

- 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目 U1361209
- 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 2013CB227903
- 国家自然科学基金项目 51410105002
- 王宽诚教育基金会资助项目



煤矿岩层 控制理论与技术进展

——33 届国际采矿岩层控制会议(中国)论文集

主 编 王家臣 Syd S.Peng

副主编 李 杨 左建平 陈 磊



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目 U1361209

国家重点基础研究发展计划(“973”计划) 2013CB227903

国家自然科学基金项目 51410105002

王宽诚教育基金会资助项目

煤矿岩层控制理论与技术进展

——33届国际采矿岩层控制会议(中国)论文集

主 编 王家臣 Syd S.Peng

副主编 李 杨 左建平 陈 磊

北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 提 要

本书收录了国际与国内煤矿开采岩层控制领域的学术论文 80 余篇,集中展示了国际采矿岩层控制领域近年来的发展方向与技术创新。会议主要议题包括采场围岩与岩层控制、巷道围岩控制、冲击地压及其防治、科学采矿理论与技术、围岩移动监控设备与软件开发、数值模拟、开采沉陷与控制、矿山岩石力学基础等。

本书可供煤矿开采方面的研究人员、工程技术人员、设计人员、管理人员阅读参考,也可作为高等院校采矿工程专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿岩层控制理论与技术进展:33 届国际采矿岩层控制会议(中国)论文集/王家臣等主编. —北京:冶金工业出版社,2014.10

ISBN 978-7-5024-6746-3

I. ①煤… II. ①王… III. ①煤矿开采—岩层控制—文集
IV. ① TD325-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 232381 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010) 64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6746-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 10 月第 1 版,2014 年 10 月第 1 次印刷

210mm×297mm;28.75 印张;950 千字;450 页

130.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

大会顾问委员会

钱鸣高 Syd S.Peng 宋振骐 周世宁 谢和平 张铁岗 彭苏萍
袁 亮 李晓红 蔡美峰 何满潮 何鸣鸿 吴 健 周心权

大会学术委员会

主 席：

钱鸣高 中国工程院院士

Syd S.Peng 美国工程院院士

杨仁树 中国矿业大学(北京) 教授、校长

副主席：

王家臣 缪协兴 周 英 朱德仁 王金华 刘 峰 姜耀东

何学秋 谢广祥 潘一山 冯 涛 郝传波 吴爱祥 翟桂武

于 斌 刘建功 张忠温 李 伟 马 耕

委 员：（按拼音字母顺序排列）

陈忠辉 傅 贵 冯国瑞 何富连 贺志宏 华心祝 姜德义

姜福兴 康红普 李化敏 李全生 梁卫国 孟国营 马念杰

马植胜 孟祥瑞 齐庆新 秦跃平 石必明 谭云亮 屠世浩

伍永平 王来贵 王卫军 许延春 杨忠东 张 农 张宏伟

赵庆彪 赵毅鑫 朱红青 周宏伟 左建平

大会组织委员会

主 席：

王家臣

副主席：

缪协兴 周 英 Tom Barczak 朱旺喜 宋 为 王红梅

委 员：（按拼音字母顺序排列）

Anton Sroka Axel Preusse 杜莉莉 Gerry Finfinger

郭文兵 侯运炳 Hani Mitri Hua Guo Jinsheng Chen

刘万会 刘洪涛 李成武 李振华 毛德兵 聂百胜

潘卫东 宋彦波 王春来 王 凯 许家林 杨 英

杨宝贵 杨胜利 杨大鹏 张 勇

前 言

煤矿开采首先要依靠科学的工程设计,并以安全、充分的岩层控制为基础,因此采矿岩层控制是采矿工程学科和工程实践的重要研究内容。采矿过程中不仅仅是要保证工作面、运输和通风巷道等围岩稳定和工作安全,还要研究和控制开采对环境的不利影响。如果不进行开采,地面就不会塌陷,地下水系不会被破坏,煤炭中赋存的瓦斯也不会析出和流动,也就不会发生瓦斯事故等。因此,所有的一切都是采矿开挖引起的,应该说采矿岩层控制是采矿工程中最关键和最基础的研究内容和技术。

国际采矿岩层控制会议(International Conference on Ground Control in Mining,简称 ICGCM)自 1981 年起在美国举办,至今已成功举办 33 届。鉴于我国煤炭开采技术的飞速发展,为了便于我国学者与国际采矿岩层控制领域的学者进行广泛交流,增强我国在采矿岩层控制领域的研究与应用水平,提升我国在国际采矿行业的国际影响力,经与 ICGCM 组委会协商,将定期在中国举办“国际采矿岩层控制会议(中国)”。

此次国际会议是第一次在中国召开。会议的目标是创建一个在煤炭开采岩层控制方面技术分享与讨论的平台。会议主席团由国内外采矿岩层控制领域权威专家组成,包括中国工程院院士与美国工程院院士。会议的交流内容不仅注重采矿岩层控制的基础理论,而且也重视煤炭开采方面的实际问题与前沿技术,将为世界采矿技术的发展产生重要的理论和实际意义。

会议从 2014 年 4 月开始征收论文至 2014 年 9 月,共收到来自中国、美国、加拿大、澳大利亚、德国、巴西、印度、埃及、英国等世界各地的论文 125 篇文章,通过大会学术委员会筛选,收录 80 篇论文。其中中文 62 篇,英文 18 篇。大会论文集分为两本,一本英文论文集,一本中文论文集。其中中文论文筛选出 18 篇文章,精简后由 Syd S. Peng 院士逐字修改并翻译成英文与 18 篇英文论文全文收录于本次大会英文论文集中。中文论文集收录了国际与国内煤矿开采岩层控制领域的中文论文 62 篇与 18 篇英文论文摘要。

会议组织会秘书李杨、左建平、陈磊、赵毅鑫等做了许多具体工作,尤其是李杨博士在会议的组织、论文征集与出版等方面做了大量工作,并于今年 7 月专程到美国 33 届 ICGCM 上宣讲会议筹备情况。Syd S. Peng 院士给出了许多建设性建议和指导,亲自翻译了 17 篇中文文章摘要,广泛宣传这次会议,对提升会议的国际性做出了重要贡献。

目 录

国际采矿岩层控制会议背景与中国煤矿岩层控制进展	王家臣	Syd S. Peng	康红普	1
-------------------------	-----	-------------	-----	---

1 采场围岩与岩层控制

错层位巷道布置新技术的应用与岩层控制理论	赵景礼	田 柯	刘宝珠	王志强	宋 平	崔 帅	9
液压支架承载特性及其适应性分析	李化敏	蒋东杰	Syd S. Peng	冯军发	14		
近距离煤层群下向开采应力-裂隙场演化叠加效应试验研究							
	杨 科	刘千贺	刘钦节	闫书缘	孙 力	22	
覆岩结构完整性对沟谷中浅埋煤层开采矿压影响规律的模拟研究							
	张志强	许家林	赵红超	刘洪林	吕金星	29	
浅埋煤层采场矿压研究综述与展望				汪华君	朱恒忠	35	
深部岩层渐进破断机理及塑性铰理论研究	左建平	魏 旭	杨胜利	王春来	李 杨	苏海成	41
近距离上保护层开采卸压效果研究		张 村	屠世浩	袁 永	刘安秀	47	
断层相似模拟试验的声发射信号特性研究	张宁博	齐庆新	欧阳振华	赵善坤	王永仁	53	
深井大采高工作面超前支承压力分布规律研究			程志恒	吴 波	季文博	61	
分层放顶煤开采区段煤柱留设对冲击矿压影响分析	苏振国	窦林名	焦 彪	丁言露	卢 昊	68	
工作面顶板灾害预测预警技术	徐军见	郭江涛	刘亚辉	蔺增元	汪开元	74	
钱家营矿综采面冒顶影响因素分析及控制措施				李 擎	于子江	79	
大采高综采工作面末采阶段来压规律与顶板控制技术		孙中光	李良红	李少刚	田灵涛	83	
近距煤层重复开采覆岩三带的划分与地表沉陷观测	王志强	张嘉文	陈福勇	胡 勇	赵德义	91	
巨厚含水岩层顶板损伤破断冲击隔水层突水机理分析		魏立科	李宏杰	毕忠伟	96		
浅埋深综放工作面支架运转特性及适应性分析	师皓宇	田 多	徐嘉荣	姚瑞强	103		
松散承压含水层下采煤覆岩结构失稳致灾机理及防治	王晓振	许家林	朱卫兵	107			
汾源煤矿5号煤层顶煤冒放性分析及煤壁片帮的防治措施				孟旭刚	120		
综放工作面注浆加固风氧化端面顶板理论与实践	田 多	师皓宇	赵启峰	徐嘉荣	姚瑞强	128	
大采高综放煤壁片帮及支架结构参数影响分析			庞义辉	王国法	134		

2 巷道围岩控制

薄煤层沿空留巷巷旁充填体参数的合理确定	卢前明	槐衍森	王海洋	王明明	143
潞新矿区冲击性巷道矿压显现特征及大变形控制技术	褚晓威	吴拥政	149		
断层破碎带近灰岩掘进巷道破坏机理分析及围岩修复控制技术	陈 贵	陶金勇	孙荣贵	156	
上巷充填开采巷道稳定性研究			杜学领	164	
深部软岩巷道长锚杆支护技术	李 飞	刘克安	172		

软岩大断面交岔点整体锚杆支护技术及工程应用	石建军 张 军 王金国 郭志彪	177
汾源煤业 5 号煤层大巷保护煤柱合理尺寸的计算研究	张红义	185
坚硬顶板沿空留巷巷旁支护技术研究	蔡来生 庞绪峰	192
弯曲式可伸长锚杆拉伸力学性能试验研究	王 斌 曾泽民 曾国正 王卫军 赵伏军 樊宝杰	198
沿底掘进厚煤层巷道围岩变形特征与控制对策研究	方树林	203
含水率变化引起软岩巷道围岩应力场演变规律研究	王 波 刘德民 左建平 李 杨	209

3 科学采矿理论与技术

千万吨矿井安全高效绿色开发评价模型	王国法 庞义辉	217
固体充填采煤回收房式煤柱理论研究	张吉雄 周 楠 严 红 曹远威 黄艳丽	223
浅埋煤田采空区地下水库水资源转移存储技术	马立强 梁继猛 王 飞 孙 海 苗乾坤	230
隐马尔可夫模型在煤矿事故案例推理中的应用探究	魏永强	237
采空区隔离充填开采方法	轩大洋 许家林	244

4 围岩移动监控设备与软件开发

井下水力压裂煤层顶板应力监测及其演化规律	卢义玉 程 亮 葛兆龙 丁 红 陈久福	257
多重交向近景摄影测量在相似材料模型中的应用	杨福芹 戴华阳 邹定辉 杨国柱 王 潇	263
煤矿采空区覆岩破坏井地联合立体监测及控制技术	黎 灵 李 文 张 彬	269
基于地质雷达的浅埋煤层群开采相互影响	张春雷 郁志伟 魏春臣 刘亚东	276

5 数值模拟

近水体下采煤三维动画仿真	许延春 李卫民 刘世奇	287
条带充填与沿空留巷开采技术的数值模拟	潘卫东 张 通 贾尚伟	293
单口放煤崩落开采的有限-离散元数值模型	胡邵凯 张振宇 陈燕伟 冯吉利	303
基于摩擦滑动的顺层偏压隧道大变形数值模拟	顾义磊 李清淼 吴文杰 史配乌	308
树脂锚杆锚固体损伤无损检测的实验与数值模拟研究	李青锋 朱川曲	314
煤层气协调开采数值模拟分析	张风达	321
“三软”厚煤层综放工作面护巷煤柱尺寸的数值模拟研究	李金贵	328
富水覆岩采动裂隙导水特性模拟分析	王 文 李化敏 黄祖军 李东印	334
CDEM 数值方法在煤矿采场矿压及岩层运动中的应用	袁瑞甫	342

6 开采沉陷与控制

“三软”煤层开采地表沉陷规律及参数研究	郭文兵 白二虎 马晓川	357
基于地表建筑物允许变形的充填量优化计算	姜 岩 Axel Preusse Anton Sroka 姜 岳	365
文明煤矿地表建筑保护煤柱尺寸的留设	姚建伟	369
立井下采煤上覆岩层沉陷控制标准及应用研究	唐 海 黄靖龙	376
“采-充-留”耦合单侧充填开采煤柱失效宽度试验	郭俊廷 戴华阳 杨国柱 吕小龙	383

7 矿山岩石力学基础

卸荷条件下预制裂纹大理岩的破坏过程试验	宋彦琦 李 名 王 晓 郝亮钧 孙 川 周 涛	393
泥岩遇水损伤的微观机理	杨建林 王来贵 李喜林 张 鹏	400
不等长双裂隙相互作用下岩石破坏规律研究	马 宁 陈忠辉 朱帝杰 李 博 张闪闪	406
基于 CT 数字体散斑法的岩石内部三维应变场测量	毛灵涛 刘海洲 牛慧雅 邓淋升 周开渊 张 毅	413
岩石蠕变损伤模型	魏 霞 万 玲 齐正磐	420
采动裂隙宽度与岩体变形关系探讨	张广伟 李凤明 李树志	425
高压水射流钻切煤岩效率的相似试验研究	刘佳亮 司 鹤 薛永志 周 维	432

8 国外论文摘要

In Situ Assessment of Roof Bolt Performance——A New Load Monitoring Technology	Hani Mitri Wenxue Chen	441
Performance of Chock Shield Supports in Longwall Mining——A Case Study	S Jayanthu Lalit Kumar. D Samarth S Sukanth. T	441
A Method for the Design of Gateroad Roof Support with Case Studies	Lawrence William Collins Enwere Arthur Dybowicz	442
Numerical Modelling Methodolgy for Design of Coal Mine Roof Support	Lawrence William	442
Field Monitoring of Roof Strata and Longwall Overburden in Underground Coal Mines	Baotang Shen Hua Guo Xun Luo	443
Soviet Experience of Underground Coal Gasification Focusing on Subsurface Subsidence	Y. G. Derbin J. Walker D. Wanatowski A. M. Marshall	443
Comprehensive Yieldable Support System in Deep Mine	Yajie Wang Li Tan Dongyin Chen	444
Analysis of Blasting Damage in Adjacent Mining Excavation	Nick Yugo Woo Shin	444
3D Time Dependant Numerical Model for Simulation of Soft Floors in European Mining Situation	Dariusz Wanatowski Alec Marshall Rod Stace Yudan Jia	445
Selection of Pumpable Cribs for Longwall Gate and Bleeder Entries	Alan A. Campoli Jennmar	445
Current Geotechnical Issues in Open Cut Mining of Desert Area in Mongolia	Akihiro Hamanaka Tsedendorj Amarsaikhan Naoya Inoue	446
Support of Solving the Problems of Abandoned Mining Areas in Germany by Improvement of the University Education	Michael Hegemann	446
Study on Surface Subsidence due to Longwall Mining Operation under Weak Geological Condition in Indonesia	Hiroshi Takamoto Takashi Sasaoka Hideki Shimada	447
The Gate-raod Support in Yunjialing Mine under Soft Strata and Deep Cover	Yonghui Chen Yajie Wang Bin Zhao	447

Development of Ground Strain Predictions due to Longwall Mining in the Illinois Basin	
..... Michael Karmis Zacharias Agioutantis Daniel Barkley	448
Rock Characterization while Drilling and Application of Roof Bolter Drilling Data for Evaluation of Ground	
Conditions..... Jamal Rostami Sair Kahraman Ali Naeimipour Craig Collins	448
A Holistic Examination of the Geotechnical Design of Longwall Shields and Associated Mining Risks	
..... Russell Frith	449
Update: Analysis and Case Study of Impact-Resistant (IR) Steel Sets for Underground Roof Fall Rehabilitation	
..... Dakota Faulkner Jinrong Kevin Ma John C.Stankus	450

国际采矿岩层控制会议背景与中国 煤矿岩层控制进展

王家臣¹ Syd S.Peng² 康红普³

(1. 中国矿业大学(北京), 中国; 2. 西弗吉尼亚大学, 美国; 3. 天地科技股份有限公司, 中国)

1 国际采矿岩层控制会议背景

国际采矿岩层控制会议(International Conference on Ground Control in Mining, 简称 ICGCM)是由美国西弗吉尼亚大学、美国工程院院士 Syd S.Peng 创立的, 并于 1981 年召开了第一届会议, 每年一次会议, 至今已经召开了 33 届。

Syd S. Peng 经过在中国台湾的 4 年井下煤矿工作后, 1965 年到美国, 1970 年获斯坦福大学采矿工程专业博士学位。1974 年, 进入美国西弗吉尼亚大学工作, 1978 年到 2006 年担任采矿工程系主任, 从事煤矿开采的研究工作。在阿巴拉契亚的煤矿研究时, Peng 发现很多从业者不知道什么是岩层控制技术, 也不知道什么岩层控制技术可行。与此同时, 许多研究成果也和阿巴拉契亚煤田的生产实际不一致。由于美国的煤矿全部是机械化开采, 所以矿井设计首先是根据开采技术装备进行的, 其次是岩层控制。大部分岩层控制的设备都是由制造商开发的, 任何新产品在煤矿使用之前都必须由监管机构批准。因此, 为了岩层控制技术与设备的发展, 迫切需要一个供大家交流的平台, 这个平台能为研究人员、从业人员(煤矿和相关咨询公司)、设备制造商和政府监管部门人员提供定期交流的机会, 并且能及时交换岩层控制领域相关信息, 因此就有了每年举办一次会议的想法。在向美国采矿工程师学会(SME)、美国矿业局(USBM)、美国岩石力学学会请求在他们的年会中多加入采矿岩层控制的论文失败后, 在 1981 年夏天, Peng 决定独自举办第一届采矿岩层控制会议(这里强调的是“采矿”)。第一届和第二届会议举办得非常成功, 因此美国岩石力学大会主办方邀请 Peng 加入他们的行列。因此, 第三届会议与第 24 届美国岩石力学大会在西北大学联合举办。由于来自矿山企业的参会人员非常少, Peng 决定还是单独举办专注于“采矿”的会议, 这才是对采矿岩层控制发展唯一可行的道路。为了寻找相应的赞助, 1984 年的会议没有举办。在 1985 年, 美国矿业局和美国矿山安全与健康监察局(MSHA)联合赞助了第四届的会议。至此之后的会议确定在西弗吉尼亚州的摩根敦(Morgantown, WV), 每年举行。1989 年, 西弗吉尼亚大学作为第 30 届美国岩石力学大会的主办单位与第八届采矿岩层控制会议同时举行。因此, 第八届会议论文集合并在美国岩石力学大会的论文集中。

伴随着会议的成长, 有越来越多来自世界各地的参会者。为了反映会议的国际性, 在 1987 年第六届会议上, Peng 将会议的名称改为“国际采矿岩层控制会议”(ICGCM)。

在过去的 33 年里, 只有三届会议没有在摩根敦举行。除了 1983 年的第三届会议在美国西北大学举办外, 还有 1992 年的第 11 届会议由澳大利亚卧龙岗大学主办、1996 年的第 15 届会议由科罗拉多矿业学院主办。1997 年, 组委会认为西弗吉尼亚州摩根敦是 ICGCM 最好的举办地, 并一致投票决定永久留在西弗吉尼亚州摩根敦。

ICGCM 大胆地处理各种采矿相关问题, 并促进了许多采矿相关的创新理念, 包括法律、勘探、地质、露天和地下开采等各个方面; 也已经向美国采矿行业推出了很多新的岩层控制技术, 其中一些至今已经成为了美国行业标准。因此, ICGCM 已真正被公认为岩层控制技术创新的最佳论坛。

每一届参会人员都来自于世界各国与矿业开采相关的行业, 包括学术界、企业与顾问公司、政府人员、制造商、矿业生产者、研究人员, 以及采矿技术服务供应商等。事实上, 过去的 33 年里, 参会的采矿专业人员来自 35 个国家共计 6 千多人次。会议中会有许多激烈的辩论。每届参会者大多会坚持参加完所有的技术交流与讨论直到会议结束。它是真正的年度论坛专业人士之间的交流。

对于 ICGCM 的会议论文集, Peng 教授会亲自认真阅读每一篇文章, 无论在论文的学术上还是论文撰写与编辑, 都会提出修改意见, 并与作者交流互动, 使文章更加流畅, 格式统一, 最重要的是, 在技术理论

上是正确的。近年来，组委会成员会协助审核一些论文。

ICGCM 促进了采矿设计中岩层控制的核心地位，岩层控制成为了采矿工程的标准术语，它取代了传统的“顶板管理”。岩层控制不仅涵盖了顶板、两帮和底板控制，也包括从煤层底板直到地表的各岩层开采运动。有了这个概念和思想路线，当面对一个岩层控制问题时，正确的思路是，应考虑更广泛、更合适、更持久的解决方案。

“岩层控制”是采矿工程的主要理论和技术学科，但是仍然需要面对许多挑战，许多相关的基础问题仍然没有解决，产学研相结合的理论与实践尚需继续改进。为此，Peng 与美国采矿工程师学会（SME）于 2005 年建立了每年的 Syd S. Peng 采矿岩层控制奖和奖学金，以促进和鼓励岩层控制技术和教育的持续发展。

ICGCM 作为国际性会议，每年都有来自世界各国的 250~350 名代表参加会议，会期 3 天，会议不设分会场，每届会议有 50~55 人做大会报告。中国作为矿业大国，尤其是煤炭开采产量占到了全世界煤炭产量的 48%，对 ICGCM 十分关注，钱鸣高院士、宋振骐院士、李鸿昌教授、朱德仁教授、吴健教授、王悦汉教授、侯朝炯教授、史元伟教授等老一代采矿与岩层控制专家都参加过 ICGCM，并作了有关岩层控制方面的报告。近年来一些中青年采矿科技工作者也踊跃参加 ICGCM，每年大约有 5~10 名来自中国的参会者。在今天的美国 33 届会议上，首次设立了中国单元（Chinese Delegation Presentation and Conference Update），我被邀请作为中国单元主席，冀中能源集团刘建功副董事长作了“中国煤矿充填开采技术进展和在地表控制中的作用”、我作了“中国煤矿地下开采技术进展”、中国矿业大学王方田作了“浅埋煤层房柱采空区下长壁开采的覆岩运动规律”的大会报告，中国矿业大学（北京）李杨详细介绍了今年的 ICGCM（中国）准备情况，受到与会者好评，并认为设置中国单元很成功。

随着中国煤矿开采与岩层控制技术发展，借鉴世界先进的矿山岩层控制理论和技术、与世界各国进行广泛交流越来越迫切，为此我在 2011 年参加第 30 届 ICGCM 时，与 Syd S. Peng 和 ICGCM 组委会协商，决定在中国举办 ICGCM（中国），由中国矿业大学（北京）、中国矿业大学、河南理工大学轮流主办，为中国广大采矿科技工作者、从业人员等提供与世界采矿界学术交流的平台，也可以展示近年来中国在采矿与岩层控制方面的进展，为此有了这次 ICGCM（中国）的成功举办。

2 煤矿岩层控制的研究内容与方法

2.1 煤矿岩层控制的研究内容

众所周知，煤矿及其他固体矿床开采分为地下开采和露天开采。在中国，煤矿地下开采占主体，大约全国煤炭产量的 85% 来自于地下开采，2013 年约为 32 亿吨。美国的地下开采产量约为全部煤炭产量的 40%，产量为 3.7 亿吨。世界各国煤炭地下开采的比例不同，一般为 40%~60%。无论是地下开采还是露天开采，都可以归结为大规模开挖岩体活动，这必然涉及开挖空洞的围岩及上覆岩体活动规律与有效控制问题。由于煤炭的沉积形成原因，煤系地层主要是层状岩层，偶尔会有一些岩浆等侵入改变岩体性状，所以在煤矿的开挖空间围岩与上覆岩体控制中，通常称为岩层控制。在一般的意义上，人们通常将涉及采矿开挖空间周围的、对开挖空间围岩变形等有直接影响的岩层控制问题称为采矿围岩控制，而对于开挖空间上面的、且对开挖空间直接影响较小的、直至地表的岩层控制问题称为岩层控制。在中国一般情况下，煤矿的围岩控制问题主要是由从事采矿的人员进行研究，而岩层控制主要是由从事“三下”开采的人员研究，当然这里面有很多是相互交叉的。在欧美等国，这种研究界限十分模糊，或者说都是由从事采矿的人员进行研究。在中国的金属矿山领域，围岩与岩层控制问题也同属于采矿工程领域。

在这里，岩层控制是指围岩与上覆岩层控制的统称。对于地下开采而言，岩层控制涉及采场、巷道、硐室及井筒的顶底板与四周的围岩控制，以及开挖空间，主要是指采空区上覆岩层和地表的变形控制问题。对于露天开采而言，岩层控制主要是露天矿采场边坡和排土场边坡的稳定控制，有些露天矿也会涉及在边坡岩体中掘进的运煤、运岩巷道或者溜井、破碎硐室等工程的围岩控制问题。

岩层控制的核心就是以少的人力、物力、资金等的投入，利用采矿和矿山压力科学规律，控制采矿开挖空间及上覆岩层的变形、移动与破坏等，保证采矿作业人员、设备等的安全；保证采矿开挖的各种工程正常发挥其效能；减少对地面的沉降与损害，保证地面农田、森林、建构物等正常使用。

岩层控制的基本对象是岩体，岩体运动和破坏的根本原因是采矿动态开挖工程活动，因此岩层控制研究必然涉及到工程地质与水文地质学、岩体力学、采矿学、弹性力学、材料力学、结构力学等众多基础和工程

学科,以此来进行采矿引起的岩层活动理论分析、工程分析等。同时保证采矿工程活动有效进行是岩层控制的主要目的,因此岩层控制的装备与技术也是岩层控制的主要研究对象。更一般地,可以把岩层控制归结为如下一些研究内容:(1)岩石与岩体的力学属性与强度理论;(2)原岩应力(地应力)分布规律与特点;(3)采矿开挖空间围岩内应力分布规律与特点,以及开挖围岩的力学属性变化;(4)采场顶板、底板岩层活动规律及特征;(5)采场支架与围岩相互作用原理及围岩控制技术;(6)巷道围岩变形与破坏规律、控制原理与控制技术;(7)采矿开挖上覆岩层的移动、破坏规律与控制技术;(8)地表移动规律与控制原理及技术;(9)煤矿动压现象及控制技术;(10)围岩及岩层活动规律的基本特征参数实测技术与装备。

随着开采技术及社会发展,岩层控制研究的内容也会更加宽泛,而一些已经基本解决的传统研究内容也会逐渐萎缩,研究方法和手段也会不断更新和发展。

2.2 岩层控制研究的基本方法

岩层控制的基本问题是岩层移动、破坏、稳定与控制岩层移动的问题,借鉴工程地质学、采矿学和固体力学的研究方法是其研究的基本思路。

2.2.1 现场观测方法

现场观测与研究是岩层控制研究中必不可少的基础工作,也是岩层控制效果的最直接检验方法。现场观测的主要内容有支架工作阻力、工作面煤壁与端面顶板破坏情况、巷道顶底板与两帮变形量、顶板离层量、支架或锚杆的受力大小、煤柱或者煤体压力、上覆岩层移动与破裂、顶煤冒落、地表变形、煤岩破裂等。现场观测具有工作量大、观测条件差等缺点,而且若想获得准确的观测数据,难度也较大。但是近年来,观测的手段和仪器有了很大进展,观测仪器已由过去单一的机械扩大到电、声、光、磁等多种技术的综合应用,观测方式也从人工就地读数向遥控和自动监测过渡,观测的自动化程度和观测数据的无线传输有了很大发展,但是在开发适应煤矿井下环境和精度高的观测仪器、提高现场观测数据的准确性、正确分析和使用观测数据等方面还需要继续努力。

2.2.2 室内试验方法

由于采矿工程规模巨大、时间长、条件复杂,进行现场观测的成本高,以及受生产影响大,现场观测到的表面现象多等,在进行采矿岩层控制研究时,室内试验也是常用的方法。室内试验通常分为两种情况,一种是进行岩石或岩体的基本物理、力学性质实验,如强度、弹性模量、应力应变关系、电导率、水理性质等;另一种是进行现场开采的模拟试验,通过相似理论,根据现场开采的情况构建试验模型,通过模型试验开采,测试模型内的应力、应变等,同时可以直观观测到上覆岩层垮落与移动情况。模型试验时要尽可能地按照相似理论选取模型材料的物理与力学参数,模型受力条件也要尽可能地与现场实际相似,但是事实上严格地满足相似条件是很难的,因此到目前为止相似模拟试验主要还是定性的。

2.2.3 理论分析

岩层控制的理论分析是不可避免的,虽然实际的采矿岩层介质属性、几何边界条件、力学条件等不会完全符合经典力学或者数学假设,但是从宏观上仍然可以引用经典力学、数学或者统计学的一些理论来研究采矿中的某些岩层控制问题。比较常见的有圆形巷道围岩中应力分布规律、利用胡克定律求解自重作用下的原岩应力分布、利用材料力学求解老顶破断条件等。同时也建立了一些岩层控制特有的理论,如“砌体梁”理论、“关键层”理论、“传递岩梁”理论、概率积分等。近 20 余年来,除了采用经典的力学、数学等方法外,一些近代的力学、数学等理论也用于岩层控制研究,如概率数学、模糊数学、非线性力学等,对促进岩层控制的多元发展起到了重要作用。

2.2.4 数值计算方法

目前数值计算方法已经成为岩层控制研究的主要方法。数值计算的优点是适应各种几何与力学边界条件,通过数值逼近获得相对精确的模拟结果,而且计算成本低、时间短,可以反复变换计算条件等。数值计算的准确性与岩层介质属性选取、力学条件施加、计算方法选取、计算技巧等有很大关系。目前主要的数值计算方法有有限元(FEM)、边界元(BEM)、离散元(DEM)和有限差分(FLAC)等。有限元和有限差分法适用于连续介质,离散元适合于相对破裂的松散介质,DDA 属于离散元的范畴。根据岩层控制研究问题的需要,上述各种方法也可以耦合使用。

3 中国煤矿岩层控制进展

3.1 学术交流

岩层控制是采矿的核心,中国在煤矿岩层控制的理论研究和实践方面做了大量工作,也取得了一些重要的标志性学术成果。在学术交流方面,也组织召开了一系列具有标志性的学术会议,如 1979 年 4 月 26 日在中国矿业大学成立了煤炭工业部矿山压力情报中心站,并下设综采矿压分站、单体支柱工作面分站、井巷地压分站、矿压仪表分站、冲击地压分站、矿山支护与设备分站、软岩工程分站、放顶煤开采矿压分站 8 个分站。于 1981 年 8 月 21 日在中国矿业大学组织召开了首届矿压理论与实践研讨会,每两年召开一次,目前已经召开 17 届会议。矿压理论与实践研讨会成为了中国煤矿岩层控制广泛学术交流、研讨的重要平台,对促进中国煤矿岩层控制理论与技术的发展做出了重要贡献。为了更加广泛促进岩层控制的学术交流,1984 年 10 月创刊了《矿山压力与顶板管理》杂志,2006 年更名为《采矿与安全工程学报》,是目前中国煤炭行业被 EI 收录的四种刊物之一。

中国矿业大学(北京)于 1995 年、2000 年、2005 年等组织召开的全国放顶煤开采技术研讨会,对放顶煤开采的岩层控制进行了广泛的研究和讨论,如顶煤破碎机理、放煤理论、矿压显现规律、地表沉降等,对促进放顶煤开采的岩层控制起到了积极作用。

3.2 顶板事故概述

岩层控制的目的是保证井下作业人员安全、维持各种采矿开挖工程正常发挥效能、减少对地表等环境损害等。

避免顶板事故是煤矿岩层控制的首要出发点。1990 年前,中国煤矿顶板事故死亡人数占全部事故死亡人数的 45%,随着支护技术的进步,这一比例下降到 35%。但是近年来随着开采深度不断增加,以及瓦斯事故的下降等,顶板事故所占比例又开始上升,2000 年和 2012 年,顶板事故起数及死亡人数占事故总起数及死亡人数的 51.2%和 35.8%,事故起数和死亡人数在煤矿各类事故中居首位。同时由于开采引起地表沉降、建筑物、水系、交通道路、农田破坏等现象也相当严重。

美国由于顶板事故造成的死亡人数也占据着煤矿开采死亡人数的首位。来自美国矿山安全与健康监察局(MSHA)的统计数据表明,在 2003~2007 年间,地下煤矿共死亡 116 人,其中顶板事故死亡人数占 35.3%,运输事故占 22.4%,瓦斯、粉尘爆炸和燃烧事故占 18.1%,机械事故占 10.3%,电力事故占 4.3%,人员摔倒和坠落事故占 4.3%,其他事故占 5.2%。美国矿山安全与健康监察局(MSHA)劳工部副部长(Assistant Secretary of Labor) David Dye 曾说过,“国际采矿岩层控制会议”(ICGCM)为美国煤矿顶板事故减少做出了重大的贡献,拯救了无数生命。

3.3 中国煤矿岩层控制的主要成果

中国煤矿技术进步主要始于新中国(1949 年 10 月 1 日)成立以后,1949 年中国的煤炭产量只有 3000 万吨,2013 年产量达 38 亿吨。但是在 1964 年以前都是单体支柱、爆破落煤的炮采工作面(长壁为主,也有一些房柱开采),中国 1964 年装备了当时的第一个普通机械化长壁工作面。1970 年 11 月 28 日,在大同煤矿峪口矿 8710 工作面装备了第一个综合机械化采煤工作面,1974 年、1978 年分别从德国、匈牙利引进了 43 套和 100 套综采设备,促进了中国综采技术与装备的发展,使工作面岩层控制有了重要进展,采煤的安全性有了很大提高。在 20 世纪 90 年代以前,中国的综采程度不足 60%,目前可以达到 90%。岩层控制技术与研究的对象与采煤技术是密切相关的,取得的主要成果如下。

3.3.1 老顶结构模型的提出与建立

20 世纪 70 年代,钱鸣高院士提出了上覆岩层开采后呈“砌体梁”式平衡的结构力学模型,给出了“砌体梁”滑落失稳和转动变形失稳条件,为采场顶板压力计算给出了具体边界,也为采场矿山压力控制参数确定奠定了基础。在此基础上,提出岩层断裂前后的弹性基础梁力学模型及各种不同支撑条件下板的力学模型,为老顶来压预报提供了理论依据。90 年代中期,随着对岩层控制研究的不断深入和为了解决采动对环境的影响,在研究开采引起岩体裂隙场的改变和更准确地描述开采对地表移动的影响方面,提出了“关键层”理论^[1]。宋振骥院士提出了“传递岩梁”理论,认为支架阻力大小与所控岩梁的位态有关,支架作用可以改变岩梁位态,若支架控制

岩梁下沉变形量越小,则支架所受的顶板压力越大,据此提出了“给定变形”和“限定变形”岩梁运动形态^[2]。

在支架工作阻力确定方面,除按上述理论计算外,煤炭科学研究总院通过长时间现场观测,在统计分析了70多个综采工作面矿压观测结果后,建立了一种求解支架—围岩临界工作阻力的经验统计方法^[3]。

3.3.2 采场“支架—围岩”关系与支护质量监测

通过试验和现场观测,提出了支架工作阻力 P 与顶板下沉量 ΔL 之间存在着类双曲线关系,在中厚煤层采高条件下, $P-\Delta L$ 这种类双曲线关系已经成为普遍规律;对于放顶煤条件, $P-\Delta L$ 类双曲线关系不再存在。

在煤矿岩层控制中,实际支护阻力和设计阻力往往是两回事,尤其是工作面不断推进,顶板条件不断变化,这常常是导致工作面顶板事故的主要原因。自20世纪80年代开始,中国大规模地进行了采煤工作面顶板和支护质量监测,运用岩层控制理论确定监测指标,形成了“支架—围岩”稳定性诊断技术。

3.3.3 采煤工作面顶板与顶板事故分类

煤矿生产地质条件复杂多样,为了适应采场围岩控制需要,在汇集大量实测资料和生产经验基础上,对工作面直接顶、老顶进行了分类和分级,提出了“缓倾斜煤层回采工作面顶板分类”方案,一直指导着工作面岩层控制。

根据顶板事故发生的力学原因和危害程度,对顶板事故进行了科学分类,分为压垮型冒顶(发生在老顶来压期间)、漏冒型冒顶、推垮型冒顶和综合类型冒顶^[4];提出了各种类型顶板事故发生的地点、岩层条件、力学条件、可能造成的危害、防止技术等;提出了在控制顶板方面支架初撑力与工作阻力具有同等的重要性,并将初撑力写入顶板控制规范中,尤其是对单体支柱工作面。

3.3.4 基于顶板和煤壁控制的支架阻力确定方法

为了更好地指导高效开采工作面顶板与煤壁控制问题,建立了平衡顶板载荷和保持煤壁稳定的确定支架工作阻力二元准则。分析了顶板压力等对煤壁稳定的影响以及支架工作阻力在减缓煤壁压力方面的作用。煤壁上的顶板压力是影响煤壁稳定的主要因素,提出了在保持煤壁稳定时支架工作阻力应满足的准则。当老顶结构失稳时,会对支架产生冲击,根据能量理论,提出了通过计算控制顶板的支架工作阻力确定的动载荷计算法,同时提出了薄基岩厚松散层条件下的支架阻力计算方法^[5~8]。

3.3.5 长壁工作面充填采煤技术

充填开采技术是控制地表塌陷、保护地表及环境的有效技术。中国已经形成了矸石充填、高水材料充填、膏体材料充填、高浓度胶结材料充填等充填开采技术,不同材料的充填技术有各自的优缺点。矸石充填技术是以煤矸石为主要充填材料,在地面加工后,直接运至井下充填材料仓,然后通过皮带、专用刮板输送机、专用充填支架等运至采空区并充填;高水材料充填是采用高水速凝固结材料作为充填材料的一种充填采煤技术;膏体材料充填是把煤矸石、粉煤灰、工业炉渣等固体废物在地面加工成膏状浆体,膏体料浆的真实质量浓度为81%~88%,通过充填泵及重力的作用经管道送到井下工作面充填采空区;高浓度胶结充填是指以煤矸石、粉煤灰、水泥及外加剂,加适量的水作为充填材料,通过活化搅拌,将充填料浆制备成高浓度料浆,料浆的真实质量浓度为74%~82%。

3.3.6 巷道围岩控制理论与技术

掌握了巷道从开挖到开采结束全过程围岩变形、破坏随时间、空间的变化规律,根据中国巷道围岩地质条件,深入研究了围岩与支护相互作用关系,提出多个采准巷道围岩控制理论,形成了比较完善的巷道合理布置系统,沿空留巷、沿空掘巷理论与技术得到发展和广泛应用。

岩石巷道普遍采用锚喷支护,采准巷道也广泛使用锚杆与锚索支护技术。在深入研究锚杆支护作用的基础上,逐步形成了中国煤矿巷道锚杆支护的基础理论,如锚杆支护围岩强度强化理论^[9]、高预应力锚杆支护理论等^[10]。

软岩巷道支护技术有了长足进展,在软岩定义、分类、支护理论与技术方面形成了相对较为有效的体系,如锚喷网支护技术、U形钢支架与壁后充填技术、注浆加固技术、防治底鼓的封闭支护技术、各种联合支护与加固技术,以及爆破、钻孔及切缝等围岩卸压技术等^[11]。

3.3.7 围岩控制的装备与技术

采场围岩控制的主要装备是液压支架,近十余年来,中国的液压支架研制有了很大进步,在支架能力和尺寸方面发展很快。2000年,最大支架阻力为10000kN左右,目前中国最大支架工作阻力达到21000kN,平

均每年以 1000 kN 的速度增加。支架的高度也达到了 7.2m, 中心距 2.05m, 目前在试图开发 8m 高度的支架。

巷道围岩控制方面研发了高强度锚杆和锚索、高延伸率大变形锚杆、可接长锚杆、桁架锚杆、桁架锚索等, 水泥类、高分子类注浆材料, 及多种形式的 U 型钢、钢管混凝土支架等。

在覆岩变形控制方面, 除了充填开采技术外, 也形成了离层注浆、条带注浆、条带开采等技术。在缓倾斜和极倾斜煤层的地表移动规律及预测、地表变形控制等方面都取得了很大进展。

相似物理相似模拟试验方面, 在试验数据采集、处理、分析方面进步明显。同时开发了一些专用试验装备, 如放顶煤装置、充填开采装置、煤与瓦斯共采设备等。

围岩活动实测方面, 除传统的方法外, 钻孔电视、内窥仪、光栅、无线传输、离层监测等, 使得现场监测更加方便, 数据更加准确。

4 中国煤矿岩层控制展望

岩层控制是服务于采矿生产的, 采矿技术进步需要岩层控制的理论与技术支持, 同时新的采矿技术也会为岩层控制提出新的研究课题, 结合我国煤矿开采技术的发展和需求, 岩层控制需要在如下几个方面加强研究:

(1) 特厚煤层开采的岩层控制理论与技术。

我国的厚(>3.5m)及特厚($\geq 12\text{m}$)煤层开采取得了重要进展, 大采高开采、放顶煤开采技术已经广泛应用, 但是相对于开采技术来说, 岩层控制技术的理论研究还相对滞后, 主要表现在大采动空间的覆岩运动规律与控制技术、散体顶煤运动与放出规律、大断面巷道围岩控制、无煤柱或者小煤柱开采理论与技术。

(2) 煤层群或者小煤窑破坏区开采的岩层控制理论与技术。

煤层群开采是我国煤层赋存的特点之一, 小煤窑破坏区煤炭资源高效安全开采是我们必须面对的一个现实问题, 近年来资源整合与兼并重组, 使原有许多大矿都得开采一些小煤窑开采后遗留的煤炭资源, 因此需要研究煤层群开采的岩层控制、顶板灾害防治、小煤窑破坏区开采的岩层控制理论与技术。

(3) 急倾斜煤层的覆岩移动规律。

相比而言, 缓倾斜煤层开采的覆岩移动规律研究比较成熟, 而急倾斜煤层要差很多, 随着西部及大量难采煤层开采, 急倾斜煤层开采量会有所增加, 在未来有必要对急倾斜煤层开采的围岩控制、工作面支架与围岩相互作用关系、覆岩移动与地面沉降规律等加强研究。

(4) 深部开采。

我国的深部开采资源会越来越多, 深部开采主要面临的问题是高应力、多煤层联合或顺序开采, 导致采动应力集中和叠加, 需要高效安全的开采方法; 高应力诱发冲击地压、采场与巷道难以支护问题; 高温导致矿石、煤炭自燃、炸药自爆、高温作业问题等, 因此深部开采研究需要加强。

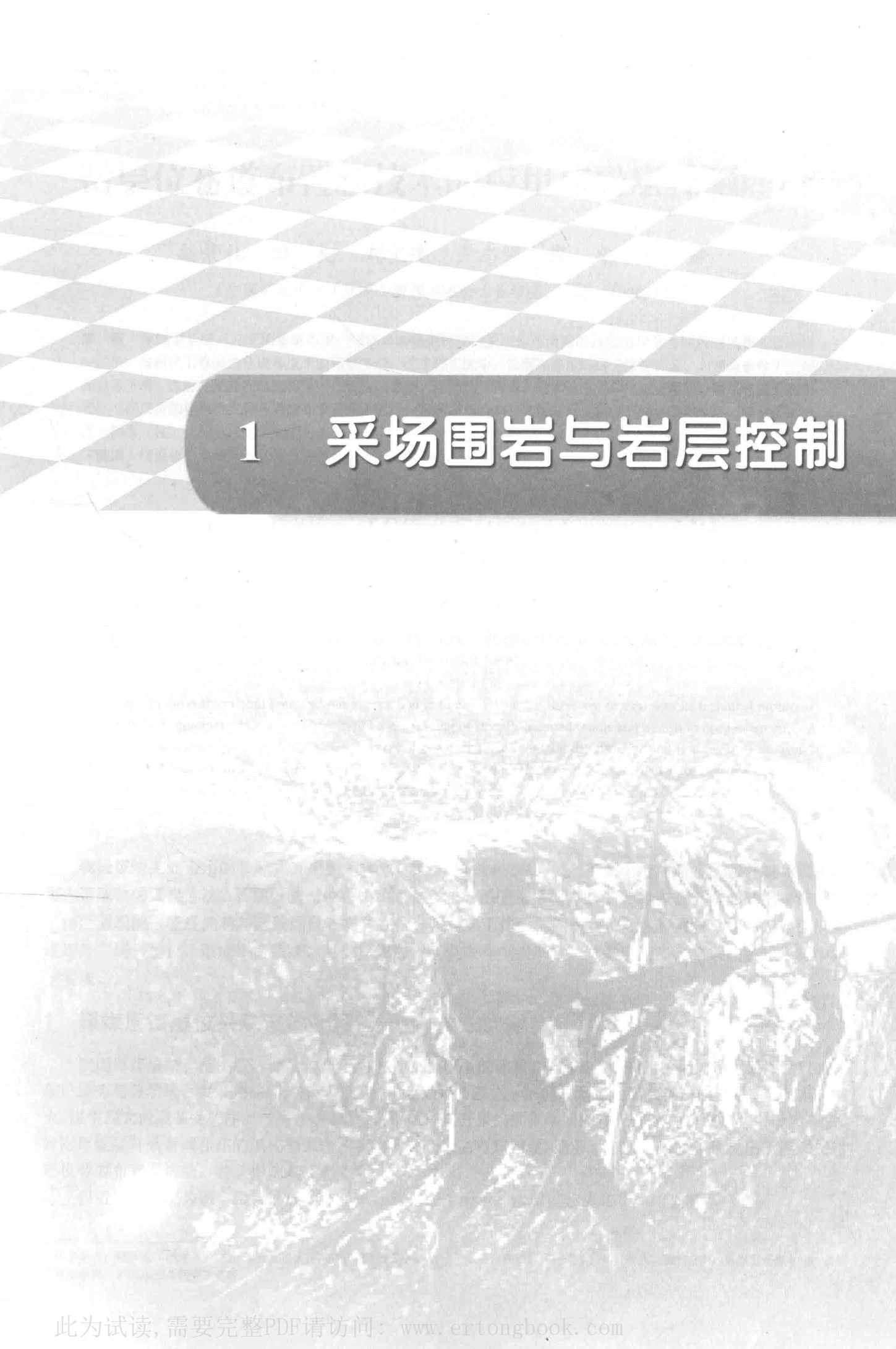
(5) 开采对底板的扰动与破坏。

开采对底板的扰动与破坏研究相对较少, 但是随着煤层群开采、深部开采增加, 研究开采对底板扰动规律越来越重要, 可以用来指导煤层群开采的采掘布置、底板有承压水威胁煤层安全开采等。

参 考 文 献

- [1] 钱鸣高. 20 年来采场围岩控制理论与实践的回顾[J]. 中国矿业大学学报, 2000(1).
- [2] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [3] 史元伟. 采煤工作面围岩控制原理和技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [4] 岑传鸿, 窦林名. 采场顶板控制及监测技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [5] 王家臣. 极软厚煤层煤壁片帮与防治机理[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 785~788.
- [6] Wang Jiachen, Yang Shengli, Li Yang, et al. A dynamic method to determine the supports capacity in longwall coalmining[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2014: 1~12.
- [7] 王家臣, 王蕾, 郭尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力确定[J]. 煤炭学报, 2014, (8).
- [8] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [9] 侯朝炯, 等. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [10] 康红普, 王金华, 等. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [11] 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.

(执笔人: 王家臣)



1 采场围岩与岩层控制