

研究论文

山西煤系锂镓铝分布特征和开发利用前景

刘汉斌^{1,2}, 马志斌¹, 郭彦霞¹, 程芳琴¹

(1. 山西大学 资源与环境工程研究所, 山西 太原 030006; 2. 山西省煤炭地质局, 山西 太原 030006)

摘要:煤中共伴生金属矿产是指在煤系地层中,与煤共生或伴生在一起,在煤炭开采时共同产出的具有工业价值或工业利用前景的金属矿产。山西煤炭资源丰富,储量巨大,年煤炭产量常年占全国年煤炭产量的 25% 左右,火电发电量常年占全省总发电量 90% 以上。山西煤与煤基固废中蕴藏着大量可供工业开发和利用的金属矿产,如煤中锂、镓、铝等。但目前尚无从全省的角度对山西煤中共伴生金属矿产的分布进行研究,极大地限制了从宏观政策层面对煤中共伴生矿产的战略开发。笔者根据山西煤系地层中锂镓铝的研究数据,分析了目前山西煤系共伴生锂、镓、铝的分布特征和成矿前景。认为,山西煤中太原组煤中锂含量显著大于山西组,而铝镓小于山西组;煤层夹矸中锂镓含量显著大于煤层中。山西宁武煤田平朔矿区,沁水煤田晋城矿区、霍西煤田霍州矿区、西山煤田古交矿区太原组主采煤层以及西山煤田夹矸中的锂具有良好的煤系伴生锂矿成矿潜力;山西煤中镓和铝异常高值较普遍,广泛分布于山西山西省中北部地区,且整体上从北向南依次递减。山西煤系锂镓铝资源在山西电厂粉煤灰和高铝煤矸石储量巨大,具有良好的工业开发前景,亟需对山西粉煤灰中锂和煤层夹矸中锂镓的边界品位和最低工业品位进行划定,以实现资源的循环和高值化利用。作为 2 种特殊的矿产资源,粉煤灰和煤矸石的综合利用应从源头开始做顶层设计,因地制宜、分类分级梯级利用。

关键词:山西煤; 共伴生; 锂; 镓; 铝; 开发利用

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)05-0039-08

Distribution characteristics and development and utilization prospect of lithium gallium aluminum in Shanxi coal system

LIU Hanbin^{1,2}, MA Zhibin¹, GUO Yanxia¹, CHENG Fangqin¹

(1. Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Coal Geological Bureau, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The coal-associated metal minerals refer to metal minerals with the industrial value or industrial utilization prospects in coal mining that are co-produced or associated with coal in coal-bearing strata. Shanxi is a large coal province in China, which has abundant coal resources and huge reserves. The annual coal output accounts for about 25% of the national annual coal output. The annual thermal power generation accounts for more than 90% of the total power generation in the province. The Shanxi coal and coal-based solid waste contain a large number of the metal minerals for industrial development and utilization, such as lithium, gallium and aluminum in coal. However, there is no research on the distribution of the associated metal minerals in Shanxi coal from the perspective of the province, which greatly limits the strategic development of the coal-related companion minerals from the macro policy level. Based on the existing research data of lithium, gallium and aluminum in Shanxi coal-bearing strata, the distribution characteristics and metallogenic prospects of lithium, gallium and aluminum in Shanxi coal system were analyzed and discussed. It is believed that the lithium content in Taiyuan Formation coal in Shanxi coal is significantly larger than that in Shanxi group, while the aluminum and gallium is smaller than that in the Shanxi group. The content of lithium gallium in coal seam gangue is significantly larger than that in coal seam. In Shanxi Ningwu

收稿日期: 2019-03-04; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19030415

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603101); 山西省煤基低碳科技重大专项资助项目(MC2016-05)

作者简介: 刘汉斌(1986—), 男, 山西吕梁人, 博士研究生, 从事煤炭地质研究与管理工。E-mail: liuhanbin203@163.com。

通讯作者: 程芳琴, 教授, 从事固体废物资源化利用工作。E-mail: cfangqin@163.com

引用格式: 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 Hanbin, MA Zhibin, GUO Yanxia, et al. Distribution characteristics and development and utilization prospect of lithium gallium aluminum in Shanxi coal system[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 39-46.



移动阅读

Coalfield Pingshuo mining area, Qinshui coalfield Jincheng mining area, Huoxi coalfield Huozhou mining area, Xishan coalfield Gujiao mining area, Taiyuan Formation main coal seam and the gangue of Xishan coalfield, the Lithium has good mineralization potential for coal-related associated lithium; The abnormally high values of gallium and aluminum in Shanxi coal are common, and the gallium and aluminum widely are distributed in the central and northern parts of Shanxi Province, and decrease from north to south as a whole. The Shanxi coal-based resources of lithium-gallium-aluminum have huge reserves of the fly ash and high-alumina coal gangue in Shanxi Power Plant, which has good prospects for industrial development. It is urgent to demarcate the boundary grade and minimum industry grade of lithium and gallium in coal seams and lithium and in Shanxi fly ash in order to achieve resource recycling and high value utilization. As two special mineral resources, the comprehensive utilization of fly ash and coal gangue should be made from the source to the top layer design, according to local conditions, classify and classify cascade utilization.

Key words: Shanxi coal; co-occurrence; lithium; gallium; aluminum; development and utilization

0 引言

煤中共伴生金属矿产是指在煤系地层中,与煤共生或伴生在一起,在煤炭开采时共同产出的具有工业价值或工业利用前景的金属矿产,包括锂、镓、锆、稀土、铝、铁等^[1-3]。山西煤炭资源丰富,储量巨大,从北到南分布 18 个煤炭国家规划矿区。近年来,随着煤炭开发和煤质分析测试技术的进步,山西煤系地层中发现具有重大开发利用价值的锂、镓、铝等金属矿产资源^[4-6]。对此,学者对山西不同矿区煤中锂、镓、铝等共伴生矿产进行了研究,秦勇等^[7]基于煤样煤质数据发现,山西某些勘查区煤中存在镓的地球化学异常,具有一定的成矿前景;孙玉壮^[8]研究了宁武煤田高铝煤中铝、镓、锂、稀土等共伴生矿产的开发与利用情况;朱华雄等^[9]分析了山西煤中铝的分布变化规律并估算华北地区可供工业利用煤中铝资源量;Zhao 等^[10]发现,沁水煤田晋城矿区煤中锂的异常高值与煤中绿泥石富集有关。目前大部分研究均针对某个矿区或煤田,较少从全省的角度对山西煤中共伴生金属矿产的分布进行研究,限制了从宏观政策层面对煤中共伴生矿产的战略开发。此外,目前研究均局限于定性研究,未考虑煤中金属矿产的工业指标问题,且仅将研究对象设定为煤和实验室灰化灰,而煤矸石和电厂粉煤灰中锂、镓、铝的工业指标研究鲜见报道,限制了其再开发和利用。粉煤灰和煤矸石作为煤炭生产的一种终端产品和共生资源,是 2 种主要的煤基工业固废。山西全省年煤炭产量占全国的 25% 左右,火电发电量占 90% 以上,加快推进山西粉煤灰、煤矸石的资源化、梯级、分类分质利用,实现全省粉煤灰、煤矸石的高值化利用和资源循环利用对于山西煤炭“减”、“优”、“绿”发展、实现从“煤老大”到“排头兵”的历史性跨越具有重要的现实意义。本文基于山西煤中锂、镓、铝已有研究数据,分析了山西煤系共伴生锂、镓、铝的宏观分布特征以及存在的问题,指出山西煤

中共伴生金属矿产的开发利用前景和研究重点,以期从战略层面为实现山西煤炭与煤基固废的清洁、绿色、高效、循环利用,构建全省清洁低碳用能模式与能源革命综合改革提供思路与启发。

1 分布特征

1.1 煤中锂

锂被广泛用于原子反应堆、新能源电池等,是现代高新科技的支撑,锂资源具有重大的战略意义。我国煤中锂的平均含量为 $31.8 \mu\text{g/g}$ ^[11],华北地区煤中锂的平均含量为 $43.91 \mu\text{g/g}$ ^[12]。2015 年山西平朔矿区煤中锂镓资源调查评价项目发现,平朔矿区 4、9 号煤层中锂的平均含量分别为 128.27、152 $\mu\text{g/g}$,煤灰中的二次富集浓度达 0.35% (Li_2O),超过工业品位^[6]。近年来,在沁水煤田晋城矿区、霍西煤田霍州矿区、西山煤田古交矿区太原组主采煤层以及西山煤田山西组、太原组夹矸中(图 1)发现了锂的异常分布(表 1)。可以看出,锂含量异常高值点中,太原组煤中锂含量大于山西组,煤层夹矸中锂含量大于煤层。

表 1 山西煤中锂含量与分布

Table 1 Content and distribution of lithium in

分布区	Shanxi coal		$\mu\text{g/g}$ 数据来源
	赋存层位		
	山西组	太原组	
宁武煤田	128.3(4号煤层)	152.0(9号煤层)	文献[13]
平朔矿区	—	237.5(11号煤层)	文献[14]
沁水煤田 晋城矿区	—	188.1(15号煤层)	文献[15]
霍西煤田 霍州矿区	—	94.0(10号)	文献[15]
西山煤田	285.9(2号夹矸)	—	文献[16]
古交矿区	—	493.0(8号夹矸)	文献[17]
	—	151.7(8号煤层)	文献[18]
西山煤田	109.0(2号夹矸)	138.0(8号夹矸)	文献[19]
西山矿区	283.0(3号夹矸)	—	

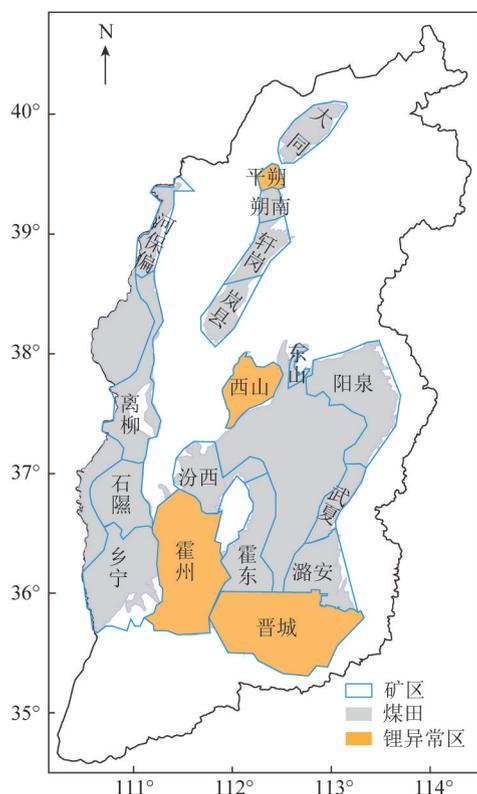


图1 山西煤中锂异常矿区分布

Fig.1 Distribution of lithium anomaly deposits in Shanxi coal

1.2 煤中镓

镓是煤中分布较为广泛的一种稀散元素,被称

为“电子工业的粮食”,是重要的战略金属。煤中镓含量为 $5 \sim 10 \mu\text{g/g}$ ^[20],中国煤中镓的平均含量为 $6.55 \mu\text{g/g}$ ^[11],其中 C-P 煤中镓的平均含量为 $17.9 \mu\text{g/g}$ ^[20],华北地区煤中平均含量为 $12.57 \mu\text{g/g}$ ^[12],而煤中镓含量大于 $30 \mu\text{g/g}$ 时具有工业价值^[21]。山西煤中镓的含量为 $0.6 \sim 57.0 \mu\text{g/g}$,平均 $13.68 \mu\text{g/g}$ ^[22],山西石炭二叠煤系地层中镓的高值点见表 2。

从表 2 可以看出,西山煤田古交矿区和西山矿区太原组和山西组夹矸中的镓含量均大于煤中镓的边界品位;宁武煤田平朔矿区煤层中镓异常较普遍,存在于山西组 4 号煤层及太原组 11 号煤层及部分 9、10 号煤层中。结合图 2 可以看出,山西煤系地层中镓异常含量较多存在于中北部地区,整体上山西组煤中镓含量大于太原组,显示沉积环境可能是影响煤中镓含量的一个重要因素^[24]。

1.3 煤中铝

煤中铝资源主要分布在高铝煤与高铝煤矸石中。高铝煤指燃烧后的灰分中 Al_2O_3 含量大于 35% 的煤^[9],高铝煤矸石指 Al_2O_3 含量大于 30% 的煤矸石^[25]。山西煤中铝的高值点见表 3,可以看出,山西多地的石炭二叠纪煤层煤灰中 Al_2O_3 含量均大于 30%,属于高铝煤。

表 2 山西煤中镓含量与分布

Table 2 Content and distribution of gallium in Shanxi coal

 $\mu\text{g/g}$

分布区	赋存层位		数据来源
	山西组	太原组	
西山煤田古交矿区	39.17(2号夹矸)	—	文献[16]
	—	63.75(8号夹矸)	文献[17]
西山煤田西山矿区	43.00(2号夹矸)	37.00(8号夹矸)	文献[19]
	40.00(3号夹矸)	—	
平朔矿区	36.11(4号煤层)	—	文献[13]
	35.70(4号煤层)	—	文献[14]
宁武煤田	—	32.35(9号煤层)	文献[8]
	—	31.80(10号煤层)	文献[7]
	—	40.01(11号煤层)	文献[23]
沁水煤田阳泉矿区	—	30.20(9号煤层)	文献[7]
大同煤田大同矿区	30.60~45.40(2号煤层)	—	文献[7]

从表 3 可知,山西中北部煤系地层煤中铝异常,且整体上北部煤中 Al_2O_3 含量大于南部;山西组煤中 Al_2O_3 含量高于太原组。研究表明^[9],大同煤田

石炭-二叠纪煤中 Al_2O_3 含量高于侏罗纪煤。

图 3 为山西主要高铝煤矸石矿区 Al_2O_3 含量分布^[25],可以看出,山西高铝煤矸石主要分布在宁武

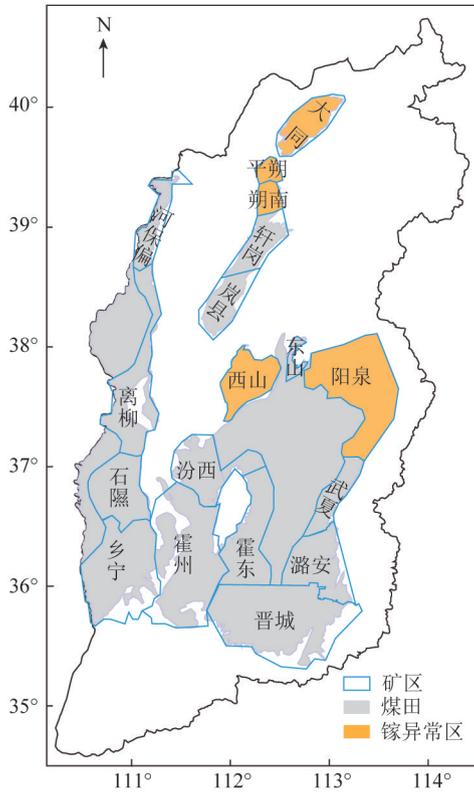


图2 山西煤中镓异常矿区分布

Fig. 2 Distribution of gallium anomaly in Shanxi coal

表3 山西高铝煤的含量与分布

Table 3 Content and distribution of high alumina coal in Shanxi

分布区	赋存层位			数据来源
	地层	煤层	Al ₂ O ₃ 含量/%	
宁武煤田平朔矿区	太原组	9号	40.70	文献[8]
大同煤田挖金湾矿	太原组	5号	43.63	
大同煤田南阳坡矿	太原组	5号	46.52	
河东煤田贺西煤矿	太原组	—	25.91	文献[9]
	山西组	—	35.44	
河东煤田高家塔井田	太原组	—	35.77	
	山西组	—	40.01	
西山煤田马兰矿	太原组	8号	38.48	文献[17]

煤田平朔矿区、河东煤田保偏矿区以及沁水煤田潞安矿区,山西北部地区煤矸石中 Al₂O₃ 含量大于中部地区,南部潞安地区煤矸石中 Al₂O₃ 含量最低,整体呈向南递减趋势,与高铝煤的分布相似。山西煤中铝异常矿区分布如图4所示。

2 资源利用前景

2.1 锂、镓资源量估算

不同学者基于各自的计算方法对山西不同矿区

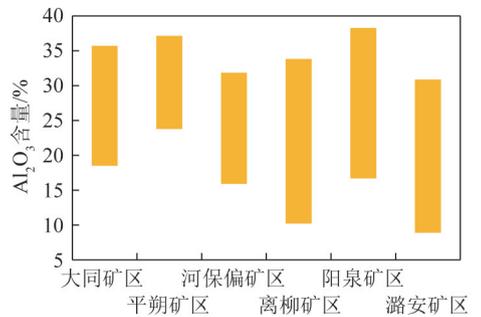
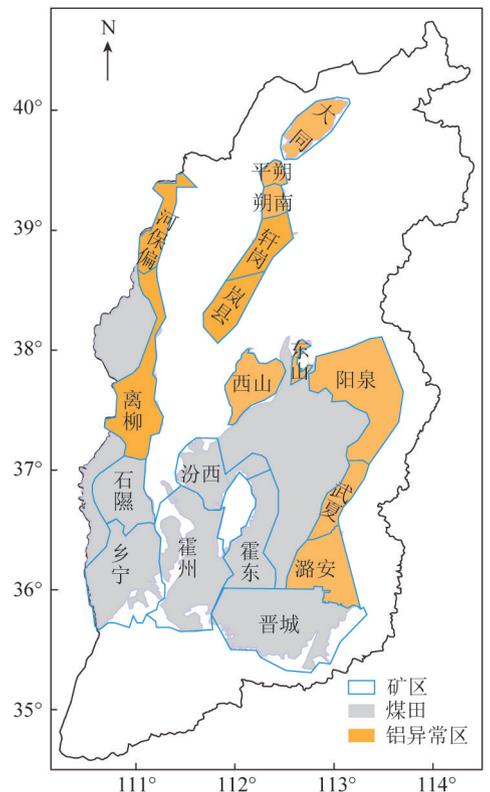
图3 山西主要高铝煤矸石矿区 Al₂O₃ 含量^[25]Fig. 3 Al₂O₃ content in the main high-alumina coal gangue mining area in Shanxi^[25]

图4 山西煤中铝异常矿区分布

Fig.4 Distribution of anomalous mining areas in Shanxi coal
煤中锂、镓资源量的计算见表4,可以看出,山西煤中锂主要存在于宁武煤田平朔矿区,镓分布较广(大同煤田、宁武煤田、西山煤田古交矿区及河东煤田离柳矿区和沁水煤田阳泉矿区),西山煤田夹矸中也有少量锂和镓存在。

2.2 煤系铝资源量估算

孙玉壮^[8]基于平朔矿区9号煤中 Al₂O₃ 质量分数和灰分,估算其 Al₂O₃ 的储量约为 3.7 亿 t。朱华雄等^[9]估算华北石炭二叠纪煤中可供工业开发利用的煤中铝资源量约 19.5 亿 t。根据文献^[25],截至 2012 年,山西高铝煤矸石堆存量达 2.9 亿 t,且每

表4 山西煤系锂、镓预测资源量

Table 4 Shanxi coal-based lithium and gallium

forecast resources 10^5 t

分布区	锂		镓		数据来源
	煤中锂	夹矸中锂	煤中镓	夹矸中镓	
大同矿区	—	—	30.42	—	文献[8]
平朔矿区	127.96	—	4.63	—	
古交矿区	—	—	6.84	—	文献[7]
马兰矿区	—	2.11~3.57	—	0.29~0.46	文献[26]
杜儿坪矿区	—	0.28~0.72	—	0.10	文献[19]
离柳矿区	—	—	4.15	—	文献[7]
阳泉矿区	—	—	12.25	—	文献[7]
合计	127.96	2.39~4.29	58.29	0.39~0.56	

年以 6 000 万 t 的速度增加,可推算出目前山西高铝煤矸石中 Al_2O_3 资源量不少于 2.67 亿 t。

2.3 工业指标

矿产工业指标指当前经济技术条件下,对原矿品质和开采条件提出的要求,主要包括边界品位和最低工业品位等。边界品位是对矿石中有益组分的最低要求,是区分矿石和围岩的最低品位界限^[21];最低工业品位是指在现行经济技术条件下,工业上能够盈利的最低品位^[21]。煤中锂、镓、铝的工业指标见表 5。

表5 煤中锂、镓、铝的边界品位与工业品位

Table 5 Grade and industrial grade boundaries of lithium, gallium, aluminum in coal

矿种	边界品位	工业品位	数据来源
煤中锂	120	—	文献[27]
煤中镓	30	50	文献[1,28]
	—	50	文献[7]
灰中镓	110	160	文献[7,28]
煤中铝	$Al_2O_3 \geq 30\%$	$Al_2O_3 \geq 40\%$	文献[28]
	$Al_2O_3 \geq 35\%$	$Al_2O_3 \geq 40\%$	文献[9]

注:煤中锂、镓和灰中镓的边界品位和工业品位单位为 $\mu\text{g/g}$ 。

根据《稀有金属矿产地质勘查规范》(DZ/T 0203—2002),伴生氧化锂的综合回收指标 Li_2O 含量 $\geq 0.2\%$,同时考虑煤层灰分和资源充分利用,孙玉壮等^[27]建议煤中锂的回收利用的指标应为 $120 \mu\text{g/g}$ 。秦勇等^[7]根据统计数据,建议煤中镓的边界品位为 $30 \mu\text{g/g}$,最低工业品位为 $50 \mu\text{g/g}$,粉煤灰中镓的边界品位为 $110 \mu\text{g/g}$,最低工业品位 $160 \mu\text{g/g}$ 。代世峰等^[1]综合考虑煤层厚度、煤的灰分产率,认为具有开发价值的煤中镓含量至少应为 $50 \mu\text{g/g}$,同时煤灰分中 $Al_2O_3 > 50\%$ 。宁树正等^[28]根据

煤中铝、镓资源特征及资源条件影响权重,将 Al_2O_3 含量 30% 作为粉煤灰中评价边界品位,40% 作为工业品位, $30、50 \mu\text{g/g}$ 作为煤中镓的分界特征, $110、160 \mu\text{g/g}$ 作为粉煤灰中镓的分界特征。依据《铝土矿、冶镁菱镁矿地质勘查规范》(DZ/T 0202—2002),我国沉积岩铝土矿床的边界品位为 $Al_2O_3 \geq 40\%$,朱华雄等^[9]在分析华北石炭二叠煤中铝平均含量的基础上,建议将煤灰分中 $Al_2O_3 \geq 35\%$ 为煤中铝的边界品位, $Al_2O_3 \geq 40\%$ 作为煤中铝的工业品位。从表 1、2 可以看出,煤层夹矸中锂镓含量大于煤层中,说明煤层夹矸具有良好的锂、镓成矿前景。但截至目前,关于夹层夹矸中锂、镓的边界品位和最低工业品位的鲜见研究,制约了煤系夹矸中锂、镓的工业开发和利用。此外,鉴于不同地区煤中灰分差异较大,且煤中锂主要在电厂粉煤灰中提取,因此亟需对灰中锂的工业指标进行划定。

3 开发前景分析和建议

3.1 存在的问题

开发利用煤系铝资源可缓解国内铝土矿资源短缺的矛盾,增加铝资源有效供给,保障产业安全,促进铝产业的可持续发展。粉煤灰中提取氧化铝技术主要有酸法、碱法和碱烧-酸浸出联合法^[29]。酸法提铝在一定条件下具有铝溶出率高、残渣量少、成本低、能耗低等优点,但存在耗酸量大、对设备要求高等缺点,难以工业化应用。碱法工艺相对成熟,目前也有建成的工业生产线,但也存在硅钙渣产量大、能耗较高、成本高等问题,如目前较为成熟且建成投产的是采用预脱硅-碱石灰烧法提取氧化铝,生产 1 t 氧化铝产生 2.2 t 硅钙渣^[30],制约了其工业化发展。碱焙烧-酸浸出联法有工艺复杂,目前仍处在试验探索阶段。煤矸石提取氧化铝需经高温煅烧、酸溶、水解、碱溶、酸化、焙烧等步骤,技术复杂,尚处于实验室探索阶段^[25]。燕可洲等^[31]采用盐酸酸浸法浸取山西潞安矿区煤矸石中的氧化铝,氧化铝的溶出率达 62.4% 以上,消纳 1 000 kg 煤矸石可得到 131.6 kg 氧化铝。

近年来,由粉煤灰、煤矸石生产氧化铝技术研究获得了一些进展,但总体还存在诸多不足。① 在技术层面,目前提取氧化铝的工艺仍存在成本高、固废产生量大、能耗高等缺点,特别是生产过程中“三废”的产生与排放,严重制约工业化运营。② 综合提取、协同利用的问题。目前大部分工艺仅限于粉煤灰中氧化铝的分离、提取与利用,未涉及粉煤灰中硅、铁及其他三稀元素,如锂、镓、稀土等的综合利

用,粉煤灰、煤矸石的的综合利用效率较低。③ 国家政策倾斜和重视程度不够,缺乏税收和财政支持。粉煤灰作为重要的煤基工业固废,政府应加大财政补贴和税收优惠,以及加大科研投入和企业扶持力度,从而促进粉煤灰、煤矸石高资源化利用。

3.2 开发前景

燃煤发电作为煤炭的主要消耗方式,每年产生大量的粉煤灰。据统计,2015年全国电煤消耗量占全国煤炭消费量的46%^[29]。按25%的平均灰分计算,每消耗1t煤即产生0.25t粉煤灰,电厂粉煤灰已成为我国工业固废的最大单一排放源^[1]。煤中锂、镓、铝赋存于煤的无机组分中,经燃烧后随有机质的挥发,在煤灰分中相对富集。作为煤系共伴生矿产,煤系锂、镓、铝资源不具备单独开采的条件,只能作为煤系共伴生矿产,在燃煤灰分中提取^[32-34]。煤矸石做为煤矿开采的副产品,广泛产于煤矿巷道掘进、开采和煤炭分选中,产量与煤炭产量成正比,其排放量相当于煤炭产量的12%^[35]。山西煤炭产量巨大,年煤炭产量占全国煤炭产量的1/4。2015年,山西全省排放煤矸石12 714万t、粉煤灰3 921万t,煤矸石综合利用率66.1%,粉煤灰综合利用率67.1%^[36],且以水泥、混凝土、墙体材料等建筑材料为主要途径。目前,山西堆存煤矸石9亿t、粉煤灰2.8亿t^[36]。锂、镓属于战略性稀缺矿产,应用于新能源与航空工业中,是电子工业的基础。我国铝资源丰富,但近年来由于经济的快速发展,铝土矿进口量猛增,铝资源供应压力巨大。电厂高铝粉煤灰和高铝煤矸石作为潜在的铝资源,开发利用前景广阔。从电厂粉煤灰和高铝煤矸石中提取锂、镓、铝等金属矿产,不仅可消耗粉煤灰和煤矸石库存,实现粉煤灰、煤矸石的高值化利用,而且可增加国家锂、镓、铝的战略储备,同时减少和减轻因粉煤灰、煤矸石堆存产生的巨大土地压力和环境压力,前景巨大。

3.3 开发利用建议

电厂粉煤灰和煤矿煤矸石作为重要的煤基工业固废,其高值化利用对于山西煤炭行业走“减、优、绿”发展之路,建立绿色技术创新体系具有重要的现实意义,但长期以来粉煤灰和煤矸石被视为工业垃圾而非资源。针对这2种特殊的矿产资源,首先应改变对其的认识和定位,从煤基工业固废转为“矿产资源”,从“消耗式”利用转变为“节约式”利用,从明显的有害固废转变为具有潜在利用价值的宝贵资源;其次,要重视煤矸石和粉煤灰的梯级、分类分质利用。对煤矸石而言,将收到基低位发热量 $>6\ 270\text{ kJ/kg}$ 的煤矸石用来发电; Al_2O_3 含量(质量

分数) $>40\%$ 的煤矸石可用来提取含铝化工产品;高岭石含量(质量分数) $>80\%$ 的煤矸石可用来制备高岭石;灰分 $<85\%$ 、有机质含量 $>20\%$ 煤矸石,可用来制作微生物肥料和有机复合肥等。对于电厂粉煤灰,也应根据粉煤灰中不同的物质特征进行分类使用,实现“应提尽提”、“能用尽用”,因地制宜采取不同的利用方式;第三,应鼓励低热值煤机组掺烧煤矸石综合利用发电,积极开展煤矸石多元素、多组分梯级利用,推进煤矸石高值化利用,提取有用矿物元素;推广粉煤灰分选和粉磨技术,加强精细化、高科技化产品的研发,推广粉煤灰分离提取高附加值产品,推动高铝粉煤灰提取氧化铝及其配套项目建设。

4 结 论

1) 垂向上,太原组煤中锂含量大于山西组,铝、镓含量小于山西组,煤层夹矸中锂、镓含量大于煤层。横向上,山西宁武煤田平朔矿区山西组、太原组煤层,沁水煤田晋城矿区、霍西煤田霍州矿区、西山煤田古交矿区太原组主采煤层以及西山煤田夹矸中的锂含量超过目前煤中锂的工业指标,具有良好的煤系伴生锂矿成矿潜力;山西石炭二叠纪含煤地地层中镓和铝异常高值较普遍,广泛分布于山西省中北部地区,且整体上从北向南依次递减。

2) 山西煤中锂主要存在于宁武煤田平朔矿区;煤中镓在大同煤田、宁武煤田、西山煤田古交矿区及河东煤田离柳矿区和沁水煤田阳泉矿区。西山煤田夹矸中存在锂、镓异常高值点;煤中铝主要存在于平朔矿区和大同煤层太原组地层中,山西高铝煤矸石中 Al_2O_3 资源储量巨大。

3) 山西电厂粉煤灰和高铝煤矸石中锂、镓铝储量巨大,具有良好的工业开发前景,亟需对粉山西煤灰中锂和煤层夹矸中锂、镓的边界品位和最低工业品位进行划定,以实现资源的循环和高值化利用。

4) 粉煤灰和煤矸石应定位为特殊的矿产资源,从源头做好顶层设计,因地制宜做好粉煤灰、煤矸石的梯级分质利用;在技术层面,应大力推广粉煤灰分选和粉磨技术,加大对高铝粉煤灰提取氧化铝、锂、镓项目的研发和投入;适度发展煤矸石等低热值煤电厂的建设,积极开展煤矸石、粉煤灰多元素、多组分梯级利用。

参考文献(References):

- [1] 代世峰,任德怡,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): 1707-1714.
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.
- [2] 孙升林, 吴国强, 曹代勇, 等. 煤系矿产资源及其发展趋势[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(11): 1-11.
SUN Shenglin, WU Guoqiang, CAO Daiyong, et al. Mineral resources in coal measures and development trend [J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(11): 1-11.
- [3] 朱华雄, 陈寒勇, 章伟, 等. 华北煤中金属矿产的种类和分布特征[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 303-309.
ZHU Huaxiong, CHEN Hanyong, ZHANG Wei, et al. Metal mineral types and distribution characteristics in coal in Northern China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 303-309.
- [4] 卫宏, 陆昌后. 太原西山煤田煤层中的镓元素及其工业意义[J]. *山西矿业学院学报*, 1990(4): 382-386.
WEI Hong, LU Changhou. Gallium in the coal seam of Xishan coalfield in Taiyuan and its industrial significance[J]. *Journal of Shanxi Institute of Mining Technology*, 1990(4): 382-386.
- [5] 王钧漪, 王文峰, 李健, 等. 元素锗镓铈在大同煤田北部煤中的赋存特征[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(2): 117-121, 85.
WANG Junyi, WANG Wenfeng, LI Jian, et al. Occurrence characteristics of elemental lanthanum uranium in coal in the northern part of Datong coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(2): 117-121, 85.
- [6] 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心. 山西省平朔地区煤中锂镓资源调查评价项目技术研究报告[R]. 2012.
- [7] 秦勇, 王文峰, 程爱国, 等. 首批煤炭国家规划矿区煤中镓的成矿前景[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 21(1): 17-26.
QIN Yong, WANG Wenfeng, CHENG Aiguo, et al. Metallogenic prospects of gallium in coal from the first batch of coal national planning mining areas [J]. *China Coal Geology*, 2008, 21(1): 17-26.
- [8] 孙玉壮. 阴山南麓高铝煤研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [9] 朱华雄, 章伟, 宁树正, 等. 华北石炭-二叠煤中铝分布及资源前景[J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(6): 21-25.
ZHU Huaxiong, ZHANG Wei, NING Shuzheng, et al. Aluminum distribution in north China permo-carboniferous coal and its resource prospect[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(6): 21-25.
- [10] LEI Zhao, COLIN R Ward, DAVID French et al. Origin of a kaolinite-NH₄-illite-pyrophyllite-Chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng coalfield, Qinshui Basin, Northern China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 61-78.
- [11] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin. 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.
- [12] 代世峰, 任德貽, 李生盛, 等. 华北地台晚古生代煤中微量元素及 As 的分布 [J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(2): 111-114.
DAI Shifeng, REN Dezhen, LI Shengsheng, et al. Distribution of trace elements and s in Late Paleozoic coals in north China platform[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(2): 111-114.
- [13] 李华, 许霞, 杨恺. 山西平朔矿区 4 号煤中锂镓资源成矿地质特征研究[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(12): 17-19.
LI Hua, XU Xia, YANG Kai. Lithium and gallium resources metallogenic geological characteristics in coal No.4, Pingshuo mining area, Shanxi [J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(12): 17-19.
- [14] 刘帮军, 林明月, 褚光琛. 山西平朔矿区 4 号煤中镓的分布规律与富集机理[J]. *中国煤炭*, 2014(11): 25-29.
LIU Bangjun, LIN Mingyue, PEI Guangyu. Distribution and enrichment mechanism of gallium in No.4 coal in pingyu mining area, Shanxi Province [J]. *China Coal*, 2014(11): 25-29.
- [15] 宁树正, 邓小利, 李聪聪, 等. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2214-2225.
NING Shuzheng, DENG Xiaoli, LI Congcong, et al. Research status and prospect of metal element mineral resources in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2214-2225.
- [16] 蒲伟, 孙蓓蕾, 李珍, 等. 马兰 2 号煤层夹矸微量与稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(10): 1709-1716.
PU Wei, SUN Beilei, LI Zhen, et al. Geochemistry of trace and rare elements in No.2 coal seam parting in Malan coal mine and its geological implication [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10): 1709-1716.
- [17] 孙蓓蕾, 曾凡桂, 李美芬, 等. 西山煤田马兰矿区 8 号煤及其夹矸的微量与稀土元素地球化学特征 [J]. *煤炭学报*, 2010, (1): 110-116.
SUN Beilei, ZENG Fangui, LI Meifen, et al. Geochemistry characteristics of trace elements & rare earth elements (REEs) of No. 8 coal and parting in Malan Coal Mine, Xishan coalfield [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 110-116.
- [18] 孙富民. 西山煤田古交矿区 8 号煤层煤中锂的赋存规律 [J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(8): 196-201.
SUN Fumin. Occurrence regularity of lithium in No.8 coal seam of Gujiao mining area in Xishan coalfield [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(8): 196-201.
- [19] 杨亚丽, 文雪琴, 曾凡桂. 太原西山矿区杜儿坪井田夹矸地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(4): 763-771.
YANG Yali, WEN Xueqin, ZENG Fangui. Geochemistry of trace elements in partings of the Duerping Coal Mine, Xishan coalfield, Taiyuan (North China) and its geological implication [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(4): 763-771.
- [20] 任德貽, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 矿产资源工业要求手册编委会. 矿产资源工业要求手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [22] 刘东娜, 曾凡桂, 赵峰华, 等. 山西省煤系伴生三稀矿产资源研究现状及找矿前景 [J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 1-7.
LIU Dongna, ZENG Fangui, ZHAO Fenghua, et al. Status and prospect of research for three type coal-associated rare earth resources in coal measures in Shanxi Province [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(4): 1-7.

- [23] 周建飞,王金喜,白观累,等.山西平朔矿区11号煤中镓的分布特征及富集因素[J].煤炭技术,2014,33(11):82-84.
ZHOU Jianfei, WANG Jinxi, BAI Guanlei, et al. Distribution characteristics and enrichment factors of gallium in No. 11 coal in Pingyu mining area, Shanxi Province[J]. Coal Technology, 2014, 33(11): 82-84.
- [24] 李昌盛,刘汉斌,李森.河东煤田煤中镓的分布规律和工业前景分析[J].山东国土资源,2017,33(5):25-29.
LI Changsheng, LIU Hanbin, LI Miao. Distribution rule and industrial prospect analysis of gallium in coal in hedong coalfield [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(5): 25-29.
- [25] 赵海燕.我国高铝煤矸石资源与提铝技术产业化分析[J].矿产保护与利用,2014,38(1):54-58.
ZHAO Haiyan. Introduction of high alumina coal gangue resources and industrialization of alumina extraction technologies in china[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014, 38(1): 54-58.
- [26] 刘汉斌,马志斌,郭彦霞,等.太原西山煤田煤系锂镓赋存特征及工业前景[J].洁净煤技术,2018,24(5):26-32.
LIU Hanbin, MA Zhibin, GUO Yanxia, et al. Occurrence characteristics and industrial prospects of lithium and gallium in coal in Taiyuan Xishan coalfield [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 26-32.
- [27] 孙玉壮,赵存良,李彦恒,等.煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J].煤炭学报,2014,39(4):744-748.
SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, LI Yanheng, et al. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 744-748.
- [28] 宁树正,韩亮,朱世飞,等.基于AHP的灰色聚类法的煤中铝、镓资源评价体系[J].煤炭学报,2016,(2):316-323.
NING Shuzheng, HAN Liang, ZHU Shifei, et al. Evaluation of Al, Ga resources in coal measures based on AHP-GCA method [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 316-323.
- [29] 李晓光,丁书强,卓锦德,等.粉煤灰提取氧化铝技术研究现状及工业化进展[J].洁净煤技术,2018,24(5):1-11.
LI Xiaoguang, DING Shuqiang, JOW Jinde, et al. Research status and industrialization progress of extracting Al_2O_3 from fly ash [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 1-11.
- [30] 国家发展改革委办公厅.关于加强高铝粉煤灰资源开发利用的指导意的通知[Z].2011-02-15.
- [31] 燕可洲,郭彦霞,张俊才,等.潞安矿区煤矸石用于氧化铝提取的研究[J].煤炭转化,2014,37(4):85-90.
YAN Kezhou, GUO Yanxia, ZHANG Juncai, et al. Study on alumina extraction from coal gangue in Lu'an mining area [J]. Coal Conversion, 2014, 37(4): 85-90.
- [32] 黄炳香,赵兴龙,张权.煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架[J].中国矿业大学学报,2016,45(4):653-662.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, ZHANG Quan. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 653-662.
- [33] 袁亮.煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J].煤炭学报,2019,44(1):1-9.
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [34] 黄文辉,久博,李媛.煤中稀土元素分布特征及其开发利用前景[J].煤炭学报,2019,44(1):287-294.
HUANG Wenhui, JIU Bo, LI Yuan. Distribution characteristics of rare earth elements in coal and its prospects on development and exploitation [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 287-294.
- [35] 叶吉文,沈国栋,路露.煤矸石的危害及综合利用[J].中国资源综合利用,2010,28(5):32-34.
YE Jiwen, SHEN Guodong, LU Lu. Harm and comprehensive utilization of coal gangue [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28(5): 32-34.
- [36] 山西省经济和信息化委员会.山西省“十三五”工业资源综合利用和清洁生产发展规划[EB/OL].(2017-04-07).http://www.shanxiic.gov.cn/NewsDefault.aspx?pid=4_277_299_47449.xtj.