

基于矿井地下水库的煤矿采空区地下空间利用模式与关键技术

张村^{1,2,3}, 贾胜¹, 吴山西¹, 刘金保¹, 焦越¹, 张晨曦¹

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083

2. 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

3. 煤炭开采水资源保护利用国家重点实验室, 北京 102209

摘要 利用煤矿采空区建设矿井地下水库对实现矿井采空区地下空间及矿井水资源化、能源化利用, 促进矿区环境生态保护意义重大。综合国内外典型案例, 论述了基于矿井地下水库的矿井地下空间及水资源的3种利用模式: 矿井地下储滤水库、抽水蓄能电站及矿井地热开发利用。与国外传统地下水库以井巷为主要存储空间相比, 目前国内构建的地下水库主要以矿井采空区垮落带为存储空间, 这使得矿井地下水库的容量大幅度提升, 且垮落带内的煤矸石对矿井水还具有过滤作用。在此基础上, 凝练了中国煤矿地下水库2个关键科学问题: 矿井地下水库库容能力和矿井地下水库稳定性控制。探讨了库容能力和坝体稳定性控制的影响因素和现阶段主要研究手段, 提出了在产矿井和资源枯竭型矿井建设地下水库的后续研究方向。

关键词 资源枯竭型矿井; 矿井地下水库; 矿井地下空间; 储水系数; 水库坝体

随着中国煤炭资源的持续开发, 加之近年来中国政府实施的煤炭去产能政策, 一批资源枯竭及落后产能矿井加快关闭, 形成大量关闭/废弃矿井^[1]。图1^[2]为根据煤矿规模与相应煤矿井巷可利用的地下空间量的比例系数来计算中国各省煤矿地下可

利用空间的总量及分布情况, 预计到2020年底, 中国由于废弃/关闭煤矿产生的地下可利用空间总量高达6.64亿m³。如果仅仅直接简单封井, 不仅将会造成地下数万亿固定资产的废弃及浪费, 而且会间接造成地质和矿业遗址的损坏。同时, 地下水位

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-06-17

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8212032); 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金项目(SKLMRDPC19KF08); 煤炭开采水资源保护利用国家重点实验室基金项目(WPUKFJJ2019-15)

作者简介: 张村, 副教授, 研究方向为废弃矿井利用, 电子信箱: cumt-zc@cumtb.edu.cn

引用格式: 张村, 贾胜, 吴山西, 等. 基于矿井地下水库的煤矿采空区地下空间利用模式与关键技术[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 36-46; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.004

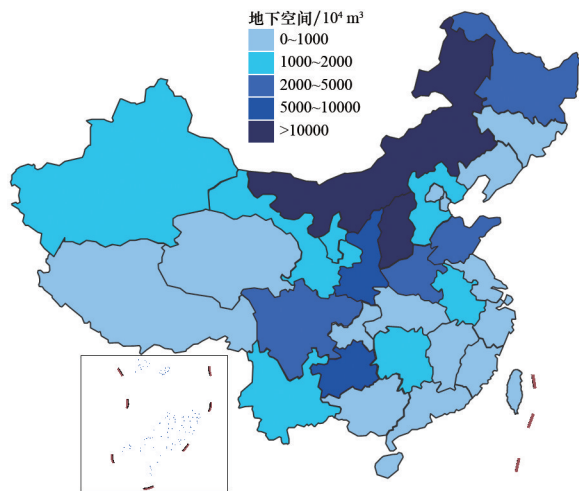


图1 2020年中国主要省市地下空间估算分布^[2]

上升会造成地下水系污染,威胁水源地安全^[3-4]。

据统计,在中国,每开采1 t煤约产生2 t的矿井水,而矿井水的利用率仅有25%^[5-6]。绝大多数矿井水进入煤矿的采空区内,形成了天然的储水空间(图2),这就使得因资源枯竭而废弃/关闭的矿井采空区内含有丰富的地下水资源^[7-8]。在煤矿关闭后,矿井水位将不断上升,如果沟通了浅部的含水层与地表水,会进一步扩大高矿化度水体的污染范围,严重威胁了矿区附近水体环境^[3-4,9-11]。同时矿井采空区残存的大量破碎煤岩体具有较大的纳污能力,可将矿井水中的胶体物质和悬浮物等有效去除,具有净化矿井水的作用,特别是可以吸附矿井水中的重金属离子^[12-16]。综上,如何合理开发利用中国资源枯竭矿井的储水能力是解决中国矿区生态安全的重大科学难题,也是改善中国西部矿区

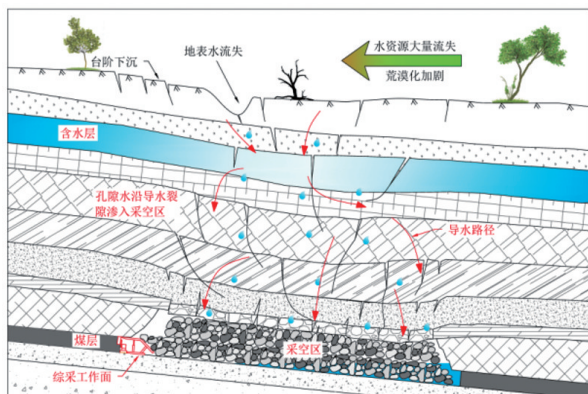


图2 煤炭开采引发水资源流失

水资源匮乏的有效途径。

综合资源枯竭型矿区可持续发展与生态保护的特点,结合世界范围内已有的成功案例,谢和平等^[2]、袁亮等^[11]及顾大钊^[17]相继提出矿井地下水库储水储能先进理念,并聚焦研究矿井采空区地下水库、抽水蓄能电站和污水处理中心等核心关键技术,对实现矿井采空区地下空间及矿井水资源化、能源化利用,促进环境生态保护提供了有益借鉴,为国内外矿井科学开发地下空间资源提供了示范。

为了分析中国煤矿地下空间的利用现状,以矿井地下水库技术为例,本研究重点分析煤矿采空区建设矿井地下水库的利用模式。

1 基于矿井地下水库的利用模式

1.1 矿井地下水库

利用煤矿采空区建设矿井地下水库最早是针对水淹矿井提出的,这是由于水淹矿井有充足的水源。但绝大多数是致力于利用矿井地下水开发地热资源^[18],这主要由于矿井水水质较差,对于水资源丰富的地区不具备足够的吸引力。例如,在1973年,Cairney^[19]就提出了利用废弃矿井建设地下水库的概念,但之后并没有更多关于废弃地下水库水资源存储利用的研究与报道。现阶段除中国以外,对于废弃矿井地下水库的建设基本上用于蓄能以及地热资源的开发,很少有为了保护水资源及水资源的循环利用^[20]。

中国采用的煤矿地下水库的概念和矿井水井下储存利用的理念,有别于欧洲地区仅利用废弃矿井巷道作为储水空间,是将水存储于煤炭长壁开采后形成的采空区的岩体空隙,水库坝体由安全煤柱辅以人工坝体形成,水入库设施及取水设施同时进行建设,充分利用煤矿采空区岩体自然净化矿井水的作用,建设煤矿地下水库工程(图3)。这一技术突破了“堵截法”保水理念的限制,采取“导储用”的理念,使矿井水能够疏导至煤矿采空区,进行储存及利用,防止了矿井开采水外排蒸发损失、运行成本高和地面水处理厂建设等问题。目前该技术在神东矿区应用,煤矿地下水库建成35座,达到2500万 m³储

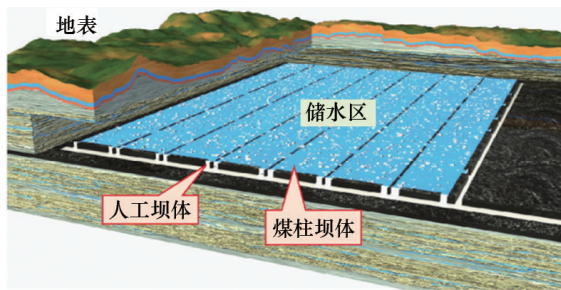


图3 煤矿地下水库储水示意

水量,供应了矿区95%以上的用水,并为周边产业供水,有助于西部矿区煤炭开采水资源保护利用^[17]。因此,以矿井水资源利用为主的矿井地下水库主要适用于缺水的干旱或者半干旱的西部矿区。

1.2 矿井抽水蓄能电站

废弃矿井地下水矿化度高、水质较差,因此很多国家利用废弃矿井地下水库建设抽水蓄能电站,这为废弃矿井地下空间及水资源的利用提供了另一种选择。在比利时、西班牙、德国,利用废弃矿井建设抽水蓄能发电站均有案例,中国也进行了相关的可行性分析和设想^[21-24]。利用废弃矿井建设抽水蓄能电站需要建设上下2个水库,国外大多情况下利用废弃矿井建设下部水库,然后在地表利用塌陷区建设上部水库;但在中国很多矿区均处于缺水干旱地区,年均蒸发量远大于降雨量,这就使得地表水库建设成本及可行性相对较差。此外,与矿井地下水库建设相类似的是,国外仍主要以废弃矿井巷道作为地下储水空间,这相对于中国以采空区为储水空间的矿井地下水库储水量大幅度减少,进而降低储能能力。由于中国煤层一般以煤层群形式存在,在煤矿开采过程中会形成多层不同埋深的采空区。这就使得抽水蓄能电站的2个矿井地下水库均能建设在煤矿采空区(图4)。上下水库具有一定的落差,以保证足够的蓄水能力。因此,在中国

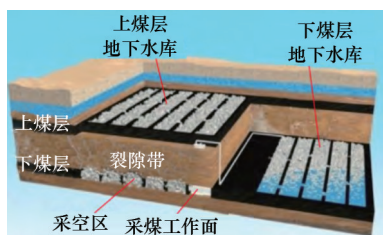


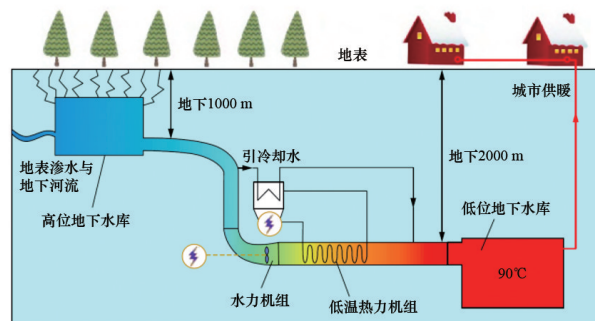
图4 煤层群地下水库示意

开展的抽水蓄能电站建设过程中,其基础仍是以矿井采空区地下水库为主的抽水蓄能电站。

在此基础上,谢和平等^[25]估算中国废弃煤矿和现有煤矿蓄水储能发电总量约为 7.25×10^6 MW·h。抽水蓄能一体化技术构想还包括太阳能与风能发电技术。由于在季节、气候、地点等因素的影响下,太阳能和风能具有随机性、间歇性和波动性,不能维持稳定的常量供给。因而,如何在用电低谷时能大规模存储过剩能源以及在用电高峰时实现蓄能高效发电是制约太阳能和风能大规模发展的重中之重。而抽水蓄能电站的应用可以充分利用西部地区丰富的太阳能、风能资源以及富裕电力,对矿井水进行抽水蓄能以及循环利用^[26-27]。以抽水蓄能为主的矿井地下水库主要适用于矿井采空区落差大、能够提供足够的储能能力,且风能和太阳能发电资源较为丰富的矿区。

1.3 矿井地下水库地热利用模式

起初利用废弃矿井构建地下水库管网系统的主要目的是地热的利用,能够在一定程度上减少碳排放量,且往往与蓄能电站相结合,实现能源循环利用^[28-30]。区别于地表的单一型工作电站,地下水网的构建使地下水能与热能利用得到有机整合,从而可进一步探究地下储能、地热、水力和供热的一体化技术(图5)^[22]。实际上往往以抽水蓄能电站为基础来利用地热。低位地下水库不仅用于储水,也用于储能,且储存的热能在地下空间不会损耗,维护成本低。当地面城市需要供暖或供热水时,可以直接从低位地下水库中取用,从而实现清洁能源的合理化利用。如果地下巷道密封性高,或者进行相关密封措施后,还可以增加压缩空气储能等利用方

图5 地下水体储能与发电一体化系统^[22]

式^[31]。以地热利用为主的矿井地下水库主要适用于深部地热资源丰富的矿区,如中国中东部等资源枯竭型矿区。

2 矿井地下水库构建主要关键技术

中国利用矿井地下空间建设多用途抽水蓄能电站的基础仍然是矿井地下水库的建设。经过长达10年左右的研究分析及实践验证,矿井地下水库技术在中国已经成功运行,且效果显著。有别于早期运用水淹矿井建设的地下水库,中国目前建设的地下水库主要是基于存储空间更大但环境更加复杂的长壁开采工作面采空区及边界煤柱坝体。由于采空区的环境较为复杂,煤柱受到采动的影响较为明显。因此,针对煤矿采空区的矿井地下水库研究涉及到多方面的关键技术。其中矿井地下水库库容计算与坝体稳定性分析是最基础也是研究最多的2个科学问题。

2.1 矿井地下水库库容能力

对于利用水淹废弃矿井建设地下水库时,储水能力计算实际上是计算废弃水淹矿井内实际水量。综合有效降雨对矿区的渗透、地下水的贡献以及地表水的损失,可以对每个矿井的水资源(补给)进行评估,进而计算矿井地下水库的储水量^[28]。对于中国西部新建的矿井地下水库而言,由于后续仍然有煤层需要开采,矿井并未关闭,只是利用优先开采的煤层形成的采空区进行储水,因此需要建设坝体,来形成一个相对密闭的空间。且储水一般位于垮落带,垮落带由破碎煤岩体组成,储水是利用的采空区垮落煤岩体的空隙空间(图6),在这种情况下则需要计算采空区的储水能力。除了垮落带,也

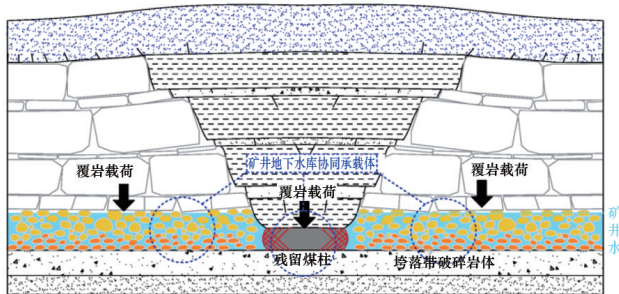


图6 采空区垮落带储水及承载结构示意图

有学者将裂隙带孔隙空间同样认为是有效的储水空间。同时为了计算各分带岩层冒落后的体积差,而使用地下水库上覆各分界岩层的垂直位移轨迹方程,进一步确定煤矿地下水库不同分带内岩层的有效储水空间^[32]。确定矿井地下水库极限水位在计算水库容量中尤为重要。极限水位的确定主要考虑水库四周隔离煤柱及人工构筑密闭墙的极限承载与防渗透能力,而合理水位则应位于关键层以下^[33]。就目前而言,矿井地下水库的储水空间仍然以垮落带空间为主,储水水位一般不会超过垮落带高度。这主要是由于垮落带空间相对于裂隙带空间而言要大得多^[7],且由于矿井地下水库建设的采空区位于在产矿井,水位过高存在一定的风险。

因此,现阶段研究矿井水库的库容能力主要聚焦于垮落带的孔隙率演化特征,或者称为垮落带的储水系数。对于垮落带孔隙率影响比较大的主要是垮落带岩体的碎胀系数与采高,这两个因素直接决定垮落带高度与孔隙率。通过式(1)计算垮落带高度^[34-35]

$$H_m = \frac{100M}{c_1 M + c_2} \pm c_3 \quad (1)$$

式中, H_m 为垮落带高度; M 为煤层采高; c_1 、 c_2 和 c_3 为垮落带高度系数,取值范围见表1^[7]。

表1 垮落带高度计算系数

直接顶 类型	单轴抗 压强/MPa	系数		
		c_1	c_2	c_3
硬	>40	2.1	16	2.5
中硬	20~40	4.7	19	2.2
软	<20	6.2	32	1.5

而垮落带的孔隙率可以根据式(2)计算

$$\varphi = \frac{(H_m - M)b}{H_m} \quad (2)$$

式中, φ 为垮落带孔隙率; b 为垮落岩体碎胀系数。

在研究储水系数过程中,很多学者直接研究垮落带岩体的碎胀系数。利用相似材料模型试验研究得出神东矿区工作面垮落带岩体碎胀系数范围为1.09~1.48。考虑到垮落带后期将进行注水,同时进行了饱和含水条件下破碎岩体碎胀特性的研

究。受载饱水岩石的碎胀系数与自然岩石相比,减幅更为明显,两者相差8.514%^[36]。除此之外,也有学者采用理论分析、数学建模的方法划分采空区垮落岩体应力和碎胀系数分区。根据悬臂梁及弹性地基梁理论,并推导各分区垮落岩体应力变化公式,从而建立了垮落岩体碎胀系数的分布模型。最终计算得出神东矿区的储水系数在12.80%~33.80%(平均22.30%)。因此,根据垮落带孔隙率及垮落带范围即可以大致求出矿井水库的储水空间^[37-40]。

上述研究是根据碎胀系数来计算垮落带储水能力,实际上煤矿地下水库储水系数的潜在影响因素还包括垮落带破碎岩体弹性模量、上覆岩层体应力、上覆岩层密度、泊松比等。方杰等^[41]结合弹性力学、渗流力学的相关原理与知识,以及矿井水流动涉及的流固耦合渗流机理,建立了考虑有效应力影响的煤矿地下水库储水系数数学模型,并确定了模型解析解。这种方法计算与式(2)的计算方法一致。因为式(2)中垮落带岩体的碎胀系数与有效应

力有关,孔隙率也是由破碎岩体的压实应变决定。因此,研究矿井地下水库储水能力取决于采空区垮落带压实特征。

工作面开采完毕后,采空区在储滤水过程中,垮落带破碎岩体将长期处于水浸受载环境,水岩作用下破碎岩体受载内部结构劣化、损伤演化规律复杂多变^[42]。在矿井地下水库运行过程中,破碎岩体主要发生受载破碎(再次破碎和结构调整)、水浸软化(化学侵蚀溶解和遇水膨胀)以及水渗冲蚀(冲蚀扩孔和小颗粒携带)等耦合损伤,具体如图7(a)所示,进而造成破碎岩体再次破碎、孔隙结构调整和压实变形,使得垮落带孔隙空间大幅度减小(图7(b)),降低矿井水库储水能力。同时,垮落带破碎岩体的再次破碎压实,将会使得矿井水库顶板下沉,应力向残留煤柱转移,进而破坏矿井水库协同承载结构,威胁矿井水库安全运行。因此,掌握垮落带破碎岩体采动水浸作用下的耦合损伤机制及其孔隙演化特征对矿井地下水库储水能力和安全稳定运行具有重要意义。

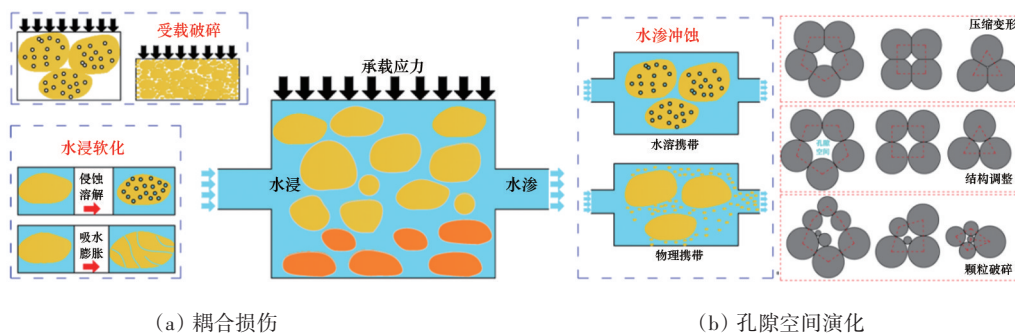


图7 采动水浸过程中破碎岩体耦合损伤及孔隙空间变化情况

2.2 矿井地下水库坝体稳定性控制

矿井地下水库建设完成之后,由于本身就位于煤层采动空间内,加之矿井地下水库储水过程中水浸软化的影响,所以确保矿井水库运行过程中的稳定性十分重要。在欧美早期利用废弃矿井建设地下水库过程中一般运用维护相对容易且受采动影响小的井巷作为地下水库储水体,这种情况下只要确保巷道的稳定性即可,地下水库的稳定性相对容易控制^[33]。目前,中国矿井地下水库的建设主要以采动强度剧烈的长壁开采采空区作为储水体。

在矿井地下水库运行过程中,除了垮落带破碎煤岩体作为承载体以外,矿井地下水库的安全运行还受到工作面残留煤柱、边界煤柱坝体边界人工坝体的稳定性的影响,如图3所示。

2.2.1 人工坝体

人工坝体主要是为了封堵长壁工作面回采结束后的左右两侧巷道,与采区边界煤柱共同形成矿井水库坝体结构。由于人工坝体构建是在工作面开采之后进行,一般不考虑工作面采动对其影响。因此,人工坝体主要考虑储水过程中对水体压力的

承载以及防渗能力。人工坝体常采用T型结构,以防渗层和混凝土主坝体结合构成,其中防渗层不起承载作用,主要有混凝土或“工字钢+混凝土”2种形式^[43]。而实际上,虽然在构筑完人工坝体后的初始阶段,坝体顶部没有受到垂直载荷作用,但随着坝体服务时间的增加,受顶板残余沉降变形的影响,以及坝体内部垮落带岩体及残留煤柱在水浸水渗的影响下强度降低,导致上覆岩层会挤压人工坝体顶部,从而使坝体顶部受到垂直载荷的作用,因此有必要研究垂直载荷作用下坝体结构稳定性^[44]。同时,针对人工坝体同样要考虑水浸(吸水—失水)作用,且研究表明地下水库人工坝体稳定性在循环(吸水—失水)下受到较大影响^[45]。

2.2.2 煤柱坝体

煤柱坝体稳定性对地下水库稳定性起决定性作用,是地下水库设计中极其重要的部分。既要保障地下水库的安全运行,也要保证煤炭可以安全开采。有别于人工坝体,煤柱坝体一般由采区边界安全煤柱构成,其受力更加复杂。采区边界煤柱由于服务于整个采区,每个工作面的开采都将对煤柱坝体产生影响。除此之外,煤柱坝体长期受覆岩顶板压力、垮落岩体的侧向压力及邻近采区采动应力的影响。在矿井地下水库蓄水之后还会受到水压的影响。且地下水库水的循环蓄水放水还会让部分煤柱一直处于“浸水—失水—再浸水”的状态。因此,研究采动与水浸作用下煤柱坝体累积损伤破坏机理对保障矿井地下水库稳定运行具有重要作用。

煤柱坝体采动水浸作用实际上可以分为2个阶段:(1)采动损伤阶段,该阶段一般不受水浸的影响;(2) 受载水浸作用阶段,发生在矿井地下水库运行过程中。对于第一阶段煤层开采过程中煤柱稳定性的分析研究,已经有了很多研究成果,包括极限平衡理论、Wilson 两区约束理论、大板裂隙理论等,提供一些有力手段用于分析煤柱稳定性及宽度设计^[46-49]。但矿井地下水库煤柱坝体与传统煤柱存在明显的区别,采区边界煤柱由不连续的煤柱段(长度为单个长壁工作面宽度)组成,受整个采区煤层的采动影响,且煤柱坝体的一侧为采准巷道,另一侧为采空区,受力特点存在明显的区别。再加

之后期还需要承受长期循环水浸的影响。因此,有必要研究煤柱坝体在上述2个阶段条件下的稳定性及合理宽度设置等问题。

针对动静载叠加的复杂应力环境下的地下水库煤柱坝体,使用FLAC^{3D}软件程序来构建煤柱坝体在复杂应力场下的动态损伤数值计算模型,研究得出在受到邻近工作面的采动影响下,煤柱坝体会处于较高侧向支承压力的影响区,塑性区发育范围较大;受到矿震等动载荷的影响,煤柱坝体围岩的塑性区发育面积及发育深度会有显著增加,同时竖向应力极值点开始向纵深方向发展,煤柱坝体在重复采动残余支承压力和动载的叠加作用下其损伤破坏程度会更为严重^[50]。参考借鉴有关地面水库坝体的抗震安全评价方面的研究,运用矿井地下水库相似材料模拟平台进行不同烈度条件下的煤柱坝体的动力破坏试验研究,验证了煤矿地下水库坝体较地面水库坝体具有更好的抗震安全性^[51]。

在煤矿蓄水之后,煤柱坝体在受载水浸作用下的稳定性是以往煤柱坝体稳定性分析过程中很少涉及的方面。应力与水是作用于煤柱坝体的两个关键物理场,两者相互影响,产生受载与水浸耦合作用煤柱“损伤—渗流—累积损伤”渐进破坏效应,最终有可能引起煤柱坝体的失稳,并使矿井水库被破坏。目前针对煤柱采动与水浸作用下的稳定性分析主要还是实验室尺度的煤样强度分析。包括煤样含水率、干湿循环次数、水浸时间、渗透水压、水流冲蚀速度以及含水条件下的加载方式等对煤岩样强度的影响^[52-57]。具体表现为,随着煤岩样含水率的增加,煤岩样单轴抗压、抗拉强度和弹性模量逐渐降低,峰值应变则随之变大。水压的增加导致煤样内部孔隙的扩展,同样使煤样的强度逐渐降低。结合实验室的试验结果,在不同含水率条件下,对煤柱坝体的破坏区塑性区宽度运用弹塑性力学理论进行探讨,同时研究考虑水压力、覆岩压力以及水对煤柱坝体的弱化作用下坝体的宽度应如何设计。

数值模拟手段作为现阶段普遍采用的工程尺度计算方法,可以将实验结果嵌入数值模型中进行煤柱坝体稳定性的分析。现阶段进行矿井地下煤柱稳定性的数值模拟主要是基于计算软件如

UDEC 或者 FLAC^{3D} 等^[58-59]。为了考虑煤体的水浸软化作用,关键是在以往煤柱数值模拟的基础上如何计算煤柱坝体中含水量的变化,进而根据含水率计

算煤体强度弱化情况。

常用的基于离散元或者有限元的水浸软化程序如图 8 所示,具体的遇水软化模型可参考文献[60]。

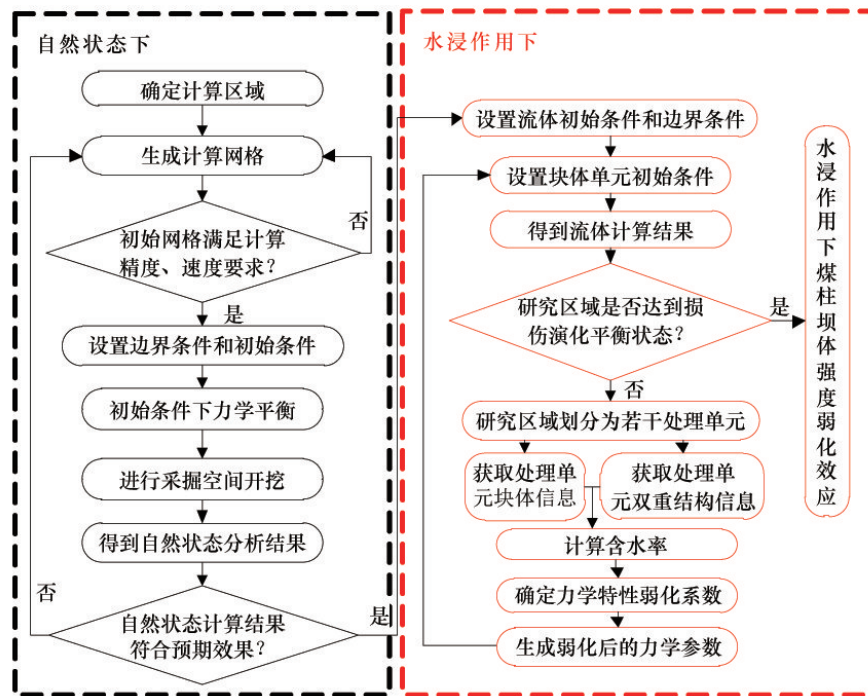


图8 水浸作用煤柱坝体强度弱化模拟计算流程

2.2.3 残留煤柱

矿井水库残留煤柱是指位于采空区内服务于相邻工作面的区段煤柱,如图6所示。与矿井水库煤柱坝体相比而言,残留煤柱同样受整个采区开采的影响,且受采动影响更大,损伤更加剧烈。且由于残留煤柱并不作为矿井水库坝体,设计过程中也不考虑后期矿井水库建设对其稳定性的影响。但是采空区残留煤柱作为矿井地下水库协同承载体的一部分,与垮落带和煤柱坝体共同对上覆岩层起到支撑作用,残留煤柱一旦失稳导致顶板下沉,不仅影响矿井水库的库容,同时还威胁矿井水库的稳定性。但目前针对矿井地下水库残留煤柱在受载水浸过程中的稳定性研究鲜有报道,绝大多数仍是针对开采阶段的煤柱宽度设计与稳定性控制。

3 结论

虽然目前已经建设完成多个矿井地下水库,但

建设区域一般为在产矿井,开采环境及采空区范围清楚,且地质条件相对简单。煤矿地下水库建设虽然已经形成体系,但整个建设过程仍相对粗放,例如对于库容能力的计算虽然有很多理论公式,但现场很难通过储放水进行验证,一方面对于含水层的水量无法预测,另一方面由于是在产矿井,不会冒险去测量极限水位。因此,现阶段矿井储水量要远小于矿井采空区实际库容能力。现阶段建设成的矿井地下水库运行时间较短,均在10年以内。而煤柱坝体、人工坝体以及损伤更剧烈的残留煤柱,在长时间的水浸及干湿循环下强度的进一步降低均会影响矿井稳定性。特别是残留煤柱与垮落带破碎煤岩体本身损伤剧烈,且完全浸于水中。长期的受载水浸弱化作用势必会造成进一步损伤,进而造成顶板下沉,影响矿井地下水库的稳定性与库容能力。因此,有必要进行长期受载循环水浸作用下破碎岩体与残留煤柱稳定性的研究。

现阶段中国虽然建设了大规模的矿井地下水

库,但到目前为止仅仅作作为储水,并没有开发储能功能,这主要存在2方面原因。一方面,现阶段建成的地下水库多位于在产矿井且基本位于西部矿区,地表水源与储水能力有限,年蒸发量大。要形成高度差的上下水库只能位于矿井之下,而现阶段建设完成的地下水库均位于首采层,即上水库。只有等到后期下一个水平煤层的开采才能建设下位水库。另一方面,在产矿井建设上位水库后势必会对下位煤层开采产生一定的影响。特别是上位水库正下方的压煤如何开采,以及开采过程中上位水库如何运行保护都将成为后续开采问题。

针对废弃矿井而言,无需考虑后期煤矿开采对矿井水库的影响,因此如何充分利用煤矿地下空间来进行地下水库建设有着重要意义。但利用废弃矿井(已关闭)建设矿井地下水库在中国仍没有具体案例,这主要由于废弃矿井水文地质条件更加复杂,对于地下库容的把握难以计算。因此,要想利用好废弃矿井大量的地下空间资源首先要掌握矿井地下具体的空间环境,包括:(1) 地下空间位置大小、水气资源赋存情况及空间联通情况;(2) 废弃矿井地下空间的稳定情况,特别是在本身不含水空间里注水对围岩弱化影响;(3) 如何实现水库水流的控制(废弃矿井围岩裂隙发育,不利于储水)及管网铺设是利用废弃矿井地下水库的重要因素;(4) 矿井的水源获取,特别是对于废弃矿井本身含水位较低的情况。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Wright I A, Paciuszkiewicz K, Belmer N. Increased water pollution after closure of australia's longest operating underground coal mine: A 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology[J]. Water Air & Soil Pollution, 2018, 229(3): 55.
- [4] Liu P, Gao Y, Shang M, et al. Predicting water level rises and their effects on surrounding karst water in an abandoned mine in Shandong, China[J]. Environmental Geology, 2020, 79(1): 51.1-51.10.
- [5] 贾绍凤,吕爱峰,韩雁,等. 中国水资源安全报告[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [6] 中国科学院. 中国可持续发展遥感监测报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2017.
- [7] Zhang C, Tu S, Zhao Y. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1): 27-46.
- [8] Zhang C, Tu S, Zhang L. Analysis of broken coal permeability evolution under cyclic loading and unloading conditions by the model based on the hertz contact deformation principle[J]. Transport in Porous Media, 2017, 119(3): 739-754.
- [9] 孙亚军,陈歌,徐智敏,等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
- [10] 潘玥,刘勇,徐红霞,等. 徐州东部废弃矿井地下水化学及其时空演化特征分析[J]. 高校地质学报, 2018, 24(2): 257-262.
- [11] 赵峰华,孙红福,李文生. 煤矿酸性矿井水中有害元素的迁移特性[J]. 煤炭学报, 2007, 33(3): 261-266.
- [12] 张凯,高举,蒋斌斌,等. 煤矿地下水-岩相互作用机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3760-3772.
- [13] Tran T Q, Banning A, Wisotzky F, et al. Mine water hydrogeochemistry of abandoned coal mines in the outcropped carboniferous formations, Ruhr Area, Germany [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(4): 1-16.
- [14] Fernandes M M, Vér N, Baeyens B. Predicting the uptake of Cs, Co, Ni, Eu, Th and U on argillaceous rocks using sorption models for illite[J]. Applied Geochemistry, 2015, 59: 189-199.
- [15] 赵丽,孙艳芳,杨志斌,等. 煤矸石去除矿井水中水溶性有机物及氨氮的实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 236-241.
- [16] Zhao L, Sun C, Yan P, et al. Dynamic changes of nitrogen and dissolved organic matter during the transport of mine water in a coal mine underground reservoir: Column experiments[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 223: 103473.
- [17] 顾大钊. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. 煤炭学

- 报, 2015, 40(2): 239-246.
- [18] Watzlaf G R, Ackman T E. Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems [J]. *Mine Water and the Environment*, 2006, 25(1): 1-14.
- [19] Cairney T. Utilisation of disused coal mines as water storage reservoirs[J]. *Journal of Hydrology*, 1973, 19: 251-258.
- [20] Ordóñez A, Jardón S, Álvarez R, et al. Hydrogeological definition and applicability of abandoned coal mines as water reservoirs[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(8): 2127-2136.
- [21] Pujades E, Orban P, Bodeux S, et al. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency? [J]. *Applied Energy*, 2017, 190: b135-b146.
- [22] 谢和平, 许唯临, 刘超, 等. 地下水利工程战略构想及关键技术展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 781-791.
- [23] 张村, 屠世浩, 赵毅鑫, 等. 基于渗流实验的三轴流固耦合离散元数值模拟研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(1): 23-33.
- [24] Menéndez J, Loredo J, Galdo M, et al. Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance[J]. *Renewable Energy*, 2018, 134: 1381-1391.
- [25] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 965-972.
- [26] 李庭, 顾大钊, 李井峰, 等. 基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(9): 93-98.
- [27] 徐生恒, 周涛, 孙海洲, 等. 浅层地能热泵采集系统关键科技问题与对策[J]. *矿业科学学报*, 2017, 2(3): 219-227.
- [28] Álvarez R, Ordóñez A, García R, et al. An estimation of water resources in flooded, connected underground mines [J]. *Engineering Geology*, 2018, 232: 114-122.
- [29] Kranz K, Dillenardt J. Mine water utilization for geothermal purposes in Freiberg, Germany: Determination of hydrogeological and thermophysical rock parameters[J]. *Mine Water & the Environment*, 2010, 29(1): 68-76.
- [30] Menéndez J, Ordóñez A, Álvarez R, et al. Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 498-512.
- [31] Budt M, Wolf D, Span R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 250-268.
- [32] 庞义辉, 李全生, 曹光明, 等. 煤矿地下水库储水空间构成分析及计算方法[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(2): 557-566.
- [33] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 381-387.
- [34] Yavuz H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 193-205.
- [35] Zhang C, Tu S, Zhang L, et al. A methodology for determining the evolution law of gob permeability and its distributions in longwall coal mines[J]. *Journal of Geophysics & Engineering*, 2016, 13(2): 181-193.
- [36] 汪北方, 梁冰, 王俊光, 等. 煤矿地下水库岩体碎胀特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 178-184.
- [37] 梁冰, 汪北方, 姜利国, 等. 浅埋采空区垮落岩体碎胀特性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 475-482.
- [38] Chu T X, Yu M G, Jiang D Y. Experimental investigation on the permeability evolution of compacted broken coal[J]. *Transport in Porous Media*, 2017, 116(2): 847-868.
- [39] Wang B F, Sun K M, Liang B, et al. Development and application of an experimental device for measuring storage coefficient in a coal mine underground reservoir[J]. *Archives of Mining Sciences*, 2019, 64(4): 655-670.
- [40] 赵毅鑫, 曹宝, 张通. 轴压和渗透压对破碎岩石渗透率影响的试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(5): 434-441.
- [41] 方杰, 宋洪庆, 徐建建, 等. 考虑有效应力影响的煤矿地下水库储水系数计算模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3750-3759.
- [42] 张村, 宋子玉, 赵毅鑫, 等. 矿井地下水库破碎岩体运

- 移的DEM-CFD耦合分析[J]. 采矿与岩层控制工程报, 2021, 3(4): 043011.
- [43] 白东尧, 鞠金峰, 许家林, 等. 李家壕煤矿地下水库人工坝体稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1839-1845.
- [44] 方志远, 鞠金峰, 曹志国, 等. 基于正交异性板模型的煤矿地下水库人工坝体结构优化[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1375-1384.
- [45] 姚强岭, 刘亚鹏, 陈田, 等. 地下水库人工坝体强度损伤演化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1111-1117.
- [46] Wang F, Zhang C. Reasonable coal pillar design and remote control mining technology for highwall residual coal resources[J]. Royal Society Open Science, 2019, 6(4): 181817.
- [47] Zhou Z, Zang H, Cao W, et al. Risk assessment for the cascading failure of underground pillar sections considering interaction between pillars[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104142.
- [48] Li X, Kim E, Walton G. A study of rock pillar behaviors in laboratory and in-situ scales using combined finite-discrete element method models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 118: 21-32.
- [49] Renani H R, Martin C D. Modeling the progressive failure of hard rock pillars[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018, 74: 71-81.
- [50] 王方田, 梁宁宁, 李岗, 等. 复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1145-1152.
- [51] 顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1589-1597.
- [52] 王文, 张世威, Liu K, 等. 真三轴动静组合加载饱水煤样动态强度特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2010-2020.
- [53] Zhong C, Zhang Z, Ranjith P G, et al. The role of pore water plays in coal under uniaxial cyclic loading[J]. Engineering Geology, 2019, 257: 105125.
- [54] Sadeghiamirshahidi M, Vitton S J. Laboratory study of gypsum dissolution rates for an abandoned underground mine[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(7): 2053-2066.
- [55] Li Z, Xiong Z, Chen H, et al. Analysis of stress-strain relationship of brittle rock containing microcracks under water pressure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1909-1918.
- [56] Liu Y, Yin G, Li M, et al. Mechanical properties and failure behavior of dry and water-saturated anisotropic coal under true-triaxial loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 53: 4799-4818.
- [57] Yao Q, Chen T, Tang C, et al. Influence of moisture on crack propagation in coal and its failure modes[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105156.
- [58] Wang F, Liang N, Li G. Damage and failure evolution mechanism for coal pillar dams affected by water immersion in underground reservoirs[J]. Geofluids, 2019, doi: 10.1155/2019/2985691.
- [59] Bai Q, Tu S, Wang F, et al. Field and numerical investigations of gateroad system failure induced by hard roofs in a longwall top coal caving face[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 173: 176-199.
- [60] 张村, 韩鹏华, 王方田, 等. 采动水浸作用下矿井地下水库残留煤柱稳定性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 220-227.

Research status and prospect of underground space utilization mode and key technology in goaf based on underground reservoir

ZHANG Cun^{1,2,3}, JIA Sheng¹, WU Shanxi¹, LIU Jinbao¹, JIAO Yue¹, ZHANG Chenxi¹

1. School of Energy and Mining Engineering, Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China,
3. State Key Laboratory of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 102209, China

Abstract It is significant to construct underground reservoir to utilize underground space and water resource and energy in goaf, and to promote environmental ecological protection of mining area. Based on typical worldwide cases, this paper discusses three utilization modes of underground space and water resources based on underground reservoir: underground storage and filtration reservoir, pumped storage power station, and development and utilization of mine geothermal energy. Compared with the previous UWR with the tunnel as the main space, the storage capacity is larger and the gangue in the caving zone can be purify the mine water. This makes the capacity of underground reservoir of mine increase greatly. On this basis, the paper summarizes two key scientific problems of underground coal reservoir in China: capacity of underground reservoir and stability control of underground reservoir in mine. Furthermore, the influencing factors of reservoir capacity and stability control of the dam body and the main research methods at the present stage are given, and the follow-up research direction of construction of underground reservoir in the production and resource exhausted mines is proposed.

Keywords resource exhausted mine; underground water reservoir; coal mine underground space; storage capacity; coal pillar dam ●



(责任编辑 刘志远)