

新疆煤制饮用水处理用活性炭工艺及应用

陆晓东,雷清平,王福平,刘昆仑

(神华新疆能源有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830027)

摘要:新疆煤炭储量大,煤炭资源丰富,煤种多样化且具有灰分低、活性高等特性,是制备水处理用煤基活性炭的优质原料。以新疆主要矿区原煤为原料,采用配煤压块工艺制备活性炭,考察预氧化、炭化、活化等工艺条件及催化剂对活性炭性能的影响,优化饮用水处理用活性炭制备的工艺及主要参数,并表征了活性炭对 TOC、COD_{Mn} 和 UV₂₅₄ 的吸附能力。结果表明,灰分<5%、挥发分 35% 左右、水分 3%~6% 的新疆哈密煤、新疆宽沟按 60:40 的比例配煤,添加含钾化合物催化剂,在 250℃ 氧化 180~200 min、530~560℃ 炭化 150~180 min、920~940℃ 活化,可制备出碘吸附值 1 200~1 320 mg/g、亚甲蓝吸附值 280~290 mg/g、平均强度 95%、装填密度 470~485 g/L 的高效水处理活性炭,基于新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中 TOC、COD、UV₂₅₄ 的去除率分别为 38%、42%、67%,表明新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中有机物的吸附性能优于美国卡尔岗公司生产的 F-400。

关键词:新疆煤;水处理用活性炭;配煤;预氧化;催化

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0145-07

Preparation technology and performance of activated carbon for drinking water treatment from Xinjiang coal

LU Xiaodong, LEI Qingping, WANG Fuping, LIU Kunlun

(Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830027, China)

Abstract: Xinjiang has large coal reserves, abundant coal resources, diversified coal types, low ash content and high activity. It is a high-quality raw material for preparing coal-based activated carbon for water treatment. Activated carbon was prepared from raw coal of main mining areas in Xinjiang by coal blending and pressing process. The effects of pre-oxidation, carbonization and activation conditions and catalysts on the performance of activated carbon were investigated. The preparation process and main parameters of activated carbon for drinking water treatment were optimized. The adsorption energy of activated carbon on TOC, COD_{Mn} and UV₂₅₄ was characterized. The results show that the iodine adsorption values of 1 200-1 320 mg/g, the adsorption value of methylene blue is 280-290 mg/g and the average strength is 95%, and the loading density is 470-485 g/L can be prepared by blending Hami coal and Kuangou coal with ash less than 5%, volatile matter 35% and moisture 3%-6% at the ratio of 60:40, adding potassium-containing compound catalyst and oxidized 180-200 min at 250℃, carbonized 150-180 min at 530-560℃, activated at 920-940℃. The removal rates of TOC, COD and UV₂₅₄ in drinking water treatment based on coal-based activated carbon products produced in Xinjiang are 38%, 42% and 67%, respectively. It shows that coal-based activated carbon products produced in Xinjiang coal-based drinking water treatment have better adsorption properties than F-400 produced by Carlgang Company in the United States.

Key words: Xinjiang coal; activated carbon for water treatment; preoxidation; catalytic

0 引言

活性炭具有优异的吸附性能和良好的化学稳定性,广泛应用于食品、化工、制药及环保领域^[1]。

随着我国对环保的高度重视和环保执法力度的加强,对用于环保产业水、气净化的基本材料——活性炭的需求量剧增,由于我国宁夏自治区和山西大同适用于活性炭生产的优质原煤资源枯竭,中

收稿日期:2019-01-10;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19011015

作者简介:陆晓东(1979—),男,江苏南通人,工程师,从事活性炭生产技术管理。E-mail:6847162@qq.com

引用格式:陆晓东,雷清平,王福平,等.新疆煤制饮用水处理用活性炭工艺及应用[J].洁净煤技术,2019,25(4):145-151.

LU Xiaodong, LEI Qingping, WANG Fuping, et al. Preparation technology and performance of activated carbon for drinking water treatment from Xinjiang coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 145-151.



移动阅读

国活性炭产业面临前所未有的挑战和发展机遇。新疆煤炭资源丰富,种类齐全^[2],特别是哈密、准东、黑山、阜康、宽沟等地区的煤炭具有低灰、低硫、高活性等特点^[3-8],是制备饮用水专用活性炭的优良原料。

刘卫娜等^[9]对新疆煤制备活性炭的孔隙结构进行了研究,结果表明,加入添加剂和采用空气预氧化法均有利于提高活性炭的比表面积。解炜等^[10]对压块工艺条件下配煤对活性炭孔结构的调控作用进行了研究,结果表明,外加水分的增加对活性炭前驱体的冷压强度和磨损强度有不利影响;沥青含量的增加可有效提高其冷压强度和磨损强度;较低的对辊压力使物料难以成型,提高对辊压力可有效提高其强度;在不添加外水及沥青含量6%的条件下,利用对辊压力60 MPa成型可制备冷压强度达13.7 MPa、磨损强度为88.1%的活性炭前驱体。吉建斌等^[11]研究了预氧化处理对大同煤制活性炭性能的影响,研究表明,氧化预处理可使最终活性炭制品的水容量、碘吸附值、亚甲基蓝吸附值和四氯化碳吸附率分别提高27%~34%、134 mg/g、86~96 mg/g和9%~13.5%(绝对算术差值)。张守玉等^[12]研究了煤种及炭化条件对孔隙结构的影响,研究表明,较高的挥发分与氧含量有益于活性焦孔隙结构的发展,同时较高的氧元素含量可能有益于活性焦苯甲酸吸附值的提高。邢宝林等^[13]研究了配煤对煤基活性炭孔径分布的影响,研究表明,不同配比的配煤均可制备高比表面积(2 817~3 134 m²/g)的活性炭,配煤的配比是影响活性炭孔径分布的主要因素,随着配煤中高煤化度煤种配比的提高,活性炭的孔径分布逐渐变窄,中孔率降低,原料煤自身结构与性质的差异是造成不同煤化度煤基活性炭孔结构差异的主要原因,通过配煤技术可有效调节活性炭的孔径分布。林珈羽等^[14]研究了不同原料和炭化温度下活性炭结构及性质,研究表明,松木屑的最大热解速率及其对应温度最高,说明热稳定性最好;不同原料在相同炭化温度下所制得的生物炭所含表面含氧官能团种类和总量相近,但pH值和吸附能力差别较大,其中麦秆制得的生物炭pH值最大,松木屑制得的生物炭吸附能力最强;随着炭化温度升高,相同原料制得的生物炭表面含氧官能团总量减少,pH值升高,纤维素和半纤维素特征峰消失,芳构化程度增加,吸附性能总体呈先升后降的趋势。郑征等^[15]研究了活化时间对吸附性能的影响,研究表明,随着活化时间由5 s增至120 min,所制备活性焦的苯酚吸附值

和碘值先增加后略微下降,活化时间为5 s时,活性焦吸附性能提高不明显;而采用固定床活化,活性焦吸附性能提高,当活化时间为90 min时,活性焦的苯酚吸附值和碘吸附值达最大值,分别为97 mg/L和588 mg/L,总比表面积和总孔容分别可达675.53 m²/g和0.631 2 cm³/g;当活化时间>30 min时,自制活性焦对高低浓度气化废水中COD、总磷、TOC去除率和吸附容量与市售活性焦相近;活化时间在30~120 min时,导致COD、总磷、TOC去除率和吸附容量变化范围均<5%,活化时间对高低浓度气化废水中COD、总磷、TOC去除率和吸附容量影响不大。杨晓霞等^[16]研究了加入KOH等催化剂活化制备活性炭的工艺,研究表明,活性炭碘吸附值、亚甲基蓝值以及氢气产量受催化剂工艺参数影响很大,当浸渍比为0.5、活化温度为700℃、单元活化时间为10 min时,所制得的活性炭性能较好,碘吸附值达837 mg/g,亚甲基蓝吸附值达431 mg/g,此时H₂产量约为33.1 mmol/g煤。

上述研究均以活性炭生产工艺及指标研究为主,但以新疆煤为原料制备活性炭的相关研究、指标及水处理吸附较少。本文采用不同配比的新疆保利原煤和宽沟原煤(9:1、8:2、7:3、6:4、5:5),通过调整氧化、炭化温度及时间,添加2% KOH、2% KHCO₃催化剂,制成的活性炭碘吸附值为1 200~1 320 mg/g、亚甲基蓝吸附值为280~290 mg/g、平均强度95%、装填密度470~485 g/L,且具有较好的耐磨强度,对水中TOC、COD、UV₂₅₄的去除率分别为38%、42%、67%,符合国际市场的高强度、高堆比重要求,为净水行业用活性炭生产、指标提供参考。

1 试验

1.1 活性炭制备

1.1.1 原料煤

根据 $A_d < 5\%$ 、 $V_{daf} = 35\%$ 、 $M_{ad} = 3\% \sim 6\%$ 以及原煤CO₂反应性>90%原则,对新疆主要矿区的原煤进行筛选,最终确定哈密煤(A煤)及宽沟煤(B煤)作为活性炭的试制原料,其煤质性质见表1。

表1 活性炭原料煤的煤质指标

Table 1 Coal quality indicators of raw coal

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	CO ₂ 反应性/ $\%$
A煤	5.56	2.20	33.00	>90
B煤	2.81	5.93	34.34	>90

1.1.2 试验设备及仪器

主要仪器设备:全自动电子天平(赛多利斯科

学仪器北京有限公司)、密封式快速制样机(南昌通用化验制样机厂)、拍击式标准振筛试验机(中国航空工业第五四零工厂)、WS150型压块试验机(石家庄恒业机械厂)、球磨制粉机(石家庄恒业机械厂)、辊式细粒破碎机(石家庄恒业机械厂)、小型炭化炉(石家庄恒业机械厂)、小型活化炉(石家庄恒业机械厂)、全自动工业分析仪(长沙开元)、COD测试仪TC890C(青岛溯源)、原子分光光度计7230G(上海菁华科技有限公司)。

1.1.3 样品制备

将A、B两种原煤共3 kg,按照表2的方案进行混配,在球磨机中研磨8 h,确保85%煤粉可通过0.074 mm筛网,将煤粉送入压块试验机中,在压力20 MPa(线压力98 kN/cm)压块成型,由于哈密原煤灰分较低,因而以哈密原煤为主煤。

表2 配煤方案
Table 2 Coal blending scheme

煤样	比例/%					
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
A煤	100	90	80	70	60	50
B煤	0	10	20	30	40	50

将成型料破碎筛分至2.4~6.7 mm;取2.5 kg粒料在氧化炉中,以空气为氧化剂进行氧化,在隔绝空气的条件下进行炭化。将1 kg炭化后的物料在小型活化炉中活化,以高温水蒸气为活化剂,按照物料/蒸汽(质量比)=1:2.5通入高温水蒸气。采用正交试验法在840~920℃考察不同温度和活化时间对产品性能的影响。在最佳工艺条件下,加入质量分数2%的KOH和KHCO₃,考察其对产品性能的影响。

产品性能测试包括碘值、亚甲蓝、强度、堆比重,检测标准为GBT 7702—1997和GBT 7702—2008;考察最佳工艺条件下产品的TOC、COD、UV₂₅₄等指标,TOC、COD的检测标准分别为GB/T 5750.7—2006、GB 11914—89,UV₂₅₄采用分光光度法测试。

2 试验结果与讨论

2.1 最佳工艺条件试验

2.1.1 最佳配比

采用单一煤种生产的活性炭,由于其孔隙结构和吸附性能的特点和缺陷,应用领域受到限制。A煤的变质程度较高,为不黏煤,由于变质程度较高的原煤内部结构致密,制备的活性炭中微孔相对发达,中孔孔隙结构较小,因此碘吸附值较高,亚甲蓝吸附值相对较低;B煤的煤化程度较低,制备的活性炭中

微孔相对较少,中孔发达,亚甲蓝吸附值较高。将A和B两种煤进行配比,在一定程度上可提高活性炭性能指标,改善单一煤种生产的活性炭孔隙结构^[12],配煤试验结果如图1所示。从图1可以看出,综合考虑吸附性能和产品强度与收率,4号配煤方案最佳。

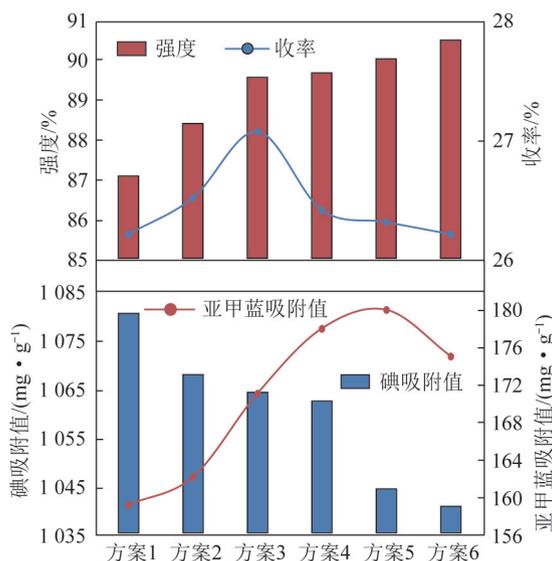


图1 不同配煤生产的活性炭性能指标

Fig. 1 Performance indexes of activated carbon for different formulation

2.1.2 氧化工艺

1) 氧化温度

保持氧化时间180 min不变,进行氧化温度分别为230、250、270℃的活性炭性能试验,试验结果如图2所示。

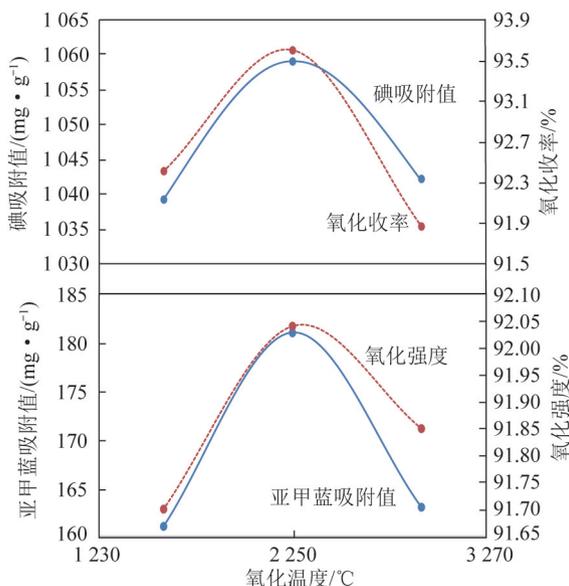


图2 不同氧化温度下的产品指标

Fig. 2 Performance indexes of activated carbon for different temperature

从图2可以看出,随着氧化温度升高,收率略增加后下降,吸附性降低。主要是因为氧化反应增加了炭表面的含氧官能团,有利于降低炭化过程中石墨化现象发生,提高后期与水蒸气的活化反应性。但温度过高,在氧化过程中,原煤中的胶质体发生熔融和缩聚现象,部分挥发分逸出,物料变得致密,降低后期的活化反应性和吸附值,因此最佳的氧化温度为250℃。

2) 氧化时间

氧化时间对碘吸附与亚甲蓝吸附的影响如图3所示。

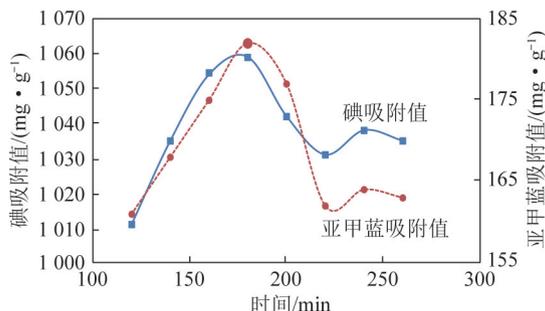


图3 氧化时间对碘吸附与亚甲蓝吸附的影响

Fig. 3 Effect of oxidation time on iodine value and methylene blue value

从图3可以看出,随着氧化时间延长,氧气逐步扩散进入物料内部发生反应,产品的吸附值升高^[13]。扩散和氧化完成后,吸附性达到最高值,之后略降至相对稳定值。主要原因是随着氧化时间延长,理论上产品得率应略增加,但物料磨损也增加,造成物料脱粉率上升。因此最佳的氧化时间为180~200 min。

2.1.3 炭化工艺

采用慢速升温工艺,从250℃逐步升温至指定温度后恒温,炭化升温速率<5℃/min。炭化时间、炭化温度对吸附性能的影响如图4所示。

从图4可以看出,随着炭化温度升高,碘吸附值略有增加,亚甲蓝吸附值显著提高。主要原因是随着炭化温度升高,炭化料中的更多高温挥发分释放,孔隙增加,提升了产品中孔比率^[14],但残留在炭化料中的挥发分降低,使得率从72%降至65%。因而最佳炭化温度为530~560℃。

随着炭化时间延长,活性炭的吸附性增加,但增加幅度有限。同时炭化强度增加,产品得率下降。主要原因是在炭化反应开始阶段,挥发温度低于530℃的挥发分快速逸出,但随着炭化时间延长,挥发分完全逸出,炭化料内部胶质逐步石墨化,结构趋于稳定,此时吸附性变化不大。综合考虑吸附性和

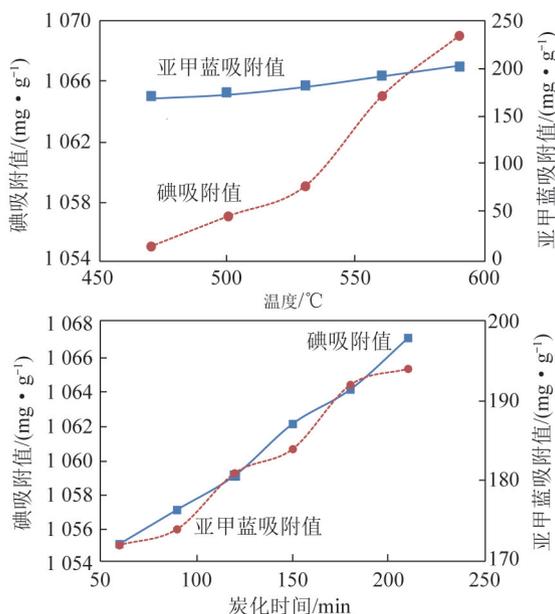


图4 炭化时间、炭化温度对吸附性能的影响

Fig. 4 Effect of carbonization time and temperature on adsorbability

收率,炭化时间不易过长,最佳炭化时间为150~180 min。

2.1.4 活化工艺

1) 活化温度

图5为活化温度对吸附特性的影响。从图5可以看出,随着活化温度升高,吸附性能显著提升,收率逐步下降,灰分逐步增加。主要原因是活性炭的活化主要是H₂O和C的反应,温度较低时,受热力学控制,由蒸汽在炭孔隙中的扩散控制;温度逐步升高时,活化速率由H₂O和C的反应速率控制,温度升至850℃以上,反应速率随温度的升高迅速增加。单位时间反应速率提升使得率下降,且由于灰分与C相比属于惰性物质,逐渐积累在活性炭中,灰分增加。根据目前高品质活性炭的要求,灰分应在8%以下,综合考虑吸附性能及灰分、收率的影响,最佳活化温度在920~940℃。

2) 活化时间

图6为活化时间对吸附性能的影响,可以看出,随着活化时间延长,碘吸附值迅速增加,240 min后,碘吸附值增加缓慢,随后碘吸附值下降;亚甲蓝吸附值随活化时间的延长而增加。主要原因是随着活化的进行,炭化料中非石墨结构的炭与水蒸气快速反应,生成CO₂逸出,空出孔隙,孔隙孔径吸附的主要结构是碘分子吸附尺寸和稍大的亚甲蓝分子,使碘吸附值和亚甲蓝吸附值迅速上升,之后由于非石墨结构的炭反应完全,水蒸气与石墨化的炭骨架反应,由于石墨化的炭结构相对稳定性较高,使扩孔反应

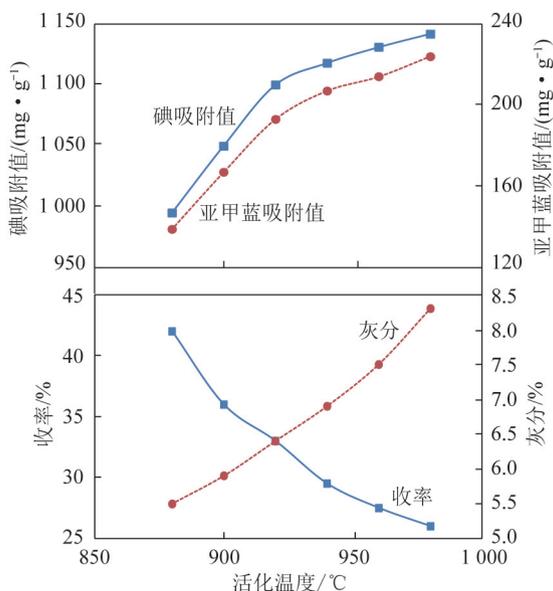


图5 活化温度对吸附特性的影响

Fig. 5 Effect of activation temperature on adsorbability, yield and ash content

速率降低,吸附性增加出现平台期。随着时间延长,前期产生的孔隙孔径继续增加,适合吸附碘分子的孔隙减少,而适合吸附亚甲蓝的孔隙增加,碘吸附值下降,亚甲蓝吸附性继续增加。综上,确定最佳的活化时间为240~270 min。

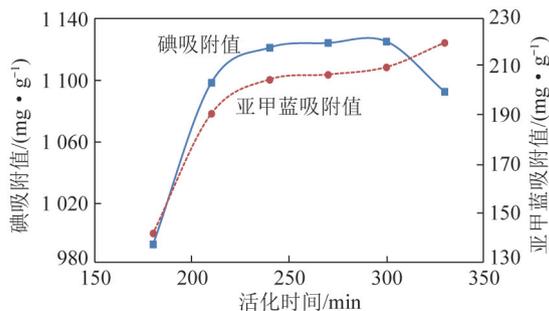


图6 活化时间对吸附性能的影响

Fig. 6 Effect of activation time on adsorbability

2.1.5 添加剂的影响

有机污染物种类繁多,要求活性炭具有更高的碘吸附值与亚甲蓝吸附值,且要保证一定的堆比重和强度。目前主要采用配煤结合催化剂的调孔技术,以改变活性炭孔结构,提高活性炭的吸附性能。

在最优工艺参数基础上进行配煤压块、氧化、炭化和活化,考察原料中无添加剂(样品1)、添加2% KOH(样品2)和2% KHCO₃(样品3)对产品吸附性(CNAS检测)的影响,结果如图7所示。

由图7可以看出,产品的碘吸附值和亚甲蓝吸附值以及装填密度和强度均达到或接近F400型活性炭。添加调孔剂后制成的活性炭,质量技术指标已达碘吸附值1200~1320 mg/g、亚甲蓝吸附值

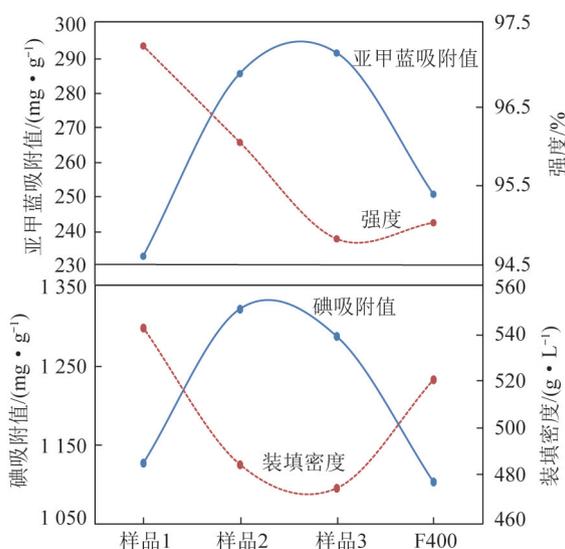


图7 添加剂对产品主要技术指标的影响

Fig. 7 Effect of agents on technical index of products

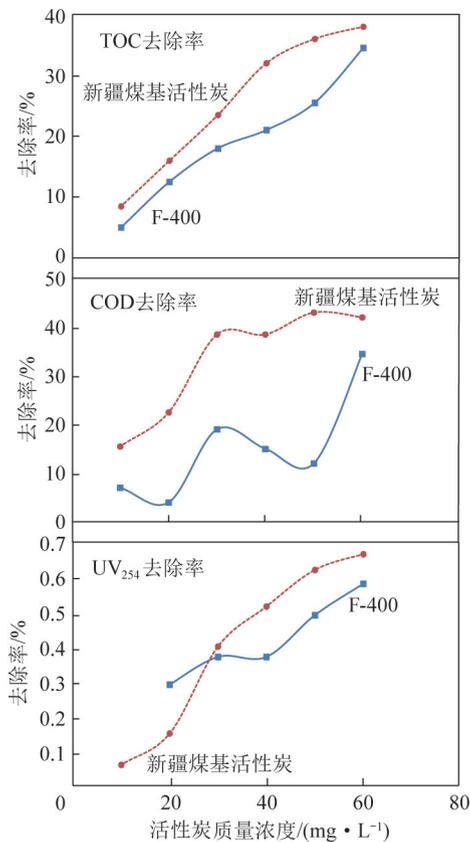
280~290 mg/g、平均强度95%、装填密度470~485 g/L,且保持较好的耐磨强度,符合国际市场的高强度、高堆比重要求。

2.2 对水中有机污染物的去除效果

试验原水为北京地表水源。向装有500 mL试验原水的广口瓶中分别添加0、10、20、30、40、50、60 mg/L活性炭样品,在25 °C恒温下震荡12 h,振荡频率为120 r/min。水样过0.45 μm滤膜后进行TOC、COD_{Mn}、UV₂₅₄测定^[16]。由于国内尚无活性炭对TOC、COD_{Mn}和UV₂₅₄吸附能力的评定标准,本文仅与被欧美自来水厂广泛应用的F400活性炭产品进行比较。测试结果如图8所示。从图8可以看出,基于新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中TOC去除率为38%,F400活性炭产品对水中TOC去除率为35%。基于新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中COD的去除率为42%,F400活性炭产品对水中TOC去除率为34.5%,基于新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中UV₂₅₄去除率为67%,F400活性炭产品对水中UV₂₅₄去除率为58%。通过上述对比基于新疆煤质生产的饮用水处理用煤基活性炭产品对水中有机物的吸附性能优于美国卡尔岗公司生产的F-400。

3 结论

1)采用新疆原煤生产优质水处理用活性炭的优化工艺参数为:哈密煤和宽沟煤配比为60:40,氧化最高温度250 °C,时间180~200 min;炭化最高温度530 °C,时间150~180 min;活化温度920~940

图8 活性炭对 TOC、COD_{Mn}、UV₂₅₄ 去除率对比Fig.8 Comparison of active carbon to of removal rates
TOC, COD_{Mn} and UV₂₅₄

℃,活化时间 240~270 min。

2)在最佳工艺条件下,添加含钾化合物催化剂,可制备出碘吸附值 1 200~1 320 mg/g、亚甲蓝吸附值 280~290 mg/g、平均强度 95%、装填密度 470~485 g/L 的高效水处理活性炭。

3)在最佳条件下制备的活性炭产品对 TOC、COD_{Mn}、UV₂₅₄ 有较好的去除效果。

参考文献 (References):

[1] 蒋煜,刘德钱,解强.我国煤基活性炭生产技术现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2018,24(1):26-32.
JIANG Yu,LIU Deqian,XIE Qiang. Status and development trend of coal-based activated carbon production technology in China [J]. Clean Coal Technology,2018,24(1):26-32.

[2] 姜云辉,杨万志,程遂欣.新疆煤类分布、变质规律及变质作用分析[J].新疆地质,2008,26(3):301-304.
JIANG Yunhui,YANG Wanzhi,CHENG Suixin. Analysis on distributing orderliness of the degenerative and metamorphism of the coal in Xinjiang [J]. Xinjiang Geology,2008,26(3):301-304.

[3] 韦欣,王玲,许孝万.新疆沙尔湖煤田煤层特征及对比[J].中国煤炭地质,2010,22(9):9-14.
WEI Xin,WANG Ling,XU Xiaowan. Discussion on coal seam characteristics in Shaerhu coalfield,Xinjiang [J]. Coal Geol-

ogy of China,2010,22(9):9-14.

[4] 张冀,韦波,田继军,等.新疆哈密三塘湖特大整装煤田中-下侏罗统煤层煤质及煤相特征[J].地质学报,2015,89(5):917-930.
ZHANG Ji,WEI Bo,TIAN Jijun, et al. Characteristics of coal quality and coal facies of middle-lower jurassic coal seam in Large Ready coalfield of the Santanghu Basin, Hami, Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica,2015,89(5):917-930.

[5] 苏国庆,姚伟,何红光.新疆准东煤矿煤质特性试验研究[J].煤质技术,2015(4):39-41.
SU Guoqing, YAO Wei, HE Hongguang. Experimental research on coal characteristics of coal sample from Xinjiang Zhundong coalmine [J]. Coal Quality Technology,2015(4):39-41.

[6] 吴秀章,李克健,李文博.新疆黑山煤直接液化性能研究[J].煤炭转化,2009,32(1):40-43.
WU Xiuzhang, LI Kejian, LI Wenbo. Study on direct liquefaction performance of Xinjiang Heishan coal [J]. Coal Conversion,2009,32(1):40-43.

[7] 李轩,芦海云,何立新,等.宽沟煤热解半焦成浆性研究[J].洁净煤技术,2016,22(4):89-95.
LI Xuan, Lu Haiyun, HE Lixin, et al. Slurryability of semi-coke from Kuangou coal pyrolysis [J]. Clean Coal Technology,2016,22(4):89-95.

[8] 林海飞,程博,曾强,等.新疆阜康矿区煤的吸附孔分形特征试验研究[J].中国煤炭,2016,42(5):103-108.
LIN Haifei, CHENG Bo, ZENG Qiang, et al. The experimental study on the fractal characteristics of coal adsorbed pore in Fukang mining district of Xinjiang [J]. China Coal,2016,42(5):103-108.

[9] 刘卫娜,李志娟,周岐雄,等.新疆煤基中孔活性炭的制备及其吸附性能研究[J].煤化工,2013,41(4):58-61.
LIU Weina, LI Zhijuan, ZHOU Qixiong, et al. Preparation of mesoporous activated carbon from coal and research on its adsorption performance [J]. Coal Chemical Industry,2013,41(4):58-61.

[10] 解伟,王鹏,曲思建,等.压块工艺条件下配煤对活性炭孔结构的调控作用[J].煤炭科学技术,2017,45(2):197-202.
XIE Wei, WANG Peng, QU Sijian, et al. Regulation effect of blending coal on pore structure of coal-based activated carbon prepared by brquetting method [J]. Coal Science and Technology,2017,45(2):197-202.

[11] 吉建斌,薛保平,刘大鹏,等.预氧化处理对大同烟煤压块活性炭性能的影响[J].煤炭转化,2005,28(1):66-68.
JI Jianbin, XUE Baoping, LIU Dapeng, et al. Influence of preoxidation treatment on the properties of the agglomerated activated carbon made from datong bitumite [J]. Coal Conversion,2005,28(1):66-68.

[12] 张守玉,吕俊复,岳光溪,等.煤种及炭化条件对活性焦孔隙结构的影响[J].煤炭学报,2003,28(2):167-172.
ZHANG Shouyu, LYU Junfu, YUE Guangxi, et al. The effects of coal type and carbonization conditions on the porous texture of activated char derived [J]. Journal of China Coal Society,2003,28(2):167-172.

[13] 邢宝林,张传祥,谌伦建,等.配煤对煤基活性炭孔径分布影

- 响的研究[J]. 煤炭转化,2011,34(1):43-46.
XING Baolin,ZHANG Chuangxiang,CHEN Lunjian, et al. Effect of coal blending on the pore size distribution of the activated carbons[J]. Coal Conversion,2011,34(1):43-46.
- [14] 林珈羽,张越,刘沅,等. 不同原料和炭化温度下制备的生物炭结构及性质[J]. 环境工程学报,2016,10(6):3200-3206
LIN Jiayu,ZHANG Yue,LIU Yuan, et al. Structure and properties of biochar under different materials and carbonization temperatures[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(6):3200-3206.
- [15] 郑征,周三,景旭亮,等. 活化时间对加氢半焦气化废水吸附性能的影响[J]. 煤炭转化,2017,40(6):63-70.
ZHENG Zheng,ZHOU San,JIN Xuliang, et al. Effect of activation time on performance of hydrogenation char for adsorption of gasification wastewater[J]. Coal Conversion,2017,40(6):63-70.
- [16] 孔令宇,张晓健,王占生. 臭氧-生物活性炭与单独活性炭工艺处理效果比较[J]. 中国给水排水,2006,22(11):49-51.
KONG Lingyu,ZHANG Xiaojian,WANG Zhansheng. Comparison of Performance between O₃-BAC and Processes[J]. China Water & Wastewater,2006,22(11):49-51.