

共生矿产与尾矿综合利用

我国煤系共生矿产资源综合利用研究进展

郭子一^{1,2}, 刘建荣³, 郭志宾^{1,2}, 樊瑞康^{1,2}, 周恩会^{1,2}

1. 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室(中国矿业大学), 江苏徐州 221116;
2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏徐州 221116;
3. 内蒙古上海庙矿业有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 016200

中图分类号: TD849 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)06-0001-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.001

摘要 煤炭是我国的基础能源,煤系共生矿产资源储量大、种类多,主要包括金属矿产、非金属矿产与能源矿产。加强煤系共生矿产资源综合利用符合国家能源资源加工利用重大需求。阐述了煤系金属矿产(锗、镓、铝、稀土元素)、非金属矿产(硫铁矿、高岭土、膨润土、耐火黏土、硅藻土、石墨)和能源矿产(铀矿、油页岩、煤系气、天然气水合物)的赋存状况、分布特征与加工利用研究进展,分析了“双碳”背景下煤系共生矿产资源综合利用面临的机遇与挑战,展望了延伸煤系产业链、聚焦关键技术开发、促进煤系共生矿产资源分类及内涵改革、完善矿业权设置管理的发展前景,为未来煤系共生矿产资源综合利用提供借鉴。

关键词 煤炭; 锗; 稀土; 共生矿物; 综合利用

引言

我国煤炭资源丰富,富含大量共生矿产资源。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中将“推动煤炭等化石能源清洁高效利用”列为主要发展目标^[1]。这就要求充分发挥我国资源优势,深入推进煤炭资源综合利用,深化煤系共生矿产资源加工利用,促进矿产资源低碳转型。煤系共生矿产资源是指成煤岩层中与煤炭共生/伴生,或是在煤炭加工选冶过程中生成的有用矿产^[2]。根据性质的不同,煤系共生矿产资源可以分为煤系金属矿产、煤系非金属矿产和煤系能源矿产^[2](图1)。煤系金属矿产主要包括锗、镓、铝、稀土元素、钒以及锂等;煤系非金属矿产涵盖硫铁矿、高岭土、膨润土、耐火黏土、硅藻土与石墨等;煤系能源矿产中常见的有铀矿、油页岩、煤系气与天然气水合物等。随着我国经济的飞速发展,上述矿产资源的原生矿产大多出现资源枯竭、开采难度大、开发利用生态环境污染等问题,导致重要矿产资源供不应求。我国煤炭年产量达41亿t^[3],其共生矿产资源储量丰富、开采成本低,可以有效弥补资源短缺、环境破

坏的短板,同时实现煤炭固体废弃物的资源化利用。本文梳理了煤系共生矿产资源的综合利用现状,总结分析了煤系金属矿产、非金属矿产和能源矿产的赋存状况、分布特征与加工利用研究进展,论述了“双碳”背景下煤系共生矿产资源发展面临的机遇与挑战,为提高我国煤系矿产资源开发利用水平、发展绿色矿业、建设绿色矿山、促进选矿工业进步发挥作用。

1 煤系共生矿产资源加工利用现状

1.1 煤系金属矿产

煤系金属矿产主要有锗、镓、铝、稀土元素、钒以及锂等。粉煤灰和煤矸石有可能成为镓、铝资源的理想替代来源,开发利用前景广阔。我国煤中稀土元素含量远超世界平均值水平^[4],为我国工业化开发利用煤系稀土元素矿床提供了可能。传统的煤系钒资源提取工艺主要有钠化焙烧法、无盐焙烧法和钙盐焙烧法等^[5],受原料特性影响,普遍存在回收率低、适应性差等问题。空白焙烧—碱浸法、氧压酸浸法等清洁型提钒工艺已成为热点,尚处于研究阶段。我国煤系锂区域成矿无明显特征^[6],多呈零星点状分布,集中开发

收稿日期: 2022-12-09

基金项目: 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项项目—低品质动力煤低碳清洁高效干法分选提质关键技术与应用(2021EEDSCXSQZD007)

作者简介: 郭子一(2000—),女,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究煤及其共生矿物分选加工。

通信作者: 周恩会(1988—),男,江苏邳州人,博士,硕士生导师,副教授,主要研究煤炭清洁高效分选加工。

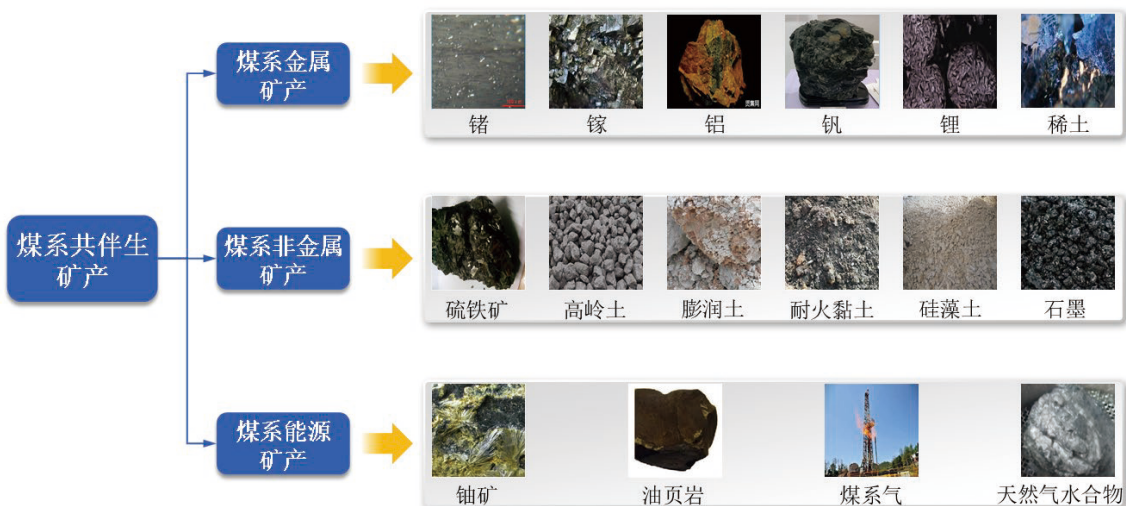


图 1 煤系共伴生矿产资源分类
Fig. 1 Classification of associated mineral resources in coal-bearing strata

利用难度大。

1.1.1 锗

我国内蒙古乌兰图嘎锗矿与云南临沧锗矿均是世界知名的大型煤系锗矿床,由于其盆地附近分布有富锗花岗岩,淋溶形成的富锗溶液浸入泥炭形成煤系富锗矿床。煤中锗的含量达到 300 μg/g 以上,可以进行工业化提取与利用^[6]。褐煤是有工业价值的富锗煤的典型代表,锗在其中的赋存状态主要为腐殖酸络合物、有机化合物和硫化物^[7]。目前,煤中金属锗的提取技术主要包括干馏—氯化法、水冶法和微生物浸出法^[8]。干馏—氯化法已进入工业化运行阶段,提取原理是将褐煤加热使锗挥发,然后通过氯化反应与蒸馏技术得到锗的氯化物。然而,该工艺蒸馏残液锗含量高、残渣量大等问题仍然突出,工业生产成本高。水冶法是将原煤粉碎至一定粒度,用浓度不低于 7 mol/L 的浓盐酸对其进行浸出蒸馏提取锗^[9]。该方法锗的回收率可达 90% 以上,但由于盐酸的消耗量过大、成本高昂等原因尚不适合工业化生产,还需进行相应的试验探索。微生物浸出法是利用球菌将大分子有机锗的结构破坏,形成易溶解的游离锗或小分子结合的锗,浸出率高达 85%,耗酸量远低于水冶法,且不破坏煤的燃烧性能^[10],具有操作简便、价格低廉、回收率高、污染小的优点;但其处理规模小、周期长且微生物浸出收集困难,尚处于技术研究阶段。

当前,金属锗被广泛应用于太阳能电池、红外光学、半导体及医药领域,对锗的需求量也正以每年近 20% 的速度增长。中国作为世界煤炭大国,优势明显。但是我国目前煤中高品位锗的提取利用工艺较成熟(如褐煤),对于煤中低品位锗的开发处理尚未实现工业化应用,未来应加强对煤中低品位金属锗的提取利用的研究,如低品位含锗褐煤控气氛二次挥发富集等^[11]。

1.1.2 镓—铝

中国是世界上第一大铝生产和消费国,由于镓元素与铝元素在晶体化学上相似性极强,所以镓的迁移与分布很大程度上受铝元素的地球化学行为影响^[12]。我国高镓煤主要分布于华北赋煤区石炭—二叠系煤层、西北赋煤区侏罗系煤层和华南赋煤区二叠系煤层^[13]。镓—铝矿床主要分布在内蒙古的准格尔煤田和大青山煤田^[9]。我国煤中镓的平均含量为 6.55 μg/g。煤系镓、铝主要从燃煤灰分中提取,当煤灰中镓含量超过 50~100 μg/g,可以考虑镓、铝的共同开发。粉煤灰中提取镓和铝可以分为酸法和碱法^[14]。酸法一般采用盐酸溶液进行酸浸,使得镓与铝一起被溶解,再通过树脂吸附、沉淀—电解或者萃取法等提取获得金属。碱法是将粉煤灰烧结后,用碳酸钠溶液浸出,经多次碳酸化处理及分离后获得富镓、铝沉淀,后用氢氧化钠溶液溶解该沉淀,最终通过电解法可制得金属镓和铝。一般酸法的提取率高于碱法,可达 90% 以上^[15]。

镓是一种重要的战略稀缺金属,被称为“电子工业的粮食”,广泛应用于新能源与航空航天领域。与此同时,随着我国工业化的快速发展,铝土矿消耗量逐年递增,已经出现供不应求的现象。因此粉煤灰和煤矸石有可能成为铝和镓资源的理想替代来源,开发利用前景广阔。未来应加强对煤中提取镓、铝的热力学机理、影响因素以及在提取过程中加入不同物质来改善粉煤灰结构、性质以及提取效率等方向的研究^[16]。

1.1.3 稀土元素

煤具有一定的吸附性能,在一定的地质条件下能够富集稀土元素,使其达到可以加工利用的程度。煤中稀土元素赋存状态多样,在低灰分煤中倾向于赋存在有机质组分中。我国煤中稀土元素含量的平均值为 96 g/t^[17],远超世界平均水平,另外,煤灰中稀土含量

比煤中还要高出很多,是因为煤炭经过燃烧后稀土得以再次富集。尤其是重庆西南部地区和内蒙古地区,煤灰中稀土元素氧化物的含量超过 1 000 g/t^[18],为我国工业化开发利用煤系稀土元素矿床提供了可能。

使用重选、磁选、浮选以及氢氧化钠化学活化处理可以富集煤中稀土元素,提高后续浸出效率,浸出液通过沉淀法、溶剂萃取法、液膜法和生物吸附法等方法实现稀土元素的提取^[19]。其中,沉淀法是在浸出液中加入碳酸盐等沉淀剂,通过 pH 调节或者络合反应生成沉淀,实现稀土离子的分离。该方法处理成本低、易操作,但在处理过程中会产生废水,造成二次污染。溶剂萃取法借助溶质在不同溶剂中的溶解度不同的原理来分离稀土。由于浸出液 pH 一般小于 7,所以大多数选择阳离子交换型萃取剂。该法具有连续性强、效率高和易操作的优势,但由于萃取液的使用量大且易造成二次污染,该法不适合投入工业化应用。液膜法利用非水溶剂和螯合剂将渗滤液和酸性剥离剂物理分离,同时回收稀土元素。与溶剂萃取法相比,液膜法选择性高、工艺简单,但其液膜具有不稳定性,只能用于混合稀土元素的富集。生物吸附法的原理是借助生物吸附剂与溶液之间的静电力以及巯基官能团的吸附作用实现稀土元素的提取。与其他提取方法相比,生物吸附法效率高、污染小,但未来还需对其能否投入工业化应用进一步探索。

稀土元素的金属活泼性很高,有“工业维生素”的美誉,是现代科技高速发展必不可少的重要战略资源之一。如果将煤及其副产品中的稀土元素进行有效利用,不仅能够缓解我国对稀土资源的需求压力,更有着长远的战略意义。未来的研究应重视研发适用于不同煤种的稀土元素提取工艺,同时还要考虑提取过程的经济性与环保性。

1.2 煤系非金属矿产

煤系非金属矿产主要有硫铁矿、高岭土、膨润土、耐火黏土、硅藻土与石墨,一般在煤层的顶底板、夹矸中赋存,种类多样,应用与开发前景广泛。

1.2.1 硫铁矿

我国煤系硫铁矿资源储量丰富,保有储量超过 16 亿 t,主要分布在煤矸石中,含硫量高达 18%;部分矿石为结核状,含硫量 30% 以上^[20]。煤系硫铁矿约占我国硫铁矿资源的 40%,主要分布在我国山东、四川、山西等省份。

煤系硫铁矿形态多样、赋存特征各异,多以中低品位为主,结构主要为粒状、胶状、生物结构充填^[21]。煤系硫铁矿一般随煤采出,主要是夹矸和少量顶底板,在较粗的磨矿细度条件下,即可分离出粗粒硫铁矿^[22],再通过螺旋溜槽、摇床分离或者浮选工艺可以得到硫

精矿,但浮选得到的硫精矿含碳量过高,不利于常规应用,因此还要经过反浮选或絮凝等工艺进行降碳处理。合格的硫精矿可用于生产硫酸和硫磺。除此之外,硫精矿生产中排出的固体废渣也是一种二次资源,可用于制取磁性材料、颜料、化工产品、高效脱硫剂以及复合净化剂等^[23]。目前,煤系硫铁矿回收技术存在效率低且精砂含硫品位低的弊端,影响其进一步利用。为此,未来应加强对分系统开采煤系硫铁矿的技术研究,即随煤采出夹矸中的硫铁矿,有目的地开采煤层顶、底板部位的硫铁矿,以提高硫铁矿的采出率,增加综合采矿效益。

1.2.2 高岭土

煤系高岭土一般以煤层夹矸或煤层顶、底板的形式赋存于煤系之中,随煤采出分离后累计堆存量已达 70 亿 t,并以每年 1.5 亿 t 的速度增长^[24]。我国煤系高岭土多属沉积形成,颜色较深,矿物成分单一^[25]。以其赋存状态和矿石性质可以大致划分为以下三种类型^[26]: (1)含炭高岭土,一般以煤层夹矸的形式赋存于煤系之中,在我国分布极其广泛,一般来讲,只要有煤的地方就有含炭高岭土的存在。含炭高岭土主要应用于建材、化工、石油等行业。(2)“焦宝石型”高岭土,以煤层顶、底板或煤层之间等方式赋存的矿石,在我国分布同样极其广泛,主要分布在石炭-二叠系和侏罗系^[27],重点应用于冶金、建材、橡塑和化工等许多行业。(3)沉积型软质和半软质高岭土。以广东茂名高岭土为突出代表,此外还有内蒙古准格尔、陕西泾阳等地,地质时代分布主要以三叠纪居多^[28]。这种高岭土具有极好的可选性,选后的精矿可广泛应用于众多行业。

通过磨矿、磁选、漂白、压滤、干燥、煅烧等工艺流程可实现煤系高岭土的精选提纯与应用。煤系高岭土的综合利用以发电、建材以及无害化处理等大宗利用技术作为主攻应用方向^[29]。此外,煤系高岭土还应用于化工原料、陶瓷、塑料、橡胶、涂料等材料研发与制备领域^[30],低纯度煤系高岭土可以用作水泥混合材或混凝土矿物掺合料。其综合利用途径如图 2 所示^[31]。可见,煤系高岭土不仅资源可靠,同时还具有极大的经济价值优势。

1.2.3 膨润土

我国煤系膨润土储量丰富、品质优良,且多为大型或超大型矿床,探明储量 8.88 亿 t^[32],主要分布在我国东北三省、广西、新疆、甘肃等省区,易于在开采煤的同时进行开采,不需新建矿井,开采成本低。

煤系膨润土品位高,通常采用手选法和风选法实现干法提纯^[33],手选法是通过人工将膨润土矿石中的大块废石挑选除去,基本流程为破碎、干燥、手选、粉

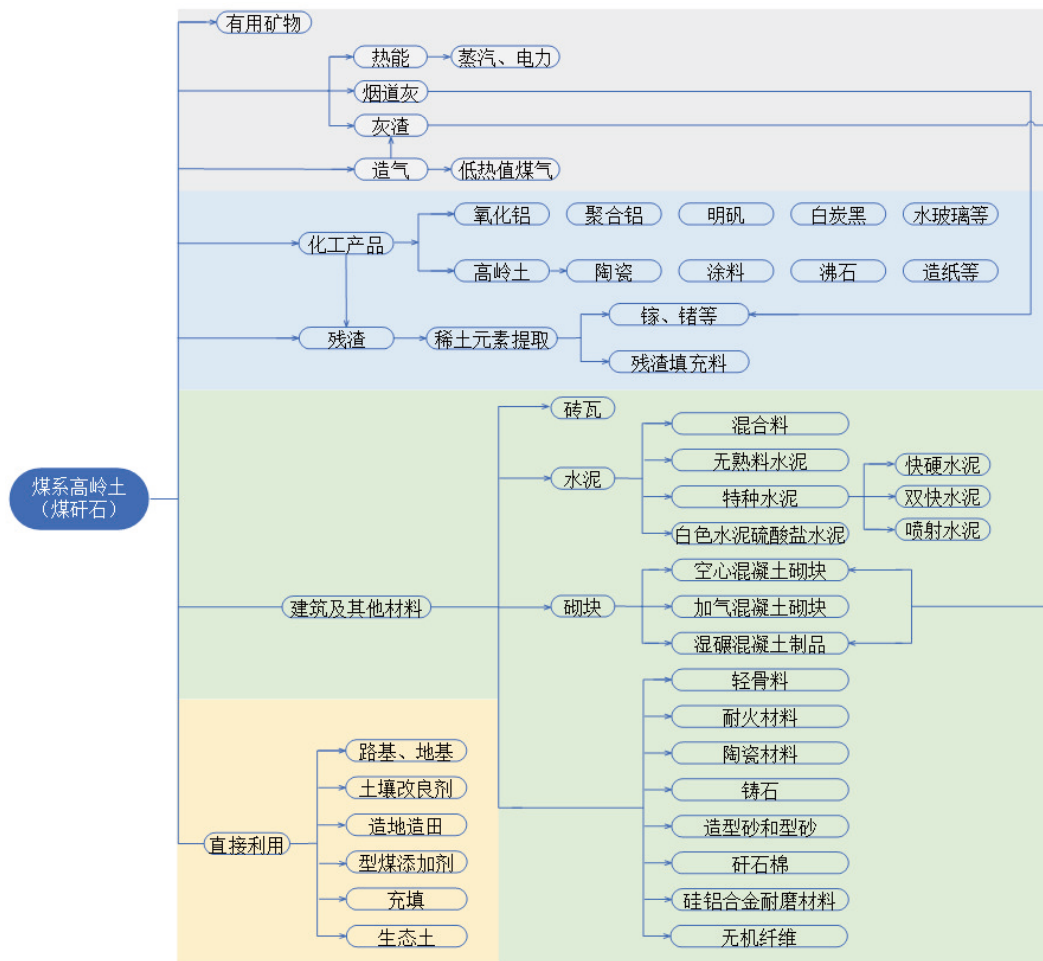


图 2 煤系高岭土综合利用途径
 Fig. 2 Comprehensive utilization of coal series kaolin

磨、包装。此法工艺简便,生产过程灵活性高,但工业应用较少,只适合小规模生产。风选法通过利用膨润土矿物和杂质矿物的硬度和密度差异逐级分离沉降,将杂质和膨润土分离。基本流程为破碎、干燥、风选分级、碾磨,最终得到精矿产品^[34]。该法操作简便、处理量大,但是容易造成空气污染,对于杂质矿物同蒙脱石粒度相近的超细粒级产品来说分离不彻底。

煤系膨润土是由于其形成的环境所决定的,但是就其本身的性质来讲与非煤系地层中的膨润土基本没有区别,因此其加工提纯的基本思路与技术路径是相通的^[35]。对煤系膨润土的深加工应用主要包括制备人工改型钠土、4A 沸石、无机凝胶、有机膨润土以及废水废气的综合治理。目前,人工改型钠土、4A 沸石、无机凝胶都已投入工业化应用。人工改型钠土是将膨润土用钠盐处理,通过离子交换合成钠基膨润土^[35]。4A 沸石是一种理想的吸附剂与干燥剂^[36],主要制备工艺流程是用酸处理膨润土产生活性硅胶,后经过晶化、洗涤、干燥、粉碎得到成品。无机凝胶主要用于牙膏和化妆品的生产,生产流程是先利用粉碎、浸取、分散、沉降等措施实现除杂^[37],后将浓缩后的矿浆进行

化学改性,以改善和提高胶体性能。通过阳离子交换改性得到有机蒙脱石、制备有机膨润土。在环境污染治理方面,膨润土能吸附大量的悬浮物,在污水、废气治理中可以起到捕集净化的作用^[38]。未来应积极研究新的改性工艺及设备、活化方法等,逐步实现煤系膨润土的工业化应用。

1.2.4 耐火黏土

我国煤系耐火黏土资源丰富,已探明资源储量 17 亿 t^[39]。主要分布在山西、河南、山东、内蒙古、河北等省区。受地质条件影响,我国耐火黏土矿床与煤地层密切伴生。在新疆、内蒙古、辽宁等地,由于煤的自然作用,与煤伴生的黏土已烧成天然熟料,成为一种节能耐火原料。

煤系耐火黏土主要成分是铝硅酸盐矿物,厚度仅为厘米级,分布范围广,性质稳定。一般而言,Al₂O₃ 含量的高低决定了耐火材料性能^[40],所以煤系耐火黏土根据不同耐火材料要求等级进行分级开采、分类煅烧、分类利用,使其发挥不同级别烧结性能和煅烧后熟料的高温性能。对煤系耐火黏土化工方面深加工

而言,可以生产工业硫酸铝、明矾、氯化铝等铝盐产品^[41]。其生产废渣还可用以制作充填增强剂及耐火材料等。此外,耐火黏土在研磨材料、陶瓷和石油钻井支撑剂、铺路材料、农业促肥剂等领域也有广泛应用^[42]。

耐火黏土属于我国重要的非金属矿产资源,但目前具有开采技术落后、选矿分级效率低、煅烧水平较低的发展弊端,相关研究成果未能在生产实践中得到应用。因此应加强对已有研究成果的产业化,同时继续拓宽煤系耐火黏土应用领域,提高其开发利用水平。

1.2.5 硅藻土

我国煤系硅藻土探明储量1.9亿t,占硅藻土总探明储量的71%,是一种理想的硅源,主要分布在我国的西南地区和东北地区的第三纪褐煤煤层上^[43]。

煤系硅藻土是由于生物作用在煤中形成的硅质沉积岩,其有益成分为硅藻,煤系硅藻土的提取要先经过800℃煅烧去除有机质^[44],后破碎至1mm以下,通过硫酸或盐酸处理生成可溶盐,再经过滤、洗涤、干燥后得到精硅藻土,主要用在啤酒、制药等行业中^[45],煅烧精选后的煤系硅藻土还可以作为催化剂载体,如接触法制硫酸使用的钒触媒就是以硅藻土浸涂V₂O₅制成。此外,由于硅藻土具有纳米级的天然微孔及缝隙,比表面积大、吸附性强,可以用于制造多孔道纳米沸石、微孔玻璃等微孔材料以及作为吸附剂用于油类物质的脱色精炼和污水治理^[46]。

我国煤系硅藻土资源丰富,应用前景广阔,但目前仍存在煤系硅藻土中铁氧化物含量较高的问题,对硅藻土的加工利用产生一定阻碍。未来应加强对铁氧化物的存在形态及成分研究,克服除铁难关,提高煤系硅藻土加工利用的经济效益。

1.2.6 石墨

我国煤系石墨资源潜力巨大,已探明储量达5000万t以上^[47],主要分布在我国东、中部,以吉林、湖南和福建省最为典型。煤系石墨属于隐晶质石墨,晶体直径处于微米级别^[48],具有高品位、矿体集中、开发利用简单的特点。

煤系石墨的选矿提纯主要采用盐酸与氢氟酸洗样品^[49],后经过洗涤、干燥处理,使得氮含量下降,碳得到富集。富集得到的石墨可以作为电池、耐火材料、碳素制品等的优质原料,前景广阔。目前煤系石墨的开采和初选相对简单^[50],但存在效率低、污染大、成本高等问题;未能做到统一规划,开采混乱现象严重,浪费资源且污染环境。与此同时,煤系石墨的深加工工艺落后,缺乏对高附加值产品的研发投入,制约了煤系石墨的产业发展。因此,对于煤系石墨的未来发展,一方面应深入研究煤系石墨的赋存状态及成矿机制,实现高效分级利用;另一方面,应加大对煤系

石墨选矿提纯和深加工技术的研究投入,保障石墨产业良性发展。

1.3 煤系能源矿产

煤系能源矿产中,铀矿、油页岩为固态矿产;煤层气、致密砂岩气、页岩气等煤系气以及天然气水合物为气态矿产。随着煤系矿产的研究和勘查的不断深入,煤系能源矿产的潜在价值不断被发掘。

1.3.1 铀矿

煤系铀矿主要分布在我国西南、西北地区,包括砂岩型和煤岩型两类,砂岩型铀矿主要出现在煤层顶底板砂岩中,煤岩型铀矿多数存在于褐煤中^[51]。我国煤中铀煤层具有明显的时代分布规律,云南和贵州主要为古生代石炭纪到二叠纪,部分为新生代煤层,内蒙古和新疆地区则以侏罗纪煤层为主^[51]。铀在煤中主要有四种赋存状态,其中最主要的赋存方式是有有机质螯合或束缚。

当煤中铀含量超过200μg/g时,即具有工业化利用价值^[52]。从煤中提取铀主要有两种途径,一是从原煤中提取铀;二是从煤灰中提取铀。若直接从原煤中浸出铀,煤中的有机物会部分进入浸出液中,出现固液分离困难、浸出率低和试剂消耗多等问题^[53]。故通常是先将煤灰化,再从煤灰中提取铀,其过程包括选矿分离、灰化、煤灰浸出和浸出液中提取铀。煤与砂岩、黏土的分选是根据比重不同进行风选,灰化处理的目的是除去煤中的有机物,主要受温度影响。浸出和液固分离煤灰中的铀主要以铀的氧化物和铀酸盐等状态存在,通常采用硫酸浸出,浸出率可达到94%^[54]。

目前对煤中铀的认识更多是处于概念认识层面,在实践层面的有效利用技术研究还不够深入,缺乏统一部署的方案,从而导致资源浪费和环境污染。未来的研究应将煤中铀作为一种特殊的煤单独分类,制定其勘查与开发利用等相关规范标准,实现资源化、高效化、清洁化。

1.3.2 油页岩

我国油页岩资源大多与第三纪低阶煤共生,成为煤层的顶板或底板或单独赋存在煤层上下部的矿层,主要分布在吉林、广东、辽宁和新疆等地^[55]。目前,页岩油提炼、页岩灰残渣作建材环保材料是煤系油页岩资源综合利用的主要技术路线。页岩油提炼的工艺流程包括大、中颗粒油页岩炼油、剩余瓦斯和页岩半焦发电以及综合输煤^[56],已形成完整产业链。此外,油页岩灰渣的主要成分是SiO₂和Al₂O₃,可以用来制备超轻陶粒、轻质砖、硅酸盐水泥和泡沫玻璃等。当油页岩中苯的抽提率大于1.3%时,可以提炼油页岩蜡得到浅色精制蜡,提炼后的油页岩依旧可以继续使用。

煤系油页岩的成因十分复杂,受沉积环境的影响较大,目前尚缺乏该方面的深入研究;此外,由于西部地区部分矿产资源开发较晚^[57],与煤共生的油页岩资源尚未得到合理勘查与利用,所以今后需要加强对煤系油页岩资源的理论研究及勘查开发力度。

1.3.3 煤系气与天然气水合物

煤系气是成煤过程中形成的富含甲烷的天然气,包括煤层气、致密砂岩气和页岩气^[58]。我国煤系煤层气资源储量丰富,千亿级别的含煤层气盆地共有14个。煤系致密砂岩气是一种低孔隙度、低渗透率的非常规气,主要分布于四川盆地、鄂尔多斯盆地的煤系烃源岩中^[59]。煤系页岩气主要分布于我国西北、东北、华北和南方等地区。赋存状态包括吸附气、游离气和溶解气。按照油气出产的出井方式煤系气的开采可分为分采混出共采以及分采共出共采^[60]。开采出的煤系气在诸多领域都具备广阔的应用前景,如通过内燃机驱动低浓度煤层气发电、利用液化和变压生成压缩天然气、提取裂解原料及合成油、制取醇类、醛类等液体燃料和有机产品^[61]。

煤系天然气水合物具有高效、清洁的优势,开发潜力极大,被视为未来天然气的替代能源^[62]。其主要赋存于永久冻土带之下的中侏罗统含煤岩系,在我国的青海木里煤田中分布广泛^[63],该区发育天然气水合物并非偶然现象,而是含煤岩系的充足气源和有利生储盖条件与高寒山区适宜的水合物稳定带耦合作用的必然结果。煤系烃源岩丰富,地层岩性旋回性强,低孔低渗的碎屑岩层封盖性好,在冻土区的温压稳定带中极易形成天然气水合物^[64]。鉴于煤系天然气水合物的“低品位”和与煤系气共存的特点^[65],在遵循天然气水合物开采“增温降压”基本原理的基础上,把煤系天然气水合物纳入煤系气共探合采范畴,无疑是煤系天然气水合物经济合理开发值得关注的方向。

2 “双碳”目标下的挑战与展望

在当前复杂的国际政治经济形势下,作为全球最大的矿产资源生产国、消费国,我国如何实现“双碳”目标已成为全球瞩目的焦点。“双碳”目标的达成意味着我国必须进行能源供需结构的重大转变,这对我国矿产资源战略安全保障提出了严格的要求。煤系共伴生矿产资源是我国的重要资源,尽管现有的研究成果显示,煤系共伴生矿产资源的开发和利用潜力很大,但是由于这一领域的研究起步较晚,还存在诸多挑战:(1)煤中锆、耐火黏土、石墨、铀矿、油页岩、煤系气与天然气水合物等煤系共伴生矿产资源开采技术落后、开采混乱现象严重、开发利用水平较低,相关研究成果未能在生产实践中得到应用。(2)煤中提取镓、铝的热力学机理及影响因素、针对不同煤种

稀土元素的提取工艺、煤系硅藻土中铁氧化物含量及存在形态的相关研究缺乏。(3)对煤系共伴生矿产资源的赋存状态与机理、分布规律、构造环境、地球动力学过程和机制以及煤系共伴生矿产资源开发的技术性、经济性、战略重要性、污染性缺乏系统性研究。

针对以上严峻挑战,我国煤系共伴生矿产资源综合利用未来发展应考虑以下主要方向:(1)突破传统的单一煤炭资源开发利用模式,着力解决开采混乱、技术落后等短板,延伸煤系产业链,立足全生命周期的生存发展规律与逻辑,提高对煤系共伴生矿产资源的综合勘查开发利用水平,促进产业化、工业化发展;(2)聚焦煤系共伴生矿产资源的赋存状态与分布规律、提取机理与影响因素、特殊地球动力学过程和机制以及资源开发评价研究;(3)立足矿产资源加工利用全产业链,推进煤系共伴生矿产资源分类及内涵改革;(4)完善煤系共伴生矿产资源的矿业权管理与开发利用方案,并落到实处。

3 结语

新形势下,矿产资源作为我国经济发展的主要物质支撑,在我国经济发展中起到了基础保障作用。推进矿产资源低碳转型,节能减排,加快煤系共伴生矿产资源开发利用,对实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。加强煤系共伴生矿产资源开发利用研究对于推动我国经济从“粗放”到“集约”的转型,实现资源的合理分配与产业可持续发展,有着十分重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和年远景目标纲要[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2022.
State Council of the People's Republic of China. Outline of the 14th Five-Year Plan and Annual Goals for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China [R]. Beijing: The State Council of the People's Republic of China, 2022.
- [2] 崔艳. 我国煤系共伴生矿产资源分布与开发现状[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(S1): 27-32.
CUI Y. Distribution and development status of coal measures associated mineral resources in China[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(S1): 27-32.
- [3] 安庆贤, 赵婧, 戴博. 中国矿产资源的可持续效率及全要素生产率分析[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(6): 1551-1565.
AN Q X, ZHAO J, DAI B. Analysis on sustainable efficiency and total factor productivity of mineral resources in China[J]. Systems Science and Mathematics, 2022, 42(6): 1551-1565.
- [4] 李梦闪, 黄伟欣, 张臻悦, 等. 煤及其副产物中稀土元素的赋存特征与选矿富集研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 61-81.
LI M S, HUANG W X, ZHANG Z Y, et al. Occurrence characteristics and beneficiation enrichment of rare earth elements in coal and its byproducts[J]. Nonferrous Metals (Beneficiation Section), 2021(6):

- 61–81.
- [5] 赵蕾, 王西勃, 代世峰. 煤系中的锂矿产: 赋存分布、成矿与资源潜力[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1750–1760.
ZHAO L, WANG X B, DAI S F. Lithium minerals in coal measures: occurrence, distribution, mineralization and resource potential[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1750–1760.
- [6] 代世峰, 赵蕾, 魏强, 等. 中国煤系中关键金属资源: 富集类型与分布[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3715–3729.
DAI S F, ZHAO L, WEI Q, et al. Key metal resources in coal measures of China: enrichment types and distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3715–3729.
- [7] JIU B, HUANG W, SUN Q. Distribution Characteristics and Enrichment Model of Germanium in Coal: An Example from the Yimin Coalfield, Hailar Basin, China[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(1): 725–740.
- [8] 钞晓光, 李依帆, 张云峰, 等. 煤中锗的资源分布及其提取工艺研究进展[J]. 矿产综合利用, 2020(4): 21–25.
CHAO X G, LI Y F, ZHANG Y F, et al. Research progress on resource distribution and extraction technology of germanium from coal[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020(4): 21–25.
- [9] NGUYEN T H, LEE M S. A review on germanium resources and its extraction by hydrometallurgical method[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2021, 42(6): 406–426.
- [10] REZAEI H, SHAFAEI S Z, ABDOLLAHI H, et al. A sustainable method for germanium, vanadium and lithium extraction from coal fly ash: Sodium salts roasting and organic acids leaching[J]. Fuel, 2022, 312: 122844.
- [11] SHPIRT M Y, STOPANI O I, LEBEDEVA L N, et al. Germanium production technology based on the conversion of germanium-bearing lignites[J]. Solid Fuel Chemistry, 2020, 54(1): 1–10.
- [12] 徐璐, 史光大, 李元坤, 等. 低品位铝土矿预富集铝镓的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3): 26–29.
XU L, SHI G D, LI Y K, et al. Study on pre-enrichment of aluminum gallium in low grade bauxite[J]. Nonferrous Metals (Smelting Part), 2018(3): 26–29.
- [13] SHAO P, WANG W, CHEN L, et al. Distribution, occurrence, and enrichment of gallium in the Middle Jurassic coals of the Muli Coalfield, Qinghai, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 185: 116–129.
- [14] LU F, XIAO T, LIN J, et al. Resources and extraction of gallium: A review[J]. Hydrometallurgy, 2017, 174: 105–115.
- [15] 王涛, 张新军. 煤中伴生矿产赋存状态及提取方法综述[J]. 矿产综合利用, 2019(4): 21–25.
WANG T, ZHANG X J. Occurrence status and extraction methods of associated minerals in coal[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 21–25.
- [16] 刘汉斌, 马志斌, 郭彦霞, 等. 山西煤系锂镓铝分布特征和开发利用前景[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 39–46.
LIU H B, MA Z B, GUO Y X, et al. Distribution characteristics and development and utilization prospects of lithium, gallium and aluminum in Shanxi coal measures[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 39–46.
- [17] 张瑞, 张春明, 孙喆, 等. 煤基固废中稀土元素的分布及赋存[J]. 山东化工, 2022, 51(19): 134–138.
ZHANG R, ZHANG C M, SUN Z, et al. Distribution and occurrence of rare earth elements in coal based solid waste[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(19): 134–138.
- [18] ZHANG W, NOBLE A, YANG X, et al. A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials[J]. Minerals, 2020, 10(5): 451.
- [19] HONAKER R, GROppo J, BHAGAVATULA A, et al. Recovery of rare earth minerals and elements from coal and coal byproducts[C]//International Conference of Coal Preparation, Louisville, Kentucky, 2016.
- [20] 徐德信. 基于ICP-OES测定煤中硫铁矿硫的研究[J]. 石化技术, 2022, 29(7): 132–134.
XU D X. Determination of pyrite sulfur in coal based on ICP-OES[J]. Petrochemical Technology, 2022, 29(7): 132–134.
- [21] 康文泽, 马子航. 煤系黄铁矿理化性质及浮选脱硫研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 109–117.
KANG W Z, MA Z H. Research progress on physicochemical properties and flotation desulfurization of pyrite in coal measures[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 109–117.
- [22] OLIVEIRA C M, MACHADO C M, DUARTE G W, et al. Beneficiation of pyrite from coal mining[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 821–827.
- [23] 唐竹胜, 唐佳, 陈惠忠, 等. 各种品位硫铁矿烧渣还原生产高品质还原铁的应用[J]. 硫酸工业, 2015(5): 24–29.
TANG Z S, TANG J, CHEN H Z, et al. Application of reduction of various grade pyrite cinder to produce high quality reduced iron[J]. Sulfuric Acid Industry, 2015(5): 24–29.
- [24] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165–178.
LI Z, XUE J, ZHU Z L, et al. Research progress of comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165–178.
- [25] CHENG S, GE K, SUN T, et al. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123972.
- [26] YUAN S, LI Y, HAN Y, et al. Effects of carbonaceous matter additives on kinetics, phase and structure evolution of coal-series kaolin during calcination[J]. Applied Clay Science, 2018, 165: 124–134.
- [27] LIU L, LIU Q, ZHANG K, et al. Thermal decomposition and oxidation of pyrite with different morphologies in the coal gangue of North China[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022: 1–16.
- [28] GAN C, HU H, MENG Z, et al. Characterization and hemostatic potential of two kaolins from southern China[J]. Molecules, 2019, 24(17): 3160.
- [29] 常纪文, 杜根杰, 杜建磊, 等. 我国煤矸石综合利用的现状、问题与建议[J]. 中国环保产业, 2022(8): 13–17.
CHANG J W, DU G J, DU J L, et al. Current situation, problems and Suggestion of comprehensive utilization of coal gangue in our country[J]. China Environmental Protection Industry, 2022(8): 13–17.
- [30] LIU Y, LEI S, LIN M, et al. Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin[J]. Applied Clay Science, 2017, 143: 159–167.
- [31] 王栋民, 房奎圳. 煤矸石资源化利用技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021: 31–32.
WANG D M, FANG K Z. Coal gangue resource utilization technology[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2021: 31–32.
- [32] 余丽秀, 邵晨, 朱进, 等. 膨润土开发利用水平评估影响因素探讨[J]. 矿产保护与利用, 2018(6): 20–23+30.
YU L X, SHAO C, ZHU J, et al. Discussion on influencing factors of development and utilization level assessment of bentonite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(6): 20–23+30.

- [33] SINGH S P, NAYAK K, PANI A. Assessment of coal ash-bentonite mixture as landfill liner[C]//Proc. Indian Geotech. Conf. 2015.
- [34] 舒锋, 宋双艳. 我国膨润土开发利用现状和对策建议[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2021(6): 24-26.
SHU F, SONG S Y. Development status and countermeasures of bentonite in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry Guide, 2021(6): 24-26.
- [35] 苗艳晖, 赵云良, 陈立才, 等. 钙基膨润土钠化工艺过程及其对矿浆黏度影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3525-3532.
MIAO Y H, ZHAO Y L, CHEN L C, et al. Study on sodium process of calcium bentonite and its effect on viscosity of pulp[J]. Bulletin of the Silicate, 2022, 41(10): 3525-3532.
- [36] 崔家新, 王连勇, 李尧, 等. 水淬渣-粉煤灰基4A沸石的制备及性能表征[J]. 无机盐工业, 2022, 54(4): 135-140.
CUI J X, WANG L Y, LI Y, et al. Preparation and characterization of water quenched slag and fly ash based 4A zeolite[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(4): 135-140.
- [37] 雷东升, 汪思孝. 膨润土无机凝胶制备及其在水基农药中的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(4): 1-2+6.
LEI D S, WANG S X. Preparation of bentonite inorganic gel and its application in water-based pesticides[J]. China Non-metallic Minerals Industry Guide, 2019(4): 1-2+6.
- [38] 刘涛, 张一敏, 黄晶, 等. 钛交联蒙脱石复合材料的制备与表征[J]. 非金属矿, 2011, 34(1): 47-49.
LIU T, ZHANG Y M, HUANG J, et al. Preparation and characterization of Titanium crosslinked Montmorillonite composites[J]. Non-metallic Mines, 2011, 34(1): 47-49.
- [39] 牛仁杰, 朱进, 向琦. 我国耐火粘土矿产资源分类及综合利用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2016(1): 43-45.
NIU R J, ZHU J, XIANG Q. Classification and comprehensive utilization of refractory clay Mineral resources in China[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2016(1): 43-45.
- [40] 秦正, 杜春彦, 王二锋, 等. 我国耐火粘土矿产资源可持续利用对策研究[J]. 矿产综合利用, 2021(6): 1-6+25.
QIN Z, DU C Y, WANG E F, et al. Research on sustainable utilization of refractory clay resources[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2021(6): 1-6+25.
- [41] 周丽, 冯琦, 李远兵, 等. 煤系高岭土在耐火材料中的应用[J]. 耐火材料, 2021, 55(3): 272-276.
ZHOU L, FENG Q, LI Y B, et al. Application of coal measure kaolin in refractories[J]. Refractories, 2021, 55(3): 272-276.
- [42] 张利珍, 吕子虎, 谭秀民, 等. 我国煤系共生伴生矿物资源及开发利用现状[J]. 中国矿业, 2012, 21(11): 59-61.
ZHANG L Z, LV Z H, TAN X M, et al. Development and utilization of co-associated mineral resources in coal measures in China[J]. China Mining Industry, 2012, 21(11): 59-61.
- [43] 姜玉芝, 贾嵩阳. 硅藻土的国内外开发应用现状及进展[J]. 有色矿冶, 2011, 27(5): 31-37.
JIANG Y Z, JIA S Y. Development status and progress of diatomite at home and abroad[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2011, 27(5): 31-37.
- [44] LUO Z M, CHENG F M, WANG T, et al. Suppressive effects of silicon dioxide and diatomite powder aerosols on coal mine gas explosions in highlands[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16(9): 2119-2128.
- [45] 赵中华, 张健, 盛雪茹, 等. 硅藻土基固体酸催化剂的制备及催化酯化性能[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1169-1174.
ZHAO Z H, ZHANG J, SHENG X R, et al. Preparation and catalytic esterification of diatomite based solid acid catalyst[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(1): 1169-1174.
- [46] 石瑞琦. 硅藻土吸附剂对水体中重金属离子的吸附性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
SHI R Q. Study on adsorption performance of diatomite adsorbent for heavy metal ions in water [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [47] 王德利, 任辉, 张宇航, 等. 我国煤系石墨资源开发利用现状及对策建议探讨[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(6): 8-10+39.
WANG D L, REN H, ZHANG Y H, et al. The development and utilization status and countermeasures of coal measure graphite resources in our country[J]. Coal Geology in China, 2022, 34(6): 8-10+39.
- [48] SHEN S, WANG J, WU Z, et al. Graphene quantum dots with high yield and high quality synthesized from low cost precursor of aphanitic graphite[J]. Nanomaterials, 2020, 10(2): 375.
- [49] 李阔, 刘钦甫, 张帅, 等. 煤系石墨显微组分与结构特征[J]. 矿物学报, 2021, 41(1): 101-108.
LI K, LIU Q F, ZHANG S, et al. Maceral and structure characteristics of coal measure graphite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(1): 101-108.
- [50] ZHANG H, LI K, SUN J, et al. The structural evolution and mutation of graphite derived from coal under the influence of natural igneous plutonic intrusion[J]. Fuel, 2022, 322: 124066.
- [51] 王文峰, 王文龙, 刘双双, 等. 煤中轴的赋存分布及其在利用过程中的迁移特征[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 65-80.
WANG W F, WANG W L, LIU S S, et al. Occurrence, distribution and migration of uranium in coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 65-80.
- [52] 刘东原, 赵永椿, 张军营, 等. 煤中轴及其在燃烧过程中的迁移行为研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 175-181.
LIU D Y, ZHAO Y C, ZHANG J Y, et al. Research progress of uranium in coal and its migration behavior during combustion[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 175-181.
- [53] SU X, LIU Z, YAO Y, et al. Petrology, mineralogy, and ore leaching of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos Basin, North China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 127: 103768.
- [54] YANG Z, LI Y, NING Y, et al. Effects of oxidant and particle size on uranium leaching from coal ash[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, 317(2): 801-810.
- [55] 傅丛, 丁华, 陈文敏. 我国油页岩与煤共生资源分布及综合利用[J]. 煤质技术, 2021, 36(3): 1-13.
FU C, DING H, CHEN W M. Distribution and comprehensive utilization of symbiotic resources of oil shale and coal in China[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(3): 1-13.
- [56] 王宇, 龙帅. 油页岩干馏技术综述[J]. 河南化工, 2019, 36(11): 6-10.
WANG Y, LONG S. Retorting technology of oil shale[J]. Henan Chemical Industry, 2019, 36(11): 6-10.
- [57] 毕彩芹, 胡志方, 汤达祯, 等. 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 402-423.
BI C Q, HU Z F, TANG D Z, et al. Progress in coal measure gas research and important scientific problems to be solved[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 402-423.
- [58] 黄宇. 煤层气综合利用现状及趋势研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(19): 248-249.
HUANG Y. Research on current situation and trend of comprehensive utilization of coalbed methane[J]. Engineering Technology Research, 2020, 5(19): 248-249.

- 2020, 5(19): 248–249.
- [59] 孙雄伟, 张枫, 张宝权, 等. 煤系地层致密气薄储层地震预测方法——以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(7): 1165–1174.
SUN X W, ZHANG F, ZHANG B Q, et al. Seismic prediction method of tight gas thin reservoir in coal measure strata: A case study of Daning-Jixian block, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(7): 1165–1174.
- [60] 张学庆, 李贤庆, 李阳阳, 等. 煤系页岩气储层研究进展[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(2): 59–66.
ZHANG X Q, LI X Q, LI Y Y, et al. Research progress of coal measure shale gas reservoir[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(2): 59–66.
- [61] LU Y Y, ZHANG H D, ZHOU Z, et al. Current status and effective suggestions for efficient exploitation of coalbed methane in China: a review[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(11): 9102–9123.
- [62] 张利媛, 邹雪净, 白宸瑞, 等. 双碳背景下天然气水合物开发的研究思路[J]. 石化技术, 2022, 29(10): 223–225+239.
ZHANG L Y, ZOU X J, BAI C R, et al. Research ideas of gas hydrate development under dual-carbon background[J]. *Petrochemical Technology*, 2022, 29(10): 223–225+239.
- [63] ZHAO J, ZHU Z, SONG Y, et al. Analyzing the process of gas production for natural gas hydrate using depressurization[J]. *Applied energy*, 2015, 142: 125–134.
- [64] WANG Y, LANG X, FAN S, et al. Review on enhanced technology of natural gas hydrate recovery by carbon dioxide replacement[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(5): 3659–3674.
- [65] KE W, CHEN D. A short review on natural gas hydrate, kinetic hydrate inhibitors and inhibitor synergists[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(9): 2049–2061.

Research Progress on Comprehensive Utilization of Associated Mineral Resources in Coal-bearing Strata in China

GUO Ziyi^{1,2}, LIU Jianrong³, GUO Zhibin^{1,2}, FAN Ruikang^{1,2}, ZHOU Enhui^{1,2}

1. Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization (China University of Mining & Technology), Ministry of Education, Xuzhou 221116, China;

2. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Inner Mongolia Shanghaimiao Mining Industry Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 016200, China

Abstract: Coal is the basic energy of our country. The associated mineral resources in coal-bearing strata have many kinds and large reserves. It can be divided into metal minerals, non-metallic minerals and energy minerals. Deepening the comprehensive processing and utilization of associated mineral resources in coal-bearing strata is in line with the major needs of national energy resources processing and utilization. This paper expounded the occurrence, distribution characteristics, processing and utilization of metal (germanium, gallium, aluminum and rare earth elements), non-metallic (pyrite, kaolin, bentonite, refractory clay, diatomite, graphite) and energy minerals (uranium, oil shale, coal measure gas, natural gas hydrate) in coal-bearing strata, analyzed the opportunities and challenges faced by the comprehensive utilization of associated mineral resources in coal-bearing strata under the background of "Double-Carbon Policy" and looked forward to the development prospect of extending the coal-bearing strata industry chain, focusing on the development of key technologies, promoting the classification and connotation reform of associated mineral resources in coal-bearing strata, and improving the management scheme of mining rights. It provides a reference for the study of comprehensive utilization of coal measures associated mineral resources in the future.

Keywords: coal germanium; rare earth; associated mineral resources; resource utilization; comprehensive utilization

引用格式: 郭子一, 刘建荣, 郭志宾, 樊瑞康, 周恩会. 我国煤系共伴生矿产资源综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 1–9.

GUO Ziyi, LIU Jianrong, GUO Zhibin, FAN Ruikang, ZHOU Enhui. Research progress on comprehensive utilization of associated mineral resources in coal-bearing strata in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6): 1–9.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn