松河井田地温特征及煤层气井适配性压裂工艺

赵 霞[1,2],赵凌云[1]

(1. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550008; 2. 贵州省煤田地质局,贵州 贵阳 550008)

摘 要: 基于煤层气勘查开发示范工程,分析了黔西松河井田地温特征及其对煤层气开发的影响,探讨了龙潭煤系上煤组压裂工艺优选及下煤组压裂工艺优化方案。研究表明: 受泥岩、煤层热导率低及煤系隔水性好、富水性弱的共同影响,龙潭煤系纵向地温梯度达 3.57~4.65 ℃/hm,表现出明显的正地温梯度。基于不同温度下煤的等温吸附试验,45 ℃条件下下煤组各煤层煤层气可采系数与 30 ℃相比提高了 4.55%~11.67%; 受此影响,下煤组压裂深度为 620~900 m 时,煤层气采收率较高。采用 CO_2 泡沫压裂工艺适合井田下煤组超压、低渗、敏感性及滤失性强的储层特点,煤层埋深超过 750 m 即满足 CO_2 泡沫压裂对储层温度的要求。同时,利用低温活性水压裂液注入可大幅降低上煤组储层温度,实现煤层气开发过程中的升温解吸、渗流。

关键词: 松河井田; 地温; 煤层气; 解吸; 水力压裂

中图分类号: TE377 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)02-0017-05

Geothermal characteristics and suitable CBM well fracturing technology in Songhe Mine Field

Zhao Xia[1,2], Zhao Lingyun[1]

(1. *Guizhou Provincial Engineering and Technology Research Center of Coalbed Methane and Shale Gas, Guiyang* 550008, *China*;
2. *Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang* 550008, *China*)

Abstract: Based on the demonstration project of coalbed methane (CBM) exploration and development, this paper analyzed the geothermal characteristics and its effect on CBM development, and discussed the coal group fracturing optimization scheme of Longtan Formation in Songhe Mine Field, West Guizhou. The research has shown that vertical geothermal gradient was 3.57~4.65 ℃/hm in Longtan Formation by the combined effect of low thermal conductivity of mudstone and coal seam, hydrogeological conditions of well water-resisting property and low water-richness, therefore, the geothermal gradient showed positive abnormal significantly in the Longtan Formation. According to the experimental results of isothermal adsorption under different temperatures, CBM recoverable coefficient increased by 4.55%~11.67% in lower coal group under the temperature condition of 45 ℃ compared with 30 ℃. Affected by this, CBM recovery ratio would be higher when the burial depth of lower coal group was 620~900 m. CO_2 foam fracturing technology was suitable for the reservoir characteristics of high reservoir pressure, lower original, strong sensitivity and filtration permeability in lower coal group, and reservoir temperature could meet the CO_2 foam fracturing requirement of higher than 40 ℃, while the burial depth of lower coal group was more than 750 m. Low temperature active hydraulic fracturing fluid injection could significantly reduce the reservoir temperature of the upper coal group, and forms CBM desorption, exploitation with coal reservoir temperature rising in the process of CBM development.

Key words: Songhe Mine Field; geothermal temperature; coalbed methane; desorption; hydraulic fracturing

0 引 言

黔西地区煤层气资源丰富,开展区域煤层气地质条件研究,对促进煤层气地面勘查开发具有重要的现实意义[1]。现代地温场控制下的煤储层温度条件直接影响到煤层气赋存、解吸及产出过程,是煤

收稿日期: 2015-10-18; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.02.003

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204162,41272154); 贵州省科技重大专项资助项目(黔科合重大专项字[2014]6002 号)

作者简介: 赵 霞(1967—),女,贵州息烽人,高级工程师,硕士,现任贵州省煤田地质局副局长。Tel: 0851-84809216, E-mail: gzmtzhaoxia@qq.com

引用格式: 赵 霞,赵凌云.松河井田地温特征及煤层气井适配性压裂工艺[J].煤炭科学技术,2016,44(2):17-21.

Zhao Xia, Zhao Lingyun. Geothermal characteristics and suitable CBM well fracturing technology in Songhe Mine Field[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 17-21.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

储层评价及产能模拟的重要参数[2]。近年来，国内外学者基于吸附试验研究了温度对煤吸附特征的影响，普遍认为高温条件有利于煤层气的解吸[3-4]，但对不同煤阶煤的渗透性改变却存在显著的差异[5-8]。同时，以往工作多集中在理论研究方面[9-10]，较少从开发工艺选择及优化视角研究现代地温场对煤层气地面开发的影响。

笔者基于黔西松河井田煤层气勘查开发示范工程资料，分析了该井田地温特征及其对煤层气地面开发的影响，对黔西煤层气井开发工艺优化具有指导意义。

1　地质与工程背景

1.1　井田地质条件

松河井田位于贵州省六盘水煤田盘江矿区北部，土城向斜北翼中段，出露地层由老至新为峨眉山玄武岩组($P_3\beta$)、龙潭组(P_3l)、飞仙关组(T_1f)、永宁镇组(T_1yn)、第四系(Q)。井田整体为一单斜构造，倾向 SW；区内共查出断层 108 条，以斜向高角度正断层为主，走向 NE —NEE，倾角 45°～80°。

井田含煤地层为龙潭组与峨眉山玄武岩组第二段，龙潭组为区域煤层气勘查开发目标层系。龙潭组厚 341 m，含煤 47～66 层，一般为 50 层。含煤厚度 37～47 m，一般为 41 m，含煤系数 12%。

井田内可采煤层 18 层，其中：全井田可采煤层为 1+3、4、9、12、15、16、17 号，可采总厚 11.68 m；大部分可采煤层有 5_1、6_2、18、27_2、29_2、29_3、32 号，可采总厚 8.85 m；局部可采煤层有 10、11、27_1、29_1 号，可采总厚 4.49 m。

根据松河井田龙潭煤系煤层群叠置关系，可将各煤层划分为上、中、下 3 个煤组[11]。对于煤层气勘查开发而言，主要目标煤层为厚度大、含气量高、煤体结构较为完整的上煤组 1+3、4、5_1、9、12 号煤层，下煤组 27_1、27_2、29_2、29_3 号煤层；中煤组各煤层构造煤发育或厚度薄，不利于煤层气地面开发。

1.2　煤层气勘查开发示范工程

为了探索与煤层群发育区煤层气地质条件相匹配的开发技术工艺，贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心等单位在松河井田开展了煤层气地面勘查开发示范工程，实施了 1 口煤层气参数井及 9 口煤层气开发试验井(1 个丛式井组)。参数井及开发试验井施工过程中，开展了煤岩样品测试、裸眼井温测井、井温测井压裂裂缝监测等工作，系统获得了示范工区地层温度、储层物性等数据，为研究提供了基础资料。

2　井田地温特征

煤田地质勘探阶段，松河井田内开展了 2 个钻孔的近似稳态测温及 26 个钻孔的简易测温工作。基于上述钻孔测温资料，确定井田恒温带深度为 20.0 m，恒温带温度为 17.1 ℃，这与井田所处的盘县地区地面年平均温度 17.3 ℃相近。由于煤田勘探阶段所施工的钻孔垂深多为 300～500 m，因此未能系统查明煤层气勘查开发 500～900 m 深度范围内的地温特征。

松河井田煤层气勘查开发示范工程实施后，根据开发试验井松 1 井裸眼测温结果，分析地层温度、地温梯度与垂深的关系如图 1 所示。

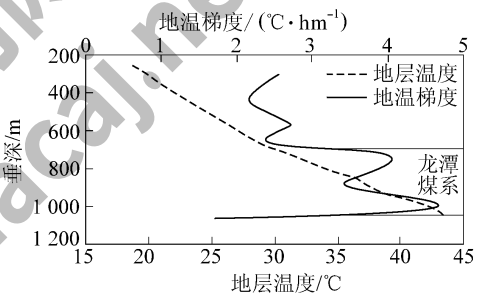


图 1　松 1 井地层温度、地温梯度

Fig.1　Formation temperature and geothermal gradient of Well Song 1

由图 1 可见：纵向上，松河井田地温梯度变化较大，变化范围在 1.71 ～4.65 ℃/hm。上部飞仙关组地温梯度为 2.19～2.72 ℃/hm，表现为轻度的地温梯度负异常；下部龙潭煤系地温梯度为 3.57～4.65 ℃/hm，表现为明显的正地温梯度；煤层埋深 750 m 处，地层温度超过 40 ℃，已进入地温梯度异常背景下的高温区。

井田龙潭组地温梯度明显高于上覆飞仙关组的原因，主要受控于地层组不同岩性岩石热导率的差异。龙潭组以浅灰色、深灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主，夹较厚的暗色泥岩及煤层；与上覆飞仙关组相比，其泥岩厚度、煤层厚度及占总厚度百分比明显增大(图 2)。

由于泥岩、煤层的热导率与粉砂岩、细砂岩相比明显偏低[12-13]，因此这种低热导率的岩层在一定程度阻碍了地层内部热流在龙潭组内部的传播与散失。此外，由于龙潭组隔水性好、富水性弱，地下水活动微弱[14]，因此共同导致了松河井田龙潭组地温

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

梯度明显的正异常。

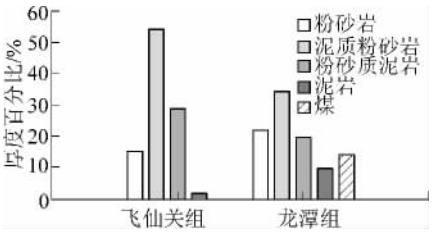


图 2　松 1 井钻遇地层组不同岩性厚度比

Fig. 2　Thickness ratio of different lithologies of Well Song 1

3　煤层气井适配性压裂工艺

3.1　压裂段埋深对可采性的影响

为了研究储层温度对煤的吸附特征及煤层气资源可采性的影响，采集了龙潭组煤系下煤组 21、27_1、29_3号煤样，分别开展了在 30、35、45 ℃条件下的等温吸附试验，所获得的空气干燥基煤样等温吸附试验结果见表 1。

表 1　不同温度下煤样等温吸附参数

Table 1　Coal adsorption parameters under different temperature

煤层编号	兰氏体积 V_L/(m³·t⁻¹)			兰氏压力 P_L/MPa		
	30 ℃	35 ℃	45 ℃	30 ℃	35 ℃	45 ℃
21	21.57	20.11	19.82	1.18	1.27	1.41
27_1	24.26	23.78	23.51	2.07	1.91	2.30
29_3	18.64	18.00	17.84	1.09	1.20	1.31

由表 1 可见: 随着试验温度的升高，兰氏体积 V_L逐渐减小，煤的最大吸附能力略有下降; 兰氏压力 P_L随着温度的升高整体上表现出增大的趋势，这在一定程度增加了煤层气开发中的解吸量，说明高温对煤基质甲烷脱附起到活化作用，较高的储层温度有利于煤层气的地面开发。

根据煤层气参数井松 1 井的现场、室内测试资料，21、27_1、29_3 号煤空气干燥基含气量分别为 12.42、14.06、18.53 m³/t。参考国内外煤层气开发的经验，中煤阶煤储层废弃压力取 0.7 MPa，采用等温吸附曲线法预测不同储层温度条件下各煤层煤层气可采系数结果如图 3 所示。

由图 3 可见: 30 ℃条件下，各煤层煤层气可采系数相对较低; 随着储层温度的升高，煤层气可采系数总体上呈现增大的趋势。与 30 ℃条件相比，各煤层 45 ℃下的煤层气可采系数提高了 4.55% ~ 11.67%。尤其是 21 号煤层，45 ℃条件下煤层气可采系数分别比 30、35 ℃条件下的煤层气可采系数提高了 11.67%、7.08%。

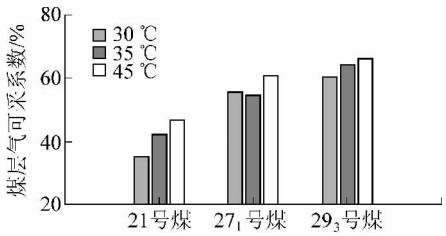


图 3　不同温度下各煤层煤层气可采系数

Fig. 3　CBM recovery rate under different temperature

由于储层温度直接影响到煤的吸附特征，在煤层初始含气量一定的条件下，较高的储层温度增加了煤层气的解吸量，因此煤层气资源具有更好的可采性。基于松河井田地温梯度纵向特征分析: 当龙潭煤系下煤组埋深在 620~900 m 时，煤储层温度为 35~42 ℃，在此深度范围内进行下煤组压裂段优选，预期可获得较高的资源采收率。

3.2　下煤组压裂工艺优选

松河井田龙潭组各煤层原始渗透性差，试井渗透率为(0.093~0.210)×10⁻³ μm²，开展煤储层压裂改造是煤层气地面开发获得经济产量的前提[15]。但基于前期示范井压裂及排采工程实践认为，下煤组采用活性水压裂工艺难以达到预期的储层改造效果。分析问题产生的原因: ①松河井田地处黔西高应力区，下煤组储层压力梯度高达 1.35 MPa/hm。在异常高地应力及储层压力条件下，低渗煤储层敏感性强，活性水压裂液的进入、返排更易造成储层绝对渗透率及相对渗透率的大幅下降，影响煤层气井气、液产出。②受晚二叠世成煤期沉积环境影响，龙潭煤系下煤组各煤层黏土矿物含量明显偏高，27_1、29_3号煤中黏土类矿物含量分别达到 14.8%、15.8%。因此，活性水压裂液易造成煤中黏土矿物膨胀、分散，并在返排中运移并堵塞气水渗流通道，导致储层水敏伤害。③下煤组焦、瘦煤天然裂隙发育、力学强度低，活性水压裂液在煤储层中滤失性强，压裂中易在井筒周围形成网状裂缝，难以沿裂缝发育优势方向形成主裂缝，因此煤储层改造范围有限。④由于活性水压裂液的携砂能力弱，因此难以将石英砂携带至裂缝远端进行有效支撑，造成支撑剂在近井地带大量堆积，并最终导致煤层气井稳产时间短、衰减速度快。

由于 CO_2泡沫具有储层伤害小、低摩阻、降滤失、携砂能力强、预防水锁效应等优点，CO_2泡沫压

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

裂能够长期维持煤储层渗透性的改善效果[16-17]，因此在理论适合松河井田下煤组超压、低渗、敏感性及滤失性强的储层特点，是本区可开展工程探索的储层改造工艺。

为了保证 CO_2 泡沫压裂作业能够形成高质量的 CO_2 泡沫，被压裂煤层的原始温度应高于 40 ℃，以使注入储层的液态 CO_2 在超临界状态下气化发泡质量达到压裂要求[18]。由于松河井田龙潭煤系地温梯度表现为明显的正异常，当下煤组埋藏深度超过 750 m 时，储层温度就已超过 40 ℃。因此，在下煤组埋深 750～900 m 范围内，可探索性开展 CO_2 泡沫压裂工作。

3.3　上煤组压裂工艺优化

煤层气开发试验井松 5 井上煤组 1+3、4、5_1 号煤合层压裂前后井温测井结果如图 4 所示。可以看出：活性水压裂施工前后，压裂段温度由 34 ℃下降至 12 ℃，外界流体注入能够对煤储层起到显著的降温作用。在压后放溢流及煤层气井后续排采中，压裂段温度在地球内部热量传递下逐渐回升，经历一个煤层气升温解吸、渗流及产出过程。

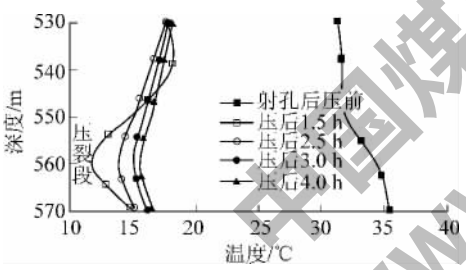


图 4　松 5 井上煤组压裂段附近井温测井曲线

Fig. 4　Temperature logging curves near upper fracturing segment of Well Song 5

在煤层气升温解吸、渗流过程中，煤基质不断吸热一方面促进了煤层气的持续解吸[3,10,19]；另一方面，由于煤基质吸热导致体积膨胀，高挥发分烟煤渗透性变好，煤层气渗流速率明显加快，因此可产生更好的储层改造效果[5-6]。对于松河井田上煤组肥、焦煤活性水压裂工艺优化，可通过冬季压裂施工或抽取浅层地下水连续配液施工方式，将较低温度的压裂液注入储层以尽可能降低煤储层温度，进而实现高含气饱和度煤储层煤层气地面开发过程中气体升温解吸、渗流，提高煤层气地面开发效果。

4　结　　论

1) 受泥岩、煤层热导率低及煤系隔水性好、富水性弱的共同影响，松河井田龙潭煤系表现出明显的地温梯度正异常，煤系下部煤储层温度偏高。

2) 45 ℃储层温度条件下，下煤组各煤层煤层气可采系数与 30 ℃相比提高了 4.55%～11.67%；受此影响，下煤组开发深度 620～900 m 时，预计可获得较高的煤层气资源采收率。

3) CO_2 泡沫压裂工艺理论上适合松河井田下煤组高压、低渗、敏感性及滤失性强的储层特点，煤层埋深超过 750 m 即满足 CO_2 泡沫压裂对储层温度的要求，可探索性开展 CO_2 泡沫压裂工作。

4) 通过冬季压裂施工或抽取浅层地下水连续配液施工方式，将较低温度的活性水压裂液注入储层以尽可能降低煤储层温度，进而实现上煤组煤层气开发过程中气体变温解吸、渗流，提高煤层气地面开发效果。

参考文献(References)：

[1] 邵龙义，侯海海，唐　跃，等. 中国煤层气勘探开发战略接替区优选[J]. 天然气工业，2015，35(3)：1-11.
Shao Longyi，Hou Haihai，Tang Yue，*et al*. Selection of strategic relay areas of CBM exploration and development in China [J]. Natural Gas Industry，2015，35(3)：1-11.

[2] 许　江，彭守建，刘　东，等. 煤层气抽采过程中煤储层参数动态响应物理模拟[J]. 煤炭科学技术，2014，42(6)：61-64.
Xu Jiang，Peng Shoujian，Liu Dong，*et al*. Dynamic response physical simulation of coal reservoir parameters during coalbed methane drainage [J]. Coal Science and Technology，2014，42(6)：61-64.

[3] 马东民，张遂安，王鹏刚，等. 煤层气解吸的温度效应[J]. 煤田地质与勘探，2011，39(1)：20-23.
Ma Dongmin，Zhang Suian，Wang Penggang，*et al*. Mechanism of coalbed methane desorption at different temperatures [J]. Coal Geology & Exploration，2011，39(1)：20-23.

[4] Cai Yidong，Pan Zhejun，Liu Dameng，*et al*. Effects of pressure and temperature on gas diffusion and flow for primary and enhanced coalbed methane recovery [J]. Energy Exploration and Exploitation，2014，32(4)：601-619.

[5] 杨新乐，张永利，李成全，等. 考虑温度影响下的煤层气解吸渗流规律试验研究[J]. 岩土工程学报，2008，30(12)：1811-1814.
Yang Xinle，Zhang Yongli，Li chengquan，*et al*. Experimental study on desorption and seepage rules of coal-bed gas considering temperature conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2008，30(12)：1811-1814.

[6] 蔡益栋，刘大锰，姚艳斌，等. 温度控制下的煤层气储层物性动态演化研究[J]. 地学前缘，2014，21(1)：240-248.
Cai Yidong，Liu Dameng，Yao Yanbin，*et al*. Revolution of petrophysical properties of coalbed methane reservoirs under the heat treatment [J]. Earth Science Frontiers，2014，21(1)：240-248.

[7] 许　江，彭守建，张超林，等. 瓦斯抽采降压过程中温度对煤变

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

形及渗透率的影响 [J] .煤炭科学技术,2015,43(2):68-75.
Xu Jiang,Peng Shoujian,Zhang Chaolin,*et al*.Temperature affected to coal deformation and permeability in gas drainage during pressure declining process [J] . Coal Science and Technology,2015,43(2):68-75.

[8] 孙立东,赵永军,蔡东梅.应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究: 以山西沁水盆地为例 [J] .山东科技大学学报,2007,26(3):12-14,31.
Sun Lidong,Zhao Yongjun,Cai Dongmei.Research of effect of pressure,geo-temperature and stress fields on permeability of coalbed-gas-bearing seams in Qinshui Basin [J] .Journal of Shandong University of Science and Technology,2007,26(3):12-14,31.

[9] 降文萍.基于等温吸附实验的温度对煤层气含量影响研究 [J] .中国煤层气,2014,11(5):3-6.
Jiang Wenping.Study on the effect of temperature on coalbed methane content based on the isothermal adsorption experiment [J] .China Coalbed Methane,2014,11(5):3-6.

[10] 曾社教,马东民,王鹏刚.温度变化对煤层气解吸效果的影响 [J] .西安科技大学学报,2009,29(4):449-453.
Zeng Shejiao,Ma Dongmin,Wang Penggang.Effect of temperature changing on desorption of coalbed methane [J] .Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(4):449-453.

[11] 金　军,周效志,易同生,等.气测录井在松河井田煤层气勘探开发中的应用 [J] .特种油气藏,2014,21(4):22-25.
Jin Jun,Zhou Xiaozhi,Yi Tongsheng,*et al*.Application of gas logging in exploration and development of CBM in Songhe Field [J] . Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(4):22-25.

[12] 卢玲玲,秦　勇,郭　晨.黔西补作勘查区现代地温场及煤层受热温度分析 [J] .中国煤炭地质,2013,25(10):12-17.
Lu Lingling,Qin Yong,Guo Chen.Modern geothermal field and coal seam heating temperature in Buzuo exploration area,western-Guizhou [J] .Coal Geology of China,2013,25(10):12-17.

[13] 孙占学,张　文,胡宝群,等.沁水盆地地温场特征及其与煤层气分布关系 [J] .科学通报,2005,50(S1):93-98.
Sun Zhanxue,Zhang Wen,Hu Baoqun,*et al*.The characteristic of the geotemperature field and its relationship of the coal methane in Qinshui Basin [J] .Chinese Science Bulletin,2005,50(S1):93-98.

[14] 肖永洲,刘殿元,孔祥周,等.龙凤井田 9 煤地温特征及影响因素分析 [J] .中国煤炭地质,2009,21(1):45-47.
Xiao Yongzhou,Liu Dianyuan,Kong Xiangzhou,*et al*.Analysis of No.9 coal geotemperature characteristics and impacting factors in Longfeng Minefield [J] .Coal Geology of China,2009,21(1):45-47.

[15] 张亚蒲,杨正明,鲜保安.煤层气增产技术 [J] .特种油气藏,2006,13(1):95-98.
Zhang Yapu,Yang Zhengming,Xian Baoan.Coalbed gas simulation technology [J] .Special Oil & Gas Reservoirs,2006,13(1):95-98.

[16] 荣光迪.二氧化碳泡沫压裂技术研究 [D] .北京: 中国石油大学(北京),2005: 1-18.
Rong Guangdi.Study on the technology of CO_2 foam fracturing [D] .Beijing: China University of Petroleum (Beijing),2005: 1-18.

[17] 丛连铸,吴庆红,赵　波,等.CO_2泡沫压裂在煤层气井中的适应性 [J] .钻井液与完井液,2005,22(1):51-52,56.
Cong Lianzhu,Wu Qinghong,Zhao Bo,*et al*.Adaptability of CO_2 foam fracturing operation in coalbed methane wells [J] . Drilling Fluid & Completion Fluid,2005,22(1):51-52,56.

[18] 丛连铸,吴庆红,赵　波,等.CO_2泡沫压裂技术在煤层气开发中的应用前景 [J] .中国煤层气,2004,1(2):15-17.
Cong Lianzhu,Wu Qinghong,Zhao Bo,*et al*.The prospect of the application of CO_2 foam fracturing in the development of coalbed methane [J] .China Coalbed Methane,2004,1(2):15-17.

[19] Zhao Dong,Feng Zengchao,Zhao Yangsheng.Laboratory experiment on coalbed methane desorption influenced by water injection and temperature [J] .Journal of Canadian Petroleum Technology,2011,50(7/8):24-33.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net