

基于热焓利用率的原油管输优化运行研究

杨璐¹ 成庆林¹ 刘家鑫¹ 吴梅² 甘亦凡¹

1. 东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要:在区分可避免、不可避免热焓损失的基础上,提出了热焓利用率的定义,用以评价原油管道不同运行工况下的焓耗状况,能够真正体现对热焓的有效利用程度。以大庆某输油管道为例,计算原油管道在不同运行条件下的热焓利用率,研究其随管径、原油输量、出站温度及保温层厚度等影响因素的变化情况,并采用正交试验分析法比较四种因素对管道热焓利用率的影响程度。研究表明,四种因素对热焓利用率影响程度由大到小依次是管径、原油输量、出站温度、保温层厚度,可为原油管道优化运行提供一定理论依据。

关键词:原油管道;热焓损失;热焓利用率;正交试验分析;优化运行

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.01.005

0 前言

近些年来,有国内研究人员将焓分析方法引入到原油管输能耗分析^[1-4]中,并取得了一些研究成果。李东明^[5]针对掺热水和掺热油两种原油集输系统进行焓损分析,研究表明掺热水流程中散热损失较大,焓损系数高于掺热油流程,掺热油流程优于掺热水流程,原油集输系统节能的重点应为改进管线隔热保温以减少散热损失。张萌^[6]指出原油管输过程必定伴随着推动焓的消耗,并依据焓分析原理建立原油管输过程的焓分析模型,推导出原油管输过程中推动焓耗的计算式,进一步分析推动焓耗随管径、原油输量、出站温度、保温层厚度等运行参数的变化情况,为进行管输过程焓流分类奠定了基础。李哲^[7]在阐述外部焓损失与内部焓耗散的基础上,从原油管输过程用能实质出发,提出将管输过程中的焓流分为有效焓耗和无效焓耗进行研究,并推导出有效焓耗、无效焓耗的计算方法,为保证原油管道节能输送提供了新思路。

考虑到原油管道运行过程中,热焓损失往往占据总焓损失的主要部分,特别对于长距离、低输量运行的管

道,仅加热自耗油量就可高达原油输量2.5%以上^[8-9],而目前关于管输过程热焓损失的分析相对较少,并且原油管道不同的运行参数对热焓损失影响甚大,不能简单地以热焓损失的大小来评价管道运行过程中的焓耗状况,因此有必要在正确区分管输过程中可避免、不可避免热焓损失的基础上,进一步引入无量纲量——热焓利用率,对原油管输过程的焓耗状况进行评价,能够真正体现对热焓的有效利用程度,并分析研究热焓利用率随运行参数变化的规律,为原油管道节能输送提供理论依据。

1 热焓利用率的定义及计算方法

原油管道输送过程中存在着传热及流体流动等不可逆过程,因而能的“品质”逐渐降低,焓值随之减少^[10-12]。本文将原油管输过程中因起、终点温差传热不可逆过程所导致减少的那部分焓值,定义为原油管输过程中的热焓损失,记为 $E_x(T)$,计算式为:

$$E_x(T) = Gc(T_q - T_z - T_0 \ln \frac{T_q}{T_z}) \quad (1)$$

收稿日期:2016-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51534004,51674086);黑龙江省普通高校科技创新团队基金项目(2009 td 08)

作者简介:杨璐(1991-),女,河北廊坊人,硕士,主要从事热力学分析及油气储运综合节能的研究

式中: G 为原油的质量流量, kg/s ; c 为原油比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_q 为原油出站温度, $^\circ\text{C}$; T_z 为原油进站温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

对于实际热力过程和循环而言,温差、压差、化学势差等强度量势差的存在必然导致热损失,势差越小,热损失就越小^[13-15]。文献中将技术上或经济上的最小热损失定义为不可避免热损失^[16]。同样,对于原油管输过程而言,管道起、终点之间的最小温差即为原油理论最低温度与最低进站温度之差,依据规定原油最低进站温度要求在凝点 3°C 以上,最低出站温度可根据苏霍夫公式^[17]求得,因此,与原油管道最小温差相对应产生的热损失,即为在保证原油管道安全经济运行条件下的最小热损失,定义为管输过程中的不可避免热损失,记为 $E_{x,u}(T)$,计算式为:

$$E_{x,u}(T) = Gc(T_R - T_{z'} - T_0 \ln \frac{T_R}{T_{z'}}) \quad (2)$$

$$T_R = T_0 + (T_{z'} - T_0)e^{aL} \left(a = \frac{K\pi d}{Gc} \right) \quad (3)$$

$$T_{z'} = T_c + 3 \quad (4)$$

式中: T_R 为原油最低出站温度, $^\circ\text{C}$; $T_{z'}$ 为原油最低进站温度, $^\circ\text{C}$; T_c 为原油凝点温度, $^\circ\text{C}$; d 为管道内径, m 。

目前对原油管输过程的能耗评价方法,虽然以焓分析法为基础,强调参与管输过程的热能和压能存在“品质”的差异和变化^[18],但是对于不同的管输工艺要求和不同的运行工况,管输过程中的热耗损失都各不相同,若只从热耗的数值大小评价管输过程的能耗状况,难以全面、科学地反映输油管道的能耗水平。因此引用热焓利用率(η_r)指标,评价不同原油管输过程中的热焓利用程度, η_r 计算式为:

$$\eta_r = \frac{E_{x,u}(T)}{E_x(T)} \quad (5)$$

式中: $E_{x,u}(T)$ 为原油管输过程的热焓损失, kJ/s ; $E_x(T)$ 为原油管输过程的不可避免热焓损失, kJ/s 。

可以看出 η_r 计算值越大,表明原油管输过程中用于输油的热焓比例越大,即管输过程中热焓较大幅度地用于输送原油; η_r 计算值越小,表明原油管输过程中可避免热焓损失越大,热焓较多地白白散失于环境中,原油管输系统有较大的节能空间。

综上所述,原油管输过程中热焓利用率计算流程见图 1。

2 热焓利用率影响因素分析

以大庆油田某输油管道为例,对原油管输过程的热焓利用率进行分析,管道基本运行参数见表 1。

选择管径分别为 168、219、273、323 mm,对管输过程的热焓利用率进行计算,结果见图 2。管径越大,原油输

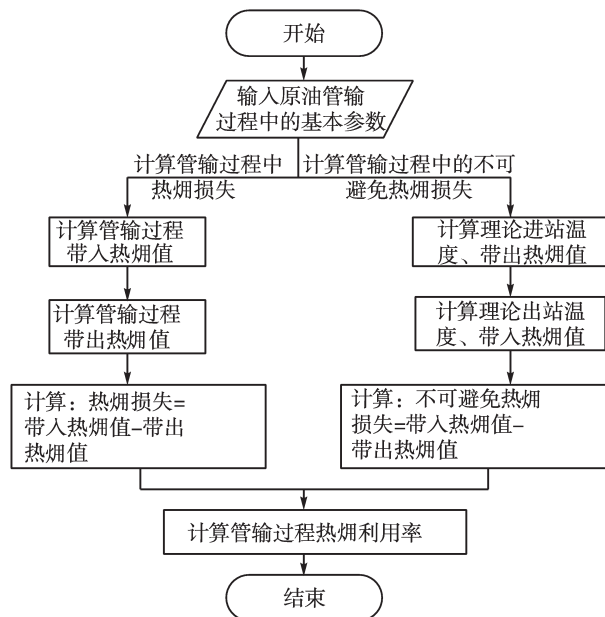


图 1 原油管输过程中热焓利用率计算流程图

送过程中的热焓利用率越小,从温度场角度分析,随着管径的增大,原油的散热面积增大,传热过程加剧,导致管输过程中温降加快,相应的热焓损失增大,管内原油与周围环境之间存在较大温差,导致原油携带的热焓更多地白白散失到环境中,相应地不可避免热焓损失减小,热焓利用率降低。

表 1 大庆某输油管道基本运行参数

项目	数据	项目	数据
管长 /m	45 121	管径 Φ /mm	219 × 5.6
埋地深度 /mm	1 600	析蜡点 / $^\circ\text{C}$	47.7
出站温度 / $^\circ\text{C}$	65	反常点 / $^\circ\text{C}$	36.2
出站压力 /MPa	3.06	凝点 / $^\circ\text{C}$	25
管道输量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}$)	70	密度(35 $^\circ\text{C}$) / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	860
环境温度 / $^\circ\text{C}$	-4.4	密度(55 $^\circ\text{C}$) / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	830
土壤导热系数 $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$	1.4	黏度(30 $^\circ\text{C}$) / ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	70
管道导热系数 $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$	45.24	黏度(50 $^\circ\text{C}$) / ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	9.41

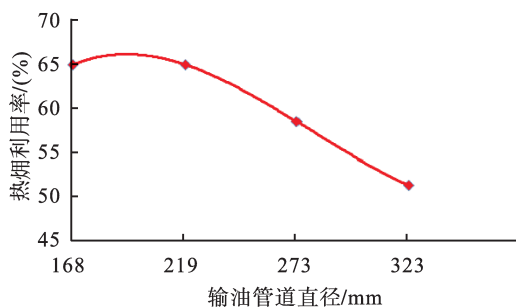


图 2 热焓利用率随管径变化曲线

选择原油输量分别为 50、60、70、80、90、100 m^3/h , 对管输过程的热焓利用率进行计算, 结果见图 3。随着原油输量增加, 热焓利用率先升高后降低, 由此可知, 确定输油管道的最优原油输量对降低管输过程的热焓损失、保证管输过程顺利进行至关重要。

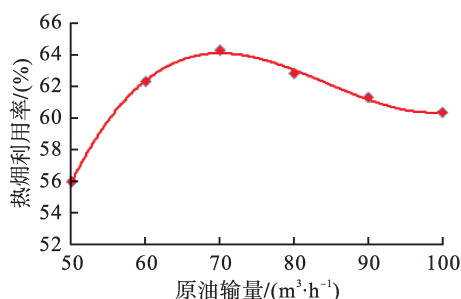


图3 热焓利用率随原油输量变化曲线

选择出站温度分别为 55、60、65、70、75 $^{\circ}\text{C}$, 对管输过程的热焓利用率进行计算, 结果见图 4。随着原油出站温度降低, 管内原油与周围环境的温差减小, 热焓利用率逐渐升高, 由此可知, 低温运行是原油管道节能输送的一个方向^[19]。但由于我国多产含蜡原油, 在较低温度下输送易出现凝管事故, 因此有必要确定最佳原油出站温度以保证原油管输安全经济运行。

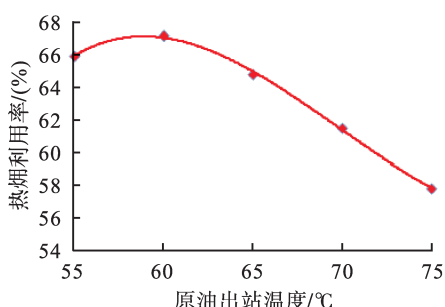


图4 热焓利用率随出站温度变化曲线

选择保温层厚度分别为 10、20、30、40、50 mm, 对管输过程的热焓利用率进行计算, 结果见图 5。管输过程中保温层厚度为零时, 管输过程中的热焓利用率最低, 随着保温层厚度不断增大, 保温性能越来越好, 热焓利用率不断升高, 但当厚度超过 40 mm 后, 热焓利用率开始下降。因此为保证原油管道的节能优化运行, 有必要考虑保温层厚度与热焓利用率的关系, 从而确定最佳的保温层厚度。

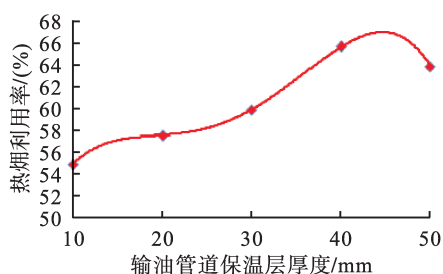


图5 热焓利用率随保温层厚度变化曲线

3 热焓利用率正交试验分析

上文分别分析了管径、原油输量、出站温度和保温层厚度等因素对原油管输过程中热焓利用率的影响, 但是各影响因素之间谁占主导作用并不清楚, 因此有必要采用正交试验分析法^[20-22]对各个因素的影响程度进行分析。假设各影响因素之间无交互作用, 可选 4 因素正交表进行试验, 对于 4 因素 3 水平的正交试验, 最少需要试验 9 组, 记为 $L_9(3^4)$, 各因素及水平取值见表 2, 具体试验方案及计算结果见表 3。

表2 各影响因素及水平取值

水平	管径 / mm	原油输量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出站温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温层厚度 / mm
1	168	70	60	10
2	219	80	70	20
3	273	90	80	40

表3 正交试验计算结果

水平	管径 / mm	原油输量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出站温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温层厚度 / mm	热焓利用率 / (%)
1	168	60	55	10	59.538
2	168	70	65	20	69.874
3	168	80	75	40	55.177
4	219	60	75	40	59.276
5	219	70	55	10	60.062
6	219	80	65	20	64.940
7	273	60	75	20	50.454
8	273	70	55	40	59.972
9	273	80	65	10	51.748

本文应用极差分析法对试验结果进行分析, 对第 m 因素 n 水平所对应的热焓利用率求平均值 K_{mn} ($m, n = 1, 2, 3$), 通过 K_{mn} 可以确定 m 因素的最优水平以及 m 因素的变化对热焓利用率的影响。最后通过式 (6) 计算得到 m 因素的极差 R_m , 极差可以反映出各影响因素对热焓利用率影响程度的大小, 即:

$$R_m = \max(K_{m1}, K_{m2}, K_{m3}) - \min(K_{m1}, K_{m2}, K_{m3}) \quad (6)$$

热焓利用率极差分析结果见表 4。通过极差分析可知, 各因素影响热焓利用率的主次顺序为管径、原油输量、出站温度、保温层厚度, 从降低输油管道热焓损失角度来讲, 节能工作的重点也应从这几个角度出发。使热焓利用率最高的各因素水平组合方案为管径 168.3 mm、原油输量 80 m^3/h 、出站温度 55 $^{\circ}\text{C}$ 、保温层厚度 20 mm, 对该方案进行计算得到热焓利用率为 75.616%, 高于已进行的 9 次试验, 因此可认为该方案能达到优化运行的目的。

表 4 热焓利用率的极差分析

类别	管径 / mm	原油输量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出站温度 / $^{\circ}\text{C}$	保温层厚 度 /mm
K_1	61.530	56.422	61.483	57.116
K_2	61.426	63.302	60.299	61.756
K_3	54.058	57.288	55.231	58.141
R	7.472	6.880	6.252	4.640

4 结论

本文针对原油外输管道,基于正交试验研究管径、原油输量、出站温度、保温层厚度等因素对原油管输过程热焓利用率的影响,得出以下结论:

1) 热焓利用率的大小与原油管输过程中的运行参数有关,为无量纲常数,可以用来评价原油管道不同运行工况下热焓的利用状况。

2) 通过实例计算可知:随着管径增大,热焓利用率逐渐降低;随着原油输量增大,热焓利用率先升高后降低;随着原油出站温度降低,热焓利用率逐渐升高;随着保温层厚度增大,热焓利用率逐渐升高。

3) 采用正交实验法分析了各影响因素对原油管输过程热焓利用率的影响程度大小,结果表明管径对热焓利用率影响最大,其次为原油输量、出站温度,保温层厚度对热焓利用率影响最小。

4) 依据优选出来的方案使热焓利用率显著提升,有利于对原油管输过程进行节能优化,可以为原油管道节能输送工作提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 杨兴兰,张 鹏,张志勇,等. 热油管道优化运行研究现状[J]. 天然气与石油,2009,27(2):8-12.
Yang Xinglan, Zhang Peng, Zhang Zhiyong, et al. Research on Hot Oil Pipeline Operation Optimization [J]. Natural Gas and Oil, 2009, 27 (2): 8-12.
- [2] 胡 森,周 广,苗 青,等. 东部原油管网能耗问题分析[J]. 油气储运,2010,29(5):401-405.
Hu Sen, Zhou Guang, Miao Qing, et al. Energy Consumption Analysis on Eastern Oil Pipeline Network [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29 (5): 401-405.
- [3] 梁宏宝,马百涛,姜 勇,等. 长输原油管道能耗关键影响因素研究[J]. 化工机械,2016,43(3):311-314.
Liang Hongbao, Ma Baitao, Jiang Yong, et al. Analysis of Factors Influencing Energy Consumption of Crude Oil Pipelines [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43 (3): 311-314.
- [4] 孟振虎. 输油管道运行优化理论与方法的分析[J]. 天然气与石油,2004,22(1):18-22.
Meng Zhenhu. Analysis on Theory and Method of Optimum Operation of Oil Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2004, 22 (1): 18-22.
- [5] 李东明,吴照云,项新耀,等. 原油集输工艺流程的焓分析评价[J]. 石油学报,1993,14(2):102-109.
Li Dongming, Wu Zhaoyun, Xiang Xinyao, et al. Exergy Analysis of Technological Processes for Oil Gathering and Transmission [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14 (2): 102-109.
- [6] 张 萌. 管输原油过程热力学焓流描述与分析[D]. 黑龙江:东北石油大学,2013.
Zhang Meng. Description and Analysis of Thermodynamics Exergy Flow in Oil Pipeline Transportation System [D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2013.
- [7] 李 哲. 原油管道多层级焓传递能耗评价体系的建立及应用[D]. 黑龙江:东北石油大学,2014.
Li Zhe. Establishment and Application of Multi-Level Exergy Transfer Evaluation System for Energy Consumption in Crude Oil Pipeline [D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2014.
- [8] Fogler H S, Singh P, Venkatesan R, et al. Formation and Aging of Incipient Thin Film Wax-Oil Gels [J]. AIChE Journal, 2000, 46 (5): 1059-1074.
- [9] 杨世铭. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1987:246-247.
Yang Shiming. Heat Transfer Theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 246-247.
- [10] 成庆林,丁 宁,衣 犀,等. 原油管输不可逆过程焓的传递和转换规律研究[J]. 热科学与技术,2015,14(2):125-129.
Cheng Qinglin, Ding Ning, Yi Xi, et al. Study of Exergy Transfer and Conversion Law of Irreversible Process in Crude Oil Pipeline Transportation [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015, 14 (2): 125-129.
- [11] 成庆林,孙晓丽,高东宇. 含蜡原油管道输送过程的熵产率分析[J]. 工程热物理学报,2013,34(3):488-492.
Cheng Qinglin, Sun Xiaoli, Gao Dongyu, et al. Entropy Generation Rate Analysis for Pipeline Transportation of Waxy Crude Oil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34 (3): 488-492.
- [12] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
Zhu Mingshan. Exergy Analysis of the Energy System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [13] 傅泰生,肖跃雷,冯 霄. 换热器中的不可避免焓损失[J]. 华北电力大学学报,2003,30(5):79-82.
Fu Qinsheng, Xiao Yuelei, Feng Xiao, et al. Inevitable Ex-

- ergy Loss in Heat Exchanger [J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30 (5): 79-82.
- [14] 傅秦生,肖跃雷,冯 霄. 蒸气压缩制冷循环中的不可避免烟损失[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 546-548.
Fu Qinsheng, Xiao Yuele, Feng Xiao, et al. Inevitable Exergy Loss in Vapor-Compression Refrigeration Cycle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37 (5): 546-548.
- [15] Cheng Q L, Zhang M, Wang X X. Deduction and Analysis of Driving Exergy Loss in Oil Pipeline System [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, (291-294): 688-692.
- [16] 傅秦生,冯 霄. 热力循环中的不可避免的烟损失[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(11): 1106-1108.
Fu Qinsheng, Feng Xiao. Inevitable Exergy Loss in Heat Engine Cycle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35 (11): 1106-1108.
- [17] 王 凯,吴 明. 热油管道输送含蜡原油的轴向温降计算[J]. 管道技术与设备, 2005, (2): 8-9.
Wang Kai, Wu Ming. Calculation of Axial Temperature Drop Along Hot Waxy Oil Pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2005, (2): 8-9.
- [18] 项新耀. 烟概念及烟值的计算[J]. 油田地面工程, 1985, 4(1): 27-35.
Xiang Xinyao. The Concept of Exergy and the Calculation of Energy Value [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1985, 4 (1): 27-35.
- [19] 吴世逵,梁朝林,李大上,等. 易凝原油低温热输送的研究[J]. 油气储运, 2004, 23(5): 13-16.
Wu Shikui, Liang Chaolin, Li Dashang, et al. Study on Low-temperature Transportation of High Pour Point Crude Oil [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23 (5): 13-16.
- [20] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27 (9): 52-55.
- [21] 孙 蕾,李军怀. 一种基于正交法和扩展卡方检验的关联分类算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1692-1695.
Sun Lei, Li Junhuai. Multi-Class Associative Classification Based on Intersection Method and Extended Chi-Square Testing [J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28 (7): 1692-1695.
- [22] 汤红霞,方木云,刘 明,等. 基于正交法的软件测试用例生成[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14): 3673-3676.
Tang Hongxia, Fang Muyun, Liu Ming, et al. Test Case Generation for Software Based on Orthogonal Experiment Design [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29 (14): 3673-3676.

中国石油在川页岩气年产量超 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$

2016年,长宁—威远国家级页岩气示范区生产页岩气超 $23 \times 10^8 \text{ m}^3$,日产气量达 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。至此,中国石油在川页岩气年产量超 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$,为保障冬供开足马力。

根据《四川省页岩气产业发展2016年度实施计划》,四川省在2016年要建成页岩气年产能 $35 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气产量达到 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。据西南油气田有关人员介绍,长宁—威远国家级页岩气示范区2016年产气量已超 $23 \times 10^8 \text{ m}^3$,加上昭通区域产量,中国石油在川页岩气年产量超过 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$,全面完成实施计划。

目前,长宁—威远国家级页岩气示范区所在的内江、自贡、宜宾等地,已有超过5万户城乡居民用上了页岩气。页岩气还通过外输干线直供宜宾主城区,有力拉动了地方经济发展。

页岩气的规模效益开发,将为建设美丽四川发挥更加重要的作用。

(兰 洁 摘自中国石油新闻中心网)