

## 铜矿中伴生金银综合回收研究进展

张 铃<sup>1</sup>, 蒋太国<sup>2</sup>, 方建军<sup>1\*</sup>, 唐 敏<sup>1</sup>, 寇青军<sup>1</sup>, 郑润浩<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 玉溪矿业有限公司, 云南 玉溪 653100)

**摘 要:** 铜矿中伴生的金银矿物是重要的贵金属资源, 其高效利用一直是研究的热点及难点。针对国内铜矿伴生金银资源特点, 从工艺矿物学、选矿工艺、浮选药剂 3 个方面进行了系统评述, 指出了现阶段伴生金银综合回收技术存在的问题。提出详细研究伴生金银的工艺矿物学特性, 选择合理的磨矿细度和选矿工艺流程, 根据伴生金银可浮性, 研发新型、组合药剂, 加强铜硫分离, 提高载体矿物铜精矿的回收率, 是铜矿伴生金银回收利用的重点研究方向。

**关键词:** 选矿技术; 伴生金银; 工艺矿物学; 浮选药剂

中图分类号: TD952 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2020)01-0085-07

### Research Progress of Associated Gold and Silver Recovery in Copper Ores

ZHANG Ling<sup>1</sup>, JIANG Tai-guo<sup>2</sup>, FANG Jian-jun<sup>1\*</sup>, TANG Min<sup>1</sup>, KOU Qing-jun<sup>1</sup>, ZHENG Run-hao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093, China;

2. Yuxi Mining Co. Ltd., Yuxi 653100, Yunnan, China)

**Abstract:** The associated gold and silver minerals in copper mines are important precious metal resources. Their efficient utilization has always been a hot and difficult point of research. According to the characteristics of domestic associated gold and silver in copper mines the recoveries of gold and silver were systematically reviewed from three aspects, process mineralogy, mineral processing technology and flotation reagents. The current problems for the comprehensive recovery of associated gold and silver were pointed out. It is proposed to study the process mineralogy characteristics of associated gold and silver in details, select reasonable grinding fineness and beneficiation process, develop new and combined reagents according to the floatability of associated gold and silver, strengthen the separation of copper and sulphur, and improve the recovery of the carrier copper concentrate as the key research directions for improving the recovery of gold and silver associated with copper mines.

**Key words:** beneficiation technology; associated gold and silver; process mineralogy; flotation reagents

金银是重要的贵金属资源, 多以伴生的形式存在于有色金属矿石中<sup>[1]</sup>。据美国地质调查局统计<sup>[2]</sup>, 截至 2018 年底, 世界陆地已发现铜资源量 21 亿吨, 潜在铜资源量 35 亿吨, 全世界有 2/3 以上的银资源来自于有色金属矿床, 并且铜和铅锌中伴生的金银将继续占据未来储量和资源的较大比重。据我国自然资源部统计<sup>[3]</sup>, 截至 2017 年, 国内铜矿储量达到了 1.06 亿金属吨, 新增查明铜资源储量为 418.11

万吨。尽管铜资源储量持续增加, 但由于国内铜消费增速下降导致铜价下跌, 铜矿中伴生的金银矿物逐渐成为大家关注的热点。因此, 提高铜矿中伴生金银的回收与富集, 不仅能够提高贵金属资源的回收利用, 还可以在保证选铜指标不下降的前提下, 额外增加企业效益。

本文根据近年来国内在铜矿伴生金银矿物研究方面的相关资料, 从工艺矿物学、选矿工艺、浮选

收稿日期: 2019-07-08

第一作者: 张 铃, 女, 硕士研究生, 研究方向: 浮选理论与工艺。E-mail: 526474843@qq.com

\*通讯作者: 方建军, 男, 副教授, 研究方向: 浮选理论与工艺研究。E-mail: 18487126862@126.com

药剂3个方面阐述了铜矿中伴生金银综合回收研究现状,并在此基础上进行了评述,对铜矿中伴生金银综合回收的发展前景进行了展望,为我国伴生金银的回收利用提供参考。

## 1 铜矿伴生金银资源特点

### 1.1 伴生金资源特点

铜伴生金矿床中铜主要以硫化物的形式产出,因其成矿时间、地质条件、矿床成因和类型等不同,造成矿石所含成分及含量存在不同程度的差异。通常含金的硫化铜矿物主要有黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、铜蓝和斑铜矿等;同时,氧化铜矿物中也存在不同数量的伴生金,如孔雀石、蓝铜矿、黑铜矿、硅孔雀石、赤铜矿和胆矾等。其中,黄铜矿是金最重要的载体矿物之一<sup>[4]</sup>。金赋存于铜矿物中的状态大致可分为:粒间金、裂隙金、包裹金和胶体吸附金,嵌布形式的差异影响着选别过程的难易,对于富集回收具有重要意义。

### 1.2 伴生银资源特点

与伴生金类似,铜伴生银矿床中铜主要以硫化物的形式产出,含银的硫化铜矿物主要有黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、斑铜矿和铜蓝等。除此之外,银具有亲铜的特性,能够以不同的含量和形式存在于铜矿物之中。银赋存于铜矿物中的状态大致可分为:粒间银、裂隙银、包裹银<sup>[5]</sup>。其中,以包裹银为主要嵌布形式。

金银的化学性质相似,且均与硫化矿物密切相关。铜作为重要的载体矿物,在实际生产中,很大程度决定了金银的走向和分布情况。载体矿物的回收率提高,伴生金银的回收率也随之提高,由此为回收伴生金银提供了有利的研究方向。

## 2 工艺矿物学

金银的嵌布粒度不均匀,多以包裹金银、粒间金银形式贮存于铜矿床中,因此对金银的回收造成一定影响<sup>[6]</sup>。若想提高铜矿中伴生金银矿物的回收率,首先应确定金银矿物的工艺矿物学特性,再选择与之相适应的工艺流程及药剂制度。

张才学等<sup>[7]</sup>利用单矿物化学分析和扫描电镜研究了云南某铜矿中伴生金银的赋存状态。研究表明该矿床中金、银主要以独立矿物形式产出,与硫化物紧密共生,主要以包裹体的形式存在于黄铜矿和斑铜矿中,部分与硫化物和脉石矿物毗连嵌镶,少

量银矿物包裹于脉石矿物和磁铁矿中。研究还发现金、银的嵌布粒度均较细,多数在0.05 mm以下,因此,金、银要达到单体解离,应将原矿粒度细磨到-0.074 mm。

李艳峰等<sup>[8]</sup>利用 MLA 技术对某铜矿石中伴生的低品位金银矿物进行了系统的工艺矿物学考察。结果表明金、银均以独立矿物形式存在,以微细粒形式产出。金矿物主要为自然金、银金矿和碲金银矿,银矿物主要为碲银矿和硒银矿,两者的主要载体矿物分别为硫化铜矿物和脉石。因此,选择合理的磨浮工艺,金将富集在铜精矿中,银则多存在于石英、钾长石等脉石矿物中,易损失于尾矿。

刘展常<sup>[9]</sup>考察了广西德保钦甲铜锡矿区伴生金银的赋存状态。研究发现金矿物以自然金、银金矿和金银矿为主,银矿物以银金矿为主。黄铜矿、黄铁矿和毒砂为金银的主要载体矿物,一部分金银将随载体矿物黄铜矿产出,另有60%~70%的金银随载体矿物黄铁矿、毒砂被抑制,流失于尾矿中。因此,应注重加强富含黄铁矿、毒砂尾矿部分的回收利用,以期进一步提高伴生金银的回收率。

黄松等<sup>[10]</sup>发现安徽铜陵狮子山铜矿床中金银矿物主要为银金矿、金银矿和少量含金自然银,主要载体矿物为黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿,载金矿物中金的赋存状态以裂隙金、粒间金和包裹金3种类型存在。研究结果表明,通过重选工艺,先将选矿过程中损失和进入尾矿中的单体金回收,再利用后续浮选工艺将铜矿床中伴生的金银矿物加以富集,提高了伴生金银矿物的回收率。

赵向前等<sup>[11]</sup>研究分析了西藏某铜矿中铜及伴生金银的赋存状态,发现主要伴生金银矿物为黄铜矿、斑铜矿和闪锌矿。金矿物的嵌布状态为40%的粒间金、20%~30%的包裹金,以及少部分与斑铜矿连生在一起的自然金。银矿物主要为自然银和碲银矿,其中,自然银粒径多分布在0.01 mm左右,以微裂隙银形式与石英、方解石一起嵌布于斑铜矿、黝铜矿中;碲银矿粒径多分布在0.1~0.3 mm之间。存在少部分微细粒金银矿物分布于脉石矿物中,难以回收。

彭昭银等<sup>[12]</sup>研究了云南新平大红山铜多金属矿床的工艺矿物学,发现金银均以独立矿物形式产出,金银的主要载体矿物为黄铜矿和黄铁矿,自然金多以包裹体的形式赋存于黄铜矿中,银多以独立矿物包裹体和类质同象2种形式赋存于黄铁矿中。

王明燕等<sup>[13]</sup>研究了江西某铜矿铜、硫、金和银

的工艺矿物学特性,结果表明主要的金矿物为自然金,其中一部分以单一形式存在,另一部分以包裹金、裂隙金的形式贮存于黄铁矿中,银的独立矿物有碲银矿、含银黝铜矿和银黝铜矿等。金银的粒度均较细,主要分布在0.001~0.020 mm,在碎磨过程中较难完全单体解离,故包裹于黄铁矿中的金银矿物将进入硫精矿中,从而对浮选回收率造成影响。

方明山等<sup>[14]</sup>运用 AMICS 对某铜矿伴生金银的工艺矿物学进行了研究。研究发现原矿中金品位为0.11 g/t、银品位为2.76 g/t,金银矿物主要以裂隙金银、包裹金银、粒间金银的形式存在,主要金矿物有87.38%分布于自然金、11.76%分布于银金矿,另有微量的铜金矿,主要银矿物有49.31%分布于辉银矿、25.59%分布于碲银矿、19.63%分布于自然银,另有少量分布于舍硫铋铅银矿。

王明燕等<sup>[15]</sup>研究了安徽某铜铅锌多金属矿床中金银的赋存状态。金的载体矿物为黄铜矿、黄铁矿和菱铁矿。其中,由于包裹于黄铁矿和菱铁矿中的金嵌布粒度细,不能完全单体解离,易流失于硫精矿中。银的载体矿物为黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和针硫铋铅矿。同样,由于包裹于黄铁矿的银矿物嵌布粒度细,易流失于硫精矿中,包裹于方铅矿和针硫铋铅矿的银矿物主要进入到铅精矿中,少量包裹于脉石的银矿物易损失于尾矿中。

通过分析国内学者对铜矿伴生金银工艺矿物学的研究发现,我国伴生金银矿石种类繁多,赋存状态复杂,多数金银以独立矿物形式产出,金银的粒度较细,在碎磨过程中较难完全单体解离。因此,赋存于硫化铜矿物中的金银在浮选作业中将伴随载体矿物共同进入铜精矿,此部分易于计价与回收。但是,赋存于黄铁矿或脉石中的金银矿物将进入硫精矿或尾矿中,回收难度较大。

### 3 选矿工艺

在探究查明矿物的工艺矿物学、生产设备性能等基础上,合理的选别流程对于提高伴生金银的指标也十分关键<sup>[16]</sup>。综合回收铜矿伴生金银的各项选矿工艺中,浮选法是回收伴生金银矿物的主要选矿方法<sup>[17]</sup>。

田祯兰等<sup>[18]</sup>为了提高某铜矿伴生金银的选矿指标,分别采用铜硫混合浮选和铜硫等可浮浮选综合回收其中的铜、金和银。结果表明,采用铜硫混合浮选流程,获得铜、金和银的回收率分别为84.10%、48.17%和35.84%;采用铜硫等可浮浮选流

程,获得铜、金和银的回收率分别为83.85%、44.97%和32.65%。因此,铜硫混合浮选流程提高了伴生金银的回收率,而且该流程便于管控,更适合此矿物选别。

赵向前等<sup>[11]</sup>采用快速浮选闭路流程代替原有现场生产工艺,得到铜、金和银的回收率分别为90.21%、67.68%和65.23%的铜精矿,与原厂指标相比铜、金和银的回收率分别提高了1.79、2.86和3.77个百分点,尽量避免了在循环作业中铜、金和银发生可浮性降低或流失等问题。

叶岳华等<sup>[19]</sup>在对蒙古某铜矿伴生金银工艺研究的基础上,采用铜优先-铜和脉石分离浮选工艺,粗选以BKH为选择性捕收剂优先选铜,精选以BKL为抑制剂抑制脉石矿物,将金银富集到铜精矿中,最终获得了含铜24.85%,铜回收率81.88%;含金21.87 g/t,金回收率55.00%;含银515.80 g/t,银回收率68.89%的铜精矿。

邓善芝等<sup>[20]</sup>对某金银铜矿进行了新工艺研究,针对粗精矿中尚未解离的部分连生体矿物,采用粗精矿再磨混合浮选工艺,添加pH调整剂石灰、脉石抑制剂水玻璃、捕收剂XZD-1,获得了铜品位为13.73%,金品位为38.59 g/t,银品位为2160 g/t的良好指标。

张才学等<sup>[7]</sup>通过对云南某铜矿伴生金银进行原矿性质及工艺矿物学研究,发现铜矿中伴生金银的粒度比铜矿物细,为了提高磨矿细度,对现有生产工艺进行了技术改造,采用中矿再磨-分级-返回粗选再选的工艺流程,最终结果表明铜精矿中金和银的回收率分别提高了15.2%和15.8%,强化了细粒级伴生金银的回收。

王洪忠<sup>[21]</sup>对邹平铜矿进行选矿试验研究。根据金的工艺矿物学特性,决定采用重选收金和快速浮选工艺流程,通过在磨矿分级回路中添加重选作业,避免了粗粒级金在此回路中大量聚集,金粒泥化等问题,减少了金的损失。结果表明,金和银的回收率分别提高了10个百分点和5.6个百分点。

阮华东等<sup>[22]</sup>针对武山铜矿伴生金银回收率偏低的问题,使用新型高效捕收剂BK321和抑制剂BK509,采用优先浮铜-中矿再磨的工艺流程,获得了铜品位20.39%、铜回收率88.80%,金品位2.55 g/t、金回收率37.78%,银品位144.70 g/t,银回收率47.36%的理想指标。

浮选工艺是浮选生产的支架,是回收伴生金银的有效手段,担负着十分重要的角色,不仅决定了

浮选生产的可行性,还直接影响选别指标的高低。近年来,随着选矿事业的发展,大量选矿工作者在现有生产工艺的基础上,通过改进流程结构,比如:对于粗粒级的金银矿物,考虑采用重-浮联合流程,减少浮选过程中的损失;对于细粒级的金银矿物,考虑改进磨矿工艺,提高磨矿细度,增加中矿再磨工艺等,以及解决铜硫分离问题多采用的优先浮选、等可浮浮选、混合浮选、部分优先-混合浮选等工艺,在确保铜品位不变的前提下,极大地提高了伴生金银的回收。

## 4 浮选药剂

现阶段,我国铜矿石日渐趋向贫、细、杂,确定合理的药剂制度往往能够获得理想的选别效果。近年来,人们特别重视对硫化铜矿浮选药剂的开发使用,尤其在捕收剂和抑制剂的研发与应用方面格外突出<sup>[23]</sup>。目前,针对药剂的研究主要从2个方面开展,一是研发高效、无毒、针对性强的新型捕收剂和抑制剂;二是对传统药剂进行搭配组合<sup>[24]</sup>,无论在哪一方面均取得丰硕成果。

### 4.1 常规药剂

铜矿中伴生的金银矿物往往随主金属得到回收。然而,在硫化铜矿中,硫化铁矿物常与之致密共生,硫化铁矿物在硫化铜矿物中的嵌布特性、含量、可浮性都会直接影响到铜及伴生金银的选矿指标<sup>[25]</sup>,若想获得达标的铜精矿,即要进行铜硫分离。

常用的硫化铁矿及脉石矿物的抑制剂主要有石灰、亚硫酸钠、腐殖酸钠、硫代硫酸钠、水玻璃、六偏磷酸钠、CMC等。其中,石灰是实现铜硫分离的有效抑制剂,但其用量过多会对金银矿物产生抑制作用<sup>[26]</sup>。常用的硫化铜矿捕收剂主要有黄药、黑药、硫氮等<sup>[27]</sup>。

黄药对硫化矿具有捕收作用,而对石英和云母等脉石矿物不具有捕收性,是最重要的巯基捕收剂,捕收能力强,选择性较差。具有刺激性气味、价格低、有毒、易溶于水等特点。黄药的捕收能力与其非极性部分的烃链长度和异构有关,烃链越长,捕收能力越强。异丁基黄药由于带有支链,在捕收能力方面强于正丁基黄药。韩宪景<sup>[28]</sup>采用碳酸钠为调整剂、丁基黄药为浮选捕收剂强化某细粒难选金银矿石,试验将矿浆pH值调整在7.5~8.5之间,获得了铜品位11.13%、回收率84.15%,金品位476.23 g/t、回收率51.23%,银品位3244 g/t、回收率78.15%的选矿指标。

Y-89系列是由广州有色金属研究院研制的长碳链高级黄药类捕收剂,是硫化铜矿和氧化铜矿的有效捕收剂<sup>[29]</sup>。研究发现,Y-89系列黄药对含金硫化铜矿物具有良好的捕收效果<sup>[30]</sup>。

黑药是仅次于黄药应用较广的硫化矿物的有效捕收剂,其捕收能力较黄药弱,选择性、稳定性较黄药强。黑药类的捕收剂具有起泡性,但价格比黄药高。常用的黑药为丁铵黑药,生产实践表明,用丁铵黑药代替丁基黄药作捕收剂时,金回收率和精矿品位均有提高。丁铵黑药可在较低的pH下进行浮选,故可以节省石灰用量,但因其泡沫情况不好,浮选时较难控制,一般情况下配合其他捕收剂组合使用时,泡沫稳定性得以改善<sup>[31]</sup>。

硫氮类捕收剂的性质和浮选性能与黄药相近,两者的差异在于硫氮类的一个氮原子取代黄药中的氧原子,且具有2个疏水基,因而具有捕收能力强、浮选速度快、用量少等优点。乙硫氮是应用最广的硫氮类捕收剂,其对黄铜矿的捕收能力强,对黄铁矿捕收能力弱,在铜硫分离中表现良好。

### 4.2 新型、组合药剂

金银的可浮性与硫化铜矿物略存在差异,若想实现主金属与伴生贵金属的同时回收,应不断研发对可浮性不同的矿物适应性强、捕收能力强、选择性好、浮选时间长的药剂。

朱月锋<sup>[32]</sup>为了改变某斑岩铜矿伴生金属回收率较低的现状,采用AT-680与丁铵黑药组合代替丁基黄药,与原选矿指标相比,铜精矿中金品位提高了2.33 g/t,金的回收率提高了61.56%,与此同时,银的回收率也有所提高。

徐协刚<sup>[33]</sup>对某矿山的铜锌硫复杂多金属硫化矿进行试验研究,采用丁基黄药与DH-3搭配组合,获得了铜品位20.35%、回收率93.74%,金品位1.26 g/t、回收率44.61%,银品位141 g/t、回收率68.62%的铜精矿。

黄红军等<sup>[34]</sup>为了强化红透山铜矿中伴生金银的回收,采用丁基黄药与丁铵黑药组合捕收银矿物,丁基黄原酸丙烯酸酯强化捕收金矿物,提高了伴生金银的回收率,金、银回收率分别达到58.07%和60.51%,较原工艺相比取得了优良指标。

曹声林等<sup>[35]</sup>为了提高某碳质铜矿伴生金银的回收率进行了试验研究,采用Y-89与丁铵黑药联合捕收剂替代丁基黄药,获得了铜精矿铜品位提高约1%、金品位提高1 g/t、银品位提高10 g/t的良好指标。

武培勇等<sup>[36]</sup>以凤凰山铜矿为研究对象, 采用新型复合捕收剂 BJ-306 代替现场使用的 OSN-43 (丁基黄原酸丙腈酯) 作为部分优先浮选捕收剂, 试验研究结果表明铜、金、和银的回收率分别提高了 1.082%、8.141%和 2.020%, 达到了提高伴生金银回收率的目的。

陈会全<sup>[37]</sup>对大红山铜矿的工艺矿物学进行了分析, 开展了单一、组合捕收剂种类试验研究, 最终试验结果表明, 采用 Y-89 和 CSU-AFJ 组合捕收剂对伴生金银的回收效果较好, 与原工艺相比, 铜回收率提高 1.47%, 金回收率提高 16.4%和银回收率提高 10.71%, 经济效益显著。

焦江涛等<sup>[38]</sup>对新疆阿舍勒铜矿进行试验研究。采用捕收剂 Y-89 与黄药组合代替捕收剂 PAC 和黄药组合, 试验结果与原工艺相比较, 金品位提高了 0.11 个百分点、金回收率提高了 6.91 个百分点, 银品位提高了 4.07 个百分点、银回收率提高了 6.26 个百分点, 为企业创造了良好的经济效益。

谭欣等<sup>[39]</sup>为提高某高硫铜矿石伴生金银指标进行试验研究。在适当降低矿浆碱度(pH 值 10.5~12)条件下, 采用铜选择性捕收剂 BK-306 + BK-321 和高效组合抑制剂 BK-509, 研究表明, 与原现场的高碱工艺相比, 伴生金的回收率提高了 2.07 个百分点, 伴生银的回收率提高了 2.38 个百分点, 强化了对细粒单体金、银矿物的回收。

叶国华等<sup>[40]</sup>对硫氧混合型铜矿伴生金银进行试验研究, 采用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与 $\text{Na}_2\text{S}$ 协同活化、联合分散, 采用乙氧基羰基硫逐氨基甲酸酯(ECTC)与酯-205 联合捕收, 获得了铜品位为 27.88%、回收率为 93.66%, 金品位为 19.83 g/t、回收率为 92.64%, 银品位为 1276.36 g/t、回收率为 85.75%的铜精矿, 取得了理想的技术指标。

新型药剂与组合药剂已成为现阶段乃至未来研究发展的趋势, 单一药剂的吸附特性要远远低于混合药剂, 国内外学者通过研究认为, 混合药剂之间以及药剂与矿物之间存在交互、共吸附、螯合等效应<sup>[41]</sup>, 从而促使了选别过程的进行。因此, 选择适合矿物特性的多种药剂进行联合捕收是提高铜及伴生金银品位和回收率的关键。

## 5 结语

1) 加强对伴生金银载体矿物的综合回收, 一是提高硫化铜矿物的回收率; 二是降低硫化铁矿物和脉石中伴生金银矿物的损失。两者都是研究的重点,

前者是提高伴生金银品位和回收率的主体部分, 但后者往往对提高金银回收率起着关键性作用, 甚至决定着金银回收的极限程度, 是提高伴生金银回收率的潜能所在。

2) 充分探明铜矿中伴生金银矿物的工艺矿物学特性, 通过调整磨矿工艺, 提高伴生金银矿物的单体解离度。

3) 强化铜硫分离, 选择低碱, 实用性强, 生产指标更好的新工艺。

4) 伴生金银与主金属之间存在可浮性差异, 改进浮选药剂制度是提高分选效果的关键, 研发高效、绿色无毒的新型、组合捕收剂和抑制剂, 将继续成为伴生金银回收的研究热点。

## 参考文献:

- [1] 冯博, 朱贤文, 彭金秀, 等. 有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展[J]. 贵金属, 2016, 37(2): 70-76.  
FENG B, ZHU X W, PENG J X, et al. Research progress in recovering associated gold and silver from non-ferrous metal sulfide ores[J]. Precious metals, 2016, 37(2): 70-76.
- [2] USGS. Mineral Commodity Summaries 2019[R]. US Geological Survey, 2019: 53-151.
- [3] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2018[R]. 地质出版社. 2018: 2-5.  
Ministry of natural resources, PRC. China mineral resources 2018[R]. <http://www.gph.com.cn>. 2018: 2-5.
- [4] 蔡玲, 孙长泉, 孙成林, 等. 伴生金银综合回收[M]. 冶金工业出版社. 1999: 55-63.  
CAI L, SUN C Q, SUN C L, et al. Associated gold and silver recovery[M]. [Http://www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn). 1999: 55-63.
- [5] 韩玉光, 方建军, 尧章伟. 硫化铅锌矿中伴生银回收研究进展[J]. 贵金属, 2018, 39(1): 79-85.  
HAN Y H, FANG J J, YAO Z W. Research progress of associated silver recovery in lead-zinc sulphide ores[J]. Precious metals, 2018, 39(1): 79-85.
- [6] 罗晓华, 黄万抚. 伴生金银回收研究与进展[J]. 矿业快报, 2004(1): 5-7.  
LUO X H, HUANG W F. Study and advances of associated gold and silver recovery[J]. Express information of mining industry, 2004(1): 5-7.
- [7] 张才学, 巨星, 张巍, 等. 云南某铜矿伴生金银的赋存状态及综合回收[J]. 矿产综合利用, 2013(5): 24-26.  
ZHANG C X, JU X, ZHANG W, et al. Study on

- occurrence and comprehensive utilization of associated gold and silver in a copper mine in Yunnan[J]. Multi-purpose utilization of mineral resources, 2013(5): 24-26.
- [8] 李艳峰, 付强. 利用 MLA 对某铜矿石中伴生微细粒金、银的工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(4): 1-4.  
LI Y F, FU Q. Study on process mineralogy of low-grade associated gold, silver in a copper ore[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2016(4): 1-4.
- [9] 刘展常. 广西德保钦甲铜锡矿区伴生金银赋存规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(5): 14-17.  
LIU Z C. Study on gold and silver occurrence regularity in Qinjia copper-tin ore area, Debao mine, Guangxi[J]. Nonferrous metals (Mine section), 2010, 62(5): 14-17.
- [10] 黄松, 丁俊华. 安徽铜陵狮子山铜矿床中伴生金的赋存状态及提高回收率途径[J]. 矿产与地质, 1997(5): 342-346.  
HUANG S, DING J H. Occurring state of the associated gold and the ways of increasing its recovery ratio in the Shizishan copper deposit, Tonglin, Anhui[J]. Mineral resources and geology, 1997(5): 342-346.
- [11] 赵向前, 孙春宝. 提高某铜矿铜及伴生金银回收率的研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(7): 48-52.  
ZHAO X Q, SUN C B. Study on increasing the recovery rate of copper and associated gold and silver in a copper mine[J]. Mining research and development, 2015, 35(7): 48-52.
- [12] 彭昭银, 陈维锋. 云南新平大红山铜多金属矿床金、银成矿规律及找矿标志[J]. 现代矿业, 2017(5): 43-47.  
PENG Z Y, CHEN W F. Metallogenic regularity and prospecting indicators of gold and silver in Dahongshan copper-polymetallic deposit in Xinping county, Yunnan province[J]. Modern mining, 2017(5): 43-47.
- [13] 王明燕, 祁小军. 影响江西某铜矿中伴生金、银选矿指标的工艺矿物学因素研究[J]. 矿冶, 2015, 24(1): 81-86.  
WANG M Y, QI X J. Process mineralogy factors affecting the beneficiation indexes of associated gold and silver in a copper mine in Jianxi[J]. Mining and metallurgy, 2015, 24(1): 81-86.
- [14] 方明山, 王明燕. AMICS 在铜矿伴生金银综合回收中的应用[J]. 矿冶, 2018, 27(3): 104-108.  
FANG M S, WANG M Y. Application of amics in comprehensive recovery of associated gold and silver in a copper ore[J]. Mining and metallurgy, 2018, 27(3): 104-108.
- [15] 王明燕, 李磊, 郜伟. 安徽某铜铅锌多金属矿中伴生金银的赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(1): 1-5.  
WANG M Y, LI L, GAO W. Study on occurrence of associated gold and silver for copper-lead-zinc polymetallic ore in Anhui[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2019(1): 1-5.
- [16] 王洪忠. 提高邹平铜矿金银回收率的工艺研究[C]//金属矿产资源高效选冶加工利用和节能减排技术及设备学术研讨会. 桂林: 中国冶金矿山企业协会. 2009: 252-255.  
WANG H Z. Technical study on improving recovery of gold and silver for Zouping's copper ore[C]// Symposium on efficient beneficiation, metallurgical processing and utilization of metal mineral resources, energy saving and emission reduction technology and equipment. Guilin: MMAC, 2009: 252-255.
- [17] FORREST K, YAN D, DUNNE R. Optimisation of gold recovery by selective gold flotation for copper-gold-pyrite ores[J]. Minerals engineering, 2001, 14(2): 227-241.
- [18] 田祎兰, 王立刚, 李成必, 等. 某铜矿伴生金银综合回收试验[J]. 武汉工程大学学报, 2015(5): 18-22.  
TIAN Y L, WANG L G, LI C B, et al. Comprehensive recovery test of associated gold and silver in a copper mine[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015(5): 18-22.
- [19] 叶岳华, 王立刚, 胡志强, 等. 蒙古某铜矿伴生金银浮选回收工艺技术研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(S2): 355-358.  
YE Y H, WANG L G, HU Z Q, et al. Study on the technology of gold and silver flotation recycle of a copper ore in Mongolia[J]. China mining magazine, 2017, 26(S2): 355-358.
- [20] 邓善芝, 曾小波, 熊文良. 某金银铜矿综合利用新工艺研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(12): 103-107.  
DENG S Z, ZENG X B, XIONG W L. A new processing technology of comprehensive utilization on the gold-silver-copper ore[J]. China mining magazine, 2014, 23(12): 103-107.
- [21] 王洪忠. 多金属铜矿无尾排放工艺研究[J]. 金属矿山, 2010(1): 75-80.  
WANG H Z. Study on zero tailing discharge technology of polymetallic copper mine[J]. Metal mine, 2010(1): 75-80.
- [22] 阮华东, 王中明. 提高武山铜矿伴生金银指标试验研

- 究[J]. 世界有色金属, 2016(6): 45-48.
- RUAN H D, WANG Z M. Recovery of lead and zinc ore dressing experiment research in Wushan copper mine[J]. World nonferrous metals, 2016(6): 45-48.
- [23] 汤玉和, 汪泰, 胡真. 铜硫浮选分离药剂的研究现状[J]. 材料研究与应用, 2012, 6(2): 100-103.
- TANG Y H, WANG T, HU Z. Research progress of flotation agents for cu-s separation flotation[J]. Materials research and application, 2012, 6(2): 100-103.
- [24] 王浩林, 王礼平, 王强强, 等. 硫化铜矿石选矿技术发展[J]. 金属矿山, 2017(11): 122-127.
- WANG H L, WANG L P, WANG Q Q, et al. Advances in beneficiation technology of copper sulfide ore[J]. Metal mine, 2017(11): 122-127.
- [25] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 1-2.
- HU X G. Non-ferrous metal sulfide ore dressing[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1987: 1-2.
- [26] 李艺, 梁有彬. 我国铜矿床中伴生金(银)的赋存特征及提高其回收率的途径[J]. 矿产综合利用, 1991(6): 42-49.
- LI Y, LIANG Y B. Occurrence characteristics of associated gold (silver) in copper deposits in China and ways to improve their recovery rate[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 1991(6): 42-49.
- [27] 胡岳华. 矿物浮选[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014: 87-95.
- HU Y H. Mineral flotation[M]. Changsha: Central South University Press, 2014: 87-95.
- [28] 韩宪景. 对细粒难选金、银的综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 1986(3): 20-23.
- HAN X J. Study on comprehensive utilization of difficult selection of gold and silver in fine particles[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 1986(3): 20-23.
- [29] 李志辉, 刘有才, 刘洪萍, 等. 某硫化铜金矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(1): 41-44.
- LI Z H, LIU Y C, LIU H P, et al. Beneficiation experiment research of copper sulfide gold ore[J]. Mining and metallurgical engineering, 2013, 33(1): 41-44.
- [30] 罗惠华, 罗廉明, 王玉林. Y-98捕收剂选金、铜的试验研究[J]. 金属矿山, 2001(3): 30-32.
- LUO H H, LUO L M, WANG Y L. Experimental research of using Y-98 collector in gold and copper separation[J]. Metal mine, 2001(3): 30-32.
- [31] 李定芝. 凤凰山铜矿伴生金银的回收[J]. 世界采矿快报, 1996(18): 11-14.
- LI D Z. Recycling of associated gold and silver in Fenghuangshan copper mine[J]. Mining technology, 1996(18): 11-14.
- [32] 朱月锋. 提高某斑岩铜矿伴生金属回收率的试验研究[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(1): 8-11.
- ZHU Y F. Experimental study of improving the recovery rate of associated metals of some porphyry copper[J]. China mine engineering, 2010, 39(1): 8-11.
- [33] 徐协刚. 捕收剂DH-3浮选铜锌硫化矿石的试验研究[J]. 新疆有色金属, 2014, 37(S1): 115-117.
- XU X G. Experimental study on flotation of copper and zinc sulfide ore by DH-3 collector[J]. Xinjiang nonferrous metals, 2014, 37(S1): 115-117.
- [34] 黄红军, 苏建芳, 孙伟. 强化红透山铜矿中伴生金银回收效果的选铜试验[J]. 金属矿山, 2011(9): 87-90.
- HUANG H J, SU J F, SUN W. Experiment of separating copper meanwhile strengthening the recovery effect of associated gold and silver in Hongtoushan copper mine[J]. Metal mine, 2011(9): 87-90.
- [35] 曹声林, 韩江峰, 王明金, 等. 某碳质铜矿伴生金银元素回收的研究应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(6): 14-16.
- CAO S L, HAN J F, WANG M J, et al. Research and apply on the improving recovery of gold and silver elements from associated carbonaceous copper ore[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2015(6): 14-16.
- [36] 武培勇, 石先祥. BJ-306提高伴生金银回收率的工业应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2007(2): 45-47.
- WU P Y, SHI X X. Research on industrial application of improving the recoveries of associated gold and silver by BJ-306[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2007(2): 45-47.
- [37] 焦江涛, 汪庭成, 康仲海. 新疆阿舍勒铜矿提高铜及伴生金银回收率的试验研究和生产实践[J]. 矿冶, 2010, 19(3): 40-44.
- JIAO J T, WANG T C, KANG Z H. The experiment research and industry practice on increasing the recovery of copper and associated gold and silver of Xinjiang Ashele copper mine[J]. Mining and metallurgy, 2010, 19(3): 40-44.