

## 有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展

冯博<sup>1,2</sup>, 朱贤文<sup>1</sup>, 彭金秀<sup>1</sup>, 汪惠惠<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学 江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州 341000;

2. 西部矿业股份有限公司 博士后科研工作站, 西宁 810000)

**摘要:** 有色金属矿产资源中伴生的金银矿物是贵金属金银资源的重要来源, 伴生金银的回收一直是各国选矿工作者研究的重点。伴生金银资源主要分布在硫化铜、硫化铜铁及硫化铅锌矿石中, 由于共伴生金银嵌布粒度粗细不均, 金银捕收剂对矿石的适应能力不强, 导致现有浮选工艺及药剂制度难以满足伴生金银回收的要求, 严重影响了伴生金银的回收效果。在伴生金银工艺矿物学研究基础上, 针对不同矿石中伴生金银资源的回收特点, 选矿工作者通过改进和强化磨矿工艺、选择合理的工艺流程及开发多种新型金银捕收剂, 显著提高了有色金属硫化矿中伴生金银资源的选矿指标。

**关键词:** 伴生金银; 工艺矿物学; 回收; 进展

**中图分类号:** TD952 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2016)02-0070-07

## Research Progress in Recovering Associated Gold and Silver from Non-ferrous Metal Sulfide Ores

FENG Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Xianwen<sup>1</sup>, PENG Jinxiu<sup>1</sup>, WANG Huihui<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Post-doctoral Scientific Research Workstation, Western Mining Co. Ltd., Xining 810000, China)

**Abstract:** The associated gold and silver, mainly distributed in the copper sulfide ore and iron sulfide ore and copper-lead-zinc sulfide ore, are an important source of gold and silver and need to be recovered. The existing flotation technology and reagent regime do not meet the requirements for recovering associated gold and silver efficiently. The collectors used in the flotation can not be applied to the ores due to the uneven grain sizes of gold and silver inlay in these ores. Basing on the process mineralogy research of the associated gold and silver, the mineral processing workers have significantly improved the existing flotation technology by strengthening the grinding process and developing a variety of more effective gold and silver collectors.

**Key words:** associated gold and silver; process mineralogy; recovery; progress

金和银均是贵金属, 具有众多优良特性, 是国民经济发展和人民生活不可缺少的重要原材料, 在国际金融中也发挥着至关重要的作用, 因此世界各国对金、银的生产都非常重视。随着经济的快速发展, 黄金和白银的生产量和消费量均日益增长。2014年, 世界黄金和白银的产量分别为2860 t和27293 t<sup>[1]</sup>。有色金属矿产资源中伴生的金银矿物

是金银的重要来源, 据不完全统计, 全世界从有色金属矿产资源中回收伴生金的产量约占金总产量的10%, 而伴生银的产量约占银总产量的90%<sup>[2]</sup>。

我国有色金属矿产资源中伴生金银的储量也非常大。据统计, 我国伴生金储量占全国金矿总储量的33.5%, 主要集中于江西、甘肃、安徽、湖北、黑龙江五省; 伴生银矿保有储量62319 t, 占全国银

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404109)、中国博士后科学基金(20142BAB216021)。

第一作者: 冯博, 男, 博士, 研究方向: 矿物加工理论与工艺。E-mail: fengbo319@163.com

总储量的 59.6%<sup>[3]</sup>。长期以来,我国对伴生金银资源的回收不够重视,伴生金银回收率低,资源浪费严重。因此开展提高有色金属硫化矿中伴生金银回收率研究,既可以实现矿产资源综合利用,提高企业经济效益,又可以减少污染,保护环境,促进矿山企业的可持续性发展。本文概述了我国有色金属硫化矿中伴生金银资源的矿石特征、主要回收工艺及浮选药剂,并对伴生金银回收技术发展方向进行了评述,为有色金属硫化矿中伴生金银资源的回收提供借鉴。

## 1 伴生金银资源特点及分类

与金伴生的矿石主要是铜和铜铁矿石,其次是铅锌矿石。伴生金矿床的矿物组合中,金属矿物主要以硫化矿物形式产出,但由于矿床成因、类型、成矿地质条件、成矿时间的不同,使其矿石矿物组成和含量有所不同,金属硫化物主要是黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿。

与银伴生的矿石主要是铅锌矿石,其次是铜矿石,钨、锡、锰矿石中也含有一定量的银<sup>[4]</sup>。伴生银矿床的矿物组合中,银不仅以金属互化物形式存在,而且主要以各种化合物状态产出。金属硫化物主要是方铅矿、闪锌矿、铁闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿。

根据主要金属硫化矿物的不同,我国伴生金银矿石类型大致可分为以下几种:

1) 与单一铜矿石伴生。这类矿石矿物组成简单,铜矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝及少量氧化铜矿物,脉石矿物主要有石英、方解石、长石、白云石、云母、绿泥石等。伴生金银以铜矿物的混入物或单独矿物形式存在,含量较低,但金银能够富集到铜精矿中,浮选流程较为简单,选矿指标较高。

2) 与铜硫矿石伴生。铜硫矿石的矿物组成较单一铜矿石复杂,主要金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、铜蓝、辉铜矿、斑铜矿等,脉石矿物主要有石英、云母、石榴石、绿泥石等。金主要以自然金和银金矿形式存在,银主要以独立矿物存在。矿石中金银含量较低,但与铜的硫化矿物共生关系密切,能够富集在铜精矿中综合回收。

3) 与铜铁矿石伴生。铜铁矿石中主要金属矿物有黄铜矿、辉铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿等,脉石矿物以石榴石、透辉石为主。矿石中除铜、

硫、铁等元素外,还伴生有金、银、钴、钼等元素。矿石中金银含量较低,含金一般为 0.1~2.67 g/t,含银一般为 3~35.5 g/t。由于金银与铜矿物共生关系密切,能够富集在铜精矿中综合回收。

4) 与铅锌矿石伴生。矿石中主要有用矿物为方铅矿和闪锌矿,常见的共生矿物有黄铁矿、硫化铜矿物。金银主要以类质同象形式赋存于方铅矿与闪锌矿晶格中,但也有某些单独的金银矿物。伴生金银主要富集到铅精矿中,少部分富集到锌精矿中。

5) 与铜锌矿石伴生。矿石中主要金属矿物有黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿等,脉石矿物以石榴石、透辉石、蛇纹石、绿泥石、云母等为主。矿石中金银主要呈包裹态分布在铜的硫化物中,选矿时能富集在铜精矿中综合回收。

6) 与铜铅锌矿石伴生。矿石中金属矿物主要有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,其次为黄铁矿、磁黄铁矿、辉铜矿、斑铜矿、磁铁矿、毒砂等,脉石矿物以石英、方解石、绿帘石、透辉石、石榴石等为主。矿石中的金主要呈自然金状态存在,或伴生在黄铜矿与黄铁矿中,银主要呈天然的 Au-Ag 固溶体或银的硫化物状态存在,与矿石中的方铅矿、黝铜矿及砷黝铜矿共生,在选矿过程中主要富集在铜、锌精矿中综合回收。

## 2 伴生金银回收的主要问题及解决措施

### 2.1 伴生金银回收存在的主要问题

共伴生的金银矿物的回收与单独的金银矿物回收存在一些不同,主要表现在<sup>[3]</sup>:

1) 共伴生金银嵌布粒度粗细不均匀,多呈不规则粒状、片状、浑圆状、乳滴状形态以包裹金银及粒间金银形式赋存于矿物体中,给金银的回收带来一定难度。

2) 浮选工艺流程及浮选药剂制度难以满足伴生金银回收的要求。目前生产上使用的金银捕收剂种类较少,且对矿石的适应能力不强,影响了金银的回收效果。

3) 对副产品及尾矿产品中流失金银的回收工作缺乏足够认识,没有采取必要措施,导致金银总体回收率不高。在许多含伴生金银的有色金属矿山企业中,企业只重视铜、铅、锌等主金属的考核,忽视了对伴生金银生产指标的考核,导致选矿生产中没有兼顾回收金、银的需要,使金银不能得到充分的回收。

## 2.2 解决措施

为了解决伴生金银回收存在的问题,需要采取以下措施<sup>[5]</sup>:

1) 改进和强化磨矿工艺。针对各类不同共(伴)生金银矿床中金、银矿物的赋存状态、嵌布特征以及主金属矿物的共生关系,有针对性的改进和强化磨矿工艺。

2) 选择合理的工艺流程。对共(伴)生金银的选矿回收,既要考虑到主金属矿物的选别回收,同时又要考虑到伴生金银的综合回收,对两者要综合平衡,全面考虑。

3) 加强混合用药并研制新药剂。选择合适的药剂制度是提高多金属矿中共(伴)生金银综合回收的有效措施。

## 3 伴生金银回收研究现状

### 3.1 伴生金银的工艺矿物学研究

近年来选矿技术人员对共(伴)生金、银的工艺矿物学进行了深入研究,为综合回收共(伴)生金、银的各项选矿工艺及进行生产技术改造提供了科学依据。

铜矿床是重要的金银共伴生矿床,因此与铜矿伴生的金银矿物的工艺矿物学是研究的重点。宋会侠等<sup>[6]</sup>考察了新疆包古图斑岩铜矿中伴生金、银的赋存状态,发现该铜矿为富金矿床,金平均含量为0.25 g/t,主要以固溶体形式赋存于硫化物中,其中黄铜矿是最主要的载金矿物。张才学等<sup>[7]</sup>发现云南某铜矿中伴生的金、银多以单独矿物形式存在,少部分与硫化物紧密共生,被硫化物包裹或毗连嵌镶,结晶粒度较细,不易单体解离,在浮选时,大多数金银将富集在铜精矿中,少量金、银矿物与脉石(黑云母、石英)和磁铁矿共生,在生产时将损失在浮选尾矿中。吴卫东等<sup>[8]</sup>研究发现武山铜矿矿石中的金矿物主要是自然金,偶见银金矿,银矿物有自然银、辉银矿、硫铋银矿、块硫铋银矿等,铜矿物是金和银的主要载体矿物,因而提高铜回收率将有助于金银的回收。王明燕等<sup>[9]</sup>对影响江西某铜矿中伴生金、银选矿指标的工艺矿物学因素进行了分析,发现金矿物的粒度细,主要分布在0.02 mm以下,故在破碎、磨矿过程中较难完全单体解离,将随着载体矿物的走向而分布,银主要赋存在碲银矿中,粒度细,并且与黄铁矿关系密切,常被包裹在其中,因此这部分银矿物即使在细磨条件下也很难完全单体解

离,易进入到硫精矿中。罗建安<sup>[10]</sup>研究了城门山铜矿伴生金银的赋存状态及其分布规律,发现金主要呈自然金状态产出,次为银金矿,以裸露金和包体金产出于金属硫化物和褐铁矿晶粒间,粒度较细(<0.02 mm);银主要以辉银矿形式存在,次为银汞膏,主要载银矿物为次生硫化铜及褐铁矿、方铅矿、闪锌矿等,颗粒细小,一般为1~3 μm。

杨磊等<sup>[11]</sup>研究了青海某铜铅锌矿床中伴生银的工艺矿物学,发现矿石中伴生银主要以硫化物及碲化物形式存在,主要银矿物为银黝铜矿、碲银矿、辉银矿,银的主要载体矿物为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿,除银黝铜矿外,银矿物粒度细小,一般小于0.01 mm,因此,选择合适的磨矿细度,使嵌布于黄铁矿、闪锌矿、脉石中的银黝铜矿等银矿物解离,并使其进入铜精矿或铅精矿,是提高银回收率的主要途径。严华山等人<sup>[12]</sup>研究了某铜铅锌多金属矿的工艺矿物学,发现金主要以银金矿独立矿物存在,还有一些以分散状态或其他形式分布于载体矿物黄铁矿、方铅矿、闪锌矿中,以粒间金为主,次为包裹金;银主要以独立矿物存在于银碲铜矿、硫碲铜银矿、辉银矿,以及金银互化物中。

蔡劲宏等<sup>[13]</sup>发现南京栖霞山铅-锌-银矿中银矿物以银的硫酸盐矿物为主,锡黝铜矿占90%以上,银矿物种类较单一,有利于选矿富集回收,提高该矿床银的选矿回收率的途径是尽可能地提高银的宿主矿物方铅矿、闪锌矿的回收率,将单体分离的银矿物(主要是银黝铜矿)富集到铅精矿中。

### 3.2 伴生金银选矿工艺研究

与铅锌矿物伴生的金银的回收是研究的热点。甘肃花牛山铅锌矿石中银含量为89.6 g/t,主要为银黝铜矿,王庚辰等通过采用混合用药(丁铵黑药和丁基黄药作为选铅捕收剂)、适当降低铅精矿主品位、粗精矿再磨等多种技术措施,使伴生银的回收率有了较大幅度的提高<sup>[14]</sup>。云南某硫化铅锌矿含银93.81 g/t,为典型的富银铅锌矿,70.21%的银赋存在方铅矿中,15.33%的银赋存在银黝铜矿、柱硫碲铅银矿等独立银矿物中,邹坚坚<sup>[15]</sup>采用“优先浮铅银-活化选锌”工艺流程,采用以丁铵黑药为主的组合药剂HA作捕收剂,强化对铅矿物、银黝铜矿、柱硫碲铅银矿的回收,获得了银品位1401.09 g/t,银回收率82.20%的指标。为了提高某铅锌矿中伴生银的回收率,罗科华等<sup>[16]</sup>采用提高磨矿细度、降低浮选矿浆碱度、添加选择性捕收剂BK901C等工艺措施,

使银回收率提高了 33.57%。马忠臣等<sup>[17]</sup>针对内蒙古敖包吐铅锌硫化矿的矿石性质, 采用优先选铅-铅尾矿选锌流程, 使用组合抑制剂石灰+次氯酸钙抑制黄铁矿, 碳酸钠与硫酸锌组合药剂抑制锌矿物, 乙硫氮+25 号黑药+乙基黄药为铅、银矿物的组合捕收剂, 获得了铅精矿铅品位 45.18%, 铅回收率 88.98%, 含银 1556.55 g/t, 银回收率 73.55% 的指标。林树宾等<sup>[18]</sup>采用抑锌浮铅的优先浮选流程, 使用常规的浮选药剂浮选内蒙古某含银铅锌矿, 银主要富集在铅精矿中, 其含量为 1225.20 g/t, 回收率为 58.95%。杨备等<sup>[19]</sup>采用组合抑制剂(碳酸钠+硫酸锌)在低碱条件下抑锌浮铅, 以乙硫氮为铅矿物捕收剂, 选铅尾矿以硫酸铜作为锌矿物的活化剂, 丁基黄药作为锌矿物捕收剂浮选, 可以实现铅锌银的综合回收, 银在铅精矿中的回收率提高了 10.02%。

与铜矿伴生的金银的回收的特点是铜的回收率高对金银回收影响较大, 铜的回收率越高, 金银回收率就越高, 铜的品位越高, 金银品位也越高, 因此提高铜的选别指标, 意义重大。李锐等<sup>[20]</sup>分析了邹平铜矿伴生金银总回收率低的原因, 提出采用早收快取方案捕收粗颗粒金, 对浮选流程结构进行改革, 选择适宜的磨矿细度、矿浆酸碱度及合理的药剂制度, 是提高金银总回收率的重要技术措施。王洪忠<sup>[21]</sup>采用重选和浮选联合流程强化铜矿中伴生金银的回收, 金的回收率比单一浮选流程提高 15% 以上, 银的回收率提高 10% 以上。陈会全<sup>[22]</sup>针对大红山铜矿伴生金银浮选回收率较低的问题, 在工艺矿物学研究基础上, 以 Y89+CSU-A 为捕收剂, CTP-1 为调整剂, 采用中矿分级再磨新工艺流程处理该矿石, 金回收率提高了 16.4%, 银回收率提高了 10.71%。焦江涛等<sup>[23]</sup>采用 Y89 黄药为捕收剂强化新疆阿舍勒铜矿中铜及伴生金银的回收, 取得了较好指标, 金品位提高 0.11%, 银品位提高 4.07%, 金、银回收率分别提高 6.91% 和 6.26%。某铜矿中伴生金主要以游离金存在, 占全部金的 88.24%, 粒度较粗, 不适于用常规的浮选法回收, 使得粗粒和特别细粒的自然金损失在尾矿中, 回收率最高只有 40%, 张侠等<sup>[24]</sup>采用离心机回收金, 回收率达 52.21%, 富集比可达 583 倍。

多种硫化矿物的存在使伴生金银矿物的回收更加复杂。某铜硫矿石中伴生金品位较低, 难以回收, 刘松采用浮-重联合流程, 浮选采用低碱流程, 以 QP-03 为捕收剂、石灰为抑制剂, 重选使用尼尔森选矿机, 实现了低品位伴生金的高效利用<sup>[25]</sup>。汤雁

冰分析了丰山铜矿伴生金银的回收现状, 认为金银走向基本与铜矿物一致, 控制好铜硫分离作业, 降低金银在硫精矿中的损失, 是提高金银回收率的重要措施<sup>[26]</sup>。李崇德等分析了永平铜矿伴生银的赋存状态, 认为伴生银回收率低主要是尾矿中银的损失造成的, 其次是损失在铜硫分离的硫精矿中, 使用丁胺黑药为捕收剂, 采用等可浮工艺处理该矿石, 大幅度提高了银的回收率<sup>[27]</sup>。武山铜矿矿石中伴生金银赋存情况复杂, 嵌布粒度细, 金回收率为 32%~43%, 银回收率为 50%~65%, 罗晓华采用铜硫混合浮选-再磨-铜硫分离流程, 能够较好地解决武山铜矿伴生金银回收率偏低问题, 与目前选矿生产指标相比, 铜回收率提高 4.01%, 硫回收率提高 21.03%, 金回收率提高 8.63%, 银回收率提高 0.29%<sup>[28]</sup>。福建某含银铜铅锌多金属矿矿石中 55.93% 的银以辉银矿单体存在, 其他银与铋铅硫元素形成硫银矿和辉银矿等以微细包裹体或类质同象形式存在于黄铜矿、铜蓝及部分方铅矿中, 因此提高铜铅回收率是银高效回收的关键, 方夕辉等使用 Z200 与 SN-9<sup>#</sup> 组合捕收剂, 获得了较高的银回收率<sup>[29]</sup>。

### 3.3 伴生金银选矿药剂研究

由于伴生金银矿物主要随主金属矿物进行综合回收, 因此常规的硫化矿物捕收剂, 如黄药、黑药等也是提高伴生金银回收率的有效捕收剂。孙志勇等采用黑药和丁胺黑药组合作为捕收剂回收伴生银矿物, 取得了较好效果<sup>[30]</sup>。罗仙平等研究发现丁胺黑药对铅锌硫化矿石中的含银矿物具有较强的捕收能力, 采用乙硫氮+丁胺黑药混合捕收剂浮选铅矿物时, 可使银矿物在铅精矿中得到有效富集, 银回收率提高了 31.98%<sup>[31]</sup>。

为了强化伴生金银的回收, 选矿工作者开发了多种新型捕收剂。武培勇等使用新型复合药剂 BJ-306 浮选凤凰山铜矿中的金和银, 强化了铜、金、银的回收, 铜、金、银回收率分别提高了 1.08%、8.14%、2.02%<sup>[32]</sup>。吴彩斌等采用对贵金属具有较强捕收能力的 P10 作为选铜药剂, 实现了低品位伴生金的综合回收<sup>[33]</sup>。邱廷省等采用铜捕收剂 LG-03 回收低铜高硫难选铜硫矿石中的伴生金, 取得了较好的选别指标<sup>[34]</sup>。黄红军等采用丁基黄原酸丙烯酸酯作为金的捕收剂浮选红透山铜矿中低品位伴生金, 效果显著<sup>[35]</sup>。彭再华等人使用新型捕收剂酯-116 和新型调整剂 T16 两种药剂, 强化锡铁山铅锌矿中铅、金、银矿物及其连生体矿物的浮选, 提高了伴生金银回收率, 金回收率提高 5.77%, 银回收率提高

1.51%<sup>[36]</sup>。为提高紫金山铜矿中伴生金的回收率,陈波等采用闪浮加一次粗选的抑硫浮铜工艺,在不影响铜回收率的条件下,通过调节浮选矿浆质量分数、加入BP捕收剂及脉石抑制剂HY,显著提高了金的回收率<sup>[37]</sup>。

新药剂和常规硫化矿物捕收剂共用也是研究的重点。Mac-12是一种具有螯合作用的捕收剂,王诚华采用Mac-12捕收剂+少量丁基黄药回收德兴铜矿中的金银,结果表明,铜回收率提高1.05%,金回收率提高7.16%,银回收率提高1.17%<sup>[38]</sup>。某铜矿中的金主要以单体金的形式存在,回收率较低,朱月峰采用AT680与丁胺黑药组合强化单体金的回收,效果显著,与原指标相比,金的品位由2.2 g/t提高到4.53 g/t,回收率由26%提高到87.56%<sup>[39]</sup>。药剂LD(铵类磷酸盐)可与矿物表面的金属离子作用形成疏水性螯合物,该螯合物在适宜的pH及氧化作用下可对一部分银矿物具有捕收作用,从而达到对该部分贵金属的最大限度回收,陈代雄等使用LD处理某矽卡岩型多金属硫化矿床,取得了较好指标,银总回收率提高了17.16%<sup>[40]</sup>。

#### 4 伴生金银回收研究发展方向

伴生金银是金银资源的重要来源,其矿石种类繁多,回收方案复杂,回收难度较大。因此加强伴生金银矿物工艺矿物学的研究是提高伴生金银选矿指标的前提,在此基础上,考察金银矿物在选矿过程中的走向,选择合理的工艺流程,研发新型高效捕收剂强化对伴生金银的回收,是提高金银选矿指标的关键。

#### 参考文献:

- [1] JEWELL S, KIMBALL S M. Mineral commodity summaries 2014[J]. US Geological Survey, 2014.
- [2] 宛鹤. 复杂多金属矿石共伴生金银综合利用的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 2-15.  
WAN H. Experimental study on comprehensive recovery of symbiosis gold and silver from complication polymetallic ore[D]. Xian: Xian university of science and technology building, 2013: 2-15.
- [3] 蔡玲. 伴生金银综合回收[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 3-12.
- [4] 王强. 强化铅锌矿中伴生银回收的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004: 4-7.  
WANG Q. Experimental research of strength silver
- reclaim in galena and sphalerite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004: 4-7.
- [5] 罗晓华, 黄万抚. 伴生金银回收研究与进展[J]. 矿业快报, 2004, 20(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, 20(1): 5-7.
- [6] 宋会侠, 郭国林, 焦学军, 等. 新疆包古图斑岩铜矿伴生元素金和银赋存状态初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(4): 329-334.  
SONG H X, GUO G L, JIAO X J, et al. A preliminary study of the modes of occurrence of associated Au and Ag in the Baogutu porphyry copper deposit, Xinjiang Autonomous Region, China[J]. Acta petrologica et mineralogica, 2007, 26(4): 329-334.
- [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]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2013(5): 24-26.
- [8] 吴卫东, 江亲才. 武山铜矿伴生金银赋存状态的研究[J]. 铜业工程, 2000(3): 26-28.  
WU W D, JIANG Q C. Studies of deposit status for associated gold and silver in wushan copper mine[J]. Copper engineering, 2000(3): 26-28.
- [9] 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 Jiangxi[J]. Mining and metallurgy, 2015, 24(1): 81-86.
- [10] 罗建安. 浅谈城门山铜矿伴生金银的赋存状态及其分布规律[J]. 有色金属: 矿山部分, 2006, 58(5): 10-11.
- [11] 杨磊, 刘飞燕, 刘厚明, 等. 青海某铜铅锌矿床中伴生银的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2009(2): 22-26.  
YANG L, LIU F Y, LIU H M, et al. Process mineralogy study on associated silver in a deposit in Qinghai province. Multipurpose utilization of mineral resources, 2009(2): 22-26.
- [12] 严华山, 尹艳芬, 艾光华. 某铜铅锌伴生金银多金属矿工艺矿物学研究[J]. 矿业研究与开发, 2015(2): 32-36.  
YAN H S, YIN Y F, AI G H. Process mineralogy research on a Cu-Pb-Zn polymetallic ore associated with gold and

- silver[J]. Mining research and development, 2015(2): 32-36.
- [13] 蔡劲宏. 南京栖霞山铅-锌-银矿银的工艺矿物学研究[J]. 矿产与地质, 2007, 21(2): 196-199.
- CAI J H. Research on technological mineralogy of silver in Qixiashan of Nanjing lead zinc silver deposit[J]. Mineral resources and geology, 2007, 21(2): 196-199.
- [14] 王庚辰, 魏德洲. 甘肃花牛山铅锌硫化物矿石中伴生银的回收[J]. 中国矿业, 2005, 14(9): 34-37.
- WANG G C, WEI D Z. The recovery of associated silver in Gansu Huaniushan lead-zinc sulphide ore[J]. China mining magazine, 2005, 14(9): 34-37.
- [15] 邹坚坚. 富银铅锌矿浮选分离试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZOU J J. Research on the flotation separation of rich silver lead-zinc ore[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] 罗科华, 赵志强, 贺政, 等. 提高铅锌矿中伴生银回收率的试验[J]. 有色金属, 2010, 62(3): 13-16.
- LUO K H, ZHAO Z Q, HE Z, et al. Enhancing recovery of accompanying silver from lead-zinc ore[J]. Nonferrous metals, 2010, 62(3): 13-16.
- [17] 马忠臣, 杨长颖, 马延全. 铅锌硫化矿中伴生银综合回收试验研究[J]. 黄金, 2014, 35(11): 64-68.
- MA Z C, YANG C Y, MA Y Q. Experimental research on comprehensive recovery of associated silver in lead-zinc sulfide ores[J]. Gold, 2014, 35(11): 64-68.
- [18] 林树宾, 高鹏跃. 内蒙古某铅、锌、银多金属矿选矿试验[J]. 现代矿业, 2014(6): 38-40.
- [19] 杨备, 刘卫. 提高某铅锌伴生银矿选矿指标试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2012(6): 25-27.
- YANG B, LIU W. Experimental study on improvement of dressing indexes for a lead-zinc-associated silver ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2012(6): 25-27.
- [20] 李锐, 鲁珊红. 提高邹平铜矿伴生金银总回收率的探讨[J]. 矿业快报, 2002(16): 11-13.
- LI R, LU S H. On improving the total recovery of associated gold and silver of Zouping copper mine[J]. Express information of mining industry, 2002(16): 11-13.
- [21] 王洪忠. 提高邹平铜矿金银回收率的工艺研究[C]//中国冶金矿山企业协会矿山技术委员会, 金属矿产资源高效循环利用国家工程研究中心和金属矿山杂志社. 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与技术成果推广交流暨设备展示会. 广西桂林: 金属矿山, 2009.
- [22] 陈会全. 大红山铜矿伴生金银综合回收技术试验研究[J]. 云南冶金, 2005, 34(3): 24-26.
- CHEN H Q. Experiment on complex recovery of associated gold and silver from ore of Dahongshan copper mine[J]. Yunnan metallurgy, 2005, 34(3): 24-26.
- [23] 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 experimental 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.
- [24] 张侠, 何玉凤. 重选法回收铜矿伴生金的工艺研究[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(4): 29-32.
- ZHANG X, HE Y F. Technical study on recovery of associated gold using gravity concentration technique from copper ore[J]. China resources comprehensive utilization, 2012, 30(4): 29-32.
- [25] 刘松. 铜硫矿石中低品位伴生金的回收技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013: 74-76.
- LIU S. Research on recovery technology of low and medium grade associated gold in copper sulfide ore[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013: 74-76.
- [26] 汤雁冰. 丰山铜矿伴生金银回收现状及建议[J]. 新疆有色金属, 2000(4): 20-23.
- [27] 李崇德, 郭可宁, 项则传, 等. 永平铜矿伴生银的赋存状态研究及回收实践[J]. 矿冶, 2001, 10(2): 27-30.
- LI C D, GUO K N, XIANG Z C, et al. A research into occurrence state of associated Ag and its flotation recovery at yongping copper mine[J]. Mining & metallurgy, 2001, 10(2): 27-30.
- [28] 罗晓华. 提高武山铜矿伴生金银回收率选矿试验研究[J]. 矿业快报, 2006, 25(5): 17-20.
- LUO X H. Beneficiation experimental research on increasing recovery of associated gold and silver of wushan copper mine[J]. Express information of mining industry, 2006, 25(5): 17-20.
- [29] 方夕辉, 郑雪华, 陈文亮, 等. 福建某含银多金属矿工艺矿物学及银的高效回收[J]. 有色金属工程, 2015, 5(1): 49-53.
- FANG X H, ZHENG X H, CHEN W L, et al. Mineralogy of a silver-bearing polymetallic yore in Fujian and silver

- efficiently recovering[J]. *Nonferrous metals engineering*, 2015, 5(1): 49-53
- [30] 孙志勇, 李洁, 王重阳, 等. 提高内蒙古某含银铅锌矿选别指标试验[J]. *现代矿业*, 2012(12): 89-91.  
SUN Z Y, LI J, WANG C Y, et al. Test of improve the separation index of a silver lead-zinc deposit in Inner Mongolia[J]. *Modern mining*, 2012(12): 89-91.
- [31] 罗仙平, 周贺鹏, 周跃, 等. 提高某复杂铅锌矿伴生银选矿指标新工艺研究[J]. *矿冶工程*, 2011, 31(3): 35-39.  
LUO X P, ZHOU H P, ZHOU Y, et al. New technique to improve dressing indexes of associated silver in complex lead-zinc ore[J]. *Mining and metallurgical engineering*, 2011, 31(3): 35-39.
- [32] 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 recovery of associated gold & silver by BJ-306[J]. *Nonferrous metals: mineral processing section*, 2007(2): 45-47.
- [33] 吴彩斌, 刘瑜, 周意超, 等. 低金高硫铜矿石回收金选矿试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2014(5): 74-78.  
WU C B, LIU Y, ZHOU Y C, et al. Experimental study on gold recovery from low gold high-sulfur copper ore[J]. *Gold science and technology*, 2014(5): 74-78.
- [34] 邱廷省, 刘燕波, 艾光华, 等. 含金低铜高硫难选铜硫矿浮选分离工艺研究[J]. *矿山机械*, 2014, 42(1): 96-100.  
QIU T S, LIU Y B, Ai G H, et al. Study on flotation separation of a refractory gold-bearing high sulfur low copper copper-sulfur ore[J]. *Mining & processing equipment*, 2014, 42(1): 96-100.
- [35] 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.
- [36] 彭再华, 蒋素芳. 提高锡铁山铅锌矿中伴生金银回收率的试验研究[J]. *湖南有色金属*, 2013, 29(1): 14-17.  
PENG Z H, JIANG S F. Industrial test study of associated gold and silver from Xitieshan lead-zinc ore[J]. *Hunan nonferrous metals*, 2013, 29(1): 14-17.
- [37] 陈波, 余开平, 黄丽亚. 提高铜矿中伴生金的回收率试验[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2014, 33(6): 793-796.  
CHEN B, YU K P, HUANG L Y. Associated gold recovery in copper ore[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2014, 33(6): 793-796.
- [38] 王诚华. 德兴铜矿伴生有价元素回收的生产实践[J]. *金属矿山*, 2006(5): 77-79.  
WANG C H. Production practice of recovering associated valuable elements in Dexing copper mine[J]. *Metal mine*, 2006(5): 77-79.
- [39] 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]. *Chinese mining engineering*, 2010, 39(1): 8-11.
- [40] 陈代雄, 肖骏, 杨建文. 提高矽卡岩型多金属硫化矿床伴生贵金属回收的研究[J]. *有色金属: 选矿部分*, 2014(5): 53-57.  
CHEN D X, XIAO X, YANG J W. Research on improving the recovery of associated precious metals from Skarn-Type polymetallic sulfide ore deposit[J]. *Nonferrous metals: mineral processing section*, 2014(5): 53-57.