

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0299

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0299

深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想

谢和平¹, 高峰², 鞠杨^{2,3}, 葛世荣², 王国法⁴, 张茹¹, 高明忠¹, 吴刚¹, 刘见中⁵

(1. 四川大学, 四川 成都 610065; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 4. 天地科技股份有限公司, 北京 100013; 5. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要:地球浅部煤炭资源逐步开采殆尽,煤炭资源开发不断走向地球深部。然而,面对深部地层环境与极限开采深度的限制,传统采矿学与力学等理论难以解决深部煤炭开采出现的技术难题,深部煤炭绿色安全高效生产面临严峻挑战。结合深地煤炭资源开发的未来趋势,提出深地煤炭资源流态化开采的颠覆性科学构想及流态化开采定义、目标与内涵,建立深地流态化开采的应力-温度-渗流-化学-微生物等多种作用机制的多场耦合模型与可视化理论,揭示煤炭流态转换的物理、化学与生物机制,建立深地煤炭资源的采、选、充、电、热、气一体化的物理流态化开采、化学转化流态化开采、生物降解流态化开采、物理破碎流态化开采等颠覆性理论和技术。在此基础上,提出“2025 基础研究、2035 技术攻关、2050 集成示范”的战略实施路线,构建深地煤炭资源无人智能化的采选充一体化开采、热电气集成转化的流态化开采理论与技术体系,达到“地上无煤、井下无人”的绿色环保目标,实现深地煤炭资源开采的颠覆性变革。

关键词:深地开发;煤炭资源;流态化开采;物理转化;化学转化;生物转化;无人智能化

中图分类号:TD82 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)03-0547-10

Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources

XIE He-ping¹, GAO Feng², JU Yang^{2,3}, GE Shi-rong², WANG Guo-fa⁴, ZHANG Ru¹, GAO Ming-zhong¹, WU Gang¹, LIU Jian-zhong⁵

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 5. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The depth of coal mining increases continuously owing to the exhaustion of the shallow coal resources. However, the technical difficulties which occur during deep coal mining cannot be solved well by using the traditional theories, such as mining science and mechanics, because of the limit of the deep geo-environment and critical mining depth. Therefore, to implement deep coal mining with a green, safe and efficient way will meet serious challenges. According to the trend of the exploitation of deep coal resources, a disruptive idea, the fluidized mining of deep underground coal resources, was presented in this paper. The definition, goals and meaning of the fluidized mining were also proposed. The multi-coupled field model and the visualization theory for multi-mechanism of stress-temperature-chemistry-microorganism were established. The physical, chemical, biological mechanism of coal fluidized transformation was

收稿日期:2017-02-24 修回日期:2017-03-07 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600701,2016YFC0600705);国家自然科学基金资助项目(51674251)

作者简介:谢和平(1956—),男,湖南双峰人,中国工程院院士。Tel:028-85406002, E-mail: xiehp@scu.edu.cn

interpreted. A series of disruptive theories and technologies, such as physical fluidized mining including exploitation, separation, filling, electricity and heat generation, gasification, the fluidized mining of chemical transformation, the fluidized mining of bio-degradation, the fluidized mining of physical grinding, were established. Afterwards, the strategic implementation routine of "2025 basic research, 2035 technological breakthrough, and 2050 integrated demonstration", was put forward. The disruptive revolution of deep coal resource exploitation, including the implementation of deep coal resource integration mining for exploitation separation and filling with unmanned intellectualization, the formation of the theory and technology system for fluidized mining of integrated transformation of heat, electricity and gas, and to reach the green environmental protection goal for coal free ground and unmanned underground mine, will be realized.

Key words: deep exploitation; coal resource; fluidized mining; physical transformation; chemical transformation; biological transformation; unmanned intellectualization

地球深部蕴藏的资源 and 能源是维系万物生存的物质和能量基础。地球资源开采已有逾百年的历史,地球浅部煤炭资源已逐渐趋向枯竭,煤炭资源开发不断走向地球深部,千米级深部开采已是常态。2016-05-30,习近平总书记在全国科技创新大会上指出:“当前,国家对战略科技支撑的需求比以往任何时期都更加迫切……从理论上讲,地球内部可利用的成矿空间分布在从地表到地下 10 000 m,目前,世界先进水平勘探开采深度已达 2 500~4 000 m,而我国大多小于 500 m,向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”^[1]。目前,世界上煤炭开采深度已达 1 500 m,地热开采深度已超 3 000 m,有色金属矿开采深度超过 4 350 m,油气资源开采深度达 7 500 m。学者研究预测:如果我国固体矿产勘查深度达到 2 000 m,探明的资源储量可以在现有基础上翻一番。然而,地球资源开采领域所面临的共性问题:人类深部岩体工程活动大大超前于基础理论研究,传统的采矿学、固体力学等理论面对深部开采活动出现理论失效,导致深部资源开采活动普遍存在着相当程度的盲目性、低效性和不确定性,灾害事故频发,难以预测预报和控制,安全高效生产面临严重挑战^[2-9]。

从理论上讲,开采具有极限深度,按照现有的理论预测及勘测结果,当深度超过 6 000 m 时,目前的资源开采方式将失效,岩层运动、围岩支护、灾害预警与防治将难以控制,超过 6 000 m 以深的矿物资源开发成为人类可望不可及的奢望^[9-12]。然而,石油、天然气等油气资源开采深度已超过 7 500 m,石油钻井早已突破万米,主要原因是油气资源属于流态,其开采为流态化开发,钻机下井、人不下井,通过压差流态传输至地面,这与深地固体矿物资源开采方式有本质不同^[4-8]。

因此,要使我国成为地球深部探测领域世界范围

内的“领跑者”,特别是要在深地煤炭资源绿色安全开发领域成为国际上的“领跑者”,就必须颠覆现有的煤炭开发理论与技术,实现煤炭资源从固态开发向流态开发的根本转变。为此,笔者分别于 2014 年 6 月在中国工程院国际工程科技大会上首次提出固体资源流态化开采的学术构想^[2],2015 年 3 月在煤炭工业“十三五”科技发展规划编制会议上提出了煤炭资源开采固液转化的技术构想^[3],2016-04-07 在“深地颠覆性技术”研讨会上进一步阐述了深地固体资源流态化开采的理论与技术构想^[4]。2016 年 8 月 19,26 日和 9 月 13 日,由国土资源部与科技部组织的国家重大科技专项“地球深部探测计划”的深部矿产资源编写专家组,将深地固体资源流态化开采的技术构想列为国家重大科技专项的重点攻关内容。2016 年 10 月,笔者在“煤炭绿色开发利用与煤基多元协同清洁能源技术革命研究”研讨会上,提出了深部固态矿产资源流态化开采的科学定义^[5]。2016-11-29 在由教育部科技委组织的“深部固体矿产资源流态化开采”圆桌会议上,笔者重点阐述了深部固态矿产资源流态化开采,提出在已有煤炭资源开发研究的基础上,对未来深部固态矿产资源流态化开采划分 3.0 时代、4.0 时代、5.0 时代的构想,确立在未来构建“地上无煤、井下无人”的智能开采模式,构建了向地下要空间、向深地要资源的战略愿景^[6]。2016-12-06 在教育部科技委主办的“深部固体矿产资源流态化开采关键技术”咨询研讨会上,笔者再次提出了矿业科学向地球深部进军战略思考,进一步明确了深部固态矿产资源流态化开采的科学定义。阐述了深部固态矿产资源流态化开采的目标,即实现对深地固态资源采、选、冶、充、电、气、热的原位、实时和一体化开发,颠覆传统的固态资源开发的开采模式、运输模式和利用模式;引领矿产资源开采技术革命,实现固态矿产资源开采深度上的突破,为我国可采资源总量

翻一番提供技术支撑^[7]。

针对我国深部煤炭资源的开发现状与未来发展趋势,本文提出深地煤炭资源流态化开采的基础理论与技术构想,实现对深地煤炭资源采、选、充、电、气的原位、实时和一体化开发,提高深地煤炭资源的开发效率、运输效率和利用转换效率,颠覆传统的煤炭资源的开发模式和运输模式,实现“地上无煤、井下无人”的绿色环保开采终极目标。同时,在此过程中出现的新理论与技术难题也是人类走向地球深部必须面对和优先探索的基础性科学问题。

1 固体资源流态化开采的定义和构想

流态化开采是指将深部固体矿产资源原位转化为气态、液态或气固液混态物质,在井下实现无人智能化的采选充、热电气等转化的开采技术体系^[2-8]。该技术突破了固体矿产资源临界开采深度的限制,使深地煤炭资源开采可以像油气开发那样实现“钻机下井,人不下井”、依靠压差作用进行开采,从根本上颠覆固体资源的开采模式。实现深地煤炭资源的流态化开采,关键在于要去探索深地井下采、选、充、气、电、热的一体化无人、智能采掘与转化系统,通过无人作业、智能采掘、原位转化、高效传输等颠覆性技术,实现将深地固体资源气化、液化、电气化等系统的流态化开采。

煤炭资源开采、清洁燃烧、环保利用与 CO₂ 减排一直是国际上重点关注的内容,作为煤炭开采与消费大国的中国,如果能够实现深地煤炭资源的采、选、充、电、气的原位、实时和一体化开发的颠覆性开采模式,不仅能够解决中国经济高速发展对能源需求短缺的问题,实现煤炭资源开采深度上的突破,为中国乃至世界资源可开采可利用的总量翻番提供理论与技术支撑,同时还能够在煤炭资源高效开采、清洁燃烧、环保利用与 CO₂ 减排等方面为世界做出贡献。未来的煤矿将是清洁、安全、智能、环境协调、生态友好的电力传输和能源调蓄基地。

深部煤炭资源流态化开采构想包括以下主要技术流程:① 无人采掘。以深地无人智能盾构作业(TBM)破割煤岩体,通过传送设施将矿物块粒传送至分选模块;② 智能分选。通过重力分选,将煤炭与矸石进行分离,并将矸石回填至采空区;③ 原位转化。在深部原位实现煤炭资源的液化、气化、电化、生物化等系统流态化;④ 充填调控。转化后的矿渣进行混合加工,形成充填材料回填采空区,用以控制岩层运动与地表沉陷,实现安全、绿色开采;⑤ 高效传输与智能调蓄。深部煤炭资源通过原位转化,以流态

化形式高效智能传输至地表,并结合深地热能利用,使传统概念的煤炭企业成为电力传输和清洁能源的调蓄基地。

2 流态化开采的新原理和新理论

2.1 流态化开采的原位采动岩体力学理论

深部固体资源在开采过程中,工程扰动作用下岩石受力应遵循实际开采活动的应力空间变化路径,基于开采扰动应力路径的岩石力学理论是深部资源开采活动的重要理论基础^[8-11]。作为颠覆常规方式的流态化开采方法,地下岩体在智能化无人盾构机的作用下发生破碎,建立矿产资源开采、就地转换和运输的通道,首先在岩体破碎方式和方法上与常规采矿方式具有本质差异。此外,流态化开采中固体资源还需要进行就地气化、液化、电气化,流态化转换过程所产生的一系列扰动都会影响原位岩体的损伤、变形和破坏规律。由此可见,在流态化开采条件下,深部岩体将会出现一系列不同于常规开采方式的力学行为,传统的岩体力学及采动岩体力学理论或许难以适用甚至被颠覆,急需突破现有的采动岩体力学框架,构建基于流态化开采扰动的原位岩体力学理论。

发展流态化开采的原位采动力学理论,核心是要探索不同深度下的岩体物理力学行为的差异与变化规律,关键是要突破深部原位高保真取芯与测试的理论与技术^[6-8],系统研究保真(保压、保温、保湿、保光、保质)取芯的原理与方法,发展原位、移位、原位恢复保真取芯核心技术与装备和保真岩体力学测试的新标准体系。探索深部岩体在原位状态和流态化开采全过程下的应力重分布特征及演化规律,提炼基于流态化开采的工程扰动应力路径的加卸载试验原理,在实验尺度下还原流态化开采全过程的原位岩体的破坏规律,弹塑性状态转换条件,以及岩体非线性力学行为的响应机制。从能量角度分析流态开采扰动作用下岩体稳定与破裂扩展演化的关联性,揭示流态开采中原位岩体的本构行为的力学本质特征,构建不同流态开采方式下原位岩体力学灾变准则,从而建立流态化开采扰动作用下岩体动力灾害致灾判据。

2.2 流态化开采的“三场”透明及可视化理论

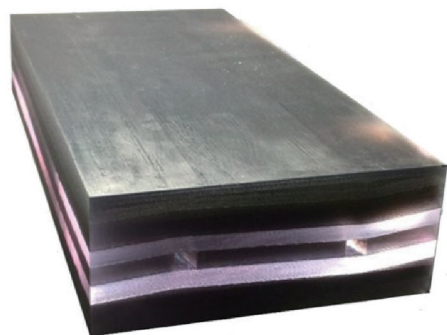
深部煤炭资源流态化开采是一项多种技术共同作用的动态过程,在多种开采扰动的共同作用下,深部煤炭围岩内部结构和原位应力场不断演化,形成新的连续演化的采动应力场、裂隙场和渗流场(即三场)^[8,13]。深部煤炭资源开发所面对的岩体介质深埋于地下,流态化开采扰动所引起的岩体结构演化、流体渗流以及岩体灾变破坏以及流态化转换等过程属

于无法直观显示的“黑箱”问题^[7-8,14-16]。在流态化开采扰动下,岩体内部的微裂纹网络是如何扩展演化,又是如何诱发产生宏观的岩体破坏,深部固体矿产资源的原位气化、液化、电化所产生的扰动效应对岩体的应力场以及流体渗流规律的影响都难以准确捕捉和直观显现,这也将成为制约深部矿产资源流态化开采的理论和技术的瓶颈。

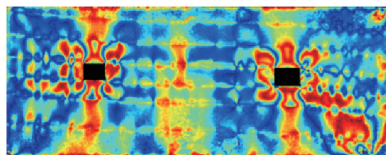
针对流态化开采扰动下深部岩体破裂结构、原位应力以及开采扰动下的岩体应力场-裂隙场-渗流场演化的特征,借助分形重构、3D 打印、应力冻结等物理实验方法和技术^[14-16],研究探索流态化开采下“三场”的透明及可视化表征方法,包括:建立深部岩体非连续结构的分形重构算法;研制与深部岩层基本力学性能相一致的三维应力可视化材料,借助 3D 打印技术,构建高清透明并具有良好的光折射能力的深部岩体的三维物理模型,直观地显示天然岩体内部复杂的裂隙结构与空间形态,建立深部岩层非连续结构可视化物理模型;同时,发展三维应力冻结技术与提取方法,建立深部岩体流态化开采扰动下的应力场、裂隙场和渗流场的定量表征方法与可视化理论,直观地再现深部煤炭开采过程中的非连续结构演化、应力场重分布、应力场和渗流场相互作用机制以及岩体灾变全过程等各种物理现象的发生机理、时空演化规律(图 1)。利用建立的流态化开采岩体应力场-裂隙场-渗流场的可视化理论,预先对深部煤炭流态化开采进行“透明推演”,直观、定量地显示整个开采过程中矿体破碎、应力与能量转移、灾害发生的形式、位置、时间、量级,从而达到预判、预警、预解的目标,改变目前矿山开采随采随治的作业模式和被动局面。在“透明推演”的基础上,实现深地煤炭流态化、智能化与无人化开采,为最终实现消除或避免深地煤炭资源开采灾害以及有效防治这一理想目标提供基础理论与技术支撑体系。

2.3 流态化开采的原位转化多物理场耦合理论

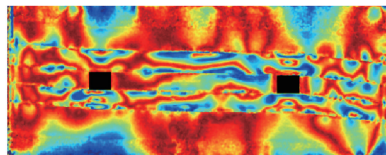
深部固体资源流态化开采的核心是原位转化,它是一个多相介质(固、液、气)共存,多物理场(温度场、渗流场、应力场、损伤场、裂隙场)相互交叉耦合作用的过程^[8,11,13,17-18]。流态化开采作为一项颠覆性技术,其独特优势在于可在地下借助一系列的力学、化学和微生物手段将固态的矿产资源进行原位气化、液化及电化,这与常规的采矿方式具有本质的不同。深部岩体除了受到应力-温度-渗透的耦合作用外,还需要进一步考虑固态资源相变转换的化学反应以及微生物转化反应等因素的影响。以深地煤炭资源快速液化为例,煤炭在高温高压环境下快速液化所发



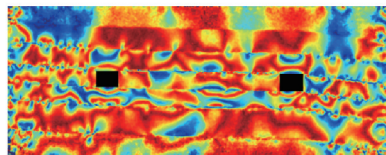
(a) 3D透明开采模型



(b) 巷道掘进33 m时的围岩应力分布



(c) 巷道掘进66 m时的围岩应力分布



(d) 巷道掘进83 m时的围岩应力分布

图 1 3D 透明开采模型和采动应力演化的物理可视化

Fig. 1 Physical visualization for 3D transparent mining model and mining stress evolution

生的化学反应势必会引起地下温度场和压力场的变化,进而对周围岩体产生强扰动作用。特别是,针对深部煤炭原位生物流态化开采,采用培育地下菌种的方式对矿产资源进行气化和液化时,菌种的生长扩展以及对岩石组分的作用也会影响到岩体微观结构以及流体的渗流行为,进而有可能改变岩体在开采过程中的本构行为及失稳准则。深部矿产资源流态化所涉及到的多物理场理论体系和影响因素更为复杂,基于传统开采条件下的多物理场耦合方法及原理已经无法满足流态化开采的需求。这就需要在充分考虑流态化开采扰动下的固、液、气、电多相并存的开采环境,揭示固态资源流态转换过程的化学及微生物作用对深部岩体微观结构和原位应力的影响机制,建立包含微-细-宏观跨尺度的裂隙结构,固、液、气、电等并存的多相环境,以及应力-温度-渗流-化学-微生物多种作用机制的多物理场耦合模型,揭示不同流态化开采方式下的岩体本构行为、渗流机制、变形破坏规律,最终形成深部矿产资源流态化开采扰动下的多物理场耦合理论。

2.4 深部原位流态化转换理论

固体资源的流态化转换是实现深部矿产资源流态化开采的关键,直接关系到流态化开采技术能否成功实施和工业化应用。流态化开采的2个关键点在于:一是矿产资源是否具有足够高的液化、气化效率,从而满足工业化开采的需求;二是矿产资源中的有用组分是否能够最大限度的转换或者萃取出来,从而大幅度提高深部矿产资源的开采效率,达到经济化、高效化的开采目标。因此,需要进一步发展和建立固态资源流态化转换理论,揭示固态资源流态转换的化学及生物机制。

研究高温高压环境下矿产资源快速液化机理以及催化剂的催化机制,揭示温度、压力及反应时间对固态资源液化速率的影响机理,建立深部矿产资源快速液化的调控方法。研究矿物的化学组分在新型超临界萃取溶剂中的溶解和扩展机理,分析溶解后的矿物组分在超临界溶剂中的运移规律,探索利用原位高温干热岩调控超临界萃取溶剂的溶解矿产资源的化学机制。探索深部原位外源高效菌种的培养和激活技术,揭示菌群与矿产资源相互作用机制,研究菌液和菌气转换原理及其控制机理,形成深部矿产资源微生物原位开采的理论与技术体系。通过上述方式,探索固体资源流态化转换过程,掌握流态化转换机理与控制方法,构建深部矿产资源流态化开采的流态化转换理论体系,从而为实现深部矿产资源流态化开采提供理论指导。

3 流态化开采的关键技术

深部固体资源流态化开采的技术实现途径主要有4种方式,即将固体资源转化为气态(如煤炭地下气化:氢、甲烷)、将固体资源转化为液态(如煤炭地下液化、煤炭地下高温生物、化学转化)、将固体资源转化为混态(爆炸煤粉、水煤浆等)、将固体资源原位能量转化(如煤炭深部原位电气化等),而针对这4种流态化开采方式,必须提出相应的颠覆性关键技术。

3.1 深部原位采选充电气热一体化、流态化开采技术

深部原位采选充电气热一体流态化开采技术由盾构式采掘舱、破碎选煤舱和流态转化反应舱3个主体部分构成,如图2所示^[19],将固体资源转变为液态、气态和电能进行开发,实现地下煤炭无人智能开采和就地能量转化,主要综合了盾构掘进、煤矸分选、煤粉爆燃发电等创新性技术,是一种颠覆性开采技术集成,国内外尚未开展相关研究。盾构式采掘舱负责

无人智能掘进与传送,利用采掘舱前置大深度多场源精准探测装置,将地理全信息(构造、水、资源分布等)一体化动态显示在虚拟监测平台上,启动基于多元信息综合决策的地质灾害自主避险系统,完成采掘舱实时控制。利用多维、多尺度深地空间分布式导航原型系统,建立深地空间独立的高精度定位体系,实现采掘舱的资源精准开采。破碎选煤舱在井下破碎分选出精煤粉,而流态转化反应舱进行等离子引爆,构成模块发电机组,同时也可利用深地原位(地热、水力)小型发电厂将煤炭进行地下燃烧和气化,获得电力资源和可利用气体资源,并高效智能传输至地表,实现固态资源的流态转换,使传统开采的输煤变为输电、输热、输气。转化后的矿渣进行混合加工,形成充填材料回填采空区,用以控制岩层运动与地表沉降,实现安全、绿色开采。

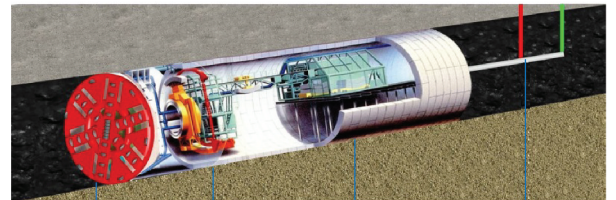
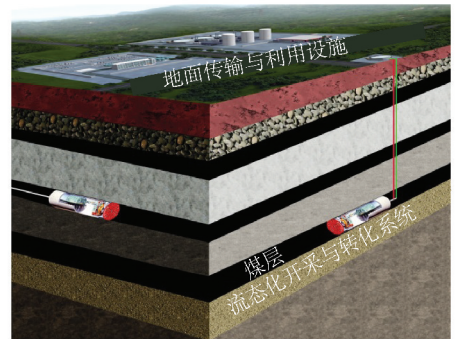


图2 盾构式采选充电气热一体流态化开采系统示意

Fig. 2 Schematic fluidization mining with TBM; assemblage for excavation, separation, filling, electricity, gas and heat system

3.2 深部原位化学转化流态化开采技术

深部原位化学转化流态化开采技术包括煤炭地下气化和地下液化两种,主要利用化学反应将煤炭直接原位转化为液体或气体,关键是提出创新性颠覆性技术把现有地下气化液化技术在深部原位小型化、精准化及稳定可控。

现有的煤炭地下气化技术是一种适用于深地资源流态化开采的绿色开采技术,通过定向钻井、可控气化、岩层控制及生态恢复等一系列技术手段实现煤炭资源的安全高效绿色开采^[19-21]。然而,在深地环境下,现有技术存在不可控、灾害风险大、时效难把握等困难,1 000 m以深煤层赋存地下环境

以及煤气就地利用地下空间的物性规律并不清楚。图3为煤炭地下气化技术示意,就是将处于地下的煤炭进行有控制的燃烧,通过对煤的热作用及化学作用而产生可燃气体的过程。该过程主要是在地下气化炉的气化通道中实现的,由进气孔鼓入气化剂(有效成分是 O_2 和水蒸气),并在进气侧点燃煤层,气化剂中的 O_2 遇煤燃烧产生 CO_2 ,并释放大量的反应热,使还原区煤层处于炽热状态,当气流中 O_2 浓度接近于零时,氧化区结束。在还原区 CO_2 与炽热的C还原成CO, $H_2O(g)$ 与炽热的C还原成CO, H_2 等,由于还原反应是吸热反应,使煤层和气流温度逐渐降低,当温度降低到不能进行还原反应时,还原区结束。但此时气流温度仍然很高,对下流(干馏干燥区)煤层进行加热,释放出热解煤气。经过这3个反应区以后,生成了含可燃组分(主要是 H_2 ,CO, CH_4)的煤气,气化反应区逐渐向出气口移动,因而保持了气化反应过程的不断进行。地下气化的物质基础是地下气化炉,采用新型自动纠偏导向定向钻机,结合多传感器实时监测,可解决深地钻井及气化炉构建问题;采用多点温压耦合传感探测技术,可实现对深地煤层化学反应工作面及高温腔体的分布范围、移动扩展速度探测。

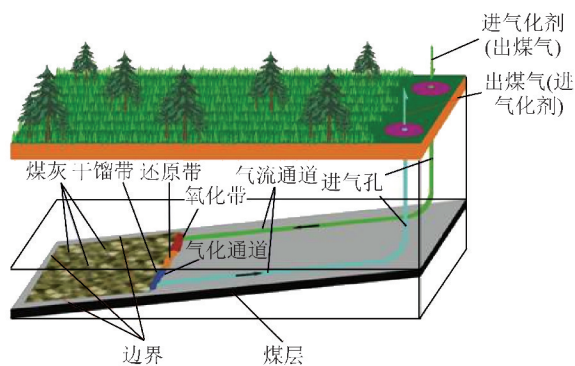


图3 煤炭地下气化技术示意^[21]

Fig. 3 Schematic for coal underground gasification system^[21]

深部原位流态化地下液化则是结合目前已有的地下气化和地上液化知识产生的技术设想,这个设想的实质就是将高温溶剂经孔道高压注入地下煤层与煤作用,产出的液态产物、细颗粒和未作用的溶剂一起由另一孔道输出地面,再进一步分离和精制,目前煤的地下液化仍处于基础研究阶段,图4是容器式深地煤炭快速液化技术示意图,流态转化仓中反应本质为通过加氢方式提高煤中的H/C原子比(0.2~1.0)以达到油的H/C原子比(1.6~2.0)水平,其关键核心技术在于快速液化反应条件(温度、压力、反应时间)的过程调控、高效供氢催化剂的研制与回收。

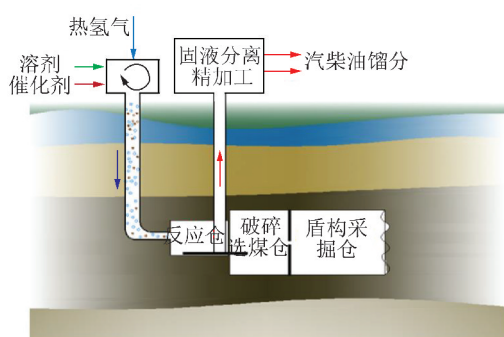


图4 深部煤炭原位容器式快速液化技术

Fig. 4 Fast fluidization technology for deep underground coals within in-situ reaction vessel

3.3 深部原位生物降解流态化开采技术

微生物可以对煤炭基质和煤层气进行降解^[22-23],生物降解流态化开采技术是指利用微生物将煤炭在井下转化为气体和液体燃料和原料的一种流态化开采技术,分为生物液化和气化2种。如图5所示,首先将营养液和微生物培养液带压注入煤层,并扩散循环,煤炭将与这些微生物持续反应,通过水解发酵菌、产酸细菌、产氢产乙酸细菌和产甲烷菌联合作用,生成 CH_4 和 CO_2 ,如图6所示,经过抽采钻井并产出,其关键技术在于外源高效菌种的培育及土著菌种的激活技术、菌液煤层多分支注入与压裂扩散技术、菌液转化反应控制技术、转化气液产物抽采技术、地下环境污染与控制技术。

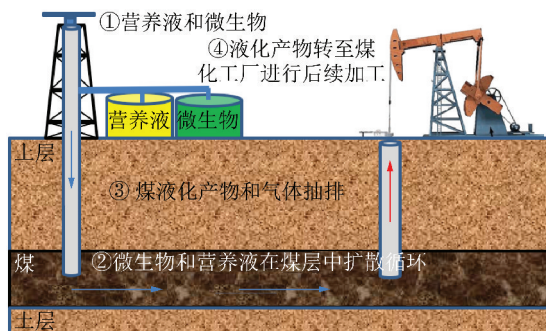


图5 煤炭深部原位生物液化和气化技术构想示意^[22-23]

Fig. 5 Schematic conception for in-situ bio-fluidization and bio-gasification for deep underground coals^[22-23]

3.4 深部原位能量诱导物理破碎流态化开采技术

地下煤体在地应力、瓦斯压力的共同作用下,会在极短时间内破碎成较小尺度的碎块,这种破裂是在动力扰动下的灾变能瞬态释放,同时也是一个高能量岩体的自破裂,只要找到适当的诱导破裂方法和途径,就可以将深部煤岩体的这种灾害性破坏诱变为煤体有效破碎,实现深部煤炭的安全高效开采。物理破碎流态化开采技术,是指利用深部高应力,通过钻掘及水射流破岩,诱发深部煤体突出形

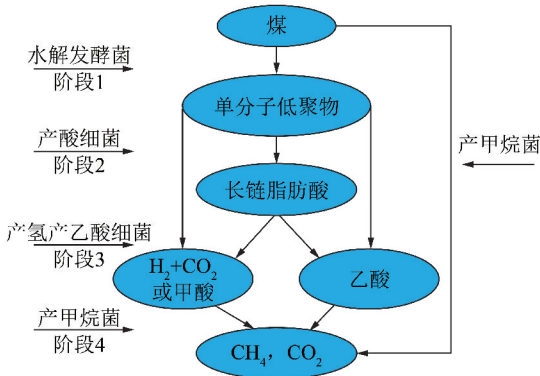


图6 煤生物液化和气化反应机理^[22-23]

Fig. 6 Reaction mechanisms for bio-fluidization and bio-gasification of coals^[22-23]

成颗粒流、气、液等混合流态物质,形成符合管路传送的颗粒尺度,从而达到管道负压流态化输送至地表的目的,从而进行地面抽采。主要包括深部煤与瓦斯突出地面诱导抽采技术、深部煤炭地面井压裂造穴流态抽采技术,前者主要利用爆破等手段对煤体进行扰动,诱导其发生煤与瓦斯突出等动力灾害,利用其自身能量产生高度破碎;而后者主要利用人为技术手段对地下煤体进行破碎作业,为此提出了无水超大体破裂改造与开发技术^[25],创新集成高能气动脆裂技术、CO₂基压裂技术、高分子支撑剂技术和深地微生物改性提质技术,探索深地煤层大尺度、大体量、高强度致裂破碎技术。

4 现有技术对煤炭流态化开采的基础作用

煤炭流态化开采在现阶段虽然属于科学构想,但从目前现有相关技术的发展趋势推演,在 20 ~ 30 a 内完全有望达到流态化开采的目标要求,支撑流态开采成为未来深地资源开采的主导技术。现有技术对流态化开采的基础作用及支撑关系如图 7 所示。

4.1 地质构造探测及多信息融合数字化矿山技术

4.1.1 地质构造探测及地质保障技术

地质构造探测及地质保障技术是煤炭开采的重要基础,主要有三维地震、地球物理测井等地面物探技术,井下电磁法勘探、瑞利波、直流电法技术,深井钻探探测技术与装备等。可查明煤层赋存状态、矿区(井田)资源条件及煤矿大中型地质构造、岩浆侵入体,以及采空区、小构造及陷落柱等超前探测和预报等。深入研究热力破碎、激光钻进、中子束钻进等新型岩石破碎机理和方法,研发深部取芯钻进工艺和装备。目前,世界上最深的科拉半岛超深钻孔已经达到 13 000 m^[25-26],国内外钻探技术与装备的发展趋势是三维可控与可视化钻井技术、热能钻进法、低温

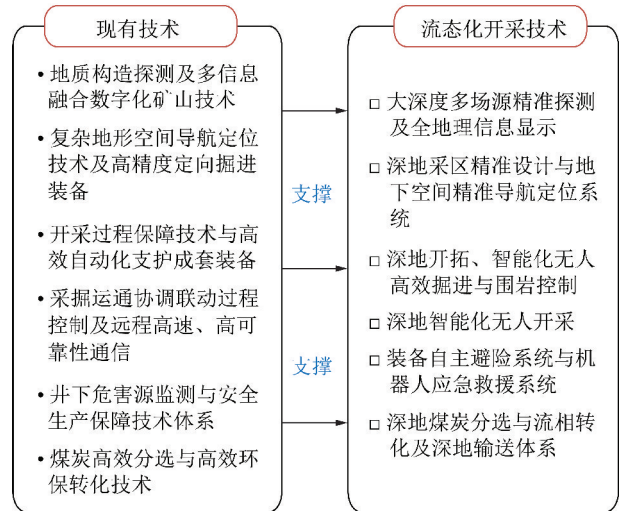


图7 现有技术对流态化开采的基础作用及支撑关系

Fig. 7 Relationship of fluidization mining with current mining theory and technology

冷冻钻进法、热力破碎、激光钻进、中子束钻进等新方法与工艺、设备的研制。上述技术和装备的发展可为研究地球深部基本科学规律提供技术、装备手段,支撑流态开采所需的大深度多场源精准探测装置研制。

4.1.2 多信息融合数字化矿山技术

当前的数字化矿山技术融合地理信息与采区开拓、巷道布局、通风、安全监控等多种类型的数据,为煤矿总体生产调度、安全保障、运输、人员监控等提供了基础平台。但在地质构造信息的获取和融合方面很薄弱,信息量小、准确度差、精度低。需在地质构造探测及地质保障技术的基础上加强信息获取和融合处理,才能为流态化开采地理全信息系统(透明地球)提供技术基础,从而建立详细、准确的三维地理信息模型(图 8)及全信息可视化平台。

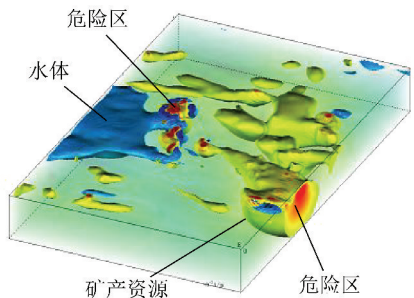


图8 三维地理信息模型

Fig. 8 3D geographic information model

4.2 复杂地形空间导航定位技术及高精度定向掘进装备

精确描述井下设备的位置及方向是建立自动化、智能化开采系统的核心技术。煤矿井下封闭复杂空间没有 GPS 卫星信号,无法建立类似于地面的导航

系统;且井下环境复杂,围岩粗糙表面漫反射、大功率设备干扰、松散岩体吸收等都使得无线信号衰减非常严重。目前,井下可采用激光雷达导航、三维惯性导航、UWB超宽带无线定位及无线 Mesh 网络导航系统等,研究重点集中在各种定位技术的定位算法、滤波技术及其误差分析修正算法上,以确保信号传输的可靠性、定位的及时性、准确性。

流态化开采也需要进行井下装备的精准定位、协调运行,因此在上述技术的基础上建立一个不随时间、环境条件变化而漂移的井下独立导航系统至关重要。有了高精度的井下空间多维、多尺度高性能导航原型系统,截割装备(采煤机、连采机、掘进机等)才能沿着既定的路线,在地下三维空间精准前行,从而支撑流态化开采采区精准开拓及资源开采。

4.3 开采过程保障技术与高效自动化支护成套装备

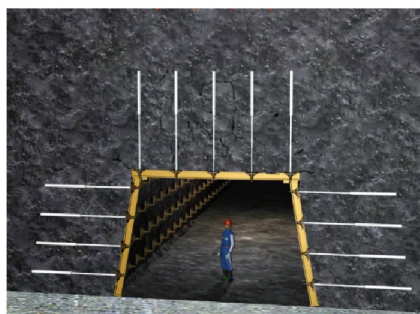
流态化开采首先需要在稳定控制的采场内把煤采出或就地移位,而且开采过程中要能够实时管控装备与煤岩、井下环境之间的耦合作用关系。当前,井下工作面近场围岩状态的非均质、易突变特性,狭小空间内瓦斯、粉尘易爆和高湿、强振的开采环境已然给自动化开采带来极大难度。因此,在揭示工作面开采条件(围岩状态与开采环境)变化规律及装备系统-煤岩耦合作用机理的前提下,必须研发开采过程的保障技术,处置围岩压力、瓦斯、水、煤尘等影响开采进程的动态变化因素,实现采煤进程的连续、稳定推进。

现有技术中的水力压裂、瓦斯增透、坚硬顶板弱化等技术都可继续发展,支撑流态化开采中的采区维护及处置技术的研发。锚杆锚索、液压支架等围岩支护技术及控制装备需要与工作面同步推进,实现生产空间的高效自动化支护。在现有开采过程保障技术与高效自动化支护成套装备的基础上进一步探索流态化开采强地压、大空间、流变特性围岩的围岩控制技术和高效自动化支护装备(图9)。

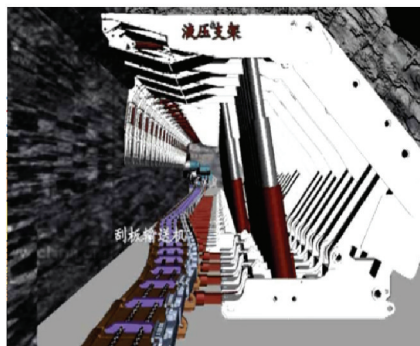
4.4 采掘运通协调联动过程控制及远程高速、高可靠性通信

井下采掘运通设备群构成复杂,设备动作多,配合要求速度快、精度高,协调联动控制必须准确、及时,且要求逻辑严密、柔性高,对可能发生的故障、工作环境变化都能及时响应,并予以处理。现有工作面系统的控制机制能够基本满足要求,并通过铠装电缆通信、冗余设计等方法保证通信的可靠性。

未来的流态开采需要开采装备与转化装备在有限空间内大规模集成,其控制的实时性、准确性、可靠性要求更高。因此,需要在现有技术基础上深入研究



(a) 锚杆支护巷道



(b) 工作面液压支架围岩控制

图9 采场围岩控制与空间支护

Fig.9 Rock mass control and support technology for underground mining

大规模群组设备的智能化协调控制技术、基于光纤传输的远程高速高可靠性通信技术,从而支撑流态化开采装备系统多任务、多目标的分布式控制需求。

4.5 井下危害源监测与安全生产保障技术体系

安全隐患是地下资源开采最大的威胁,及时发现危险源并预警对安全管理至关重要。目前,煤尘、瓦斯超限、透水、冲击地压等灾害源监测及预警技术装备都相对比较成熟了,而矿用探测、巡检机器人、大功率的快速特征救援装备等还处于起步研制阶段^[27](图10)。未来的流态开采将面临更多的安全和设备故障处理问题。深地无人化开采若无法保证设备安全和极高可靠性,开采过程将无法持续。而且,深地开采中灾害的强度、速度、规模都较大,必须研发危险源的精准识别与探测技术,准确预判危险发生的地点、范围和影响程度,智能化决策采取的应对方案。同时,流态开采装备应具有自主避险系统、应急救援系统等,能够自动保证设备自身安全。现有井下危害源监测与安全生产保障技术体系的发展应为建立流态化开采应急救援系统奠定基础。

4.6 煤炭高效分选利用与高效环保转化技术

(1) 煤炭高效分选利用技术

煤炭分选是煤炭转化利用的前道工序,煤炭经洗选加工后,通过混配以控制燃煤的中灰分、硫分等指标,使之符合电厂锅炉要求,减少污染物排放,降低锅



图10 矿用探测抢险机器人

Fig. 10 Rescue robot for underground mining

炉的结渣沾污和积灰。目前,煤炭分选主要采用重介质、涡流分选等技术,美国有43.2%的选煤厂装备了重介质分选机,澳大利亚90%以上的选煤厂采用了重介质选煤。未来流态化开采需要在井下小空间内快速完成选煤,因而需要研发新的煤炭高效分选装备,例如超导分选与磁悬浮运输技术等,从而与采煤、充填形成采选充一体化作业。

(2) 煤炭高效环保转化技术

煤炭转化技术是未来煤炭流态化开采最为的重要支撑技术。目前,煤制油、煤制天然气和水煤浆技术均已经得到大规模应用。煤制天然气技术主要包括气化合成技术(两步法)和加氢化和蒸汽催化气化技术(一步法),美国、韩国、英国等采用了固定床气化、气流床气化、五级循环固定床等不同的工艺。

煤炭液化技术主要包括直接液化和间接液化技术。在直接液化技术方面,德国、美国、日本等发达国家完成了工业性示范,我国的神华集团在鄂尔多斯建设了世界上最大的煤制油直接液化项目,一期工程完成后年耗煤345万t,生产各种油品108万t。在间接液化技术方面,主要是费-托(F-T)合成技术,南非的SASOL公司建成3个合成油厂,年生产油品460万t,化学品308万t。我国的兖矿集团在陕西榆林建设了年产110万t间接煤制油基地。

5 深地煤炭资源流态化开采战略路线及结论

深地煤炭资源流态化开采颠覆了传统煤炭开采理念和技术体系,是新的资源及能源开采方式革命。基于上述“现有基础支撑技术—突破性技术—颠覆性技术”构建的技术蓝图,提出“2025基础研究、2035技术攻关、2050集成示范”的战略实施路线,即:

2015—2025年,流态化开采的基础理论、技术研

究阶段;2025—2035年,流态化开采的技术突破、装备研发阶段;2035—2050年,流态化开采的技术集成及工业性示范阶段。

最终建立井下智能化采选充一体化无人开采、热电气集成转化的流态化开采技术体系,达到“井下无人、地上无煤”的理想目标,实现地下煤炭资源开采的颠覆性变革。

深地煤炭资源流态化开采是深地科学研究的重要内容,是国家能源开发未来科技发展的战略储备技术。伴随着深地科学基本规律的探索和技术创新,必将把这一科学构想变为一个全新的、可行的开采技术体系。从而开辟新的采矿工业模式,实现深地矿产资源清洁高效-生态友好开发。

6 结语与展望

人类要真正走向深部,实现深地资源开发,必须颠覆现有的开发理论与技术。流态化开采作为一项颠覆性技术,能够突破矿产资源开采深度的限制,使其像油气资源一样以流态化的形式进行开采,最终实现深部矿产资源开采的无人化和智能化。为推动深部矿产资源流态化开采技术的实现和工业应用,提出了关于流态化开采的原位采动岩体力学、可视化、多物理场耦合以及流态化转换等理论构想,指出了流态化开采所面临的基础难题。在技术层面,提出了深部矿产资源采选充电热气一体化流态化开采、深部矿产资源化学转化流态化开采、深部矿产资源生物降解流态化开采以及深部矿产资源物理破碎流态化开采等技术构想,为建立深部矿产资源流态化开采的技术体系与适应性评价方法指明了方向。本文提出的关于流态化开采理论和技术构想,有望开辟新的采矿工业模式,引领矿产资源开采技术革命,实现深地矿产资源清洁高效-生态友好开发。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话[N]. 人民日报, 2016-06-01.
- [2] 谢和平. 煤炭科学开采与技术变革[Z]. 中国工程院国际工程科技大会报告, 2014.
- [3] 谢和平. 煤炭科技之探索和展望[Z]. 煤炭工业十三五科技发展规划编制会议报告, 2015.
- [4] 谢和平. 深地资源开采的颠覆性理论与技术[Z]. 中国地质科学院: 深地颠覆性技术研讨会报告, 2016.
- [5] 谢和平. 中国工程院咨询项目“煤炭绿色开发利用与煤基多元协同清洁能源技术革命研究”研讨会报告[Z]. 北京: 西郊宾馆, 2016.
- [6] 谢和平. 深地科学技术探索[Z]. 教育部科技委“深部固体矿产

资源流态化开采”圆桌论坛报告,成都:四川大学,2016.

- [7] 谢和平. 深部固体矿产资源流态化开采关键技术[Z]. 教育部科技委“深部固体矿产资源流态化开采关键技术”专家研讨会报告,北京:北京科技大学,2016.
- [8] 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,2016,49(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.
- [9] 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.
- [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] 谢和平,高峰,鞠杨. 深地岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2177.
Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *China Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11):2161-2177.
- [12] 谢和平,周宏伟,刘建峰,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.
- [13] 谢和平,张泽天,高峰,等. 不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2405-2417.
Xie Heping, Zhang Zetian, Gao Feng, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10):2405-2417.
- [14] 鞠杨,谢和平,郑泽民,等. 基于3D打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报,2014,59(32):3019-3119.
Ju Yang, Xie Heping, Zheng Zemin, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(32):3019-3119.
- [15] Ju Yang, Zheng Jiangtao, Epstein Marcelo, et al. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms[J]. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 2014, 279(9):212-226.
- [16] Ju Yang, Wang Li, Xie H P, et al. Visualization and transparentization of the structure and stress field of aggregated geomaterials through 3D printing and photoelastic techniques[J]. *Rock Mech. Rock. Eng.*, 2017, DOI: 10. 1007/s00603 - 017 - 1171-9.
- [17] 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 confining of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1):91-99.
- [18] 朱万成,魏晨慧,田军,等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. 岩土力学,2009,30(12):3851-3857.
Zhu Wancheng, Wei Chenhui, Tian Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12):3851-3857.
- [19] 郭纫云. 煤炭气化[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1989.
- [20] Younger P, Gluyas J, Roddy D, et al. Underground coal gasification[J]. *Science*, 1977, 183(4129):600-610.
- [21] 梁杰,余力. “长通道、大断面”煤炭地下气化新工艺[J]. 中国煤炭,2002(12):10-12.
Liang Jie, Yu li. A new technology for underground coal gasification with long channel and large section[J]. *China Coal*, 2002(12):10-12.
- [22] Cohen M S, Gabriele P D. Degradation of coal by fungi polyporus versicolor and poria monticolor[J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1982, 44:23-27.
- [23] 陈东科,王璐,金龙哲,等. 微生物降解煤矿瓦斯的研究[J]. 煤炭学报,2006,31(5):607-609.
Chen Dongke, Wang Lu, Jin Longzhe, et al. The preliminary research on coal-bed gas degradation by microorganism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(5):607-609.
- [24] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 页岩气储层改造的体破裂理论与技术构想[J]. 科学通报,2016,61(1):36-46.
Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Novel idea of the theory and application of 3D volume fracturing for stimulation of shale gas reservoirs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(1):36-46.
- [25] 谢和平,彭苏萍,何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,2005:1-35.
- [26] 董树文. 向地球深部进军的号角已经吹响[N]. 中国国土资源报,2016-09-07.
Dong Shuwen. The horn that marches deep inside the Earth has been blown[N]. *China Land and Resources News*, 2016-09-07.
- [27] 唐山高新技术产业开发区管理委员会. 机器人产业基地[EB/OL]. <http://www.tsgxq.gov.cn/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=106>, 2017-02-20.