

# 新时期我国煤矿地下空间综合利用 现状及展望



Pre-pub. on line: www.  
geojournals.cn/georev

霍超<sup>1)</sup>, 王蕾<sup>2)</sup>, 谢志清<sup>1)</sup>, 潘海洋<sup>1)</sup>, 方惠明<sup>1)</sup>, 赵岳<sup>1)</sup>, 王丹丹<sup>1)</sup>, 王丹凤<sup>1)</sup>

1) 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京, 100039;

2) 中国煤炭学会, 北京, 100013

**内容提要:**我国煤炭资源的长期大规模开采, 产生了大量的地下空间, 直接一关了之不仅造成地下空间资源浪费, 还可能产生一系列安全、环境及经济问题, 因此, 如何科学、高效地解决煤矿地下空间的综合开发利用问题, 对煤炭产业乃至国民经济的发展具有重要现实意义。笔者等以主要产煤省份为代表, 结合调研收集的最新生产煤矿和关闭煤矿数据, 深入分析了“十三五”期间生产煤矿地下空间和关闭煤矿地下空间总体情况, 系统总结了国内外煤矿地下空间在储物、储能等方面的功能化利用现状, 指出了当前我国煤矿地下空间利用存在资源数据信息匮乏、整体开发利用率低、相关技术研究工作仍相对滞后、可供推广借鉴的成熟示范工程较少等问题, 提出了新时期煤矿地下空间基础数据库建设、利用体系构建、关键技术攻关、示范工程推广 4 个方面作为重点发展方向。

**关键词:**煤矿地下空间; 地下空间估算; 综合利用; 利用模式; 国际趋势; 中国现状

随着我国社会经济的飞速发展和现代化的建设, 地下空间开发利用的必要性和可行性凸显(邢怀学等, 2022; 唐鑫等, 2022; 张建羽等, 2023)。

新中国成立以来, 我国累计生产煤炭 950 亿吨左右(王佟等, 2023), 如此大规模的煤炭开采, 随之而来产生了大量的地下空间, 据统计, 从建国以来截至 2016 年, 煤炭开采形成的采空区地下空间约为 138.36 亿立方米。截止 2020 年, 我国关闭煤矿数量已达 12000 处, 未来一段时间, 仍将有大量煤矿被关闭, 预计到 2030 年关闭煤矿数量将达到 15000 处(任辉等, 2019)。地下空间资源被看作是一种新的资源, 煤炭生产过程中形成的巨大地下空间, 若直接关闭废弃, 不仅造成巨大的地下空间资源浪费, 还可能产生潜在地质灾害隐患, 因此, 对煤炭开采产生的数量可观的地下空间分类开发利用势在必行。

自 20 世纪 60 年代开始, 欧美国家对煤炭开采和其他矿产开发产生的地下空间在矿井关闭后如何利用进行了大量研究和实践, 探索了多种不同的开发模式, 围绕储物、储能等利用功能形成了很多成功应用的案例(袁亮等, 2021)。我国煤矿地下空间开发利用意识淡薄, 其开发利用研究和实践整体处于起步阶段, 功能化利用比较单一, 近年来, 在储物功

能化利用方面逐渐有了一些成功案例, 如地下储水库, 在储能功能化利用还处于理论研究阶段, 随着时间的推移, 越来越多的人意识到提高煤矿地下空间综合开发利用的迫切性。

鉴于此, 笔者等系统梳理了我国“十三五”期间主要产煤省份生产煤矿地下空间和关闭煤矿地下空间总体情况, 围绕煤矿地下空间功能化利用方向, 重点阐述了利用地下空间开展储物、储能及其他功能化利用模式的现状, 在此基础上, 系统分析了每种模式功能化利用过程中亟需解决的关键技术难题, 结合国家政策导向, 提出了未来一段时间围绕煤矿地下空间功能化利用方面需要开展的一些重要工作, 以期对我国煤矿地下空间独特情况进行功能化开发利用提供参考。

## 1 “十三五”时期我国煤矿 地下空间现状

据煤炭工业协会发布的最新煤矿数据, 截至 2022 年底, 全国共有煤矿数量约 4400 处, 其中露天煤矿 357 处, 占比 90% 以上的井工煤矿在煤炭开采过程中形成了大规模、多类型的地下空间, 煤矿地下空间指在煤矿建设和生产过程中产生的地下空间,

注: 本文为中国煤炭地质总局碳中和专项(编号: ZMKJ-2021-ZX02, ZMKJ-2021-ZX04)的成果。

收稿日期: 2023-09-11; 改回日期: 2024-01-18; 网络首发: 2024-02-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.02.001

作者简介: 霍超, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为煤炭地质勘查及煤矿地质灾害防治; Email: 493578419@qq.com。

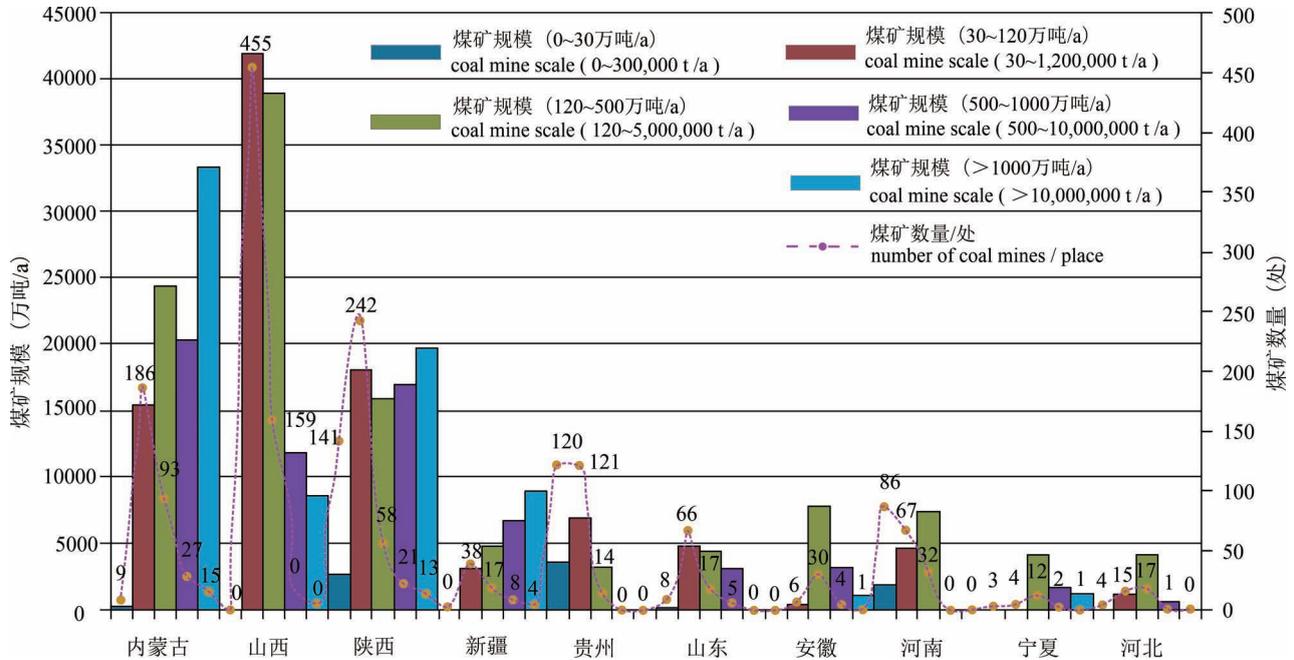


图1 截至2020年底前十大产煤省份生产煤矿情况统计(据各省能源局发布数据)

Fig. 1 Coal production in the top ten coal-producing provinces by the end of 2020

(source data released by provincial energy bureaus)

主要包括巷道、采空区、井筒以及硐室群等空间(吉莉等,2022)。巷道空间指服务于煤炭开采中运煤、通风、排水、通行及为设备采出煤炭在岩体或煤层中开凿的不直通地面的水平或倾斜通道的总称;采空区指采煤遗留下的以后不再维护的地下空间;硐室空间指空间3个轴线长度相差不大且又不直通地面的地下通道的总称(刘钦节等,2021)。煤炭开采产生的地下空间作为一种不可逆的资源,在功能化利用方面具有安全性高、温度与湿度等环境条件适宜、开发利用投资成本低等一系列优点,加以科学、合理利用可以带来很好的社会效益与经济效益。

### 1.1 “十三五”期间我国生产煤矿地下空间

#### 总体情况

笔者等主要对我国生产煤矿可利用井巷和煤矿采空区两大部分可利用地下空间进行了统计。生产煤矿可利用井巷地下空间量主要根据生产煤矿产能规模与其井巷可利用地下空间量的比例系数计算得出。煤矿采空区可利用地下空间量主要依据地下空间体积组成计算得出。

#### 1.1.1 主要产煤省份生产煤矿可利用井巷地下空间情况

根据国家能源局和各省最新发布的煤矿生产能力数据,统计汇总了截至2020年底前十大产煤省份

生产煤矿现状(图1),前十大产煤省份生产煤矿数量合计2144处,约占我国生产煤矿数量的45%,产能规模合计359544万吨/a。其中煤矿生产能力在0~30万吨/a、30~120万吨/a、120~500万吨/a、500~1000万吨/a、>1000万吨/a的煤矿数量分别为373处、1200处、449处、83处、39处,对应产能规模合计分别为9025万吨/a、96839万吨/a、115710万吨/a、64770万吨/a和73200万吨/a。

生产煤矿可利用井巷地下空间体积主要根据产能规模乘以井巷可利用地下空间量的比例系数得出,比例系数来源于谢和平院士调研统计的煤矿规模与其井巷可利用地下空间量的比例系数(谢和平等,2018),估算出前十大产煤省份现有生产煤矿井巷可利用地下空间量总计约5.83亿立方米(表1),其中山西、内蒙古、陕西三个省份生产煤矿井巷可利用地下空间量排名前三。

#### 1.1.2 主要产煤省份生产煤矿采空区地下空间情况

煤炭采出后产生的地下空间体积 $V$ 主要由工作面采空区地下空间 $V_1$ 、岩石膨胀体积 $V_2$ 和地表下沉盆地体积 $V_3$ 三部分组成(谢和平等,2018),即:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

表 1 截至 2020 年底前十大产煤省份煤矿可利用井巷地下空间量统计

Table 1 Statistics of underground space of coal mines in the top ten coal-producing provinces by the end of 2020

省份	0~30(万吨/a)		30~120(万吨/a)		120~500(万吨/a)		500~1000(万吨/a)		>1000(万吨/a)		合计
	系数	可利用空间 (万立方米)	系数	可利用空间 (万立方米)	系数	可利用空间 (万立方米)	系数	可利用空间 (万立方米)	系数	可利用空间 (万立方米)	可利用空间 (万立方米)
内蒙古	0.20	54	0.17	2616.3	0.15	3655.5	0.15	3063	0.12	4008	13396.8
山西	0.19	0	0.16	6708.8	0.14	5454.4	0.13	1543.1	0.12	1044	14750.3
陕西	0.21	577.92	0.19	3439.57	0.18	2870.1	0.15	2565	0.15	2970	12422.59
新疆	0.17	6.12	0.14	439.88	0.21	1019.55	0.15	1012.5	0.15	1350	3828.05
贵州	0.29	1044	0.3	2080.5	0.26	842.92					3967.42
山东	0.21	50.4	0.19	915.99	0.17	755.65	0.15	472.5			2194.54
安徽	0.22	0	0.2	73.2	0.18	1443.6	0.16	513.6	0.14	154	2184.4
河南	0.28	536.76	0.26	1234.22	0.25	1874.5					3645.48
宁夏	0.19	17.1	0.15	33.75	0.14	579.6	0.11	187	0.11	132	949.45
河北	0.18	21.6	0.16	188.8	0.15	635.25	0.14	79.8			925.45
合计		2307.9		17731.01		19131.07		9436.5		9658	58264.48

注:系数指的是煤矿规模与其井巷可利用的地下空间量的比例系数。

(1)煤炭采出后产生的地下空间体积  $V$ : 煤炭采出后产生的地下空间体积  $V$  可根据煤炭产量与平均密度计算得出,统计出“十三五”期间主要省份煤炭产量,煤炭平均密度按  $1.35 \text{ t/m}^3$  计算,计算得出“十三五”期间煤炭采出后产生的地下空间体积。

(2)岩石卸压膨胀体积  $V_2$ : 根据三带理论,岩石的膨胀自下而上主要产生在冒落带、裂隙带和弯曲下沉带,岩石膨胀体积按如下估计

$$V_2 = V_1 k$$

$k$  取值为 0.1,本次系数引用来源于《特殊地下空间的开发利用》一书(谢和平等,2018)。

(3)地表下沉盆地体积  $V_3$ : 地表下沉盆地体积与地表下沉系数  $\eta$  有关,根据前人研究统计了我国煤炭相关产区的地表下沉系数(表 2)(谢和平等,2018),可近似认为  $V_3 = V\eta$ 。

(4)工作面采空区地下空间  $V_1$ : 根据上述计算过程,工作面采空区地下空间

$$V_1 = V - V_2 - V_3, \text{ 即}$$

$$V_1 = \frac{V(1-\eta)}{1+k}$$

“十三五”时期,据国家统计局发布数据,全国累计生产原煤 179.45 亿吨,前十大产煤省份合计生产原煤 164.64 亿吨,按照煤炭平均密度  $1.35 \text{ t/m}^3$ ,煤炭采出后产生的地下空间体积为 112.20 亿立方米(井工开采量占 92%),根据公式计算井工煤矿 2016~2020 年形成采空区地下空间体积共计 30.41 亿立方米(表 2)。

## 1.2 “十三五”期间我国关闭煤矿

### 地下空间总体情况

据《“十四五”矿山安全生产规划》通知,“十三五”

时期,我国累计淘汰退出煤矿 5464 处,产能 9.4 亿吨/年,其中原煤产量累计位居前十的产煤省份关闭煤矿数量达 1530 处,产能 4.65 亿吨/年(表 3),关闭煤矿总体呈现以下特征:

(1)关闭煤矿数量以小型煤矿为主。“十三五”期间,主要引导灾害严重、资源枯竭、技术装备落后、不具备安全生产条件、不符合煤炭产业政策的煤矿以及 30 万吨/a 以下落后小煤矿有序退出。十大产煤省份关闭的煤矿中 30 万吨及以下的数量为 1200 座,占总关闭煤矿总数的 78.43%,说明 30 万吨/a 以下煤矿未来将逐步淘汰退出,大型现代化煤矿将逐步替代中小煤矿。

(2)以大型煤炭基地外煤矿关闭退出为主。当

表 2 2016~2020 年十大产煤省份煤矿采空区可利用地下空间统计表

Table 2 Statistical table of available underground space in coal mine goaf of top ten coal-producing provinces from 2016 to 2020

省份	2016~2020 年 原煤产量 (亿吨)	煤炭采出后 地下空间体积 (亿立方米)	下沉 系数 $\eta$	工作面采空区 地下空间 (亿立方米)
内蒙古	46.94	31.99	0.70	8.72
山西	45.96	31.32	0.70	8.54
陕西	30.18	20.57	0.70	5.61
新疆	10.19	6.94	0.70	1.89
贵州	7.21	4.91	0.63	1.65
山东	6.07	4.14	0.74	0.98
安徽	5.75	3.92	0.74	0.93
河南	5.84	3.98	0.74	0.94
宁夏	3.69	2.51	0.70	0.69
河北	2.81	1.91	0.74	0.45
合计	164.64	112.20		30.41

前,我国煤炭产能重点逐步向资源赋存和开采条件好的“晋陕蒙新”等西部地区集中,煤炭开发总体布局为压缩东部、限制中部和东北、优化西部,非煤炭主产区关闭煤矿力度较大,如“十三五”期间,云贵川合计关闭煤矿近1200座,淘汰落后产能约18000万吨/a;华东地区(福建、江苏、安徽、江西、山东)合计关闭煤矿近700座,淘汰落后产能11140万吨/a。通过有序退出过剩产能,将进一步推动优化我国煤炭开发布局,推进煤炭产业结构优化升级。

根据谢和平(2018)提出的利用煤矿规模与其井巷可利用地下空间量的比例系数,估算得出“十三五”时期十大产煤省份关闭煤矿井巷可利用地下空间量总计约0.96亿立方米(图2、表3)。

通过以上分析,可估算出“十三五”期间煤矿地下空间体积:①“十三五”期间主要产煤省份生产煤矿可利用井巷地下空间量为5.83亿立方米,关闭煤矿井巷可利用地下空间量为0.96亿立方米,合计6.79亿立方米。②根据采出的原煤产量,估算出“十三五”期间主要产煤省份生产煤矿采空区地下空间量为30.41亿立方米。综上所述,“十三五”期间主要产煤省份煤炭开采形成的可利用地下空间体积总计37.2亿立方米。由此可见,我国煤炭开采形成的地下空间资源具有总体体量大、分布比较广泛、单个矿井地下空间规模大小不一、地质条件多样的

特征。如果最终煤矿停留在“一关了之”的状态,其产生的地下空间将无法利用,会带来一系列社会、环境及经济问题。新时期,如果能将规模如此巨大的地下空间进行功能化利用,变废为宝,将对社会和经济发展具有十分重要的战略意义。

## 2 煤矿地下空间综合利用的国际趋势与我国现状

因煤矿地下空间具有防护性和安全性优越、空间环境条件较稳定、开发利用投资较低等优点,欧美国家较早开始了对煤矿地下空间开发利用,提出了形式多样的煤矿地下空间利用模式,部分案例取得了成功(袁亮等,2018)。我国在煤矿地下空间利用和开发方面的研究起步较晚,近年来,我国学者提出了很多具有建设性的构想和建议,部分案例已经开始实施。作为重要空间载体,按照煤矿地下空间功能导向分类,主要有储物、储能及其他功能化利用模式。

### 2.1 储物功能化利用

我国多位学者提出充分利用巨大的煤矿地下空间资源开展储水、储气、储油、储物等储存功能,因煤矿地下空间资源具有稳定、易开发、开发成本低、恒温恒湿、安全性高等特点,为此,利用煤矿地下空间开展储存功能具有先天优势,也是目前地下空间最

表3 “十三五”时期主要产煤省份关闭煤矿及井巷可利用地下空间统计表

Table 3 Statistical table of underground space available for closed coal mines and tunnels in major coal-producing provinces during the 13th five year plan period

省或自治区	2016~2020年关闭煤矿规模								关闭煤矿井巷可利用地下空间量							
	0~30		30~120		120~500		合计		0~30		30~120		120~500		合计	
	数量(处)	煤矿规模(万吨/年)	数量(处)	煤矿规模(万吨/年)	数量(处)	煤矿规模(万吨/年)	数量(处)	煤矿规模(万吨/年)	系数	可利用空间(万立方米)	系数	可利用空间(万立方米)	系数	可利用空间(万立方米)	系数	可利用空间(万立方米)
内蒙古	44	1320	25	1675	1	180	70	3175	0.2	264	0.17	284.75	0.15	27	0.15	575.75
山西	33	894	89	6045	16	3950	138	10889	0.19	169.86	0.16	967.2	0.14	553	0.14	1690.06
陕西	123	2578	31	1785	1	140	155	4503	0.21	541.38	0.19	339.15	0.18	25.2	0.18	905.73
新疆	153	1384	8	500	1	180	162	2064	0.17	235.28	0.14	70	0.21	37.8	0.21	343.08
贵州	454	6120	23	1306	0	0	477	7426	0.29	1774.8	0.3	391.8	0.26	0	0.26	2166.6
山东	55	1089	36	2110	2	545	93	3744	0.21	228.69	0.19	400.9	0.17	92.65	0.17	722.24
安徽	0	0	6	534	8	2145	14	2679	0.22	0	0.2	106.8	0.18	386.1	0.18	492.9
河南	208	3843	30	1681	4	780	242	6304	0.28	1076.04	0.26	437.06	0.25	195	0.25	1708.1
宁夏	28	430	7	360	0	0	35	790	0.19	81.7	0.15	54	0.14	0	0.14	135.7
河北	102	1738	37	2370	5	795	144	4903	0.18	312.84	0.16	379.2	0.15	119.25	0.15	811.29
合计	1200	19396	292	18366	38	8715	1530	46477		4684.59		3430.86		1436		9551.45

注:①系数指的是煤矿规模与其井巷可利用的地下空间量的比例系数;②关闭煤矿数据来源于各省煤炭行业化解过剩产能领导小组办公室发布。

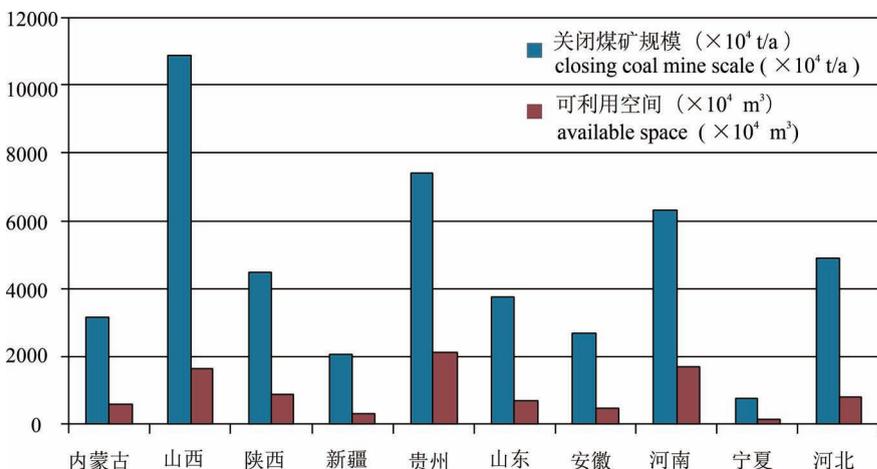


图2 2016~2020年主要产煤省份关闭煤矿井巷可利用地下空间分布

Fig. 2 Distribution of available underground space in closed coal mines in major coal-producing provinces from 2016 to 2020

主要的开发利用模式。

(1) 地下储水库。全国14个大型煤炭基地中有9个在黄河流域,随着我国煤炭生产开发布局西移、黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的实施,西部地区煤炭开采引起的水资源短缺和浪费已越来越引起业界的关注,煤矿地下水库作为一种新的地下水利工程,是解决西部生态脆弱矿区水资源保护利用的关键技术之一,是一个涉及多学科系统工程。煤矿地下水库主要是指利用煤炭开采后形成的大面积地下采空区空间对水资源进行转移储存,由采空区、安全煤柱、人工坝体和取水设施等组成(顾大钊等,2016;张凯等,2023)。顾大钊院士(2015)提出了“导储用”为核心的煤矿地下水库储用矿井水技术思想,建立了煤矿地下水库理论框架和技术体系,自利用煤炭开采产生的地下空间作为地下储水库在神东矿区首次成功应用以来,累计已建成35座地下储水库,作为当前世界唯一的煤矿地下储水库群,总储水量达 $31 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,每年为矿区提供了95%以上的用水量。

我国学者针对煤矿地下水库建设中涉及的水力联系及渗流规律(智国军等,2022)、建设适应性条件及其设计体系(张保等,2022)、库容计算平台开发研究(姜琳婧等,2020)、储水结构稳定性评价(梁冰等,2020)、煤柱坝体安全稳定性分析(池明波等,2023)、地下水库水质影响机理(智国军等,2022)等问题进行了卓有成效的研究,取得了一系列成果。由于我国关闭煤矿地质条件和开采条件的不同,使得可供开发利用的地下空间复杂程度不同,利用煤

矿地下空间建设储水库必须符合一定的适应性条件:采空区空间性完整且具有一定规模、采空区底板倾角较小、水文地质条件简单—中等、围岩渗透性差、无导水构造等。

(2) 地下储气库。我国天然气需求量逐年增长,导致液化天然气进口量逐年增大,亟需开辟新的储存空间以平衡市场供需矛盾,而地下储气库作为用气调峰和安全供气的方式之一,是解决我国天然气储存需求和保障国家能源安全的一种行而有效的方法(郝宪杰等,2021;刘汉斌等,2019)。据统计,常用于地下储气库的主要储存主体有枯竭

油气藏、地下盐穴、含水层及废弃矿井等,截止2021年底,我国先后建成储气库28座,形成了约160亿立方米的调峰能力,但总的储气规模有限,仅占当年天然气消费量的4.4%(刘恒阳,2022)。

美国主要利用油气藏和岩穴建设地下储气库,俄罗斯地下储气库主要储存主体也是油气藏。我国适宜建设地下储气库的油气藏较少,同时盐穴型和含水层型储存主体储量空间有限,因此,大规模煤矿地下空间被用来储存天然气受到越来越多关注。世界范围内先后建成了3座废弃煤矿地下储气库,分别是美国的Leyden废弃煤矿储气库(Schultz and Evans, 2020)和比利时的Anderlus和Peromes废弃煤矿储气库(Distrigaz, 1981),对应储气能力达到1.4亿立方米、1.2亿立方米和1.8亿立方米。可见,利用煤矿地下空间建设储气库是可行的。利用煤矿地下空间建设储气库,一般需要保证较长的储气时间和储气环境的稳定性,虽然目前国外已有相关成功案例,但在实施过程中,必须符合一定的适应性条件:地层裂隙不发育、地层的渗透率应不小于 $0.12 \sim 0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、地层的孔隙度应不低于10%~15%、围岩应弹性模量较高且完整性较好、上覆岩层具有一定厚度且满足储气压力要求。

(3) 地下储油库。近年来,我国原油对外依存度高达约70%,虽然我国已建成的2860万立方米石油储备库容,但仅够使用时间约40天,因此,从国家能源战略安全考虑,加快石油储备库建设已刻不容缓(刘峰等,2017)。全球范围内常用于建设地下储

油库的主要有盐岩洞穴、水封洞窟、废弃矿井、含水层和枯竭油气层等,目前较为成熟的技术主要为盐穴洞库和水封洞库(陈树旺等,2021)。地下储油库相较于地上库而言,具有安全性高、节约用地、投资成本低、运营费用低等方面的明显优势,随着国家石油储备战略发展的推进,利用煤矿地下空间建设储油库成为新的考虑方向。

国外多个国家(美国、法国、德国等)就利用废弃矿井建设地下储油库开展了相关研究和实践,典型代表为上世纪70年代,法国Caen港口利用废弃煤矿地下空间建成的500万立方米柴油库,储油空间埋深在14 m至395 m之间,一直沿用至20世纪90年代退役。目前我国还未开展煤矿地下空间储油工程实践,仅在利用废弃石膏矿井开展地下储油进行了理论和中试方面相关研究(毛东桂,2022),皖北煤电开展了世界首例废弃石膏矿采空区储油项目中试研究,证明利用废弃矿井地下空间建设储油库是可行的。利用煤矿地下空间建设储油库,必须符合一定的适应性条件:围岩和顶板具备很好的稳定性、空间密封性良好、地层构造裂隙不发育且渗透率较低。

(4)低中放射性核废料处置库。采用陆地深埋法是目前处置放射性核废料最行之有效的方法,国外利用废弃矿井地下空间处置放射性废物开展了一些成功案例,德国利用废弃盐矿(Asse矿和Morsleben矿)开展了放射性废物处置,从20世纪60年代开始接收中低放射性废物,Asse矿处置低放废物12.5万桶,中放废物1300桶(Meyer,2003);Morsleben矿处置库关闭前共处置了36752 m<sup>3</sup>废物(Mauke and Herbert,2015),目前,两座地下核废料处置库均已关闭。捷克自20世纪60年代先后利用废弃的石灰石矿(Richard)和铀矿(Bratrství)地下空间建成了放射性废物处置库,至今仍在运行(陈文轩等,2018)。

随着国家“双碳”目标的持续推进、能源安全战略的深化落实,我国核电机组和核电发电量将保持持续增长,随之而来将面临如何安全处置核电站产生的大量放射性固体废物这一难题。根据我国关于低中水平放射性固体废物处置的法律法规、标准规范,废弃矿井可以用于处置低中水平放射性固体废物。我国利用废弃矿山地下空间处置低中放射性核废料起步较晚,吴琼(2021)针对国内关闭煤矿地下空间建设低中水平放射性固体废物处置库开展了选址原则、核废料的迁移衰变机理数值模拟等方面研究论

证。工程实践方面,目前我国仅开展了一个废弃矿井处置低放废物的案例:利用辽宁兴城退役铀矿山废弃矿井处置退役的镅厂低放废物,于2000年开始接受废物,2003年处置完毕,累计接受低放废物8747 m<sup>3</sup>(徐乐昌等,2013)。利用煤矿地下空间开展低中放射性核废料处置必须符合一定的地质条件:①地下空间必须干燥无水;②围岩需具备致密、低孔隙率和低渗透率特征,可选择花岗岩、黏土岩等;③地质构造稳定;④地下水处于贫水区且含水介质低渗透。

(5)二氧化碳封存。随着“双碳”目标的提出,CCUS技术是一项国际公认的具有大规模温室气体减排潜力和保障能源资源安全的战略技术。CO<sub>2</sub>地质封存是CCUS技术的核心组成部分,当前常用于二氧化碳封存的地质体有深部咸水层、正在开采或枯竭的油气田、深部不可采煤层、煤矿采空区等。国外学者Jalili等针对废弃煤矿储存二氧化碳研究发现:二氧化碳可以三种状态储存在废弃煤矿中,其中游离在煤层孔隙中、吸附于煤基质上或溶解在煤水中,二氧化碳储存量取决于矿山的地质特征与工程设计参数,通过对澳大利亚坎平盆地进行数值模拟,预测其废弃煤矿二氧化碳封存量为700万吨(Jalili et al., 2011)。我国利用煤矿地下空间进行CO<sub>2</sub>封存尚处于探索研究阶段,袁亮(2022)、王双明(2022)、黄定国(2014)等分别从多源数据融合数字孪生技术、煤炭开采扰动空间封存CO<sub>2</sub>的必备条件、煤矿采空区封存CO<sub>2</sub>的技术风险和应对措施等方面论述了废弃矿井CO<sub>2</sub>工程封存构想。何满潮院士针对不同煤矿地质构造条件下二氧化碳封存场景,利用研发的不同温度和湿度条件下检测甲烷和二氧化碳气体系统解决了煤矿二氧化碳渗透和泄漏难题,为废弃煤矿高效经济开展CO<sub>2</sub>封存提供了技术途径。作为一种新的CO<sub>2</sub>封存载体,利用煤矿地下空间开展CO<sub>2</sub>封存必须符合一定的地质条件:煤层上部稳定地质盖层、储集空间密闭性良好。

## 2.2 储能功能化利用

近年来,物理储能技术因其成本低、规模大、能耗低、环保等特点和具有替代其他能源进行能源转型的可能性而越来越受到重视(陈海生等,2019)。我国《“十四五”现代能源体系规划》提出“要积极推进多能互补的清洁能源建设”和“加快推进抽水蓄能电站建设及压缩空气储能等技术多元化应用”;《“十四五”新型储能发展实施方案》提出的“开展不同技术路线分类试点示范”中明确要求“开展利用废弃矿坑储能等

试点示范”。目前,国内外利用关闭矿井地下空间开展物理储能且取得一定进展的主要有抽水蓄能、压缩空气储能和地下空间储热技术等,随着“双碳”目标的提出,我国储能技术和规模发展迅速,探索利用关闭煤矿加固改良后的地下空间开展物理储能建设,有助于为加快构建清洁低碳、安全高效的多能互补能源体系提供有力支撑。

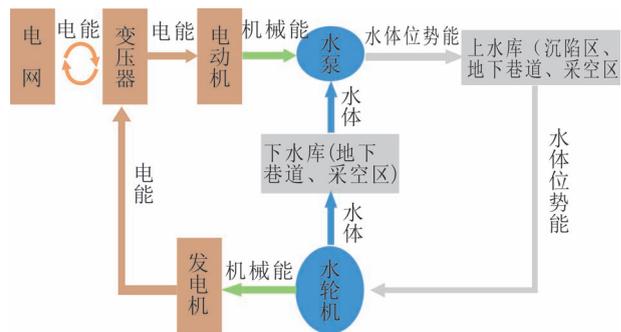


图3 抽水蓄能电站工作原理示意图

(据何涛等,2021 修编)

Fig. 3 Schematic diagram of the working principle of pumped storage power station(modified from He Tao et al. , 2021&)

## 2.2.1 抽水蓄能

当前利用关闭矿井地下空间开展物理储能,从产业程度和装机规模来看,抽水蓄能规模最大(孙强等,2023)。利用关闭煤矿建设抽水蓄能电站与传统抽水蓄能电站工作原理相同(图3),因煤矿地下空间具有结构简单、空间大、天然高差、容易密封加固等特点,为建造抽水蓄能电站提供了良好的基础条件和理想场地(朱超斌等,2022;杨科等,2023)。

国外少数国家利用煤矿地下空间建设抽水蓄能电站已进入应用阶段,德国于2017年利用 Prosper—Haniel 煤矿建成世界首个抽水蓄能电站(Niemann et al. , 2018)。我国很多学者围绕煤矿地下空间抽水蓄能电站建设开展了大量研究工作,谢和平、袁亮、顾大钊等多位院士和专家先后提出了利用煤矿地下空间建设抽水蓄能电站的战略构想,为我国煤矿地下空间利用、矿井水循环利用和抽水蓄能发电等提供了基本思路。王兵等(2021)、姚西龙等(2021)、张保生等(2021)针对国内煤矿地下空间建设抽水蓄能开展了电站选址、关键技术参数、水泵水轮机等方面研究论证。卞正富等(2022)提出可利用废弃煤矿井巷空间(体积约  $1.34 \times 10^7 \text{ m}^3$ ) 在黄河流域九省区建设抽水蓄能电站,年发电量可达  $3.78 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,由此可见,我国煤矿地下空间抽水蓄能有很大的应用潜力。近两年,我国先后利用阜新海州露天矿坑和河北滦平关闭

镍矿矿坑建设抽水蓄能电站,电站计划装机规模均为120万千瓦,计划于2031年和2029年正式运营。

因我国利用煤矿地下空间开展抽水蓄能电站研究起步较晚,基础理论和关键技术研究还不够成熟,且我国煤矿地质条件复杂及采煤方法多样,抽水蓄能发电过程中水的运动导致多重应力交替变化,对水库的安全稳定带来较大影响,因此,利用煤矿地下空间建设抽水蓄能电站必须符合一定的地质条件:①围岩需具有长期稳定性、密闭防渗;②地下空间具有一定的落差,要求水头适中,其范围为200~700m;③水资源需满足抽水蓄能电站建设的需求;④地层断层裂隙不发育。

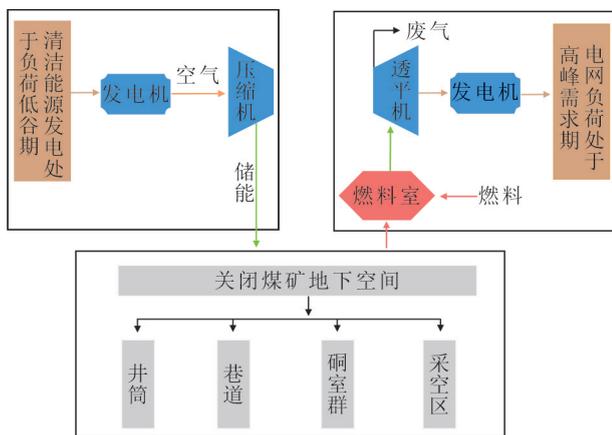


图4 压缩空气蓄能电站工作原理示意图

(据孙强等,2023 修编)

Fig. 4 Schematic diagram of working principle of compressed air energy storage power station(modified from Sun Qiang et al. , 2023&)

## 2.2.2 压缩空气储能

压缩空气储能分为两个阶段,分别为储能和释能。储能时段,一般是指当太阳能、风能等清洁能源发电处于负荷低谷期时,利用剩余电能将空气进行高压压缩后储存于密闭空间;释能时段,当电网负荷处于高峰需求期时,将高压压缩空气释放燃烧,进而驱动汽轮机进行发电(图4)。压缩空气储存的密闭空间主要有地下盐穴、废弃矿山、枯竭的油气藏储层、人工地下储气库等。压缩空气储能被视为除抽水蓄能之外的另一种极具潜力的大规模储能技术(杜俊生等,2023),因其具有规模大、成本低、效率高、零排放等一系列优点而被作为实现电网调峰、调频、调相需求、构建新型电力系统和助力“双碳”目标实现的重要途径(孙强等,2023)。

目前压缩空气储能应用成功的案例主要集中于地下盐穴空间,利用煤矿地下空间建设压缩空气储能电站的案例还比较少。近年来,我国先后在江苏金坛、山

东肥城利用盐穴开展了压缩空气储能电站建设且并网试验成功,部分学者在利用煤矿地下空间建设压缩空气储能电站方面进行了探索研究,杜俊生等(2023)、吴迪(2020)、王帅等(2020)针对国内关闭煤矿建设压缩空气蓄能发电站开展了巷道储存高压气体的可行性、压缩空气储能的多物理场耦合、压缩空气储能地质安全稳定性理论研究。2019年,山西同煤集团首次利用关闭煤矿废弃巷道开工建设了总规模100 MW压缩空气储能电站。利用煤矿地下空间建设压缩空气储能电站必须符合一定的地质条件:①地下空间上覆具有非渗透性盖层;②围岩宜选择硬质岩,类别不宜低于Ⅲ类,且具有长期稳定性、密闭防渗;③水文地质条件简单;④构造稳定,不存在断层裂隙构造;⑤地下空间深度宜为500~1500 m。

### 2.2.3 地热能开发利用

煤矿地下空间具有温度变化小、蓄水量大、焓值较高等一系列优点,国外(加拿大、荷兰、英国和德国等)很早就利用废弃矿井开展了地热能开发利用,建成了多个示范工程(霍冉等,2019)(表4)。我国针对煤矿地下空间开展地热资源利用的示范工程较少,与国外相比,我国利用煤矿地下空间开发地热能具有一定的优势,一是我国很多煤矿为井工矿,深度埋深较大,有的煤矿采深达1000 m,而国外开展废弃矿井地热能利用的深度多在500 m以浅,随着深度增加,可供地热能利用的围岩温度也随之增加,这为地热能利用提供了良好的基础条件;二是我国很多煤矿分布在城市周边,这为地热能利用提供了供需条件,利用煤矿地下空间为周边生产和生活提供可持续的地热能,具有很好的经济和社会效益。

表4 国外典型开展废弃矿井地热能利用示范工程  
(据霍冉等,2019)

Table 4 Typical demonstration project for geothermal energy utilization in abandoned mines in foreign countries (from Huo Ran et al., 2019 &)

序号	国家(城市)	功率(kW)	水温(℃)	COP*
1	加拿大(Nova Scotia)	3.73	18.00	3.50
2	荷兰(Heerlen)	2800.00	22.0~28.0	5.60
3	英国(Hope Shaft)	10.00	14.00	3.95
4	英国(Caphouse)	10.50	17.00	5.20
5	德国(Marienberg)	690.00	12.00	4.30
6	德国(Freiberg)	25.00	10.20	3.50
7	西班牙(Barredo Shaft)	3500.00	23.00	5.50
8	美国(Park Hills)	112.00	14.00	3.67

注:\*为Coefficient of Performance。

目前,我国开展煤矿地下空间地热能利用处于

探索和起步阶段,一些学者围绕废弃矿井地热能利用循环系统模型(浦海等,2021)、以矿井水为储能介质在巷道群和采空区等地下空间通过太阳能集热和地热能资源为周边用户供热/制冷(郭平业等,2022)等方向进行了探索研究。基于我国煤矿地质条件复杂,缺少成熟的示范性建设工程的现状,新时期开展煤矿地下空间地热能开发利用要围绕煤矿地下空间深度与稳定性、矿井水的温度及其季节变化规律、矿井水水质及其排放、区位条件及供给需求等方面进行全面研究考虑,加强国外成功案例经验借鉴,充分挖掘我国煤矿地下空间地热能利用价值,助力“双碳”目标的实现。

### 2.3 其他功能化利用模式

谢和平、袁亮院士在借鉴世界范围内开发利用特殊地下空间的先进做法和经验基础上,结合我国实际,探索了适宜的特殊地下空间开发利用方法和发展模式,提出了关闭煤矿转型升级战略构想,除前面提到的储物和储能功能化利用外,还提出了利用地下空间开展深地实验、深地医疗、旅游开发等其他功能化利用模式(谢和平等,2017)。利用煤矿地下空间开展深地实验、深地医疗、旅游开发必须符合一定的地质条件:①围岩稳定且强度高,如火山岩、变质岩等;②低本底、低辐射;③深地实验室需具备超千米深层岩石覆盖。

#### 2.3.1 深地实验室

煤矿地下空间具有恒温、恒湿、外界干扰小、低本底无辐射等特征,为深地科学实验探索(暗物质探测、深地微生物研究、非常规岩石力学研究等)提供了良好的环境和场所(冯飞胜等,2022)。国际上本先后利用关闭矿井地下空间建成了多个地下实验室,代表性的有美国杜赛尔(DUSEL)、加拿大斯诺(SNOLAB)、日本神岗(Kamioka)、英国伯毕(Boulby)等深地实验室,上述实验室先后开展了包括中微子、暗物质等物理实验,取得了许多代表性重要成果(赵蕊等,2017)。我国在四川锦屏利用建设水电站时掘进的交通隧道建成了用于暗物质探测研究、中微子试验的深地实验室,是目前世界上岩石覆盖层最深的地下实验室(贺永胜等,2018)。因此,今后探索利用煤矿地下空间建设和发展深地实验室,对开展深地基础科学研究具有重要现实意义。

#### 2.3.2 深地医院

据研究,矿井地下空间独特的深地低辐射环境对细胞生长具有一定的减缓作用(罗萍嘉等,2019)。国外(罗马尼亚、乌克兰及波兰等)利用废

弃的盐矿地下空间建成了多个地下医院,从应用效果证明对慢性阻塞性肺疾病治疗患者的细胞免疫力有明显提高。我国谢和平院士于2015年首次提出深地医学概念,2017年底首次在东北夹皮沟金矿完成了深地医学研究基地及地下实验室建设。目前,虽然利用煤矿地下空间开展深地医院建设还处于空白期,但煤矿地下空间在深度和稳定环境方面的优势为未来开展深地医学研究提供了基本条件,尤其是在探索呼吸类、恶性肿瘤、细胞与人工器官培养等方面具有很好的医学价值(谢和平等,2017)。

### 2.3.3 旅游开发

20世纪60年代,德国、英国等对利用废弃矿井地下空间开展工业旅游进行了研究,比较典型的旅游资源开发案例有德国的然梅尔斯贝格博物馆、英格兰的国家煤矿博物馆、瑞典的地宫酒店等,国外的成功案例对我国煤矿地下空间旅游开发具有很好的借鉴作用(韩运等,2021)。我国利用关闭煤矿地下空间资源特点进行旅游开发的研究起步较晚,且具体实施的案例不多,仅在山西大同晋华宫煤矿、河北开滦唐山煤矿、安徽淮南矿区刘庄煤矿建成了以旅游开发为主题的国家矿山公园。

## 3 煤矿地下空间综合利用展望

煤矿地下空间功能化利用涉及多学科交叉领域,是一个新兴课题,也是一个综合难题,从宏观方面来说,我国关闭煤矿存在数量分布区域广、地下空间基本数据不清、地质条件复杂程度不一、功能化开发利用起步较晚等现状;从具体功能化利用方面来看仍存在一些有待解决的地质问题:①利用前的地质条件适宜性分析和安全性评价。主要是利用煤矿生产过程中取得的地质、岩石、采掘等数据,重点查明功能化利用空间的地质构造(断层、褶皱、陷落柱等)、围岩体基本物理力学性能(强度、稳定性、渗透性)、水文地质特征、地下空间范围等情况,以期保障地下空间利用过程中的工程地质安全。②利用中要研究煤矿地下空间动静多场演化与多相流体运移规律,掌握地下空间利用过程中大范围、多相(固、液、气)、多场(温度场、应力场、渗流场、热场、化学场)等之间的相互耦合作用对地质条件演化机制和围岩变形破坏规律,为煤矿地下空间功能化利用长期稳定性提供可靠的地质、力学和渗流环境认识。③利用后要定期对地下空间地质条件、安全条件及环境条件等方面进行长时间、多尺度协同监测与动态评估,尤其在液体及气体泄漏、围岩变化等方面加

强安全监测与预警,实现功能化利用生命周期地质体性能参数实时监测和灾变预警,为地下空间利用提供全方位安全保障。④地下空间稳定性改造。针对地下空间不同的功能化利用途径,一般需围绕地下空间密闭性、采空区稳定性、围岩稳定性和渗透性等进行一系列加固改良,为地下空间长期安全高效开发提供地质保障。新时期,为了推动我国煤矿地下空间多样化利用,需要在地下空间基础数据库建设、利用体系构建、关键技术攻关、先导示范工程推广等方面加强探索研究,以期实现煤矿地下空间精准开发与利用新局面。

### 3.1 煤矿地下空间基础数据库亟待建设

我国以煤为主导的能源结构短期内难以发生根本改变,面对国内现有存量以及未来持续增多的关闭煤矿,地下空间规模越来越大,建议尽快开展煤矿地下空间调查,摸清家底和利用现状,在全国和省区范围内建立煤矿地下空间管理信息系统库和云平台,及时掌握更新煤矿地下空间数量、规模、分布特征等,为煤矿地下空间多元化利用提供基础数据支撑,进而实现煤矿地下空间的实时动态管理和监测。

### 3.2 煤矿地下空间功能化利用体系亟待构建

我国针对煤矿地下空间利用和开发的研究起步较晚,大部分研究方法主要借鉴国外已经实施的成功案例。近些年,很多学者在煤矿地下空间利用方面开展了大量有益探索研究,逐渐实施了一些成功案例工程,但多种利用模式仍处于研究探索阶段,因地制宜对煤矿地下空间开发利用基础研究仍然薄弱,在煤矿地下空间的分类利用和等级评价体系还有待完善和提高。随着我国阶段性关闭煤矿数量逐年增多且煤矿地质条件复杂程度不一,国外利用模式可供借鉴有限的情况下,新时期需要围绕煤矿地下空间开发利用规模、利用水平、利用效果等方面加强国家层面整体规划,助力构建煤矿地下空间功能化利用在系统性、规模化、安全性、高效性等方面的体系建设。

### 3.3 煤矿地下空间功能化利用技术攻关亟待加强

安全稳定的煤矿地下空间环境与平衡稳定的循环体系是功能化开发利用的基本保障。我国关闭煤矿地下空间在规模体量、地质条件复杂性、开发利用程度等方面与国外相比均有很大的差异,功能化利用过程中面临着诸多难题,不能完全参考照搬国外开发利用模式。新时期需要围绕煤矿地下空间功能化利用方面加强关键技术攻关,形成适合中国国情、利用现状的保障理论与技术。储物方面:针对不同

类型的储物(水、气、油、核废料等)特征,需加强煤矿遴选、可用储存空间、密封性能、储存时间、实时监测手段等关键环节深入研究;储能方面:需要围绕工程选址、长期运行过程中围岩及坝体稳定性分析评价及运行过程全方位监测等方面加强研究。

### 3.4 煤矿地下空间功能化利用示范工程亟待推广

随着煤炭资源枯竭和国家去产能等原因,关闭煤矿逐年增多,但煤矿地下空间却未得到有效利用。在当前煤矿地下空间功能化利用示范工程成功的基础上,要进一步向类似条件煤矿进行技术推广应用,以推动煤矿地下空间利用方式多样化发展,如地下储水库在神东矿区取得很好效果后,可进一步向蒙陕接壤区关闭煤矿进行推广应用,进而可以利用煤矿地下空间在蒙陕地区建成超大规模煤矿地下水库群,助力煤炭资源实现绿色开采。

## 4 结论

新时期我国煤炭产业持续推进供给侧结构性改革,随着煤炭资源的长期大规模开采而形成的地下空间总量在进一步加大,如何合理、高效、精准利用煤矿地下空间已成为一个亟需解决的问题。

(1)我国煤矿地下空间呈现总量大、分布广、地质条件差异大等特征,“十三五”期间,全国前十大产煤省份生产煤矿形成地下空间量合计约36.24亿立方米,前十大产煤省份关闭煤矿数量达1530处,关闭煤矿井巷可利用地下空间量总计约0.96亿立方米,可见煤矿地下空间体量巨大,具有很大的应用潜力。

(2)系统总结了国内外煤矿地下空间在储物(储水、储气、储油、低中放射性核废料处置库、二氧化碳封存)、储能(抽水蓄能、压缩空气储能、地热)和其他功能化(深地实验室、深地医院、旅游开发)利用模式方面的开发利用现状,针对每种利用模式,提出了利用过程中应该具备的地质、构造、围岩岩性、密闭性等基本条件。

(3)我国煤矿地下空间功能化利用整体处于研究探索阶段,针对利用前、利用中、利用后和地下空间稳定性改造4个方面面临的主要科学问题,建议新时期围绕煤矿地下空间功能化利用重点开展四个方面工作:加强基础数据库建设、加快利用体系构建、加大关键技术攻关、加快示范工程推广,推进我国煤矿地下空间的精准开发与利用。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese

- with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 卞正富,朱超斌,周跃进,徐雨农. 2022. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估. 煤田地质与勘探, 50(12): 51~64.
- 陈海生,凌浩恕,徐玉杰. 2019. 能源革命中的物理储能技术. 中国科学院院刊, 34(4): 450~459.
- 陈树旺,崔少东,梁久正,公繁浩,卞雄飞,张庆森. 2021. 利用废弃地下空间建设战略原油储备库的构想. 地质与资源, 30(6): 707~709.
- 陈文轩,康宝伟,王旭宏,吕涛,赵焕梅,王馨,殷娟,李昶. 2018. 国外利用废弃矿井对放射性废弃物的处置. 工业建筑, 48(4): 9~12.
- 池明波,吴宝杨,曹志国,李鹏,刘小庆,李海祥,张勇,杨毅. 2014. 煤矿地下水库煤柱坝体失稳机理及前兆信息 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1~14 [2024-01-18] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230210.0920.003.html>.
- 杜俊生,陈结,姜德义,范金洋,张传玖,陈紫阳. 2023. 中国废弃煤矿压气蓄能潜力与初步可行性研究. 工程科学与技术, 55(1): 253~264.
- 冯飞胜,张继强,王于. 2022. 中国关闭/废弃矿井的分类利用与等级评价. 科技导报, 40(22): 105~112.
- 顾大钊,颜永国,张勇,王恩志,曹志国. 2016. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析. 煤炭学报, 41(7): 1589~1597.
- 顾大钊. 2015. 煤矿地下水库理论框架和技术体系. 煤炭学报, 40(2): 239~246.
- 郭平业,王蒙,孙晓明,何满潮. 2022. 废弃矿井地下空间反季节循环储能研究. 煤炭学报, 47(6): 2193~2206.
- 韩运,刘钦节,吴犇牛,杨科,董志勇. 2021. 废弃矿井地下空间旅游资源开发利用模式研究. 煤田地质与勘探, 49(4): 79~85.
- 郝宪杰,陈泽宇,张通,王振宇,任波,武志德,陈凯,詹睿城,黄睿来. 2021. 中国关闭/废弃矿井地下空间储物环境稳定性保障:现状、评价及改造. 科技导报, 39(13): 29~35.
- 何涛,王传礼,高博,陈凡,王伟俊,赵凯平. 2021. 废弃矿井抽水蓄能电站基础建设装备关键问题及对策. 科技导报, 39(13): 59~65.
- 贺永胜,孔福利,范俊奇,李世民. 2018. 国际深地实验室发展综述及深地防护实验室建设构想. 防护工程, 40(1): 69~78.
- 黄定国,侯兴武,吴玉敏. 2014. 煤矿废弃矿井采空区封存CO<sub>2</sub>的机理分析和能力评价. 环境工程, 32(S1): 1076~1080.
- 霍冉,徐向阳,姜耀东. 2019. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望. 煤炭科学技术, 47(10): 267~273.
- 吉莉,刘峰,尚建选,董霁红,黄艳利. 2022. 关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径. 煤炭科学技术, 50(5): 281~289.
- 姜琳婧,方杰,杨宗,赵怡晴,赵会杰. 2020. 基于GIS与CAD的煤矿地下水库库容计算平台开发研究. 煤炭科学技术, 48(11): 166~171.
- 梁冰,迟海波,汪北方,孙本通. 2020. AHP理论下的煤矿地下水库储水结构稳定性评价. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 39(3): 195~200.
- 刘峰,李树志. 2017. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨. 煤炭学报, 42(9): 2205~2213.
- 刘汉斌,张亚宁,程芳琴. 2019. 山西关闭煤矿资源利用现状及开发利用建议. 煤炭经济研究, 39(10): 78~82.
- 刘恒阳. 2022. “双碳”背景下天然气地下储气库机遇与挑战. 石油与天然气化工, 51(6): 70~76.
- 刘钦节,王金江,杨科,邸晟钧,董志勇. 2021. 关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究. 煤田地质与勘探, 49(4): 71~78.

- 罗萍嘉, 田亚琦. 2019. 城区型废弃矿区地下空间开发策略研究. 中国矿业, 28(3): 52~57+65.
- 毛东桂. 2022. 废弃石膏矿地下储油空间围岩损伤演化规律及稳定性研究. 导师: 周跃进. 江苏徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 浦海, 卞正富, 张吉雄, 许军策. 2021. 一种废弃矿井地热资源再利用系统研究. 煤炭学报, 46(2): 677~687.
- 任辉, 吴国强, 张谷春, 宁树正, 朱士飞, 王行军, 贺小龙, 梁叶萍. 2019. 我国关闭/废弃矿井资源综合利用形势分析与对策研究. 中国煤炭地质, 31(2): 1~6+81.
- 孙强, 张卫强, 耿济世, 胡建军, 张玉良, 吕超, 葛振龙, 李鹏飞, 贾海梁, 刘亚斌, 李宇翔. 2023. 利用煤炭开发地下空间储能的技术路径与地质保障. 煤田地质与勘探, 51(2): 229~242.
- 唐鑫, 龚绪龙, 许书刚, 张其琪, 郭慧, 邓峰丽. 2022. 苏南都市圈城市地下空间资源开发利用现状与地质调查对策. 地质论评, 68(2): 593~605.
- 王兵, 刘朋帅, 邓凯磊. 2021. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究. 矿业科学学报, 6(6): 667~677.
- 王帅, 蒲宝基, 蹇军强, 宋立平, 李瑞华, 李庆. 2020. 废弃煤矿压缩空气储能地质安全稳定性分析. 煤炭工程, 52(8): 133~137.
- 王双明, 申艳军, 孙强, 刘浪, 师庆民, 朱梦博, 张波, 崔世东. 2022. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO<sub>2</sub> 地下封存途径与技术难题探索. 煤炭学报, 47(1): 45~60.
- 王佟, 韩效忠, 邓军, 孙亚军, 李增学, 唐书恒, 毛善君, 林中月, 李聪聪, 赵欣, 孙杰, 宋洪柱, 张彪, 孟凡彬, 吴兆剑, 邓小利, 江涛. 2023. 论中国煤炭地质勘查工作在新条件下的定位与重大研究问题. 煤田地质与勘探, 51(2): 27~44.
- 吴迪. 2020. 废弃煤矿地下空间压缩空气储能的多物理场耦合理论. 导师: 王建国. 江苏徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 吴琼. 2021. 废弃矿井处置中低放核废料的迁移衰变机理数值模拟研究. 导师: 王建国. 江苏徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 谢和平, 高明忠, 高峰, 张茹, 鞠杨, 徐恒, 王勇威. 2017. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术. 煤炭学报, 42(6): 1355~1365.
- 谢和平, 高明忠, 刘见中, 周宏伟, 张瑞新, 陈佩佩, 刘志强, 张安林. 2018. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究. 煤炭学报, 43(6): 1487~1503.
- 谢和平, 刘见中, 高明忠, 张瑞新, 周宏伟, 刘志强. 2018. 特殊地下空间的开发利用. 北京: 科学出版社, 1~279.
- 邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 华健, 常晓军, 蔡小虎. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究——以杭州市为例. 地质论评, 68(2): 607~614.
- 徐乐昌, 任长顺, 高洁, 石敏, 王尔奇. 2013. 低放废物近地表岩洞处置实践. 核安全, 12(1): 73~78.
- 杨科, 付强, 袁亮, 陈宁, 刘钦节, 杨卿干. 2023. 关闭/废弃矿井地下空间抽水蓄能发展战略研究. 矿业科学学报, 8(3): 283~292.
- 姚西龙, 葛帅帅, 徐晓瑞. 2021. 废弃井巷抽水储能技术构想及关键技术参数研究. 煤炭工程, 53(9): 117~121.
- 袁亮, 姜耀东, 王凯, 赵毅鑫, 郝宪杰, 徐超. 2018. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考. 煤炭学报, 43(1): 14~20.
- 袁亮, 杨科. 2021. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策. 煤炭学报, 46(1): 16~24.
- 袁亮, 张通, 张庆贺, 江丙友, 吕鑫, 李姗姗, 付强. 2022. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考. 煤炭学报, 47(6): 2131~2139.
- 张保, 曹志国, 池明波, 吴宝杨, 张西斌, 张勇. 2022. 煤矿地下水库建设适应性条件及其设计体系. 煤矿安全, 53(2): 93~98.
- 张保生, 陈宁, 高博, 陈凡. 2021. 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机关键技术. 科技导报, 39(13): 66~72.
- 张建羽, 吕敦玉, 刘长礼, 王翠玲, 孟舒然, 刘松波, 张云. 2023. 河南郑州市岩土地层结构特征及地下空间开发利用建议. 地质论评, 69(1): 305~315.
- 张凯, 刘舒予, 曹志国, 高举, 陈湘宇, 严嘉宇. 2023. 煤矿地下水库水岩作用时间规律模拟试验研究. 煤田地质与勘探, 51(3): 54~64.
- 赵蕊, 姚伟. 2017. 中外极深地下科学实验室建设比较研究. 安徽建筑大学学报, 25(4): 74~78+89.
- 智国军, 鞠金峰, 刘润, 杨瑞刚, 方志远, 张成璞. 2022. 水岩相互作用对煤矿地下水库水质影响机理研究. 采矿与安全工程学报, 39(4): 779~785.
- 智国军, 刘润, 杨瑞刚, 秦伟, 鞠金峰. 2022. 煤矿地下水库相邻采空区水力联系及渗流规律研究. 矿业安全与环保, 49(2): 9~15.
- 朱超斌, 周跃进, 卞正富, 陈宁, 夏晨阳, 白海波. 2022. 废弃矿井抽水蓄能句法视角下拓扑模型构建及空间优化. 煤炭学报, 47(6): 2279~2288.
- Bian Zhengfu, Zhu Chaobin, Zhou Yuejin, Xu Yunong. 2022&. Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River Basin. Coal Geology & Exploration, 50(12): 51~64.
- Chen Haisheng, Ling Haoshu, Xu Yujie. 2019&. Physical energy storage technology in energy revolution. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34(4): 450~459.
- Chen Shuwang, Cui Shaodong, Liang Jiuzheng, Gong Fanhao, Bian Xiongfei, Zhang Qingsen. 2021&. Conception of constructing strategic crude oil storage by utilization of abandoned underground space. Geology and Resources, 30(6): 707~709.
- Chen Wenxuan, Kang Baowei, Wang Xuhong, Lyu Tao, Zhao Huanmei, Wang Xin, Yin Yue, Li Chang. 2018&. The disposal of radioactive waste using abandoned mine at abroad. Industrial Construction, 48(4): 9~12.
- Chi Mingbo, Wu Baoyang, Cao Zhiguo, Li Peng, Liu Xiaoqing, Li Haixiang, Zhang Yong, Yang Yi. 2024. Research on instability mechanism and precursory information of coal pillar dam of underground reservoir in coal mine. Coal Science and Technology: 1~14. [2024-01-18] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20230210.0920.003.html>.
- Distrigaz S A. 1981. Belgian experience with gas storage in. Coal mines pipe line industry, 15(10).
- Du Junsheng, Chen Jie, Jiang Deyi, Fan Jinyang, Zhang Chuanjiu, Chen Ziyang. 2023&. Study on the potential and pre-feasibility of compressed air energy storage of abandoned coal mines in China. Advanced Engineering Sciences, 55(1): 253~264.
- Feng Feisheng, Zhang Jiqiang, Wang Yu. 2022&. Classified utilization and grade evaluation of closed/abandoned mines in China. Science & Technology Review, 40(22): 105~112.
- Gu Dazhao, Yan Yongguo, Zhang Yong, Wang Enzhi, Cao Zhiguo. 2016&. Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal Pillars in coal mine underground reservoir. Journal of China Coal Society, 41(7): 1589~1597.
- Gu Dazhao. 2015&. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir. Journal of China Coal Society, 40(2): 239~246.

- Guo Pingye, Wang Meng, Sun Xiaoming, He Manchao. 2022&. Study on off-season cyclic energy storage in underground space of abandoned mine. *Journal of China Coal Society*, 47(6): 2193~2206.
- Han Yun, Liu Qinjie, Wu Benniu, Yang Ke, Dong Zhiyong. 2021&. Study on exploitation and utilization mode of tourism resources of the underground space in abandoned mines. *Coal Geology & Exploration*, 49(4): 79~85.
- Hao Xianjie, Chen Zeyu, Zhang Tong, Wang Zhenyu, Ren Bo, Wu Zhide, Chen Kai, Zhan Rongcheng, Huang Ruilai. 2021&. Environmental stability guarantee of underground storage in closed/abandoned mines in China: Current situation, evaluation and transformation. *Science & Technology Review*, 39(13): 29~35.
- He Tao, Wang Chuanli, Gao Bo, Chen Fan, Wang Weijun, Zhao Kaiping. 2021&. Key problems and countermeasures for infrastructure equipment of abandoned mine pumped storage power station. *Science & Technology Review*, 39(13): 59~65.
- He Yongsheng, Kong Fuli, Fan Junqi, Li Shimin. 2018&. Summarization of international deep underground laboratories development and conceiving of deep underground protective laboratory. *Protective Engineering*, 40(1): 69~78.
- Huang Dingguo, Hou Xingwu, Wu Yumin. 2014&. Mechanism analysis and capacity evaluation of CO<sub>2</sub> sealed in goaf of abandoned coal mine. *Environmental Engineering*, 32(S1): 1076~1080.
- Huo Ran, Xu Xiangyang, Jiang Yaodong. 2019&. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad. *Coal Science and Technology*, 47(10): 267~273.
- Jalili P, Saydam S, Cinar Y. 2011. CO<sub>2</sub> storage in abandoned coal mines.
- Ji Li, Liu Feng, Shang Jianxuan, Dong Jihong, Huang Yanli. 2022&. Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines. *Coal Science and Technology*, 50(5): 281~289.
- Jiang Linjing, Fang Jie, Yang Zong, Zhao Yiqing, Zhao Huijie. 2020&. Study on precision computing platform development of coal mine underground reservoir capacity based on GIS and CAD. *Coal Science and Technology*, 48(11): 166~171.
- Liang Bing, Chi Haiho, Wang Beifang, Sun Bentong. 2020&. Stability evaluation of water storage structure in coal mine groundwater reservoir based on AHP theory. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 39(3): 195~200.
- Liu Feng, Li Shuzhi. 2017&. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines. *Journal of China Coal Society*, 42(9): 2205~2213.
- Liu Hanbin, Zhang Yaning, Cheng Fangqin. 2019&. Utilization status and development suggestions on closed coal mine resources in Shanxi Province. *Coal Economic Research*, 39(10): 78~82.
- Liu Hengyang. 2022&. Opportunities and challenges of underground natural gas storage based on carbon peak and carbon neutrality goals. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 51(6): 70~76.
- Liu Qinjie, Wang Jinjiang, Yang Ke, Di Shengjun, Dong Zhiyong. 2021&. Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines. *Coal Geology & Exploration*, 49(4): 71~78.
- Luo Pingjia, Tian Yaqi. 2019&. Research on the exploitation strategies of the underground space in urban type abandoned mining area. *China Mining Magazine*, 28(3): 52~57+65.
- Mao Donggui. 2022&. Study on damage evolution law and stability of surrounding rock in underground oil storage space of abandoned gypsum mine. Tutor: Zhou Yuejin. Xuzhou: Master Thesis of China University of Mining and Technology: 1~88.
- Mauke R, Herbert H J. 2015. Large scale *in situ* experiments on sealing constructions in underground disposal facilities for radioactive wastes - Examples of recent BfS- and GRS-activities. *Progress in Nuclear Energy*, 84: 6~17.
- Meyer H. 2001. Die einlagerung radioaktiver abfälle in der schachtanlage asse.
- Niemann A, Balmes J P, Schreiber U, Wagner H J, Friedrich T. 2018. Proposed underground pumped hydro storage power plant at Prosper—Haniel colliery in Bottrop-state of play and prospects. Mining report, 154(3): 214~223.
- Pu Hai, Bian Zhengfu, Zhang Jixiong, Xu Junce. 2021&. Research on a reuse mode of geothermal resources in abandoned coal mines. *Journal of China Coal Society*, 46(2): 677~687.
- Ren Hui, Wu Guoqiang, Zhang Guchun, Ning Shuzheng, Zhu Shifei, Wang Xingjun, He Xiaolong, Liang Yeping. 2019&. The situation analysis and strategy research of closed/abandoned mine resources comprehensive utilization in China. *Coal Geology of China*, 31(2): 1~6+81.
- Schultz R A, Evans D J. 2020. Occurrence frequencies and uncertainties for US underground natural gas storage facilities by state. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84: 103630.
- Sun Qiang, Zhang Weiqiang, Geng Jishi, Hu Jianjun, Zhang Yuliang, Lyu Chao, Ge Zhenlong, Li Pengfei, Jia Hailiang, Liu Yabin, Li Yuxiang. 2023&. Technological path and geological guarantee for energy storage in underground space formed by coal mining. *Coal Geology & Exploration*, 51(2): 229~242.
- Tang Xin, Gong Xulong, Xu Shugang, Zhang Qiqi, Guo Hui, Deng Fengli. 2022&. Development and utilization of urban underground space resources and geological survey countermeasures in southern Jiangsu metropolitan area. *Geological Review*, 68(2): 593~605.
- Wang Bing, Liu Pengshuai, Deng Kailei. 2021&. Site selection of pumped storage power station in abandoned mines: Results from fuzzy-based multi criteria decision model. *Journal of Mining Science and Technology*, 6(6): 667~677.
- Wang Shuai, Pu Baoji, Jian Junqiang, Song Liping, Li Ruihua, Li Qing. 2020&. Geological safety and stability analysis on compressed air energy storage of abandoned coal mine. *Coal Engineering*, 52(8): 133~137.
- Wang Shuangming, Shen Yanjun, Sun Qiang, Liu Lang, Shi Qingmin, Zhu Mengbo, Zhang Bo, Cui Shidong. 2022&. Underground CO<sub>2</sub> storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target. *Journal of China Coal Society*, 47(1): 45~60.
- Wang Tong, Han Xiaozhong, Deng Jun, Sun Yajun, Li Zengxue, Tang Shuheng, Mao Shanjun, Lin Zhongyue, Li Congcong, Zhao Xin, Sun Jie, Song Hongzhu, Zhang Biao, Meng Fanbin, Wu Zhaojian, Deng Xiaoli, Jiang Tao. 2023&. Orientation and major research problems of coal geological exploration in China under new conditions. *Coal Geology & Exploration*, 51(2): 27~44.
- Wu Di. 2020&. Study on multi-physical field coupling theory of compressed air energy storage in underground space of abandoned coal mine. Tutor: Wang Jianguo. Xuzhou: Master Thesis of China University of Mining and Technology: 1~87.
- Wu Qiong. 2021&. Numerical simulation study on migration and decay mechanism of low-level nuclear waste in abandoned mine disposal.

- Tutor: Wang Jianguo. Xuzhou; Master Thesis of China University of Mining and Technology: 1~80.
- Xie Heping, Gao Mingzhong, Gao Feng, Zhang Ru, Ju Yang, Xu Heng, Wang Yongwei. 2017&. Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shut-down coal mines. *Journal of China Coal Society*, 42(6): 1355~1365.
- Xie Heping, Gao Mingzhong, Liu Jianzhong, Zhou Hongwei, Zhang Ruixin, Chen Peipei, Liu Zhiqiang, Zhang Anlin. 2018&. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1487~1503.
- Xie Heping, Liu Jianzhong, Gao Mingzhong, Zhang Ruixin, Zhou Hongwei, Liu Zhiqiang. 2018&. Development and utilization of special underground space. Beijing: Science Press, 1~279.
- Xing Huaixue, Dou Fanfan, Ge Weiya, Hua Jian, Chang Xiaojun, Cai Xiaohu. 2022&. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization. *Geological Review*, 68(2): 607~614.
- Xu Lechang, Ren Changshun, Gao Jie, Shi Min, Wang Erqi. 2013&. A case study of low level radioactive waste disposal in near-surface cavern. *Nuclear Safety*, 12(1): 73~78.
- Yang Ke, Fu Qiang, Yuan Liang, Chen Ning, Liu Qinjie, Yang Qinggan. 2023&. Development strategy of pumped storage in underground space of closed/abandoned mines. *Journal of Mining Science and Technology*, 8(3): 283~292.
- Yao Xilong, Ge Shuaishuai, Xu Xiaorui. 2021&. Technical conception and key technical parameters of pumped energy storage in abandoned wells and roadways. *Coal Engineering*, 53(9): 117~121.
- Yuan Liang, Jiang Yaodong, Wang Kai, Zhao Yixin, Hao Xianjie, Xu Chao. 2018&. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China. *Journal of China Coal Society*, 43(1): 14~20.
- Yuan Liang, Yang Ke. 2021&. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines. *Journal of China Coal Society*, 46(1): 16~24.
- Yuan Liang, Zhang Tong, Zhang Qinghe, Jiang Bingyou, Lü Xin, Li Shanshan, Fu Qiang. 2022&. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality. *Journal of China Coal Society*, 47(6): 2131~2139.
- Zhang Bao, Cao Zhiguo, Chi Mingbo, Wu Baoyang, Zhang Xibin, Zhang Yong. 2022&. Adaptive condition of construction and design system of coal mine underground reservoir. *Safety in Coal Mines*, 53(2): 93~98.
- Zhang Baosheng, Chen Ning, Gao Bo, Chen Fan. 2021&. Key technologies of pump—turbine in underground pumped storage station using abandoned mine. *Science & Technology Review*, 39(13): 66~72.
- Zhang Jianyu, Lv Dunnyu, Liu Changli, Wang Cuiling, Meng Shuran, Liu Songbo, Zhang Yun. 2023&. Characteristics of rock – soil stratigraphic structure in Zhengzhou City and suggestions for development and utilization of underground space. *Geological Review*, 69(1): 305~315.
- Zhang Kai, Liu Shuyu, Cao Zhiguo, Gao Ju, Chen Xiangyu, Yan Jiayu. 2023&. Study on the time law of water—rock interaction in coal mine groundwater reservoir. *Coal Geology & Exploration*, 51(3): 54~64.
- Zhao Rui, Yao Yi. 2017&. A comparative study of Chinese and foreign deep underground science laboratories' construction. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 25(4): 74~78+89.
- Zhi Guojun, Ju Jinfeng, Liu Run, Yang Ruigang, Fang Zhiyuan, Zhang Chengpu. 2022&. Water—rock interaction and its influence on water quality in the underground reservoir. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 39(4): 779~785.
- Zhi Guojun, Liu Run, Yang Ruigang, Qin Wei, Ju Jinfeng. 2022&. Study on hydraulic connection and seepage law of adjacent goaf of underground reservoir in coal mine. *Mining Safety & Environmental Protection*, 49(2): 9~15.
- Zhu Chaobin, Zhou Yuejin, Bian Zhengfu, Chen Ning, Xia Chenyang, Bai Haibo. 2022&. Topological model construction and space optimization of abandoned mine pumped storage from the perspective of space syntax. *Journal of China Coal Society*, 47(6): 2279~2288.

## Present situation and prospect of comprehensive utilization of underground space in coal mines in China in the new period

HUO Chao<sup>1)</sup>, WANG Lei<sup>2)</sup>, XIE Zhiqing<sup>1)</sup>, PAN Haiyang<sup>1)</sup>, FANG Huiming<sup>1)</sup>,  
ZHAO Yue<sup>1)</sup>, WANG Dandan<sup>1)</sup>, WANG Danfeng<sup>1)</sup>

1) *General Prospecting Institute of China National Administration of Coal Geology, Beijing, 100039;*

2) *China Coal Society, Beijing, 100031*

**Abstract:** Long-term large-scale exploitation of coal resources in China has produced a large number of underground spaces. Directly shutting it down will not only waste underground space resources, but also cause a series of safety, environmental and economic problems. Therefore, how to scientifically and efficiently solve the comprehensive development and utilization problem of underground space in coal mines is of great practical significance for the development of the coal industry and even the national economy. This article takes the main coal producing provinces as representatives and combines the latest data collected from research on production and closure of coal mines to deeply analyze the overall situation of underground space in production and closure of coal mines during the 13th Five Year Plan period. It systematically summarizes the current functional utilization status of

underground space in coal mines at home and abroad in terms of storage and energy storage, and points out the scattered resource data information in the current utilization of underground space in coal mines in China, the overall development and utilization rate is low, related technology research work is still relatively lagging behind, and there are few mature demonstration projects available for promotion and reference. Four key development directions have been proposed in the new era, including the construction of coal mine underground space basic database, utilization system construction, key technology research, and demonstration project promotion.

**Keywords:** underground space of coal mine; underground space estimation; comprehensive utilization; utilization model; international trend; present situation in China

**Acknowledgements:** Thank you for the revision suggestions put forward by reviewers and the strong support of the editorial department.

**First author:** HUO Chao, male, born in 1985, Master Degree Candidate, Senior engineer, Mainly engaged in coal resource exploration and coal mine geological disaster control technology research; Email: 493578419@qq.com

**Manuscript** received on: 2023-09-11; Accepted on: 2024-01-18; Network published on: 2024-02-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2024.02.001

**Edited by:** LIU Zhiqiang