

您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

交叉·前沿

再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策

袁 亮[1,2],杨 科[1,2]

(1. 安徽理工大学,安徽 淮南 232001; 2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院,安徽 合肥 230031)

摘 要:在经济发展新常态和供给侧改革背景下,关闭/废弃矿井数量逐年增多,仍遗留大量可开发利用资源,开展关闭/废弃矿井资源开发利用意义重大。目前,相关研究工作仍相对滞后,难以系统解决遗留能源资源及地下空间开发利用等方面存在的科学问题和技术瓶颈。基于山西省关闭/废弃矿井资源禀赋与开发现状分析,结合关闭/废弃矿井遗留煤炭地下气化、遗留煤层气地面抽采、地下空间储能储物等重大需求,亟需研究关闭/废弃矿井能源资源协同综合利用评价方法、固-液-气及应力-位移-渗流-温度等多相多场动态演化机制、复杂遗留空间煤层气运移规律与储集成藏机理、复杂岩体多场耦合作用机理及稳定性控制等 4 个关键科学问题,攻克关闭/废弃矿井能源资源协同利用安全与风险评价技术、遗留煤炭地下气化炉构建及气化工艺、遗留煤层气资源地面抽采与利用、地下储库(储水、储油、储气等)库容探测与防渗等 4 项关键核心技术。基于矿井全生命周期绿色利用科学理念,以白家庄煤矿为例,提出了山西省关闭/废弃矿井遗留资源和空间资源“能源化、资源化、功能化”协同利用综合性解决方案,创新了“政产学研用金”协同机制为基础的关闭/废弃矿井能源资源精准开发与利用新模式。

关键词:关闭/废弃矿井;煤层气;地下空间;矿井全生命周期;精准开发与利用

中图分类号:TD88;X321 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2021)01-0016-09

Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines

YUAN Liang[1,2], YANG Ke[1,2]

(1. *Anhui University of Science & Technology, Huainan* 232001, *China*; 2. *Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei* 230031, *China*)

Abstract: Under the background of the new normal of economic development and supply side reform, the number of closed/abandoned mines has increased year by year, leaving a large number of exploitable resources. It is of great significance to carry out the development and utilization of closed/abandoned mine resources. At present, the related research work is still relatively backward, and it is difficult to systematically solve the scientific problems and technical bottlenecks in the development and utilization of the remaining energy resources and underground space. Based on the analysis of resource endowment and development status of closed/abandoned mines in Shanxi Province, combined with the major needs of underground coal gasification, surface extraction of coalbed methane and underground space energy storage, it is urgent to study the evaluation method of collaborative comprehensive utilization of energy resources in

收稿日期:2020-12-26 **修回日期**:2021-01-18 **责任编辑**:常明然 **DOI**:10.13225/j.cnki.jccs.YG20.1966

基金项目:中国工程院咨询研究资助项目(2020-XZ-13);中国工程院院地合作资助项目(2020SX5);山西省揭榜招标资助项目(20191101016)

作者简介:袁 亮(1960—),男,安徽金寨人,中国工程院院士。E-mail:yuanl_1960@sina.com

引用格式:袁亮,杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报,2021,46(1):16-24.

YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16-24.

移动阅读

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

closed/abandoned mines, the multi-phase and multi field dynamic evolution mechanism of solid liquid gas and stress displacement seepage temperature four key scientific issues, including the movement law and reservoir integration mechanism of coalbed methane in complex remaining space, multi field coupling mechanism of complex rock mass and stability control, were solved, including safety and risk assessment technology for collaborative utilization of energy resources in closed/abandoned mines, construction and gasification process of underground gasifier for remaining coal, surface pumping and utilization of remaining coalbed methane resources, and underground storage (water and gas storage) There are four key core technologies: oil and gas storage capacity detection and anti-seepage. Based on the scientific concept of green utilization in the whole life cycle of mines, taking Baijiazhuang Coal Mine as an example, this paper puts forward a comprehensive solution for the collaborative utilization of the remaining resources and space resources of closed/abandoned mines in Shanxi Province, and innovates a new mode of accurate development and utilization of energy resources of closed/abandoned mines based on the collaborative mechanism of "government industry university research user fund".

Key words: closed/abandoned mine; coalbed methane; underground space; mine life cycle; precise development and utilization

国家"十四五"规划纲要提出的经济社会发展主要目标中要求生态文明建设实现新进步,能源资源配置更加合理,利用效率大幅提高。在经济发展新常态和供给侧改革背景下,随煤炭去产能政策的推进,资源枯竭及落后产能矿井和露天矿坑的关闭势在必行。关闭/废弃矿井中仍赋存煤炭资源量约 420 亿 t、非常规天然气近 5 000 亿 m^3,以及丰富的地下空间、矿井水、地热与工业旅游等资源[1-5]。据不完全统计,2020 年全国因化解产能或安全问题关闭煤矿数量达 428 处,退出煤矿产能约 1.5 亿 t/a。充分利用关闭/废弃矿井中的能源及空间资源,将关闭/废弃矿井资源开发利用纳入区域经济和社会发展中,实现资源和资产二次回报,不仅能减少资源浪费,提高去产能矿井能源资源开发利用效率,同时还可以为关闭/废弃矿井企业提供一条转型脱困和可持续发展的战略路径,进而推动资源枯竭型城市转型发展。

欧美国家是关闭/废弃矿井开发利用的先驱,也是废弃矿井开发利用技术最成熟的国家。自 20 世纪 60 年代至今,美国、英国、德国、比利时等欧美国家针对关闭/废弃矿井开展了相关的研究与实践,在理论突破的基础上实施了地下空间储气库(如美国 Leyden 煤矿地下储气库、比利时 Anderlues 煤矿地下储气库和 Peronnes 煤矿地下储气库)、废物处置库(如德国 Asse 矿低中废物处置库、德国 Konrad 铁矿低中放废物处置巷道以及捷克 Richard 石灰岩矿处置库)、地下医院、冷库、实验室(如斯坦福大学修建 1 500 m 极深地下实验室)、文件存储中心(Iron Mountain 地下文件存储中心)、瓦斯发电站(德国北莱茵威斯特法利亚煤矿瓦斯发电站)、压缩空气蓄能电站、抽水蓄能电站(德国 Prosper-Haniel 煤矿 200 MW 抽水蓄能电站)、地热能供暖制冷(荷兰 Heerlen 煤矿水热地热能开发)、矿山博物馆(如德国然梅尔斯贝格矿山博物馆、波兰维利奇卡盐矿博物馆和 Guido 煤矿博物馆)等工程实践[6-8],对废弃矿井遗留煤炭、非常规天然气、地下空间、建筑物与土地等资源进行二次开发利用,形成了关闭/废弃矿井遗留资源能源化、资源化和功能化利用模式,取得了极大的资源环境与经济效益。

随去产能政策的逐步推进,我国关闭/废弃矿井数量逐年增多,关闭/废弃矿井再利用刻不容缓。中国工程院重大咨询项目"我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究"的开展,初步完成了我国关闭/废弃矿井二次开发利用的顶层设计。现阶段"工业 4.0"在能源场景中的应用势头强劲,精准开采、智能感知、大数据分析等技术愈发成熟,赋能关闭/废弃矿井相关遗留资源精准开发利用。但目前我国关闭/废弃矿井资源开发利用整体仍处于试验阶段,针对关闭/废弃矿井遗留煤炭、煤层气、地下空间与土地等资源开展了塌陷区治理(徐州潘安湖湿地公园)、煤炭地下气化(山东新汶鄂庄煤矿煤炭地下气化)、塌陷区光伏发电(大同熊猫电站、淮南漂浮式光伏电站)、地热能利用(冀中能源水源/地源热泵)、建立储气库(安徽含山石膏矿、金坛)、地下储水库(神东矿区)、煤层气抽采(辽宁铁法矿区、晋城区块-晋圣永安煤矿、岳城煤矿废弃矿井煤层气抽采、中节能宁夏新能源股份有限公司下属乌兰煤矿卸压钻孔废弃矿

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

井瓦斯抽采)、国家地质公园(淮南大通国家矿山公园、淮北国家矿山公园)和伴生矿产开发(淮北矿务集团开采伴生高岭土)等方面的基础理论攻关和先期工业试验。然而,关闭/废弃矿井智能精准开发利用涉及多学科交叉协作,内容纷繁复杂,我国对关闭/废弃矿井能源资源开发利用的研究起步较晚,基础理论与关键技术研发仍有待提高[9-10],且没有形成可复制推广的成熟模式。

开展关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间精准开发利用试点,凝练关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间精准开发利用面临的核心科学问题,归纳遗留能源资源精准开发利用亟需攻克的关键技术难题,提出试点区域废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用技术路线,推动"政产学研用金"协同机制为基础的关闭/废弃矿井能源资源精准开发与利用新模式,发展形成关闭/废弃矿井综合开发利用模式,为全国关闭/废弃矿井遗留资源二次利用探路示范和积累经验。山西省作为能源大省,新中国成立至今,其煤炭产量有近 60 a 位居中国第 1[11];山西省煤层气产业水平和规模领跑全国,建有我国最大规模的沁南国家煤层气产业基地,贡献了超 90% 以上的煤层气地面抽采量[12];随去产能的持续推进而产生的大量关闭/废弃矿井、蓝焰集团在沁水煤田开展的关闭/废弃矿井地面抽采工业实践及山西省作为能源革命综合改革试点的重大使命均为山西作为关闭/废弃矿井精准开发利用试点奠定了重要基础。

1 山西省关闭/废弃矿井资源禀赋与开发现状

山西省作为我国的重要煤炭能源基地,2020 年原煤产量 10.63 亿 t,占全国煤炭产量的 27.68%,位居全国之首,估算 2020 年山西省原煤产量 10.56 亿 t,占全国原煤总产量的 27.57%,再次超越内蒙古,成为我国第 1 煤炭生产大省。山西省矿井数量在 1949 年为 3 676 处,经过大规模建设,到 1997 年达到最高峰为 10 971 处[11],伴随而来的是煤炭资源的浪费和环境的污染。经安全整治、整合重组和去产能等措施推进,目前年生产能力 90 万 t 以下的煤矿已逐渐关闭。2016—2020 年,山西省共关闭煤矿 138 座,退出产能 10 889 万 t[13],如图 1 所示。

中国工程院重大咨询项目调研统计表明,1949—2012 年,我国井工开采方式下累计遗留煤炭资源总量达 582.7 亿 t,山西省占比 20.59%,居全国首位,如图 2 所示。2014—2018 年,山西关闭矿井 118 座,废弃矿井遗留煤层气(Abandoned Mine Methane,AMM)资源量预估 103 亿 m^3,占全国 AMM 预计总量的 50% 以上,将成为我国废弃矿井瓦斯二次利用的重点省份,如图 3

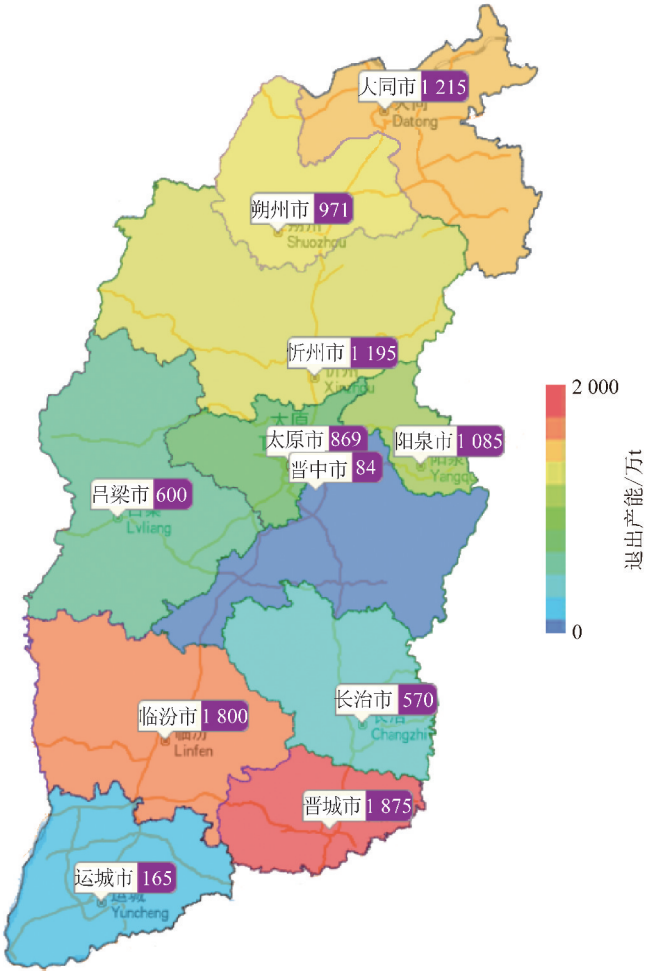


图 1 2016—2020 年山西省关闭矿井分布情况

Fig. 1 Distribution of closed mines in Shanxi Province from 2016 to 2020

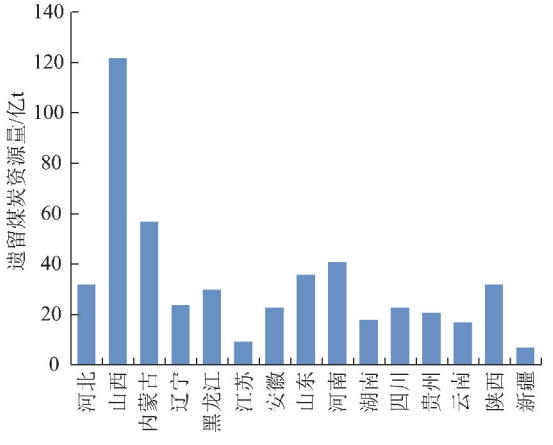


图 2 2014—2018 年全国井工开采遗留煤炭资源统计

Fig. 2 Statistics of coal resources left over from underground mining in China from 2014 to 2018

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

所示。另外,据山西省国土资源厅发布的《山西省煤炭采空区煤层气资源调查评价报告》显示,目前山西省采空区面积 5 000 km^2 以上,具有开发价值约 2 052 km^2;预测残余煤层气资源量约 726 亿 m^3。其中,7 个瓦斯含量较高的矿区(西山、阳泉、武夏、潞安、晋城、霍东、离柳)内,采空区面积约 870 km^2,预测煤层气资源量 303 亿 m^3,部分地区资源相对富集,值得开发利用[14]。

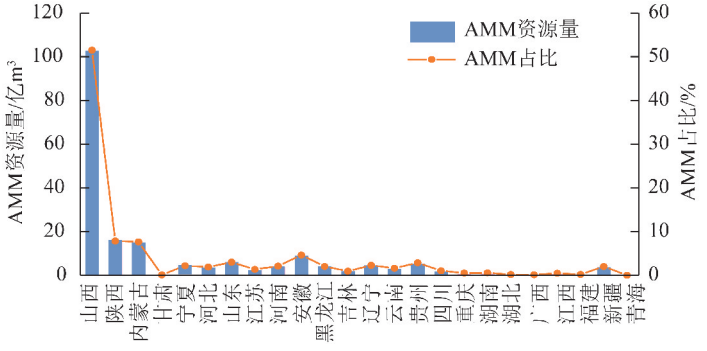


图 3　2014—2018 年全国 AMM 资源统计

Fig. 3　Statistics of national remaining AMM resources from 2014 to 2018

面对关闭/废弃矿井中遗留蕴藏的大量煤炭、煤层气与地上地下空间等资源[15],山西省关闭/废弃开发利用现状体现为“三多两少”—废弃矿井数量多、遗留资源种类多、闭坑次生隐患多,科学规划设计少、精准开发案例少。就遗留煤层气资源而言,仅开展了部分基础理论研究和先期工业试验。目前,晋煤集团先后在晋城、西山、阳泉、晋中等矿区施工废弃矿井煤层气抽采井 135 口,目前运行 55 口,日抽采量为 9.4 万 m^3,累计利用气量约 1.3 亿 m^3;蓝焰集团牵头承担的山西煤基(煤层气)重点科技攻关项目“关闭煤矿采空区地面煤层气抽采技术研究及示范”实施 27 口关闭/废弃矿井采空区煤层气井建设,15 口井完成设备安装运行,单井日均产量 1 155 m^3,截至 2016 年底,累计抽采利用煤层气约 1 700 万 m^3[16]。国内对煤层气的利用主要依赖于正在开采矿井的瓦斯抽排系统,虽然有些矿区进行了地面钻孔排采利用,但真正意义上的废弃矿井遗留煤层气综合治理利用产业化尚属空白。

为实现关闭/废弃矿井遗留能源资源的精准开发利用,在机制上,山西省采取揭榜挂帅式的科技创新新探索,从“路径依赖”转向“模式创新”,规避人才与技术基础劣势,让全球范围内的智力资源与创新资源服务于自身高质量转型发展。揭榜挂帅制推动“政产学研用金”协同创新,为山西众多的关闭/废弃矿井开发利用提供智力支持,量身打造实施方案,让大学成为关闭/废弃矿井开发利用从理论至应用的科研主战场;在标准方面,由山西省应急管理厅提出、蓝焰集团等单位起草的山西省地方标准《煤矿采空区(废弃矿井)煤层气地面抽采安全规范》于 2019 年初推出征求意见稿,该标准规定了煤矿采空区(废弃矿井)煤层气地面抽采的钻井井位及层位选择、场地设备安装等要求,可用于指导山西省辖区内煤矿采空区(废弃矿井)煤层气地面抽采的安全管理工作;在政策方面,2019 年底山西省自然资源厅与能源局一同下发了《关于开展煤炭采空区(废弃矿井)煤层气抽采试验有关事项的通知》,明确了开展煤炭采空区(废弃矿井)煤层气抽采试验,有效开发利用采空区煤层气资源,是山西省能源革命综合改革试点的一项重要任务。

综上所述,山西省关闭/废弃矿井遗留煤炭、煤层气、地下空间等资源禀赋优势突出,在政策、标准、机制等多方面为推动关闭/废弃矿井遗留能源资源的精准开发利用提供了坚实基础。

2　关闭/废弃矿井能源资源精准开发利用关键科学问题

基于山西省关闭/废弃矿井资源禀赋条件,提出废弃矿井遗留煤炭地下气化、遗留煤层气地面抽采和地下空间储能储物等 3 种能源资源精准开发与洁净利用方式,必将面临如下 4 个关键科学问题。

2.1　关闭/废弃矿井资源综合利用安全评价体系

矿井直接关闭或废弃将会引发地质灾害威胁,如地表塌陷、矿井水隐患、采空区瓦斯泄漏而导致的爆炸或火灾等[17]。关闭/废弃矿井资源综合利用安全评价是以关闭/废弃矿井遗留能源资源主体作为被评价对象,分析影响遗留能源资源开发利用过程安全的主要因素,构建一套可量化的评价指标体

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

系,采用互联网、软件开发、云计算、数据挖掘、模糊数学等理论与方法,对遗留能源资源开发利用这一主体的当前及未来安全度进行评估的过程。需要重点关注关键性指标的选取与把握,梳理关闭/废弃矿井地质背景、采掘历史、资源条件、采空区空间等特征指标,根据指标体系设计的一般原则,构建安全评价指标体系,对关闭/废弃矿井的安全性进行分析,对各风险因素进行研究,建立关闭/废弃矿井资源协同利用安全与风险评价技术标准,向关闭/废弃矿井利用和管理提供技术层面的决策支撑,指导关闭/废弃矿井“能源化”“资源化”与“功能化”利用的动态评判。

2.2 气液热固化等多相多场动态演化机制

煤炭地下气化是通过控制井下煤炭资源燃烧反应,使得煤层在热及化学作用下形成可燃气体的过程[18-19],作为煤炭无害化开采技术创新方向,被列入国家《能源技术革命创新行动计划(2013—2030年)》[20]。关闭/废弃矿井遗留的煤炭资源与空间资源为煤炭地下气化的研究工作提供了新战场,将遗留煤炭资源转化为可用燃气资源,必将为我国推进能源生产与消费革命增添新的活力。在地下遗留煤炭气化过程中会产生 1 200 ℃的高温,围岩边界温度随气化工作面的定向移动而产生变化,如图 4 所示。为揭示地下气化过程对井下结构和环境的影响机理,需要系统研究温度场的剧烈变化对周围应力场、位移场、孔隙场以及裂隙发育等产生的影响。分析温度场分布及动态变化规律,确定围岩内温度影响的范围,阐明其余多场的演化机制。进一步建立多场耦合条件下,地下煤炭气化对遗留煤柱、围岩、覆岩运移及地表沉降特征影响的模型。

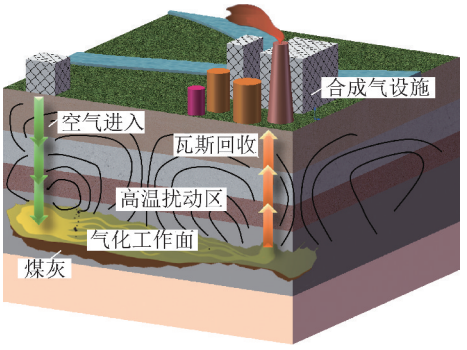


图 4 遗留煤炭地下气化示意

Fig. 4 Schematic diagram of underground gasification of legacy coal

煤炭地下气化技术体系如图 5 所示。因此,需要对山西省区域典型煤种进行热解、气化和强制氧化着火实验,研究其大尺度煤热解、气化动力学参数,强制氧化着火机理,并建立动力学方程。通过实验或煤炭地下气化物料及能量平衡模型,研究典型煤种地下气化参数,包括不同氧浓度-水蒸气连续气化条件下的汽氧比、吨煤产气率、比消耗量、气化效率,以及煤气有效组分和热值的变化规律,进行山西省典型煤种催化热解、气化实验,包括催化剂的选择、配比以及负载方法等,研究催化煤热解、气化动力学参数,以获得更高水平的煤炭气化效率,确定高效的地下煤炭气化的工艺技术。

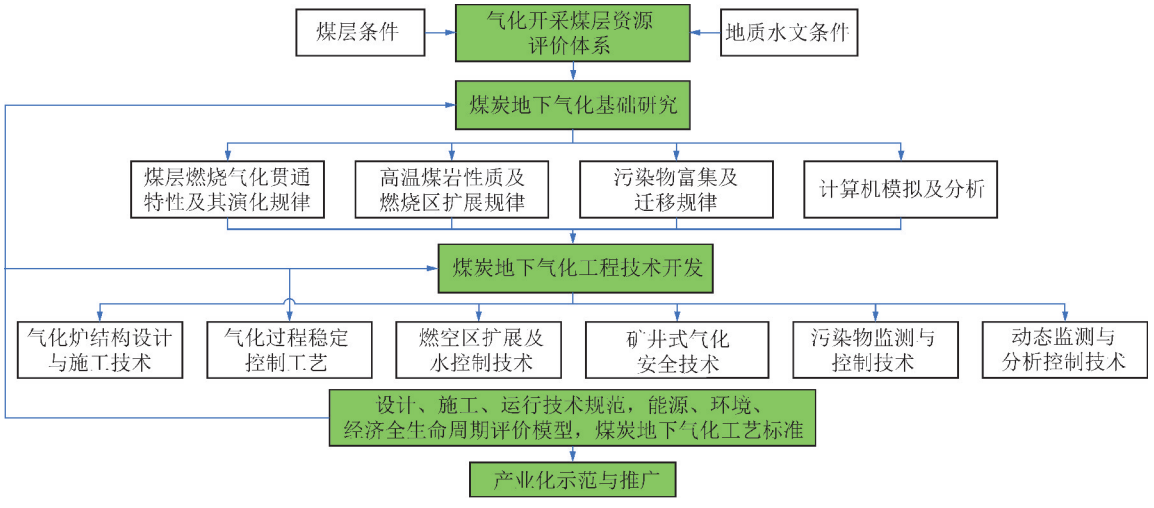


图 5 煤炭地下气化技术体系[17]

Fig. 5 Technology system of underground coal gasification[17]

2.3 复杂遗留空间煤层气运移规律与储集成藏机理

关闭/废弃矿井遗留煤层气泄露导致的爆炸或火灾严重威胁着周边群众生产、生活和安全,相关事故时有报道[21]。关闭/废弃矿井的采动裂隙、地表塌陷

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

裂隙或封闭不严的井筒等是可燃气体向地面逸散的通道,不仅存在爆炸或火灾等事故隐患,更会加剧温室效应。为此,2020 年国家能源局颁发《关于推进关闭煤矿瓦斯综合治理与利用的指导意见(征求意见稿)》,对关闭煤矿的瓦斯综合治理与利用工作已经提上日程。

然而,矿井地下空间构造种类繁多、地质断层散落其中、采场和巷道错综复杂、采后覆岩“三带”长期演化转换、遗留煤炭资源分布规律不清等因素致使废弃矿井瓦斯抽采利用对象属性不清,地面抽采工程措施无的放矢、效果不理想。关闭/废弃矿井采空区既是应力释放区,也是低压区,以采空低压区为中心,采动区裂隙为通道,周围煤岩储层中的煤层气向采空区运移、聚积,且随时间尺度的长短,其聚积程度不一,如图 6 所示。因此,需要基于储层特征、岩层破坏变形规律和裂隙场、渗流场动态演化规律的全面解析,揭示关闭/废弃矿井遗留煤层气运移、动态聚积规律,阐明时间和空间尺度下煤层气聚积特征和二次动态成藏机理,建立关闭/废弃矿井煤层气资源动态评价体系,构建关闭/废弃矿井煤层气井产气量预测模型及其经济性评价指标体系。

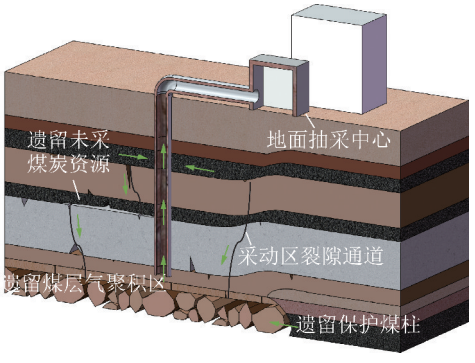


图 6　关闭/废弃矿井遗留煤层气抽采示意

Fig. 6　Schematic diagram of coalbed methane extraction from closed/abandoned mines

具体而言,需要根据山西省关闭/废弃煤矿典型试验矿井的煤层结构和特点,构建基于三场(“裂隙场”、“应力场”和“压力场”)耦合条件下的抽采渗流模型,研究原生带-裂隙带-低压采空区条件下的煤层气分布-迁移规律和解吸-扩散-渗流特征,耦合气体渗流场特征。以煤层气资源赋存参数特征及产出特性为基础,建立关闭/废弃矿井煤层气产气量预测模型,提出其经济性评价指标体系,科学评估煤层气极限产出量与经济价值。揭示布井位置对抽采效果的影响机理,确定井位布置原则,评价井型井网的地质适应性,提出关闭/废弃矿井煤层气资源地面抽采关键技术。

2.4　复杂岩体多场多相耦合作用机理及其变形破坏特征

地下水库、地下油气储库及其他储物空间是关闭/废弃矿井地下空间利用的潜力方向[22-23]。废弃矿井遗留空间资源具有特殊性与复杂性:首先,具有复杂多尺度、多形态特征,且存在冒落矸石、采掘破碎岩块、裂隙裂缝岩体、塑性大变形岩体及完整岩石形态等;其次,受力环境场源多,如自重应力、构造应力、重复采动应力、矿井水或煤层瓦斯压力及人为工程扰动应力等;再次,载荷历程路径复杂、受力变形演化期长、动态研究分析难度大。因此,需要深入研究复杂岩体多场多相耦合作用机理,揭示其变形损伤与破坏规律,建立符合工程实际条件的固-液-气多场耦合损伤演化模型,为废弃矿井地下空间安全高效储水与抽水蓄能提供理论基础与技术保障。

具体而言,需要攻关的技术问题是:综合考虑储水或储油气地下空间的孔隙和裂隙、煤层因素、覆岩岩性、开采方法、采空区处理方法及工作面尺寸等因素的地下水库或油气库容积特征,研究不同工作面布局、开采条件、地质条件与采空区面积和冒落岩石空隙率的关系,构建地下水库库容的计算方法;研究煤柱或人工坝体受采动影响产生的裂隙区、塑性区引起的渗漏以及相应的防治措施,以地质力学参数为基础,通过物理力学试验和数值模拟,研究裂隙带发育规律,提出相应的隔离筑坝及防渗技术,为关闭/废弃矿井储能储物综合利用提供现实基础。

3　山西省关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用对策

面向山西省大量关闭/废弃矿井遗留资源和空间资源利用的重大需求,为向山西省关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用提供对策,在基础理论与技术研发层面,需要揭示高温条件下围岩温度场、应力场和位移场的动态分布以及地表移动变形规律、遗留煤层气资源运移与动态聚积规律、资源动态评价体系与地面抽采利用关键技术和围岩空间裂隙与水油气耦合作用机理;提出关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间利用的管理创新制度;建立关闭/废弃矿井风险安全评价体系,完善关闭/废弃矿井资源综合利用创新模式的总体思路;紧密围绕关闭/废弃矿井遗留资源和地下空间资源开发利用关键技术的研发及工程示范。

同时,结合关闭/废弃矿井全生命周期系统管理利用的理念,建立关闭/废弃矿井可再生能源利用规

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

划标准,开展关闭/废弃矿井遗留煤炭资源及可再生能源利用示范项目试点研究,加大自主技术研发、加强国际合作、制定专业人才培养机制、加大科技攻关投入、加强关闭/废弃矿井遗留煤炭、煤层气和地下空间等资源利用基础研究及开采利用关键技术研究,建立一套完整可行的关闭/废弃矿井煤层气资源评估和煤层气产量预测模型,确定不同地质条件的最佳利用方式、规模和服务年限。

另外,还需要促进国家相关职能部门采用多种政策支持和财政资金保障相结合的方式,完善关闭/废弃矿井可再生能源利用财税优惠政策,完善关闭/废弃矿井可再生能源利用的相关财政补贴、税收减免政策及投资环境,鼓励引导私人资本参与,建立市场化运营等新型的投资机制和商业模式,创建关闭/废弃矿井能源资源精准开发利用多元化投资及合作开发模式。

最终,形成山西省关闭/废弃矿井遗留资源和空间资源利用综合性解决方案如图 7 所示。

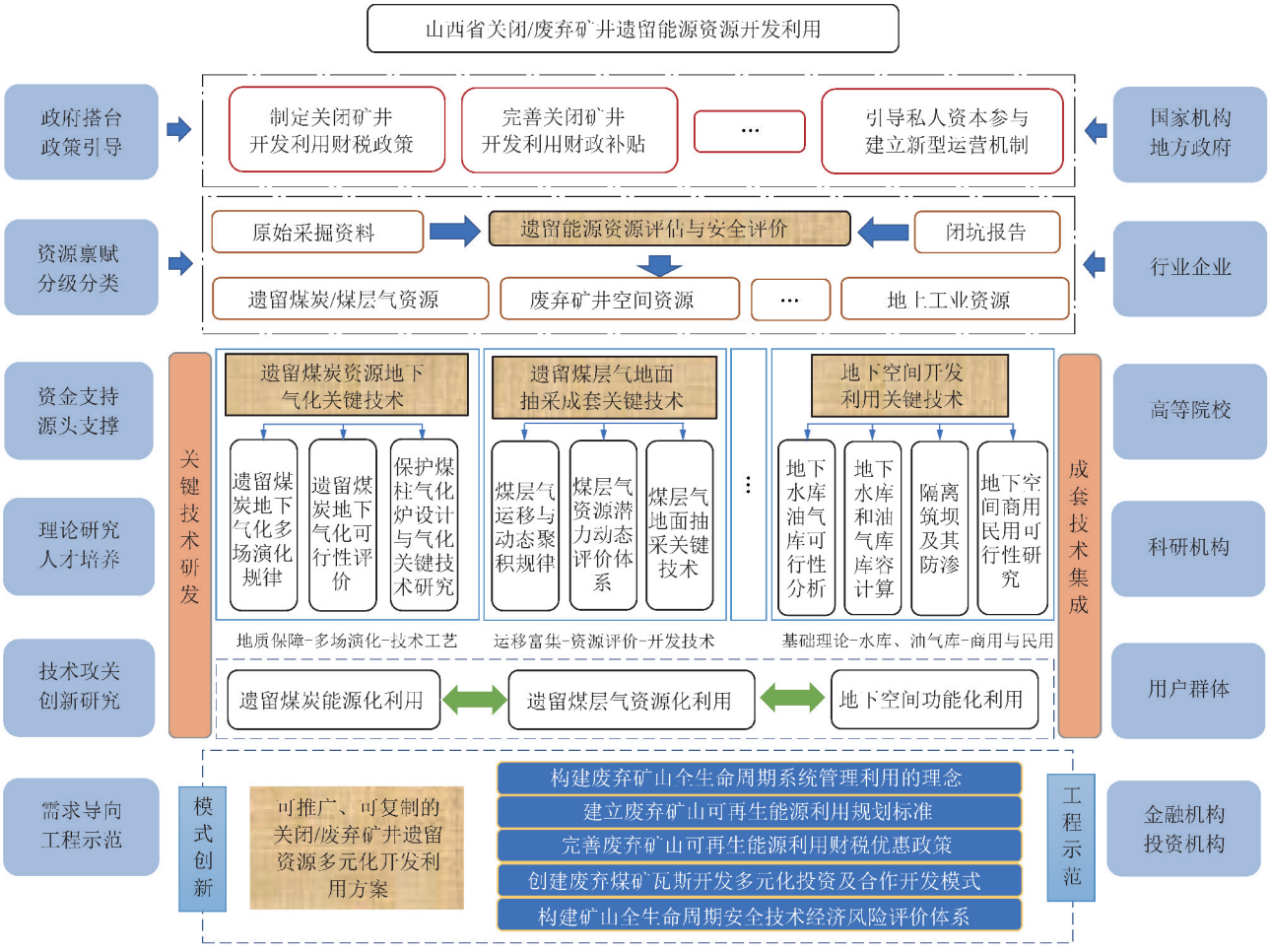


图 7 山西省关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用方案

Fig. 7 Technical route for development and utilization of abandoned mine resources and underground space in Shanxi Province

4 山西省关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用模式

白家庄煤矿位于太原市西南万柏林区西铭乡白家庄村,距太原市中心约 20 km,交通便利。矿井位于西山煤田边缘,开采历史悠久,开采手段多样,毗邻万亩休闲生态园。所属区域年平均气温 9.5 ℃,年平均降水量为 415 mm,降雨多集中在 7 至 9 月,水资源短缺。2016 年,白家庄矿响应“推进供给侧结构性改革”要求,在当年 10 月底关闭停产,退出产能 100 万 t。依据白家庄矿闭坑地质报告,全井田保有储量达 107 483 kt,矿井原 2 号井口延续饮用水采水功能,对井下现有+840、+710 水平生产、通风、机电等系统以及 22526 工作面进行保留。结合该矿“近城区、近景区、开采久、水丰富”的资源禀赋特征与环境特点等要素,提出了地上工业旅游资源开发+煤炭教学基地建设,井下空间储水+抽水蓄能发电的立体开发方式,建成可复制可推广的综合性示范基地如图 8 所示。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

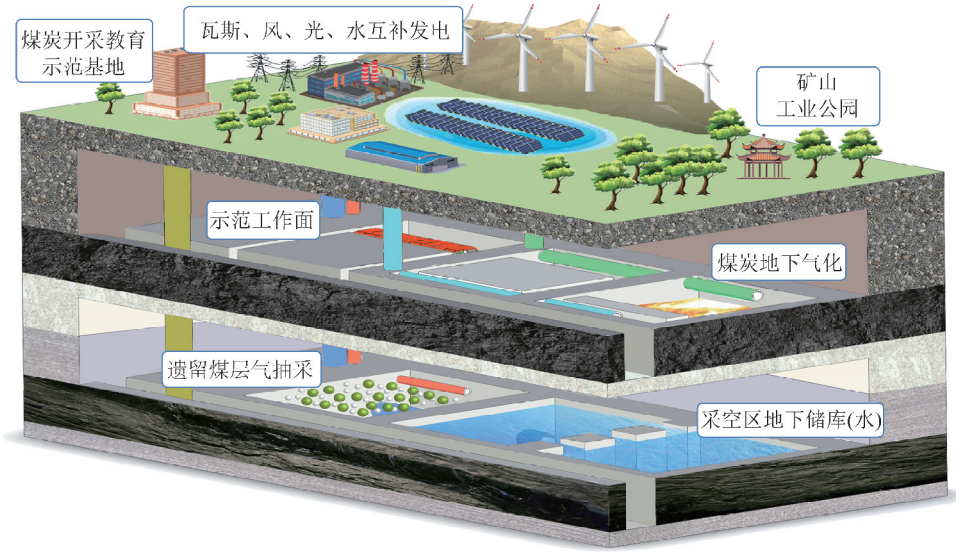


图 8　关闭/废弃矿井遗留资源及地下空间开发利用示意

Fig. 8　Development and utilization of abandoned mine resources and underground space in Shanxi Province

5　展　　望

(1)对山西省关闭/废弃矿井分布情况进行了调查,明确了山西省关闭/废弃矿井遗留资源禀赋优势,山西省在政策、制度、机制上的相关举措为推动关闭/废弃矿井遗留能源资源的精准开发利用提供了坚实基础。

(2)面对不同遗留能源资源的开发利用需求,亟需研究关闭/废弃矿井能源资源协同综合利用评价方法、固-液-气及应力-位移-渗流-温度等多相多场动态演化机制、复杂遗留空间煤层气运移规律与储集成藏机理、复杂岩体多场耦合作用机理及稳定性控制等 4 个关键科学问题,攻克关闭/废弃矿井能源资源协同利用安全与风险评价技术、遗留煤炭地下气化炉构建及气化工艺、遗留煤层气资源地面抽采与利用、地下储库(储水、储油、储气等)库容探测与防渗等 4 项关键核心技术。

(3)通过构建关闭/废弃矿井全生命周期系统管理利用的理念,建立关闭/废弃矿井可再生能源利用规划标准,开展关闭/废弃矿井遗留煤炭资源及可再生能源利用示范项目试点研究。通过“政产学研用金”这样一体化的改革,把技术创新的上游、中游、下游以及创新环境与最终用户有效对接和耦合,才能真正推动关闭/废弃矿井精准开发利用模式的创新研究。

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.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.

[2]　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.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: Principles, present situation and future [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 965-972.

[3]　韩保山,张新民,张群. 废弃矿井煤层气资源量计算范围研究[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(1):29-31.
HAN Baoshan, ZHANG Xinmin, ZHANG Qun. Theoretical study on calculation limits of CBM resource of abandoned coal mine [J]. Coal Geology and Exploitation, 2004, 32(1): 29-31.

[4]　黄炳香,刘江伟,李楠,等. 矿井闭坑的理论与技术框架[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(4):715-729,747.
HUANG Bingxiang, LIU Jiangwei, LI Nan, et al. Frame work of the theory and technology for mine closure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 715-729, 747.

[5]　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.
XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1484-1503.

[6]　常春勤,邹友峰. 国内外废弃矿井资源化开发模式述评[J]. 资源开发与市场,2014,30(4):425-429.
CHANG Chunqin, ZOU Youfeng. Review on resource development mode of abandoned underground space of mine [J]. Resource Development & Market, 2014, 30(4): 425-429.

[7]　ACCIARRI R, ACERO M A, ADAMOWSKI M, et al. Long-baseline neutrino facility (LBNF) and deep underground neutrino experiment (DUNE): The LBNF and DUNE projects [R]. 2016.

[8]　陈文轩,康宝伟,王旭宏,等. 国外利用废弃矿井对放射性废弃物的处置[J]. 工业建筑,2018,48(4):9-12.

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

CHEN Wenxuan, KANG Baowei, WANG Xuhong, et al. Disposal of radioactive waste in abandoned mines abroad[J]. Industrial Construction, 2018, 48(4): 9-12.

[9] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.
XIE Heping, GAO Mingzhong, GAO Feng, et al. Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shutdown coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1355-1365.

[10] 袁亮. 我国煤炭工业高质量发展面临的挑战与对策[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 6-12.
YUAN Liang. Challenges and countermeasures for high quality development of China's coal industry[J]. China Coal, 2020, 46(1): 6-12.

[11] 山西省煤炭工业协会. 山西煤炭工业 70 年巨变[M]. 太原: 山西人民出版社, 2019.

[12] 吴建光, 孙茂远, 冯三利, 等. 国家级煤层气示范工程建设的启示——沁水盆地南部煤层气开发利用高技术产业化示范工程综述[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 9-15, 112-113.
WU Jianguang, SUN Maoyuan, FENG Sanli, et al. Good lessons from the state-level demonstration project of coalbed methane development: An overview of such hightech and commercial project in the southern Qinshui Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 9-15, 112-113.

[13] 张农, 阚甲广, 王朋. 我国废弃煤矿资源现状与分布特征[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 4-8.
ZHANG Nong, KAN Jiaguang, WANG Peng. Study on resources and distribution of abandoned mines in China [J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 4-8.

[14] 山西省国土资源厅. 山西省煤炭采空区煤层气资源调查评价报告[R]. 太原: 山西省国土资源厅, 2017.

[15] 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.
MENG Zhaoping, SHI Xiuchang, LIU Shanshan, et al. Evaluation model of CBM resources in abandoned coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 537-544.

[16] 刘汉斌, 张亚宁, 程芳琴. 山西关闭煤矿资源利用现状及开发利用建议[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(10): 78-82.
LIU Hanbin, ZHANG Yaning, CHENG Fangqin. Utilization status and development suggestions on closed coal mine resources in Shanxi Province[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(10): 78-82.

[17] 戴家生. 浙江废弃矿井现状调查及影响分析[J]. 现代矿业, 2020, 36(6): 216-219.
DAI Jiasheng. Investigation and impact analysis of the current situation of abandoned mines in Zhejiang[J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 216-219.

[18] 梁杰, 王喆, 梁鲲, 等. 煤炭地下气化技术进展与工程科技[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 393-402.
LIANG Jie, WANG Zhe, LIANG Kun, et al. Progress and technology of underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 393-402.

[19] 梁杰. 煤炭地下气化过程稳定性及控制技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.

[20] 刘淑琴, 梅霞, 郭巍, 等. 煤炭地下气化理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 90-99.
LIU Shuqin, MEI Xia, GUO Wei, et al. Progress of underground coal gasification theory and technology [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 90-99.

[21] 徐潇, 周来, 冯启言, 等. 废弃煤矿瓦斯赋存与运移气-水-岩相互作用研究进展[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 1-4, 8.
XU Xiao, ZHOU Lai, FENG Qiyan, et al. Research progress of gas-water-rock interaction for gas occurrence and migration in abandoned coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(6): 1-4, 8.

[22] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205-2213.
LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2205-2213.

[23] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267-273.
HUO Ran, XU Xiangyang, JIANG Yaodong. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 267-273.