

河南省科技攻关项目(172102310738) 资助
河南工程学院博士基金项目(D2015025)

工作面前方煤体采动卸压规律 及其与瓦斯运移相关性

郑吉玉 著

非
外
借



黄河水利出版社

河南省科技攻关项目(172102310738)

河南工程学院博士基金项目(D2015025)

资助

工作面前方煤体采动卸压规律 及其与瓦斯运移相关性

郑吉玉 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书运用岩石力学、渗流力学等相关知识,探讨采煤工作面前方煤体变形破坏及卸压过程与瓦斯运移相关性,旨在通过把握采煤工作面前方煤卸压与瓦斯运移相关性规律,为采煤工作面前方卸压区瓦斯抽采提供理论依据和指导,以降低卸压区瓦斯涌出量,从而降低瓦斯危险。

本书内容与煤岩采动卸压及瓦斯运移基本理论和实践有关,主要可供煤矿安全相关专业老师和学生、煤矿瓦斯治理技术和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工作面前方煤体采动卸压规律及其与瓦斯运移相关性/郑吉玉著. —郑州:黄河水利出版社,2017. 10

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1873 - 3

I. ①工… II. ①郑… III. ①回采工作面 - 安全技术 IV. ①TD802

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 258817 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:7.25

字数:168 千字

版次:2017 年 10 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

瓦斯灾害是煤矿的主要灾害之一,尤其是重特大瓦斯事故造成的伤亡损失占比最大。据统计,2005~2015年重特大煤与瓦斯爆炸事故和重特大瓦斯突出事故占重特大煤矿事故的58.4%,因此瓦斯被称为煤矿安全的第一杀手。受采动影响,采煤工作面前方煤体发生卸压破坏,存在卸压区。卸压区内煤体裂隙发育,瓦斯通过解吸扩散,向采煤工作面大量涌出,给采煤工作面安全采煤带来危险。

本书研究了采煤工作面前方煤体采动卸压与瓦斯运移规律的相关性。通过实验室试验研究了不同加卸载条件下煤的力学性质和压缩扩容过程中煤的渗流特性,理论分析了工作面前方煤体卸压区范围,推导了工作面前方煤体孔隙率动态变化方程、渗透率变化方程,并应用多物理场耦合软件模拟了工作面前方煤体垂直应力变化规律、渗透率变化规律、瓦斯压力变化规律。现场实测了工作面前方应力分布和钻孔瓦斯流量随工作面推进变化规律,通过对比,现场实测与理论分析和数值模拟较为一致。

基于工作面前方煤体卸压增透效应,给出了工作面前方钻孔卸压瓦斯抽采量计算公式,并根据钻孔成孔率及盲区范围对钻孔偏角进行了优化,确定了合理钻孔偏角,为工作面前方煤体卸压区瓦斯抽采提供指导。具体内容包括:绪论、煤的卸围压及加卸载试验研究、煤的压缩扩容与渗流试验研究、考虑孔隙瓦斯压力的工作面前方煤体卸压区范围研究、工作面前方采动煤体瓦斯运移方程及数值模拟、工作面前方煤体采动卸压增透效应及预抽钻孔偏角优化、结论与展望。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者谅解。

作 者
2017年8月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 选题背景及研究意义	(1)
1.2 采动影响下煤体破坏及卸压范围理论研究现状	(2)
1.3 煤层瓦斯运移规律研究现状	(7)
1.4 采动影响与瓦斯运移相关性研究现状	(9)
第2章 煤的卸围压及加卸载试验研究	(12)
2.1 概 述	(12)
2.2 试验装置的组成及各部分简介	(13)
2.3 试件制作安装及试验方案、过程	(16)
2.4 常规三轴试验结果分析	(19)
2.5 卸围压试验结果分析	(23)
2.6 加卸载试验结果分析	(26)
2.7 本章小结	(30)
第3章 煤的压缩扩容与渗流试验研究	(32)
3.1 概 述	(32)
3.2 试验装置的组成及简介	(33)
3.3 试验装置各系统介绍	(34)
3.4 试验理论基础及准备	(38)
3.5 试验结果分析	(39)
3.6 本章小结	(46)
第4章 考虑孔隙瓦斯压力的工作面前方煤体卸压区范围研究	(48)
4.1 概 述	(48)
4.2 考虑孔隙瓦斯压力的工作面前方煤体卸压区范围计算	(51)
4.3 卸压区宽度的影响因素	(54)
4.4 实例分析	(58)
4.5 本章小结	(59)
第5章 工作面前方采动煤体瓦斯运移方程及数值模拟	(60)
5.1 概 述	(60)
5.2 孔隙率动态变化模型	(61)
5.3 渗透率动态变化模型	(62)
5.4 工作面前方煤体渗流场方程	(64)
5.5 工作面前方煤体应力—渗流数值模拟	(66)

5.6	数值模拟结果分析	(72)
5.7	本章小结	(80)
第6章	工作面前方煤体采动卸压增透效应及预抽钻孔偏角优化	(81)
6.1	概 述	(81)
6.2	工作面前方煤体采动卸压增透效应现场测试	(84)
6.3	基于采动煤体卸压增透效应现场应用及偏角优化	(85)
6.4	本章小结	(94)
第7章	结论与展望	(96)
参考文献		(98)

第1章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 选题背景

随着采深的增加和科技的发展,煤矿开采表现出新的特点,主要有:综合机械化开采成为主要的开采方式,开采强度大造成采场空间的不稳定性增加,是导致瓦斯涌出量增加的主要因素之一,增加了瓦斯治理难度,也给采掘空间带来一定的瓦斯危险;随着埋深的增加,地应力和瓦斯含量增大,综合各种因素的复杂事故(如冲击诱导型煤与瓦斯突出事故)越来越多;煤岩体采掘过程中,采动影响、瓦斯运移、地应力等各种复杂因素叠加,影响煤矿安全高效生产^[1,2]。

从国家重大事故统计看,煤矿事故在国家重大事故中所占比例较大。2013年、2014年煤矿事故分别造成1 067人、931人死亡。2013年10人以上重大事故共12起,共造成221人死亡,其中煤与瓦斯突出事故3起,瓦斯爆炸事故5起,即共8起为瓦斯事故。2014年10人以上重大事故14起,共造成229人死亡,其中煤与瓦斯突出事故3起,瓦斯爆炸事故6起,即共9起为瓦斯事故。2013年、2014年煤矿10人以上重大事故中,瓦斯事故起数分别占总事故起数的75%、64.3%。从近几年的煤矿重大事故看,煤矿瓦斯事故起数多、伤亡大;从煤矿开采新特点看,高强度开采造成瓦斯治理难度不断增大,因此加强瓦斯治理降低瓦斯事故的发生是降低国家重大事故发生的迫切措施。

受煤体开挖影响,煤体原始应力水平状态被打破,导致采煤工作面前方煤体应力的二次分布。应力的变化使煤体经历弹性变形、塑性变形和破坏过程,且这种过程周而复始地发生。采煤工作面的回采引起煤壁前方煤体应力二次分布并使煤体结构发生变化,这种变化经历了煤体的孔隙压缩闭合、微裂隙产生、微裂隙扩展和宏观裂隙的产生、扩展,继而形成相互贯通的宏观裂隙网络,而随之引起采煤工作面前方煤体渗透性的改变,这种渗透性的变化与裂隙的演变息息相关。在采煤工作面前方煤体渗透率变化过程中,紧邻采煤工作面煤壁的前方卸压区内煤层渗透率急剧增大,为工作面前方本煤层倾斜钻孔卸压区瓦斯抽采提供了瓦斯源,具有非常重要的意义^[3,4]。瓦斯运移与采煤工作面前方煤体的变形破坏及裂隙演化是一个复杂的过程,其中还伴随着应力的不断变化,因此应将瓦斯运移规律与采动影响下采煤工作面前方煤体的变形破坏过程以及应力变化有机地结合起来。

1.1.2 研究意义

煤壁瓦斯涌出量是采掘空间瓦斯涌出量的重要组成部分,占较大比例,而煤壁前方煤体卸压区为煤壁瓦斯提供源源不断的瓦斯源,且煤与瓦斯突出也与工作面前方卸压瓦斯

涌出异常有关,因此工作面前方卸压瓦斯不仅易造成采煤工作面瓦斯积聚,也是促使煤与瓦斯突出的因素之一。工作面前方卸压瓦斯运移规律及瓦斯治理既是目前煤矿安全的重要内容之一,也是目前煤矿瓦斯的研究热点之一。

瓦斯在未受开采扰动的煤层中,长期处于一定瓦斯压力水平。受采动影响,工作面前方煤体受力变形,产生卸压破坏,此过程又伴随孔隙率、渗透率变化以及瓦斯运移过程。由于采动卸压与瓦斯运移的复杂性,针对开采扰动下采煤工作面前方煤体卸压与瓦斯运移相关性方面的研究尚不够完善。受采动影响,采煤工作面前方煤体成为一个非稳态过程,瓦斯运移和采动卸压是相互影响、相互制约的综合作用系统,因此有必要进行综合系统的研究。

研究采动影响下采煤工作面前方煤体变形破坏过程与瓦斯运移的关系,旨在通过研究开采扰动下工作面前方煤体的变形破坏过程,研究与其相关的瓦斯运移规律,尤其是卸压区的瓦斯运移规律,从而为采煤工作面前方煤体卸压瓦斯抽采提供理论依据。采煤工作面前方煤体钻孔卸压瓦斯的抽采使瓦斯含量和突出危险性降低,也避免了采煤工作面瓦斯积聚危险的发生,因此掌握采煤工作面前方煤体的变形破坏与瓦斯运移相关规律,对指导工作面高效抽采、保障工作面安全回采具有重要意义。

1.2 采动影响下煤体破坏及卸压范围理论研究现状

1.2.1 煤岩强度准则

长期以来,人们对煤岩应力应变下的屈服、破坏进行了研究,总结了煤岩破坏的一般规律,形成了煤岩强度准则。强度准则也是各种材料强度计算及工程设计的基础,自从 Coulomb 强度准则发现以来,陆续出现了多种强度准则,不同的强度准则基于不同的条件假设以及对应不同的材料适用范围。

1.2.1.1 Mohr - Coulomb 强度准则^[5]

井下煤岩采掘引起应力集中以及卸压,从而导致煤岩体的破坏,即煤岩体的破坏是在一定应力下发生的,对应为破坏强度。在以往的研究中,许多强度准则被提出,最简单也是最早被提出的是 Coulomb 准则,它于 1773 年由 Coulomb 提出,认为煤岩体的破坏主要是剪切破坏,因此又称为剪切强度准则。Coulomb 准则表达式用来描述剪切应力参数和正应力参数关系,其定义用式(1-1)表示。

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (1-1)$$

式中, τ 为煤岩体抗剪强度; σ 为剪切破坏面上正应力; φ 、 C 分别为煤岩体抗剪内摩擦角和黏聚力。

1900 年,Mohr 把 Coulomb 强度准则扩展到三轴应力条件,提出了 Mohr 强度准则,并认为剪应力是正应力的函数,且与材料性质密切相关,其函数表示为

$$\tau = f(\sigma) \quad (1-2)$$

式(1-2)所表达的曲线通过单轴拉伸、单轴压缩及三轴应力条件下破坏时的 Mohr 应力圆包络线获得,根据大量试验结果,破坏曲线形式主要有直线形、双曲线形、抛物线形。

由于 Coulomb 准则可看作 Mohr 强度准则的特例,且两种强度准则应用范围较广,因此合称为 Mohr - Coulomb 强度准则。

1.2.1.2 Griffith 强度准则

1921 年英国科学家 Griffith^[6] 提出:受固体材料内部存在裂缝或缺陷因素的影响,固体材料的实际强度低于理论强度。Griffith 指出如果材料体系的总能量降低,则原有的裂隙将扩展,其能量平衡方程可用下式表示

$$U = U_0 + U_\alpha + U_p - F \quad (1-3)$$

式中, U_0 为无裂隙表面的弹性能(常数); U_α 为引起裂隙的弹性能变化的值; U_p 为形成裂隙表面的弹性能变化的值; F 为由外力做的功。

根据裂纹扩展的能量不稳定原理可以确定裂纹扩展的条件,1924 年 Griffith^[7] 在压缩试验中应用上述理论,形成 Griffith 强度准则

$$\begin{cases} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = 8\sigma_t & (\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0) \\ \sigma_3 = -\sigma_t & (\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力; σ_t 为煤岩的单轴抗拉强度。

周群力^[8] (1979) 等将岩体中的裂隙模拟为裂纹,通过断裂力学的方法分析裂隙的开裂、扩展、贯通直至破坏的过程,结合 Mohr - Coulomb 强度理论,建立了相关断裂准则,即

$$l_{12} \sum K_I + \sum K_{II} = \bar{K}_{IIIC} \quad (1-5)$$

式中, l_{12} 为压剪系数; K_I 、 K_{II} 为应力强度因子; $\bar{K}_{IIIC}$ 为压缩状态的剪切韧度。 l_{12} 、 $\bar{K}_{IIIC}$ 由压剪试验确定。

1.2.1.3 Drucker - Prager 强度准则^[9]

Drucker - Prager 强度准则是基于塑性力学中的 Mises 强度准则和 Mohr - Coulomb 准则而建立的,可用下式表示

$$s_m I_1 + \sqrt{J_2} - t_n = 0 \quad (1-6)$$

式中, s_m 、 t_n 分别为与煤岩黏聚力 C 和内摩擦角 φ 有关的常数,用下式计算

$$\begin{cases} s_m = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \\ t_n = \frac{6C\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \end{cases} \quad (1-7)$$

其中, I_1 、 J_2 为应力偏量(分别为第一、第二不变量),表达式分别为

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \end{cases} \quad (1-8)$$

1.2.1.4 Hoek - Brown 强度准则

1980 年, Hoek 和 Brown 提出了 Hoek - Brown 强度准则^[10]。Hoek - Brown 强度准则反映了煤岩破坏时主应力间的非线性关系,即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

式中, σ_c 为煤岩的单轴抗压强度; m_i 为经验参数; 其他符号含义同前。

通过对大量试验结果的分析和论证, Hoek 提出了修正的广义强度准则^[11], 即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + s \right)^t \quad (1-10)$$

式中, s, t 为有关经验常数; 其他符号含义同前。

B. Singh^[12] 基于 Hoek - Brown 准则提出考虑中间主应力的强度准则, 即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2\sigma_1} + s \right)^t \quad (1-11)$$

1.2.1.5 幂函数强度准则

1965 年, Murrell^[13] 提出幂函数强度准则, 即

$$\sigma_1 = F_i \sigma_3^{F_s} + \sigma_c \quad (1-12)$$

式中, F_i, F_s 为常数。

随后, Bieniawski^[14] 提出了如下经验强度准则

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 1 + e_i \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^{f_i} \quad (1-13)$$

式中, e_i, f_i 为常数; 其他符号含义同前。

Ryunoshin Yoshinaka^[15] 等提出包含剪应力和主应力的幂函数强度准则, 刘宝琛^[16] 等将大量试验数据进行了应用, 得出幂函数强度准则表达式如下

$$\frac{\tau_m}{\tau_{m0}} = A_i \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} \right)^{B_i} \quad (1-14)$$

式中, $\tau_m, \tau_{m0}, \sigma_m, \sigma_{m0}$ 分别为三轴应力极限状态下的最大剪应力、单轴压缩应力极限状态下的最大剪应力、三轴应力极限状态下的平均法向应力、单轴压缩应力极限状态下的平均法向应力; A_i, B_i 为与煤岩性质相关的系数。

1.2.1.6 统一强度准则^[17,18]

统一强度准则是在双剪应力屈服准则基础上建立的, 其形式如下

$$\begin{cases} \tau_{13} + \tau_{12} = \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) & (\tau_{12} \geq \tau_{23}) \\ \tau_{13} + \tau_{23} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \sigma_3 & (\tau_{12} < \tau_{23}) \end{cases} \quad (1-15)$$

随后俞茂宏提出广义双剪应力强度准则, 其形式如下

$$\begin{cases} F = \tau_{13} + \tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + \sigma_{12}) = c & (F \geq F') \\ F' = \tau_{13} + \tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + \sigma_{23}) = c & (F < F') \end{cases} \quad (1-16)$$

由于双剪应力强度准则适用范围的局限性, 俞茂宏提出适用岩土材料的统一强度准则, 其形式如下

$$\begin{cases} \tau_{13} + b\tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) = c & (\tau_{12} + \beta\sigma_{12} \geq \tau_{23} + \beta\sigma_{23}) \\ \tau_{13} + b\tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) = c & (\tau_{12} + \beta\sigma_{12} < \tau_{23} + \beta\sigma_{23}) \end{cases} \quad (1-17)$$

式(1-15) ~ 式(1-17)中, b, β 为系数(分别与中间主剪应力和正应力相关); c 为强度参数; $\tau_{13}, \tau_{12}, \tau_{23}$ 分别为各作用面上的双剪应力; $\sigma_{13}, \sigma_{12}, \sigma_{23}$ 分别为各作用面上的正应力。

强度准则的选择直接影响计算结果,因此选择正确的强度准则往往比计算过程重要。煤岩体本身脆延特征不同、所处的应力条件不同,对应的强度准则也不同。在工程应用及试验研究中,选择正确的强度准则,对提高煤(岩)体应力应变、塑性区范围、卸压区范围计算的准确性大有裨益。

1.2.2 采动影响下的煤岩塑性破坏区理论

1.2.2.1 采动影响下的煤岩塑性区范围研究现状

有关采动影响下煤岩塑性区及卸压区范围的研究,国内外不少学者做出了积极的贡献。在相关研究中,采用的屈服破坏准则不尽相同,以 Mohr - Coulomb 准则为主;研究的巷道形状也有区别,以圆形巷道为主。有关塑性区范围计算公式,以 Fenner 公式和 Kastner 公式最为著名,随后国内外不少学者在 Fenner 公式和 Kastner 公式的基础上对塑性区范围计算公式进行了修正和改进^[19,20],同时也有学者采用不同的研究方法确定塑性区范围。

关于塑性区范围的研究,从理论上讲,根据破坏准则不同,塑性区范围的研究主要有 Mohr - Coulomb 准则、Druker - Prager 准则、Hoek - Brown 准则等,其中以 Mohr - Coulomb 准则应用最为广泛;从研究角度上看,对塑性区范围的研究考虑因素各有不同,如郑颖人等^[21]认为塑性区范围为时间 t 的函数,马念杰等^[22]把岩石的全应力应变曲线峰后残余强度作为塑性软化强度,翟所业等^[23]考虑了中间主应力因素,熊仁钦^[24]考虑了三维应力条件,赵国旭等^[25]考虑了煤(岩)柱稳定性。另外,塑性区范围研究的从岩体到煤体,从圆形巷道到矩形巷道,所得到的塑性区范围计算公式各不相同。这方面的内容将在后面章节进行详细阐述。

对塑性区范围的研究,考虑的是围岩峰前屈服条件下的应力平衡状态,而对于围岩峰后残余阶段的应力平衡,通常得到的是煤岩破坏后形成的松动圈,这方面的理论称为松动圈理论。

1.2.2.2 采动影响下的围岩松动圈理论研究现状

煤岩巷道开挖以后,开挖巷道周围由原岩应力状态转为应力集中状态,当应力大于煤岩强度时,煤岩发生屈服破坏,继而导致巷道周围煤岩形成破裂区域,称为松动圈。早在 20 世纪早期,随着普氏理论(自然平衡拱理论)的提出,松动圈理论开始发展应用;随后太沙基提出与地压理论相关的冒落拱理论,但其适用性随着埋深的增加而降低。金尼克基于弹性理论计算了圆形巷道的围岩侧向位移量。芬纳尔基于塑性理论计算了竖井和水平硐室围岩的屈服区半径。拉巴斯把巷道围岩进行了分区,并给出了松裂区的计算公式。鲁宾涅特基于拉巴斯和芬纳尔的理论,提出了圆形巷道松动裂隙区(非弹性变形区)与围岩位移的计算公式^[26]。

20 世纪 70 年代,日本学者采用声波测试技术对松动圈进行了实测,并建立了与波速相关的松动圈范围计算公式。A. K. Dube 等在忽略围岩性质等因素影响的情况下,以弹塑性理论为基础估算了松动圈(破碎区)范围。L. Z. Wojno 基于松动圈范围和侧向位移对岩石进行了简单分类。E. I. Shemyakin 等建立了包括原始应力、埋深、煤岩强度、跨距的松动圈计算公式^[27],认为巷道开挖后,由于产生的集中应力大于围岩的强度,使围岩产生

松动的破裂带,称为松动圈。文献[28]基于声波法对松动圈(破裂带)的实测,提出围岩松动圈理论和锚喷支护理论。文献[29]研究了软岩巷道工程的判定方法,提出采用围岩的松动圈厚度这一定量指标进行判定,具有简单、方便和较准确的特点。文献[30]认为松动圈由塑性软化区和破碎区两部分组成,并采用动静力学进行的解释分析,推导出松动圈半径计算公式,并现场测试验证了其正确性。文献[31]认为声波法对煤层等软岩松动圈的观测并不准确,提出采用地质雷达法对围岩松动圈进行观测,较为方便有效。此外,松动圈的测定方法还有电阻率法、地震波法等。文献[32]采用钻孔数字摄像以及配套的软性系统分析方法测试煤矿巷道的围岩松动圈,并与声波法对比,误差较小,且连续、可靠、直观。文献[33]分析了受采动影响的围岩松动圈范围的影响因素,认为与采深、围岩强度、支护、采动影响、时间等关系密切。

上述理论学说及计算公式虽然是在一定假设条件下推导出来的且各有其局限性,但对松动圈理论起了推动作用,仍有较广泛的应用。由于井下环境及松动圈影响因素的复杂性,目前尚无统一的松动圈计算公式,围岩的应力分布及裂隙演化规律有待进一步研究。

1.2.2.3 采动影响下的深部围岩分区破裂研究现状

在深部巷道,人们在观测松动圈的时候发现围岩松动圈内部存在分区破裂化现象。20世纪70年代,苏联学者首次发现了分区破裂化现象。随后不少学者采用电阻率、超声透射、潜望镜、地球物理等方法分别观测到了分区破裂化现象,有的多达4~5个周期裂纹区。近年来,国内学者在分区破裂化方面的研究也取得了不少成果^[34]。

文献[35]根据国内外分区破裂化方面的研究,总结了分区破裂化的发生条件及发展规律特征。文献[36]认为分区破裂化的产生需要两个条件:一是需要较大的轴向应力,才能引起多次破坏;二是需要足够的能量突然释放,产生足够大的拉应力,使围岩发生多次受拉破坏。文献[37]采用钻孔窥测仪以录像形式观测了淮南矿区深部巷道围岩的分区破裂化现象,证实了该现象的存在。根据深部分区破裂的发生条件,文献[38]以最大支撑力区发生破坏的深度作为深部界定标准。文献[39]通过能量平衡分析,研究了分区破裂化(间隔性区域断裂)的形成机制,认为分区破裂化与原岩应力、巷道半径及围岩的力学参数有关。文献[40]采用三维相似模拟方法研究了淮南矿区某矿的分区破裂化。在分区破裂化研究中,文献[41]提出了连续相变理论。通过序参量塑性剪切变形并利用自由能及热力学相关理论,得到多个破裂区的发展特征。文献[42]基于弹性力学和断裂力学研究了破裂区的发生条件并根据残余强度特征及时间确定破裂区的数量和宽度。文献[43]、[44]等研制了模拟深部巷道围岩分区破裂的相似模拟试验装置,观察到分区破裂现象,发现只有在硐室轴线方向与最大主应力方向平行时,才会发生分区破裂化现象。

煤矿开采进入深部以后,巷道(硐室)围岩的应力状态变得更复杂,目前分区破裂的研究在国内尚处于起步阶段,分区破裂现象还需要大量的试验进行验证,分区破裂相关机制需进一步研究。

1.3 煤层瓦斯运移规律研究现状

瓦斯在煤体内的运移规律分为两个过程:一是孔隙(小孔)瓦斯的扩散;二是裂隙(包括大孔)瓦斯的渗流。受采煤扰动影响,煤层内气体的平衡状态被打破,瓦斯首先由吸附状态转变成游离状态,高浓度的游离瓦斯与孔隙空间内的低浓度瓦斯形成浓度差,瓦斯发生扩散。煤层内的裂隙为大量的扩散瓦斯提供了汇集和运移通道,形成瓦斯渗流。

1.3.1 孔隙瓦斯扩散理论研究现状

扩散是物质从一个系统运移到另一个系统并造成分子减少的运动过程。Thomas Graham 最早对气体扩散进行了定量试验研究,发现了 Graham 扩散定律(Graham's law):认为两种气体扩散相互接触(相互混合)的体积并不相等,而每一种气体的扩散体积与该气体密度的平方根成反比。

Fick 在 1855 年研究了盐水混合系统的扩散现象,结果表明:盐的扩散量与浓度梯度成正比,并引入了扩散系数概念。假设扩散在一维空间进行,Fick 扩散定律^[45]表达式为

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1-18)$$

式中, J 为通量; D 为扩散系数; C 为浓度; $\frac{\partial C}{\partial x}$ 为浓度梯度。

把 Fick 扩散定律扩展到三维流场,其表达式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1-19)$$

气体分子在多孔介质中的扩散与孔隙直径和气体分子的自由程有关,而煤的孔隙按直径不同有不同的分类,设孔隙直径 d 与气体分子自由程 λ 的比值为 K_n ,其表达式为

$$K_n = \frac{d}{\lambda} \quad (1-20)$$

式中, K_n 为 Knudsen 数,当 Knudsen 数大于等于 10 时,扩散遵循 Fick 定律。

通过大量的试验及实践经验,煤屑(多孔介质)瓦斯扩散符合 Fick 扩散定律。

当 Knudsen 数小于等于 0.1 时,扩散遵循 Knudsen 扩散,这种扩散是由分子与孔隙壁的碰撞造成的。Knudsen 扩散系数与气体性质有关^[46],如下式

$$D_n = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (1-21)$$

式中, D_n 为努森扩散系数; r 为半径; R 为气体常数; T 为绝对温度; M 为瓦斯相对分子质量。

当 $0.1 \leq K_n \leq 10$ 时,为过渡性扩散,既有努森扩散的发生又伴随着菲克扩散。

煤层中瓦斯多以吸附状态存在,在煤粒表面往往存在大量吸附瓦斯,当孔隙表面的瓦斯分子由于浓度差的作用发生扩散时,称为表面扩散。表面扩散系数为

$$D_{se} = D_{s0} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1-22)$$

式中, D_{se} 为表面扩散系数; D_{s0} 为与气体性质和介质有关的常数; E_a 为表面能量。

当孔隙较大时, 表面扩散与 Fick 扩散相伴进行。

此外, 当压力增加到一定程度时, 还可能发生晶体扩散, 或以固体瓦斯形式存在。由于煤中孔隙尺寸分布以符合 Fick 扩散为主, 因此 Fick 扩散使用得更为广泛。

Stephan 和 Neumann 在研究 Fick 扩散的基础上, 首次认识到边界条件对解扩散方程的重要性^[47]。杨其銮和王佑安^[48, 49]根据 Fick 扩散定律并借助热传导的研究方法, 求出了第一类边界条件下煤屑瓦斯扩散率的近似计算公式。

$$\delta(t) = \frac{Q_t}{Q_\infty} = \sqrt{1 - e^{-KBt}} \quad (1-23)$$

式中, $\delta(t)$ 为扩散率; Q_t 为 t 时间的累积扩散通量; Q_∞ 为极限扩散通量; K 为校正系数; $B = 4\pi^2 D/d^2$, 其中 D 为扩散系数, d 为煤屑直径。

郭勇义等^[50]假设煤粒内部瓦斯扩散服从 Fick 扩散, 表面瓦斯扩散符合对流传质原理, 建立了第三类边界条件下的扩散微分方程。

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \\ t = 0, 0 < r < r_0; c = c_0 \\ t > 0, \frac{\partial c}{\partial r}(r = 0) = 0, -D \frac{\partial c}{\partial r}(r = r_0) = \alpha(c_s - c_1) \end{cases} \quad (1-24)$$

式中, r_0 为半径; c_0 、 p_0 分别为初始瓦斯浓度和初始瓦斯压力; c_s 、 c_1 分别为表面瓦斯浓度和游离瓦斯浓度; α 为极限吸附量。

文献[51]~[53]分别给出了煤粒瓦斯扩散的理论模型, 并求出其解析解。此外煤孔隙瓦斯扩散还受温度、外载荷、水分、物理化学结构的影响。温度升高时, 瓦斯扩散能力增加。外载荷和水分使瓦斯扩散能力减弱。煤的物理化学结构对瓦斯扩散的影响是一个复杂的课题, 还需深入研究。

1.3.2 瓦斯渗流理论研究现状

法国水利工程师达西通过水压过砂粒试验发现线性渗流理论——Darcy 定律, 其表达式如下^[54]

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial l} \quad (1-25)$$

式中, v 为流速; K 为渗透率; $\frac{\partial p}{\partial l}$ 为压力梯度; μ 为黏度。

国内外学者普遍认为, 瓦斯在煤层中的渗流符合 Darcy 定律, 此定律是煤矿瓦斯防治的基础理论之一, 应用广泛。

日本学者发现在非线性层流和紊流情况下, 幂定律更符合煤层瓦斯运移的规律, 其表达式为

$$v_n = -\alpha \left(\frac{dp}{dl} \right)^m \quad (1-26)$$

式中, v_n 为流速(无因次); a 为渗透系数; m 为指数, 通常取 $1 \sim 2$; $\frac{dp}{dl}$ 为压力梯度(无因次)。

文献[55]中, 国内学者孙培德认为煤体是非均质的各向异性的孔隙裂隙二重介质, 日本学者樋口澄志教授的瓦斯渗流数学模型不够严密, 因此对幂定律进行了推广, 推广形式如下

$$\begin{cases} U_n = -A_{xx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m_1} - A_{xy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^{m_2} - A_{xz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{m_3} \\ v_n = -A_{yx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m_1} - A_{yy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^{m_2} - A_{yz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{m_3} \\ W_n = -A_{zx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m_1} - A_{zy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^{m_2} - A_{zz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^{m_3} \\ \vec{Q}_n = U_n \vec{i} + v_n \vec{j} + W_n \vec{k} \end{cases} \quad (1-27)$$

式中, $\vec{Q}_n$ 为流速; U_n, v_n, W_n 为流速分量; $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z}$ 为压力梯度分量; $A_{xx}, A_{xy}, \dots, A_{zz}$ 为系数; m_1, m_2, m_3 为 x, y, z 方向的指数。

赵阳升等^[56]考虑了三维应力状态下孔隙瓦斯压力和体积应力对渗透率的影响, 提出相应的渗流模型, 即

$$K = K_0 \rho^\eta e^{b(\theta - 3\alpha p)} \quad (1-28)$$

式中, K 为渗透率; K_0 为初始渗透率; p 为瓦斯压力; η 为吸附作用系数; θ 为体积应力; b, α 为相关系数。

周世宁等^[57-60]对煤层瓦斯流动理论做了大量研究工作, 认为瓦斯在煤层中的流动是扩散和渗透的结合。以扩散定律和 Darcy 定律为基础分别建立了球向扩散微分方程和瓦斯裂隙单向流动微分方程, 通过瓦斯含量把两者联系起来, 并用代数法进行了求解。

在受载及卸压状态下, 煤体应力发生变化, 渗透率也随之变化。煤体受载状态下渗透率与应力的关系以及卸压状态下渗透率与应力的关系往往分开来研究。周世宁等^[54]、Swan^[61]、Gangi^[62]通过对受载状态下瓦斯渗流的变化研究, 分别得到了受载状态下煤体渗透率与应力的关系模型。周世宁等^[54]、梁冰^[63]、缪协兴等^[64]、尹光志等^[65]通过对卸压状态下瓦斯渗流的变化研究, 分别得到了卸压状态下煤体渗透率与应力的关系模型。美国学者 Harpalani S 等^[66]、郑哲敏等^[67]等根据能量守恒原理, 结合固体力学和 Darcy 定律, 研究了煤与瓦斯突出过程中的瓦斯流动模型。

在煤层瓦斯运移规律的研究中, 往往把扩散或渗流单独研究, 实际上受采动影响的煤层瓦斯扩散和渗流是一个连续性的过程。受采动影响, 采煤工作面前方煤体应力集中导致煤体孔隙裂隙扩展, 从而影响瓦斯的扩散与渗流。采动影响引起的采煤工作面前方卸压区的产生, 以及由此引起卸压区域内的瓦斯大量解吸扩散和运移, 为卸压区瓦斯抽采提供了现实和理论依据。对于采煤工作面安全回采及卸压瓦斯抽采具有重要意义。

1.4 采动影响与瓦斯运移相关性研究现状

煤层开采后, 采动影响主要包括对工作面前方煤体以及上覆、底板煤岩体的影响, 而

采动影响,工作面前方煤体及上覆、底板煤岩体卸压,裂隙发育,为瓦斯运移提供便利条件,利用采动卸压进行瓦斯抽采的应用已有广泛应用,如保护层卸压抽采、裂隙带抽采、工作面前方煤体卸压区瓦斯抽采。因此,采动卸压与瓦斯运移密切相关,且卸压瓦斯抽采应用广泛。

Terzaghi^[68]最早研究了土体和流体相互作用的现象,提出了应用广泛的有效应力公式,作为基础公式,这一应力公式仍是研究岩体和流体相互作用的重要公式,但其局限于一维弹性孔隙介质中的饱和流体。Biot^[69]在 Terzaghi 研究的基础上,将 Terzaghi 的一维工作推广到了三维介质固结问题,并给出了一些算例,为流固耦合理论奠定了基础,随后在各向异性多孔介质中也得到推广应用。Verruijt^[70]在前人研究的基础上,建立了多相流动和变形孔隙介质问题的耦合理论模型,此理论模型为连续介质力学的系统框架内多相渗流与孔隙介质相关性理论的重大发展。研究发现应力与渗透率具有相关性,Somerton^[71]是较早研究该现象的学者之一,他认为相比最大主应力方向和加载顺序,应力变化历程对渗透率影响更大,并给出了应力与渗透率的关系式,关系式包含一个负指数项和一个开三次方项。Durucan 和 Edwards^[72]研究了裂隙煤体的应力影响半径与渗流现象,给出了渗透率与应力半径的关系式。Seidle^[73]给出了新的渗透率与应力的关系式,关系式包含体积压缩系数和静水压力差。Seidle 和 Huitt^[74]研究了煤基质收缩下的孔隙率方程,并指出渗透率与初始渗透率的比值为孔隙率与初始孔隙率比值的三次方。Palmer 和 Mansoori^[75]考虑基质收缩和有效应力,提出了相应的孔隙率计算公式,并在此基础上提出包含孔隙压缩系数的渗透率方程。Pekot 和 Reeves^[76]考虑了瓦斯和二氧化碳气体的膨胀效应,提出了新的孔隙率计算公式。Gilman 和 Beckie^[77]假设煤体为弹性介质,且水平方向应变为零,发展了煤层瓦斯运移理论计算模型,模型包含基质和裂隙两部分,分别遵循努森扩散和达西定律。现有多数模型均为考虑水平方向应变,但在现实地应力条件下及三轴应力渗流试验中,径向应变对渗透率影响较大^[78]。

赵阳升等^[79,80]在煤体应力应变和瓦斯运移的基础上,提出了煤体—瓦斯相关性数学方程,并通过现场实例给出了数学方程的数值解法,数值解证明了其正确性。梁冰^[81,82]等把煤层中的瓦斯看作是可压缩气体运移,提出了煤体变形与瓦斯运移相关的数学方程。孙培德等^[83-85]发现近距离煤层间瓦斯具有越层流动现象,基于此现象提出了煤层瓦斯越流数学模型,模型考虑了煤岩变形与瓦斯越流的相互作用,给出数值算例,并通过现场实测对该理论进行了验证。吴世跃^[86]考虑了吸附变形、解吸扩散的作用,认为煤体变形、介质吸附变形与瓦斯扩散解吸和游离瓦斯流动存在完全耦合、半耦合和非耦合运动的关系,并分别建立了相关微分方程。

近年来,国内关于耦合试验装置的研制及试验成果颇多,唐巨鹏等^[87]利用三轴渗流仪,对瓦斯解吸和渗流相关性进行了研究。试验过程考虑了固流相关作用影响,模拟了三轴应力状态下和不同加载条件下的瓦斯流动过程。许江等^[88]、尹光志等^[89]结合伺服压力机和瓦斯渗流设备的功能,研制了多功能三轴渗流装置,由于其在渗流过程中实现了力的加卸载伺服控制,功能完善,目前该仪器国内使用频率较高,该装置可进行在不同围压、温度和加卸载条件下的渗流试验,并得到了一些国内认可的试验成果。曹树刚等^[90]研制了煤岩固气耦合细观力学试验装置,它使瓦斯的试验环境与细观力学相结合,因此所研究

的煤岩—瓦斯变形破坏规律,具有更加接近矿山实际的优点。

以上研究所建立的数学模型往往以小变形为假设,即以弹性理论为基础建立相关理论模型,而在采煤过程中,采煤工作面前方的煤体既经历了弹性变形,也经历了塑性和破坏过程,在塑性和破坏过程中,煤层瓦斯大量解吸扩散既给采煤工作面瓦斯治理带来了危险,也为采煤工作面前方卸压区瓦斯抽采提供了理论和现实依据。