

王家臣,刘峰,王蕾. 煤炭科学开采与开采科学[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2651-2660. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1395
Wang Jiachen, Liu Feng, Wang Lei. Sustainable coal mining and mining sciences[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2651-2660. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1395

煤炭科学开采与开采科学

王家臣^{1,3,4}, 刘峰², 王蕾²

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;2. 中国煤炭学会,北京 100013;3. 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083;4. 中国煤炭学会煤矿系统工程专业委员会,北京 100013)

摘要:从安全生产、机械化或自动化开采、共伴生资源共同开采、保护环境、降低开采直接成本、资源利用最大化、科学规划等方面详细阐述了煤炭科学开采的基本要求。介绍了国内外在煤炭科学开采方面的研究现状与进展,对比分析了国内外科学开采的共同点与差异。提出了我国实现煤炭科学开采需要从技术进步、思想观念、法律法规、基础研究与人才培养等方面入手。提出了煤炭开采今后需要在采矿开挖卸荷与偏应力作用、采动应力场动态变化、深部煤岩体的力学行为、煤岩柱的长期强度、采场的系统刚度等10个方面加强研究。

关键词:科学开采;责任开采;安全生产;环境保护;可持续发展

中图分类号:TD821 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2016)11-2651-10

Sustainable coal mining and mining sciences

WANG Jia-chen^{1,3,4}, LIU Feng², WANG Lei²

(1. College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Coal Society, Beijing 100013, China; 3. Coal Industry Engineering Research Center of Top-coal Caving Mining, Beijing 100083, China; 4. System Engineering Committee, China Coal Society, Beijing 100013, China)

Abstract: The basic requirements of sustainable coal mining were described in detail from various aspects—safe mining, automatic mining, co-mining of coal and accompany resources, environment protection, direct cost reduction of mining, maximization of resource utilizing and sustainable planning. Overseas and domestic research status and progress of sustainable coal mining were introduced to make a comparative analysis for similarities and differences. Accordingly, the realization of domestic sustainable coal mining was proposed to focus on five aspects—technical development, ideological progress, optimization for laws and regulations, basic researches and talent cultivation. At last, coal mining was suggested to be continuously studied from all ten aspects—mining including unloading and deviatoric stress, dynamic change in mining stress field, mechanical behavior of deep coal-rock mass, long-term strength of coal-rock pillar, stiffness of stope system, etc.

Key words: sustainable coal mining; responsible mining; safe mining; environment protection; sustainable development

煤炭是我国基础能源,也是重要的化工原料。煤炭的安全、高效与环境协调开采以及煤炭的清洁高效利用是煤炭行业面临的两大根本任务。2002—2011年,煤炭开采业得到了快速发展,煤炭产量从2002年

的13.8亿t增加到2012年的36.5亿t,占世界煤炭产量的47.5%,这也就是所谓的“煤炭黄金10a”。在煤炭快速发展的同时,也暴露了一些问题,如产能增长过快、损害环境、资源回收率较低、开采技术和安

全状况发展不平衡等,为此钱鸣高院士提出了煤炭科学开采的概念和基本要求,这对促进我国煤炭开采健康发展起到了巨大作用。

近几年,尤其是2012年下半年以来,煤炭行业遇到了前所未有的困难,煤价持续走低、产能过剩、行业亏损等,加之环境和大气保护要求越来越严格,对煤炭的生产和利用提出了许多严格的条件,这就更加迫切需要研究煤炭科学开采的一些问题。煤炭科学开采是一个宏观要求,真正实现煤炭的科学开采又是一个系统工程,涉及到开采及相关技术、政策与法规、人才队伍、管理水平、资源与环境经济以及开采的基础科学等,本文仅就煤炭科学开采及地下开采中的一些基础理论问题进行论述。

1 煤炭科学开采的基本要求

煤炭一直是我国的基础和主体能源,尽管目前我国煤炭行业处于困难时期,以煤炭为代表的化石能源在开发与利用过程中造成的环境污染等问题已成为社会焦点,但由于我国资源禀赋特点,近期我国又不得不以煤炭作为主体能源,若想改变这一现状,必须在新能源开发与利用技术方面取得实质性突破,否则较长一段时期内不会发生根本性改变,煤炭在一次能源消费中不会低于50%。然而在社会对安全、环境、健康等要求越来越高的情况下,对一直依靠大规模开挖获取煤炭资源的煤炭开采业提出了更高的要求,这也就迫使煤炭生产方式必须发生改变。

煤炭科学开采是运用系统科学思想,基于相关科学与技术进步,提升煤炭行业开采技术水平与理念,兼顾资源、安全、环境、生产与社会的一种符合现代社会要求与人类社会潮流的科学思想。煤炭科学开采的提出并不是说以往的煤炭开采不依靠科学技术,仅仅是凭借经验的粗放式开采,而是在更高层次上要求煤炭生产的规划和开采能够更加科学。

煤炭科学开采是一个相对抽象概念,但也有其具体的定义和要求,概括地说就是在煤与自然、环境、人文相协调下,安全高效地开采出煤炭及共伴生资源,在钱鸣高院士提出的科学采矿概念基础上,煤炭科学开采的具体要求可以理解为如下几个方面^[1-4]。

1.1 安全生产

煤炭科学开采的安全生产是指煤炭开采的主要安全指标达到或接近国际先进采煤国家水平,或者煤炭开采的安全状况好于或者接近全国其他基础行业的安全状况。

安全生产是一切从事生产活动所必须的,我国煤

炭开采由于受自然条件、生产技术、安全技术、安全意识与管理水平等因素制约,以及多年来的安全生产状况不容乐观,因此煤矿的安全生产尤其受到关注,至今仍然以百万吨死亡率为安全生产的衡量指标。安全生产并不应该理解为开采过程中一定要达到零伤亡事故,任何一个生产行业都无法真正做到无事故、零伤亡,而应该是尽可能地降低伤亡事故,追求零伤亡目标。

2014年美国煤矿的百万吨死亡率为0.016、澳大利亚为0.014,我国2015年煤矿的百万吨死亡率为0.159,较10a前有了大幅度降低(2005年为2.811),与俄罗斯、波兰水平相当,但仍然是美国和澳大利亚的10倍左右,这里有自然条件和开采方式的差异,如美国和澳大利亚60%的煤炭产量来自于更加安全的露天开采,而我国只有15%的煤炭产量来自露天开采等;但是也有生产技术、安全技术、安全理念与管理等方面的原因。我国煤矿安全生产状况在最近10a有了很大改观,但在国内各行业从业人员的死亡人数中,煤炭开采业仍然位居前列(2015年死亡588人),与建筑行业相当(2012年死亡624人)^[5];借鉴美国和澳大利亚等国的先进经验,煤炭开采可以成为安全的行业。

1.2 机械化或自动化开采

我国目前煤炭开采机械化水平参差不齐,有世界最先进大采高、放顶煤等综合机械化工作面,也有许多自动控制工作面和机械化充填开采工作面等,但在一些条件复杂的矿区,还有一些劳动强度大的炮采工作面等。巷道掘进也是综掘与炮掘并存。近几年来通过关闭小煤矿、煤矿技术改造与升级,使我国煤矿的整体机械化水平有了很大提高,目前全国煤矿总体的机械化程度在80%以上,这还是低于世界其他采煤先进国家的水平(95%~100%)。

机械化或者自动化开采,不仅仅是提高开采效率和产量,同时也具有减少作业人员、改善工人劳动强度、保障作业安全、改善作业条件、提高职业健康水平的作用。未来的目标应该是智能化、无人化开采,但这至少还需要10a的时间。

1.3 提高煤炭及共伴生资源采出率

煤炭采出率(也称回收率、回采率)一直是困扰我国煤炭开采的核心问题之一,也是一直受到业外人士抨击的话题之一。事实上我国国有地下煤矿的煤炭资源采出率并不低于世界其他先进采煤国家地下煤矿的采出率。前些年由于一些小煤矿的非正规开采,导致这些煤矿的采出率偏低、技术落后,极大地影响了煤炭行业的整体形象。相关部门

最近的一次调查统计结果表明全国煤矿平均采区采出率 83.29% (2011 年数据),而且一些开采薄煤层的矿井,采出率会高一些。在进行煤炭科学开采的同时,除了要提高煤炭资源采出率外,更重要的是要提高与煤炭共伴生的瓦斯、水、铀、铝等其它资源的采出率,达到开采效益和资源回收的最大化。化石能源(资源)是地球在数千万年以前形成的宝贵资源,最大限度地采出、利用和节约是人类必须面对的课题。

1.4 保护环境与修复

一切开采都会破坏地球的原始状态和环境,这是毋庸置疑的,由于煤炭开采的面积大和采出量大更加引起关注。煤炭开采造成地表塌陷、植被破坏、地下与地表水流失、河流和大气污染等是社会对开采行业颇多微词的原因之一,但是这些破坏和对自然环境的扰动又是不可避免的。开采的目的是为了促进经济发展,满足人类生产、生活的各种需要,逐步改善和提高生活质量。但是开采的结果又破坏了自然环境,降低了人类与自然的和谐程度以及生活质量,尤其对于矿区的居民影响更大。因此如何寻求开采与环境和谐共存,既要保护环境,又要进行适当的开采,从现实和长远的意义上寻求平衡,以及环境与社会可以共同接受的量值是煤炭科学开采所要研究的重要内容。

自然环境、生态和地下水等在经历开采扰动后,会产生破坏。若扰动和破坏的规模不大、程度不严重,它们经过一段时间后可以实现全部或局部的自我修复,这在国内外的开采实践中业已证明。然而这种自我修复的程度是有限的,我们还不能过多地依赖环境的自我修复能力,还是要研究和实现煤炭开采最大限度地减少对环境的破坏,并利用环境自我修复特性和人工干预对环境进行保护和修复,在环境、生态和水资源等的承载能力(环境容量)内进行开采,达到开采与环境协调共存的目的。

1.5 降低煤炭开采的直接成本

煤炭开采是国家主要税收来源之一,同时由于煤炭地下开采的特殊性,安全投入大,大面积开采占地和村庄搬迁、用人多等,导致煤炭开采过程中税赋、安全投入、占地、人工等费用高,这也是区别其它行业的主要差别之一,使我国煤炭开采成本高于周边甚至全世界其他国家。通过研发先进的开采技术与装备,降低煤炭开采直接成本,提高劳动效率,改善作业条件势在必行,这也是煤炭科学开采需要研究的重要内容之一。

我国煤炭产量居世界首位,我国煤炭从业人员数

量也位居世界首位,人员成本占有很大比例,达 40% ~ 50%,美国为 33%。我国煤炭行业从业人员多是一个难以解决而又迫切需要解决的重要问题。初步估计我国煤炭从业人员总数达 600 万人,国有重点煤矿约 250 万人、地方国有煤矿 130 万人、乡镇煤矿 220 万人。近年来煤炭经济形势急转直下,影响了煤炭就业,煤炭从业人员数量会有所减少,但是流失的人员会以技术人员和有特长的管理人员为主,庞大的基础人员队伍不会有很大变化。减少从业人员数量,尤其是井下辅助作业人员和后勤与管理人员数量非常迫切。

在世界范围内基本有个共识,就是煤矿的全员效率为 10 000 t/(人·a),是煤矿企业获得较好收益的平衡点,美国煤矿全员效率为 12 800 t/(人·a),澳大利亚为 12 900 t/(人·a),而我国不足 700 t/(人·a)。我国煤炭开采的全员效率低,从业人员数量大,近 3 a 来,煤炭市场严重下滑,煤炭企业全面亏损,通过技术升级和科技进步来减人提效是必经之路。

1.6 实行煤炭开采完全成本

煤炭地下开采的作业条件差、安全风险大、劳动时间长在短期内难以根本改变,因此增加煤矿井下作业人员以及从业员工资待遇、吸引优秀人才、提高从业人员素质应该成为煤炭行业的基本策略。一方面要通过技术进步减人提效,降低总体工资成本比例,另一方面需要提高个体工资水平,吸引人才。除此之外,要认真研究煤炭完全成本构成,煤炭开采成本中需计入环境修复、工人安全风险、资源枯竭、转产等方面的成本。表 1 是中美两国煤矿从业员工资对比,可以看出我国煤矿从业人员的周工作时间是美国的 1.26 倍,每天工作时间近 12 h。煤矿从业人员的年平均工资是社会平均工资的 1.13 倍,而美国则为 1.65 倍。表 2 是我国煤矿从业人员文化程度统计,可以看出,煤矿从业人员中初中及以下文化程度人员占比偏大,这与煤矿行业劳动强度大、工资低、安全风险高有直接关系。

表 1 2014 年我国与美国煤矿从业人员薪酬统计对比

Table 1 Comparison of coal mine employee's salary between China and U. S. in 2014

国别	社会人均 年工资	煤矿人员 年工资	煤矿人员年 工资/社会平 均年工资	煤矿从业 人员小时 工资	周工作 时间/h
美国	\$ 49 700	\$ 82 058	1.65	\$ 31.7	45
中国	¥49 968	¥56 929	1.13	¥20.6	>57

表2 2013年不同类型的煤矿从业人员文化程度

Table 2 Educational level of coal mine employees in different types of enterprise in 2013 %

项目	初中及以下	初中以上	大专及以上
	文化程度	大专以下	文化程度
全国从业人员	49.40	39.10	11.40
采矿从业人员	42.50	47.70	9.70
煤炭从业人员	60.00	29.00	11.00
中央企业所属煤矿	36.00	40.00	24.00
国有重点煤矿	43.20	45.00	11.80
地方国有煤矿	60.50	32.40	7.10
乡镇煤矿	76.80	19.60	3.60

1.7 实现产业循环经济,资源利用最大化

随着社会思想和技术进步,煤炭开采理念也发生了巨大变化,煤炭开采的一些副产品,如煤矸石、瓦斯、矿井水、地热等在传统意义上均作为废品处理,但是随着环保标准提高和资源逐渐紧缺,它们既是煤矿开采的副产品,同时也是宝贵的资源。如何最大化利用这些煤矿生产的副产品、延伸产业链,实现煤矿生产的大系统零排放,保持对环境友好非扰动也是科学开采所要求的基本内容之一。

煤矸石、瓦斯、矿井水、矿井热能利用与保水开采等方面已经取得了一定进展,但是利用的途径仍然过于单一,低浓度瓦斯利用、风排瓦斯利用、矿井热能利用等还有很长的路要走。

1.8 矿井全生命周期的科学规划与利用

煤炭的科学开采不仅仅体现在煤炭的生产过程中,而应该贯穿煤矿设计、生产、关井及矿井后续处理的全过程中。因此科学开采要求下的矿井科学规划与设计、资源枯竭矿井的关井及后续合理利用尤其重要,很多矿井生产中遇到的问题是由于矿井当初规划与设计留下的隐患,主要表现为矿井设计中的短期利益行为,缺少系统的科学规划。废弃矿井也是宝贵的资源,含有大量的可利用地下空间、矿井水、瓦斯气体等,同时地面也含有大量的塌陷土地资源。科学规划、合理开发、变废为宝,重振老矿区经济也是煤炭科学开采需要解决的问题之一。

2 煤炭科学开采现状

煤炭开采是大规模获取煤炭资源的基本方式,尽管从20世纪50年代世界上开始了煤炭地下气化研究,但是至今仍然没有进入商业化阶段,煤炭开采依然是采用物理方式,人和机电设备通过各种井、巷(露天开采的斜坡道)进入到采煤工作面进行直接开采为惟一方法。

2.1 国内煤炭科学开采现状

我国煤炭资源开发从20世纪90年代的可持续发展与循环经济到21世纪初的绿色开采,再到目前的煤炭科学开采的理念,历经20余年的探索,钱鸣高院士、谢和平院士等科学家对于推动我国煤炭的科学开采做出了巨大贡献。简单地说,可持续发展与循环经济侧重于煤炭产业链的延伸与无废排放,绿色开采侧重于煤炭开采与环境的协调与治理,科学开采包含更加广泛的内容,如开采技术、安全状态、环境保护与治理、经济与社会效益等诸多要素。钱鸣高院士等结合我国社会进步与煤炭开采现状,2003年提出了煤矿绿色开采^[1]、2008年提出了科学采矿的概念^[2-3],谢和平院士等2010年提出了煤炭科学产能概念及内涵^[6-7],为我国煤炭开采的发展提出了建设性意见。

2003年钱鸣高院士提出了煤矿绿色开采的概念、适用于煤炭绿色开采的技术,旨在尽可能的防止或减少煤炭开采对环境和其它负面影响,兼顾经济效益与社会效益协调发展^[1];印度学者A. K. Ghose认为中国专家提出的绿色开采技术可以改变煤矿开采作为环境破坏者的面貌。而后于2007年对绿色开采的概念和技术框架进行了完善,分别对减沉开采、煤与瓦斯共采、保水开采和矸石减排开采的技术体系及适用条件进行了研究,同时从经济与管理角度出发,分析了煤炭绿色开采存在的困难,为我国不同矿区的绿色开采提出建议与措施^[8-9]。2009年提出了“从点到面”实现煤炭绿色开采的内容,包括基础理论研究、关键技术研究、政府职责和国家法律法规研究^[10]。杜祥琬院士于2011年提出了能源的科学、绿色、低碳战略,认为能源的科学发展是依赖于强有力的科技支撑,即:基础性研究、技术创新、重大工程项目与战略性新兴产业支持^[11]。

2010和2012年,谢和平院士等针对我国煤炭行业在安全与环境等方面的社会形象不佳,提出了煤炭科学产能概念,以及论述了我国煤炭科学产能的规模、布局和发展潜力等,以促进我国煤炭工业可持续发展。提出科学产能是指在具有保证持续发展储量前提下,用科学、安全和环境友好的方法将煤炭资源最大限度采出的年度生产能力,并提出了我国煤炭向科学产能发展的战略部署和措施建议^[6-7]。

除上述的重要论述以外,笔者2011年提出了科学采矿人才培养基本思路,认为科学开采的实现是依靠技术进步和人才培养,而对于煤炭开采人才的培养首先要培养其科学开采的意识、知识和技能,要培养复合型人才。要有坚实的数学、力学、经济学的基础理论,也要有矿山机电、矿井通风与安全、资源与环境

等方面的知识,培养的人才不仅能够从事煤炭开采工作,也要了解矿业经济、资本运作与企业管理等知识^[12]。2014 年对煤炭科学开采的内涵给出了进一步的解释,认为实现煤炭科学开采的核心是支撑技术的发展和进步,如果没有技术进步,科学开采难以实现,总结了我国在厚煤层开采、煤与瓦斯共采、大倾角开采、充填开采、矿区微生物复垦和煤机制造等方面取得的长足进步,同时提出工人的作业条件不但要安全还要舒适^[4]。2012 年,李东印的博士论文“科学采矿评价指标体系与量化评价方法”构建了一些科学采矿评价指标,提出了研究科学采矿量化评价方法,用科学采矿指数(SCMC)和科学采矿等级(SCMR)从不同侧面反映矿井的科学采矿水平^[13]。2015 年王蕾的博士论文“煤炭科学开采系统协调度研究及应用”以煤炭科学开采定义和内涵为基础,提出了反映煤炭科学开采内涵的 STEEM 系统,即:安全(Safety)、技术(Technology)、经济(Economy)、环境(Environment)和管理(Management),首次将科学管理系统纳入煤炭科学开采主体系统,并对实际开采矿井进行了科学开采的评价^[14]。

总体来说,煤炭的科学开采是基于可持续发展理论、循环经济理论和绿色开采理论发展而来的,但有其独自的行业特征,更适用于煤炭行业。科学开采(采矿)这一名词从提出到现在不过 10 余年时间,但是已经被煤炭行业广泛接受,并在科学开采内涵、科学产能、支撑技术、科学开采系统、评价指标、人才培养的要求等方面开展了一些研究,许多已经达成共识,但仍有许多问题需要我们进行更高层次的讨论与研究,如科学开采指标的选取与量化、科学开采的标准、科学管理、政策法规、发展模式等,尤其是煤炭科学开采需要深入研究的基础理论问题等。

2.2 国外科学开采现状

国外并没有明确提出科学开采的概念,一般是以“可持续开采(Sustainable Mining)”和“责任开采(Responsible Mining)”的概念出现,与我国提出的科学开采有相似之处,即涉及到社会群体、经济、环境、安全、资源开采和利用效率等问题,但其着眼点在于资源与人类社会的和谐发展,以及与矿业开采、环境保护相关的法律法规制定。

1987 年首次定义了“可持续发展”的概念:“在保护环境的条件下既满足当代人的需求,又不损害后代人需求的发展模式”^[15]。社会、经济、环境协调发展是可持续发展的三大支柱。可持续发展的概念首次在矿业中提出是在 1992 年的里约峰会上,1993 年 Von Below 提出矿业可持续开采是通过不断的勘探,

技术的革新以及环境的修复来实现的^[16]。1995 年 Allan 在发表的《未来的可持续开采》一文中提出,可持续开采的实现一方面指资源使用率不应超过新探明资源率,另一方面指的是开采所占用地不应该破坏空气、水、土地和生物群,在开采前就应对环境进行控制^[17]。1999 年 James 进一步解释了可持续开采的内容,他认为可持续开采应包括社会、环境和经济 3 个方面。1999 年英国学者 Sarah J. Cowell 等在《可持续性与开采行业:理论与实践》一文中利用固定资本和机会成本理论对开采行业的可持续性进行了理论与实际的分析,聚焦于固定资本理论的生态学家、工程师和一些科学家认为有限资源的耗竭是不可避免的,而机会成本理论则认为资源可以通过替代品、循环利用和技术的进步来扩展资源的生命周期,因此资源枯竭并非不可避免^[18]。2000 年 Hilson 和 Murck 提出了可持续开采的 6 点建议:① 提升规划的重要性;② 促进环境管理;③ 实施清洁技术;④ 增加利益相关者参与;⑤ 构建合作关系;⑥ 增加员工培训。

进入 21 世纪以来,国外对可持续开采也有一些争论,主要集中在不可再生资源是否可以实现真正意义的可持续发展。2005 年 Rajaram 认为矿产是不存在可持续开采的,这主要是因为短期的集中开采所带来的价值高于资源的长期开采。对此 Rajaram 提出了对可持续开采的定义:只有平衡经济、环境和社会之间的关系时才能对矿产资源进行可持续开采,这三者的关系是一个“三角底线”。2007 年美国针对阿帕拉契亚地区露天煤矿开采展开争论,尽管该矿区提供了美国煤炭产量的 7%,为当地创造了就业机会,但同时也破坏了当地的生态环境,超过 800 m 的河流被填埋,到 2012 年为止,这种严重的环境破坏面积超过美国特拉华州(费城)的面积,煤尘和岩粉污染了当地的水资源,影响了空气质量。也正是因为这一矛盾,“可持续开采”一词在矿业中有所争议。

针对可持续开采是否能够实现的争论,2008 年 Jack A. Caldwell 在其《矿业可持续发展:情况与展望》一书中阐明了矿业可持续发展的概念,将可持续发展分为学术上的和实际上的,他认为学术上的“可持续”一词就是保持无限的发展,这实际是扭曲了其本质的意思,他认为矿业真正的可持续发展是在矿产资源被开采后或者闭坑之后,利用先进的技术,使得矿工依旧可以依赖其土地生活^[19]。2008 年波兰人 Wojciech Suwala 讨论了煤炭行业可持续发展的模型,构建了煤炭供给平衡系统模型,该模型由煤炭供给和煤炭平衡组成,其有利于对波兰煤炭行业的发展进行理性规划^[20]。2009 年 J. A. Botin 主编的《采矿可持

续开采管理》一书中阐述了矿业可持续发展的概念,应包括环境的可持续发展、经济的可持续发展和社会与文化的可持续发展,其中环境的可持续发展主要指自然资源有能力提供人类赖以生存的清洁环境;经济可持续发展是指保持或提升人们的生活水平,同时强调,以绿色 GDP 代替传统 GDP 来衡量经济发展;社会与文化的可持续发展强调社会公正,即如何分配采矿带来的经济效益与责任^[21]。2009 年 Laurence 和 Scoble 认为“三角底线”忽略了 2 个事实:安全问题和资源自身特征。对此提出了实现可持续开采的 5 个方面:经济、环境、效率、安全和共同体,可持续开采的实现必然是 5 个方面的协调发展,如图 1 所示。



图 1 可持续协调发展示意

Fig. 1 Sustainable and harmonious development

2012 年 Robert Goodland 认为在过去 20 a 中,煤炭行业一直以煤矿安全、环境修复和共同体关系 3 个方面来提升煤炭行业形象,但是却忽略了经济、社会和环境责任之间的关系,他认为,采矿是一个复杂的系统,如果不能做到技术、经济、环境和社会政治的协调发展,那么开采就不应被进行,对此 Goodland 在《责任开采:资源开发的关键》提出:不科学的采矿活动造成了社会成本的增加,责任采矿就是平衡经济、技术、环境和社会 4 个因素,而做到责任采矿包括了 8 个原则① 社会与环境的评价;② 信息透明度;③ 项目验收;④ 农业生产多于矿业开采;⑤ 符合国际标准;⑥ 企业开采权资格预审;⑦ 保险;⑧ 特许权使用费^[22]。

上述是国内外近些年来科学开采方面的一些主要观点和研究成果,国内是煤矿方面的,国外也涉及到一些其他矿产资源,但总体来说,国内的科学开采是兼顾安全、技术、环境、经济、社会、法规等方面,国外是侧重经济、环境、社会以及利益共同体等,图 1 是国外科学开采(责任开采)共同遵循的最新准则。图 2 可以简单地表达科学开采发展的 4 个发展阶段:可持续开采主要是指矿产资源储量的可持续性,新探明储量要大于开采储量,同时兼顾社会与环境;绿色开

采侧重于对环境的保护与修复;责任开采侧重于环境、社会以及法规的约束;科学开采是包含有安全、技术、环境、社会、经济、法规等多个方面的系统科学。

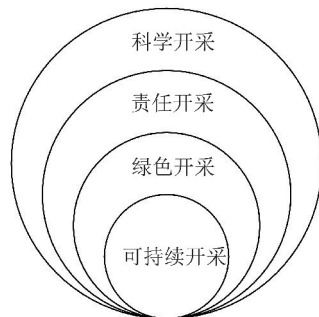


图 2 国内外煤炭开采发展阶段

Fig. 2 Developmental stage of scientific coal mining in the world

3 我国煤炭实现科学开采的途径

3.1 思想观念

近年来,煤矿生产观念已经发生了很大转变,从单纯重视生产与安全逐渐发展到重视安全、生产、环境、作业条件及社会责任等多个方面,思想观念有了很大进步,但是还远远不够,尤其是对煤炭资源的经济属性与价值重视不够,对我国煤炭资源的稀缺性认识不足,尤其是适合科学产能的,以及一些国家要求保护性开采的稀缺煤种的认识不足。煤矿开采对环境的深远影响以及需要承担的社会责任的认识尚有待加强。由于煤矿开采的特殊性,除具有生产产品、上缴税收、解决就业等企业基本属性外,还具有环境治理、资源综合开发与利用、资源枯竭矿井关闭与转产等社会属性,这就使煤矿企业的生产观念需要更加开放、更加系统、更加社会化,生产组织与对社会的影响等都必须从系统观点出发,因此可以说实现煤炭的科学开采更是一个系统工程。

3.2 技术进步

科技进步与推广应用是我国煤炭实现科学开采的先决条件。先进的开采技术要能够实现煤炭的安全、高效、高采出率开采,同时可以做到保护环境、减轻劳动强度,使一线生产人员摆脱繁重的体力劳动,极大改善一线生产人员作业条件。煤矿主要生产工艺要向自动化、智能化、无人化方向发展,同时也要更加重视辅助作业环节,如辅助运输、岩巷掘进、瓦斯抽采、水患防治的自动化与智能化。除了煤矿井下生产环节以外,技术进步也要面对环境治理、地下水保护与利用、开采塌陷的缓解与治理、开采塌陷区与矿井资源的综合利用等,技术进步要面对矿区规划、矿井

设计、矿井生产、矿井关闭等全生命周期的各个环节及对环境的各种扰动与修复。

3.3 法律法规

制订和执行合理的法律法规是促进煤炭实现科学开采的保障,法律法规的本质是约束企业或者个人的行为,通过对煤矿企业的合理约束、规范其开采与环境治理等的责任。从经济角度讲,实现煤炭科学开采就是意味着加大非生产要素投入,增加开采的间接成本,势必增加企业负担,这也要求国家在制订税收等相关政策时考虑企业所付出的社会成本和责任。科学开采的要求是我国煤炭行业近 10 a 提出来的,而煤炭的税收政策并没有考虑煤炭行业的特殊性,近些年来煤炭开采的安全成本、环境成本、社会成本大幅度增加,因此制订新形势下煤炭税收政策,让利于企业,使煤炭企业有能力自行支付安全、环境、社会责任等高昂的费用十分必要。以往政府有关部门收取了一定的各种费用,并没有真正起到作用,最后相关支出还是由企业承担。

法律法规的严格约束与法律法规的可操作性是辩证统一的,无法执行的法律法规不但不会促进企业发展,反而会扼制企业的发展,导致大面积违法。

3.4 基础研究与人才培养

加强煤炭开采的基础研究是促进煤炭行业实现科学开采的保障,煤炭开采的基础研究既有开采本身的基础科学研究,也有相关法律法规、资源经济、环境保护等方面的基础研究,建立适合我国煤炭自身特点的法律体系、经济体系、基础理论体系和监察监管体系等。在人才培养上,要分层次,既要有懂得管理、经济、资本运作、法律等的复合型人才,也要有肯于钻研业务的技术和科学人才,也要有适应煤炭信息化、自动化、智能化开采的操作人才。

4 煤炭开采的几个基础科学问题

煤炭开采是工程技术,但是从本质上讲,更是科学技术,许多科学问题并没有真正的研究清楚,如何进一步提升采矿工程的科学含量和更好地指导技术开发,必须在一些基础理论问题上有所突破。

4.1 采矿开挖卸荷与偏应力作用

煤炭开采的实质就是在地壳中进行大规模开挖活动,而且这种开挖在矿山服务年限内是持续的、动态的,各种开挖活动相互影响的。原有地壳中存在原岩应力,地下煤岩体在三向原岩应力作用下处于平衡状态,然而采矿开挖后,巷道或者采场围岩的某个方向原岩应力卸掉,导致其处于偏应力状态。在偏应力作用下,围岩会发生破坏,引起原岩应力重新分布,即

常说的采动应力。从这一过程可以看出,围岩的破坏并不是由于三向高应力作用而引起的,而是由于采矿开挖过程中某一个方向的原岩应力解除,导致围岩受力状态发生改变,从三向应力状态变为两向甚至单向应力状态,围岩单元体承受大的偏应力而造成的。随着采深增大,开挖卸荷后引起的偏应力更加严重,破坏更加剧烈,甚至发生冲击地压。因此采矿开挖引起的围岩力学响应,不应仅仅以对围岩的加载方式进行研究,而应更加重视受载后的围岩在某一方向卸荷所产生的力学响应与行为,力学计算中的本构关系也应结合卸载曲线进行研究。

4.2 采动应力场的动态变化及相互影响

采矿开挖不是单一开挖工程,在井田范围和采区范围内,有各种井、巷、硐室、采场进行开挖,各种开挖时间上有先后顺序,也有同时进行的。各种开挖形成的应力重新分布(采动应力)是相互影响和干扰的,这就给采矿工程的力学理论分析带来很大困难,甚至无法完成,因此人们只能借助于数值模拟。但是由于计算容量和速度限制,数值模拟时也很难真实地模拟多种开挖并存的情况,导致模拟的精度很难保证,甚至有时出现错误。

采矿开挖工程是一个动态开挖过程,采矿研究的是开挖过程中,开挖工程围岩的活动与稳定规律及控制原理,采动应力场是随开挖工程进行而动态变化的,对邻近已有工程的影响也是动态变化的。采矿工程的动态进行对原有围岩中裂隙影响及采动裂隙的产生也是动态变化的,这就使得采矿问题更加复杂,但这又是采矿工程的实际情况,必须加以考虑和认真研究,不能过于简化。

4.3 采矿支护工程的载荷边界

各种采矿开挖工程的围岩稳定控制是采矿领域的重要研究内容之一,尤其对于煤矿开采,煤系地层年代近,煤岩层强度低,围岩稳定控制难度大。围岩控制的主要方法就是支护,如采场的液压支架、巷道的金属架棚支架、锚杆锚索等支护物,那么支护上的载荷如何确定呢?在采场支护方面,钱鸣高院士提出了采用组合梁理论计算基本顶岩层的上覆载荷,并给出了载荷边界,这一计算是基于上覆岩层没有破断的条件下给出的^[23]。近些年来,的关键层理论也可用来指导采场上覆岩层载荷边界的计算。在巷道支护时,巷道近处围岩对支架施加载荷,但同时又可承受远处围岩的载荷,巷道围岩对支架既是施载体,又是承载体,对于采场亦有同样的问题,这种双重关系如何界定,如何量化其作用目前还没有好的办法。锚杆支护的基本原理之一就是使锚杆(索)加固的围岩对远处

围岩起到承载作用。当然支架上的载荷除与围岩的重量有关,更重要的是取决于围岩与支架的相互作用、二者的本构关系,这就是一个更加复杂的问题。

4.4 裂隙煤岩体

无论岩层还是煤层都会有大量的裂隙,煤岩的力学行为及破坏规律,很大程度上取决于煤岩体中裂隙的分布及发育程度,无论是顶板破断、巷道与采场的围岩破坏、顶煤破碎、底板突水等都与煤岩体中的裂隙分布有关系。在金属矿及水电领域,对岩体中的裂隙分布及影响研究相对多一些,但是在煤矿开采中重视不够,将煤岩体简化为均质各向同性的连续梁是其基本假设,然而煤岩体中的裂隙影响是巨大的,一方面大大地弱化了煤岩体强度,也影响着煤岩体的破坏方式。E·Hoek 和 E·T·Brown 于 1980 年提出的 Hoek-Brown 强度准则较充分地考虑到了岩体中的裂隙对其强度的影响^[24],但是对裂隙的产状影响考虑较少。除了工程中对裂隙影响的研究较少外,室内的基础研究往往也局限于单个或较少几个裂隙面的影响研究。当然真正精确定量地研究裂隙煤岩体的力学行为是很难的,从工程角度讲,可以采用宏观的统计方法进行研究。其中一个重要的难题就是快速、低成本地标定煤岩体中的裂隙分布,对于软煤层(硬度系数 $f < 1$),可以不考虑裂隙的影响。

4.5 煤岩破碎机理

采矿开挖工程涉及到 2 个相反的岩体力学行为,一个是开挖工程的围岩稳定控制,另一个是煤岩破碎。对于煤体而言,目前以机械破碎为主(采煤机、连采机、掘进机等);对于岩体而言,以机械和爆破方式破岩共存,尤其是硬岩($f > 8$),仍然是爆破破岩为主。如何实现煤矿硬岩的机械破碎并研发相对轻便的破岩机械,是未来煤矿采掘机械研发的重要方向之一。要实现硬岩的机械破碎,除增大破岩机械的功率和强度以外,还应从机械破岩机理等方面深入研究,寻找更经济、简便的破岩方式。

4.6 采场的系统刚度

采场的系统刚度思想不是一个新的概念,在经典的教科书中已有阐述^[23],认为采场的支架与围岩系统变形由支架、直接顶、底板的变形组成。其中支架和直接顶的刚度决定了各自变形量在系统变形量中的比例分配。这一研究主要是指支架与围岩在铅垂方向上的系统刚度关系,只涉及铅垂方向的变形量,没有涉及到破坏问题。采场的系统刚度研究还应包括采场推进的水平方向系统刚度研究,如煤壁、支架、采空区冒落的矸石刚度,以此研究上覆岩层载荷的比例分配,以及进行煤壁等围岩稳定

控制应采取的对策等。

4.7 冲击地压与顶板大面积来压

随着采深加大、开采条件复杂、地质构造影响等,我国煤矿冲击地压发生几率有所增加,近年来也成为了国内煤矿研究热点之一。但是在发生机理、预测预报和防治方法上尚有很大研究空间。我国的冲击地压主要是由于采动导致原岩应力场的不断变化,由此导致在孤岛煤柱、地质构造带应力场发生突然变化,有时坚硬顶板破断垮落也会引起冲击。这 4 种情形引起的冲击地压是有差别的,其发生的机理和防治方法也是有所差别。冲击地压和煤与瓦斯突出有时相伴而生,有时二者很难区分。冲击地压是一个非线性问题,难以预测。值得注意的是,坚硬顶板的大面积来压若没有诱发其他冲击地压发生,那仅仅是顶板来压,而不是冲击地压,尽管顶板垮落会对工作面支架等产生强烈冲击,但这仅仅是冲击载荷。

4.8 煤岩柱的长期强度及破坏机理

由于试验时间长和试验条件限制等,人们对煤岩体的长期强度研究较少。即便有所研究,也是局限于试件的室内测试。煤岩柱的长期强度是容易被忽视的一个问题,但是由于煤岩柱长期强度失效可能会引起严重的安全事故。近年来国内外发生了一些由于数十年前房柱法开采遗留的煤柱失稳破坏而导致的地面塌陷事故。目前国内在一些地面需要保护的矿区,又开始采用房柱法(旺格维利法),或者部分充填法开采。用充填柱代替煤柱起到支撑顶板作用,这也带来了煤柱或充填柱的长期强度问题。随着时间增加,煤柱、充填柱风化,在顶板压力作用下,煤柱充填柱表面会产生崩落、破坏,并逐渐向中间发展。当煤柱充填柱强度和尺寸不足时,可能导致柱核破坏,煤柱充填柱失稳,顶板载荷迅速转移到邻近的其它煤柱充填柱上,引起邻近煤柱充填柱失稳,并发生连锁反应,最终导致地面塌陷。因此研究煤岩柱及充填体的长期强度非常重要,是面向未来开采安全的重要基础研究。

4.9 深部煤岩体力学行为

煤炭开采走向深部是必由之路,尽管目前由于深部开采的许多科学和技术问题还没有解决,基于安全考虑,对深部开采做了一些限制,但是研究深部 1 000 ~ 2 000 m 高应力条件下岩体的力学行为与属性,对开挖工程与围岩控制的影响非常重要,更是面向未来的基础研究。

4.10 煤系地层共、伴生资源协调开采

煤系地层包含有许多共、伴生资源,如煤炭、煤层气、高岭土、油页岩、铝土矿、石墨、锆、铀矿、膨润土、

耐火黏土等,这些都是宝贵的矿产资源,如何在煤炭开采中,协调地采出其共、伴生矿产资源并回收利用是一个近年来才引起关注的课题,既要研究协调开采技术,也要研究开采的相互影响与制约机理、矿物分离的机理与技术,随着时间推移,矿产资源的消耗,这一基础研究更加重要。

5 结 语

煤炭科学开采是对煤炭行业的要求,也是煤炭行业健康发展的必由之路,在社会对安全、环保、资源采出率、开采效率和作业条件等要求越来越高的情况下,煤炭开采必须走科学开采的道路,要兼顾生产、安全、共伴生资源共同回收、环境、成本、作业条件等诸多方面,煤炭的科学开采是一项系统工程。

近 10 年来,国内外在科学开采方面取得了重要进展,国内侧重于生产、技术进步、安全、环境等方面,国外侧重于环境、经济、效率、安全和利益共同体等。国内在煤炭企业或行业的利益方面还没有给予足够的重视。

实现煤炭的科学开采需要从思想观念、技术进步、法律法规、基础研究与人才培养等方面入手。

煤炭开采是一项工程技术,更是科学技术,今后需要在采矿开挖卸荷与偏应力作用、采动应力场动态变化及其引起能量场的变化、深部煤岩体的力学行为、煤岩柱的长期强度、采场的系统刚度等 10 个方面加强研究。除此之外,现阶段在智能化开采的关键装备与元器件、煤炭资源经济等方面尚需加强研究。

参考文献:

[1] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4):343-348.

[2] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):1-10.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1):1-10.

[3] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报,2010,35(4):529-534.
Qian Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4):529-534.

[4] 王家臣. 煤炭科学开采的内涵及技术进展[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(1):5-9.
Wang Jiachen. The connotation and technical progress of scientific coal mining[J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(1):5-9.

[5] 武永峰,袁明慧. 2004—2012 年我国建筑施工事故统计分析

[J]. 价值工程,2014,33(21):96-98.
Wu Yongfeng, Yuan Minghui. Statistical analysis on safety accidents of building construction from 2004 to 2012 in China[J]. Value Engineering, 2014, 33(21):96-98.

[6] 谢和平,钱鸣高,彭苏萍,等. 煤炭科学产能及发展战略初探[J]. 中国工程科学,2010,12(6):44-50.
Xie Heping, Qian Minggao, Peng Suping, et al. Sustainable capacity of coal mining and its strategic plan[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(6):44-50.

[7] 谢和平,王金华,申宝宏,等. 煤炭开采新理念—科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报,2012,37(7):1069-1079.
Xie Heping, Wang Jinhua, Shen Baohong, et al. New idea of coal mining scientific mining and sustainable mining capacity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7):1069-1079.

[8] 许家林,钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科学导论, 2007, 25(7):61-65.
Xu Jialin, Qian Minggao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(7):61-65.

[9] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报,2007,32(1):1-7.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):1-7.

[10] 缪协兴,钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现在与展望[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(1):1-14.
Miao Xiexing, Qian Minggao. Research on green mining of coal resources in China: Current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1):1-14.

[11] 杜祥琬,周大地. 中国的科学、绿色、低碳能源战略[J]. 中国工程科学,2011,13(6):1-10.
Du Xiangwan, Zhou Dadi. China's scientific, green and low carbon energy strategy[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(6):1-10.

[12] 王家臣,钱鸣高. 卓越工程师人才培养的战略思考——科学采矿人才培养[J]. 煤炭高等教育,2011,29(5):1-4.
Wang Jiachen, Qian Minggao. Thinking of excellent engineer of talent training strategy——talent training of the scientific coal mining[J]. Meitan Higher Education, 2011, 29(5):1-4.

[13] 李东印. 科学采矿评价指标体系与量化评价方法[D]. 焦作:河南理工大学,2012.
Li Dongyin. Evaluation index system and methodology for scientific mining[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.

[14] 王蕾. 煤炭科学开采系统协调度研究及应用[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2015.
Wang Lei. Study and application on coordination degree of scientific coal mining system[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2015.

[15] United Nations. Report of the world commission on environment and development: our common future [R/OL]. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, 1987-03.

[16] Von Below M A. Sustainable mining development hampered by low mineral prices[J]. Resources Policy, 1993, 19(3):177-183.

[17] Allan R. Sustainable mining in the future[J]. Journal of Geochemi-

- cal Exploration, 1995, 52(1):57-63.
- [18] Cowell S J, Wehmeyer W, Argust P W, et al. Sustainability and the primary extraction industries: theories and practice [J]. Resources Policy, 1999, 25(4):277-286.
- [19] Jack A. Caldwell. Sustainable mine development: stories & perspectives [J]. Mining Intelligence & Technology, 2008(8):3-5.
- [20] Suwala W. Modelling adaptation of the coal industry to sustainability conditions [J]. Energy, 2008, 33(7):1015-1026.
- [21] Botin J A. Sustainable management of mining operations [M]. Littleton: Society for Mining Metallurgy & Exploration, 2009:19-26.
- [22] Goodland R. Responsible mining: the key to profitable resource development [J]. Sustainability, 2012, 4(9):2099-2126.
- [23] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [24] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. London: Klumer Academic Publishers, 2004.