

黄金矿床的分类及其综合利用技术现状^{*}

吕子虎^{1,2}, 刘红召^{1,2}, 卞孝东^{1,2}, 赵登魁^{1,2}, 郭保万^{1,2}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 自然资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006)

摘要:介绍了中国金矿资源的现状, 论述了金矿床的分类、类型和特点等。通过分析几种重要类型金矿床的成因、矿床特点和矿物组成, 评述了典型金矿床的综合开发利用技术现状, 总结其综合开发规律, 并展望了金矿资源的综合开发利用。

关键词:黄金矿山; 综合利用; 尾矿; 浮选; 浸出; 重选

中图分类号:TD953⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2018)04-0135-07

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.03.034

The Classification of the Gold Deposit and Its Status of Comprehensive Utilization Technology

LYU Zihu^{1,2}, LIU Hongzhao^{1,2}, BIAN Xiaodong^{1,2}, ZHAO Dengkui^{1,2}, GUO Baowan^{1,2}

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ores of Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: This paper introduces the status of gold resources in China. The classification, types and characteristics of gold deposits were discussed. The paper also reviews the present situation of comprehensive utilization technology of typical gold deposits by analyzing the genesis, characteristics and mineral compositions of several important gold deposits. It summarizes the regularities of comprehensive development and utilization of gold deposits, and prospects the future development of comprehensive utilization of gold resources.

Key words: gold mine; comprehensive utilization; tailing; flotation; leaching; gravity separation

黄金作为一种贵金属, 已成为世界各国外汇储备的重要组成部分, 同时也是重要的战略物资之一。长期以来, 黄金用于储备、制造货币、首饰以及其他装饰品, 随着科学技术的飞速发展, 黄金及其合金在国防工业、电子仪表、宇宙航行等尖端科学技术领域里获得了广泛应用。黄金的属性及应用带动黄金矿山的开采, 也带来了矿山废石、尾矿、浸渣等固体废弃物的排放和堆积, 侵占农田土地, 破坏自然生态环境与自然景观, 污染水土, 同时还存在安全隐患等。然而, 众所周知中国单一金矿很少, 共伴生金矿床

多, 譬如岩金矿床常共伴生铜、铅、锌、银、钼、钨、铋、镍等有益组分, 砂金矿床常伴生有磁铁矿、锆石、钛铁矿、独居石、石榴石、金红石等有用矿物, 但由于黄金企业的选冶技术水平和综合利用水平参差不齐, 导致大量伴生资源没有回收而进入尾矿中, 所以说尾矿也是一种宝贵的潜在二次资源。综合开发利用黄金尾矿资源, 不仅能降低其长期堆放对环境产生的危害程度, 而且可创造良好的经济效益, 贯彻固体废弃物“资源化、减量化、无害化”政策, 有利于环境、经济、社会效益统一协调发展。本文从黄金矿床

^{*} 收稿日期: 2018-01-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201017000150001); 中国地质调查局地质调查项目(121201017000150003)

作者简介: 吕子虎(1980-)男, 河南信阳人, 硕士, 高级工程师, 从事矿物资源调查及综合利用研究工作。

的分类、工业类型、矿物组成等角度论述金矿资源的综合利用技术现状及发展,期望对同类型矿山的综合开发利用起到一定的指导和借鉴意义。

1 金矿资源及矿床分类

据《中国黄金年鉴 2016》报道,2015 年中国查明金矿资源储量 11 563.46 t,跃居全球第二。金资源储量第一位是南非 3.1 万 t,第三位是澳大利亚 9 900 t,顺次为俄罗斯 7 000 t、印度尼西亚 6 000 t、美国 5 500 t、加拿大 4 200 t、智利 3 900 t、墨西哥 3 400 t、加纳 2 700 t,其他国家为 14 837 t,世界总计达 10 万 t。中国黄金查明资源储量主要分布在山东(3 157.77 t)、甘肃(918.89 t)、新疆(728.43 t)、内蒙古(688.86 t)以及河南(641.99 t),占全国的 53.07%^[1]。

中国金矿资源可分为岩金、砂金和伴生金三大类,其中岩金是目前金矿开发的主要对象,而石英脉型、微细浸染型和碎裂带蚀变岩型金矿是我国岩金矿的主要类型。

自然界中金矿床种类繁多、成因复杂,以不同的依据则有不同的分类,如以矿床成因、成矿物质来源、成矿大地构造环境和成矿作用、容矿岩石和含金建造、金矿床地球化学、含金矿石建造和矿体形态或矿化类型为依据的分类等^[2-3]。

目前国际上盛行以美洲、环太平洋板块俯冲造山环境为基础提出一种新的金矿床分类,依据矿石和蚀变矿物组合、矿石和蚀变矿化金属储量、成矿流体的压力和成分、矿床形成的深度及其范围、与构造和不同规模的岩浆侵入岩的关系、与围岩地块 P-T-t 演化的关系等,将金矿床划分出造山带型金矿床、卡林型-似卡林型金矿床、浅成低温热液型金-银矿床、铜-金斑岩型金矿床、铁氧化物型铜-金矿床、富金火山岩型块状硫化物和沉积喷气矿床 6 种主要类型,这种分类反映了金矿床生成的不同地球动力学环境^[4]。

中国地域广阔、地质构造复杂(尤其是独特的陆内造山作用)、地质环境特殊决定了金矿床类型繁多,应用大地构造环境划分的 6 种类型难以涵盖和区分中国金矿的类型。中国矿床学者对金矿床的分类做了大量的研究工作,有以矿床成因和成矿方式、成矿物质来源、产出环境和岩石组成或元素组合为基础的分类等。其中影响较大的是以金矿容矿岩系与矿化体产出形式为基础的分类方案,可以将我

国金矿床分为 10 类 22 个亚类,其反映的是地质背景和地球动力学环境^[5-8]。李景春^[9]从金矿床经济价值角度将其分为 10 个工业类型,分别是石英脉型、糜棱岩型、蚀变碎裂岩型、冰长石-绢云母石英脉型、角砾岩型、矽卡岩型、微细浸染型、铁帽型、红土型、砂砾层型,此分类与前人不同之处在于优先考虑了含金地质体的特征,并把金矿床勘查与开发的直接对象作为分类的基础和主要准则。矿产资源综合利用手册按照矿床地质特征、矿物组成、工业开发利用等,将金矿床分为以下几种工业类型。

2 典型金矿综合利用

黄金矿山废石、尾矿、浸渣及废水的综合利用已是一个越来越重要的研究课题,早已受到国内外的重视,其合理利用能带来可观的经济效益和良好的社会效益。南非是世界上最大的黄金生产国,也是最早开始大规模地从尾矿中回收金的国家,1985 年建成月处理 200 万 t 尾矿的 Ergo 尾矿处理厂;澳大利亚新庆金矿选厂从 1990 年起建立尾矿处理厂,回收尾矿中的金,大大提高了金的总回收率;加拿大于 1988 年实施了从安大略省北部提敏斯市金尾矿中大规模回收黄金的 ERG 资源工程计划,对 1.6 亿 t 平均金含量 0.43 g/t 的老尾矿进行再选,月处理超 100 万 t;另外,美国、津巴布韦、前苏联等国家也开展了尾矿中回收金的研究与实践,并取得了显著的成果^[12]。自上世纪末,我国政府、科研部门、学者及矿山企业也积极开展了黄金尾矿的综合利用研究工作。

2.1 石英脉型金矿综合利用

中国的石英脉型金矿床主要集中在胶东、小秦岭、燕辽-乌拉山、辽吉东部以及湘西、云南三江、新疆北部等地区,其中小秦岭矿区是中国的四大金矿带之一,也是我国第二大黄金产区。小秦岭金矿床为热液型金矿床,围岩蚀变可分为内带、中带、外带,内带蚀变作用强、交代彻底,发育硅化、黄铁矿化、绢云母化等,中带以绢云母化和硅化为主,外带主要是绿泥石化、绢云母化^[13]。小秦岭金矿区矿石中主要金属矿物有自然金、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿、磁黄铁矿、黑钨矿、白钨矿等,脉石矿物主要是石英、长石、方解石、铁白云石、重晶石、绢云母等,主要金矿物为自然金、银金矿,黄铁矿是最主要的载金矿物^[14-15]。

表1 中国金矿床的工业类型^[5,9-11]
Table 1 Industrial types of gold deposits in China

工业类型	矿床特点	矿物组成	典型矿床
石英脉型	围岩主要是变质岩、中-酸性岩浆岩,石英脉成群成带分布,矿床多为含金热液沿岩石的裂隙或断裂充填而成,脉旁经常发育线型蚀变,以硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化最为普遍	金属矿物以黄铁矿为主,含黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等;脉石矿物主要石英、长石、云母等	河北金厂峪,吉林夹皮沟,辽宁五龙金矿,小秦岭金矿,玲珑金矿
破碎带蚀变岩型	围岩主要是中-酸性岩、变质岩、混合岩、矿体严格受断裂构造控制,围岩蚀变以硅化、高岭土化、绢云母化、碳酸盐化和黄铁矿化为特征。矿床多为含金热液交代破碎带岩石而成,矿体主要赋存在黄铁绢英岩化岩中,矿石多呈细脉状浸染,金与硫化物共生	金属矿物以黄铁矿为主;脉石矿物以石英、绢云母为主	山东招平断裂带诸金矿床,焦家金矿,银洞坡金矿,葫芦沟金矿
细脉浸染型(斑岩型或火山岩型)	围岩主要是中-酸性浅成侵入岩中、次火山岩、角砾岩,容矿岩石多为硅铁质岩石、粉砂质岩石、含炭黏土质岩石,部分为碳酸盐岩、火山碎屑岩等。矿床多为含金热液沿围岩的微细裂隙充填而成,金矿物呈微细粒以浸染状产出,矿石常为热液交代容矿岩石而成	金属矿物以黄铁矿为主,含少量黄铜矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、辉铋矿等;脉石矿物有石英、白云石、高岭土、绢云母等	黑龙江团结沟,吉林刺猬沟,江苏铜井金矿,福建紫金山,台湾金瓜石
石英-方解石脉型	矿床产于中生代火山岩中或在碳酸盐岩层及少量碎屑岩中。围岩蚀变以青盘岩化为主,另有硅化、冰长石化、碳酸盐化等。矿床多由含金和碳酸钙的热液沿围岩裂隙或断裂充填而成,矿脉由石英、方解石组成,与火山岩有关的近地表部位银含量常高于金	金属矿物因成因不同由简至繁,脉石矿物有玉髓、低温石英、冰长石、蛋白石、方解石等	广西叫曼,吉林鹁鸽砬子,甘肃九源
微细粒浸染型(卡林型)	由美国内华达州“卡林金矿”而得名,金颗粒呈显微和亚显微级浸染在硅化的碳酸盐类岩石中,金与重晶石、二氧化硅、黄铁矿及其他硫化矿物伴生,矿石由热液交代围岩形成,矿体与围岩一般无明显标志	特征元素有砷、汞、锑等,有时含钨、重晶石	广西金牙,甘肃甘南,贵州烂泥沟
砂金型	矿床由砂砾岩和其他有用矿物的岩屑及残积物组成	主要矿物有磁铁矿、褐铁矿、钛铁矿、锆英石、石榴石、金红石等,脉石矿物有砾石、卵石、石英、长石等	吉林珥春,内蒙古哈泥河

李建政^[16]针对小秦岭金矿田废石开展了综合利用研究,采用二段闭路破碎,10~24 mm 粒级废石作为建筑碎石,-10 mm 粒级磨矿—浮选回收金、银和硫化矿物,浮选尾矿摇床重选得到石英精矿,废石资源综合利用率达85.63%。周新民等^[17]对灵宝某年排尾矿15万t的金选矿开展了尾矿回收白钨矿的试验研究,尾矿含WO₃ 0.1%左右,单一浮选法获得WO₃ 品位50.71%、回收率71.06%的钨精矿。郭珍旭等^[18]对灵宝地区含金0.5~1.5 g/t的尾矿采用螺旋溜槽—磁选预富集抛尾,粗精矿摇床精选—氰化,氰化尾矿制作瓷质墙地砖的工艺流程,指标优良,经济效益显著,环境效益好。王安理等^[19]对小秦岭含钼石英脉金矿采用钼金混合浮选—氰化提金—氰渣浮钼的工艺流程,实现金钼综合回收,经济效益十分显著。焦瑞琦^[20]对小秦岭含铜金矿采用铜金混合浮选—氰化提金—氰渣浮铜的工艺流程综合回收金铜,解决了选厂技术难题,且提高了经济

效益。

中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所对河南主要黄金冶炼企业的黄金冶炼渣开展了综合回收有价金属元素的试验研究,磁化焙烧—磁选工艺可得到TFe 品位60%、回收率70%以上的铁精矿,直接还原焙烧—磁选工艺可得到TFe 品位93.5%、回收率86.7%的铁,酸浸—酸浸渣氰化工艺可得到TFe 浸出率91.4%、金浸出率72.80%、银浸出率62.5%的指标,酸浸液铵沉淀—焙烧工艺可得到Fe₂O₃ 含量>94%、回收率80%以上的铁红产品,两段焙烧工艺综合回收 Au 96.01%、Ag 81.69%、Cu 86.57%、Pb 99.67%、Zn 99.07%以及TFe 品位>88%、回收率>80%的海绵铁产品,技术指标优异,成果显著。

2.2 破碎带蚀变岩型金矿综合利用

中国的破碎带蚀变岩型金矿床主要分布在胶东、小秦岭、海南、四川、湖南等地区,其中焦家金矿

是国内外著名的“焦家式金矿”的典型代表,含蚀变带是由花岗岩经热液蚀变发生的绢云母化、硅化、黄铁矿化所组成。矿石中主要金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿等,脉石矿物以石英、长石、绢云母、方解石为主,载金矿物主要以黄铁矿、黄铜矿等硫化矿物和石英、长石等脉石矿物为主,金赋存状态有裂隙金、包裹金、晶隙金,金矿物有银金矿、自然金、金铜矿等^[21]。

随着国家倡导资源节约和保护环境,矿山企业已重视科技创新和科技进步,焦家金矿已开展了低品位金矿的开发利用及尾矿的综合利用。刘胜光等^[22]对焦家金矿老采场残留矿柱、矿壁及矿体下盘矿体或未采矿体等资源(金平均品位 3.7 g/t)进行了综合回收利用研究,并取得良好的技术经济效益,自 2006 年残矿回收采场产能为 270 t/d,年利润 2 100 多万元。刘润田等^[23]对焦家金矿区区内低品位资源(金平均品位 1 g/t)进行了回收利用,提高了资源利用率,延长了矿山服务年限,且经济效益显著。焦家金矿浮选尾矿含金 0.22 ~ 0.25 g/t,金主要赋存于粗粒级包裹体和贫连生体中,尾矿经旋流器分级,粗粒级再磨浮选提金,然后供建材公司制加气砖用料,细粒级再次浮选回收金,尾矿再选提金工艺提高金回收率 2%,促进尾矿减排,充分利用资源,提高企业经济效益^[24-25]。邵广全^[26]对焦家金尾矿进行螺旋溜槽分级,螺旋粗砂重选提金后井下充填,螺旋中矿强磁选除铁—反浮选脱硫得到产率为 34.76% 供生产陶瓷的长石粉,尾矿综合利用率达到 60% 以上。刘渝燕等^[27]对焦家金尾矿中的混合硅酸盐矿物开展超细提纯研究工作,生产出多种应用前景广泛的橡胶制品,尾矿利用率 30% 以上。焦家金矿低品位金矿资源的开发利用及尾矿综合利用,有着巨大的经济、社会、环境效益。

2.3 细脉浸染型金矿综合利用

中国的细脉浸染型金矿床主要集中在内蒙古—大兴安岭、东南沿海、长江中下游、新疆等地区。其中,福建紫金矿业股份有限公司紫金山金矿,位于福建上杭县,属特大型金铜矿山,已探明金矿储量达 150 t,远景储量可达 200 t 以上,铜矿储量 200 万 t 以上,现成为中国采选规模最大、入选品位最低、单位矿石成本最少的黄金矿山,主要经济指标和技术指标达到国际先进水平,成为中国唯一的世界级特大金矿,2008 年被中国黄金协会授予“中国第一大金矿”称号。

紫金山金矿为燕山晚期陆相火山岩次火山岩—隐爆角砾岩期后热液脉状矿床,是浅成次火山入侵体及其伴随的火山岩的热液系统从岩浆的去气作用部位延伸至喷气孔和酸性热泉,将斑岩和高硫化成矿环境结合而成的,与燕山晚期中酸性次火山岩及火山机构有密切关系,其下部是铜矿体^[28-29]。围岩蚀变十分强烈,主要有绢云母化、地开石化、明矾石化和硅化。矿石中主要金属矿物有蓝辉铜矿、辉铜矿、硫砷铜矿、铜蓝和黄铁矿等,脉石矿物主要有石英、明矾石和少量地开石、高岭土。铜矿石基本为原生硫化物矿石,铜矿物及黄铁矿呈脉状或浸染状分布,充填交代隐爆角砾岩及蚀变次英安玢岩和蚀变花岗岩中。金矿石为氧化矿石,主要赋存在褐铁矿、针铁矿、赤铁矿等矿物中^[30-31]。

紫金山金矿于 1993 年首先进行地下开采,1997 年转向露天开采,2000 年全部转为露天开采,并采用全段面高台阶陡帮开采工艺,这项技术减少基建剥岩 600 万 m³,节约费用 6 600 万元。紫金山金矿采用先进的破碎—筛分—洗矿—细粒重选—炭浸—粗粒堆浸—联合提金工艺,其独创的低品位氧化金矿选矿方法解决了矿堆渗透性及矿石中含粗粒金的回收问题,使大量低品位资源得到开发利用,2003 年紫金山金矿石平均入选品位 0.873 g/t,最低入选品位 0.3 g/t,如今降至 0.2 g/t,增加可利用资源金属量 44.88 t,其低品位金矿综合利用技术处于国际领先水平^[32-33]。

同时,紫金山金矿开展了废物利用工程和环境治理工程,如低品位废石堆浸不卸堆,改造为坝体用以拦挡剥离废土石;锅炉炉渣用于铺路、填坑等;研制大掺量尾矿免烧砖,使砖中尾矿含量达 80%;建设生态旅游矿山等。紫金山金矿呈现了良好的矿业经济可持续发展态势,并建设成为资源节约与环境友好型矿山。

2.4 微细粒浸染型金矿综合利用

中国微细粒浸染型金矿(卡林型金矿)主要分布在滇黔桂、陕川甘、西南秦岭及湘中等金矿化集中区,即扬子陆块西南缘的板内古生带—中生代沉降带和西北缘古生代—中生代造山带中,其属于中低温热液(渗透热卤水)成因的金矿床,围岩蚀变以硅化为主,其次为碳酸盐化、黏土化、绢云母化,还有绿泥石化、黑云母化、钠长石化和重晶石化等^[34-36]。

贵州烂泥沟金矿位于黔西南州贞丰县,是滇黔桂“金三角”目前已探明最大的卡林型金矿床,金矿

储量达到 110 t,远景储量在 130 t 以上,达到世界级特大型金矿规模。蚀变类型主要为硅化、黄铁矿化、毒砂化、辉锑矿化、汞矿化、碳酸盐化、黏土化等,矿体含金 4 ~ 11 g/t,平均 7.01 g/t,金主要呈显微-次显微状赋存于黄铁矿富砷环带中和毒砂中。矿石中金属矿物主要是黄铁矿,其次为毒砂、雄(雌)黄、辰砂,少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等;脉石矿物主要是石英、黏土矿物和碳酸盐矿物^[37-38]。

烂泥沟金矿石属含砷贫硫化物难选冶原生金矿石,在当时的技术条件下难以开发利用,澳大利亚澳华黄金公司于 2002 年参与该矿床勘探和开发(采用细菌预氧化选矿工艺),2007 年控股 82% 成立贵州锦丰矿业有限公司,2009 年被加拿大埃尔拉多黄金公司全面收购,2016 年 9 月 7 日又被中国黄金集团公司并购。锦丰金矿采用原矿浮选 + 浮选精矿 BIOX(生物氧化) + CIL(炭浸) + 活性炭解吸 + 电解精炼工艺流程,各项指标都达到了国际先进水平。

锦丰矿业非常注重资源集约开发与综合利用,从源头保护资源,实现绿色开采,2013 年露采边界金品位 0.9 g/t、回采率达 100%,井下开采边界品位为 1.5 g/t、回采率 99.43%,采矿贫化率 11.4%,尽最大可能回收低品位矿及低于边界品位的矿化废石,被国土资源部授予“矿产资源节约与综合利用先进适用技术推广应用示范矿山”称号。浮选尾矿采用“旋流器—底流(泵送)—充填站 18 m 浓密机—搅拌槽—井下充填采空区”的工艺流程,最大限度的利用了尾矿资源,减少了对环境的污染和资源的浪费。同时开展了剥离废石堆存—覆土—土壤改良—造地—监测抚育的废石堆场复垦工作,并配套水利设施,至 2014 年 7 月,累计恢复废石场坡地 5.3 万 m²,恢复平地为耕地 11.8 万 m²,成效显著。

2.5 红土型金矿综合利用

红土型金矿是金矿体或含金岩石(矿源体)出露地表后,分散于矿源体中的金在表生红土化作用的水-岩反应过程中,发生活化迁移、沉淀富集重组而形成,并以红土风化壳为寄主体的表生金矿床,其具有矿床规模较大、矿体埋藏浅、产状平缓稳定、矿物组分简单、易开采及选冶、投资回报率高等优点。我国红色黏土型金矿床主要集中分布于中南和西南地区,例如云南上芒岗、贵州老万场、湖北蛇屋山、云南北衙等矿床。

北衙金多金属矿位于大理白族自治州鹤庆县北衙、黄坪乡、洱源县焦石硐乡三乡交界处,是云南最

大的金多金属矿床,主体是一个以金为主、共生铁铜、伴生铅锌银的斑岩-矽卡岩金多金属矿床,其次为表生作用形成的砂砾黏土型金铁矿床。以斑岩体为中心,向外可划分为产于斑岩体内部的斑岩型铜金矿、产于斑岩与北衙组碳酸盐地层接触带的矽卡岩型金铜铁矿、产于围岩层间界面或破碎带中的中低温热液型金、铅、锌、银多金属矿,以及外生风化作用形成的砂砾黏土型金铁矿^[39-40]。其中,红土型金矿主要有与正长斑岩和碳酸盐岩接触带脉状含金矿体有关的古红土型金矿和直接产于灰岩喀斯特风化面上、与构造含金破碎带有关的红土型金矿。截至 2011 年底,北衙金多金属矿探明黄金储量 151.28 t,银 3 493 t,铜 22.17 万 t,铁 8 897 万 t,铅锌 154 万 t。

北衙金矿石中主要金属矿物有褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿、针铁矿、软锰矿,非金属矿物主要有白云石、绿泥石、方解石、长石、云母、高岭土等。矿石中金主要以自然金或含银自然金形式存在,呈细粒、微细粒嵌布于褐铁矿、石英、绿泥石等矿物粒间、裂隙或包裹于其中。银主要赋存于褐铁矿和锰矿物中,铁主要赋存于磁铁矿、磁赤铁矿和褐铁矿中。金、银、铁都与铁、锰矿物有明显的嵌布关系,铁、锰矿物是金银的载体矿物^[41-42]。

鹤庆北衙矿业有限公司现有 2 000 t/d 和 4 000 t/d 两套选矿生产线,都采用粗碎—半自磨—球磨流程,全泥氰化浸出选金,浸渣经过弱磁选、强磁选铁的联合工艺流程,获得金品位 2.43 g/t、浸出率 88.02%,含铁 62.14%、回收率 16.13% 的弱磁选精矿,含铁 46.51%、回收率 33.59% 的强磁选精矿,有用矿物得到了综合利用,经济效益显著^[43]。王小川等^[44]应用“边磨边浸”工艺对北衙金矿 4 000 t/d 选厂进行技改,金银浸出率提升明显,选厂经济效益显著,年利润可增加 5 000 万元以上。

2.6 铁帽型金矿综合利用

铁帽型金矿床主要分布在长江中下游,埋藏浅,易于露采,具有重要的工业价值。铁帽型金矿床是由含金硫化物矿床经风化淋滤而成的,产于层间的构造破碎带中,如新桥铁帽型金矿床是沿泥盆系和石炭系之间的层间断裂发育;代家冲金矿产在高丽山组砂页岩与船山灰岩、白云质灰岩的压性断裂带内;龙王山金矿体赋存在燕山期花岗闪长岩与二叠系当冲组含锰硅质岩、硅质页岩、硅质泥灰岩的接触破碎带中。

安徽铜陵新桥金银矿是铁帽型金矿床中具有代

表性的矿床之一,表内 Au 储量 5 539 kg、平均品位 4.04 g/t, Ag 储量 298 091 kg、平均品位 227.13 g/t; 表外 Au 储量 698 kg、平均品位 1.29 g/t, Ag 储量 22 028 kg、平均品位 40.84 g/t^[45]。矿石中主要金属矿物为褐铁矿,其次为赤铁矿等,脉石矿物主要为石英,其次为伊利石、高岭土、蒙脱石等黏土矿物。金、银主要以自然金、金银矿、金银矿、自然银等独立矿物形式产出,颗粒微细,呈不规则粒状、片状等赋存在褐铁矿裂隙或间隙中^[46-47]。

崔贤富^[45]根据新桥金矿中金、银矿物与褐铁矿的嵌布关系,采用全泥氰化—强磁选工艺,金回收率 91.71%、银回收率 91.60%,并获得 TFe 品位 56.40%、回收率 52.91% 的褐铁矿精矿,实现了有用矿物的综合回收,经济效益较好。聂基兰等^[48]对新桥金矿全泥氰化后的尾矿采用浸取法富集金银,浸取液制备硫酸亚铁、氧化铁黄和氧化铁红颜料等铁系化工产品,尾渣可用作建筑材料,较好地解决了铁帽型金银矿尾矿的综合利用问题,且环境污染小,成本低。

2.7 砂金矿综合利用

砂金矿是由原生金矿床或含金地质体在风化、剥蚀、搬运、沉积等外生地质作用下,在河流中某个部位聚集而形成的金矿,具有埋藏浅、易采易选、投资少、见效快等特点,是世界黄金的主要来源之一。我国砂金矿资源丰富,主要集中分布在黑龙江、吉林、内蒙古、甘肃、新疆、四川、陕西、湖南、江西、广西和广东等地^[49]。砂金矿常伴生磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、金红石、石榴石、铂、锡石、铬铁矿、锆石、独居石及宝石矿产资源,具有较高的综合回收价值。

陕西省月河砂金矿床是我国目前规模最大的砂金矿床,由上游汉阴矿段和下游恒口矿段构成,砂金储量 15 t。砂金矿石由砾石(70%~82%)、砂(10%~20%)、黏土质粉砂(3%~8%)及重矿物(砂金、钛铁矿、石榴石、磁铁矿)组成,物料松散,属松散砂砾型砂金矿床^[50]。月河砂金矿床沿河有五里、安康、恒口、汉阴 4 座砂金矿山,其中安康金矿采用干式磁选—摇床重选工艺从砂金选矿尾矿中回收磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿与脉石连生体以及细粒金屑,钛铁矿与石榴石连生体采用焙烧—磁选工艺分选回收;恒口金矿采用干式磁选—摇床重选工艺回收砂金尾矿中的磁铁矿和细粒金屑;汉阴金矿采用湿式弱磁选机回收砂金尾矿中的磁铁矿,选铁精矿后的尾矿采用筛分—焙烧—磁选—摇床重选工艺回收铁、钛铁矿、石榴石、金红石、独居石及细粒金

屑^[51]。伴生矿产资源的综合回收,提高了资源的利用水平,也增加了金矿企业的经济效益。

3 展望

几十年来,我国黄金资源开发强度过大,资源储量耗减速度明显超过新探明储量的增长速度,造成探明资源量贫乏甚至枯竭,可持续供给能力下降,难以满足黄金生产持续稳定发展的需要,同时在黄金开采、运输、尾矿遗留等多个环节中还存在资源浪费现象。鉴于我国金矿资源的现状,一方面须加大地勘投入力度,加快深部资源勘探及外围找矿,提高勘探开采深度和广度,扩大资源储量,缓解资源供需矛盾;另一方面须充分合理地利用现有的矿产资源,回收伴生有益组分及含氰废液中的贵金属,综合利用低品位矿石资源及废石、尾矿等,使有限的资源发挥最大的经济效益。笔者从金矿床成因、特点和矿物组成角度,分析评述金矿开发过程中的综合利用技术,为同类型矿床的综合开发利用提供借鉴。

此外,技术进步是黄金采、选、冶发展的根本动力,通过科技创新和技术改造,利用先进工艺技术和设备集约利用低品位矿石,提高资源综合利用效率,增加黄金资源总量,以实现我国黄金矿业的可持续发展。低品位金矿资源的开发利用,要注重露天开采和联合生产工艺以及高新技术的推广应用,如金矿制粒堆浸技术因处理量大、成本低而得到迅速发展。在黄金矿产开发过程中,要注意矿山废石、尾矿和浸渣等固体废物的综合处理与利用,提高环保意识,积极推进清洁生产工艺,并开展矿区绿化工作,做到资源效益、经济效益和社会效益的统一。

参考文献:

- [1] 佚名. 中国黄金年鉴 2016[J]. 黄金, 2016, 37(8): 13.
- [2] 胡伦积, 姚凤良. 金矿床的成因类型[J]. 中国地质, 1983(1): 13-15.
- [3] 韦永福, 吕英杰, 江雄新, 等. 中国金矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [4] 张文钊, 卿敏, 牛翠祎, 等. 中国金矿床类型、时空分布规律及找矿方向概述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014(5): 721-732.
- [5] 赵博云, 营俊龙, 邓建华, 等. 金矿找矿方法和技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [6] 丁式江, 翟裕生, 邓军. 中国金矿床分布的分形研究[J]. 地质论评, 1998(2): 188-193.
- [7] 陈纪明. 中国金矿床类型划分[J]. 黄金地质科技, 1990(3): 1-8.
- [8] 陈毓川, 李兆鼎, 毋瑞身. 中国金矿床及其成矿规律[M]. 北

- 京:地质出版社,2001.
- [9] 李景春,庞庆邦,李文亢,等. 中国金矿工业类型[J]. 贵金属地质,1998,7(2):114-120.
- [10] 《矿产资源综合利用手册》编辑委员会. 矿产资源综合利用手册[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [11] 黄永星,黄毓和. 金的找矿与选冶技术[M]. 广西:广西科学技术出版社,1989.
- [12] 吴荣庆. 国外低品位金矿,含金尾矿和废渣开发利用现状及其经济效益分析[J]. 国外地质技术经济,1989,5(4):64-69.
- [13] 邵军. 中国石英脉型金矿床地质特征[J]. 贵金属地质,1998,7(3):172-178.
- [14] 方维萱. 小秦岭含金石英脉矿物地球化学研究[J]. 地质与勘探,1996,32(3):40-45.
- [15] 魏彦森. 河南小秦岭金矿床主要载金矿物标型研究[J]. 资源与产业,2012(5):89-99.
- [16] 李建政,王安理,范尚立,等. 小秦岭金矿区废石资源综合利用试验研究[J]. 矿冶工程,2010(6):51-53.
- [17] 周新民,徐靖,宋翔宇. 灵宝某金矿白钨尾矿综合回收试验研究[J]. 矿产保护与利用,2011(6):83-87.
- [18] 郭珍旭,杨卉芑,岳铁兵,等. 灵宝金尾矿金的再回收及试制瓷质墙地砖的研究[J]. 矿产保护与利用,2000(1):23-26.
- [19] 王安理,库建刚,蔡圣锋,等. 小秦岭石英脉金钼多金属矿床综合利用试验研究与实践[J]. 矿冶工程,2009(1):40-43.
- [20] 焦瑞琦. 某含铜金精矿选矿工艺试验研究[J]. 黄金,2006(1):37-40.
- [21] 胡海洋,牛桂强,刘洪澜,等. 焦家金矿主矿区金矿石的赋存特征[J]. 岩矿测试,2013(6):931-937.
- [22] 刘胜光,郭广军,刘军晓,等. 山东焦家金矿残矿回收技术的研究[J]. 黄金科学技术,2010(1):80-82.
- [23] 刘润田,邱俊刚,张忠辉,等. 焦家金矿低品位矿石回收设计与应用[J]. 黄金科学技术,2010(6):54-57.
- [24] 牛桂强. 焦家金矿尾矿综合利用的试验研究与生产实践[J]. 黄金,2009(4):41-42.
- [25] 刘海龙,牛桂强,杨玉杰,等. 焦家金矿选矿厂提高效益的措施[J]. 矿山机械,2011(12):139-140.
- [26] 邵广全. 焦家金矿选矿厂尾矿综合利用选矿工艺研究[J]. 国外金属矿选矿,2006(7):41-43.
- [27] 刘渝燕,洪飞,金平,等. 焦家金矿尾矿在橡胶工业中的应用研究[J]. 矿业快报,2002(15):1-3.
- [28] 郝秀云,刘文达,王静,等. 福建紫金山金铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金,1999,20(4):8-11.
- [29] 罗映南,刘荣春,邹凯. 紫金山金矿低品位资源的开发利用技术[J]. 黄金科学技术,2003(2):27-31.
- [30] 阮诗昆,张定才,龚建生. 紫金山金矿露采铜矿石赋存形态及成因初探[J]. 资源环境与工程,2009(2):100-103.
- [31] 甘永刚. 紫金山金矿含金固体废弃物的综合利用[J]. 矿产综合利用,2003(5):43-46.
- [32] 李小文. 紫金山金矿低品位金矿资源的开发利用[J]. 矿产综合利用,2005(5):35-39.
- [33] 袁国才. 紫金山特大型低品位金矿选矿工艺流程论述[J]. 有色金属(选矿部分),2000(1):14-17.
- [34] 吴烈善,彭省临. 中国微细浸染型金矿床围岩蚀变地质特征[J]. 地质找矿论丛,2005(3):151-155.
- [35] 李得刚,曾小华,关有国,等. 中国卡林型金矿床成矿地质特征探讨[J]. 有色金属(矿山部分),2012(1):24-30.
- [36] 刘源,侯中健,李定武. 我国卡林型金矿研究现状[J]. 四川地质学报,2013(2):132-136.
- [37] 宋正刚. 贵州烂泥沟金矿岩石特征、围岩蚀变及其成矿规律初探[J]. 企业技术开发,2014(13):53-56.
- [38] 吴秀群. 烂泥沟金矿金赋存状态及工艺特性研究[J]. 黄金,1992(6):11-16.
- [39] 和中华,周云满,和文言,等. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律[J]. 矿床地质,2013(2):244-258.
- [40] 和中华,官德任,和文言,等. 滇西北衙超大型金多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质,2016(2):261-282.
- [41] 崔银亮,陈贤胜,晏建国. 北衙红色粘土型金矿地质特征和成矿条件[J]. 矿物学报,2001(4):654-658.
- [42] 邱显扬. 北衙金矿金银铁矿石特性与选矿回收的关系[J]. 黄金,2016(10):54-59.
- [43] 熊涛,谢美芳,王小川. 北衙多金属矿工艺流程试验[J]. 现代矿业,2013(6):91-93.
- [44] 王小川,姜亚雄,黄丽娟,等. 边磨边浸全泥氰化工艺在北衙金矿的运用[J]. 矿冶,2016(2):48-52.
- [45] 崔贤富. 铜陵新桥铁帽型金银矿基本地质特征及矿石可选(冶)性[J]. 有色矿山,1992(5):14-17.
- [46] 何双梅. 我国铁帽型金矿床的地质特征[J]. 矿物岩石地球化学通讯,1989(4):259-262.
- [47] 曹晓生. 铜陵新桥铁帽型金矿床元素分带特征的统计研究[J]. 物探化探计算技术,1991(3):229-235.
- [48] 聂基兰,杨泉生,王振长,等. 铁帽型金银矿尾矿的综合利用[J]. 南昌大学学报(理科版),1993(2):65-69.
- [49] 金洪涛,贾伟光,邸志强,等. 我国砂金矿开采造成的环境地质问题与对策[J]. 地质与资源,2004(1):30-34.
- [50] 戴安周. 我国一个独特的大型砂金矿床[J]. 黄金科学技术,1989(7):20-25.
- [51] 艾满乾. 陕南月河流域砂金矿选矿厂尾矿的综合利用[J]. 有色矿山,1998(3):46-49.

引用格式:吕子虎,刘红召,卞孝东,等. 黄金矿床的分类及其综合利用技术现状[J]. 矿产保护与利用,2018(4):135-141.

LYU Zihu, LIU Hongzhao, BIAN Xiaodong, et al. The classification of the gold deposit and its status of comprehensive utilization technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4):135-141.