

“煤系战略性金属矿产成矿理论与分布规律”专题

煤系中战略性金属矿产资源:意义和挑战

代世峰¹,刘池洋²,赵 蕾¹,刘晶晶³,王西勃¹,任德怡¹

(1.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 西北大学 地质学系,陕西 西安 710069;3.中国矿业大学 国际煤地质学研究中心,江苏 徐州 221116)

摘 要: 战略性金属矿产资源对国民经济发展和国防安全具有重要作用。煤是特殊的沉积有机岩石,在其形成过程的特定地质条件下,可以富集战略性金属,并在煤系中形成大型或超大型金属矿床。由于煤系战略性金属矿床不断被发现,世界各国对煤系战略性金属矿产高度重视,使其成为矿产资源勘探的重要领域和重要方向。基于煤系战略性金属矿产的丰度和规模、粉煤灰中金属元素(如锆、镓、铝、铀等)现有提取利用情况和其他金属开发潜力评估,煤系战略性金属矿产的开发利用表现出了良好的前景,将为战略性金属资源增储和环境保护(如燃煤引起的环境污染控制和碳中和目标的实现)发挥重要作用。然而,煤系战略性金属矿产在成矿理论、勘探和提取的理论与技术等方面的研究时间尚短、研究问题复杂和难度大,面临诸多难题或挑战。在成矿理论方面存在的诸多关键科学问题中,核心难题包括:成煤全过程中有机质(矿产)和无机质(矿产)的相互作用及其效应、金属成矿 4 个过程(物质供给/形成—物质迁移—金属富集—后期改造保存)和盆地演化 3 个阶段(沉积物充填—成岩作用—改造就位)之间的时空配置规律。在勘查技术方面存在的诸多关键技术问题中,其核心技术难题是煤系中战略性金属元素丰度和组合与地球物理参数的定量表征。煤系战略性金属的类型、赋存环境、组合样式的多样性,造成传统的或单一的勘探技术难以适应煤系中大部分金属矿床的勘探。在提取技术方面存在的挑战是除了个别金属外(如锆、铀、铝等),煤系(或粉煤灰)中大部分战略性金属具有低品位和难提取的特征。正确认识煤系中战略性金属矿产资源现有研究状况、重要的科学和社会意义,以及面临的机遇和挑战,对实现战略性金属矿产的增储、资源评价和推动煤系金属资源的开发利用具有重要作用。

关键词: 煤;煤系;战略性金属;矿产资源;粉煤灰

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)05-1743-07

Strategic metal resources in coal-bearing strata:Significance and challenges

DAI Shifeng¹,LIU Chiyang²,ZHAO Lei¹,LIU Jingjing³,WANG Xibo¹,REN Deyi¹

(1.School of Geosciences & Surveying Engineering,China University of Mining & Technology-Beijing,Beijing 100083,China;2. Geology Department,Northwest University,Xi'an 710069,China;3.International Research Center for Coal Geology,China University of Mining & Technology,Xuzhou 221116,China)

Abstract: Strategic metal resources are extremely important in economic development and defense security. Coal is a particular sedimentary organic rock,which can be rich in strategic metals and subsequently form large or super-large ore deposits under some specific geological conditions. Given that the strategic metal ore deposits in coal-bearing strata

收稿日期:2022-01-04 修回日期:2022-02-09 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.MJ22.0011

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902001);国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91962220);中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZX20201400001051)

作者简介:代世峰(1970—),男,山东日照人,教授,博士生导师。E-mail:daishifeng@gmail.com

引用格式:代世峰,刘池洋,赵蕾,等.煤系中战略性金属矿产资源:意义和挑战[J].煤炭学报,2022,47(5):1743-1749.

DAI Shifeng,LIU Chiyang,ZHAO Lei,et al. Strategic metal resources in coal-bearing strata:Significance and challenges[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(5):1743-1749.



移动阅读

have been continuously discovered and their promising prospect, they have been paid much attention in all countries around the world, and therefore, strategic metal resources in coal-bearing strata are now an important research area of mineral resources exploitation. Based on the abundance, mineralization scale, the extraction situation of metals (e.g., Ge, Ga, Al, and U) from coal ash, and the feasibility of potential industrial utilization of other metals from coal ash, the strategic metal resources in coal-bearing strata present an promising prospect and provide opportunities from providing additional reserves and environmental protection (environmental pollution control and the Target implementation of carbon neutralization). However, in addition to the complex of the scientific questions and difficulties, the research on ore-forming theory, exploitation and exploration, and extraction technologies has not been fully carried out for a long time; hence, this research faces big challenges. For the ore-forming theories, the interaction between organic matter and inorganic matter throughout the coal-forming process, the space-time relation and configuration between four coal-forming procedures (sources-migration-accumulation-preservation) and three stages of basin evolution (sediment filling-diagenesis-deformation and position) are not clear. For exploitation technologies, the varieties of the ore types, occurrence of ore beds, and associations of metals lead to unsuitability of traditional or a single exploration technology to the strategic metal ore deposits in coal-bearing strata. For extraction technology, with the exceptions of some metals (e.g., Ge, U, and Al), most strategic metals in coal-bearing sequences are characterized by low grade and difficult extraction. Therefore, correct understanding of the opportunities and challenges of strategic metal ore deposits in coal-bearing strata is important for providing additional reserves of strategic metals and properly evaluate their exploration, exploitation and utilization.

Key words: coal; coal-bearing strata; strategic metals; mineral resources; coal ash

战略性金属矿产资源在新材料、新能源、信息技术、航天航空和国防军工等产业领域具有不可替代性^[1],直接关系到国民经济持续发展和国防安全。由于它们在自然界的储量相对较少且分布高度不均,存在较高供应受限风险,特别是 20 世纪 80 年代以来,全球矿产资源日趋紧缺,大部分国家面临着经济发展导致的矿产资源短缺的巨大压力,世界各国对其高度重视,因此寻找和研发新型矿产资源对保障国家的资源安全具有重要意义^[2]。

煤炭是一种特殊的沉积有机岩石,其形成过程(包括泥炭堆积、压实成岩、后期改造等)复杂,在其形成过程中的特殊地质和地球化学条件下,可以富集战略性金属,并且在丰度上可以和传统的金属矿床相当,在规模上可以形成大型或超大型金属矿床^[2-4],因此成为传统金属矿产的重要补充,也成为世界产煤国家的前沿研究课题。特别是 2014 年以来,世界产煤国家对煤和煤系中包括稀土元素在内的战略性金属的研究倍加关注(“煤和煤系中战略性金属矿产”以下简称“煤系金属矿产”)。一些欧洲国家^[5-6]、俄罗斯^[7-9]、南非^[10]、中国^[2,4,11-14]、美国^[15-16]等产煤诸国均对此进行了研究,并陆续发现了煤系中系列战略性金属矿床。2021 年 12 月,中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心与科睿唯安联合向全球发布了《2021 研究前沿》和《2021 研究前沿热度指数》报告,在地球科学领域 Top10 热点

前沿中有 4 个属于地理学、3 个属于地质学、3 个属于大气科学的研究;其中,“煤中稀土元素地球化学研究”继 2018 年再次入选地质学的热点前沿。

美国对煤中稀土元素的研究特别重视,涉及的部门广、立项速度快、资金投入多^[4]。美国能源部投入巨资研发煤、煤灰、煤矸石、酸性矿井水中稀土元素的分布和提取技术,美国能源部国家技术实验室专门成立了煤中稀土元素的研究和发展计划。杜克大学、肯塔基大学、弗吉尼亚理工学院暨州立大学、伊利诺伊大学、北达科他大学、怀俄明大学、德克萨斯大学奥斯汀分校、美国联邦地质调查局等众多高等院校和科研院所参与了该项研究,涉及的研究区包括美国的主要含煤盆地(如阿巴拉契亚盆地、圣胡安河—拉顿—黑山盆地、伊利诺伊盆地、波德河盆地、尤盈塔盆地、格林河—温德河盆地、墨西哥湾盆地、阿拉斯加盆地等)^[15-16]。

2019 年,中国国家自然科学基金委员会立项的“战略性关键金属超常富集成矿动力学重大研究计划”中,对煤系金属矿产的重点项目和培育项目也进行了立项。2021 年科技部实施了“战略性矿产资源开发利用”重点专项,对煤系金属矿产也专门立项,旨在深入系统研究煤系金属矿产的分布规律,研发地质勘查技术和分离提取技术等。

一些学者对煤系金属矿产的资源进行了论述^[2,4,17-18],包括煤系金属矿产的类型、丰度和开发利

用品位、富集成矿机理和规律、成矿专属性、金属元素赋存状态、矿床时空分布特征、成矿规模和矿产资源特点等。虽然煤系金属矿产的开发利用表现出良好的前景,基于煤系金属矿产的资源特点,相关研究也面临诸多困难和挑战。

1 煤系金属矿产资源开发利用的基础和意义

早在 100 a 前,煤中部分高度富集的金属及其利用价值就引起了关注(如美国怀俄明州和犹他州煤中的金和银)^[3]。第二次世界大战结束后,煤中铀是美国和前苏联核工业材料的主要来源,成为煤中金属元素工业化开发利用的里程碑^[4,19]。20 世纪 60 年代,前苏联和捷克斯洛伐克实现了从煤灰中工业化提取锆^[3]。到目前为止,煤中锆的提取是煤中金属元素工业化开发利用最成功的实例^[4]。2011 年,中国神华集团建立了从粉煤灰中提取铝和镓的实验工厂^[19],2018 年建立了提取铝和镓的工业化示范生产线。值得特别注意的是,目前众多的研究表明,从粉煤灰中提取稀土元素在技术和经济上都是可行的^[3,4,15,17-19]。从煤系金属矿产的丰度和规模、粉煤灰中金属元素(如锆、镓、铝、铀等)现有提取利用的情况及其他金属潜在开发利用的可行性来看,煤系金属矿产的开发利用表现出了良好的应用前景,将为战略性金属资源增储和环境保护(如燃煤引起的环境污染控制和碳中和目标的实现)发挥重要作用。

1.1 中国煤炭地质的区域特色为煤系金属矿产的研究提供了有利条件

中国是世界上成煤条件最复杂的国家之一。中国煤炭资源丰富、成煤时代多、分布地域广阔、煤类齐全多样、成煤地质背景因地而异。中国的主要成煤时代达 6 个:晚石炭世—早二叠世、晚二叠世、晚三叠世、早—中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世、古近纪—新近纪^[20]。与传统的战略性金属矿床相比,大部分煤中战略性金属矿产的含量较低。但是,在所有的成煤期均发现了战略性金属高度矿化的煤层(或地层)或富集成矿的实例^[17]。在煤炭资源丰富的西南地区、鄂尔多斯盆地、山西、内蒙古、新疆等地区的煤系中,均有战略性金属富集并成矿的诸多实例。这些地区包含了中国 14 个亿吨级大型煤炭基地的 10 个,并且大部分含煤盆地构造背景和成煤过程复杂,这为煤系中战略性金属的矿化提供了有利条件^[17,20],并且金属元素矿化具有类型复杂、组合样式多样、成矿物质多元的特征。

同时,这些煤炭基地将影响中国未来的煤炭能源战略格局。对这些大型煤炭基地中煤系金属矿床的

研发,不仅在全国煤炭资源循环利用中具有带动和示范作用,对世界范围内煤系金属矿床的研究和开发也具有极大的推动作用。这些煤炭基地也是世界著名的中—东亚成矿带的重要组成部分,该研究也会带动和指导中—东亚成矿带及世界其他地区煤系金属矿床的研究和勘探。这些煤炭基地地域的特色性和多种战略性金属矿产资源成矿的复杂性,充分体现了我国的自然优势和资源特色。同时这些煤炭基地地理位置重要,在地域上既是衔接东部经济较发达地区和西北和西南部经济欠发达地区的枢纽,它又可就近得到东部经济较发达地区的科技支援和经济支持,提领和推动西部的经济发展,又可为促进东部进一步发展提供能源矿产等基础原材料。

1.2 煤系金属矿产的开发利用是实现环境保护的重要举措

粉煤灰是煤炭燃烧后产生的主要固体废弃物,它可长期堆积并占用大量的土地资源;粉煤灰中的有害元素经雨水淋溶作用后,会对周围的土壤和水资源造成污染,粉煤灰的扬尘也会造成空气污染^[4,21]。因此,粉煤灰的综合利用不仅具有良好的经济效益,也可在很大程度上缓解环境污染问题,从而变废为宝、变害为利,节约矿床开采成本,实现煤炭经济的良性循环发展。目前我国粉煤灰主要应用于建筑、环保和农业领域,但是整体综合利用率低,在提取战略性金属、其他有用组分及高附加值利用领域的利用率不足 5%^[21],具有很大的利用提升空间。因此,积极推进煤炭高效洁净和循环利用,走安全清洁低碳利用的绿色之路,寻找和利用煤系金属矿产是实现环境保护(污染物控制和“碳中和”目标)的重要举措。

1.3 煤系是战略性金属矿产增储的重要来源

SEREDIN 和 FINKELMAN^[3]列出了世界上矿化煤中锆、铀、稀土、金、银、铍、钨、钼、镓、锑、铟、铯、钨等金属的含量(灰基),均表明一些煤灰中战略性金属在丰度上可与传统的金属矿床相当或更高^[3]。在规模上,煤系金属矿床往往是大型或超大型矿床,这主要受煤炭资源的赋存特点决定的,即与传统的金属矿床相比,煤炭的资源量巨大,分布面积广,煤层厚度大,空间分布稳定^[2,4];同时,煤系金属矿产不仅分布在煤层本身,而且也可赋存于煤层顶底板、夹矸,或者煤系中正常的沉积岩、火山灰蚀变黏土岩或凝灰岩中^[2,4]。因此,煤或煤系为战略性金属矿产不仅提供了增储的可能,并且是其中某些矿种的重要或主要来源(如煤中锆)^[2-4,17-18]。

1.4 煤系金属矿产是完善已有成矿理论和突破重大地质难题的新途径

煤系中不同类型战略金属矿产具有成矿的独特性(或专属性),可以用来预测和指导矿床的勘探和开发。我国煤系中战略性金属矿产类型多、成矿过程复杂,已经发现的有锆、钒、锂、稀土、铀-铼-硒、镓-铝、铈-锆-稀土-镓等矿产^[2],它们各具特定的地质成矿条件和赋存环境,对其来源、富集成矿过程、时空分布规律的解剖与总结,有望带动和引领国内外煤系中战略性金属矿产的研究和勘探。

与传统的金属矿床相比,有机质在煤系中战略金属矿产的成矿过程中具有重要作用,因此,煤系中战略性金属矿产是研究有机质(矿产)和无机质(矿产)相互作用的难得案例,其成矿机理处于学科前沿。对其研究将会发展、补充和完善已有成矿理论,在国际基础科学前沿领域中将占有重要一席之地。

与常规沉积岩相比,煤炭在形成过程中对所经受的各种地质作用更为敏感,通过煤系中战略性金属矿床的有机岩石学、矿物学和地球化学记录,可揭示古地理、古气候、蚀源区以及区域地质构造演化等重大科学问题,并在这些方面取得原始创新成果。

煤系金属矿产的物质来源和富集成矿,是在复杂的地质构造环境和重要的地球动力学过程中进行和完成的,深刻体现了中国大陆的地质个性、自然优势和资源特色,可从新的视角、更广阔的领域丰富和发展中国区域地质和矿床学理论,属国家的重大需求与前沿科学问题密切结合的重要命题。

1.5 以往工作为规模化开发利用煤系金属矿产筑建了较高平台

以往研究表明,煤系(包括石煤)中工业化开发利用的元素有铀、锆、钒、硒、镁、镓、铝等^[4],这些元素的成功开发利用为煤系中其他战略性金属的勘查和提取利用提供了经验。众多研究结果均表明,煤中稀土元素的开发利用在技术和经济上都是可行的^[5,15]。

研究表明,多种战略性金属往往在煤系中共存富集,为多种金属的综合开发利用和经济效益的提升提供了可能。煤系中战略性金属矿床不仅种类多、组合多样,而且均属于大型或超大型矿床^[4],可以为煤系中战略性金属的持续开发利用提供保障。值得注意的是,虽然我国的传统稀土矿产资源量相对较为丰富,但其资源量只占世界的 38%,并且我国的稀土产量几乎支撑了全球稀土消耗,作为不可再生的宝贵资源,稀土元素的高产和高消费量持续性问题值得高度重视;煤系作为稀土资源的重要后备补充和可能的主要来源,应该作为勘查和开发的重点,美国等发达国

家已经在此方面进行了很多研究工作,并取得了重要研究进展。

与传统的金属矿床相比,已经发现的煤系金属矿床空间分布稳定,地层分界和围岩特征明晰;并且煤系中不同的金属矿产在成矿过程与赋存条件方面各具专属性(个性),有利于判识和开采;在提取技术方面,研究表明,粉煤灰颗粒细小,部分金属元素在不同粒径级别和不同物相的粉煤灰中分异明显,便于分离和提取^[4,21]。

2 煤系金属矿产面临的理论与技术方面的难题或挑战

虽然煤系金属矿产对国家战略性资源增储方面切实可行,前景良好,在环境保护和实现碳中和目标等方面将发挥重要作用,同时,在理论方面为补充和完善已有成矿理论和解决重大地质问题提供了可能,但由于该领域研究时间尚短、研究问题复杂和难度大,存在诸多科学和技术问题尚未得到解决,例如煤系金属矿产来源的特殊地球动力学过程和机制,多种战略性金属耦合成矿作用;煤系金属矿产的赋存状态与机理,煤系金属矿产的分布规律及其赋存的构造环境;煤系金属矿产的地球物理响应等。在诸多科学和技术问题中,一些核心科学和技术难题的解决对引领煤系金属矿产的成矿理论研究、勘查技术和分离提取技术的研发等具有带动作用,主要包括以下 4 个方面。

2.1 成矿理论方面的关键科学问题与挑战

在基础理论方面,与传统的战略性金属矿床相比,煤系金属矿产成矿作用的显著特色表现为分散金属元素的富集及其与有机质矿产(煤)共(伴)生。煤和煤系中金属元素的来源是多元、多期的,有地表(如富集战略性金属的蚀源区)、空中(如碱性火山灰)、浅部(如地下水)和深部(如深部热液、岩浆活动),以及盆地基地或周边的花岗岩类岩石,均可作为战略性金属的来源,并可发生在沉积充填、埋藏成岩和后生改造各个阶段。有机质和无机质相互作用,有机物质对金属元素富集和保存的影响贯穿成矿的全过程,并且可以发生于成煤的各阶段。揭示泥炭堆积和煤化(变质)作用各阶段全过程中金属元素的来源和有机物质对金属元素富集地球化学行为的影响,是煤系金属矿产成矿需要解决的关键科学问题。

前人对泥炭和低阶煤中金属元素的来源及其与有机质相互作用做了许多研究^[22],但由于物质来源的多样性和相互作用的复杂性,仍有诸多问题尚待攻克。特别是随着煤阶的升高,煤的芳构化程度逐渐加强,给有机质和无机质相互作用的研究增加了难度。

煤系金属矿产成矿作用所经历的“蚀源区供给(和蚀源区形成)—物质迁移—金属富集—后期改造保存”4个过程,是在盆地沉积物“堆积—成岩—后期改造”3个演化阶段中发生和发展的,探讨这4个过程与3个阶段不同组合形式在时空配置框架下的成矿模式,是揭示战略性金属富集成矿和分布规律的关键,也是研究煤系战略性金属分布规律的主要难题和挑战。值得提出的是,对于由蚀源区供给形成的煤系金属矿床,不仅要研究蚀源区的位置和性质,还要研究蚀源区的形成过程和机制,这也对区域地质历史演化、古气候和古地理特征具有重要的启示意义。

2.2 在勘查技术方面的难题及原因

由于煤系金属矿产类型多,与传统金属矿床相比,大部分金属元素丰度较低,目前地球物理勘查技术的精度,难以定量表征或准确判识煤系中大部分金属元素的丰度、组合关系、时空展布等特征;适应于煤系中某种战略性金属矿产的地球物理和地球化学勘查技术,难以适应煤系中其他类型的矿床。产生这些难题的地质原因复杂多样,具体表现有:

(1) 成因类型复杂。有火山灰成因(煤中铈—铈—镓—稀土矿床)、蚀源区供给成因(煤中镓铝矿床)、火山灰和热液流体改造复合成因(煤系中铈—铈—镓—稀土矿床)、同生热液淋溶成因(煤中镓矿床)、后生热液淋溶成因(煤和煤系中铈矿床)、海底喷流成因(煤中铈矿床)、热液和沉积环境复合成因(石煤中钒矿床)等^[2-4,17,20]。

(2) 矿床赋存条件复杂。煤系金属矿床的赋存条件的复杂表现为矿床的基底和围岩的岩性各不相同。例如,煤中镓矿床的盆地基底或盆地周边为花岗岩;煤系中铈—铈—镓—稀土矿床的底部为玄武岩(它们中间有正常的沉积岩)或者为灰岩;煤中铈—铈—镓—稀土矿床均含有碱性火山灰夹矸(Tonstein);后生成因的煤中铈矿床的围岩与砂岩型铈矿床密切相关,同生的煤中铈矿床的顶底板通常为灰岩等^[2-4,17,20]。

(3) 金属组合形式复杂。煤系金属矿床有镓、铈—铈—稀土、镓—铈—镓—金—银—镓—铝—铈—铈—镓—稀土、铈—铈—铈—铈—稀土等组合类型。

(4) 放射性核素复杂。有表现为放射性异常的煤系金属矿床,如镓—铈—铈—铈—镓—稀土、铈—铈—铈—铈—稀土;也存在没有放射性异常的煤系金属矿床,如镓、镓—金—银—镓—铝等类型^[2-4,17,20]。尽管铈—铈—稀土—镓矿床在测井曲线上表现为自然伽马的高正异常^[4,17,23],但对此异常的原因尚不清楚。

因此,煤系不同类型战略性金属矿产的成矿过程、

赋存环境和组合形式不同,煤系金属矿床与煤层的依存关系各异,具有明显的专属性特征。依据矿床专属性特征选择合适的地质、地球化学、地球物理(电法、磁法、地震、放射性)勘查技术是实现煤层中与煤系中不同类型战略性金属矿床精细协同勘探的关键。

2.3 在资源开发评价方面的标准探讨

对煤系金属矿产开发的评价,应主要考虑以下因素:金属元素的丰度和资源量、开采和提取分离技术、提取分离的经济性、矿产的战略重要性、开发过程中的环境问题等。以下重点讨论丰度和资源量问题。

评价煤系中战略性金属矿产的开发,要求金属元素要达到一定的品位和成矿规模^[24]。但是,我国在煤系金属矿产的成矿标准制定方面尚不完善,已经制定的煤中镓的工业品位尚值得探讨,包括标准制定的依据(例如金属的含量基准是全煤基还是灰基)和其他重要因素(如金属所赋存的煤层厚度,共伴生的其他金属元素的丰度和赋存状态等)^[24-25]。文献[4]在系统总结国内外文献基础上,提出了煤和煤系中18种(类)战略性金属矿产的开发利用品位,包括铈(1 000 $\mu\text{g/g}$)、镓(300 $\mu\text{g/g}$)、钒(1 000 $\mu\text{g/g}$)、硒(500~800 $\mu\text{g/g}$)、镓(100 $\mu\text{g/g}$;如果镓和铝联合提取,镓的品位为50 $\mu\text{g/g}$)、稀土元素(氢化物,1 000 $\mu\text{g/g}$)、钇(300 $\mu\text{g/g}$)、钪(100 $\mu\text{g/g}$)、铈(300 $\mu\text{g/g}$)、铈(2 000 $\mu\text{g/g}$)、钼(1 000 $\mu\text{g/g}$)、铈(1 $\mu\text{g/g}$)、钨(1 000 $\mu\text{g/g}$)、金+铂+钯(2 $\mu\text{g/g}$)、银(10 $\mu\text{g/g}$)、铍(300 $\mu\text{g/g}$)、铈(1 000 $\mu\text{g/g}$)、铈(150 $\mu\text{g/g}$)。需要指出的是,以上金属的开发利用品位,均是以灰基为基准的含量,而不是全煤基准的含量,这是因为:迄今为止,煤中战略性金属的提取,均是从粉煤灰中提取,而不是从原煤中提取;对灰分产率较低的煤层,其对应的煤灰中金属含量可能会很高,并可以达到开发利用的价值。同时,对共伴生的金属元素,需要特别考虑那些储量少但用途更大的金属在所有共伴生金属中所占的比例。例如,对煤中稀土元素开发利用价值的评价,不仅要考虑稀土元素总含量及其赋存状态,也要考虑紧缺的稀土元素(如钆、铈、铈、铈、铈、铈)在总稀土元素含量中所占的比例^[26-27]。

对多种金属共伴生富集的矿产和对提取技术要求不高的矿产,其品位要求可有所降低。对以上煤系金属矿产的开发潜力评价,还需要在矿产基础研究和技术研发实践中进一步验证和完善。

2.4 在提取利用方面的技术难题与环境问题

煤中富集的战略性金属在煤高温燃烧后的粉煤灰中会更为富集,加之粉煤灰的粒度较细,故战略性金属物质一般从粉煤灰中提取和分离^[4,21]。例如内

蒙古准格尔煤中镓和铝的质量分数分别为 10.6 μg/g 和 10.56%,在粉煤灰中其质量分数分别为 100 μg/g 和 51%^[28]。内蒙古乌兰图嘎煤中锆的质量分数均值为 273 μg/g,在其粉煤灰中锆的质量分数为 1.5%^[29];云南临沧煤中锆的质量分数均值为 1 294 μg/g,在其粉煤灰中锆的质量分数可达 3.9%^[29]。

在提取煤系战略性金属方面面临的最具有挑战性的难题是,矿产的低丰度和对赋存状态的精确定困难。粉煤灰的物相组成通常主要为玻璃质或莫来石(根据燃烧工况和入料原煤的不同,物相组成差异明显),战略性金属元素的赋存状态大多赋存在这 2 种物相中。例如 KOLKER 等^[16]运用离子探针微区分析技术,验证了稀土元素主要赋存在硅铝玻璃质中^[16]。值得提出的是,富锆粉煤灰中锆的存在形式与其他金属元素不同,锆主要以氧化物形式存在(GeO₂晶体),该氧化物中可含有砷、锑、钨等元素,形成(Ge, As) O_x, (Ge, As, Sb) O_x, (Ge, As, W) O_x和(Ge, W) O_x等晶体化合物;飞灰中的玻璃体、含钙铁酸盐、SiO₂等晶体中均可含有锆^[29]。因此,粉煤灰中战略性金属的提取,需要包含破坏莫来石等晶体结构以及玻璃质,释放金属元素等过程^[30]。在提取过程中,首先要查明金属元素在粉煤灰中的赋存状态,然后有针对性地采用化学或物理(如粒度分级、密度分级)与化学相结合的技术方法,释放结晶矿物或玻璃质中的金属元素后再进行提取;同时需充分考虑所采用的提取技术的经济与环保问题。

除了考虑技术上可行、经济上合理外,在战略性金属提取过程中有害物质对环境和人体健康的危害,也是煤系战略金属物质分离提取面对的挑战。煤系中不仅多种战略性金属往往共同富集,而且也经常富集有害元素,例如内蒙古乌兰图嘎煤中锆矿床中富集砷、汞、铊等,该矿床相应的富锆粉煤灰中砷和汞的质量分数分别为 9 215.0 和 67.5 μg/g^[29],是目前文献报道中砷和汞质量分数最高的粉煤灰。临沧锆矿床中铍的质量分数高达 2 000 μg/g,含量之高,非常罕见^[31]。虽然有的锆提炼厂对砷进行了污染控制处理,但是对其他有害元素的控制尚未关注。煤中镓铝矿床经常富集铅和氟,例如在内蒙准格尔镓铝矿床中铅和氟的质量分数均值分别为 35.7 μg/g 和 101.0 μg/g^[28]。煤中铀矿床中经常富集钼、硒、铬等有害元素^[32-33],例如在贵州贵定上二叠统富铀煤中,氟、铬、硒和钼的质量分数分别为 2 076.0, 391.0, 35.3, 364.0 μg/g。

对煤和煤系中战略性金属提取利用的问题,还面临不同提取源选择的问题,除了粉煤灰和煤系中非煤

岩石外,还有酸性矿井水^[34]以及煤炭开采和加工利用中产生的矸石、煤的气化产物、煤的洗选产品等。需要研究战略性关键金属物质在这些提取源中的丰度、赋存状态、富集机理,以及提取的可行性等。

3 结 语

基于我国能源资源的禀赋特征,在可预见的未来,以煤炭为主体的能源结构不会发生根本性改变,因此对煤系中战略金属矿产成矿理论的基础研究及其勘探开发和综合利用的研究至关重要。煤系金属矿产是保障战略性金属供给的重要补充,是发展循环经济、提高综合经济效益的有效途径,同时也是减轻环境污染,实现碳中和目标,建立资源节约型、清洁生产型、生态环保型社会的重要组成部分。

虽然已有的研发进展表明煤系金属矿产的开发利用具有良好的应用前景,由于该领域研究时间短,其成矿理论和提取技术研发难度大,诸多关键的核心科学和技术问题或难题尚未得到解决,存在诸多挑战。同时,该领域的基础研究和技术研发涉及学科多,因此这些关键问题的解决,可以推动煤炭地质、金属矿产地质、地球化学和地球物理勘探、冶金、选矿、煤炭加工利用、大数据科学等其他相关学科的交叉融合与发展。

参考文献(References):

[1] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金,2019(2):106-111.
ZHAO Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues [J]. Science Foundation of China, 2019(2): 106-111.

[2] 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,2020,65:3715-3729.
DAI Shifeng, ZHAO Lei, WEI Qiang, et al. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China: Enrichment types and distribution [J]. Chines Science Bulletin, 2020, 65: 3715-3729.

[3] SEREDIN V V, FINKELMAN R B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76: 253-289.

[4] DAI S F, FINKELMAN R B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 186: 155-164.

[5] BLISSETT R S, SMALLEY N, ROWSON N A. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content [J]. Fuel, 2014, 119: 236-239.

[6] FIKET Ž, MEDUNIC G, FURDEK TURK M, et al. Rare earth elements in superhigh-organic-sulfur Raša coal ash (Croatia) [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 194: 1-10.

[7] ARBUZOV S I, CHEKRYZHOV I Y, FINKELMAN R B, et al. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu,

- Tb, Yb, Lu) with examples from coals of north Asia (Siberia, Russian far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 206: 106–120.
- [8] NECHAEV V P, CHEKRYZHOV I Y, VYSOTSKIY S V, et al. Isotopic signatures of REY mineralization associated with lignite basins in South Primorye, Russian Far East [J]. *Ore Geology Review*, 2018, 103: 68–77.
- [9] SEREDIN V V, ARBUZOV S I, ALEKSEEV V P. Sc-bearing coals from Yakhlink deposit, Western Siberia [J]. *Doklady Earth Sciences*, 2006, 409: 967–972.
- [10] WAGNER N J, MATIANE A. Rare earth elements in select Main Karoo Basin (South Africa) coal and coal ash samples [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 196: 82–92.
- [11] LI B Q, ZHUANG X G, QUEROL X, et al. Geological controls on enrichment of Mn, Nb (Ta), Zr (Hf), and REY within the Early Permian coals of the Jimunai Depression, Xinjiang Province, NW China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 215: 103298.
- [12] ZHOU C, DU J, ZHANG Y, et al. Redistribution and transformation mechanisms of gallium and germanium during coal combustion [J]. *Fuel*, 2021, 305: 121532.
- [13] HUANG W H, WAN H, FINKELMAN R B, et al. Distribution of uranium in the main coalfields of China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2012, 30: 819–835.
- [14] 宁树正. 中国煤中金属元素矿产资源 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 295.
- [15] TAGGART R K, HOWER J C, DWYER G S, et al. Trends in the rare earth element content of U. S. - Based coal combustion fly ashes. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 5919–5926.
- [16] KOLKER A, SCOTT C, HOWER J C, et al. Distribution of rare earth elements in coal combustion fly ash, determined by SHRIMP-RG ion microprobe [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 184: 1–10.
- [17] DAI S F, YAN X Y, WARD C R, et al. Valuable elements in Chinese coals: A review [J]. *International Geology Review*, 2018, 60: 590–620.
- [18] SEREDIN V V, DAI S F, SUN Y Z, et al. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy efficient technologies [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 31: 1–11.
- [19] SEREDIN V V. From coal science to metal production and environmental protection: A new story of success commentary [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 90: 1–3.
- [20] DAI S F, REN D Y, CHOU C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3–21.
- [21] 王建新, 李晶, 赵仕宝, 等. 中国粉煤灰的资源化利用研究进展与前景 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(12): 3834–3841.
- WANG Jianxin, LI Jing, ZHAO Shibao, et al. Research progress and prospect of resource utilization of fly ash in China [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(12): 3834–3841.
- [22] ESKENAZY G M. Aspects of the geochemistry of rare earth elements in coal: An experimental approach [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 38: 285–295.
- [23] DAI S F, ZHOU Y P, ZHANG M Q, et al. A new type of Nb (Ta) – Zr (Hf) – REE – Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 83: 55–63.
- [24] 代世峰, 任德貽, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床; 成因类型、赋存状态和利用评价 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1707–1715.
- DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits; Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1707–1715.
- [25] DAI S F, JIANG Y F, WARD C R, et al. Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China; Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the Jungar Coalfield [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 98: 10–40.
- [26] SEREDIN V V. A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores [J]. *Geology of Ore Deposits*, 2010, 52: 428–433.
- [27] SEREDIN V V, DAI S F. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 67–93.
- [28] DAI S F, REN D Y, CHOU C L, et al. Mineralogy and geochemistry of the No. 6 coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 253–270.
- [29] DAI S F, WANG X B, SEREDIN V V, et al. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China; New data and genetic implications [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 90: 72–99.
- [30] WANG Z, DAI S F, ZOU J H, et al. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 203: 1–14.
- [31] DAI S F, WANG P P, WARD C R, et al. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang, Yunnan, southwestern China; Key role of N_2 – CO_2 -mixed hydrothermal solutions [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152: 19–46.
- [32] DAI S F, SEREDIN V V, WARD C R, et al. Enrichment of U – Se – Mo – Re – V in coals preserved within marine carbonate successions; geochemical and mineralogical data from the Late Permian Guiding Coalfield, Guizhou, China [J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50: 159–186.
- [33] ZENG R S, ZHUANG X G, KOUKOUZAS N, et al. Characterization of trace elements in sulphur-rich Late Permian coals in the Heshan coal field, Guangxi, South China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 61: 87–95.
- [34] HEDIN B C, HEDIN R S, CAPO R C, et al. Critical metal recovery potential of Appalachian acid mine drainage treatment solids [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 231: 103610.