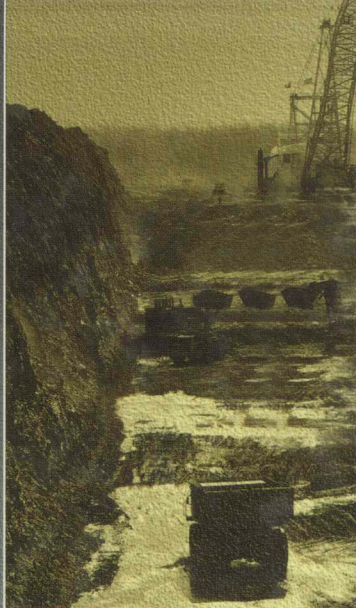




采动应力裂隙场时空演化与 瓦斯流动场耦合效应

齐庆新 李宏艳 刘洪永 杨 科 孙维吉 著



科学出版社

内 容 简 介

本书是国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目的主要研究成果,书中详细阐述了采动煤岩体裂隙场时空演化、采动煤岩体与瓦斯流动场的耦合效应及其在工程中的应用,全书共分 6 章,包括绪论、采动煤岩体裂隙场时空演化、采动煤岩体渗透特性研究、采动煤岩体多场耦合效应研究、煤岩体多场耦合数值模拟研究、耦合理论在瓦斯抽放中的应用。

本书适合从事煤岩瓦斯动力灾害防治的科研人员、工程技术人员、高等院校教师、研究生和本科高年级学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

采动应力裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应/齐庆新等著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034734-3

I. ①采… II. ①齐… III. ①采动-应力场(力学)-研究②矿井-瓦斯渗透-研究 IV. ①TD32②TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 123272 号

责任编辑:刘宝莉 陈 捷 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:张 倩 / 封面设计: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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 7 月第一次印刷 印张:24

字数:471 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在科学探索上，如果问上天难还是入地难，或许你会说上天难。殊不知，其实入地更难。人类在认识世界的过程中，时刻都离不开与地球打交道。其中煤炭资源开采就是最典型的活动之一。煤炭作为我国的主体能源，对支撑国民经济的发展起到了极其重要的作用。目前，我国煤炭产量已达到年产 30 亿 t，产量和消耗量均占世界总量的 40%。尽管如此，由于我国煤炭资源赋存条件复杂，瓦斯、水、火、顶板等各种灾害威胁严重，能够保证煤炭安全高效科学采出的产量不足 30%。尤其是随着我国煤矿开采深度的不断增加，煤层中瓦斯含量呈非线性递增趋势，很多在浅部为低瓦斯的煤矿进入深部开采后转变为高瓦斯矿井，瓦斯已成为制约煤矿生产和影响煤矿安全的主要因素。因此，研究煤炭开采过程中瓦斯的吸附与解吸、瓦斯在采掘空间不同应力场与裂隙场内的运移与流动、采动裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应等关键科学问题，对有效指导煤矿在生产过程中的瓦斯抽采提供理论支撑，对于实现煤矿的安全开采具有重要意义。

正是在这一背景下，国家科技部 2005 年设立了国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“预防煤矿瓦斯动力灾害的基础研究”，针对煤炭开采过程中瓦斯运移及灾变的动力学机制，围绕煤矿瓦斯灾害的地质构造作用机理、采动裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应、煤岩瓦斯动力灾害演化机制及地球物理响应规律、瓦斯煤尘爆炸动力学演化机制等科学问题，开展瓦斯灾害机理及预防的基础研究。

本书内容主要来源于 973 计划项目“预防煤矿瓦斯动力灾害的基础研究”的子课题“采动裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应”的研究成果。煤炭科学研究总院、中国矿业大学、辽宁工程技术大学、安徽理工大学、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 20 余名科研人员依托煤炭资源与安全开采国家重点实验室、煤矿安全技术国家重点实验室、煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室、煤矿安全技术国家工程研究中心、国家安全生产技术支撑体系国家级重点实验室等国家级科研平台参与了该课题研究，采用实验研究、理论分析、数值模拟及现场实测相结合的方法，主要针对采动条件下应力场、位移场和裂隙场的形成机制及分布特征以及采动裂隙场瓦斯流动规律开展研究，具体研究内容包括：①采动条件下裂隙场形成机制及分布特征：研究采动条件下煤岩层的垮落与破坏机制及煤岩体裂隙时空演化与分布规律，建立煤岩层垮落、裂隙、变形与相关参数的关系，弄清采动应力场与瓦斯流动场相互作用机

理, 阐明裂隙发育与分布特征; ②采动裂隙场条件下的瓦斯流动规律: 研究采动裂隙场对瓦斯流动的作用机制, 瓦斯在采动煤岩体裂隙场中的流动规律, 建立采场宏观应力壳的形成及失衡理论, 揭示宏观应力壳与煤岩体裂隙分布、瓦斯渗流特性的内在关系, 瓦斯在采动多孔介质条件下运移与流动特性, 得出瓦斯流动与煤岩体裂隙耦合的时空演化及分布规律, 弄清煤岩层垮落的时空性与瓦斯涌出的时空性及其关系。

本书紧紧围绕采动条件下应力场、裂隙场与瓦斯流动场及其相互耦合效应研究这一主线, 针对采动应力场与瓦斯渗流场耦合等国内外研究热点问题, 系统研究了采动应力场、采动裂隙场、采动瓦斯渗流场。全书共 6 章: 第 1 章绪论; 第 2 章采动煤岩体裂隙场时空演化; 第 3 章采动煤岩体渗透特性研究; 第 4 章采动煤岩体多场耦合效应研究; 第 5 章煤岩体多场耦合数值模拟研究; 第 6 章耦合理论在瓦斯抽放中的应用。

作者所在研究团队的全体成员为本书的撰写倾注了大量心血。本书的研究工作得到了煤炭科学研究总院申宝宏研究员、胡千庭研究员、卢鉴章研究员, 中国矿业大学周世宁院士、张铁岗院士、何学秋教授、林柏泉教授、聂百胜教授, 西南石油大学刘建军教授的关心和指导, 在此向他们表示衷心的感谢。同时, 感谢山西天地王坡煤业有限公司、五阳矿、平煤八矿、平煤十矿、谢桥矿、潘一矿、潘三矿等单位对本书的出版给予的大力支持。

由于采动裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应的研究涉及多学科的理论与方法, 故有许多理论与实际问题仍有待于深入探讨和研究。书中难免有不足之处, 敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究对象	1
1.2 研究意义	2
1.3 研究现状	4
1.3.1 采动煤岩体应力场及裂隙演化过程研究进展	4
1.3.2 煤层瓦斯渗流理论研究进展	16
1.3.3 煤层瓦斯渗流理论在采矿工程中的应用	33
1.4 研究内容与研究方法	38
1.4.1 研究内容	38
1.4.2 研究方法	39
第 2 章 采动煤岩体裂隙场时空演化	41
2.1 煤岩地质特征与赋存环境	41
2.1.1 煤岩力学特性	41
2.1.2 煤岩结构特征	42
2.2 采动煤岩体应力壳与裂隙的动态效应	47
2.2.1 应力壳力学特征、演化特征及其采厚效应	47
2.2.2 不同采厚采动裂隙时空演化特征	60
2.2.3 应力壳与采动裂隙的动态效应	64
2.3 采动煤岩体裂隙场时空演化规律	78
2.3.1 采动煤岩裂隙场演化规律现场观测及描述	78
2.3.2 采动煤岩裂隙场演化规律相似模拟及描述	82
2.3.3 覆岩裂隙场演化的定量描述	87
2.3.4 覆岩裂隙场演化的应力机制分析	100
2.3.5 覆岩裂隙场演化的影响因素分析	119
2.3.6 煤岩裂隙演化规律理论分析	136
2.3.7 开采过程中煤岩裂隙场演化规律数值模拟	142

2.4 本章小结	159
第3章 采动煤岩体渗透特性研究	160
3.1 煤岩渗透性的实验室研究	160
3.1.1 煤岩渗透性的应力敏感性	160
3.1.2 原煤破坏过程中的瓦斯渗透规律研究	181
3.1.3 变围压及煤变形破坏过程中渗透规律试验研究	186
3.2 采动煤岩体渗透特性	206
3.2.1 采动影响下煤岩体内瓦斯流动分析	206
3.2.2 气体示踪技术相关研究	208
3.2.3 现场观测仪器的选择	208
3.2.4 五阳煤矿采动条件下煤体渗透率研究	210
3.3 本章小结	230
第4章 采动煤岩体多场耦合效应研究	232
4.1 采动围岩裂隙场与瓦斯流动场耦合效应	232
4.1.1 冒落带内瓦斯流动与汇集规律	232
4.1.2 裂隙带瓦斯汇集规律	234
4.1.3 弯曲下沉带瓦斯流动与汇集规律	243
4.1.4 下伏煤岩瓦斯运移、汇集规律	246
4.1.5 特殊地质条件下瓦斯运移、汇集规律	253
4.2 煤层应力场、裂隙场与瓦斯流动场耦合效应	258
4.2.1 应力场、裂隙场与瓦斯关系的预测	260
4.2.2 应力场、裂隙场与瓦斯关系的验证	263
第5章 煤岩体多场耦合数值模拟研究	281
5.1 远程采动煤岩体变形与瓦斯流动气固耦合模型	281
5.1.1 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型	281
5.1.2 采动弹脆塑性损伤本构模型的开发	284
5.1.3 采动煤岩体变形数学模型	287
5.1.4 远程卸压瓦斯运移物理模型	288
5.1.5 卸压瓦斯运移数学模型	289
5.1.6 采动煤岩体气固耦合变量	292
5.2 煤岩体裂隙场与渗流场耦合过程数值模拟	294

5.2.1	煤体采动裂隙场演化过程中煤体渗透性的变化分析	294
5.2.2	煤体瓦斯渗流-应力耦合方程建立	297
5.2.3	煤体采动裂隙场演化过程中瓦斯流动的数值模拟	299
5.2.4	煤岩体裂隙场瓦斯渗流数值模拟研究	311
5.2.5	采动裂隙场瓦斯渗流数值模拟研究	317
第6章	耦合理论在瓦斯抽放中的应用	328
6.1	采动煤岩体变形与瓦斯流动气固耦合模型的应用	328
6.1.1	数值试验模型的构建	328
6.1.2	气固耦合效应分析	329
6.2	采动裂隙场对瓦斯抽放影响的数值模拟及其应用	335
6.2.1	工程应用背景概况	335
6.2.2	煤层瓦斯抽放数值模拟	338
6.3	本章小结	354
参考文献		356

第 1 章 绪 论

随着科学技术的发展,在能源开采中涉及了一系列复杂的多孔介质多场耦合作用的科学与工程命题,如煤层开采导致顶底板松动,浅层水沿孔隙裂隙涌入工作面,奥灰水沿裂隙突出;煤层中瓦斯沿孔隙裂隙渗出,进入采掘空间而引起瓦斯爆炸等重特重大事故。这些工程实际问题促进了采矿工程、岩石力学和渗流力学之间的交叉与融合,特别是 20 世纪 90 年代开始的裂隙岩体多相多物理场耦合问题的研究,凝练了采矿过程中煤岩变形与破坏的关键科学问题,丰富了矿山岩石力学与矿业工程学科的理论、方法与技术。

采动条件下煤岩介质应力场、裂隙场与瓦斯流动场耦合效应的研究以煤岩体为主要研究对象,以煤岩体赋存环境为研究基础,以现场、实验室试验和数值模拟为主要研究手段,以煤岩体应力、裂隙演化和瓦斯在煤岩介质中的流动为主要研究问题,以揭示在采动条件下煤岩体变形破坏、瓦斯流动为主要研究目标。采动条件下多场耦合效应研究涉及采矿工程、岩石力学、渗流力学等多个学科,是典型的多学科交叉研究命题。经过近些年的研究,结合我国采矿工程中煤岩动力灾害防治技术,将煤岩体应力场、裂隙场与渗流场共同考虑,研究采动过程中煤岩介质裂隙场演化规律、应力场与渗流场耦合机理、耦合模型与数值模拟,初步形成了采动条件下煤岩介质多场耦合效应研究的基本理论与分析方法。

1.1 研究对象

采动煤岩体多场耦合效应的主要研究对象为煤岩体,以采矿工程煤岩介质中裂隙场与渗流场耦合效应为研究目标,着重研究采矿活动对煤岩体应力、裂隙、渗流的影响。煤岩体作为采矿工程、岩石力学等学科的主要研究对象,其地质特征、力学特性以及工程特性既是耦合效应研究的基础,也是科学工作者面临的关键问题。

在地质特征方面,煤岩体是经过地质作用改造过的,由结构面和结构体所组成并具有一定结构特征的,赋存于物理地质环境中的地质体。煤作为一种典型的岩石,当将其称为“煤岩体”时,它至少具有岩体所具有的三层含义:一是煤岩体在地质历史时期曾经受过复杂的内外动力地质作用,煤岩体中发育了各种地质

构造；二是煤岩体的基本组分可以用结构面和结构体进行表征，其中结构面用于对节理、裂隙、断层、夹层及层间剪切错动带等构造形迹的抽象，结构体则是由结构面切割所形成的岩块，结构面的发育程度和组合关系决定了煤岩体结构类型；三是煤岩体总是与一定的物理地质环境相联系，地应力场、渗流场及地温度场是煤岩体赋存的主要环境，煤岩体的物理力学性质除受岩体结构控制外，还受其赋存环境的影响。

在力学特性方面，煤岩体是非均匀、不连续、各向异性的介质。煤岩体的不连续性源于岩体中发育的各级各类结构面，在实际问题中常被简化为等效连续介质。煤岩体的组成，包括岩性及工程地质岩组等决定了煤岩体的非均匀程度、结构面及其组合形式，特别是煤岩体结构类型和赋存环境决定了煤岩体的各向异性 and 变形特征。

在工程性质方面，煤岩体是工程利用和改造的对象，通过工程作用使煤岩体的变形、强度特性、渗流特性满足人类工程需要。煤岩体的工程性质主要指煤岩体的承载能力、渗透能力。

煤岩体的地质特征揭示了其成因、组成、赋存环境和演化的历史；煤岩体的力学特性介于地质特征和工程性质之间，揭示了煤岩体变形和破坏的机理和规律；煤岩体的工程性质体现了工程的客观要求及岩体对工程的适应能力。因此，煤岩体地质特征是物质基础，煤岩体力学特性是科学问题，岩体工程性质是研究目标。

1.2 研究意义

煤炭作为我国的主要能源，在国民经济发展中占有极其重要的位置。煤矿开采深度不断增加，煤层瓦斯含量加大，煤岩层动力灾害增多，煤层赋存条件不断恶化，给煤矿的安全高效开采提出了严峻的课题。特别是近十多年来，随着厚及特厚煤层的综采放顶煤、大采高等高强度开采技术的推广应用，煤矿重、特重大事故，尤其是瓦斯事故时有发生，如2003年5月13日淮北芦岭煤矿因顶板冲击引起采空区瓦斯喷出导致瓦斯爆炸，2004年10月20日郑州大平煤矿因煤与瓦斯突出引起瓦斯爆炸，2004年11月28日陕西陈家山煤矿综放开采自然发火引发瓦斯爆炸，2005年2月14日辽宁孙家湾煤矿综放开采引发矿震导致的瓦斯爆炸等。尽管这些事故大多最终表现为瓦斯爆炸，但进一步分析可以看到，这些事故的共同特点是发生事故工作面的煤层条件为厚及特厚煤层，所采用综采放顶煤、大采高等高强度开采方法。同时还应注意到，在这些重特重大事故分析中，只关注形成瓦斯爆炸的直接原因，而经常忽略瓦斯爆炸的间接原因，如具有爆炸危险的瓦斯是如何流动与涌出的。近年来，由于煤矿回

采工作面支护与回采装备水平的提高,忽略了综采放顶煤、大采高等高强度开采条件下顶板岩层垮断时空特性的重要性及其对冲击地压和瓦斯流动、涌出的影响。事实上,综采放顶煤、大采高等高强度开采的特点,使得采动影响范围和空间扩大,煤岩层的垮断规律、采动应力场时空演化过程与发生冲击地压的条件及其对瓦斯流动、涌出的影响等发生根本性改变,建立在薄、中厚及厚煤层分层开采条件下的岩层控制理论(压力拱假说、悬臂梁假说、铰接岩块假说、“砌体梁”理论等)是否能够指导厚及特厚煤层综采放顶煤、大采高等高强度开采则是一个急需探讨的问题。这不仅直接影响厚及特厚煤层高强度开采条件下的采动应力场分布规律及冲击地压的发生,而且也关系到研究煤岩层垮断、采动应力场的时空演化过程,掌握瓦斯的流动、涌出与岩层垮断及采动裂隙场的时空相关性,是进而控制瓦斯突出、瓦斯爆炸等重特大事故发生的理论基础。

在煤岩层的垮断规律、采动应力场时空演化过程及其对瓦斯流动、涌出的影响方面,缪协兴等(2004)对高压条件下峰后岩体渗流的非线性行为进行了相关研究,并提出了采动岩体渗流理论;鲜学福(1993)建立了煤层瓦斯流动理论及渗流控制方程;俞启香等(2000)总结了我国煤矿瓦斯涌出的基本规律。尽管国内外学者对此开展了部分相关研究,但主要研究裂隙场与瓦斯的相互耦合作用及瓦斯渗流理论。而对高强度开采条件下岩层垮断与采动应力场的时空演化规律及其对瓦斯流动涌出的影响的研究鲜有报道。

采动裂隙场与瓦斯流动场的相互作用关系是我国煤层瓦斯采动抽放的基础,因为我国开采的煤层大多属于石炭二叠纪的煤层,开采深度大(华东地区平均开采深度已经超过600m),瓦斯压力大,瓦斯含量高,煤层透气性低,地质构造复杂,煤层瓦斯不易在采前抽放。“十五”期间的瓦斯抽采工程实践证明,在煤炭资源开采过程中,工作面周围的煤岩体形成了一定的采动裂隙,该采动裂隙促进了煤岩体中的瓦斯解吸和流动,从而形成了瓦斯采动抽采的条件。保护层开采及强化抽采瓦斯实践的成功,充分说明瓦斯的采动抽采是目前瓦斯治理工作的主要技术途径之一。

采动煤岩裂隙场时空演化与瓦斯流动场耦合效应的研究,可以丰富岩体力学、流体动力学、流固耦合理论等多学科的内涵,使其能更好地为解决工程实际问题服务;可为有效预测预防瓦斯动力灾害的技术和方法奠定理论基础。同时采用大量近年发展起来的新的实验测试、现场监测手段验证、证实机理与机制,有利于预测、预报、评价、治理等重大科学问题的进一步研究。本书对这些科学问题的探讨属于前瞻性应用基础理论研究,并已在瓦斯灾害治理中得到应用,具有重要的学术价值和推广前景。

1.3 研究现状

1.3.1 采动煤岩体应力场及裂隙演化过程研究进展

综合机械化放顶煤开采技术起源于 20 世纪 50 年代初的欧洲，而发展且成熟于 20 世纪 80 年代的中国。实践证明，它是开采厚及特厚煤层行之有效的方法之一，但是，煤层的高强度开采不仅给煤矿安全生产带来很多难题，而且给巷道的支护、顶板管理和围岩控制带来一系列问题，由此引发了对采场上覆岩层应力场及裂隙演化的基本理论研究。

1. 采场上覆岩层应力场及裂隙演化基本理论研究进展

地下矿体的采出必定会引起采场围岩体内的应力重新分布，进而引起围岩的变形、破坏以及运动，从而导致围岩裂隙存在状态的改变。

钱鸣高在铰接岩块学说和预成裂隙梁假说的基础上，借助大屯孔庄矿开采后岩层内部移动观测资料，研究了裂隙带岩层形成结构的可能性和结构的平衡条件，提出了上覆岩层开采后呈“砌体梁”式平衡的结构力学模型。该理论认为采场上覆岩层的岩体结构主要是由多个坚硬岩层组成，每个分组中的软岩可视为坚硬岩层上的荷载，此结构具有滑落和回转变形两种失稳形式。该研究的意义主要在于，上覆岩层结构形态与平衡条件的提出为论证采场矿山压力控制参数奠定了基础。缪协兴、钱鸣高给出了关于“砌体梁”的全结构模型（见图 1.1），并对全结构进行了力学分析，得出了“砌体梁”的形态、受力的理论解以及“砌体梁”排列的拟合曲线。

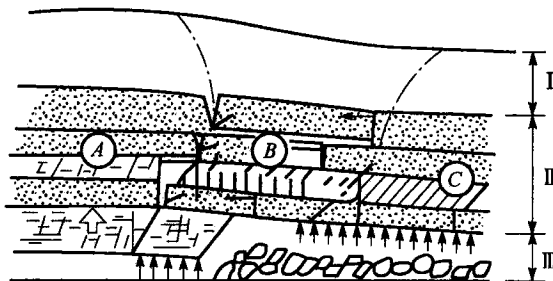


图 1.1 采场上覆岩层“砌体梁”结构

宋振骐（1988）在大量现场观测的基础上，建立并逐步完善了以岩层运动为中心，预测预报、控制设计和控制效果判断二位一体的实用矿压理论体系。矿压界也称之为“传递岩梁”理论。这一理论的重要贡献在于，揭示了岩层运动与采

动支承压力的关系,明确提出了内外应力场的观点,并以此为基础,提出了系统的采场来压预报理论和技术;提出了“限定变形”和“给定变形”为基础的位态方程(支架围岩关系),以及系统的顶板控制设计理论和技术。

在“砌体梁”和“传递岩梁”理论的基础上,姜福兴通过大量现场观测、实验室研究和理论研究,基于“岩层质量的量变引起老顶结构形式质变”的观点,提出了基本顶存在类拱、拱梁和梁式三种基本结构,以及定量诊断老顶结构形式的岩层质量指数法(姜福兴,1993,1994)。在此基础上,姜福兴采用专家系统原理实现了计算机自动分析柱状图,得出老顶结构的形式和直接顶的运动参数,进而实现顶板控制的定量设计。这一成果已在数百个煤矿应用。三种基本结构的观点是基于定量和系统分析方法提出的,“砌体梁”相当于基本结构中的拱梁结构,“传递岩梁”相当于基本结构中的梁式结构(见图1.2),类拱结构则是指由较软岩层组成的老顶。在三种不同的基本顶结构中,类拱结构下不可预报来压,拱梁结构下可预报来压,梁式结构下可准确预报来压;对梁式结构老顶而言,基本顶结构以断裂失稳为主,岩块断裂长度即来压步距;而对类拱结构老顶而言,则以变形失稳为主,失稳步距为周期来压步距,拱梁结构老顶具有两者的特点,并进一步提出了不同基本顶结构形式下各种支架围岩关系。

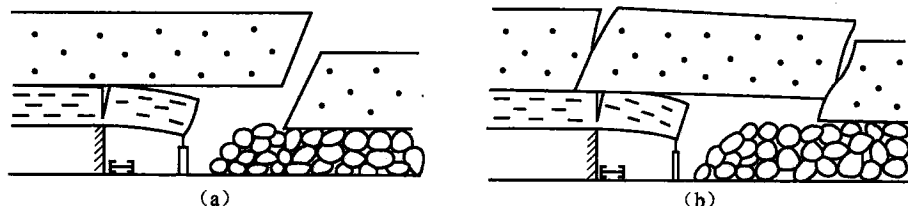


图 1.2 梁式结构的两种形式

姜福兴等(2005)通过研究四面孤岛开采矿压控制技术,认为四面采空孤岛采场越来越成为深部和老矿井的重大安全隐患;专题研究这类采场的矿压控制问题具有重要的理论和实用价值,并提出了三种典型的四面采空“孤岛”的开采地质条件;将四面采空孤岛采场覆岩视为多层空间结构,有助于正确认识岩层运动规律及其与采动应力场的关系,在理论上做出合理的分析。

潘一山等(2003)深入研究了采动对断层附近应力场的影响,建立了断层冲击地压简单模型,采用有限元的方法进行了分析,如图1.3所示,得出了以下两方面的结论:开采后,位于煤层底板部位断层的正应力减小,剪应力也减小,但正应力减小的幅度远大于剪应力减小的幅度,因此,在断层部位,开采引起的断层应力变化以正应力减小为主;开采后,位于煤层顶板部位的断层剪应力增加,正应力也增加,但剪应力增加的幅度远大于正应力增加的幅度,因此,在断层部位,开采引起的断层应力变化以剪应力为主。

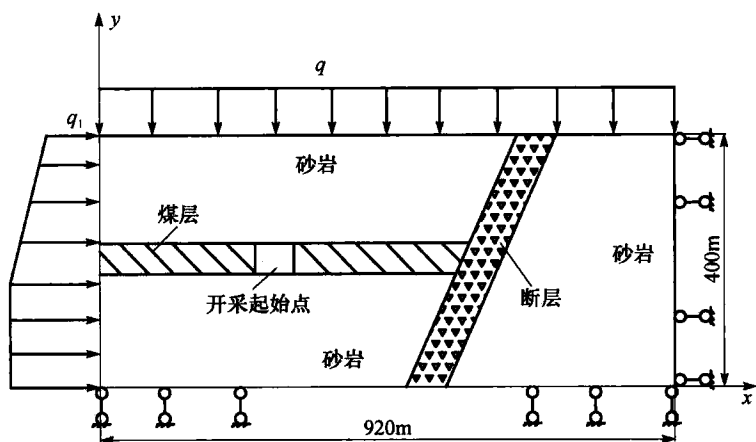


图 1.3 开采对断层应力影响的分析模型

煤炭科学研究总院齐庆新 (1996) 从煤岩层状结构这一特点出发, 采用有限元方法对水平煤层、单一煤层、多煤层、硬顶、硬底、硬煤以及存在软弱层和节理等结构面的煤层进行了采动应力状态研究。结果表明, 无论是单一煤层还是多煤层开采, 采掘空洞周围应力发生显著变化, 出现了较高的应力集中区域; 煤层卸载爆破可能导致局部范围的煤岩体应力集中程度明显下降, 应力峰值位置移向煤体深部, 支承压力的影响范围明显扩大; 结构面对煤岩体应力分布规律的影响是极为显著的。齐庆新等 (1995, 1997) 针对采动应力作用下煤岩体相对滑动也做了大量的研究, 结果表明: 摩擦与滑动特性是非常重要的—种力学特性, 在岩石的摩擦滑动现象中, 存在着两种形式的滑动, 即稳定滑动和黏滑 (不稳定滑动)。稳定滑动是指滑动过程中滑移而上的剪应力不会发生随着滑移面的滑动而急剧增大或减小, 而是基本保持不变的平稳滑动; 黏滑是指滑动过程中滑移而上的剪应力不断出现随着滑移滑动而急剧增大和减小的过程, 这种移面的滑动是在剪切力增大和减小过程中的急剧滑动, 表现为滑移面之间的不稳定滑动。

煤炭科学研究总院闫少宏等 (1996) 基于放顶煤开采上覆岩块运动特点引入有限变形力学理论, 提出了上位岩层结构面稳定性的定量判别式, 并根据结构面极限挤压角的概念、挤压角与层面弯矩的关系, 分析了放顶煤开采上覆岩层平衡结构向高位转移的原因。

陈学华 (2002) 具体研究了工作面开采时煤柱尺寸对采动应力分布的影响。通过计算分析得到以下结论: 采动应力曲线在向深部煤体转移过程中, 峰值应力逐渐变小, 而作用范围逐步增大; 随着采深的增加, 峰值应力集中系数增大, 采动应力影响范围和深入煤壁距离都增大; 随着煤层力学性质变差, 强度降低, 弹

性模量变小,采动应力的影响范围逐渐变大,Y向采动应力峰值强度集中系数变小,最大峰值点向煤壁转移距离 $L_{\max}$ 增大;随着煤层厚度增加,Y向采动应力集中系数变小,而影响范围和峰值点深入煤壁尺寸都相应增大;随着上覆岩层压力角增加,即随着上覆岩层变硬,采动应力峰值集中系数降低,其影响范围和深入煤壁距离都降低;随着煤柱尺寸减小,在煤柱中采动应力的集中系数相应增加。

采场覆岩层属于沉积岩层,一般有一层或几层较为坚硬的厚岩层在整个上覆岩体的变形与破坏中起主要的控制作用,这种岩层称为关键层(key stratum)(涂敏等,2004)。在采动过程中,关键层下部将产生不协调的连续变形,形成岩层移动中的离层和各种裂隙分布。从力学机制上讲,离层是由于上、下岩层的抗弯刚度不同,相邻岩层之间必然产生法向位移。当上位岩层的抗弯刚度大于下位岩层时,则会产生离层运动;当上位岩层的抗弯刚度小于下位岩层时,则形成组合运动;而岩层的抗弯刚度又取决于岩层的弹性模量和厚度。当相邻的上下岩层抗弯刚度接近时,由于覆岩的变形是由下至上逐层递进发展的,故也会产生短期的离层。

采动裂隙场因采场上覆岩层随工作面的推进而形成,由于在不同的区域上覆岩层受力的形式及位置不同,具体的裂隙场也可分为工作面上方裂隙场和采空区上方裂隙场。其中,前者主要是受到超前支承压力的作用,使煤体原岩应力发生巨大变化而形成的;而后者是煤体支承力突然消失后,采空区上覆岩层负重完全作用在顶板上,形成了“砌体梁”结构,从而使顶板裂隙的形态同煤壁前方裂隙完全不同(李树刚等,1999)。

钱鸣高等(1995,1998)应用模型试验、图像分析、离散元模拟等方法对上覆岩层采动裂隙分布特征进行了研究,揭示了长壁工作面覆岩采动裂隙的两阶段发展规律与“O”形圈分布特征,并将其用于指导卸压瓦斯抽放钻孔布置,在淮北矿区卸压瓦斯抽放中得到应用并取得了显著效果,从而得出了以下结论:在一定的开采条件下,岩层的硬度、厚度、断块长度及层序是影响上覆岩层离层裂隙分布的主要因素,覆岩关键层下的离层裂隙最为发育;随着采煤工作面的推进,覆岩离层裂隙的分布呈现两阶段规律,第一阶段离层裂隙在采空区中部最为发育,其最大离层率是第二阶段的数倍,第二阶段采空区中部离层裂隙趋于压实,而采空区四周存在一个离层裂隙发育的“O”形圈;采动裂隙“O”形圈是卸压瓦斯流动的通道和贮存空间,为了大面积、长时间抽放泄压瓦斯,抽放孔应打到“O”形圈内,且第一钻场应布置在离层裂隙分布的第一阶段的区域内。

涂敏等(2004)应用理论分析、模拟分析等手段把瓦斯运移和采场矿压相结合,研究综放开采过程中采场上方覆岩离层裂隙发育的变化规律,阐述采场上方

离层裂隙带的范围,分析采空区离层裂隙带的空隙渗流特性。她的研究结论显示:采场上方存在着多个离层裂隙和纵向断裂面,其随采动裂隙的产生、发展到最终闭合是一个动态变化过程,其覆岩结构离层裂隙带有明显特征,为工作面 and 采空区内瓦斯运移提供通道和储存空间;按岩石碎胀系数大小,开采后工作面后方的垮落覆岩具有明显分区性;离层裂隙分布随时空变化;在开切眼、终采线和采场附近裂隙发育,采场附近顶板离层间隙和断裂裂隙发育,采空区中部裂隙逐渐被压实,如图 1.4 所示。



图 1.4 采动过程中顶板裂隙分布

(1) 煤岩体作为有一定强度的固体介质,当受到采动影响时,其内部承载力发生巨大的变化,虽然在一定范围内岩体不会发生大面积的变形、崩塌,但其内部还是因承载力的加大而产生一系列的微小裂隙,而且其变化是从受采动影响的围岩内壁开始,逐渐向岩体内部开裂的,裂隙逐渐变小。

(2) 从横向方向上来看,裂隙的分布是不均匀的。在采动过程中,两巷和工作面煤壁所受到的采动力分布不均匀,工作面两侧巷道由于承载面积大,因此工作面推进后对其整体载荷分布来讲影响相对较小,微裂隙虽然普遍存在,但大面积的破坏还是较少的;而工作面煤壁则不同,综采的长壁工作面最长的达到 250m 左右,采动影响开始后,工作面上有体积相当大的煤体被剥落,其相应的上覆岩层垂直应力全部作用在尚未回采的工作面煤壁上,应力集中程度非常高,因此其产生的裂隙不论是从开裂度上还是从分布密度上来说都是很大的。

(3) 从纵向方向来看,裂隙的分布也是有很大差异的。煤体上覆岩层包括顶煤、直接顶、基本顶,从分布上来看,它们的厚度是很不均匀的,其强度也是不同的,一般来说煤层较薄、强度也最差,基本顶厚且强度最大。从煤层向上,其破碎程度逐渐降低,裂隙也逐渐减少,直至未受采动影响的区域为止。相对来说,采空区上方的裂隙要比煤壁上方发育的多。

(4) 从煤壁走向上来说,由于采动应力是超前作用的,通常会超前煤壁前方 40m 左右,故煤体裂隙的产生也是从此时开始形成的。初期由于距离回采面较

远, 所受影响较小, 形成的裂隙不是很发育, 但随着工作面的推进, 煤体所受应力不断增大, 最高峰值可能是原岩应力的几倍甚至十几倍, 其破坏力是很大的, 由此而形成的裂隙数量迅速增多, 开度也越来越大。

苏现波等(1998)根据宏观和微观观测, 发现煤中存在一种流体压力致裂的特殊裂隙, 这些裂隙的成因无法用诸如应力场的作用来解释, 此类裂隙的形成与煤中流体(液体和气体)密切相关, 流体的来源有两类: 煤化作用过程中形成的以瓦斯为主的流体和补给来的地下水, 以前者为主, 当孔隙或裂隙中流体压力大于垂直裂隙(或基质孔隙)壁的正应力时, 孔隙或裂隙将沿最大主应力方向延伸、沿最小主应力方向张开; 当流体压力降低时扩展终止, 流体压力导致孔隙向割理转化、割理向继承性裂隙以及外生裂隙进一步扩展。流体压力的集中是周期性的, 即流体压力增加-裂隙扩展-压力降低-裂隙闭合, 这与烃源岩微裂缝排烃机理类似。

宋选民(2002)采用现场实测和理论分析相结合的方式对潞安矿区五阳、王庄、漳村等矿岩体裂隙的分布进行了分析和总结。具体的实测方法是: 在巷道内选取3~5个测区, 每个测区的巷道长度取5m, 在此范围内将顶板裂隙按组进行测量。统计每组裂隙总条数, 计算裂隙间距, 用地质罗盘测定裂隙方位, 或测定裂隙延伸长度与巷道的空间组合尺寸来反算裂隙方位。裂隙的倾角根据其在巷道两帮的出露面或迹线用罗盘进行测定, 裂隙在巷道顶板的延伸长度可用钢卷尺来测定, 在顶板裂隙分布统计观测结束后, 绘出巷道顶板裂隙玫瑰图, 对每个测区的裂隙分布参数进行算术平均, 即可得到测定地区的顶板裂隙分布平均参数值。最终确定潞安矿区构造控制性裂隙展布的总体优势方位, 在布置回采巷道时应注意裂隙方位与巷道轴向以及工作面煤壁方向的合理匹配, 满足巷道稳定性较好, 并保证工作面的正常安全生产。

黄志安等(2006)提出了采空区上覆岩层下沉、裂隙、冒落三带的界定方法, 并通过FLAC软件对沙曲矿14201工作面进行开挖模拟, 将应力超过屈服强度或抗剪强度的岩层高度定为裂隙带的上限, 而将其双向拉应力都超过抗拉强度的岩层高度定为裂隙带的下限, 最后由该矿抽放结果对“三带”划分方法进行了有力的验证。

诸多学者对采动上覆围岩应力场与裂隙场的研究主要是从顶板安全角度来进行的, 产生了诸多顶板围岩运动基本理论, 从不同的角度论述了上覆围岩应力场的作用机理, 阐述了在应力的演变过程中上覆岩层裂隙场的演化规律。综合以上学者的观点, 还需进行以下内容的研究:

(1) 从瓦斯安全角度出发, 考虑采场上覆岩层在瓦斯流动过程中的作用以及上覆岩层应力场、裂隙场的演化过程。

(2) 分析采动上覆岩层裂隙的生成与演化对上覆围岩岩体渗透性的影响, 并

进行定量研究。

2. 岩体裂隙系统分布规律及方法研究

采动条件下煤岩体裂隙演化过程研究的核心问题是如何表征煤岩体中裂隙的特征。由于天然露头或人工开挖的限制,很难对岩体内裂隙的集合参数进行系统而准确性的测量,对岩体中裂隙特征的完整描述也是非常困难的,有时甚至是不可能的。岩体中存在形态、大小、间距、密度和方向各异的裂隙,特别是它们相互交切,形成裂隙网络系统,使岩体具有结构性和不确定性的特点,成为岩体裂隙研究的难点之一。岩体裂隙几何形态的不确定性导致了岩体力学行为的不确定性,从而使得岩体力学问题定量化程度不高或定量成果可信度偏低。就目前数值模拟技术来说,无论是有限元、边界元、离散元,还是它们的耦合计算,以及它们与模糊数学、概率统计、分形几何或与损伤力学、断裂力学的结合等,其计算结果的可靠性均取决于岩体结构模型的正确与否以及裂隙参数的选取,而岩体结构描述和岩体力学参数选取一直是岩体力学研究领域的难点。

岩体中的断层、软弱层面、大多数节理、软弱片理和软弱带等各种力学成因的裂隙面和裂隙带定义为结构面(discontinuity)。自20世纪50年代以来,各国学者通过总结许多大型工程实践和一系列灾害性的岩体失稳事件,逐步认识到岩体中的结构面对岩体变形及稳定性所起到的重要作用。岩体结构的研究始于20世纪50年代,以Muller为代表的奥地利学派最早认识到结构面对岩体力学特性和工程稳定性起控制作用,并认为这是构成岩体和岩块力学与工程特性差异的根本原因,从此开辟了结构面研究的先河。60年代谷德振、孙玉科提出了“岩体结构”的概念和岩体结构控制岩体稳定的重要观点。80年代孙广忠提出了“岩体结构控制论”,全面、系统地研究了结构面影响岩体变形与破坏的基本规律。

对岩体结构面的研究大致可以从三个方面展开:结构面几何特性、结构面力学特性和结构面网络模拟(黄润秋等,2004)。

1) 结构面几何特性研究

1978年,国际岩石力学学会实验室和野外试验标准化专门委员会提出了“对岩体结构面定量描述的推荐方法”,其中规定了结构面的10个描述指标,包括结构面产状(orientation)、间距(spacing)、延续性(persistence)、粗糙程度(roughness)、起伏度(aperture)、侧壁抗压强度、充填情况、渗流、组数和块体大小等。

(1) 结构面产状研究。

1941年Arnord在其博士论文《球状概率分布》中研究了方向数据球状分