

JINJULIMEICENGQUN BAOHUCENGKAICAI
WASI LITI CHOUCAI FANGTUJILI
YUSHIYAN YANJIU

近距离煤层群保护层开采 瓦斯立体抽采防突机理 与实验研究

汪东生 著

煤炭工业出版社

近距离煤层群保护层开采瓦斯立体 抽采防突机理与实验研究

汪东生 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突机理与实验研究/汪东生著. —北京: 煤炭工业出版社, 2010

ISBN 978-7-5020-3672-0

I. ①近… II. ①汪… III. ①煤层-瓦斯抽放-研究
IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 088330 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
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850\text{mm} \times 1168\text{mm}^{1/32}$ 印张 $6^{3/4}$
字数 175 千字 印数 1—2,000
2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 6482 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

前 言

通常情况下煤矿井下瓦斯以吸附和游离两种状态存在于煤层和煤系地层中。在地层深处，煤层中的瓦斯以高压状态存在，最大压力可达 10MPa 以上。当采掘工作破坏或扰动了地层中原有的气体平衡时，煤层中的高压瓦斯就会发生解析，向气压较低的空间运移并进入采空区。由于瓦斯在运移过程中不仅可以发生煤与瓦斯突出动力现象，而且瓦斯进入采掘作业空间后，在具备爆炸或燃烧条件时还会发生爆炸或着火。不仅如此，瓦斯爆炸过程中，往往还会卷扬煤尘混合瓦斯一起爆炸，爆炸强度更大，因而瓦斯灾害是煤矿生产中最严重的灾害之一。

针对贵州矿区瓦斯赋存量大的情况，在林化矿井开展实例研究。林化矿井煤层存在瓦斯含量高、煤层层数多且煤层间距小、煤层为煤与瓦斯突出煤层、煤层渗透性低、煤层透气性差、抽采有效半径小、抽采时间短、构造复杂、孔被水封导致钻孔难以发挥作用等特点。为此，在该矿井开展了近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突机理与实验研究，建立了近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突理论体系，推导出了近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突认证方程和适合林化煤矿的瓦斯立体抽采防突认证方程。

项目组完成了瓦斯立体抽采防突和认证实验研究，通过试验得出了本煤层回采工作面平行抽采钻孔抽采、顶板高位走向钻孔抽采、回采工作面采空区“T”型网管抽采、底板穿层钻孔抽采等合理的布置方式，采取立体综合防突措施，由“单一平面抽采”变为“立体综合抽采”，克服单一防突措施的不足，从根本上消除突出危险。

项目组开发研制了 PE 矿用塑料导向滑轮管道瓦斯抽采护孔

技术,提高了钻场瓦斯抽采率。采用 UDEC 软件模拟了近距离上保护层开采过程中覆岩垮落的动态发展过程,得出了底板和覆岩破裂移动规律以及随保护层工作面推进,被保护层煤体应力和变形分布特征,进而分析了它对合理布置卸压抽采钻孔和消除被保护层突出危险性的作用。系统地将近距离煤层卸压瓦斯储集和运移规律与采动覆岩移动、裂隙演化过程有机地结合起来,科学地、完整地将瓦斯灾害治理工程与采场卸压瓦斯流动规律、瓦斯富集区统一考虑。环形裂隙圈是动态的,瓦斯运输和储集也是动态变化的。

对垮落带破碎煤岩的渗透率进行量化研究,推导出了回采期间采空区垮落带的渗透率半理论化的表达式,并将其应用于瓦斯立体抽采系统中。采用 FLUENT 软件模拟了近距离煤层瓦斯立体抽采防突过程,发现了近距离保护层开采过程中随着煤岩体裂隙的动态时空演化,风流流场分布的规律及瓦斯分布规律。在顶板高位走向钻孔配合“T”型网管抽采情况下,增加了工作面的瓦斯抽排量,减少了工作面上隅角的瓦斯涌出。抽采钻孔周围煤体中瓦斯压力分布,从钻孔中心向外呈增大扩散,钻孔周围煤体中瓦斯流动速度场分布,从钻孔中心向外呈减小扩散。建立了一套回采工作面瓦斯立体抽采防突综合治理措施和防突管理体系。

通过现场试验研究发现 C_4 煤层抽采瓦斯含量降到 $5.75\text{m}^3/\text{t}$, 瓦斯压力降到 0.30MPa ; 通过底板穿层钻孔和高位走向钻孔抽采被保护层并卸压瓦斯, C_5 、 C_9 煤层瓦斯含量降为 $3.95\text{m}^3/\text{t}$ 、 $3.78\text{m}^3/\text{t}$, C_5 、 C_9 煤层瓦斯压力降为 0.42MPa 、 0.44MPa , C_5 、 C_9 煤层透气性系数增加 1210 倍和 560 倍,煤层各项测定指标降到了该煤层突出危险临界值以下,采煤工作面回风流瓦斯浓度由 1.5% 以上下降到 0.45% 以下,回风流绝对瓦斯涌出量由 $21.55\text{m}^3/\text{min}$ 下降到 $4.50\text{m}^3/\text{min}$ 以下。在整个开采过程中,没有出现煤与瓦斯突出事故,没有出现瓦斯超限作业,日安全出煤 2000t,年产值达到 3 亿元。瓦斯立体抽采防突抽排技术效果是明显的,且取得了巨大的经济效益和社会效益,具有广泛的推广

使用价值。

在本书完成过程中，王兆丰教授、林伯泉教授、杨胜强教授、李兴华教授、王凯教授、吴海进博士、黄金硕士、徐全硕士、王延林硕士等给予了大力的协助和支持，在此一并感谢。

著 者

2010 年 3 月

目 次

0 绪论	1
1 近距离煤层群覆岩层采动裂隙动态分布及瓦斯赋存流动规律研究	5
1.1 覆岩层采动裂隙动态分布规律	5
1.2 近距离煤层群瓦斯赋存规律	8
1.3 采动卸压瓦斯流动规律研究	26
1.4 林化井田煤与瓦斯突出特点	38
1.5 林化井田瓦斯涌出	38
1.6 本章小结	42
2 近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突机理	44
2.1 瓦斯立体抽采防突体系	45
2.2 瓦斯立体抽采防突机理	58
2.3 瓦斯立体抽采效果认证	60
2.4 本章小结	66
3 近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突现场实验研究	67
3.1 矿井概况	67
3.2 保护层开采情况	68
3.3 首采区煤层瓦斯基本参数测定	70
3.4 掘进工作面瓦斯治理	80
3.5 保护层工作面瓦斯治理试验	81
3.6 被保护层工作面卸压瓦斯抽采试验	96
3.7 PE 矿用塑料导向滑轮管道瓦斯抽采护孔技术	100
3.8 瓦斯立体抽采防突效果认证试验	103

3.9 本章小结	110
4 近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突数值 模拟研究	112
4.1 基于 UDEC 系统的近距离保护层开采过程 数值模拟	112
4.2 卸压瓦斯储集与采场围岩裂隙演化关系	121
4.3 近距离煤层群开采瓦斯流动规律模拟	127
4.4 本章小结	158
5 近距离煤层群保护层开采瓦斯立体抽采防突技术 应用	160
5.1 开采情况	160
5.2 采空区内风流流动状况	161
5.3 工作面瓦斯涌出规律分析	162
5.4 瓦斯涌出来源分析	165
5.5 采空区抽采瓦斯相关因素分析	167
5.6 瓦斯立体抽采防突治理技术及效果	169
5.7 本章小结	190
6 瓦斯立体抽采防突管理体系	192
6.1 瓦斯立体抽采防突工作流程	192
6.2 管理组织网络与检查流程	193
6.3 管理量化评定流程	193
6.4 本章小结	199
7 结论	200
参考文献	204

0 绪 论

矿井地下深部原始煤岩体中的瓦斯, 10% ~ 20% 以游离状态存在于裂隙、空隙中或吸附在煤体表面, 80% ~ 90% 以吸附状态附着在煤岩体表面。原始煤岩中的瓦斯相对静止地存在于高压状态下, 当采掘巷道进入了煤岩体中或煤层被采出时, 煤岩体就暴露在采矿作业空间, 相对封闭稳定的大面积煤岩层出现松动变形, 产生裂隙, 直至垮落。原始煤岩体中的高压瓦斯卸压解吸, 游离和解吸瓦斯沿孔隙或裂隙通道运移到低压采矿空间, 瓦斯的运移轨迹和储集区域与采矿覆岩裂隙演化过程有着密切关系。

井下卸压瓦斯的运移与储集必须具有瓦斯流动的通道, 同时遵守由高压区流向低压区的原则。当瓦斯与空气共存时, 由于瓦斯比空气轻, 瓦斯具有升浮漂移特征, 其流动动力特性满足浮力定律。伴随着煤层开采, 采场面积增大, 覆岩运动, 岩层开始松动变形, 由微孔演化成裂隙、空隙, 形成了卸压瓦斯流动的通道和积聚瓦斯的区域。对于采用走向长壁式开采体系的采矿场, 采用 U 型通风的采煤工作面, 瓦斯事故大都发生在采煤工作面的上隅角, 这主要是来自于采场卸压煤岩体的瓦斯通过裂隙通道运集工作面上隅角所致。

煤层瓦斯的主要成分是甲烷, 是造成全球温室效应和破坏臭氧层的主要污染源之一。中国有着相当长的瓦斯排放历史, 而且瓦斯排放量在过去的一个世纪内几乎翻了一倍。同时, 瓦斯又是一种可燃气体, 因此可以作为一种气体能源加以利用, 其高热、清洁和环保性等优点是其他能源所无法比拟的。瓦斯燃烧产生的热量非常大, 其发热量大约为 $3.35 \times 10^6 \sim 3.68 \times 10^6 \text{ J/m}^3$, 并且甲烷的热效率要比煤炭的热效率高。经计算, 1000m^3 的瓦斯大致相当于 4t 原煤所产生的热量。此外, 瓦斯除了可作为民用燃

料，还可以作为化工原料生产氨气和化肥等工业产品。所以，瓦斯集利害于一身，同时也是煤矿所特有的宝贵资源。

因此，实现煤与瓦斯的安全共采，可以充分利用地下资源，减少因瓦斯排放造成的环境污染，从而实现企业的安全生产、新能源供应和环境保护三重效应，获得显著的经济效益和社会效益。我国煤矿企业应从采掘部署上把瓦斯抽采与利用纳入正规的生产工艺流程，促进煤层气的开发达到规模生产。限制我国高瓦斯突出矿井井下瓦斯抽采的主要原因有两点：一是煤层的低渗透率和高可塑性使得沿煤层打钻孔困难，煤层采前预抽效果较差；二是我国煤矿大部分处于偏僻地区，矿区居民较少，民用气量不大，浓度偏低，远距离输送缺乏管网，运输成本高。

在煤矿采掘过程中，瓦斯是安全生产的最大威胁。加强通风是处理瓦斯最有效的方法，瓦斯抽采是解除这种威胁最有效的措施。当瓦斯涌出量大于通风所能解决的瓦斯涌出量时或采用通风方法不合理时，就应当采取瓦斯抽采措施。在突出矿井中，为防止在采掘生产活动中发生突出事故，必须采取开采保护层、煤层瓦斯抽采、煤层注水等区域性防突措施或掘进工作面瓦斯抽采、钻孔卸压等局部防突措施。

为了实现高瓦斯煤层工作面高产高效开采，国内在加大工作面供风量、工作面瓦斯涌出和分布规律，以及有效进行瓦斯抽采等方面进行了大量的研究。一般采用加大风量与瓦斯抽采相结合的方法解决工作面瓦斯超限及瓦斯突出问题，并在工作面采用了“E”、“U”、“W”、“Y”、“Y+L”及“U+L”型等通风方式。对于高瓦斯综采工作面，国内主要采用3条巷道布置方式，其中2条为工作面巷道，一般沿底板布置；1条为工作面瓦斯尾巷，用于排放瓦斯，一般沿煤层顶板布置。国外发达采煤国家，如美国、澳大利亚，由于一般采用连续采煤机掘进，工作面至少布置4条巷道，对于高瓦斯工作面也主要通过加大供风量和瓦斯抽采保证工作面的高产高效。

随着煤层瓦斯抽采技术的不断发展，瓦斯抽采已成为工作面

瓦斯治理的重要途径。抽采方法已由单一的采前预抽发展为边采边抽、强化抽采、邻近层卸压抽采、采空区抽采等多种方法，在透气性差煤层瓦斯抽采方面也取得了明显的进展。

因此，为安全有效地解决高瓦斯工作面影响生产的问题，必须将巷道布置、加大风量及瓦斯抽排相结合，对工作面瓦斯进行综合治理。

人们对矿井瓦斯赋存、涌出规律、瓦斯灾害危险性及其防治技术等方面进行了长期的研究，这方面的研究成果也较多。但是，不同矿区、不同煤层的瓦斯也有各自的特殊性。因此，针对不同矿区各开采煤层做专门的研究对指导各开采煤层的进一步延深开采和提高煤炭产量具有十分重要的意义。依据瓦斯赋存规律，随着采深的增加，煤层原始瓦斯含量逐渐增加，相应采掘工作面瓦斯涌出量也会增大。因此，提前进行瓦斯涌出规律和瓦斯防治技术的研究，对将来采掘作业的瓦斯治理也会提供有益的指导。

本书主要是完成保护层开采和保护层开采时瓦斯综合治理及其相互关系的理论体系研究，提出瓦斯立体抽采的防突理论，完成瓦斯立体抽采防突实验研究，检验瓦斯立体抽采防突实施效果。

在煤与瓦斯突出的防治措施上，国内外专家、学者一致认为，开采保护层是防治煤与瓦斯突出最经济、最有效的措施。本文研究开采上保护层对下部被保护层的采动影响规律，探索保护层开采后煤层透气性的变化规律，从而为防治煤与瓦斯突出提供科学的理论依据。

对于上保护层开采，在工作面推进后，由于采空区出现了大面积的空间，在地应力作用下，开采层下方的地层即向采场空间膨胀，这样，在层间形成大量的裂隙，形成了下部地层中的瓦斯向采场空间扩散的条件。下部岩层向上鼓起的程度随距采空区的距离、采深以及采高的变化而变化。裂隙的形成大大提高了下邻近层的透气系数，如果下邻近层中含有高瓦斯，则瓦斯压力形成

的膨胀力和推进力会促进岩层的移动和瓦斯向采场空间移动。

下邻近层的瓦斯涌出，一般情况下是比较缓慢的，但是当层间岩层强度低而且距离不大时，在下邻近层高压瓦斯压力的推动下，可以形成猛烈的鼓起，造成底板破裂、瓦斯突然喷出。

贵州矿区煤层瓦斯的赋存有以下几大特点：

- (1) 煤层层数多且煤层间距小；
- (2) 多数煤层为煤与瓦斯突出煤层；
- (3) 煤层瓦斯含量高；
- (4) 煤层渗透性低，围岩封闭性好；
- (5) 煤层透气性差，抽采有效半径小；
- (6) 衰减速度快，抽采时间短；
- (7) 构造复杂，塌孔、堵孔导致钻孔不发挥作用。

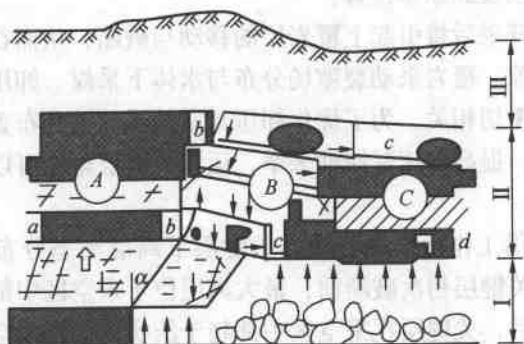
这些特点都反映出贵州矿区的煤炭开采和瓦斯治理的难度，同时也说明了对其进行深入研究的必要性。贵州矿区煤层气的抽采对策是研究原始应力条件下和改变原始应力条件下矿井煤层气的赋存和涌出规律，研究强化抽采技术，提高煤层气的抽采浓度和抽采量。

通过对煤层群的整体考虑，采用保护层开采，利用卸压范围内煤岩渗透性大量增加的特点，对下部被保护层的煤层进行瓦斯抽采，有效降低煤层瓦斯含量，消除下部被保护煤层的瓦斯突出，从而实现煤层群立体防治煤与瓦斯的突出，实现煤与瓦斯的高效共采。

1 近距离煤层群覆岩层采动裂隙动态分布及瓦斯赋存流动规律研究

1.1 覆岩层采动裂隙动态分布规律

砌体梁理论针对煤层开采后覆岩移动规律提出了“横三区”、“竖三带”矿压模型,如图1-1所示,即沿工作面推进方向,上覆岩层将分别经历煤壁支撑影响区、离层区、重新压实区。由下而上岩层移动分为垮落带、裂隙带、弯曲下沉带。实践表明,上覆岩层的岩性对岩层移动、变形和断裂有很大的影响。



A—煤壁支撑影响区 (a—b); B—离层区 (b—c); C—重新压实区 (c—d);

α —支撑影响角; I—垮落带; II—裂隙带; III—弯曲下沉带

图1-1 覆岩移动的“横三区”、“竖三带”矿压模型

岩层控制的关键层理论为深入研究岩层内部移动的动态过程和岩层采动裂隙动态分布规律提供了强有力的理论工具。关键层理论的基本学术思想为:由于成岩时间及矿物成分不同,煤系地

层形成了厚度不等、强度不同的多层岩层，其中一层至数层厚硬岩层在岩层移动中起主要的控制作用。将对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。关键层判别的主要依据是其变形和破断特征，即在关键层破断时，其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调一致的，前者称为岩层活动的主关键层，后者称为亚关键层。也就是说，关键层的断裂将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动。覆岩中的亚关键层可能不止一层，而主关键层只有一层。为了弄清开采时由下往上传递的岩层移动动态过程，并对岩层移动过程中形成的采场矿压显现、煤岩体中水与瓦斯的流动和地表沉陷等状态的变化进行有效监测与控制，关键在于弄清关键层的变形破断及其运动规律，以及在运动过程中与软岩层间的相互耦合作用关系。

上覆岩层内部移动特征：沿倾斜方向剖面，测点基本沿着与层面垂直的方向向下移动；沿走向剖面，测点先向采空区方向移动，最后恢复到原来位置。

煤层开采后将引起上覆岩层的移动与破断，从而在覆岩中形成采动裂隙。覆岩采动裂隙场分布与水体下采煤、卸压瓦斯抽采工程问题密切相关。为了优化卸压瓦斯抽采的钻孔布置，减少钻井工程量，提高卸压瓦斯抽采率，运用关键层理论可以得出以下基本规律：

(1) 沿工作面推进方向，关键层下离层动态分布呈现两阶段发展：关键层初次破断前，最大离层位于采空区中部；关键层初次破断后，关键层在采空区中部趋于压实，而在采空区两侧仍各自保持一个离层区，其最大宽度及高度仅为关键层初次破断前的 $1/3$ 左右。

(2) 沿顶板高度方向，随工作面推进，离层呈跳跃式由下往上发展。第Ⅰ亚关键层下出现离层，当其破断后，离层呈“O”形圈分布，如图1-2所示。此时，上部第Ⅱ亚关键层下出现离层，当其破断后，离层呈“O”形圈分布。如此发展直至主关键层。

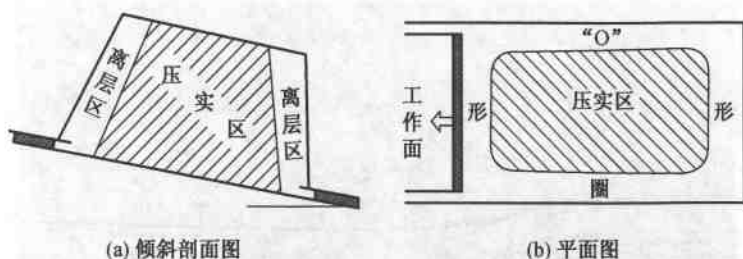


图 1-2 “O” 形图示意图

开采煤层顶板内瓦斯富集区除了与开采方式、通风方式有关外，还与顶板岩层移动特征有关。根据开采模拟试验和现场观测，采空区四周顶板岩层处在悬空状态，采空区顶板岩层移动是一个垮落下陷的过程，在靠近煤壁处，由于顶板没有完全垮落，存在较多的空洞，顶板内的裂隙在相当长的时期内存在。对采空区四周煤壁上覆岩层取其一层进行受力分析。图 1-3 描述了模拟试验的回采工作面回风巷上覆顶板岩层破坏特征，取图中的 AOB 层进行分析，AO 段处在煤岩体中，BO 段处在悬臂位置，并且上面承受一定的荷载，主要来自上覆岩层。载荷 q 分布不均匀，以 O 点为中心的一定范围内的载荷接近于零，该层可看做悬臂梁受力状态。根据岩层破坏特征，该层的底面 cd 段因弯曲受岩石层挤压、上面段受拉，同时该岩层还受到剪应力作用，将产生剪裂隙或在上段产生张裂隙，这些裂隙大部分与岩层面斜交，自煤壁向采空区方向破断呈 55° 角向上延伸，沟通上下层面。这些裂隙在相当长时间内不会压实，其诸多裂隙构成的裂隙区边界形似环状圈。其裂隙分为离层裂隙和竖向破断裂隙，前者是随岩层下沉在层与层之间出现的沿层面裂隙，它使煤层产生膨胀变形而使瓦斯卸压，并使卸压瓦斯沿离层裂隙流动；后者是随岩层下沉破断形成的穿层裂隙，它是沟通上、下岩层间瓦斯流动的通道。

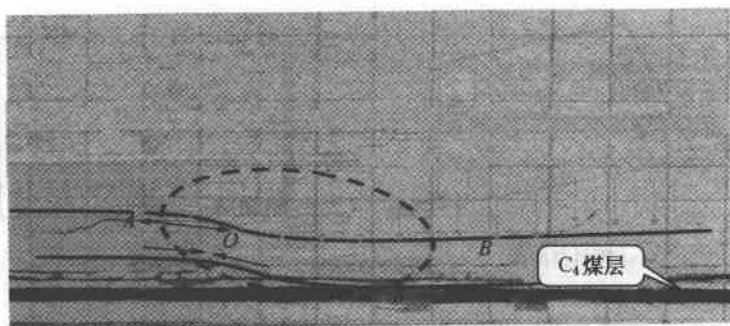


图 1-3 环形裂隙圈形成

1.2 近距离煤层群瓦斯赋存规律

1.2.1 煤的吸附理论及煤层瓦斯含量

煤是天然吸附体，对瓦斯有很强的吸附能力。目前煤矿开采的一些高瓦斯含量煤层，煤中所含瓦斯体积可达到煤本身体积的 30 ~ 40 倍，这些瓦斯主要以吸附状态存在于煤中。吸附是物理吸附、化学吸附和吸收的总称，物理吸附指瓦斯集中在煤孔隙的表面，即在瓦斯—煤界面处，瓦斯密度较其他点高。物理吸附时，固体表面与气体之间无特殊的相互作用，吸附力即为范德华分子吸引力。物理吸附与气体液化、水蒸气凝结相似，吸附时放出的吸附热较小，一般为每吸附一个克分子量瓦斯放出 10 ~ 20 kJ 的热量，这与气体液化时放出的热量相似。化学吸附时，在固体表面上固体分子与气体分子之间形成化学联系，即在它们之间有电子传递。化学吸附与物理吸附的主要区别在于：物理吸附是可逆的，而化学吸附是不可逆的，化学吸附的吸附热近似于化学反应的热效应，一般比物理吸附热大十倍至几十倍。对煤吸附瓦斯的大量试验测定表明，煤吸附瓦斯是可逆过程，充瓦斯时煤吸附的瓦斯量和脱附时解吸的瓦斯量基本相同，试验测出的吸附热为 12.6 ~ 20.9 kJ/g 分子量，近似于甲烷液化放出的热量，

由此可知，煤对瓦斯的吸附同物理吸附。

煤除表面吸附瓦斯外，还存在吸收状态的瓦斯。吸收与吸附的宏观差别仅在于前者的平衡时间较长，吸收时吸附体的膨胀变形量较大。

煤的吸附性通常用煤的吸附等温线表示。吸附等温线是指在某一固定温度下，煤的吸附瓦斯量随瓦斯压力变化的曲线。国内外大量的试验表明，煤吸附瓦斯时，吸附等温线符合朗格缪尔方程式：

$$X = \frac{abp}{1 + bp} \quad (1-1)$$

式中 X ——在某一温度下，瓦斯压力为 p 时，单位质量（或体积）纯煤（去水和灰分）吸附的瓦斯量， m^3/t （或 m^3/m^3 ）；

p ——瓦斯压力，MPa；

a ——吸附常数，标志纯煤的极限吸附瓦斯量，即在某一温度下当瓦斯压力趋近于无穷大时的最大吸附瓦斯量， m^3/t （或 m^3/m^3 ）；

b ——吸附常数， MPa^{-1} 。

煤的吸附饱和度是吸附瓦斯量与煤极限吸附瓦斯量之比。由于煤的极限吸附瓦斯量为 a ，则按式（1-1）煤的吸附饱和度 C 为

$$C = \frac{X}{a} = \frac{bp}{1 + bp} \quad (1-2)$$

显然，式（1-2）所表征的曲线与吸附等温线具有完全相同的形式，随着瓦斯压力的增大，吸附饱和度增大，但增大率逐渐减小；当瓦斯压力趋于无穷大时，吸附饱和度趋于1。煤的吸附饱和度除取决于瓦斯压力外，还同吸附常数 b 密切相关，常数 b 为曲线起始点（ $p=0$ ）的斜率， b 值越大，曲线上升速度越快，越易趋近于极限饱和值1。图1-4所示为根据式（1-2）绘出的不同常数 b 值时吸附饱和度 C 随瓦斯压力的变化。