

不同反应条件对铜蓝晶体生长的影响

张玉珠, 彭书传, 陈天虎, 刘海波, 陈冬, 马文婕

(纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室(合肥工业大学), 合肥工业大学 资源与环境工程学院,
安徽 合肥 230009)

摘要: 在环境温度下, 水中 Cu^{2+} 与铁硫化物矿物交换反应形成的铜蓝的结晶度可以影响 Cu^{2+} 的回收效率及交换反应的完全程度。本文利用 CuCl_2 和 Na_2S 直接反应生成铜蓝, 讨论了不同 pH 值、反应时间、反应温度、反应物浓度、反应物滴加速度、外加电解质浓度等条件对铜蓝晶体生长的影响, 并采用 XRD、TEM 和 EDX 方法对铜蓝结晶度和形貌进行了表征, 用 Scherrer 公式计算了晶体的平均粒径。结果表明, 反应 pH 值越低, 时间越长, 温度越高, 反应物滴加速度越慢, 越有利于铜蓝晶体生长; 铜蓝晶体结晶度随着反应物浓度的增加呈先增后减的趋势, 而在不同外加电解质浓度条件下表现出不同的结晶度。

关键词: 铜蓝; 晶体生长; 废水处理; 重金属

中图分类号: P579; X75

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)01-0113-07

The effects of different reaction conditions on the crystallinity growth of covellite

ZHANG Yu-zhu, PENG Shu-chuan, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, CHEN Dong and MA Wen-jie

(Key Laboratory of Nanominerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The crystallinity of covellite formed by the exchange reaction of Cu^{2+} and iron-sulfide minerals in water at ambient temperature affects the recovery efficiency of Cu^{2+} and the complete degree of the exchange reaction. In this study, covellite was synthesized via direct reaction of CuCl_2 and Na_2S . The growth of covellite crystal under different conditions, including different pH values, reaction time, reaction temperatures, reactant concentrations, reactant dropping rate, and extra-added electrolyte concentrations, were discussed. The crystallinity and morphology of covellite were characterized by XRD, TEM and EDX. The average particle size of the crystal was calculated by Scherrer formula. The results showed that the lower pH values, longer reaction time, higher reaction temperature and lower reactant dropping rate had favorable effects on the growth of covellite crystals. The crystallinity of covellite increased first and then decreased with the increasing of reactant concentration, and varied with the different concentrations of extra-added ions.

Key words: covellite; crystal growth; wastewater treatment; heavy metals

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772035)

收稿日期: 2019-07-25; 接受日期: 2019-10-28; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772035)

作者简介: 张玉珠(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向主要为环境矿物学, E-mail: zyz0016@qq.com; 通讯作者: 彭书传, 男, 教授, E-mail: scpeng@vip.sina.com。

黄铁矿是自然界分布最广泛的矿物之一,主要用来提取硫磺生产硫酸,副产品硫酸烧渣用来炼铁(Lü *et al.*, 2012)。但是近年来,随着天然气脱硫副产硫磺等技术的普遍应用以及钢铁行业产能严重过剩,黄铁矿生产硫酸副产铁精粉的技术工艺已变得无利可图,天然黄铁矿本身又极易氧化产生酸性矿山废水,从而污染环境(Evangelou and Zhang, 1995; 谢先德等, 2001; Valente and Gomes, 2009)。目前,作为矿物材料的铁硫化物用于处理废水在国内外受到广泛关注(鲁安怀, 1999; Waters *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2014, 2016; 石俊仙等, 2015; Labiadh *et al.*, 2015; Abdul *et al.*, 2019)。本课题组前期进行了热活化黄铁矿处理含铜废水的动态模拟实验,处理水量达到1 600倍柱床体积时反应柱可被快速穿透,反应柱底部的铜含量可达到19%,认为铜去除反应机制是由磁黄铁矿溶度积(3.7×10^{-19})与铜蓝溶度积(8.5×10^{-45})的差异推动的磁黄铁矿溶解、铜蓝沉淀反应。分析结果表明,当动态柱失效时即使动态柱底部的热活化黄铁矿也未与水中的铜离子完全反应,通过FE-SEM和TEM观察到铁硫化物样品表面有大量CuS生成,反应柱底部样品表面被微米尺度的球形铜蓝颗粒包围,而顶部样品被微米尺度的针形铜蓝颗粒包围,且铜含量从底部到顶部逐渐降低。热活化黄铁矿未能与铜离子完全反应的原因归结于热活化黄铁矿表面钝化,即在界面反应过程中新生物相(铜蓝、铁氧化物等)覆盖于热活化黄铁矿表面阻止了内部颗粒继续反应(Chen *et al.*, 2014)。显然克服钝化效应,不仅可以提高热活化黄铁矿处理含铜废水的能力,而且可以提高最终产物中铜的含量,进而提高铜回收效率。

铜蓝晶体结晶度越高,晶体颗粒越大,晶体的粒间孔隙就越大,就越利于减弱热活化黄铁矿与铜离子反应的表面钝化效应。通过研究不同pH值等条件下铜蓝晶体的生长规律可以知道不同条件对铜蓝

晶体生长的影响,以此为理论依据改进动态实验方案,找到有效克服钝化效应的方法,以提高热活化黄铁矿处理含铜废水的能力和铜回收率,这对研究热活化黄铁矿表面钝化具有重要意义。本文拟采用CuCl₂和Na₂S直接反应生成铜蓝的方法,以此来探究不同条件对铜蓝晶体生长的影响,为改进动态实验找到解决钝化问题的方法提供理论依据。

1 实验

1.1 实验方法

分别配制一定浓度、pH值的CuCl₂溶液和一定浓度的Na₂S溶液,用蠕动泵将CuCl₂溶液按一定速度滴加到Na₂S溶液中,同时用带控温功能的磁力搅拌器搅拌,控制反应温度、反应物滴加速度、反应物混合时间,得到不同反应条件下生成的CuS样品。反应结束后调节溶液到一定pH值(反应开始时CuCl₂溶液的pH值),静置沉淀一段时间后,倒掉上清液,将CuS样品和一部分液体转移到100 mL离心管中,在振荡器上常温振荡反应,使铜蓝晶体继续生长,振荡反应一定时间后取样。取得的铜蓝样品用去离子水清洗后通过XRD、TEM表征来分析不同条件对铜蓝晶体生长的影响。铜蓝样品在反应物滴加混合和振荡反应的过程中分别经历了晶体成核和生长阶段,具体反应条件详见表1。

1.2 样品表征

使用丹东浩元DX-2700型X射线粉末衍射仪分析样品的物相组成,并用Scherrer公式计算铜蓝的晶体粒径,铜靶,CuK α 射线($\lambda = 0.154\ 056\ \text{nm}$),管电压为40 kV,管电流为30 mA,扫描步宽0.02°,采样时间0.4 s,扫描范围 $2\theta = 20^\circ \sim 70^\circ$ 。在室温下,将含有铜蓝的无水乙醇溶液滴加到透明玻璃片上,无水乙醇蒸发后即得到铜蓝XRD样品。

使用日本电子JEM-2100F型场发射透射电子显

表1 实验方案设计
Table 1 Experimental design

pH值	温度/°C	Cu ²⁺ 浓度/ (mol·L ⁻¹)	S ²⁻ 浓度/ (mol·L ⁻¹)	电解质浓度/ (mol·L ⁻¹)	Cu ²⁺ 滴加速 度/(mL·min ⁻¹)	溶液体积/mL	反应物混合 时间/min	振荡反应 时间/d
1~5	20	0.05	0.05	-	10.00	300+300	30	20
2	20	0.05	0.05	-	10.00	300+300	30	0~50
2	10~50	0.05	0.05	-	10.00	300+300	30	10
2	20	0.01~0.10	0.01~0.10	-	10.00	200+200	20	12
2	20	0.05	0.05	-	0.28~10.00	50+50	5~178	-
2	20	0.05	0.05	0.01~0.50	10.00	250+250	25	10

显微镜(TEM)和高分辨透射电子显微镜(HRTEM)观察样品的形貌变化,并通过 EDX 能谱对铜蓝进行元素分析。

2 结果与讨论

2.1 产物结构表征

图 1 为在 pH = 1 条件下反应 20 d 后铜蓝的

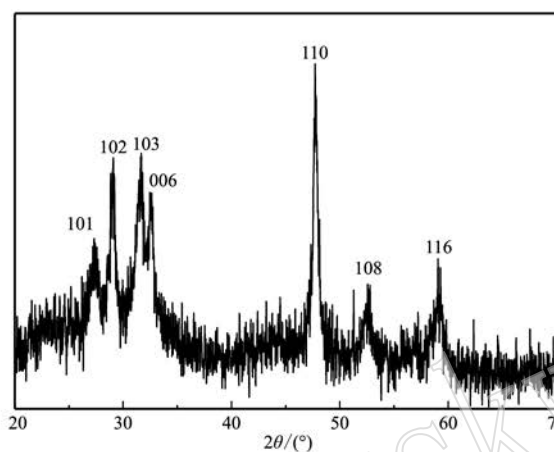


图 1 铜蓝样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of covellite sample

XRD 图谱,所有衍射峰均符合 JCDPS 卡片 06-0464,具标准六方靛铜矿结构,晶胞参数为 $a = b = 0.3791 \text{ nm}$, $c = 1.6344 \text{ nm}$,而且没有出现杂峰,说明产物是单一相的铜蓝。铜蓝衍射峰出现一定程度的宽化现象,说明实验生成铜蓝晶体粒径非常小。图 2 是铜蓝的 EDX 能谱图。从图 2 中可以看出 Cu 和 S 原子比为 $51.08:48.92 = 1.04:1$,与 CuS 中两种元素的化学计量比基本一致,进一步证明实验生成产物为 CuS。

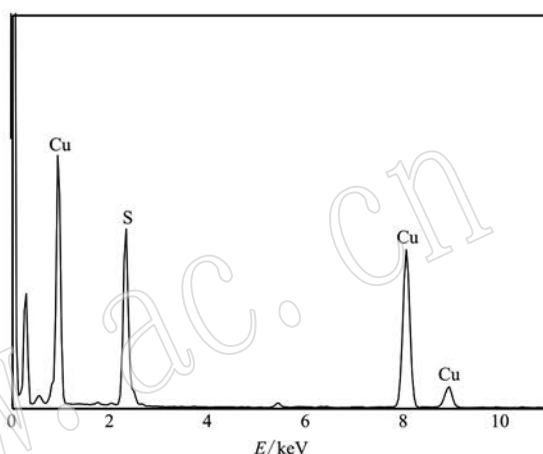


图 2 铜蓝样品的 EDX 图谱

Fig. 2 EDX pattern of covellite sample

为了进一步考察生成产物的形貌和结构,对生成产物进行了透射电镜分析,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出样品由大量粒径 10 nm 左右的片状颗

粒组成,样品均匀分布并连接成一片。通过 HRTEM 照片可以明显看出生成样品的晶格条纹,通过测量得到样品的晶格间距为 0.2858 nm ,对应(103)晶面。

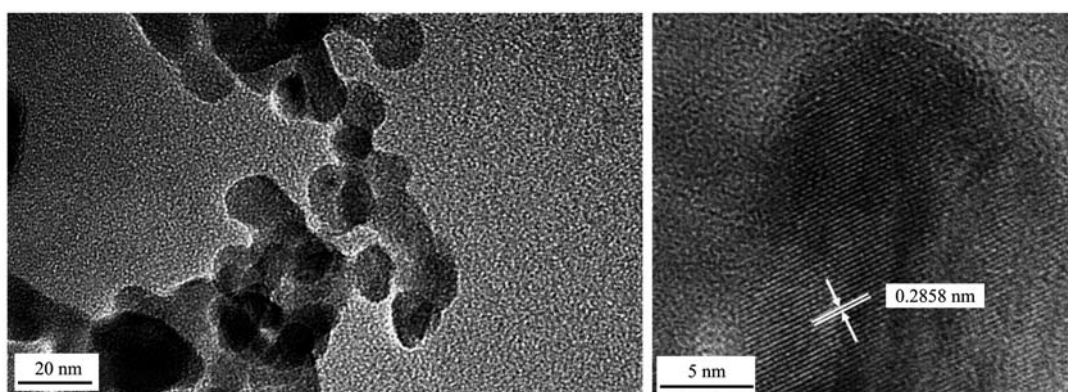


图 3 铜蓝的 TEM 和 HRTEM 图像

Fig. 3 TEM and HRTEM images of covellite sample

2.2 pH 值对铜蓝晶体生长的影响

为研究 pH 值对铜蓝晶体生长的影响,在其他条件不变的情况下,通过控制反应溶液 pH 值的方法做

了一系列对比实验。图 4 为在不同 pH 值(1、2、3、4、5)条件下生成的铜蓝在振荡器上反应 20 d 后取样的 XRD 图谱。对比图 4 中 XRD 图谱可以看出 pH

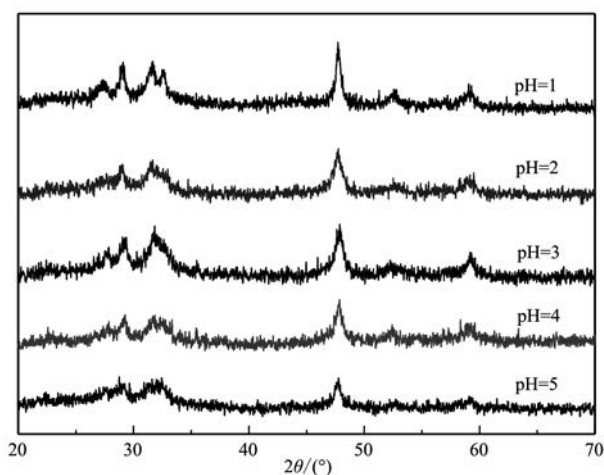


图4 不同pH值条件下生成铜蓝的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of covellite synthesized at different pH values

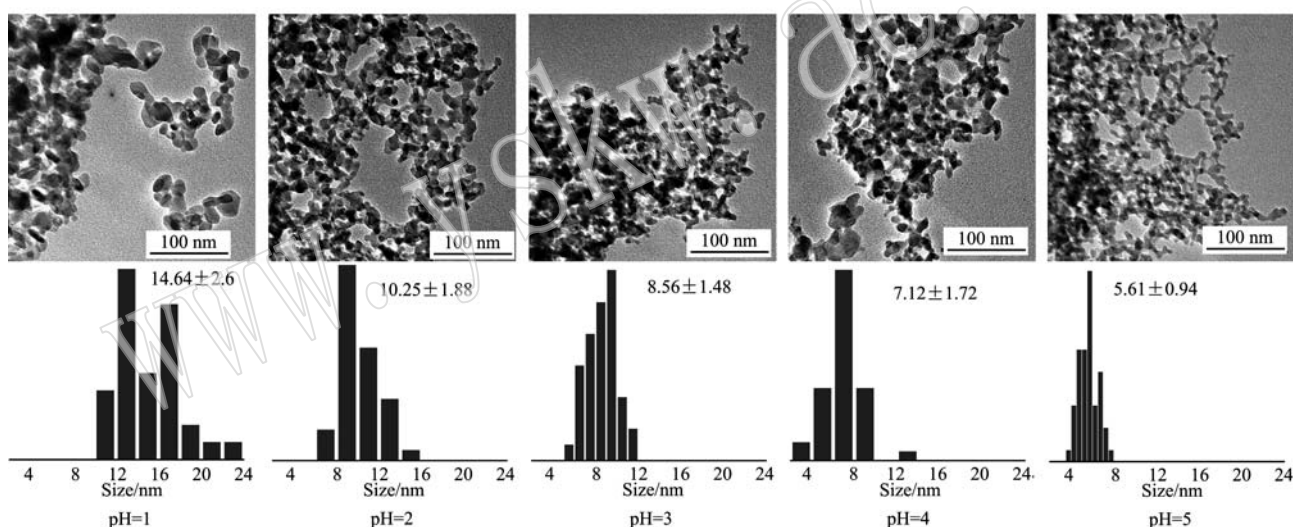


图5 不同pH值条件下生成铜蓝的TEM图像及其粒径统计图

Fig. 5 TEM images and particle size distribution diagrams of covellite synthesized at different pH values

2.3 晶体生长时间对铜蓝晶体生长的影响

为研究晶体生长时间对铜蓝晶体生长的影响,对同一个实验样品在振荡器上反应不同时间后取样得到的产物进行分析。图6为pH=2条件下生成铜蓝在振荡器上振荡反应不同时间(0、1、3、8、20、30、50 d)后取样的XRD图谱。通过对比图6中XRD图谱可以看出随着反应时间的增加,铜蓝晶体的衍射峰明显增强,说明铜蓝结晶度越来越好。在纳米材料的制备过程中,反应物需要经历足够的反应时间才能完成扩散、接触、碰撞、结合、聚集、成核生长等过程及步骤,最后得到结晶度好、形貌规整的目标产

物。反应50 d和30 d后取样的铜蓝XRD衍射峰基本一样,没有继续变强,说明反应30 d后铜蓝已经具有较好的结晶度。

值对铜蓝晶体生长有着显著影响。pH值越低XRD的衍射峰越高,说明铜蓝结晶度越好。图5是在不同pH值条件下生成的铜蓝在振荡器上反应20 d后的TEM图像及其粒径统计图。从TEM图像中可以看出,铜蓝晶体形貌近似为不规则圆片,具有较好的单分散性且分布均匀。对比TEM图片可以看出,不同pH值条件下生成铜蓝的晶体粒径大小具有明显区别。pH值越低,铜蓝越能呈现出清晰明显的片状颗粒,晶体粒径越大。原因可能是pH值越低,溶液中 H^+ 浓度越高, H^+ 与 S^{2-} 反应生成 H_2S 导致溶液中 S^{2-} 浓度降低, S^{2-} 与 Cu^{2+} 混合形成铜蓝晶核的速度变慢。而pH值较高时, Cu^{2+} 和 S^{2-} 浓度较高,二者迅速反应生成大量铜蓝晶核,这些晶核来不及定向生长为纳米片即长成大颗粒,生成的铜蓝结晶度较低。

物。反应50 d和30 d后取样的铜蓝XRD衍射峰基本一样,没有继续变强,说明反应30 d后铜蓝已经具有较好的结晶度。

2.4 反应温度对铜蓝晶体生长的影响

为研究反应温度对铜蓝晶体生长的影响,反应过程中通过磁力搅拌器控制反应溶液温度(10、20、30、40、50 $^{\circ}C$),样品滴加混合完毕后继续控温搅拌2 h,静置沉淀后将铜蓝样品转移到离心管中振荡反应10 d。图7为不同温度条件下生成铜蓝的XRD图谱。对比图7中XRD图谱可以看出,反应温度对铜蓝晶体的生长具有明显影响,反应温度越高,铜蓝

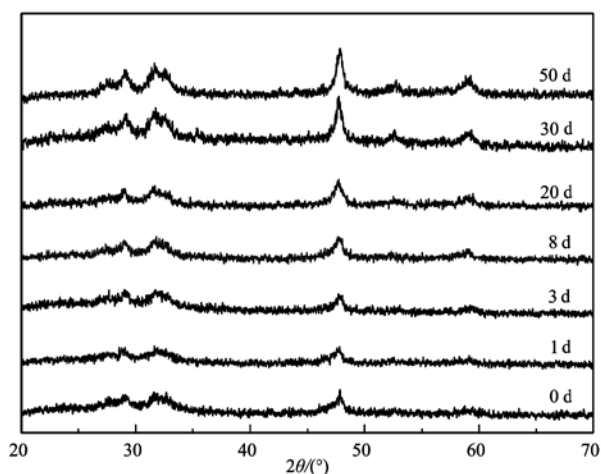


图6 反应不同时间后铜蓝的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of covellite in different time spans

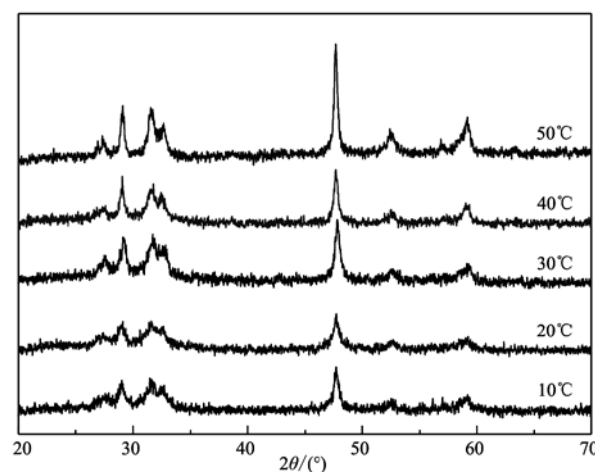


图7 不同温度条件下生成铜蓝的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of covellite synthesized at different temperatures

的衍射峰越强,结晶度越好。在晶体成核阶段,反应温度的升高会促进溶液中 Cu^{2+} 和 S^{2-} 的扩散和反应以及铜蓝晶体生长,所以铜蓝结晶度更好。

2.5 反应物滴加速度对铜蓝晶体生长的影响

为了研究反应物(CuCl_2)滴加速度对铜蓝晶体生长的影响,通过控制反应过程中蠕动泵速度来控制反应物滴加速度(0.28、1、5、10 mL/min),反应物混合时间分别为5、10、50、178 min。图8是在不同反应物滴加速度条件下生成铜蓝的XRD图谱。通过对比图8中XRD图谱可以看出,反应物滴加速度最慢为0.28 mL/min、反应时间最长时,XRD衍射峰要明显高于其他条件,铜蓝结晶度最好。这是因为

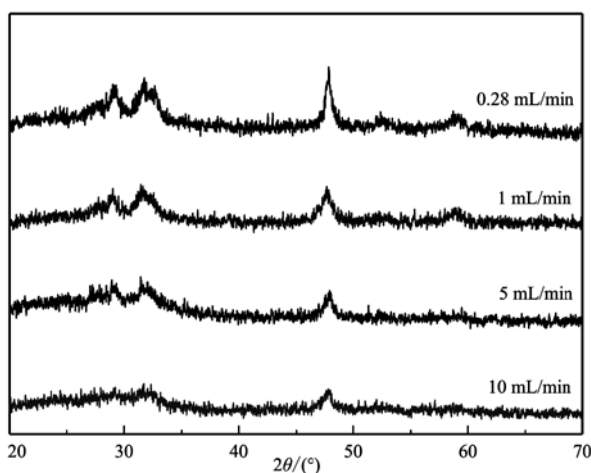


图8 不同反应物滴加速度条件下生成铜蓝的XRD图谱

Fig. 8 XRD patterns of covellite synthesized at different reactant dropping rates

Cu^{2+} 和 S^{2-} 接触后就会迅速反应生成铜蓝,反应物混合速度越快反应时间越短,会导致 Cu^{2+} 和 S^{2-} 反应进行不充分,产物结晶度不好。

2.6 不同电解质浓度的影响

为研究不同电解质浓度对铜蓝晶体生长的影响,在 CuCl_2 和 Na_2S 溶液中分别加入 KCl 、 NaCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 、 Na_2SO_4 和 NaNO_3 配制成分别含有不同浓度(0.01、0.05、0.10、0.50 mol/L)的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 的反应溶液,同时 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别与对应浓度的 Cl^- 共存, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 分别与对应浓度的 Na^+ 共存,将其表示为 $\text{K}^+(\text{Cl}^-)$ 、 $\text{Na}^+(\text{Cl}^-)$ 、 $\text{Ca}^{2+}(2\text{Cl}^-)$ 、 $\text{Mg}^{2+}(2\text{Cl}^-)$ 、 $\text{SO}_4^{2-}(2\text{Na}^+)$ 和 $\text{NO}_3^-(\text{Na}^+)$ 。在其他条件不变的情况下反应得到不同电解质浓度条件下生成的铜蓝,表2是对不同电解质浓度条件下生成铜蓝进行XRD分析后根据 Scherrer 公式计算的样品晶体粒径。

从表2中可以看出电解质种类和浓度都对铜蓝晶体生长具有一定影响。当 $\text{K}^+(\text{Cl}^-)$ 离子浓度从 0.01 mol/L 增加到 0.05 mol/L 时铜蓝结晶度变高,浓度继续增加后铜蓝结晶度又逐渐变低;当 $\text{Na}^+(\text{Cl}^-)$ 离子浓度为 0.10 mol/L 时铜蓝结晶度最高,浓度继续增加到 0.50 mol/L 后铜蓝结晶度又大幅度下降为最低;当 $\text{Ca}^{2+}(2\text{Cl}^-)$ 离子浓度为 0.10 mol/L 时铜蓝结晶度最高,浓度继续增加到 0.50 mol/L 后铜蓝结晶度最低;当 $\text{Mg}^{2+}(2\text{Cl}^-)$ 离子浓度为 0.10 mol/L 时铜蓝结晶度最低,其他浓度下结晶度相差不大; $\text{SO}_4^{2-}(2\text{Na}^+)$ 离子浓度越高,铜蓝结晶度越好;当 $\text{NO}_3^-(\text{Na}^+)$ 离子浓度为 0.05 mol/L 时铜

表2 Scherrer公式计算不同电解质浓度条件下生成铜蓝的晶体粒径

nm

Table 2 Calculation of the crystal size of covellite synthesized at different electrolyte concentrations according to the Scherrer formula

浓度/(mol·L ⁻¹)	K ⁺ (Cl ⁻)	Na ⁺ (Cl ⁻)	Ca ²⁺ (2 Cl ⁻)	Mg ²⁺ (2 Cl ⁻)	SO ₄ ²⁻ (2 Na ⁺)	NO ₃ ⁻ (Na ⁺)
0.01	18.75	23.54	22.55	24.54	17.64	25.87
0.05	26.69	19.13	21.32	23.67	22.37	22.55
0.10	24.98	24.76	25.71	21.21	22.31	26.60
0.50	15.80	18.39	13.51	23.54	27.45	24.69

蓝结晶度最低,其他浓度条件对其影响不大。

2.7 反应物浓度对铜蓝晶体生长的影响

图9为不同反应物浓度(0.01、0.03、0.05、0.10 mol/L)条件下生成铜蓝在振荡器上反应12 d后的XRD图谱。通过对比图9中XRD图谱可以看出,当反应物浓度为0.05 mol/L时,XRD衍射峰最高,铜蓝结晶度最好;反应物浓度低于0.05 mol/L时,浓度越高,衍射峰越强,铜蓝结晶度越好;反应物浓度高于0.05 mol/L时,衍射峰又有所降低。导致这一现象的原因是反应物浓度过低时铜蓝晶体成核和生长速度很慢,产物结晶度不好,随着反应物浓度的增加,铜蓝晶体结晶度随之变好。但在其他条件不变的情况下,反应物浓度过高时,反应体系中Cu²⁺和S²⁻浓度太高会导致铜蓝成核和生长速度过快,反应进行不充分,铜蓝结晶度又变差。

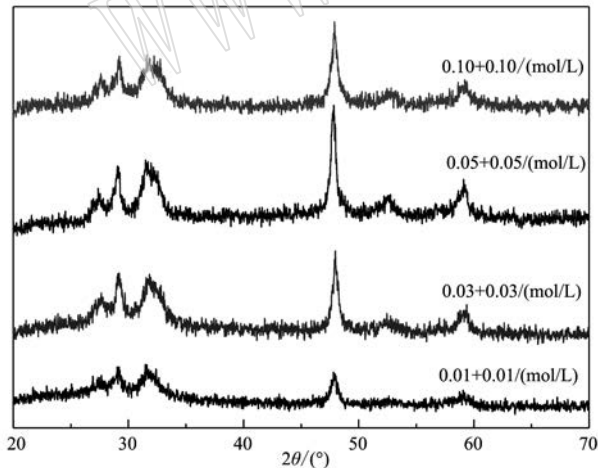


图9 不同反应物浓度条件下生成铜蓝的XRD图谱

Fig. 9 XRD patterns of covellite synthesized at different reactant concentrations

3 结论

(1) 本文利用CuCl₂和Na₂S直接反应生成沉淀的方法成功制备出直径约5~30 nm的片状铜蓝。

(2) 通过研究不同条件对铜蓝晶体生长的影响发现pH值、反应时间、反应温度、反应物滴加速度、反应物浓度、外加电解质浓度对铜蓝晶体生长都有一定影响。其中,反应pH值越低、时间越长、温度越高、反应物滴加速度越慢越有利于铜蓝晶体生长;不同离子分别在其特定浓度下对铜蓝晶体生长有明显的促进或抑制作用,铜蓝晶体结晶度随着反应物浓度的增加呈先增后减的趋势,而在不同外加电解质浓度条件下表现出不同的结晶度。

(3) 根据以上结果,在改进铁硫化物矿物除铜实验方案时可以通过降低溶液pH值、增加水力停留时间、对酸性矿山废水中较高浓度离子进行预处理等方式,使反应条件更加有利于铜蓝晶体的生长,以达到克服钝化效应的目的。

References

- Abdul N A, Abdul-Talib S and Amir A. 2019. Nano-pyrite as a reductant to remove chromium in groundwater[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (2): 1~8.
- Chen Tianhu, Yang Yan, Li Ping, *et al.* 2014. Performance and characterization of calcined colloidal pyrite used for copper removal from aqueous solutions in a fixed bed column[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 130: 82~87.
- Evangelou V P and Zhang Y L. 1995. A review: Pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25(2): 141~199.
- Labiadh L, Oturan M A, Panizza M, *et al.* 2015. Complete removal of AHPS synthetic dye from water using new electro-fenton oxidation catalyzed by natural pyrite as heterogeneous catalyst[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 297: 34~41.
- Lu Anhuai. 1999. The application of environmental mineral materials to the treatment of contaminated soil, water and air[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(4): 292~300(in Chinese with English abstract).

Lü M Y, Wen S M, Xian Y J, *et al.* 2012. Efficiently produce iron concentrate from high-purity pyrite[J]. *Advanced Materials Research*, 622 ~ 623: 500 ~ 503.

Shi Junxian, Zhao Wenyan, Lü Mengkai, *et al.* 2015. The treatment of Cr-containing wastewater in tannery with the mine iron sulfide minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(6): 887 ~ 892 (in Chinese with English abstract).

Valente T M and Gomes C L. 2009. Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage[J]. *Science of the Total Environment*, 407(3): 1 135 ~ 1 152.

Waters K E, Rowson N A, Greenwood R W, *et al.* 2008. The effect of heat treatment on the magnetic properties of pyrite[J]. *Minerals Engineering*, 21: 679 ~ 682.

Xie Xiande and Zhang Gangsheng. 2001. Environmental significance of the interaction between minerals and microbes[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 382 ~ 386 (in Chinese with English abstract).

Yang Yan, Chen Tianhu, Li Ping, *et al.* 2014. Removal and recovery of Cu and Pb from single-metal and Cu-Pb-Cd-Zn multi-metal solutions by modified pyrite: fixed bed columns[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53: 1 180 ~ 1 188.

Yang Yan, Chen Tianhu, Li Ping, *et al.* 2016. Cu removal in real acid mine drainage by modified pyrite: Batch and column experiments [J]. *Mine Water and the Environment*, 36(3): 371 ~ 378.

附中文参考文献

鲁安怀. 1999. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用 [J]. *岩石矿物学杂志*, 18(4): 292 ~ 300.

石俊仙, 赵文岩, 吕梦开, 等. 2015. 矿山铁的硫化物矿物处理皮革厂含铬废水的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(6): 887 ~ 892.

谢先德, 张刚生. 2001. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 20(4): 382 ~ 386.

2018 年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率
1	地球科学	2.385	3 719	0.73	18	地球化学	0.802	1 842	0.95
2	地质学报	2.237	6 626	0.87	19	现代地质	0.800	2 203	0.88
3	地学前缘	2.015	5 710	0.94	20	地球与环境	0.791	1 156	0.95
4	地质论评	1.975	3 702	0.89	21	矿物学报	0.787	1 305	0.89
5	岩石学报	1.850	11 870	0.78	22	岩矿测试	0.778	1 291	0.84
6	地质与勘探	1.750	2 179	0.72	23	地质通报	0.762	4 721	0.91
7	中国科学 地球科学	1.620	5 193	0.95	24	高校地质学报	0.740	1 627	0.96
8	地球学报	1.401	2 214	0.90	25	地质科学	0.682	1 631	0.95
9	中国地质	1.383	3 359	0.86	26	地质科技情报	0.667	1 825	0.82
10	地球科学进展	1.324	3 509	0.93	27	地层学杂志	0.667	889	0.88
11	吉林大学学报地球科学版	1.278	2 607	0.90	28	地质力学学报	0.652	618	0.87
12	矿物岩石地球化学通报	1.192	1 388	0.90	29	矿物岩石	0.648	1 059	0.93
13	沉积学报	1.137	3 407	0.92	30	西北地质	0.559	969	0.89
14	大地构造与成矿学	1.022	1 648	0.93	31	新疆地质	0.422	989	0.88
15	岩石矿物学杂志	0.914	1 571	0.93	32	地质找矿论丛	0.325	524	0.91
16	地球科学与环境学报	0.883	785	0.93	33	矿产与地质	0.304	703	0.83
17	矿床地质	0.864	3 035	0.88	34	地质与资源	0.224	436	0.92

本表数据引自《2019 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。