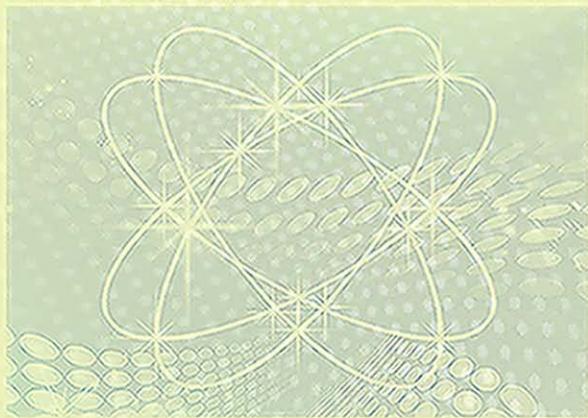


清洁能源开采利用安全新技术

李文 编译



四川人民出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

清洁能源开采利用安全新技术 / 李文编译. — 成都:
四川人民出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-220-08392-1

I. ①清… II. ①李… III. ①无污染能源
—能源利用 IV. ①X382

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 157998 号

QINGJIE NENGYUAN KAICAI LIYONG ANQUAN XIN JISHU

清洁能源开采利用安全新技术

李 文 编 译

责任编辑	谢 雪 王智敏
封面设计	经典记忆
技术设计	古 蓉
责任校对	何秀兰
责任印制	李 剑 孔凌凌
出版发行	四川出版集团 四川人民出版社 (成都槐树街 2 号)
网 址	http: //www. scpph. com http: //www. booksss. com. cn E-mail: scrmcbsf @ mail. sc. cninfo. net
发行部业务电话	(028) 86259459 86259455
防盗版举报电话	(028) 86259524
照 排	四川胜翔数码印务设计有限公司
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	146 mm×208 mm
印 张	4. 375
字 数	120 千字
版 次	2011 年 3 月第 1 版
印 次	2011 年 3 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-220-08392-1
定 价	18. 00 元

■ 版权所有·侵权必究

本书若出现印装质量问题, 请与我社发行部联系调换
电话: (028) 86259624

序 言

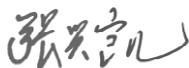
随着经济社会的快速发展，日益增长的能源需求带来了严重的能源危机，已成为制约我国经济社会发展的突出瓶颈。以“减量化、再利用和再循环”为原则发展循环经济利用清洁能源，是建设资源节约型、环境友好型社会和实现可持续发展的重要途径。如何更加有效地利用煤层气等清洁能源和实现资源再循环利用是各方共同关心的问题，也是解决能源资源危机和保证经济社会可持续发展的根本途径。

中国具有丰富的煤层气资源，规模化和产业化开发利用煤层气资源不仅在优化能源结构上能有效地增加高效洁净能源供给，直接减少煤矿瓦斯排放量以有效缓解温室效应，同时还有望从根本上遏制矿井瓦斯灾害以改善煤矿安全生产条件。已有的天然气管网和即将建设的煤层气管网也将为煤层气的输送和下游的市场利用提供有利条件。

为加快四川省资源再利用的规模化产业化发展，大力开发使用清洁能源，四川省安全科学技术研究

院承担了四川省发展和改革委员会“四川省煤层气（煤矿瓦斯）抽采利用规划配套政策及规模化建设”的科研项目，该课题重点研究煤层气的新能源战略和技术，并对清洁低碳能源技术的开发和商业化进行了探索。

李文作为课题主持人，依据《全国煤层气（煤矿瓦斯）“十二五”开发利用规划》，在大量国外期刊刊载的各国（包括中国）专业论文中，收集并编译了关于国内外煤层气再循环利用最新技术和成果，涉及煤层气地质评价、钻探及排采利用技术、煤矿区煤层气抽放利用技术等。本书对我国煤层气利用研究起到了抛砖引玉的作用，为广大煤层气科技人员提供了有益的借鉴，同时也为各级领导进行有效的决策提供了依据。



2011年3月

目录

Contents

序 言	张兴凯 / 1
澳大利亚悉尼盆地成藏历史对煤层气储存特性的影响	M. Faiz 等 / 1
蒙大拿州粉河盆地煤层水文特性及地球物理测井分析	Roger H. Morin / 23
煤层气水平井自动液压纠偏技术	Maria Mataierz 等 / 47
在加拿大不列颠哥伦比亚省东南部的落基山脉进行 水平井开采煤层气的稳定性分析	Thoms Gentzis / 72

美国东部阿巴拉契亚盆地的煤层气资源

..... Robert C. Milici 等 / 99

中国煤炭开采废弃物回收利用模式研究

..... Kurble J. 等 / 114

澳大利亚悉尼盆地成藏历史 对煤层气储存特性的影响

M. Faiz, A. Saghafi, N. Sherwood, I. Wang

摘要：由于以 P-T 条件和煤阶为变量的煤气系统平衡状态的变化，导致煤的气体成分在其埋藏过程中一直在改变。为充分评价煤层气资源的开采前景，需要对与气体吸附能力，含气量和气渗透率有关的大量的煤特性、埋藏史、P-T 条件、水文以及二次生物煤气化的可能性等进行研究。

以往的研究对煤阶和煤显微组分与吸附能力的关系给出了不同的诠释。悉尼盆地最大煤气储量与中挥发烟煤成反比，但焦化、接触变质型煤含量会有提升。煤吸附能力的比较与煤阶和煤显微组分类似，数据表明，煤阶是所有有机质类型中最为主要的影响因素。

悉尼盆地煤的现场含气量在 600m 深度含量较高，并在 900m 深度内进一步增加，含气量趋于稳定甚至降低。此趋势可能源于地质历史中压力和温度对气吸附能力的联合影响。对煤和气的 R—模式聚类分析给出了含气量和丰富惰煤素的正比关系。此关系与富镜煤的欠饱和性和性有关，可能因为富镜煤的渗透性和相应的逸散要高于富惰煤。

虽然悉尼盆地的大量甲烷和其他碳氢化合物气体可能已在

早白垩纪达到最大埋藏量，由于有限的气体吸附能力和高温下扩散系数的提高，仍有很大比例的游离瓦斯。在盆地隆起处，来自深处或由于浅处生物活动的气体可能已被煤吸收。但是，很多煤由于没有二次补气，仍保持显著的非饱和性。

在含有可观数量二次生物气的区域对于煤层气生产更具开采前景，部分原因是由于更高的含气量，但同样因为更高的渗透性。对于高渗透性来说，获得微生物和降水内养分是必需的。

为充分评价煤层气资源的开采前景，需要对与气体吸附能力、含气量和气渗透率有关的大量的煤特性，埋藏史、地质背景以及二次生物煤气化的可能性等进行考量。

1 概述

煤层气产业在澳大利亚发展迅猛，已经成为西海岸重要的能源供给。悉尼盆地烟煤含有大量甲烷（ CH_4 ），且靠近澳大利亚最大的天然气市场。悉尼盆地煤出产的甲烷产品由于其低渗透性、高压及多样气体饱和程度而具有很强的竞争力。因此，要对商业甲烷产品的商业价值进行准确描述，必须全面了解影响这些多样性的各种因素。

有大量的因素影响煤层气藏属性，需要对最重要的因素建立全盘的考量。即使在一个单型盆地之内，不同区域的不同因素也可能有决定性影响，与煤成分、煤阶、地质构造、岩浆活动、应力场、盆地流动力学、埋藏史及受热史等相关。在有关地质条件方面，本研究的目的在于对如下方面进行研究：

- (1) 对悉尼盆地煤的气体储藏能力的主要影响力。
- (2) 煤属性以及埋藏史对饱和程度及现场含气量的影响。

1.1 地质背景

悉尼盆地（图 1）是一个弧后前陆盆地，在晚石炭世至早

三叠世期间泥盆世和奥陶系基岩的沉积层序堆积。大多数定位于煤层气（CBM）产品的煤位于晚二叠纪，主要位于河成三角洲环境。悉尼盆地序列同样含大量二叠纪至第三纪火成岩入侵。放射性定年法和其他地层研究表明火成岩活动贯穿整个盆地地质历史，于约 250 180 年和 500 亿年前达到活动高峰。

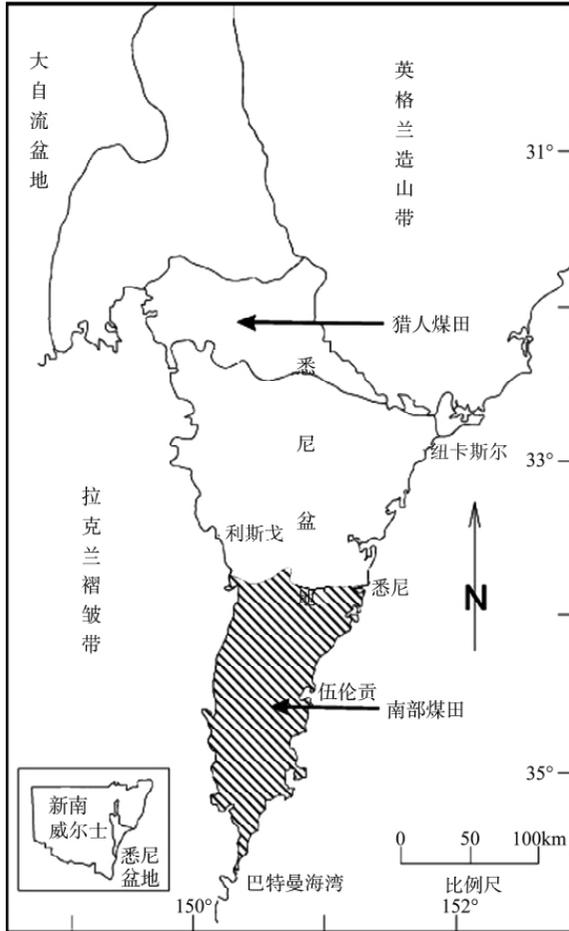


图 1 澳大利亚新南威尔士悉尼盆地南部及猎人煤田位置

自晚白垩纪起，悉尼盆地大部分处于东北至南—北抗压应力之下。此变形导致以向前张力或扭张线型构造的抗压应力叠加为代表的各向异性现象。合成各向异性影响了煤层气产品，特别是在悉尼盆地南部的产品。在大多数情况下，前向结构的方向与现在的最大压力方向正交。

悉尼盆地煤阶包含高挥发性烟煤至低挥发性烟煤，平均镜质体反射率（VR）范围为 0.7%~1.9%。受热史模型表明，这些范围的成因是高古热流量（75~100mW/m²）和早白垩纪期 2.5~4km 埋藏作用的结果。因此，盆地由于白垩纪晚期和第三纪时期的高速隆起而降温。

1.2 悉尼盆地煤层气

煤层气主要成分为 CH₄，其次为 CO₂、C₂H₆、C²⁺ 和 N₂。但是，在悉尼盆地的某些区域的煤含超过 90% 的 CO₂ 以及高达 12% 的 C₂H₆。悉尼盆地煤中的气体源自如下：

- （1）热生成气 CH₄ 和较高碳氢化合物生成于早白垩纪的深埋藏；
- （2）二次生物气 CH₄ 生成于白垩纪晚期的隆起；
- （3）CO₂ 大部分源自二叠纪至第三纪期间的间歇性火成岩活动。

1.3 煤中的气体储藏

煤的多孔性和孔径分布对其内部表面面积和气体储藏容量有主要影响。煤孔直径范围从 >50nm（大孔）至 <2nm（微孔），根据煤成分和阶数而定。烟煤主要为微孔，而低阶煤更有可能有更多的大孔。大体上说，煤的总开孔率和内部表面面积随着煤阶增加而减少，从高挥发性烟煤（VR~0.7%）至中挥发性烟煤（VR~1.4%），并随着煤阶的进一步增加而增加。很多研究证明，给定煤阶下，镜质体比惰煤含更高数量的

微孔。

由于分散（瓦尔）力、短距离斥力以及某些情况下的两级分子、静电力，煤中的气体主要以分子形态被微孔表面吸附的方式进行储藏。有研究认为，在高压下有大量的气体（特别是 CO_2 ）也可能以分子结构渗透的方式被吸收至煤中。气体与煤吸附和吸收分别的比例尚未知，因此使用联合形式的“吸着作用”一词表示包含两种形式的气体保持能力。为进一步吸收气体，有较少数量的气体以“自由气”的形式储藏于大孔以及煤的裂缝中，或者以溶解气体的形式储藏于煤层中的孔隙水中。

煤中储藏的气体含量主要与内部表面面积、压力和温度有关。对于一给定的煤，其气体吸着能力一般随着压力的增大而增加，保持双曲线关系。目前对压力范围的研究显示，等温线一般服从Braunauer等（1940）定义的“第一类”等温线。此类型等温线主要用于观察多微孔固体，如煤和活性炭，并且假定单层气体吸附在孔的表面。气体吸着是一个放热过程，因此一旦在一定的压力下达到平衡，吸着能力随着温度的升高而降低。

煤吸着能力也随着气体成分的物理和化学特性而变化。比如，在给定的 $P-T$ 条件下，悉尼盆地的烟煤可储藏的 CO_2 含量比 CH_4 高出1.5~2倍，且次烟煤和褐煤中的这个比例可达到 >10 。与 CH_4 相比， CO_2 具有更小的分子体积，被Ciu等（2004）认为是 CO_2 高吸着率的主要原因。但是， CO_2 的高吸着能力可能同样与其强极性静电力有关（正四面体形式），且静电力可能是气体吸着能力的一个重要影响因素。含有大量水分和大量羟基和羧基的低阶煤，比高阶煤含更多离子，因此静电力对 CO_2 吸着能力的影响对低阶煤的影响最大。进一步的，在含有高水分的低阶煤（如褐煤）中， CO_2 同样可以以溶解的形式储藏，特别是在高压下。

2 样本及方法

2.1 采样

本研究中，从悉尼盆地的南部和猎人煤田地下煤矿中的煤层气勘探钻孔和排水钻孔中获取了一系列煤炭岩心样品。现场含气量和煤特性由 61 份样本进行分析，气吸着能力由 18 份样本进行分析（表 1）。

2.2 现场含气量

现场含气量利用“直接模式”决定，符合商业实验室——地球数据有限公司的澳大利亚标准协会（1999）标准。含气量测试之后，煤炭岩心平行其长轴线分离成两半，然后压碎，以获得每个气体解吸筒的代表样本。这些代表样本用于煤成分、煤阶和气体吸着分析。

2.3 气吸着分析

煤炭样本的吸着等势线分析采用了 CSIRO 的重量分析法，包括测量煤炭吸附气体的重量增量。在这些测量中，样本暴露在常温、气压 0~50kPa 之间。研究过程中的数据通过对 300g 粒度中值为 50um 的样本在 27°C~33°C 之间进行测量。

在本研究中所用到的压力范围是假定为单层气体吸附机制，并根据 Langmuir 等式进行建模。吸附气体量和相应压力

符合如下公式 $C = \frac{V_L \cdot p}{P_L + p}$ (1)，其中 C 为气体吸附体积

(cm^3/g)， p 为气压 (kPa)， V_L 和 P_L 为经验参数。参数 V_L 代表理论最大含气能力。参数 P_L 为 Langmuir 压力，代表气体体积占其最大容量的 1/2 时的气压。

表 1 煤特性和朗缪尔体积对悉尼盆地煤样本 CH₄ 吸着能力分析

煤样	平均镜质体最大反射率/%	朗缪尔体积 /cm ³ /g	镜质体 /%	惰质组 /%	膜煤素 /%	矿物质 /%	内部水分 /%	灰分 /%	挥发分 /%
GLBa	1.3	19.41	54.3	37.2	<0.1	8.5	1.4	30.4	16.1
GLBT	1.33	23.32	50.7	44.8	<0.1	4.5	0.8	12.7	20.4
GLBB	1.35	24.13	29.9	63.5	<0.1	6.6	0.8	11.4	19.4
KPBT	1.13	29.45	20.8	73.0	0.7	5.5	0.6	5.3	26.8
KPBB	1.14	29.79	27.4	68.8	0.7	3.1	0.8	7.2	24.6
WGBT	1.22	28.61	47.6	49.5	0.5	2.4	0.6	7.3	26.5
WGBB	1.24	28.67	63.5	27.6	0.1	8.8	0.7	9.1	25.2
PNWood	0.81	27.91	37.1	56.2	3.8	2.9	2.0	7.3	31.3
PnWark	0.83	28.21	33.8	45.9	3.8	16.5	1.8	11.6	32.6
PNMt	0.8	24.73	53.2	17.8	1.2	27.8	1.8	25.8	26.2
KNWood	0.86	34.32	37.2	57.1	3.5	2.2	2.0	4.0	32.8
KNAr	0.84	31.32	61.8	27.3	2.5	8.4	1.8	6.8	27.2
KNPi	0.97	30.89	40.4	47.3	1.2	10.6	1.5	13.7	27.4
KNVa	0.99	32.40	69.4	24.3	1.6	4.7	1.5	6.5	29.4
METROI431	1.39	22.26	66.0	28.0	<0.1	7.0	0.4	12.2	21.0
METROMP3	11.20	26.92	65.6	18.5	<0.1	15.8	4.0	21.4	11.9
THGBI	1.04	24.65	79.8	15.3	2.5	2.3	1.2	6.6	33.0
THGWS05	0.99	28.25	44.5	49.2	1.3	5.0	1.2	9.1	25.7

2.4 煤岩石学，近似分析与煤元素分析

镜质体反射测量利用 40 倍油物镜蔡司镜头，干涉滤光片通频带峰为 546nm。操作符合澳大利亚标准协会（2000）的规程。使用平面对立光，对每个样本的 50 个镜质体粒子的最大反射比进行测量，平均值为平均最大镜质体反射率（VR）。

样本的煤显微组分分析使用符合澳大利亚标准协会（1998）要求的点计数器。最小计数为 500，有机和矿物成分数量由计数器按容积百分比计数。

商业实验室致力于根据澳大利亚标准协会（2000）标准进行近似分析和根据澳大利亚标准协会（1997）标准进行元素分析。

3 结论及讨论

3.1 甲烷吸着能力

18 个样本的 CH_4 吸附朗缪尔体积 (V_L) 为 $19 \sim 34 \text{m}^3/\text{t}$ (表 1)， CH_4 吸着等势线与收到基准相差很大 (图 2)。除了一个样本煤，其他样本煤从高挥发性烟煤至中挥发性烟煤和 VR 值范围为 $0.8\% \sim 1.4\%$ 。这些样本主要由镜质体和惰煤组成，含有 $<5\%$ 的膜煤素。其他样本由火成岩侵入导致接触变质，镜质体反射率为约 11% 。

如图 3 所示，样本分析显示 CH_4 的吸着能力与灰分成中度至弱的反比关系。此种关系已在其他煤上证实（如，Schwarzer 和 Byrer, 1983; Mavor 等, 1990; Laxminarayan 和 Crosdale, 1999）。这种气体吸着能力和灰分的负相关关系与气体主要储藏在有机质中有关，在有机质中多孔性由微孔决定。煤中的矿物质一般含更大的孔并因此具有较低的内部表面积。为研究有机质性质和 CH_4 吸附能力的关系， V_L 值根据干燥无灰基进行归一化。

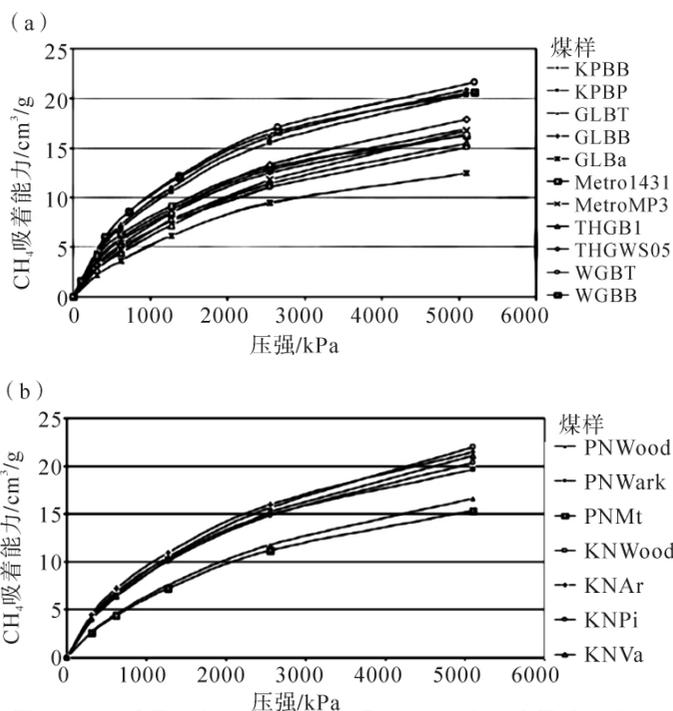


图 2 (a) 悉尼盆地南部煤田的吸着等势线 (采用重力学方法) (b) 悉尼盆地猎人煤田的吸着等势线 (采用重力学方法)

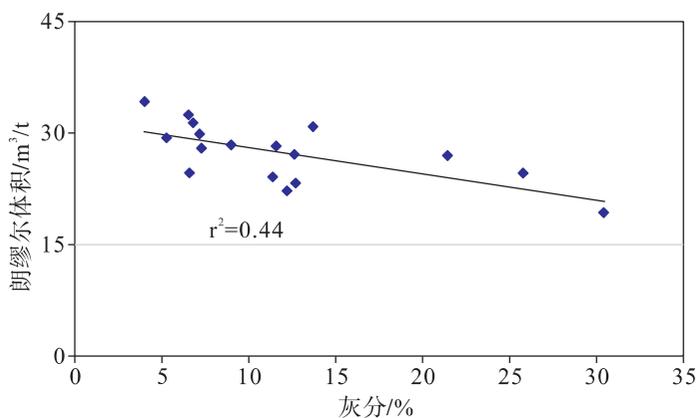


图 3 悉尼盆地煤灰分和朗缪尔体积的关系

3.1.1 煤阶的影响

之前的研究表明气体吸着能力和煤阶之间存在各种关系。一些研究表明，在高挥发性烟煤至无烟煤范围内， CH_4 吸附能力和多孔性在最低至中挥发性烟煤阶段逐渐降低，之后随着煤阶的升高而升高。例如，根据 94 组北美样本，Schwarzer 和 Byrer (1983) 证明吸附能力在最低程度含碳量为 83% ~ 88%。与之相反，Kim (1977) 认为 CH_4 吸附能力随煤阶从次挥发性至无烟煤增加而持续地增加。

根据这个研究中的煤分析，在高挥发性至中挥发性烟煤中， V_L 值与 VR 成反比关系，但是接触变质煤的 V_L 值脱离了此种趋势而具有高吸着能力 (图 4)。这些结果与之前的研究一致，表明广泛最低吸着能力和中间性煤阶的多孔性。

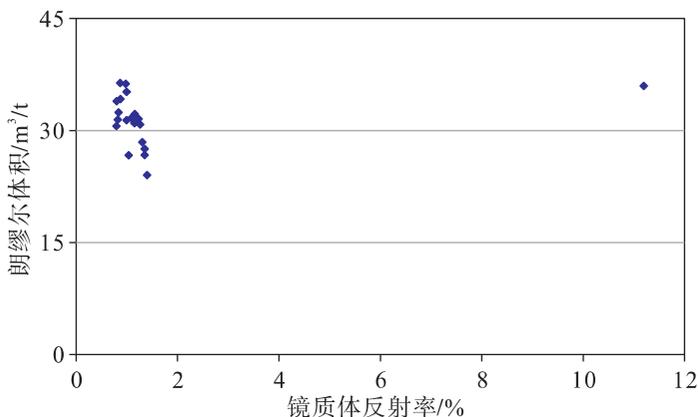


图 4 悉尼盆地煤朗缪尔体积和镜质体反射率关系

上述广泛最低吸着能力的原因不容易理解。在 X 射线散射研究的基础上，Hirsch (1954) 认为煤在中挥发性烟煤煤阶时具有“液体型结构”，含有最低的开孔率，C 含量为 89%。Moffat 和 Weale (1955) 认为这种低 CH_4 吸着能力是与低开孔率、高度整齐的面向优先的片层结构有关。对于 CH_4 吸着

能力在高挥发性 A 至中挥发性烟煤阶段逐渐减低的其他比较可信的解释是，微孔由煤化作用的副产品重碳氢化合物分子占据。Levine 支持这一观点，表示气体吸着能力根据重碳氢化合物的数量而变化，其堵塞在同煤阶的煤的微孔之中。但是，为彻底理解这种在中间煤阶气体吸着能力的降低仍需进一步研究。

3. 1. 2 显微组分的影响

由于煤显微组分物理和化学属性的固有区别，气体吸着能力也随着显微组分的不同而变化。但是，在对具有相同 VR 值的煤的等势线对比研究（图 5）表明，在镜质体和富含惰煤的煤中 CH_4 吸着能力相对于无灰基准并没有系统的变化。

之前的研究表明煤显微组分对气体吸着能力的影响呈现对立的结果。Ettinger 等（1966）发现在低煤阶中丝质体比镜质体吸收更多的气体，而在高煤阶相反为最低。与此研究一致的是，Schwarzer 和 Byrer（1983），Faiz 等（1992）以及 Krooss 等（2002）表明镜质体和富含惰煤的煤中气体吸着能力无系统的变化。相反的是，许多其他研究人员证明富含镜质体的煤比富含惰煤的煤吸收更多气体。进一步的，Lamberson 和 Bustin（1992）表明显微组分对于随煤阶变化的吸着能力具有相当的或压倒性的影响。但是，图 4 和图 5 中的等势线表明，在悉尼盆地煤研究中，煤阶（以 VR 值定义）是对吸着能力的最主要影响因素。

一些研究中的差异之处可能是由于显微组分的变化（与显微组分组相反）。比如，悉尼盆地的二叠纪煤一般比石炭纪煤更富含惰煤，北半球煤的惰煤更多，低反射半丝质体及更少的丝质体。悉尼盆地煤的丝质体含量一般 $< 8\%$ ，因此其对于气体吸着能力的影响可能为最低。悉尼盆地煤大部分半丝质体的气体吸着能力可能与镜质体相当，给定煤阶下，没有发现镜质体和富惰煤的煤气体吸着能力的显著差别。悉尼盆地煤的膜煤素具有较小的含量（ $< 5\%$ ），因此其影响也可能为最低。