

我国褐煤资源及其物性特征

傅雪海^{1,2}, 路露², 葛燕燕¹, 田继军¹, 罗培培²

(1. 新疆大学 地质与勘查工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为给研究褐煤对水和甲烷的吸附性及水和甲烷在褐煤中的流动性提供依据, 对采自我国主要褐煤产地的13个样进行了煤岩组分、工业分析及褐煤物性特征测试。结果表明: 褐煤中的全水分、空气干燥基水分、挥发分含量随变质程度的增加而减少; 当镜质组最大反射率 $R_{o,max} < 0.35\%$, 褐煤孔隙度随变质程度的增加而减少, 当 $R_{o,max} > 0.35\%$ 随变质程度的增加而增大; 各煤样孔容、比表面积差别很大, 但大孔、中孔、过渡孔、微孔孔容分布较均匀, 比表面积集中分布在过渡孔和微孔中; 褐煤对甲烷的饱和吸附量平均为 $6.27 \text{ m}^3/\text{t}$ 。研究成果对褐煤中次烟煤的划分、褐煤的提质利用及褐煤中煤层气资源的开发具有指导作用。

关键词: 褐煤; 煤岩组分; 物性特征; 孔隙性; 吸附性

中图分类号: TQ531 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2012)10-0104-04

China Lignite Resources and Physical Features

FU Xue-hai^{1,2}, LU Lu², GE Yan-yan¹, TAIN Ji-jun¹, LUO Pei-pei²

(1. School of Geology and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to provide the basis to the study on the water and methane adsorption of lignite and the water and methane flowability of lignite, the tests of the coal and rock composition, proximate analysis and lignite physical features were conducted on 13 coal samples from main lignite production places in China. The results showed that the total moisture, air dry base moisture and volatile matter content of the lignite would be reduced with the metamorphic degree increased. When $R_{o,max}$ was over 0.35%, the porosity of the lignite would be reduced with metamorphic degree increased. When $R_{o,max}$ was less than 0.35%, the porosity of the lignite would be increased with metamorphic degree increased. The pore volume and specific surface area of each coal sample would be high in difference. The pore volume distribution of the large pore, medium pore, transition pore and micro pore would be homogeneous and the specific surface area was concentrated and distributed in the transition pore and the micro pore. The average methane saturated adsorption of lignite was $6.27 \text{ m}^3/\text{t}$. The study achievements would have the guidance role to the sub-bituminous coal grading in the lignite, the upgrading and utilization of the lignite and the development of coal bed methane resources in lignite.

Key words: lignite; coal and rock components; physical features; porosity; adsorption

褐煤是变质程度最低的煤种, 它是泥炭经脱水、压实转变为有机生物岩的初期产物, 一般指镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 介于 $0.2\% \sim 0.5\%$ 的低变质程度煤。我国褐煤资源丰富, 产量逐年增加。前人在研究煤阶系列时对褐煤的煤岩、煤质、工艺性质、孔径结构、吸附性等进行了较多研究^[1-5], 但对不同变质程度褐煤中的全水分、空气干燥基水

分、挥发分、孔径结构的变化规律研究则相对较少。基于此, 笔者对采自我国主要褐煤产地(内蒙古海拉尔、云南昭通、河北万全、新疆吐哈盆地等)的13个煤样进行了工业分析、比重瓶法孔隙度测试、压汞和等温吸附试验, 探讨了褐煤中全水分、空气干燥基水分、挥发分及孔隙度随变质程度的变化规律, 以期对褐煤中次烟煤的划分、褐煤提

收稿日期: 2012-06-30; 责任编辑: 代艳玲

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(40872104); 新疆维吾尔自治区“天山学者”计划启动基金资助项目(036104)

作者简介: 傅雪海(1965—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: fuxuehai@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.20121018.0932.026.html>

引用格式: 傅雪海, 路露, 葛燕燕, 等. 我国褐煤资源及其物性特征[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 104-107, 112.

质利用及褐煤中煤层气资源开发提供参考。

1 褐煤资源分布

我国褐煤资源丰富,埋深 2 000 m 以浅资源总量 3 194.38 亿 t, 占我国煤炭资源总量的 5.74%; 探明储量 1 291.32 亿 t, 占全国探明储量的 12.69%; 预测褐煤资源量 1 903.06 亿 t, 占预测煤炭资源总量的 4.18%。埋深 1 000 m 以浅的褐煤资源量为 2 465.44 亿 t, 占褐煤总资源量的 77.2%, 主要分布在内蒙古、吉林、辽宁、山东、云南、广西等地。埋深 1 000 ~ 1 500 m 的褐煤资源量为 138.20 亿 t, 占褐煤总资源量的 4.3%, 主要分布在内蒙古、辽宁、广西等地; 埋深 1 500 ~ 2 000 m 的褐煤资源量为 590.74 亿 t, 占褐煤总资源量的 18.5%, 主要分布在内蒙古自治区和辽宁等地^[2]。

根据 GB/T 5751—2009 《中国煤炭分类》, 褐煤分为年轻褐煤 (HM₁) 和年老褐煤 (HM₂)^[6]。东北地区多属年老褐煤, 以形成于早白垩世 (K₁)、古近纪 (E) 为主, 云南多为新近纪年轻褐煤。我国年轻褐煤的资源量为 689.73 亿 t, 年老褐煤的资源量为 2 504.65 亿 t^[5]。

我国褐煤资源地域分布不均, 主要分布在我国东北和西南地区, 大型褐煤盆地群有海拉尔盆地群、二连盆地群和昭通盆地群^[7]。内蒙古东部褐

煤占全国褐煤总资源量的 77.55%, 云南褐煤占全国褐煤总量的 11.88%。褐煤在黑龙江、吉林、辽宁以及广西也有分布, 在河北、山东、广东、海南和四川等省的局部地区也有零散分布。内蒙古保有褐煤储量占内蒙古保有煤炭储量的 45.0%, 云南占 3.7%, 广西占 4.7%, 黑龙江占 5.4%, 海南则几乎全部是褐煤^[2]。

2 褐煤煤岩与煤质特征

2.1 煤岩特征

早、中侏罗世褐煤的腐植组含量最低, 平均仅 50% 左右, 而其他时代的褐煤腐植组含量普遍高达 80% 以上, 其中以古近纪褐煤最多, 平均可达 87% 左右, 早、中侏罗世褐煤的情质组含量最高, 一般大于 30%, 早白垩世褐煤的情质组平均含量比古近纪、新近纪褐煤略高; 褐煤中的稳定组平均含量小于 5%, 且成煤时代越早含量越低, 如新近纪平均含量 5.91%, 古近纪平均 3.71%, 早白垩世平均含量为 2.03%^[1]。

对采自不同地区的 13 个煤样进行煤岩鉴定、工业分析及孔隙度测试, 结果见表 1。由表 1 可知, 13 个煤样实测的腐植组含量 26.16% ~ 84.77%, 平均 58.67%; 情质组含量 6.43% ~ 62.98%, 平均 33.73%; 稳定组含量 3.41% ~ 10.66%, 平均 7.51%。

表 1 煤岩鉴定、工业分析及孔隙度测试结果

编号	采样地点	$R_{o, max} / \%$	工业分析 / %				煤岩显微组分含量 / %			真密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	视密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	孔隙度 / %
			M_{ad}	A_d	V_{daf}	M_t	腐植组	情质组	稳定组			
1	珲春	0.33	11.46	5.60	34.81	—	26.16	62.98	9.86	1.50	1.35	10.00
2	珲春	0.40	13.60	7.19	38.05	—	72.61	16.72	10.67	1.60	1.32	17.50
3	海拉尔	0.24	25.24	9.02	49.71	50.85	40.02	50.21	9.77	1.42	1.18	16.90
4	海拉尔	0.26	22.17	11.82	44.16	48.62	30.82	58.84	10.34	1.57	1.22	22.29
5	海拉尔	0.33	9.64	5.08	34.01	23.17	26.16	63.98	9.86	1.52	1.34	11.84
6	海拉尔	0.42	8.20	6.48	43.61	36.80	84.77	8.43	6.80	1.39	1.04	25.18
7	海拉尔	0.42	11.65	8.13	41.42	29.12	82.53	14.06	3.41	1.41	0.96	31.91
8	海拉尔	0.42	15.66	9.41	42.62	21.67	65.88	28.89	5.23	1.38	1.10	20.29
9	吐哈	0.50	4.31	4.82	43.47	—	69.78	26.17	3.32	1.57	1.38	12.10
10	万全	0.41	12.06	12.11	33.41	12.92	43.55	52.42	4.03	1.48	1.32	10.63
11	伊犁	0.45	11.46	2.68	35.94	14.10	65.73	26.41	7.86	1.46	1.26	13.70
12	准噶尔	0.40	7.70	5.99	39.46	7.70	72.54	16.80	10.66	1.46	1.34	8.22
13	昭通	0.30	10.12	12.84	42.40	—	81.63	12.54	5.83	1.59	1.30	18.24

2.2 煤质分析

本次实测我国主要褐煤产地褐煤中的全水分含量介于 7.70% ~ 50.85%，平均为 27.22% (表 1)，随变质程度的增加而减少 (图 1a)。空气干燥基水分介于 4.31% ~ 25.24%，平均为 12.56%，亦随变质程度的增加而减少 (图 1b)。干燥基灰分一般为 20% ~ 30%，一些煤质较好的矿区如霍林

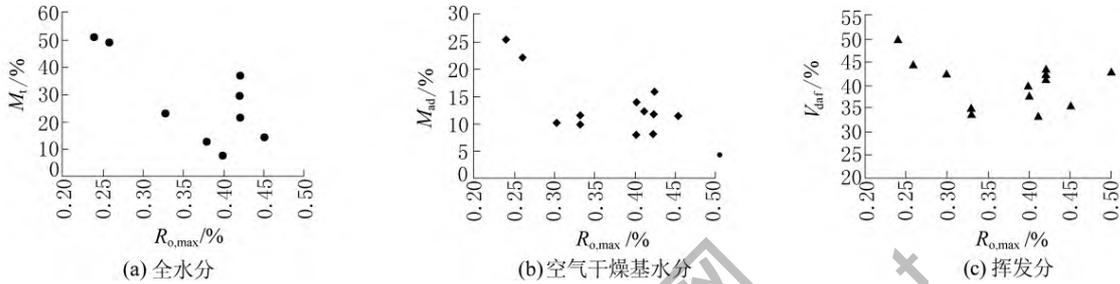


图1 $R_{o,max}$ 与 M_t 、 M_{ad} 、 V_{daf} 的关系

褐煤中的硫分 (干燥基全硫含量) 以东北地区为最低, 霍林河、伊敏、扎赉诺尔等地褐煤硫分一般为 0.2% ~ 0.7%; 广西、广东、海南等地的褐煤硫分多为 1.5% ~ 3.0%; 云南褐煤的硫分为 0.2% ~ 6.0%，甚至达 8.0% 以上, 云南玉溪多数煤层的硫分为 0.2% ~ 0.4%，而弥勒跨竹矿区硫分为 1.5% ~ 8.0%，差别较大^[8]。

褐煤属低热值 ~ 中低热值煤, 干燥基低位发热量 $Q_{net,d}$ 一般介于 16.73 ~ 25.09 MJ/kg, 收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$ 为 1.71 ~ 16.73 MJ/kg。其中, 早白垩世褐煤的热值较高, 古近纪、新近纪褐煤则相对较低^[5]。

3 褐煤物性特征

褐煤物性特征包括孔隙度、孔径结构、不同孔径段的孔容、比表面积及其对甲烷的吸附性等。孔径结构分布决定了褐煤吸附水和甲烷的能力, 也控制了水和甲烷在其中的扩散和流动, 是研究褐煤脱水及煤层气开发的基础。

1) 孔隙特征。采用比重瓶法实测煤的真密度、视密度, 计算得出褐煤的孔隙度介于 8.22% ~ 31.91%, 平均为 16.83% (表 1), 先随变质程度的增加而减少, 后随变质程度的增加而增大, 拐点约在 $R_{o,max} = 0.35\%$ 处 (图 2)。

2) 孔容特征。采用压汞法实测煤样总孔容, 测试结果差别较大, 介于 0.058 ~ 0.530 cm^3/g (表 2), 平均为 0.23 cm^3/g , 总体上大孔、中孔、过

河、伊敏、扎赉诺尔、平庄、小龙潭等矿区, 灰分为 10% ~ 20%, 云南的一些小型褐煤盆地, 灰分也有在 10% 以下的, 而煤质较差的舒兰、琿春、茂名、石鼓、长坡、长昌、五图等矿区的灰分则高达 30% ~ 50%^[5]。干燥无灰基挥发分为 33.41% ~ 49.71%, 平均为 40.24%, 也随变质程度的增加而减少 (图 1c)。

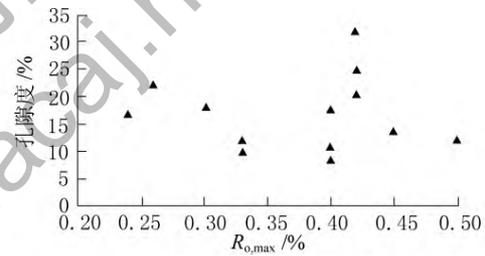


图2 $R_{o,max}$ 与孔隙度的关系

渡孔、微孔 (以 B. B. Ходот 十进制分类^[9]) 分布较均匀, 分别占 26.4%、22.4%、30.2%、20.9%, 有利于煤层气的开发。

3) 比表面积特征。实测煤样总比表面积差别较大, 介于 9.01 ~ 61.77 m^2/g (表 3), 平均为 25.93 m^2/g , 大孔、中孔、过渡孔、微孔分别占 1.31%、9.13%、55.96%、33.31%, 集中分布在过渡孔和微孔中。

4) 褐煤对甲烷的吸附性。褐煤对甲烷的等温吸附试验表明, 吸附曲线呈朗格缪尔方程形式, 低压时 ($< 1.3 \text{ MPa}$) 吸附量随压力增大呈线性增长, 后随压力增大吸附量增加缓慢, 逐渐趋于定值 (图 3), 其中, 温度 25 $^{\circ}\text{C}$, $R_{o,max} = 0.41\%$ 吸附量数据引自文献 [8], $R_{o,max} = 0.45\%$ 引自文献 [9], $R_{o,max} = 0.40\%$ 引自文献 [10]。实测朗格缪尔体积介于 1.13 ~ 13.62 m^3/t , 平均为 6.27 m^3/t ; 实测朗格缪尔压力介于 0.58 ~ 8.79 MPa, 平均为 3.46 MPa。总体上, 褐煤对甲烷的吸附能力低, 使煤储层含气量低, 不利于煤层气的开发。

表 2 煤样孔容特征

编号	孔容 / (10 ⁻⁴ cm ³ · g ⁻¹)					孔容百分比 / %			
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V _t	V ₁ /V _t	V ₂ /V _t	V ₃ /V _t	V ₄ /V _t
1	325	92	21	582	1 020	31.90	9.00	2.10	57.00
2	360	334	241	725	1 660	21.70	20.10	14.50	43.70
3	869	808	894	135	2 706	32.11	29.87	33.03	4.99
4	1 668	857	536	139	3 200	51.00	24.22	19.98	4.80
5	508	698	776	390	2 404	23.96	22.57	28.48	22.95
6	58	341	2 050	441	2 890	1.99	11.80	70.95	15.26
7	273	1 069	2 388	316	4 047	6.75	26.42	59.01	7.82
8	162	296	1 738	367	2 563	6.25	11.56	67.86	14.33
9	201	79	187	114	581	34.60	13.60	32.20	19.60
10	383	188	320	72	963	39.79	19.51	33.26	7.44
11	715	181	47	357	1 300	55.00	13.90	3.60	27.50
12	360	334	241	725	1 660	21.70	20.10	14.50	43.70
13	886	3 628	695	120	5 328	16.60	68.10	13.00	2.30

注：V₁、V₂、V₃、V₄分别指大孔（孔径大于1 000 nm）、中孔（孔径1 000~100 nm）、过渡孔（100~10 nm）、微孔（10~7.2 nm）的孔体积；V_t为总孔容。

表 3 煤样比表面积特征

编号	比表面积 / (m ² · g ⁻¹)					比表面积百分比 / %			
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S _t	S ₁ /S _t	S ₂ /S _t	S ₃ /S _t	S ₄ /S _t
1	0.078 0	5.372 0	8.781 0	5.651 0	19.882 0	0.40	27.00	44.20	28.40
2	0.071 5	2.741 3	16.325 1	7.451 2	26.589 1	0.27	10.31	61.40	28.02
3	0.010 3	0.763 9	39.961 0	21.031 7	61.766 9	0.02	1.24	64.70	34.05
4	0.218 6	1.043 4	7.967 4	6.560 2	15.789 6	1.50	7.14	49.41	41.95
5	0.897 2	2.314 6	17.635 1	9.324 5	30.171 4	2.97	7.67	58.45	30.91
6	0.015 5	0.562 2	36.200 2	17.127 0	53.904 9	0.03	1.04	67.16	31.77
7	0.332 6	1.544 3	6.748 1	5.107 6	13.732 6	2.42	11.25	49.14	37.19
8	0.027 9	0.537 1	36.015 8	17.396 7	53.977 5	0.05	1.00	66.72	32.23
9	0.007 6	0.125 0	3.593 8	5.287 3	9.013 7	0.10	1.40	39.90	58.70
10	0.018 0	0.351 6	5.494 9	3.493 7	9.358 2	0.19	3.76	58.72	37.33
11	0.562 1	1.684 2	7.365 1	4.368 5	13.979 9	4.02	12.05	52.68	31.25
12	0.354 1	2.315 6	8.965 1	3.021 4	14.656 2	2.42	15.80	61.17	20.62
13	0.374 5	3.265 1	7.652 4	2.941 6	14.233 6	2.63	22.94	53.76	20.67

注：S₁、S₂、S₃、S₄分别指大孔（孔径大于1 000 nm）、中孔（孔径1 000~100 nm）、过渡孔（100~10 nm）、微孔（10~7.2 nm）的比表面积；S_t为总比表面积。

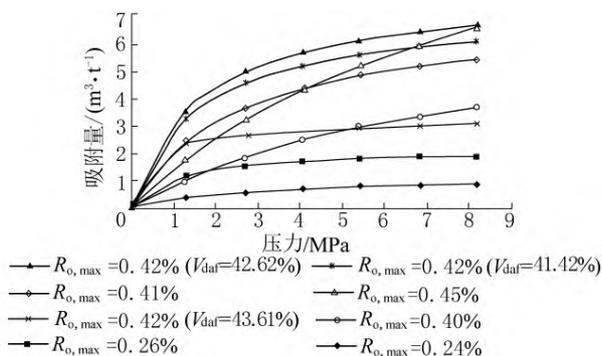


图 3 褐煤等温吸附曲线

4 结 论

我国褐煤以木质煤和碎屑煤为主，二者含量之

和大于 80%，褐煤中全水分、空气干燥基水分、挥发分随变质程度的增加而减少。当 $R_{o,max} < 0.35\%$ ，褐煤孔隙度随变质程度的增加而减少，当 $R_{o,max} > 0.35\%$ 随变质程度的增加而增大。褐煤中比表面积集中分布在过渡孔和微孔中，二者占 92.69%，孔容分布较均匀，实测煤样大孔、中孔、过渡孔、微孔孔容平均分别占 26.4%、22.4%、30.2%、20.9%，有利于煤层气的扩散与渗流。实测煤样中空气干燥基水分平均为 12.56%，对甲烷的最大饱和吸附量平均为 6.27 m³/t，说明褐煤吸附水能力强，吸附甲烷能力较弱。

(下转第 112 页)

- tion of Victorian Brown Coal with Steam: Enhancement of Hydrogen Production [J]. *Fuel*, 2006, 85 (2): 127-133.
- [8] 朱廷钰, 王洋. 氧化铁与碳酸钾对煤温和气化的影响 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2000, 16 (2): 203-208.
- [9] 公旭中, 郭占成, 王志. Fe_2O_3 对高变质程度脱灰煤热解反应性与半焦结构的影响 [J]. *化工学报*, 2009, 60 (9): 2321-2326.
- [10] Chareonpanich M, Zhang Z G, Nishijima A, *et al.* Effect of Catalysts on Yields of Monocyclic Aromatic Hydrocarbons in Hydrocracking of Coal Volatile Matter [J]. *Fuel*, 1995, 74 (11): 1636-1640.
- [11] 白金锋, 王勇, 胡浩权, 等. 原位担载 Fe_2S_3 催化剂煤的热解动力学研究 [J]. *燃料化学学报*, 2001, 29 (1): 39-43.
- [12] 王美君, 何秀风, 陈小利, 等. 铁基矿物质对西部弱还原性煤热解特性的影响 [C] // 第五届全国环境化学大会摘要集. 北京: 中国化学会, 2009.
- [13] Sato S, Morita M, Hashimoto T, *et al.* Activity Enhancement of Iron Ores as a Catalyst for Direct Coal Liquefaction [J]. *Fuel*, 1989, 68 (5): 622-625.
- [14] 杜淑凤, 舒歌平, 陈绍毅. 依兰煤液化过程中天然矿物催化剂影响的研究 [J]. *洁净煤技术*, 2000, 6 (2): 32-34.
- [15] Chen H, Li B, Zhang B. Effects of Mineral Matter on Products and Sulfur Distributions in Hydrolysis [J]. *Fuel*, 1999, 78 (6): 713-719.
- [16] Hayashi J-I, Takahashi H, Iwatsuki M, *et al.* Rapid Conversion of Tar and Char from Pyrolysis of a Brown Coal by Reactions with Steam in a Drop-tube Reactor [J]. *Fuel*, 2000, 79 (3/4): 439-447.
- [17] Quyn D M, Wu H, Li C Z. Volatilisation and Catalytic Effects of Alkali and Alkaline Earth Metallic Species During the Pyrolysis and Gasification of Victorian Brown Coal, Part I: Volatilisation of Na and Cl from a Set of NaCl-loaded Samples [J]. *Fuel*, 2002, 81 (2): 143-149.
- [18] Tomko V, Shevkopyas V. Pyrolysis of Coals from the Pavlograd Field and the Effect of Inorganic Alkalis and Acids on It [J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 1996, 27 (3): 208.
- [19] 贾永斌, 黄戒介, 程中虎, 等. 煤快速热解过程中氧化钙对焦油裂解的影响 [J]. *煤炭转化*, 2001, 24 (2): 53-57.
- [20] Ellig D L, Lai C K, Mead D W, *et al.* Pyrolysis of Volatile Aromatic Hydrocarbons and N-heptane over Calcium Oxide and Quartz [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1985 (24): 1080-1087.
- [21] Simell P A, Leppälähti J K. Catalytic Purification of Tarry Fuel Gas with Carbonate Rocks and Ferrous Materials [J]. *Fuel*, 1992, 71 (2): 211-218.
- [22] Xu W C, Tomita A. The Effects of Temperature and Residence Time on the Secondary Reactions of Volatiles from Coal Pyrolysis [J]. *Fuel Processing Technology*, 1989, 21 (1): 25-37.
- [23] 赵国靖, 豆斌林. 高温煤气中焦油组分的催化裂解 [J]. *煤气与热力*, 2001, 21 (1): 3-6.
- [24] Velegol D, Gautam M, Shamsi A. Catalytic Cracking of a Coal Tar in a Fluid Bed Reactor [J]. *Powder Technology*, 1997, 93 (1): 93-100.
- [25] Chareonpanich M, Boonfueng T, Limtrakul J. Production of Aromatic Hydrocarbons from Mae-Moh lignite [J]. *Fuel Processing Technology*, 2002, 79 (2): 171-179.
- [26] Takarada T, Tonishi T, Fusegawa Y, *et al.* Hydrolysis of Coal in a Powder-Particle Fluidized Bed [J]. *Fuel*, 1993, 72 (7): 921-926.
- [27] Rada de Malherbe, Steve J Doswell. Synthetic Fuels from Coal [J]. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1983, 5 (1): 33-77.
- [28] 李文, 王娜, 李保庆. 寻甸褐煤的催化多段加氢热解过程 [J]. *化工学报*, 2003, 54 (1): 52-57.
- [29] Zhu T, Zhang S, Huang J, *et al.* Effect of Calcium Oxide on Pyrolysis of Coal in a Fluidized Bed [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 64 (1/3): 271-284.
- [30] 邹献武. 提高焦油品质的煤催化热解研究 [D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2007.

(上接第107页)

参考文献:

- [1] 韩德馨. 中国煤岩学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [2] 毛节华, 许惠龙. 中国煤炭资源预测与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 陈鹏. 中国煤炭性质分类和利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [4] 陈家良, 邵震杰, 秦勇. 能源地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [5] 袁三畏. 中国煤质评论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [6] GB/T 5751—2009, 中国煤炭分类 [S].
- [7] 尹立群. 我国褐煤资源及其利用前景 [J]. *煤炭科学技术*, 2004, 32 (8): 12-14, 23.
- [8] 屈进州, 陶秀祥, 刘金艳, 等. 褐煤提质技术研究进展 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39 (11): 121-125.
- [9] Ходог В В. 煤与瓦斯突出 [M]. 宋世钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966: 27-30.
- [10] 傅小康. 中国西部低阶煤储层特征及其勘探潜力分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [11] 傅雪海, 焦宗福, 秦勇, 等. 低煤级煤平衡水条件下吸附实验 [J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2005, 24 (2): 161-164.
- [12] 谢勇强. 低阶煤煤层气吸附与解吸机理实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006.