

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

郝宪杰^{1,2}, 陈泽宇², 张通³, 王振宇², 任波^{2,4}, 武志德^{5,6}, 陈凯², 詹镕城², 黄睿来²

1. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083
2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083
3. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001
4. 淮南矿业(集团) 有限责任公司深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室, 淮南 232000
5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
6. 中国石油天然气集团公司油气地下储库工程重点实验室, 廊坊 065007

摘要 中国存在大量关闭/废弃矿井, 其中关闭/废弃矿井地下空间资源是稳定且易开发的资源。在梳理不同类型储物下(油、气、水、核废料、种子等)研究现状的基础上, 研究了矿井遴选、密封性能、储物空间大小、储物时间等, 提出了相应的地下空间储物评价指标和改造技术, 形成了适合中国国情、自然地质条件的关闭/废弃矿井地下空间储物环境稳定性保障理论与技术。

关键词 关闭/废弃矿井; 地下空间; 储物环境; 稳定性保障

随着煤炭工程技术发展和中国能源组成结构的不断调整, 加之煤炭供给关系的不断变化, 以及煤矿自身服务年限的期满, 使得关闭/废弃矿井不断产生, 这一方面带来了生态污染等很多生态问题^[1-3], 而另一方面关闭/废弃矿井仍赋存大量可利

用资源(如废弃矿井生产区还有很多闲置厂房和设备以及大量的土地资源得不到充分利用), 尤其是矿井地下空间及矿井地上空间等资源化可利用空间资源^[4-6], 开发利用空间巨大。中国关闭/废弃矿井空间资源研究较薄弱且技术不成熟, 故亟需开展

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51804309); 中国矿业大学(北京)越崎青年学者资助计划项目(2019QN02); 国家重点研发计划项目(2017YFC0805801); 中国石油天然气股份有限公司直属院所基金项目(2019D-500811); 中国矿业大学(北京)本科教改项目(J200103)

作者简介: 郝宪杰, 副教授, 研究方向为地下工程稳定性, 电子信箱: haoxianjie@cumtb.edu.cn

引用格式: 郝宪杰, 陈泽宇, 张通, 等. 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[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 29-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.003

废弃矿井地下空间资源利用研究。

针对关闭/废弃矿井资源化可利用资源,有学者建立了煤层气资源预测数学模型,对关闭/废弃矿井内煤层气资源量进行了评价,为煤层气开采提供了方案^[7];制定“疏通解堵、降低水位、增透增产”的技术方案,为废弃矿井煤层气二次抽采提供指导^[8];建立关闭/废弃矿井煤层气资源数学模型,分析关闭/废弃矿井煤层气资源的状态特征,提出相应开采措施^[9]。针对废弃矿井资源化可利用资源,已有学者将废弃矿井地热资源与蓄热利用相结合,设计利用水源热泵对家居进行季节性供暖;采用关闭/废弃矿井双循环地热发电系统和关闭/废弃矿井热干岩发电系统进行发电^[1];荷兰海尔伦市通过智能化集中控制,将建筑物群、储能系统、冷热供应等装置连接形成“矿井水热能开发系统”^[10]。针对废弃矿井功能性可利用资源,已有学者研究了国内外关闭/废弃矿井放射性废物处置的现状,提出了基于关闭/废弃矿井的选址原则^[11];提出实现关闭/废弃矿井地下空间开发利用的“矿城”转型方案^[12];将矿井开拓、准备巷道进行改性处理,形成密封的储气空间^[13-14]。

综上所述可以看出,关闭/废弃矿井可利用资源的功能化资源中,关闭/废弃矿井地下空间资源是最为稳定且易开发的资源,开发成本低,回报高,易实现。尽管当前有部分研究针对各个不同的储物类型,但尚未有专门针对关闭/废弃矿井地下储“物”空间的全面研究,不同类型储物下(油、气、水、核废料、种子等)的矿井遴选、密封性能、储物空间大小、储物时间等方面尚需展开深入研究,形成适合中国国情、自然地质条件的关闭/废弃矿井地下空间储物环境稳定性保障理论与技术。

1 不同类型储物稳定性研究现状

1.1 储气

根据各年度国内外油气行业发展报告,中国液化天然气进口量将继续低速稳态增长^[15],其对外依存度依然较高,亟需开辟新的建库领域,加快地下储气库能力建设。

采用废弃矿井地下空间作为储气库,国外已有先例。目前全球共有3座煤矿地下储气库,分别位于比利时和美国,这些煤矿储气库均是为了满足天然气调峰需求而建设,目前美国的储气库还在运行^[13]。

利用关闭/废弃矿井作为地下储气库,所注入的气必须能在地下空间保存很长时间,一般至少20年,因此在废弃矿井选址时需要注意:(1) 渗透性较低的基岩可以作为较好矿井地下储气库封闭天然气盖层;(2) 矿井围岩应弹性模量较高、完整性较好;(3) 地下空间体积应满足要求;(4) 密封界面处的气渗应单独分析;(5) 位置选择时应尽量靠近天然气主管道或用气负荷中心。

虽然利用关闭/废弃矿井作为地下储气库已有成功的先例,但目前仍然有许多难题需要解决。首先是对关闭/废弃矿井已形成的渗气途径密闭问题的解决,例如井筒、钻孔和断层等。除此以外,针对不同废弃矿井其原有开采方法所形成的采空区的稳定性问题也要解决,一些开采方法如自然垮落法、充填采矿法所形成地下空间的利用能力也需要考虑。还有对于关闭/废弃矿井型地下储气库来说,采场顶板中存在大量方向各异的采动裂隙且应力状态不相同,因此,需结合现场实际情况,计算不同的废弃矿井合理的储气压力。

综上,利用关闭/废弃矿井建立地下储气库要面临许多困难,但却是解决中国天然气储存需求和地下空间资源利用问题的一种行而有效的方法^[16-18]。建议调研关闭/废弃矿井,通过废弃矿井信息库,为关闭/废弃矿井地下空间资源利用提供数据支持。同时,深入研究不同类型废弃矿井空间地质条件、空间改造方式、密封性能、经济性和安全性。此外,建立地下储气库最主要的问题还是如何保障储气环境的稳定性,在解决了环境稳定性问题之后可以合理开发不同类型的废弃矿井,开辟新的建库邻域。

1.2 储水

据统计,中国每年因煤炭开采破坏大量地下水,地下水利用率较低。开发关闭/废弃矿井的地下空间资源储水蓄能技术,对解决中国水资源匮乏

问题有很大帮助。

中国工程院院士钱鸣高针对煤炭开采对地下水资源的影响提出煤矿绿色开采理念和煤矿保水开采技术。而后有学者发展了基于充填开采和限高开采等技术的“堵截法”,能保护隔水层不受破坏,避免导水裂隙的形成,而以“导储用”为核心的煤矿地下水保护利用理念,则能实现矿井水引导至采空区,并进行储存及利用。目前已经在神东矿区成功建设了示范工程^[19]。为了保障地下水库空间环境的稳定,使其能够长期稳定的运行,需要解决许多关键性问题。首先是要进行水源预测,了解地下水的运移规律以及水量预测是建设地下储水库的前提;同时,为了保障地下储水库的安全运行,还要建立配套的监测和预警措施。

虽然目前已经建成了多个地下储水库,但大多数建在正在生产的矿井中,虽然对于废弃/关闭矿井建设地下储水库具有一定指导意义,但还是具有一定差别,例如废弃矿井无需考虑开采影响,其围岩稳定性也与正在开采的矿井不同。由于废弃/关闭矿井的水文地质条件更为复杂,库存空间更难确定,如何充分利用废弃/关闭矿井地下空间也是接下来要考虑的问题。

1.3 储油

中国国家石油储备主要采取地面罐和地下洞库2种形式。自2000年以来,中国正在建立石油储备体系^[20]。大型储油罐作为石油行业中用途最为广泛的储油方式,建设容易,储油量大,易管理,但诸多石油泄漏、爆炸、火灾事故使其安全性成为需要深入研究的课题。相比普通储油方式,地下储油库安全性、环保性和经济性都要更好,优势显著,但地下储油库选址前需要重点考虑区域围岩稳定性、顶板稳定性及地下水条件,如地下储油洞库围岩易变形破坏,长期时效稳定问题更为严峻;地下洞库与地下水密切相关,因此地下空间储油对渗透性更加严格,但目前针对关闭/废弃矿井的地下水动力学场的数值模拟分析的方法还较少。上述环境稳定性问题对储油方法的变革创新提出了新要求,亟需对已有的储油方法进行改造或开发出新的储油方法^[21-23]。

随着国家政策大力加快石油战略储备,大力发展地下油库建设,利用废弃煤矿地下空间成为地下储油库的新方向。废弃煤矿地下空间储油安全性高、运行成本低、火灾风险低、气温恒定。已有许多国家就废弃矿井储存石油展开相关实践,如美国、法国、德国等也曾将关闭/矿井废弃巷道作为战略物资地下储库。

1.4 处置低中放射性核废料

由于经济、清洁等优点,核能越来越受到人们的重视,但妥善处理核废料也是必须要解决的问题^[24]。各国曾提出过多种方案进行核废料的回收处理,包括埋入潜设区、冰冻处理等,其中地质深埋法是目前公认的针对放射性核废料的最有效可行的方法^[25-26]。若能将关闭/废弃矿井经过改性、筛选从而作为中低放废物的处置场所,不仅可以解决中低放废物的去向,还可以实现关闭/废弃矿井的再次利用。

德国、捷克已经率先开展了该方面的研究,2007年,处置低中放废物所需的巷道已在德国进行建设,2019年开始处置低中放废物。中国起步较晚,目前仅有辽宁兴城某废弃铀矿2000年开始处置废物,2003年处置完毕。

利用关闭/废弃矿井处理中低放废物涉及体系较多,选址、监测、安全环境都应进行深入考虑,如围岩力学性质应较好、蠕变性质差,地质构造简单,满足深度要求,无显著地下水流动等,应构建试验和理论模型,综合多方面因素,经过详细论证,形成采用关闭/废弃矿井处置核废料的安全型、环境友好型储存方法。

1.5 储存物资

相比传统的储物方式,废弃矿井具有稳定的热环境,恒定的温度和湿度易赶走啮齿动物和昆虫,十分适合食物的储存,同时可以有效抵抗地面载荷,实现通风和低渗透的有效控制,已有国家利用废弃矿井储存农作物、新鲜食品及重要军事物资等。如:美国把石灰石开采后遗留的废弃矿坑改造成食品和农作物的地下储库,温度常年稳定适宜;北欧斯堪底纳维亚地区利用地下的恒温恒湿的条件,将废弃矿井建造成许多地下冷库;日本利用采

石废弃矿坑的温度和湿度年变化稳定且适宜的条件,建成了地下鲜桔储存仓库。地下空间也可以作为储存农作物种子的地点,种子的质量、储存条件、种子含水量和储藏的温度、湿度都是影响种子生理活性的重要因素,尤其是温度与湿度。而废弃矿井地下空间稳定热环境,恒定温度和湿度的特点,保证了农作物种子的生理活性,是非常好的储存地点^[13]。且废弃矿井地下空间具有安全和不易被发现的特点,因此可以用作重要物资和文件的储存场所,如美国利用废弃矿井建成了安全等级非常高的地下文件储存中心。

把废弃矿井地下空间作为储物库,具有大大减少国家开支,方便管理;保证物资、装备、设施长期有效;保证在遇到突发状况时及时提供额外的物资设备;环境稳定性高,物资受环境因素影响小等优点,是未来物资储备的发展趋势^[27-29]。

2 关闭/废弃矿井围岩渗透性时效特征和改造方法

在考虑时效特性的情况下,关闭/废弃矿井地下空间围岩渗透性变化和力学特性变化同等重要,这是因为地下岩体随时间发展导致围岩中微小裂缝形成、延伸或贯通,一方面为岩体渗流提供了路径,导致岩体渗透特性增加,另一方面也对岩体强度力学特性造成了显著影响。尤其随着时间的发展,其渗透性和力学特性时效特征愈来愈重要,泄露危险性变大^[30]。在进行地下空间稳定性改造时,也应充分考虑渗透性和强度变形特性的时效特征效应。关闭/废弃矿井空间的不同利用方式应满足不同的地质环境、煤层、水文(包括渗透率)等要求(表1)。

表1 关闭/废弃矿井储物地质评价参数及相对影响程度

一级指标	二级指标	评价指标分级及其对应的指标			
		好(90~100分)	较好(75~90分)	一般(55~75分)	较差(<55分)
地质条件	煤层顶板	极难冒落坚硬顶板	相对软弱顶板	中等冒落顶板	易冒落松软顶板
	勘察程度	继续详查	仔细详查	严加详查	严加详查
	煤层裂隙/天	裂压贯通天数<7	8~15	15~30	>30
	地质构造	一类	二类	三类	四类
煤层情况	倾角/(°)	<5	5~25	25~45	>45
	稳定性	稳定	较稳定	不稳定	极不稳定
水文条件	充水条件	第一类	第二类	第三类	
	充水特征	微小裂隙	孔隙-裂隙	裂隙-岩溶	
	水资源	匮乏-中等	中等-丰富	丰富	
	防治难度	难度小	难度中等	难度大	

针对评价指标为好的关闭/废弃矿井地下储物空间,可以用来储存要求最高的中低放射性核废料。可以在矿井关闭前即做相应处理,例如可以采用煤柱支撑法处理采空区,由于煤柱的支撑,采空区较为稳定,且采空区可用范围大,能够储存更多的中低放射性核废料。同时应考虑围岩密封性问题,通过浇筑混凝土或在巷道周围砌混凝土的方式来封堵天然裂隙或缺口,达到加强密封的作用。同时还应保证废弃矿井地质条件至少在万年以上与人类环境安全隔离,可以长久安全运行。

针对评价指标为较好的关闭/废弃矿井地下储物空间,可以用来储气、储油、储水等要求相对较低的物资。应采取纳米改性混凝土材料等新型材料进行密封处理,保证地下空间渗透性和稳定性达标,通过调整地下空间运行压力,保证其稳定性与密封性^[31],减少天然地下水损失,以此形成真正密闭的“储存容器”^[32]。

针对评价指标为一般的关闭/废弃矿井地下储物空间,可以用来储种子、文件、食品、粮食、水果等要求较低的物资。对较大空间的矿井开挖应采取

分段开挖方式,并在开挖同时对矿井内岩层进行支、护等措施^[33-36];对存在断层的地下空间,应加强锚杆支护;优化开挖顺序,采取软件进行仿真模拟计算,对不同方案的围岩变形规律进行比较,找出最合理的方案,考虑流变效应,保证其长期稳定性^[37-39]。同时还应考虑顶板移动变形、围岩变形稳定性、防水密封等方面,对密闭墙位置、断面尺寸、墙体厚度等进行设计,保证地下储物资的空间安全性^[40-41]。

针对评价指标为较差的废弃矿井地下储物空间,经过详细论证和大量改造后,可以用来储种子、文件、食品、粮食、水果等要求较低的物资。除考虑上述改造方法以外,还可以填充混凝土墙,使其稳定程度、渗透度达到要求标准,同时应控制地下水位,防止对矿井侵蚀导致储物空间寿命缩减,以此达到长期处理储存物资的条件。

3 结论

随着中国煤炭工业的不断发展,关闭/废弃矿井数量也在不断增加,但关闭/废弃矿井仍有大量资源可供开发利用,如地下空间、地上空间等功能化可利用资源,存在巨大的开发潜力。如今国外关闭/废弃矿井地下空间储库开发已具有较成熟的开发技术和开发经验,而国内尚缺少相关基础理论研究,技术也不够成熟,因此更应多借鉴美国、印度等国经验,同时结合自身实际,开展关闭/废弃矿井深部实验室建设。

参考发达国家的先进经验,加大示范项目建设力度,推动中国矿井地下空间多样化发展,关闭/废弃矿井地下空间利用方式多样化的新局面。同时中国应完善矿山关闭法律法规,在矿井关闭前即进行适当考虑和改造;开展关闭/废弃矿井资源普查及灾害预测预报;出台关闭/废弃矿井转型优惠政策;加大自主研发;展开示范项目建设。

以此来推动废弃矿井规模化应用,加大矿产资源开采后的环境整治、资源开发、空间利用,引入新

型产业结构,形成关闭/废弃矿井环境友好型资源再利用的新局面。

参考文献(References)

- [1] 谢友泉,高辉,苏志国,等.废弃矿井地热资源的开发利用[J].太阳能,2020(10):13-18.
- [2] 谢友泉,高辉,苏志国,等.废弃矿井资源的可再生能源开发利用[J].可再生能源,2020,38(3):423-426.
- [3] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.
- [4] 袁亮.我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J].中国矿业大学学报(社会科学版),2018,20(1):3-12.
- [5] 袁亮.我国需开展废弃矿井资源开发利用战略研究[N].中国煤炭报,2019-11-21(4).
- [6] 戴家生,夏明强,潘磊,等.典型废弃矿井综合治理分析[J].煤炭技术,2020,39(6):97-99.
- [7] 胡长勤,刘坤鹏.废弃煤矿瓦斯资源量预测模型的构建与应用[J].能源与环保,2020,42(9):1-6.
- [8] 于志军,孙杰,刘天绩,等.废弃矿井瓦斯抽采利用技术初探——以呼鲁斯太矿区乌兰特矿为例[J].中国煤炭地质,2017,29(7):24-27.
- [9] 孟召平,师修昌,刘珊珊,等.废弃煤矿采空区煤层气资源评价模型及应用[J].煤炭学报,2016,41(3):537-544.
- [10] 吴金焱.荷兰海牙市废弃煤矿矿井水热能开发利用工程实践[J].中国煤炭,2020,46(1):94-98.
- [11] 康宝伟,王旭宏,杨球玉,等.我国废弃矿井放射性废物处置选址原则研究[C]//土木工程新材料、新技术及其工程应用交流会.北京:中冶建筑研究总院有限公司,2019:5.
- [12] 罗萍嘉,田亚琦.城区型废弃矿区地下空间开发策略研究[J].中国矿业,2019,28(3):52-57.
- [13] 袁亮.我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究总论[M].北京:科学出版社,2020.
- [14] 高延法,张长福,邢飞.废弃矿井地下空间储气技术分析[C]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集.北京:中国地质学会,2009:4.
- [15] 三桶油高层领导齐发声:2020年国内石油业将这么干[EB/OL].[2021-03-31].https://www.sohu.com/a/367994-948_188371.
- [16] 武志德,郑得文,李东旭,等.我国利用废弃矿井建设地下储气库可行性研究及建议[J].煤炭经济研究,2019,39(5):15-19.

- [17] 先智伟, 谢箴. 地下储气库的地质条件要求和选型[J]. 天然气与石油, 2004(2): 5-7.
- [18] 高延法, 张长福, 邢飞. 废弃矿井地下空间储气技术分析[C]// 第三届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2009: 4.
- [19] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
- [20] 彭杨. 地下水封储油研究综述[J]. 化工管理, 2019(35): 220-221.
- [21] 杨龙伟, 黄鹏飞. 地下水封储油洞库施工安全监测及稳定性分析[J]. 路基工程, 2020(5): 217-221.
- [22] 杜国敏, 耿晓梅, 徐宝华. 国外地下水封岩洞石油库的建设与发展[J]. 油气储运, 2006(4): 5-6.
- [23] 马克, 唐春安, 梁正召, 等. 基于微震监测的地下水封石油洞库施工期围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1353-1365.
- [24] 陈洋. 谈核废料地质深埋法[J]. 四川水泥, 2017(6): 122.
- [25] 焦旭. 如何安全处理核废料[N]. 中国能源报, 2013-04-22(11).
- [26] 李思凡, 王旭宏, 杨球玉, 等. 核废料的深埋和储存是如何做到保障安全的, 深埋储存后的核废料后续如何处理?[J]. 中国核电, 2019, 12(3): 348-351.
- [27] 李宝忠, 王虎儒, 吕晓东. 探讨建立救援装备国家战略物资储存库[J]. 城市与减灾, 2011(1): 14-15.
- [28] 甘肃省民政厅. 创新思路, 多措并举, 建设救灾物资储备体系[N]. 中国社会报, 2017-12-29(3).
- [29] 胡永涛. 物流基地物资储存方式的选择研究[J]. 商, 2016(14): 265.
- [30] 郑华康, 胡超, 尚钦, 等. 大型地下厂房洞室群围岩开挖松弛效应与渗透性演化特征[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(6): 624-636.
- [31] 付晓飞. 江汉盆地黄场盐穴地下储气库稳定性分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 73-75.
- [32] 许建聪, 郭书太. 地下水封油库围岩地下水渗流量计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1295-1302.
- [33] 张欣然, 韩磊, 马纯杰. GFRP 锚杆用于地下水封储油洞库支护可行性分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(14): 93-94.
- [34] 梁冰, 迟海波, 汪北方, 等. AHP 理论下的煤矿地下水库储水结构稳定性评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 195-200.
- [35] 郝宪杰, 袁亮, 卢志国, 等. 考虑煤体非线性弹性力学行为的弹塑性本构模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 896-901.
- [36] 王芝银, 李云鹏, 郭书太, 等. 大型地下储油洞粘弹性稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 14-19.
- [37] Lou J F, Gao F Q, Yang J H, et al. Characteristics of evolution of mining-induced stress field in the longwall panel: insights from physical modeling[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, doi: 10.1007/s40789-020-00390-5.
- [38] 沈铭龙, 刘保国, 郑金伙, 等. 大型地下水封储油洞库施工风险分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1016-1023.
- [39] 赵乐之, 刘保国, 赵峰. 考虑流固耦合的地下储油洞库稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 155-162.
- [40] 方刚. 煤矿工作面采空区构建地下储水空间安全性分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(11): 97-103.
- [41] 杜献杰, 冯国瑞, 戚庭野, 等. 结构充填“保水-储水”采煤顶板稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 821-830.

Environmental stability guarantee of underground storage in closed/abandoned mines in China: Current situation, evaluation and transformation

HAO Xianjie^{1,2}, CHEN Zeyu², ZHANG Tong³, WANG Zhenyu², REN Bo^{2,4}, WU Zhide^{5,6}, CHEN Kai², ZHAN Rongcheng², HUANG Ruilai²

1. Beijing Key Laboratory of Associated Energy Precision Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
4. State Key Laboratory of Deep Coal Mining & Environment Protection, Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan 232000, China
5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
6. CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Underground Storage, Langfang 065007, China

Abstract There are currently a large number of closed/abandoned mines in China, among which closed/abandoned mine underground space resources are the most stable and easy to develop resources, with low development costs, high returns, and easy realization. However, no one has yet conducted a comprehensive study on the underground storage space of closed/abandoned mines. Based on summarizing the research status of different types of storage (oil, gas, water, nuclear waste, seeds, etc.), this paper conducts an in-depth research on mine selection, sealing performance, storage space size, storage time and other aspects. Corresponding evaluation indicators and transformation technologies for underground space storage are proposed to formulate a theory and technology for ensuring the stability of underground space storage environment in closed/abandoned mines suitable for China's national conditions and natural geological conditions.

Keywords closed/abandoned mine; underground space; storage environment; stability guarantee ●



(责任编辑 刘志远)