

文章编号: 0253-2239(2010)10-2898-06

利用 X 射线 K 边减影成像研究铜离子在 聚合物材料上的吸附

郭荣怡^{1,2} 马红娟¹ 薛艳玲^{1,2} 谢红兰¹ 邓彪¹ 杜国浩¹ 王敏¹ 肖体乔¹

(¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 研究和开发新型有机功能材料来吸附重金属离子,是解决水体重金属污染的重要途径之一。采用传统技术,很难直接观察到吸附材料中重金属离子的分布。利用同步辐射 X 射线能量可调谐及其较强的穿透性,采用 K 边减影(KES)成像技术对此问题进行了研究。通过优化实验条件和图像配准、中值滤波等图像处理,成功地将这一技术运用到有机材料吸附金属离子过程的研究中,得到了非常清晰的铜离子在聚偏氟乙烯改性高分子材料上的分布图像。研究结果表明,铜离子被吸附后进入到吸附材料的内部。通过研究还发现,样品颗粒的尺度对铜离子进入颗粒内部的深度影响不明显,单位时间铜离子吸附的质量主要受到吸附材料表面积的影响。

关键词 图像处理;X 射线显微成像;K 边减影(KES)成像;有机吸收材料;重金属离子吸附

中图分类号 O434 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103010.2898

K-Edge Digital Subtraction X-Ray Imaging for Observation of Cu²⁺ Adsorption in Polymer Particles

Guo Rongyi^{1,2} Ma Hongjuan¹ Xue Yanling^{1,2} Xie Honglan¹ Deng Biao¹
Du Guohao¹ Wang Min¹ Xiao Tiqiao¹

(¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The investigation and development of novel functional organic material for the adsorption of heavy metal ion in water is one of the important solutions to water pollution. However, with traditional techniques, it is very difficult to observe directly the distribution of heavy metal ion inside the adsorptive material. By means of the tunability and penetrability of the X-rays, this problem is researched with K-edge digital subtraction (KES) imaging. Systematical investigation is carried out successfully, resorting to optimization for experimental conditions, image registration and median filtering etc.. The experimental results demonstrate that the adsorbed copper ions can infiltrate into the adsorber. The results also indicate that sizes of the adsorbing particles do not have obvious impact on the infiltrating depth of the copper ions. The mass of the copper ions adsorbed per unit time is mainly affected by the superficial area.

Key words image processing; X-ray microscopy imaging; K-edge digital subtraction (KES) imaging; organic adsorption material; heavy metal ion adsorption

1 引 言

重金属污染是危害最大的水污染之一,重金属不

能被微生物降解,在环境中只能发生各种形态之间的相互转化,所以重金属污染的消除往往更为困难。随

收稿日期: 2009-12-22; 收到修改稿日期: 2010-02-04

基金项目: 国家 973 计划(2010CB834301)、国家自然科学基金(10805071, 10705020)、中国科学院对外合作重点项目(GJHZ09058)和上海市基础研究重点项目(08JC1411900)资助课题。

作者简介: 郭荣怡(1985—),男,硕士研究生,主要从事 X 射线显微成像方面的研究。E-mail: guorongyi@sinap.ac.cn

导师简介: 肖体乔(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事 X 射线光学,成像光学及光学检测等方面的研究。

E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn(通信联系人)

着高分子材料科学发展,开发和研制新型的有机功能材料成为当前重金属水处理研究的一大热点^[1,2]。

目前,在重金属吸附问题的研究上,主要有两类方法:一是研究金属在材料和溶液中的分散系数;二是研究材料本身的结构或物理化学性质。例如透射电镜(TEM)、扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)、热分析-差示扫描量热计法(DSC)、热-重分析(TGA)、微分热分析(DTA)、升温脱附(TDS)、热机械分析(TMA)等。这些方法虽然可以从某些间接的参数来分析吸附材料对重金属离子的吸附性能,但是无法以图像的形式直观地给出金属离子在吸附材料上的分布状况,从而对某些结论提不出有力的证据^[3~7]。光学成像方法对样品的研究具有直观性的优点^[8~11],再考虑到 X 射线所具有的较强的穿透性和 K 边减影(KES)成像技术有效的图像分离

能力,所以 X 射线 KES 成像技术成了解决这个问题的首选。本文即对该技术进行了较为系统的研究。

2 原理与方法

2.1 实验原理

K 边减影成像技术,又叫能量减影(ES)技术,它是由 Jacobson B. Dichromatic 等^[12]于 1953 年提出的,它是利用了所选元素的吸收系数在其吸收边处的不连续性,用略高于和略低于元素 K 边的能量的 X 射线分别对样品进行成像(不妨将其分别称为高能像和低能像),然后将这两幅图像经过一系列的手段进行图像处理,就得到了描述该元素分布的图像^[13~15]。

根据 Lehmann L. A. 等^[16]提出的双能量方法,可以得到兴趣元素和基底在整个样品上的分布^[17],

$$(\rho t)_{\text{contrast}} = \frac{\left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{base}} \ln \frac{N_0}{N}(E_+) - \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{base}} \ln \frac{N_0}{N}(E_-)}{\left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{base}} \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{contrast}} - \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{base}} \left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{contrast}}}, \quad (1)$$

$$(\rho t)_{\text{base}} = \frac{\left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{contrast}} \ln \frac{N_0}{N}(E_+) - \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{contrast}} \ln \frac{N_0}{N}(E_-)}{\left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{base}} \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{contrast}} - \left[\frac{\mu}{\rho}(E_+) \right]_{\text{base}} \left[\frac{\mu}{\rho}(E_-) \right]_{\text{contrast}}}, \quad (2)$$

其中(1)式描述了铜离子在样品上的分布,(2)式描述了基底在样品上的分布, μ/ρ 作为一个参数,表示物质的质量吸收系数, ρ 是物质的密度, t 是 X 射线所穿越的样品的长度, N 表示 X 射线穿过样品到达 CCD 上时,CCD 所成像的灰度值, N_0 表示 X 射线直接到达 CCD 上时,CCD 所成像的灰度值。这些参数缀以 base 和 contrast 表示这些参数分别是基底和兴趣元素所对应的值,而缀以 E_- 和 E_+ 则表示这些参数分别是低能 X 射线和高能 X 射线所对应的值。

2.2 研究方法

2.2.1 参数选择

根据(1)式和(2)式,要想实现兴趣元素和基底影像的分离,就需要知道高能和低能 X 射线所对应的铜离子的质量吸收系数和密度,以及基底的质量吸收系数和密度。但是在具体的研究中,基底不仅包括了吸附材料,还包含了盛放样品的容器,它的质量吸收系数和密度是难以测量的,并且所研究的铜离子是以金属络合物的形式存在的,它的质量吸收系数和密度也同样难以测定。考虑到基底在用高低两个能量的 X 射线成像中,其质量吸收系数变化不

大,可以将其影响忽略掉,这就是均匀背景近似,这样就可以从物质对 X 射线的吸收公式得到

$$\frac{N(E_-) - D}{N_0(E_-) - D} / \frac{N(E_+) - D}{N_0(E_+) - D} = \exp \left\{ \left[\Delta \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^* (\rho t) \right]_{\text{Cu}} \right\}. \quad (3)$$

2.2.2 X 射线的能量

研究中,X 射线高低两个能量要在一个合理的范围内选择。如果选择的能量间隔过小,会导致铜离子的吸收系数在这两个能量处差异太小,这不仅会导致减影像中铜离子影像的衬度大幅降低,还会严重影响图像的信噪比;相反,如果选择的能量间隔过大则会导致减影像中可能残留的基底的影像衬度增大,从而对铜离子影像的衬度产生影响。

经过测定,在研究中用到的 $7.5 \mu\text{m}$ 厚的铜标样的吸收曲线如图 1 所示。

图中 a, b 两点处的能量分别是 8.980 keV 和 9.001 keV 。不难看出,X 射线的两个能量选在 a, b 两点附近是合适的,因为这个能量间隔是使得铜离子的吸收系数有较大差异的最小间隔,从而既可以满足增强铜离子影像衬度的要求,又能够在一定程

度上抑制基底的影像。研究中所选择的能量正是在 a, b 两点附近,同时考虑到测量误差,所以选择的两个能量分别是 8.976 keV 和 9.006 keV。

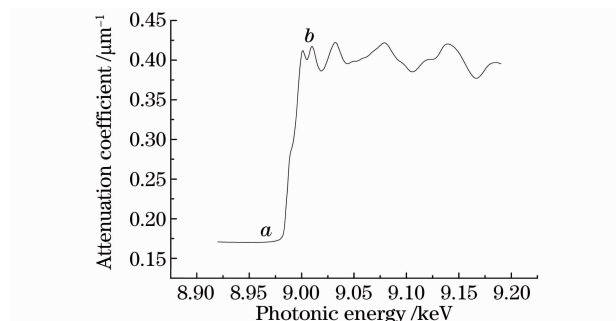


图 1 铜标样(7.5 μm 厚)的吸收曲线

Fig. 1 Absorption curve of copper standard sample (thickness of 7.5 μm)

2.2.3 图像后期处理

由于在获取高能像和低能像时,用的是两次曝光的方法,那么在这两次成像之间的时间内,一些外界因素可能使得整个光路发生微小抖动,或者由于光源本身或者单色器的不稳定造成从光学前端区进入实验光路的 X 射线发生抖动(从实验情况看,这方面的影响还是比较大的),这些因素的影响都可能使得这两幅图像上样品的相对位置发生错位。因此若直接进行减影,则会出现背景无法减除的现象,这可能会严重影响减影效果。因此,减影之前需要对高能像和低能像进行配准。

图像在进行减影以后,对比度相对于原来的图像会大幅度下降,究其原因,是因为与背景区的灰度值相比,以络合物形式存在的铜离子的高低两个能量的质量吸收系数的差异还不足以使得减影像的铜离子影像有较好的衬度。如果直接对高低两个能量的 X 射线对样品所成的影像减影,那么所得到的图像将会是漆黑一片而基本没有任何衬度。所以,必须要对得到的减影像进行对比度增强处理。研究中用到的处理方法主要分为两步:首先,对减影像的灰度值乘以一个系数 m ,那么背景区和颗粒区的灰度值的差异便被放大了 m 倍,从而使得图像的衬度得以增强。其次,进行对比度拉伸处理,可使得图像的灰度在整个 256 个灰度级上进行拉伸,从而进一步增强图像对比度。

虽然经过对比度增强处理后,图像的峰值和谷值对比明显,衬度良好,但是图像中夹杂了一些随机噪声,在经过前边对比度增强处理时,这些噪声也会被放大,使得图像的灰度值分布有很大的随机起伏,这在后边定量分析问题,将会产生一定的干扰,所

以需要将这些噪声做一些滤波处理,从而降低噪声的干扰。对于这种类似椒盐噪声的噪声来说,中值滤波最为简单而且也比较有效。因此,此次研究中也用中值滤波的方法来滤除噪声。

2.2.4 两次曝光法的实现

K 边减影成像要求 X 射线具有良好的单色性、较高的亮度、合适的谱宽、灵活的能量可调谐性等方面的特点,这些要求在 Jacobson 于 1953 年提出这个理论时是无法满足的,这也是 K 边减影成像技术没有在当时得到推广的原因,但是这个问题随着同步辐射的出现迎刃而解。作为世界上最先进的第三代光源之一,上海光源产生的 X 射线具有高亮度、高单色性、宽的光谱范围、能量可调谐等优点,为 K 边减影技术的应用提供了有力的硬件支持^[18]。本次研究正是在上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL-13W1)上开展的。实验光路图如图 2 所示。

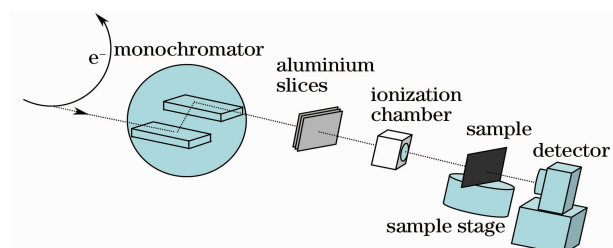


图 2 实验光路图

Fig. 2 Light path of the experiment

为此次研究而开展的实验中,用的是两次曝光的方法,即分别用高低两个能量的 X 射线对样品成像,从而得到高能像和低能像。研究中用到的吸附材料是聚偏氟乙烯(PVDF)粉体(重均分子量 6.1×10^5 ,平均粒径 0.1 mm)上接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)再用三乙烯四胺改性得到的粉末。它属于高分子重金属捕集剂,高分子基体具有亲水性的氨基,它能与水中的重金属离子发生螯合反应,并生成稳定的金属络合物^[19]。将这种材料置于一定浓度的硫酸铜溶液中(研究中 Cu^{2+} 初始浓度为 5 g/L)吸附预定的时间,铜离子将被吸附到材料上。具体的实验步骤是这样的:首先将吸附好的材料置于光路中,设置 X 光的能量为实验中用到的低能位置,调节曝光时间,得到一幅含有暗电流的材料的影像 N ,然后将材料拿走,用同样的曝光时间,得到一幅含有暗电流的入射光的影像 N_0 。接着,把光闸放下,挡住 X 光,这时 CCD 上得到影像就是暗电流 D 。接下来,将 X 光能量调至高能位置,重复上面的步骤,就可以得到高能 X 光条件下相应的参量。

3 数据处理和分析

3.1 样品颗粒模型化

由于 X 射线成像是用二维的图像来描述三维的物体,所以在需要定量分析铜离子的分布情况时,需要从二维的图像上定量分析三维的铜离子的分布情况,这需要建立一个模型并进行合理的分析。综合样品所成的像和实际观察,可以看到,将颗粒模型化为球体是合理的。材料颗粒在吸附铜离子一段时间后,材料颗粒的外围总会富集一层成球壳状分布的铜离子,这样吸附后的整个样品颗粒就分成了两部分,一部分是铜离子富集形成的球壳,另一部分是没有铜离子分布的内核。假设外面大球的半径为 r_0 ,内核小球的半径为 r_1 , z 轴方向为逆着 X 光入射方向, y 轴沿着垂直方向, x 轴沿着水平方向。球体沿水平方向的截面如图 3 所示。

图 3 中 h 为 X 光穿越样品时所经过的铜离子厚度的一半 h 与 x 的关系为

$$\begin{cases} h = z_0 - z_1 = \\ \sqrt{r_0^2 - x^2} - \sqrt{r_1^2 - x^2}, (|x| \leq r_1) \\ h = z_0 = \sqrt{r_0^2 - x^2}, (r_1 < |x| \leq r_0) \end{cases} \quad (4)$$

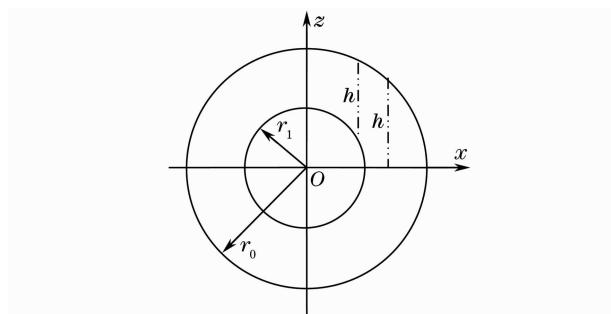
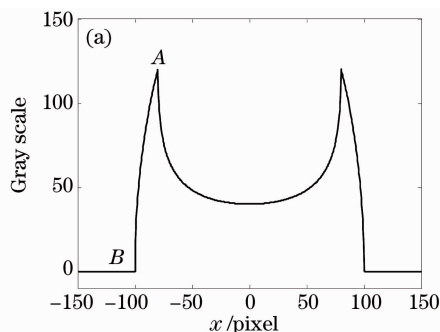


图 3 用平行于 X 光入射方向的平面截组合体得到的平面图

Fig. 3 Schematic diagram of the plane obtained by intercepting the two spheres using the plane parallel to X-ray

同时,考虑到所成的图像的灰度值是 h 值的单调增函数,可以得出:当 $|x| = r_1$ 时, h 取得最大值,为 $\sqrt{r_0^2 - r_1^2}$,即灰度值最大的位置就是内核的边界;当 $|x| = r_0$ 时, $h = 0$ (背景处的灰度值为 0),即灰度值等于背景值的位置就是大球的边界,这样铜离子形成的球壳厚度就可以得到了。

据此,根据如图 4 的减影像中沿颗粒的直径方向的灰度值分布曲线的示意图,A 与 B 之间横坐标的差值即是球壳厚度。

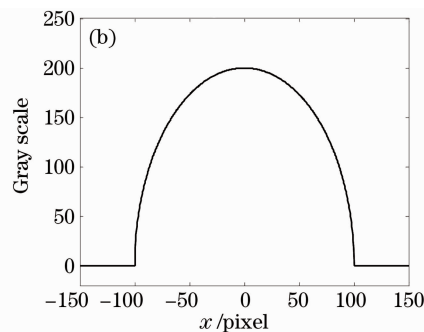


图 4 减影像中沿颗粒的直径方向的灰度值分布。(a)铜离子呈球壳状分布,(b)铜离子充满样品颗粒

Fig. 4 Distribution of grey scale along the diameter. (a) the case that the Cu^{2+} distributes as a spherical shell,

(b) the case that the sample is full of Cu^{2+}

3.2 体吸收现象

研究中,吸附材料与水中的重金属离子选择性的反应,最终以金属络合物的稳定形式存在。理论研究认为,吸附过程可以分为 4 个阶段:离子从溶液主体中扩散到吸附介质表面(溶质扩散)、离子穿过吸附介质表面液膜进入介质内部(液膜扩散)、穿过液膜的离子继续在介质内交联网孔中扩散直至达到某一活性基团位置(粒子内部扩散)及目的离子与活性基团中的可交换离子发生交换吸附(吸附反应)。据此而言,被吸附的铜离子可以进入材料内部,但是缺少直观观察的证明。

利用 K 边减影成像的方法,能够很容易地说明被吸附的铜离子进入了材料的内部。图 5 是两个吸附不同时间的样品的减影像。从图 5(a)所示的吸附 10 min 的样品的减影像中可以看到样品颗粒上有一层呈球壳状分布的铜离子,但是单独看这一张图像,无法断定这是由铜离子向外附着于颗粒表面还是向内进入颗粒内部。因为,不论是哪种情况,直观上都是一层铜离子呈球壳状分布在颗粒上,反映在灰度分布曲线上,都会呈现图 5(b)所示带有两个“犄角”的灰度值分布曲线的形状。两种情况的区别在于:如果吸附过程向内进行,那么颗粒上未被铜离

子占据的球形空间将会逐渐变小,直至消失,这时,颗粒的减影像沿颗粒直径方向的灰度分布图像中两个“犄角”将消失,如图 4(b)所示;如果随着吸附过程向外进行,那么颗粒上未被铜离子占据的球形空间不会有所变化,变化的只是包括铜离子在内的整个颗粒本身的尺寸,所以无论吸附时间有多长,颗粒

的减影像沿颗粒直径方向的灰度分布都将会如图 4 的(a)图所示,只是球壳的厚度会逐渐变厚而已。而从图 5(d)可以看到,颗粒的减影像中,沿直径方向的灰度分布呈现出图 4(b)所示的图样,“犄角”消失,据此,可以得出结论,即铜离子被这种材料吸附以后,进入了材料颗粒的内部。

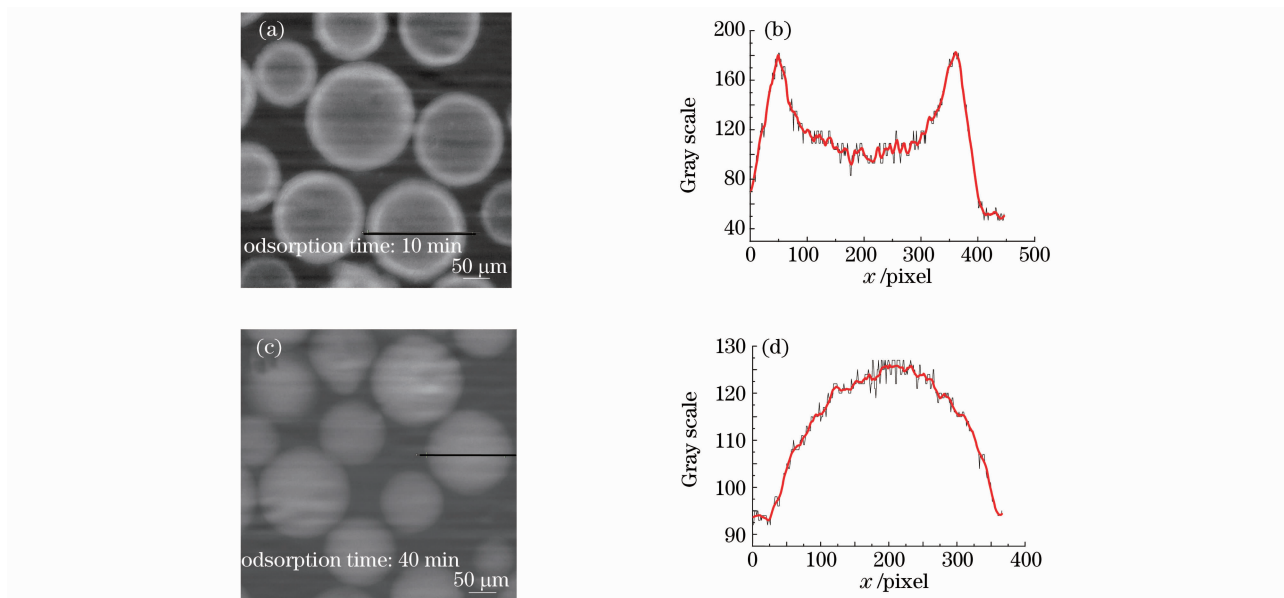


图 5 吸附 10 min 和吸附 40 min 的样品的减影像(a),(c)及其灰度分布(b),(d)

Fig. 5 Subtraction images (a), (c) and grey scale distribution of the sample adsorbing for 10 min and 40 min (b), (d)

3.3 表面积对铜离子吸附速度的影响

根据前面分析的测量球壳厚度的方法,可以对样品吸附的平均速度进行计算,从而分析影响铜离子吸附速度的因素。以吸附了 10 min 的样品的减影像为例,如图 6 所示。

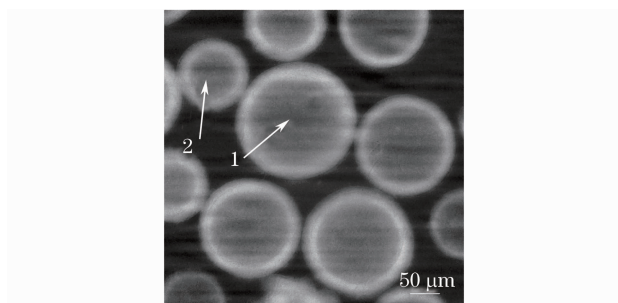


图 6 吸附 10 min 的样品的减影像

Fig. 6 Subtraction imaging of the sample adsorbing for 10 min

图 6 中所标记的 1 号颗粒,其直径为 $217 \mu\text{m}$,由前面所述的方法,可以得它球壳厚度的 13 个样本值,分别是 39, 46, 39, 48, 41, 37, 46, 40, 39, 39, 48 和 37 pixel,而每个像素大小为 $0.5 \mu\text{m}$,因此,所研究的颗粒上已吸附铜离子的球壳的厚度为 $h = 0.5 \times 41 = 21 \mu\text{m}$ 。较小的 2 号颗粒的直径为

$126 \mu\text{m}$,用同样的方法可以得到这个颗粒上铜离子分布的球壳厚度为 $20 \mu\text{m}$,这与前面研究的颗粒的厚度 $21 \mu\text{m}$ 相比,没有太大出入,因此,颗粒尺寸对平均每分钟内铜离子进入颗粒的厚度影响不大。但是考虑到球壳的体积为 $V = \frac{4}{3} \pi (3r^2 \Delta r + 3r \Delta r^2 + \Delta r^3)$, r 为球壳的内半径, Δr 为球壳厚度,所以,从总的质量方面讲,颗粒的尺寸越大,每分钟内吸附的铜离子也越多。另外,球壳的体积还可以表示为

$$V = \int_{r_1}^{r_2} S(r) dr, \text{ 其中 } S(r) \text{ 表示半径为 } r \text{ 的小球的表}$$

面积, r_1 和 r_2 分别表示内球和外球的半径。在球壳厚度不是太大的情况下,近似为 $V \approx S \Delta r$,其中 S 表示颗粒的表面积。由于铜离子进入的深度与颗粒的尺寸无关,所以经过一段时间的吸附,材料的表面积越大,吸附的铜离子就会越多,所以对于同样多的材料,加大其表面积可以有效的提高材料的吸附速度。

4 结 论

基于物质对 X 射线的吸收公式,提出均匀背景近似的方法,解决了应用 K 边减影成像技术时遇到

的一些参量无法测量的问题。经过理论分析和实验探索,优化了实验参数,特别是对 KES 减影中光子能量的选取进行了分析。然后经过图像配准和减影处理,成功得到了减影像。采用中值滤波和对比度增强算法,进一步抑制了噪声干扰、提高了减影像衬度,成功地将 K 边减影成像技术运用到有机材料的铜离子吸附研究中。基于减影像给出了铜离子在吸附材料上的分布状况,通过定量分析,实验验证了铜离子被吸附以后进入了材料颗粒的内部。通过研究还发现,样品的表面积能够影响单位时间铜离子吸附的质量,增大样品的表面积应该是提高材料吸附速度的一条途径。因此,KES 成像可作为研究重金属吸附的一种有效手段。

KES 成像技术不仅可以用作对样品做平面像的减影,还可以与 CT 技术相结合,得到样品上某种元素分布的三维影像^[20],从而能够更直观地观察铜离子在颗粒上的三维分布情况,这就是所谓的 KES-CT 技术;另外,KES 成像还可以与时间减影技术结合,即混合减影技术。通过这种技术,可以直接观察到吸附材料颗粒上的铜离子的动态分布情况。

参 考 文 献

- M. Ozacar, I. A. Sengil. Adsorption of reactive dyes on calcined alunite from aqueous solutions [J]. *Journal of Hazardous Materials B.*, 2003, **98**(1~3): 211~224
- M. E. Argun, S. Dursun. Heavy metal adsorption by modified oak Sawdust: Thermodynamics and kinetics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **141**(1): 77~85
- Qiao Yuxin, Song Laizhou. Adsorption characteristics of Zn(II) ion onto polyvinylidene fluoride blending modified membrane[J]. *Journal of Tangshan Teachers College*, 2008, **30**(5): 27~32
- 乔玉新, 宋来洲. 聚偏氟乙烯共混改性膜对 Zn(II)吸附性能的研究[J]. *唐山师范学院学报*, 2008, **30**(5): 27~32
- Song Laizhou, Dong Chunyan, Zhang Zunju *et al.*. Adsorption behavior of Cu(II) ion by the poly acrylic acid-polyvinylidene fluoride blending resin[J]. *China Environmental Science*, 2007, **28**(3): 322~326
- 宋来洲, 董春艳, 张尊举等. 聚丙烯酸-聚偏氟乙烯树脂对 Cu(II)的吸附性能[J]. *中国环境科学*, 2007, **28**(3): 322~326
- Song Laizhou, Zhang Zunju, Zheng Qiuyan. Adsorption characteristics of Cu²⁺ ion onto polyvinylidene fluoride blending modified membrane[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(11): 2500~2506
- 宋来洲, 张尊举, 郑秋艳. 聚偏氟乙烯共混改性膜对 Cu²⁺吸附性能的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2500~2506
- Zeng Lin, Wang Jibin, Song Laizhou. Adsorption behavior of Cu²⁺ onto the poly acrylic acid-polyvinylidene fluoride blending membrane[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, **33**(3): 114~119
- 曾琳, 王继斌, 宋来洲. 聚丙烯酸-聚偏氟乙烯共混膜对 Cu²⁺吸附特性的研究[J]. *环境科学与管理*, 2008, **33**(3): 114~119
- M. Machida, M. Aikawa, H. Tatsumoto. Prediction of simultaneous adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto activated carbon by conventional Langmuir type equations[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **120**(3): 271~275
- Guan Yingjian, Peng Xiang, Gao Zhi *et al.*. Embedded three-dimensional imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 244~248
- 关颖健, 彭翔, 高志等. 嵌入式三维数字成像系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 244~248
- Yang Fang, Ma Yiwen, Gao Feng *et al.*. Multi-level wavelet domain decomposition based time-domain diffuse optical tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1571~1578
- 杨芳, 马艺闻, 高峰等. 一种基于多级小波域分解的时域扩散光学层析成像方法的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1571~1578
- Wang Weichao, Liu Yujia, Tobias Braeuler *et al.*. Frequency-domain optical coherent tomograph and the application in ophthalmology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 181~184
- 王纬超, 刘宇嘉, Tobias Braeuler 等. 频域光学相干层析成像及其在眼科中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 181~184
- Ding Zhihua, Chen Minghui, Wang Kai *et al.*. High-speed swept source and its applications in optical frequency-domain imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2469~2476
- 丁志华, 陈明惠, 王凯等. 快速扫频光源及其在光学频域成像中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2469~2476
- B. Jacobson. Dichromatic absorption radiography-dichromography[J]. *Acta Radiol*, 1953, **39**: 437~52
- H. Zhang, Y. Zhu, B. Bewer *et al.*. Comparison of iodine K-edge subtraction and fluorescence subtraction imaging in an animal system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A.*, 2008, **594**: 283~291
- A. Sarnelli, H. Elleaume, A. Taibi *et al.*. K-edge digital subtraction imaging based on a dichromatic and compact X-ray source[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2006, **51**: 4311~4328
- A. Robert, M. S. Kruger, A. Charles. Mistretta. Digital K-Edge Subtraction Radiography[J]. *Work in Progress Radiology*, 1977, **125**: 243~245
- L. A. Lehmann, A. Macovsky, W. R. Brody *et al.*. Generalized image combination in dual KVP digital radiography [J]. *Med. Phys.*, 1981, **8**: 659~67
- A. Sarnelli, H. Elleaume, A. Taibi *et al.*. K-edge digital subtraction imaging with dichromatic X-ray sources: SNR and dose studies[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2006, **51**: 4311~4328
- Xue Yanling, Xiao Tiqiao, Du Guohao *et al.*. Microscopic identification of panax quinquefolium and panax ginseng by X-ray phase contrast imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1828~1832
- 薛艳玲, 肖体乔, 杜国浩等. 西洋参和高丽白参的 X 射线显微鉴定研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1828~1832
- Li Qianqian, Li Yijiu, Xiang Bo. Application of the macromolecule-chelating agent to the treatment of heavy metal wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2004, **14**(7): 5~8
- 李倩倩, 李义久, 相波. 高分子螯合剂在重金属废水处理中的应用[J]. *工业水处理*, 2004, **24**(7): 5~8
- Li Baolei, Yang Min, Fu Jian *et al.*. Two ring artifact correction methods for computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1849~1853
- 李保磊, 杨民, 傅健等. 两种 CT 成像环状伪影校正方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1849~1853