

不同类型黄铁矿对金的吸附实验*

张世柏 吴大清 谢先德

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘 要 在稀溶液状态下的 Au 的吸附实验,较好地体现了地质热液过程中吸附作用在金矿成矿方面的重要性。黄铁矿与金的硫氢配合物的作用结果截然不同于黄铁矿与金的氯配合物的作用结果。黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附是通过表面络合和静电吸附完成的,且不同类型黄铁矿有明显的吸附差异。矿物表面特性及非均匀催化可能在吸附过程中起了重要作用。金矿中常见的 Au、As 和 p 型黄铁矿三位一体的现象可能与 As 对吸附作用的影响有较大关系。而金的氯配合物则极易被黄铁矿所还原。

关键词 黄铁矿 含金溶液 吸附实验 成矿作用

金矿的分布是极为广泛的,从火成岩、沉积岩到变质岩均有产出,而且内生金矿床中均毫无例外地有黄铁矿分布^[1]。Au 的赋存状态研究表明,黄铁矿是 Au 的最主要载体矿物^[2]。据胶东金矿 20 个矿区的资料统计^[3],黄铁矿占矿石总量的 1.40%—23.2%,其载金比率高达 25.5%—94.6%,且绝大多数在 50%以上。江西金山金矿所含黄铁矿不足矿石总量的 5%,却有 86.12%的 Au 分布于黄铁矿或者其晶界中^[4]。这些事实不能不引起我们对黄铁矿的极大兴趣。

近年来的研究提醒人们,吸附作用可能在 Au 的富集方面扮演了重要角色。Hyland *et al.*^[5]借助 X 射线光电子谱研究了各种硫化物(黄铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等)对 KAuCl_4 水溶液的吸附作用。他们认为, $[\text{AuCl}_4]^-$ 配合物离子首先被吸附到硫化物表面,然后被迅速还原成单质金。

在成矿热液系统中, Au(I) 与 Cl^- 、 HS^- 、 S^{2-} 的配合物是最重要的^[6]。而在 25—250℃ 温度范围内, $\text{pH}=5-9$, $m_{\text{S},\text{t}} \approx 0.01$ 的条件下, $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 是 Au 的最主要迁移态。这里 $m_{\text{S},\text{t}} \approx 0.01$ 较好地体现了地热系统中硫化物的含量^[7]。目前绝大多数 Au 的吸附实验所用的吸附液为 KAuCl_4 溶液,而金与氯的配合物只是在低 pH 值、高氧活度、高温和高氯化物存在的条件下存在。因此,我们的工作旨在更接近地质热液的条件下进行 Au 的吸附实验。我们的研究表明,黄铁矿与金的硫氢配合物的作用结果截然不同于黄铁矿与金的氯配合物的作用结果。二者的作用效果不同,作用机制也不同。此外,不同类型黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附特征有差别,吸附程度也不同,溶液 pH、硫活度和界面特征等对吸附过程都有影响。

第一作者简介:张世柏 男 32 岁 博士 近代矿物学和实验地球化学

* 国家自然科学基金资助项目(No. 49273181)

收稿日期 1994-07-29, 改回日期 1995-06-11

1 实 验

1.1 黄铁矿样品采集与加工

黄铁矿样品采自四种不同类型的矿床,即山东东风金矿、江西金山金矿、江西银山铅锌矿和广东英德硫铁矿。东风金矿赋存于黄铁绢英岩化带(即弱糜棱岩带)中,矿化以细脉浸染状和斑杂状为特征。绢云母化和硅化造成长石矿物颗粒边界不清,石英发生粒化重结晶作用。金属矿物主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿等。黄铁矿多呈他形粒状,颗粒较粗(1—5mm),少量自形晶呈立方体、五角十二面体或者它们的聚形。碎裂结构很发育,黄铁矿中 Co、Ni、As 的含量均较低。金山金矿赋存于韧—脆性剪切带中,矿石为硅化岩型,金属矿物含量极少(<5%),且基本上都是黄铁矿。黄铁矿呈浸染状、细脉浸染状分布,颗粒细小(0.5—2mm)。晶形多为五角十二面体及其与立方体或八面体组成的聚形,即或有立方体也是曲面状的歪晶。该矿床黄铁矿普遍含 As 较高,且 As 与 Au 有明显的正相关关系^[4,8]。银山铅锌矿产于浅变质岩系中,可以划分为铜硫矿体和铅锌矿体。样品采自铜硫矿体,该矿体含有一定量的伴生金。伴生金主要以自然金、银金矿的形式分布于黄铁矿、黄铜矿、砷黝铜矿等矿物中。这类黄铁矿也含有较高的 As。英德硫铁矿为单一的黄铁矿矿床,产于碳酸盐岩中。矿石以块状构造、浸染状构造为主,也有条带状、角砾状构造。金属矿物基本上为黄铁矿和少量的磁黄铁矿等。黄铁矿晶形呈立方体,边长 0.5—1cm 左右,含金极微量。各样品特征见表 1。

表 1 黄铁矿微量元素含量(μg / g)及有关物性特征

Table 1 Composition (μg / g) of trace elements and associated physical properties of pyrite from the studied area

黄铁矿 类型	导电型	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	As	Au
YD	p	88	101	196	67	15	86	548	0.27
JS1	p	104	2625	41.4	51	94	19	7650	25.70
JS2	p	325	354	359	35	222	53	12399	67.66
YS	p	3308	560	11.2	35	31	12	5214	8.44
DF	p	253	1414	52.2	8	5	18	808	65.73

注: YD.英德; JS.金山; YS.银山; DF.东风(下同)。

上述四个矿床的黄铁矿样品是经过碎矿、筛分、摇床分选、磁选、重液分选和**双目镜下挑选**等获得的,纯度 99%以上,并用 X 射线衍射分析确认。临实验前才将矿物颗粒研磨到所需粒度,这样可以减少暴露于空气中的时间。所有吸附样品均选用 90—61μm 的粒度范围。**比表面积**(0.44—0.82m² / g)由北京石油化工科学研究院测定。测定条件:样品在 1.33Pa 下脱气 4h,方法为氮吸附静态容量法,分析仪器为 ASAP2400 自动物理吸附仪。

1.2 吸附液的配制

$[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 溶液按 Renders *et al*^[7] 的方法制备。该溶液中 Au 浓度可达 7.24mg/L。K₂AuCl₄ 溶液的配制很简单:称取纯金粉 0.2000g 置于 50mL 烧杯中,加入新配制王水 10—20mL,低温溶解并蒸发至小体积,加 KCl 2g,浓 HCl 50mL,然后转入容量瓶,加去 O₂ 蒸馏水 1000mL 摇匀即可。此溶液含 Au 200mg/L 左右。

1.3 吸附实验方法

黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附实验是在氮气氛围保护下进行的,这样可以避免受氧气的影响。同时吸附瓶(95 玻璃瓶)用油漆涂黑,以免光对 Au(I) 的还原作用。吸附液 200mL, Au 的初始浓度从 30ng/g 到 440ng/g 不等(用去氧二次蒸馏水稀释)。控制温度 $t = 50 \pm 2^\circ\text{C}$ (恒温水浴),控制 $\text{pH} = 6.0 \pm 0.03$,总还原硫 $m_{\text{S,t}} \approx 0.01 \pm 0.002$ (用 H₂S 调节),总还原硫用碘量法测定。吸附剂(黄铁矿)均为 0.1g。吸附过程中吸附瓶不断摇动,吸附时间 1h,吸附平衡时间的确定见表 4。容器壁的吸附用空白实验校正。吸附完毕,取 10mL 吸附平衡液测定 Au 的浓度。并据此和空白实验结果求出 Au 的吸附量。

考虑到 pH 值、时间、粒度对吸附作用的影响,我们进行了在不同 pH、时间、粒度条件下的吸附实验,方法与上述类似,初始浓度均为 190ng/g。

为了估计吸附金在黄铁矿表面的固着强度,我们还进行了吸附金在 H₂S 水溶液 ($m_{\text{S,t}} \approx 0.01$) 中的解吸实验。解吸液 20mL,解吸时间 3h,解吸完毕,取 10mL 解吸液测 Au,并大致求得 Au 的解吸百分数。

为了便于比较,也相应地进行了几组黄铁矿与 $[\text{AuCl}_4]^-$ 溶液的吸附实验和解吸实验。Au 的初始溶液用去氧二次蒸馏水调配,吸附液 100mL,吸附剂均为 0.1g。用 NaOH 和 HCl 调 pH 值为 2.5,用 NaCl 调盐度为 100μg/g,吸附过程不断摇动吸附瓶,室温下持续 2h,平衡时间的确定见表 6。容器壁的吸附用空白实验校正,解吸液用相应 pH 值的去氧蒸馏水(10mL),解吸时间 3h。

1.4 金的测定方法

K₂AuCl₄ 溶液中 Au 的测定用 PEHGA600 石墨炉原子吸附分光光度计,检测灵敏度 5ng/g,误差 15%,当 Au 的浓度大于 300ng/g 时,用 PE3100 火焰原子吸收分光光度计测定,灵敏度 50ng/g,误差 15%; $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 溶液中的 Au 用 (TMK-CPB-Au) 三元络合比色法,在岛津 UV-260 紫外-可见光自动记录分光光度计上测定,灵敏度 10ng/g,对 30、50、60、80℃ 的吸附平行样检测表明,其测定精度分别为 1.6%、6%、8% 和 19%,误差 15%。用此法测定可以排除 SO_4^{2-} 、 SO_3^{2-} 、 S^0 或 S^{2-} 等可能造成的影响,再现性较好。

2 实验结果

表 2 给出了不同 pH 值条件下黄铁矿对 Au(I) 的硫氢配合物的吸附结果,在 $\text{pH} = 3.5—6$ 的范围内,吸附作用都比较明显,只是在吸附程度上有一定的差异。在碱性

环境下, 吸附作用明显减弱, 甚至不吸附。

表 2 不同 pH 条件下黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附百分数

Table 2 Adsorption percentage of gold hydrosulphido-complexes by pyrite at different pH

黄铁矿类型	比表面积 (m ² / g)	pH = 3.5	pH = 6	pH = 9
YD	0.44	20.5	7.9	2
JS1	0.48	27.6	28.7	2
JS2	0.48	38.2	36.5	1
YS	0.82	19.4	19.8	4
DF	0.67	41.4	30.8	4

表 3 列出了不同类型黄铁矿的等温饱和和吸附数据, 表中 C 表示吸附平衡液中 Au 的浓度, Γ 表示相应的吸附量。总的特征是吸附量随着吸附液中含 Au 浓度的增加而增加, 并迅速趋向饱和。

表 3 黄铁矿对金的吸附量与平衡浓度之间的关系 (50℃, pH = 6)

Table 3 Adsorption of gold by pyrite as a function of equilibrium concentration at the condition of $t = 50^{\circ}\text{C}$ and pH = 6

[Au(HS) ₂] ⁻ 溶液								KAuCl ₄ 溶液	
DF		JS2		YS		YD		DF	
C	Γ	C	Γ	C	Γ	C	Γ	C	Γ
18	46	12	42	14	20	13	25	7	18
44	79	32	82	31	34	34	31	10	58
77	98	50	94	51	50	58	33	10	118
130	121	98	128	90	65	108	34	35	191
177	128	151	152	130	76	159	33	36	311
236	133	177	160	170	76	236	35	37	441
350	142	350	175	380	80	423	35	84	729
								84	929

注: C . 平衡浓度 (ng / g); Γ . 吸附量 ($\mu\text{g} / \text{g}$)。

在 1h 之内, 各种黄铁矿的吸附均已达平衡, 唯有金山黄铁矿例外, 在作用时间达 18h 以后, Au 的吸附百分数有大幅度的上升 (表 4)。

表 4 吸附百分数随时间的变化 (对应于 [Au(HS)₂]⁻ 溶液)

Table 4 Adsorption percentage of gold hydrosulphido-complexes by pyrite as a function of time

吸附剂类型	10min	30min	1h	6h	12h	18h
英德黄铁矿	2.1	4.5	7.9	7.6	7.8	8.6
金山黄铁矿	20.9	33.3	36.5	37.0	37.0	81.7
银山黄铁矿	12.1	18.4	19.8	18.0	19.8	22.0
东风黄铁矿	9.5	27.5	30.8	32.1	31.4	33.3
玻璃	1.0	3.0	5.4	5.0	5.0	4.5

不同粒度黄铁矿对 Au (I) 的硫氢配合物的吸附实验表明, 黄铁矿越破碎, 对 Au 的

富集能力越强。当黄铁矿粒度从 124—160 μm 降到 58—83 μm 时,吸附量从 4 $\mu\text{g/g}$ 升到 111 $\mu\text{g/g}$ (表 5)。

表 5 不同粒度黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附结果

Table 5 Adsorption of gold hydrosulphido-complexes by pyrite with different grain sizes				
粒 度 (μm)	< 58	83—58	124—85	160—124
$C_0(\text{ng/g})$	190	190	190	190
$C(\text{ng/g})$	135	145	175	188
$\Gamma(\mu\text{g/g})$	111	89	30	4
$A\%$	29.2	23.4	7.8	1.1

注: C_0 . 初始浓度; C . 平衡浓度; Γ . 吸附量; $A\%$. 吸附百分数。

许多金矿床都表明黄铁矿越破碎, Au 含量越高。金矿所处的构造环境常比较复杂, 成矿构造往往具有多期活动的特点。金矿带往往与构造破碎带、韧脆性剪切带有关, 这些环境不仅对成矿流体运移有利, 而且造成黄铁矿的破碎。黄铁矿破碎程度越高, 表面积越大, 对 Au 的吸附能力越强。同时也为 Au 的富集提供了空间。

在我们的实验中, 无论何种黄铁矿对 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的吸附总是特别强, 尽管吸附刚开始时吸附快慢有一些差异, 但最终残留在溶液中的 Au 都不会超过 2%(表 6)。

表 6 吸附百分数随时间的变化(对应于 $[\text{AuCl}_4]^-$ 溶液)

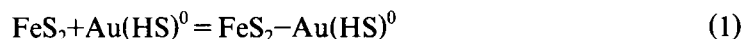
Table 6 Adsorption percentage of gold chloride complexes by pyrite as a function of time									
黄铁矿类型	5min	30min	2h	5h	黄铁矿类型	5min	30min	2h	5h
YD	78	93	96	98	YS	70	94	98	99
DF	83	86	98	98	玻璃	19	19	20	20
JS2	54	78	98	99					

解吸实验表明被黄铁矿吸附的硫氢配合物可以解吸出 2%—3.5%; 而被黄铁矿吸附的金的氯配合物只能解吸出 0.013%—0.054%。

3 讨 论

pH 对吸附作用的影响是明显的(表 2)。一个重要原因是 pH 严重影响了黄铁矿的表面电荷及 $\text{Au}(\text{I})$ 在溶液中的分布状态^[7]。我们知道, 当黄铁矿浸入吸附液时, 黄铁矿表面就要发生水合作用。根据硫化物表面水合作用模型^[9, 10], 硫化物表面电位决定离子主要是 OH^- 和 H^+ 。也就是说, 表面电荷主要是取决于硫化物表面正、负离子相对水解强度。黄铁矿的对硫离子在晶格中呈哑铃状, 而且轴向与黄铁矿晶格中每八分之一的小立方体对角线方向一致, 这就决定了 $[\text{S}_2]^{2-}$ 中只有一个硫离子比较显著地暴露于晶体的断面中, 可以认为与 H^+ 结合的主要是相对位置靠外的 S^- , 从电荷考虑就知道, 这个 S^- 离子的水解要比其他单硫化物(PbS 、 ZnS 、 CdS 等)表面 S^{2-} 离子的水解程度弱得多, 而正离子 Fe^{2+} 和 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的水解能力基本上差不多, 对应水解产物的电离常数相近^[11]。比较几

种硫化物的表面 pH_{ZPC} 值: PbS 8.6、 ZnS 8.6、 CdS 7.7, 可以推测出黄铁矿的 pH_{ZPC} 应位于近中性范围, 在中酸性环境下黄铁矿表面带正电荷, $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 比 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 易于接近黄铁矿表面, 形成静电吸附; 另一方面, $\text{Au}(\text{I})$ 有强烈形成三原子线性配合物的趋势^[10], 当 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 与黄铁矿表面接近时, $\text{Au}(\text{HS})^0$ 就趋向于与矿物表面形成表面键。这个反应可用下式表示:



通过这个反应, 被吸附的 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 就形成了双配位三原子配合物 $[\text{S}-\text{Au}(\text{I})-\text{SH}]$ 。可见, 黄铁矿与 $\text{Au}(\text{I})$ 的硫氢配合物的吸附作用是通过表面络合和静电吸附完成的, Au 的氧化态仍为 +1。在碱性条件下, 黄铁矿表面荷负电, 此时 $\text{Au}(\text{I})$ 的分布态也是荷负电的, $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 的稳定性及其与黄铁矿表面电荷的排斥性, 就保证了它不易被黄铁矿所吸附, 而成为一种重要的迁移态。

将黄铁矿对 $\text{Au}(\text{I})$ 的硫氢配合物的等温饱和吸附数据(表 3), 用 Langmuir 方程拟合, 经一元线性回归可求得饱和吸附量 $\Gamma_m(\text{YD}) = 35(\mu\text{g}/\text{g})$, $\Gamma_m(\text{DF}) = 154(\mu\text{g}/\text{g})$, $\Gamma_m(\text{JS2}) = 192(\mu\text{g}/\text{g})$ 和 $\Gamma_m(\text{YS}) = 91(\mu\text{g}/\text{g})$ 的 Langmuir 等温线(图 1)。由不同的饱和吸附量可做一个粗略的比较。金山黄铁矿和东风黄铁矿含 Au 量高, 相应的饱和吸附量也大。由表 2 也可以看出, 在同一初始浓度下这两种黄铁矿比含 Au 低的另两种黄铁矿(YD、YS)的吸附百分数也高得多。因此, 可以认为含 Au 黄铁矿比不含 Au 或少含 Au 黄铁矿的吸附能力强。造成这一现象的原因之一可能是与黄铁矿表面的有效吸附位置有关。我们对黄铁矿的表面微形貌特征进行了扫描隧道显微镜观察。黄铁矿的表面微形貌是十分复杂的, 不均匀的。含 Au 黄铁矿(DY)的断面微形貌都很复杂, 很难找到平坦面; 而英德黄铁矿颗粒粗, 结晶完好, 在断面中微解理面所占的比率较大, 转折点密度降低, 减少了高能点的分布, 即减少了有效吸附位置, 从而影响了吸附能力。原因之二可能是矿物表面非均匀催化作用引起的。表面本身、表面所含的微金粒及以类质同象混入物存在的 As 都可能成为催化剂。在吸附 18h 以后, 金山黄铁矿的吸附百分数有大幅度的上升, 可能就是这一作用的突出表现。比较金山矿区的两个黄铁矿样品(JS1、JS2), 吸附百分数与含 As 量似乎有正相关关系。As 可以替换 S 而进入黄铁矿晶格, As 的分布不均匀, 含 As 高的黄铁矿常有环带结构, 在富含 As 的部位可能由于 As 对 H^+ 的结合力较弱, 更易被 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 置换, 为 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 在表面吸附创造了更多的机会, 还可能通过非均匀催化作用进一步使 $\text{Au}-\text{S}$ 键弱化, 甚至断裂, 从而还原出单质金。或许这就是使黄铁矿中 Au 、As 呈正消长关系的原因。与此同时, 高电价阴离子 $[\text{As}_2]^{3-}$ 或 $[\text{AsS}]^{3-}$ 代替低电价阴离子 $[\text{S}_2]^{2-}$ 使黄铁矿产生空穴, 成为 p 型半导体。这就是使许多金矿中存在的 Au 、As 和 p 型黄铁矿构成三位一体现象的原因。其实黄铁矿中含有多种微量元素(Cu、Pb、Zn、Co、Ni 等), 从光片观察和类质同象条件分析, 只有 Co、Ni、As 等少数元素能以类质同象形式存在, 其余只是以包裹体存在。黄铁矿晶格中 Co、Ni 和少量高价铁的存在都会引起电子型导电。因此, 黄铁矿的最终导电型是取决于上述杂质元素的平衡结果。

分析不同黄铁矿的产状, 我们知道, 英德黄铁矿是产于碳酸岩中的, 属于碱性环境, 黄铁矿晶形完整、颗粒粗、裂隙少等都对 Au 的富集不利; 东风金矿和金山金矿产于长英质绢英岩、硅化岩中, 属于中酸性环境, 地质构造上属于韧—脆性剪切破碎带, 碎裂作用、重

结晶作用强烈, 介质条件和地质环境都有利于黄铁矿对 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 的吸附。与金山金矿产于同一浅变质岩系中的银山铅锌矿的特点是有大量硫化物生成, 使成矿介质不仅硫活度高, 而且有大量金属离子 (Cu^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ag^+ 等) 存在。这些离子的浓度远远地超过了 Au 的浓度, 在这样的环境下, 处于痕量状态的 Au 就有可能完全或部分地被“掩蔽”起来, 而难于接近硫化物的表面。另外, 硫活度过高使 $\text{Au}(\text{I})$ 的分布态向低 pH 方向移动^[10], 降低了 $\text{Au}(\text{HS})^0$ 在溶液中的比率。这也许是使银山矿只能形成伴生金的重要原因。

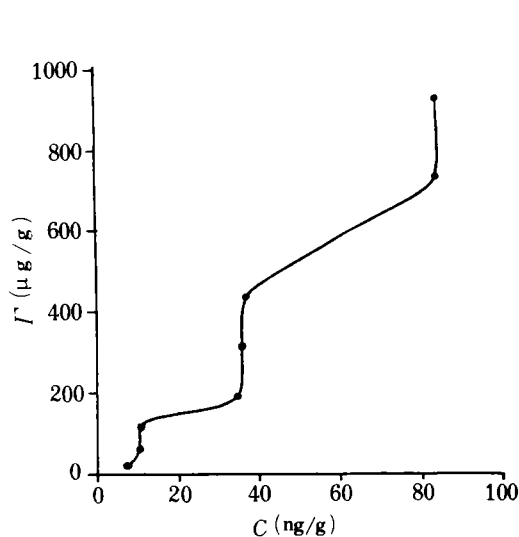


图 1 不同类型黄铁矿的 Langmuir 吸附等温线 (对应于 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 溶液, $t = 50^\circ\text{C}$)

Fig.1 The Langmuir adsorption isotherms for different types of pyrite (in $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ solution, $t = 50^\circ\text{C}$)

JS、DF、YS、YD 代表黄铁矿的四种类型, 据文献[7]。

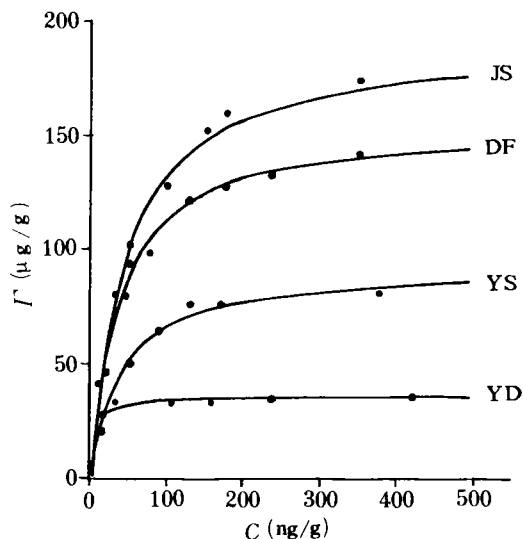


图 2 DF 黄铁矿的 Langmuir 吸附等温线 (对应于 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 溶液)

Fig.2 The Langmuir adsorption isotherm of DF pyrite (in $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ solution)

黄铁矿对 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的吸附作用则是完全不同的另一种形式。其吸附等温线 (图 2) 存在明显的吸附阶梯, 并随浓度的上升而上升, 也不趋于饱和值。这是多层吸附并伴随新相生成的结果^[12]。Jean *et al*^[13], Hyland *et al*^[5] 用 XPS 证明了 $[\text{AuCl}_4]^-$ 被硫化物吸附后迅速还原成单质金的例子, 有些 Au 的吸附层还可以用 SEM 观察到。其实, 正由于 $[\text{AuCl}_4]^-$ 稳定性差, 极易被还原, 才使其不能成为重要的迁移态。

金的氯配合物被还原成单质金, 固着于黄铁矿表面, 要重新返回溶液中就很困难, 解吸率极低; 而金的硫氢配合物主要是以表面配合物固着于黄铁矿表面 (尽管有一部分可能受表面非均匀催化作用等还原), 其可逆性就稍大一些, 解吸率相应高一些。

综上所述, 黄铁矿对 Au 的吸附作用是受多种因素控制的, 其中金的配合物形式、介质条件、黄铁矿表面特性、微量元素特征及所处的地质环境等等都是十分重要的制约因素。

4 结 论

(1) 黄铁矿对金的硫氢配合物的吸附是通过表面络合和静电吸附完成的, 只有在中酸性介质条件下才存在显著的吸附作用, 且不同类型黄铁矿有较大的吸附差异。

(2) 矿物表面特性及非均匀催化可能在吸附过程中起了重要作用, 尤其是由晶体表面非均匀性造成的活性位置。As 的分布可能起到了非均匀催化剂的作用, 使部分吸附金得以还原, 归并。

(3) 金矿中常见的 Au、As 和 p 型黄铁矿三位一体的现象可能与 As 对吸附作用的影响有较大关系。

(4) 黄铁矿对金的氯配合物的吸附作用, 与其说是吸附作用, 不如说是还原反应更恰当些。在吸附 / 还原这个过程中, 后者表现得更突出。不同类型的黄铁矿均可以将溶液中的 Au 基本耗尽。

(5) Au 的吸附作用, 无论从实验, 还是从地质现象来看, 都可以认为是一种重要的成矿作用。

本文大部分实验都是在彭金莲高级工程师的协助下完成的, 王秀璋研究员提供了部分样品, 陈先沛研究员提供了建设性意见, 在此特致谢忱。

参 考 文 献

- 1 博伊尔 R W. 金的地球化学及金矿床. 马万钧等译. 北京: 地质出版社, 1984, 35—90.
- 2 Foster R P. GOLD'82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold deposits. (s.l.): A.A. Balkema Press, 1984, 753.
- 3 罗天明. 试论金与铁矿物的关系. 黄金地质科技, 1991, 3(29): 63—67.
- 4 鲍振襄. 江南古岛弧带金矿床中黄铁矿-毒砂-辉锑矿含金性研究. 黄金科学技术, 1993, 1(3): 40—47.
- 5 Hyland M M, Bancroft G M. An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: Reducing agents. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 367—372.
- 6 Seward T M. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In: Foster R P ed. GOLD'82: The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold deposits. (s.l.): A.A. Balkema Press, 1984, 165—181.
- 7 Renders P J, Seward T M. The stability of hydrosulphido- and sulphido-complexes of Au(I) and Ag(I) at 25°C. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 245—253.
- 8 王燕. 江西的一种新类型金矿——金山式剪切带型金矿床的成矿地质特征. 黄金科学技术, 1993, 1(3): 20—26.
- 9 Ronngren L, Sjöberg S, Sun Z *et al.* Surface reactions in aqueous metal sulfide systems. J Colloid Interface Sci, 1991, 145(2): 396—404.
- 10 Renders P J, Seward T M. The adsorption of thio gold (I) complexes by amorphous As₂S₃ and Sb₂S₃ at 25 and 90°C. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 255—267.
- 11 印永嘉. 大学化学手册. 济南: 山东科技出版社, 1985, 319—320.
- 12 亚当森 A W. 表面的物理化学. 顾惕人译. 北京: 科学出版社, 1984, 399, 616.
- 13 Jean G E, Bancroft. An XPS and SEM study of gold deposition at low temperatures on sulphide mineral surface: Concentration of gold by adsorption / reduction. Geochim Cosmochim Acta. 1985, 49: 979—987.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF ADSORPTION OF GOLD COMPLEXES BY PYRITE FROM DIFFERENT DEPOSITS

Zhang Shibai Wu Daqing Xie Xiande

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

Abstract

The experimental study of adsorption of gold complexes by pyrite in dilute solutions shows the fundamental role of adsorption in gold mineralization. The result of adsorption of gold hydrosulphido-complexes by pyrite is different from that of gold chloride complexes. These two kinds of complexes have different mechanism of adsorption. The former is associated with surface complex and electrosorption. There exists obvious discrepancy in adsorption density between different pyrites. The surface characteristics of minerals and heterogeneous catalysis may play an important role in adsorption. The coexistence of Au, As and p-type pyrite indicates the effect of As on adsorption. Gold chloride complexes are easily reduced by pyrite.

Key words: pyrite, gold-bearing solution, adsorption experiment, ore-forming process