

煤微孔隙特征及其与油气运移储集关系的研究

吴 俊

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘 要

本文应用意大利 Carlo-Erba 2000 型压汞仪测定了孔隙半径为 $37.5\text{--}75000\text{\AA}$ ($\times 10^{-8}\text{ cm}$) 范围内煤的微孔隙特征 (包括煤微孔隙体积、孔隙通道分布、孔隙结构、孔隙突破压力等内容), 研究表明煤微孔隙性与煤的性质、煤的含烃性 (油气)、煤层油气储集性、煤体破坏以及煤变质程度等地质因素有关。根据我国煤微孔特征进行了分类, 它们与煤层油气运移和采矿安全研究有着密切的关系。

关键词 煤、孔隙、煤层油气、运移

煤微孔隙空间似乎可以这样定义: 即煤物质中可被有机物质或无机物质及未被填集的空间。煤微孔隙空间的狭义概念是应不包括裂隙 (由于构造力作用使煤体发生破裂而留下的空间) 在内的那部分空间。煤微孔隙空间最主要的构成是孔隙和通道。一般将煤体中较大的空间称为孔隙, 而其间连通的狭窄部分称为通道。

研究煤微孔隙性比较常用的方法是 SEM 技术和压汞法技术。前者可直观地观察到煤中一些微米级的孔隙^[1-3], 后者可定量地得到一定孔径范围内有关孔隙大小、孔隙分布、孔隙类型以及孔隙突破压力方面的信息。这些研究对煤微孔隙的成因、物性特征、油气的储集以及瓦斯抽放均是有益的。

1 煤孔隙压汞法原理及研究意义

压汞法的基本原理是: 根据 Laplace 公式, 接触角大于 90° 的水银在无外界压力的条件下是不能进入煤微孔隙中的。利用外加压力可以克服水银表面张力带来的阻力。这样可以建立充满一定孔隙所需压力和孔径大小间的函数关系。迫使水银进入给定孔隙所需的压力符合 Laplace 公式, 即

$$r = -2\sigma \cos \theta / p, \quad (1)$$

式中, r —— 孔隙半径 (10^{-8} cm 或 $\text{\AA}$), σ —— 水银表面张力 (常取 $480 (\times 10^{-5})\text{ N/cm}$),

θ ——水银与被测煤样的接触角(取 140°), p ——压入水银压力($\times 10^5$ Pa).

将(1)式简化可得

$$r = 75000/p. \quad (2)$$

根据(2)式得到在不同压力 p 时所对应的孔径 r . 将压汞实验所测压入体积增量 ΔV , r , p 等进一步处理即可得煤的孔隙分布、孔隙结构、孔隙突破压力等参数.

我们用 Carlo-Erba 2000 型压汞仪测定煤的孔隙性, 至少得到了以下几方面与油气储运和采矿安全有关的信息.

(1) 煤的微孔隙体积 即可测定出孔隙半径为 $37.5 - 75000 \text{ \AA}$ 范围内的所有孔隙体积. 假若在地层深度内其它裂隙或大孔隙(孔隙半径 $> 75000 \text{ \AA}$)被封闭的条件下, 这部分体积可作为评价煤层储气、储油空间的基本参数.

(2) 煤微孔隙通道大小分布 根据压汞曲线或压入曲线可求出煤孔隙通道的分布参数, 该分布参数可作为煤层气体在煤层中运移、抽放设计评价基本参数.

(3) 煤微孔隙结构 根据压汞和退汞参数或曲线特征导出煤的孔隙类型和结构特征. 它们可以作为煤物性特征研究和气体储集、运移的基本评价参数.

(4) 煤层气体排驱压力 根据孔隙压入曲线可求出煤层气体孔隙的突破压力, 这些是煤层气体在煤层中运移程度和抽放条件以及煤层瓦斯突出的评价参数.

(5) 煤微孔隙性 与变质程度和煤体强度有关, 这些有助于加强煤的理论和实践研究.

(6) 煤层中油气储集状态特征 对样品进行有机溶剂抽提, 可导出抽提前后样品的孔隙特征, 这样可得出煤中液态烃的储存状态, 这对煤成油的储存和运移有重要研究意义.

2 煤孔隙空间形态特征和煤微孔隙分类

孔隙与在煤层中的空间分布是孔隙连通性的定性反映. 煤的总孔隙空间主要由可渗透·扩散孔隙、死端孔隙和孤立孔隙三种类型所组成. 有效孔隙和孤立孔隙是一个相对概念. 这主要取决于对孔隙的认识程度. 若仅从孔隙的连通性分析, 所谓“死端孔隙”的概念则是因为还存在着更小数量级的孔隙由于毛细管的凝聚作用使之不能与其它孔隙所相通的缘故.

煤中所有孔隙的连通性均可认为是由孔隙的并联和串联连通类型组成(图1). 煤层气体的所有传质运动均是在这两种孔隙类型中进行, 并是这两种连通孔隙类型与气体作用的综合反映.

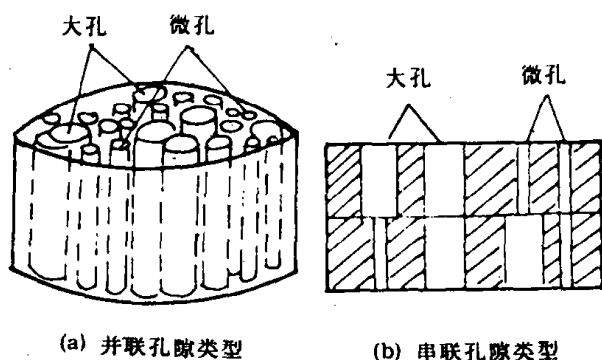


图1 煤微孔隙连通性基本模型

根据 Carlo Erba-2000 型压汞仪测定了孔隙半径(从 $75000 - 37.5 \text{ \AA}$ 间的孔隙性), 并作出孔隙分类(表1). 该分类主要根据压汞特征曲线和气体的扩散运移特征作为分类基础, 它能比较好的反映煤的孔隙性.

另外我们还应注意到煤微孔隙结构类型对油气运移、储集的影响. de Bore 根据“孔隙滞后环”的特征将孔隙分为 A, B, C, D 和 E 5 种结构类型^[4]. 由于煤孔隙结构组成的复杂性, 所以用压汞仪所测的滞后环则应是煤各种孔隙类型叠加的

表1 煤微孔隙类型特征分类

类型	孔径分布 (直径 Å 或 10 ⁻⁸ cm)	孔隙结构特征	油气运移和储集	气体扩散孔隙类型
(I)	> 10000	多以管状孔隙、板状孔隙为主	易于液态烃, 气态烃储集和运移, 排烃效果好	气体容积型扩散孔隙 (YP)
(II)	10000 — 1000	以板状孔隙, 管状孔隙为主, 间有不平行板状孔隙	易于液态烃和气态烃的储集和运移	
(III)	1000 — 100	以不平行板状孔为主, 有一部分墨水瓶孔隙	易于气体储集, 但不利于重烃气体的运移	气体分子型扩散孔隙 (LP)
(IV)	< 100	具有较多的墨水瓶孔和不平行板状毛细管孔隙	气体能储集但不利于运移	

总效应,它也可以分为 5 种类型(图 2). 富烃煤层中主要出现 B 和 D 类孔隙,而贫烃煤层则多以 A 和 E 类孔隙为主.

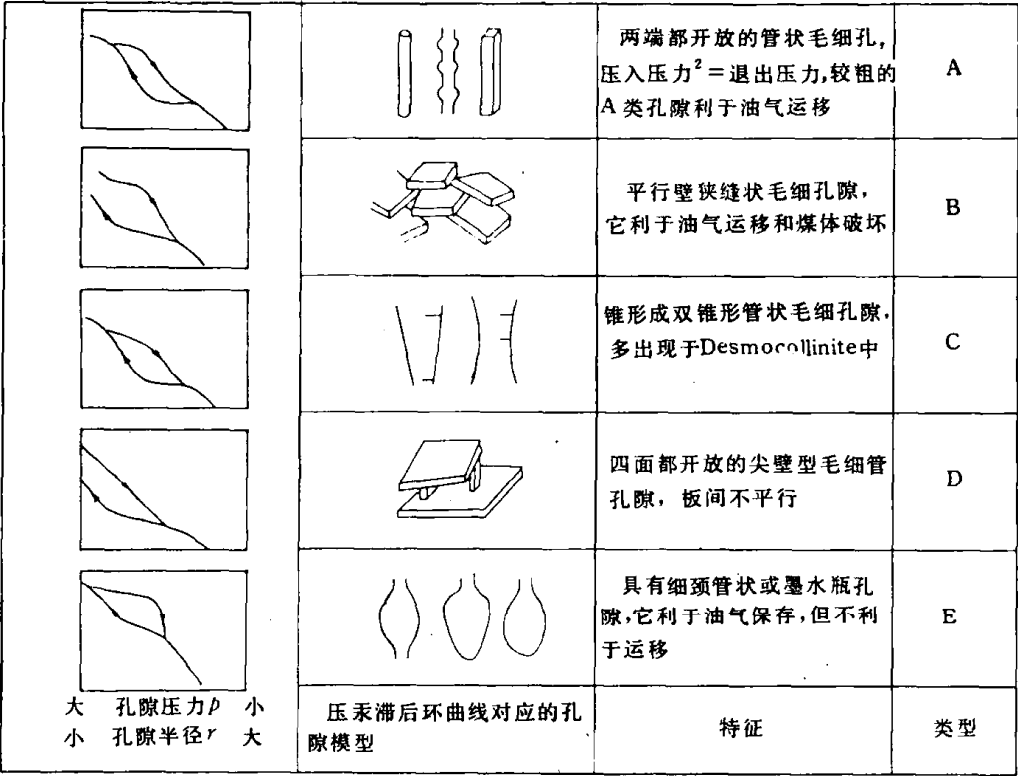


图2 煤中孔隙压汞滞后环及其所反映的孔隙结构模型

3 煤微孔隙特征研究

3.1 富烃煤与贫烃煤孔隙体积的比较

在压汞仪可测体积的范围内,富烃煤(层)微孔隙体积一般要比贫烃煤(层)的大(表 2). 例如淮南煤田 B_{11b} 煤层(突出煤层)的微孔隙体积是 B₁₀ 煤层(非突出煤层)的 5 倍之多. 南桐矿区的富烃煤层也相对于贫烃煤层具有更大的孔隙体积.

除此之外,我们还对煤进行了有机抽提处理,即对一些液态烃进行了“清除”. 同样抽提后

表 2 富烃、贫烃煤(层)微孔隙特征比较

矿区	煤层富烃性		R_r (%)	总孔容 (cm^3/g)	孔隙类型 (%)				突出危险性
					I	II	III	IV	
淮南	B _{11b}	富烃	0.85	0.1812	75.72	14.41	5.79	4.08	强烈突出
	B ₁₀	贫烃	0.85	0.0314	58.91	9.86	15.29	15.92	不突出
砚石台	4	富烃	1.08	0.01996	29.91	8.27	29.91	31.91	有强烈突出危险性
	6	一般富烃	1.10	0.01039	30.13	14.53	24.83	30.51	一般危险
鱼田堡	4	富烃	1.68	0.0276	21.38	19.55	46.37	12.68	强烈突出
	6	一般富烃	1.64	0.0159	10.70	10.06	49.08	29.56	一般突出

煤样的总孔隙体积大为增大, 并是未抽提样品的 2—5 倍(表 3)。富烃煤中具有较大的孔隙体积空间, 为油气的储集提供了条件。

表 3 富烃煤抽提前后的孔隙特征

样号	采样地点	R_r (%)	抽提状态	总孔容 (cm^3/g)	孔隙类型 (%)				样品类型
					I	II	III	IV	
EP-2	江西乐平鸣山 B ₂ 煤层	0.70	前						树皮煤
			后	0.0607	43.34	13.02	34.75	8.90	
EP-9	贵州水城大河边 409 煤层	0.72	前	0.0284	11.97	8.45	54.22	25.35	镜亮煤
			后	0.0992	47.42	19.25	26.11	7.16	
EP-7	贵州水城大河边 407 煤层	0.72	前	0.0435	21.85	18.63	43.68	15.86	镜亮煤
			后	0.1070	46.36	22.43	26.55	4.67	
EP-3	浙江长广东风卡 C ₂ 煤层	0.71	前	0.0264	20.98	10.73	48.30	20.00	树皮煤
			后	0.1238	68.90	12.20	14.30	4.60	
EP-4	四川南桐砚石台 4 号煤层	1.20	前	0.0245	18.78	13.06	51.83	16.33	镜亮煤
			后	0.0776	65.21	15.85	14.46	4.51	
EP-5	四川南桐二井 4 号煤层	1.20	前	0.0245	18.78	13.06	51.832	16.33	镜亮煤
			后	0.0836	70.21	7.53	16.99	22.55	
EP-11	贵州水城木冲沟 11 号煤层	1.26	前	0.0417	13.20	13.68	49.89	23.26	镜亮煤
			后	0.0861	57.38	11.61	23.11	7.90	
EP-8	四川鱼田堡 4 号煤层	1.68	前	0.0276	21.38	19.55	46.37	12.68	镜亮煤
			后	0.1026	65.40	14.72	16.57	3.31	
EP-10	贵州六枝大用矿 7 号煤层	1.71	前	0.0483	20.49	21.60	36.85	19.05	镜亮煤
			后	0.1055	66.83	15.26	13.36	4.55	

我们根据微孔隙的连通性采用体积比例法研究了我国煤层的孔隙通道分布特征并进行了归纳分类, 它们大致可分为三大类 9 小类(图 3)。其中开放型的孔隙系统具有最佳的运移性能, 而封闭型的运移性能较差。

3.2 煤孔隙特征对煤体强度的影响因素

对破碎煤和硬块煤微孔隙性研究发现, 煤的破坏与其孔隙性有着密切的关系。一般认为破坏程度大的煤具有较大的孔隙体积(表 4), 并且含有较多孔径(直径)大于 1000 Å 的孔隙(图 4)。

孔隙体积大和大孔比例高的煤层是煤体易碎性的内因之一。较大的孔隙体积和孔隙类型使煤的孔壁变薄并使孔隙骨架强度降低。另外较大的孔隙体积可容纳较多的气体, 它可使煤

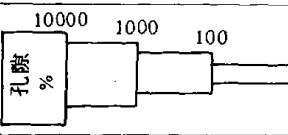
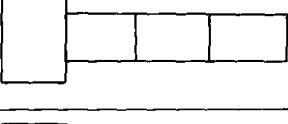
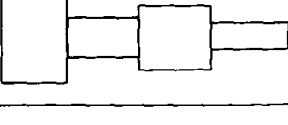
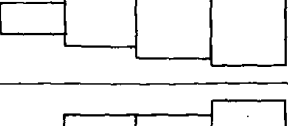
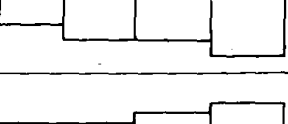
特征 类型	孔径分布类型	特征及评价	举例
开 放 型	K I 	在10000Å以上的孔隙中能储集较多的气体, 这种类型的孔隙易于气体的排驱, 对此类的煤层应注意瓦斯抽放, 它也是煤层气勘探的目标层位	淮南B _{11b} 煤
	K II 		六枝化处 7 号煤层
	K III 	I, II 类孔隙较多, 易于抽放和突出	淮南C ₁₃ 煤层
过 渡 型	G I 	在 I 和 III 孔隙区内储集较多的气体, 易于发生阶段性的富集和瓦斯突出	开滦赵各庄矿12号煤层 南桐硐石台 4 号煤层
	G II 	I, II 类孔隙较多, 易于抽放和突出	淮南C ₁₃ 煤层
	G III 	II 类孔隙较多, 易阶段性突出	水城汪矿409煤层
封 闭 型	F I 	I 类微孔分布少, 并向次一级微孔递增, 不利于气体的运移和抽放	六枝地宗 7 号煤层
	F II 	同上, 但在1000Å以下的孔隙中易富集较多的气体, 在煤层开采中应注意部分高压气体的存在和瓦斯突出	鱼田堡 6 号煤层, 焦作二煤层,
	F III 	1000Å 以上的孔较少, IV, III 类型孔较多	淮南B ₄ 煤层, 南桐硐石台 6 号煤层

图3 煤微孔隙分布类型

的含气性增强并促使煤与气体的共体体系内能增加. 这种良好的气体、固体性质的配合形式造成了软煤或软分层的易变性.

3.3 煤孔隙性与煤变质程度的关系

从理论上分析, 煤微孔隙性应与变质程度有关, 但在我们研究的孔隙数量级上并未得到两者有密切关系的迹象. 这一特点说明了煤中孔隙的复杂性. 然而在孔隙限定的范围内仍可得到煤中的 III 类孔隙百分比与变质程度存在着一定的相关性 (图5).

可以看出随变质程度的增加, III 类型孔隙比例增大, 而大于 1000 Å 的 I 和 II 类型孔隙

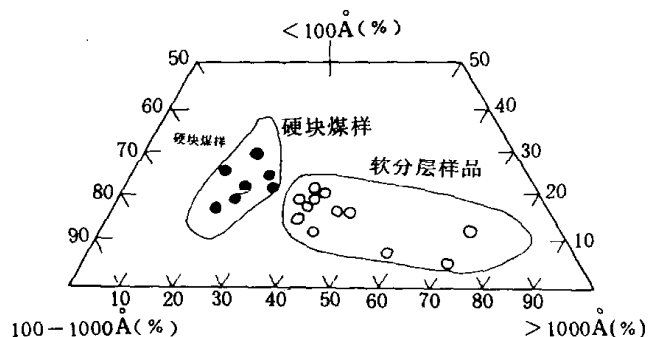
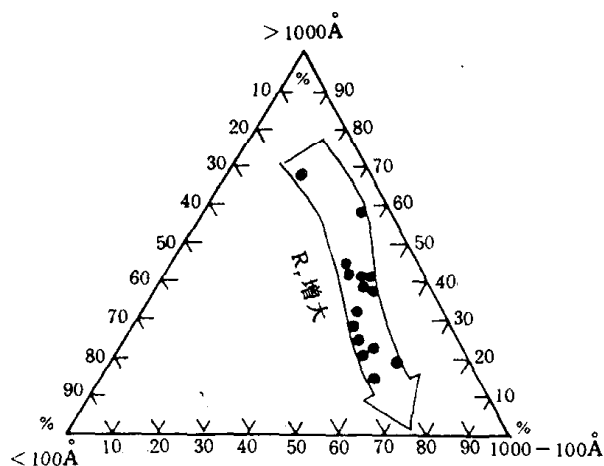


图4 不同破坏程度煤样的孔隙分布三角图

表 4 不同破坏程度煤的孔隙特征

样号	采样地点	煤层	煤样性质	总孔容	孔隙类型 (%)				突出程度
					(I)	(II)	(III)	(IV)	
C-60	长广东风卡	C ₂	软煤	0.0264	20.45	17.05	43.94	18.56	有
C-69	长广东风卡	C ₂	硬煤	0.0205	20.98	10.73	48.30	20.00	没有
S-36	水城大河边	407	软煤	0.0758	26.12	31.66	33.37	8.84	强烈
K-9	开滦马家沟	9	软煤	0.0322	20.50	14.60	48.77	16.15	强烈
K-10	开滦马家沟	9	硬煤	0.0237	8.45	8.44	59.49	23.63	没有
K36	开滦赵各庄	9	软粒状煤	0.0285	18.96	17.89	49.47	13.68	强烈
N-143	南桐硯石台	6	软煤	0.0274	26.86	18.28	37.98	16.85	有
N-159	南桐硯石台	4	块煤	0.0192	13.02	9.90	59.38	17.71	有
S-64	水城汪家寨	409	软煤	0.0555	18.55	21.61	45.21	14.59	较强
N-89	南桐鱼田堡	6	粒状暗煤	0.0248	20.16	15.73	43.15	21.77	强烈
N-91	南桐鱼田堡	6	硬块煤	0.0186	10.22	9.14	63.42	17.20	没有
N-14	南桐鱼田堡	4	软煤	0.0276	21.38	18.55	46.37	12.68	强烈
N-101	南桐鱼田堡	4	粒状软煤	0.0322	22.68	19.26	40.38	17.70	强烈
N-138	南桐东林	6	构造煤	0.0262	21.37	16.03	42.37	20.33	强烈
LP-1	六枝地宗	7	硬块煤	0.0333	7.20	8.10	60.96	23.42	没有
LP-2	六枝地宗	7	粒状煤	0.0586	33.28	27.99	29.35	9.35	强烈
LP-3	六枝地宗	7	软煤	0.0483	20.49	23.60	36.85	19.05	强烈
JP-2	焦作演马	2	软煤	0.0288	22.23	20.14	41.66	15.97	强烈

图 5 煤孔隙分布三角图及其与 R_1 的关系

百分比迅速减小, IV 类型孔隙比例基本不变, 这一规律说明在物理方法可测的量子内, 孔径小于 $100\text{\AA}$ 的孔隙仍保持在一定的范围内. 它的绝对体积大小虽有变化, 而相对体积百分比却变化不大. 在气煤至无烟煤的范围内, IV 型孔隙占总孔隙体积的 15—25%. 由此可见, I, II 和 III 类型孔隙是控制煤层中油气储集和运移的主要因素, 而 IV 类型孔隙则并不重要.

为了证明孔隙性与变质程度的关系, 我们曾对南桐煤田 3 个矿区的两层煤进行系统性的孔隙性研究 (表 5). 可以发现在南桐煤

田无论是经过抽提处理还是未处理的样品, 煤微总孔容都有随变质程度增加而增加的趋势, 尤其对于抽提处理以后的样品更为明显. 分析孔隙类型的变化可以发现: 对于未抽提样品, 两层煤在焦煤阶段煤中的 I 和 II 类孔隙降低, 这说明有机质不断生成并充填于煤的较大孔隙中. 对于肥煤阶段的 I 和 II 类型孔隙较多, 而瘦煤阶段煤的 IV 类型增多. 但在抽提后的样品中, 煤的孔隙类型变化不大. 这一实验说明煤的孔隙类型受热演化程度和可溶有机质的双重因素的影响. 南桐煤田煤微孔隙性变化特征说明了鱼田堡矿的煤层不仅具有较大的孔隙体积以表示它具有较大的储气能力, 同时它们还以 III 类型孔隙为特征使它们具有较好的固气能力. 这两点是鱼田堡矿区煤层具有较高含气性的主要原因之一.

表5 煤抽提前后孔隙体积和孔径分布的变化

样品号	抽提状态	采样矿井	煤层	某种	总孔隙体积 (g)	孔径分布 (r), $\Delta V / \sum V$ (%)			
						(I)	(II)	(III)	(IV)
RO-2	抽提前	砚石台	4	肥煤	0.0222	29.73	14.41	43.23	12.61
	抽提后	砚石台	4	肥煤	0.0776	65.62	15.85	14.46	4.51
RO-1	抽提前	砚石台	6	肥煤	0.0213	21.62	10.34	47.88	13.62
	抽提后	砚石台	6	肥煤	0.0459	62.97	8.93	22.66	5.45
RO-3	抽提前	南桐二井	4	焦煤	0.0245	18.78	13.06	51.83	16.33
	抽提后	南桐二井	4	焦煤	0.0836	70.21	7.53	16.99	5.26
RO-4	抽提前	南桐二井	6	焦煤	0.0212	21.70	11.79	49.54	16.98
	抽提后	南桐二井	6	焦煤	0.0222	29.73	14.41	43.23	12.61
RO-10	抽提前	鱼田堡	4	瘦煤	0.0322	22.68	19.26	40.38	17.70
	抽提后	鱼田堡	4	瘦煤	0.1026	65.40	14.72	16.57	3.31
RO-9	抽提前	鱼田堡	6	瘦煤	0.0248	20.16	15.73	43.15	21.77
	抽提后	鱼田堡	6	瘦煤	0.0486	61.73	7.21	22.43	8.64

4 煤微孔隙性与可溶有机质储存状态的关系

煤中孔隙不仅是气态烃的储集空间,同时还是液态烃的储集空间.那么煤中的液态烃到底在煤层中具有什么样的赋存状态呢?这对于煤成油气研究是很重要的.

首先对煤进行有机溶剂抽提 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{甲醇}$, 9:1),将煤中的可溶有机质进行“清除”.然后测定抽提前后样品孔隙体积的变化增量 (ΔV),这个“增量”便是可溶有机质在煤孔隙中的状态反映(图6).对富烃煤层的一个变质系列样品进行了测定(表3)表明:抽提前后煤微孔隙体积发生了较大的变化,抽提前的样品一般以孔径小于 $1000 \text{ \AA}$ 的孔隙为主,而抽提后的样品则以孔隙直径大于 $1000 \text{ \AA}$ 的孔隙为主.抽提前后的孔隙之差及其分布就是煤中液态烃的赋存状态.在图6中可以看出液态烃在煤微孔隙的分布是不均匀的,并受着煤中孔隙分布的影响.

煤中的液态烃一般储存于较大的孔隙之中,在孔隙直径大于 $100 \text{ \AA}$ 的孔隙范围内,液态烃可以在煤中成为一种连续相,但这种分布也不是绝对的.例如

南桐煤田 R-9 号样品中的液态烃在孔径为 $5000 \text{ \AA}$ 时就中断了.这一现象说明煤中的液态烃分布范围很短,较大的孔隙虽然有利于液态烃的富集与储存,但在某种意义上也利于油气的运移和破坏.因为各类降解作用的发生将导致液态烃的破坏.例如各种微生物对液态烃的生物化学降解作用、机械降解作用以及化学降解作用等.还必须注意煤中液态烃的存在并非有利于采矿安全,这是因为存储于煤体内的液态烃将作为一种润滑剂而加速煤体的破坏,并同时导致煤和液态烃由于机械降解作用所产生的重烃气体增加,使煤层具有突出倾向性和易燃易

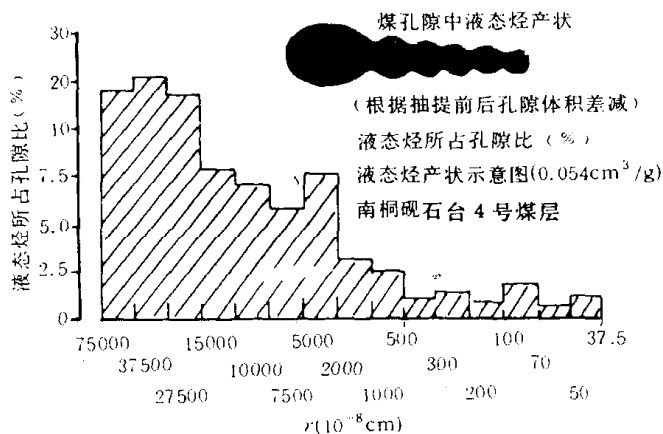


图6 煤中液态烃在孔隙中的分布状态

易爆性。这些情况在我国具有煤、油、气共生的矿区均有发生。

5 几 点 结 论

1. 用意大利 Carlo-Erba 2000 型压汞仪所揭示的孔隙参数基本上能满足煤层微孔隙性的研究。它们反映出煤微孔隙是煤层油气运移的主要介质。

2. 不同的煤层具有不同微孔隙性。孔隙体积、孔隙通道、孔隙结构特征,是影响煤层力学性质、煤层油气储运的内在因素。

3. 含烃性高的煤层具有较好的孔隙性,它不仅表现在孔隙体积大于含烃性低的煤层,而且前者还存在着有利于油气运移的孔隙条件。

4. 根据煤孔隙分布特征对煤(层)储集性和运移性作了分类,它们是开放型、过渡型和封闭型三大类和 9 小类,这一分类表征了煤层油气运移的难易程度,同时也反映了煤层气体抽放和灾害性的发生程度。

5. 在所测量范围内,煤微孔隙与变质程度关系并不密切,但在 III 类孔隙中,孔隙体积的变化与 R_v 有一定的关系。

6. 煤微孔隙性可反映煤中液态烃的存储状态。通常液态烃储集于大孔之中,这不仅有利于油气的运移,而且还易导致煤体的破坏。

总之,影响煤微孔隙的因素较多,煤是一类非常特殊的储集岩。因此对它的研究无论在煤成(层)油气地质上,还是在煤加工利用上,都是十分有意义的。

参 考 文 献

- [1] Dai Jinxing, *Chinese Science Bulletin*, 1982, 27(12):1314—1318.
- [2] 吴 俊, 煤炭学报, 1987, (2):40—46.
- [3] 郝 琦, 煤炭学报, 1987, (4):49—56.
- [4] 严继民、张启元, 吸附与凝聚-固体的表面与孔隙, 科学出版社, 北京, 1979.