

典型杂质矿物及离子对黄铜矿浸出影响的研究现状

冷红光, 韩百岁, 杨孟月, 赵通林

(辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 黄铜矿常与黄铁矿、石英、碳酸盐类及硅酸盐类等杂质矿物共生, 而这些矿物的存在会对黄铜矿的浸出产生一定影响。此外, 黄铜矿浸出时常需加入一些氧化剂来促进其溶解, 而额外加入的氧化剂产生的离子以及杂质矿物自身溶解产生的离子也会影响其浸出效率。因此, 本文综述了近年来典型杂质矿物及溶液中离子对黄铜矿浸出影响的相关研究, 旨在为实现高效完全黄铜矿浸出提供理论支撑和科学依据。

关键词: 浸出; 黄铜矿; 杂质矿物; 离子

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.016

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0129-07

黄铜矿 (CuFeS_2) 是地球上铜存在的主要形式, 大约占全部铜资源的 70%^[1-3], 且常与黄铁矿、硅酸盐矿物、碳酸盐矿物等共生。铜冶炼技术根据矿石类型的不同, 主要分为火法冶金以及湿法冶金^[4], 传统的火法冶金技术处理低品位黄铜矿不仅生产成本低, 而且焙烧过程中释放的气体 (如 SO_2) 会严重污染环境。相对而言, 湿法炼铜技术具有成本低、规模大、资源利用率高、产品质量好、建设周期短、环境污染小等优点^[5]。因此, 发展和完善铜湿法冶金技术具有重要的现实意义^[6]。本文综述了近年来典型杂质矿物及溶液中离子对黄铜矿浸出影响的相关研究, 旨在为实现高效完全黄铜矿浸出提供理论支撑和科学依据。

1 代表性杂质矿物对黄铜矿浸出的影响

黄铜矿常与黄铁矿 (FeS_2)、石英 (SiO_2)、白云石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)、绢云母 ($\text{K}_{0.5-1}(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 及其他含 Au、Ag、Zn 等矿物共生。由于上述诸类杂质矿物具有其自身独特的性质, 在浸出过程中难免会对黄铜矿的溶解产生或多或少的的影响。因此, 研究杂质矿

物对黄铜矿浸出的影响具有重大的意义。

1.1 黄铁矿对黄铜矿浸出的影响

黄铁矿是黄铜矿中最常见的伴生矿物。为探究黄铁矿对黄铜矿浸出的影响, 国内外学者开展了大量的实验研究, 主要包括常压浸出、加压浸出和生物浸出研究。

MAJIMA 等^[7] 研究发现, 当多种矿物共存于溶液中时, 会产生协同溶解作用, 即电位较高的矿物溶解被抑制, 而低电位矿物溶解速率增加。含黄铁矿的黄铜矿浸出时, 高电位的黄铁矿能加速低电位黄铜矿的溶解, 进而提高铜的浸出率。白云龙等^[8] 探究了常压条件下黄铁矿对黄铜矿浸出的影响。实验表明, 黄铜矿浸出过程中加入一定量黄铁矿后, 二者在溶液中产生原电池效应, 该作用有效加速了黄铜矿的溶解。当浸出温度为 80°C 、加入黄铁矿量为 1/5 黄铜矿质量时, 铜的浸出率可由不加黄铁矿时的 5% 提升至 20%。Li 等^[9] 开展了黄铁矿对黄铜矿浸出的影响机理研究。结果表明: 当浸出温度为 75°C 、溶液电位为 650 mV 时, 加入适量黄铁矿后铜的浸出率提高了 5 倍。其原因可能是: 人为添加的黄铁矿与黄铜矿

收稿日期: 2021-05-31; 改回日期: 2022-10-08

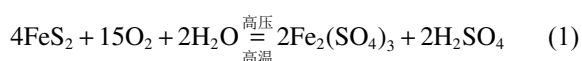
基金项目: 辽宁省教育厅项目 (2020LNQN20)

作者简介: 冷红光 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向湿法冶金。

通信作者: 韩百岁 (1987-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事硫化矿湿法冶金相关研究。

形成了原电池效应,进而加速了黄铜矿的溶解;由于溶液中电子的转移及电流的形成,导致浸出液电位升高,从而进一步促进了黄铜矿的浸出。李宏煦等^[10]的研究也证实了黄铜矿浸出过程中加入适量黄铁矿可使二者之间产生原电池效应,而该作用可有效促进黄铜矿的溶解。

在加压浸出方面, Han 等^[11]考察了加压体系中人为添加的黄铁矿对黄铜矿浸出的影响。结果表明:当实验条件为 2 MPa、180℃ 和 0 M H₂SO₄,黄铁矿与黄铜矿质量百分比为 1:10 时,铜浸出率最高可达 77.6%,与 0.1 M H₂SO₄ 浸出黄铜矿时的铜浸出率基本一致。这是由于黄铁矿在高温高压下生成了硫酸,即为黄铜矿的溶解提供了充足的酸源,因此在 H₂SO₄ 为 0 M 条件下依然得到了较好的黄铜矿浸出效率。反应方程式如下:



在生物浸出方面,王廷健等^[12]探究了黄铁矿对黄铜矿生物浸出的影响。研究表明:黄铁矿在浸出过程中产生的 Fe³⁺、Fe²⁺,既可为浸矿细菌的生长提供能源,也可为黄铜矿的溶解提供氧化剂。浸矿细菌与黄铜矿在氧气环境下发生反应^[13]:



上述生成的硫酸高铁作为一种强氧化剂,可将生成的 Fe²⁺不断氧化成 Fe³⁺,进而促进黄铜矿的溶解。莫晓兰等^[14]以氧化亚铁硫杆菌(*At.f*)为对象,探讨了黄铁矿对黄铜矿生物浸出的影响。实验表明:细菌的氧化作用及硫化矿之间的原电池作用是影响黄铜矿浸出的主要因素。当加入的黄铁矿与黄铜矿质量比小于 5:2 时,主要是 *At.f* 的氧化作用;当二者质量比大于 10:2 时,则是原电池效应起主要作用。Z.Sadowski 等^[15]发现在黄铜矿的生物浸出中,加入浓度为 3% 的黄铁矿后,铜浸出可达 86%;当黄铁矿的添加量超过 3% 时,会对黄铜矿的生物浸出起“抑制”作用,导致铜的浸出率下降了 2.2%。

综上所述,黄铁矿的存在或人为添加的黄铁矿对黄铜矿的浸出具有一定的促进作用,但过量的黄铁矿会对黄铜矿的浸出产生抑制作用,其主要原因是由于黄铁矿自身的溶解机制^[16]而导致的,即黄铁矿的大量溶解会削减与黄铜矿之间的电化学浸出。

1.2 石英对黄铜矿浸出的影响

石英作为一种普遍存在于铜矿物之中的脉石矿物,由于其本身的独特化学性质,即极难溶于一些无机酸、易溶于氢氟酸、可少量溶解于某些有机酸及无机试剂、可部分溶解于细菌的代谢产生的有机酸、多糖^[17]。因此,脉石矿物 SiO₂ 对黄铜矿浸出的影响,主要体现在生物浸出方面。如莫晓兰等^[18]探究了石英对黄铜矿生物浸出的影响。实验表明:黄铜矿的浸出率会随着石英粒度减小而提高。当添加的石英粒度小于 43 μm 时,铜浸出率可由不添加石英时的 34% 提升到 54%。周闪闪^[17]探究了石英促进黄铜矿生物浸出的机理。实验发现,石英溶出的硅能促进黄铜矿的溶解,且铜浸出率随石英粒度的减小而增加。当温度为 30℃、石英粒度为 -43、-74+43 和 -150+74 μm 时,铜浸出率分别为 39%、21% 和 19.9%。实验最终确定了 SiO₂ 对黄铜矿浸出的促进机理,即石英表面可吸附部分黄铜矿浸出过程中产生的沉淀物,进而减少了沉淀物在黄铜矿表面的附着量。Dong 等^[19]通过摇瓶实验,研究了石英含量对黄铜矿生物浸出的影响。实验表明石英的存在可增加与黄铜矿之间的机械摩擦,进而起到减少黄铜矿表面黄钾铁矾附着量并提高铜浸出率的作用。铜浸出率较不含石英时提高了约 20%。

综上所述,石英的粒度大小及溶出的硅是影响黄铜矿生物浸出的重要因素,且铜浸出率随石英粒度的减小而增加。因此,深入研究石英在黄铜矿浸出中的溶解动力学,有助于更好地了解其对黄铜矿浸出的影响。

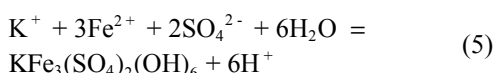
1.3 白云石和绢云母对黄铜矿浸出影响

白云石(CaMg(CO₃)₂)和绢云母(K_{0.5-1}(Al, Fe, Mg)₂(SiAl)₄O₁₀(OH)₂·nH₂O)均是黄铜矿中常见的脉石矿物。在黄铜矿常压浸出和加压浸出中,二者的影响主要体现为消耗大量的浸出剂。然而,在生物浸出过程中,白云石和绢云母对黄铜矿溶解效率的影响却截然不同。

莫晓兰等^[20]发现白云石的存在会对黄铜矿的浸出产生一定抑制作用。在含白云石的黄铜矿浸出初期,由于碱性的白云石与酸发生剧烈中和反应而消耗大量 H⁺,导致浸出体系 pH 值显著上升。这些因素直接导致大量细菌生长环境被破坏而死亡,进而间接削减了黄铜矿的浸出效率^[17]。

莫晓兰等^[27]发现加入适量的绢云母能明显促

进黄铜矿的浸出率。这是由于绢云母可溶解产生 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 K^{+} 等，这些离子进一步发生水解反应而产生 H^{+} (3)~(5) 可有效促进黄铜矿溶解。



当所添加的绢云母的粒级为 $-33\ \mu\text{m}$ 、质量分数为 5.0% 时，铜的浸出率可达 54.88%，比不添加绢云母时的铜浸出率提高了 12%。周闪闪^[17] 探究了绢云母对黄铜矿生物浸出的影响机理。实验将其促进机理总结为：绢云母能吸附浸出中产生的沉淀，致使黄铜矿与细菌接触面积增加；同时绢云母溶出的硅能有效增强细菌生长活性，从而增加铜的浸出率；绢云母溶解产生的 Al^{3+} 、 K^{+} 可使细菌有效吸附在黄铜矿表面，进而促进了黄铜矿的氧化速率。

此外，由于黄铜矿的成矿条件较为复杂，自然界中很难找到单一纯黄铜矿，常与多种脉石矿物共存。莫晓兰等^[20] 研究了多种脉石矿物对黄铜矿浸出的影响。结果表明，铜浸出率由高到低的脉石矿物组合是：石英-绢云母 (45.71%) > 空白 (42.17%) > 石英-绢云母-白云石 (30.16%) > 石英-白云石 (11.85%) > 绢云母-白云石 (10.75%)。同时发现，当加入不同种类脉石矿物时，黄铜矿浸出过程中产生的钝化层也存在一定的差异性：当添加石英时，形成的钝化层主要成分是黄钾铁矾 ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)；当添加白云母时，钝化层主要是由铵黄铁矾 ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$) 构成；当添加绢云母时，钝化层的主要成分为针铁矿 ($\text{FeO}(\text{OH})$)。

以上分析可知，在黄铜矿品位日益低下、成分日益复杂的当下，越来越不能忽视这些杂质矿物对其浸出产生的影响。特别是对于生物浸出来说，区分和筛选不同种类脉石矿物对黄铜矿浸出的影响变得尤为重要。

2 添加离子对黄铜矿浸出的影响

2.1 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 对黄铜矿的影响

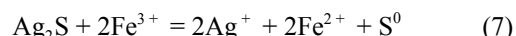
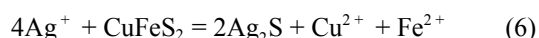
Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 是黄铜矿浸出过程中除 Cu^{2+} 外生成量最多的离子。杨聪仁等^[22] 研究发现，在黄铜矿浸出过程中加入 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 后， CuFeS_2 会转变为结

构简单、更易浸出的 Cu_2S 。在相同条件下，加入 0.1 mol/L Fe^{2+} 时铜的浸出率是加入等量 Fe^{3+} 时的 4 倍。甘晓文等^[23] 发现，加入适量的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 能氧化黄铜矿表面生成的硫层，进而削减钝化层（硫层）对后续黄铜矿浸出的影响，而加入 Fe^{2+} 时生成的是皮壳状、结核状的黄钾铁矾，该生成物分散在溶液中，不易附着在黄铜矿表面，因此对黄铜矿的浸出没有阻碍作用。

实际上黄铜矿自身溶解生成的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 也会对其浸出产生一定的影响。许晓芳^[24] 在研究中发现，细菌可将黄铜矿浸出过程中产生的 Fe^{2+} 不断氧化为 Fe^{3+} ，而生成的 Fe^{3+} 一方面即可为细菌的生长代谢提供能量，另一方面也能作为黄铜矿浸出过程中的氧化剂提升其溶解效率。HAVLIK 等^[25] 研究表明，黄铜矿的浸出依赖于 Fe^{3+} 的浓度，当 Fe^{3+} 浓度过低时，黄铜矿溶解速率明显变慢；而当 Fe^{3+} 浓度超过 0.5 mol/L 后， Fe^{3+} 对浸出的影响不明显。

2.2 Ag^{+} 对黄铜矿的影响

早在之前毛天舒^[34] 就发现， Ag^{+} 的加入能加快黄铜矿的溶解速率，其作用机理如下：



人为添加的 Ag^{+} 可促进黄铜矿的溶解并生成 Ag_2S ，而黄铜矿氧化分解产生的 Fe^{3+} 可将生成的 Ag_2S 又氧化成 Ag^{+} ，进而使上述反应循环发生。王廷健等^[12] 研究发现，在黄铜矿的生物浸出中加入 Ag^{+} 时，铜的浸出率随着 Ag^{+} 的浓度增加而增加，期间生成的 Ag_2S 能与黄铜矿产生原电池效应，从而促进黄铜矿的溶解。Ahmad 等^[27] 研究了 Ag^{+} 在硫酸体系下催化溶解黄铜矿的浸出机理。实验证实，除上述原电池效应外， Ag^{+} 还可以消耗黄铜矿浸出过程中生成的部分 S，并在其表面形成疏松多孔硫层，使得浸出液能与未溶解矿物的接触面积明显增加，进而提高铜的浸出效率。

童雄^[28] 等通过加入 Ag^{+} 、 Hg^{2+} 、 Co^{2+} 、 Bi^{3+} 等金属离子，考察了这些离子对黄铜矿的浸出的催化作用。实验确定， Ag^{+} 是催化黄铜矿溶解的最优离子，其他离子的催化效果从大到小为： $\text{Hg}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Bi}^{3+}$ 。黄铜矿经 Ag^{+} 催化后，铜浸出率可达 90%，远高于不加 Ag^{+} 时的 30%。王康林^[29] 等开展了 Ag^{+} 催化浸出黄铜矿实验。研究发现，当 Ag^{+}

浓度为 2.5 mg/L 时, 铜浸出率仅为 20.76%; 当 Ag^+ 浓度增加到 10 mg/L 时, 铜浸出率提升到 56.86%; 而将浓度进一步提升至 100 mg/L 时, 铜浸出率反而降低为 54%, 由此可知 Ag^+ 虽然对黄铜矿的氧化分解有明显的催化作用, 但并非浓度越高越好。徐伟昌^[30]发现, 过高的 Ag^+ 浓度会对细菌产生毒害而抑制细菌的生长甚至使其死亡, 进而抑制黄铜矿的生物浸出。

2.3 Cu^{2+} 对黄铜矿的影响

黄铜矿浸出的目的就是将其溶解并最终得到 Cu^{2+} 。为了探究 Cu^{2+} 的浓度如何影响黄铜矿的浸出效率, 研究人员开展了大量的实验研究。Saleh Rasouli 等^[31]探究了盐酸体系中 Cu^{2+} 浓度对黄铜矿浸出的影响。结果表明: 当体系温度为 68℃、浸出液为 3 M 盐酸时, 添加浓度 0.2 M 的 Cu^{2+} 后铜浸出率仅为 40%; 当添加的 Cu^{2+} 浓度提升至 0.8 M 时, 铜浸出率可达 58%。

崔亚铨等^[32]对嗜酸喜温硫杆菌进行 6 个月铜耐受定向驯化后, 进行了黄铜矿生物浸出实验。结果表明: 经驯化后的细菌具有较强抵御铜胁迫能力。当 Cu^{2+} 浓度为 0、1 和 3 g/L 时, 驯化后菌株的铜浸出率分别较出发菌株提高了 17.64%、70.93% 和 306.09%。

2.4 其他离子对黄铜矿的影响

李洪枚等^[33]研究了 Mg^{2+} 对黄铜矿细菌浸出的影响。实验表明, 当添加 Mg^{2+} 初始浓度小于 10.5 g/L 时, 对细菌的生长未见不利影响; 当 Mg^{2+} 浓度达到 15.5 g/L 时细菌的生长开始受到抑制作用; 当 Mg^{2+} 增加至 20.5 g/L 时, 细菌生长被完全抑制。蒋金龙等^[34]研究了 Hg^+ 对黄铜矿生物浸出的影响。结果表明: 当 Hg^+ 小于 0.1 g/L 时, 铜浸出率随 Hg^+ 浓度增加而增加; 当 Hg^+ 浓度超过 0.1 g/L 时, 细菌的蛋白质和酶结构中必需的硫醇失去活性, 导致细菌生长被抑制甚至死亡, 进而抑制铜的浸出。此外, As^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 等一些其他金属阳离子也会对细菌产生一定的影响, 均是由于过高离子浓度所导致的细菌活性下降。因此, 在浸出前对浸矿细菌进行定向驯化、或将其氧化成无害的离子(如 As^{3+} 氧化成 As^{5+}) 对实现高效黄铜矿生物浸出意义重大^[35]。

除上述阳离子以外, 科研人员也考察了一些代表性阴离子(如 SO_4^{2-} 、 Cl^-) 对黄铜矿浸出的影响。田国才等^[36]研究发现, SO_4^{2-} 可与溶液中

Fe^{3+} 反应生成 FeSO_4^+ , 从而降低了 Fe^{3+} 的活性并最终引起铜浸出效率的降低。Carneiro 等^[37]探究了 Cl^- 对黄铜矿浸出的影响机理。实验表明: Cl^- 促使矿物表面生成了疏松多孔的硫层, 这不仅增加了黄铜矿表面的孔隙率, 也增加了浸出液与未反应矿物接触的概率。Hiroyoshi 等^[38]探究了 Cl^- 对黄铜矿浸出的影响。结果表明: Cl^- 的添加可提升浸出体系的临界电位值, 使得黄铜矿在该浸出环境中溶解速率变得更快。

李治明等^[39]在亚氯酸钠氧化浸出黄铜矿的实验研究中表明: ClO^- 在溶液中分解成了氧化活性更强的 ClO_3^- 、 Cl_2 、 ClO_2 , 这些新物质的生成可明显加速黄铜矿溶解。当 NaClO_2 与黄铜矿质量比为 6/1 时, 铜浸出率可达 82% 以上。Hernández 等^[40]探究了硝酸根对黄铜矿浸出的催化作用, 在温度为 45℃、浸出时间 7 d 的条件下时, 加入硝酸根可将铜的浸出率提高 3 倍。

3 总结与展望

(1) 典型杂质矿物的存在能促进或抑制黄铜矿的浸出。其中适量的黄铁矿、石英和绢云母可对黄铜矿的浸出起促进作用; 而白云石则对黄铜矿的浸出起抑制作用。

(2) 人为加入的氧化剂产生的离子以及杂质矿物自身溶解产生的离子会对黄铜矿的浸出产生一定的影响, 这些离子可分为阴离子及阳离子。其中适量的 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Ag^+ 、 Al^{3+} 及 Cl^- 、 ClO^- 和 NO_3^- 等有益于黄铜矿的浸出, 而 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 则会抑制黄铜矿的浸出。

(3) 在铜矿品位日渐低下、矿石成分日益复杂的当下, 越来越不能忽略杂质矿物在黄铜矿浸出过程中产生的影响。如果能借助难免杂质矿物的促进作用实现黄铜矿浸出, 不仅能从源头上减少浸出所需氧化剂的消耗, 也能进一步提升其浸出效率。因此, 系统研究并了解各类典型杂质矿物对黄铜矿浸出产生的影响有望成为未来黄铜矿浸出领域的热点课题之一。

参考文献:

- [1] 孙若凡, 刘丹, 杜钰, 等. 黄铜矿、方铅矿分离研究现状及进展[J]. 矿产综合利用, 2021(4):80-86.
- SUN R F, LIU D, DU Y, et al. Research status and development of separation of chalcopyrite and galena[J].

- Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):80-86.
- [2] 卢晶, 王枫, 李磊, 等. 安徽省铜陵马山金硫矿床北段金矿物特征研究[J]. 矿产综合利用, 2020(5):115-119.
- LU J, WANG F, LI L, et al. Study on the characteristics of gold minerals in the northern segment of the Mashan gold-sulfur deposit in Tongling, Anhui province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5):115-119.
- [3] 肖炜, 田小松. 云南迪庆铜铅锌硫化矿浮选分离研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):65-70.
- XIAO W, TIN X S. Study on flotation separation of copper-lead-zinc sulfide ore in Diqing Yunnan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):65-70.
- [4] 张兴勋. 某低品位次生硫化铜矿生物柱浸试验[J]. 矿产综合利用, 2020(3):111-116.
- ZHANG X X. Experiment of biological column leaching of a low-grade secondary copper sulfide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):111-116.
- [5] 张水龙, 刘金艳, 杨林恒, 等. 吉林铜钴镍多金属硫化矿的生物浸出试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):50-53.
- ZHANG S L, LIU J Y, YANG L H, et al. Bioleaching of copper-cobalt-nickel polymetallic sulfide ores in Jilin[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):50-53.
- [6] 王新宇, 李育彪. 黄铜矿的浸出及其动力学研究[J]. 金属矿山, 2017(1):82-85.
- WANG X Y, LI Y B. Study on the chalcopyrite leaching and its kinetics[J]. Metal Mine, 2017(1):82-85.
- [7] Hiroshi Majima, Yasuhiro Awakura, Tetsuji Hirato, et al. The leaching of chalcopyrite in ferric chloride and ferric sulfate solutions[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2013, 24(4).
- [8] 白云龙, 王伟, 谢锋, 等. 黄铁矿对黄铜矿浸出的影响[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2020(7):5-10+40.
- BAI Y L, WANG W, XIE F, et al. Effect of Pyrite on Leaching Behavior of Chalcopyrite[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(7):5-10+40.
- [9] Yubiao Li, Gujie Qian, Jun Li, Andrea Gerson. Chalcopyrite Dissolution at 650 mV and 750 mV in the Presence of Pyrite[J]. Metals, 2015, 5(3).
- [10] 李宏煦, 邱冠周, 胡岳华, 等. 原电池效应对混合硫化铜细菌浸出的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003(5):1283-1287.
- LI H X, QIU G Z, HU Y H, et al. Galvanic effect on mixed sulfide bioleaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003(5):1283-1287.
- [11] Baisui Han, Batnasan Altansukh, Kazutoshi Haga, et al. Leaching and kinetic study on pressure oxidation of chalcopyrite in H_2SO_4 solution and the effect of pyrite on chalcopyrite leaching[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2017, 3(3).
- [12] 王廷健, 周仲魁, 孙占学, 等. 黄铁矿添加量对微生物浸出的影响[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2020(7):53-58.
- WANG T J, ZHOU Z K, SUN Z X, et al. Effect of pyrite addition on microbiological leaching[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(7):53-58.
- [13] 潘灵, 孔迎辰. 黄铁矿在微生物浸矿技术中的应用[J]. 科技资讯, 2011(36):61+63.
- PAN L, KONG Y C. Application of pyrite in microbiological leaching technology[J]. Science & Technology Information, 2011(36):61+63.
- [14] 莫晓兰, 林海, 傅开彬, 等. 黄铁矿促进黄铜矿微生物浸出影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7):761-768.
- MO X L, LIN H, FU K B, et al. Influence factors of pyrite promotion on the bioleaching of chalcopyrite[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(7):761-768.
- [15] Z Sadowski, E Jazdyk, H Karas. Bioleaching of copper ore flotation concentrates[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(1).
- [16] 张冬艳, 张通. 细菌浸出黄铜矿过程中黄铁矿的影响行为[J]. 湿法冶金, 1997(2):4-7.
- ZHANG D Y, ZHANG T. Influence behavior of pyrite on the bioleaching of chalcopyrite[J]. Hydrometallurgy of China, 1997(2):4-7.
- [17] 周闪闪. 脉石矿物在微生物浸出黄铜矿体系的溶出特性及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- ZHOU S S. Study on mechanism and dissolution characteristics of gangue minerals in bioleaching of chalcopyrite[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [18] 莫晓兰, 林海, 董颖博, 等. 石英对微生物浸出黄铜矿的作用[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6):682-687.
- MO X L, LIN H, DONG Y B, et al. Effect of quartz on bioleaching of chalcopyrite[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6):682-687.
- [19] Yingbo Dong, Hai Lin, Shanshan Zhou, et al. Effects of quartz addition on chalcopyrite bioleaching in shaking flasks[J]. Minerals Engineering, 2013:46-47.
- [20] 莫晓兰, 林海, 温建康, 等. 脉石矿物对细菌浸出黄铜矿的影响研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(3):437-445.
- MO X L, LIN H, WEN J K, et al. Effect of gangue minerals on chalcopyrite bioleaching[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(3):437-445.
- [21] 莫晓兰, 林海, 傅开彬, 等. 绢云母对黄铜矿微生物浸出的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(5):1475-1481.
- MO X L, LIN H, FU K B, et al. Effect of sericite on

- bioleaching of chalcopyrite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5):1475-1481.
- [22] 杨聪仁, 焦芬, 覃文庆. 黄铜矿浸出: 强调铜离子和铁离子的作用 (英文)[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(10):2380-2386.
- YANG C R, JIAO F, QIN W Q. Leaching of chalcopyrite: An emphasis on effect of copper and iron ions[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(10):2380-2386.
- [23] 甘晓文, 王军, 赵红波, 等. Fe^{3+} 对黄铜矿与铁闪锌矿分步浸出的影响机制[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1):77-80.
- GAN X W, WANG J, ZHAO H B, et al. Effect of Fe^{3+} on stepwise bioleaching of chalcopyrite and marmatite[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2017, 37(1):77-80.
- [24] 许晓芳. 不同离子胁迫对微生物浸出黄铜矿的影响和机理 [D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- XU X F. Effect and mechanism of different ions stress on bioleaching of chalcopyrite[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [25] HAVLIK T, SKROBIAN M, BALAZP, KAMMELR. Leaching of chalcopyrite concentrate with ferric chloride[J]. International Journal of Mineral Processing, 1995, 43(1/2):61-72.
- [26] 毛天舒. 氯化银对生物浸出黄铜矿精矿的影响[J]. 湿法冶金, 2000, 19(4):63.
- MAO T S. Effect of silver chloride on bioleaching of chalcopyrite concentrate[J]. Hydrometallurgy of China, 2000, 19(4):63.
- [27] Ahmad Ghahremaninezhad, Rebecca Radzinski, Tudor Gheorghiu, et al. A model for silver ion catalysis of chalcopyrite (CuFeS_2) dissolution[J]. Hydrometallurgy, 2015:155.
- [28] 童雄, 孙永贵. 微生物浸出难浸黄铜矿的研究[J]. 矿产综合利用, 1999(4):7-11.
- TONG X, SUN Y G. Study on microbiological leaching of refractory chalcopyrite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1999(4):7-11.
- [29] 王康林, 韩效钊, 汪模辉, 等. 银离子在细菌浸出黄铜矿中的催化行为研究[J]. 矿冶工程, 2003(5):60-62.
- WANG K L, HAN X Z, WANG M H, et al. The study of catalyzing behavior of silver ions in bacterial leaching of chalcopyrite[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2003(5):60-62.
- [30] 徐伟昌. 生物技术在核工业中的应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- XU W C. Application of Biotechnology in the Nuclear Industry[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002.
- [31] Saleh Rasouli, Behrad Mojtahedi, Hossein Yoozbashizadeh. Oxidative Leaching of Chalcopyrite by Cupric Ion in Chloride Media[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020.
- [32] 崔亚铨, 冯守帅, 黄兴, 等. 铜耐受定向驯化强化嗜酸喜温硫杆菌浸出贫黄铜矿[J]. 生物技术通报, 2019, 35(8):95-102.
- CUI Y Q, FENG S, HUANG X, et al. Directed domestication of copper tolerance for enhancing low- grade chalcopyrite bioleaching by *ccidithiobacillus* [J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(8):95-102.
- [33] 李洪枚, 柯家骏. Mg^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌生长活性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000(4):576-578.
- LI H M, KE J J. Effect of Mg^{2+} on growth and activity of *thiobacillus ferrooxidans*[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000(4):576-578.
- [34] 蒋金龙, 汪模辉, 王康林. 金属离子对细菌浸出复杂金属硫化矿的影响[J]. 成都理工学院学报, 2001(2):209-213.
- JIANG J L, WANG M H, WANG K L. The Influence of various metallic ions on the bioleaching of complex metal sulphides[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2001(2):209-213.
- [35] G-J-奥尔松, 汪镜亮, 李长根. 金属硫化矿物的生物氧化基本原理[J]. 国外金属矿选矿, 2004(12):21,34-38.
- G J OHLSSON, WANG J L, LI C G. Fundamental principles of biological oxidation of metallic sulfide minerals[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2004(12):21,34-38.
- [36] 田国才, 胡均贤, 字富庭. 氧化剂在黄铜矿氧化浸出中应用的研究进展[J]. 过程工程学报, 2017, 17(4):664-676.
- TIAN G C, HU J X, ZI F T. Research advances in applications of oxidants in oxidation leaching of chalcopyrite[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4):664-676.
- [37] M F C Carneiro, V A Leão. The role of sodium chloride on surface properties of chalcopyrite leached with ferric sulphate[J]. Hydrometallurgy, 2007, 87(3).
- [38] Hiroyoshi N, Miki H, Hirajima T, et al. Model for ferrous-promoted chalcopyrite leaching[J]. Hydrometallurgy, 2000, 57(1):31-38.
- [39] 李治明, 钟珊, 李育彪, 等. 亚氯酸钠氧化浸出黄铜矿研究[J]. 金属矿山, 2019(1):74-77.
- LI Z M, ZHONG S, LI Y B, et al. Research of chalcopyrite oxidative leaching mechanism by sodium chlorite[J]. Metal Mine, 2019(1):74-77.
- [40] P C Hernández, Taboada M E, Herreros O O, et al. Leaching of Chalcopyrite in Acidified Nitrate Using Seawater-Based Media[J]. Minerals, 2018, 8(6).

Research Status of the Effect of Typical Impurity Minerals and Ions on Chalcopyrite Leaching

Leng Hongguang, Han Baisui, Yang Mengyue, Zhao Tonglin

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology, Anshan, Liaoning, China)

Abstract: Chalcopyrite is often associated with some impurity minerals such as pyrite, quartz, carbonate and silicate minerals, and the presence of these minerals will affect the leaching of chalcopyrite. Additionally, to promote the dissolution of chalcopyrite, some oxidants often need to be added in its leaching process, which generates many unavoidable ions. Therefore, involving the ions produced from the dissolution of impurity minerals will affect the leaching efficiency of chalcopyrite. In this paper, the effect of the typical impurity minerals and ions on chalcopyrite dissolution was reviewed for providing a theoretical foundation for the high-efficiency and complete CuFeS_2 leaching.

Keywords: Leaching; Chalcopyrite; Impurity mineral; Ions

////////////////////////////////////
(上接第 115 页)

Metallogenic Geological Characteristics and Genesis of the Rb-Sn Polymetallic Deposit in Mount Tiantang, Guangdong Province

Liu Tiesheng¹, Chen Wenhui², Huang Xiangkuan³, Cao Yunjiang⁴, Ye Shun⁵, Zhao Yanming⁴

(1. Team 408 of Hunan Bureau of Geology and mineral resources exploration and development, Chenzhou, Hunan, China; 2. Team 418 of Hunan Bureau of Geology and mineral resources exploration and development, Loudi, Hunan, China; 3. Sichuan Guangwang Energy Development (Group) Co., Ltd, Guangyuan, Sichuan, China; 4. Hunan University of Science and Technology, Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Xiangtan, Hunan, China; 5. School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China)

Abstract: Tiantangshan Rb-Sn polymetallic deposit in Guangdong Province is located at the intersection of the southern part of the NNE trending Wuyishan polymetallic metallogenic belt and the eastern end of the Nanling latitudinal polymetallic metallogenic belt. Based on the study of the geological and metallogenic characteristics of the rubidium tin polymetallic ore body in Tiantangshan, Guangdong Province, it is found that the ore body mainly occurs in the volcanic rocks of the second subgroup of the upper Jurassic Gaojiping group and its tectonic fracture alteration zone, joint fissure alteration zone and the uplift of granite. The background concentration of Rb is relatively high in the volcanic rocks of the second subgroup of the Jurassic Gaojiping group, This stratum is the main ore bearing horizon of rubidium ore body. Based on geological characteristics and geochemical evidence, it is considered that the source of minerals is related to volcanic rocks and Yanshanian rocks. The genesis of hornblende type rubidium deposit, greisen type rubidium deposit, albitized granite type niobium tantalum deposit, structural fracture alteration zone (rock) type tin deposit, greisen type tungsten tin deposit, veinlet leaching type tin deposit, lead zinc deposit and copper deposit in the area is post magmatic gas hydrothermal filling metasomatism. The main multi-stage and multi-stage mineralization is a group of ore deposits with genetic relationship formed in different evolution stages, different metallogenic geological conditions and different parts.

Keywords: Tiantangshan Mountain; Guangdong Province; Rb-Sn polymetallic deposit; Geological characteristics; Genesis of deposits