

钾长石粉酸浸除铁废液资源化的实验研究

郑 骥 ,马鸿文 ,章西焕 ,文智慧

中国地质大学矿物材料国家专业实验室,北京 100083

摘要: 钾长石粉经过硫酸或盐酸酸浸除铁后,废液中含有大量的金属离子和游离酸。对废硫酸进行循环利用实验,钾长石粉铁的浸出率达到88.3%。对酸浸废液进行蒸发结晶,分别制备得到了纯度为94.1%的绿钾铁矾和74%的三氯化铁。用硫酸酸浸废液蒸发结晶后,铁的回收率为70.0%,钾的回收率为96.5%。整个工艺无需高温,无需加压,操作简单,具有高效、低能耗、低污染的特点,表明用本项技术处理酸浸废液行之有效。分析认为,废液呈强酸性、溶液中存在大量 Fe^{2+} 、碱金属离子含量偏低是蒸发结晶过程中形成绿钾铁矾而不是黄钾铁矾的主要原因。

关键词: 钾长石;酸性废液;结晶;绿钾铁矾;三氯化铁。

中图分类号:P578.968 X703.1

文章编号:1000-2383(2004)01-0059-06

收稿日期:2003-04-15

Treatment on Acid Leaching Wastewater from K-Feldspar Powders

ZHENG Ji, MA Hong-wen, ZHANG Xi-huan, WEN Zhi-hui

National Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: After sulfuric acid or hydrochloric acid leaching to remove iron from K-feldspar powders, the filtrate wastewater contains free acid and abundant useful metal ions such as iron. The leaching proportion of iron from K-feldspar powders is 88.3% after treated by the used sulfuric acid. With a purity of 94.1% and 74% respectively, voltaite crystal and solid $FeCl_3$ have been produced by crystallizing in a lower temperature following the vaporization of the wastewater, with 70% iron and 96.5% potassium recovered. No need of high temperature and pressure, and with high efficiency, low energy loss and less pollution, this process proves its effectiveness. The strong acidity, Fe^{2+} and rather lower concentration of alkalis ions are responsible for voltaite, not jarosite, crystallizing from the acidic iron-bearing water.

Key words: K-feldspar; acidic wastewater; crystallizing; voltaite; ferric chloride.

钾长石粉经酸浸处理得到精矿粉,同时还会产生大量酸性废液,其主要成分是铁、铝、钾、镁等金属离子和游离硫酸或盐酸(郑骥等,2001),如果不经过处理直接排放,不仅会造成严重的水环境污染,还会损失许多有用成分,造成资源浪费。离子交换、溶剂萃取、膜分离、化学沉淀与结晶、电解或电沉积等技术现已广泛地应用于冶金、化工、食品、制药、造纸、印染、环保等行业,有效地实现了各种强酸性或强碱性溶液的无害化和资源化。

从矿石浸出液中分离杂质和回收有用金属经常使用化学沉淀与结晶技术,锌冶炼工艺中使用的黄钾铁矾法最具代表性,许多重要的铁质回收工艺,都

是从中发展而来。该方法比较圆满地解决了固液分离问题,并能有选择性地提取溶液中的金属成分,具有操作温度低、产物过滤性能好的特点,非常适合于处理钾长石酸浸废液。利用基于氧化还原反应的水热合成方法,已经制备出高纯的具有化学计量比的黄钾铁矾单晶,晶格中与氧形成八面体配位的 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 和 V^{3+} 具有不同寻常的反铁磁性特征,应用前景良好(Grohol and Nocera, 2002)。

目前,国内外对于非金属矿酸浸除铁废液的铁质资源回收研究,主要侧重于合成氧化铁系列产品,以及各类铁矾、硫酸亚铁、聚合硫酸铁和氯化铁等;

而对于最大限度地提高浓酸的利用率,并消除浓酸对环境的危害性,则认为酸浸滤液应分阶段收集后分别处理,高浓度废酸直接循环利用,低浓度酸液加入中和剂形成沉淀(王泽民等,1995);或者,向高温酸浸废液中加入浓硫酸混合均匀后,自然冷却到室温,结晶分离后的溶液作为再生酸浸液(由正明,1990)。对于含易挥发盐酸的酸浸液,加压 1~2 kPa,在 60~75 °C 下即可利用非氯化法制备得到纯度大于 45% 的 FeCl_3 (杨运泉等,1994)。因此,这种酸性废液综合处理的关键,一是废酸的回收利用,并减少中和剂、沉淀剂用量,以节约生产成本;另一方面则是采用物理或化学分离技术实现固液分离,或将其提纯到适于各类铁基微粉材料或其他产品的生产要求。

本研究旨在提高钾长石粉酸浸除铁工艺中酸的利用率,实现无“三废”排出,并回收酸浸废液中的金属成分,变废为宝。

1 酸浸废液的成分

实验所用钾长石分别取自天津蓟县和江苏丰县。蓟县钾长石原矿为粗面岩,属中元古界长城群大红峪组,原矿粉中微斜长石质量分数约为 70%,磁铁矿等铁钛氧化物约 8%,富铁矿物多呈浸染状嵌布于钾长石晶粒间隙。丰县钾长石原矿为页岩,赋存于中上石炭统至下二叠系砂页岩夹灰岩地层中,原矿粉经重选后,钾长石质量分数约 78%,针铁矿约 8%。酸浸废液样品 liq-JX1 为 2 kg 蓟县钾长石粉硫酸酸浸除铁实验所得母液,liq-JX2 为其洗涤液,酸浸实验条件为硫酸质量分数 40%,温度 98 °C,反应时间 180 min,液固比即体积(mL):质量(g)约为 2:1。酸浸废液样品 liq-FX1 为 10 g 丰县钾长石粉盐酸酸浸除铁实验所得母液,除铁实验条件为:盐酸质量分数 30%,反应温度 95 °C,酸浸时间 150 min,液固比即体积(mL):质量(g)约为 1:1。酸浸废液样品 liq-FX2 为 1 kg 丰县钾长石粉盐酸酸浸除铁实验所得母液,酸浸除铁实验其他条件与 liq-FX1 相同。表 1 给出了上述 4 种酸性废液主要成分的化学分析结果及 pH 值。

2 实验方法

使用酸浸废液 liq-JX1 作为浸出剂,对蓟县钾长

表 1 钾长石粉酸浸废液及结晶后滤液的主要成分

Table 1 Compositions of wastewater

样品	$\rho_B / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$				$\rho(\text{Si}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
	Fe	Al	K	Mg		
liq-JX1	21.61	8.21	2.88	8.27	148.40	0.14
liq-JX2	2.27	1.02	0.33	0.92	20.10	0.88
liq-FX1	33.62	6.56	2.55	0.79	358.60	2.45
liq-FX2	41.78	4.59	2.31	0.62	5.46	-
r-JX1	14.25	5.88	0.658	6.87	214.00	-1.12
r-JX2	6.50	3.04	0.100	3.54	45.00	-0.07
r-FX1	84.48	27.44	11.29	3.22	590.00	-

r-JX1、r-JX2、r-FX1 分别为酸浸废液蒸发结晶后的滤液。

石粉进行酸浸废液循环使用除铁实验。反应温度 98 °C,酸浸时间 180 min,liq-JX1 体积 20 mL,钾长石粉 20 g。实验完成后,立即使用水循环式真空泵抽滤,滤出液冷却后在相同温度下进行下一次除铁实验,反应时间 180 min,滤液体积 10 mL,钾长石粉 10 g。反应完成后,立即抽滤,干燥,分别测定酸浸后钾长石精矿粉的 Fe_2O_3 质量分数及滤液成分。

2 kg 蓟县钾长石粉酸浸实验完成后,立即取出 1 000 mL 酸浸废液 liq-JX1,置于烧杯中自然冷却至室温,大约 7 d 后开始析晶。取一定量酸浸废液置于烧杯中,于不同温度下在恒温水浴锅中分别蒸发结晶,开始出现晶体后,立即取出烧杯并放入冷水中迅速降温,晶体生长一定时间后过滤、干燥,并完成各项测试内容,具体实验条件见表 2。

表 2 酸浸废液蒸发结晶实验

Table 2 Crystallization experiments of acidic wastewater

样品	体积/mL	温度/°C	析晶/h	生长/d	产物	滤液
liq-JX1	1 000	室温	168	7	crys-rt	r-JX1
liq-JX1	200	65	6-8	1	crys-65C	r-JX2
liq-JX1	200	98	6-8	1	crys-98C	-
liq-FX1	400	85	10	2	crys-85C	-
liq-FX2	300	95	5.5	2	crys-95C	r-FX1

3 实验结果讨论

3.1 硫酸废液处理

表 3 给出了硫酸废液循环利用实验结果,表明废硫酸循环浸出时仍然具有较好的除铁效果,但废酸液经 2 次使用后铁的浸出率降至 60.4%,与硫酸酸浸实验的浸出率相比,循环使用废酸时除铁效果均有所降低。究其原因,一是硫酸的浓度降低了,二

是废硫酸多次使用后,大量的金属离子从钾长石矿

表 3 废硫酸循环利用除铁实验

Table 3 Recycle of sulfuric wastewater

	原矿	酸浸	循环一次	循环二次
$u(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	6.99	0.31	0.82	2.77
铁浸出率/ $\%$	-	95.6	88.3	60.4

粉溶解转移到溶液中,改变了浸出液的组成,严重地干扰了钾长石粉铁质的去除。通过加入浓硫酸调节 pH 值,保证一定的酸度范围,或者将废酸液先行提纯处理,降低其溶解的金属成分的浓度,在减轻金属离子干扰之后再行循环利用,应是可行的解决方法。

酸浸废液 liq-JX1 在室温放置过程中,约 2~3 d 后烧杯中出现一种白色凝胶状物质,搅拌或者加热后该物质即重新溶解,推断该物质为硅胶。与室温结晶体相似,liq-JX1 在 65 °C 和 98 °C 蒸发结晶的产物也为一种暗橄榄绿色至黑色的结晶体,呈松脂光泽。图 1 分别为它们的 X 射线粉末衍射图。经分析,判定该物质为绿钾铁矾。表 4 给出了依据 X 射线衍射数据计算得到的绿钾铁矾晶胞参数。

人工合成结晶体的 a_0 值的大小顺序为 $\text{crys-rt} > \text{crys-98C} > \text{crys-65C}$,三者均小于绿钾铁矾标准值,这应与在室温下晶体生长有较充裕时间相关,而

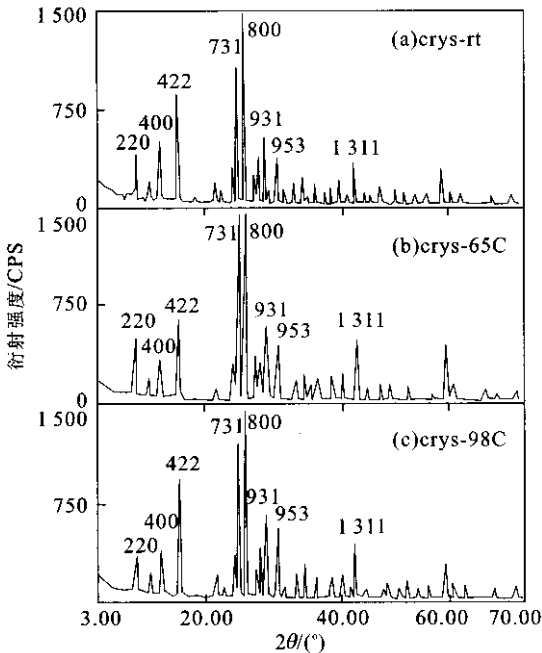


图 1 酸浸废液 liq-JX1 不同温度下结晶产物的 X 射线粉末衍射图

Fig. 1 XRD patterns of voltaite crystallized from wastewater liq-JX1

表 4 合成绿钾铁矾晶胞参数 a_0

Table 4 Unit cell parameter of voltaite

样品	crys-rt	crys-65C	crys-98C	绿钾铁矾
$a_0/0.1 \text{ nm}$	27.269 7	27.251 0	27.264 4	27.273

绿钾铁矾 a_0 值据中国科学院贵阳地球化学所,1978。

当温度升高时,质点具有更高的迁移和重排能力,晶胞更容易长大。另外,大半径二价阳离子的引入以及碱金属离子含量的变化,都有可能改变晶格的热力学性质,从而影响晶胞的大小(Sondi and Shi, 2001)。

在扫描电镜下观察该结晶产物,可以看出,晶体发育良好,无明显的团聚或胶凝现象,粒度分布不甚均匀,最大粒径约 2 μm 。

天然绿钾铁矾矿物主要产于铁的硫化矿床氧化带以及火山气孔中,与铁明矾、水绿矾、镁明矾等共生。绿钾铁矾类质同象代替现象很普遍,能与很多阳离子形成均一物质,Al 可替代 Fe^{3+} ,也存在 Mg 置换 Fe^{2+} ,Na 置换 K(中国科学院贵阳地球化学所,1978)。因此,文献报道的绿钾铁矾化学成分变化较大,现一般采用 $\text{K}_2\text{Fe}_5^{2+}\text{Fe}_4^{3+}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 。绿钾铁矾由于不同占位的 2 种铁离子之间的相互作用,温度高达 3 K 时仍不能转变到有序态,具有低温磁化率,可以用作新型功能材料(Beveridge and Day, 1979)。

表 5 为硫酸及盐酸酸浸溶液蒸发结晶产物 crys-rt 和 crys-95C 的化学分析结果。

电子探针和能谱分析证明了在绿钾铁矾晶体中夹带有 SiO_2 包裹体。结合其化学式,计算得到绿钾铁矾质量分数约 94.1%,其化学式为 $(\text{K}_{1.88} \cdot \text{Na}_{0.12})_2(\text{Fe}_{2.71}\text{Mg}_{2.19})_4(\text{Fe}_{3.67}\text{Al}_{0.33})_4(\text{SO}_4)_{12} \cdot 16.7\text{H}_2\text{O}$ 。结晶水不饱和,并存在 10% Fe^{2+} 空位,晶格中可能还有其他阳离子。剩余的 Ti、Mn、Ca、Al 则可能以硫酸盐、磷酸盐、羟基磷酸盐或羟基硫酸盐形式吸附于绿钾铁矾表面或者被包裹于其晶体内部,或者进入晶格占据 Fe^{2+} 空位,但对样品 crys-rt、crys-65C、crys-98C 的 X 射线粉末衍射分析结果尚不能予以明确证明。

crys-rt 差热曲线与样品 1214(变绿钾铁矾, $\text{K}_2\text{Na}_6\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}(\text{SO}_4)_{12}\text{O}_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)非常相似(图 2)。变绿钾铁矾 290 °C、495 °C 吸热谷为结晶水和结构水的排除,575 °C 吸热谷为 FeSO_4 分解,725 °C、800 °C 吸热谷为 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 分解,1 000 °C 吸热谷则

表5 酸浸废液蒸发结晶产物化学成分分析结果

Table 5 Chemical compositions of crys-rt and crys-95C

$w_B/\%$	crys-rt	crys-95C
SiO ₂	0.74	0.05
TiO ₂	0.07	-
Al ₂ O ₃	3.11	3.18
Fe ₂ O ₃	14.00	38.76
FeO	9.28	-
MnO	0.12	0.86
MgO	4.22	3.19
CaO	0.63	3.03
Na ₂ O	0.20	0.15
K ₂ O	4.17	3.24
P ₂ O ₅	0.61	0.09
SO ₃	46.96	47.98*
H ₂ O ⁺	14.10	-
H ₂ O ⁻	1.21	-
总量	99.42	100.53

中国地质大学(北京)化分室陈力平等分析;*. 该数据为Cl质量分数.

为残余硫酸盐的分解(黄伯龄,1987). 据热重分析, 温度 < 400 °C 时, 样品质量损失约 5.25 mg, 占 16.4% 600 ~ 800 °C 损失约 10.1 mg, 占 31.6% 800 ~ 1000 °C 损失约为 3.15 mg, 占 9.8%(图3).

32 mg 结晶体 crys-rt 中有 0.042 mmol FeSO₄ · 0.028 mmol Fe₂(SO₄)₃, 受热分解将释放 10.088 mg SO₃, 与样品在 600 ~ 800 °C 的热重分析质量损失一致, 这也证明了 crys-rt 中所有的铁质均以硫酸盐形式存在, 而 crys-rt 含 4.928 mg H₂O, 15.11 mg SO₃, 与热重分析结果略有差别, 估计在分析温度范围内样品尚未完全分解, 而吸附水含量也比化学分析结果有所增加. 在 900 °C 下将合成绿钾铁矾焙烧 180 min, 焙烧产物 X 射线衍射分析表明除含有赤铁矿外, 还有少量无水软钾镁矾(K₂Mg[SO₄]₂).

结晶操作后酸性滤液中的主要元素有铁、硫或氯、铝、镁、钾、硅等, 表1给出了结晶后废液的主要成分的化学分析结果. 表6是母液 liq-JX1 及 liq-FX2 在结晶后主要金属组分的回收率.

显然, 对于酸浸废液 liq-JX1 而言, 65 °C 结晶回收有用成分的效果优于室温冷却结晶. 在 65 °C 对废液 liq-JX1 蒸发结晶操作后的溶液再次进行蒸发实验, 铁的回收率相应提高到 74.1%, 铝 92.8%, 镁 94.0%, 钾则达到 100%. 可见 2 次蒸发结晶对于回收硫酸酸浸废液中的金属成分是十分有效的.

3.2 盐酸酸浸废液处理

母液 liq-FX1 的结晶产物 crys-85C 为浅黄色疏松粉末, 全铁含量 38.69%, 并含有 23.79% 的 H₂O,

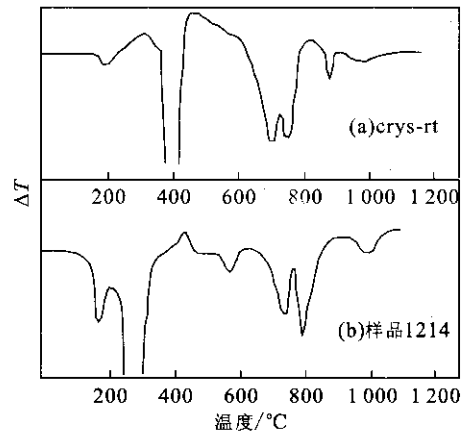


图2 结晶体 crys-rt 差热曲线

Fig. 2 TDA analysis of crys-rt

热分析样品 32 mg, 升温速度 15 °C/min, 走纸速度 2 mm/min; 样品 1214 引自 Beveridge and Day, 1979

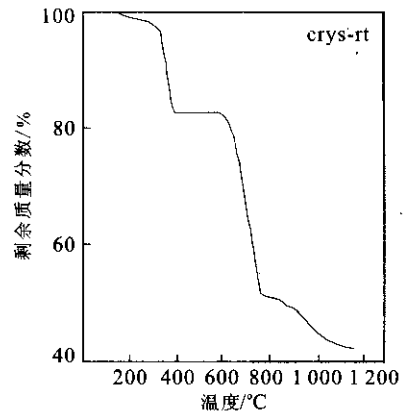


图3 结晶体 crys-rt 热重曲线

Fig. 3 TG analysis of crys-rt

热分析样品 32 mg, 升温速度 15 °C/min, 走纸速度 2 mm/min 计算得到产物中 Fe 与 H₂O 的摩尔比大致为 1:3, 与 FeCl₃ · 7H₂O 结晶水含量相差甚远. 扣除 H₂O 后铁含量为 50.77%, 比 FeCl₃ 理论值 34.4% 要高许多, 与产物中存在二价铁有关. 母液 liq-FX2 的结晶产物 crys-95C 为浅棕红色, 烘干后为黄

表6 酸性废液中主要金属组分的回收率

Table 6 Recovery percentages of principal metallic components in wastewater

样品	结晶温度	回收率/%			
		Fe	Al	Mg	K
liq-JX1	室温	34.1	27.5	16.9	77.2
liq-JX1	65 °C	70.0	63.0	57.2	96.5
liq-FX2	95 °C	53.9	23.3	25.3	18.8

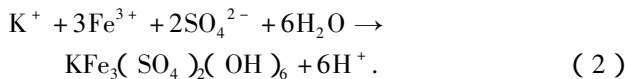
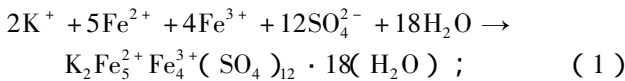
色块体,化学成分分析结果见表5,计算得到化学式为 $(\text{Na}_{0.01} \text{K}_{0.17} \text{Mg}_{0.09} \text{Ca}_{0.09} \text{Mn}_{0.02} \text{Al}_{0.06} \text{Fe}_{0.75}) \text{Cl}_3$, FeCl_3 含量74%,与无水三氯化铁工业用净化剂标准 GB4482-1993 的 I 型标准 93% 尚有一定差距。

比较 2 种废液的主要金属成分回收率,不难发现 liq-FX2 回收率偏低。估计其原因,一是 HCl 大量挥发改变了溶液的组成,相关实验表明,蒸发结晶过程中,氯损失约 10.5%;另外, FeCl_3 的强水解能力也会阻碍铁离子转移到固相中。换言之,则可认为对于酸性废液 liq-FX2,大部分的有用组分都保留到了液相中,而挥发掉的 HCl 也具有很高的纯度,更有利于循环利用。计算表明,46.1% 的铁、76.7% 的铝、74.7% 的镁和 81.2% 的钾都残留于液相中。

3.3 绿钾铁矾形成条件

在酸性溶液中,铁、铝的溶解度由氧化物、羟基化合物、硫酸盐、氯化物等控制,浸出溶液化学环境的改变将影响次生矿物的种类和形态,金属离子是形成新物相还是溶解于溶液将取决于 pH 值、离子活度、溶解度等因素,同时还受到化学反应动力学约束(Shum and Lavkulich,1999)。

假定金属成分在溶液中以简单离子形式存在,则绿钾铁矾和黄钾铁矾的形成过程可以用化学反应方程式(1)和(2)表示如下



比较反应(1)和(2),可以看出:①绿钾铁矾形成过程中,溶液中含有大量二价铁离子,而黄钾铁矾形成溶液中则不能存在 Fe^{2+} 。化学分析结果表明,盐酸除铁废液和硫酸除铁废液中都含有一定量的 Fe^{2+} ,更容易形成绿钾铁矾。②就 1 mol K^+ 而言,形成绿钾铁矾需要 2 mol Fe^{3+} , 2.5 mol Fe^{2+} , 6 mol SO_4^{2-} ,而对于黄钾铁矾,则分别是 3 mol Fe^{3+} , 2 mol SO_4^{2-} ,生成绿钾铁矾需要消耗更多的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 SO_4^{2-} 。铁离子与一价阳离子的浓度比值大于对应化学分子式的系数比时,容易形成稳定的沉淀,反之则容易引入杂质离子(陈家镛等,1991)。酸浸废液 liq-JX1 中,铁离子与碱金属离子浓度比值 $\rho(\text{Fe})/\rho(\text{K})$ 值为 5.1,大于绿钾铁矾的 $\rho(\text{Fe})/\rho(\text{K})$ 值 4.5,也远大于黄钾铁矾的 $\rho(\text{Fe})/\rho(\text{K})$ 值 3,表明废液中碱金属离子含量偏低,而铁质含量偏高。③黄钾铁矾的生成伴随着 H^+ 的产生, H^+ 增多将阻碍反应(2)向右进行。而在 pH 值较低时,必须在较高温度下才能生成黄钾铁矾,20 °C 形成黄钾铁矾 pH 值范围是

2~3,100 °C 为 1~2.3(陈家镛等,1991)。而酸浸废液 liq-JX1 的 pH 值为 0.14,r-JX1 的 pH 值为 -1.12,r-JX2 的 pH 值为 -0.07,酸度均太大,不适合形成黄钾铁矾。④绿钾铁矾晶体中存在多种类质同象替代,易于容纳杂质,杂质通过改变溶液的结构或浓度,改变晶体与溶液接触相界面上液态层特性来影响晶体的形成,杂质离子浓度越大,温度越低,吸附越多(《溶液中金属及其他有用成分的提取》编委会,1995)。随着阳离子被吸附到晶胞上,可吸附点也随之减少,离子间则相互抑制,同时阻碍着水解、络合等反应的进行,最终加速了晶体的形成和生长(Zinck and Dutrizac,1998)。

4 结论

(1)浓酸循环利用并结合蒸发结晶技术回收溶液中的铁等有用成分,是一种行之有效的钾长石酸浸废液资源化和无害化处理方法。(2)硫酸废液循环利用,钾矿石铁的浸出率达到 88.3%。硫酸废液蒸发结晶操作后得到纯度为 94.1% 的绿钾铁矾晶体,铁回收率为 70%,钾回收率为 96.5%。盐酸酸浸除铁废液蒸发结晶产物中 FeCl_3 占 74%。(3)废液呈强酸性、溶液中存在大量 Fe^{2+} 、碱金属离子含量偏低是废液蒸发结晶过程中形成绿钾铁矾而不是黄钾铁矾的主要原因。(4)本工艺无需高温,无需加压,无需添加氧化剂,酸洗废液闭路循环,成本低,操作简单,具有高效、低能耗、低污染的特点,因而具有重要的潜在应用价值。

References

- Beveridge D., Day P., 1979. Charge transfer in mixed-valence solids: Part 9. Preparation, characterization, and optical spectroscopy of the mixed-valence mineral voltaite [aluminium pentairon (II) tri-iron dipotassium dodecasulphate 18-hydrate] and its solid solution with cadmium(II). *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 4: 648-653.
- Chen J. Y., Yu S. Q., Wu Z. C., 1991. Separation and Application of iron in hydrometallurgy industry. Metallurgy Industry Press, Beijing, 93-103 (in Chinese).
- Guiyang Institute of Geochemistry, CAS. A handbook of XRD identification of minerals. Science Press, Beijing, 165 (in Chinese).
- Grohol D., Nocera D. G., 2002. Magnetic minerals made from scratch. *Science* 295: 1797.
- Huang B. L., 1987. A handbook of differential thermal analysis of minerals. Science Press, Beijing, 203-439 (in Chinese).

nese).

Sondi ,I. ,Shi ,S. ,Matijevi ,E. ,2001. Precipitation of monodispersed basic iron (III) sulfate(sodium jarosite) particles. *Colloid Polymer Sciences* 279 :161 – 165.

Shum ,M. ,Lavkulich ,L. ,1999. Speciation and solubility relationships of Al ,Cu and Fe in solutions associated with sulfuric acid leached mine waste rock. *Environmental Geology* 38(1) 59 – 68.

The Editorial Committee of Metal and Other Useful Components Extraction from Solution ,1995. Metal and other useful components extraction from solution. Metallurgy Industry Press , Beijing 398 – 399 (in Chinese).

Wang Z. M. ,Ma X. F. ,Sun W. T. ,et al. ,1995. Study on acidic purification of diatomite and comprehensive utilization of wastewater. *Non-metallic Mines* ,1 :16 – 19 (in Chinese with English abstract).

Yang Y. Q. ,Tian H. ,Wang H. ,1994. Experiment of producing FeCl₃ from acidic leaching water using a non-chlorine oxidation method. *Environmental Protection of Chemical Industry* ,14(2) :88 – 91 (in Chinese with English abstract).

You Z. M. ,1990. A method of recovery of sulfuric acid leaching water. Chinese Patent ,CN104353A.

Zheng J. ,Ma H. W. ,Chen H. ,et al. ,2001. Experimental research into iron removal from K-feldspar powder by acid leaching. *Earth Science—Journal of China University of Ge-*

osciences 26(6) 657 – 666 (in Chinese with English abstract).

Zinck J. M ,Dutrizac ,J. E. ,1998. The behavior of zinc ,cadmium ,thallium ,tin and selenium during ferrihydrite precipitation from sulphate media. *CIM Bulletin* ,91(1019) 94 – 101.

附中文参考文献

陈家镛 ,于淑秋 ,伍志春 ,1991. 湿法冶金中铁的分离与应用. 北京 :冶金工业出版社 ,93 – 103.

黄伯龄 ,1987. 矿物差热分析鉴定手册. 北京 :科学出版社 ,203 – 439.

《溶液中金属及其他有用成分的提取》编委会 ,1995. 溶液中金属及其他有用成分的提取. 北京 :冶金工业出版社 ,398 – 399.

王泽民 ,马小凡 ,孙文田 ,等 ,1995. 酸法提纯硅藻土及废酸综合利用研究. 非金属矿 ,1 :16 – 19.

杨运泉 ,田皓 ,王浩 ,1994. 酸洗废液非氯氧化法生产三氯化铁工业实验. 化工环保 ,14(2) :88 – 91.

由正明 ,1990. 硫酸酸洗废液再生的工艺方法. 中国专利 ,CN104353A.

郑骥 ,马鸿文 ,陈煌 ,等 ,2001. 钾长石粉酸浸除铁的实验研究. 地球科学——中国地质大学学报 26(6) 657 – 666.

中国科学院贵阳地球化学所 ,1978. 矿物 X 射线粉晶鉴定手册. 北京 :科学出版社 ,165.

(上接 58 页)

of China University of Geosciences ,27(2) :127 – 133 (in Chinese with English abstract).

Wang ,Y. X. ,2001. Removal of heavy metals from wastewater using low-cost sorbents :Application of biomass and geomaterials to environmental protection. *Earth Science Frontiers* 8 : 301 – 307 (in Chinese with English abstract).

Yang Z. Z. ,Liao L. B. ,Du H. B. ,et al. ,1999. Application of nonmetallic minerals in environmental cleanup. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry* ,18(4) 257 – 260 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李万山 ,高斌 ,冯建坊 ,等 ,1999. HDTMA 改性粘土对模拟地

下水中苯系物的吸附. 中国环境科学 ,19(3) :211 – 214.

梁起 ,康定学 ,1994. 利用沸石处理含 NH₄⁺ 工业废水. 河南化工 ,1 :27 – 29.

林鸿福 ,1988. 有机膨润土的应用及其制备. 地质实验室 ,4 (2) :134 – 139.

沈耀良 ,1995. 废水处理中的几种廉价吸附剂. 重庆环境科学 ,17(3) :49 – 53.

沈照理 ,王焰新 ,2002. 水 – 岩相互作用研究的回顾与展望. 地球科学——中国地质大学学报 27(2) :127 – 133.

王焰新 ,2001. 去除废水中重金属的低成本吸附剂 :生物质和岩矿材料的环境利用. 地学前缘 8 :301 – 307.

杨赞中 ,廖立兵 ,杜洪兵 ,等 ,1999. 非金属矿物在环境治理中的应用. 矿物岩石地球化学通报 ,18(4) :257 – 260.