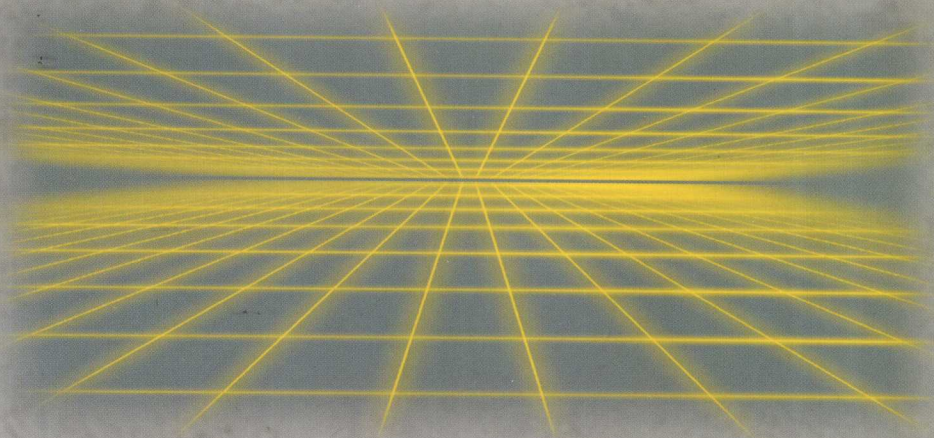


煤层注水防治冲击地压的机理及应用

宋维源 潘一山 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

煤层注水防治冲击地压的机理及应用

宋维源 潘一山 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 宋维源 潘一山 2009

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层注水防治冲击地压的机理及应用 / 宋维源, 潘一山著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2009.5

ISBN 978-7-81102-682-5

I. 煤… II. ①宋… ②潘… III. 煤层注水—防治—冲击地压—研究
IV. TD324

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 071379 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

网址: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市市政二公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×228mm

印 张: 8.625

字 数: 155 千字

出版时间: 2009 年 5 月第 1 版

印刷时间: 2009 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 铁 力

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-682-5

定 价: 22.00 元

前 言

煤层注水预防冲击地压成本低、操作简单、适应性强，一直是预防冲击地压的首选措施。由于过去缺乏相应的研究，迄今仍然停留在试验水平上。本书以阜新矿区瓦斯含量高、孔隙压力大的冲击地压预防为背景，对煤层注水预防冲击地压进行了研究。本书主要内容如下。

1. 通过实验研究煤浸水时间与含水率的关系，含水率对煤物理力学性质破坏特性的影响，确定了煤层不致发生失稳破坏的临界含水率，从而得到注水防治冲击地压时水充满注水区域所需要的浸水时间，同时根据物理化学理论，阐述了注水预防冲击地压是由于煤被水湿润后，通过煤水的表面作用，水为煤所湿润时，水分子挤入煤分子之间，增大了煤分子之间的距离，减少了分子之间的范德华力，因而改变了煤的物理力学性质及破坏特性。

2. 煤层注水实际上是水由钻孔进入煤层，由钻孔附近向周围煤层推进驱气，水占领水驱气后的区域的过程，进行水驱替的研究后，建立了水驱气的数学模型，改变了过去将注水过程中水在煤层中的流动视为对煤层中原有的水流动进行的渗流场的分析。

3. 将水、气视为不可压缩流体，分别对适用于厚煤层平行径向流的活塞式水驱气问题及适用于薄煤层的平面流活塞式水驱气问题求解，以及将气体作为可压缩性流体，水仍然视为不可压缩性流体，对于平面径向流的水驱气问题求解，从而得到水气界面位置随着时间变化的关系式。可以确定在不同水驱气过程中，水流至煤层指定位置，即将需要注水区域注满水所需要的时间。或在指定时间内，能够注满煤层区域的范围，以便确定提前注水时间和注水孔的布置方案。通过比较，得出将气假设为不可压缩流体后，误差可以满足工程要求的结论。

4. 煤层不是单纯孔隙介质，而是典型的双重介质中的双孔介质。为了在理论上深入研究煤层注水驱气过程中流体的流动，按照煤层系双孔介质的实际情况，建立了进行煤层注水时水在煤层中由钻孔向四周平面径向流动微分方程组。首先讨论了无吸渗作用，即水不湿润煤层的双孔介质平面径向

流,在此条件下,因煤层孔隙喉径太小,水分子团不能进入,隙间无流体流动,仍然为单一裂隙渗流,其水-气驱替与单纯孔隙水-气驱替相近,渗流为稳定流时的情况与此相同。然后讨论了有吸渗作用,煤层注水首先进入裂隙系统驱气,并将基质块孔隙空间包围,当水为湿润流体时,由于吸渗作用,水分子将沿基质块孔隙壁进入孔隙空间,将其中的气体挤出孔隙,进入裂隙,因而在驱水后,区域将成为具有不同饱和度的水气两相流,再补充吸渗方程,从而建立了有吸渗作用的平面径向流水-气驱替的数学模型,采用特征线法,则可以求得饱和度为零的水气两相流位置与时间的关系,同样可以得到任意时刻水驱气时前锋达到的位置。

5. 对目前盛行的冲击地压发生理论进行了论述,简述了建立在煤岩破坏机理上的失稳理论(该理论具有广泛的物理基础)更加符合实际,并说明了以上研究结果在阜新矿区五龙矿预防冲击地压中的应用。

由于作者水平有限,书中的疏漏和不足之处在所难免,恳请专家、学者批评指正。

作 者

2009年1月

目 录

1 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究状况	3
1.2.1 煤层注水技术国内外研究概况	3
1.2.2 煤层注水理论国内外研究概况	5
1.2.3 煤层注水预防冲击地压的国内外研究概况	8
1.3 本研究开展的工作	10
2 阜新矿区冲击地压的基本特点	12
2.1 五龙煤矿冲击地压的基本特点	12
2.1.1 五龙煤矿井田概况	12
2.1.2 五龙煤矿冲击地压的基本情况	14
2.1.3 五龙煤矿冲击地压的基本特点	17
2.2 孙家湾煤矿冲击地压的基本特点	18
2.2.1 孙家湾煤矿井田概况	18
2.2.2 孙家湾煤矿冲击地压的基本情况	19
2.2.3 孙家湾煤矿冲击地压的基本特点	22
2.3 海州立井煤矿冲击地压的基本特点	23
2.3.1 海州立井煤矿井田概况	23
2.3.2 海州立井煤矿冲击地压的基本情况	24
2.3.3 海州立井煤矿冲击地压的基本特点	25
2.4 王营煤矿冲击地压的基本特点	25
2.4.1 王营煤矿井田概况	25
2.4.2 王营煤矿冲击地压的基本情况	30
2.4.3 王营煤矿冲击地压的基本特点	32
2.5 本章小结	33

3 注水改变煤层物理力学性质的研究	35
3.1 注水改变煤层物理力学性质的实验研究.....	35
3.1.1 实验方法和实验步骤.....	35
3.1.2 实验结果.....	37
3.2 注水改变煤层物理力学性质的机理.....	41
3.2.1 润湿作用.....	41
3.2.2 吸附现象.....	44
3.2.3 注水改变煤物理力学性质的机理.....	47
3.3 本章小结.....	49
4 注水过程中的水-气驱替	50
4.1 水-气驱替的基本概念.....	50
4.1.1 流体界面上的毛管力.....	50
4.1.2 饱和度.....	51
4.1.3 界面张力.....	51
4.1.4 相对渗透率.....	52
4.2 渗流速度与实际流体质点速度的关系.....	53
4.3 煤层注水时的流体流动.....	54
4.4 注水过程中流体流动的基本方程.....	55
4.5 本章小结.....	59
5 孔隙介质煤层注水水-气驱替研究	61
5.1 按照平面径向流确定注水工艺参数.....	61
5.2 按照平面平行流确定注水工艺参数.....	69
5.3 煤层注水时可压缩与不可压缩稳态渗流的相似性.....	74
5.4 水-气视为可压缩流体时的水驱气平面径向流.....	78
5.5 两种径向流的比较.....	83
5.6 本章小结.....	84
6 煤层双孔介质注水驱气渗流	86
6.1 煤层介质的结构特性.....	86
6.2 双重介质中渗流微分方程的建立.....	88
6.3 无吸渗作用的双孔煤层渗流及水-气驱替.....	91

6.4 双孔介质煤层注水驱气机理·····	94
6.5 双孔介质煤层注水驱气基本方程·····	96
6.6 双孔介质煤层注水驱气问题的解·····	99
6.7 本章小结 ·····	107
7 注水在阜新矿区冲击地压防治中的应用 ·····	109
7.1 冲击地压发生的理论 ·····	109
7.2 冲击地压及注水防治的机理 ·····	111
7.3 阜新矿区五龙煤矿煤层注水工艺参数的确定 ·····	114
7.3.1 煤层注水注水孔参数选择的一般原则 ·····	114
7.3.2 注水前湿润角的测定 ·····	115
7.3.3 五龙煤矿 311 采区煤层注水工艺参数的确定 ·····	115
7.4 注水工艺过程及主要注水设备 ·····	117
7.5 注水实际效果 ·····	118
7.6 本章小结 ·····	119
结 论·····	120
参考文献·····	123

1 绪 论

1.1 问题的提出

在我国的各种能源资源中,煤炭资源最为丰富。由于发表的统计单位不同,所以具体的统计数字有很大差异。综合第十五届世界能源会议、2000年中国统计年鉴和其他有关方面发表的有关统计数字,我国煤炭保有量超过1万亿t,居世界第三位。我国同时又是油气资源相对缺乏的国家,煤炭占各种化石燃料的95%以上。因而在我国的一次能源构成中,目前煤炭能源所占比例虽然有所下降,但自1980年以来,也一直在75%左右,远远高于世界平均值(世界上,煤炭在一次能源结构中大约占27%)。从1990年以来,我国的煤炭生产量和消耗量一直位居世界第一,2003年煤炭生产量已突破14亿t。这种以煤炭为主的能源消耗结构是由我国的自然能源资源条件和经济发展水平决定的,而这种状况在相当长的一段时间内还难以改变。以后即使比例有所下降,但随着国民经济的发展,煤炭消耗总量还会继续增加。据有关方面预测,到2020年,我国煤炭消耗量将达到26亿t,比现在翻一番^[1-5]。

我国煤炭资源绝大部分埋藏深,不适合露天开采,95%以上是矿井开采。阜新矿区露天矿基本枯竭,井下开采已经进入深部,地质条件复杂、瓦斯含量高、孔隙压力大,近几年冲击地压灾害频繁发生。我国中东部的矿井大部分是20世纪五六十年代建成的,有四十多年的历史,有的矿井开采已经有七八十年甚至百年的历史。在经历了多次构造运动后,地质条件复杂,存在许多安全隐患,不仅安全事故多,而且由于采矿诱发的自然灾害,如煤和瓦斯突出、冲击地压等,每年的事故灾害造成的死亡人数(如将小煤窑计算在内)均超过万人、直接经济损失近百亿元^[6-7]。如抚顺老虎台矿,2000年1月初发生的冲击地压,伤亡30多人,破坏巷道300m,采区全部被摧毁(包括放顶煤的主采设备及全部辅助机电设备均被埋在采区,无法取出),经济损失超过1亿元^[8]。高强度冲击地压发生时,还给矿区地面造成地震灾

害。如 1991 年 7 月北票台吉矿发生的一次冲击地压, 地面 1500 多间房屋遭受破坏, 居民 12 人受伤, 其中重伤 2 人^[9]。1994 年 5 月 9 日北京门头沟矿发生的一次冲击地压, 地面 5300 多间房屋遭受破坏, 涉及 1600 多户, 赔偿近千万元^[10]。我国的煤和瓦斯突出也很严重^[11-12]。最大一次发生在四川三汇一矿, 突出煤岩 12780t, 瓦斯 1400 万 m³^[13-14]。对于冲击地压、煤和瓦斯突出灾害, 还不能得到基本的防治, 因而从 20 世纪 80 年代末, 一些发达国家(如日本、德国、英国和法国等)开始对冲击地压、煤和瓦斯突出频繁发生的矿井予以关闭。现在德国、日本已经将煤炭矿井全部关闭、停止生产, 以油气代替煤炭或由国外进口^[15-17]。根据有关资料介绍, 目前我国冲击地压矿井数已超过 65 个^[18-20], 煤和瓦斯突出矿井数已达 200 多个^[21]。中东部主力矿井大部分都有冲击地压发生, 且从发生的频度和造成灾害的严重程度来看, 我国均位居世界之首^[21-22]。另外, 井下采掘工作面粉尘飞扬, 我国煤矿矿工矽肺病严重, 据不完全统计, 患病者已达 30 余万人之多, 严重损害着矿工的身心健康, 缩短矿工寿命, 以致目前井下采掘作业人员大部分来自贫穷落后地区, 城镇青年已经无人愿意当采掘工人。因而防治煤矿冲击地压、煤和瓦斯突出灾害以及预防矿工矽肺病的发生, 也是保证我国煤炭工业持续发展的需要。

过去冲击地压大多数发生在低瓦斯和无瓦斯煤层, 而高瓦斯煤层不可忽略瓦斯对煤层的软化作用, 且随着采深增加, 煤层瓦斯含量增加, 发生冲击地压更加频繁且严重, 如阜新矿区的五龙煤矿、海州立井煤矿、孙家湾煤矿、王营煤矿均为高瓦斯煤层, 自 2002 年 3 月以来, 频繁发生冲击地压灾害, 这就迫切需要研究在高瓦斯、高孔隙压条件下流体在煤层中的流动状况, 为煤层注水预防冲击地压提供理论依据。

煤层注水预防冲击地压、煤和瓦斯突出灾害及对采掘工作面降尘已经有较长的历史。实践证实: 只要注水工艺参数(如注水时间、注水压力、流量、注水半径、要求达到的含水率等)确定合适, 则注水对于预防冲击地压、煤和瓦斯突出灾害及对采掘工作面降尘是有效的, 而且应用面广^[22-24]。煤层注水既可以用于区域性预防危险的发生, 又能应用于已有危险的区域进行解危, 而且是有希望对顶板、断层冲击地压进行有效防治的措施。煤层注水所需防治费用低, 简单方便, 便于管理, 容易操作。但是, 迄今为止, 对煤层注水的研究都是现场试验, 基本上没有进行过理论研究。因而目前注水工艺参数、注水应达到的指标基本上是进行工程类比、依靠经验, 带有很大的主观性和盲目性, 以致影响了注水效果, 甚至无效。特别是阜新矿区发生冲击

地压是在高瓦斯、孔隙压力大的煤层,在注水时,将严重影响水由钻孔周边向煤层中的推进。因而考虑煤层中的瓦斯压力,研究煤层注水过程中流体流动的理论及预防冲击地压的机理,以便为分析煤层注水问题和决定注水工艺参数提供理论指导,还可以应用于煤层气开采、注水驱气,提高产量和效率。因此,它的研究不仅具有理论意义,而且具有重要的实际应用价值。

1.2 国内外研究状况

关于煤层注水技术的理论及在预防冲击地压中的应用,国内外研究状况可以分为煤层注水技术国内外研究概况、煤层注水理论国内外研究概况、煤层注水预防冲击地压的国内外研究概况。现分别叙述如下。

1.2.1 煤层注水技术国内外研究概况

煤层注水的目的是增加煤层中水的饱和度,即煤层中的含水率。不论用于降尘、降温,还是用于预防冲击地压、煤和瓦斯突出,煤层注水总是采用向煤层钻一系列的孔的方法,通过钻孔将水注入煤层内。我国首先通过向前苏联学习,然后在国内部分矿井试验,最后推广应用。

在国际上,煤层注水开始于什么年代,起源于哪个国家,已经难以考证。从现有能查找到的资料来看,煤层注水首先是在第二次世界大战期间的苏联,由于开始实现了机械化,所以班产量激增,工作面煤尘很大。很可能是受到扫地时洒水可以降尘的启发,开始向煤层洒水,以后改成向煤层注水,以增加煤的含水率,减小扬尘,降低工作面作业人员矽肺病的发生率。开始时采用的方法是从地面接管线,依靠落差进行注水。在第二次世界大战后,就将此方法列入了苏联煤矿安全作业规程^[25]。

1955年,苏联学者阿维耳申所著的专著《冲击地压》^[26]的中译本中,已经提到注水可以预防冲击地压,并将其列为冲击地压的主要防治措施之一。为了提高注水效率、缩短注水时间,开始改为压力注水,即用水泵将水泵入钻孔,在一定压力下,将水渗入煤体。苏联顿巴斯煤田在1946年已经大量采用煤层注水防治瓦斯突出^[27]。在20世纪50年代末,几乎所有发达国家均把煤层注水纳入了煤炭安全开采的有关手册之中,苏联、波兰等国家在冲击地压煤层安全开采规程中,分别制订了不同用途的专门的煤层注水的技术规范^[28-29]。

我国虽然很早就开始开采煤炭,但在新中国成立之前,煤矿生产方式十

分落后,工人生命被视如草芥,根本不重视安全。新中国成立后,煤炭需求量急剧增加,开始实现了采掘机械化,从而造成工作面粉尘大量增加,因此一些大的矿务局就用注水的方法降低工作面粉尘。1952年开滦、大同矿务局通过钻孔、利用落差对煤层进行注水,以便湿润煤层、降低煤尘^[30-31]。我国煤矿安全规程第154款第二条也对此作了明确的规定^[32]。

1965年抚顺煤炭科学研究院、北票矿务局采用煤层注水防治瓦斯突出,先后进行了石门煤层注水、巷道煤层注水、区域煤层注水的试验研究,历时十年。于1976年进行了全面总结^[33-34],自行研制了胶塞封孔器进行封孔和用水泥封孔方法进行封孔,至今仍然在我国煤层注水中应用。通过试验,研究了注水时的注水压力、注水流量、单孔注水时间及总流量对瓦斯突出、煤体变形的影响,并得出了注水后如不能达到使煤层均匀湿润反而更有利于发生突出的结论,经鉴定认为,研究是成功的。但以后并未在我国煤矿中广泛推广用煤层注水方法防治煤和瓦斯的突出。1995年煤炭部制订防治煤和瓦斯突出的细则第86条规定,煤层注水只用于煤质坚硬煤层^[35]。

直到20世纪60年代,我国发生冲击地压灾害的矿井还很少,且发生次数不多、发生强度不高。直到20世纪70年代末,冲击地压矿井数迅速增加,达30多个。抚顺龙凤矿、北京门头沟矿、开滦唐山矿、枣庄陶村矿冲击地压频繁发生,生产设施遭到严重损坏和人员伤亡,发生多起灾害^[36-37]。1980年原煤炭部首次立项,在抚顺龙凤矿、北京门头沟矿开展冲击地压的机理预测防治研究。先后由北京开采所、阜新矿业学院进行了煤层注水预防冲击地压的研究,直接采用已经比较成熟的煤层注水技术进行了试验。北京门头沟矿由于水不能湿润煤层而停止试验^[38]。通过龙凤矿三个工作面历时三年的试验,初步确定了龙凤矿适用的防治冲击地压的煤层注水工艺参数,采用现场试验来确定注水预防冲击地压的工艺参数。同时也得到结论:当注水后,若煤层湿润不均匀,则相当于在煤层中留下了孤立煤柱,将会增加冲击地压发生的危险^[39]。目前采用煤层注水防治冲击地压已经在我国煤矿中普遍应用。在龙凤矿注水防治冲击地压研究的基础上,制定了注水预防冲击地压的技术规范,并纳入煤矿安全规程和冲击地压煤层安全开采的暂行规定中^[40]。迄今为止,尽管对煤层注水预防冲击地压已经做了不少工作,但对于理论研究工作做得很少,对于煤层注水预防冲击地压机理说法不一,对于注水工艺参数的确定还只能通过工程类比,最终进行现场试验决定,往往由于注水工艺参数选择不当,煤层得不到均匀湿润,不仅影响了注水防治冲击地压效果,而且促成冲击地压的发生。

此外,北京煤炭科学院在20世纪80年代后期通过煤炭部立项,将注水技术应用于坚硬顶板下煤层的开采,解决了由于顶板坚硬不易冒落、形成大面积塌顶而产生的大面积顶板垮落的问题^[41]。在20世纪90年代,山西矿业学院经煤炭部立项,在晋城矿务局采用注水技术软化煤层,解决了放顶煤开采中煤层大块冒落、不能从落煤孔上落下,影响生产,甚至大块煤压实支架的问题,因而得以实现放顶煤开采,实现了高产高效^[42]。

由于注水技术在煤炭开采中得到广泛应用,1992年煤炭部制定了煤层注水的部颁标准^[44],用以指导并推行煤层注水预防冲击地压、煤和瓦斯突出。

到目前为止,注水技术基本上已经成熟和定形,注水设备基本配套,可以顺利地将水注入煤层。但工艺参数依然依靠经验,通过工程类比进行选择确定,存在很大的随意性和盲目性,不能确保煤层均匀湿润,影响注水效果。

1.2.2 煤层注水理论国内外研究概况

煤层注水的理论研究实际上是研究注水过程中水在煤层中的运移规律,以便在此基础上确定注水工艺参数,使注水区域煤层能够得到均匀的湿润,取得良好的注水效果。

注水过程中水在煤层中的运移问题,就是水在煤层孔隙-裂隙连成的通道中的流动问题。也可以说,水在煤层中的运移问题就是水在煤层中的渗流问题。

从1856年达西提出孔隙介质线性渗流定律即达西定律以来,自20世纪40年代起,经过了包括力学、水利、水文、数学和石油天然气工作者的努力,渗流力学发展成为力学学科的一个分支。单相不可压缩和微可压缩流体在均匀的单介质中的渗流问题已经基本解决。如不考虑介质变形的稳定和非稳定的不可压缩及微可压缩流体渗流流动,可以归结为求解数学物理方程中研究得最多的拉普拉斯方程和傅里叶方程。基本上均可以在定解条件下求得解析解或近似解析解。同时对单一孔隙介质中单相气体在多孔介质中流动,建立了稳定和非稳定的气体渗流方程,其稳定渗流方程具有拉普拉斯方程性质,而非稳定气体渗流方程则是具有二阶的非线性抛物线型方程,难以求得解析解。但是经过许多学者的研究,提出了不少线性化的方法来求解近似解,因而可以说单纯孔隙介质中的不可压缩、微可压缩和可压缩流体在介质不变形的情况下,单相渗流流体流动问题已经基本得到解决,可以广泛应

用于解决各个不同部门的这方面的渗流力学问题^[45-51]。直到 20 世纪 60 年代初,周世宁首先将单一的孔隙介质、单相流体的渗流力学应用于解决瓦斯在煤层中的运移问题,建立了瓦斯在煤层中运移的渗流理论^[52],从此开始了煤层渗流问题的研究。1985 年,赵阳升在硕士论文“防治煤矿冲击地压的压力注水法的研究”中,对注水煤层区域水运移视为渗流场进行了分析^[53],这是国内首次见到的应用渗流理论对煤层注水进行的分析研究。但迄今为止,绝大多数仍然是将煤层视为单一的孔隙介质,而将流体视为不可压缩的单相渗流来研究水在煤层中流动的压力和渗流速度的分布。

从 20 世纪 30 年代开始,随着低饱和压力下油田的开发与油田注水开发的进行,对于低饱和压力下的油田开发,在油层中,除了油外,还有气体;对于用注水进行的油田开发,在油层中,除了油外,还有水。前者是油气不可溶混的两相流体流动,而后者是油水不可溶混的两相流体流动。从此开始了两相渗流的研究,提出了相对渗透率和毛管力的概念。1942 年, Buckley 和 Leverett M.C. 首先忽略流体重力、毛细管作用和可压缩性影响,对于两种不相溶混的流体,在一般的单一的多孔介质中的非定常一维直线流动建立了两相流动的方程,然后采用特征线法,将两相流的方程组化成了仅包括流体饱和度对时间及位置的偏导数的两个方程(称为 Buckley-Leverett 方程),进而求出了不同时间及不同位置上的饱和度变化规律^[54]。Pai S.I. 于 1959 年对一维直线平行流在忽略重力、毛细管压力情形下的非定常可压缩两种不相溶混的渗流进行了解^[55]。陈钟祥在 1965 年求得了在同时考虑重力差和毛细管压力差情况下,两相流体非定常渗流方程的一个相似性解^[56]。通过这些解,可以得到任意一种流体在零饱和度时的速度和位置,例如,在水驱油时油零饱和度时的速度实际上就是水前沿的速度,位置就是水前沿的位置。该方程又称为驱替方程。

同时,在水驱油时,若水-油为不相溶混,则水-油接触区可视为一个突变的界面(动界面)。有突变界面的驱替称为活塞式驱替。水将多孔介质中的油驱向前进,即动界面不断向前推进,就是一种活塞式驱替。它是列宾逊在 20 世纪 40 年代提出的。Vergin(1952)^[57]研究了流体的活塞式驱替在注水井压力提升中的问题,Kong Lu 研究了动界面的稳定问题^[58-60],但均是对单一孔隙介质进行的研究。

碳酸盐岩油藏占全世界油藏的一半,由于碳酸盐岩存在无数裂纹,将岩石分割成许多小岩块,小岩块存在大量的孔隙,因而碳酸盐岩存在着两重结构,渗流特性显然与单一孔隙或裂隙介质不同。随着碳酸盐岩油藏的开发,

为了进行试井分析、储层分析,必须研究双重介质渗流。Barenblatt, Zheltov, Kochina^[61]等人于1960年首先提出了孔隙裂隙介质渗流的概念及类型,导出了双重介质的基本方程。1963年和1965年,Warren Root提出了类似的基本方程,建立了孔隙间流动为稳态的平面径向流动的不可压缩单向流体的双孔介质模型^[62-64]。如进行无量纲化,通过拉普拉斯变换求解,可得到拉普拉斯空间的压力分布规律,再通过解析反演,得到当时时间足够大时,井底压力的渐近解,用来对双孔介质情形进行井底分析。

De Swann^[65]1976年将基质块理想化为球状体,研究了流体在孔隙裂隙中的非稳态流动,裂隙介质也是非稳态的。对于平面的径向流动,同样是无量纲化后,采用拉普拉斯变换,求出拉普拉斯空间的解。1979年,Mavor Cinco-Ley^[66]将基质块理想化为正方体,也研究了双孔介质隙间非稳态的渗流有关问题。Bourdet Gringarten^[67]进一步讨论了基质块理想化的几种典型形状尺寸及无量纲化后的系数与典型基质块形状因子的关系。1980年我国的陈钟祥和姜礼尚^[68]在未进行任何简化的条件下,对有界地层的普遍情形指明了解的结构。在处理圆形均质地层中心的试井分析研究中,采用一类新的特殊函数,获得了平面双重介质渗流方程组的精确解,为双重介质渗流场分析奠定了理论基础。

随着碳酸盐岩油藏开采进入注水开发阶段,单一孔隙介质的驱替理论不再适合双重介质,因而开始研究双重介质的驱替问题,但是均没有考虑吸渗作用。1978年,De Swann^[69]研究了双重介质的两相驱替问题,建立了驱替的渗流方程组,写出了吸渗方程。陈钟祥等对双重介质的水、油两相流进行了数值模拟^[64]。1980年,陈钟祥、刘慈群^[70]改进了已有的双重介质的两相驱替数学模型,考虑了吸渗作用,对直线平行流两相驱替,写出了更具普遍性的双重介质两相渗流方程组,对采用特征线法求解进行了研究,揭示了裂隙-孔隙地层中水驱油的基本特征。1982年,吴望一、陈焕章^[71]对双重介质底水锥进问题进行了数值求解。以上研究为双重介质两相渗流、两相驱替提供了基本的研究思想和方法。

20世纪80年代末,美国将煤层瓦斯作为一种非常规的天然气藏进行开采,取得了突破性进展,形成了煤层气产业。这就需要根据煤层实际结构是裂隙-孔隙双重结构,认真研究煤层中瓦斯的流动特性。Anbarci Ertekin (1990)^[72], Kolesar, Ertekin, Qbut^[73]等假设煤层气主要吸附于基质煤块内表面上,解吸后,经扩散进入裂隙,与裂隙中的水形成水气两相流的平面径向流动。这些研究仍然基于渗流场分析,对于煤层注水预防冲击地压在瓦斯

压力较大时,必须研究注水过程,而注水过程是水驱气的过程。章梦涛在 2003 年 10 月就单一孔隙介质论述了这种方法^[74]。

1.2.3 煤层注水预防冲击地压的国内外研究概况

虽然煤层注水已经被广泛应用于预防冲击地压,但是对于煤层注水预防冲击地压的理论研究,却在很长一段时间内存在困惑。

在 20 世纪 50 年代,冲击地压发生的理论只有 20 世纪初期南非冲击地压研究所提出的应力超过强度,煤岩破坏而发生冲击地压的强度理论。煤层注水降低了煤层的抗压强度,按照冲击地压的强度理论,煤层注水只会更有利或促进冲击地压的发生,并不能用于预防冲击地压的发生。因此可以说,煤层注水预防冲击地压绝不是在理论指导下提出的。大量冲击地压发生的实例证实,冲击地压都发生在干燥含水率低的煤层中。即使是同一冲击地压煤层,含水率不同,发生冲击地压的情况也不相同。因此,人们得到启发,采用注水方法,湿润煤层、增加煤层的含水率可以预防冲击地压的发生。经过实践的检验,确实是预防冲击地压发生的有效措施之一。

国内也有许多学者^[75-76]通过大量试验研究,发现注水改变了煤层的物理力学性质,使煤层的抗压强度降低、弹性模量降低、塑性增加,因此认为这就是注水能预防冲击地压发生的原因和条件。

为了能够定量估算注水对煤层物理力学性质的改变程度,苏联学者符拉索夫^[77]对库兹巴斯煤矿的煤层进行了大量的试验,得到关系式

$$f = f_0 - 0.7W$$

式中: f ——湿润后的平均硬度指数(普氏系数);

f_0 ——自然湿度时的硬度指数;

W ——煤层湿度提高的百分数。

同时,通过了大量实验确定:若硬度普氏系数小于 2,则不会发生冲击地压。

直到 20 世纪 60 年代,波兰上西西得里煤炭科学院 Bieniawski 根据大量实例观察和实验,提出煤层是否发生冲击地压是由煤的本身(称为冲击倾向)性质决定的^[78-79]。只要冲击倾向大于某一定值,就可能发生冲击地压。如果无冲击倾向,那么不会发生冲击地压。并提出了以岩石试件加载到峰值强度的 80%~90%时,总弹性能和卸载消耗能量的比值和弹性能指标作为冲击倾向的度量。若超过一定值,则发生冲击地压。显然,注水后煤层峰值强度降低,总弹性能远比消耗能下降得多,故弹性能指标降低不易超过临界

值。即煤层注水能降低弹性能指标,预防冲击地压的发生。国内也有李玉生、王淑坤、张万斌等^[80]对冲击倾向及煤层注水能降低弹性能指标、预防冲击地压发生进行了研究,提出了以岩样达到峰值强度后至完全丧失承载能力所需的时间作为冲击倾向指标。时间愈短,冲击倾向愈大;时间愈长,冲击倾向愈小。煤层注水使煤层含水量增大,煤层完全丧失承载能力的时间延长,故煤层注水可以降低它的冲击倾向。

随着煤炭开采范围的扩大,一些无冲击倾向的软弱煤层也发生了冲击地压^[81-82]。冲击地压的冲击倾向理论无法提供解释。这也表明,冲击倾向理论并不能说明煤层注水防治冲击地压的机理。

1965年Cook发明了刚性试验机,通过相同岩石试样在刚性试验机和普通试验机上进行的试验发现:岩石试样在普通试验机上的破坏是突然的迅猛失稳破坏,而在刚性试验机上的破坏是缓慢的平稳的塑性破坏,试样发生了两种完全不同的破坏过程。通过研究,将矿柱冲击地压类比为试样在普通试验机上,试样刚度大于试验机刚度而发生的迅猛破坏。认识到冲击地压是失稳问题,提出了矿柱刚度大于围岩刚度而发生冲击地压^[83]。1975年,Cook^[84]将其普遍化,即矿山加载系统刚度小于矿山结构系统刚度就会发生冲击地压,被称为刚度理论。国内朱之芳等通过试验,提出煤层注水是降低了煤层、煤柱的刚度,对煤层注水预防冲击地压的机理进行了解释。

1987年,章梦涛通过煤岩破坏机理,对冲击地压的发生进行研究,提出了冲击地压是煤岩破坏的失稳过程,是由于材料性质改变而发生的物理失稳^[85]。并根据失稳理论,对注水与未注水的煤层试样进行了数值计算,证实了注水能增加煤层试样的稳定性,有利于防治冲击地压的发生。

以上是从冲击地压的发生理论对于注水防治冲击地压的机理研究的概况。总的来说,长期以来,对于冲击地压的理论,有许多研究和论述,没有形成统一的共识,因而影响了对注水预防冲击地压的理论研究。迄今为止,在国内外还未检索到专门研究注水防治冲击地压机理文献。上面所述都是在相关的论文中涉及煤层注水所给予的阐述。

关于注水预防冲击地压工艺参数的选择研究,大量的研究均是现场工业实验的研究,由于各煤田的煤层性质不同、地质条件不同,注水的工艺参数及临界含水率不可能一致。如1972年在北票冠山三矿、1982—1983年在抚顺龙凤矿及四川天池矿、唐山开滦矿、北京门头沟矿均进行了大量的注水预防冲击地压的试验,通过试验,决定各矿采用的注水工艺参数。

1985年,在总结上述研究经验的基础上,我国将注水预防冲击地压列