文章编号: 1004-0609(2008)S1-0166-06

201×7 树脂对铁氰络合物的吸附动力学

兰新哲,李秀玲,宋永辉,张秋利

(西安建筑科技大学 贵金属工程研究所,西安,710055)

摘 要: 对 201×7 树脂吸附铁氰化合物的过程进行动力学研究。结果表明,201×7 树脂对铁氰化合物有很好的 吸附效果。在 298 K 时,201×7 树脂对亚铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]⁴⁻和铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]³⁻的静态饱和吸 附量分别为 8.620 和 12.072 mg/mL。用均相颗粒扩散模型和收缩核模型对吸附参数进行描述,表明 201×7 树脂 对[Fe(CN)₆]³⁻和[Fe(CN)₆]⁴⁻的吸附过程均属于液膜扩散控制。由树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻的等温吸附线得到 Freundlich 常数 n 分别为 4.786 和 6.145; 吸附过程中分离系数 S 和选择系数 K 均大于 1,表明 201×7 树脂对 [Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻两种络合离子都是容易吸附的,而且[Fe(CN)₆]³⁻离子比[Fe(CN)₆]⁴⁻离子更容易被吸附。 关键词: 201×7 树脂; 铁氰化物; 吸附; 动力学

中图分类号: X 703 文献标识码: A

Adsorption kinetics of 201×7 resin for iron cyanocomplexes

LAN Xin-zhe, LI Xiu-ling, SONG Yong-hui, ZHANG Qiu-li

(Institute of Precious Metal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Kinetics measurements on the adsorption of iron cyanocomplexes with the 201×7 ion-exchange resin were investigated. The results show that the 201×7 resin has good adsorption ability for iron cyanocomplexes. The static saturated adsorptive capacity at 298 K is 8.620 and 12.072 mg/mL for ferrocyanide $[Fe(CN)_6]^{4-}$ and ferricyanide $[Fe(CN)_6]^{3-}$, respectively. Analyses of the respective rate data in accordance with homogeneous particle diffusion model and shell progressive model are used to explain the ions adsorption kinetics, which indicates that the controlling step of adsorbing $[Fe(CN)_6]^{3-}$ and $[Fe(CN)_6]^{4-}$ is liquid film diffusion. Isotherm adsorption curves deduce that Freundlich constant, *n*, is 4.786 and 6.145 for $[Fe(CN)_6]^{4-}$ and $[Fe(CN)_6]^{3-}$, respectively. In adsorption process, the separation factor *S* and selectivity coefficient *K* are both greater than 1. The facts indicate that both $[Fe(CN)_6]^{4-}$ and $[Fe(CN)_6]^{3-}$ are easily adsorbed on 201×7 resin, furthermore, the adsorption of $[Fe(CN)_6]^{3-}$ on 201×7 resin is easier than that of $[Fe(CN)_6]^{4-}$. **Key words:** 201×7 resin; iron cyanocomplex; adsorption; kinetics

从提金尾液中回收氰化物具有重要的环保和经济 价值,目前用离子交换树脂回收氰化物已经迅速发展 起来^[1]。加拿大 FlinFlon 矿最早研究了用酸化法回收 尾液中的氰化物,酸化过程将氰化物分解为游离氰化 物(HCN)和金属离子,再通过挥发和中和工艺可以有 效回收氰化物。 但是当尾液中有亚铁氰化物存在时,树脂上就会 出现普鲁士蓝沉淀,一般表达式是 Me₂Fe(CN)₆·H₂O (Me=Cu, Ni, Zn)。有研究发现这种沉淀会使树脂中毒, 而且非常稳定很难分解^[2-3]。铁氰化络合离子 [Fe(CN)₆]³⁻和亚铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]⁴⁻稳定常数 都很高, lg*K*分别为 43.6 和 35.4,立体化学结构均为

通讯作者: 宋永辉; 副教授; 电话: 029-82201248; E-mail: syh1231@126.com

八面体,属于强稳定性氰化物。

本文作者主要对 201×7 树脂吸附两种铁氰络合物的动力学过程进行研究,对实验过程中得到的动力 学数据进行图解和数值分析,从而得到吸附速率控制 步骤和离子交换过程的动力学参数。这一研究可为树 脂上铁氰络合物的有效解吸,解决树脂中毒问题提供 一定的理论依据。

1 实验

1.1 材料与设备

实验所用 201×7 树脂(南开大学提供)经预处理转 型为 Cl 型^[4]。

实验所用单纯的铁氰化物溶液和亚铁氰化物溶液 分别由相应的金属氰化物盐 K₃Fe(CN)₆(AR)和 K₄Fe(CN)₆·3H₂O(AR)配制而成。混合溶液含有两种铁 氰化合物(铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]³⁻和亚铁氰化络 合离子[Fe(CN)₆]⁴⁻),且铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]³⁻的 浓度稍高于亚铁氰化络合离子[Fe(CN)₆]⁴⁻的浓度。配 制的模拟溶液的质量浓度约 80.37 mg/L,与提金尾液 的组成基本一致。溶液中添加质量分数为 2.0×10⁻⁶ 的氰化钾(AR)及氢氧化钾(AR),以调整 pH 值保持在 10.0~10.5 之间,溶液中没有沉淀出现。所有的氰化 物溶液在使用前均置于容积为1L 的 PVC 瓶中,冷藏 于4 ℃条件下。

实验所用设备有: HH-4 恒温水浴锅, 78-1 磁力加热搅拌器, TG328A 电子天平和 6800A 原子吸收光谱仪。

1.2 吸附和分析方法

量取一定体积的预处理树脂置于烧杯中,加入铁 氰化物溶液或亚铁氰化物溶液进行静态平衡吸附实 验。在一定温度下将烧杯至于磁力搅拌器中进行搅拌 实验。在达到吸附平衡之前不断量取上层澄清溶液, 分析铁的浓度^[5-6]。吸附容量 *Q*(mg/mL)和吸附率 *E*(%) 可由下面的公式计算得到(公式中符号的意义和单位 详见文后附录):

$$Q = \frac{(\rho_0 - \rho_e)V}{V_r} \tag{1}$$

$$E = \frac{\rho_0 - \rho_e}{\rho_0} \times 100\%$$
 (2)

溶液中铁的浓度通过原子吸收光谱仪测量。

2 离子交换过程的动力学模型

铁氰化合物在离子交换树脂上的交换反应,同其 它的固液间的多项反应一样,可以由一系列的控制速 率的步骤来描述: 1)离子扩散通过颗粒周围的液膜 (膜扩散(LFD)): 2)离子扩散通过树脂聚合物基体(颗 粒扩散控制(PDC)): 3)基体上附着的功能团的化学反 应。这 3 个连续发生的步骤中,通常有一个对离子交 换反应的阻力比其它两个要大,所以可以认为该步骤 为交换过程的速率控制步骤^[7]。这里选用了两个动力 学模型来描述 201×7 树脂对两种铁氰化络合离子的 吸附过程,即均相颗粒扩散模型(HPDM)和收缩核模 型(SPM),这两个模型已被广泛用于模拟离子交换过 程^[8–10]。

2.1 均相颗粒扩散模型(HPDM)

在这个模型中,离子交换机理是液相中的 [Fe(CN)₆]⁴⁻或[Fe(CN)₆]³⁻与树脂相中的 CI⁻克服一系列 阻力进行平衡扩散的过程。[Fe(CN)₆]⁴⁻或[Fe(CN)₆]³⁻ 与 CI⁻进行交换的过程可以严格的用 Nernst Plank 方程 来描述。

离子自溶液进入球形树脂相的颗粒扩散控制过程 可以用下面的方程进行描述:

$$-\ln(1-X^2) = 2kt, \quad k = \frac{D_r \pi^2}{r_0^2}$$
(3)

如果离子交换过程是由液膜扩散步骤控制的,可 以用下面的方程进行描述:

$$-\ln(1-X) = 2k_{1i}t, \quad k_{1i} = \frac{3Dc}{r_0^2 c_t}$$
(4)

2.2 收缩核模型(SPM)

当聚合物的空隙率比较小、对液体反应物不具有 渗透性时,离子交换过过程可以通过收缩核模型进行 研究。反应时间和反应程度之间的关系可以由下面的 公式进行描述。

树脂对某些离子具有很高的亲和力,吸附过程为 不可逆过程,用收缩核模性来描述这一过程是很有效 的。因为树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻均有很强的亲 和力,所以用收缩核模性来描述这一吸附过程的动力 学数据。

1) 当吸附过程为液膜扩散控制时,

$$X = \frac{3c_{A_0}K_{\rm m}}{a_0r_0\rho_{\rm S_0}}t\tag{5}$$

2) 当吸附过程为颗粒扩散控制时,

$$[3-3(1-X)^{2/3}-2X] = \frac{6k_{\rm S}D_{\rm A_0}}{r_0}t$$
(6)

3) 当吸附过程为化学反应控制时,

$$[1 - (1 - X)^{1/3}] = \frac{k_{\rm S} c_{\rm A_0}}{r_0} t \tag{7}$$

3 结果与讨论

3.1 静态饱和吸附容量的测定

实验温度为 298 K, 量取 5 mL 树脂两份置于不同的烧杯中,分别加入铁氰化溶液和亚铁氰化溶液,取样分析,测得一系列相应时间下树脂的吸附容量,如表1所列。

根据表 1 计算得到 201×7 树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻和 [Fe(CN)₆]³⁻离子的静态饱和吸附容量分别为 8.620 和 12.072 mg/mL。

3.2 吸附速率常数以及速率控制步骤的确定

量取 5 mL 树脂两份置于不同的烧杯中,分别加入铁氰化溶液和亚铁氰化溶液。在吸附过程中,不断 量取 10 mL 上层澄清溶液分析溶液中铁的浓度直至浓 度保持不变,进行体积修正得到一系列数据。

根据上述定义的 F(X)—t 的方程式(3)~(7),将所 有实验数据进行图解分析,如图 1 和图 2 所示。由图 可以看到,由于化学反应和颗粒扩散的实验数据经拟 合没有形成一条直线,所以吸附过程不是化学反应和 颗粒扩散控制的。而根据式(4)和(5),两种铁氰化离子 的数据进行拟合后均为直线,拟合数据如表 2 和 3 所 列。



图 1 [Fe(CN)₆]⁴⁻的动力学模型方程 F(X)的图解分析 Fig.1 Tests of kinetic model equation F(X) vs time defined by equations for [Fe(CN)₆]⁴⁻ (Resin 5.0 mL; [Fe(II)]₀=80.037 mg/L; *T*=298 K; Volume of solution 600.0 mL)

由表 2 和 3 中的线性回归结果可以看到,该吸附 过程可以用这两个方程进行描述,并通过直线斜率可 计算得到物质传递系数 K_m 和吸附速率常数 k_{1i} ,所以 可以确定树脂对[Fe(CN)₆]³⁻和[Fe(CN)₆]⁴⁻的吸附过程 是由液膜扩散为控制步骤的。表 2 和 3 中已得到液膜 扩散控制的吸附过程中的 K_m 和 k_{1i} ,对于[Fe(CN)₆]⁴⁻ 和[Fe(CN)₆]³⁻离子的吸附速率常数分别为 3.308×10⁻³ 和 5.498×10⁻³/s,物质传递系数 K_m 分别为 4.325×10⁻³ 和 6.321×10⁻³ m/s。

表1 静态饱和吸附容量的测定

Table 1 Determination of static saturated adsorptive capacity

T	Adsorptive capacity/(mg·mL ^{-1})					
Iron ion	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	
Fe(II)	6.044	7.824	8.620	8.618	8.621	
Fe (III)	9.688	11.398	12.073	12.071	12.073	

Resin 5.0 mL; $[Fe(II)]_0=80.360 \text{ mg/L}$; $[Fe(III)]_0=78.976 \text{ mg/L}$; Volume of ferrocyanide solution 800. 0 mL; Volume of ferricyanide solution 1 000. 0 mL

s168



图 2 [Fe(CN)₆]³⁻的动力学模型方程 F(X)的图解分析

Fig.2 Tests of kinetic model equation F(X) vs time defined by equations for $[Fe(CN)_6]^{3-}$ (Resin 5.0 mL; $[Fe(II)]_0=84.690$ mg/L; *T*=298 K; Volume of solution 600.0 mL)

Table 2 Lineal regression analysis of function $-\ln(1-X)$ vs time (t)							
Ion	Sample No.	Initial concentration/(mg·L ^{-1})	F(X)=f(t) intercept	r	k_{1i}/s	Average k_{1i}/s	
[Fe(CN) ₆] ^{4–}	1	41.231	2.04×10^{-2}	0.988	3.308×10^{-3}		
	2 3	60.048	1.21×10^{-2}	0.993	3.306×10^{-3}	2.208×10^{-3}	
		79.159	1.52×10^{-2}	0.997	3.308×10^{-3}	5.508 ~ 10	
	4	101.024	1.07×10^{-2}	0.986	3.309×10^{-3}		
$\left[\operatorname{Fe}(\operatorname{CN})_{6}\right]^{3-}$	1	40.265	1.71×10^{-2}	0.992	5.499×10^{-3}		
	2	61.387	3.04×10^{-2}	0.990	5.496×10^{-3}	5.400×10^{-3}	
	3	82.016	2.72×10^{-2}	0.998	5.498×10^{-3}	5.498 × 10	
	4	99.348	2.29×10^{-2}	0.989	5.499×10 ⁻³		

表 2 方程-ln(1-X)对时间(t)的线性拟合分析结果

表3 方程X对时间(t)的线性拟合分析结果

Table 3 I	Lineal	regression	analysis	of function	Xvs	time	(t))
							<u>ر ۲</u>	,

Ion	Sample No.	Initial concentration/(mg \cdot L ⁻¹)	F(X)=f(t) intercept	r	$K_{\rm m}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	Average $K_{\rm m}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$
[Fe(CN) ₆] ⁴⁻	1	42.310	3.09×10^{-3}	0.991	4.323×10^{-3}	
	2	58.324	2.17×10^{-3}	0.989	4.325×10^{-3}	
	3	80.235	3.75×10^{-3}	0.996	4.327×10^{-3}	4.325×10^{-3}
	4	99.309	3.87×10^{-3}	0.992	4.325×10^{-3}	
[Fe(CN) ₆] ³⁻	1	38.267	2.01×10^{-3}	0.995	6.320×10^{-3}	
	2	60.231	4.02×10^{-3}	0.987	6.320×10^{-3}	(221×10^{-3})
	3	81.067	3.18×10^{-3}	0.994	6.321×10 ⁻³	0.321 \ 10
	4	98.967	2.46×10^{-3}	0.989	6.323×10^{-3}	

3.3 等温吸附曲线

分别量取 2、4、6、8 和 10 mL 树脂各两份置于 不同的烧杯中,分别加入铁氰化溶液和亚铁氰化溶液, 实验条件为: [Fe(II)]₀=79.267 mg/L, [Fe(III)]₀=82.015 mg/L, *T*=298 K,总溶液体积 800.0 mL。用著名的 Freundlich 等温吸附方程进行线性拟合分析^[7]:

$$\lg Q_{\rm e} = \frac{1}{n} \lg \rho_{\rm e} + \lg k \tag{10}$$

当吸附达到平衡时,分别测得剩余氰化物的平衡 浓度 ρ_c(mg/L)和相应的吸附容量 *Q*(mg/mL),线性分析 如图 3 所示。





表 4	混合铁氰化溶液中的分离系数 S 和选择系数 J	K
Table	1 Separation factors S and selectivity coefficie	n

Freundlich 常数 n 可表征吸附材料的均一性或吸附反应的强度^[11]。当 n 在 2 和 10 之间时,可以认为吸附过程是容易进行的,而 n 小于 0.5 时吸附过程是 难以进行的。n 也可表征优惠吸附,当n 大于 1 时为 优惠吸附,等于 1 时为线性吸附,n 小于 1 时为非优 惠吸附。

根据 lg Q_e —lg ρ_c 线性关系得到树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻ 和[Fe(CN)₆]³⁻吸附的 Freundlich 常数 *n* 值分别为 4.768 和 6.145。当 *n* 在 2 和 10 之间时,表明 201×7 树脂对 [Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻两种离子的吸附过程均是容 易进行的^[12]。

3.4 吸附选择性的测定

量取 5.0 mL 树脂 3 份置于不同的烧杯中,分别加 入含有两种铁氰化离子的模拟溶液。吸附过程中不断 量取 10 mL 上层澄清液,分析测定溶液中铁的浓度直 至保持恒定,再进行体积修正得到一系列数据。

根据下面的公式计算得到分离系数 S_{A/B} 和选择系数 K_{A/B}^[13],如表4所示。

$$S_{A/B} = \frac{[\overline{A}][B]}{[A][\overline{B}]}$$
(8)

$$K_{A/B} = \frac{[\overline{A}]^{b}[B]^{a}}{[A]^{b}[\overline{B}]^{a}}$$
(9)

由表 4 中的数据可以看到分离系数 *S*_{A/B} 和选择系数 *K*_{A/B} 均大于 1,这表明 201×7 树脂对[Fe(CN)₆]³⁻的吸附较[Fe(CN)₆]⁴⁻更容易^[13]。通过以上实验可以得到树脂对对[Fe(CN)₆]³⁻的吸附速率要比对[Fe(CN)₆]⁴⁻的吸附快。因为树脂吸附[Fe(CN)₆]³⁻离子需要给出 3 个功能基进行交换,吸附一个[Fe(CN)₆]⁴⁻必须同时给出 4 个功能基,而对于长链的聚乙烯基体来说同时接近并交换 4 个功能基团是很困难的,所以树脂吸附 [Fe(CN)₆]³⁻离子要必吸附 [Fe(CN)₆]⁴⁻要容易^[14]。 SHARPE^[15]提到亚铁氰化离子是不稳定的,容易失去 一个价键而氧化成稳定的铁氰化离子。

Sample No. –	Initial concentration/(mg· L^{-1})		S 2 4	K	
	$\left[\mathrm{Fe}(\mathrm{CN})_{6}\right]^{3-}$	$[Fe(CN)_6]^{4-}$	\sim [Fe(CN) ₆] ²⁻ /[Fe(CN) ₆] ⁴⁻	$[Fe(CN)_6]^{-7}/[Fe(CN)_6]^{+7}$	
1	80.831	81.364	1.627	2.434	
2	78.264	82.109	1.565	2.093	
3	75.624	81.647	1.481	1.714	

le 4 Separation factors, S and selectivity coefficients K derived from mixed iron cyanide solutions

4 结论

1) 201×7 树脂对铁氰络合物有很好的吸附能力。 298 K 时, [Fe(CN)₆]⁴⁻和 [Fe(CN)₆]³⁻两种离子的静态 饱和吸附容量分别为 8.620 和 12.072 mg/mL。

2) 用颗粒扩散模型和收缩核模型对实验数据进行拟合,结果表明 201×7 树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻和 [Fe(CN)₆]³⁻两种离子的吸附过程均是液膜扩散控制。

3) 通过不同浓度的铁氰溶液的吸附实验得到 201×7 树脂对[Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻两种离子的吸 附速率常数分别为 3.308×10⁻²/s 和 5.498×10⁻²/s,物 质扩散系数分别为 4.325×10⁻³ m/s 和 6.321×10⁻³ m/s。

 4)吸附等温线得到[Fe(CN)₆]⁴⁻和[Fe(CN)₆]³⁻两种 离子的吸附 Freundlich 常数 *n* 分别为 4.786 和 6.145。
 n 的值在 2 和 10 之间表明吸附是容易进行的。

5)分离系数 *S* 和选择系数 *K* 均大于 1,表明 201 ×7 树脂对[Fe(CN)₆]³⁻的吸附较[Fe(CN)₆]⁴⁻更容易。

REFERENCES

- LEAO V A, CIMINELLI V S T, COSRA R S. Cyanide recycling using strong-base ion exchange resins [J]. Journal of Metals, 1998, 50(10): 71–74.
- FERNANDO K, TRAN T, LAING S, KIM K J. The use of ion exchange resins for the treatment of cyanidation tailings (part 1): Process development of selective base metal elution [J]. Minerals Engineering, 2002, 15: 1163–1171.
- [3] BACHILLER D, TORRE M, RENDUELES M. Cyanide recovery by ion exchange from gold ore waste effluents containing copper [J]. Minerals Engineering, 2004, 17: 767–774.
- [4] 兰新哲, 宋永辉, 廖 赞, 何 敏. 含氰尾液综合回收研究[J].
 稀有金属, 2005, 29(4): 493-497.
 LAN Xin-zhe, SONG Yong-hui, LIAO Zan, HE Min.
 Comprehensive recovery of tail solution containing cyanide [J].
 Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(4): 493-497.
- [5] SHU Zeng-Nian, XIONG Chun-hua, WANG Xu. Adsorption behavior and mechanism of amino methylene phosphonic acid resin for Ag(I) [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(3): 700–704.
- [6] XIONG Chun-hua, SHEN Qiu-xian. Adsorption of Er(III) and its mechanism on diglycolamidic acid resin [J]. Journal of Rare Earths, 2002, 20(5): 492–496.
- [7] LEÃO V A, LUKEY G C. The dependence of sorbed copper and nickel cyanide speciation on ion exchange resin type [J]. Hydrometallurgy, 2001, 61: 105–119.
- [8] HELFFERICH F. Ion exchange [M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [9] PETRUZZELLI D, LIBERTI L, PASSINO R, HELFFERICH G, HWANG Y L. Chloride/sulfate exchange kinetics: solution for

combined film and particle diffusion control [J]. React Polym, 1987, 5: 219-227.

- [10] CORTINA J L, WARSHAWSKY A, KAHANA N, KAMPEL V, SAMPAIO C H, KAUTZMANN R M. Kinetics of goldcyanide extraction using ion-exchange resins containing piperazine functionality [J]. Reactive & Functional Polymers, 2003, 54: 25–35.
- [11] GONZALEZ-LUQUE S, STREAT M. Uranium sorption from phosphoric acid solutions using selective ion exchange resins (part II): Kinetic studies [J]. Hydrometallurgy, 1983, 11: 227–245.
- [12] MILTZAREK G L, SAMPAIO C H, CORTINA J L. Cyanide recovery in hydrometallurgical plants: Use of synthetic solutions constituted by metallic cyanide complexes [J]. Minerals Engineering, 2002, 15: 75–82.
- [13] HAINEY1 P, SHERRINGTON D C. Oligoamine-functionalised poly(glycidyl methacrylate-ethyleneglycol dimethacrylate) resins as moderate base extractants for gold from cyanide solutions [J]. Reactive & Functional Polymers, 2000, 43: 195–210.
- [14] LEÃO V A, LUCKY G C. The effect of resin structure on the loading of copper and iron cyanocomplexes [J]. Solvent Extraction and Ion Exchange, 2001, 19(3): 507–530.
- [15] SHARPE A G. The chemistry of cyano complexes of the transition metals [M]. London: Academic Press Inc, 1976.

附录

- *a*₀ 化学计量系数;
- c 两种交换物质的总浓度, mol/L;
- $c_{\rm r}$ 离子交换介质中两种交换物质的总浓度, mol/L;
- c_{A_0} 溶液中物质 A 的浓度, mol/L;
- $<math>\rho_{S_o}$ 树脂中未反应物质的浓度, mg/L;
- D 液相中的扩散系数, m²/s;
- $D_{\rm r}$ 固相中的扩散系数, m²/s;
- k_{li} 液膜扩散速率常数(大量溶液);
- X 交换度;
- $D_{e,r}$ 固相中的扩散系数, m^2/s ;
- K_m 物质通过液膜的传递系数, m/s;
- *k*s 表面反应常数, m/s;
- ρ_0 溶液中铁的初始浓度, mg/L;
- $\rho_{\rm e}$ 溶液中铁的平衡浓度, mg/L;
- V 溶液的总体积, mL;
- *V*_r 树脂的体积, mL;
- Ā, B 树脂相中的 A、B 的铁的浓度;
- *a*, *b* 络合离子 A 和 B 的电荷数(价态);
- *Q* 吸附容量, mg/mL;
- $\rho_{\rm c}$ 剩余氰化物的平衡浓度, mg/L;
- K, n Freundlich 常数。

(编辑 何学锋)