

煤炭加工

中孔煤基磁性活性炭的制备及性能表征

姜勇^{1,2},张庆伟²,王胜¹,解强²,王新乐¹,姚鑫²

(1. 中海油能源发展股份有限公司 安全环保分公司,天津 300451;2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要:为提高活性炭的回收性能,以褐煤为原料,Fe₃O₄为赋磁剂,采用一步法制备了中孔煤基磁性活性炭,并通过低温氮气吸附、X射线衍射光谱(XRD)和振动样品磁强计(VSM)对磁性活性炭的比表面积、孔隙结构、赋磁剂晶型、磁性能进行表征,研究了炭化和活化条件对磁性活性炭性能的影响。结果表明,Fe₃O₄不仅能催化炭烧蚀,而且能赋予活性炭磁性,最终以生成的FeO、 γ -Fe₂O₃和未反应的Fe₃O₄形式分散在磁性活性炭内。在Fe₃O₄添加量6%,炭化温度650℃,炭化60 min,活化温度930℃,活化时间120 min,水蒸气流量0.77 g/(g·h)的优化工艺条件下,煤基磁性中孔活性炭的比表面积达到370 m²/g,中孔率达到55.7%,比饱和磁化强度1.36 emu/g,剩磁0.46 emu/g,矫顽力643.17 Oe,比磁化率7.19×10⁻⁶ m³/kg。该煤基磁性活性炭属弱磁性矿物类,可采用强磁选机进行磁选回收。

关键词:煤基活性炭;磁性;褐煤;中孔活性炭

中图分类号:TQ424;TD849 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)03-0001-05

Preparation and characterization of magnetic mesopores activated carbon from lignite

JIANG Yong^{1,2}, ZHANG Qingwei², WANG Sheng¹, XIE Qiang², WANG Xinle¹, YAO Xin²

(1. Safety and Environmental Protection Co., Ltd., China National Offshore Oil Corporation, Tianjin 300451, China;

2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve adsorptive property of activated coke, a magnetic activated carbon with developed mesopores was prepared by one-step method taking lignite as raw material, Fe₃O₄ as magnetic reagent. The specific surface area, pore structure of activated coke and the crystal type, properties of magnetic reagent were characterized by low temperature nitrogen adsorption, X-ray diffraction and vibrating sample magnetometer. The effects of carbonization and activation conditions were researched. The results showed that the Fe₃O₄ in magnetic activated carbon which was able to catalyze ablation of carbon and magnetize activated carbon, existed in the forms of FeO, γ -Fe₂O₃ and unreacted Fe₃O₄. The optimized technical parameter was that the carbonization and the following activation of magnetic activated carbon with 6% Fe₃O₄ were carried out at 650℃ for 60 minutes and 930℃ for 120 minutes respectively. The activation vapour flow was 0.77 g/(g·h) based on the weight of carbonized material. The specific surface area of magnetic activated carbon at the optimized conditions was 370 m²/g, the ratio of mesopore volume was 55.7%, the saturation magnetization was 1.36 emu/g, the remanence was 0.46 emu/g, the coercivity was 643.17 Oe and the specific susceptibility was 7.19×10⁻⁶ m³/kg respectively. The magnetic activated carbon was weak magnetic mineral, and it could be recovered by high intensity magnetic separator.

Key words: coal-based activated carbon; magnetism; lignite; mesopore activated carbon

收稿日期:2015-03-10;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.03.001

基金项目:中海油能源发展股份有限公司资助科研项目(HFXMLZ-CY201303)

作者简介:姜勇(1981—),男,黑龙江海伦人,讲师,博士,从事油田水处理、碳材料及煤基灰渣的研究工作。E-mail:jiangyong13@cnooc.com.cn

引用格式:姜勇,张庆伟,王胜,等.中孔煤基磁性活性炭的制备及性能表征[J].洁净煤技术,2015,21(3):1-5,10.

JIANG Yong, ZHANG Qingwei, WANG Sheng, et al. Preparation and characterization of magnetic mesopores activated carbon from lignite[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 1-5, 10.

0 引言

活性炭是一种多孔炭材料,其物理化学性质稳定,具有耐高温、耐酸碱、导电、传热等优点,在气体和液体的精制、分离以及水处理和空气净化等领域广泛应用^[1-4]。活性炭赋磁可作为催化剂的载体、药物的靶向载体,并有助于解决粉末状活性炭回收难题^[5-8],为活性炭提供更广阔的应用空间。王崇琳^[9]将商品活性炭浸渍在含铁、钴、镍盐的溶液中,然后在草酸铵溶液中浸渍,最后在600~1200℃下通入H₂、N₂进行磁化处理,制备了具有磁性的活性炭。刘守新等^[10]以顺磁性材料为磁核,以椰壳活性炭为载体,通过吸附制备出磁性活性炭。张巧丽等^[11-12]利用商品活性炭与磁性材料采用混合或浸渍工艺制备磁性活性炭材料。Gorria等^[13]将浸渍有镍盐和蔗糖混和液的商品活性炭在600℃下进行热处理,在活性炭孔隙体系内形成具有磁性的8~15 nm镍纳米颗粒。传统磁性活性炭制备技术工艺复杂、成本高,制备的磁性活性炭吸附性能较前驱体大大降低;受活性炭载体的限制,磁性活性炭的比表面积和孔隙结构不可调。中孔发达的磁性活性炭在化工、环保和催化领域具有重要作用,如液相中难生物降解大分子有机污染物的去除以及药物的靶向载

体^[14-17]等,但关于磁性中孔活性炭的制备却很少,解强教授^[8,18]创新性地提出“一步法”制备磁性活性炭,即在活性炭制备原料中添加赋磁剂,经炭化、活化一步实现活性炭的制备与赋磁。笔者以宝日希勒褐煤为原料,通过添加赋磁剂Fe₃O₄,制备了中孔发达的煤基磁性活性炭,研究炭化温度、炭化时间、活化温度、活化时间和水蒸气流量等对活性炭性能的影响,优化制备工艺条件,并对其性能进行表征,分析赋磁剂Fe₃O₄的作用和转化机理,解释Fe₃O₄在活性炭制备过程中的作用和磁性的来源。

1 试验条件

1.1 试验原料

选取宝日希勒褐煤为原料,褐煤煤质分析见表1。使用前煤样全部过0.149 mm标准筛,90%过0.074 mm标准筛。分析纯Fe₃O₄作为赋磁添加剂,使用前研磨100%过0.044 mm标准筛。

1.2 试验仪器

天津中环实验电炉有限公司SK2-2-10型管式电阻炉(配CKW-2200型温控仪),美国Quanta-Chrom公司的NOVA-1200型低温氮气吸附仪,日本理学公司的D/MAX-RB型X射线衍射仪,美国Lakeshore公司的VSM-7307振动样品磁强仪。

表1 宝日希勒褐煤煤质分析

工业分析/%				元素分析/%				
<i>M</i> _{ad}	<i>A</i> _d	<i>V</i> _{daf}	<i>FC</i> _{daf}	<i>w</i> (C _d)	<i>w</i> (H _d)	<i>w</i> (N _d)	<i>w</i> (O _d)	<i>w</i> (S _{t,d})
27.26	7.82	48.78	51.22	66.67	3.59	0.79	18.72	0.44

1.3 磁性活性炭的制备

按照100 g煤、45 g煤焦油和15 g水的比例混合原料,同时添加一定比例的赋磁剂Fe₃O₄。混匀后的原料采用压料机压制料条(φ=3.5 mm),风干备用。

磁性活性炭制备装置如图1所示。将60 g风干后剪至1cm左右的料条装入不锈钢试验管中,在试验管两端装入陶瓷环保护,连接试验装置,检查气密性,然后程序升温,升温速率为5℃/min,在N₂保护的条件下,进行水蒸气活化。

未添加Fe₃O₄的参比活性炭命名为MAC-0,添加2%、4%、6%和8% Fe₃O₄的磁性活性炭样品分别命名为MAC-2、MAC-4、MAC-6和MAC-8。

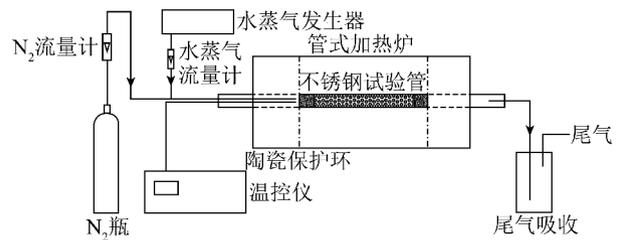


图1 磁性活性炭制备装置

1.4 磁性活性炭的表征

样品比表面积采用低温氮气吸附测定,采用BET法计算比表面积,BJH法计算中孔分布,HK法计算微孔分布;X射线衍射测定样品的晶体结构。活性炭的碘值反映活性炭微孔发育情况,亚甲基蓝值反映中孔发达程度,是活性炭吸附性能评价的2个重要指标。活性炭的碘值和亚甲基蓝值测定方法参考

GB/T 7702.7—2008《煤质颗粒活性炭试验方法:碘吸附值的测定》和 GB/T 7702.6—2008《煤质颗粒活性炭试验方法:亚甲蓝吸附值的测定》。

2 结果与讨论

2.1 磁性活性炭制备工艺优化

固定赋磁剂 Fe_3O_4 添加量为 6%, 研究炭化温度、炭化时间、活化温度、活化时间以及水蒸气流量对磁性活性炭吸附性能的影响。活性炭的烧失率可从侧面反映活性炭孔的发育情况。通常情况下, 烧失率 <50%、50%~75% 和 >75% 时, 制备的活性炭孔隙类型分别为微孔、混合结构(微孔、中孔和大孔兼备)和大孔结构^[3]。试验选用活性炭的烧失率、碘值和亚甲蓝值作为活化优劣的评价指标。

2.1.1 炭化温度优化

炭化温度优化试验见表 2。由表 2 可知, 650 °C 时炭化得率为 56.88%, 明显低于 600 °C 的 61.63%, 说明料条中大部分挥发分已逸出, 且在炭化料中留下大的孔道, 这些孔道有利于活化剂向炭化料内部扩散, 因此, 确定优化炭化温度为 650 °C。

表 2 炭化温度优化试验

炭化温度/°C	原料条质量/g	炭化料质量/g	炭化得率/%	烧失率/%
600	36.98	25.86	61.63	30.07
650	34.22	21.84	56.88	36.18

2.1.2 炭化时间优化

炭化时间过短, 炭化物中挥发分逸出不充分, 不利于水蒸气向炭化料内部扩散; 炭化时间过长, 会使炭化料过度炭化, 活性炭活化困难, 甚至不能活化^[19]。炭化时间优化试验见表 3。由表 3 可知, 炭化时间对炭化得率影响不大, 炭化时间 45、60 min 时, 烧失率分别为 30.07% 和 41.82%, 烧失率高有利于炭材料活化。因此, 炭化时间 60 min 时更有利于褐煤基磁性活性炭的制备。

表 3 炭化时间优化

炭化时间/min	炭化料质量/g	活性炭质量/g	炭化得率/%	烧失率/%
45	36.98	25.86	61.63	30.07
60	36.84	21.43	61.40	41.82

2.1.3 活化温度优化

活化温度对活性炭性能的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 活化温度越高, 制备活性炭的碘值和亚甲蓝值越大。炭-水活化反应以化学反应为主, 活化温度较低时, 炭化料内部和表面水蒸气的浓度基本相同, 活化反应稳定进行, 有利于在炭化料内部生成均匀微孔结构。当活化温度从 880 °C 提高到 930 °C, 活性炭碘值和亚甲蓝值增加较多, 分别为 692 和 163 mg/g, 此时烧失率为 54.8%, 说明制备的磁性活性炭孔隙为混合型结构, 微孔和中孔较为发达, 因此, 优化的活化温度为 930 °C。

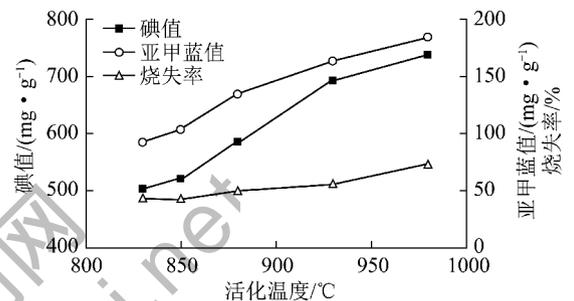


图 2 活化温度对活性炭性能的影响

2.1.4 活化时间优化

活化时间对活性炭性能的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 随着活化时间延长, 活性炭的碘值和亚甲蓝值先增加后减少, 烧失率逐渐增大, 主要是由于炭-水活化反应不断刻蚀炭化料孔壁, 使孔壁变薄, 部分孔隙结构遭到破坏, 甚至烧塌, 造成活性炭比表面积下降。活化时间为 120 min 时, 烧失率为 54.8%, 碘值和亚甲蓝值达到最大, 分别为 692 和 163 mg/g, 因此, 优化的活化时间为 120 min。

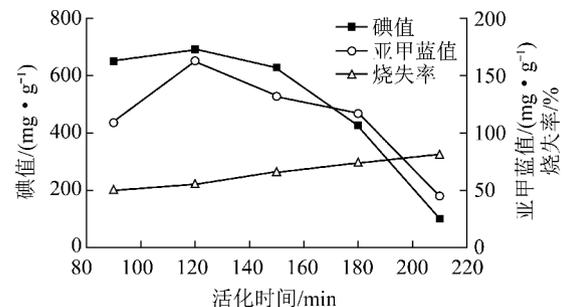


图 3 活化时间对活性炭性能的影响

2.1.5 水蒸气流量优化

水蒸气流量对活性炭性能的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 随着水蒸气流量的增加, 褐煤基磁性活性炭的碘值和亚甲蓝值先升高后降低, 烧失率逐渐增大。水蒸气流速过快, 则不能与炭化料充分反应即流过反应活化区, 活化效率低; 而水蒸气流速

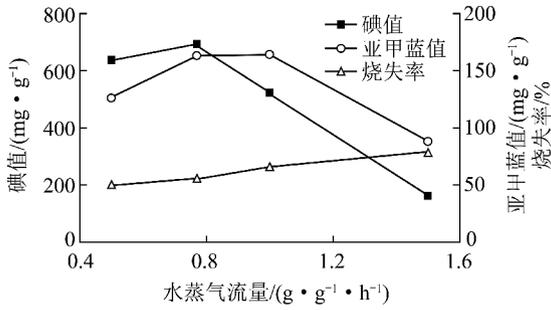


图4 水蒸气流量对活性炭性能的影响

过慢,活化时间长,能耗高,活化反应易集中在表面,造成表面过度活化^[19]。水蒸气流量为0.77 g/(g·h)(g为炭化料质量,下同)时,碘值和亚甲基蓝值最大达到692和163 mg/g,因此,最佳水蒸气流量为0.77 g/(g·h)。因此,确定褐煤基磁性活性炭载体制备工艺优化参数为: N₂ 流量 100 mL/min,炭化温度 650 ℃,炭化时间 60 min;活化温度 930 ℃,活化时间 120 min,水蒸气流量 0.77 g/(g·h)。

2.2 磁性活性炭的表征试验

在优化的炭化和活化条件下,考察 Fe₃O₄ 添加量对磁性活性炭孔隙结构、炭微晶结构、氧化铁晶型及磁性能的影响。

2.2.1 比表面积分析

褐煤基磁性活性炭的低温氮气吸脱附等温线如图5所示。Fe₃O₄ 添加量对活性炭比表面积和孔隙结构的影响见表4。

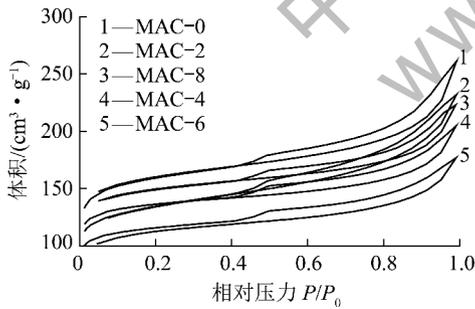


图5 低温氮气吸脱附等温线

表4 Fe₃O₄ 添加量对活性炭比表面积和孔隙结构的影响

样品	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	微孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	中孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	中孔 率/%
MAC-0	525	0.383	0.206	0.177	46.2
MAC-2	434	0.344	0.157	0.187	54.4
MAC-4	436	0.302	0.186	0.116	38.4
MAC-6	370	0.262	0.146	0.116	55.7
MAC-8	488	0.335	0.200	0.135	40.3

注:中孔容=总孔容-微孔容。

由图5可知,制备磁性活性炭的吸脱附等温线具有滞后环和翘尾特征(相对压力 P/P₀ 靠近 1 时),说明磁性活性炭具有中孔和大孔结构,属于 II 型吸附等温线。由图5、表4可知,添加赋磁剂 Fe₃O₄ 后,吸脱附等温线下移,比表面积、总孔容和微孔容变小。通过热重分析^[20]可知,炭化温度低于 500 ℃时,Fe₃O₄ 抑制挥发分逸出,缩小水蒸气向炭化料内部的扩散通道,阻碍炭-水活化反应,导致活性炭比表面积、总孔容和微孔容减小。磁性活性炭(添加 Fe₃O₄)的比表面积、总孔容和微孔容均小于参比活性炭(未添加 Fe₃O₄),说明 Fe₃O₄ 对褐煤造孔也有一定程度的抑制作用。Fe₃O₄ 添加量为 6% 时,制备活性炭的中孔率最大达到 55.7%,适宜制备中孔煤基活性炭。

2.2.2 XRD 分析

磁性活性炭 XRD 分析如图6所示。由图6可知,制备的活性炭具有石墨 d(002)和 d(110)2 个特征峰。随着 Fe₃O₄ 添加量增大,d(002)峰和 d(100)峰强度变小,峰形变宽,说明炭微晶结构层片排列不规则,趋于乱层化,且定向性变差^[19]。根据文献^[21]公式计算炭化料的微晶尺寸,结果见表5。

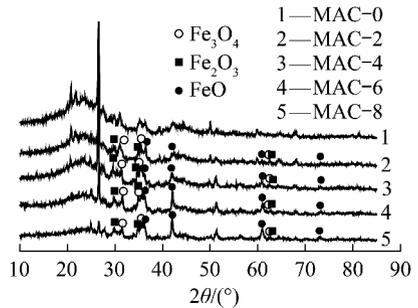


图6 磁性活性炭 XRD 分析

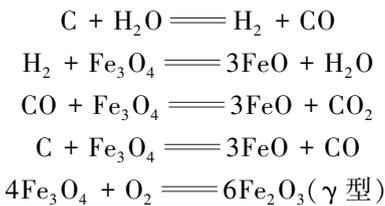
表5 炭化料的微晶结构参数

样品	石墨微晶参数/nm		
	层间距 d(002)	微晶层面 直径 La	微晶层片堆 积高度 Lc
MAC-0	0.3849	4.9910	1.1184
MAC-2	0.3844	7.2138	1.0812
MAC-4	0.3867	5.3253	1.1664
MAC-6	0.3885	5.8258	1.1416
MAC-8	0.3821	6.9873	1.1035

由表5可知,添加 Fe₃O₄ 会使炭微晶层面直径增加幅度较大,相邻两炭层间距变化较小,层片高度变化较小。这主要是由于在原料混捏和压制过程

中,Fe₃O₄ 颗粒不能进入到炭层中间(煤粉粒径为 75 μm,Fe₃O₄ 粒径为 46 μm),而在炭化和活化过程中,Fe₃O₄ 能够促进炭-水反应,加速缩合反应,使炭微晶层面直径增大,而此过程中产生的 Fe₃O₄ 还原产物亦不能进入炭层中,使相邻炭层间距和层片堆积高度变化不大。

从图 6 中还可以识别出物相 Fe₃O₄、FeO 和 γ-Fe₂O₃,说明在炭化和活化过程中,部分 Fe₃O₄ 被还原为 FeO 和 γ-Fe₂O₃。可以推断赋磁剂 Fe₃O₄ 在炭化和活化过程中,主要发生以下反应^[21]



根据 XRD 定量分析结果,计算 Fe₃O₄、γ-Fe₂O₃ 和 FeO 在磁性活性炭中的比例见表 6。由表 6 可知,随着 Fe₃O₄ 添加量的增加,料条中 Fe₃O₄ 含量增大,与碳直接接触的 Fe₃O₄ 增多,Fe₃O₄ 转化率增大,γ-Fe₂O₃ 和 FeO 的生成量逐渐增大。Fe₃O₄ 添加量为 6% 时,Fe₃O₄ 转化率达到最大,为 88.5%,继续增大 Fe₃O₄ 添加量,Fe₃O₄ 在褐煤中的分散性受到限制,Fe₃O₄ 转化率变小。

表 6 Fe₃O₄ 转化比例

样品	Fe ₃ O ₄ 转化率/%		
	未反应的 Fe ₃ O ₄	生成的 γ-Fe ₂ O ₃	生成的 FeO
MAC-2	39.6	42.5	17.9
MAC-4	24.4	59.7	15.9
MAC-6	11.5	68.9	19.6
MAC-8	17.1	58.6	24.3

2.2.3 磁性能分析

通过磁滞回线可计算磁性材料的饱和磁化强度、剩磁和矫顽力等指标。剩磁能够反映材料提供永磁体磁感应强度的能力;矫顽力是划分软、硬磁的主要依据。褐煤基磁性活性炭的磁滞回线如图 7 所示,磁性指标分析见表 7。

由图 7、表 7 可知,磁性活性炭表现出明显的磁性,其矫顽力大于 125 Oe,属于硬磁材料^[22],而 MAC-0 的少量磁性是由于原料煤中含有少量铁磁性杂质所致。随着 Fe₃O₄ 添加量的增加,剩磁增大,Fe₃O₄ 添加量为 4% 时,磁性活性炭的比饱和磁

化强度达到最大 2.17 emu/g。Fe₃O₄ 添加量为 6% 时,制备活性炭的中孔率最大达到 55.7%,比饱和磁化强度为 1.36 emu/g,剩磁 0.46 emu/g,矫顽力 643.17 Oe,比磁化率 7.19×10⁻⁶ m³/kg。在磁选矿学领域,比磁化率为 12.6×10⁻⁸ ~ 7.5×10⁻⁶ m³/kg 时属于弱磁性矿物类型^[22],说明制备的磁性活性炭属于弱磁性矿物,可采用强磁场磁选机回收。此外,制备的磁性活性炭剩磁较小,易在介质中分散、不易聚集。

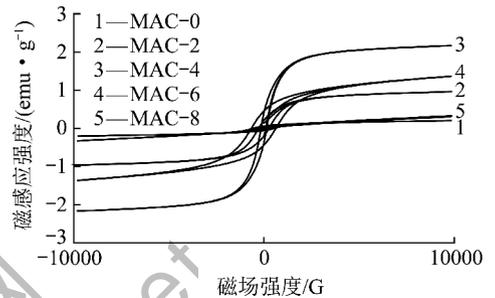


图 7 磁性活性炭的磁滞回线

表 7 磁性活性炭的磁性能参数

样品	矫顽力/Oe	剩磁/(emu·g ⁻¹)	比饱和磁化强度/(emu·g ⁻¹)	比磁化率/(m ³ ·kg ⁻¹)
MAC-0	571.81	0.06	0.20	9.48×10 ⁻⁷
MAC-2	272.52	0.21	0.96	5.72×10 ⁻⁶
MAC-4	145.75	0.39	2.17	1.41×10 ⁻⁵
MAC-6	643.17	0.46	1.36	7.19×10 ⁻⁶
MAC-8	232.49	0.72	0.33	8.41×10 ⁻⁷

注:比磁化率在磁场强度 1500 Oe 下测定。

3 结 论

1) 褐煤基磁性活性炭载体一步制备的优化参数为:650 ℃炭化 60 min;930 ℃活化 120 min,水蒸气流量 0.77 g/(g·h),N₂ 流量 100 mL/min。

2) Fe₃O₄ 在磁性活性炭制备过程中具有催化造孔和赋磁双重作用,Fe₃O₄ 在炭化和活化过程中部分转化为 γ-Fe₂O₃ 和 FeO,优化的 Fe₃O₄ 添加量为 6%。

3) 制备的煤基磁性中孔活性炭的比表面积达到 370 m²/g,碘值和亚甲蓝值达到 692 和 163 mg/g,中孔率达到 55.7%。

4) 制备的磁性活性炭属于弱磁性矿物,比饱和磁化强度为 1.36 emu/g,剩磁 0.46 emu/g,矫顽力 643.17 Oe,比磁化率 7.19×10⁻⁶ m³/kg,可采用强磁选机磁选回收。

(下转第 10 页)

的烟煤阶段,形成以贫煤—贫瘦煤—瘦煤组成的带状变质带^[10],进入新生代煤变质程度已结束。

4 结 语

石林勘探区二₁煤层为全区可采煤层。二₁煤在深成变质作用的基础上叠加了区域岩浆热变质作用,根据煤的化学性质、工艺性质、显微煤岩组分特征,依据国家和行业标准对二₁煤煤质进行全面分析。二₁煤贫煤、瘦煤属低灰煤,贫瘦煤属中灰煤。各煤类均属特低硫、高发热量、极易磨煤。贫煤属无黏结、中等软化温度和中等流动温度灰;贫瘦煤属微黏结,瘦煤属弱黏结,两者均属较高软化温度和较高流动温度灰。贫瘦煤、瘦煤可作工业炼焦配煤^[11],贫煤符合发电煤粉锅炉用煤和高炉喷吹用煤技术条件^[12-13]。

参考文献:

- [1] 郭熙年,唐仲林,李万程,等.河南省晚古生代聚煤规律[M].北京:中国地质大学出版社,1991:249-250.
- [2] 杨永宽.中国煤岩学图鉴[M].北京:中国矿业大学出版社,1996:5-6.
- [3] 李英华.煤质分析应用技术指南[M].北京:中国标准出版社,2006:119-120.
- [4] 刘天新,张敬运,张自劬.煤炭检测新方法 with 动力配煤[M].北京:中国物资出版社,1992:74-75.
- [5] 杨金和,陈文敏,段云龙.煤炭化验手册[M].北京:煤炭工业出版社,2004:708-709.
- [6] 陈亚飞,姜英,陈文敏.煤炭化验结果的审核与计算[M].北京:煤炭工业出版社,2003:116-117.
- [7] 陈鹏.中国煤炭性质、分类和利用[M].北京:化学工业出版社,2004:166-168.
- [8] 杨起.华北石炭二叠纪煤变质特征与地质因素探讨[M].北京:地质出版社,1988:53-77.
- [9] 韩德馨,杨起.中国煤田地质学[M].北京:煤炭工业出版社,1980:398-399.
- [10] 李元建,范云霞,刘素青,等.河南石炭二叠系煤层煤质特征与综合利用研究分析[J].洁净煤技术,2010,16(6):55-56.
- [11] 袁三畏.中国煤质论评[M].北京:煤炭工业出版社,1999:212-213.
- [12] 陈亚飞.煤质评价与煤质标准化[J].煤质技术,2006(1):12-15.
- [13] 周尽晖,丁玲.炼焦煤质量评价与问题分析[J].洁净煤技术,2014,20(4):61-64.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 熊银伍.中国煤基活性炭生产设备现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2014,20(3):39-42.
- [2] 裴卫兵,邢宝林,黄光许,等.预炭化时间对煤基活性炭孔结构

- 及电化学性能的影响[J].洁净煤技术,2013,19(3):42-45.
- [3] 李昌贤,秦廷武.煤质活性炭[M].北京:煤炭工业出版社,1993:118-136.
- [4] 沈曾民,张文辉,张学军.活性炭材料的制备与应用[M].北京:化学工业出版社,2006:100-120.
- [5] 崔兆玉,刘守新,张世润.磁性活性炭的一种制备方法[J].林产化工通讯,2002,36(4):9-10.
- [6] 朱文红.椰壳磁性活性炭合成研究[J].辽宁高职学报,2000,2(5):45-48.
- [7] 单国彬,张冠东,田青,等.磁性活性炭的制备与表征[J].过程工程学报,2004,4(2):141-145.
- [8] 邢雯雯,周铁桥,张军,等.煤基磁性活性炭的制备[J].北京科技大学学报,2008,31(1):83-87.
- [9] 王崇琳.一种磁性活性炭的制备工艺:中国,CN1026215C[P].1994-10-19.
- [10] 刘守新,孙承林.磁性椰壳活性炭的合成研究[J].新型炭材料,2002,17(1):45-48.
- [11] 张巧丽,陈旭,袁彪.活性炭磁性氧化铁复合材料制备及吸附性能[J].化学工业与工程,2004,21(6):673-676.
- [12] 张巧丽,陈旭,袁彪.磁性氧化铁/活性炭复合吸附剂的制备及性能[J].天津大学学报,2005,38(4):361-364.
- [13] Gorria P, Sevilla M, Blanco J A, et al. Synthesis of magnetically separable adsorbents through the incorporation of protected nickel nanoparticles in an activated carbon[J]. Carbon,2006,44(10):1954-1957.
- [14] Ao Yanhui, Xu Jingjing, Fu Degang, et al. A novel magnetically separable composite photocatalyst: titania-coated magnetic activated carbon[J]. Separation and Purification Technology,2008,61(3):436-441.
- [15] Ao Yanhui, Xu Jingjing, Fu Degang, et al. Photocatalytic degradation of X-3B by titania-coated magnetic activated carbon under UV and visible irradiation[J]. Journal of Alloys and Compounds,2009,471(1/2):33-38.
- [16] 马根智,曹宏明,黄广建,等.铁炭复合磁靶向缓释药物载体材料的制备:制备条件对铁炭复合材料磁性能的影响[J].功能材料,2004,35(4):324-326.
- [17] Rudge S R, Kurtz T L, Vessely C R, et al. Preparation, characterization, and performance of magnetic iron-carbon composite microparticles for chemotherapy[J]. Biomaterials,2000,21(14):1411-1420.
- [18] 张军,刘娟,杨明顺,等.添加Fe₃O₄对煤基活性炭孔结构的影响[J].煤炭科学技术,2010,38(6):118-121.
- [19] 解强,边炳鑫.煤的炭化过程控制理论及其在煤基活性炭制备中的应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002:6-22.
- [20] 姜勇.纳米TiO₂/磁性活性炭光催化剂制备与性能研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2011:49-69.
- [21] 牛耀岚,马承恩,李登新,等.KOH活化废弃麻制备活性炭及其结构表征[J].高等学校化学学报,2010,31(10):1929-1933.
- [22] 刘树贻.磁电选矿学[M].长沙:中南工业大学出版社,1994:31-59.