

国家自然科学基金 (51304142) 资助出版
山西省基础研究计划项目 (2013021029-3) 资助出版

水-热耦合作用下煤层气 吸附解吸机理研究

赵东 著

煤炭工业出版社

国家自然科学基金 (51304142) 资助出版

山西省基础研究计划项目 (2013021029-3) 资助出版

水-热耦合作用下煤层气 吸附解吸机理研究

赵 东 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

水-热耦合作用下煤层气吸附解吸机理研究/赵东著. --北京:
煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978-7-5020-4306-3

I. ①水… II. ①赵… III. ①煤层—地下气化煤气—吸附—
研究②煤层—地下气化煤气—解吸—研究 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 213423 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 880mm × 1230mm $1/32$ 印张 $6\frac{1}{2}$

字数 167 千字 印数 1—1 000

2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 7134 定价 20.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换



赵东，男，1986年生，山西大同人。2012年毕业于太原理工大学，获采矿工程专业博士学位，现为太原理工大学矿业工程学院讲师。目前主要从事安全科学与工程专业的教学和煤层气开采及矿井瓦斯防治等方面的科研工作。主持山西省研究生优秀创新项目、山西省基础研究计划项目青年科技研究基金和国家自然科学基金青年科学基金项目。在《岩石力学与工程学报》等国内外知名学术期刊发表多篇学术论文，其中SCI收录2篇，EI收录8篇。

内 容 简 介

本书在综合分析国内外煤层气开采和煤层气吸附解吸机理相关研究的基础上,采用细观实验、宏观实验、理论分析和数值模拟等科学研究手段,对水-热耦合作用下煤层气吸附解吸机理进行了全面分析和系统研究。

全书共分6章,重点论述了水-热耦合作用下煤层气吸附解吸机理的实验研究成果。该系列研究成果包括:煤中气-液渗流细观实验、高压注水后煤层气恒温解吸特性实验、高压注水后煤层气升温解吸和恒温吸附特性实验、较高温度下煤层气吸附-解吸特性实验和煤中水-气耦合流动机理及细观数值模拟等。

本书可供大专院校采矿工程、安全工程专业本科生和研究生阅读,也可供从事煤层气抽采的工程技术人员、科研院所的研究人员参考。

前 言

煤层气俗称“瓦斯”，主要成分是甲烷，是成煤过程中产生的伴生气体，在煤矿的安全生产中具有“双重效应”。

首先，瓦斯是引发矿井瓦斯喷出、煤与瓦斯突出和瓦斯爆炸事故的主要诱因。新中国成立以来，煤矿发生一次死亡百人以上事故24起，其中瓦斯或煤尘事故21起，死亡人数占总死亡人数的90%。并且，瓦斯对大气臭氧层的破坏作用是二氧化碳的20多倍，对大气的温室作用也远高于二氧化碳，如将瓦斯直接排放，会对大气造成更为严重的臭氧层破坏和温室效应。如何将煤层瓦斯综合利用，减少直接排放，是目前亟待解决的问题。

其次，瓦斯是一种优质能源，当浓度为40%时，发热量高达14630~16720 kJ/m³。

近年来许多相关领域的专家学者，致力于研究煤层气的高效和安全开采，这样既可以降低矿井生产过程中的瓦斯浓度，预防矿井瓦斯灾害，又可以减少煤层瓦斯的直接排放量，提高能源利用效率。

煤层气作为一种能源，其储量巨大。据估计，全球埋深浅于2000 m的煤层气资源量约为 $2.4 \times 10^5 \text{ Gm}^3$ ，是常规天然气探明储量的2倍多。美国、俄罗斯、英国、德国、澳大利亚、印度和加拿大等国竞相开展煤层气的开发与利用，美国煤层气的商业开发尤为成功。我国是世界上煤层气资源最丰富的国家之一，全国陆上煤田埋深浅于2000 m的资源量约为 $3.67 \times 10^4 \text{ Gm}^3$ ，相当于45 Gt标准煤，按目前国内的煤炭产量，约等于150年的煤炭总产量。我国从20世纪90年代开始进行煤层气开发技术及工程应用研究，已取得了一定的进展和技术突破，采用地面钻孔和井下抽放联合作业方式抽采瓦斯，使矿井的瓦斯抽采率达到30%。

尽管矿井瓦斯抽采工作取得了长足进步,但矿井瓦斯灾害仍然是威胁煤矿安全生产的主要隐患,给国家和人民生命财产造成了严重的损失。究其原因,除了安全生产管理因素外,更主要的是因为我国的多数煤层属低渗透煤层,煤层瓦斯渗透性较差,采用常规的地面钻孔和井下抽采的措施,仍不能达到预防矿井瓦斯事故的目的。因此,需要进一步从煤层气的吸附解吸机理角度,对煤层气的运移规律进行研究,以掌握煤层气的释放规律。

煤层气的解吸和运移是扩散和渗流共同作用的结果,受多种因素的制约,其中温度和水分是重要的影响因素。实验证实,升温可以促进煤层瓦斯的快速解吸,但液态水会阻碍瓦斯的解吸释放,基于此,作者在赵阳升教授和冯增朝教授的指导下,在综合分析国内外煤层气吸附解吸机理相关研究的基础上,利用细观实验、宏观实验、理论分析和数值模拟等科学手段,对水-热耦合作用下煤层气吸附解吸机理进行系统研究,揭示温度和水分两种因素对煤层瓦斯吸附解吸规律的影响。现将以上研究成果编纂成书,相信该书的出版会对煤层气抽采领域的科学研究工作,起到重要的参考作用。

本书的出版得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(51304142)、山西省基础研究计划项目青年科技研究基金(2013021029-3)的资助。同时,对赵阳升教授和冯增朝教授的悉心指导表示衷心感谢。由于本人水平有限,书中不妥之处敬请各位读者批评指正。

作者

2013年6月

目 次

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外煤层气资源概况及开发现状	6
1.3 煤层气吸附解吸机理研究现状	13
2 煤中气-液渗流细观实验研究	20
2.1 煤中孔隙、裂隙特征	20
2.2 实验系统和过程	22
2.3 显微 CT 观测的煤吸附甲烷的特性	23
2.4 显微 CT 观测的含甲烷煤在高压注水后的特性	30
2.5 本章小结	38
3 高压注水后煤层气恒温解吸特性实验研究	39
3.1 实验系统	39
3.2 实验过程	42
3.3 实验结果与分析	44
3.4 结合孔隙结构对解吸的分析和讨论	60
3.5 本章小结	68
4 高压注水后煤层气升温解吸和恒温吸附特性实验研究	71
4.1 升温解吸实验系统和吸附实验过程	71
4.2 升温解吸实验结果与分析	77
4.3 恒温吸附实验系统和实验过程	86
4.4 恒温吸附实验结果与分析	87

4.5	本章小结	97
5	较高温度下煤层气吸附-解吸特性实验研究	100
5.1	实验系统的研制	100
5.2	实验过程与试样	103
5.3	实验结果与分析	105
5.4	结合吸附理论对结果的分析讨论	123
5.5	本章小结	127
6	煤中水-气耦合流动机理及细观数值模拟研究	129
6.1	煤中水-气耦合流动机理	129
6.2	温度作用下煤中水-气耦合流动数学模型	136
6.3	模型的简化和数值模拟方案	139
6.4	恒温 (30 ℃) 下气-液流动规律的 数值实验结果	144
6.5	升温 (30 ~ 270 ℃) 作用下气-液流动规律的 数值实验结果	167
6.6	本章小结	187
	参考文献	191

1 绪 论

1.1 引言

1.1.1 煤层瓦斯的形成和运移

煤是由高等植物经过上亿年的煤化作用形成的,以高等植物为主的成煤原始物质在沼泽中的细菌参与下经生物降解作用形成泥炭,泥炭经成岩作用形成褐煤,再经变质作用有机质发生热分解形成烟煤和无烟煤。瓦斯是煤变质过程中的伴生产物,在所有的煤化阶段均有一定的生成,随着煤变质程度的增加,煤层中的瓦斯含量逐渐增加,并且由于吸附作用的存在,80%~90%的瓦斯是吸附在煤的孔隙、裂隙表面上。由于甲烷是分子结构最简单的有机物,因此,许多学者认为甲烷是煤化作用的脱基产物。甲烷是无色无味的气体,在大气压力为101.325 kPa、温度为0℃的标准状态下,密度是 0.716 kg/m^3 ,并且难溶于水。

由于煤层所处的地质条件不同,煤层瓦斯形成的机理也不尽相同,目前认为瓦斯的形成主要有以下4种:

第一种,有机质在煤化作用过程中相伴生成。

第二种,由于火成岩侵入或碳酸盐受热分解生成的二氧化碳经断层等通道侵入到含煤地层之中而生成。

第三种,放射性物质蜕变过程中生成。

第四种,地下水放出的放射性惰性气体氦气及惰性气体氡气。

其中,第一种是有机成因,第二、第三、第四种为无机成因,瓦斯的组成中甲烷占到90%以上,其余由其他烃类气体及二氧化碳等组成。

煤层瓦斯的赋存状态一般有吸附状态和游离状态两种,并且

煤对甲烷分子的吸附作用属于物理吸附，是甲烷分子与碳分子之间相互吸引的结果。瓦斯在煤中的运移途径为微孔→小孔→中孔→大孔→微裂隙→中等裂隙→裂缝，随着对瓦斯流动规律研究的深入，国内外多数学者认为，一般情况下，瓦斯流动符合扩散—渗流运动规律。即煤是由若干尺寸小于极限粒度的颗粒组成，在尺寸小于极限粒度的煤粒中，瓦斯的流动是扩散运动；在尺寸大于极限粒度的煤粒中，瓦斯的流动是渗流运动。通俗地说，在小孔和微孔以下的流动属于扩散，而在大孔和裂隙以上的流动属于渗流，因此，就出现了煤中瓦斯流动的扩散—渗流规律。扩散，遵循菲克定律；渗流，遵循达西定律。

1.1.2 煤层中水的作用

已经查明，所有煤层中均含有一定的水分，为 5% ~ 16%，这些水分对瓦斯在煤层中的解吸、扩散、渗流有较大的影响。并且由于煤层注水具有防治冲击地压、防止瓦斯突出、防治煤尘及软化中硬煤层等各种综合作用，因此一直被国内外多数矿井广泛使用，我国已将其列入《煤矿安全规程》。20 世纪中期的多数研究证实，煤层中的高压注水，可以有效抑制矿井的煤与瓦斯突出，20 世纪 60 年代阳泉矿务局采用苏联的方法曾进行煤层注水对矿井突出抑制效应影响的工业实验，验证其可行性，然而由于没有相关的可靠实验数据支持，这一方法一直没有被广泛推广及再研究利用。近年来随着生产规模的扩大和煤层开采深度的不断增加，涌现出大批的高瓦斯矿井，作为治理高瓦斯矿井有效措施的煤层注水法又被重新提上日程并加以重视，而且一些相关的实验研究也同样证实煤层注水可以有效抑制煤层气的解吸，因此，水对煤层瓦斯的吸附解吸及煤层气的开采具有一定的影响，须加以分析研究。

对煤层的注水效应主要取决于煤体对水的渗透特性，太原理工大学采矿工艺研究所在 20 世纪 90 年代曾对全国 20 多个矿井的煤层煤样进行了渗透系数规律的测定研究，测定方法就是模拟实际储层的煤体对不同压力水流的渗透规律。选取较大尺寸

100 mm × 100 mm × 200 mm 的大块长方体煤样, 通过大量实验得出煤体对水所遵循的渗透系数规律符合:

$$\kappa = a \exp(-b\theta + cp) \quad (1-1)$$

其中, κ 为渗透系数, m/d; θ 为体积应力, MPa; p 为孔隙压力, MPa; a 、 b 、 c 均为实验拟合常数。由式 (1-1) 可以看出, 煤体的渗透系数受孔隙压力与体积应力影响十分显著, 说明煤层注水对煤体的渗透性影响及改性主要取决于注水压力与煤的实际赋存深度。

在不渗透的作用下, 水在实际储层煤体中的作用遵循修正的太沙基有效应力规律:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - ap\delta_{ij}$$

等效孔隙压力系数 a 随体积应力与孔隙压力 p 呈指数规律变化, 即

$$a = Ae^{-b\theta + cp} \quad (1-2)$$

其中, A 是拟合常数。

式 (1-2) 证实煤层注水可以降低煤层原始的体积应力, 这样就可以间接起到煤层卸压的效果, 因此煤层注水对预防一系列由于煤体原始压力过高而引起的矿井灾害事故具有理论上的抑制作用。

煤层注水使煤岩体与水相互作用, 考虑固体骨架变形和水的渗流, 主要有以下几个方面: 煤层中水的渗流符合达西定律; 煤体变形遵循广义虎克定律; 有效应力遵循修正的太沙基有效应力规律; 体积变形有骨架变形和孔隙变形两部分。得到煤层水渗流的固-液耦合数学模型如下:

$$\begin{cases} (T_{ij,p,i})_{,i} = \beta n \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial t} + w \\ [\lambda(p) + \mu(p)] u_{j,ji} + \mu(p) u_{i,jj} + F_i + (ap)_{,i} = 0 \\ e = u_{i,i} \end{cases}$$

此模型考虑流体与固体的相互作用, 说明岩体的变形特性受孔隙水压的影响, 依据煤体内部的流体流动规律, 此模型为煤层

注水防治突出与解吸提供了理论指导。

阜新矿业学院朱之芳等曾对煤样浸水软化特性进行了实验研究,得出煤样在饱和含水以后,其强度和弹性模量均有不同程度的降低,下降幅度基本符合以下关系式:

$$\sigma_c = a - bw_c$$

$$E = \frac{a}{w_c} - b$$

$$E = a - bp$$

其中, σ_c 、 E 分别是煤体单轴抗压强度和弹性模量; w_c 、 p 分别是煤体饱和含水率和孔隙水压; a 、 b 是各自的拟合常数。由此说明,煤层注水可以软化煤体、增加煤体塑性,有效降低由于应变能突然释放导致的各类煤矿事故。

1.1.3 煤中对流-传导换热准则

与煤层瓦斯和煤层注水产生的渗流场类似,煤中同样存在着温度分布的场,称为温度场,温度场空间内各点的温度是空间坐标和时间的函数, $T=f(x, y, z, t)$ 。当达到稳态即温度不随时间变化时,则有 $T=f(x, y, z)$, 称为稳态温度场;反之称为瞬态温度场。煤中的传热方式主要分为热传导和对流换热。

1. 热传导定律与理论

1822 年法国科学家 Fourier (1768—1830 年) 在大量实验的基础上提出:单位时间内通过给定截面的热量,正比于垂直于该截面法向上的温度变化率和截面面积,而热量传输的方向则与温度升高的方向相反。

在三维坐标下,研究某一表征体积单元 (REV) 的热量传输,导入热量为

$$\begin{cases} \Phi_{x+dx} = \Phi_x + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx = \Phi_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \right) dx \\ \Phi_{y+dy} = \Phi_y + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy = \Phi_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \right) dy \\ \Phi_{z+dz} = \Phi_z + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = \Phi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \right) dz \end{cases}$$

按照能量守恒：导入热量 + 微元体内热源生成热 = 导出热量 + 微元体热能增量。

得到导热微分方程为

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = (\lambda T_{,i})_{,i} + Q \end{cases}$$

2. 对流换热定律与理论

对流换热的数学描述包括对流换热微分方程组及定解条件，以下介绍对流换热微分方程的推导分析过程。

引入如下假设：①流动是二维的；②流体为不可压缩的牛顿流体；③流体物性为常数、无内热源；④黏性耗散产生的耗散热可以忽略不计。

根据 Fourier 导热定律，局部表面换热系数是

$$\begin{cases} h_x = -\frac{\lambda}{\Delta T_x} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{w,x} \\ h_y = -\frac{\lambda}{\Delta T_y} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{w,y} \end{cases}$$

式中， h_x 、 h_y 分别是不同方向的表面换热系数； ΔT 是换热面与流体的温度差； λ 是导热系数。上式称为对流换热微分方程，为了求解温度梯度还需要建立其他微分方程。

二维、常物性、无内热源的能源守恒微分方程是

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

式中， c 是比热容， ρ 是流体密度。

动量守恒微分方程为

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases}$$

式中，从左至右，第一项是惯性力，第二项是密度不均引起

的浮升力,第三项是总压力梯度,第四项是黏性力。 u 、 v 是 x 、 y 方向的速度分量。

连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

1.2 国内外煤层气资源概况及开发现状

1.2.1 国内煤层气资源情况及储层特点

国内的煤层气资源极其丰富,据相关部门测算,我国煤层气的保有资源储量约为 $36.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,并且资源分布相对比较集中。有资料显示,我国的煤层气含气量大于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的富煤层气资源量为 $12.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$;含气量小于 $4 \text{ m}^3/\text{t}$,埋深小于 2000 m 的煤层气资源量为 $14.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$;含气量介于 $4 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤层气资源量为 $9.92 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。埋藏深度小于 1500 m 的浅层煤层气资源量为 $24.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,埋藏深度介于 $1500 \sim 2000 \text{ m}$ 的煤层气资源量为 $11.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。全国大于 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的含煤层气盆地(群)共有 14 个,其中含气量在 $5000 \times 10^8 \sim 10000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有川南、黔北、豫西、川渝、三塘湖、徐淮等盆地;含气量大于 $10000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有鄂尔多斯盆地东缘、沁水盆地、准噶尔盆地、滇东黔西盆地群、二连盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、天山盆地群、海拉尔盆地。

国内煤层气的储层具有如下 3 个特点:

第一,煤储层渗透率低。按照渗透率大小可将煤层气储层分为 5 个等级:一级渗透率大于 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是渗透性极好的储层;二级渗透率介于 $5.0 \times 10^{-3} \sim 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,是渗透性较好的储层;三级渗透率介于 $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,属于中等渗透性的储层;四级渗透率介于 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,属于渗透性差的储层;五级渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是渗透性极差的储层。表 1-1 是我国煤储层渗透率的分级标准和分布比例。对于我国所有的煤层气储层分布,

渗透率二级及以上的占 14%，三级占 17%，四级占 35%，五级占 34%，渗透性差及以下的储层约占总量的 70%。这正是我国煤层气采用常规手段难以开发的原因，因此增加煤层的渗透性或可通透性是煤层气采出与否的必要条件。

表 1-1 我国煤储层渗透率的分级标准和分布比例

渗透率等级	划分界限/ μm^2	所占比例/%	渗透性描述
二级及以上	$\geq 5.0 \times 10^{-3}$	14	渗透性好或较好
三级	$1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$	17	渗透性中等
四级	$0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$	35	渗透性差
五级	$< 0.1 \times 10^{-3}$	34	渗透性极差

第二，煤储层地应力梯度分布不均。煤储层渗透率大小受多种地质因素影响，其中地应力是最主要的因素。随着煤储层原地应力的增大，渗透率明显减小。煤储层原地应力的大小决定于煤层埋深和应力梯度。由于受地质构造条件的影响，不同煤田或地区的应力梯度也存在差异，六盘水地区、淮南煤田和淮北煤田的应力梯度较大，平均大于 2 MPa/100 m；大城、鹤岗和河东煤田的应力梯度中等，平均值的范围为 1.7 ~ 20 MPa/100 m；沁水和铁法煤田的应力梯度较小，平均为 1.6 MPa/100 m 和 1.3 MPa/100 m。

第三，煤储层普遍欠压。煤储层压力的大小受深度和压力梯度的影响，根据我国 151 个煤层气井的试井结果，储层压力系数（储层压力是指储层裂缝中流体的压力，习惯将煤层气井中地下水静液面到达井口的煤层称为正常压力储层；高出井口的称为超压储层；在井口以下的称为欠压储层。储层压力系数为储层压力与正常压力的比值）为 0.29 ~ 1.60，平均为 0.88。其中，淮南煤田、六盘水地区、铁法煤田和河东煤田压力系数平均为 1.08、1.03、1.02 和 1.01，以正常压力和超压储层为主；大城煤田、

淮北煤田和鹤岗煤田压力系数平均为 0.95、0.93 和 0.91，以略欠压和接近正常压力储层为主；沁水煤田压力系数为 0.29 ~ 0.96，平均为 0.66，以欠压和严重欠压储层为主。

1.2.2 国内煤层气开采相关方法的实施概况

目前我国的煤层气开采方法主要是以抽采方法为主，由于我国的煤储层渗透性普遍较差，采用常规的抽采法很难开采相应的煤层气资源，因此提出了强化抽采的理论与方法，主要有密集钻孔抽采、水压致裂抽采、水力冲孔抽采、开采保护层强化抽采、水力割缝强化抽采方法等。这些方法对煤层气开采工业的发展起到了一定的推动作用，并且由于煤层瓦斯的预先抽采，有效降低了矿井瓦斯事故的发生率，为煤矿的安全生产提供了保障。

第一种，密集钻孔抽采瓦斯的方法。密集钻孔抽采瓦斯的方法是指缩小钻孔间距，提高瓦斯抽采率的瓦斯抽采方法，该方法一般通过加大钻孔直径、缩小钻孔间距、降低抽采负压以提高瓦斯抽采效果。根据周世宁院士的渗流理论，钻孔的总瓦斯流量为

$$Q = \pi m \lambda^{0.9} p_0^{1.85} R_1^{0.2} \alpha^{0.1} t^{-0.1} \quad (1-3)$$

式中， Q 为瓦斯总流量； m 为煤层厚度； p_0 为煤层瓦斯压力； λ 为透气系数； R_1 为钻孔半径； α 为煤层瓦斯含量系数； t 为煤层瓦斯排放时间。从式 (1-3) 可以看出，在抽采时间较长，瓦斯进入稳定流动状态时，钻孔总瓦斯流量 Q 与煤层厚度 m 成正比、与煤层瓦斯压力 p_0 的 1.85 次方及透气系数 λ 的 0.9 次方成正比，而钻孔半径 R_1 对总瓦斯流量 Q 的影响不大；决定钻孔总瓦斯流量的关键参数是瓦斯压力 p_0 和透气系数 λ 。

采用钻孔抽采时，加大钻孔直径在短时间内能呈现一些效果，但是由于钻孔总瓦斯流量仅与钻孔半径的 0.2 次方成正比，时间较长时，效果不大。钻孔间距与钻孔的有效抽采半径有关，实践证明：钻孔的有效抽采半径随抽采时间的延长而逐渐增大，当时间达到某一临界值时，达到极限抽采半径。若两个钻孔间距超过极限半径的两倍，无论怎样延长抽采时间，钻孔之间煤体中的瓦斯总有一部分抽不出来。而钻孔过于密集时，钻孔过程中容