

张吉雄,张强,巨峰,等.深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J].煤炭学报,2018,43(2):377-389. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.4102

ZHANG Jixiong,ZHANG Qiang,JU Feng,et al.Theory and technique of greening mining integrating mining,separating and backfilling in deep coal resources[J].Journal of China Coal Society,2018,43(2):377-389. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.4102

深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术

张吉雄^{1,2,3},张 强^{1,2,3},巨 峰⁴,周 楠^{1,2,3},李 猛^{1,2,3},孙 强^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:深部煤炭资源开采已势在必行,但面临更加复杂的开采环境、更加危险的开采扰动诱导潜在灾变过程。结合深部煤炭开采“四高一扰动”的挑战与充填开采在岩层控制等方面的技术优势,总结分析了深部充填开采面临的五大技术难题,提出深部煤炭资源采选充绿色化开采构想,即直接在井下构建煤炭开采、煤矸分选与矸石就地充填一体化生产系统,形成深部煤炭采选抽充防协同生产模式,实现深部煤炭及伴生资源的安全高效及绿色开采。该构想的初步技术体系已基本形成,并在平煤集团十二矿、开滦集团唐山矿等深部矿井建立了示范工程或基地。后续将继续深入开展深部充填开采岩层控制等6个基础理论方面的研究工作,创新采选充绿色化系统布置、自动化充填、物料大流量输送、煤矸智能分选等7项关键技术,形成深部煤炭资源采选充绿色化开采的系列理论与技术体系,为实现深部资源绿色化开采提供可靠基础。

关键词:深部资源;充填开采;采选充;岩层控制;绿色化开采

中图分类号:TD823.7 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2018)02-0377-13

Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources

ZHANG Jixiong^{1,2,3},ZHANG Qiang^{1,2,3},JU Feng⁴,ZHOU Nan^{1,2,3},LI Meng^{1,2,3},SUN Qiang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China; 2. School of Mines,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China; 3. Ministry of Education's Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China; 4. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China)

Abstract:Deep resource exploitation is imperative, but it is facing with more complicated mining environment and dangerous mining disturbances to induce the potential catastrophe process. Combined with the challenge of “four high and one disturbance” in deep coal mining and the technical advantages of backfilling mining in ground control, this paper summarizes five major technical problems faced by deep backfilling mining, thus the conception of green mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources is put forward. The theoretical research and technical system of the conception have been basically formed which has been carried out in typical mines such as the 12th Coal Mine of Pingdingshan Group and Tangshan Coal Mine of Kailuan Group. In order to build integral theories and technology system of the green mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resource, backfilling and ground control theory in deep coal mine and five other basic theories need further researches and beyond that, sev-

收稿日期:2017-11-30 修回日期:2018-01-15 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(51725403);江苏特聘教授基金资助项目(苏教师(2015)29号)

作者简介:张吉雄(1974—),男,宁夏中卫人,教授,博士生导师。E-mail:zjxiong@163.com

通讯作者:张 强(1986—),男,湖北宣恩人,讲师。E-mail:leafkky@163.com

en key technologies such as the layout of mining-dressing-backfilling green mining system, automatic backfilling, mass flow material transportation and intelligent coal-waste separation need to be developed. These theories and techniques provide a reliable basis for realizing the safe, efficient and green mining of deep resources.

Key words: deep resource; backfilling mining; mining- separating-backfilling; ground control; green mining

1 深部煤炭资源采选充绿色化开采背景

随着我国浅部煤炭资源的长期持续高强度开采以及东部地区煤炭资源的日渐枯竭,使得煤炭开采深度逐渐加大,由于接续资源多在深部和优质资源多在西部的现状,逐渐形成“压缩东部、限制中部和东北、优化西部”的全新煤炭生产格局。“两部开采”,即深部与西部开采将成为煤炭工业发展与资源开发中的新常态。就深部开采而言,目前煤炭开采深度已达1 502 m(中国孙村煤矿),地热开采深度达4 005 m(中国西安地热井),有色金属矿开采深度达4 700 m(南非Western Deep Level金矿),石油开采深度达7 110 m(中国塔里木托普39井),天然气开采深度达8 103 m(美国米尔斯兰奇气田)(图1)^[1-9],深部资源开采,尤其进入1 000~2 000 m的深部煤炭资源开采条件(四高一扰动,即高地应力、高地温、高岩溶水压、高瓦斯以及高强扰动)后,潜在灾变过程集中表现为冲击地压频率和强度显著增加、煤与瓦斯突出危险性持续加剧、采场矿压显现尤为强烈、突水事故趋于严重、地表沉陷难以预计等,深部煤炭资源开采与灾害防治将面临严峻挑战^[2-3,10-14]。《“十三五”规划纲要(2016—2020)》明确提出“加快推进深井灾害防治等技术研发应用”、《煤炭工业发展“十三五”规划》也将深井灾害防治列为煤炭科技发展的重点。

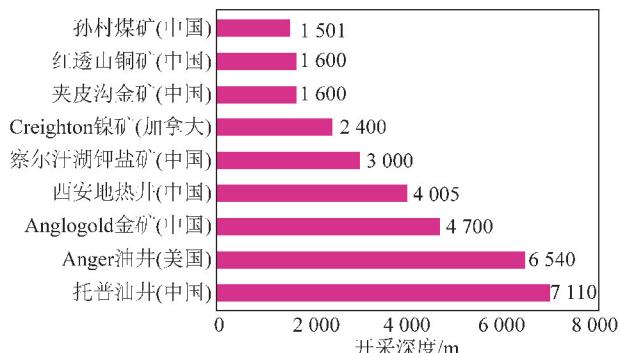


图1 深部资源开采深度统计

Fig. 1 Depth statistics in deep resource exploitation

固体充填采煤技术在岩层运动控制与潜在灾变防控、煤矸石等废弃物处理、地表沉陷控制、生态环境保护以及煤炭资源采出率提高等方面具有显著的技术优势^[15],作为煤矿绿色开采核心技术之一,是解决

深部资源开采的主要技术选择。但是,由于深部开采环境的显著变化,深部充填开采面临诸多重大技术难题(图2)^[10,16-19]:一是高地应力下充填采煤岩层移动机理发生变化;二是高地温诱发充填体具有蠕变脆弱特征;三是高瓦斯导致煤与瓦斯共采困难;四是深部充填煤岩体的渗流特性不明;五是高强开采制约集成开采系统布置。如何应对上述严峻挑战,创新解决深部充填开采的科学问题,发展与充填采煤相关的岩层移动控制基础理论,形成深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术体系,是当前研究的重点。

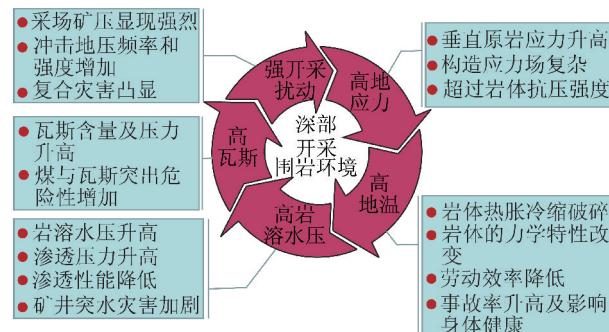


图2 深部充填开采面临的挑战

Fig. 2 Challenges faced in deep backfilling mining

针对我国深部煤炭资源的开发现状与发展趋势,本文提出深部采选充绿色化开采构想,以期实现对深部煤炭资源高效开采、煤矸井下分选、矸石就地充填、瓦斯实时抽采、潜在灾害有效防控,形成井下采选抽充防集型生产模式,实现深部煤炭及伴生资源的安全、高效和绿色开采,达到深部煤炭资源开发与环境保护相协调发展的目标。

2 深部煤炭资源采选充绿色化开采构想

针对深部充填开采面对的重大技术难题,围绕深部充填开采充填体控制岩层运动这一主题,安全、高效与绿色充填开采要从浅部走向深部,亟待创新与发展深部充填开采的岩层控制理论与技术体系^[20]。由此提出深部煤炭资源采选充绿色化开采构想(图3),即在井下实现煤炭开采、煤矸分离及矸石就地充填,直接产出清洁煤炭。为此,需要深入研究解决深部充填开采的基础性关键科学问题,具体包括:①深部充填开采岩层控制理论;②深部充填开采地表沉陷控

制理论;③大断面硐室的围岩控制理论;④深部充填物料高效输送理论;⑤深部围岩环境充填材料力学行为;⑥高水压采动岩体渗流理论。

结合深部充填开采技术难题与理论研究,研发采选充绿色化系统优化布置、充填开采装备的自动化控制、大断面硐室的围岩控制、深部大流量物料的输送、充填体与支架协同控顶、深部充填效果监测控制以及井下高效智能煤研分选等系列技术,以形成深部采选充绿色化开采模式,总体研究技术框架如图4所示。

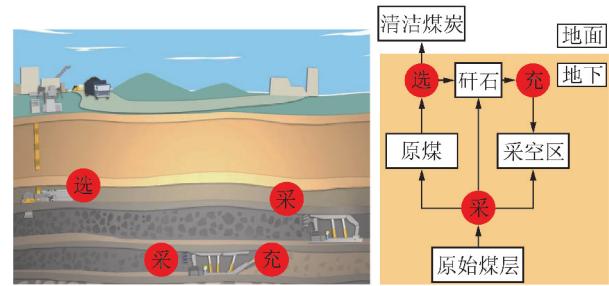


图3 深部煤炭资源采选充绿色化开采构想

Fig. 3 Conception of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources

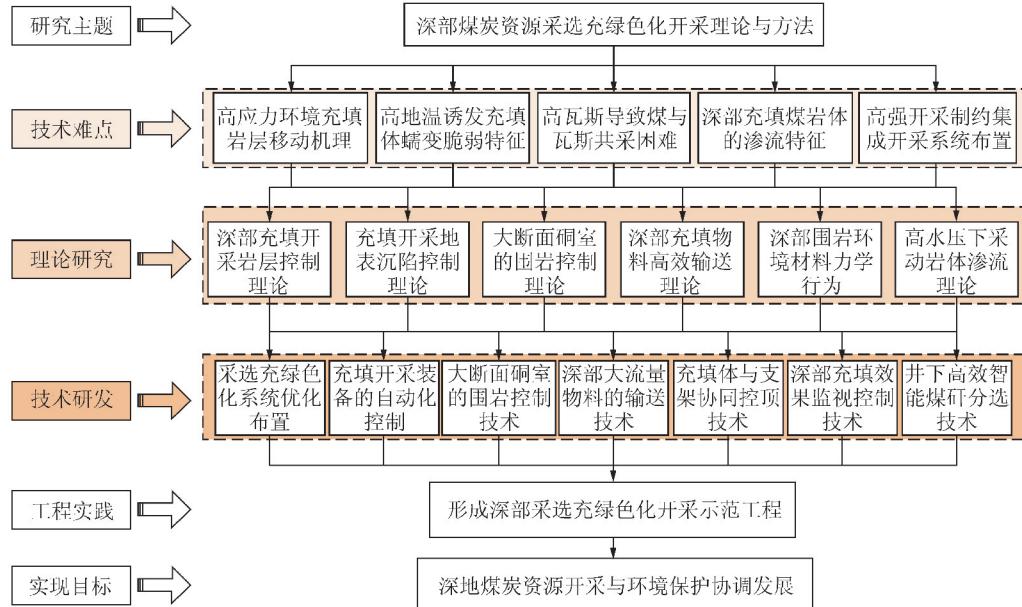


图4 深部煤炭资源采选充绿色化开采研究框架

Fig. 4 Research framework of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources

3 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论

3.1 深部充填开采岩层控制理论

深部充填开采矿压显现与浅部相比具有明显的区别,目前在浅部充填开采岩层运动控制理论方面已取得一定进展,主要有用于地表沉陷预计与控制设计的“等价采高”理论^[21]、以控制关键岩层弯曲变形规律为目标的关键岩层稳定控制理论^[15]、以判定基本顶是否发生临界破断的基本顶控制理论^[22],以及聚焦充填采场直接顶位态稳定控制的煤体-支架-充填体“三位一体”协同控顶理论^[23]等(图5),上述理论基本涵盖了浅部充填开采采场直至地表的岩层运动规律分析与控制设计研究。但是进入深部开采后,现有理论不完全适用于深部高应力、高温、高岩溶水压及强应力扰动下的矿压显现与覆岩运动规律研究,也即,深部开采环境下针对岩体性质差异、围岩应力变化、“煤体-支架-充填体”协同控顶机理变化条件下

的深部充填开采岩层控制理论有待深入研究。

3.2 充填开采地表沉陷控制理论

与浅部相比,深部充填开采地表沉陷控制的差异主要表现在:受深部高地应力影响,充填体变形量增大,矿压显现强度大;但随着开采深度的增加,主要影响半径加大,地表最大变形值减小,地表沉陷影响范围整体扩大^[24];地表达到充分采动所需的临界开采面积迅速增大,覆岩结构、采区上下山煤柱和采区隔离煤柱等永久煤柱对地表沉陷的控制作用更加显著;浅部与深部充填开采地表沉陷规律对比示意如图6所示(图中 w_0 为浅部充填开采充分采动后地表最大下沉值; w_1 为深部充填开采未充分采动时地表下沉值)。从岩层控制角度,需要提高采空区充实率以控制强矿压显现;而从地表沉陷控制角度,充实率又可适当降低,由此,需综合平衡井下围岩控制与地表沉陷设防指标,兼顾覆岩结构和井下永久煤柱的岩层控制作用,优化设计充实率,构建新的适用于深部充填

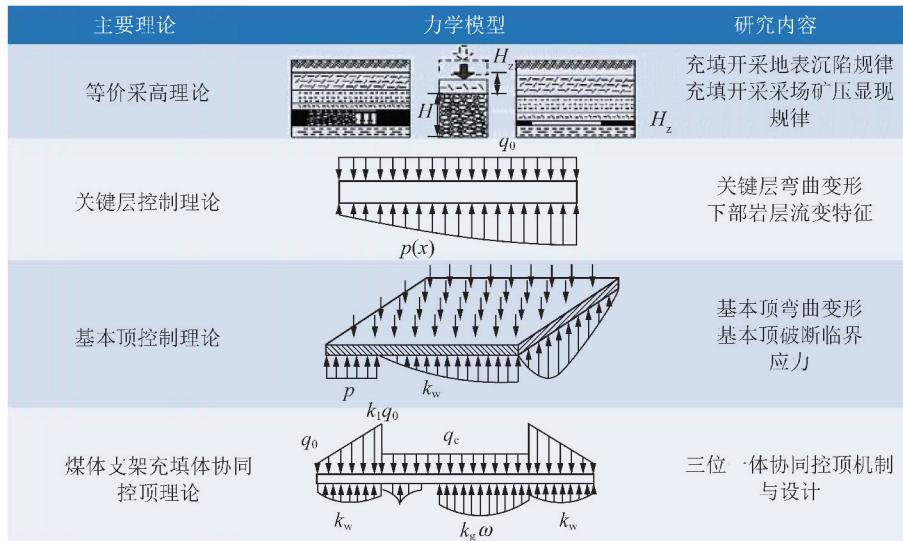


图5 浅部充填开采岩层控制理论

Fig. 5 Main theories of ground control in deep backfilling mining

开采的岩层移动和地表沉陷预计方法。

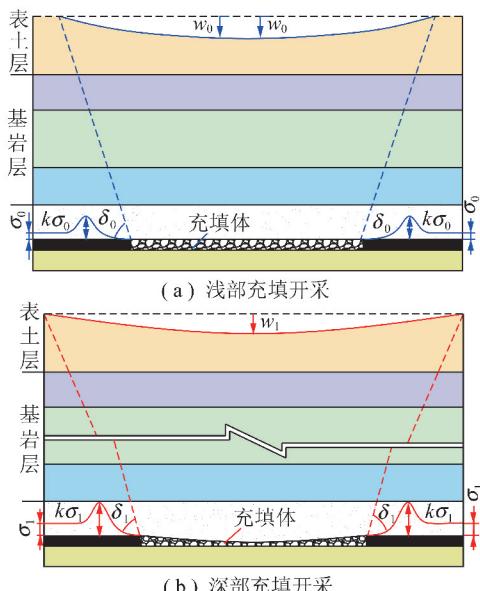


图6 浅部与深部充填开采岩层移动与地表沉陷规律示意

Fig. 6 Law of strata movement and surface subsidence in shallow and deep backfilling mining

充填体应力应变关系作为充填开采理论研究的重点,充填体本构关系是其应力应变特性分析的关键所在。准确掌握深部开采条件下充填体本构关系是实现深部精准充填、安全开采的关键前提。受高应力、高地温、高岩溶水压环境影响,充填材料的力学行为与浅部开采的差异性对于岩层移动与地表沉陷控制具有重要影响。图7为某矿矸石充填体充实率为85%时地表下沉量及地表下沉设防指标为250 mm时充实率随开采深度的变化曲线关系。由图7可知,地表下沉量、充实率与采深呈不同程度负相关关系。

一般来讲,深部充填开采围岩变形大、难以控制,而地表沉陷控制相对容易。因此,综合考虑采场围岩控制与地表沉陷对充实率的设计要求是实现深部资源绿色化开采的关键。

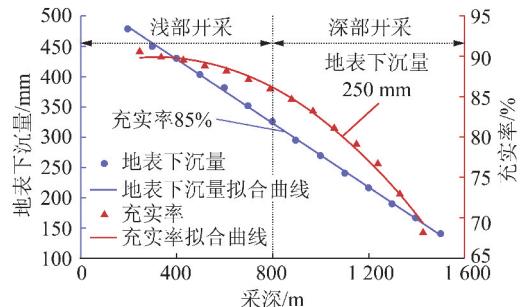


图7 充填开采地表下沉量、充实率与采深关系

Fig. 7 Relationship between surface subsidence, backfilled ratio and mining depth in backfilling mining

3.3 大断面硐室的围岩控制理论

深部煤炭资源开采时,用于煤流矸石井下分选的大断面硐室处于长期高地应力、洗选设备振动反复干扰的环境中,导致围岩塑性区急剧发育,易于发生大变形及破坏,同时硐室断面尺寸对围岩变形与塑性区发育的影响也将更加显著^[25]。以平煤十二矿洗选硐室为例,硐室断面超过50 m²,采用FLAC^{3D}数值模拟软件建立无支护、无振动扰动影响状态下的大断面分选硐室模型,得到不同埋深条件下硐室围岩变形与塑性区分布如图8所示。

随着埋深不断加大,硐室围岩变形均不断增加,当埋深超过800 m后,硐室围岩变形量增大程度呈现升高趋势;塑性区发育面积随着埋深增大而增高,当埋深超过800 m后,硐室围岩已经全部破坏。

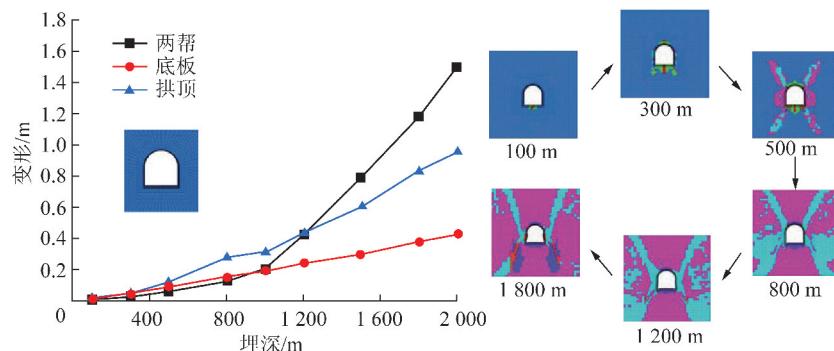


图8 不同埋深条件下大断面硐室围岩变形与塑性区发育规律

Fig. 8 Deformation and plastic zone development of large-section chamber surrounding rock in different depths

大断面硐室被开挖后,致使岩体向自由面方向移动的合力由围岩变形的工程力、围岩自身承载力与工程支护力组成。在对于深部大断面硐室,围岩自身的承载力无法平衡围岩变形所带来的工程力,需要增加工程支护力,以控制硐室围岩的稳定性。因此,为保证深部开采大断面硐室围岩稳定性^[26],需研究深部开采时大断面硐室应力分布、围岩变形与破坏规律,以及分选振动应力、冲击应力等环境应力对硐室围岩的影响机制及控制方法。

3.4 深部充填物料高效输送理论

充填开采实现连续化作业的基本保障是充填材料的高效供给,制约供给效率的关键环节是充填材料

由地面至井下的运输^[27]。根据输送材料不同,有副立井或副斜井运输和管道运输等方式,以固体充填为例,通过从地面向井下开掘垂直投料井,井底设置缓冲等系统,实现充填材料的连续化运输与供给^[28-30](图9)。浅部充填开采(小于800 m)大流量物料输送已实现,深部充填开采后,大流量物料垂直输送面临新的挑战,主要包括投料井的垂直度高精度保证、充填材料对投料井底部的高冲击力缓冲、狭长输送空间内多相多场耦合条件气压安全控制、投料输送管道的耐磨以及长距离垂直输送系统的实时智能监控等。因此,构建深部大流量物料垂直输送控制理论,是实现深部高效充填开采的关键。

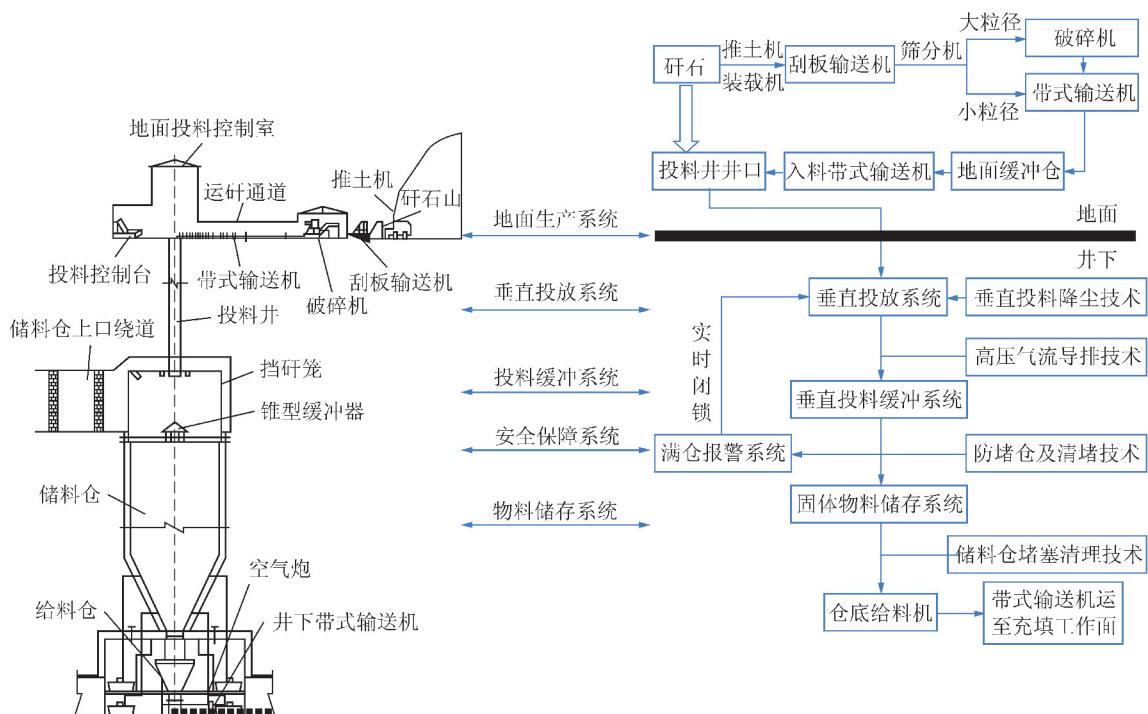


图9 固体充填物料垂直输送系统基本结构与工艺流程

Fig. 9 Basic structure and process flow of vertical transportation system for solid materials

具体需从以下几个方面开展相关理论研究^[27,31-33]:① 输送井掘进垂直度精准控制方面,投料

井垂直度控制要求高,一般在0.1%内,需及时掌握地层岩性的变化规律,发展智能测斜方法,采用现代

化测斜仪器进行数据及时反馈与分析,建立测斜相关数据的识别模型理论,实现深部大流量物料垂直输送井掘进垂直度的精准控制;②相对浅部投料,深部投料井内气压急剧升高、气流场扰动强烈、投料井壁碰撞更加频繁,研究充填物料在多相多场耦合作用下的运动规律,需构建深部大流量物料垂直输送狭长空间多相多场耦合理论;③在投料井下部设置缓冲储能装置(图10)是吸收高速下落过程中冲击能的方法,深部投料系统中的物料对缓冲装置的冲击作用加剧、缓冲装置接触表面应变速率变化更为强烈、交变动载作用下缓冲装置的模态与频响特征更加复杂、阻尼材料对缓冲装置的衰减趋势更为突出,由此需要建立深部大流量物料垂直输送中的动力学模型,揭示缓冲装置在深部大流量物料垂直输送中的动力行为与响应机制;④深部大流量物料垂直输送的投料管磨损模型及机理方面,深部投料需研究物料在狭长投料空间内与投料管壁之间的相互作用关系,建立物料垂直投放竖管与固体物料磨损的力学模型,明确投料管道的磨损模式,揭示投料管磨损机理,为深部大流量物料垂直输送投料管磨损材料提供依据;⑤深部大流量物料垂直输送的多参量实时监控与分析优化模型方面,多参数(投料管径、投料能力、投料深度、空气阻力、空气压力等)对投料效率的影响显著,通过构建系统化、集成化、自动化至智能化监控平台,实施投料过程监测,获取多参数实时指标,建立基于多场耦合下的物料垂直输送多参量实时监控与分析优化模型,保证物料安全高效输送。

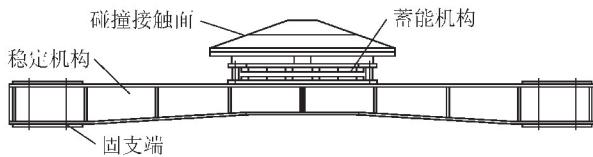


图 10 缓冲储能装置结构简图

Fig. 10 Structure diagram of buffer and energy storage device

3.5 深部围岩环境材料力学行为

深部充填开采时充填材料处于高应力、高地温环境下,其力学行为与浅部围岩环境充填材料力学行为的影响因素不同(图11),受高地温影响,充填材料内部微裂隙发育、微孔隙扩展,充填材料本身强度降低,导致较大的变形;在高应力条件下,充填材料的变形量增大,顶板下沉量较大,导致采场矿压显现显著;因此需深入研究深部围岩环境充填材料的力学行为,为充填材料支撑性能的改进提供理论基础。

3.6 充填开采高水压采动岩体渗流理论

深部充填材料融入高温环境(Thermal)、高渗透水压环境(Hydraulic)、高应力环境(Mechanical)以及

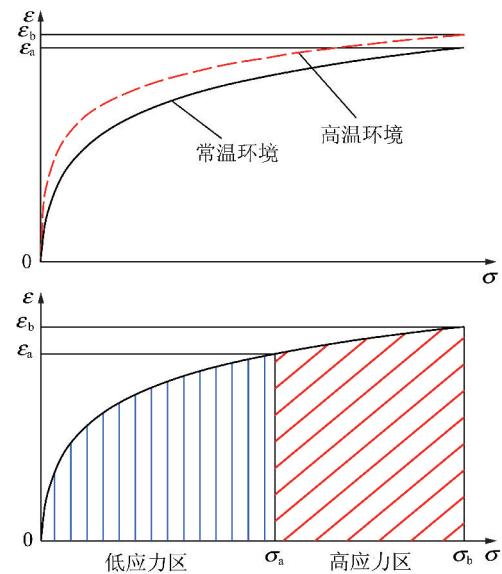


图 11 深部高地温、高应力围岩环境影响充填材料力学行为

Fig. 11 Mechanical behavior of backfilling materials influenced by high temperature and high stress surrounding rock environment

化学环境(Chemical)的深部采场,在THMC多场耦合作用下(图12)充填体的力学承载机制发生显著改变^[2,34-36]。充填体被充分压实,覆岩下沉空间持续增大,覆岩导水裂隙带急剧发育。以某深部矿井条件为例,采用数值和回归分析得到导水裂隙带高度与采深、充实率关系,如图13所示。随着导水裂隙的发育,孔隙水流、水压不断增大,一方面,对岩体、充填体力学特性造成影响,另一方面,渗流使孔隙压力重新分布,引起岩层进一步变形。

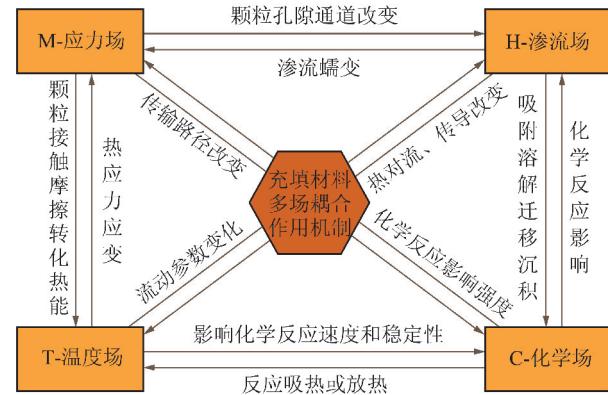


图 12 深部充填材料多场耦合作用机制

Fig. 12 Multi-field coupling mechanism of deep backfilling materials

对深部煤矿采动破碎岩体与充填材料渗流特性参数进行测定^[37-38],如图14所示,渗透系数随轴压呈负指数规律变化,渗透系数随压力升高而降低,混合粒径时渗透系数最小。建立深部强扰动和强时效下采动岩体的非Darcy渗流运动控制方程,

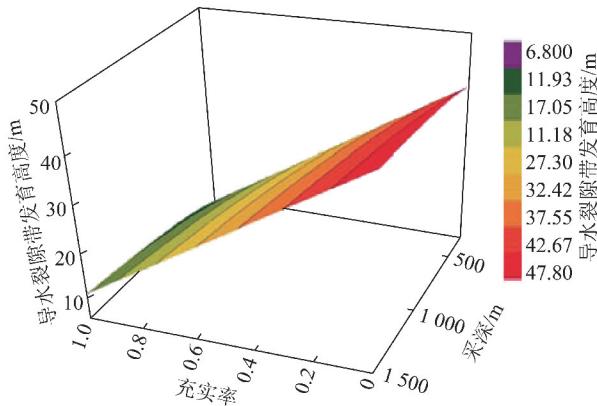


图 13 导水裂隙带高度与充实率和采深关系

Fig. 13 Relationship between height of water flowing fracture zone and backfilled ratio, mining depth

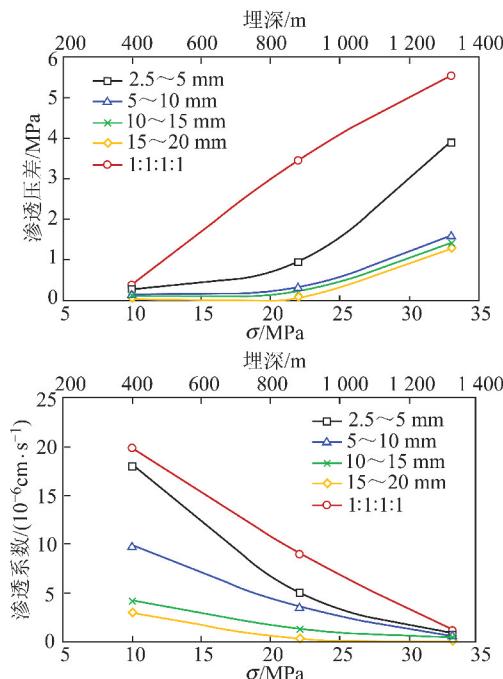


图 14 破碎砂岩渗透压差、渗透系数随轴压变化

Fig. 14 Osmotic pressure difference and osmotic coefficient of broken sandstone changed by axial pressure

通过非线性动力学分析判别隔水关键层渗流稳定性,建立不同孔隙率下松散物料与水体多场耦合渗流力学模型,揭示采空区内三维渗流场动态演化规律并给出渗流场控制方程,揭示高水压采动岩体渗流规律,对于充填体的长期稳定性及安全性具有十分重要的理论价值。

4 深部煤炭资源采选充绿色化开采关键技术

4.1 采选充绿色化系统优化布置

采选充绿色化系统布置^[39~42]遵循五大协调原则:一是井上下的协调,采选充的立体化布置;二是少出矸的协调,智能分选集约化布置;三是经济生产协

调,高效采充一体化布置;四是灾害监控协调,监测监控安全化布置;五是资源共采协调,协同开采绿色化布置。图 15 为某矿典型的采选充绿色化系统优化布置,涵盖近全岩保护层开采、井下少煤多矸高效分选、低渗透煤层瓦斯抽采、充填与垮落式协同开采一体化生产系统。各系统之间相互协调统一,相互配合。实现了深部近全岩开采、煤矸分选、瓦斯抽采、矸石就地充填,保证了“采选抽充”系统安全高效运转。

4.2 充填开采装备的自动化控制

充填采煤自动化智能控制是指利用井上下计算机、工作面视频系统、工作面无线或有线通讯系统、传感系统、监控系统以及各种自动化的采煤设备,通过采集数据,实时图文显示、数据存储和分析,实现对采、选、充实时监测控制^[43],深部充填开采自动化控制系统构想如图 16 所示。

其中充填开采工作面的自动化控制体系是核心,主要包括充填采煤液压支架、多孔底卸式输送机、夯实机构及自移式转载输送机的自动化控制等(图 17),以充填采煤工作面的自动化控制体系为主导的各控制体系严密配合,共同实现深部充填开采的自动化控制^[44]。

4.3 大断面硐室的围岩控制技术

深部大断面硐室的围岩稳定控制的关键是以采矿地质条件为基础,分析特定条件下大断面硐室的围岩力学特征及其变形破坏机理,以及分选振动应力、冲击应力等环境应力影响,进而以“分阶段围岩控制、分区耦合支护,关键部位强力支护与封闭式支护”的原则^[45],以强支护、分层支护和让压支护 3 种支护形式独立或组合使用^[46],并在混凝土中添加减水剂、速凝剂和纳米有机仿钢纤维材料、恒阻大变形锚杆(索)、高强让压复合支护结构等新型支护材料的总体策略^[47~48],实施大断面硐室的围岩长期稳定控制。

4.4 充填体与煤岩体协同控顶技术

充填开采协同控顶机理^[23]揭示充填采煤液压支架控制顶板的提前下沉量,以保障足够的充填空间;充填体抑制顶板的活动,抑制程度由充填体的致密性严格控制;由此,充填体与煤岩体协同控顶的关键还在于充填材料。散体充填材料在充填空间形成致密充填体后,成为充填体与煤岩体协同控顶的关键载体。在高地应力的影响下,充填体在上覆岩层的作用下被压缩而发生较大的变形,导致岩层下沉量较大,覆岩导水裂隙带高度急剧发育,若导水裂隙带波及到高承压水,将致使矿井发生突水灾害,威胁矿井的安全开采^[49]。因此,针对深部开采环境,需要对充填材

料进行改进,以应对高地应力、高渗透压所引发的诸多问题。为适应深部开采环境,主要采用混合、水化

固结与微生物改性等手段对充填材料进行制备与改进,基本原理如图 18 所示。

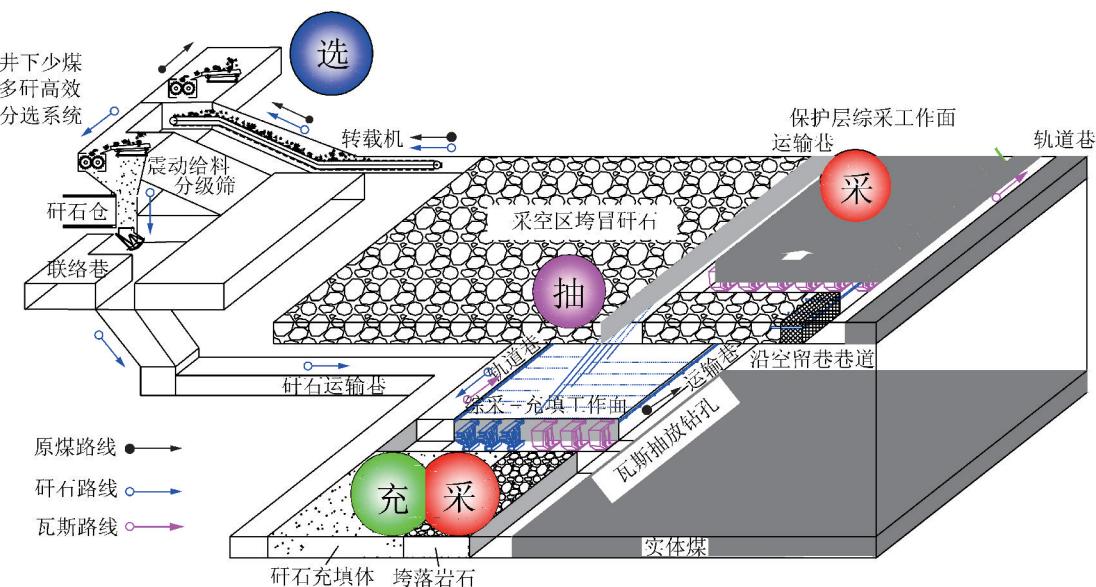


图 15 井下“采选抽充”一体化系统立体图

Fig. 15 Stereogram of integrated technologies of mining-dressing-gas draining-backfilling system

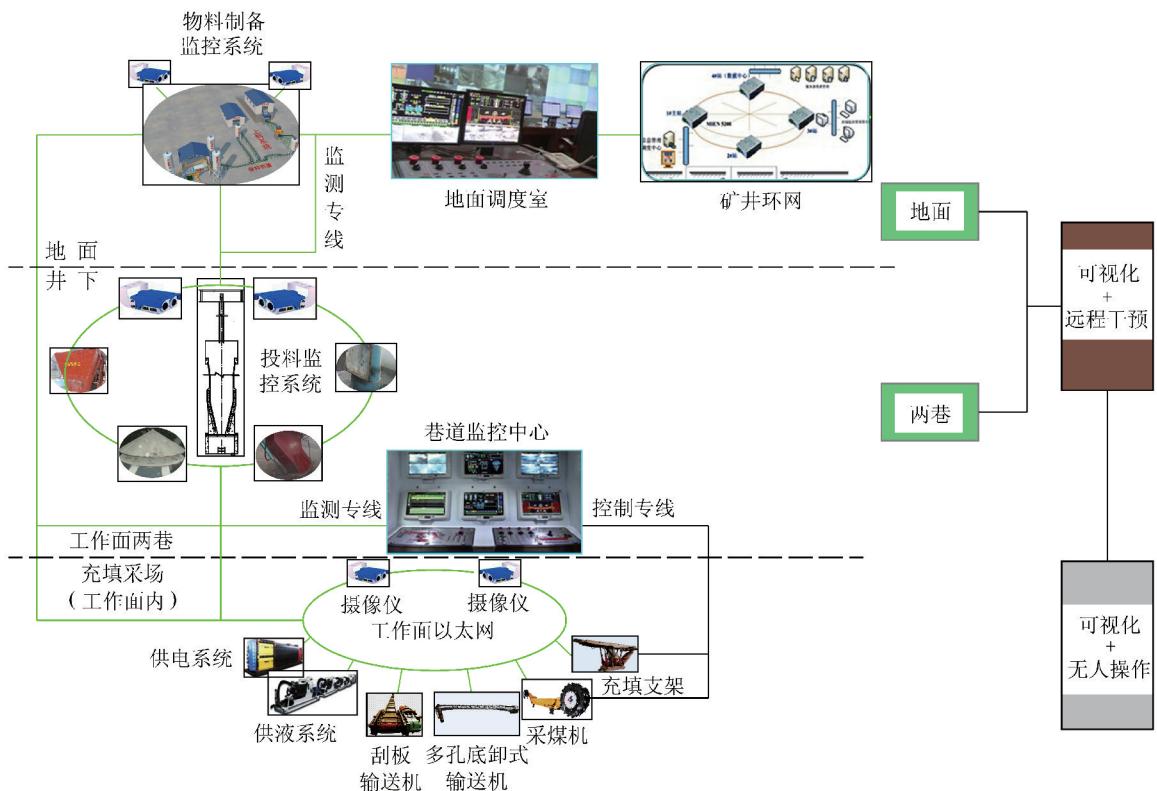


图 16 深部充填开采自动化控制系统构想

Fig. 16 Conception of automatic control system for deep backfilling mining

4.5 深部充填效果监测监控技术

深部采场充填效果决定地表沉陷与岩层移动的整体控制程度^[50-51],可从地表沉陷评价、采场岩层移动控制评价、充填质量评价 3 方面着手评价充填效果,其中地表沉陷评价指标包括地表下沉量、倾斜变

形、水平变形等;采场岩层移动评价指标包括支架支护质量、顶板动态下沉量、充填体应力和超前支承压力建筑;充填质量评价指标包括充采质量比和夯实机构夯实力等。地表沉陷、采场岩层移动和充填质量评价共同构成深部充填效果监测监控体系(图 19)。

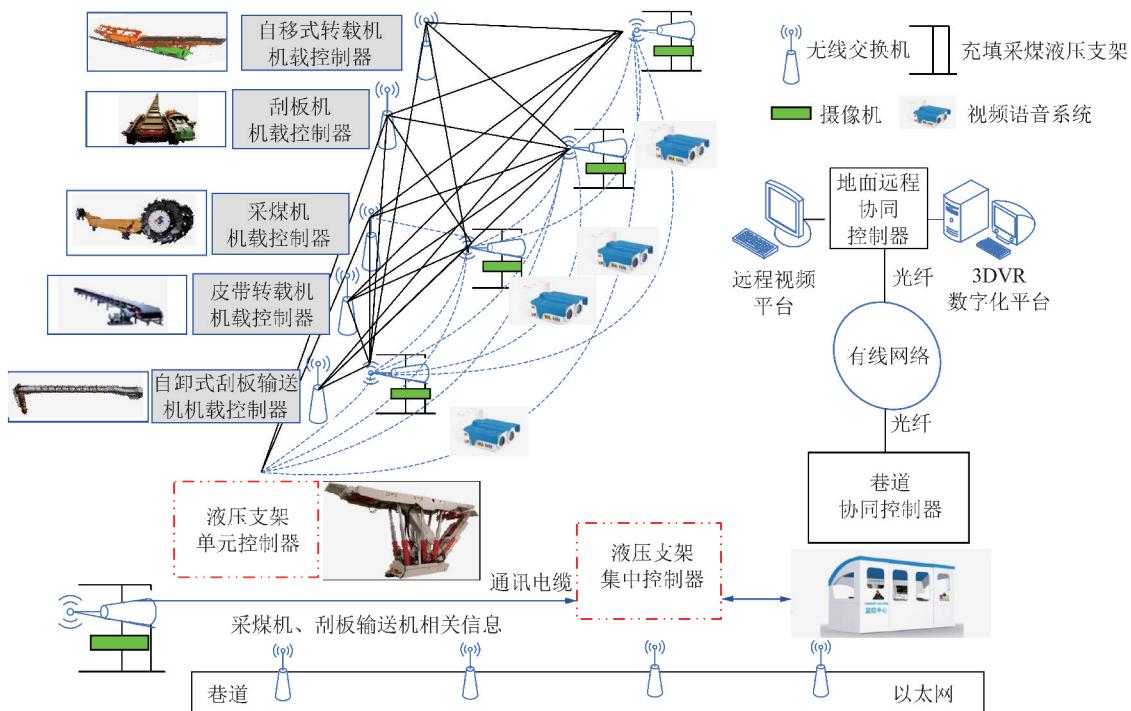


图 17 充填采煤工作面的自动化控制体系

Fig. 17 Automatic control system for backfilling mining panel

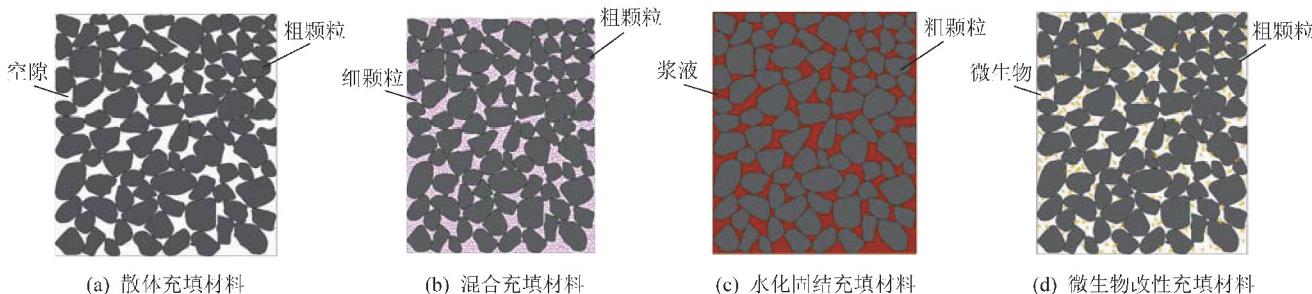


图 18 深部开采充填材料制备示意

Fig. 18 Schematic of backfilling material preparation

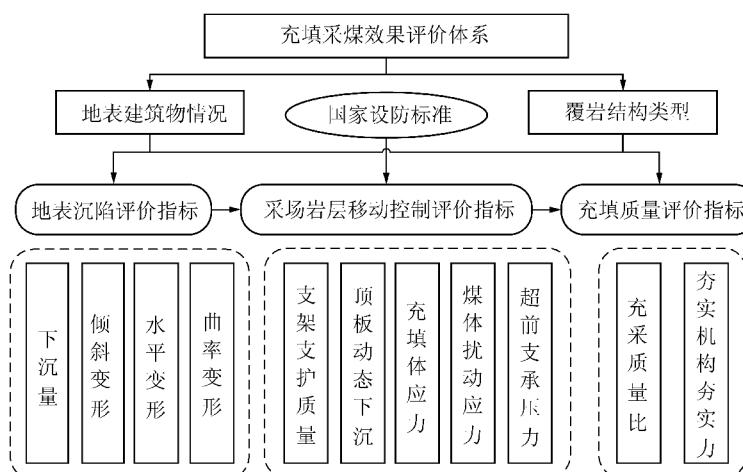


图 19 深部充填效果监测监控体系

Fig. 19 Monitoring and controlling system for deep backfilling effect

4.6 井下高效智能煤研分选技术

井下煤研分选系统要适应井下空间受限、环境较差、安全要求高、生产规模大及连续生产等要求,井下分选设备需满足体积较小、防爆性好、实用性强、分选效果好、可靠性高等性能。近年国内已经在井下试用了重介浅槽、动筛跳汰、单段跳汰工艺,以及尝试双能 γ 射线选矸、图像识别智能选矸方法,技术上有了一定进步和发展^[52]。这些方法基本上实现大块煤(+50 mm)排矸分选,实现了部分煤中矸石井下分选,但还得利用地面选煤厂进一步洗选以满足市场和环境保护对精煤的要求。

要满足煤炭井下完全洁净生产,实现深部井下充分洗选排矸和充填开采,应根据煤质和煤产品需求研发洗选粒度范围可控、可靠、高效、智能、简单、经济实用的煤研洗选分离技术,比如多段跳汰等工艺的新型井下洗选系统,实现井下洗选一步到位、以产品煤出井、矸石全部井下充填。未来,随着国家对环保、生态、土地和绿色安全开采的更高要求,先进、高效、经济、可靠、智能、深度煤研分选技术将成为未来深部采选充绿色开采的重点发展方向。

5 深部煤炭资源采选充绿色化开采典型案例

目前,深部煤炭资源采选充技术已在开滦集团唐

山矿、平煤集团十二矿等多个深部矿井进行了初步工程应用。

5.1 开滦集团唐山矿

开滦集团唐山矿充填采区位于8号煤层,倾角7°~10°,煤厚3.77 m,埋深720.0~731.0 m。井田范围地表为唐山市中心,密集建筑物下压煤量达1.71亿t,占矿井剩余可采储量的79.7%,矿井地面年排放80万t煤矸石。该矿主要面临两大工程难题:一是“三下”压煤严重,大大缩短了煤矿的服务年限;二是地面固体废物堆积严重,污染环境。针对上述难题,采用采选充采一体化技术(图20)^[53],包含大垂深矸石直接投料输送系统、井下煤流矸石分选系统、矸石就地充填与煤炭开采系统。其中洗选系统采用了动筛跳汰分选法,投料系统输运能力达到550 t/h,实现了矸石处理与充填开采对岩层移动及地表沉陷的有效控制。该项技术已在该矿8号、9号、10号、12号等煤层群的回采中得到成功应用。采空区充采质量比达到1.4:1,充实率达到90%以上,地表沉陷控制效果良好^[40]。

5.2 平煤集团十二矿

平煤集团十二矿已₁₅煤层,埋深1 005.0~1 166.0 m。已₁₅煤原始瓦斯含量高达15.3 m³/t,瓦斯压力1.78 MPa,透气性系数仅0.078 m²/(MPa²·d);已₁₅煤上覆已₁₄煤层赋存不稳定,煤厚

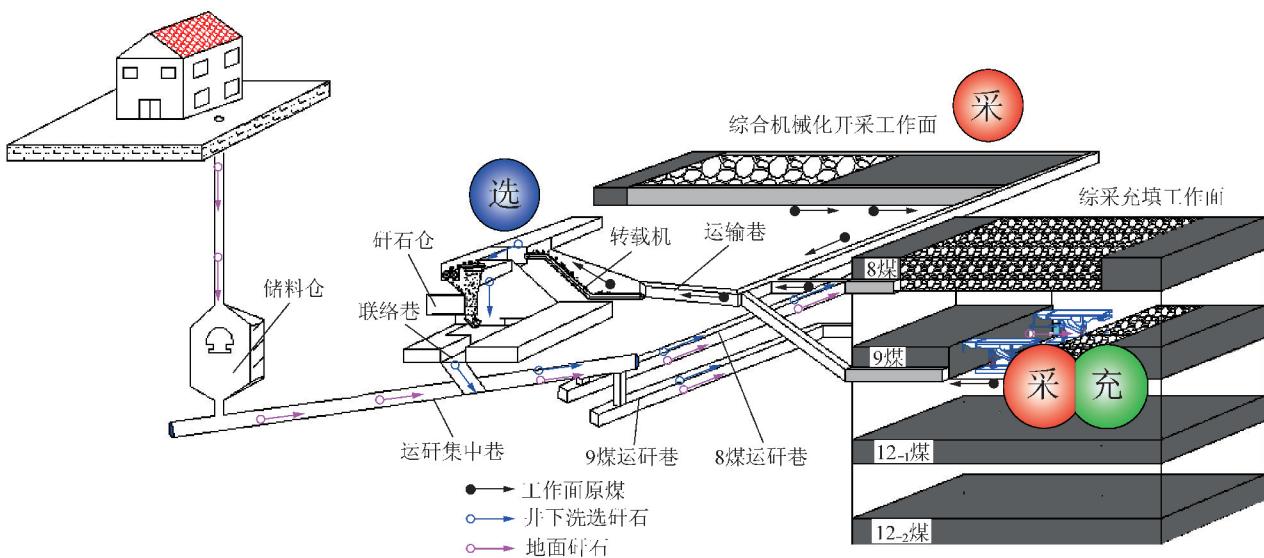


图20 采选充采一体化生产系统

Fig. 20 Integrated system of mining-dressing-backfilling

仅0.5 m。主采已₁₅煤层开采面临四大技术难题:一是开采深度超过1 100 m,辅助提升困难、严重影响正常生产;二是瓦斯含量高,渗透率及抽放率低,潜在危险严重,安全开采受到严峻挑战;三是上覆已₁₄煤层赋存不稳定,不具备常规保护层开采条件;四是矿井

主要开采“三下”压煤,无法保障煤炭产量。

为解决上述问题,研发了深部采选抽充防协同煤与瓦斯共采技术^[53-54](图15),将已₁₄煤层作为保护层进行开采,产生的高含矸率原煤直接井下煤研分选,矸石充填至被保护层充填与垮落法协同工作面;

同时在保护层、被保护层中布置瓦斯抽放系统进行瓦斯抽采^[55],通过采动影响增加被保护层瓦斯的透气性,提高瓦斯抽放率,实现低透气高瓦斯煤层及瓦斯的安全高效共采。其中煤研分选采用重介质浅槽分选法。回采期间,被保护层已₁₅31010工作面累计抽采瓦斯1.3亿m³,抽采率达66.0%;瓦斯压力由原1.78 MPa降至0.35 MPa,降幅达80.0%。

6 结 论

(1) 深部资源开采势在必行,深部煤炭资源开采面临全新的机遇与挑战,开展深部煤炭资源充填开采中的理论与技术研究迫在眉睫。

(2) 深部煤炭资源采选充绿色化开采的基本构想在井下实现煤炭开采、煤研分离及矸石就地充填,以形成深部采选充协同生产模式,实现深地煤炭及伴生资源的安全、高效及绿色开采。

(3) 深部煤炭资源采选充绿色化开采初步技术体系已基本形成,并在开滦集团唐山矿、平煤集团十二矿等多个深部矿井进行了工程应用。后续将继续着力于深部煤炭资源绿色化开采的研究主题,深入研究深部煤炭资源充填开采中的岩层控制等基础理论问题,研发智能化充填、物料大流量输送、煤研智能分选等关键技术,构建系统化的深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术体系。

参考文献(References):

- [1] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(2):1-16.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2015,34(11):2161-2178.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2005,24(16):2803-2813.
- [4] 张朝鹏,高明忠,张泽天,等. 不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中渗透特性研究[J]. 煤炭学报,2015,40(4):836-842.
ZHANG Zhaopeng, GAO Mingzhong, ZHANG Zetian, et al. Research on permeability characteristics of raw coal in complete stress-strain process under different gas pressure[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(4):836-842.
- [5] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报,2011,36(7):1067-1074.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(7):1067-1074.
- [6] 蓝航,陈东科,毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology,2016,44(1):39-46.
- [7] DIERING D H. Ultra-deep level mining-future requirements [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997, 97(6):249-255.
- [8] QIAN Q,ZHOU X,XIA E. Effects of the axial in situ stresses on the zonal disintegration phenomenon in the surrounding rock masses around a deep circular tunnel[J]. Journal of Mining Science,2012,48(2):276-285.
- [9] SELLERS E J,KLERCK P. Modelling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology,2000,15(4):463-469.
- [10] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,2015,40(1):1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(1):1-10.
- [11] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2858.
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(16):2854-2858.
- [12] 袁亮. 破解深部煤炭开采重大科技难题的思考与建议[J]. 科技导报,2016,34(2):1.
YUAN Liang. Thoughts and suggestions on cracking major scientific and technological problems in deep coal mining[J]. Science & Technology Review,2016,34(2):1.
- [13] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报,2012,37(4):535-542.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):535-542.
- [14] 周宏伟,谢和平,左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展,2005,35(1):91-99.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005,35(1):91-99.
- [15] 张吉雄. 砧石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
ZHANG Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal winning technology and its engineering applications[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2008.
- [16] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(14):2396-2401.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on roadway bottom heave problem in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(14):2396-2401.

- JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2004, 23(14):2396–2401.
- [17] 李夕兵,宫风强,高科,等.一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):251–260.
- LI Xibing, GONG Fengqiang, GAO Ke, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2010, 29(2):251–260.
- [18] 康红普,姜铁明,张晓,等.晋城矿区地应力场研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):1–8.
- KANG Hongpu, JIANG Tieming, ZHANG Xiao, et al. Research on in-situ stress field in Jincheng mining area and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(1): 1–8.
- [19] CHEN S G, CAI J G, ZHAO J, et al. Discrete element modelling of an underground explosion in a jointed rock mass[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2000, 18(2):59–78.
- [20] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J].工程科学与技术,2017,49(1):1–8.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1):1–8.
- [21] 缪协兴,张吉雄.研石充填采煤中的矿压显现规律分析[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):379–382.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4):379–382.
- [22] 黄艳利.固体密实充填采煤的矿压控制理论与应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- HUANG Yanli. Ground control theory and application of solid dense backfill in coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [23] 张强.固体充填体与液压支架协同控顶机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- ZHANG Qiang. Roof control mechanism by coordination with back-filled body and backfill support in solid backfill mining technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [24] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, SUN Qiang, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2):1439–1448.
- [25] 肖同强,李化敏,杨建立,等.超大断面硐室围岩变形破坏机理及控制[J].煤炭学报,2014,39(4):631–636.
- XIAO Tongqiang, LI Huamin, YANG Jianli, et al. Deformation and failure mechanism of surrounding rock in chamber with super large section and its control[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4):631–636.
- [26] LI Meng, ZHANG Jixiong, DENG Xuejie, et al. Measurement and numerical analysis of water-conducting fractured zone in solid backfill mining under an aquifer:a case study in China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 2017, 50(1):h2016–h2018.
- [27] 巨峰.固体充填采煤物料垂直输送技术开发与工程应用[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- JU Feng. Development and engineering applications of solid materials vertical transportation system in backfill coal mining technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [28] 巨峰,周楠,张强.煤矿固体充填物料垂直投放系统研究与应用[J].煤炭科学技术,2012,40(11):14–18.
- JU Feng, ZHOU Nan, ZHANG Qiang. Study and application of vertical transportation system with solid backfill material in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11):14–18.
- [29] 张蓓.矸石充填综采大垂深投料及堵管监控系统设计[J].采矿与安全工程学报,2009,26(3):386–390.
- ZHANG Bei. Design of the deep batching system and blockage supervisory system for waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3):386–390.
- [30] 李树兴.唐山矿建筑物下综采工作面研石充填系统开发设计研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- LI Shuxing. Study on developing design of gangue filling system under buildings for fully mechanized face in Tangshan mine[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2012.
- [31] 莫海涛.煤矿区地面大口径定向井成井工艺研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2014.
- MO Haitao. Research of construction technology on large-diameter directional borehole in coal mining areas [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [32] 冯巨恩.金属矿深井充填系统的安全评价与失效控制方法研究[D].长沙:中南大学,2005.
- FENG Juen. Study on safety assessment and failure control method of deep-level filling system in metal mine [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [33] 肖卫国.深井充填技术的研究[D].长沙:中南大学,2003.
- XIAO Weiguo. Research on deep well filling technology[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [34] 曹峰.温度对深部岩石力学性质的影响[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):83–85.
- CAO Feng. Review of temperature impact of mechanical properties of deep rock [J]. Journal of Chongqing University of Science & Technology, 2012, 14(5):83–85.
- [35] 俞缙,李宏,陈旭,等.渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1203–1213.
- YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Triaxial experimental study of associated permeability-deformation of sandstone under hydro-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2013, 32(6):1203–1213.
- [36] 韩铁林,师俊平,陈蕴生,等.不同化学腐蚀下砂岩冻融力学特性劣化的试验研究[J].固体力学学报,2017(6):1–12.
- HAN Tielin, SHI Junping, CHEN Yunsheng, et al. Laboratory investigation on the mechanical properties of sandstone immersed in different chemical corrosion under freeze-thaw cycles [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2017(6):1–12.
- [37] 杨天鸿,师文豪,李顺才,等.破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J].煤炭学报,2016,41(7):1598–1609.

- [38] 缪协兴,刘卫群,陈占清.采动岩体渗流与煤矿灾害防治[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(2):74-77.
- MIAO Xiexing, LIU Weiqun, CHEN Zhanqing. Seepage of mining mass and control of mine disasters[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2007, 22(2): 74-77.
- [39] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2017,42(3):547-556.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547-556.
- [40] 何琪.煤矿井下采选充采一体化关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- HE Qi. Research on key technique of the integration of separation and backfilling in coal mining [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [41] 孙传尧,宋振国.地下采选一体化系统的研究及应用概况[J].矿冶,2017,26(1):1-6.
- SUN Chuanyao, SONG Zhenguo. Development and application outline of integrated underground mining-processing system[J]. Mining & Metallurgy, 2017, 26(1): 1-6.
- [42] 梁和平.充填开采与井下原煤分选一体化技术[J].煤炭科学技术,2013,41(8):35-37.
- LIANG Heping. Integrated technology of backfill mining and raw coal separation in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 35-37.
- [43] 田成金.可视化远程干预型智能化采煤关键控制技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):97-102.
- TIAN Chengjin. Study on key control technology of visualized remote interference type intelligent mining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 97-102.
- [44] 刘建功,毕锦明,赵利涛,等.综合机械化固体充填采煤自动控制研究与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(1):149-156.
- LIU Jiangong, BI Jinming, ZHAO Litao, et al. Research and application on automatic control of comprehensive mechanized solid backfill coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 149-156.
- [45] 肖同强,李化敏,王桂生,等.复杂结构大断面硐室围岩稳定控制研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1):9-15.
- XIAO Tongqiang, LI Huamin, WANG Guisheng, et al. Study on surrounding rock stability control in large section chamber with complex structure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 9-15.
- [46] WANG Fei, LIU Hongtao, ZHANG Shengkai, et al. Yieldable technology of lengthened bolts for high-stress soft rock roadways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1666-1673.
- [47] 欧阳幼玲,陈迅捷,陆采荣,等.钢纤维和仿钢纤维喷射混凝土性能[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(S2):44-48.
- OUYANG Youling, CHEN Xunjie, LU Cairong, et al. Properties of steel fiber and macro-synthetic fiber reinforced shotcrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(S2): 44-48.
- [48] 何满潮,郭志飚.恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1297-1308.
- HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1297-1308.
- [49] 李术才,王刚,王书刚,等.加锚断续节理岩体断裂损伤模型在硐室开挖与支护中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1582-1590.
- LI Shucai, WANG Gang, WANG Shugang, et al. Application of fracture-damage model to anchorage of discontinuous jointed rockmass of excavation and supporting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1582-1590.
- [50] 杨承祥.深井金属矿床高效开采及地压监控技术研究[D].长沙:中南大学,2007.
- YANG Chengxiang. Investigation on the technologies of high efficiency mining and ground pressure monitoring and control for deep metal deposit mining[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [51] 王磊,张鲜妮,郭广礼,等.综合机械化固体充填质量控制的体系框架[J].煤炭学报,2013,38(9):1568-1575.
- WANG Lei, ZHANG Xianni, GUO Guangli, et al. Quality control system framework for fully mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1568-1575.
- [52] 郑克洪.基于X-Ray CT的煤矸颗粒细观结构及破损特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- ZHENG Kehong. Study on mesostructure and damage characteristics for coal and gangue particles based on X-Ray CT[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [53] 张吉雄,缪协兴,张强,等.“采选抽充采”集成型煤与瓦斯绿色共采技术研究[J].煤炭学报,2016,41(7):1683-1693.
- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, ZHANG Qiang, et al. Integrated coal and gas simultaneous mining technology: mining-dressing-gas draining-backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1683-1693.
- [54] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, SPEARING AJS, et al. Green coal mining technique integrating mining-dressing-gas draining-backfilling-mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(1): 17-27.
- [55] SUN Qiang, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. A protective seam with nearly whole rock mining technology for controlling coal and gas outburst hazards: a case study[J]. Natural Hazards, 2016, 84(3): 1-14.