

我国矿产资源高效清洁利用进展与展望

毕献武, 董少花

中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘要: 矿产资源是社会发展的物质基础, 随着经济的快速发展, 我国对矿产资源的需求快速增长, 矿产资源短缺日益严重, 资源、环境压力不断加大。我国矿产资源利用率低, 伴随资源利用的环境污染问题突出, 如何高效清洁利用矿产资源成为亟需解决的重要科学问题。本文分析了我国矿产资源的利用现状和存在的问题, 总结了近十年来我国金属矿产资源、非金属矿产资源和能源矿产资源在利用领域的发展概况, 探讨了矿产资源高效清洁利用的未来发展趋势。

关键词: 矿产资源; 高效利用; 金属矿产; 选矿技术; 清洁生产

中图分类号: P617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2802(2014)01-0014-09 **doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2014.01.002

Progress and Prospect on High Efficient and Clean Utilization of Mineral Resources in China

BI Xian-wu, DONG Shao-hua

State Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Mineral resource is one of the most important material basis for the social development. With the rapid development of economy, the mineral resource consuming of China increases rapidly and the resource and environmental pressures gradually increase. In order to improve the level of resource utilization and alleviate the crisis of the environment pollution, how to use mineral resources efficiently and cleanly has become into an important scientific problem to be solved. Firstly, this article analyzed the present situation of resources utilization in China. Secondly, we summarized the development on high efficient and clean utilization of main mineral resources in China in past decade, including metal mineral resources, nonmetallic mineral resources and energy resources. At last, we discussed the future development trend about high efficiency and clean utilization of mineral resources.

Key words: mineral resources; high efficient utilization; metal mineral; technology of mining

矿产资源是重要的非可再生自然资源, 是国家经济建设的基础物质材料, 其保障程度关系到国民经济长期稳定发展和国家安全。我国是世界上矿产资源种类齐全、储量丰富的少数国家之一。据统计, 我国 90% 以上的能源、80% 以上的工业原料、70% 以上的农业生产原料都来自矿产资源^[1]。目前, 我国已发现 171 种矿产, 探明有储量的矿产 168 种, 已探明矿产资源储量潜在价值约占世界矿产总价值的 14.6%, 居世界第 3 位^[2]。然而, 我国矿产资源人均占有量仅为世界人均占有量的 58%, 列世

界第 53 位。面对国民经济建设的巨大需求, 我国矿产资源储量严重不足^[3]。

经济快速增长下我国矿产危机日益明显, 当前面临着严峻的形势, 主要表现有: ①我国矿产资源需求量很大, 已探明的主要矿产严重短缺; ②矿产资源利用率不高, 矿业开发造成的环境问题突出^[4]。为了缓解我国矿产资源需求和环境压力, 矿产资源高效清洁利用成为亟需发展的重要技术方向^[5~7]。本文首先分析了我国矿产资源利用的现状, 指出了矿产资源高效清洁利用方面存在的问题。在此基

收稿日期: 2013-12-24 收到

基金项目: 中国科学院至 2050 年矿产资源领域科技发展路线图战略研究项目; 矿床地球化学国家重点实验室项目群资助项目 (SKLOGG-ZY125-03)

第一作者简介: 毕献武 (1967—), 女, 博士生导师, 研究方向: 矿床地球化学。E-mail: bixianwu@mail.gyig.ac.cn.

础上,总结了近十年来我国主要矿产资源在高效清洁利用领域取得的进展及主要技术突破。最后,对矿产资源高效清洁利用的未来发展趋势进行了展望。

1 矿产资源利用现状

我国矿产资源具有以下特征:(1)矿产分布不均,优势矿产大多用量不大,而一些重要的支柱性矿产多为短缺或探明储量不足,需要长期依赖进口^[8]。(2)贫矿多富矿少,低品位难选冶矿石所占比例大。如我国铁矿石平均品位为33.5%,比世界平均水平低10个百分点以上;锰矿平均品位仅22%,离世界商品矿石工业标准(48%)相差甚远;铜矿平均品位仅为0.87%;磷矿平均品位仅16.95%;铝土矿几乎全为一水硬铝石,分离提取难度很大^[9]。(3)大型-超大型矿床少、中-小型矿床多。以铜矿为例,我国迄今发现的铜矿产地900余处,其中大型-超大型矿床仅占3%,中型矿床占9%,小型矿床高达88%。(4)单一矿种的矿床少,共生矿床多:据统计我国的共、伴生矿床约占已探明矿产储量的80%。目前,全国开发利用的139个矿种,有87种矿产部分或全部来源于共、伴生矿产资源^[10]。

鉴于我国矿产资源“三多三少”的特征,加上认识和技术上的不足,我国矿产资源高效清洁利用还存在着诸多问题^[11~18]。主要表现为:

(1)综合利用意识淡薄,综合利用率低

由于长期以来对矿业的粗放式经营,人们大多对我国的矿产资源情况缺乏正确的认识,综合利用意识淡薄,矿山企业盲目开采,对共(伴)生矿物及尾矿等不利用或利用率很低。据统计,我国矿产资源总回收率和共伴生矿产资源综合利用率平均分别仅为30%和35%左右,比国际先进水平低20%;我国金属矿山尾矿的综合利用率仅约为10%,远低于发达国家60%的利用率;我国工业“三废”综合利用率总体偏低,如粉煤灰的利用率为48%,煤矸石为38%。在品种上,我国综合利用的矿种只占可以开展综合利用矿种总数的50%左右。在数量上,我国铜铅锌矿产伴生金属冶炼回收率平均为50%左右,发达国家平均在80%以上,相差30个百分点左右。我国伴生金的选矿回收率只有50%~60%,伴生银的选矿回收率只有60%~70%,与国外先进水平相比均落后10%左右。

(2)综合利用技术欠缺,工艺水平相对落后

我国复杂多元素共生矿、低品位矿、难选冶矿所占比例较大,对这些矿的开发利用是我国矿产资

源开发利用的重要任务,但我国适用于这些矿的综合利用技术较为欠缺。其问题主要表现在:传统矿产加工生产工艺复杂、流程长、成本高;采矿工艺技术落后、选冶过程的自动控制水平低、选冶流程不科学,使很多伴生、共生组分损失遗弃;大型高效低耗选冶加工装备缺乏,选矿厂装备水平不高;相对缺少对尾矿、废渣等固体废弃物进行综合回收利用的先进装备。这些因素都制约了矿产资源综合利用的效益和对贫、杂、微细复合矿石的综合利用。相比之下,我国对矿产资源的综合利用起步较晚,目前还有相当多的小矿,在采用最原始的采矿和选冶方法。我国金属矿产资源选冶加工仍以初级产品为主,产品缺乏国际竞争力。综合利用所得产品的科技含量和附加值较低,市场销路有限,也是制约资源综合利用的重要原因之一。

(3)乱采滥挖,资源浪费严重

小矿山各自为政,技术单一,难以形成规模采矿和规模经济,矿产资源的综合利用效率偏低。国家通过多年治理,对小型矿山进行关停并转,取得一定成效,但小型矿山数量仍然巨大。据统计,我国各种经济类型的矿山企业约16.5万个,其中大型矿山占全国矿山总数的0.33%,中型矿山占0.82%,小型矿山16.3万座占到全国矿山总数的98.85%,而小型矿山的产量仅占全国总产量的40%~60%。由于这些小型矿山企业欠缺资金、技术、管理、人才等方面的扶持,因而采富弃贫、采易弃难的现象普遍,造成了矿产资源的严重浪费;且因其安全环保意识薄弱,使当地在社会经济繁荣的背后隐藏着祸根。更为严重的是,一些小企业无证违规经营,进行破坏性开采,导致了严重的资源浪费。

(4)生态环境破坏严重

矿产资源的开采过程必然会造成地形、地貌的破坏,造成严重的地质灾害,如地表下沉、滑坡和泥石流等。矿石选冶过程造成大量废水有毒气体、粉尘及固体废弃物等“三废”的排放。许多矿山企业环保意识薄弱,没有完善的环保设施,有的企业甚至对排出的“三废”不进行处理就直接外排。“三废”的排放造成大面积的土壤、大气、地表水和地下水的污染,严重破坏生态环境,造成砷、氟、重金属等有害成分的累积,直接危害到矿区周边人民群众的身体健康。大量矿山废弃固体堆砌场和尾矿堆放库存在地质安全隐患。

综上所述,我国矿产资源综合利用率低、能耗高,资源浪费和环境污染严重。提高矿产资源利用

效率,走绿色矿业之路,是当前我国矿产资源开发利用中亟需解决的突出问题,同时也是缓解我国资源供需矛盾的巨大潜力所在。

2 矿产资源高效清洁利用进展

在国际上,矿产资源高效清洁利用的发展趋势主要是向高回收率、低成本、节能、环保和健康安全方向发展^[19~21]。高回收率就是通过技术创新提高矿产资源的利用率,低成本就是要降低单位产量的成本,节能就是要降低单位产量的能量消耗,环保就是要降低单位产量的噪声、废气、废水、固体废气物的排放,健康安全就是要提高工人的安全、降低有害物质的暴露。经过十几年的努力,我国在矿产资源高效利用和清洁利用领域取得了显著的成绩。

2.1 矿产资源高效利用

近十年来,我国矿产资源高效利用方面取得了长足进步,主要表现在新方法和先进的技术设备在实际生产中得到了广泛运用,极大地提高了矿产资源的回收率以及伴生矿产的综合利用,缓解了我国长期以来在矿产资源开采与经济效益之间存在的矛盾。

(1)黑色金属:黑色金属矿产主要包括铁、锰、铬、钒和钛等矿产,铁矿、锰矿和铬矿是钢产品必不可少的原料,但我国铁矿、锰矿、铬矿资源严重不足,对我国现有铁、锰、铬、钒、钛矿产资源的高效利用成为当前极为紧迫的任务,十年来我国黑色金属高效利用方面有了明显的进展。

在铁矿资源方面,我国铁矿石富矿少、贫矿多,97%的铁矿为30%以下的低品位铁矿,国内尚存大量未被开发利用的难选铁矿。我国铁矿石“贫、细、杂、散”的特点促进了我国选矿新工艺、新技术、新设备研究工作的开展,一系列高效精选设备在选矿厂得到应用,一些选矿新工艺和新技术达到了国际先进水平。我国铁矿选矿技术进展主要表现在以下方面^[22~28]:一是实施“提铁降硅”战略,关键技术包括反浮选技术及高效捕收剂的应用、新型磁选设备和细筛技术的应用以及浮选柱的应用;二是针对脉石为含铁硅酸盐的细粒嵌布磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状赤铁矿等复杂难处理铁矿石,研究开发了高效节能选矿新技术,如闪速磁化焙烧技术、强磁预选工艺、小粒级赤铁矿预选技术等;三是新型破碎磨矿、筛分、磁选和浮选设备的研制和应用。四是节能减排技术的应用,包括多碎少磨工艺、矿石预选技术、选矿废水循环利用、选矿厂自动化技术、尾矿输送技术、尾矿综合利用技术等。

在锰矿资源方面,我国锰矿品位低、杂质高、矿石结构复杂、嵌布粒度细,近80%的锰矿属于沉积或沉积变质型^[29,30]。近几年我国锰矿选矿技术进展表现在:一是选矿工艺流程优化,通过加强洗矿筛分、重选和粗粒强磁预选,优化流程结构,使锰矿石的可用品位提高3%~5%,特别适合于碳酸锰矿石。二是多种型号的强磁选机应用于生产,DPMS系列永磁强磁机、新型湿式永磁机、SHP型强磁选机和SLON型高梯度磁选机等磁选机的应用,提高了锰矿的回收率,为锰矿泥和尾矿中锰的回收提供了有效途径。三是含多金属锰矿石的综合回收取得进展,火法选锰的富锰渣法能高效地处理高铁、高磷等难选贫锰矿石,将铁与锰及其他有用元素实现有效分离^[31]。四是化学选锰法的发展,如采用选冶联合工艺富集氧化型银锰矿中的银^[32],以氯化焙烧—氰化浸出工艺从某银锰矿中富集锰、回收银^[33],采用铵盐法从低品位碳酸锰矿石中富集回收锰^[34],微生物催化还原浸出氧化锰中锰^[35]等多种化学选锰方法。

在铬矿资源方面,铬在自然界中主要赋存于铬铁矿中。中国铬铁矿资源极度匮乏,95%依赖进口,铬铁矿的高效利用迫在眉睫。近年来,我国对低品位铬铁矿的利用进展主要表现在铬矿预热还原原矿球团新工艺的进展,辽阳市宏远冶金研究所于2008年,成功开发外热式竖炉生产预还原铬矿球团工艺,并进一步用于冶炼高碳铬铁试验^[36]。从铬渣中分离回收铬的技术中,浸取—微生物回收法以及氯化焙烧回收法取得了较好的效果^[37]。另外,多金属矿中伴生铬的利用也已引起关注,如甘肃金川铜镍尾矿中回收铬,采用氧化焙烧法制取铬盐,再电解出金属铬^[38]。

在钒、钛矿产资源方面,钒钛磁铁矿是我国有重大特色的多金属矿产资源,储量巨大,且为钒、钛、铁、铬等多金属共生,资源综合利用价值很高。钒钛磁铁矿的高效清洁利用进展主要有,亚熔盐法钒渣高效清洁提钒技术^[39]、酸浸法从黏土钒矿中提钒技术^[40]、钛铁矿精矿球团还原—锈蚀法制取富钒料、钒钛磁铁矿还原—磨选法综合利用铁钒钛^[41]以及低品位钛的转底炉还原—氯化法提取^[42]等技术的发展。

(2)有色金属:我国有色金属矿产主要有钨矿、锡矿、钼矿、铜矿、铅矿、锌矿、镍矿、钴矿、铝土矿、镁矿、铋矿、汞矿和锑矿等,下面主要介绍钨矿、锡矿、钼矿、铜矿、铅锌矿、铝土矿等矿产高效利用方面的主要进展。

我国钨矿储量居世界首位,钨矿开采历史久远,特别是黑钨矿资源经过近百年的开采,储量日渐减少、入选品位逐年下降。近年来,钨矿选矿技术的发展主要表现在:一是在粗粒级黑钨矿选矿中,高效节能的重选设备有所发展,如在重选工艺中推广应用了动筛跳汰机、螺旋溜槽;在细粒级黑钨矿选矿中,采用重选、浮选、磁选多种选矿方法相结合的联合工艺流程,使回收率逐渐得到了提高^[43,44]。二是随着黑钨矿的开采殆尽,难选白钨矿的利用受到重视,对于白钨矿较有效的浮选工艺进展迅速,开发了常温浮选法,研制了多种新型白钨浮选捕收剂和抑制剂,应用了浮选柱等新型浮选设备^[45]。三是对于复杂难选的多金属黑、白钨矿,黑、白钨混合浮选新工艺不断发展^[46]。

我国锡矿资源丰富,但锡矿石种类繁多,组成复杂,分选困难。近年来,对于锡矿的高效利用方向主要为:一是提高锡选矿回收率,以重选法为主的联合工艺,如重选—浮选法、重选—浮选—重选法、浮选—重选法、浮选—重选—磁选等的联合分离工艺流程来实现多金属矿的综合利用。二是多种浮选选矿方法的发展,如载体浮选法、絮凝浮选法、浮选柱浮选法、双液分离浮选法、离子浮选法、沉淀浮选法、吸附胶体浮选法、加压加温浮选法、真空浮选法等^[47]。

我国钼矿储量丰富,主要以辉钼矿形式存在,另外还有铜钼矿和高氧化率钼矿等。辉钼矿资源相对易选,开发和利用其它钼资源越来越重要。我国钼矿选矿技术的发展主要表现在:辉钼矿新型浮选药剂和新型浮选柱的发展^[48];低品位矿石废催化剂残渣中回收钼技术的发展^[49];铜钼矿和高氧化率钼矿等难选钼矿中回收技术如预先脱泥、焙烧—浸出工艺、选冶联合工艺等技术的突破^[50]。

我国铜矿资源利用率较低,“贫、杂、氧、难”是当前铜矿资源利用情况的最好概括。据统计,目前我国尚有43%的铜储量暂难利用^[51],提高资源综合利用率势在必行。近年来,我国铜矿选矿技术研究取得了重大进展,主要表现在:一是硫化铜矿石选矿中的铜锌硫化矿浮选分离技术的发展^[52]。二是氧化铜矿石选矿的进展,如氧化铜矿石浮选过程中预先脱泥—诱导浮选、分段硫化浮选等技术的突破,氧化铜矿石化学选矿中硫代硫酸盐浸出碱性氧化银、铜矿技术,浸出—置换—浮选工艺流程和浸出—沉淀—载体浮选方法的发展。三是铜矿浮选药剂中高效捕收剂、高效组合抑制剂及新型活化剂的研制^[53]。

我国铅锌矿资源丰富,目前铅锌工业矿物主要有氧化铅锌矿及硫化铅锌矿。铅锌选矿技术的发展主要表现在:一是硫化铅锌矿浮选电化学及电位控制浮选技术的突破^[54],等可浮浮选、分支串联浮选、异步混合浮选、部分快速优先浮选等新颖浮选流程结构的开发利用^[55];二是氧化铅锌矿中,新型捕收剂、抑制剂和组合浮选药剂的研制^[56],复杂难选氧化铅锌矿中浮选工艺流程的优化^[57]。

我国铝土矿约98%以上都是一水硬铝石型铝土矿。此类铝土矿的特点是铝高、硅低、铁低,矿物组成非常复杂,嵌布粒度较细,铝矿物和铝硅酸盐矿物的可磨性差异较大,不能满足拜耳法生产氧化铝的要求。我国科技工作者立足国内铝土矿资源性质特点,为了满足低能耗的拜耳法生产氧化铝的需要,对此类矿石进行了大量预脱硅处理研究,主要技术有:化学选矿脱硅法、洗矿分级方法、选择性絮凝方法、重选方法、载体浮选方法、联合方法、辐射选矿法、生物选矿脱硅方法等^[58~62]。

(3)贵金属:我国贵金属矿产资源主要有金矿、银矿、铂族金属(铂、钯、钌、铑、铱、锇)矿产资源等,下面主要介绍金矿资源及铂族金属矿产在高效利用方面的发展。

我国采金历史悠久,2010年黄金产量达到340t,已连续4年世界第一。随着易处理金矿的不断开采,可直接氰化提取的高品位金矿资源日趋枯竭,低品位、难处理金矿资源的开采利用势在必行,我国难处理金矿资源比较丰富,约占探明储量的1/4。金矿的高效利用的主要进展有:一是改建和强化传统的选矿方法,如改造破碎磨矿工艺流程来实现“多碎少磨”、研制新型浮选药剂等。二是难处理金矿石预处理方法如常规氧化焙烧、热压浸出和细菌氧化法的发展及浮选—氰化联合工艺流程的应用^[63, 64]。

铂族金属矿产方面,铂族元素始终是最紧缺的矿种之一,全国保有储量仅约310t,工业储量23t,不到世界储量的3%^[65]。我国铂族元素矿产高效利用方面的进展主要是:催化剂和催化技术的发展,含铂族金属的失效催化剂种类和数量不断增加,加压氰化法的提出^[66],火-湿法联合工艺技术的发展^[67]等。

(4)稀有金属:稀有金属矿产资源包括铌、钽、锂、铍、锆、铈、铷、铯等矿产,我国主要稀有金属矿产有锂矿、铍矿、铌钽矿等,分布较集中,多为共伴生矿床。稀有金属矿产资源高效利用方面的进展主要是:锂矿方面主要有盐湖卤水提锂技术的发

展^[68],铍矿方面主要有高氟低品位铍矿中对矿石加碱焙烧—水解除杂—再球磨后浮选提铍技术的发展^[69],铌钽矿方面多种选冶联合工艺如重选—磁选—浮选联合流程等技术的应用^[70]。

(5)稀土金属:稀土金属矿产包括钨矿、轻稀土矿(镧、铈、镨、钆、铽、钇、铈、镱、铟、铊、铋、镱、铪、铌、钽、钨、铀)和重稀土矿(钆、铽、铈、镱、铟、铊、铋、镱、铪、铌、钽、钨、铀)等矿产资源,我国稀土矿产资源丰富、矿床类型齐全、分布面广而又相对集中。我国稀土矿选矿技术的发展主要有:一是工艺的创新,如白云鄂博稀土矿中将强磁车间的粗选—精选改为粗选—扫选,扫选精矿用反浮泡沫作为稀土浮选原料进行反浮。二是新型高效稀土浮选药剂如 LF-8、LF-6 捕收剂的研制。三是新型选矿设备的开发,如磁选机、螺旋溜槽、浮选柱等^[71]。

(6)分散元素金属:分散元素包括铟、镓、锗、铊、镉、硒、碲、铼等 8 个元素。前人认为“分散元素不形成独立矿床,它们以伴生元素方式存于其它元素的矿床中”。20 世纪 90 年代以来,在涂光炽院士带领下,中国科学院地球化学研究所完成“分散元素成矿机制研究”项目,发现分散元素可以成矿,可以形成独立或共生矿床^[72]。近十年,我国已经发现许多分散元素独立矿床,为分散元素的利用做出了重要贡献。项目还发现分散元素成矿类型的专属性,绝大多数分散元素所富集的矿床类型具有一一对应的关系^[73],成矿专属性的发现提高了分散元素的找矿及与多金属综合利用的效率。

(7)放射性金属:放射性金属包括铀、钍、镭、钷、铯、锶、钷、钷等,我国放射性金属矿产主要为铀矿。铀是重要的战略金属,我国铀矿资源贫乏、需求量大,提高铀资源的利用水平迫在眉睫。铀矿选矿技术主要有地浸、堆浸等,近年来选矿工艺技术的发展主要有:一是地浸选矿技术的发展,如可地浸砂岩型铀矿快速钻进冲洗液的应用^[74]等。二是堆浸选矿工艺的改进,包括化学溶浸剂、助渗剂^[75]等方面的创新。三是原地爆破浸出技术、细菌堆浸新工艺的发展^[76]。

(8)非金属矿产:我国非金属矿产资源种类齐全,已探明非金属矿产有 88 种,主要介绍一下我国萤石矿、钾长石矿、磷矿等矿产资源开发利用进展。萤石矿选矿进展主要表现在石英型萤石矿高效抑硅药剂的研制,重晶石型和碳酸盐型萤石矿高效捕收剂和抑制剂以及多次选别工艺流程的开发^[77]。钾长石矿高效利用主要表现在除铁工艺的进展,如浮选—硫酸酸浸联合、磁选—浮选联合、反浮选—强磁选联合等多种联合工艺除铁技术的发

展^[78]。磷矿方面主要进展有:一是反浮选、双浮选工艺的发展及新型浮选药剂的研制,二是重介质旋流器选磷技术的开发和新型磁选设备的应用^[79],三是窑法磷酸技术、微生物处理法、干式电选法等技术的突破^[80]。

(9)能源矿产:我国主要能源矿产有煤、石油、天然气、核能及地热等,能源矿产资源比较丰富,但结构不理想,煤炭资源比重偏大,石油、天然气资源相对较少。我国在煤矿资源高效利用中的进展主要表现在选煤技术的发展:掌握了国际上先进的选煤方法,高效重介质旋流器选煤技术广泛推广,风选、动筛跳汰选煤技术及大型设备得到发展,浮选选煤技术中各类捕收剂和泡沫剂的研制,细粒煤脱水技术中加压过滤技术、强气压穿流式压滤技术和沉降离心脱水技术的突破等^[81~83]。

综上所述,我国在矿产资源高效利用领域取得了显著的成果。2012 年国家发布的数据显示^[84]:在矿产资源综合利用方面,全国约 1/3 的共伴生矿产资源实现综合开发。黑色金属矿共伴生的 30 多种有用组分中,有 20 多种得到综合利用;有色金属矿的 45 种共伴生组分中,有 33 种得到综合利用;全国共伴生金属矿产约 70% 得到综合利用,综合利用的金属量占到全国金属总产量的 15%,全国 35% 的黄金、90% 的银、100% 的铂族元素、75% 的硫铁矿和 50% 以上的钒、碲、镓、铟、锗等稀有金属来自于综合利用。目前已形成攀枝花钒钛磁铁矿、金川铜-镍多金属共生矿、包头白云鄂博稀土-铈-铁多金属共生矿、湖南柿竹园钨锡多金属共生矿、广西大厂锡多金属矿、辽宁硼镁铁矿等六大共伴生矿产资源综合利用基地^[85]。在再生资源回收利用方面,主要品种再生资源回收总量达 1.65 亿吨,回收总值达 5763.9 亿元,部分城市主要品种再生资源回收率提高到 70%,废钢铁、废铜、废铝、废铅利用量分别占当年产量的 13%、50%、23% 和 42%。

2.2 矿产资源清洁利用

十年来,我国矿产资源清洁利用方面的进展主要体现在矿山“三废”治理技术的发展以及清洁生产模式的引进。

(1)矿山“三废”治理:对于矿山废水的治理,近年来许多矿山都建立了污水处理系统,主要措施有:①提高矿产资源采选技术,尽量少用有毒有害的药剂,提高水的循环利用率,减少废水排放量;②净化处理水质较差的外排水,水处理技术如中和法、硫化法、沉淀浮选法、还原法、离子交换法、生物法、液膜法等得到发展^[86],水处理新技术如矿物治

理重金属废水法^[87]等得到突破。对于矿山废渣的治理,我国许多黑色、有色金属矿山都采取了一系列措施,如对有价值元素进行回收,矿山污染源的微生物处理,某些废渣用于生产建筑材料、发电等。对矿山废气的处理,主要措施有做好通风除尘、实现废物利用等^[88]。

(2)清洁生产模式:我国2003年1月正式颁布实施了《清洁生产促进法》,说明清洁生产已被提上国家议程^[89]。清洁生产的总体目标、手段都非常明确地贯穿了矿区环境与矿山开发协调发展的思想,是矿山工业污染防治战略的一项重大变革。对生产过程而言,清洁生产包括节约原材料和能源,淘汰有毒原材料并在全部排放物和废物离开生产过程以前减少它们的数量和毒性^[90]。矿山企业作为我国的支柱产业之一,实施清洁生产势在必行,我国许多煤矿在开采利用过程中实施清洁生产模式^[91]。煤炭是我国主要的能源矿产,煤矿资源丰富,然而在煤炭大量开发利用的同时,也带来一系列环境和生态问题。近年来,我国洁净煤技术发展迅速,在煤矿采选冶过程中一些重要技术得到发展,如煤炭洗选、配煤、水煤浆、循环流化床等技术的发展,烟气脱硫、大型煤气化等技术的开发等^[92~95]。

综上所述,矿产资源开发利用带来的环境问题已引起了中国政府的重视,政府近十年来相继出台了一系列矿产清洁利用的相关政策和法规,包括2003年实施的《清洁生产促进法》、2004年出台的《固体废物污染环境防治法》、2007年出台的《节约能源法》、《水污染防治法》、2009年出台的《矿山地质环境保护规定》、《保护性开采的特定矿种勘察开采管理办法》等。矿产资源清洁利用已初见成效。中国资源综合利用年度报告显示^[79],2011年粉煤灰、煤矸石、工业副产石膏等大宗固体废物年利用量约 15×10^8 t。工业固体废物综合利用率近60%,年利用量近 20×10^8 t;全国煤矸石、煤泥发电装机容量达 2800×10^4 kw,相当于减少原煤开采4200万吨;从钢渣中提取出约 450×10^4 t渣钢,相当于减少铁矿石开采近 1740×10^4 t。

3 矿产资源高效清洁利用展望

矿产资源高效清洁利用对有效利用矿产资源和合理保护生态环境将发挥积极作用,对推动我国经济增长方式由“粗放型”向“集约型”转变、实现资源优化配置和经济可持续发展具有重要意义。因此,矿产资源高效清洁利用必将是我国经济发展的

一项重大战略方针。尽管我国矿产资源在高效清洁利用领域有了明显的成绩,但是矿产资源高效清洁利用是长远大计,我们要以高效利用为核心,基地建设和示范工程为主导,清洁发展和节能减排为前提^[5],坚持矿产资源高效清洁利用的方针不变。因此,根据矿产资源特点和高效清洁利用现状,我国现阶段及未来矿产高效清洁利用的方向应该为:一是对传统矿石的高效利用,二是复杂共生、伴生矿石的高效利用,三是目前不能利用但将来可利用的低品位矿和“呆矿”的高效利用,四是矿山生态环境优化^[5]。具体有以下建议:

(1)完善相应的法律法规及政策机制:在《中华人民共和国宪法》和《矿产资源法》的指引下,我国制定了一系列的政策和相关法规。初步建立了中国矿产资源的管理法律、法规体系框架,使矿产资源及其勘查开发与管理进入了有法可依的轨道。虽然矿产资源合理利用的规划建设已经越来越引起我国政府的关注,但规制多是简要而抽象地规定了一些鼓励开展矿产资源综合、合理利用的政策、方针,较缺少可行、有力的措施和具体明确的执法主体。因此,在执行中打折扣的现象时有发生。因此,首先要健全矿产资源法律法规体系,加快矿产资源高效清洁利用法规体系建设,研究制定《再生资源回收利用法》、《资源综合利用法》、《金属尾矿综合利用管理办法》,并完善《矿产资源法》和《清洁生产促进法》等法规,使资源的高效清洁利用纳入法制化轨道,为矿产资源高效利用、发展循环经济提供法律保证;其次要设立矿产资源合理利用专项基金并建立监管机制,将国家用于扶植矿产资源综合利用包括税收在内的优惠经济政策真正落实到位,提高企业开展矿产资源综合利用的积极性;再次要强化对矿产资源综合利用的监督管理,加强对勘探和生产过程中的全面综合评价与考核监督;最后要完善矿产资源及矿业权有偿使用制度,加快出台矿业企业整合政策,建立重要矿产资源保护利用机制等^[96]。

(2)加强新技术、新工艺的开发与应用:矿产资源高效利用的根本出路在于技术的进步,加强采选冶过程中新技术、新工艺的研究及推广,不断提高矿产资源的综合利用水平。实现矿产资源的高效利用,必须针对我国资源特点,借助于每个单元的技术创新和设备革新,进一步创新适合我国资源特点的选矿新技术,如生物选矿技术、微细粒贫矿选矿技术、多金属共生矿综合利用技术、尾矿再利用技术等^[97];在催化反应、装备、流程工艺等方面形成

一批自主知识产权,形成综合利用资源的核心技术、先进装备等。在未来的几年里,着力突破以下技术难题:高含镁低品位硫化镍铜矿直接浸出技术,稀土铁铌等共生资源高效利用技术,盐湖和海洋矿产资源高效利用技术,富含砷锑的银铜铅锌多金属矿选冶联合关键技术,多金属矿伴生铁、锰资源回收利用技术,铜锡多金属共生资源综合利用技术,复杂贵金属矿产资源高效利用技术,黑色岩系中镍、钼、铂族元素等有用元素高效利用技术,铜、铅、锌老尾矿中综合回收有价元素关键技术,磷石膏综合利用技术,硫酸烧渣及难选赤铁矿流态化煅烧技术,冶金渣有用元素回收及综合利用技术等^[5]。

(3)积极治理矿山“三废”,推广清洁生产模式:我国要摆脱“先污染,后治理”的模式,积极治理矿业三废,对已污染矿山的生态环境进行全面修复,不再新建破坏生态环境的开采项目,新建矿山中积极推广清洁生产模式。在未来的几年里,着力突破以下技术难题:矿区重金属复合污染土壤的生物、物化联合修复技术,植物修复安全处置与资源化利用关键技术,重金属污染土壤联合修复集成技术,矿区重污染土壤的钝化技术,矿区有机物的微生物固化降解技术和生物表面活性剂强化修复技术,原位微生物修复技术,植物—微生物联合修复技术,放射性核素污染土壤控制与修复技术,矿山生态恢复与重建技术与方法等^[5]。

4 结 语

近年来,我国矿产资源高效利用领域已有明显进展,矿产资源节约与综合利用技术明显进步,主要表现在选矿技术的创新、工艺的改造和设备的研发,对矿业的科技进步和经济效益的提高、矿业的可持续发展发挥了重要作用;而在清洁利用领域研究尚浅,对“三废”的治理和清洁生产模式的实施还在起步阶段,应加强宣传教育,提高社会的资源环保意识。积极开展矿产资源高效清洁利用,对于贯彻落实节约资源和保护环境的基本国策,缓解工业化和城镇化进程中日趋强化的资源环境约束,提高资源利用效率,加快经济发展方式转变,增强可持续发展能力,都具有重要意义。

参考文献 (References):

[1] 矿产资源综合利用手册编委会. 矿产资源综合利用手册[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[2] 李占演, 吴小飞. 中国矿产资源现状分析及对策[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(11): 84-87.

[3] 曾培炎. 国务院关于矿产资源合理利用、保护和管理工作的报告[R]. 全国人民代表大会常务委员会公报, 2007, (1): 104-110.

[4] 曹清华, 曹献珍. 如何提高矿产资源保障能力[J]. 中国国土资源经济, 2005, (12): 11-12.

[5] Hu R Z, Liu J M, Zhai M G. Mineral resources science in China: A Roadmap to 2050[M]. Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

[6] 任巍, 高帆, 王殿茹. 矿产资源紧缺与我国矿产资源战略体系的构建[J]. 中国国土资源经济, 2005, (5): 14-16.

[7] 潘锋. 构建我国金属资源高效利用技术体系[J]. 科学新闻, 2007-6-26.

[8] 侯万荣, 李体刚, 赵淑华, 胡琴霞, 金同和, 刘洪利, 李振辉. 我国矿产资源综合利用现状及对策[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 63-66.

[9] 陈毓川. 我国矿产资源安全现状与对策[R]. 全国第三界成矿理论和找矿方法学术讨论大会报告[C]. 海口, 2007.

[10] 刘玉强, 乔繁盛. 我国矿产资源及矿产品供需形式与建设[J]. 矿产与地质, 2007, 21(1): 1-7.

[11] 蔡世锋, 杨殿. 矿产资源的综合利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2000, (2): 3-5.

[12] 冯培忠, 曲选辉, 吴小飞. 关于我国矿产资源利用现状及未来发展的战略思考[J]. 中国矿业, 2004, 13(6): 12-16.

[13] 孙成林. 浅谈我国有色金属矿产资源高效利用现状[J]. 金属矿山, 2005 (Suppl.): 243-244.

[14] 王春秋. 关于矿产资源综合利用的思考[J]. 矿产与地质, 2005, 19(3): 242-245.

[15] 宋守志, 钟勇, 邢军. 矿产资源综合利用现状与发展的研究[J]. 金属矿山, 2006, (11): 1-4.

[16] 唐宇. 我国矿产资源高效利用存在问题及对策建议[J]. 西部资源, 2012, (3): 63-64.

[17] 张崇森. 矿产资源综合利用与环境保护之关系的探讨[J]. 矿冶, 2003, 12(2): 22-25.

[18] 李新冬, 陈明. 矿产资源开发与清洁生产关系的探讨[J]. 中国资源综合利用, 2005, (11): 12-14.

[19] Crowson P. Mining during the next 25 years: Issues and challenges[J]. Natural Resources Forum, 1997, 21(4): 231-238.

[20] Wellmer F M, Becker Platen J D. Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: A review[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, (91): 723-745.

[21] Christmanna P, Arvanitidis N, Martinsa L, Recochea G, Solara S. Towards the sustainable use of mineral resources: A European geological surveys perspective[J]. Minerals and Energy, 2007, 22(3-4): 88-104.

[22] 印万忠, 丁亚卓. 铁矿选矿新技术与新设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

[23] 罗良飞, 余永富, 陈雯, 严小虎. 某含铁浸金渣闪速焙烧磁选试验研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(3): 26-28.

[24] 宋仁峰, 李维兵, 刘华艳. 我国铁矿石选矿技术发展特点及展望[J]. 金属矿山, 2009, (1): 1-8.

[25] 刘晓明, 陈强, 汪建. 低品位铁矿资源利用技术的发展与实

- 践[J]. 矿业工程, 2009, 7(1): 25-28.
- [26] 文金磊, 李晓波, 陈园园. 我国难选褐铁矿选矿技术的新进展[J]. 矿山机械, 2012, 40(11): 7-13.
- [27] Zhang S H, Xue X X, Liu X, Duan P, Yang H, Jiang T, Wang D, Liu R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources[J]. Journal of Mining Science, 2006, 42(4): 403-408.
- [28] Li C, Sun H H, Bai J, Li L T. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings; Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174: 71-77.
- [29] 曹志良, 张泾生, 王运正. 中国锰矿磁选新进展[J]. 中国锰业, 2005, 23(2): 1-4.
- [30] 张泾生, 周光华. 我国锰矿资源及选矿进展评述[J]. 中国锰业, 2006, 24(1): 1-5.
- [31] 严旺生. 中国锰矿资源与富锰渣产业的发展[J]. 中国锰业, 2008, 26(1): 7-11.
- [32] 吴文伟. 采用选冶联合工艺富集氧化型银锰矿中的银[J]. 有色金属(选矿部分), 2003, (5): 22-24.
- [33] 孙敬峰. 从某银锰矿中回收银[J]. 湿法冶金, 2002, 21(1): 25-27.
- [34] 李赋屏, 朱国才, 田君. 从低品位碳酸锰矿石中富集回收锰的绿色化学工艺研究[J]. 矿产与地质, 2005, 19(1): 93-96.
- [35] 李浩然, 冯雅丽. 微生物催化还原浸出氧化锰矿物中锰的研究[J]. 有色金属, 2001, 53(3): 5-8.
- [36] 李志忠. 铬矿预还原生产铬铁新工艺[J]. 铁合金, 2011, (6): 7-10, 18.
- [37] 李陈君, 雷国元. 从铬渣中分离、回收铬的研究进展[J]. 矿产资源综合利用, 2012, (5): 3-6, 10.
- [38] 王瑞奇. 金川硫化铜镍矿床伴生铬的回收问题[A]. 汪贻水, 彭航. 中国实用矿山地质学(上册)[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 251-255.
- [39] 郑诗礼, 杜浩, 王少娜, 张懿, 陈东辉, 白瑞国. 亚熔盐法钒渣高效清洁提钒技术[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 15-19.
- [40] 梁江龙, 方正, 李浩然, 冯雅丽. 酸浸法从黏土钒矿中提钒[J]. 有色金属, 2008, 60(1): 80-82.
- [41] 郭宇峰. 钒钛磁铁矿固态还原强化及综合利用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [42] Yuan Z F, Wang X Q, Xu C, Li W B, Kwauk Mooson. A new process for comprehensive utilization of complex titania ore[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(9): 975-978.
- [43] 罗仙平, 路永森, 张建超, 钱有军, 沈远海, 梁长利. 黑钨矿选矿工艺进展[J]. 金属矿山, 2011, (12): 87-90.
- [44] 林海清. 中国钨矿选矿的百年变迁[J]. 中国钨业, 2007, 22(6): 11-15.
- [45] 王星, 黄光洪, 陈典助. 钨矿选矿工艺研究进展评述[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(4): 21-23, 71.
- [46] 艾光华, 刘炯天. 钨矿选矿药剂和工艺的研究现状及展望[J]. 矿山机械, 2011, 39(4): 1-7.
- [47] 刘玫华, 刘四清. 锡选矿及提高其回收率的工艺方法探讨[J]. 云南冶金, 2009, 38(5): 19-21.
- [48] 张文钰. 钼矿选矿技术进展[J]. 中国钼业, 2008, 32(1): 1-7.
- [49] Chen Y, Feng Q M, Shao Y H, Zhang G F, Ou L M, Lu Y P. Investigations on the extraction of molybdenum and vanadium from ammonia leaching residue of spent catalyst[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 79(1): 42-48.
- [50] 范子恒, 周晓彤, 汤玉和. 钼矿选矿工艺和药剂浅析[J]. 材料研究与应用, 2013, 7(1): 1-5.
- [51] 赵福刚. 铜矿的选矿技术进展[J]. 铜业工程, 2006, (4): 13-18.
- [52] 邱廷省, 徐其红, 匡敬忠, 彭时忠, 赵学付, 李婷. 某复杂硫化铜矿硫分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2011, (2): 45-48.
- [53] 曹惠昌. 我国铜矿石选矿技术研究新进展[J]. 有色矿冶, 2011, 27(6): 26-28.
- [54] 郑伦, 张笃. 电位调控浮选在凡口铅锌矿的应用[J]. 中国矿山工程, 2005, (2): 1-5.
- [55] 李兵容. 铅锌矿矿石的选矿工艺研究[J]. 矿业快报, 2008, (1): 41-45.
- [56] 荆正强, 陈典助, 黄光洪, 马士强. 我国铅锌矿选矿设备与工艺现状[J]. 工程设计与研究, 2010, (1): 1-6.
- [57] 刘凤霞, 陈建华, 魏宗武. 氧化铅矿浮选研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2008, (1): 48-55.
- [58] 刘水红, 方启学. 铝土矿选矿脱硅技术研究现状述评[J]. 矿冶, 2004, 13(4): 24-29.
- [59] 张安朝, 徐靖, 李建政. 铝土矿资源选矿技术分析[J]. 河南冶金, 2009, 17(8): 20-21, 42.
- [60] Liu W C, Yang J K, Xiao B. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 93(3-4): 220-231.
- [61] 周长春, 刘炯天, 李振, 任新春, 闫波. 中低品位铝土矿浮选柱短流程分选研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 116-120.
- [62] 钟娟娟, 孙德四, 陈晔, 曹飞. 基于矿物晶体结构的铝土矿细菌浸矿机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 638-645.
- [63] 徐晓军, 白荣林, 张杰. 黄金及二次资源分选与提取技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [64] 印万忠. 我国黄金选矿技术的最新进展[J]. 有色矿冶, 2006, 22(S1): 170-174.
- [65] 王淑玲. 铂族金属资源的现状及对策研究[J]. 中国地质, 2001, 28(8): 23-27.
- [66] 黄昆. 加压氰化法提取铂族金属新工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [67] 杨洪飏. 失效载体催化剂回收铂族金属工艺和技术[J]. 上海有色金属, 2005, 26(2): 86-92.
- [68] 刘向磊, 钟辉, 唐中杰. 盐湖卤水提锂工艺技术现状及存在的问题[J]. 无机盐工业, 2009, 41(6): 4-6, 16.
- [69] 符剑刚, 蒋进光, 李爱民, 王晖. 从含铍矿石中提取铍的研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2009, 37(1): 40-44.
- [70] 刘勇, 何晓娟, 梁冬云, 管则皋, 徐晓萍, 张先华, 刘珍珠. 复杂稀有全属矿的选冶结合处理研究[J]. 金属矿山, 2010,

- (suppl.): 441-444.
- [71] 车丽萍, 余永富. 我国稀土矿选矿生产现状及选矿技术发展[J]. 稀土, 2006, 27(1): 95-101.
- [72] 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [73] 张乾, 朱笑青, 高振敏, 潘家永. 中国分散元素富集与成矿研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(4): 342-349.
- [74] 要二仓, 郑秀华, 张富兰, 杨爱军. 快速钻进冲洗液在地浸砂岩型铀矿的应用试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, (suppl.): 251-254.
- [75] 吴沅陶, 孟晋, 陈梅安, 樊保团, 居明, 张建国. 铀矿堆浸工艺中助渗剂应用的研究[J]. 铀矿冶, 2007, 26(2): 72-78.
- [76] 罗仙平, 陈江安, 熊淑华. 近年化学选矿技术进展[J]. 四川有色金属, 2006, (3): 12-19.
- [77] 卢冀伟, 王乃玲, 印万忠, 梁冠杰. 我国萤石矿选矿进展与展望[A]. 王运敏. 中国采选技术十年回顾与展望[C]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 38-243.
- [78] 张成强, 郝小非, 何滕飞. 钾长石选矿技术研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012, (5): 48-51.
- [79] 李成秀, 文书明. 我国磷矿选矿现状及其进展[J]. 矿产综合利用, 2010, (2): 22-25.
- [80] 谭明, 魏明安. 磷矿选矿技术进展[J]. 矿冶, 2010, 19(4): 1-6.
- [81] 赵树彦. 中国选煤的发展和三产品重介质旋流器选煤技术[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(3): 12-14.
- [82] 杨林青, 胡方坤. 我国选煤技术的现状及发展[J]. 煤炭技术, 2010, 29(5): 109-111.
- [83] 张友军. 国内外选煤技术与装备的现状与发展趋势[J]. 选煤技术, 2011, (1): 70-72.
- [84] 中国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告(2012)[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(4): 6-12.
- [85] 崔振民, 吴伟宏, 姜琳, 孙志伟. 浅析我国矿产资源综合利用[J]. 中国矿业, 2013, 22(2): 40-43.
- [86] 李新冬, 黄万抚. 矿产资源开发中的环境影响与防治措施[J]. 中国钨业, 2003, 18(3): 30-33.
- [87] 王吉中, 李胜荣, 刘宝林, 佟景贵. 国内矿物治理重金属废水研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(2): 159-164.
- [88] Das B, Prakash S, Reddy P S R, Misra V N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries[J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, (50): 40-57.
- [89] 吴振烈. 《清洁生产促进法》实施的重要意义[J]. 油气田环境保护, 2003, 13(2): 3-4.
- [90] Kjaerheim G. Cleaner production and sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, (13): 329-339.
- [91] Liu X, Yu Z F, Wu L X, Ye J, Chen G F, Fan M H. Policy study on development and utilization of clean coal technology in China[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(4): 475-484.
- [92] 曾东. 清洁生产机制在煤炭资源开发利用中的发展[A]. 全国环境资源法学研讨会论文集(二)[C]. 武汉: 武汉大学环境法研究, 2006: 625-628.
- [93] Chen Q R, Wang H F. Clean processing and utilization of coal energy[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(3): 507-511.
- [94] Liu H W, Ni W D, Li Z, Ma L W. Strategic thinking on IGCC development in China[J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 1-11.
- [95] Zhang N, Lior N, Liu M, Han W. COOLCEP (cool clean efficient power): A novel CO₂-capturing oxy-fuel power system with LNG (liquefied natural gas) coldness energy utilization[J]. Energy, 2010, 35(2): 1200-1210.
- [96] 刘建芬. 矿产资源合理利用规制综述[J]. 中国国土资源经济, 2011, (7): 40-42.
- [97] 马金平. 矿产资源综合回收与利用[J]. 中国矿业, 2010, 19(9): 57-59, 70.