

煤矿区煤层气三区联动立体抽采理论与模式

李国富^{1,2}, 何辉¹, 刘刚¹, 焦海滨¹, 刘星¹

(1. 晋城煤业集团煤层气产业发展局, 山西 晋城 048006; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了实现煤矿区煤炭与煤层气2种资源的安全高效协调开发, 基于煤炭开发时空接替规律, 将煤矿区划分为规划区、准备区、生产区3个区间, 分别采用地面钻井排采、地面与井下联合抽采以及本煤层钻孔抽采等不同的瓦斯抽采技术以保证煤炭安全高效生产。根据煤矿安全生产容许最高瓦斯含量数学模型、煤层瓦斯压力数值模拟模型和煤层气立体抽采优化专家系统, 创立了三区联动的区域递进式立体抽采模式(晋城模式), 提高了煤炭资源采出率, 实现了煤矿瓦斯井下抽采和地面原位抽采2个独立产业模式的有效衔接, 解决了煤层气开发与煤炭开采的时空矛盾。

关键词: 煤矿区; 煤层气; 立体抽采; 规划区; 准备区; 生产区; 三区联动

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)10-0007-05

Three Region Linkage Three-Dimensional Gas Drainage Theory and Mode of Coal Bed Methane in Coal Mining Area

LI Guo-fu^{1,2}, HE Hui¹, LIU Gang¹, JIAO Hai-bin¹, LIU Xing¹

(1. Coal Bed Methane Industrial Development Bureau, Jincheng Coal Mining Group, Jincheng 048006, China;

2. School of Geosciences and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the safety and high efficient coordinative development of coal and coal bed methane resources in the coal mining area, based on the time and space replacing law of the coal development, the coal mining area was divided into three regions, including the planning region, preparation region and production region. The gas drainage with the surface drilling wells, the combined drainage with the surface and underground boreholes, the gas drainage in the mining seam and different gas drainage technology were individually applied to ensure the safety and high efficient coal production. According to the mathematics model of the max gas content allowed by the coal mine production, the numerical model of the seam gas pressure and the optimized experts system of the coal bed methane drainage, a regional progressive three-dimensional gas drainage model (Jincheng Mode) of three region linkage was created. The recovery rate of the coal resources was improved, an effective connection of the industrial models with the underground mine gas drainage and the surface in-place gas drainage could be realized and the time and space contradiction between the coal bed methane development and the coal mining was solved.

Key words: coal mining area; coal bed methane; three-dimensional gas drainage; planning region; preparation region; production region; three region linkage

长期以来, 我国高瓦斯矿井均是通过煤矿井下抽采瓦斯来保证安全生产的。自21世纪开始, 利用石油天然气开发技术将煤层中吸附的煤层气提前预抽出来并加以综合利用的煤层气地面抽采技术在我国逐步获得成功, 使得煤矿区煤炭与煤层气2种资源安全高效协调开发成为可能^[1]。突破煤矿瓦

斯井下抽采和煤层气地面抽采2个独立产业模式的局限性, 有机协调煤矿安全高效生产与煤层气资源开发利用, 是实现煤层气产业安全、能源、环保三重效益所必须解决的重大技术瓶颈^[2]。基于煤炭开发时空接替(煤炭生产何时由上一时空进入下一时空)规律, 将煤矿区划分为煤炭生产规划区

收稿日期: 2012-08-17; 责任编辑: 王晓珍

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05063)

作者简介: 李国富(1965—), 男, 山西晋城人, 教授级高级工程师, 博士。Tel: 0356-3669879, E-mail: 13834068216@163.com

网络出版时间: 2012-10-18 09:32:34; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20121018.0932.002.html>

引用格式: 李国富, 何辉, 刘刚, 等. 煤矿区煤层气三区联动立体抽采理论与模式 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 7-11.

(简称规划区)、煤炭开拓准备区(简称准备区)与煤炭生产区(简称生产区)3个区间。生产区即煤炭生产矿井现有生产区域,准备区是煤炭生产矿井近期(一般为3~5年内即将进行回采的区域),而规划区的煤炭资源一般在5~10年甚至更长时间以后方进行采煤作业,留有充分的煤层气预抽时间。晋城煤业集团自20世纪90年代开始在潘庄矿区引进美国先进的煤层气地面预抽技术,结合晋城矿区地质情况研发出了“清水钻进、活性水压裂、定压排采、低压集输”系列关键技术,使得沁水盆地南部地区的煤层气地面开发在我国煤层气产业一直占据着举足轻重的地位。沁南地区煤层气地面开发的成功,也为矿区三区联动、分区采用不同技术措施实施煤炭与煤层气2种资源安全高效协调开发奠定了基础。在充分论证了规划区、准备区、生产区之间的技术衔接要求基础上,创建了瓦斯安全阈值测算模型和模拟方法,创立了三区联动的区域递进式立体抽采模式(晋城模式),并实现了“三区”煤层气抽采关键技术及配套工艺的创新^[3~4]。

1 矿区煤层气三区联动立体抽采理论

1.1 抽采决策模型

以晋城等矿区为代表的华北中部地区,石炭二叠系煤层瓦斯含量高,安全生产隐患非常严重;煤矿瓦斯井下抽采和地面原位抽采2个独立的产业模式无法从技术上有效衔接,地面抽采与煤矿瓦斯治理严重脱节,煤层气开发与煤炭开采的时空矛盾尖锐,难以有效地为煤矿瓦斯安全达标服务^[2];多数矿井实行单一煤层的煤炭开采,国内外传统的区域卸压瓦斯抽采工艺和技术无法实施,抽采效率低,抽采成本高,不能保证在有限时间内抽采达标。因此,基于煤炭开采时空接替规律,创新煤层气抽采工艺及关键技术,是实现这些地区煤矿安全、能源开发双重效益并举的必由途径。

三区联动立体抽采模式主要采用递进式抽采模式,即根据煤储层的瓦斯含量与瓦斯压力在不同区域采用不同的抽采技术。在煤炭生产规划区,因为有充足的抽采时间,可以采用地面钻井、定压排采的方式进行预抽采。在煤炭开采之前进行充足时间的“先抽后采”,可以彻底改变原始高瓦斯环境的采煤作业设计方式,可以将高瓦斯环境降为低瓦斯

作业环境,进而实现大幅度降低通风量即减少巷道截面积,改变高瓦斯矿井目前通常采用的两进一回(即Y型通风)甚至是三进两回通风方式,降低保留煤柱的数量,从而提高煤炭资源采出率。

煤炭开拓准备区一般在3~5年转化为煤炭生产区,超过5年会增加维护成本,时间太短会因瓦斯解吸时间不足而导致瓦斯含量和瓦斯压力不达标。在煤炭开拓准备区,采用地面与井下联合抽采工艺进行预抽采。为使掘进巷道抽采达标,晋城煤业集团首创了条带式井上下联合抽采技术,同时在寺河等矿区应用井下定向钻机使煤矿井下钻孔与地面钻井压裂带贯通,真正实现了井上下联合抽采。

在煤炭生产区,虽然已经实现了区域抽采达标,但仍然需要进行本煤层钻孔抽采以降低井下通风量,保证煤炭安全高效生产,同时由于瓦斯赋存的非均质性也使得煤矿井下局部的瓦斯异常情况时有发生,由于采用井下高效抽采的压降更大,可以大幅度降低局部瓦斯异常情况发生的频率。

1.2 抽采模型理论基础

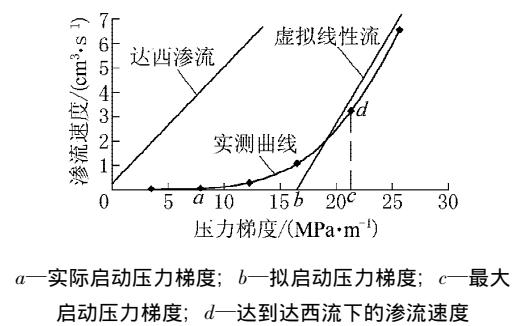
1) 煤矿安全生产容许最高瓦斯含量数学模型。依据煤层气地质特征、瓦斯地质条件、煤炭开采强度和煤矿通风安全措施等4个方面的主控因素,推导出煤矿安全生产容许最高瓦斯含量 C_p 预测数学模型^[5~6],为三区联动时空接替提供了瓦斯含量阈值方面的决策依据。

$$C_p = C_{ie}(1 - R) + \beta \varepsilon \frac{M_c S_h v_h}{nP} \quad (1)$$

式中: C_{ie} 为原始瓦斯含量, m^3/t ; R 为煤层气解吸率, %; β 为煤炭资源采出率, %; ε 为综合影响因子; M_c 为回风流中瓦斯最高允许体积分数, %; S_h 为回风巷断面积, m^2 ; v_h 为回风巷最高允许风速, m/s ; n 为掘进工作面前方影响距离与工作面推进速度的比值; P 为单位时间煤炭产量, t/s 。

2) 基于二级渗流数学模型的煤层瓦斯压力数值模拟模型。通过大量渗流机理试验(图1),建立了考虑煤层瓦斯渗流启动压力的基质孔隙内非达西渗流(式2)和裂隙内达西渗流(式3),进而建立了基于二级渗流模型的煤层瓦斯压力数值模拟模型,为三区联动时间接替提供了瓦斯压力限值方面的决策依据^[7~8]。

一级渗流模型(基质孔隙内非达西渗流):



a—实际启动压力梯度; b—拟启动压力梯度; c—最大启动压力梯度; d—到达达西流下的渗流速度

图1 煤样渗流机理代表性试验结果

$$\begin{cases} v = 0 & (|\Delta P| \leq a) \\ v = \frac{b - c}{b - a} \frac{K}{\mu} (|\Delta P| - a) & (a < |\Delta P| < b) \end{cases} \quad (2)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \Delta P \left(1 - \frac{c}{|\Delta P|}\right) \quad (\Delta P \geq b)$$

二级渗流模型(裂隙内达西渗流):

$$v = KS\Delta P / (\mu L) \quad (3)$$

式中: ΔP 为流体通过样柱前后的压力差, 10^{-1} MPa; v 为在 ΔP 下流体通过样柱的渗流速度, cm^3/s ; K 为绝对渗透率, m^2 ; S 为样柱截面积, cm^2 ; μ 为通过样柱的流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; L 为样柱长度, cm 。

3) 煤矿区煤层气立体抽采优化专家系统。在原始煤储层精细三维地质建模、煤矿采动影响条件下动态裂隙场预测技术取得突破的基础上, 研发了“煤矿区煤层气区域递进式立体抽采优化专家系统”, 包括立体抽采模式优化专家决策、地面开发井网优化、地面与井下联合抽采优化、煤矿井下抽采优化设计等子系统^[9]。

2 规划区煤层气地面高效低成本抽采技术

现有技术条件下, 地面井的煤层气预抽采周期和预抽效率难以满足规划区与准备区接替的时间要求, 煤层强化改造效果不佳、钻井/排采过程中煤储层伤害严重、单井施工和排采与集输成本高等。为此, 研发了煤层高效改造增产、煤层气井智能控压控粉排采、丛式井钻采、低压自然能煤层气集输等技术难题^[7-8], 提高了煤层气抽采效率, 有效降低了成本, 优化相关技术和工艺, 是提高煤层气地面预抽效率、降低生产成本进而保证煤炭开拓准备区瓦斯含量和压力达标的关键。

2.1 大砂量中砂比煤层高效改造增产技术

通过不同排量、不同前置液量、不同携砂液

量、不同平均砂比的示范工程试验(表1), 针对晋城矿区煤层天然裂隙较为发育导致压裂液滤失严重、煤层压裂难度大、煤吸附能力极强等特点, 研制成功了大排量($>8 \text{ m}^3/\text{min}$)、中砂比(12%~16%)、大规模活性水压裂工艺技术, 显著提高了煤层改造效果和煤层气井产量, 降低了单位产量的作业成本。

表1 煤层改造施工参数匹配试验方案

排量/(m³·min⁻¹)	前置液量/m³	携砂液量/m³	平均砂比/%
< 6.5	130	< 200	< 10
6.5~8.0	130~240	200~350	10~16
> 8.0	> 240	> 350	> 16

注: 排量为泵注速率; 平均砂比即注入煤储层的砂子与压裂液的体积比。

2.2 智能控压控粉排采工艺技术

研究发现, 晋城无烟煤层渗透率的应力敏感性很强, 压差过大造成煤粉堵塞井壁周围的裂缝导致近井筒煤层受到严重伤害。为此, 通过大量实践探索, 形成了针对不同地质条件的排采强度(控制产水量)、液面和套压智能优化控制技术, 实现了最佳压差控制和最佳煤粉产出速度/产出时段控制, 保证煤层气井长期稳定高产, 同时也有效降低了修井和排采作业成本^[10-11]。

2.3 丛式井钻采技术

丛式井是在同一井场应用定向钻进技术向不同方向钻出2个以上井眼的“树丛状”井组, 具有节约土地资源、便于集中控制、降低排采集输成本等优势。为此, 晋煤集团在潘庄煤矿规划区施工成功国内第1组煤层气丛式井抽采井组, 并在其他规划区广泛推广应用。同时, 针对煤层气丛式井排采生产期长、煤层区域变化不大等特点, 研发了井眼轨迹(井身平滑度)和中靶位移控制技术, 攻克了特定曲率井眼的排采技术难关, 保证了丛式井的顺利施工和大规模推广应用, 大幅度降低了预抽采成本。

2.4 低压自然能煤层气集输技术

煤层气的井口压力低、压力差异大, 常规集输工艺需要增压设备, 导致能耗增大。为解决集输驱动力不足和增压设备能耗大的问题, 本着下游适应上游的设计思想, 改进了下游压缩机, 降低了其入口压力, 省去了各个集气站的增压设备, 率先形成

低压集输技术，实现了井口压力不足0.25 MPa的正常集输，大幅降低了集输成本（图2）。

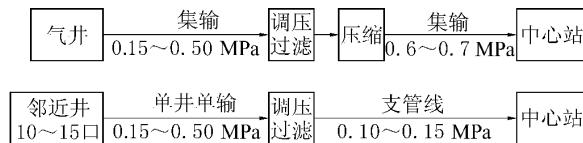


图2 低压自然能煤层气集输技术流程

大砂量中砂比煤层高效改造增产技术，煤层气井排采由人工控制发展成数字智能化控压控粉，丛式井钻采技术的大规模推广应用，煤层气集输技术由人工增压集输发展为低压自然能集输，形成了一整套煤层气地面高效低成本抽采关键技术^[12]。

3 准备区煤层气地面与井下联合抽采技术

传统的地面直井或水平井只能实现“点”上的卸压，经前期预抽后煤层中残留瓦斯的吸附性更强，需要区域卸压才能被有效解吸和抽采；晋城、阳泉等矿区受地质条件限制，目前国内外采用的区域卸压方式难以在此处实施。而且，适合这种地质条件的煤层气地面工程、煤炭开采井下工程、煤层区域卸压开采组合技术在国内外均未实现，难以降低巷道快速掘进过程中的瓦斯动力和浓度超限危险。针对上述情况，成功研发了地面与井下联合抽采工艺、条带式井上下联合抽采、井下本煤层长钻孔贯通地面井压裂影响区等关键技术，创立了独具特色的开拓准备区的煤层气地面与井下联合抽采技术体系^[13]。

3.1 地面与井下联合抽采工艺

煤矿开拓准备区煤层气地面与井下联合抽采工艺如图3所示，根据煤炭开拓与开采计划，分2个基本工艺实施联合抽采。第一步，在采煤准备工程未施工之前，在大巷和条带式采煤工作面巷道预留位置布置地面井网，实施压裂抽采。第二步，在巷

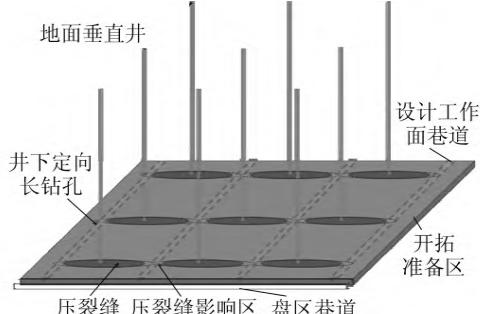


图3 煤矿开拓准备区煤层气地面与井下联合抽采工艺

道掘进过程沿巷道方向施工井下顺层水平长钻孔，贯通数口地面井压裂影响区，形成条带状区域卸压抽采。

3.2 条带式井上下联合抽采技术

在煤矿待掘进巷道区域，在地面沿巷道条带状布置煤层气井组，经压裂改造后进行地面煤层气抽采，提前抽采瓦斯；在巷道掘进过程中，施工井下瓦斯抽采钻孔，待井下钻孔连通煤层气井压裂影响区后，地面煤层气井停抽，仅井下钻孔利用煤层地面压裂增渗区继续抽采瓦斯。

3.3 井下本煤层长钻孔贯通地面井压裂影响区抽采技术

利用千米钻机定向施工本煤层长钻孔与地面直井压裂影响区沟通，形成人工裂缝与长钻孔构成的立体抽采网络，实现煤层的大面积改造卸压和瓦斯抽采。技术实施的效果，取决于采煤工程布置与煤层气地面工程布置之间的有机衔接。其中，地应力场特征是2类工程布置所要考虑的共性地质条件。即：压裂裂缝优先沿最大挤压应力方向发育，条带状采煤工程和地面井组垂直于最大挤压应力方向布置，以最大限度地扩展条带状抽采区的宽度，提高抽采效率，缩短抽采时间。

该套技术首次将采煤卸压区与地面压裂改造技术有效耦合起来，实现了煤层透气性的全覆盖式提高及采动区煤层瓦斯的高效抽采，解决了单一煤层煤炭开采区难以区域卸压、瓦斯抽采效率低下、抽采达标时间较长等技术难题。

4 生产区煤层气井下高效抽采关键技术

原有井下煤层瓦斯抽采钻孔不能确定钻进轨迹（定向定位），瓦斯抽采存在死角和盲区；矿井松软煤层钻进易塌孔、压钻，钻孔成孔率低，抽采效果差。2007年以来，晋煤集团对中~硬煤层瓦斯抽采钻孔进行定向控制施工，实现了井下煤层大面积精确抽采，消除了抽采空白带，建立了区域抽采达标评价模型，合理布置了区域钻孔工程和抽采时间；同时在松软煤层使用暂堵护壁液和水平填砂技术，提高松软煤层成孔率，提高瓦斯抽采效果^[14]。

4.1 区域抽采达标评价模型

区域抽采达标是经抽采后，煤层各点瓦斯含量与瓦斯压力均降到抽采指标要求以下。根据煤层瓦斯分布规律，测定区域内经地面预抽后煤层的瓦斯

含量 X_y 、计算区域瓦斯总量 Q_z 、抽采达标量 Q_b 及井下区域本煤层需抽采量 Q_c ，区域内抽采瓦斯量应满足 $Q_z - Q_c \leq Q_b$ 。根据 Q_c 可以确定区域钻孔工程量 l 及合理抽采时间 t ，见式 (4)。使用定向钻机施工区域抽采钻孔，根据瓦斯地质规律调整钻孔密度，消除煤层瓦斯抽采盲区，真正实现区域煤层瓦斯抽采达标。

$$l = Q_c \frac{A}{1440q_0} (1 - e^{-At})^{-1} \times 100 \quad (4)$$

其中: q_0 为百米钻孔初始流量, m^3/min ; A 为煤层瓦斯流量衰减系数。使用定向钻机施工区域钻孔，根据瓦斯地质规律调整钻孔密度，根据煤层变化情况尽可能均匀布置，消除煤层抽采钻孔布置盲区，真正实现区域煤层瓦斯抽采达标。

4.2 中~硬煤层瓦斯抽采钻孔定向控制施工技术

煤矿原先施工的煤层气井下抽采钻孔无随钻测量仪器，无法控制井眼轨迹。中~硬煤层瓦斯抽采钻孔定向控制施工技术集成国产钻进装备和随钻测量仪器，优化钻压与钻井液控制参数，创新煤矿井下顺煤层千米钻孔定向钻进施工工艺，使得钻孔直径达到了 96 mm，随钻测量精度达到 0.5%，单孔主孔最大钻进长度达 1 046 m，单孔（包括主孔与分支孔）有效抽采长度达到 2 000~5 000 m，钻孔成孔率 80% 以上，截至 2010 年底累计施工定向钻孔长度 280 万 m，实现了大区域长时间精准抽采^[15]。

4.3 松软煤层钻孔护孔钻进技术

针对松软煤层抽采钻孔施工过程中孔壁失稳和护壁堵塞瓦斯渗流通道的难题，成功研发了暂堵护壁钻井液体系。暂堵护壁液为化学浆液，护壁液暂堵率 54.82%，护壁液降解后煤层透气能力恢复至暂堵前的 75%，并可保持钻孔孔壁稳定 3 个月左右。针对瓦斯抽采钻孔垮塌导致钻孔失效问题，研发成功小井眼水平孔高效填砂技术，填砂饱和度达 90%。

5 结语

1) 在煤炭生产规划区，可以采用地面钻井、定压排采的方式进行预抽采，可以将高瓦斯环境降为低瓦斯作业环境，大幅度降低通风量即减少巷道截面积，改变高瓦斯矿井目前通常采用的两进一回（即 Y 型通风）甚至是三进两回通风方式，降低保

留煤柱的数量，提高煤炭资源采出率。

- 2) 在煤炭开拓准备区，采用地面与井下联合抽采工艺进行预抽采，统筹兼顾煤炭与煤层气 2 种资源的时空接替与回收效率。
- 3) 在煤炭生产区，仍然需要进行本煤层钻孔抽采以保证煤炭安全高效生产，大幅度降低局部瓦斯异常情况发生的频率。

4) 煤矿区三区联动、分区采用不同技术措施可实现煤炭与煤层气 2 种资源安全高效协调开发。晋城煤业集团已实现了三区煤层气抽采关键技术及配套工艺的创新，建议在更大范围内推广应用三区联动的区域递进式立体抽采模式（晋城模式）。

参考文献：

- [1] 武华太. 煤矿区瓦斯三区联动立体抽采技术的研究和实践 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (8): 1312~1316.
- [2] 张遂安. 采煤采气一体化理论与实践 [J]. 中国煤层气, 2006, 3 (4): 14~16.
- [3] 张新民, 张遂安, 钟玲文, 等. 中国的煤层甲烷 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [4] 张群. 关于我国煤矿区煤层气开发的战略思考 [J]. 中国煤炭, 2007, 33 (11): 9~11.
- [5] 秦勇, 吴财芳, 胡爱梅, 等. 煤炭安全开采最高允许含气量求算模型 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (10): 1009~1013.
- [6] 焦思红, 秦勇, 屈永华. 一种新的煤层气产出动态预测模型 [J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29 (2): 28~30.
- [7] 傅雪海, 秦勇. 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [8] 胡爱梅, 李明宅, 李国富. 煤层气开采过程中煤储层孔渗变化规律综述 [M] //中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书. 北京: 科学出版社, 2004: 267~271.
- [9] 李国富, 田永东. 煤层气井排水采气机理浅探 [J]. 中国煤炭, 2002, 28 (7): 33~35.
- [10] 张遂安. 煤层气资源特点与开发模式 [J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35 (4): 27~29.
- [11] 李国富, 侯泉林. 沁水盆地南部煤层气井排采动态与差异性 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (5): 798~803.
- [12] 张培河, 张群, 王保玉, 等. 煤层气可采性综合评价方法研究: 以潘庄井田为例 [J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34 (1): 21~25.
- [13] 张培河, 白建平. 煤矿区煤层气开发部署方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38 (6): 33~36.
- [14] 程远平, 付建华, 俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展 [J]. 采矿与安全工程报, 2009, 26 (2): 127~139.
- [15] 林柏泉, 张建国. 矿井瓦斯抽放理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.