

河南省教育厅自然科学研究计划项目 (2009B440004)

河南理工大学博士基金项目 (B2008-15)

河南理工大学青年骨干教师资助计划项目

钻孔及煤屑瓦斯动态 涌出理论与实验研究

韩 颖 张飞燕 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

河南省教育厅自然科学研究计划项目(2009B440004)

河南理工大学博士基金项目(B2008-15)

河南理工大学青年骨干教师资助计划项目

钻孔及煤屑瓦斯动态涌出 理论与实验研究

韩 颖 张飞燕 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要包括钻孔及煤屑瓦斯运移相关领域的研究历史与现状、球壳失稳机理及其在煤巷突出预测中的应用、钻进过程中孔壁瓦斯涌出规律的数值模拟研究、煤屑瓦斯扩散理论及其应用、基于试验设计理论的课题实验设计、钻孔瓦斯动态涌出规律的实验研究、煤屑瓦斯全程扩散规律的实验研究、钻孔壁瓦斯动态涌出规律的实验研究等内容。

本书可供采矿工程、安全技术及工程、煤及煤层气工程等相关领域的科研人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钻孔及煤屑瓦斯动态涌出理论与实验研究 / 韩颖,

张飞燕著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1875 - 9

I. ①钻… II. ①韩… ②张… III. ①煤矿—瓦斯涌出—研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 087272 号

书 名 钻孔及煤屑瓦斯动态涌出理论与实验研究

著 者 韩 颖 张飞燕

责任编辑 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 890×1240 1/32 印张 4.75 字数 132 千字

版次印次 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤与瓦斯突出是严重影响煤矿安全生产的自然灾害之一。我国是世界上突出最严重的国家之一。据统计,自1950年辽源矿务局首次发生突出以来,迄今为止全国先后有300座以上的煤矿发生突出数万次,死亡数千人。2008年,全国12 722座煤矿中有754座为突出矿井,占5.9%;其中885座国有重点煤矿中有突出矿井176座,占19.9%。突出严重威胁矿井安全生产,制约矿井经济效益的提高。因此,对突出进行有效防治成为保障突出矿井安全生产和提高经济效益的重要技术手段,而研究可靠的突出预测方法则是突出防治工作的基础,它可以指导人们更加合理地应用防突措施、减少防突工作的盲目性、节约防突工程费用,从而有效地保障矿井安全生产,提高矿井经济效益。

煤巷掘进工作面是突出预测工作的重点。目前,我国《防治煤与瓦斯突出规定》采用以下方法预测煤巷掘进工作面的突出危险性:① 钻屑指标法;② 复合指标法;③ R 值指标法;④ 其他经试验证实有效的方法。上述方法对于解决煤巷突出预测问题起到了重要作用,但在应用过程中也存在一些问题:① 由于不同矿井在煤层赋存条件、地质因素、瓦斯条件及煤体自身物理力学性质等方面存在差异,各种突出预测指标对煤体突出危险的敏感性随矿井的不同而不同;② 没有统一的突出预测指标临界值,出现低指标突出和高指标不突出现象;③ 随采掘深度的增加、开采条件及地质条件的变化,预测指标的敏感性及其临界值也会发生变化。

上述常规静态预测方法往往将最能反映煤体突出危险性的初始

时刻数据漏失,从而导致低指标突出事故频繁发生;而动态预测方法可以实现预测数据的连续监测与获取,对于提高煤巷掘进工作面突出预测的准确率,从而有效避免低指标突出事故具有重要意义,目前已成为煤巷突出预测研究的发展趋势。

本书对煤巷突出预测的连续流量法及其理论基础——煤与瓦斯突出的球壳失稳机理作了简要介绍。在此基础上,基于钻进过程中孔壁瓦斯动态涌出特点的分析,在一定的简化和假设条件下,选用 FLAC^{3D} 中的渗流计算模式,建立了 Mohr-Coulomb 圆柱体模型,并利用 FISH 语言编写了程序输入命令流,真实反映了孔周卸压区内透气性系数的变化规律,解决了煤层瓦斯流动问题研究中变透气性系数模拟的难题。FLAC^{3D} 采用全动态分析方法获取模型运动方程的时间步长解,可追踪介质动态演化的全过程,深入探讨其时间效应与空间效应,可作为煤层瓦斯动态涌出规律研究的有效工具。通过数值模拟研究,获取了钻进过程中孔壁瓦斯涌出速度曲线及孔壁累计瓦斯涌出量曲线,孔壁瓦斯涌出速度随钻进深度的增加不断增大,停钻瞬间达到最大,停钻后逐渐衰减;孔壁累计瓦斯涌出量随钻进深度的增加不断增大,并且该趋势是一直延续的。

基于 Fick 扩散定律,在一定的假设和简化条件下,建立了煤屑瓦斯球向流动微分方程,并给出了定解条件,运用分离变量法对微分方程进行了解算,得出了煤屑瓦斯扩散规律的无穷级数解;通过理论分析及模拟计算,对无穷级数解进行了简化,得出了煤屑瓦斯扩散规律的近似解。研究表明:在 B 值为 $6.579\ 7 \times 10^{-6} \sim 6.579\ 7 \times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$ 范围内, $n=135$, $K=0.92$ 时,模拟结果与煤屑瓦斯实际扩散过程相符;瓦斯扩散系数 D 越大,煤屑粒度越小,则扩散参数 B 值越大,煤屑累计瓦斯涌出量越大,瓦斯扩散速度及衰减速率也越快。 B 值标志着瓦斯扩散的快慢程度及衰减程度,可作为煤屑瓦斯扩散特征指标;煤屑瓦斯扩散速度在扩散瞬间达到峰值,此后随时间的延长逐渐衰减,最终无限趋近于 0;扩散速度曲线存在一条水平渐近线 $v_i=0$,但少数学者提出的铅直渐近线并不存在;在同一时刻,吸附平衡压

力越大,则煤屑累计瓦斯涌出量越大,瓦斯扩散速度也越快;在钻孔钻进过程中,煤屑瓦斯扩散速度随钻进深度的增加而增大,停钻瞬间达到最大,停钻后逐渐衰减,煤屑累计瓦斯涌出量随钻进深度的增加而增大,并且该趋势是连续的。

设计了煤层模拟装置及钻进过程中钻孔瓦斯涌出速度测定装置,依照均匀设计方法确定了实验方案,运用动态测试技术进行了钻孔瓦斯涌出速度模拟测试。研究表明:钻孔瓦斯涌出速度随钻进时间的增加而增大,停钻瞬间达到峰值,停钻后逐渐衰减为零;动态测试技术可成功捕捉钻孔瓦斯涌出初始时刻的最大速度变化率,其出现在测试过程的前 5 s,并且随煤层吸附瓦斯压力的增大而增大,该变化趋势反映了煤层突出危险程度的变化规律,钻孔瓦斯涌出初始时刻的最大速度变化率可作为衡量煤层突出危险程度的重要新指标。

基于传感器及计算机数据采集技术,运用瓦斯流量测定装置,完整测定了煤屑瓦斯在整个解吸期间的扩散过程,并利用 MATLAB 曲线拟合工具对实验数据进行分析,得出了煤屑瓦斯全程扩散规律曲线,获取了煤屑瓦斯流量方程,验证了煤屑瓦斯扩散理论研究成果;瓦斯流量峰值的出现是由于“死空间”的存在造成的,其出现时刻与煤样罐喷口面积有关,喷口面积越大,峰值出现的时刻越早,煤屑瓦斯流量越大,衰减速度也越快;在钻孔钻进过程中,煤屑瓦斯流量随钻孔的延伸而逐渐增大,停钻瞬间达到峰值,停钻后,瓦斯流量将随时间的延长逐渐衰减,最终衰减至无限趋近于 0。

运用孔壁瓦斯流量测定装置,完整测定了孔壁瓦斯在整个解吸期间的涌出过程,并利用 MATLAB 曲线拟合工具,对实验数据进行分析,得出了孔壁瓦斯涌出规律曲线;在此基础上,对孔壁瓦斯动态涌出规律进行了理论分析探讨,研究表明,孔壁瓦斯静态与动态涌出规律皆与煤屑相同。

实验研究过程中,大部分模拟煤层吸附气体选用 CO_2 ,留一个煤层充入 CH_4 ,在特定的成型压力、围岩压力、瓦斯压力及水分条件下

进行对比实验。结果表明,采用 CO_2 模拟实验得到的所有规律性结论同样适用于含甲烷煤层。

本书是在笔者博士论文的基础上修改完成的,博士论文得到了博士生导师蒋承林教授的悉心指导。本书第1章、第2章、第5章由韩颖、张飞燕共同撰写,第3章、第4章、第6章、第7章、第8章由韩颖撰写,研究生曹文涛做了本书出版前的插图修改工作。

本书部分研究得到了河南省教育厅自然科学研究计划项目、河南理工大学博士基金项目及河南理工大学青年骨干教师资助计划项目的资助,特此感谢!

应该指出,钻孔及煤屑瓦斯动态涌出理论与实验研究是一个长期过程,今后还需要做更多更深入的研究来充实和完善钻孔及煤屑瓦斯动态涌出的相关理论,以便更好地服务于生产实践。由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请专家、同行批评指正。

著 者

2012年11月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	国内外研究现状综述	7
第 2 章	球壳失稳机理及其在煤巷突出预测中的应用	17
2.1	煤与瓦斯突出的球壳失稳机理	18
2.2	煤巷突出预测的连续流量法研究	21
第 3 章	钻进过程中孔壁瓦斯涌出规律的数值模拟研究	25
3.1	钻进过程中孔壁瓦斯涌出的基本特点	25
3.2	FLAC 软件简介	28
3.3	钻进过程中孔壁瓦斯涌出规律的数值模拟研究	32
3.4	本章小结	40
第 4 章	煤屑瓦斯扩散理论及其应用	41
4.1	Fick 扩散定律	41
4.2	煤屑瓦斯扩散过程的基本特点	42
4.3	煤屑瓦斯扩散规律的一般表达式	43
4.4	煤屑瓦斯扩散理论分析与探讨	48
4.5	煤屑瓦斯动态扩散规律研究	56
4.6	本章小结	60
第 5 章	基于试验设计理论的课题实验设计	62
5.1	试验设计的基本概念	62

5.2	试验设计的基本原则	63
5.3	解决试验问题的主要步骤	64
5.4	正交设计和均匀设计	66
5.5	课题实验设计	70
5.6	本章小结	73
第 6 章	钻孔瓦斯动态涌出规律的实验研究	74
6.1	煤层模拟装置与模拟材料	74
6.2	煤层制备	77
6.3	钻孔瓦斯动态涌出规律的实验研究	78
6.4	本章小结	95
第 7 章	煤屑瓦斯全程扩散规律的实验研究	97
7.1	测定原理	97
7.2	测定装置	99
7.3	煤屑瓦斯全程扩散规律的实验研究	102
7.4	煤屑瓦斯动态扩散规律研究	116
7.5	本章小结	120
第 8 章	钻孔壁瓦斯动态涌出规律的实验研究	122
8.1	测定装置	122
8.2	钻孔壁瓦斯动态涌出规律的实验研究	124
8.3	孔壁瓦斯动态涌出规律研究	130
8.4	本章小结	133
参考文献		134

第1章 绪 论

1.1 研究背景

煤与瓦斯突出(以下简称“突出”)是煤矿井下采掘过程中发生的一种伴有声响和猛烈力能效应的动力现象,能在很短的时间(几秒钟到几分钟)内使采掘工作面的煤壁遭到破坏,并从煤壁内部突然向采掘空间喷出大量的煤与瓦斯,充填巷道,并在煤体中形成某种特殊形状的孔洞;喷出煤与瓦斯时伴随着强大的冲击力,能摧毁井巷设施,破坏矿井通风系统,甚至使风流逆转,并可能造成人员窒息、煤流埋人以及瓦斯燃烧或爆炸等事故^[1,2]。因此,突出是威胁煤矿安全生产的严重自然灾害之一。

迄今为止,世界各主要产煤国家都发生过不同程度的突出,我国是世界上突出最严重的国家之一^[1]。据统计,自1950年辽源矿务局首次发生突出以来,迄今为止全国先后有300座以上的煤矿发生突出数万次,死亡数千人。2008年,全国12 722座煤矿中有754座为突出矿井,占5.9%;其中885座国有重点煤矿中有突出矿井176座,占19.9%^[3]。突出严重威胁矿井安全生产,制约矿井经济效益的提高。因此,对突出进行有效防治成为保障突出矿井安全生产和提高矿井经济效益的重要手段,而研究可靠的突出预测方法则是突出防治工作的基础,它可以指导人们更加合理地应用防突措施、减少防突工作的盲目性、节约防突工程费用,从而有效地保障矿井安全生产,提高矿井经济效益。

国内外开采突出煤层的实践证明,突出煤层并非处处都有突出危险,突出只发生在突出煤层中的局部地带,其突出危险带的面积一般还不到突出煤层面积的 10%^[4]。《防治煤与瓦斯突出规定》^[5]规定:煤层突出危险性预测分为区域突出危险性预测和工作面突出危险性预测;突出煤层经区域预测后可划分为突出危险区和无突出危险区;在突出危险区域内,进行采掘前,应在工作面推进过程中进行工作面突出危险性预测。

统计表明,煤巷掘进时期发生的突出次数最多,约占矿井突出总次数的 45%^[2]。因此,煤巷掘进工作面是突出预测的重点。目前,我国采用下列方法预测煤巷掘进工作面的突出危险性:① 钻屑指标法;② 复合指标法;③ R 值指标法;④ 其他经试验证实有效的方法^[6]。

(1) 钻屑指标法

采用钻屑指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性时,在近水平、缓倾斜煤层工作面应向前方煤体至少施工 3 个、在倾斜或急倾斜煤层至少施工 2 个直径 42 mm、孔深 8~10 m 的钻孔,测定钻屑瓦斯解吸指标和钻屑量。

钻孔应尽可能布置在软分层中,一个钻孔位于掘进巷道断面中部,并平行于掘进方向,其他钻孔的终孔点应位于巷道断面两侧轮廓线外 2~4 m 处。钻孔布置如图 1-1 和图 1-2 所示。

钻孔每钻进 1 m 测定该 1 m 段的全部钻屑量 S ,每钻进 2 m 至少测定一次钻屑瓦斯解吸指标 K_1 或 Δh_2 值。

各煤层采用钻屑指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性的指标临界值,应根据试验考察确定,在确定前可暂按表 1-1 的临界值确定工作面的突出危险性。

表 1-1 钻屑指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性的参考临界值

钻屑瓦斯解吸指标 $\Delta h_2/\text{Pa}$	钻屑瓦斯解吸指标 K_1 /[$\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{min}^{0.5})$]	钻屑量 S	
		(kg/m)	(L/m)
200	0.5	6	5.4

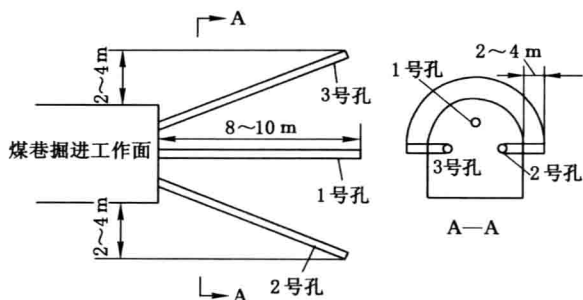


图 1-1 近水平、缓倾斜煤层煤巷掘进工作面钻屑
指标法预测钻孔布置示意图

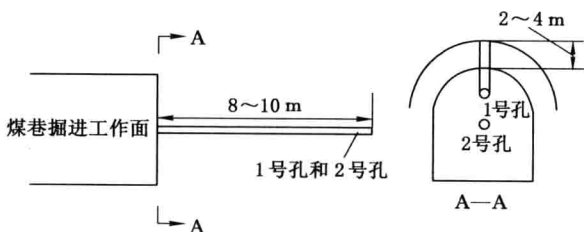


图 1-2 倾斜、急倾斜煤层煤巷掘进工作面钻屑
指标法预测钻孔布置示意图

如果实测得到的 S 、 K_1 或 Δh_2 的所有测定值均小于临界值，并且未发现其他异常情况（如瓦斯涌出异常、喷孔、顶钻、响煤炮等），则该工作面预测为无突出危险工作面；否则，为突出危险工作面。

(2) 复合指标法

采用复合指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性时，在近水平、缓倾斜煤层工作面应当向前方煤体至少施工 3 个、在倾斜或急倾斜煤层至少施工 2 个直径 42 mm、孔深 8~10 m 的钻孔，测定钻孔瓦斯涌出初速度和钻屑量指标。

钻孔应当尽量布置在软分层中，一个钻孔位于掘进巷道断面中

部,并平行于掘进方向,其他钻孔开孔口靠近巷道两帮 0.5 m 处,终孔点应位于巷道断面两侧轮廓线外 2~4 m 处。钻孔布置如图 1-3 所示。

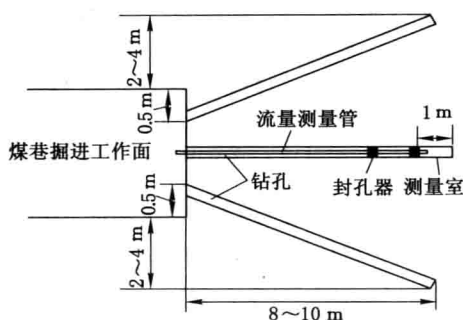


图 1-3 煤巷掘进工作面复合指标法预测钻孔布置示意图

钻孔每钻进 1 m 测定该 1 m 段的全部钻屑量 S ,并在暂停钻进后 2 min 内测定钻孔瓦斯涌出初速度 q 。测定钻孔瓦斯涌出初速度时,测量室的长度为 1.0 m。

各煤层采用复合指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性的指标临界值,应根据试验考察确定,在确定前可暂按表 1-2 的临界值进行预测。

表 1-2 复合指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性的参考临界值

钻孔瓦斯涌出初速度 q /(L/min)	钻屑量 S	
	(kg/m)	(L/m)
5	6	5.4

如果实测得到的指标 q 、 S 的所有测定值均小于临界值,并且未发现其他异常情况,则该工作面预测为无突出危险工作面;否则,为突出危险工作面。

(3) R 值指标法

采用 R 值指标法预测煤巷掘进工作面突出危险性时,在近水平、缓倾斜煤层工作面应向前方煤体至少施工 3 个、在倾斜或急倾斜煤层至少施工 2 个直径 42 mm、孔深 8~10 m 的钻孔,测定钻孔瓦斯涌出初速度和钻屑量指标。

钻孔应当尽可能布置在软分层中,一个钻孔位于掘进巷道断面中部,并平行于掘进方向,其他钻孔的终孔点应位于巷道断面两侧轮廓线外 2~4 m 处。

钻孔每钻进 1 m 收集并测定该 1 m 段的全部钻屑量 S ,并在暂停钻进后 2 min 内测定钻孔瓦斯涌出初速度 q 。测定钻孔瓦斯涌出初速度时,测量室的长度为 1.0 m。

根据每个钻孔的最大钻屑量 $S_{\max}$ 和最大钻孔瓦斯涌出初速度 $q_{\max}$ 按下式计算各孔的 R 值:

$$R = (S_{\max} - 1.8)(q_{\max} - 4) \quad (1-1)$$

式中, $S_{\max}$ 为每个钻孔沿孔长的最大钻屑量, L/m; $q_{\max}$ 为每个钻孔的最大钻孔瓦斯涌出初速度, L/min。

判定各煤层煤巷掘进工作面突出危险性的临界值,应根据试验考察确定,在确定前可暂按以下指标进行预测:当所有钻孔的 R 值小于 6 且未发现其他异常情况时,该工作面可预测为无突出危险工作面;否则,判定为突出危险工作面。

(4) 其他经试验证实有效的方法

煤巷掘进工作面的突出危险性预测方法和预测指标较多,除上述三种方法外,还有钻孔瓦斯涌出初速度法及瓦斯含量、煤体温度、 V_{30} 特征值、解吸指数法、煤层瓦斯氢浓度、瓦斯动态涌出、声发射、电磁辐射等方法 and 指标^[3]。工作面突出危险性预测是一个复杂的课题,国内外虽已提出并在生产实践中应用了很多种预测方法,但预测准确率还有待提高。从总体上分析,预测方法的发展趋势是用综合考虑多种参数的综合指标来代替单项指标,以有利于提高预测的准确率,同时发展非接触式连续性预测技术和装备,以实现工作面的实时连续预测。

研究突出预测新方法的试验应由具有煤与瓦斯突出危险性鉴定资质、技术力量雄厚的单位进行。同时,新方法的试验研究过程存在一定的风险,为确保试验的安全可靠,应科学地制定试验方案、安全措施等,在试验前应由煤矿企业技术负责人审查批准。经试验证实有效的新方法,经过必要的程序可以应用,也可作为综合预测判断的依据参数之一。

从煤矿现场应用煤巷突出预测指标的实践来看,上述指标对于解决煤巷的突出预测问题起到了一定的作用,确实保护了一批非突出工作面,加快了掘进速度。但在应用过程中也出现了一些问题:

① 由于不同矿井在煤层的赋存条件、地质因素、瓦斯条件和煤体自身物理力学性质等方面存在差异,各种突出预测指标对煤体突出危险的敏感性随矿井的不同而不同。

② 没有统一的突出预测指标临界值,出现低指标突出和高指标不突出现象。

③ 随着采掘深度的增加、煤层的改变以及地质条件的变化,预测指标的敏感性及其临界值也会发生变化。

近年来,煤巷突出预测研究有了新的进展。基于煤与瓦斯突出的球壳失稳机理^[4],蒋承林教授提出了一种新的煤巷突出预测方法——连续流量法^[6,7]。他认为,煤层中每一点煤体的突出危险性与其破坏后的初始释放瓦斯流量密切相关。在卸压带内,钻头钻进过程中释放出来的初始瓦斯流量较小;而集中应力带和原始应力带中,钻头钻进过程中释放出来的初始瓦斯流量较大。因此,可以采用连续测定钻进过程中初始瓦斯流量的方法来测定煤巷工作面前方卸压带的分布,从而预测煤巷的突出危险性。如果以某一固定的钻速用麻花钻沿着工作面软分层钻进,则如同巷道向前掘进一样,钻头前方的煤体在地应力的作用下首先破坏,形成一个小破裂带,钻头破除小破裂带的煤体,这时从钻孔中涌出的瓦斯流量包括三部分:① 钻头附近钻屑与孔壁的初始瓦斯涌出量;② 由钻屑中涌出的后续瓦斯涌出量;③ 钻头之外已经形成的钻孔壁涌出的后续瓦斯量。在现场

测定中,我们只能从钻孔口部收集由钻孔涌出的总瓦斯流量,若要得到第①部分的瓦斯涌出量,必须在充分掌握和了解第②、第③部分的瓦斯涌出量变化规律的基础上,将其从总量中扣除。

出于上述需要,本书从孔壁及煤屑瓦斯解吸规律研究入手,通过理论分析、数值模拟以及实验室模拟实验对“钻孔及煤屑瓦斯动态涌出理论与实验研究”课题进行全面深入研究,为煤巷突出预测的连续流量法提供理论支撑。综观煤样瓦斯解吸规律的研究成果,由于测定方法及认识上的限制,前人大多只研究了煤样瓦斯涌出 10 s 以后的变化规律,煤屑及钻孔壁在整个解吸期间的瓦斯涌出规律至今无人问津。而根据球壳失稳机理^[4],煤体恰恰是在地应力破坏之后初始涌出的瓦斯量的多少与突出密切相关。因此,本书研究成果将为煤巷突出预测及煤层瓦斯含量的实测提供理论参考及借鉴。

1.2 国内外研究现状综述

1.2.1 孔壁瓦斯涌出规律研究现状

在煤层瓦斯流动问题的研究中,多数研究者都是从煤层瓦斯流动的四个基本方程出发来建立煤层瓦斯流动的数学模型^[8-12]。这四个基本方程是瓦斯流动连续性方程、瓦斯运动方程、瓦斯气体状态方程和瓦斯含量方程,现分述如下:

(1) 瓦斯流动连续性方程

根据质量守恒定律,单位时间内通过任一微体积单元的净质量通量等于单元体内流体质量的变化,则连续性方程为:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = -\frac{\partial M}{\partial t} \quad (1-2)$$

式中, $\operatorname{div}(\rho \mathbf{u})$ 为瓦斯质量速度向量的散度; ρ 为瓦斯压力为 p 时的瓦斯密度, t/m^3 ; $\mathbf{u}$ 为瓦斯流动速度向量, m/s ; M 为单位体积煤体所含的瓦斯质量, t/m^3 , $M = \rho \varphi$, φ 为孔隙率, %; t 为煤壁暴露时间, s 。

(2) 瓦斯运动方程

由煤层瓦斯流动的线性渗透假设可得运动方程：

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \mathbf{grad} p = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} \right) \quad (1-3)$$

式中, k 为煤的渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯的绝对黏度, $1.08 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; p 为煤层瓦斯压力, MPa 。

(3) 瓦斯气体状态方程

基于等温流动和理想气体的假设, 可得状态方程如下：

$$\rho = \frac{\rho_n}{p_n} p \quad (1-4)$$

式中, p_n 为 1 个标准大气压, 0.101325 MPa ; ρ_n 为瓦斯压力为 p_n 时的瓦斯密度, $7.16 \times 10^{-4} \text{ t/m}^3$ 。

(4) 瓦斯含量方程

煤层瓦斯含量为吸附瓦斯含量与游离瓦斯含量之和, 方程如下^[1,2,13]：

$$X = \frac{abp}{1+bp} \times \frac{100 - A_{\text{ad}} - M_{\text{ad}}}{100} \times \frac{1}{1 + 0.31M_{\text{ad}}} + \frac{10V_k p}{\rho_s} \quad (1-5)$$

式中, X 为煤层瓦斯含量, m^3/t ; a 为吸附常数, 试验温度下的极限吸附量, m^3/t , 一般为 $15 \sim 60 \text{ m}^3/\text{t}$; b 为吸附常数, MPa^{-1} , 一般为 $0.2 \sim 5.0 \text{ MPa}^{-1}$; p 为煤层绝对瓦斯压力, MPa ; A_{ad} 为煤的灰分, $\%$; M_{ad} 为煤的水分, $\%$; V_k 为煤的孔隙体积, m^3/m^3 ; ρ_s 为煤的视密度, t/m^3 。

此外, 周世宁院士认为, 对于工程中瓦斯流动的实用分析与计算, 在瓦斯压力不很大的情况下, 采用瓦斯含量的抛物线方程基本上能够满足要求^[14]。方程如下：

$$X = \alpha \sqrt{p} \quad (1-6)$$

式中, α 为瓦斯含量系数, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{0.5})$ 。

上述四个方程即为煤层瓦斯流动问题研究的基本定律。