

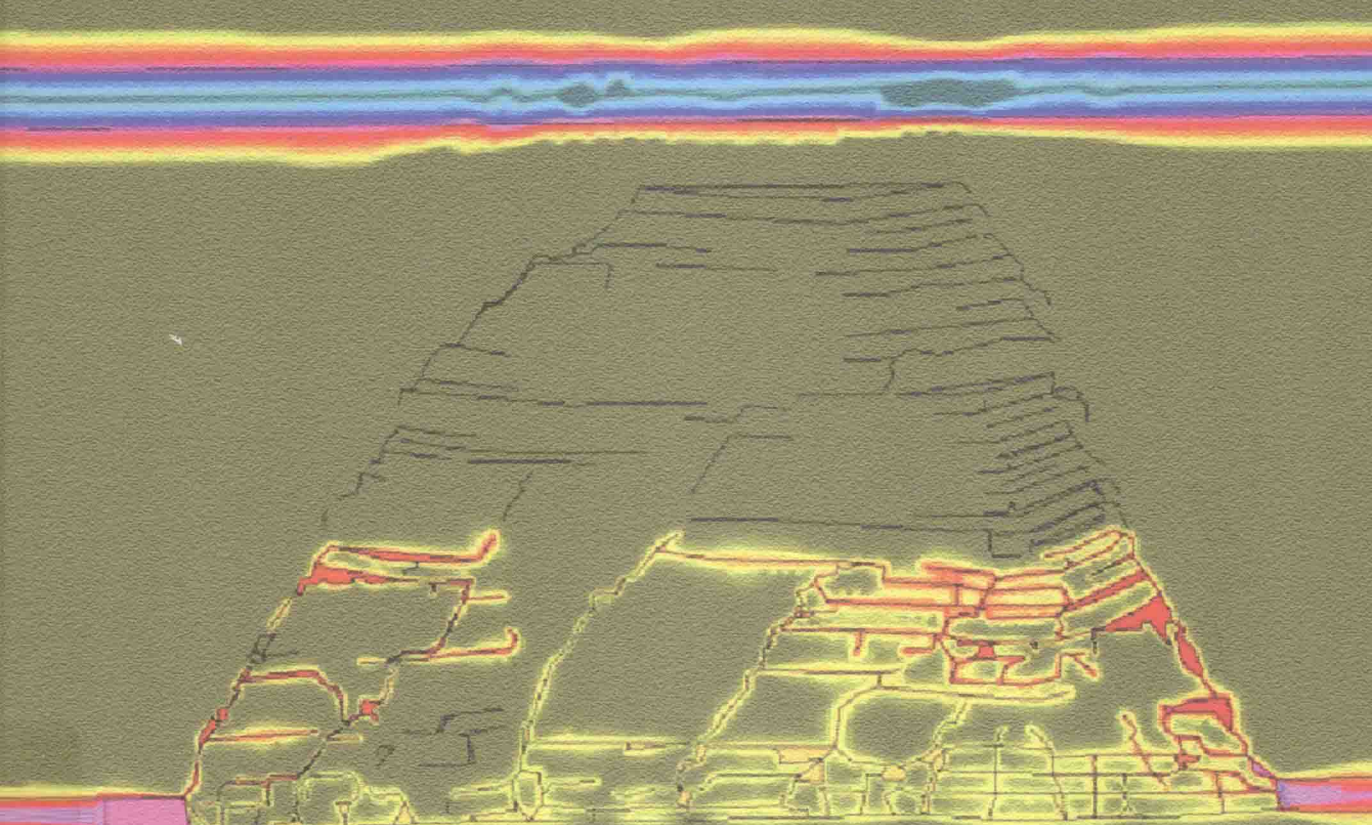


国家重点基础研究发展计划

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

深部煤与瓦斯共采 理论与技术

谢和平 林柏泉 周宏伟 等/著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

深部煤与瓦斯共采理论与技术

谢和平 林柏泉 周宏伟 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是国家 973 项目“深部煤炭开发中煤与瓦斯共采理论”研究成果的总结,主要内容涉及深部煤岩体采动力学、采动裂隙表征及演化特征、采动增透率理论和增透图谱,深部破断煤岩体中瓦斯解吸、运移、富集过程的多尺度建模,深部采动应力场-裂隙场-瓦斯场耦合的时空演化规律,单一高瓦斯煤层人工-采动耦合增透机制及合理抽采布置方法,瓦斯导向流动通道形成机制与人工导控技术、高瓦斯低透气性煤层卸压增透及高效抽采技术,深部煤与瓦斯共采的时空协同机制与理论评价方法,煤层群煤与瓦斯时空协同抽采技术等。

本书可供从事岩石力学、采矿工程、安全工程及其相关专业本科、研究生、现场工程技术人员阅读及参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部煤与瓦斯共采理论与技术 / 谢和平等著. —北京: 科学出版社, 2017. 1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-046354-8

I. ①深… II. ①谢… III. ①瓦斯煤层采煤法 IV. ①TD823. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 270158 号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 刘亚琦
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 34 3/4 插页: 16

字数: 870 000

定价: 258.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《深部煤与瓦斯共采理论与技术》

撰写人员名单

序言

谢和平

第1章 深部开采定义与采动力学

谢和平 周宏伟 高峰 鞠杨 张茹 高明忠 薛东杰 王宏伟 刘建锋
高亚楠 谢凌志 张勇

第2章 多尺度煤的瓦斯吸附特征及规律

薛英 储伟 刘晓强 邱年祥 孙文晶 冯艳艳 聂百胜 秦跃平 江成发
何旭 郝世雄

第3章 深部煤与瓦斯共采下采动煤岩体增透率理论

谢和平 高峰 周宏伟 鞠杨 张茹 高明忠 程红梅 周福宝 薛东杰
刘建峰 谢晶 张泽天

第4章 深部煤与瓦斯共采下采动裂隙演化规律与反演分析

谢和平 周宏伟 高峰 鞠杨 高明忠 张茹 刘建锋 薛东杰 黎立云
易成 谢晶

第5章 深部煤与瓦斯共采条件下采动破断煤岩体中瓦斯运移规律

尹光志 许江 张东明 黄滚 文光才 王维忠 蒋长宝 孙海涛 李文璞
李铭辉 李星

第6章 深部开采瓦斯流动通道形成机制与人工导控技术

马念杰 程远平 张勇 许兴亮 刘洪永 刘洪涛 赵志强 李季 张春雷
田素川 赵希栋

第7章 深部开采单一低透煤层增透机制及有效抽采技术

林柏泉 李增华 高峰 翟成 杨威 朱传杰 沈春明 李全贵 高明忠
薛东杰

第8章 煤层群煤与瓦斯共采关键技术

齐庆新 季文博 李宏艳 孙维吉 梁冰 秦玉金 潘立友 田福超 秦冰
侯金玲 刘晓刚 石占山 程志恒 陈理强

序 言

煤与瓦斯共采不仅可充分利用瓦斯资源,对减少温室气体排放具有重要意义,同时还将进一步提升我国含瓦斯煤层的科学开采水平。我国煤层瓦斯储量巨大,与天然气总量相当,随着社会发展水平提升和人们生活品质的提高,减排压力空前增加,瓦斯资源将扮演越来越重要的角色,在我国能源结构中的比例也将持续增加。

19世纪后期,英国威尔士煤矿用井下穿层钻孔从未开采的煤层中抽采瓦斯。目前,美国是世界上开采瓦斯最成功的国家,其开发利用瓦斯无论在技术水平还是在产业化方面均居世界前列。20世纪60年代,美国矿业局在瓦斯吸附、解吸、迁移及脱气作业方面做了大量的研究工作,80年代初,对美国18个含煤盆地进行了瓦斯资源评价工作,从80年代中期起,在圣胡安、黑勇士、阿帕拉契亚、拉顿等4个中煤阶盆地和尤因塔、粉河2个低煤阶盆地勘探取得突破。到2002年年底,美国瓦斯生产井达14200多口,年抽采瓦斯量达到410亿 m^3 ,2005年达500亿 m^3 。这主要得益于煤层透气性好,煤层赋存结构简单,煤层中的瓦斯易于流动和抽采。

我国的瓦斯抽采最早始于1938年,但系统的瓦斯抽采利用起步更晚。20世纪50年代初期,在抚顺高透气性特厚煤层中首次采用井下钻孔预抽煤层瓦斯获得成功,解决了抚顺矿区生产过程中的瓦斯安全问题,而且抽出的瓦斯还被作为民用燃料利用。50年代中期,在煤层群的开采中,采用穿层钻孔抽采上邻近层瓦斯的试验在阳泉矿区首先获得成功,解决了煤层群开采中首采工作面瓦斯涌出量大的问题。此后,在阳泉矿区又试验成功利用顶板高抽巷技术抽采上邻近层瓦斯,抽采率达60%~70%。到了60年代以后,邻近层卸压瓦斯抽采技术在我国广泛应用。70~90年代初,针对平顶山等矿区存在的单一低透高瓦斯煤层及有突出危险的煤层,采用通常的布孔方式预抽采瓦斯难以达到预期效果,而后陆续试验了强化抽采煤层瓦斯的方法,如煤层注水、水力压裂、水力割缝、松动爆破、大直径(扩孔)钻孔、网格密集布孔、预裂控制爆破、交叉布孔等,但效果仍不理想、难以消除煤层开采时的瓦斯威胁。同时,我国先后在抚顺龙凤矿、阳泉矿、焦作中马村矿、湖南里王庙矿等矿区施工地面钻孔,并且进行了水力压裂试验和研究,但均未取得预期效果。从90年代至今,针对以淮南矿区为代表的高瓦斯低透气性煤层群瓦斯赋存特征,开展了以保护层开采为主要措施的高瓦斯低透气性煤层瓦斯治理技术研究,建立了首采层卸压开采巷道法煤与瓦斯共采和留巷钻孔法无煤柱煤与瓦斯共采技术体系,依靠井下采场卸压开采来增加煤层透气性,显著提高了瓦斯抽采效率,大大解放了高瓦斯低透气性煤层所在矿区的生产力;同时,开始引进国外瓦斯开发技术,开展瓦斯勘探、地面抽采试验和井上下联合抽采试验研究,瓦斯抽采量有了显著的提升。

虽然近年来我国煤与瓦斯共采的工程实践取得了快速发展,在全国范围内已形成

规模,技术也在全面推广,但是,由于我国煤层富集条件的复杂性,地下采掘诱发的采动应力场、煤岩体裂隙场及瓦斯流动场的互动性,相关技术进步主要依赖经验,尚未形成科学性、有效性、针对性的煤与瓦斯共采基础理论体系。面临的共性关键问题主要包括:①深部采动含瓦斯煤岩体破裂机制、性质、特征及破裂程度之间的关系不清;②高强度大断面集中开采和工作面推进度与瓦斯抽放量、瓦斯排放量的动态关系关联机理不清;③瓦斯在破断煤岩体中的富集与运移规律不清;④煤与瓦斯共采时空协同机制及单一高瓦斯低透气性煤层的瓦斯抽采理论与方法没有取得实质性进展,仍属世界性难题。

这些关键问题的本质是理论研究欠缺、机理分析不深入,缺乏适合我国煤与瓦斯共采的理论研究,且随着开采深度的增加,导致开采条件更趋复杂,原有安全技术及理论基础已难以适应当前煤矿安全高效生产的迫切需求,给煤与瓦斯共采带来了新的挑战和问题,主要表现在:

(1) 国外瓦斯抽采方法与技术在我国应用成效差、效率低:我国高阶煤和低阶煤所含瓦斯在资源总量中占 2/3 以上,瓦斯赋存特征:微孔隙、低渗透率、高吸附。煤层渗透率平均只有 $1.1974 \times 10^{-18} \sim 1.1596 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。其中渗透率小于 $0.1987 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 的占 35%,渗透率为 $0.1987 \times 10^{-16} \sim 0.1987 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 占 37%,渗透率大于 $0.1987 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 的仅占 28%。而美国瓦斯地面开发选区通常要求煤层的渗透率不低于 $0.1987 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,我国煤层渗透率通常都小于 $0.1987 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。国外地面瓦斯抽采技术适合于中阶煤层高渗透、弱吸附的特征,不能适应我国高阶煤和低阶煤低渗透、强吸附的特点,国外先进技术在我国应用的实践表明:抽采影响半径只有美国的 1/3~1/2,平均单井采气量只有美国的 1/5~1/3。

(2) 深部开采所面临的瓦斯赋存条件更加复杂:我国中东部浅部煤炭资源已逐渐枯竭,目前很多矿井的开采深度已超过 800m。随着矿井开采深部的延深,瓦斯含量、瓦斯压力、绝对瓦斯涌出量逐年增加,透气性低,煤与瓦斯突出危险性越来越大,相当数量的低瓦斯矿井将转变为高瓦斯矿井,开采条件越来越复杂,给安全生产带来严重的威胁,矿井瓦斯成为制约安全生产的关键问题,如平顶山矿区,20 世纪 90 年代初仅有 2 对高瓦斯矿井,目前煤与瓦斯突出矿井 11 对,随着矿区向深部延伸,煤层瓦斯压力、含量不断增大,目前高突矿井数量已突破 15 对。

(3) 高强度集约开采导致的瓦斯涌出量激增:随着先进开采技术装备的应用,矿井单产能力大幅度提高,矿井瓦斯涌出量显著增加,低瓦斯矿井转化为高瓦斯矿井。一方面给煤矿的安全生产带来负面影响,如我国近年瓦斯事故中近 40% 发生在传统的低瓦斯矿井,个别矿井回采工作面瓦斯涌出量超过 $100 \text{ m}^3/\text{min}$,对工作面的安全管理和瓦斯处理提出了更高的要求;另一方面,低浓度瓦斯利用技术的进步和对能源需求的日益增长及环保意识的提高,也为瓦斯的抽采创造了良好的条件。

为了形成科学性、有效性、针对性的煤与瓦斯共采基础理论体系,迫切需要进一步开展研究工作,在几个主要关键科学问题,即采动条件下含瓦斯煤岩体破断结构演化规律及时空分布特征、破断煤岩体中瓦斯吸附、解吸与物质流动规律、破断煤岩体

中瓦斯导向流动的形成机制及控制理论、深部煤与瓦斯共采的时空协同机制和优化理论等方面取得突破,促进我国煤与瓦斯共采技术的健康持续发展。

鉴于此,科学技术部于2010年批准了题为“深部煤炭开发中煤与瓦斯共采理论”的973计划项目(编号:2011CB201200),谢和平院士为首席科学家。中国矿业大学、四川大学、中国矿业大学(北京)、重庆大学、山东科技大学、辽宁工程技术大学、煤炭科学研究总院、煤炭科学研究总院重庆研究院、煤炭科学研究总院沈阳研究院等单位的60余位科研人员,依托煤炭资源与安全开采国家重点实验室、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室、瓦斯灾害应急信息技术国家重点实验室、煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室、复杂煤气层开采国家地方联合工程实验室、水力学与山区河流开发保护国家重点实验室等科研平台,开展了系统的研究工作,主要研究内容包括:①深部开采下含瓦斯破断煤岩体宏观、细观表征及裂隙演化规律;②深部破断煤岩体中瓦斯解吸、运移、富集过程的多尺度建模;③深部应力场-裂隙场-瓦斯场耦合的时空演化规律;④单一低透高瓦斯煤层卸压增透机制及有效抽采技术原理;⑤深部煤与瓦斯共采的时空协同机制与理论评价方法。

5年来,研究团队围绕核心科学问题重点攻关,在基础理论、关键技术和重大装备三个方面进行了系统的攻关研究,取得了显著的进步。首次系统给出了煤与瓦斯共采的定义,即:煤与瓦斯共采的实质就是通过合理的采煤方法产生的采动应力场,使煤岩体产生有利于瓦斯解吸、流动的破裂,形成瓦斯流动通道和富集区,更加科学、有针对性地高效抽采瓦斯,达到充分抽采瓦斯的同时实现安全高效采煤的共采目的和效果。在基础理论方面,建立了深部煤岩体采动力学、采动增透率理论和增透图谱和多尺度分子模拟等三个理论模型;在关键技术方面,形成了瓦斯导向流动通道形成机制与人工导控技术、高瓦斯低透气性煤层卸压增透及高效抽采技术、煤层群煤与瓦斯时空协同抽采技术等三项关键技术;在重大实验装备方面,研制和完善了深部煤与瓦斯共采实验系统,并使之系列化。该项目研究成果在河南平顶山矿区、河南焦煤集团、山西华晋焦煤集团等得到成功推广应用,取得了显著社会效益与经济效益。

本书以深部开采条件下煤与瓦斯共采理论与实践为主线,系统总结973项目团队5年来的主要研究成果。全书分为8章,结构如下:

- 第1章 深部开采定义与采动力学;
- 第2章 多尺度煤的瓦斯吸附特征及规律;
- 第3章 深部煤与瓦斯共采下采动煤岩体增透率理论;
- 第4章 深部煤与瓦斯共采下采动裂隙演化规律与反演分析;
- 第5章 深部煤与瓦斯共采条件下采动破断煤岩体中瓦斯运移规律;
- 第6章 深部开采瓦斯流动通道形成机制与人工导控技术;
- 第7章 深部开采单一低透煤层增透机制及有效抽采技术;
- 第8章 深部煤层群煤与瓦斯共采关键技术。

本书由谢和平院士、林柏泉教授、周宏伟教授负责策划和统稿,课题负责人薛英教授、尹光志教授、马念杰教授、齐庆新研究员、储伟教授及课题部分研究骨干参与

了相应章节的撰写。

衷心感谢项目专家组周世宁院士、张铁岗院士、袁亮院士、胡千庭研究员、卫修君教授和科学技术部 973 项目咨询专家彭苏萍院士、黄素逸教授和虎维岳教授对项目研究的关怀和指导，特别感谢钱鸣高院士、宋振骐院士、李晓红院士、姜耀东教授提出的宝贵建议。感谢科学技术部、教育部、国务院国有资产监督管理委员会有关部门给予的指导和支持，感谢各项目参加单位及河南中平能化集团、潞安集团、川煤集团、焦煤集团等单位给予的大力支持，感谢项目全体研究人员在项目研究过程中所付出的艰苦努力，感谢为该项目完成和本书出版提供支持的专家和朋友。

由于作者水平有限，错误及不妥之处，敬请读者批评指正。

国家 973 项目“深部煤炭开发中煤与瓦斯共采理论”首席科学家

The image shows a handwritten signature in black ink, which reads '石和平' (Shi He Ping). The characters are written in a cursive, calligraphic style.

2015 年 8 月

目 录

序言

第 1 章 深部开采定义与采动力学	1
1.1 深部开采的定量界定与分析	1
1.1.1 地应力测试数据统计特征	1
1.1.2 国内有关矿区地应力测试结果	2
1.1.3 深部的力学定义	3
1.1.4 不同深度煤岩体采动力学性质研究	7
1.2 极限开采深度探讨	12
1.2.1 基于地温平均梯度的极限开采深度探讨	13
1.2.2 基于巷道围岩变形的极限开采深度探讨	15
1.2.3 基于巷道围岩弹性能分析的极限开采深度探讨	19
1.3 不同开采条件下采动力学行为	21
1.3.1 不同开采条件下支撑压力分布规律	21
1.3.2 不同开采条件下工作面前方煤岩体应力环境	25
1.3.3 不同开采条件下工作面前方煤体采动力学实验研究	27
1.3.4 不同开采条件下岩石的变形破坏特征及对比分析	32
参考文献	33
第 2 章 多尺度煤的瓦斯吸附特征及规律	35
2.1 分子尺度上煤体表面瓦斯吸附作用的模拟	35
2.1.1 简单煤表面模型上瓦斯吸附的特征	35
2.1.2 非均质煤结构模型与瓦斯的相互作用规律	41
2.2 细观尺度煤体瓦斯吸附的模拟	46
2.2.1 温度压力对瓦斯在煤中吸附的影响	46
2.2.2 瓦斯在煤表面的竞争吸附和吸附促进解吸的机制	56
2.3 宏观尺度瓦斯吸附的动平衡和动力学模型	66
2.3.1 吸附势理论研究超临界状态下的甲烷气体吸附	67
2.3.2 不同煤样瓦斯吸附动力学模型的建立	84
2.4 煤体孔隙结构对瓦斯吸附特征的影响	89
2.4.1 煤体孔隙结构特征的分形表征	89
2.4.2 煤体结构对瓦斯吸附行为的影响	98
2.4.3 煤体粒度与瓦斯吸附行为的关系	104

参考文献	107
第3章 深部煤与瓦斯共采下采动煤岩体增透率理论	110
3.1 增透率定义及基于平板流体模型的增透率理论	110
3.1.1 增透率定义及概念模型	111
3.1.2 基于平板流体模型的增透率理论	112
3.2 基于采动裂隙场的煤岩增透率理论室内试验验证	113
3.2.1 采动卸压增透试验平台的构建	113
3.2.2 保护层开采条件下增透率室内试验及理论验证	116
3.2.3 放顶煤开采条件下增透率室内试验及理论验证	120
3.2.4 无煤柱开采条件下增透率室内试验及理论验证	122
3.2.5 不同开采条件下煤岩增透率室内试验比较分析	123
3.3 现场增透率测试及采动增透图谱分析	127
3.3.1 基于平板流体模型煤层增透理论现场试验	128
3.3.2 采场区域增透率空间分布图谱	132
参考文献	138
第4章 深部煤与瓦斯共采下采动裂隙演化规律与反演分析	139
4.1 深部长壁工作面覆岩采动裂隙网络演化特征	139
4.1.1 深部长壁工作面覆岩运动相似材料模拟实验研究	139
4.1.2 采动岩体裂隙分形网络维数演化规律	141
4.1.3 采动裂隙长度分维与工作面推进长度的关系	142
4.1.4 采动裂隙网络的逾渗与分形特征关系研究	146
4.1.5 基于采动裂隙场的瓦斯渗流演化过程	151
4.2 深部采动裂隙网络实时演化及连通性特征的现场研究	165
4.2.1 工程背景及工作面前方钻孔布置方案	165
4.2.2 工作面前方钻孔孔壁裂隙演化特征	167
4.2.3 钻孔孔壁裂隙分维及孔深方向连通率演化特征	175
4.3 深部采动裂隙网络统计特征建模与重构研究	178
4.3.1 裂隙网络统计模型概述	178
4.3.2 椭圆状非平行裂隙特征尺寸分布的解析式推导	179
4.3.3 基于钻孔矩阵数据的椭圆状裂隙尺寸研究	190
4.3.4 煤岩体采动裂隙网络重构与反演分析	201
参考文献	207
第5章 深部煤与瓦斯共采条件下采动破断煤岩体中瓦斯运移规律	212
5.1 深部煤与瓦斯共采基础研究系列试验装置	212
5.1.1 煤岩热流固耦合试验系统	212
5.1.2 多功能真三轴流固耦合试验系统	214

5.1.3	多场耦合煤与瓦斯共采模拟试验系统	218
5.1.4	三向加载大型三维相似模拟试验系统	220
5.2	深部采动煤岩力学特性与渗流规律的试验研究	221
5.2.1	常规加载条件下煤岩力学及渗流特性试验	221
5.2.2	不同加卸载条件下煤岩力学及渗流特性试验	229
5.2.3	峰后煤岩力学及渗流特性试验	238
5.2.4	真三轴应力条件下的流固耦合试验	240
5.3	深部煤岩体多物理场耦合理论研究	244
5.3.1	含瓦斯煤渗透率理论模型	244
5.3.2	煤岩体热流固耦合模型的建立	254
5.3.3	煤岩体热流固耦合模型的应用	263
5.3.4	基于不同流动形态分区的煤层瓦斯运移模型	267
5.4	深部采动破断煤岩体中瓦斯运移与富集规律	269
5.4.1	深部采动应力条件下覆岩裂隙演化规律的试验研究	269
5.4.2	深部采动破断煤岩体中渗透率分布规律的数值模拟研究	276
5.4.3	基于三维相似模拟试验的瓦斯运移与富集规律数值模拟研究	276
	参考文献	283
第 6 章	深部开采瓦斯流动通道形成机制与人工导控技术	286
6.1	瓦斯自主通道与导向通道的概念与内涵	286
6.1.1	瓦斯自主通道	286
6.1.2	瓦斯导向通道	287
6.1.3	瓦斯钻孔蝶形导向通道的形成机制	289
6.2	瓦斯自主通道几何特征与流态方程	300
6.2.1	瓦斯自主通道的演化与渗透率耦合特性的实验室研究	300
6.2.2	采动煤岩卸荷增透理论模型与瓦斯自主通道定量表征	312
6.2.3	瓦斯自主通道的流态特征	317
6.3	深部开采瓦斯流动通道形成的力学机制与时空演化规律	332
6.3.1	工作面前方采动裂隙与瓦斯通道	332
6.3.2	采场覆岩瓦斯通道形成机制与规律	339
6.3.3	底板裂隙形成机制与瓦斯通道	347
6.4	深部开采瓦斯导向通道的构建与应用	356
6.4.1	工作面前方瓦斯流动通道特征的现场试验	357
6.4.2	采场覆岩瓦斯导向通道的构建	359
6.4.3	采场底板岩层瓦斯导向通道的构建	371
	参考文献	389
第 7 章	深部开采单一低透煤层增透机制及有效抽采技术	392
7.1	单一低透煤层卸压增透及瓦斯解吸流动规律	392

7.1.1	单一低透煤层吸附解吸特性及影响因素	392
7.1.2	瓦斯渗流特性及影响因素	403
7.1.3	水力化钻孔卸压增透范围内瓦斯流场时空演化规律	410
7.2	钻孔射流割缝卸压增透机制及数值模拟	416
7.2.1	瓦斯流动模型的建立	416
7.2.2	割缝卸压区瓦斯流动分析	418
7.2.3	割缝卸压区煤体增透分析	426
7.2.4	钻孔射流割缝卸压增透数值模拟	427
7.3	钻孔射流割缝及脉动压裂耦合增透技术	439
7.3.1	基本原理	440
7.3.2	设备研发	441
7.3.3	试验分析	443
7.4	工程应用及效果分析	452
7.4.1	试验矿井之一的古汉山矿	453
7.4.2	试验效果及分析	456
7.4.3	试验矿井之二的平煤 12 矿	461
7.4.4	试验效果及分析	462
	参考文献	466
第 8 章	深部煤层群煤与瓦斯共采关键技术	469
8.1	煤层群煤与瓦斯共采时空协同机制	469
8.1.1	煤层群开采条件下煤岩介质裂隙演化规律	469
8.1.2	煤层群开采条件下煤岩介质渗透性演化规律	486
8.1.3	基于多示踪气体的近距离煤层群瓦斯越流现场实测	495
8.2	煤与瓦斯共采控制参数指标体系与评价模型研究	499
8.2.1	煤层群煤与瓦斯共采影响因素统计、辨识与量化研究	500
8.2.2	煤与瓦斯共采评价体系与评价模型	501
8.2.3	典型矿区煤与瓦斯共采协调性分析	508
8.3	煤层群煤与瓦斯共采抽采优化技术与应用	512
8.3.1	近距离煤层群煤与瓦斯共采技术应用	512
8.3.2	远距离煤层群煤与瓦斯共采技术应用	524
8.3.3	近距离煤层群上行开采煤与瓦斯共采技术应用	532
	参考文献	540

第 1 章 深部开采定义与采动力学

我国越来越多的煤矿逐步进入深部开采。深部开采的深部如何量化,是否存在极限开采深度,都是煤炭科学技术界所面对和需要作出回答的问题。本章从分析开采深度的增加,导致一系列工程灾害如岩爆、煤与瓦斯突出、顶板垮落、底板突水等日益严重的特点入手,阐述国内外关于深部、浅部差异的量化界线。进一步针对煤炭科学开采对资源储量的要求和开采技术发展水平,从工作面环境温度、巷道变形控制以及采动岩体能量聚集灾变等方面,论述极限开采深度的概念,给出极限深度范围,探讨不同开采条件下的采动力学行为。

1.1 深部开采的定量界定与分析

长期以来科技界和工程界就深部开采中的诸多问题如深部开采中的非线性岩石力学特征、深部开采的动力响应与灾害行为、深部开采中围岩支护与控制、深部开采的界限划分与工程指标、极限开采深度以及深部开采的技术与装备等开展了广泛深入的研究,取得了丰富的成果,有效指导了煤炭的安全和高效生产。然而人们发现一个共性的问题,就是目前煤炭资源开采的科研课题、科技成果均围绕着深部开采做文章,但是恰恰都没有对深部开采的“深部”这个关键概念给出明确的、定量的、科学的定义。深部是什么?是深度,还是一种力学状态,还是表征灾害程度指标?多深算进入深部?能否给出简明的、本质的“深部”定义?这关系到深部资源开发的理念、理论基础和开采方式的变革,值得人们深入思考。

1.1.1 地应力测试数据统计特征

深部开采的讨论归纳起来大致有四方面的论述。一是绝对深度的概念,即以单一的深度值来界定深部,提出煤炭深部开采的界线。国内学术界根据目前采煤技术发展现状提出煤矿深部的概念是 $700\sim 1000\text{m}^{[1,2]}$ 。但这个绝对深度却非绝对,从我国 20 世纪 80 年代的煤矿平均采深 288m 到当前平均采深超过 700m,是不断演化的。二是从煤岩体的赋存环境来定义,提出了深部地质环境具有“三高”特征,即“高地应力、高地温、高渗透压”,但是尚未有人给出如何由“三高”特征来界定深部。三是根据灾害程度和方式来界定,以岩爆、突水、煤与瓦斯突出、顶板大面积来压等矿山动力灾害不断频发和强度加剧来确定是否进入深部开采。四是从煤矿巷道支护方式和维护成本来界定。当深部巷道底臃严重,一次支护、常规支护无法控制巷道变形与稳定,频频出现前掘后修、重复返修的现象时即认为进入深部开采。

显然上述关于深部界定的论述实质上都是经验、定性的描述,并没有揭示深部开

采的本质特征。开采深度的增加,煤岩体的应力水平随之加大,必然导致高地应力、高地温、高渗透压的“三高”现象显现,从而诱发岩爆、突水、煤与瓦斯突出等灾害,深部的围岩空间应力状态易使岩石发生脆塑性转变,围岩流变而使巷道难以支护,生产成本急剧上升。因此界定深部开采,深度的增加、灾害加剧是表象,本质控制因素正是应力,应力水平的提高和应力状态的改变是根本要素。

作者认为,深部的概念,应该综合反映深部的应力水平、应力状态和围岩属性,深部不是深度,而是一种力学状态。因此,从力学角度出发,有望对深部界定给出一个机理性的、定量化的描述,为未来深部开采提供可靠理论支撑和技术指导。

1.1.2 国内有关矿区地应力测试结果

地应力,又称为原岩应力,主要由构造应力和上覆岩层的垂直压力构成,其测量法主要分为直接方法(扁千斤顶法、水压致裂法、刚性包体应力计法等)和间接方法(应力解除法、应变解除法、地质测绘法等)^[2~5]。

1912年瑞土地质学家 Heim 提出水平地应力和垂直地应力相等,等于上覆岩层的单位质量,1926年苏联学者金尼克(Gennic)认为水平地应力与泊松比相关,1932年, Learace 在美国胡佛水坝首次成功地测定了岩体的天然应力,美国 Hubbert 和 Willis 提出了水压致裂法。1975年,南非学者 Gay 根据实测数据,提出了临界深度的概念,认为在该深度以上,水平应力大于垂直应力,在该深度以下,水平应力小于垂直应力^[2~7]。由于水平应力分为最大和最小水平应力, Hoek 和 Brown 指出水平应力和垂直应力的比值 K 的估算方程^[8]

$$\frac{100}{Z} + 0.3 < K < \frac{1500}{Z} + 0.5 \quad (1.1)$$

式中, Z 为埋深。然而,从式(1.1)可以看出,当埋深足够大时,水平应力和垂直应力的比值为 0.3~0.5,与实际不符。

为了进行资源开发和掌握地质构造和运动,世界上各个国家均开展了大量的地应力测试工作,搜集的数据达几十万组。目前世界上地质钻探深度已逾 13 000m,地应力测试深度已达 9000m^[9,10]。

图 1.1 为基于文献 [9, 10] 所提供的数据绘制出的澳大利亚、美国、日本和中国的地应力随深度的变化趋势图,其中 K_1 和 K_2 分别为最大水平应力、最小水平应力和垂直(自重)应力的比值。由图 1.1 可以看出,随着埋深的增加, K_1 、 K_2 总体上呈现减小趋势。

图 1.2 为世界 30 多个国家的地应力分布图,从中可以进一步看出,在 1500m 以内,多数最大水平应力和垂直应力的比值 K_1 大于 2,构造应力占主导地位。当埋深在 1500~3500m 时, K_1 的取值为 1.3~2, K_2 的取值为 0.5~1。当埋深大于 3500m 时, K_1 和 K_2 的值逐渐均趋向于 1,这意味着深部岩体将处于完全静水压力状态。因此随深度的增加,地应力状态逐渐从浅部的构造应力主导状态向深部静水压力状态转变,这将对深部开采理论研究与实践带来重要启示与影响。

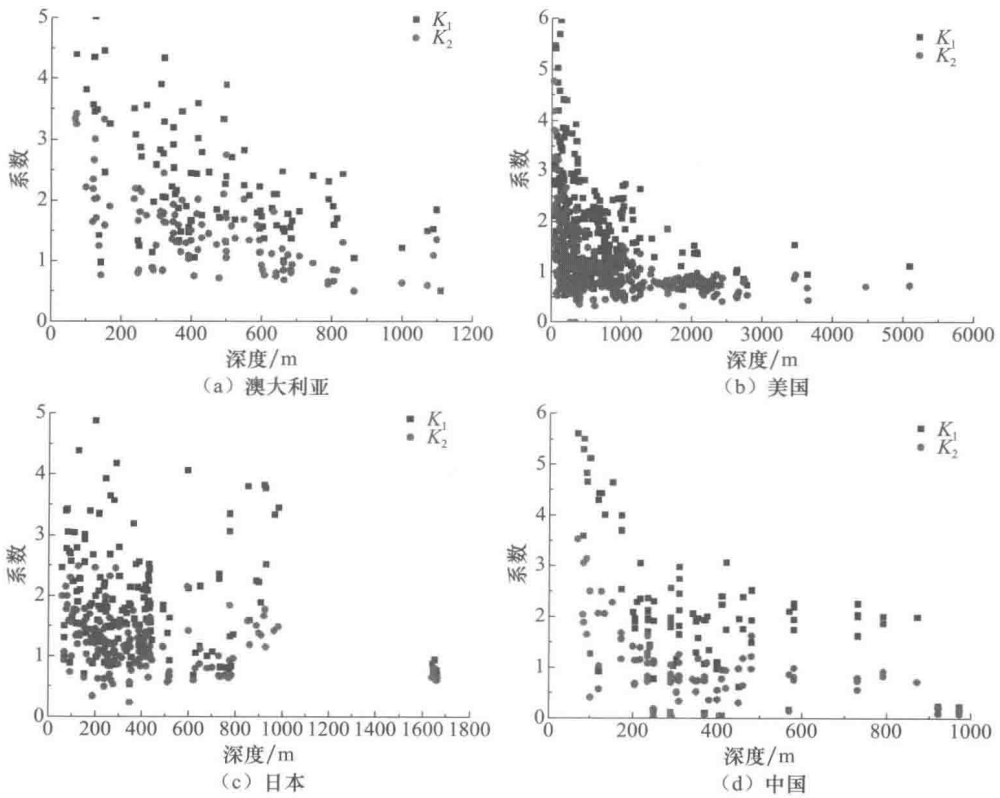


图 1.1 部分国家地应力分布情况

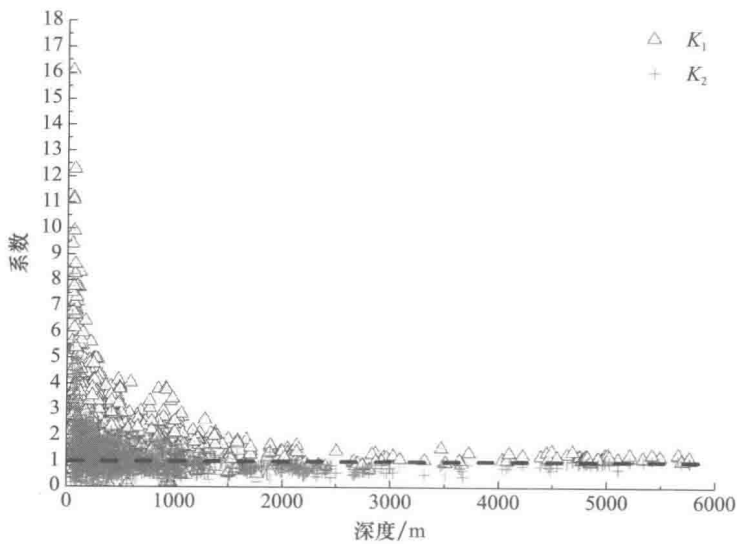


图 1.2 世界 30 多个国家地应力分布情况

1.1.3 深部的力学定义

我国的地应力测试起步较晚，1962 年首次在三峡平善坝坝址获得了岩体应力实测

结果, 1964 年在大冶铁矿进行了国内首次应力解除法测量, 1980 年 10 月在河北易县首次成功进行了水压致裂法地应力测量^[11]。以下对随机若干矿区已有的地应力测试结果随深度变化进行分析。

新汶矿区华丰煤矿是目前我国开采深度最深的矿井, 开拓巷道已达 1460m 以上。从表 1.1 中数据看出, 在 790m 深度, $K_1 = 1.55$, 构造应力效应明显, 当深度达到 1100m 以上时, K_1 接近 1.1, 趋向准静水应力状态 (双向等压应力状态)。

表 1.1 新汶矿区深部矿井地应力测量结果

巷道名称	埋深/m	σ_V /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	K_1	K_2
协庄矿 1202 西回风巷	790	20.94	32.39	16.56	1.55	0.79
潘西矿 435 运巷临时变电所	961	25.47	20.06	10.12	0.79	0.40
潘西矿 7192 主巷 1 号机窝	964	25.55	25.65	12.23	1.00	0.48
潘西矿 7192 主巷 3 号机窝	967	25.63	21.42	10.87	0.84	0.42
华丰矿—920 水平煤仓石门	1040	27.66	31.35	16.2	1.13	0.59
协庄矿—850 二采区轨道下山	1071	28.38	39.77	20.64	1.40	0.73
华丰矿—1010 水平大巷	1130	29.95	33.15	19.1	1.11	0.64
协庄矿 1202 东运输巷	1150	30.48	34.6	17.89	1.14	0.59
华丰矿—1100 大巷	1220	32.33	42.1	22.8	1.30	0.71

表 1.2 为潞安矿区若干地应力测试结果, 可以看到在 200m 水平附近, K_1 最大值达到 2.35, 构造应力显著, 而当至 600m 深度时, K_1 趋于 1.1 的准静水压力状态 (双向等压应力状态)。

表 1.2 潞安矿区地应力测试结果

煤矿名称	埋深/m	σ_V /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	K_1	K_2
潞安王庄	165	4.13	7.47	4.68	1.81	1.13
潞安潞宁	175	4.38	10.31	7.94	2.35	1.81
潞安石圪	229	5.73	9.87	6.21	1.72	1.08
潞安漳村	230	5.75	5.81	3.47	1.01	0.60
潞安司马	253	6.33	10.03	5.42	1.58	0.86
潞安夏店	320	8	6.56	3.16	0.82	0.40
潞安常村	373	9.33	13.57	6.96	1.45	0.75
潞安郭庄	454	11.35	14.08	7.54	1.24	0.66
潞安高河	468	11.7	13.15	7.1	1.12	0.61
潞安屯留	540	13.5	13.21	7.24	0.98	0.54
潞安五阳	589	14.73	16.94	10.84	1.15	0.74

表 1.3 为晋城矿区若干地应力测试结果, 可以看到在 150m 水平, K_1 最大值达到 2.66, 构造应力显著, 而当至 500m 深度时, K_1 趋于 1.2 的准静水压力状态 (双向等压应力状态)。

表 1.3 晋城矿区地应力测试结果

煤矿名称	埋深/m	σ_V /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	K_1	K_2
晋城王台	135	3.38	7.13	4.01	2.11	1.19
晋城凤凰	148	3.7	9.86	5.05	2.66	1.36
晋城古书	181	4.53	8.83	4.96	1.95	1.09
晋城寺河	210	5.25	7.63	3.78	1.45	0.72
晋城长平	290	7.25	10.09	6.17	1.39	0.85
晋城寺河	376	9.4	18.92	9.67	2.01	1.03
晋城成庄	401	10.02	16.06	8.5	1.60	0.85
晋城赵庄	505	12.63	14.83	8.12	1.17	0.64

表 1.4 为山西其他煤矿若干地应力测试结果, 可以看到在 100m 水平, K_1 最大值达到 2.4, 构造应力显著, 而当至 500m 深度时, K_1 趋于 1.1 的准静水压力状态 (双向等压应力状态)。表 1.5 同样显示 K_1 从浅部的 2.92, 逐渐趋向深部的 1。

表 1.4 山西若干煤地应力测量结果^[12]

煤矿名称	埋深/m	σ_V /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	K_1	K_2
平朔安家	86	2.15	5.15	3.31	2.40	1.54
南阳煤矿	170	4.25	4.16	3.02	0.98	0.71
汾西水峪	176	4.41	5.29	3.39	1.20	0.77
汾西柳湾	198	4.96	6.52	3.5	1.31	0.71
汾西双柳	220	5.5	7.58	4.27	1.38	0.78
汾西高阳	280	7	5.32	2.93	0.76	0.42
汾西贺西	284	7.1	8.2	4.86	1.15	0.68
竹林山煤	322	8.05	9.85	5.36	1.22	0.67
善福煤矿	359	8.98	14.85	8.41	1.65	0.94
霍尔新赫	429	10.73	13.71	8.95	1.28	0.83
汾西曙光	432	10.81	13.59	6.95	1.26	0.64
大同塔山	467	11.68	12.78	7.24	1.09	0.62
王坡煤矿	477	11.93	16.7	9.45	1.40	0.79
汾西中兴	482	12.05	14.45	7.74	1.20	0.64
阳泉新景	495	12.38	11.75	6.31	0.95	0.51
阳泉新景	510	12.75	14.06	7.15	1.10	0.56

从以上地应力测试结果可以看出, 无论是煤矿井下原位地应力测试还是深孔水力压裂地应力测试, 浅部 K_1 值较大 (大于 2), 构造应力明显, 随着深部的增加, K_1 逐渐减小趋于 1。两个水平应力中, 较大的水平应力往往大于自重应力, 而较小的水平应力小于自重应力。较大水平应力与自重应力比 K_1 随深度的增加而减小, 最后趋于 1。而较小的水平应力与自重应力比 K_1 随深度变化具有随机性, 但是随着深度不断增加, 原岩应力状态将从构造应力强烈主导区 ($K_1 > 2$) 逐渐向静水压力区转变, 这对深部开采的矿压显现将产生显著影响。