

Ⅱ. 尾矿砂对重金属的吸附作用

栾兆坤 汤鸿霄

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

摘 要

本文研究了尾矿砂颗粒对Cu, Pb, Cd三种重金属离子的吸附作用, 以及各种环境条件因素对颗粒表面吸附作用的影响。实验结果表明, 细微尾矿砂颗粒对溶液中的重金属离子具有较强烈的吸附作用, 并且强烈地依赖于溶液的pH。根据表面络合反应, 对尾矿砂颗粒表面基团可能参与的表面络合反应和吸附的重金属形态进行了讨论, 并应用简化络合反应模式, 求取了尾矿砂颗粒与Cu, Pb, Cd的表面络合形成的条件稳定常数 pK_{ad} 。

关键词: 尾矿砂, 表面特征, 重金属, 吸附。

固体颗粒对重金属离子的吸附作用, 对重金属污染物在天然水体中的形态分布、迁移转化规律及其归宿起到了十分显著的影响^[1]。天然水体中各种悬浮颗粒物对重金属的吸附作用以及表面络合反应, 如各种粘土矿物^[2,3]、金属水合氧化物^[3,4]、硫化矿物^[5], 以及天然水体悬浮沉积物组份^[6]等已有较多的研究报道。这些研究为了解天然水体中重金属的迁移转化规律及其生物可给性提供了必要的科学依据。

在前文中, 我们已对尾矿砂颗粒的物理化学特征及表面化学特性进行了表征研究^[6]。在这篇文章中, 主要研究了尾矿砂颗粒对重金属离子, 如 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 的吸附作用, 以及各种水环境条件的影响。根据实验数据, 应用简化表面络合模式求取了表面络合条件稳定常数。为酸性矿山废水污染河流的化学平衡模式和颗粒物迁移动力学模式的研究提供必要的基础数据。

实 验 部 分

实验所用尾矿砂颗粒取自德兴铜矿选厂尾矿库。经水分筛分和风干处理后, 主要的物理化学特征如表1所示。

吸附剂是将尾矿砂颗粒用去离子水精配成10.00g/l的浓悬浊液。吸附质均采用分析纯硝酸盐, 并用去离子水配制成含 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 各为1.000g/l的浓溶液。

在一系列100ml塑料瓶中, 吸取5ml浓尾矿砂悬浊液和5mL 1mol/l $NaNO_3$, 加入30ml去离子水, 用0.02mol/l $NaOH$ 或 HNO_3 预调整pH为4.0—8.0范围, 然后分别移取 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 的浓溶液0.2—20mg/l, 最后再加入少量去离子水, 使瓶中吸附液总体积达到50.0ml。吸附液放置于 $2.5 \pm 1^\circ C$ 的恒温箱中恒温振荡3h, 静置过夜后用0.45 μm 微孔滤膜过滤。头10ml滤液弃掉, 取后10ml滤液加0.1mol/l HNO_3 调pH < 2.0。用日立180-80型原子吸收分光光度计分别测定酸化滤液中铜、铅、镉的含量。过滤前悬浊液的上澄液用Orion-9100型酸度计精确测定平衡后的pH, 测定精度为 ± 0.05 。

表 1 尾矿砂颗粒的主要物理化学特征

Table 1 Main characteristics of physiochemistry for ore tailing particles

矿物组成	主要化学组份	粒径分布, 个数(%)	比表面积	总吸附位
α -石英砂、高岭石、 蒙脱石、绿泥石、 云母,	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{S}, \text{Cu}$	$<2.74\mu\text{m}, 38.94$ $<5.4\mu\text{m}, 45.58$ $<10\mu\text{m}, 8.56$	30—40(m^2/g)	$3.86 \times 10^{-4}(\text{mol}/\text{g})$

pH单位。

所用实验器皿均预先在2.0mol/l HNO_3 溶液中浸泡48 h, 滤膜则浸泡在0.02mol/l HNO_3 溶液中, 使用时用去离子水反复洗涤烘干, 以减少器壁和滤膜吸附的损失。所有吸附液均为0.1mol/l NaNO_3 离子强度。

结 果 与 讨 论

1. 尾矿砂的吸附作用及环境条件的影响

1.1 pH对尾矿砂颗粒吸附的影响

在不同pH范围(4.0—8.0)和不同吸附质浓度(Cu^{2+} 为0.2—20ppm; Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 为0.2—10ppm)范围, 尾矿砂颗粒对铜、铅、镉的吸附百分数随pH变化结果示于图1。由图1可见, 三种重金属离子的吸附百分数均随pH升高而迅速增加, 同时随吸附质浓度增加, 吸附百分数向高pH值方向平行移动约为0.3—0.5个pH单位。这三种重金属离子明显吸附的pH范围大致在2个pH单位, 如 Pb^{2+} 大致发生在pH4.5—6.0, Cu^{2+} 大致在

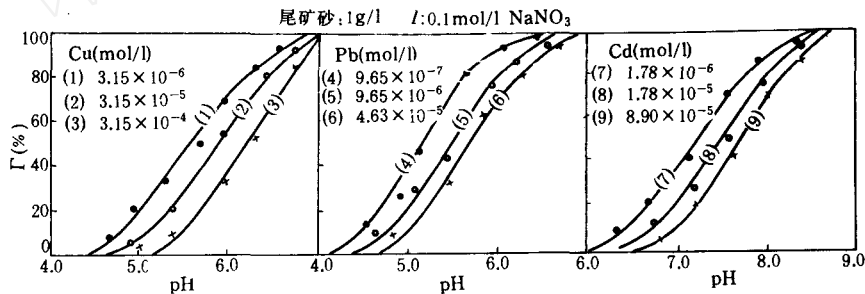
图 1 尾矿砂颗粒对 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 的吸附作用

Fig.1 Fractional adsorption of Cu^{2+} onto ore tailing particles as a function of pH and $\text{Cu}_T, \text{Pb}_T, \text{Cd}_T$

pH5.0—7.0, 而 Cd^{2+} 则在pH6.3—8.5。实验发现, 在pH低于4.5以下时, Cu^{2+} 的吸附呈负吸附现象, 这可能与矿物尾矿砂颗粒中的Cu在酸性pH条件下释放有关。结果表明, 细微的尾矿砂颗粒对重金属离子具有相当强的吸附能力, 尤其是在pH5以上。若以吸附量的50%以上的pH值作为特征吸附pH值, 即 pH_{50} 。可以看出, Pb^{2+} 的 pH_{50} 在pH5.2—5.5, Cu^{2+} 的 pH_{50} 在pH5.7—6.2, Cd^{2+} 的 pH_{50} 则在7.3—7.8, 其吸附强度为 $\text{Cd}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Pb}^{2+}$ 。

为了更确切地了解尾矿砂颗粒对重金属离子的吸附作用, 以化学平衡模式分别计算

了铜、铅、镉的形态分布随pH的变化,结果示于图2。计算结果表明,在pH6.3以前,三种重金属均没有发生沉淀作用。其存在形态主要为 Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 和 CuOH^+ , PbOH^+ , CdOH^+ 。在pH6.6时,大约60%的铜,30%的铅被沉淀,而镉只在pH8.5以上才沉淀。与图1的吸附结果相比,只有20ppm的 Cu^{2+} 吸附质浓度与计算浓度相等,而其它所有吸附质浓度均低于计算浓度值约1—2个数量级。显然,三种重金属离子的吸附pH范围均明显低于其沉淀生成的pH范围,即 $\text{pH}_{\text{ad}} < \text{pH}_{\text{sp}}$ 。因此可证实,在pH5—范围内, Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 的去除主要归于尾矿砂颗粒吸附作用所致。

1.2 重金属离子竞争吸附的影响

以不同浓度的 Cu^{2+} , Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的硝酸盐溶液混合配制成混合吸附质溶液,对三种重金属离子在尾矿砂颗粒表面的竞争吸附作用进行了实验,结果如图3—5所示。由图3可见,当混合吸附质溶液中 Cu^{2+} , Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的浓度均为2ppm时,三种金属离子的吸附百分数变化与图1所示的吸附百分数几乎一致,无明显的变化,而当混合吸附质溶液

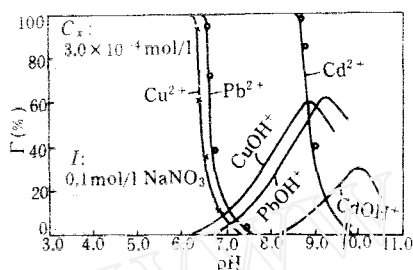


图2 三种重金属离子的形态随pH变化关系

Fig.2 The species distribution of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} ions as a function of pH

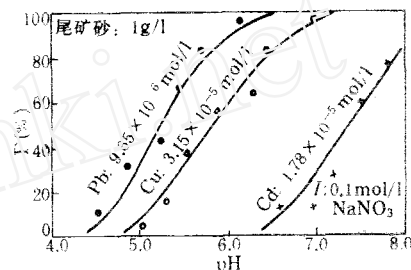


图3 Cu^{2+} , Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的竞争吸附作用

Fig.3 Competitive adsorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} onto ore tailing particles

中 Cu^{2+} 浓度高于 Cd^{2+} 浓度一个数量级时,如图4所示, Cd^{2+} 的吸附百分数明显向高pH方向移动约0.2—0.3个pH单位,并趋于与图3所示的高浓度 Cd^{2+} 吸附曲线一致。在相同

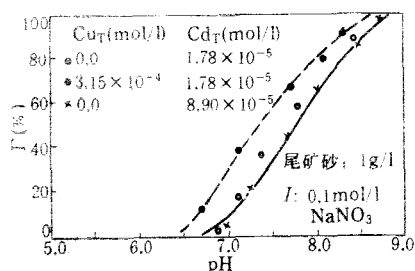


图4 Cu^{2+} 对 Cd^{2+} 的竞争吸附作用

Fig.4 Competitive adsorption of Cu^{2+} and Cd^{2+} onto ore tailing particles

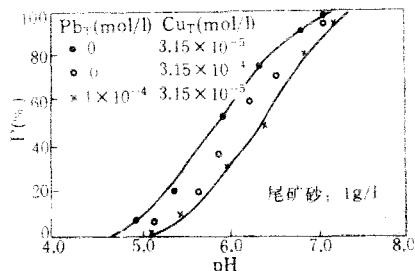


图5 Pb^{2+} 对 Cu^{2+} 的竞争吸附作用

Fig.5 Competitive adsorption of Pb^{2+} and Cu^{2+} onto ore tailing particles

pH时, 吸附量约降低20—30%。当混合吸附质中 Pb^{2+} 的浓度高于 Cu^{2+} 一个数量级时, 如图5所示, Cu^{2+} 的吸附百分数也向高pH方向移动约0.2—0.4个pH单位。相反, 当混合吸附质溶液中 Pb^{2+} 浓度大于 Cu^{2+} 浓度一个数量级时, Pb^{2+} 的吸附百分数随pH的变化却很小。这些结果表明, 在竞争吸附阳离子存在时, 只有在吸附强度较大的重金属离子浓度有明显增加时, 才会对吸附强度较弱的重金属离子的吸附作用产生明显的影响。在相同浓度条件下, 各重金属离子之间的竞争吸附作用并不明显。这也表明, 由于尾矿砂颗粒是由多种粘土矿物或氧化物颗粒组份组成的, 各组份颗粒表面可能具有不同的吸附

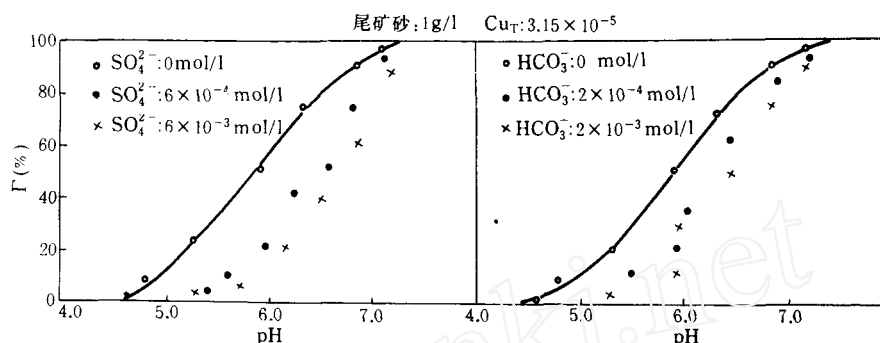


图6 阴离子对 Cu^{2+} 吸附作用的影响

Fig. 6 Effect of anion on the adsorption of Cu^{2+} onto ore tailing particles

活性位, 并对不同重金属离子具有不同的吸附选择性。在较高浓度的强吸附质存在时, 它们将优先选择并占据颗粒表面较强的活性位部份, 而相对较弱的吸附质将占据表面较弱的活性位部分^[7]。

1.3 阴离子吸附作用的影响

酸性矿山废水中含有大量的 SO_4^{2-} 阴离子。因此, 在研究尾矿砂颗粒对重金属离子吸附时, 必须考虑水体中 SO_4^{2-} 或 HCO_3^- 阴离子吸附作用的影响。图6是在 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 阴离子存在时, Cu^{2+} 在尾矿砂颗粒表面的吸附作用。由图6可见, 在 SO_4^{2-} 或 HCO_3^- 阴离子浓度明显高于吸附质浓度2—3个数量级时, 尾矿砂颗粒对 Cu^{2+} 的吸附作用均明显降低。这是由于 SO_4^{2-} 或 HCO_3^- 在颗粒表面的专属吸附作用而导致颗粒表面负电性增加, 同时占据相当数量的表面活性位所致^[8]。前文已指出, 在pH4.0—8.0范围, 尾矿砂颗粒表面电荷呈负电性, 并且随溶液中 SO_4^{2-} 浓度的增加而趋于更负值^[6]。另外, SO_4^{2-} 或 HCO_3^- 与重金属离子的络合形成可溶性金属-配位体络合物, 如 $Cu(SO_4)_x$ 或 $Cu(CO_3)_x$ 也会导致尾矿砂颗粒对铜吸附作用的降低^[9]。

1.4 尾矿砂颗粒浓度的影响

不同浓度的尾矿砂悬浊液对 Cu^{2+} 吸附作用的影响如图7所示。由图7可见, 当尾矿砂颗粒浓度增加时, 吸附百分比也明显增大, 但单位表面吸附的 Cu^{2+} 则减少, 如以单位表面吸附量, 即 mol/m^2 计算。在pH5.5时, 1g/l尾矿砂吸附剂的单位吸附量为 $2.52 \times 10^{-7} mol/m^2$, 而5g/l尾矿砂吸附剂的单位吸附量则为 $1.70 \times 10^{-7} mol/m^2$ 。大约降低

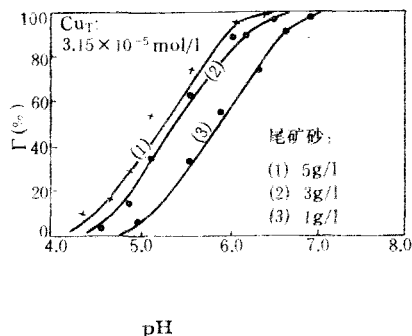


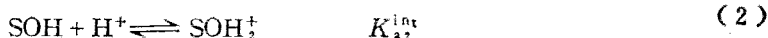
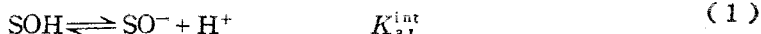
图 7 尾矿砂颗粒浓度对 Cu^{2+} 吸附的影响

Fig.7 Fractional adsorption of Cu^{2+} onto ore tailing particles as a function of pH and concentrations of ore tailing particles

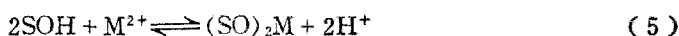
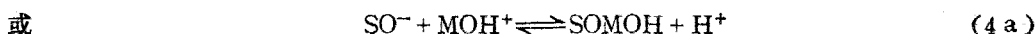
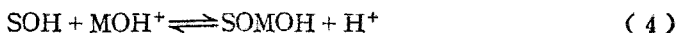
30%。这可能是由于吸附剂浓度增加而导致单位体积内的颗粒数目增大, 导致颗粒的聚集并降低了颗粒部分表面积, 从而使单位颗粒表面吸附位减少。

2. 表面络合吸附模式与条件稳定常数

关于粘土矿物, 氧化物颗粒表面的吸附作用机理已有许多的研究报道, 并已相应提出多种吸附模式来描述这些吸附行为^[10-12]。根据表面络合模式, 各种阳离子或阴离子在颗粒表面的吸附作用常被看作是一种表面络合形成反应, 反应趋势随溶液pH值和表面羟基基团的碱度增加而增大^[12]。因此, 表面络合反应特征强烈地依赖于pH值、颗粒表面特征及吸附质浓度。颗粒表面羟基基团(SOH)的离子化反应及酸度固有常数 K_{a1}^{int} 和 K_{a2}^{int} 的关系为:



前文中, 我们已求取了尾矿砂颗粒的表面酸度固有常数 $\text{p}K_{a1}^{\text{int}}$ 和 $\text{p}K_{a2}^{\text{int}}$ 分别为1.50和6.70, pH_{zpc} 为 4.0 ± 0.3 , 即尾矿砂颗粒表面电荷在pH4.0以上均呈负电荷。吸附实验已表明, 尾矿砂颗粒对重金属的吸附作用强烈依赖于pH、吸附剂数量和吸附质浓度及类型。因此, 在尾矿砂的吸附过程中, 颗粒表面羟基基团与重金属离子之间可能发生的表面络合反应为^[32]:



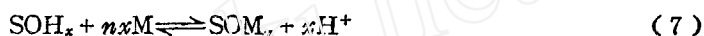
上述这些反应过程包括了表面络合反应过程中所消耗的表面羟基离子或释放质子。因此, 这些反应式可能综合地说明了尾矿砂颗粒表面的吸附行为, 颗粒表面吸附作用导致表面质子的释放已得到证实^[32]。

目前, 对于氧化物或矿物颗粒表面的吸附形态, 即是以金属自由离子形态(M^{2+})还

是以金属羟基离子形态(MOH^+)吸附仍存在争议^[3,12]。但近期已有许多研究表明,金属在恒电位表面的吸附能够通过 MOH^- 形态进行,即水解与吸附作用同时进行^[3]。Huang等也曾指出^[13],金属在颗粒表面的吸附反应应包括所有金属的水解形态,即 $\text{M}(\text{OH})_n^{3-}$,因此,金属的吸附总量应是导致表面络合形成的各组份吸附密度之和。虽然在图2所示的金属形态分布图中,在本实验pH范围,生成的 MOH^+ 浓度较低,但由于颗粒表面双电层的电位差、水的介电常数、溶剂化作用位能以及表面粘附性等综合作用结果,尤其在高pH范围,这些金属水解形态在颗粒表面的吸附作用可能会增强。因而,颗粒表面专属吸附作用应包括表面活性基团与水解形态的相互结合。

在尾矿砂颗粒的表征一文中^[6],已表明颗粒表面固有常数 $\text{p}K_{\text{a1}}^{\text{int}}$ 和 $\text{p}K_{\text{a2}}^{\text{int}}$ 大致分别在5.0—7.8或9.0—11.0, pH_{zpc} 在7.5—8.5。因此,在 $\text{pH}4.0-8.0$ 范围内,尾矿砂颗粒表面呈负电性,即以负电荷表面形态(SO^-)的吸附结合为主,金属离子或其水解形态与表面形态 SO^- 和 SOH 结合而形成表面络合物,如 $(\text{SO}^-)_2\text{M}$ 等。

上述各表面络合反应式也表明尾矿砂颗粒表面拥有不同强度的表面活性吸附位,但这些表面活性吸附位及其吸附强度是难以确切进行定量表达的。为了求取颗粒表面络合形成稳定常数,我们把上述所有表面络合反应概括为一个总的表面络合反应,即:



$$K_{\text{ad}} = \frac{[\text{SOM}_n][\text{H}^+]^x}{[\text{SOH}_x][\text{M}]^n} \text{EDL} \quad (8)$$

这里, $[\text{SOH}_x]$ 和 $[\text{SOM}_n]$ 分别代表未被结合的所有尾矿砂颗粒表面活性位(g/l)和已被结合的所有金属形态的浓度(mol/l)。 $[\text{M}]$ 代表溶液中金属的平衡浓度(mol/l)。 $[\text{H}^+]^x$ 中的 x 则代表在整个反应过程中,每结合一个金属离子时所释放 $[\text{H}^+]$ 的平均数。 K_{ad} 为总的表面络合形成条件稳定常数。EDL表示颗粒表面常数的静电校正项,在模式计算中取决于所选择的双电层结构和颗粒表面电荷密度。研究已指出^[12],在固定的离子强度(如在0.1mol/l NaNO_3 溶液中)以及金属离子吸附pH范围(如 Cu^{2+} 的吸附pH在4.6—6.3)内,EDL项的变化影响很小。因此,可将EDL隐含到常数项中,即 $K'_{\text{ad}} = K_{\text{ad}}/\text{EDL}$,则:

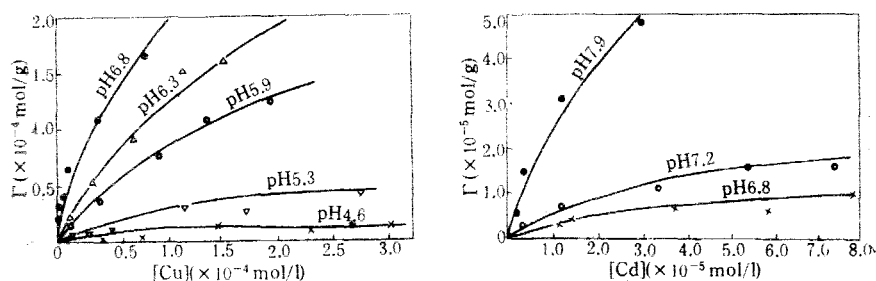
$$K'_{\text{ad}} = \frac{[\text{SOM}_n][\text{H}^+]^x}{[\text{SOH}_x][\text{M}]^n} \quad (9)$$

反应式(9)的 K'_{ad} 则代表上述所有表面络合反应形成的总条件稳定常数。

在特定pH条件下,尾矿砂颗粒对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附等温线分别绘制于图8中。从图8的吸附等温线来看,尾矿砂颗粒的吸附量取决于pH即随溶液pH值增大,吸附量明显增加。在某特定pH条件下,吸附常数 K_f 为:

$$K_f = [\text{SOM}_n]/[\text{SOH}_T][\text{M}]^n = \Gamma/[\text{M}]^n \quad (10)$$

这里, $[\text{SOH}_T]$ 表示尾矿砂颗粒总表面吸附位,即吸附剂浓度(g/l)。 $[\text{SOM}_n]$ 表示已被吸附的金属离子浓度(mol/l), $[\text{M}]$ 则表示溶液中金属的平衡浓度(mol/l), n 为反应配比数。 $\Gamma = [\text{SOM}_n]/[\text{SOH}_T]$,即单位重量吸附剂所吸附金属的量(mol/g)。在表面络合反应中,假定未被结合的颗粒表面活性位等于吸附剂的浓度,即 $[\text{SOH}_x] = [\text{SOH}_T]$,则(9)式可改写为:

图 8 尾矿砂颗粒对 Cu^{2+} , Cd^{2+} 的吸附等温线Fig.8 Adsorption isotherm for adsorption of Cu^{2+} and Cd^{2+} onto ore tailing particles

$$K'_{\text{ad}} = \frac{[\text{SOM}_n][\text{H}^+]^x}{[\text{SOH}_T][\text{M}]^n} \quad (11)$$

式(11)整理并取对数, 则为:

$$\lg \frac{[\text{SOM}_n]}{[\text{SOH}_T][\text{M}]^n} = \lg K'_{\text{ad}} + x\text{pH} \quad (12)$$

从式(12)可见, 单位颗粒表面所结合的金属浓度与溶液中金属的平衡浓度比值的对数与pH之间成线性关系, 其截距即为络合形成条件稳定常数 K'_{ad} , 斜率则为反应过程中所释放的平均质子数 x . 由于 $K_t = [\text{SOM}_n]/[\text{SOH}_T][\text{M}]^n$, 因此:

$$\lg K_t = \lg K'_{\text{ad}} + x\text{pH} \quad (13)$$

由式(13)可知, 只要求取吸附常数 K_t , 以 $\lg K_t$ 对pH作图, 即可求取表面络合形成条件稳定常数 K'_{ad} 值. 根据Freundlich吸附等温式求取不同pH条件的 K_t 值和由式(13)求取的 K'_{ad} 分别列于表2和表3中. 所有统计相关系数均在0.96—0.99之间.

表 2 三种重金属的吸附常数

Table 2 Adsorption constants for adsorption of Cd^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} on tailing ore particles

吸附质	pH	K_t	n	吸附质	pH	K_t	n
Cu^{2+}	5.32	1.12×10^{-2}	0.703	Pb^{2+}	5.40	1.12×10^{-1}	0.85
	5.90	5.25×10^{-2}	0.705		6.00	1.96×10^{-1}	0.721
	6.30	1.86×10^{-1}	0.701		6.50	9.12×10^{-3}	0.712
Pb^{2+}	4.50	2.63×10^{-3}	0.810	Cd^{2+}	7.20	2.0×10^{-2}	0.726
	4.80	2.90×10^{-2}	0.821		7.90	4.63×10^{-1}	0.730

表 3 三种金属的条件表面络合稳定常数

Table 3 Conditional surface complexation constants for adsorption of Cd^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} on ore tailing particles

吸附质	$\lg K_t = \lg K'_{\text{ad}} + x\text{pH}$	K'_{ad}	x
Cu^{2+}	$\lg K_t = -9.85 + 1.46\text{pH}$	1.41×10^{-10}	1.46
Pb^{2+}	$\lg K_t = -8.75 + 1.39\text{pH}$	1.78×10^{-9}	1.39
	$\lg K_t = -10.13 + 1.22\text{pH}$	7.41×10^{-17}	1.22

从表2和表3数据可见,三种金属的吸附系数 K_d 值均随溶液pH升高而明显增大,表明吸附反应明显依赖于pH,三种金属的表面络合形成条件稳定常数 K'_{ad} 大小的次序为 $Pb > Cu > Cd$,大致相差一个数量级,这与吸附实验结果是一致的。另外,三种金属的反应配比数 n 值与pH无关,大致均在0.7—0.8之间,而表面络合反应释放的质子数 x 值均在1.22—1.46,说明尾矿砂颗粒表面吸附位与三种金属之间的反应配比是1:(0.7—0.8),而不是1:1的关系,即一个金属离子可能与一个以上表面活性吸附位反应形成表面络合物。这也进一步表明,由多种粘土矿物和氧化物矿物颗粒组成的尾矿砂,其表面的羟基基团可能具有不同的离子化趋势,并存在不同类型和强度的表面活性位。

结 论

本文着重研究了三种重金属离子在尾矿砂颗粒表面上的吸附行为以及环境条件因素对颗粒表面吸附作用的影响。吸附实验表明,三种重金属离子在尾矿砂颗粒表面的吸附作用明显依赖于pH值、吸附质和吸附剂的浓度,其吸附作用符合于Freundlich型吸附等温式。根据表面络合反应原理,对尾矿砂颗粒表面可能参与络合反应的金属形态和表面形态进行了讨论,并应用简化的表面络合反应模式计算了三种重金属离子的表面络合形成条件稳定常数 K'_{ad} 和反应释放质子数 x ,计算的结果与实验和分析结果十分吻合。根据本文计算求取的表面络合条件稳定常数以及前文中计算的表面固有常数 K_{a1}^{int} , K_{a2}^{int} 等表面络合反应基本参数,应用表面络合模式可进行深入的模式计算研究,同时也为酸性矿山废水污染河流的化学平衡和动力学模式提供基础数据。

参 考 文 献

- [1] Tang H X, Xue H B, 1983, The Model of Aquatic Suspended Sediments as a Multicomponent Adsorbent to Heavy Metals, Proc. Intern. Conf. on Heavy Metals in the Environment, V. Z. p884—887, Heidelberg
- [2] James R O, Machaughton M G, 1977, The Adsorption of Aqueous Heavy Metals on Inorganic Minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41:1549—1555
- [3] Davis T A, Leckie J U, 1978, Surface Ionization and Complexation at the Oxide/Water Interface, II. Surface Properties of Amorphous Iron Oxyhydroxide and Adsorption of Metal Ions. *J. Colloid and Inter. Sci.*, 67:90—97
- [4] James R O, Healy T W, 1972, Adsorption of Hydrolyzable Metal Ions at the Oxide-Water Interface. *J. Colloid and Inter. Sci.*, 40:42—52
- [5] Jean G, Bancroft G M, 1986, Heavy Metal Adsorption by Sulphide Mineral Surfaces. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50:1455—1463
- [6] 栾兆坤, 汤鸿霄, 1993 尾矿砂颗粒表面特征与吸附作用的研究。I. 尾矿砂颗粒的表征。环境化学, 12(5):347
- [7] Benjamin M M, Leckie J U, 1981, Multiple-site Adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on Amorphous Iron Oxyhydroxide. *J. Colloid and Inter. Sci.*, 79:209—221
- [8] Davis J A, Leckie J U, 1980, Surface Ionization and Complexation at the Oxide/Water Interface, III. Adsorption of Anions. *J. Colloid and Inter. Sci.*, 74:32—41
- [9] Benjamin M M, Leckie J U, 1982, Effects of Complexation by Cl^- , SO_4^{2-} and $S_2O_3^{2-}$ on Adsorption of Cd, on Oxide Surface. *Environ. Sci. Technol.*, 16:162—170
- [10] Hohl H, Stumm W, 1976, Interaction of Pb with Hydrous- Al_2O_3 . *J. Colloid and Inter. Sci.*, 55:469—458
- [11] Farley K J et al., 1984, A Surface Precipitation Model for the Adsorption of Cations on Metals Oxides. *J. Colloid and Inter. Sci.*, 106:226—242
- [12] Davis J A, Leckie J U, 1978, Surface Ionization and Complexation at the Oxide/Water Interface, II. Surface Properties of Amorphous Iron Oxyhydroxide and Adsorption of Metal

- Ions, *J. Colloid and Inter. Sci.*, 67:90—97
[13] Huang C P et al., 1988, Adsorption of Zn(II) onto Hydrous Aluminosilicates, *J. Colloid and Inter. Sci.*, 131:289—306

1993年4月20日收到,

II. Adsorption of heavy metals onto ore tailing particles

Luan Zhaokun Tang Hongxiao

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy
of Sciences, Beijing 100085)

ABSTRACT

In the part of the paper, the adsorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} on ore tailing particles has been studied as a function of pH, concentrations of adsorbates and adsorbent. These results showed that the fine-grained ore tailing particles were excellent scavengers for heavy metal ions. The adsorption was strongly pH-dependent. Conditional adsorption constants of surface complexes of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} with ore tailing particles were calculated by a simplified surface complexation model.

Keywords: ore tailing particles, heavy metals, adsorption.