

矿业综述

文章编号: 1004-4051(2024)06-0014-12

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240754

我国矿产资源综合利用现状评估与发展路径

鞠建华^{1,2}, 韩见², 冯聪³

1. 自然资源部, 北京 100812;
2. 中国矿业权评估师协会, 北京 100083;
3. 自然资源部咨询研究中心, 北京 100035)

摘要: 我国各类矿产资源储量规模和结构不均衡, 大型单一富矿不足, 共伴生、低品位矿多, 这种资源禀赋特点决定了必须走综合利用的发展路线和模式。经过多年努力, 我国已形成全球最完整的矿产资源勘查、采选、冶炼、加工和应用产业体系, 综合开发利用水平显著提升, 油气采收率高位平稳, 煤炭平均开采回采率达到70%, 铁矿开采回采率和选矿回收率保持在80%左右, 有色金属矿种采选指标稳中有升, 尾矿废石综合利用步伐加快, 缓解了生态环境压力。我国矿产资源供应能力基本保持稳定, 为经济社会发展和平稳运行发挥了重要保障作用。近年来, 矿产资源供需矛盾依然十分突出, 部分矿产增储上产乏力或有下降趋势, 产业链上游压力增大, 大力提升矿产资源综合利用水平是保障我国资源安全供给的必然选择, 也是推进矿业领域生态文明建设和高质量发展的必由之路, 更是培育发展矿业新质生产力的重要载体和抓手。本文较为客观地评价了我国矿产资源综合利用基本现状, 分析了存在的问题与挑战, 认为我国矿产资源综合利用潜力大、前景好, 并提出了全面构建矿产资源综合利用五大支撑体系的发展路径。

关键词: 矿产资源; 综合利用; 共伴生矿; 废石; 尾矿; 支撑体系

中图分类号: TD98; F407.1 **文献标识码:** A

Evaluation and development path of comprehensive utilization of mineral resources in China

JU Jianhua^{1,2}, HAN Jian², FENG Cong³

1. Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China;
2. Chinese Association of Mineral Resources Appraisers, Beijing 100083, China;
3. Consulting & Research Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The scale and structure of the reserves of various mineral resources in China are uneven, the large-scale single rich ore is insufficient, and there are many coexisting (or associated) and low-grade ores. This resource endowment determines the development route and mode of comprehensive utilization. After years of efforts, China has formed the world's most complete industrial system for mineral resource exploration, mining and dressing, smelting, processing and application, and the level of

收稿日期: 2024-05-06 责任编辑: 赵奎涛

作者简介: 鞠建华(1962—), 男, 汉族, 博士, 研究员, 自然资源部矿产资源保护监督司原司长, 现任中国矿业权评估师协会负责人, 自然资源部咨询研究中心咨询委员, 长期从事矿产资源管理与研究工作。

韩见(1994—), 男, 汉族, 硕士, 助理研究员, 从事资源产业经济研究工作。

冯聪(1979—), 男, 汉族, 博士, 研究员, 长期从事矿产资源管理政策研究。

引用格式: 鞠建华, 韩见, 冯聪. 我国矿产资源综合利用现状评估与发展路径[J]. 中国矿业, 2024, 33(6): 14-25.

JU Jianhua, HAN Jian, FENG Cong. Evaluation and development path of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(6): 14-25.

comprehensive development and utilization has been significantly improved. The oil and gas recovery rate is stable at a high level, the average coal recovery rate reaches 70%, the iron ore recovery rate and dressing recovery rate remain at about 80%, the mining and dressing indicators of nonferrous metal minerals are steadily rising, and the pace of comprehensive utilization of tailings and waste rocks has been accelerated, easing the pressure on the ecological environment. The supply capacity of mineral resources in our country has basically remained stable, playing an important role in ensuring economic and social development and peaceful operation. However, in recent years, the contradiction between supply and demand of mineral resources has remained prominent, with some minerals experiencing weak or declining reserves and production. The upstream pressure on the industrial chain has increased. Vigorously improving the efficiency and comprehensive utilization level of mineral resource development is an inevitable choice to ensure the safe supply of resources in China, and it is also a necessary path to promote the construction of ecological civilization and high-quality development in the mining industry. It is also an important carrier and lever for cultivating and developing new productive forces in the mining industry. This paper objectively evaluates the basic situation of the comprehensive utilization of mineral resources in China, analyzes the existing problems and prospects, and puts forward the development path of comprehensively constructing the five supporting systems of the comprehensive utilization of mineral resources.

Keywords: mineral resource; comprehensive utilization; coexisting (or associated) ore; waste rock; tailings; supporting system

0 引言

我国是全球最大的矿产资源生产国、消费国、进口国,矿产资源总产量占全球总量的近30%,拥有全球最大矿产资源产业规模,总产量和总产值均为世界第一。全国矿石年开采总量(原矿量)超过300亿t,煤、钨、锡、锑、钼、金、稀土、磷、钒、钛、铟、锗、镓、石墨等的产量多年保持全球第一,已形成全球最完整的矿产资源勘查、采选、冶炼、加工和应用产业体系,综合开发利用水平显著提升,油气采收率高位平稳,煤炭平均开采回采率达到70%,铁矿开采回采率和选矿回收率保持在80%左右,有色金属矿种采选指标稳中有升,尾矿废石综合利用步伐加快,缓解了生态环境压力。虽然近年来传统矿产消费增幅放缓,但消费总量仍处于高位,涉及战略性新兴产业的矿产消费增长迅猛^[1-2],部分重要矿产资源对外依存度高,特别是我国冶炼加工产业在全球矿产资源全产业链中具有突出优势,大部分规模第一,总产值大约占全球50%,多种材料产量位居首位,导致上游产业压力不断增长。虽然主要矿产的资源储量在开发强度持续加大的情况下总体保持增长,但不少矿产的储量增幅有所下降,优质储量不足,部分矿产增储上产乏力或有下降趋势,资源供需矛盾依然十分突出,与建设矿业强国和保障国家资源安全供给要求差距还很大^[3-4]。

我国矿产资源禀赋特点决定了虽然矿产种类丰富,但各类矿产资源储量规模和结构不均衡,大型单一富矿不足,共伴生、低品位矿多,多数矿产资源呈

“贫、细、杂”的特性,开发利用难度大,技术工艺装备要求高,导致大量难利用矿产资源处于“呆滞”状态,无法动用^[5-6],这也决定了必须走综合开发利用的发展路线和模式。我国处于工业化中后期发展阶段,矿产资源需求种类多、用量大,矿产资源在国民经济中的基础性和支撑性地位长期难以改变,而全球矿产资源供应格局正在发生变化,海外矿产合作开发的难度和不确定性逐步增加,国内增储上产和大幅提高综合利用程度关乎国家资源供应和经济安全。因此,大力提升矿产资源开发效率和综合利用水平是保障我国资源供给安全的必然选择,也是推进矿业领域生态文明建设和高质量发展的必由之路,更是培育发展矿业新质生产力的重要载体和抓手。

矿产资源综合利用是在开发利用过程中最大限度地提高资源利用效率和效益^[7-9]。一般认为,狭义的矿产资源综合利用是指对矿床中共伴生矿产进行综合勘查、综合评价、综合开采和综合利用;广义的矿产资源综合利用则是指对矿产资源全面、充分和合理利用的开发利用方式,包括通过科学的采选、冶金技术工艺,经济合理、最大限度地提取回收矿产资源中的有用组分(主要组分及共伴生有用组分),并充分利用和有效处置矿产开发生产过程中产生的各种尾矿、废石和废水等,变废为宝、化害为利,全面提高开发利用的资源效益、经济效益、环境效益和社会效益。

1 我国矿产资源综合利用现状评估

我国积极引导全社会树立节约集约与循环利用

的资源观,矿山企业按照节约利用资源和保护环境的基本要求,应用先进生产技术、工艺和设备,加强全过程节约管理,加大对共伴生矿、低品位矿和固废等的综合利用力度,共伴生矿产、尾矿废石等的综合利用数量、规模和效益快速增长,综合利用产值达数千亿级,使矿山劳动生产率大幅提升。

近年来,我国矿产资源开发利用规模结构发生明显变化,矿山生产集中度不断提升。《全国非油气矿产资源开发利用统计年报》数据显示,全国非油气矿山数量从2012年的约10万个逐年下降至2022年的3.8万个,下降幅度达62%,落后矿山或小矿被淘汰,矿山规模和产能得到很大提升,采选技术明显提高;2022年大中型矿山数量已占矿山总量的53%,比2012年提高了44个百分点,矿业工业产值不断增长(图1)。

我国矿产资源综合利用水平稳步提升。石油和天然气采收率高位平稳,石油采收率基本稳定在25%,天然气采收率超过50%;煤炭平均回采率为70%,入选率超过70%;铁矿地下开采回采率保持在85%以上、露天开采回采率达95%以上,全国铁矿平均选矿回收率77%左右;主要有色金属矿种采选指

标稳中有升(表1),铅、锌、锡、钨等矿产地下开采回采率达到85%以上、露天开采回采率超过94%,主要有色金属(除锡矿外)的选矿回收率在85%左右;金矿采选回收率平均稳定在90%以上,选矿回收率超过87%,尾矿利用率约为40%;非金属采选指标基本保持稳定和提升,磷矿开采回采率和选矿回收率均超过80%,钾盐开采回采率总体达到82%以上,选矿回收率保持在55%左右。

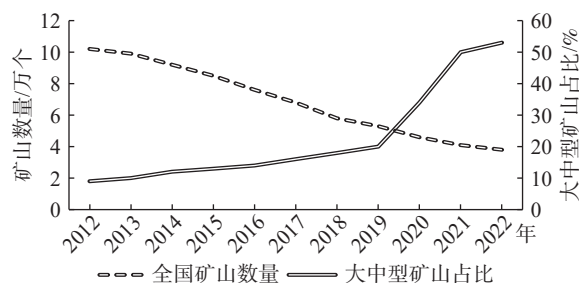


图1 2012—2022年我国非油气矿山数量变化及大中型矿山占比情况

Fig. 1 Changes in the number of non oil and gas mines and the proportion of large and medium-sized mines in China from 2012 to 2022

表1 2011年、2015年和2021年我国主要有色金属矿采选情况

Table 1 Mining and processing situation of major nonferrous metal ore in China in 2011, 2015 and 2021

矿类	采出品位	采出品位			开采回采率			选矿回收率			尾矿品位		
		2011年	2015年	2021年	2011年	2015年	2021年	2011年	2015年	2021年	2011年	2015年	2021年
		单位: %											
铜矿	地下开采	0.76	0.75	0.64	85.75	87.66	86.44	84.75	85.19	86.65	0.08	0.07	0.07
	露天开采	0.52	0.44	0.52	98.09	98.45	98.24	84.75	85.19	86.65	0.08	0.07	0.07
铅矿	地下开采	3.24	2.83	2.87	91.17	87.67	93.72	85.42	86.02	86.35	0.20	0.25	0.14
	露天开采	—	—	—	95.00	94.48	94.37	85.42	86.02	86.35	0.20	0.25	0.14
锌矿	地下开采	5.04	5.55	5.46	91.17	87.67	92.72	88.72	89.61	90.92	0.48	0.50	0.36
	露天开采	6.07	4.64	5.46	95.00	94.48	94.37	88.72	89.61	90.92	0.48	0.50	0.36
锡矿	地下开采	0.57	0.57	0.68	90.90	90.29	94.63	66.58	66.59	68.67	0.16	0.16	0.13
锑矿	地下开采	0.97	2.45	2.45	91.56	92.03	92.60	85.62	86.38	86.27	0.12	0.12	0.14
钨矿	地下开采	0.29	0.31	0.31	89.91	90.25	90.83	74.02	78.19	79.54	0.03	0.05	0.06

我国矿产资源综合利用已经成为矿山企业发展的重要增长极,在政策利好和约束机制的叠加驱动下,综合利用迎来了政产学研用深度融合、共同推动的良好局面。近年来,各矿山企业通过技术创新,勘查评价、开采和选冶加工技术水平不断提高,盘活了大量资源,矿产资源“三率”水平不断提高,大幅度提升了生产供应能力;每年矿山尾矿、废石等固废利用总量超过20亿t,矿井水综合利用量超过70亿m³,排土场、尾矿库生态治理和土地复垦进程不断加快,不仅极大地降低了“三废”排放强度,也减轻了矿山企业生态环保和安全生产压力,成为矿业行业降本

增效和新的利润增长点,产生巨大的资源效益、经济效益、环境效益和社会效益。目前,很多有色金属矿山共伴生矿产综合利用产值可以占到净产值的30%以上,钾盐、萤石等部分非金属矿山共伴生矿产综合利用产值增长显著。

1.1 我国共伴生矿产综合利用状况

我国各类矿床中含单一组分的矿床相对较少,共伴生复杂矿床多,矿石选冶难度相对大,优劣并存,这是与其他矿产资源大国在资源禀赋特征方面的主要区别之一。

目前,我国重要共伴生矿产综合利用率总体上

达到30%~50%,共伴生矿产综合回收的有价元素近40种,很大程度上提高了矿产资源储量和生产供应能力。例如,攀钢集团通过钒钛磁铁矿中钒钛伴生矿产综合利用,钒、钛资源储量分别达到1 862万t和8.7亿t,分别占世界的11.6%和35.2%,产量分别为14万t和470余万t,钒产能占全球的67%,使得我国钒钛矿产的资源储量和产能产量均从全球劣势跃居全球之首。再如,通过综合回收的黄金占总产量的25%~33%,银、铂族金属和稀有元素近100%,黑色金属为30%~40%,化工、石化、建材、煤炭、核工业等行业约30%,3/4的硫酸从有色金属生产过程中综合回收。非金属矿共伴生资源价值低、回收成本高,回收总量和产值总体不高,但随着技术进步,部分矿种综合利用水平得到很大提升,如盐湖卤水钾矿伴生锂、钠、镁等回收发展较快。

我国重要伴生矿产综合利用产值不断增长,成为矿业经济的重要组成。例如,2022年我国铜矿工业总产值893.4亿元,综合利用产值191.69亿元,综合利用产值占矿业总产值比例超过21%,同比增长7个百分点,过去十年的增幅超过了70%(图2)。

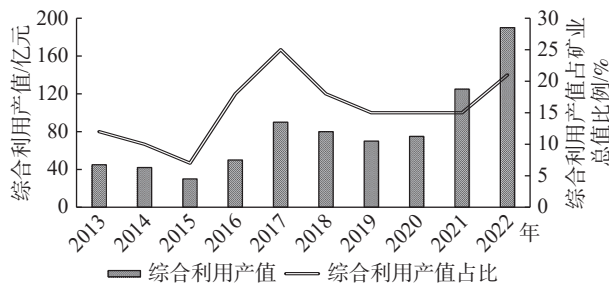


图2 2013—2022年我国铜矿工业综合利用产值及占比

Fig. 2 Output value and proportion of comprehensive utilization of copper mining industry in China from 2013 to 2022

1.2 我国矿山尾矿资源综合利用状况

我国矿山开发强度大,尾矿因数量多、难利用、危害大等特点,进行综合利用是重中之重。多年来,我国尾矿年排放量通常在15亿t左右,年利用率持续提升。2023年,全国尾矿产出总量近15亿t,综合利用总量约为5.0亿t,利用率超过32%,为过去十年的最高水平。我国矿山尾矿多来源于黑色金属矿采选业和有色金属矿采选业,其中,铁尾矿库数量最多,占比超过一半,其次是铅锌等多金属矿山尾矿库。总体上看,尾矿堆存量增幅有所下降,加之尾矿库复垦和生态治理修复进程加快,减轻了尾矿污染和危害。

尾矿数量大、粒度细,有的含有污染成分,生产、储存、运输和综合利用环节都有可能出现污染,人们对尾矿堆存问题严重性的认识逐步加深。随着矿产

相关技术的进步和矿山企业的不断发展,我国已经建立了一套比较完善的尾矿监督管理体系,加之国家不断出台政策,从资金、税费和技术等方面给矿山企业提供支持,企业不断加大资金投入和技术创新力度,在尾矿综合利用和管理等方面进行实践和探索。经过多年的发展,我国尾矿综合利用量和无害化处理能力不断增长,成效显著。但是,随着矿山开采强度加大和开采品位不断下降,排放数量仍在高位,每年仍有超过60%的尾矿未得到利用,加之尾矿历史堆存数量巨大,受技术经济等条件制约,尾矿规模化开发利用工作依然任重道远。

1.3 我国矿山废石综合利用状况

随着矿山开采深度逐渐加大,掘进和剥离的围岩数量不断增加。例如,目前金矿矿山开采深度超过千米的不在少数,也有铁矿山的建井深度达到千米,加之露天开采矿山采剥比不断增大,不少露天矿山的采剥比>1:10或更高,矿山废石渣土等排放量和堆存量不断加大。

近年来,随着国家政策约束和技术创新进步,虽然废石等排放量逐年增加,但对废石渣土等的利用程度也不断提高,特别是对排土场生态治理和土地复垦力度加大,废石渣土堆存增长速度总体上呈下降趋势,资源综合利用进程在不断加快。例如,2021年,我国冶金渣产生量6.81亿t,综合利用量5.020亿t;煤矸石产生量7.43亿t,综合利用量5.430亿t;粉煤灰产生量7.04亿t,综合利用量5.580亿t。总体上看,综合利用率有较大幅度提高(表2)。

表2 2021年我国主要大宗工业固废综合利用情况

Table 2 Comprehensive utilization of solid waste from major bulk industries in China in 2021

种类	产生量/亿t	综合利用量/亿t	综合利用率/%
冶金渣	6.81	5.020	73.72
煤矸石	7.43	5.430	73.08
粉煤灰	7.04	5.580	79.26
赤泥	1.12	0.075	6.69
工业副产石膏	2.45	1.420	57.96
石材固废	0.29	0.210	72.41
煤气化渣	0.60	0.230	38.33
电石渣	0.34	0.310	91.17

固废中煤矸石占比较大,危害也较大,2006年以来随着煤炭产能的快速扩张,我国原煤品质下降,原煤灰分上升,采煤机械化程度日益提高,原煤洗选规模逐步扩大。在上述多种因素的叠加影响下,我国煤矸石产排量快速增长,由2006年的3.78亿t增长到2022年的8.08亿t,增长了113.75%。

近年来,煤矸石综合利用进程加快,成效也显著。随着煤矸石制砖、充填等规模化消纳项目的涌现及技术的推广,煤矸石综合利用率逐年提高。在资源综合利用相关政策的推动下,煤矸石综合利用量保持稳定增长,各级煤炭企业和资源综合利用企业,依靠科技进步,拓宽利用渠道,克服煤炭经济下行压力,积极推进煤矸石综合利用率,2022年综合利用量达到5.96亿t。其中,发电、供热领域利用量占比7%,其他领域占比93%。煤矸石综合利用率从2014年的69.3%提升至2023年的74.0%左右。

1.4 存在问题与挑战

当前,我国矿产资源节约与综合利用工作取得了显著成效^[9],但与国家资源安全保障战略要求仍有差距。总的来说,主要有以下几个方面的问题。

1.4.1 政策操作执行难

矿产资源综合利用政策的落地实施,是一个涉及多方面因素的复杂过程,尽管政策制定的初衷是促进资源的合理开发和高效利用,但相关概念界定不清晰、法规政策缺失或不完善,特别是在实际操作中,面临着政策本身的明确性和具体性欠缺、执行不严格、利益主体存在矛盾、监督机制不完善、技术水平不足以支撑政策落地等困难。以激励约束政策为例,现行优惠政策覆盖范围、优惠幅度、优惠对象界限不明确,监督管理机制不健全,评价指标、评价程序和政策实施主体不明确,从而导致操作性不强;另外,由于矿产资源综合利用认定的技术要求高,管理部门通常需要相应的技术支撑单位予以认证,作为落实政策的重要依据,但真正能够开展综合利用认证的专业技术部门单位不足或缺位,影响政策落实。

1.4.2 调查评价制度不完善

目前,我国矿产资源综合利用的调查研究主要依靠督察员、年度检查、试点等制度来实现对矿山开发利用水平的了解,为矿产资源基础管理、技术推广等政策的制定提供了支撑作用。但由于历史原因,我国矿山数量众多,开发规模、开发水平、开发模式、管理运营和技术装备等在矿山和地区之间存在严重的不平衡不充分现象,而且矿产资源开发利用的专业性强、技术面广,给矿产资源的开发利用水平调查评估带来难度,造成部分信息失实、失真,现有的调查评价成果不足以支撑综合利用工作,监管部门对矿山的监管和获得真实客观的数据信息难度非常大,无法为精准制定矿产资源综合利用激励约束政策提供数据支撑。

1.4.3 市场波动冲击影响大

近年来,受全球矿产资源供需形势影响,国内外

市场矿产品价格大幅波动,找矿难度和投资成本越来越大,加之生态环保约束、矿业权清理整顿和产业结构调整力度加大等原因,矿山关停数量多,固废和矿区生态留存问题多,矿业经济发展不均衡,特别是资源综合利用成本高,与矿山企业盈利能力直接挂钩,未形成各类产品综合效益,量大质低,远离消费市场,影响了企业积极性,动力不足。

1.4.4 技术研发与推广应用面临挑战

矿产资源综合利用技术挑战多样且复杂,从技术装备的角度来看,与资源高效利用要求仍存在一定差距。对于复杂的多元素共生矿、贫矿和难处理矿,其选矿工艺复杂、流程繁琐、成本高昂,且综合利用率往往不尽如人意,需投入更多的科研力量进行攻关,但技术研发周期长、投入大,导致矿山企业研发的积极性和主动性不高。对于矿床中共伴生组分的综合勘查和综合评价技术要求相对较高,难以充分利用,降低了资源的整体利用效率和效益。同时,对于尾矿、废石处理和利用的投入和动力仍然不足,技术发展相对滞后,导致产品档次低,既影响了矿产资源利用效率,也加大了生态环境和安全稳定的压力。综合利用装备和人才队伍建设存在明显短板,创新能力不适应高质量发展要求。

1.4.5 标准规范针对性和约束性不强

目前,矿产资源综合利用标准主要集中在关于资源综合利用术语、“三率”指标要求与计算等方面,针对综合勘查、综合评价、综合开发和综合利用全过程的系统化技术标准很少,没有对矿产资源“综合利用”的范围、概念和内涵等方面作出明确界定,缺乏针对资源综合利用的评价指标和评价核算标准,相关标准规范也存在不系统、修订不及时等问题,导致在普查、详查、勘探设计与报告编制环节与开采利用环节难以统筹衔接,有时会出现综合勘查、综合评价和综合开发、综合利用脱节。另外,由于现行《中华人民共和国矿产资源法》及其实施细则等法律法规中未对共伴生、低品位等矿产的范围作出明确界定,标准编制依据不足,导致综合勘查、综合评价过程中对这些矿产的遗漏或者勘查评价结果与实际不符。

1.4.6 不同地区不同矿山综合利用水平差异大

由于我国资源禀赋条件、地区发展水平、技术经济条件、历史欠账等因素,造成目前我国矿产资源综合利用水平地区间、矿种间和矿山间差异较大。另外,由于资金投入和技术能力等原因,矿山先进采选技术应用的的优势主要在大中型矿山企业,中小企业能力有限,技术升级动力不足,采选水平不高,如

铂金银、上杭紫金山对铜金银等共生矿产的综合利用,不仅对推进全国各类矿山的资源综合利用起到了很好的示范作用,也缓解了部分矿种严重依赖海外进口的问题,有益元素的综合回收利用还为企业带来巨大的经济效益。除此之外,共生矿产的综合利用,也正在支撑战略性新兴产业的发展,如磷

矿的伴生氟资源综合利用技术、伴生碘资源回收新技术等,不但提高了磷矿的开发效益,同时为新兴的氟化工产业提供了新的资源保障;又如吸附法从老卤中提锂技术,实现了察尔汗盐湖锂资源的综合开发利用,为我国锂资源开发及碳酸锂行业下游产品的发展提供原材料条件。

表 3 我国部分矿床类型及其主要共生矿物

Table 3 Some types of mineral deposits and their main coexisting (or associated) minerals in China

矿床	主要组分	共生矿物
金矿	金	黄铁矿、毒砂、黄铜矿、砷黝铜矿、辉银矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、辉铋矿、辉铊矿、白钨矿、黑钨矿、锡石等
铁矿	铁	钛磁铁矿、铬铁矿、钛铁矿、金红石、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、钴黄铁矿、黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿等
铜矿	铜	磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、镜铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、辉钴矿、锡石、黑钨矿、白钨矿、辉铋矿、辉铊矿等
铅锌矿	铅、锌	黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、锡石、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、辉铊矿、菱铁矿、辉银矿、自然金及金矿物、萤石、重晶石等
铝土矿	铝	锆土矿(含镓)、蓝刚玉、红锆石(宝石)等
铜镍硫化物矿床	镍、铜	磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿、辉(砷)钴矿、铂族元素矿物、碲银矿、自然金、银金矿、硒硫铋矿等
煤矿	煤	天然焦、高灰煤(高炭泥岩)、油页岩、铁、铝、膨润土、高岭土、耐火黏土、硅藻土等
石墨矿	石墨	云母、石英、透闪石、透辉石、石榴子石、方解石、金红石等

根据调查统计,目前,全国已查明矿区的共生矿产中尚有 50%~70% 未能实现综合利用,综合利用率尚不足一半,其综合利用潜力大、提升空间大、潜在价值高,是国家资源安全保障的重要组成,亟需深度挖掘开发利用,这是未来矿产资源开发利用工作领域的重要方向之一。

2.2 尾矿资源综合利用潜力与前景

我国矿产资源开发规模全球领先,各类固体矿产产量位居世界前列。同时,我国尾矿产出量也占到全世界的一半,尾矿库占地现象突出。但由于尾矿库资源的分散性、复杂性、低品位等特点,以及技术、经济、环保等方面的制约,综合利用难度大、成本相对较高。目前,我国矿山尾矿堆存量有 200 亿 t 左右,有尾矿库一万多座,占地近 700 km²,其中,华北地区分布近三分之一,长江流域分布近三分之一;在用的尾矿库占三分之一,环境风险相对比较高的尾矿库占三分之一。

随着采选矿技术进步,很多矿产原矿和入选品位不断降低,尾矿产率增高。相关数据显示,目前我国尾矿综合利用率为 30% 左右,但利用量仍赶不上新增量,堆存量仍在增加。其中,铁尾矿占比超过一半,有色金属矿山平均排放强度为 11 t/t 精矿。但历史遗留累计堆存量巨大,目前尾矿堆存量超过 200 亿 t,尾矿综合利用和尾矿库复垦的空间巨大。

尾矿中含有多种有色金属、稀土、贵金属、稀散

元素等,以及石英、长石、方解石、白云石等非金属矿物尾矿,按不同选矿工艺和矿石类型,划分成不同尾矿类型(表 4),具有突出的特性和不同的利用处置路径,当前主要有综合利用和生态治理两种处置方式。一是尾矿综合利用(表 5),包括:①回收有价值组分,一些老尾矿库中有价值组分品位较高、共生矿物多,回收利用技术路线简单、成本低,如金矿、铁矿随着选冶技术的提升可以继续回收尾矿库中的金、铁等;又如硬岩稀土、钼尾矿中回收共生萤石等。②尾矿资源化利用,如尾矿用于制作建筑材料、土壤改良剂及矿物肥料、采空区充填等,可参与尾矿利用率计算,尾矿利用率是评价尾矿利用程度的技术指标,其高低也反映不同地区或企业循环利用水平。二是生态治理,包括尾矿库贮存、闭库尾矿库复垦保护,覆土后造地复田或绿化植树所对应的尾矿量,通常不计入利用量;另外,可利用植物或其他成分对尾矿中重金属有害成分进行吸收及改良作用,治理效果较为明显,如以类芦、香蒲、芒、油草等多年生草本植物为主体建设人工湿地污水处理系统,其中香蒲最为繁茂有效。

尾矿中回收有价值组分可为矿山企业直接创造经济效益,例如,攀钢集团从尾矿中回收钒钛金属矿物和稀有金属元素;白银公司从浮选尾矿中回收铜、硫、金、银等有色金属矿物;招远多家矿山企业从浮选尾矿中回收长石、石英及绢云母等非金属矿物;苹果铝

表4 尾矿类型划分

Table 4 Classification of tailings types

按选矿工艺	重尾矿、磁尾矿、人工尾矿、化学尾矿、浮选尾矿、电光电尾矿等
按矿石类型	铜尾矿、铅锌尾矿、钨尾矿、金银尾矿、铁尾矿、煤尾矿、钍尾矿、铝土矿尾矿、沥青砂尾矿、磷酸盐碱尾矿、天然碱尾矿等

表5 矿山尾矿资源综合利用方式

Table 5 Comprehensive utilization methods of mining tailings resources

利用方式	基本情况
回收有价值组分	部分老尾矿库中矿石品位可能偏高,在近期的技术经济条件下可能具有再选的经济价值。如早期一些磁铁尾矿,仍含铁20%,经强磁选机回收可获得品位达60%的铁精矿;一些早期金矿尾矿的金品位可达0.5~1.0 g/t,目前回收利用技术成熟,所产生的经济效益很高
用作建筑材料	主要在生产高标号水泥、建筑陶瓷、免烧砖和烧结砖、高档装饰材料、微晶玻璃、花岗岩等方面。例如铁矿尾矿目前在实验室研制出白、黑、红、蓝等4种色调微玻岩
用作土壤改良剂及矿物肥料	尾矿中往往含有Zn、Mn、Cu、Mo、V、B、P等维持植物生长和发育的必需微量元素。如利用磁化铁尾矿作为土壤改良剂,即通过特定设计的磁化机对铁尾矿进行磁化处理,生产出磁化尾矿,施入土壤,可提高土壤的磁性,引起土壤中磁团粒结构变化,尤其是导致土壤中铁磁性物质活化,使土壤的结构性、空隙度、透气性均得到改善
采空区等充填	采空区和矿坑等充填是直接利用尾矿的最有效途径之一,是一种很好的填充材料,具有就地取材、来源丰富和输送方便的特点,并省去扩建、增建尾矿库费用。将尾矿用于矿井充填料,费用仅为碎石的1/4~1/10

等铝土矿企业从赤泥中磁选回收铁矿物。在整体利用方面,矿山尾矿资源中80%以上是非金属矿物,所含成分与建材、无机化工、轻工业等非金属原材料相似,经过适当加工可作为建材、无机化工、轻工业等非金属材料的原材料,且不需要采矿、碎磨、筛分等加工作业便可作为细粒复合矿物原料使用。可用作建筑材料,如河北唐山某选铁尾矿可部分代替普通黏土研制建筑用砖,该烧结砖比普通黏土砖强度和硬度高,且成本低廉。用作矿物化肥或土壤改良剂,如铁尾矿经高梯度磁选机处理后撒入土壤,不仅改善了土壤的磁性,也使土壤中磁团粒的结构发生变化。尾矿回填矿山采空区的经济性较好,不少矿山利用尾矿进行回填,尾矿利用率达到90%以上^[4]。

2.3 废石资源综合利用潜力与前景

我国矿山开采每年产生废石渣土超过40亿t,且历史存量巨大,堆存点近6万处,占地面积超过3 333.33 km²,资源化规模化利用和复垦修复空间巨大。金属矿山开采每年约产生30亿t废石,累计堆存量超过600亿t。非金属矿开采(煤炭开采除外)每年约产生10亿t废石,累计堆存量超过百亿吨。虽然废石利用率有较大的提升,但随着矿产开采深度加大,采剥比不断提高,排放量呈逐年增大趋势,资源化综合利用仍然潜力巨大,复垦和生态治理修复任务更为繁重。如近年来,随着一批大型砂石矿山相继投产,废渣和石粉增长较为迅猛,按年产200亿t砂石骨料、10%左右的出粉率测算,仅石粉的产生量每年就达20亿t。

废石渣土的处置和利用方式与尾矿相似,通常有资源化综合利用和贮存并开展生态修复两种,主要包括采空区充填、生产建筑材料、有用组分的回收等,以及直接复垦恢复土地功能。

废石资源综合利用中煤矸石占据主要地位,2023年我国煤炭产量达到46.6亿t以上,煤矸石产量从2016年的6.14亿t增长至2023年的8.25亿t(综合利用量约6.07亿t)。由于各地排放量、利用量、引导政策等方面的差异,煤矸石堆存数量在不同地区差异较大,尤其是中西部主要产煤地区,堆存增长数量仍然很大。目前,我国现存矸石山约2 600座,压占土地达到1.5万hm²,堆存量超过80亿t。随着政策支持力度加大及技术的进步,煤矸石的利用途径越来越多,资源化规模化利用空间越来越大,如用于发电、建材原料、生态土、筑路回填等^[4](表6)。

3 我国矿产资源综合利用的发展路径

我国把矿产资源综合利用工作纳入了生态文明建设的总体布局,党的二十大报告中明确提出要实施全面节约战略,推进各类资源节约和综合利用。矿产资源的特殊性决定了推动其综合利用水平提升应该是多维度的,为不断发展壮大综合利用产业,需要加强基础调查评价、强化科技支撑、健全标准规范、不断完善法规政策、强化监督管理工作,全面构建我国矿产资源综合利用的五大支撑体系。

3.1 构建开发利用水平调查评价支撑体系

建立健全矿产资源开发利用水平调查评估制度,为制定法规、政策、标准和管理提供依据和支撑。

表 6 我国煤矸石综合利用基本情况

Table 6 Basic situation of comprehensive utilization of coal gangue in China

用途	基本情况
发电	全国依靠煤矸石发电的电厂装机容量已达到 500 万 kW 以上,目前煤矸石每年用于发电的处理量超过 5 000 万 t。在煤炭产业的基础上,与优势企业合作建设符合标准、技术先进的矸石发电厂已经成为目前解决煤矸石处理问题的可行、快速和高效的方法之一
制作建材	烧制建筑用砖块和水泥,将煤矸石加工成砖块,取得了非常好的成绩,节约了资源还使得大量矸石有了利用价值。由于以往用矸石制砖的工厂规模较小,没有大规模生产,所以单位成本较高,经营风险较高,新的环保政策提高了制砖企业的生产门槛,同时国家出台相关规定禁止黏土制砖,这对建设大型矸石制砖厂有利
制作生态土	煤矸石含有丰富的腐殖酸和多种植物生长所需的微量元素,但这些元素很难直接被植物吸收利用。通过把煤矸石进行分解、活化、钝化等加工处理,使煤矸石中所含的有机质、腐殖酸、氮、磷、钾以及其他有用微量元素得到有效释放,并容易被植物生长吸收;同时通过控制煤矸石分解粒径比例保证土壤的保水性和透气性,从而形成最适宜植物生长环境的高品质土壤,可用于道路边坡、废弃矿山、废弃物矿坑、生态复绿和土地复垦、荒漠化土地和盐碱地改良使用
充回填料	煤矸石硬度大,是煤矿采空区回填常用的填充物质,可在井下将煤矸石直接回填。加工处理后的煤矸石可用于地面上的建筑、路面及沟渠等结构中,降低建设成本

一是制定开发利用水平调查评价指标和方法,建立调查评估制度;科学评估开发利用水平,定期发布调查评估成果;二是强化调查评估成果的应用,作为资源配置、要素保障、财税支持、税费减免、产业扶持的重要依据,构建激励约束机制;三是调查评估的主要内容应包括矿山年度消耗储量、保有资源储量、开发利用“三率”情况,矿山环境恢复治理情况,废石尾矿堆存和利用等数据信息,以及优惠政策措施执行情况等。

2016年,国土资源部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部、财政部、国家能源局联合印发了《矿产资源开发利用水平调查评估制度工作方案》,对调查评估工作提出要求并进行部署。2018年和2023年,自然资源部选择部分矿种和省区开展了调查评估试点和扩大试点工作,为下一步开展全面调查评估和构建激励约束机制积累了经验,奠定了基础。2023年12月5日,自然资源部印发了《在新一轮找矿突破战略行动中做好部分战略性矿产共伴生、低品位资源再评价工作方案》;2024年1月5日,自然资源部印发了《在新一轮找矿突破战略行动中做好部分战略性矿产共伴生、低品位资源再评价技术要求》,聚焦“15种战略性矿产”,计划用一年时间,完成矿山实际生产指标收集、700多个在产矿山和1100多个大中型矿区的共伴生、低品位资源再评价工作,这项工作是矿产资源国情调查工作的深化,评价未来较长时期利用这些资源的可行性,以服务于国家矿产资源安全保障的大局。

另外,我国以往尚未开展过系统性尾矿调查评价,直接影响到政策制定和评价利用。需要抓紧开展全国尾矿资源专项调查评价,及时查明我国尾矿库存量、有用和有害元素赋存状态、含量(品位)、空

间分布、综合利用、复垦造地、生态治理、尾矿库安全及生态环境影响等本底状况,并对利用潜力前景及方向等做出评价,特别是以调查数据为依据,建立尾矿资源环境数据库,为管理部门政策制定、标准设计和社会投资决策提供数据信息支持。

3.2 构建技术创新支撑体系

创新驱动构建技术创新支撑体系,是加快提升综合利用水平的重要路径,也是培育发展矿业新质生产力的重要内容。

一是积极推动关键瓶颈技术取得突破。首先,针对低品位复杂难选冶战略性矿产资源,加强选冶联合技术攻关,开展有价值组分高效分离提取等关键技术攻关与应用示范;其次,针对重要共伴生矿产资源综合利用效率仍然相对较低的问题,突破关键技术瓶颈,开展共伴生资源分离提取和高值化利用等技术攻关与应用示范;另外,加强尾矿库及采矿围岩废石的资源化调查评价及技术开发工作,加强光电抛废、粗粒分选等新技术的研发,提高回收率和废石资源化利用水平。

二是加大先进适用技术研发推广力度。针对先进适用技术推广力度不够的问题,加强技术创新平台建设和成果转化机制建立,完善科技成果综合评价体系,推动先进适用技术在全国范围内的应用示范。通过建立先进技术推广转化平台,保护技术创新行为,政府引导和市场机制相结合,为推广和应用和创新提质提供有利环境;同时,加大对综合利用关键技术研发和推广的政策支持力度,动态更新先进适用技术目录,如自然资源部专门印发《矿产资源节约与综合利用先进适用技术目录(2022年版)》,促进综合利用技术方法和工艺装备水平不断提升。

三是强化综合勘查综合评价。科学圈定矿床范

围,通过科学界定低品位、共伴生矿产范围、指标和数量,盘活释放一批潜在资源或难以利用资源;提高勘查精度和加强资料共享,科学评价,扩大资源储量,为增储上产奠定资源基础;推动探索勘查开采一体化管理,鼓励勘查技术方法创新,提高勘查效率和质量。

四是不断提升矿产资源“三率”水平。通过优化采矿方法,选择最合适的采矿方法,推广使用更先进的采矿设备,引进新技术、新工艺,提高采矿技术水平,从而提高开采回采率。通过优化矿石预处理流程,确保破碎、磨矿和筛分等达到理想粒度分布;选择最合适的浮选、磁选、重选等选矿方法,针对矿石特性,进行药剂优化,引进新技术、新工艺和新设备,建立严格的矿石品质管理制度;加强矿石采样、化验和品质分析,及时调整选矿工艺和操作方式,不断提高选矿水平和效率,提高选矿回收率和共伴生矿产综合利用率。

五是加快提升尾矿和废石的综合利用和复垦治理技术。加强政策引导,鼓励企业加大对尾矿和废石综合利用和尾矿库复垦治理的投入,培育企业为主体、市场为导向的投入体系,促进综合效益提升,推动尾矿和废石利用率的提升。

3.3 构建技术标准规范支撑体系

进一步完善技术标准规范体系,增强系统性、针对性和约束性。解决范围内涵界定不明确、缺少评价核算内容、修订不及时等问题,如一些过去因技术原因无法利用的资源被定性为“矿”,而一些现在能利用的共伴生矿、低品位矿却被忽略不计,没有进入储量表,加之评价标准和程度不一,最终造成资源总量不清;另外,近年来随着选冶技术的进步和关键性技术的突破,我国部分矿山企业资源开发利用效率和工艺技术已有较大提升,一些原来难利用的低品位、共伴生矿床成了可开发利用的矿产。要加快制定勘查、开采、选矿、综合利用、生态治理等各领域各环节的系列化标准规范(国、行、地、企),适应综合利用产业发展要求;特别要建立标准发布和实施效果评价制度,动态调整相关标准,增强标准化服务支撑能力;加强综合利用产品标准制定,从根本上消除消费者对产品安全性的疑虑,提高相关产品市场认可度;做好标准解读和宣贯,发挥标准在规范行为、监督管理和制定激励约束政策等方面的准绳作用。

3.4 构建法规政策支撑体系

一是制定矿产资源综合利用专门性法规。明确综合利用的法律地位和内涵的界定,明晰管理主体和实施主体权利义务,解决共伴生矿产的概念

范围不清晰、有分歧,相关法规制度和政策措施比较分散、不衔接不协调,存在矛盾或相左,相关制度在执行层面存在缺位和差距等问题,并在各类要素保障方面予以支持,为加快综合利用产业发展奠定法律基础和支撑。同时,及时修订《尾矿库安全监督管理规定》等系列特定办法,适应新形势、新要求和新发展。

二是加大激励约束政策措施执行力度。制定优惠政策认定办法,建立第三方专业认证机构,确保激励政策实施落地;建立评价考核机制,评价考核结果向社会公开,发挥诚信体系作用,强化约束政策作用;解决评价指标和程序操作性不强、认定过程及结果欠缺说服力、评价和界定认证的主体不清、缺乏专业机构鉴定、技术支撑不到位、基础调查评价基础不够等问题;加大综合利用产业化政策扶持力度,促进产业结构由单一资源产业向集化工、能源、冶金、建材等多元共生产业发展,发挥综合效益,形成产业发展新模式。

三是解决政策体系不健全、系统衔接不足、理解和认识不统一问题。准确理解把握政策规定和要求,采取有效措施,切实推进激励约束政策落地、勘查开采管理衔接、开发利用有序等。

四是加强税费政策精细化管理,依据资源禀赋差异制定不同征收减免比例,结合调查评价结构分析企业税赋水平,调节税额标准,制定各类税费优惠政策(表7和表8);制定综合利用产品设备政府采购名录,优先选用取得认证的产品设备;法律、规划、政策、措施、标准等多措并举,统筹推进。

3.5 构建协同监督管理的工作支撑体系

2021年,国家发展改革委员会、科技部、工业和信息化部、财政部、自然资源部等十部门联合下发《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》指出,要坚持政府引导与市场主导相结合、坚持规模利用与高值利用相结合、坚持消纳存量与控制增量相结合、坚持突出重点与系统治理相结合的原则,不断完善综合利用管理制度,切实推动综合利用向产业化、高值化发展。要严把矿产资源综合利用的“源头关、过程关、闭坑关”(表9),全面推动矿产资源节约与综合利用工作。

要推动建立协同、高效的监督管理工作机制,构建“企业自律、社会监督、政府监管”全产业链条共同治理的新格局。一是严格监督管理要求,通过规划统筹,明确准入条件,提高效率,把控项目审批,做到严把源头关;二是通过制定管理制度,建立健全统计体系,加强日常管理和监测,设置评价考核环节,

表 7 矿产资源节约与综合利用税费减免政策

Table 7 Reduction policies of tax and fee for conservation and comprehensive utilization of mineral resources

税种	政策中矿产资源综合利用相关内容
资源税	①对符合条件的充填开采和衰竭期矿山减征资源税,实行备案管理制度; ②对依法在建筑物下、铁路下、水体下通过充填开采方式采出的矿产资源,资源税减征 50%; ③对衰竭期矿山采出资源,资源税减征 30%; ④对稠油、三次采油、低丰度油气田、深水油气田资源税分别减征 40%、30%、20% 和 30%; ⑤对鼓励利用的低品位矿、废石、尾矿、废渣、废水、废气等提取的矿产品,各省制定办法确定是否减税
所得税	①企业从事符合条件的环境保护、节能节水项目的所得,可以免征、减征企业所得税; ②企业综合利用资源,生产符合国家产业政策规定的产品所取得的收入,可以在计算应纳税所得额时减计收入; ③企业购置用于环境保护、节能节水、安全生产等专用设备的投资额,可以按一定比例实行税额抵免; ④符合条件经认定为高新技术企业的,可依法减按 15% 税率征收企业所得税; ⑤共生伴生矿产资源、煤矸石、煤泥、化工废渣、粉煤灰、尾矿、废石、冶炼渣等资源综合利用企业享受所得税优惠
增值税	①利用油母页岩生产页岩油,70% 退税; ②利用煤炭伴生煤层气发电,100% 退税; ③利用煤矸石生产建筑砂石骨料,利用煤矸石、煤泥、石煤、油母页岩生产氧化铝、活性硅酸钙、瓷绝缘子、煅烧高岭土,均退税 50%; ④利用煤矸石、煤泥、石煤、油母页岩以上发电发热,利用氧化铝赤泥、电石渣生产氧化铁、氢氧化钠溶液、铝酸钠、铝酸三钙、脱硫剂,均实行 50% 退税。政府在规定的税率幅度内提出具体适用税率建议,报财政部、国家税务总局确定核准
环保税	①综合利用煤矸石、尾矿、危险废弃物、冶炼渣、粉煤灰等固体废物,符合国家和地方环境保护标准的,暂予免征环境保护税; ②向不符合国家和地方环境保护标准的设施、场所贮存或者处置尾矿,每吨征收 15 元环境保护税

表 8 矿产资源节约与综合利用要素保障政策

Table 8 Policies for ensuring the conservation and comprehensive utilization of mineral resources

类型	内容
用矿政策	①取消综合勘查矿种限制。探矿权人开展综合勘查,无需办理勘查矿种变更(增列)登记,按实际发现矿产编制储量报告,探矿权转采矿权时,根据报告确定开采矿种并申请采矿登记; ②鼓励“就矿找矿”。明确采矿权人可直接勘查其采矿权深部、上部资源,无需办理勘查许可,转采时以协议方式取得采矿权; ③增加可采储量和促进资源整合,已设采矿权深部或上部、周边零星分散资源、属同一主体相邻矿业权之间距离 300 m 左右(普通建筑用砂石土类矿产除外)的,可以协议方式向同一主体出让探矿权、采矿权; ④避免资源浪费,划定砂石集中开采区或开采规划区块,避免出现以山脊线划界等开采后遗留残山残坡等不合理问题
用地政策	①将采矿项目纳入国土空间规划“一张图”,作为新增用地的依据; ②战略性矿产探矿权,开展地质勘查可依法办理临时用地审批手续; ③采矿企业可对采用地复垦修复并使用腾退指标。允许复垦修复的新增耕地用于占补平衡; ④具备直接出让采矿权条件、能够明确具体用地范围的采矿用地,不需申请办理用地预审,直接申请办理农用地转用和土地征收; ⑤油气“探采合一”和“探转采”钻井及配套设施用地,露天煤矿接续用地不需办理用地预审;能源项目、发改委重大项目名单可占用基本农田,承诺方式落实耕地占补平衡;鼓励采矿权和建设用地使用权组合供应

表 9 矿产资源综合利用监督管理工作

Table 9 Supervision and management of comprehensive utilization of mineral resources

类型	内容
严把源头关	①矿产资源规划:合理布局、有序开发; ②建设项目压矿审批:保护资源,减少和避免建设项目压覆重要矿产; ③储量报告审批:共生伴生矿产进行综合勘查和综合评价,评审备案; ④开发利用方案:审查开采顺序、方法、技术工艺和“三率”指标
严控过程关	①储量动态监管:矿山企业动用、消耗、损失资源储量,计算“三率”,提交报告和统计; ②开发利用管理:开发利用方案执行情况、“三率”水平和固废利用、生态治理和土地复垦等,强化日常监管和执法检查; ③勘查开采信息公示:强化企业自律、社会监督、信用约束
把好闭坑关	①闭坑:矿山企业申请闭坑时,对资源利用情况进行检查,提交报告; ②尾矿:闭库后尾矿回采、综合利用,应依法履行相关手续,避免浪费资源、消除污染隐患风险; ③矿区治理修复和土地复垦后验收

组织执法检查,做到严控过程关;三是通过编制闭坑报告,消除安全隐患,开展生态治理和土地复垦,做到把好闭坑关;四是形成各层级、各部门协同配合的工作机制,矿产资源综合利用涉及自然资源、发展和改革、工业和信息化、财政税务、应急管理、生态环保和科技等多部门工作职责和领域,需要加强协调配合联动,确保监管工作和政策措施的有机衔接,同向施力、形成合力,全面推动矿产资源综合利用水平不断提高;五是建强资源综合利用产业体系,不断创新产业间融合共生、区域间协同发展模式,显著增强集约高效的产业基础和骨干企业的示范引领作用,形成矿产资源综合利用产业高质量发展新格局。

参考文献(References):

- [1] 王安建,高蕊蕊.中国能源与重要矿产资源需求展望[J].中国科学院院刊,2020,35(3):338-344.
WANG Anjian, GAO Xinrui. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences 2020, 35(3): 338-344.
- [2] 鞠建华,张照志,潘昭帅,等.我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J].中国矿业,2022,31(9):1-11.
JU Jianhua, ZHANG Zhaozhi, PAN Zhaoshuai, et al. Determination of mineral resources in China's strategic emerging industries and analysis of the demand of the "14th five year plan" [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 1-11.
- [3] 陈其慎,干勇,延建林,等.从矿产资源大国到矿产资源强国:目标、措施与建议[J].中国工程科学,2019,21(1):49-54.
CHEN Qishen, GAN Yong, YAN Jianlin, et al. Transition from a large to a powerful country in mineral resources: objectives, measures, and proposals[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 49-54.
- [4] 陈其慎,张艳飞,邢佳韵,等.矿产资源安全巨系统理论方法与实践[J].中国工程科学,2023,25(6):191-201.
CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, XING Jiayun, et al. Theoretical method and practice of giant system for mineral resource security[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 191-201.
- [5] 颜世强.矿产资源综合利用支撑新一轮找矿突破[N].中国矿业报,2023-06-27(1).
- [6] 崔振民,吴伟宏,姜琳,等.浅析我国矿产资源综合利用[J].中国矿业,2013,22(2):40-43.
CUI Zhenmin, WU Weihong, JIANG Lin, et al. Analysis of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(2): 40-43.
- [7] 冯安生.我国矿产综合利用技术现状与若干发展方向[J].矿产保护与利用,2013(1):1-5.
FENG Ansheng. Progress and development about comprehensive utilization technology of mineral resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2013(1): 1-5.
- [8] 王海军,薛亚洲.我国矿产资源节约与综合利用现状分析[J].矿产保护与利用,2017(2):1-5,12.
WANG Haijun, XUE Yazhou. Situation analysis on conservation and comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 1-5, 12.
- [9] 李士彬,李宏志,王素萍.我国矿产资源综合利用分析及对策研究[J].资源与产业,2011,13(4):99-104.
LI Shibin, LI Hongzhi, WANG Suping. Approaches to comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. Resources & Industries, 2011, 13(4): 99-104.
- [10] 鞠建华,黄学雄,薛亚洲,等.新时代我国矿产资源节约与综合利用的几点思考[J].中国矿业,2018,27(1):1-5.
JU Jianhua, HUANG Xuexiong, XUE Yazhou, et al. Thoughts of mineral resources conservation and comprehensive utilization in China in new era[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 1-5.
- [11] 卢瑞楨,甘敏,林欣威.矿山尾矿资源综合利用现状及前景分析[J].现代矿业,2020,36(12):5-7.
LU Ruizhen, GAN Min, LIN Xinwei. Current situation and prospect analysis of comprehensive utilization of mining tailings resources[J]. Modern Mining, 2020, 36(12): 5-7.
- [12] 郭富强,刘昆仑,俞乔,等.煤矸石综合利用途径探讨[J].煤炭加工与综合利用,2023(8):89-93,98.
GUO Fuqiang, LIU Kunlun, YU Qiao, et al. Discussion on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2023(8): 89-93, 98.