

硫化铅锌矿中伴生银回收研究进展

韩玉光, 方建军*, 尧章伟

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 硫化铅锌矿是重要的伴生银矿物来源。综述了近年来国内伴生银矿资源回收利用的研究报道, 从工艺矿物学、选矿工艺以及浮选药剂等3个方面进行评述。提出加强工艺矿物学研究, 改善磨浮工艺, 提高主金属回收率, 使用组合药剂及开发无毒、高效的新型捕收剂, 是提高伴生银回收率的研究方向。

关键词: 有色金属冶金; 伴生银; 工艺矿物学; 选矿工艺; 药剂

中图分类号: TF832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2018)01-0079-07

Research Progress of Associated Silver Recovery in Lead-Zinc Sulphide Ores

HAN Yuguang, FANG Jianjun*, YAO Zhangwei

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology,

State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China)

Abstract: Lead sulfide zinc sulfide is an important source of associated silver minerals. The research reports on the recovery and utilization of domestic associated silver resources in recent years are reviewed, including process mineralogy technology, mineral processing and beneficiation reagents. The future research directions include the improvement of the recovery rate of associated silver by strengthening the study of process mineralogy, optimizing grinding and floating processes, using combined pharmaceuticals and developing new nontoxic and efficient collectors.

Key words: nonferrous metallurgy; associated silver; process mineralogy technology; mineral processing; beneficiation agent

银作为一种重要的贵金属,具有良好的延展性、导电性以及导热性等众多优良特性,是经济发展和日常生活中不可或缺的原材料之一。其产品广泛应用于合金制造、电镀、医疗以及感光材料等领域。银常常伴生于铅锌矿床中,据不完全统计,我国60%的银矿资源来自于铅锌矿床^[1]。长期以来,我国对铅锌矿中伴生银资源的回收利用研究重视程度不够,导致伴生银的回收利用率较低,资源浪费严重,与国外伴生银资源回收率在70%~80%相比,我国还有不小的差距^[2]。因此开展对铅锌矿中伴生银的回收利用研究,对合理利用银矿资源,促进资源可持

续发展具有重要意义。

本文从铅锌矿中伴生银的工艺矿物学、选矿工艺以及浮选药剂进行评述,并对伴生银回收利用技术进行展望,为伴生银资源综合回收利用提供借鉴。

1 伴生银资源特点

铅锌矿中银矿物通常以硫化物和硫盐矿物形式存在,以及少部分独立银矿物。常见的含银矿物有银黝铜矿、硫锑铜银矿、辉银矿、辉铜银矿、深红银矿、银黝铜矿、硫锑银铅矿等。其主要载体矿

收稿日期: 2018-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51364017)。

第一作者: 韩玉光,男,硕士研究生,研究方向: 浮选理论与工艺研究。E-mail: 505709693@qq.com

*通讯作者: 方建军,男,副教授,研究方向: 资源综合利用及浮选理论与工艺研究。E-mail: 2526611652@qq.com

物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿。在铅锌矿床中银矿物与铅锌矿伴生, 主要以类质同象形式赋存于闪锌矿和方铅矿的晶格中^[3], 在回收利用时主要富集在方铅矿中, 另一部分则富集于闪锌矿中。

铅锌矿选矿中往往偏向于对铅锌矿的矿物特征进行研究, 而对铅锌矿中银的工艺矿物学研究较少。银矿物的赋存形式有 3 种: 一种是一包裹体的形式存在于主金属矿物内部, 一种是存在于主金属矿物晶界上, 另一种则存在于金属矿物与脉石矿物的裂缝之中^[4]。对于含伴生银的铅锌矿选矿, 应确定银矿物的种类, 再利用不同银矿物之间的可浮性差异选择合理的工艺和药剂进行回收利用^[5]。

2 伴生银的工艺矿物学研究

伴生银资源回收利用效率不高主要是伴生银的赋存特征较为复杂, 嵌布粒度不均匀, 给伴生银矿物的回收带来不小的困难。因此对银矿物的工艺矿物学研究对伴生银的综合利用具有重要的意义。

聂潇等^[6]考察了河南栾川某铅锌矿中伴生银矿物的赋存状态。研究发现该矿床中银以独立矿物和类质同象 2 种形式出现, 其中独立矿物主要有自然银、辉银矿以及硫铜银矿, 以及银黝铜矿和含银黝铜矿两种以类质同象形式产出。研究还发现辉银矿以包裹体形式赋存于方铅矿中, 硫铜银矿则分布于金属硫化物颗粒周围, 而自然银分布于脉石矿物的晶隙间。

秦伟等^[7]利用电子探针技术研究了南京某铅锌矿中伴生银的赋存状态。结果表明方铅矿和闪锌矿是银的主要载体矿物。其中主要银矿物为银黝铜矿、辉银矿和少部分深红银矿, 银黝铜矿和方铅矿以及闪锌矿共生密切, 而辉银矿主要是以独立矿石嵌布于脉石矿物之中或与方铅矿共生 2 种形式存在。研究还发现银矿物的嵌布粒度较细, 应选取合适的磨矿制度, 使含银矿物解离充分, 以富集到方铅矿中, 从而提高伴生银的回收率。

朱恩静等^[8]研究了湖南黄沙坪铅锌矿中伴生银的工艺矿物学特征。结果显示含银矿物主要有辉银矿、银黝铜矿、硫铜银矿、辉银铅矿以及自然银等, 主要载体矿物为方铅矿、闪锌矿以及黄铜矿。其主要以独立银形式产出, 占 94% 以上; 类质同象与分散银占 5% 左右, 这一部分是由于银离子以类质同象的形式取代铅离子进入方铅矿的晶格中从而形成的晶格银。研究还发现自然银以及辉银矿

以微细分散相形式产出, 银黝铜矿以不规则包裹体充填于方铅矿裂缝中间, 少数具有溶蚀交代方铅矿现象。硫铜银矿呈包裹体存在于黄铜矿中。多数银矿物粒度大于 2 μm , 可以通过磨矿解离富集到精矿中, 而小于 2 μm 的自然银可以在冶炼中回收。

傅贻谟^[9]研究发现凡口铅锌矿中的伴生银主要是银黝铜矿和含银黝铜矿, 约占银矿物总量的 90%, 偶见深红银矿以及脆硫锑铅银矿, 银矿物呈包裹体存在于方铅矿、闪锌矿以及黄铁矿中, 亦或存在于矿物裂隙和界面处。除银黝铜矿粒度较粗外, 其余深红银矿等银矿物粒度较细, 细磨浮选时只能解离少部分银黝铜矿, 其余部分则以包裹体和连生体形式存在于载体矿物中。

王庚辰等^[10]为了提高甘肃某铅锌硫化矿中伴生银的回收率, 对伴生银工艺矿物学和赋存状态进行了研究。结果表明主要含银矿物为银黝铜矿, 其次是深红银矿, 偶见辉银矿。大部分含银矿物呈乳滴状或不规则粒状粗粒嵌布于方铅矿中或与其他矿物的间隙处。大多数深红银矿与方铅矿连生, 少部分则嵌布于脉石的裂缝中, 这部分属于较难回收的银矿物。研究还发现方铅矿是银的主要载体矿物, 在浮选分离过程中, 大多数银黝铜矿难以解离, 一般以包裹体或者连生体的形式存在于载体矿物中, 再加上银黝铜矿天然可浮性相对于方铅矿较差, 因此, 要提高伴生银回收率不仅需要改善载体矿物的浮选条件, 还应考虑到单体银矿物的浮选性质。

王静纯^[11]对云南会泽某铅锌矿中伴生银的工艺矿物学进行了研究。结果表明伴生银以独立银和含银矿物两种状态存在, 其中含银矿物的银以类质同象的形式进入硫化矿物或者硫酸盐矿物当中。主要的含银矿物有含银黝铜矿、含银硫锑铅矿以及含银辉银矿等, 研究还发现含银矿物主要存在于方铅矿中或存在于方铅矿与其他矿物的间隙当中。在对原矿进行金属量平衡计算时发现原矿中 87.84% 的银分布在方铅矿中, 11.36% 的银分布在闪锌矿中, 因此提高铅锌矿中伴生银的回收率的关键在于提高方铅矿和闪锌矿的回收率。

付强^[12]研究了西藏昌都某硫化铅锌矿中银的赋存状态。研究表明原矿中含银 220 g/t, 主要以独立矿物形式产出, 主要为辉银矿, 少部分银黝铜矿则以类质同象形式产出。对原矿中银的物相分析结果表明, 45% 的银矿物是以裸露形式存在, 其他银矿物则以包裹体形式存在于硫化物以及褐铁矿中, 还有少部分则存在于硅酸盐脉石矿物中, 这一部分

银矿物一般难以回收, 损失于尾矿当中, 其余的银矿物则通过浮选富集到铅精矿中。

大量学者通过对铅锌矿中伴生银的赋存状态研究发现, 大多数伴生银都呈微细粒级分布于方铅矿和闪锌矿中, 与方铅矿和闪锌矿等载体矿物密切共生。在碎磨过程中难以完全解离得到单独的银矿物, 一般在浮选作业中随载体矿物进入到铅精矿或者锌精矿中。因此, 提高伴生银回收率的关键在于提高方铅矿和闪锌矿的回收率。在对铅锌矿中伴生银矿物的赋存特征研究后, 可以通过有针对性的改善碎磨工艺, 从而提高银矿物的回收率。

3 伴生银的选矿工艺研究

随着我国选矿技术的进步, 铅锌矿中伴生银的选矿工艺研究取得了较大的进展。

罗仙平等^[13]为了提高某铅锌矿中伴生银的选矿指标, 在低碱的条件下采用抑锌浮铅优先浮选流程工艺。工艺将银富集到铅精矿和锌精矿中, 获得了银品位 3200 g/t、回收率达到 44.09%的铅精矿, 以及银品位 230 g/t、回收率为 30.97%的锌精矿, 大幅度提高了伴生银的回收率。

余新阳等^[14]针对江西某伴生银难选铅锌矿进行了研究。根据原矿性质采用优先选铅, 铅尾矿再选锌, 粗精矿再磨, 实现锌硫分离的选矿工艺, 对含银 87.30 g/t 的原矿, 获得了银回收率 68.60%的良好指标。

谢雪飞等^[15]对广东某高硫难选铅锌矿中伴生银选矿进行试验研究。采用高碱浮选流程以及混合用药工艺, 研究发现在 pH 为 11.5 时, 获得了铅精矿中银品位为 277.5 g/t, 回收率 54.46%的较好指标。

周强^[16]通过对云南某铅锌矿进行工艺矿物学研究。发现伴生银主要以微细(1 μm 以下)包裹体形式存在于载体矿物中, 采用优先浮选工艺进行实验研究, 用石灰抑制黄铁矿, 丁黄捕收铅锌银等矿物, 获得了铅品位 57.33%、铅回收率 94.80%, 银品位 2201.72 g/t、回收率 83.14%的优良指标。

刘强^[17]针对某高泥低品位铅锌银硫化矿, 在原矿含铅 0.78%以及银含量 9.92 g/t 的情况下, 采用铅优先浮选-锌硫混浮-锌硫分离工艺, 将银富集到铅精矿中。获得了铅品位 63.62%、回收率 88.41%的铅精矿, 以及银总回收率 77.97%的良好指标。

罗科华等^[18]针对某铅锌矿选厂伴生银回收率低的问题, 决定采用优先浮选, 铅尾矿再选锌的工

艺流程。通过提高磨矿细度, 使伴生银矿物尽可能解离, 在不降低铅精矿品位的前提下, 通过降低矿浆 pH 以及添加选择性捕收剂 BK901C 等工艺处理, 与原工艺相比, 伴生银回收率提高了 33%。

王成行等^[19]对云南某富银多金属硫化铅锌矿进行了选矿实验研究。根据矿石性质特点, 在弱碱环境下采用一粗、二扫、三精优先浮选工艺流程, 获得铅精矿品位 71.13%、回收率 88.45%, 铅精矿中含银 3384.10 g/t、银回收率 87.25%的良好指标。

王庚辰等^[10]在对甘肃花牛山铅锌矿进行工艺矿物学研究的基础上, 通过采用混合用药、适当降低铅精矿中铅的品位以及粗精矿再磨等措施, 大幅度提高了铅锌矿伴生银的回收率。除此之外, 方铅矿以及闪锌矿等选矿指标也得到了提升。

白秀梅等^[20]对河南某含银铅锌矿进行选矿试验研究。根据银的工艺矿物学特征, 确定采用混合浮选工艺流程回收铅锌矿中的伴生银, 试验研究表明混合浮选回收流程与优先浮选工艺流程相比, 混合浮选流程能避免在铅锌分离时造成银矿物的损失, 除此之外混合浮选流程将锌精矿以及黄铁矿流入到铅精矿中得到铅锌银混合精矿, 大大提高了银的总回收率, 同时也简化了工艺流程。研究结果最终表明铅、锌、银回收率分别提高了 6.88%、17.96%、21%。

缪建成等^[21]针对南京某铅锌银选矿厂进行流程改进。由原工艺中的低碱条件下的优先浮选改为高碱条件下的电位调控浮选, 实践生产表明电位调控浮选铅精矿品位提高了 8%、回收率提高了 3%, 同时锌精矿回收率提高了 45%。虽然由于在高碱条件下存在部分独立银矿物受到石灰的抑制作用难以进入铅精矿中, 导致铅精矿中伴生银的回收率有所下降, 但铅精矿中下降的这部分伴生银又流入到了锌精矿中。因此综合考虑电位调控浮选不仅提高了精矿品位和回收率, 并且降低了选矿能耗, 提高了企业经济效益。

韦振明等^[22]对云南某铅锌银硫化矿进行分段电位调控浮选研究。结果表明, 与传统工艺相比, 分段电位调控浮选不仅能提高铅锌综合回收指标, 而且使铅锌矿中伴生银的回收率提高了 13.43%, 取得了巨大的经济效益。

覃文庆等^[23]针对蒙自铅锌矿, 根据硫化铅锌银矿的浮选性质, 开发了一种电位调控浮选工艺。工艺的主要参数为矿浆电位、pH 值以及捕收剂用量。以二苯胺-二硫代磷酸为捕收剂, 在矿浆 pH 为 8.8,

矿浆电位 330 mV 的条件下进行电位调控浮选, 获得了铅品位 55%、回收率 86.5% 的铅精矿, 其中含银 1800 g/t, 银回收率 65% 的理想指标。与传统浮选工艺相比, 电位调控浮选技术在提高铅锌矿中伴生银的综合回收中, 能较好地解决矿物可浮性相近、矿物间彼此活化相互影响等问题导致的精矿综合指标不高问题, 同时还具有药剂消耗低的优点, 具有很大的发展前景^[24]。

目前伴生银矿物选矿工艺已趋于成熟。在高碱条件下, 通常可以更好的抑硫化铁矿物, 提高主金属的选矿指标, 但与此同时亦会对伴生银矿物进行抑制, 导致回收率下降, 因此低碱工艺是提高伴生银回收的有效手段。近年来矿浆电位调控浮选技术在选矿中取得了一定的进展, 在生产过程中具有适应性强、药剂消耗低等优点, 但由于在工业实际生产过程中难以有效控制矿浆电位, 因而在工业中应用较少。

4 伴生银的选矿药剂研究

伴生银矿物通常随主金属矿物一起回收, 常见的硫化铅锌矿捕收剂有黄药、黑药、乙硫氮、硫胺酯类和硫醇等。黄药和黑药都是常用的硫化矿捕收剂, 其中黄药对硫化矿的捕收性能要优于黑药, 但黑药具有一定的气泡性能。石灰是铅锌银选矿中常用的抑制剂, 通常用来抑制黄铁矿、雌黄铁矿、白铁矿等硫化铁矿物, 但添加石灰导致矿浆 pH 升高对松醇油类起泡剂的起泡性能有所影响^[25]。氰化物作为铅锌分离的有效抑制剂, 其抑制原理是在闪锌矿表面生成亲水性薄膜阻止闪锌矿与捕收剂的作用。由于氰化物属于有毒药剂, 会污染环境, 因此大多数选厂都采用无氰工艺。在碱性条件下硫酸锌是闪锌矿最常用的抑制剂, 单独使用时抑制效果不佳, 通常与亚硫酸盐、硫代硫酸盐以及碳酸钠等组合使用达到对闪锌矿的良好抑制效果^[26]。硫酸锌抑制闪锌矿是通过生成的水解产物吸附在闪锌矿表面, 增强闪锌矿的亲水性。亚硫酸盐的抑制效果主要是通过亚硫酸根离子的作用而达到对黄铁矿和闪锌矿的抑制^[27], 被抑制后可以通过添加硫酸铜对其进行活化。也有研究^[28]发现二氨络合物也可以作为闪锌矿的抑制剂, 主要有二硝基二氨络锌、一亚硫酸根二氨络锌以及一氰二氨络锌等。

刘望^[29]研究了湖南水口山含银硫化铅锌矿, 用苯胺黑药作为方铅矿的捕收剂。研究表明采用苯胺黑药作为选铅捕收剂有利于银在铅精矿中富集, 与

25 号黑药相比, 铅精矿品位提高了 1.2%, 回收率上升 0.25%, 其中铅精矿中银的回收率提高了 5.8%, 砷含量降低了 0.35%。

周菁等^[30]以湖南宝山铅锌矿为研究对象, 采用组合捕收剂 Y-89、乙硫氮、以及 25 号黑药共同配合使用, 用组合抑制剂硫化钠、TJ、硫酸锌和亚硫酸钠取代氰化钠的使用, 采用无氰工艺对铅锌矿选矿。研究表明该无氰工艺取得了理想的指标, 与原工艺相比, 铅回收率提高了 5~10 个百分点, 银的回收率提高了 11%。

何晓娟等^[31]为提高某富银铅锌矿的选矿指标进行试验研究。采用自行研发的捕收剂 YN-1 选铅, 在磨矿中添加石灰和胶体碳酸锌抑制锌和硫, 获得了品位 47.18%、回收率 73.17% 的铅精矿, 其中含银 1684.89 g/t、银回收率 65.05%。与原工艺相比, 银回收率提高了 11%。

孙伟等^[32]以云南某难选铅锌银矿为研究对象, 在低碱条件下采用硫化钠作为调整剂, 通过添加碳酸锌和 YZN 抑制闪锌矿, 以 BPB 捕收方铅矿, 获得了铅精矿品位 51.90%、铅回收率 82.34%, 铅精矿中含银 1981 g/t、银回收率 80.61% 的良好指标。

黄万抚等^[33]为了改变某富银铅锌矿使用氰化物实现铅锌分离的现状, 采用丁黄、HT 和乙硫氮作为组合捕收剂, 以亚硫酸钠和硫酸锌作为闪锌矿的抑制剂, 石灰作为调整剂。与原用氰化工艺相比, 铅回收率有小幅提高, 其中铅精矿中银品位提高了 283.15 g/t、银回收率提高了 7.2%, 取得了理想的选矿指标。

张平发等^[34]为了提高甘肃白银诺尔铅锌矿中伴生银的回收率, 在低碱条件下采用 25 号黑药与丁胺黑药联合捕收银矿物, 采用硫酸锌、亚硫酸钠和 Y-1 组合抑制闪锌矿。研究表明, 与原工艺相比, 采用新的药剂制度进行浮选回收铅锌银矿, 铅回收率有小幅提高, 银的回收率提高了 7.35%, 取得了显著的经济效益。

杨备等^[35]为了提高某铅锌矿中伴生银的回收率进行了试验研究。在低碱条件下采用碳酸钠和硫酸锌作为组合抑制剂, 采用丁黄作为捕收剂, 获得了铅品位 66.37%、回收率 87.31%, 银品位 2612.50 g/t、银回收率 81.45% 的铅精矿。与原工艺相比, 银回收率提高了 10.02%, 获得了良好的经济效益。

邱乐等^[36]对某含银铅锌矿进行浮选试验研究。采用丁黄和 25 号黑药 1:1 混合捕收, 获得了银总回收率 97.72% 的优良指标。

周贺鹏^[37]针对传统高碱工艺回收铅锌银时由于伴生银矿物与黄铁矿可浮性相近, 易被石灰抑制导致伴生银回收率不高的问题进行试验研究。在低碱条件下, 采用氯化钙和腐殖酸钠作为黄铁矿的抑制剂, 用硫酸锌抑制闪锌矿, 乙硫氮和丁铵黑药作为铅以及伴生银的捕收剂, 试验结果表明与传统高碱浮选工艺相比, 银的总回收率提高了 22.22%。

有研究学者^[38]用有机抑制剂二甲基二硫代氨基甲酸酯对闪锌矿进行抑制, 在不影响铅锌矿回收率的情况下, 银回收率提高了 9.9%。

彭再华等^[39]旨在提高锡铁山铅锌矿中伴生银回收率进行了工业试验研究, 添加新型捕收剂酯-116 和调整剂 T16 强化铅锌银矿的浮选。研究结果表明铅精矿中银的回收率提高了 1.51%。

杨备等^[40]在低碱条件下采用碳酸钠和硫酸锌组合抑制闪锌矿, 以乙硫氮作为铅矿物捕收剂, 丁黄捕收锌矿物, 获得了铅回收率 85.32%、锌回收率 90.90% 以及总银回收率 87.99% 的理想指标。

大量研究表明, 铅锌矿中伴生银的回收倾向于在低碱条件下进行浮选回收。由于在高碱条件下石灰在抑制硫化铁矿物的同时会对含银矿物进行抑制, 导致银回收率不高等问题。国外有研究^[41]也发现混合药剂的吸附特性要优于单一药剂, 药剂之间的协同作用能弥补单一药剂的不足, 因此提高铅锌矿中伴生银的回收率重点在于组合用药以及开发无毒、高效的新型捕收剂。

5 结语

1) 提高铅锌矿中伴生银的回收率应加强对伴生银的工艺矿物学研究, 有针对性地改善磨矿工艺, 从而提高浮选指标。由于伴生银与铅锌等主金属矿物伴生密切, 难以得到单独的银精矿, 因此提高铅锌矿中主金属的回收率是提高伴生银回收的有效措施。

2) 在高碱条件下用石灰抑制硫化矿物的同时也会对含银矿物进行抑制, 因此在低碱工艺条件下浮选是提高伴生银回收率的有效手段。

3) 混合用药的吸附特性要优于单一药剂, 能在很大程度上弥补单一药剂的不足。因此组合药剂的使用以及开发无毒、高效的新型捕收剂是提高伴生银回收率的关键。

参考文献:

[1] 叶富兴, 宋宝旭, 胡真, 等. 硫化铅锌矿中共伴生银的

强化综合回收技术研究现状和发展概况[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(s1): 15-18.

YE F X, SONG B X, HU Z, et al. Present situation and development of integrated recovery technology of associated silver in sulfide lead-zinc ore[J]. Nonferrous metals (mineral processing section), 2013(s1): 15-18.

[2] 戴自希. 世界白银资源和开发利用现状[J]. 世界有色金属, 2004(7): 22-29.

DAI Z X. World silver resources and development and utilization status quo[J]. World nonferrous metals, 2004(7): 22-29.

[3] 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, SONG 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.

[4] 汪贻水. 凡口铅锌矿石中银的赋存状态研究[M]//彭航. 中国实用矿山地质学. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 328-331.

WANG Y S. Study on the occurrence status of silver in lead and zinc ore[M]//PENG G. Practical mining geology in China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 328-331.

[5] 许志华. 银工艺矿物学进展[J]. 材料研究与应用, 1996(1): 7-13.

XU Z H. Advances in mineralogy of silver process[J]. Materials research and application, 1996(1): 7-13.

[6] 聂潇, 尹京武, 陈浦浦, 等. 河南栾川赤土店西沟铅锌银矿床中银矿物的赋存状态及成矿机理探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 184-190.

NIE X, YIN J W, CHEN P P, et al. Occurrence and enrichment mechanism of silver in the Xigou lead-zinc-silver deposit, Chitudian, Luanchuan, Henan Province[J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemist, 2015, 34(1): 184-190.

[7] 秦伟, 徐盛明, 解强, 等. 某含银铅锌硫化矿石工艺矿物学研究[J]. 有色金属工程, 2013, 3(3): 28-30.

QIN W, XU S M, XIE Q et al. Study on mineralogical mineralogy of silver lead and zinc sulfide ore[J]. Nonferrous metal engineering, 2013, 3(3): 28-30.

[8] 朱恩静, 王建国, 邱玉民. 湖南黄沙坪铅锌矿伴生银的赋存状态及分布规律[J]. 矿产勘查, 1995(2): 89-95.

ZHU E J, WANG J G, QIU Y M. The distribution regularity and occurrence of the associated silver in the huangshaping Pb-Zn ore field, Hunan province [J].

- Geological exploration for non-ferrous metals, 1995(2): 89-95.
- [9] 傅贻谟. 凡口铅锌矿深部矿体选矿试样银的工艺矿物学[J]. 矿冶, 1998, 7(3): 45-50.
FU Y M. Process mineralogy of silver of beneficiation sample from deeper ore body in Fankou lead-zinc mine[J]. Mining & metallurgy, 1998, 7(3): 45-50.
- [10] 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 sulfide[J]. China mining magazine, 2005, 14(9): 34-37.
- [11] 王静纯. 麒麟厂铅锌矿银的工艺矿物学研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 531-533.
WANG J C. Study on process mineralogy of lead and zinc deposit of Qilin[J]. Acta ineralogica sinica, 2001, 21(3): 531-533.
- [12] 付强. 西藏昌都昂青银铅多金属矿床银和铅的赋存状态[J]. 有色金属工程, 2014, 4(6): 34-36.
FU Q. The occurrence of silver and lead in the deposit of lead polymetallic deposits in Changdu, Tibet[J]. Nonferrous metal engineering, 2014, 4(6): 34-36.
- [13] 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. Study on the new process of silver beneficiation of a complex lead and zinc ore[J]. Mining & metallurgy, 2011, 31(3): 35-39.
- [14] 余新阳, 王浩林, 王强强, 等. 江西某伴生银难选铅锌矿浮选分离[J]. 有色金属工程, 2016, 6(5): 49-54.
YU X Y, WANG H L, WANG Q Q, et al. Flotation separation of lead-zinc ore with associated silver from Jiangxi[J]. Nonferrous metal engineering, 2016, 6(5): 49-54.
- [15] 谢雪飞, 罗升. 高碱条件下综合回收伴生银的研究与实践[J]. 矿冶工程, 2002, 22(1): 58-60.
XIE X F, LUO S. Study and practice of integrated recovery of associated silver with high alkalinity[J]. Mining & metallurgy, 2002, 22(1): 58-60.
- [16] 周强. 云南某铅锌矿选矿工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2005, 25(6): 41-44.
ZHOU Q. An experimental study on ore dressing process in a lead and zinc mine in Yunnan[J]. Mining & metallurgy, 2005, 25(6): 41-44.
- [17] 刘强. 某高泥低品位铅锌银硫矿选矿工艺研究[J]. 矿业工程, 2017, 15(1): 29-31.
LIU Q. Study on ore beneficiation process of low grade lead-zinc silver sulfide ore[J]. Mining engineering, 2017, 15(1): 29-31.
- [18] 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(选矿部分), 2010, 62(4): 110.
LUO K H, ZHAO Z Q, HE Z, et al. Enhancing recovery of accompanying silver from lead-zinc ore[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2010, 62(4): 110.
- [19] 王成行, 叶富兴, 童雄, 等. 云南某富银硫化铅锌矿中伴生银的综合回收研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(4): 67.
WANG C X, YE F X, TONG X, et al. A comprehensive recovery study of silver in a silver sulphide lead and zinc mine in Yunnan province[J]. Mining engineering, 2013, 33(4): 67.
- [20] 白秀梅, 张友珍, 王韩生, 等. 含银铅锌矿中银的浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 1982(2): 15-19.
BAI X M, ZHANG Y Z, WANG H S, et al. Study on flotation test of silver in silver lead-zinc ore[J]. Multi-purpose utilization of mineral resources, 1982(2): 15-19.
- [21] 缪建成, 王方汉, 刘如意, 等. 南京铅锌银矿电位调控浮选的研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2000(1): 5-8.
MIAO J C, WANG F H, LIU R Y, et al. Study and application of the potential regulation of nanjing lead and zinc silver ore[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2000(1): 5-8.
- [22] 韦振明, 潘菊芬, 赖春华, 等. 某铅锌银硫化矿的分段电位调控浮选[J]. 金属矿山, 2010(5): 81-85.
WEI Z M, PANG J F, LAI C H, et al. The subsection potential of certain lead zinc silver sulfide ore is controlled flotation[J]. Metal mine, 2010(5): 81-85.
- [23] 覃文庆, 何名飞, 陈玉平. 矿浆电位调控浮选提高蒙自铅锌银矿浮选指标[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 949-954.
QIN W Q, HE M F, CHEN Y P. Improvement of flotation behavior of Mengzi lead-silver-zinc ore by pulp potential control flotation[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2008, 18(4): 949-954.
- [24] 孙伟. 高碱石灰介质中电位调控浮选技术原理与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2001.
SUN W. Principle and application of potential control flotation technology in high alkali lime media[D]. Changsha: Central South University, 2001.
- [25] 赵福刚. 我国铅锌矿选矿技术现状[J]. 有色矿冶, 2007, 23(6): 20-25.
ZHAO F G. Present situation of mineral processing technology for lead-zinc ores in China[J]. Journal of

- nonferrous mining and metallurgy, 2007, 23(6): 20-25.
- [26] 胡元, 钟宏, 王帅, 等. 铅锌矿的浮选工艺和浮选药剂研究进展[J]. 河南化工, 2013, 30(7): 21-24.
HU Y, ZHONG H, WANG S, et al. Research progress of flotation process and flotation agent of lead and zinc ore[J]. Henan journal of chemical industry, 2013, 30(7): 21-24.
- [27] KHMELEVA T N, CHAPELET J K. Depression mechanisms of sodium bisulphite in the xanthate-induced flotation of copper activated sphalerite[J]. International journal of mineral processing, 2006, 79(1): 61-75.
- [28] 高利坤, 戴惠新. 铅锌选矿[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
GAO L K, DAI H X. Lead and zinc beneficiation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [29] 刘望. 提高铅精矿中伴生银回收率的研究[J]. 矿产保护与利用, 2001(3): 33-35.
LIU W. Study on improving the recovery of associated silver in lead concentrate[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2001(3): 33-35.
- [30] 周菁, 朱一民, 周玉才, 等. 难选铅锌矿无氰选矿新技术研究[J]. 有色矿冶, 2012, 28(4): 18-22.
ZHOU J, ZHU Y M, ZHOU Y C, et al. Study on new technology of non-cyanide mineral processing for refractory lead-zinc mine[J]. Journal of nonferrous mining and metallurgy, 2012, 28(4): 18-22.
- [31] 何晓娟, 罗传胜, 郑少冰. 难选富银铅锌矿选矿工艺的研究[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 297-299.
HE X J, LUO C S, ZHENG S B. Study on mineral processing technology of refractory gold-rich lead-zinc ore[J]. Materials research and application, 2008, 2(4): 297-299.
- [32] 孙伟, 苏建芳, 张刚, 等. 低碱条件下浮选分离铅锌银矿[J]. 中南大学学报, 2012, 19(8): 2307-2315.
SUN W, SU J F, ZHANG G, et al. Separation of sulfide lead-zinc-silver ore under low alkalinity condition[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2307-2315.
- [33] 黄万抚, 陈园园, 文金磊, 等. 某低品位富银铅锌矿选矿试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2014(2): 45-49.
HUANG W F, CHENG Y Y, WEN J L, et al. Study on ore dressing experiment of low-grade fulminating lead-zinc ore[J]. Mining research and development, 2014(2): 45-49.
- [34] 张平发, 宫晓军. 白音诺尔铅锌矿伴生银综合回收技术研究与实践[J]. 金属材料与冶金工程, 2013, 41(4): 30-32.
ZHANG P F, GONG X J. The research and production practice of silver synthetical recovery technology of silver-zinc ore[J]. Metal materials and metallurgy engineering, 2013, 41(4): 30-32.
- [35] 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 & utilization of mineral resources, 2012(6): 25-27.
- [36] 邱乐, 黄美媛. 某含铅锌银矿浮选工艺研究[J]. 有色金属工程, 2003, 55(3): 90-92.
QIU L, HUANG M Y. Study on flotation process of a silver and lead silver ore[J]. Nonferrous metals, 2003, 55(3): 90-92.
- [37] 周贺鹏. 四川会理锌矿伴生银综合回收工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011
ZHOU H P. Research on the comprehensive recovery process and mechanism of associated silver in Huili zinc mine in sichuan [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011.
- [38] 格列, 魏明安. 铅-锌-银多金属矿石优先浮选中采用一种有机抑制剂代替氰化物[J]. 国外金属矿选矿, 1996(9): 26-28.
GE L, WEI M A. Lead-zinc-silver polymetallic ore is preferentially flotation using an organic inhibitor instead of cyanide[J]. Metallic ore dressing abroad, 1996(9): 26-28.
- [39] 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. An experimental study on the recovery rate of associated gold and silver in the tin iron mountain lead and zinc ore[J]. Hunan nonferrous metals, 2013, 29(1): 14-17.
- [40] 杨备, 刘旭, 刘卫, 等. 内蒙古某铅锌伴生银矿综合回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(s1): 11-15.
YANG B, LIU X, LIU W, et al. Study on comprehensive recovery experiment of silver mine associated with a lead and zinc in Inner Mongolia[J]. Mining & metallurgy, 2013, 33(s1): 11-15.
- [41] HANGONE G, BRADSHAW D, EKMEKCI Z. Flotation of a copper sulphide ore from Okiep using thiol collectors and their mixtures[J]. Journal South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(3): 199-206.