

地质与测量

煤层气开采技术应用现状及其改进

张金波^{1,2}, 吴财芳^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为解决我国煤层气平均采收率低的问题, 从储层特征和开采技术2个方面进行了分析。在此基础上, 探讨了不同开采技术与特定地质条件的开采技术适用性以及各种新型开采技术所具有的优势。研究结果认为, 煤储层的“低含气饱和度、低渗透率、低储层压力”特征以及现行开采技术适用性差是我国煤层气采收率低的主要原因; 套管(压裂)完井、超短半径水平井和多分支水平井综合运用应作为我国煤层气开采的主要模式。分析认为采用注入混合气体增产、多级强脉冲加载压裂、“固氮酶”、“虚拟产层”等各种新型开采技术来提高我国煤层气采收率, 实现高效开采。

关键词: 煤层气; 煤储层; 采收率; 钻井; 完井

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)08-0088-04

Application Status and Improvement of Coal Bed Methane Development Technology

ZHANG Jin-bo^{1,2}, WU Cai-fang^{1,2}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. MOE Key Lab of Coal Bed Methane Resources and Deposit Process, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to solve the low average drainage and recovery rate of the coal bed methane in China, the paper had an analysis on the reservoir features and mining technology. Based on the circumstances, the paper discussed the suitability of the different development method and the special geological conditions as well as the advantages of the each new development technology. The study held that “low content saturation, low permeability and low reservoir pressure” features of the coal reservoir and the poor suitability of the available development technology were the main two causes to the low drainage and recovery rate of the coal bed methane in China. The casing (fracturing) completion, ultra short radius horizontal well and multi branch horizontal well comprehensive operation could be the main modes of the coal bed methane development in China. The analysis held that the mixed gas injection for gas production increased, multi power pulse loading fracturing, nitrogenase, virtual production layer and each new development technology could be applied to improve the drainage and recovery rate of the coal bed methane in China and to realize the high efficient development.

Key words: coal bed methane; coal reservoir; gas drainage recovery rate; well drilling; well completion

煤层气是一种新型非常规天然气, 开采煤层气对于优化能源结构、保护环境、促进煤矿安全生产等方面均有重大意义^[1]。目前我国正处于由煤层气资源大国向煤层气生产大国转型的关键时期^[2]。虽然勘探开采已取得显著进展, 但要实现真正的高效开采仍有很多问题需要解决。如何提高煤层气采

收率是其中的关键问题之一。采收率是计算煤层气可采资源量的重要依据^[3], 提高煤层气采收率不仅可实现煤层气增产, 减少温室气体排放, 还可最大限度降低煤矿瓦斯事故发生概率。此外, 提高采收率能有效降低煤层气开采成本, 有利于尽快实现煤层气产业化, 取得良好的经济效益。

收稿日期: 2012-03-08; 责任编辑: 曾康生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB219605); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034); 国家自然科学基金重点资助项目(40730422); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(40802032)

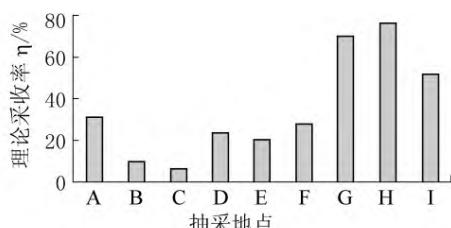
作者简介: 张金波(1987—), 男, 河北南宫人, 硕士研究生。Tel: 18795426212, E-mail: xiaopo688@126.com

网络出版时间: 2012-08-13 05:17:57; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120813.1717.201208.88_024.html

引用格式: 张金波, 吴财芳. 煤层气开采技术应用现状及其改进 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 88-91, 96.

1 开采现状与原因分析

从我国部分矿区所得理论采收率来看，其变化范围在 6.7% ~ 76.5%，平均只有 27.0%^[1]（图 1）。而美国、加拿大等主要煤层气生产国的采收率普遍高于我国。因此，我国要实现煤层气的高效开采，就必须解决采收率过低的问题。



A—韩城 3 号煤；B—韩城 5 号煤；C—峰峰矿区；D—阳泉矿区 3 号煤；E—阳泉矿区 15 号煤；F—淮南谢李矿区；G—大城矿区；H—淮北芦岭矿区；I—平顶山矿区

图 1 我国部分矿区煤层气理论采收率

1.1 煤储层现状

我国含煤区先后经过了多期构造运动改造，地质条件复杂。断层、褶皱以及岩浆侵入现象普遍存在，构造煤发育。由于构造活动强烈，导致煤储层中甲烷大量逸散，煤层中含气饱和度降低；煤储层原生孔隙系统被破坏，构造应力成为影响渗透率的关键因素，煤层在被重新埋藏到地下以后，地应力增大使得渗透率急剧下降。目前多数含煤区储层渗透率在 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下，属超低渗透煤层；过低的含气饱和度以及超低的渗透率都不利于储层压力增加^[4]。煤储层本身的沉积特征和区域小构造发育导致含煤区非均质性明显^[5]，因此煤储层裂隙间的连通性很差，使煤层气解吸和运移通道被堵塞。在排采过程中不能形成连续、稳定的降压漏斗，这对煤层气的开采非常不利。

总之，“低含气饱和度、低渗透率、低储层压力”的“三低”特性是我国煤储层的普遍特征^[5]。除地质构造条件外，煤层埋深、煤阶、煤厚、水文条件、沉积环境和演化历史等诸多条件都对煤层气的开采环境有重要影响。不同地区各种条件综合作用的结果不同，影响采收率的主导因素也不同。

1.2 煤层气开采技术现状

煤层气开采技术主要包括钻井完井技术、强化增产措施、井网布置、排采工艺 4 个方面^[6]，其主要目的可以概括为：保护煤层自身稳定性，确保开

采过程中不受污染和强烈扰动；改善煤储层渗透性，提高导流能力^[7]；最大限度降低储层压力，促使更多煤层气解吸，提高采收率。

经过多年的生产实践和国际合作，我国成功引入美国的煤层气开采技术，并在沁水盆地南部等地区煤层气开采中取得了理想效果。但由于我国煤层气开采条件差，现有技术还不能满足煤层气开采的要求，所以需要有更多低成本、高可行性、效果理想的新技术为我国煤层气开采事业服务。总结现行煤层气开采技术，主要存在以下 4 个方面的问题。

1) 钻井成本偏高，占煤层气开采总成本的 1/2 以上^[8]。尽管采用欠平衡钻井技术具备诸多优点，但选用何种钻井液仍有待研究。空气、泡沫等做钻井液只适用于浅部煤层。对于深部煤层仍宜采用泥浆钻进技术，但操作不当容易污染煤层，降低渗透性。能否在保证钻井效果的前提下降低成本是解决问题的关键。

2) 国外采用较多的垂直井技术在我国并不适用。采用的裸眼洞穴完井技术成本低、效果好，该技术在美国被广泛应用。但这种技术要求煤层具有渗透率高、地应力小、煤层顶底板稳定、煤储层强度大等条件，否则容易造成洞穴塌陷，煤层气运移通道被堵塞，因此风险性很大，后期维护成本高；套管完井风险较小，可以确保稳产，但完井费用较高，完井过程比较复杂，操作不当容易引起泥浆侵入煤层造成污染^[1]。

3) 水力压裂技术的局限性。水力压裂增产是目前普遍采用的技术，但由于煤本身质软，因此支撑剂容易嵌入煤中，造成孔隙闭合；某些遇水膨胀的煤层水力压裂后渗透率会下降；选用其他压裂液则存在低成本、低污染与高性能之间的矛盾^[8]；我国多数地区煤层不含水或含水量少，压裂液排返率低而在煤层中滞留^[9]，易对煤层造成污染；排采过程难以控制，过快容易带动煤粉和支撑剂堵塞煤体孔隙甚至钻孔，过慢则不利于储层压力的迅速下降，影响产气速度；排采过程中会产生大量污水，处理不当会影响当地环境；压裂过程需要众多大型机械设备，目前尚需进口，成本很高。

4) 注入 CO₂能有效提高采收率，但制备大量较纯净的 CO₂费用高，且会在煤矿生产中随煤重新回到地面，因此仅适用于没有开采价值的煤层。还有研究表明：CO₂注入会导致煤基质膨胀^[10]，降低

煤层渗透率，存在技术风险。

2 煤层气开采技术改进方法

2.1 多种技术综合运用

各种开采技术对煤储层适用性不同，根据已研究的果分析各开采技术适用性见表1，针对我国现有的煤储层条件，单纯靠一种技术开采煤层气还不能满足增产需求。在同一地区不同的区域小环境下选择合适的开采技术，实现经济效益和开采效果的最优化是今后努力方向。

表1 不同开采技术适用性分析

开采技术	地应力	渗透率	煤体强度	含气饱和度	煤层厚度	储层压力
裸眼（洞穴）井	小	高	大	高	中厚	大
套管（压裂）井	大	高	较大	高	中厚、多煤层	大
多分支水平井	小	低	大	低	中厚	小
超短半径水平井	大	较低	较大	低	厚、多煤层	小

裸眼完井、裸眼洞穴完井技术最初起源于美国，并在圣胡安盆地取得很大成功。该技术的优点是通过裸眼或者洞穴增大了井筒与煤层的接触面积，并最大限度地保持了煤储层的原始状态，且不需要射孔、压裂等增产措施，初次资金投入少。但该技术对于各方面的要求很高，主要适用于以下条件的地区：①地质条件相对简单，地应力小，构造不发育；②储层渗透率高，煤体强度大，含气量较高；③顶底板的封闭能力较好，且具有一定机械强度，能够对洞穴起到支撑作用。在我国已施工的裸眼井、裸眼洞穴井中，成功的案例较少，失败的案例较多，其根本原因是我国多数含煤区构造复杂，储层渗透率和压力均低，煤体破碎，容易塌孔，煤层裂隙的导流能力不但没有增加反而因此下降。

套管完井技术是在钻井之后通过下入套管的技术对井筒及煤层起到支撑和保护的作用，初期投入较高，但后期维护费用较低，因此适用范围更加广泛。尤其是对于埋藏较深，地应力较大的含煤区适合采用该技术，但同时也要求煤储层满足渗透率高、煤体强度较大以及含气饱和度大等条件。在用套管完井之后，还必须配合压裂措施进行储层改造，以降低表皮因子对煤层气产出的不利影响。这就要求煤层的顶底板岩性稳定且机械强度高、距离上下含水层较远，以降低压裂作业的风险系数。

多分支水平井在我国的应用也较为广泛，在沁水盆地南部煤层气开采中发挥了重要作用。它由垂直井段和水平井段2部分组成，其中水平井段又分为主水平井和分支水平井，形似树叶的“叶脉”，因此又称羽状井^[7]。由于水平井段大幅增加了气井与煤层的接触面积，因此特别适合在渗透率低、储层压力小、含气饱和度较低的煤层中使用。但同时也要求煤层埋深较浅，地应力小，煤体强度大，这对保持井壁的稳定性非常有利。水平分支井段应与最大渗流方向垂直，并由下向上有一定角度倾斜，以便于地下水向井筒汇集，加快排水降压速度。分支段长度和分支间距都要事先做好精确测算，这样可更有效地排出煤层中的水，增加储层的降压速度和幅度，从而提高产气速度和采收率。

超短半径径向水平井（简称URRS，图2）技术是一种新型钻井完井技术。由于采用特殊的高压水射流破岩技术，它可以在很短的距离内使井筒从垂直转向水平^[11]。这种技术可以看作套管压裂井与多分支水平井之间的一种过渡类型。它具有以下优点：①避免了上述水力压裂过程的诸多缺点；②有效增加了井壁与煤层的接触面积，提高了导流能力；③相比多分支水平井，成功率较高，对各种煤层适应能力更强。因此这种开采技术可以在埋深较深、地应力大、储层渗透率和压力均较低的煤层中收到良好的效果。在具有多煤层、易受外来污染的地区也能得到很好的应用^[12]。

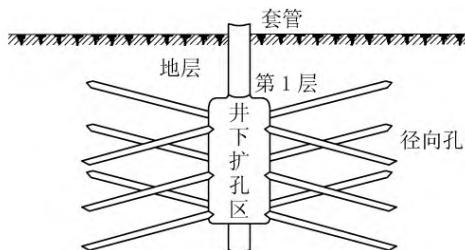


图2 超短半径径向水平井典型分布示意^[9]

各地区煤储层的地质条件和物性特征有很大不同，应针对某一地区具体的开采环境选择合理的井型配置。张培河等^[13]从地质、储层、地形、投资等方面对此类问题进行了研究，并针对各主要含煤区的地质条件、地形条件提出了相应的煤层气开采技术。

2.2 新型注气驱潜技术

我国煤层渗透率普遍偏低，煤层非均质性强。

垂直井技术与水平井技术相比影响范围更小, 不适合在我国大范围应用。而多分支水平井是以“面”为单位, 影响范围较广, 2种完井技术综合运用可使煤层整体导流能力增加^[14]。针对不同地区含气性不同合理布置井网密度, 采用新型注气驱潜技术将使煤层气采收率得到明显提高。

新型注气驱潜技术是以注入混合气体为主, 它以N₂为主要成分, 还混有一定量的CO₂、空气、烟道气等成分。这种气体来源广泛, 能大幅节约成本; 煤基质不会因吸附过多CO₂而导致体积膨胀; 混合气体注入后可以配合生物固氮酶技术产生NH₃, 进一步促进煤层气解吸; 采煤时煤层中气体突出危险性相比CO₂和CH₄明显减小, 如图3所示^[11]。

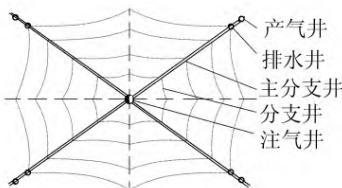


图3 多分支水平井综合注气驱潜示意

2.3 积极探索增产新技术

1) 固氮酶增产技术。该技术是指通过生物科学方法生产出具有良好热稳定性的固氮酶, 这种酶可以被送到地下天然或人工产出的裂隙中, 在原地温度下将注入到煤层混合气体中的N₂快速转化成NH₃^[15]。煤体对NH₃的吸附性要明显高于CO₂, 且可以一直吸附在煤体表面, 不影响后续驱潜; 固氮酶转化效率高、存活时间长、对煤层无污染, 因此对于提高采收率有重要意义。不足之处是NH₃对人体刺激作用很大, 应用过程中是否会对井下生产环境带来不利影响还有待研究。

2) 多级强脉冲加载压裂技术。该技术是石油与常规天然气开采中经常使用的压裂方法。其原理是通过全隔断式延时点火装置控制压裂药燃烧顺序, 在预先射孔的基础上使燃烧释放的高压脉冲波沿着射孔有序传递到煤层中, 并产生压裂效果^[16]。经过多级高压脉冲波的冲击, 可以在煤层形成多条有效裂隙, 并形成裂隙体系, 从而明显提高煤储层渗透率。与水力压裂相比, 该技术适用性更强、操作简单、成本也更低、安全可靠; 因不需压裂液从而减少了煤层污染; 但由于煤本身质地软弱, 在没有支撑剂的情况下直接对煤层进行压裂难免产生裂

隙重新闭合的问题, 因此可以采用多级强脉冲压裂与“虚拟产层”相结合的方法。

3) “虚拟产层”技术。该技术是把煤层的顶板或底板看作“虚拟产层”^[17], 对煤层和围岩同时压裂。因为煤层围岩与煤体本身相比具有更好的可压裂性, 从而能获得更好的压裂效果。围岩压裂后产生的裂隙能够延伸到煤层中, 且不易再次闭合, 煤层气可以沿着煤层与围岩接触面逐渐渗流泄放到井筒附近并最终被抽出到地表^[17]。该技术具有以下优点: ①围岩压裂所得裂隙延伸更远, 有利于煤层气的渗流和运移。②减少钻井和压裂对煤层的伤害, 保证原始渗透率的最大化。③避免降压排采过程中对煤层的扰动, 保持煤层裂缝稳定性。④缩短了煤层气运移距离, 提高产气速度。

“虚拟产层”技术有2个问题需要考虑: 一是压裂过程要严格控制, 压裂程度过高会导致煤层气逸散; 二是对煤层顶底板进行压裂时要避开煤层上部或下部的含水层, 防止压裂后导通含水层造成重大损失。应尽量选择在煤层底板压裂, 这样更有利排降压, 提高煤层气解吸速率, 并削弱后期采煤过程中对顶板支护带来的不利影响。通过上述分析可以看出, “虚拟产层”技术配合新型压裂方法将有更广阔的应用前景。

3 结 论

我国煤储层“低渗透率、低含气饱和度、低储层压力”等不利条件是造成我国煤层气采收率偏低的根本原因。传统开采技术中存在的问题主要是煤储层渗透性难以得到有效改善和持久保持, 开采成本高, 风险系数大, 从钻井到排采的整个过程都需要严格控制。能否总结出适合我国复杂地质条件下的煤层气开采技术体系, 建立适合不同煤层气赋存条件的开采技术组合是关系到我国煤层气开采能否取得成功的核心问题。超短半径径向水平井、多级强脉冲加载压裂等新技术应是今后煤层气开采的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 74.
- [2] 桑树勋, 唐书恒. 煤层气的封存与富集条件 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20 (2): 104–107.

(下转第96页)

24.91 m³/min。

3) -690 m 水平开拓大巷位于 12-1 号煤层底板的涌水量预计。-690 m 南翼轨道大巷实际掘进 1 000 m, 巷道最大涌水量为 0.35 m³/min, 比拟法计算 -690 m 水平开拓大巷涌水量 $Q = Q_0 L / L_0 = 3.15 \text{ m}^3/\text{min}$, 其中: Q 为 -690 m 水平开拓大巷涌水量; L 为 -690 m 水平开拓大巷走向长度, 取 9 000 m; Q_0 为 -690 m 水平实际掘进运输大巷涌水量, 取 0.35 m³/min; L_0 为 -690 m 水平实际掘进轨道大巷走向长度, 取 1 000 m。主采煤层(8、9、11号煤)顶底板涌水量 Q_{8-11} 可根据已回采区域经验值, 各主采煤层顶底板水最大水量 1.0 m³/min, 合计 $Q_{8-11} = 3.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 。-690 m 水平预计最大涌水量 $Q_{\max} = Q_5 + Q + Q_{8-11} = 31.06 \text{ m}^3/\text{min}$; 正常涌水量 $Q = 23.30 \text{ m}^3/\text{min}$, 即 33 552 m³/d。

根据结果可以得出, 数值法预计的涌水量与矿井涌水量预测结果相似, 计算 2 种方法预计涌水量的误差为 6.8%, 在误差允许范围内, 证明了矿井预测与模拟的正确性与科学性。

6 结 论

讨论了矿井开采过程中对涌水量的影响因素, 通过分析总结水文地质条件的改变和重新揭露对涌水量的影响, 为矿区涌水量的计算提供依据, 保证了东欢坨矿矿井涌水量预测的正确性与精确度。采用 FEFLOW 软件对延深水平涌水量进行了预测, 并用地下

(上接第 91 页)

- [3] 郑玉柱, 韩宝山. 煤层气采收率的影响因素及确定方法研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (1): 120-123.
- [4] 李仲东, 周文, 吴永平. 我国煤层气储层异常压力的成因分析 [J]. 矿物岩石, 2004, 24 (4): 87-92.
- [5] 刘贻军. 中国煤层气储层特征及开发技术探讨 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (1): 68-71.
- [6] 许春花, 赵冠军, 龙胜祥, 等. 提高煤层气采收率新技术分析 [J]. 中国石油勘探, 2010, 15 (3): 51-54, 72.
- [7] 鲜保安, 高德利, 陈彩红, 等. 煤层气高效开发技术 [J]. 特种油气藏, 2004, 11 (4): 63-66.
- [8] 徐凤银, 李曙光, 王德桂. 煤层气勘探开发的理论与技术发展方向 [J]. 中国石油勘探, 2008, 13 (5): 1-6.
- [9] 郑毅. 中国煤层气钻井完井技术发展现状及发展方向 [J]. 石油学报, 2002, 23 (3): 81-85.
- [10] 吴世跃, 赵文, 郭勇义. 煤岩体吸附膨胀变形与吸附热力学的参数关系 [J]. 东北大学学报, 2005, 26 (7): 683-686.

水动力学的廊道法进行了模拟验证, 为涌水量预测结果准确性提供依据。矿井涌水量预测结果表明, 东欢坨矿井延深水平涌水量为 35 852.55 m³/d。该结果可为东欢坨矿矿井水害防治提供科学依据。

参 考 文 献:

- [1] 李云峰, 青国富, 左传明. 梁花园矿井涌水量估算 [J]. 中国煤田地质, 2007, 19 (5): 38-40.
- [2] 李赛. 个旧锡矿高峰矿段开采期渗流场数值模拟及涌水量预测 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009: 2-8.
- [3] 李平, 郭会荣, 吴孔军, 等. 王河煤矿矿井涌水量数值模拟及预测 [J]. 地球科学, 2011, 36 (4): 755-760.
- [4] 张品刚, 曹代勇, 王强, 等. 东欢坨矿构造特征及断裂构造定量研究 [J]. 中国煤炭地质, 2009, 21 (7): 4-7.
- [5] 田洪胜, 洪益清, 马亚杰. 开滦东欢坨矿水文地质特征及防治对策 [J]. 地下水, 2009, 31 (3): 110-113.
- [6] 武强, 江中云, 孙东云, 等. 东欢坨矿顶板涌水条件与工作面涌水量动态预测 [J]. 水文地质工程地质, 2000, 28 (6): 32-35.
- [7] 武强, 魏学勇, 张宏. 开滦东欢坨矿北二采区冒裂带高度可视化数值模拟 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30 (5): 41-44.
- [8] 陈酩知, 刘树才, 杨国勇. 矿井涌水量预测方法的发展 [J]. 工程地球物理学报, 2009, 6 (1): 68-72.
- [9] 刘志鹏. 潘家窑煤矿原副斜井涌水问题数值模拟研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011: 55-68.
- [10] 胡艳卉. 矿井地下水水流场数值模拟及其应用研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2010: 54-67.
- [11] Hans-Jörg G D. FEFLOW 有限元地下水水流系统 [M]. 孙祥光, 王井泉, 翁明华, 译. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 1-154.
- [12] 高卫东, 孟磊, 张海荣, 等. FEFLOW 软件在地下水动态预测中的应用 [J]. 上海地质, 2008 (4): 10-13.

- [11] 侯玉品, 张永利, 章梦涛. 超短半径水平井开采煤层气的探讨 [J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 24 (1): 46-49.
- [12] 鲜保安, 夏柏如, 张义, 等. 开发低煤阶煤层气的新型径向水平井技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38 (4): 25-29.
- [13] 张培河, 张明山. 煤层气不同开发方式的应用现状及适应条件分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38 (2): 9-13.
- [14] 杨陆武, 孙茂远. 适合中国煤层气藏特点的开发技术 [J]. 石油学报, 2002, 23 (4): 46-50.
- [15] 刘静, 王亚娟, 吕海燕, 等. 利用固氮酶提高煤层气采收率技术 [J]. 国外油田工程, 2009, 25 (11): 13-15, 32.
- [16] 吴晋军, 苏爱明. 多级强脉冲加载压裂技术的试验研究与应用 [J]. 石油矿场机械, 2005, 34 (1): 77-80.
- [17] 饶孟余, 张遂安, 商昌盛. 提高我国煤层气采收率的主要技术分析 [J]. 中国煤层气, 2007, 4 (2): 12-16.