

# “以废治废”的CO<sub>2</sub>封存新思路——碱性固废 固化于地下废弃空间

钟秀平<sup>1,2</sup>, 陈晨<sup>1,2</sup>, 郭威<sup>1,2</sup>, 刘昆岩<sup>1,2</sup>, 刘祥<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:**我国目前的CO<sub>2</sub>封存能力距“碳达峰”、“碳中和”双碳目标的要求仍有较大差距,多元化的CO<sub>2</sub>地下封存方式并举对于助力实现碳达峰、碳中和目标具有重要的推动作用。本文在总结我国目前CO<sub>2</sub>地下封存现状、碳源碳汇分布的空间格局、碱性固废处理现状、碱性固废矿化CO<sub>2</sub>能力和地下废弃空间治理现状的基础上,提出了通过碱性固废对CO<sub>2</sub>进行矿化捕集,再将其以固态的形式输送到地下废弃空间的封存方式,实现“以废治废”。依据现有地下废弃空间总量、距离地级城市周边50 km以内的地下废弃空间量以及省域级地下废弃空间量分布,分别计算了相应的碱性固废包括粉煤灰、钢渣、电石渣封存量及CO<sub>2</sub>封存量,从封存总量和空间分布格局两方面证明了上述CO<sub>2</sub>封存方式的封存潜力,同时指出了该封存方式尚待开展的研究内容以及地质工程专业的优势。

**关键词:**双碳目标;CO<sub>2</sub>矿化;CO<sub>2</sub>地下封存;碱性工业固废;地下废弃空间;地质工程

**中图分类号:**X701 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0492-06

## A new approach to CO<sub>2</sub> storage by “treating waste with waste” : Solidified in underground waste spaces using alkaline solid waste

ZHONG Xiuping<sup>1,2</sup>, CHEN Chen<sup>1,2</sup>, GUO Wei<sup>1,2</sup>, LIU Kunyan<sup>1,2</sup>, LIU Xiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Lab of Ministry of Natural Resource for Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** The current CO<sub>2</sub> storage capacity is still far below the requirements of the “carbon peak” and “carbon neutrality” goals. Therefore, the diversified CO<sub>2</sub> underground storage methods play an important role in promoting the realization of dual carbon goals. Based on the summary of the current status of CO<sub>2</sub> underground storage, the distribution spatial pattern of carbon source and sink, the treatment of alkaline industrial solid waste, the CO<sub>2</sub> mineralization capacity of alkaline industrial solid waste, and the underground waste space, a storage method of mineralizing CO<sub>2</sub> using alkaline solid waste, and then transporting it into the underground waste space is proposed, which can realize the goal of “treating waste with waste”. Based on the total amount of underground waste space, the amount of underground waste space within 50km from prefecture-level cities, and the provincial-level distribution of underground waste space, the corresponding storage capacity of alkaline industrial solid waste including fly ash, steel slag, carbide slag storage, and CO<sub>2</sub> were calculated respectively. The storage potential of the aforementioned method was demonstrated from both the total storage amount and spatial distribution pattern. Moreover, further study of this method and the advantages in geological engineering is pointed out.

**Key words:** dual carbon goals; mineralization of CO<sub>2</sub>; underground storage of CO<sub>2</sub>; alkaline industrial solid waste; underground waste space; geological engineering

收稿日期:2023-05-25; 修回日期:2023-08-02 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.080

第一作者:钟秀平,男,汉族,1993年生,助理研究员,博士,地质工程专业,从事非常规油气资源钻采、二氧化碳地下封存方面的研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, zhongxp0189@jlu.edu.cn。

引用格式:钟秀平,陈晨,郭威,等.“以废治废”的CO<sub>2</sub>封存新思路——碱性固废固化于地下废弃空间[J]. 钻探工程,2023,50(S1):492-497.

ZHONG Xiuping, CHEN Chen, GUO Wei, et al. A new approach to CO<sub>2</sub> storage by “treating waste with waste”: Solidified in underground waste spaces using alkaline solid waste[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):492-497.

## 0 引言

实现“碳达峰”、“碳中和”双碳目标是全球大势、时代命题,关乎人类未来发展。二氧化碳捕集利用封存(CCUS)是减碳的重要途径。据国际能源署可持续发展情景的全球于2070年实现净零排放的目标,CCUS是第四大贡献技术,占累计减排的15%。我国目前已投运或建设中的CCUS示范项目约40个,捕集能力300万t/年,多以石油、煤化工、电力行业小规模驱油示范为主,尚未实现工业化示范,距离减排需求尚有较大距离<sup>[1]</sup>。此外,我国在过去长期的井工矿井开采过程中遗留了大量的地下废弃空间,其合理治理与资源化利用是当前亟待解决的问题。碱性工业固废大量产生于电力、钢铁等行业,我国大宗工业固废年产量平均36.63亿t,历史累计堆存量620亿t<sup>[2]</sup>,随着我国近年来对大宗固体废弃物的愈加关注,对其绿色、安全治理需求迫切。碱性工业固废含有的钙、镁氧化物反应活性高,具有较高的CO<sub>2</sub>封存潜力,利用碱性固废进行CO<sub>2</sub>封存近年来被广泛关注。因此,结合我国现有的CCUS封存能力、供需现状、地下废弃空间、碱性工业固废治理需求以及碱性固废对CO<sub>2</sub>的矿化能力,通过碱性固废对CO<sub>2</sub>进行矿化捕集,再将其以固态的形式输送到地下废弃空间,具有固碳安全、稳定、空间灵活、对封存空间要求低的特点,可以实现“以废治废”,是CO<sub>2</sub>封存极具前景的新思路。

## 1 我国CO<sub>2</sub>封存的工业化进程及特点

CCUS中的CO<sub>2</sub>封存方式主要包括CO<sub>2</sub>咸水层封存、CO<sub>2</sub>深部咸水层封存与采水(CO<sub>2</sub> Enhanced Saline Water Recovery, CO<sub>2</sub>-ESWR)、CO<sub>2</sub>枯竭油气藏封存(CO<sub>2</sub> Storage in Saline Aquifersalt Water, CO<sub>2</sub>-SDA)、CO<sub>2</sub>驱油封存(CO<sub>2</sub>-EOR)、CO<sub>2</sub>驱替煤层气封存(CO<sub>2</sub> Enhanced Coalbed Methane Recovery, CO<sub>2</sub>-ECBM)、CO<sub>2</sub>封存与铀矿地浸开采(CO<sub>2</sub>-based In-situ Leaching of Uranium, CO<sub>2</sub>-ILU)、运用含镁钙的碱性工业固废矿化封存等<sup>[3-5]</sup>。由于地下储集空间大且封存不占用地面空间,CO<sub>2</sub>地下封存是主要研究对象。我国目前已投运或建设中的CCUS示范项目约40个,其中CO<sub>2</sub>地下封存项目共23个,包括12个CO<sub>2</sub>-EOR、2个CO<sub>2</sub>-SSA、7个CO<sub>2</sub>-ECBM和两个CO<sub>2</sub>-ILU项目<sup>[5-7]</sup>,我国主要的CO<sub>2</sub>地质封存与利用示范工程及运行状态如表1所

示。数据显示我国目前在运行的CO<sub>2</sub>地质封存能力在220万t左右。

技术成熟度上,我国的CO<sub>2</sub>-ILU技术已经达到了商业应用阶段,CO<sub>2</sub>-EOR、CO<sub>2</sub>咸水层封存技术处于工业示范阶段,CO<sub>2</sub>-ECBM处于工程试验阶段,CO<sub>2</sub>-ESWR、CO<sub>2</sub>-SDR等技术处于或已完成基础研究阶段,尚未开展相关现场试验。目前我国总的CO<sub>2</sub>的封存能力300万t/年,而碳中和目标下2025、2030、2035、2040、2050和2060年的CCUS减排需求分别为0.24、2.30、2.49、6.30、10.25和14.1亿t(如图1)<sup>[1]</sup>。因此,对比表明以当前的CO<sub>2</sub>封存技术成熟度及封存能力,距离双碳目标下的减排需求尚有较大距离。多元化的CO<sub>2</sub>地下封存方式并举对于助力我国实现碳中和目标具有重要的推动的作用。

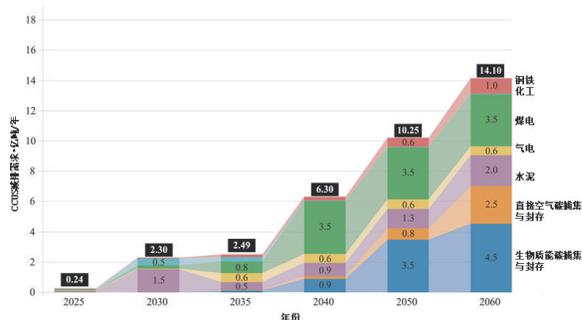
此外,当前的封存方式均直接将CO<sub>2</sub>注入地下储集空间,需保证CO<sub>2</sub>在地下保持超临界状态,这要求储集空间深度800m以深,1200~1500m为宜,且须有良好的圈闭性能<sup>[8]</sup>。我国适宜的CO<sub>2</sub>封存区域空间分布与含油气盆地分布特征基本相同,主要集中于松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、准葛尔盆地、四川盆地、和塔里木盆地<sup>[9]</sup>。而部分碳源集中地区位于东南沿海、河南、山东等地<sup>[10]</sup>,能开展封存的陆地沉积盆地面积小,分布零散,封存能力较小,导致该部分地区碳源分布与地下储集空间位置的不匹配。因此,针对我国CCUS的需求和发展现状及存在的限制,亟需开辟选址灵活、安全、低成本的CO<sub>2</sub>地下封存技术。

## 2 我国碱性固废治理现状及废弃地下空间现状

我国近年来对固体废物治理愈加关注,在《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中明确提出到2025年大宗固废综合利用率需达到60%<sup>[11]</sup>。但2011~2020年间,我国大宗工业固废年平均剩余量18.98亿t,平均综合利用率48.17%(如图2所示),且2018~2020年3年产量连续增加,截至2020年历史累计堆存量620亿t<sup>[2]</sup>。其中,2020年碱性工业固废包括粉煤灰、电石渣、钢渣的产生量分别为6.48、0.35、1.1亿t,利用率分别为77.62%、89.67%,钢渣低于40%,历史堆存量分别接近30、2、18亿t。统计结果表明我国碱性固废虽然综合利用率较高,但由于年产量大、历史堆存量,其合理治理仍然是生态文明建设中的重要问题。

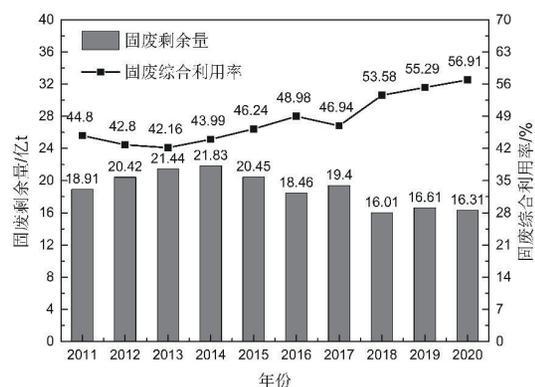
表 1 我国主要的 CO<sub>2</sub>地质封存与利用示范工程(改自文献<sup>[6]</sup>)

序号	项目名称	类型	年捕集量/10 <sup>4</sup> t	实施年份	目前状态
1	国家能源集团鄂尔多斯咸水层封存项目	咸水层封存	10	2011	停注
2	中国核工业集团有限公司通辽地浸采铀	地浸采铀	—	2006	运行中
3	新疆某铀矿地浸采铀示范工程	地浸采铀	—	2008	运行中
4	大庆油田EOR项目	EOR	20	2003	运行中
5	中石化华东油气田CCUS全流程示范项目	EOR	10	2005	运行中
6	吉林油田CO <sub>2</sub> -EOR研究与示范项目	EOR	43	2008	运行中
7	中石化胜利油田CO <sub>2</sub> -EOR项目	EOR	4	2010	运行中
8	延长石油煤化工CO <sub>2</sub> 捕集与驱油示范项目	EOR	5	2013	运行中
9	中石化中原油田CO <sub>2</sub> -EOR项目	EOR	10	2015	运行中
10	敦华石油-新疆油田CO <sub>2</sub> -EOR项目	EOR	5~10	2015	运行中
11	长庆油田CO <sub>2</sub> -EOR项目	EOR	5	2017	运行中
12	陕西国华锦界电厂15万t/a燃烧后CO <sub>2</sub> 捕集与封存全流程示范项目	EOR	15	2020	建设中
13	齐鲁石化-胜利油田CCUS项目	EOR	100	2022	运行中
14	中石化华东油气田江苏省二十万吨级全链条工业应用示范工程	EOR	20	2022	建设中
15	国家能源集团江苏泰州电厂50万t/a CO <sub>2</sub> 捕集与资源化能源化利用示范项目	EOR	50	2022	建设中
16	中联煤TL-003井CO <sub>2</sub> 注入微型先导性试验	ECBM	0.1	2004	停注
17	中联煤SX-001井深部煤层CO <sub>2</sub> 注入现场试验	ECBM	0.1	2010	停注
18	中联煤驱煤层气项目(柳林)	ECBM	0.1	2012	停注
19	中联煤深部煤层井组CO <sub>2</sub> 注入现场试验	ECBM	0.2	2013	停注
20	中联煤TS-634井组CO <sub>2</sub> 注入现场试验	ECBM	0.2	2020	停注

图 1 碳中和目标下我国的CCUS减排需求<sup>[1]</sup>

谢和平等<sup>[12]</sup>从煤炭采出体积出发,考虑地表变形和围岩卸荷膨胀,估算了自1949~2016年间累计形成的采空区地下空间,统计结果表明1949~2016年形成的采空区地下空间体积( $V_{2016}$ )可达138.36亿 $m^3$ ,其中距离地级城市周边50 km以内的地下空间体积( $V_{2016,50}$ )可达26.28亿 $m^3$ 。并预测了至2030年,将累计产生采空区地下空间( $V_{2030}$ )234.52亿 $m^3$ 。

谢和平等<sup>[12]</sup>同时对生产煤矿地下分布空间总量、“十三五”期间全国有序退出煤矿井地下空间量

图 2 2011~2020年大宗工业固废剩余量及综合利用率<sup>[2]</sup>

和距离地级市周边50 km以内的煤矿井地下空间量进行了省域级统计。统计结果表明,我国生产煤矿可利用地下空间体积达5.84亿 $m^3$ ;“十三五”期间全国有序退出煤矿井地下空间量达0.8亿 $m^3$ 。二者累计总量( $V_c$ )达6.64亿 $m^3$ 。距离地级市周边50 km以内空间体积( $V_{c50}$ )达2.67亿 $m^3$ 。废弃空间直接简单封井将直接造成数万亿地面地下固定资产的废弃和浪费,并成为重大的潜在地质隐患。但总体上我

国废弃矿井地下空间的开发利用才刚刚起步,对其进行合理治理与资源化利用至关重要。

### 3 碱性固废矿化封存CO<sub>2</sub>技术进展

采用碱性固废矿化CO<sub>2</sub>封存是指通过碱性固废中含有的反应活性较高的钙、镁氧化物与CO<sub>2</sub>反应形成稳定的固态碳酸盐,从而实现以固体形式的CO<sub>2</sub>封存<sup>[13]</sup>。通过碱性工业固废矿化CO<sub>2</sub>有以下优势:固碳能力高;颗粒小无需额外粉碎处理;工业产出的碱性固废可与其自身排放的CO<sub>2</sub>反应,降低减排成本。近年来,随着“双碳目标”的提出,采用碱性固废矿化CO<sub>2</sub>封存的研究进展迅速。2022年,国家能源集团建立的化学链矿化CCUS技术的示范工程进入调试阶段,该工程采用电石渣捕集烟气中的CO<sub>2</sub>,建成后可年处理1000 t CO<sub>2</sub>。同年,包钢集团设计研究院(有限公司)建立的10万t碳化法钢铁渣综合利用示范项目试生产,该项目通过钢渣捕集烟气中的CO<sub>2</sub>,已成功生产出碳酸钙产品。同年,有机功能材料与应用技术研究所和同济大学等单位合作建设的万吨级CO<sub>2</sub>矿化制备全固废负碳建材项目试运行,该项目利用粉煤灰、电石渣等碱性固废矿化CO<sub>2</sub>后生产建材产品,项目正式投产后预计年消纳CO<sub>2</sub>10万t以上。整体而言,我国采用碱性固废矿化封存CO<sub>2</sub>的工艺已经达到工业示范阶段。

### 4 碱性固废固化CO<sub>2</sub>地下废弃空间封存潜力及待攻关方向

目前采用碱性工业固废封存CO<sub>2</sub>的工艺以生产碳酸钙和建材为主,其固废处理能力依然难以消纳年剩余量。如果能够通过碱性固废对CO<sub>2</sub>进行矿化捕集,再将其以固态的形式输送到地下废弃空间,能够提高固废处置率同时封存CO<sub>2</sub>,是极具前景的工艺方案。现有研究表明,粉煤灰直接干法、直接湿法和间接法的最大CO<sub>2</sub>封存能力分别可达250, 230, 264 kg/t<sup>[14-16]</sup>;钢渣分别为71、290、607 kg/t<sup>[17-19]</sup>;电石渣分别为381、470、763 kg/t<sup>[17, 20, 21]</sup>。结合第2节中的地下废弃空间容量,通过下式可分别计算地下废弃空间能够封存的固废以及CO<sub>2</sub>的质量。

$$m_{\kappa} = V_{\beta} \times \rho_{\kappa}$$

$\kappa$  = 粉煤灰, 钢渣, 电石渣,

$\beta$  =  $t_{2016}$ ;  $t_{2016,50}$ ;  $t_{2030}$ ;  $e$ ;  $e_{50}$ ,

$$m_{\kappa, CO_2} = m_{\kappa} \times \eta_{\kappa}$$

式中,  $m_{\kappa}$ ——粉煤灰、钢渣、电石渣的质量, 亿t;  $V_{\beta}$ ——不同类型的地下废弃空间体积, 亿m<sup>3</sup>;  $\rho_{\kappa}$ ——粉煤灰、钢渣、电石渣的堆积密度, g/cm<sup>3</sup>;  $m_{\kappa, CO_2}$ ——粉煤灰、钢渣、电石渣矿化封存CO<sub>2</sub>的质量;  $\eta_{\kappa}$ ——每吨粉煤灰、钢渣、电石渣矿化封存CO<sub>2</sub>的质量。

假设以三种碱性固废最大的CO<sub>2</sub>封存能力(即间接法的最大封存能力)计算,取粉煤灰堆积密度为0.9 g/cm<sup>3</sup>;钢渣2.4 g/cm<sup>3</sup>;电石渣0.83 g/cm<sup>3</sup>。则  $V_{t2016}$ 、 $V_{t2016,50}$ 、 $V_{t2030}$ 、 $V_e$ 、 $V_{e50}$  对应的的  $m_{\text{粉煤灰}}$ 、 $m_{\text{钢渣}}$ 、 $m_{\text{电石渣}}$  以及对应的  $m_{\kappa, CO_2}$  如图3所示。

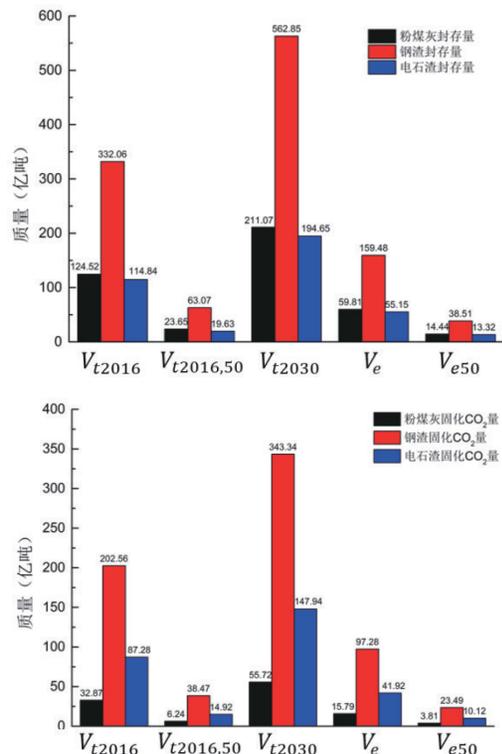


图3 各类地下空间体积的碱性固废封存量和相应的CO<sub>2</sub>固化量

从  $V_{t2016}$ 、 $V_e$  和  $V_{t2030}$  的碱性固废封存量和CO<sub>2</sub>固化量可见地下废弃空间具有极大的固废和CO<sub>2</sub>封存潜力。此外,从  $V_{t2016,50}$  和  $V_{e50}$  的碱性固废封存量和CO<sub>2</sub>固化量可见距离地级城市50 km以内的地下空间同样具有可观的固废和CO<sub>2</sub>封存潜力,这会极大的提高封存便利性,同时降低封存成本。省域级  $V_e$  和  $V_{e50}$  的  $m_{\kappa}$  和相应的  $m_{\kappa, CO_2}$  如表2所示。可见陕西、山西、内蒙古、甘肃、宁夏以及山东、河南极大的CO<sub>2</sub>封存潜力能够消纳该地区及其相邻地区的碳源

密集区域产生的CO<sub>2</sub>,从而缓解碳源碳汇分布空间 差异的矛盾。

表2 省域级和V<sub>e50</sub>的碱性固废封存量和相应的CO<sub>2</sub>固化量

省份	V <sub>e</sub>			V <sub>e50</sub>		
	(m <sub>粉煤灰</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> ) /(亿t)	(m <sub>钢渣</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> ) /(亿t)	(m <sub>电石渣</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> )/ (亿t)	(m <sub>粉煤灰</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> )/ (亿t)	(m <sub>钢渣</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> )/ (亿t)	(m <sub>电石渣</sub> /m <sub>CO<sub>2</sub></sub> )/ (亿t)
北京	0.13/0.03	0.34/0.21	0.12/0.096	0.04/0.01	0.10/0.06	0.04/0.03
河北	1.22/0.32	3.24/1.98	1.12/0.85	0.60/0.16	1.61/0.98	0.56/0.42
山西	13.27/3.5	35.39/21.59	12.24/9.3	4.75/1.25	12.67/7.73	4.38/3.33
内蒙古	12.14/3.2	32.38/19.75	11.20/8.51	1.38/0.36	3.67/2.24	1.27/0.97
辽宁	0.51/0.14	1.37/0.84	0.47/0.36	0.26/0.07	0.70/0.43	0.24/0.18
吉林	0.37/0.10	1.00/0.61	0.35/0.26	0.06/0.02	0.16/0.10	0.05/0.04
黑龙江	1.93/0.51	5.15/3.14	1.78/1.35	0.6/0.16	1.61/0.98	0.56/0.42
江苏	0.19/0.05	0.51/0.31	0.18/0.13	—	—	—
安徽	1.74/0.46	4.65/2.84	1.61/1.22	0.95/0.25	2.54/1.55	0.88/0.66
福建	0.30/0.08	0.81/0.49	0.28/0.21	0.09/0.02	0.24/0.14/	0.08/0.06
江西	0.59/0.16	1.57/0.96	0.54/2.41	0.14/0.38	0.38/0.23	0.13/0.10
山东	2.61/0.69	6.98/4.26	2.41/1.83	0.91/0.24	2.41/1.48	0.83/0.63
河南	4.51/1.19	12.03/7.33	4.16/3.16	1.43/0.38	3.81/2.33	1.32/1.00
湖北	0.23/0.06	0.61/0.37	0.21/0.83	0.03/0.01	0.09/0.06/	0.03/0.02
湖南	0.90/0.23	2.40/1.47	0.83/0.63	0.10/0.03	0.25/0.16	0.09/0.07
广西	0.19/0.05	0.50/0.31	0.17/0.13	0.02/0.01	0.06/0.04	0.02/0.02
重庆	0.52/0.14	1.39/0.85	0.48/0.36	0.07/0.02	0.19/0.12	0.07/0.05
四川	2.11/0.56	5.62/3.43	1.94/1.48	0.50/0.13	1.33/0.81	0.46/0.35
贵州	4.66/1.23	12.44/7.59	4.30/3.27	0.90/0.24	2.41/1.47	0.83/0.63
云南	1.38/0.36	3.67/2.24	1.27/0.97	0.38/0.10	1.02/0.62	0.35/0.27
陕西	6.69/1.77	17.85/10.89	6.17/4.69	0.40/0.11	1.08/0.66	0.37/0.28
甘肃	0.98/0.26	2.62/1.60	0.91/0.69	0.19/0.05	0.50/0.30	0.17/0.13
青海	0.08/0.02	0.21/0.13	0.07/0.06	—	—	—
宁夏	1.12/0.30	2.99/1.83	1.04/0.79	0.49/0.13	1.30/0.78	0.45/0.34
新疆	1.41/0.37	3.75/2.29	1.30/0.99	0.14/0.04	0.37/0.23	0.13/0.10
总计	59.81/15.79	159.48/97.28	55.15/41.92	14.44/3.81	38.51/23.49	13.32/10.12

上述结果表明,碱性固废固化于地下废弃空间的CO<sub>2</sub>封存新思路可以实现以废治废,是我国CO<sub>2</sub>封存极具前景的方案。但是,国内外对此研究较少,相应的工艺体系尚未建立。地质工程专业在固体矿产勘查、钻探以及非常规能源开采方面具有丰富的理论、技术与装备基础,与上述封存方式的需求契合。因此,应充分发挥地质工程专业在该封存方式中的优势,通过与安全工程和土木工程等专业交叉合作,开展CO<sub>2</sub>固化充填扰动下地下空间的力学响应与安全性评价、适用于地下充填的CO<sub>2</sub>固化材料体系与工艺优化、高效率低能耗的矿井内输送装置

研发,形成碱性固废固化CO<sub>2</sub>地下封存理论-技术-材料-装置体系,进而实现以废治废、地下废弃空间资源化利用,助力我国CCUS封存能力和工业固废综合利用率的提高

## 5 结论

本文通过对我国现有的CCUS封存能力现状、碳源、碳汇空间分布特征,碱性工业固废治理和地下废弃空间容量现状分析,结合碱性工业固废固化CO<sub>2</sub>的能力,提出了通过碱性固废对CO<sub>2</sub>进行矿化捕集,再将其以固态的形式输送到地下废弃空间,实

现“以废治废”的CO<sub>2</sub>封存新思路。得到的主要结论如下：

(1)我国现有的CO<sub>2</sub>封存能力距离双碳目标下的减排需求尚有较大距离,部分地区碳源分布与地下储集体空间位置不匹配。碱性固废固化CO<sub>2</sub>地下废弃空间封存的方式具有固碳安全、稳定、空间灵活、对封存空间要求低的特点,是我国CO<sub>2</sub>地下封存极具前景的方案。

(2)截至2016年,废弃地下空间总容量和距离地级城市50 km以内的容量可分别封存粉煤灰、钢渣、电石渣124.52、332.06、114.84和23.65、63.07、19.63亿t,相应的CO<sub>2</sub>封存量分别为32.87、202.56、87.28和6.24、38.47、14.92亿t。到2030年,预计废弃地下空间量可分别封存粉煤灰、钢渣、电石渣211.07、562.85、194.65亿t,相应的CO<sub>2</sub>封存量分别为55.72、343.34、147.94亿t。

(3)针对碱性固废固化CO<sub>2</sub>地下封存,急需开展CO<sub>2</sub>固化充填扰动下地下空间的力学响应与安全性评价、适用于地下充填的CO<sub>2</sub>固化材料体系与工艺优化、高效率低能耗的矿井内输送装置研发,形成碱性固废固化二氧化碳地下封存装备与工艺,进而实现以废治废、地下废弃空间资源化利用,助力我国CCUS封存能力和工业固废综合利用率的提高。

#### 参考文献：

- [1] 蔡博峰,曹成,曹丽斌,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)[R].北京:生态环境部,2021.
- [2] 石晓莉,杜根杰,杜建磊,等.大宗工业固体废物综合利用产业存在的问题及建议[J].现代矿业,2022,38(6):227-229.
- [3] Consoli C.P., Havercroft I., Irlam L. Carbon capture and storage readiness index: Comparative review of global progress towards wide-scale deployment[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 7348-7355.
- [4] Bobicki E.R., Liu Q., Xu Z. et al. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2):302-320.
- [5] 姜睿.国内外CCUS项目现状分析及展望[J].安全、健康和环境,2022,22(4):1-4,21.
- [6] 刘世奇,邵明吉,杜瑞斌,等.CO<sub>2</sub>地质封存与利用示范工程进展及典型案例[J].煤田地质与勘探,2023,51(2):158-174.
- [7] 王紫剑,唐玄,荆铁亚,等.中国年封存量百万吨级CO<sub>2</sub>地质封存选址策略[J].现代地质,2022,36(5):1414-1431.
- [8] 周新媛,唐国强,赵连增,等.二氧化碳封存现状及经济性初探[J].油气与新能源,2022,34(6):20-28,49.
- [9] 祁生文,郑博文,路伟,等.二氧化碳地质封存选址指标体系及适宜性评价研究[J].第四纪研究,2023,43(2):523-550.
- [10] 刘华军,邵明吉,吉元梦.中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究[J].地理科学,2021,41(11):1917-1924.
- [11] 发展改革委,科技部,工业和信息化部.关于“十四五”大宗固体废物综合利用的指导意见[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content\_5595566.htm.
- [12] 谢和平,高明忠,刘见中,等.煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J].煤炭学报,2018,43(6):1487-1503.
- [13] Seifritz, W. CO<sub>2</sub> disposal by means of silicates. Nature [J]. 1990, 345(6275):486-486.
- [14] Baciocchi R., Costa G., Poletini A., et al. Comparison of different reaction routes for carbonation of APC residues[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):4851-4858.
- [15] Back M., Kuehn M., Stanjek H. et al. Reactivity of alkaline lignite fly ashes towards CO<sub>2</sub> in Water[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(12):4520-4526.
- [16] Sun Y., Parikh, V. Zhang, L. Sequestration of carbon dioxide by indirect mineralization using Victorian brown coal fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209-210:458-466.
- [17] 张亚朋,崔龙鹏,刘艳芳,等.3种典型工业固废的CO<sub>2</sub>矿化封存性能[J].环境工程学报,2021,7(15):2344-2355.
- [18] Chang E.E., Pan S.Y., Chen Y.-H., et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 227-228:97-106.
- [19] 武鸽,刘艳芳,崔龙鹏,等.典型工业固体废物碳酸化反应性能的比较[J].石油学报(石油加工),2020,36(1):169-178.
- [20] Yang Yuan., Liu Wei., Cheng Weimin., et al. Method for rapid mineralization of CO<sub>2</sub> with carbide slag in the constant-pressure and continuous-feed way and its reaction heat[J]. Powder Technology, 2022, 398:117148.
- [21] Sun Y., Yao M S, Zhang J P, et al. Indirect CO<sub>2</sub> mineral sequestration by steelmaking slag with NH<sub>4</sub>Cl as leaching solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 173(2):437-445.

(编辑 王文)