勘探局有限公司辽河工程技术分公司, 辽宁 盘锦

³安徽省煤田地质局第二勘探队, 安徽 芜湖

收稿日期: 2024年10月10日; 录用日期: 2024年11月24日; 发布日期: 2025年1月13日

摘 要

水力压裂技术的面世使得油气井的产能得到了显著提升, 成为非常规油气资源开发的重要手段。然而, 在水力压裂措施实施的同时会出现支撑剂回流的现象, 对措施后的测试以及生产造成影响, 还可能削弱压裂措施的增产效果。本文介绍了影响支撑剂稳定性的因素, 重点分析了造成支撑剂回流的原因, 并综述了现有控制支撑剂回流的方法、原理以及现场应用情况。针对于不同的储层、地域情况应选择合适的控制回流方法以保证压裂后的增产。展望未来, 压裂支撑剂的发展前景广阔, 预计将朝向高性能、智能化、可降解及多功能的方向发展, 同时也要注意对环境带来的潜在影响, 朝着更可持续的方向发展。

关键词

支撑剂回流, 临界返排速度, 包胶支撑剂, 纤维拌注, 杆状支撑剂

Proppant Backflow Control Method and Field Application

Yu Wang¹, Tian Fu², Jinmei Peng¹, Huizheng Sun³, Jianqi Cao¹, Yue Gong¹, Weixiang Jin¹, Chuxiang Xia¹

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

²Liaohe Engineering Technology Branch of Liaohe Petroleum Exploration Bureau Co., Ltd., Panjin Liaoning

³The Second Exploration Team of Anhui Coalfield Geological Bureau, Wuhu Anhui

Received: Oct. 10th, 2024; accepted: Nov. 24th, 2024; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

The advent of hydraulic fracturing technology has significantly increased the productivity of oil and gas wells and has become an important means to develop unconventional oil and gas resources. However,

文章引用: 王宇, 付天, 彭金梅, 孙辉正, 曹建启, 龚跃, 金炜翔, 夏楚翔. 支撑剂回流控制方法及现场应用[J]. 矿山工程, 2025, 13(1): 53-64. DOI: 10.12677/me.2025.131008

proppant backflow can occur during hydraulic fracturing, which can interfere with post-fracturing testing and production and can reduce the stimulation effectiveness of fracturing. In this paper, the factors affecting proppant stability are introduced, the reasons for proppant reflux are analyzed, and the existing methods, principles and field applications of proppant reflux control are reviewed. According to the different reservoir and regional conditions, we should choose reasonable reflux control methods to ensure the production increase after fracturing. Looking ahead, the development of fracturing proppants is promising and is expected to move towards high performance, intelligent, degradable and versatile, while also taking into account the potential impact on the environment and moving towards a more sustainable direction.

Keywords

Proppant Backflow, Critical Flowback Velocity, Coated Proppant, Fiber Mixing, Rod Proppant

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水力压裂在全球的油气生产领域具有举足轻重的地位，目前国内各个油气田大部分压裂施工受到地层条件和生产成本等因素的制约，大部分压裂施工均以石英砂、陶粒材料等作为支撑剂，覆膜支撑剂及其他新型的支撑剂的使用相对较少。近年来，随着对煤层气、致密砂岩气以及页岩气等非常规资源勘探开发力度的不断加大，以及压裂技术工艺的逐渐发展，这就对压裂支撑剂的性能提出了更高的要求，国内外压裂支撑剂技术取得了新的进展，研发出多种新型支撑剂以适应压裂技术发展的需要。压裂后支撑剂会随携砂液一起流入人造裂缝中以充填支撑裂缝，增强裂缝导流能力。支撑剂主要是依靠流体的压实力、附着力和自身重力聚集在一起，但同时它也给支撑剂回流提供了有利条件。在压裂液返排过程中，若充填缝内压力梯度太大，支撑剂的压实能力减弱或阻力增加，必然会造成支撑剂回流。回流的支撑剂有时可能达到 20%以上，不仅会导致支撑裂缝缝宽变窄，造成裂缝的导流能力下降，还会造成检泵周期锐减，增加检泵、冲砂的作业量，对油井测试难度和费用以及油气开采有着较大的影响，如对抽油泵、喷油嘴、阀门、管线以及油气水分离器都会造成影响，带来安全事故的隐患。除此之外，还会降低压裂后的排液速度，使压裂液长时间滞留，从而增加了储层伤害。因此，针对于易发生压裂后支撑剂回流的井，分析其因素，根据不同情况制定合理的支撑剂回流的措施是十分有必要的。

2. 影响支撑剂稳定性的因素

支撑剂回流的因素主要可以概括为以下三类：① 支撑剂本身的性质，如尺寸、类型、粒度分布以及密度等；② 支撑剂周围流体的性质，包括流速、密度、黏度等；③ 支撑裂缝的性质，包括缝宽、缝长、闭合程度、岩石硬度和裂缝面的倾斜等。作用在支撑剂上的力，包括重力、浮力、拖拽力及颗粒之间的摩擦力等都将由以上因素直接或间接影响和决定，从而导致支撑剂填充层发生松动、失稳、回流[1]-[3]。

2.1. 支撑剂的本身性质对支撑剂稳定性的影响

传统的支撑剂一般是陶粒、石英砂等材料制成，支撑剂的形状多为圆球状，有利于使裂缝充填得更加紧密且能够优化裂缝形态，但近年来研究发现，采用非球状支撑剂可以使储层获得更高的导流能力和更好的控制回流能力。杨晓鹏等提出使用柱状支撑剂代替球形支撑剂可以相互接触形成桥接结构，既能

提高裂缝的导流能力,又能控制颗粒的回流作用[4]。其次,支撑剂颗粒的大小和密度对裂缝的渗透性造成直接影响,粒径的大小[5]与支撑剂的稳定性成正比,程翊珊[6]发现,如图1随着支撑剂颗粒半径和密度的增加,支撑剂越不容易发生回流现象。粒径和密度的增大,带来的阻力作为阻碍支撑剂的阻力,进而决定了支撑剂在裂缝中的稳定性。除了支撑剂的粒径和密度,支撑剂烧制工艺对支撑剂的稳定性也有一定的影响,对于相同目数的支撑剂而言,烧结支撑剂比烧融支撑剂更稳定[7]。

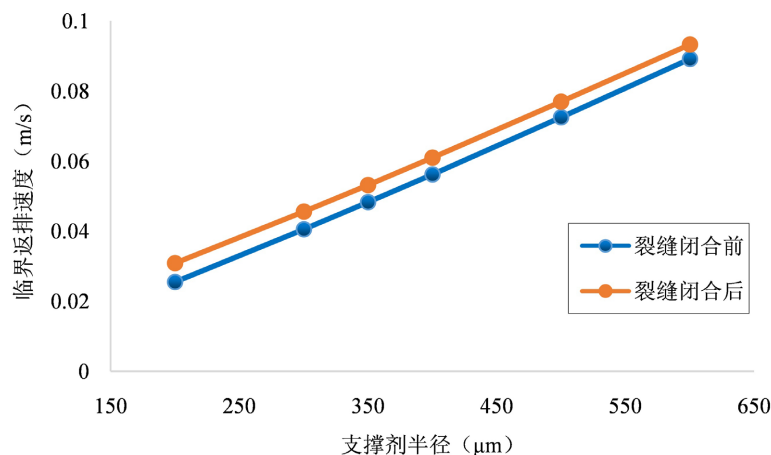


Figure 1. Effect of proppant radius on critical flowback velocity

图1. 支撑剂半径对临界返排速度的影响

2.2. 储层流体性质对支撑剂稳定性的影响

流体黏度越大,则在裂缝中的压力梯度就越大,流动粘滞力也随之逐渐增大,对于支撑剂来说,这时的粘滞力反而是支撑剂产生回流现象的动力;液体返排时的速度越大,则裂缝中的流体流动速度以及流体的流动阻力也随之增大,直到渗流速度超过层流范围,就会产生额外的惯性力阻碍流体流动,与上述返排液的粘滞力相似,流动阻力反而是推动支撑剂运移的动力,当返排速度达到临界值时,支撑剂便会产生回流,该速度也被称作临界返排速度[8],许多学者在实验过程中通过临界返排速度来判断支撑剂的稳定性和研究控制回流的方法。李天才等建立了在压裂液返排过程中支撑剂返排流速、沉降速度和临界返排流量的计算模型,并与油嘴大小相结合,做到对喷油嘴的动态优选来防止支撑剂回流[1]。Sparlin等[9]根据最小流化速度的原理对临界流速进行量化分析,以此确定支撑剂回流的临界流量。因此,由于粘度和返排速度的增加,相当于增加了支撑剂回流的动力,从而更容易引起支撑剂回流,针对此特性可以通过控制流体返排速度来控制支撑剂回流[3] [10]-[12]。

2.3. 支撑裂缝的性质对支撑剂稳定性的影响

根据大量实验研究发现不同的缝宽比(缝宽与支撑剂平均粒径之比)范围内,支撑剂填充层稳定状态会呈现不同的变化。姜春河等[13]通过实验发现,将缝宽比从3.2倍增加到15倍时,临界返排速度降低。可见当缝宽比达到一定倍率时,随着缝宽的增大,支撑剂嵌入的稳定性随之降低。通过缝宽与临界返排速度的关系(见图2)可以看出[14],临界返排速度随缝宽的增加而减小,以3 mm为界限,大于3 mm的缝宽对临界返排速度的影响较小,而小于3 mm的缝宽影响较大,临界返排速度线性增加。同样地,如图3所示,缝长越短,临界返排速度则越高,支撑剂回流也越不容易发生,当支撑缝长大于100 m后,临界返排速度受缝长的影响逐渐减小,这说明当裂缝长度超出一定范围后,其对支撑剂稳定性的影响程度逐渐变弱。

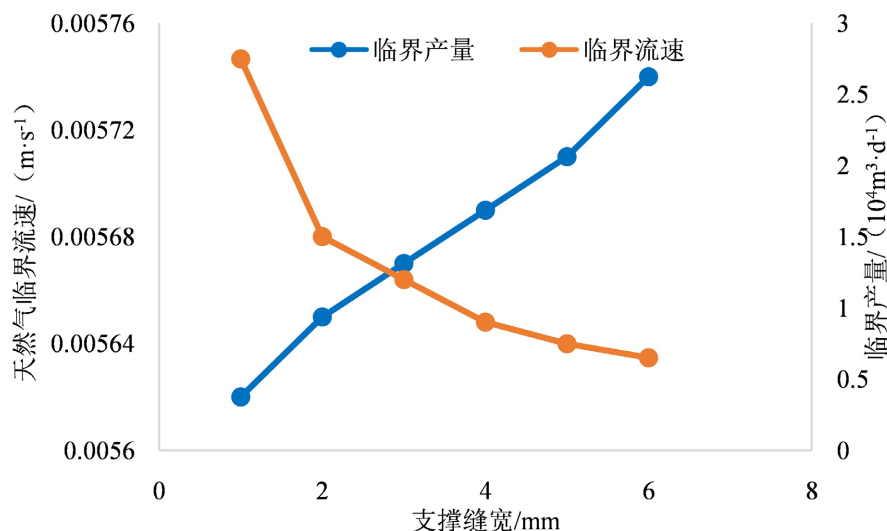


Figure 2. Relationship between critical flow rate, critical yield and support gap width

图 2. 临界流速、临界产量与支撑缝宽的关系

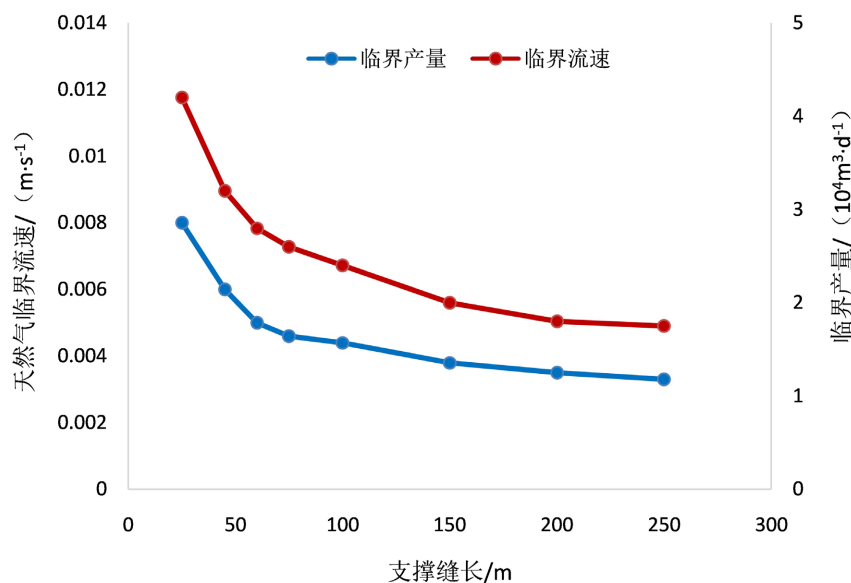


Figure 3. Relationship between critical flow rate, critical yield and gap length

图 3. 临界流速、临界产量与缝长的关系

闭合压力增大, 支撑剂颗粒之间的摩擦力也会随之增大, 使得填充层更加稳定。但是闭合压力过大也可能压碎支撑剂, 导致支撑剂回流。有国外学者选择烧结陶粒作为支撑剂, 进行了不同闭合压力下的模拟压裂液返排实验, 最终发现在闭合压力为 3.45~14 MPa 时, 受应力影响更明显, 说明在低闭合压力时, 嵌入程度对稳定性影响程度更大, 且闭合应力越高, 支撑剂嵌入的稳定性越强[15]。朱新春等[14]通过对裂缝中砂拱力学平衡分析, 建立不同闭合应力与临界流速及临界产量的数学模型, 通过数值计算, 得到如图 4 所示的结果, 临界流速及临界产量随裂缝闭合应力的增加而逐渐增加, 说明随着闭合应力的增大, 支撑剂越稳定, 越不容易发生回流。因此, 由前人研究可知, 随着闭合应力的增加, 颗粒间的摩擦系数随之上升, 裂缝中支撑剂的稳定性也相应提高。如果在裂隙未闭合或未完全闭合前实施返排, 由于支撑剂供给的压力不够, 且放喷制度不合理, 则很容易发生回流现象[16]。

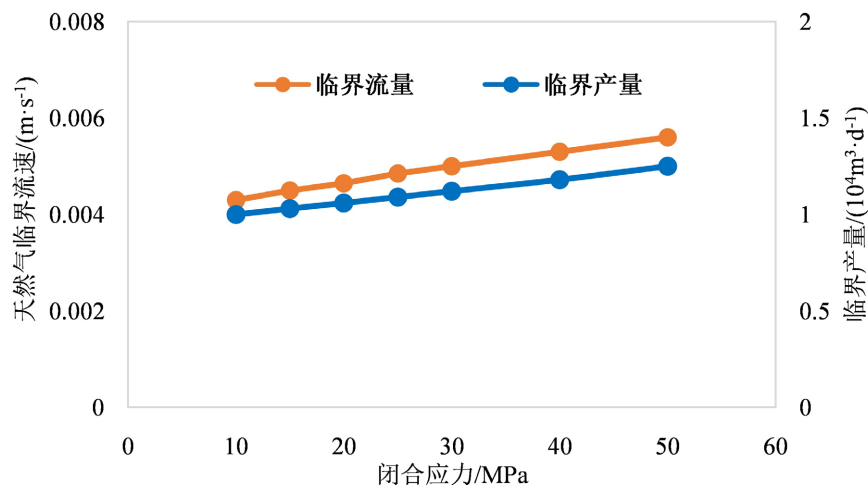


Figure 4. Relationship between critical flow rate, critical yield and closing pressure
图 4. 临界流速、临界产量与闭合压力的关系

岩石硬度对支撑剂稳定性有一定影响，同样闭合应力条件下，硬度较小的储层更稳定。尤其当闭合应力高于 20.68 MPa 时，支撑剂嵌入的稳定性对闭合应力不再敏感，而岩石硬度则成为影响支撑剂稳定性的关键。有学者采用石膏和砂岩样品，测量 16/20 目支撑剂在裂缝中的稳定性，注意到在闭合应力为 6.89 MPa 和 13.79 MPa 之间的稳定性差异对于砂岩要比石膏低得多，分析其原因是由于在软岩样环境中，在闭合应力为 6.89 MPa 条件下大部分支撑剂已经形成了嵌入。

3. 控制回流的方法及现场应用

国内外针对支撑剂稳定性影响因素的研究，研发了多种技术方法控制支撑剂回流，并进行了现场应用。这些技术的推广不仅显著提升了压裂作业的效果，也为油气田的高效开发提供了技术保障。

3.1. 控制返排速度法及现场应用

Table 1. Research progress of the method of controlling flowback speed
表 1. 控制返排速度法的研究进展

作者	方法	结论
李小龙等[20] (2015)	通过室内实验，以现场数据按比例缩小	返排速度越大，总回流量越大
王雷等[21] (2016)	测试压裂液不同返排速度下回流量	当返排速度高于 43.2 m³/d 后，支撑剂回流量增加明显加快。回流主要集中在初期。前 1/3 的返排液量携带了 75%的支撑剂
尹国君等[22] (2016)	利用裂缝导流能力模拟试验装置,模拟压裂施工的返排过程,分析返排速度对支撑剂回流的影响	压裂液返排速度是影响支撑剂回流的决定性影响因素。初期返排速度应小于 50 ml/min 为宜
曹广胜等[23] (2019)	COMSOL 仿真软件中支撑剂模拟流动规律	将压裂液流速控制在 240 m³/d 以下可以有效抑制支撑剂的回流
张矿生等[24] (2023)	将流体力学和离散颗粒元(CFD-DEM)相结合，对目前已有计算支撑剂回流临界返排流速模型进行验证	采用临界返排流速作为入口流速进行返排时，可以避免大量的支撑剂颗粒回流量

通过动态改变油嘴尺寸的方法用来控制压裂液返排速度被广泛运用，Robinson 等[17]发现小油嘴排液可以减小闭合应力的现象，认为在排液初期控制返排速度以及控制裂缝闭合时间，可以尽可能地减少

闭合应力，加强支撑剂的稳定性，减少支撑剂的破裂和回流。赖海涛等[18]也认为，油嘴尺寸的选择是动态的可调整的，并需要在不同的返排阶段改变油嘴尺寸来控制压裂液返排速度，利用编制的支撑剂回流软件计算出不同井口压力下所对应的最适油嘴大小，对油嘴尺寸进行优化设计。由此可见改变油嘴尺寸是最简单最便捷的方式来控制压裂液的返排速度。

前人主要通过实验和数值模拟两个方面研究压裂液返排速度和支撑剂回流量的关系，通过实验研究得到可在返排初期选用相对小的返排速度，后期在不出砂的条件下可适当提高返排速度，从而可兼顾控制支撑剂返排以及返排速度[19]。数值模拟可以通过建立裂缝内支撑剂回流模型模拟压裂液返排过程，展示支撑剂回流量及支撑剂在裂缝的分布，从而分析不同因素对支撑剂滞留与裂缝的影响，可以精确得到有效抑制支撑剂回流的流速。表 1 为控制返排速度法在实验和数值模拟两个方面的研究进展。

3.2. 树脂包胶支撑剂及现场应用

树脂包胶支撑剂(简称 RCP)是最早用于处理支撑剂回流问题的方法之一。如下图 5 所示大多是将支撑剂外包裹热塑膜、表面改良剂、酚醛树脂、环氧树脂等材料，经热固化处理制成，密度相对石英砂小，在作业过程中与普通支撑剂一起泵入储层或尾追进入储层，进入裂缝后，在地层的温压条件下，固化并相互粘合形成一个稳定的渗透带，从而达到防止回流、改善压裂效果的目的[25]。常用的树脂包胶支撑剂可以分为预固化和可固化两类型，两者之间的区别在于前者在进入地层之前就已经固化完全，而后者则正好相反。预固化包胶支撑剂主要用来为裂缝提供高导流能力，可固化包胶支撑剂则主要用来防止回流。由于树脂包胶支撑剂拥有抗破碎能力好、抗压性强、包埋性好及可防止支撑剂嵌入地层等优点，所以在国内外应用广泛。但它也会与压裂液里的添加剂(如交联剂、破胶剂等)发生化学反应，从而影响支撑剂的稳定性。树脂的固化需要合适的温度条件，一方面在温度低于 50℃时不易固化，另一方面不能在超过 200℃的环境中使用，影响其化学性质导致无法相互黏合，另外与普通陶粒支撑剂相比的高成本问题也不得不被考虑在内。

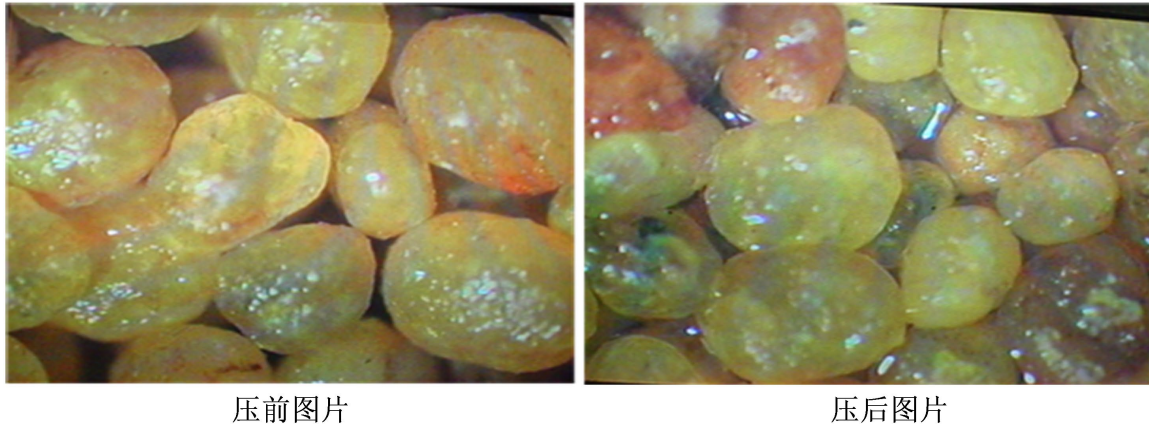


Figure 5. Pre- and post-pressure state diagram of the coated proppant
图 5. 包胶支撑剂的压前后状态图

树脂包胶支撑剂在国内外获得了有效的、广泛的应用，尤其在井温高于 50℃的中后期应用获得更为理想的效果，但在低温浅层中由于无法固结等问题得不到应有的防砂效果，针对这一问题，李怀文研制出了一种在 25℃~50℃下快速固化，并且固化强度也能达到要求的多涂层预包防砂支撑剂。使用树脂涂层支撑剂改善回流最重要的问题之一是成本问题，其价格可能超过未经处理的支撑剂价格的四倍。此外，树脂涂层支撑剂通常需要在低温或者低闭合应力地层情况下，需要额外的化学活化剂，这进一步增加了

成本[26]。Lu 等对此开发出一种固结自聚型支撑剂来控制支撑剂回流，在涂有支撑剂固结助剂(PCA)后，支撑剂依靠物理机制而不是化学键来增加支撑剂对回流的抵抗力[27]。使用该技术没有最低闭合应力、温度或关闭时间要求，涂层可以应用于所有或选择性地应用于部分支撑剂阶段，这为操作员在回排设计和生产策略方面提供了更大的灵活性。总而言之，针对树脂包胶支撑剂存在的缺点，研究人员对其进行了各种改性措施，正朝着抗低温、低成本、适合各种类型的油气藏的方向发展。

通过前人的研究成果，树脂包胶支撑剂在中原油田、孤东油田[28]、大港油田、大庆油田[29]及胜利油田[30]等进行了现场应用，并取得了较好的效果。树脂包胶支撑剂的国内应用情况见表 2。

Table 2. Domestic application of resin-coated proppants
表 2. 树脂包胶支撑剂的国内应用情况

应用区块	井深	应用时间	工艺	特点	应用效果评价
孤东油田	/	1993 年	脲醛树脂溶液	适用于高水期较低温的出砂油井	共防砂 35 井次，成功 28 井次，成功率 84.8%，平均单井日产液 74.1 t，平均单井日产油 8.9 t
胜利油田	/	2001 年	FSJ-V耐高温树脂涂敷砂支撑剂	适应高温注气稠油井防砂要求，固结强度大	平均防砂有效期 307 d，累计产油 1.82×10^4 t,创经济效益 2730 万元
中原油田	3750 m	2003 年	环氧树脂覆膜砂	抗压强度高，亲水性高，浊度、圆度等指标较石英砂明显改善	未出现回流现象，具有压裂效果明显，作用时效长的优点，该井压裂前后生产数据如图 6 所示
大港油田	1355.5 m	2010 年	多涂层预包防砂支撑剂	在 25~50℃ 下快速固化	在 4 口井中应用，获得了明显的防砂效果，截至 2010 年年底油井累计产油 939 t,累计增油 692 t
大庆葡萄花	1800 m	2010 年	新型疏水型包胶支撑剂	低密度，易泵送，耐腐蚀，耐高温、透油阻水	在含水率 98.2%主力层葡16 和葡19 层，施工后日产油 6.2 t/d，日产液为 34.5 t/d，含水率为 82%；抗回流效果较好

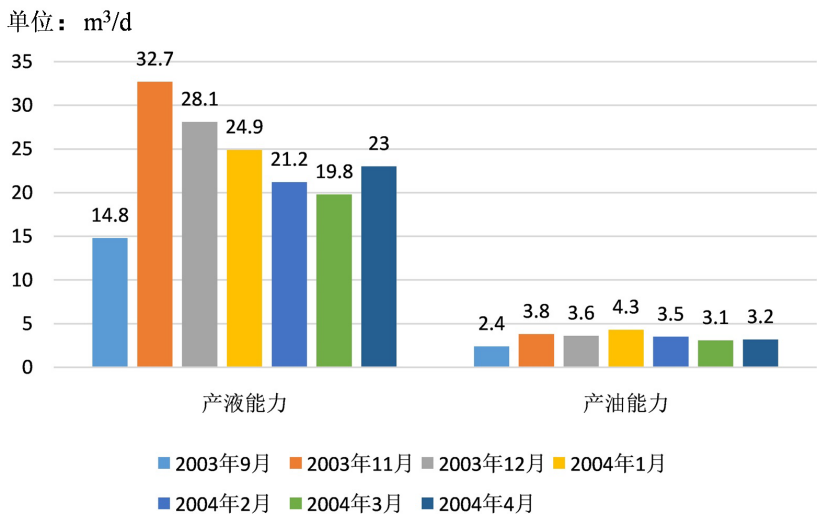


Figure 6. Comparison of production data before and after fracturing of a well in Zhongyuan Oilfield [31]
图 6. 中原油田某井压裂前后生产数据对比[31]

3.3. 纤维拌注控制支撑剂及现场应用

纤维拌注压裂工艺是在压裂液中添加人造纤维，包括陶瓷纤维、金属纤维、碳纤维、有机聚合物纤维和无机玻璃纤维等，依靠纤维的特性，均匀地分散在压裂液中，在充填层中形成网状缠绕结构，每根纤维与若干支撑剂相互接触，依靠支撑剂和纤维接触压力与摩擦力相互作用，如图 7 所示，从而提高支撑剂的固定强度，有效提高压裂液的悬砂性能，使得支撑剂能够在裂缝中铺置均匀，以达到提高压裂效果的目的[32]-[34]。该技术优势在于：比用可固化的树脂包胶支撑剂更灵活，依靠物理作用且无复杂的化学反应，受地层流体、地层温度、关闭压力、关闭时间等因素的影响较小，且与压裂流体配伍性较好，从而达到改善返排效率、减少地层损害的目的。

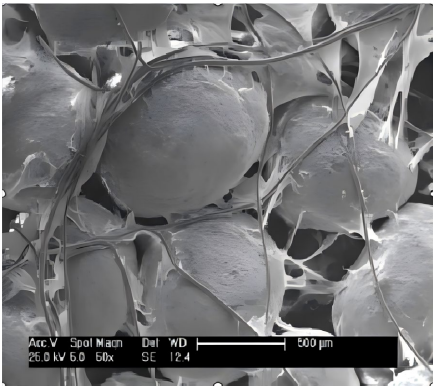


Figure 7. Fiber-proppant sample [35]
图 7. 纤维 - 支撑剂样品[35]

纤维支撑剂的有效性在实验和建立模型后得到了验证，刘伟等[36]根据玻璃短切纤维增强技术建立了介质塑性滑移基质的微观力学模型，测试纤维性能，发现其在成本、性能指标、适应性等各方面都优于树脂包砂技术。刁素等、黄禹忠等、任山等[37]-[39]在川西进行先导试验，通过人工裂缝模拟装置模拟出砂临界流速进行了支撑剂临界流速室内评价实验，发现纤维的加入使得在相同闭合压裂条件下，支撑剂更加稳定，使得回流得到有效控制，预防压裂井的出砂。2021 年，胡阳明等[40]针对聚丙烯纤维，评价注入纤维后的抗回流能力。结果表明，聚丙烯纤维的添加对于陶粒支撑剂裂缝导流能力的影响不大，支撑剂的粒径越大稳定性越好，纤维与支撑剂的质量比 0.012 最佳，纤维长度越长，支撑剂越稳定。这表明，在实际应用中，只有通过合理调整纤维和支撑剂的组合参数，才能在不同地层条件下达到最佳效果。综上所述，纤维支撑剂的研究和应用具有较大的发展前景。通过不断优化材料选择、组合参数和实验方法，并加强理论模型与实际应用的结合，可以进一步提升其在油气田开发中的应用价值和效果。

纤维拌注控制支撑剂由于其优越的防砂，悬砂及防回流性被多次应用在现场压裂施工中，特别是在应对不同地层条件和复杂井况的作业中展现了显著的效果。下表 3 为国内外油气田中纤维拌注控制支撑剂现场应用情况。

Table 3. Domestic application of fiber mixing control proppant
表 3. 纤维拌注支撑剂的国内应用情况

应用地点	应用条件	应用效果	分析
南德克萨斯州和墨西哥湾(1995) [41]	加砂量与常规压裂相当的情况下	返排速度和返排率分别为常规压裂的 5 倍，回流量减少 6 倍	大大缩短了排液的时间，有效控制了支撑剂回流，获得了显著的稳产效果

续表

川西新场气田[42] (2005)	在较疏松的主产层加砂 51 m ³ , 总液量 413 m ³ , 总纤维量为 70 kg 在同区块较致密储层常规加砂压裂, 总液量 305 m ³ , 加砂 22 m ³	返排率为 85.5%, 无支撑剂回流, 仅用 1.5 d 的时间排液约 353 m ³ 返排率 82.9%, 支撑剂回流 0.3 m ³ , 回流比 1.36%	纤维拌注支撑剂能够做到快速排液, 缩短排液时间, 提高返排效率的作用
海拉尔油田贝 301 区块 [43] (2009)	储层欠压严重, 近井地带支撑剂回流, 导致裂缝部分或完全闭合	初期产油 180 t/d, 截止 07 年, 贝 52~56 井累计增产 1184 t, 投入产出比 1:2.6	碳纤维不仅有防砂效果还提高压裂液悬砂能力, 改善裂缝铺砂剖面
苏里格气田[44] (2014)	低孔、低渗、低压	加入纤维后, 放喷出砂明显减少, 还提高了压裂返排速度 50%以上	纤维拌注支撑剂可以提高返排效率, 减少对地层的污染
新疆克拉玛依油田[45] (2013)	低渗、水敏性强、岩性松脆。地层能量不足, 后期注水阶段产液量不高, 砂比 25%	加入纤维压裂后比措施前平均日产液量增加 3.2 倍, 日产油量增加 4.4 倍。全区累积增产油量 8130 t	针对低渗、储集层岩石偏软易碎且地层能量不足的油田, 可通过纤维拌注工艺实施增产措施
靖边气田[46] (2017)	水平井分段压裂, 利用节流放喷管汇快速排液, 以同井场靖 A (全程纤维)、B 井(常规)进行放喷制度对比	A 井出砂率 1.585%, B 井 2.363%	纤维加砂压裂可以有效防止水平井压裂支撑剂回流。提高放喷改业速度
新疆油田[47] (2021)	稠油油藏, 常出现支撑剂、地层砂回流问题。前期树脂砂防砂工艺失败	在准东吉 7 井区进行稠油纤维防砂工艺。6 口井施工后所有井均未出砂, 其中 X ₁ 、X ₅ 井获得高产, 达到 7.3 t/d 以上	纤维防砂工艺可以有效解决稠油油藏支撑剂回流严重的问题

从国内外现场应用情况来看, 从 1995 年南德克萨斯州和墨西哥湾的首次应用, 到近年来在中国的多个不同类型油气田的试验与改进, 纤维拌注技术逐步显示出其在提高返排效率、缩短排液时间、适应性强、控制支撑剂回流以及增强裂缝稳定性方面的显著优势。

纤维拌注支撑剂具有导流能力超过常规压裂、缩短排液时间, 提高返排效率, 控制回流时效长, 用液量小、没有化学作用对地层伤害小, 性质稳定, 成本低廉, 并可有效控制裂缝高度的优点。但纤维拌注支撑剂作业也有着弊端, 即作业时可能会导致连续油管、混合设备和泵送设备的堵塞, 需要进行清洗作业, 返排时可能造成油嘴堵塞的问题。针对以上问题, 研究人员也对纤维拌注工艺做出了改进, 研制将纤维防砂与液氮助排、油嘴优化放喷有机结合的全程纤维网络加砂技术, 此外可降解纤维拌注与脉冲纤维加砂压裂技术也是近年来的技术前沿。

3.4. 杆状支撑剂及现场应用

杆状支撑剂是使用长 2.4~3.0 mm, 直径 1.4~1.5 mm 的圆柱体支撑剂作为尾追支撑剂, 如图 8 所示, 该支撑剂与树脂包胶支撑剂不同, 其不受化学的影响, 也不受到储层自身条件的限制, 不会像纤维拌注支撑剂一样可能会造成油管、设备的堵塞。此外, 由于杆状支撑剂的截面直径比较小, 长度也远大于球形支撑剂直径, 因此导致杆状支撑剂形状的各向异性, 在裂缝内存在较多的铺置形式。事实上, 杆状支撑剂能够有卓越的控制回流的效果是源于改变颗粒形状、影响其充填行为和颗粒间相互作用的主要结果, 杆状支撑剂粒子相互之间具有独特的互锁能力, 颗粒之间互锁桥接, 阻止了杆状颗粒间的相对移动, 形

成坚固的充填层，既能提高裂缝导流能力，也能做到有效防止回流。



Figure 8. Rod-shaped proppant [35]

图 8. 杆状支撑剂[35]

杆状支撑剂在国外应用较为广泛，尤其在 2009~2013 年间，在西部沙漠地区的成功应用[48]。这一应用不仅证明了其在防止支撑剂回流方面的显著效果，也体现了其提升储层导流能力的潜力。以阿尔塔油田为例，针对 18 口采用杆状支撑剂的水力压裂井的评估显示，所有井都实现了零回流效果。同时，使用杆状支撑剂能够显著节约作业费用，每口井的成本减少达 5 万美元，包括洗井、检泵以及生产延误费用，预计节省 72 小时的检泵时间。此外，杆状支撑剂在俄罗斯西西伯利亚油田和印尼苏门答腊岛某油田的现场应用也取得了良好的效果[49][50]。然而，值得注意的是，杆状支撑剂作为高油价时期发展起来的技术，其成本较高，价格是国内常用陶粒支撑剂的 4 至 5 倍。此外，施工时对压裂泵的压力要求较高，且对搅拌质量的要求也较为严格，这为其国内大规模应用带来了一定的挑战。所以说降低成本是其在国内大规模推广的关键，可以考虑更具成本效益的生产工艺和材料替代方案，并优化施工技术，开发更加高效的泵送系统和搅拌设备，以期在国内油气行业中得到更广泛的应用。

4. 压裂支撑剂的前景与展望

近年来，压裂支撑剂对环境的影响引起了广泛关注。据报道，每口油井需用支撑剂约 272 千克，如此庞大的材料运输、储存和处理过程的环境影响不容忽视。特别是在非常规储层开发中，2014 年的支撑剂使用量较 2004 年增长了 10 倍，这引发了诸多环境问题的挑战，亟待进一步研究与评估，包括支撑剂的输送、安全注入和废料处理等方面。

未来支撑剂材料的研发将集中在高性能、微型化和智能化三个主要方向。

1) 高性能材料的研发

将研发重点集中在低密度和高强度材料的开发上。低密度支撑剂能够减轻井下压力，提高运输和作业效率，而高强度支撑剂则确保在高压环境下维持结构稳定，防止破碎和回流。这种结合将有助于提高支撑剂在各种复杂环境中的适应能力。

2) 微型化满足致密气藏开发需求

通过减小支撑剂颗粒的尺寸，可以提高其在细小裂缝中的填充能力，增强支撑效果。同时，微型化支撑剂能够更好地适应复杂的地质条件，提高资源的采收率。

3) 智能化创新改性支撑剂

利用示踪剂和电磁改性等技术，实现支撑剂分布及压裂效果的精确探测。这些技术可以实时监测支

撑剂的状态和位置,优化后续的作业策略。此外,从光、电、磁和温度控制等领域获取的启发,为支撑剂的改性提供了创新思路,拓宽了研究方向,为未来的油气开发带来新的可能性[51]。

5. 结论

1) 支撑剂的性质、流体性质及支撑裂缝的性质都是产生支撑剂回流的主要影响因素。对于所有的压裂井都应考虑到返排速度即临界返排流速对于支撑剂回流的影响。

2) 在压裂液组分简单、配伍性强且储层温度适宜的情况下,可考虑使用树脂包胶支撑剂。

3) 对于砂量大、砂比高的压裂井,建议采用纤维拌注支撑剂工艺。返排过程中需安装两个油嘴,以防止在油嘴堵塞问题发生时能及时切换[52]。

4) 对于高产井或压裂后预计高产的井,经过经济评价后,可慎重考虑使用杆状支撑剂。在使用过程中,应对泵车和混砂车进行严密检查,确保泵注顺利,并且需要有专业人员现场指导和监督。

参考文献

- [1] 李天才, 郭建春, 赵金洲. 压裂气井支撑剂回流及出砂控制研究及其应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006(3): 44-47, 115-116.
- [2] Milton-Taylor, D., Stephenson, C. and Asgian, M.I. (1992) Factors Affecting the Stability of Proppant in Propped Fractures: Results of a Laboratory Study. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Washington DC, 4-7 October 1992, SPE-24821-MS. <https://doi.org/10.2118/24821-ms>
- [3] 何世云, 陈琛. 加砂压裂压后排液的控砂技术[J]. 天然气工业, 2002(3): 45-46.
- [4] 杨晓鹏, 曾芮. 高速通道压裂技术机理研究与应用[J]. 广东石油化工学院学报, 2015, 25(1): 8-13.
- [5] 汪翔. 裂缝闭合过程中压裂液返排机理研究与返排控制[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [6] 程翊珊. 压裂后支撑剂回流机理及其影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [7] 焦国盈, 王嘉淮, 潘竞军, 等. 压裂井支撑剂回流预测研究[J]. 海洋石油, 2007(4): 46-49.
- [8] Goel, N. and Shah, S. (1999) Experimental Investigation of Proppant Flowback Phenomena Using a Large Scale Fracturing Simulator. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 3-6 October 1999, SPE-56880-MS.
- [9] Sparlin, D.D. and Hagen, R.W. (1995) Proppant Selection for Fracturing and Sand Control. *World Oil*, **216**, Article ID: 6635709.
- [10] Yew, C.H., Ma, M.J. and Hill, A.D. (2000) A Study of Fluid Leakoff in Hydraulic Fracture Propagation. *Proceedings of International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*, Beijing, 7-10 November 2000, SPE-64786-MS. <https://doi.org/10.2523/64786-ms>
- [11] 宋军正 郭建春. 压裂气井出砂机理研究[J]. 钻采工艺, 2005(2): 20-21, 111-112.
- [12] 徐庆祥, 王绍达, 张苏杰, 等. 油气井压裂后出砂原因分析及控制措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(19): 55-56, 61.
- [13] 姜春河, 郎学军, 易明新, 等. 支撑剂回流控制技术研究与应[J]. 钻采工艺, 2008(6): 151-153.
- [14] 朱新春, 陈付虎, 李嘉瑞, 等. 大牛地气田生产中支撑剂回流机理及影响因素分析[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(4): 73-76, 82.
- [15] Romero, J. and Feraud, J.P. (1996) Stability of Proppant Pack Reinforced with Fiber for Proppant Flowback Control. *SPE Formation Damage Control Symposium*, Lafayette, 14-15 February 1996, SPE-31093-MS. <https://doi.org/10.2118/31093-ms>
- [16] 殷洪川, 胥良君, 吕泽宇, 等. 页岩气井临界出砂产量预测方法[J]. 特种油气藏, 2023, 30(6): 135-140.
- [17] Robinson, B.M., Holditch, S.A. and Whitehead, W.S. (1988) Minimizing Damage to a Propped Fracture by Controlled Flowback Procedures. *Journal of Petroleum Technology*, **40**, 753-759. <https://doi.org/10.2118/15250-pa>
- [18] 赖海涛, 梁凌云, 黄建宁. 气田防支撑剂回流压裂液快速返排的研究[J]. 石油化工应用, 2009, 28(7): 50-53, 60.
- [19] Ely, J.W. (1996) Experience Proves Forced Fracture Closure Works. *World Oil*, **217**, Article ID: 175994.
- [20] 李小龙, 肖雯, 刘晓强, 等. 压裂返排技术优化[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 402-404.
- [21] 王雷, 文恒. 压裂液返排速度对支撑剂回流量影响实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 200-202, 206.

- [22] 尹国君, 许庆双, 范传雷. 压裂液返排试验及返排制度优化研究[J]. 当代化工研究, 2016(10): 106-107.
- [23] 曹广胜, 白玉杰, 杜童, 等. 基于有限元模拟的支撑剂回流规律[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 218-222.
- [24] 张矿生, 陈宝春, 吴勇, 等. 压裂液返排冲刷支撑剂颗粒的DEM-CFD模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(4): 1009-1014.
- [25] 于庆红, 王宏飞, 隋向云, 等. 树脂包覆支撑剂控制回流方法研究[J]. 石油钻采工艺, 2005(S1): 74-76, 97.
- [26] 李怀文, 邵力飞, 曹庆平, 等. 大港油田多涂层预包防砂支撑剂研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 99-102.
- [27] Lu, W., O'Neil, B., Zhang, K., Wang, C. and Quintero, H. (2016) Enhancing Proppant Flowback Control through Surface Treatment of Proppant. *International Petroleum Technology Conference*, Bangkok, 14-16 November 2016, IPTC-18796-MS. <https://doi.org/10.2523/18796-ms>
- [28] 陈应淋, 王金荣, 郑碧锁, 姚勇. 脲醛树脂溶液防砂工艺及应用[J]. 油气采收率技术, 1995(2): 73-79, 91.
- [29] 文良凡, 邓静静. 覆膜砂压裂技术在油气开发中的应用及效果分析[J]. 石油工业技术监督, 2013, 29(11): 55-57.
- [30] 商祥毅, 严锦根, 潘超奔, 等. 适用于蒸汽吞吐井防砂的FSJ-V耐高温树脂涂敷砂[J]. 油田化学, 2002(2): 118-120.
- [31] 高旺来, 接金利, 张为民. 一种树脂覆膜砂支撑剂的研究及现场应用[J]. 油田化学, 2006(1): 39-41.
- [32] 张潇, 王占一, 吴婷颖, 等. 压裂支撑剂的覆膜改性技术[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 386-400.
- [33] 周林刚. 纤维加砂压裂工艺研究及应用[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(11): 92-95.
- [34] Bustos, O., Powell, A., Olsen, T., Kordziel, W. and Sobernheim, D. (2007) Fiber-Laden Fracturing Fluid Improves Production in the Bakken Shale Multi-Lateral Play. *Proceedings of Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium*, Denver, 16-18 April 2007, SPE-107979-MS. <https://doi.org/10.2523/107979-ms>
- [35] 刘辉. 纤维在低渗透油藏压裂控砂中的应用试验[J]. 江汉石油职工大学学报, 2021, 34(4): 24-6.
- [36] 刘伟, 张静, 李军, 等. 控制水力压裂支撑剂返排的玻璃短切纤维增强技术[J]. 石油钻采工艺, 1997(4): 77-80, 109.
- [37] 刁素, 任山, 黄禹忠, 等. 压裂井高效返排技术在川西地区的先导性试验[J]. 天然气工业, 2008(9): 89-91, 142.
- [38] 黄禹忠, 任山, 兰芳, 等. 纤维网络加砂压裂工艺技术先导性试验[J]. 钻采工艺, 2008(1): 77-78, 89, 154-155.
- [39] 任山, 向丽, 黄禹忠, 等. 纤维网络加砂压裂技术研究及其在川西低渗透致密气藏的应用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 86-89, 117.
- [40] 胡阳明, 赵振峰, 李宪文, 等. 榆林储气库高气量纤维网络抗支撑剂回流实验[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 786-791.
- [41] Howard, P.R., King, M.T., Morris, M., Féraud, J., Slusher, G. and Lipari, S. (1995) Fiber/Proppant Mixtures Control Proppant Flowback in South Texas. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 22-25 October 1995, SPE-30495-MS. <https://doi.org/10.2118/30495-ms>
- [42] 张绍彬, 谭明文, 张朝举, 等. 实现快速排液的纤维增强压裂工艺现场应用研究[J]. 天然气工业, 2005(11): 53-55, 150.
- [43] 刘琦, 刘淼, 李存荣, 等. 海拉尔油田混注纤维压裂技术[J]. 特种油气藏, 2009, 16(6): 74-76, 81, 99.
- [44] 任斌, 刘国良, 张冕, 等. 苏里格气田加纤维压裂技术的应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 121-128.
- [45] 章敬, 李佳琦, 蔡贤平, 等. 纤维混注加砂压裂工艺在克拉玛依油田的应用[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 560-562.
- [46] 桂阳, 陈恒, 曹阳. 纤维加砂压裂在靖边气田水平井的应用[J]. 现代盐化工, 2017, 44(4): 21-24.
- [47] 景帅, 李昌盛, 付宣, 等. 稠油纤维防砂工艺技术的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(6): 139-142.
- [48] Edelman, J., Maghrabia, K., Semary, M., Mathur, A., Zaki, A.S. and Bernechea, J.M. (2013) Rod-Shaped Proppant Provides Superior Proppant Flowback Control in the Egyptian Eastern Desert. *SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition*, Muscat, 28-30 January 2013, SPE-164014-MS. <https://doi.org/10.2118/164014-ms>
- [49] Valiullin, A., Makienko, V., Overin, A., Yudin, A. and Gromovenko, A. (2015) The First Experience of Rod-Shaped Proppant Implementation in Western Siberia Oil Fields (Russian). *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, 26-28 October 2015, SPE-176540-MS. <https://doi.org/10.2118/176540-ru>
- [50] Soetikno, L., Artola, P.D. and Guimaraes, C. (2014) Novel Rod-Shaped Proppant Fracturing Boosts Production and Adds Recoverable Reserves in Indonesia during Hydraulic Fracturing Field Revival Campaign. *International Petroleum Technology Conference*, Kuala Lumpur, 10-12 December 2014, IPTC-18086-MS. <https://doi.org/10.2523/18086-ms>
- [51] 牟绍艳, 姜勇. 压裂用支撑剂的现状与展望[J]. 工程科学学报, 2016, 38(12): 1659-1666.
- [52] 郑平, 邹一锋. 水平井纤维伴注加砂压裂工艺应用[J]. 新疆石油天然气, 2013, 9(1): 67-71.