

国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA062101)

国家自然科学基金资助项目(50504014)

江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)(SZBF2011-6-B35)

江苏省高校“青蓝工程”资助项目

# 薄煤层无人工作面 煤与瓦斯共采 关键技术

◎ 方新秋 著

非  
外  
借

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA062101)

国家自然科学基金资助项目(50504014)

江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)(SZBF2011-6-B35)

江苏省高校“青蓝工程”资助项目

# 薄煤层无人工作面煤与 瓦斯共采关键技术

方新秋 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统论述了薄煤层无人工作面煤与瓦斯共采关键技术,主要包括:薄煤层无人工作面采煤技术综述、无人工作面采煤系统模型与技术体系、无人工作面采煤机自主定位技术、自主定位系统误差分析与关键技术、低透气性高瓦斯煤层群薄煤层上保护层开采技术、薄煤层自动化无人工作面开采技术、保护层卸压及煤与瓦斯共采技术、沙曲矿区现场工业性试验。

本书可供从事采矿工程及相关专业的科研人员及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

薄煤层无人工作面煤与瓦斯共采关键技术/方新秋  
著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 -2112 - 4

I. ①薄… II. ①方… III. ①薄煤层采煤法 IV.  
①TD823.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 257244 号

书 名 薄煤层无人工作面煤与瓦斯共采关键技术  
著 者 方新秋  
责任编辑 王美柱  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 318 千字  
版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

矿产资源是国家经济发展的命脉,对矿产资源的开发和利用直接关系到国计民生。随着我国经济的快速发展,对矿产资源的需求也不断增大。经过多年的开采,我国不少地区矿井的中厚和厚煤层的储量已接近枯竭,而对于薄煤层(厚度小于或等于1.3 m)的开采,长期由于经济技术和安全等原因而处于缓慢发展的状态。我国煤炭储量中薄煤层的可采储量约为61.5亿t,占全国煤炭总可采储量的19%左右;然而,据不完全统计,我国薄煤层的年产量只占全国煤炭总产量的10.4%左右,产量与储量的比例严重失调。近年来,随着薄煤层采煤设备制造技术和自动化控制技术的提升,以及国家对资源合理开发利用的要求的提高,薄煤层的安全高效开采日益受到重视。为充分开发和利用有限的矿产资源,解决长期困扰薄煤层安全高效开采发展的“一大三低”问题,提高矿山企业的经济效益和社会效益,加大对薄煤层安全高效开采技术的研究和探讨显得十分必要。

无人工作面采煤技术是解决煤炭行业安全生产和可持续发展的重要途径,特别是对于我国长期发展缓慢甚至处于停滞状态的难采薄煤层的开采,具有重要战略意义。前苏联、美国、英国、德国等都相继进行了各种无人工作面采煤技术的研究和探讨。目前,我国薄煤层无人工作面采煤按采煤设备的种类进行分类,主要分为水力采煤、滚筒采煤机采煤、刨煤机采煤、煤锯采煤及螺旋钻机采煤等。对于综合机械化无人工作面采煤而言,主要存在着薄煤层矮机身与大功率之间的矛盾,采煤机自动定位、调高及煤岩分界自动识别技术、无人工作面配套设备协调运作、工况监测与故障诊断及灾后预测预报等关键技术发展缓慢的问题,导致薄煤层的安全高效开采很难实现。因此,需对薄煤层无人工作面采煤关键技术进行进一步的深入探讨和研究。

我国许多矿区都存在着低透气性高瓦斯近距离煤层群的开采条件,为了实现邻近高瓦斯突出性煤层群的卸压防突,充分开发利用难采薄煤层煤炭和瓦斯资源,常选择将薄煤层作为保护层进行开采。大量实践表明,开采保护层和预抽煤层瓦斯是有效地防治煤与瓦斯突出的区域性措施。将薄煤层作为保护层开采,结合自动化无人工作面开采技术,研发高效智能的采煤装备和监测监控系统,减少难采薄煤层工作面内作业矿工人数,最终实现井下采煤的无人化,从而开创难采薄煤层安全高效开采技术的新途径。

本书在前人研究的基础上,深入研究无人工作面采煤系统模型、技术体系及无人工作面采煤关键技术,其中重点对无人工作面采煤机自主定位技术和自主定位系统误差分析进行探讨和研究,建立了航位推算误差模型,提出了自主定位试验设计方案,并对试验结果进行了研究分析。以“砌体梁”结构模型为理论基础,运用理论分析、数值模拟计算和现场实测等方法,结合沙曲矿区低透气性高瓦斯近距离煤层群开采条件,对薄煤层上保护层、无人工作面采煤及卸压瓦斯抽采技术进行了研究,计算判别了薄煤层工作面开采覆岩关键层和“三带”,数值模拟分析了上保护层薄煤层开采的卸压保护范围和顶底板裂隙演化规律;分析了薄煤层无人工作面设备配套及布置,并对无人工作面自动化控制系统、监测体系、预测与评估体

系及生产组织进行了研究;构建了无人工作面煤与瓦斯共采技术体系,预测无人工作面卸压瓦斯的涌出量,并研究分析了煤层群卸压瓦斯的积聚和运移规律,提出了保护层本煤层钻孔瓦斯抽采、顶板高位钻场钻孔瓦斯抽采、沿空留巷墙体埋管瓦斯抽采及下邻近被保护层卸压瓦斯预抽技术方案。通过对薄煤层无人工作面采煤关键技术的研究,对于推动我国综合机械化无人工作面的自动化和无人化的进程,有效解决薄煤层开采中劳动强度大、机械化程度低、安全系数低及工作效率低等问题,都具有重要的战略意义。

在本书的撰写过程中,得到了东南大学万德钧教授、中国矿业大学屠世浩教授的具体指导和帮助;另外,还得到了中国矿业大学胡元博士,何杰、张斌、邹永铭、冯林、耿耀强、谢小平、刘晓宁、王刚等研究生的帮助。在现场期间得到了华晋焦煤有限责任公司和沙曲煤矿有关领导和工程技术人员的大力支持和帮助,提供了大量的资料和素材。在此作者表示诚挚的感谢!

书中还引用了一些前人的研究成果与实测数据,未完全标出,在此一并表示感谢!

由于作者经验和水平所限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请读者不吝指正。

著 者

2013年6月

<b>1 薄煤层无人工作面采煤技术综述</b> .....	1
1.1 我国薄煤层开采概述 .....	1
1.2 无人工作面采煤的定义与特征 .....	1
1.3 无人工作面采煤的研究现状 .....	2
1.4 无人工作面采煤方法的分类 .....	6
1.5 无人工作面采煤技术存在的问题与展望 .....	6
<b>2 无人工作面采煤系统模型与技术体系</b> .....	8
2.1 无人工作面系统模型 .....	8
2.2 无人工作面技术体系 .....	14
2.3 无人工作面采煤关键技术 .....	15
<b>3 无人工作面采煤机自主定位技术</b> .....	21
3.1 采煤机运动路线及自主定位系统原理 .....	21
3.2 采煤机自主定位系统概述 .....	23
3.3 传感器性能可靠性测试 .....	29
3.4 航位推算误差模型 .....	38
3.5 自主定位试验设计与结果分析 .....	42
3.6 采煤机姿态检测试验 .....	55
<b>4 自主定位系统误差分析与关键技术</b> .....	60
4.1 采煤机自主定位系统误差模型 .....	60
4.2 定位系统初始对准 .....	67
4.3 陀螺仪零偏补偿 .....	71
4.4 加速度计零偏补偿 .....	76
4.5 传感器数据预处理 .....	78
4.6 采煤机“地图匹配”技术 .....	80
<b>5 低透气性高瓦斯煤层群薄煤层上保护层开采技术</b> .....	86
5.1 沙曲矿区概述 .....	86
5.2 工作面概况与开采技术条件 .....	87
5.3 工作面覆岩移动规律 .....	89
5.4 工作面“三带”判别 .....	94

5.5	下伏煤岩体卸压分析	95
5.6	上保护层保护范围的确定	100
5.7	煤层群保护层开采裂隙演化规律数值模拟研究	104
<b>6</b>	<b>薄煤层自动化无人工作面开采技术</b>	<b>115</b>
6.1	沙曲矿无人工作面设备配套校核	115
6.2	无人工作面控制体系	125
6.3	无人工作面监测体系	144
6.4	无人工作面预测和评估体系	148
6.5	无人工作面生产组织	152
<b>7</b>	<b>保护层卸压及煤与瓦斯共采技术</b>	<b>158</b>
7.1	高瓦斯煤层群保护层煤与瓦斯共采理论	158
7.2	工作面瓦斯涌出预测	163
7.3	高瓦斯煤层群保护层煤与瓦斯共采技术体系	166
7.4	卸压瓦斯抽采技术	167
<b>8</b>	<b>沙曲矿区现场工业性试验</b>	<b>173</b>
8.1	综合监测内容及测站布置	173
8.2	无人工作面开采效果分析	175
8.3	巷道矿压监测结果分析	180
8.4	上保护层卸压开采效果分析	185
8.5	煤与瓦斯共采效果分析	189
	<b>参考文献</b>	<b>195</b>

# 1 薄煤层无人工作面采煤技术综述

## 1.1 我国薄煤层开采概述

我国薄煤层煤炭资源分布地域辽阔,煤层赋存状态比较复杂,水文地质条件也复杂多变。从我国现有煤炭赋存情况来看,薄煤层储量所占比重比较大,我国在近 80 个矿区的 400 多个矿井中,赋存着 750 多层薄煤层,保有工业储量 98.3 亿 t,可采储量 61.5 亿 t,约占煤炭总可采储量的 19%,其中厚度为 0.8~1.3 m 的缓(倾)斜薄煤层占 86.2%,厚度小于 0.8 m 的占 13.8%,中硬以下的薄煤层层数占总层数的 64.59%<sup>[1]</sup>。全国国有重点煤矿薄煤层储量为 25.29 亿 t,其中山西、河北、四川、内蒙古、贵州、东北和重庆地区,薄煤层储量达 5.01 亿 t。薄煤层煤炭总储量约占全国煤炭总储量的 18%,但产量只占总产量的 10.4%,远远低于储量所占的比例,造成了产量和储量比例的严重失调。近年来,虽然国家提高对资源合理开发利用的要求,薄煤层的开采日益受到重视,但形势仍然不容乐观,薄煤层的产量依然相对较低,且很难真正实现薄煤层的安全高效开采。

目前,我国薄煤层开采的机械化程度相对还比较低,大多还是采用炮采,产量低、事故多、工人的工作环境恶劣。薄煤层采煤机作为薄煤层开采机械,由于受其本身结构的限制,煤层厚 0.8 m 已是其开采下限,而且维修、操作不便,工人需在极低的工作面条件下跟机作业,劳动强度大、作业环境差。我国薄煤层的开采经历了几个发展阶段<sup>[2]</sup>:20 世纪 50 年代,薄煤层开采主要使用炮采工艺;60 年代,开始使用深截煤机掏槽,爆破落煤;70 年代,薄煤层机组得到较大发展,分别研制出不同类型的刨煤机,包括钢丝绳牵引刨煤机、全液压驱动刨煤机和刮斗刨煤机等;1974 年,研制成功 BM—100 型薄煤层滚筒采煤机;80~90 年代,研制了多种型号的刨煤机(包括滑行刨煤机和拖钩刨煤机),以解决薄煤层的开采问题,并在一些局矿的使用中取得了不错的成绩;90 年代,天府矿务局和徐州矿务局分别从俄罗斯和乌克兰引进了螺旋钻采煤机;2003 年,新汶矿业集团也引进了 2 台三钻头的螺旋钻采煤机,用于薄与极薄煤层的开采,使一些用传统采煤工艺不能开采的薄煤层、极薄煤层得到有效开采利用。近年来,我国在无人工作面采煤技术方面不断进行研究和探讨试验,铁法刨煤机综合机械化无人开采的成功,推动了我国无人开采技术的发展,无人工作面采煤技术将是薄煤层安全高效开采技术发展的新途径。

## 1.2 无人工作面采煤的定义与特征

国外一些学者给无人采矿下的定义是<sup>[3,4]</sup>:利用目前最先进的技术,包括地下通讯、定位、工艺设计、监视和控制系统来操纵采矿设备与采矿系统,其采矿工艺包括自动凿岩、自动装药与爆破、自动装岩、自动转运、自动卸岩和自动支护等,其技术基础是高速地下通讯系统



和高精度地下定位、定向系统(要求达到毫米级)。国内早期学者对无人工作面采煤技术下的定义为<sup>[5]</sup>:工人不出现在回采工作面内,而是在回采工作面以外的地点操作和控制机电设备,完成工作面内的破煤、装煤、运煤、支护和处理采空区等各项工序。

不同的国家、不同的时代以及不同的地质条件下,无人自动化工作面有自身的特征和内涵,国外主要研究金属矿山和露天采矿,国内早期研究主要是为解决薄煤层的开采。随着采矿科技水平的提高,针对中国矿井地质条件的复杂性,以综合利用煤炭资源和科学采矿为原则,提出现代无人工作面的定义为:在工作面安全专家系统的保护下,通过有线或无线方式远程控制关键生产设备,监测其工况,利用割煤设备(刨煤机或采煤机)的自主定位与自动导航技术、煤岩自动识别技术、液压支架电液控制技术、刮板输送机自动推移技术、工作面自动监控监测技术、井下高速双向通讯技术和计算机集中控制技术 etc 自动完成割煤、移架、移刮板输送机、放煤和顶板支护等生产流程,动态优化作业程序,实现工作面生产过程自动化、采煤工艺智能化、工作面管理信息化以及操作的无人化,仅当设备出现故障时,维修人员才会到达工作面,从而实现煤层的安全高效开采。

现代无人工作面的定义是建立在高度发展的科学技术和特殊应用背景之上,有其自身特征:

① 开采范围广:包括薄、中厚、厚以及特厚煤层,可实现薄煤层刨煤机无人自动化采煤、中厚或厚煤层一次采全高无人自动化及特厚煤层无人放顶煤开采。

② 开采困难煤层:无人工作面开采是解决薄煤层和高瓦斯煤层群安全高效开采的有效途径,在煤层群开采中,利用无人工作面开采高瓦斯煤层群,实现瓦斯的预先释放,降低瓦斯的浓度,既保证保护层开采安全,也实现被保护层的安全生产。

③ 传统采煤工艺和自动化技术的结合:以传统的采煤工艺为原则,利用现代科学技术丰富和改进传统的开采水平、管理模式、组织结构和采矿工艺。

④ 科学采矿技术:无人工作面是在先进、完善的矿压监测与控制系统、安全专家系统、灾害预测预警系统等保护下进行,以科学采矿思想为原则,实现资源的合理化配置,可实现零死亡。

⑤ 高度自动化、信息化、安全高效:整个生产过程采用先进的自动化技术和大功率的设备,自动化水平高、生产能力大、效率高。

## 1.3 无人工作面采煤的研究现状

### 1.3.1 国外无人工作面采煤研究现状

国外无人工作面的研究相对较早,特别是美国、澳大利亚和加拿大等国家走在了世界前面,他们的研究产品具有自动化程度高、性能好等特点,并经过了多次现场试验,都取得了良好的应用效果。

1971年,顿涅茨克煤管局利用刮刨机开采了倾角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的极薄煤层,工作面长100~120 m,由刮刨机采煤,开创了最原始的无人刮刨开采系统。使用该刮刨机刀柱式不支护采空区采煤工艺系统达到了平均日产量150 t,工作面工人劳动生产率12 t/工的效果。

澳大利亚是世界产煤大国,由于人口稀少以及煤炭开采条件好等特点,澳大利亚是最早探索无人自动化采煤技术的国家之一,并且在多个方面走在了世界前列。经过不断的技

改造和经验总结,澳大利亚在无人工作面研究中获得了良好的成果,并且在工业性试验中也取得了卓越的成效。例如,在澳大利亚南布尔戈煤矿,煤层平均厚度 2.5 m,煤质主要为洁净的动力煤和焦煤,由于采用了自动化采煤控制设备和监测设备,南布尔戈矿整个矿区只有 184 名工人,却创造了每人每年生产 12 500 t 煤的成绩,投产 2 年后的 1996 年该矿产煤 4.1 Mt。

近年来,国外的科研机构多采用联合研究的方式,对无人工作面技术进行深入研究,国外无人工作面研究的主要方向是智能化,其基本路线是遥控化→自动化→机器人化。自 20 世纪 80 年代中后期开始,加拿大诺兰达(Noranda)技术中心基于蒙特利尔大学实验室的原型设计,开始自动采矿技术的研究与开发,为金属矿床地下开采研制了多种自动化设备,2001 年,Noranda 在 Brunswick 矿的部分采场运输卡车上又试用了自动采矿系统 SIAM,取得了理想效果。这些技术及系统于 20 世纪 90 年代中期通过 STAS 公司在 Noranda 的 Bell Allard 矿和 Brunswick 矿得到推广应用。

20 世纪 90 年代初,芬兰赫尔辛基理工大学以产学合作的方式,通过了为期 5 年的“智能矿山技术”计划,开展自动采矿技术研究,包括全矿范围的信息与数据采集技术、高速双向实时监控通信技术、计算机化信息管理与生产计划控技术、自动采矿与设备遥控技术,以及这些技术系统与公共信息网络的通信接口技术。该研究计划在后续为期 3 年的“智能矿山”实施计划及奥托昆普(Outokumpu Oy)公司凯米(Kemi)铬矿的设计及生产中得到应用。这项计划的实施也将为以后必定要实现的自动化无人矿山的发展奠定基础。

1996 年,加拿大英柯(Inco,国际镍业公司)、芬兰汤姆洛克(Tamrock)和挪威太诺(Dyno)合作发起了一个采矿自动化计划(MAP),目的是有效地开发深部的或难采的矿产资源,减少交接班及进出矿井等无效工时,提高劳动生产率,降低作业成本,保障矿工安全。该计划得到了加拿大自然资源部采矿与矿物科学实验室(CANMET-MMSL)的支持,获得 350 万美元的配套经费并由实验室负责项目管理。

Inco 进一步研发了高级通信系统、采矿设备定位与导航系统、机器人掘进与回采、高级工艺与监控等方面的自动采矿新技术,包括井下 LHD、凿岩台车等机动设备的遥控技术,并在 Stobie 矿和 Creighton 矿进行应用,成为地下采矿自动化的先驱。该公司还与劳伦森(Laurentian)大学合作,应用 Auto Mod 仿真系统研究了采矿方法与遥控设备之间的相互作用关系,包括穿孔、爆破和装载等工序与开采顺序之间的相互影响。

1999 年 6 月,Inco 公司在 Stobie 矿和 Greighton 矿分别有 6 台和 8 台遥控采矿设备投入运行,该公司在地面的一幢大楼内设立了一个中央控制站,对该公司所属的多个矿山、多个矿体的开采活动进行集中控制。由此,地下矿山的采、掘、运均实现了无人作业,仅当设备出现故障时,维修人员才会到达采掘现场。

目前,加拿大 Inco 公司研制了无人工作面样机系统,并在安太略省的萨德泊里盆地的几家地下镍矿试用,实现了从地面对地下矿山进行控制,甚至可以从 400 km 以外的首都多伦多对地下镍矿的采、掘、运活动进行远距离控制<sup>[6-8]</sup>。

遥控采矿的核心部件是 Inco 公司开发的一个能在地下获取定位数据的 HORTA 装置,将该装置安装在地下观测车上,当观测车在地下或矿体内部巷道中移动时,HORTA 就会利用其激光陀螺仪和激光扫描仪在水平和垂直面上扫描矿山巷道的断面,进而产生巷道的三维结构图。Inco 公司还计划将 HORTA 完善后安装在钻机、浓缩机上。届时,

安装了 HORTA 装置的钻机将自动驶往目标巷道,自动完成开凿作业,然后再自动驶往下一巷道。

### 1.3.2 国内无人工作面采煤研究现状

我国是世界上的产煤大国,但由于我国煤矿地质条件复杂以及其他多种因素的影响,致使我国无人自动化采煤技术的发展相对较晚。经过长期不懈努力和探讨试验,国内的科研单位也相继开展了采矿机器人(MR)、矿山地理信息系统(MGIS)、三维地学模拟(3DGM)、矿山虚拟现实(MVR)、矿山 GPS 定位等方面的技术开发与应用研究,同时在我国的一些煤矿也相继开展了无人工作面的试验研究,其中还在我国无人工作面探索历程中产生了多个具有重要意义的<sup>[9-11]</sup>安全高效矿井。

西山煤电集团公司 2000 年引进一套 CH9.38Ve/5.7 型 DBT 自动化刨煤机,并采用走向长壁后退式一次采全高全部垮落法的刨煤机机械化采煤方法采煤。引进的该 DBT 刨煤机系统适于在 0.8~2.1 m 的薄煤层和较薄中厚煤层中使用。刨头沿工作面的全长自动运行,由主控台来控制,刨煤机减速箱上的计数器配合刨头导轨上的接触器开关持续不断地监控着刨头位置,并传送给工作面每个支架控制单元,主控台 MCU 不但可以控制全工作面,而且还可以在屏幕上监控输送机位置、支架位置、立柱压力、推移千斤顶的行程、刨头位置及运行方向。

在乌兰矿采用 DBT 刨煤机后,提高了工作面的产量,由于刨煤机运行速度快,刨煤速度达到 1.76 m/s,刨深 0.1 m,在 1.3 m 薄煤层中,最高日产量达 8 600 t,年产量可达 100 万 t 以上。同时还提高了工作效率,刨煤机、输送机、液压支架可实现自动运行,工作面内不需要人工操作,人员只需进行两端头维护,因此较普通采煤方法节省了许多人力,工作面效率可达 50 t/工。

龙口矿业集团北皂煤矿煤田延伸至海底,由于深部开采带来的巷道压力过大、地质构造复杂、支护难度增加等前所未有的困难,北皂煤矿采用尽量少的矿工的方法实现采煤,北皂煤矿无人工作面海底工程于 2001 年 1 月 1 日正式开工,首采面设在海域下 350 m,面长 150 m,推进长度 149 m。2005 年 6 月 10 日,北皂矿的 2101 工作面正式进行海下采煤联合试运转,这是我国历史上第一次海下采煤的正式开始,也是继美国、英国、加拿大、日本和澳大利亚之后,世界上第六个进行海下采煤的国家。该工作面于 2005 年 8 月 12 日试开采完毕,并停机撤面,经过 65 天的开采,北皂煤矿首采面共采煤 8.92 万 t,工作面回采率高达 94%。

铁煤集团于 2000 年 9 月从德国 DBT 公司引进一套 9—34VE/4.7 型滑行刨自动化控制设备,该全自动化刨煤机综采系统是目前国内薄煤层开采的最高水平,在国际上也是先进的。该系统于 2001 年 1 月 5 日至 2002 年 4 月 30 日在小青煤矿成功地进行了工业性试验,历经 271 个工作日,达到了年产 120 万~150 万 t 的水平。该系统的引进使我国成为继德国、美国之后,第三个拥有这种全自动化刨煤机先进技术的国家,为我国薄煤层安全高效开采找到了突破口。

神华集团神东煤炭分公司榆家梁矿 44305 工作面长度为 300.5 m,推进长度 2 298 m,煤层可采面积 690 579.1 m<sup>2</sup>,煤层厚度 1.7~2.0 m,平均厚度 1.85 m,倾角 1°,可采储量为 157.8 万 t。采用自动化综合采煤技术,采煤机、支架和运输机等主要设备的状态信息在 JOS(久益运输巷道控制系统)汇总,JOS 依据程序分析数据并做出处理,发出指令控制各设

备的起停。JOS同时可以在机头显示出各设备运行状态,实现机头操作人员远离工作面。自动化割煤时每个生产班按8个循环组织,检修班检修5h,剩余2h利用传统工艺割煤2个循环,每刀煤的截深为1.0m,产煤664t,这样日割煤18刀,产煤11594t。采煤机自动调整滚筒高度,不再需要生产班每班割煤前人工示范,也不需机头人员监视煤机割煤的视频信号,从而实现完全没有人工参与的自动化割煤。

2007年3月,我国首个具有自主知识产权的自动化、信息化采煤工作面在榆家梁矿投产,其中主要设备为:采煤机采用德国Eickhof公司生产的SL300电牵引采煤机,总装机功率979kW,采高1900~3940mm,最大牵引速度29.8m/min,电压3300V。该机组采用高性能计算机控制,对运行状态全过程检测、记录及显示。液压支架为配套的ZFe-35200/18/35支撑掩护式液压支架,前连杆为H形连杆;插板行程600mm,放煤口尺寸大;前梁带有伸缩梁和护帮板,伸缩值达800mm;液压系统采用双供回液系统和大流量系统;主要受力部件局部采用451cm<sup>2</sup>高强度钢板,支架的安全系数高。前后部刮板输送机采用SGZ-100011400(H)型中双链刮板输送机,电机功率2×700kW,链速1.28m/s,输送量2000t/h。该矿实现了年产800万t,回采工效300t/工,原煤生产工效18~20t/工,标志着我国煤炭行业安全高效矿井建设进入新阶段。

2011年10月薛村矿94702工作面开始安装综采数字化无人工作面,11月25日安装完毕,无人工作面初采长度为150m,煤层平均厚1.3m,选用G160/360-BWD交流变频电牵引采煤机、ZY330/07/13D薄煤层两柱双伸缩掩护式支架、SGZ-630/220中双链整体铸焊结构刮板输送机。50台矿用本安型摄像机分2组(采煤机视频和支架视频),均布安装在液压支架上;监控中心设在运煤石门附近,通信电缆和光缆分别敷设在运输巷和轨道巷与工作面设备相连;采煤机PLC与监控中心工控主机采用CAN总线通信,通信介质为MHYBVP矿用屏蔽通信电缆,波特率20kbit/s,最大传输距离1km,实现了采煤机记忆截割及远程控制、自动移架及推移刮板输送机和全景动态视频监控等功能。薛村矿94702无人工作面日产量4400t,月进度358m,月产量117000t。

2012年大力矿业有限公司5301工作面,煤层平均厚度0.65m,倾角2°~12°,采用单一走向长壁后退式采煤法,工作面采高1.0m,选用MG200/360-WD薄煤层采煤机、ZY3300/07/13D电液控邻架操纵或跟机自动化操纵支架、SGZ630/40型刮板输送机、SPJ-800型胶带输送机,监控系统采用中矿大华洋公司超低照度、高清晰、广角视频监控系统,实现了全煤壁连续监视;采煤机采用天择公司的远程控制系统;集中控制室布置在工作面结束线以外,集中控制室内放置视频监控、支架控制以及三级联动控制系统的相关设备,操作人员在集控室内实施远程监测、控制。

国内有许多专家在煤矿无人工作面采煤技术方面开展了研究工作,1997年中国矿业大学研制了用于煤矿井下安全钻孔的机器人;2000年山东科技大学研制了第1台煤矿机器人,它作为煤矿井下巷道或地下工程隧道的混凝土喷射专用设备,具有结构简单、操作方便、可靠性高等优点;2011年中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室提出了基于可见光图像和红外图像识别的煤岩界面识别方法:提取色彩、灰度、纹理、形状等图像特征,进行煤岩界面识别,并提出了基于图像识别的多参数信息融合煤岩界面识别方法,煤岩界面识别是实现无人采煤的关键技术之一,为实现无人工作面采煤奠定了基础。

## 1.4 无人工作面采煤方法的分类

无人工作面采煤方法的种类很多,分类方式也各不相同。目前,我国无人工作面采煤方法常按采煤设备的种类进行分类,主要将无人工作面采煤方法分为水力采煤、滚筒采煤机采煤、刨煤机采煤、煤锯采煤和螺旋钻机采煤等<sup>[12]</sup>。另一种分法根据开采时改变煤的聚集状态,将无人工作面采煤方法分为化学采煤和机械采煤,化学采煤以中国矿业大学王作棠教授研究的地下气化开采技术的影响较为突出。按工作面长度,将无人工作面采煤方法分为短工作面采煤和长工作面采煤。近年来,有些煤矿和研究机构将无人工作面采煤方法分为回采工作面无人采煤、工作面少人采煤及工作面定期有人采煤。采煤工作是煤矿井下生产的中心环节,选择合理的采煤方法,直接影响整个矿井生产安全和各项技术经济指标。因此,选择合理的无人工作面采煤方法应密切结合具体矿区地质及开采技术条件,并符合安全、经济、煤炭采出率高的基本原则。

## 1.5 无人工作面采煤技术存在的问题与展望

无人工作面采煤技术是标志一个国家煤炭科学技术发展的尺度,是技术密集型的产物,是代替传统劳动力密集型采煤的好方法之一,世界各国都十分重视,并相继投入了大批的人力、物力、财力来从事这一领域的研究。美国、前西德在 20 世纪 50 年代初就开始研制有关设备,前苏联 50 年代末开始研制。60 年代我国在江西、徐州、广东等地试验过煤锯采煤,开创了我国早期的无人化采煤技术;70 年代以后我国开始大力发展无人采煤技术;1989 年召开了全苏无人开采的全国性学术大会,对中厚、厚煤层进行无人开采及相关设备的研发提出了很好的方案和想法。

无人工作面采煤技术已发展到中厚煤层和厚煤层,远程控制采煤机、支架、闭路电视监测,机器人处理机械故障已在发达国家开始研制和开发。目前,我国对无人工作面采煤技术的研究主要还是针对难采薄煤层而开展,重点解决难采薄煤层开采时“一大三低”的问题。我国薄煤层约占总储量的 19%,而产量只占 10.4%,我国薄煤层的开采技术一直发展缓慢。在全国 95 个重点矿务局中有 80 个局 445 处矿井都赋存有薄煤层,薄煤层储量占总可采储量的 17.67%。全国国有重点煤矿薄煤层储量为 25.29 亿 t,其中山西、河北、四川、内蒙古、贵州、东北和重庆地区,薄煤层储量达 5.01 亿 t。因此,研究探讨薄煤层无人工作面采煤技术是具有战略意义的课题。

无人工作面采煤技术将是实现薄煤层安全高效开采的新途径,我国在无人开采技术方面一直在不断地努力发展和积极试验。铁法刨煤机综合机械化无人开采的成功,对我国无人工作面采煤技术起了带头和示范作用,推动了我国无人工作面采煤技术的发展,大大改善了煤矿工人的劳动作业环境和条件,降低了工人的劳动强度,技术经济效益和社会效益十分突出,为缩小我国与世界先进开采技术的差距起到了积极作用。近年来,我国很多矿区都积极开展无人工作面采煤技术的研究和现场工业性试验,但多数仅实现了采煤工作面内的无人化,而且在工作面设备出现故障或遇到设备不能适应现场条件时,须人工停机,并派工人到工作面现场进行处理,并需要对工作面内设备进行必要的定期检修和维护;另外,在巷



道掘进和支护工作面仍然需要大量的现场作业人员,从某种意义上讲还未真正实现煤矿井下的无人化采煤。随着我国煤矿顶板管理与自动化控制技术的突破,以及采、支、运设备的高度自动化与自动化监测监控技术的不断发展,相信以液压支架、滚筒采煤机为基础的综合机械化无人工作面采煤不久将在我国问世,实现通过有线或无线方式远程控制关键生产设备,利用割煤设备的自主定位与导航、煤岩自动识别、自动化监测监控、井下高速双向通讯和计算机集中控制等技术,实现工作面生产过程自动化、采煤工艺智能化、工作面管理信息化及操作的无人化,从而真正实现难采薄煤层的安全高效开采。通过对以上技术的研究,无人开采技术将会在我国更上一个新台阶,关键技术上会有更大的突破,从而更好地推动我国煤炭安全高效开采技术的发展。

## 2 无人工作面采煤系统模型与技术体系

我国煤矿无人工作面采煤技术发展的步伐与发达国家相比还有相当大的差距,无人工作面开采体系涉及采矿科学、采矿理论、采矿系统工程、GIS、惯性导航系统、自动控制 and 通信技术、信息技术、虚拟现实技术、可视化技术等方面的知识。针对我国煤矿企业现状,为解决中国煤矿开采技术装备普遍落后,煤炭资源回收率低、死亡率高以及“数字矿山”发展缓慢的问题,基于科学采矿理念,分析煤矿开采现状,研究存在的问题,提出高度自动化与传统综采工艺相结合的无人工作面的概念和系统模型,构建了无人工作面的技术框架,分析要解决的关键技术,包括采煤机自动调高、采煤机自主定位与导航系统、煤岩界面自动识别、井上一井下双向通讯、采煤工艺智能化、工作面组件式软件和模型以及数据库技术。

### 2.1 无人工作面系统模型

无人工作面是一个复杂的系统工程,它是不同领域技术的交叉和综合,完整的无人工作面系统模型通常由众多的分系统、子系统及零部件组成。通过采用结构化的方法,将它们按分系统、子系统、零部件等组织为一种层次结构,将系统分解为多个子系统。按功能流和数据流将其分解为:“三机”自动控制系统,“三机”工况检测与诊断系统,防尘、防水、防震和防爆系统,工作面灾害预测预报系统,“采煤—环境”安全专家系统,采煤工艺智能系统,数字化显示与更新系统,采矿模拟系统和决策仿真系统。无人工作面整个系统工程模型如图 2-1 所示。

#### 2.1.1 三机自动控制系统

采煤工作面的三机主要包括采煤机、液压支架和刮板输送机,实现三机自动控制是实现无人工作面的基础。采煤机是无人工作面设备的核心部件,实现无人工作面的关键技术就是研究适合煤层赋存条件的采煤机自动控制系统。采煤机的自动控制系统包括:自主定位、自动导航系统及自动调高系统。采煤机高速、精确自主定位导航技术是实现采煤机自动控制系统的核心<sup>[13]</sup>。液压支架电液控制系统是目前最先进的支架控制方式,集机械、液压、电子、计算机和通信网络等技术于一身,可实现拉架、推溜、打护帮板、收护帮板以及架间喷雾等随机联动自动化,以及自动控制液压支架动作,实现支架本架控制、邻架控制、隔架控制、运行状态和工作面矿压监测的远程控制等<sup>[14]</sup>。新型智能化刮板输送机在性能各方面取得了很大的发展,代表了当今世界刮板输送机的最高水平,实现了自动推移控制,同时向大型化、智能化、高可靠性及元部件标准化方向发展。

#### 2.1.2 三机工况检测与故障诊断系统

三机工况自动检测与故障诊断系统为实现三机在工作面安全运行提供可靠保障。采煤机智能化检测技术已经达到较高水平,大柳塔矿、东滩矿和寺河矿引进的 DBT、久益等公司

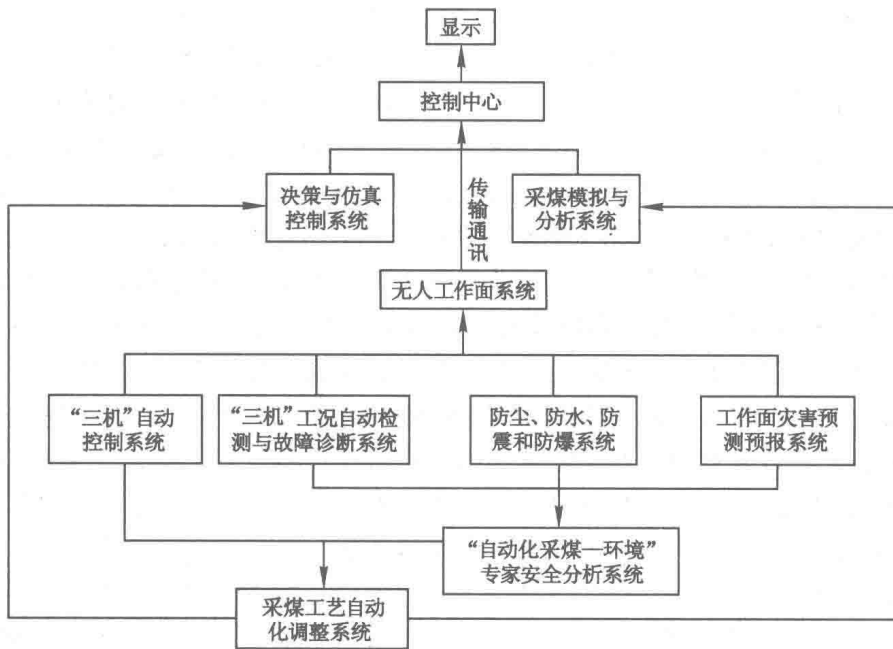


图 2-1 无人工作面系统模型

的新型电牵引采煤机具有建立在微处理机基础上的智能监控、监测和保护系统,在采煤机上安装有电压、电流、绝缘、牵引力、方向、位置、流量、压力、温度、湿度、速度、摇臂倾角及机身倾斜等传感器,可以检测 169 个采煤机的参数,可实现交互式人机对话、远近控制、无线电随机遥控、数据采集存储及传输、工况监测及状态显示、故障诊断及预警等多种功能<sup>[15]</sup>。液压支架 90% 以上的故障是液压系统泄漏,目前我国液压系统泄漏故障自动检测及其诊断技术发展比较成熟。刮板输送机的故障诊断和工况监测技术可以连续监测输送机各种部件的运行状态,进行故障诊断和报警,同时为解决刮板输送机的启动问题、功率平衡问题、过载保护和悬链问题,国内外公司研制出各种可控驱动装置和自动调链装置,采用 CST 可控驱动装置、ACTS 自动调链装置及工况监测系统,使其向智能化自动化方向发展,从而实现了功率大、事故率小、效率高和安全运行。

### 2.1.3 灾害预测预报系统

无人工作面灾害自动预测预报系统通过各种传感器对井下煤层厚度及其变化、顶底板岩层组合及其空间分布、构造(断层、褶曲)、矿井水文地质及瓦斯地质、煤层中的地质异常体(岩浆岩侵入体、岩溶陷落柱和煤层冲刷)、煤层夹矸、地应力、地温、工作面顶板状态、瓦斯爆炸、地热害以及由它们诱发的地震、突水、煤与瓦斯突出等进行监测。将监测信息传送至控制中心,利用预测评价软件系统和地质信息处理系统,为保证工作面的生产效率提供地质数据和分析判断,从而避免地质条件的复杂性和无序变化造成井下工作面事故的发生,保护井下各种传感器和精密设备安全。

回采工作面顶板冒落事故发生的主要原因是:受采动影响而失去平衡的顶板的破坏和运动;支护不及时;支护阻力不足或者稳定性差。因此,正确预测顶板失稳破坏运动的地点和时间,在顶板失稳运动前及时设置阻力足和稳定性强的支架,是顶板事故控制的关键



所在。按顶板塌垮运动和支架失稳破坏特征来分,顶板事故可分为压垮型事故(直接顶和基本顶顶来压时,支架抵抗力不足或承缩量不够被压损破坏造成顶板垮塌事故)和推垮型事故(直接顶和基本顶顶来压时,支架因稳定性不够被推倒所造成的顶板垮塌事故)。根据对压垮型事故和推垮型事故发生的条件和发展过程的分析,可知顶板事故主要发生在顶板来压发生和发展的过程中。基于顶板事故发生条件和发展过程的分析,结合实际控制过程的需要,回采面顶板事故预测和控制的主要信息基础包括:① 需控岩层的范围及其运动发展规律的信息,包括:直接顶厚度、第一次垮落和周期性垮落的步距、基本顶岩梁组成、相关岩梁厚度及第一次裂断和周期性裂断步距等;② 采场支承压压力大小分布及发展规律的信息,包括:煤壁前方压缩破坏也即“内应力场”出现的地点和时间,以及随采场推进扩展的规律等;③ 断层等构造破坏的位置及破坏特征,包括:断层的断裂走向、落差、倾斜角(特别是断层面相对工作面的夹角)以及贯通工作面的重大褶曲构造结构特征等。由此正确地预测顶板来压的地点、时间、强度以及可能发生的事故类型,在此基础上进行针对性的支护设计和顶板或煤层特殊处理方案,就成为顶板事故预防和控制的要点。

另外,煤层开采后,首先导致煤层和煤层附近地应力平衡系统遭到破坏,引起煤层和煤层附近地层中的裂隙不断发育、扩大,煤层上、下方的隔水层就可能因裂隙扩张而导通含水层,有可能形成突水通道,煤层的顶、底板就可能因裂隙扩张而出现冒顶、底鼓、自然垮落;煤层中吸附态的瓦斯就要以游离态释放出来,使得井下瓦斯含量增加。面对这些水文、地质条件随时间变化的复杂情况,在那些潜伏着不同地质灾害隐患的矿井(高瓦斯、煤层附近含水层有潜在水害、顶底板应力值较高),在管理、预防措施不当的条件下,井下事故就有可能因开采而发生。采煤工作面附近地应力的调整是导致其可能出现的地质灾害的内因。导致井下事故发生的另一个重要因素,就是在某段时间内区域应力场会突然增加,这种变化势必会加速采煤工作面附近地应力的突变,在一定程度上加速能发生井下事故水文、地质条件的形成。目前,世界上监测井下煤层开采地应力变化的方法很多,依据断裂面产生电磁波而出现了很多矿山采动岩层地应力变化监测系统<sup>[16]</sup>,就动态地质因素来讲,监测地应力、瓦斯浓度、低温、顶板下沉和离层成为主要的任务。在断层、陷落柱、软岩以及其他复杂地质构造带,工作面灾害预测预报系统显得尤为重要。

综采工作面综合监测系统的发展为无人自动预测预报系统奠定了基础。利用勘探资料分析和判断地质异常往往较为困难,近几年来发展起来的三维高分辨采区地震勘探资料经进一步处理,对上述地质异常体的空间分布有较好的反映;另外,便携式智能化地震仪、地质雷达和煤与瓦斯突出自动定位仪、三维三分量地震勘探工业性试验等矿井物探仪器为探测采煤工作面前方地质构造提供了条件<sup>[17,18]</sup>。通过建立相应的地质资料数据库和专家管理系统,并借助近年来发展起来的先进物探技术和钻探技术对存在的有关地质异常体和诱发工程灾害源进行进一步探测。但在顶板冒落、瓦斯与煤岩层突出时又往往难以准确预报,其原因是对顶板冒落地点、基本顶岩层地应力聚积部位和瓦斯聚积部位缺乏较全面的认识。在美国,配合高产综采技术装备,目前多配有由井下监控器、传感器、便携式地质雷达联合计算机转化处理器的全自动监控系统 GCMS(Ground Control Management System)。该系统采用多探头、多接收系统及计算机综合提纯技术,可获得较准确的超前岩性和小构造探测资料、煤厚变化和煤岩层分界资料。同时还能对开采过程中煤体负载压力及顶板力学性质、工作面矿压显现和瓦斯聚积等同时进行监控。灾害预测预报系统简单流程如图 2-2 所示。