

承压水沿煤层底板递进导升突水机理 的模拟与观测*

In-situ measurement and physical analogue on water inrush
from coal floor induced by progressive intrusion of
artesian water into protective aquiclude

王经明

(煤炭科学研究总院西安分院, 西安, 710054)

文 摘 完整底板和非完整底板的注水试验表明, 底板深处的耗水早于浅部, 显示底板的破裂发生在采前。相似材料模拟具一定导升高度的底板在采动中的变化揭示了同样的规律, 底板的原位测试发现承压水在采前出现了向上入侵的现象, 二次应力给导升的发展提供条件, 递进导升是突水的一种机理。

关键词 水头入侵, 突水机理, 相似材料模拟, 现场观测, 注水试验

中图法分类号 TU 742

作者简介 王经明, 1958 年生, 硕士, 1978 年毕业于淮南矿业学院地质系, 1990 年和 1995 年分别赴日本九州大学和美国宾州大学进行岩石力学培训, 现任煤炭科学研究总院西安分院水文地质研究所煤矿防治水研究室主任。主要从事煤层底板突水机理及防治研究。

Wang Jingming

(Xi'an Branch, Central Mine Research Institute, Xi'an, 710054)

Abstract The water injections into both fracturing and intact coal floor strata reveal that water drain in the lower part takes place earlier than in the upper part, and the break of rocks in deeper part of coal floor occurs before mining. The physical analogues on these two kinds of floor reveal the same phenomenon. In the in-situ measurement it is found that the artesian water intrudes into the coal floor before mining. The paper considers that the secondary stress creates conditions for the development of the intrusion of the artesian water. The progressive intrusion is one sort of mechanism for water inrush.

Key words progressive intrusion, water inrush mechanism, analogue experiment, in-situ measurement, injection test

1 引 言*

矿坑突水一直是影响和制约我国煤炭发展的最大障碍之一。岩溶水患使我国 42% 的煤炭储量不能开采。早在 50 年代这项研究就已开始, 自 1980 年以来, 由于开采强度加大, 煤矿突水频率和强度都有所增加, 突水机理的研究有了迅速的发展。多项突水机理的观点先后问世。其中较为流行的观点有: ①“下三带”说(山东矿业学院, 1978)^[1]; ②零位破裂说(王作禹, 1989)^[2]; ③岩水应力关系说(煤炭科学研究总院西安分院, 1989)^[3]。其中只有“下三带”说涉及到导升高度这一重要的水文地质现象。

尽管煤层底板突水的研究方法很多, 但现场实测和实验室相似材料模拟应为最有效的方法之一。我们通过现场观测和模拟试验发现导升高度带变化主要是发生在采面的前方。煤层底板的突水是由于承压水导升高度在采矿过程中的递进发展引起的, 即本文所要探讨的递进导升的突水机理。我们知道在承压水的富

水区存在着一定高度的天然导升, 在开采过程中, 在水压和二次应力的共同作用下, 承压水沿裂隙递进地向上入侵, 当入侵到底板破坏区时便突出。突水判据为

$$H_0 + \Delta H + h \geq M \quad (1)$$

式中 H_0 为原始导升高度; ΔH 为递进导升高度; h 为底板破坏深度; M 为底板全厚。如果 $H_0 + h = M$, 称为原始导升突水, 如果 $H_0 + h > M$, 则称为超越导升突水。

2 注水试验研究

为了了解煤层底板的突水过程, 在煤层底板的完整岩体内和断层带内分别进行了注水试验。

2.1 断层带的注水试验

两个注水孔安排在某工作面煤层底板的试验巷道内, 终孔于断层带(见图 1)。第一个孔的注水段是在

* 国家自然科学基金项目(No. 49872084)

到稿日期: 1998-11-27

煤层底板下 14.3 m 深处(法向);第二个孔的注水段为煤层下 29.6 m 深(法向)。注水开始于工作面前方(采前) 60 m(+ 60 m), 结束于工作面后方(采后) 60 m(- 60 m)。采用恒压注水, 以观测断层在采矿过程中的透水性变化, 观测结果如图 2 所示。

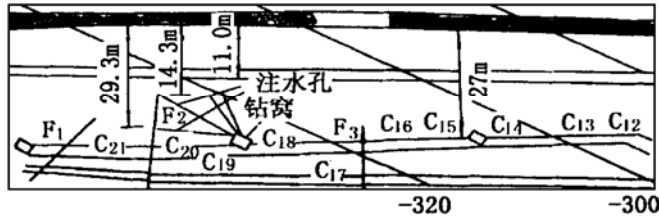


图 1 过观测巷道轴线的地质剖面及工程布置

Fig. 1 The geological section across the axis of observation tunnel and engineering layout

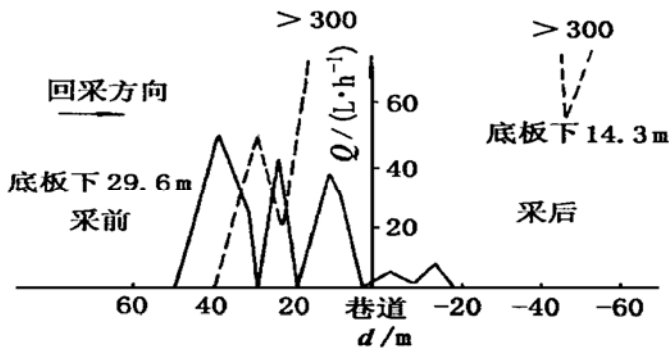


图 2 底板断层内注水量与采面位置的关系

Fig. 2 The change of injection rate in fault zone with advance of working face

从图中可以看出 29.6 m 深注水段的耗水主要发生在工作面的前方。开始时钻孔并不耗水, 当工作面距注水孔 51.3 m 时, 钻孔突然耗水, 耗水量达 50 L/h, 随着工作面的推进, 注水量发生了振荡性的变化。但注水量总的变化趋势是随采面的推进而下降, 当工作面采过后, 注水量衰减到 8 L/h 以下, 当工作面采过 20 m 时, 注水量降为零。对于 14.3 m 深的注水段, 钻孔耗水发生在工作面前 40 m(+ 40 m) 至工作面后方 60 m(- 60 m)。初期, 钻孔的耗水量近乎为零(+ 60 m 至+ 40 m)。但当工作面推进到距注水孔 40 m 时, 钻孔开始耗水达 50 L/h, 随着工作面的推进, 注水有所减少, 一度降至 20 L/h(+ 220 m 处)。当工作面推进到 20 m 时, 注水量猛增到 300 L/h 以上。该水量一直保持到观测结束, 两个深度段的注水量对比可以发现, 断层带内底板深部的耗水明显早于浅部, 且主要发生在工作面前方, 这说明底板存在着深部受采矿影响较早, 对浅部影响较晚的现象; 底板浅部断层带的耗水量远大于深部, 即采矿对浅部影响或破坏较深部强, 底板所受的影响或破坏是随工作面的推进而变化的, 存在着由深到浅向上发展的现象。

这一采矿引起的水文地质效应^[4]在突水机理研究上很有意义。

2.2 完整底板的注水试验

注水孔位于工作面上巷距切眼 86 m 处, 孔深 20 m, 以 76° 倾角倾向工作面(见图 3)。钻孔从 6 m 深到孔底分 12 个注水段进行常压注水, 注水开始于采前 45 m(+ 45 m), 结束于采后 115 m(- 115 m)。注水初期, 即工作面距注水孔大于 20 m 时, 注水量很小, 可以忽略不计。当工作面推进到距注水孔+ 20 m 时, 注水孔 14 m 以下层段耗水量开始增加达到 1000 cm³/min。而 14 m 以上层段耗水量保持不变, 仍然小于 500 cm³/min, 如图 4 所示, 在注水间歇期间, 出现了一个很有意义的现象, 钻孔的 18 m 深以下开始涌水。水源为距煤层约 22.5 m 深的徐庄灰岩。当工作面推进到+ 15 m 时, 出水段发展到 16 m 深处。当工作面推进到+ 10 m, 出水段发展到 14 m 深处。以后再没有向上发展。涌水现象持续到采面过后 20 m 方才停止。此后的注水量明显变小(如图 4 所示)。

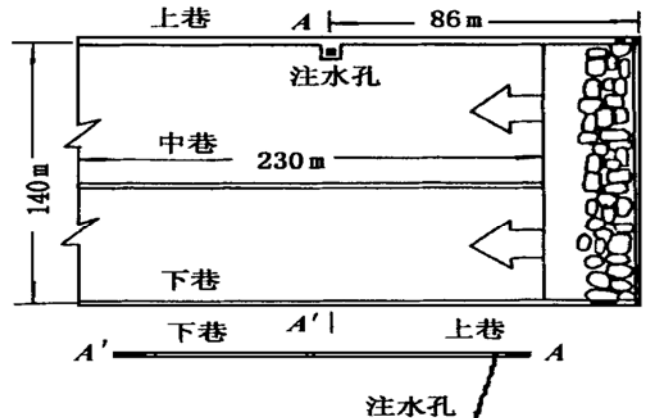


图 3 注水试验工程示意图

Fig. 3 Schema of injection test

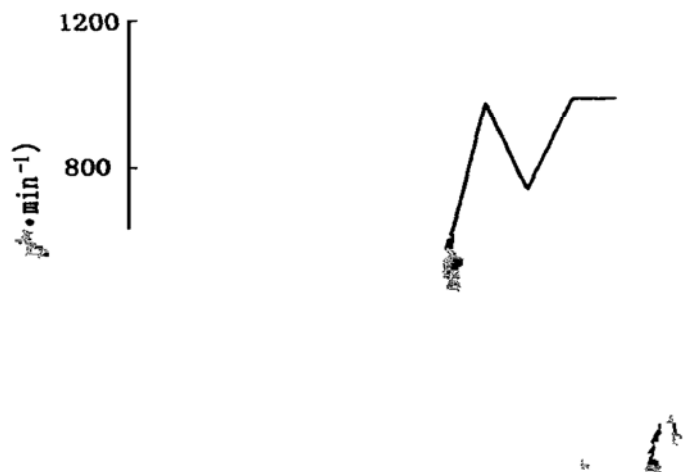


图 4 采面前后完整底板不同深度注水量的变化

Fig. 4 The change of injection rate in the intact coal floors before and behind the mining face

上述两个试验表明,不论是破碎底板还是完整底板,在开采过程中,工作面前方的底板深处都具备了张破坏的力学条件,形成了承压水入侵的应力环境。根据注水量及钻孔涌水量的变化过程,说明 18 m 以下可能存在着原始导升,受采动的影响发生了高约 4.5 m 的递进导升,达到 14 m 深处。

3 递进导升突水的实验研究

为了了解煤层底板有导升存在时的突水过程,进行了相似材料的模拟试验。试验模型长 3 m、高 2 m、厚 0.2 m,以 1: 100 的比例模拟真实情况,在模型中煤层底板设置了 2 条和含水层相通的断层。在断层内用充气的橡皮囊模拟承压水的导升高度,为了预测应力、位移状态和断层的活动情况,在模型上安装了大量的应变传感器,其中监测断层的传感器有 7 个(如图 5 所示)。模拟时,首先在模型顶部和底部同时施加地层荷载和水压荷载,然后由左测 50 cm 处以走向长壁式开挖,每步开挖 5 cm、高 4 cm、共开挖 25 步。

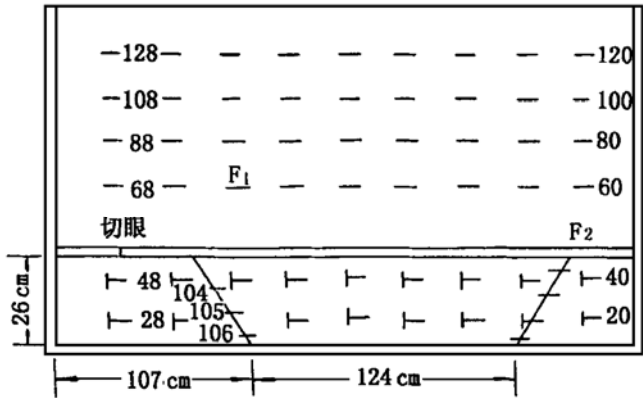


图 5 相似模拟实验结构图
(图中 $\vdash$ 60, $\dashv$ 20 等为应变片及编号)
Fig. 5 The physical skeleton of analogue
(Legend: $\vdash$ 60, $\dashv$ 20 are strain sensors)

从观测曲线(见图 6)可以看到,开挖前水平应变为压性。在开挖开始时,断层带的水平压应力开始逐渐降低。当工作面推进到距 F_1 断层 24 cm 时,最下部的 106 号应变片由压缩转变为拉伸,随着工作面的推进,106 号应变片发生了多次阶梯式上升。此后应变保持不变。位于中部的 105 号应变片也显示了类似的规律:最初,水平应变也为压性,随着工作面向断层接近,应变逐渐向张性发展。当工作面距断层仅 5 cm 时,应变由压性变为张性,直到工作面达到断层时这种变化才停止。最上方的 104 号应变片显示出采动对断层的这一部位影响很小。

对比 3 个应变片的观测值可以看出:①拉伸或断裂扩展首先从断层的最下部开始,逐渐向上发展;②断

层带深部的拉伸或扩展开始于工作面前方。由于水压和导升水头的模拟是通过气囊实现的,因气囊的长度不能随裂隙扩展前进,因此,无法模拟到导升的递进发展过程,这可能是上部的拉应变小于下部的原因。但从拉应变的先后次序上可以看到递进导升的形成条件和发展趋势。

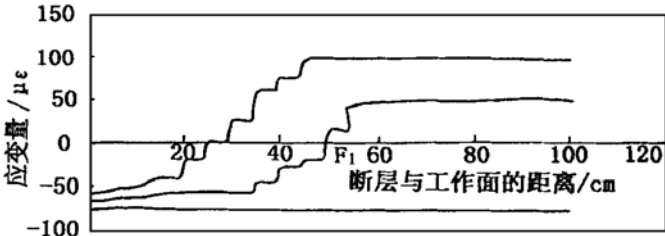


图 6 煤层底板不同深度的断裂在开采过程中应变变化曲线
Fig. 6 Changes of strain at different depths of coal floor with advance of working face

4 递进导升原位观测研究

[例 1]

已知为 8 m 的徐庄灰岩位于煤层底板下方 22.5 m,水压 2.5 MPa,灰岩水沿煤层底板的导升高度小于 2 m。在某工作面上巷以 76° 倾角向工作面底板施工了一个垂直深度为 20 m 的钻孔,观测采动过程中下伏灰岩水的动态。观测开始于采面前方 45 m,结束于采后 115 m。当工作面距观测孔 20 m 以外时,水情没有任何变化。当工作面前进至与观测孔距离 20 m 时,18 m 以下孔段开始涌水。工作面前进到 15 m 时,出水段发展了 2 m,达到 16 m 深。当工作面推进到 10 m 深时,出水段又上升了 2 m,达到 14 m 深。以后再没有向上发展。涌水现象持续到采后 20 m 方才停止。这次试验表明,煤层底板 14 m 深以下岩体在工作面前方一定范围处于相对引张状态,裂隙扩展。可以认为承压水在底板内已自然地入侵到一定的高度,在开采过程中,在张性二次应力和承压水的楔劈致裂作用下,水头渐进地向上入侵,即递进导升。如果水头入侵到底板破坏带时,便形成了突水。因此,水压在导升的发展中起着不容忽视的作用。在本次试验中,水头仅入侵到底板下 14 m 深处,没有和 11 m 深的破坏带勾通,所以没有突水。在采面过后涌水停止,表明底板深部在采面后方处于受压状态,造成了裂隙闭合。

[例 2]

原位测量地点为某工作面下巷。工作面处煤层至奥陶系泥灰岩 30 m,至奥陶系灰岩(奥灰)强含水层 60 m,奥灰水的水压为 0.8 MPa,根据物探,奥灰水沿断层带导升高度为 27 m。根据这种条件进行水压和应力的监测。水头距煤层底板 33 m,27 m 深处的水压

传感器显示当工作面距观测孔 45, 43, 34, 27m 时水压呈阶梯状地下降了 4 次, 当工作面推进到距观测孔 18 m 时, 水压急剧地上升(如图 7(a) 所示), 说明岩体发生了 5 次破裂。最后一次破裂使奥灰水导升高度发展到传感器处。20 m 深处的水压显示: 当工作面距观测孔 34, 27, 20 m 时, 水压也呈阶梯状地下降 3 次, 当工作面前进到 15 m 时, 水压又急剧地上升并稳定(如图 7(b) 所示), 这也是裂隙扩展所造成的。最后一次破裂标志着奥灰水向上导升了 37 m。水压曲线显示, 深部的承压水变化超前于浅部, 这反映出奥灰水的导升高度的发展过程, 观测结果和注水试验结果具有很好的一致性。根据观测值, 采用了数值模拟, 并进行了突水预测, 认为当工作面推进到观测孔处时将发生突水。果然, 当工作面距钻孔只有 5 m 时, 出现了顶板压力增大、支架下陷、底板轻度鼓起的直接突水前兆。于是工作面立即搬家到新切眼处, 留下 30 m 的煤柱。

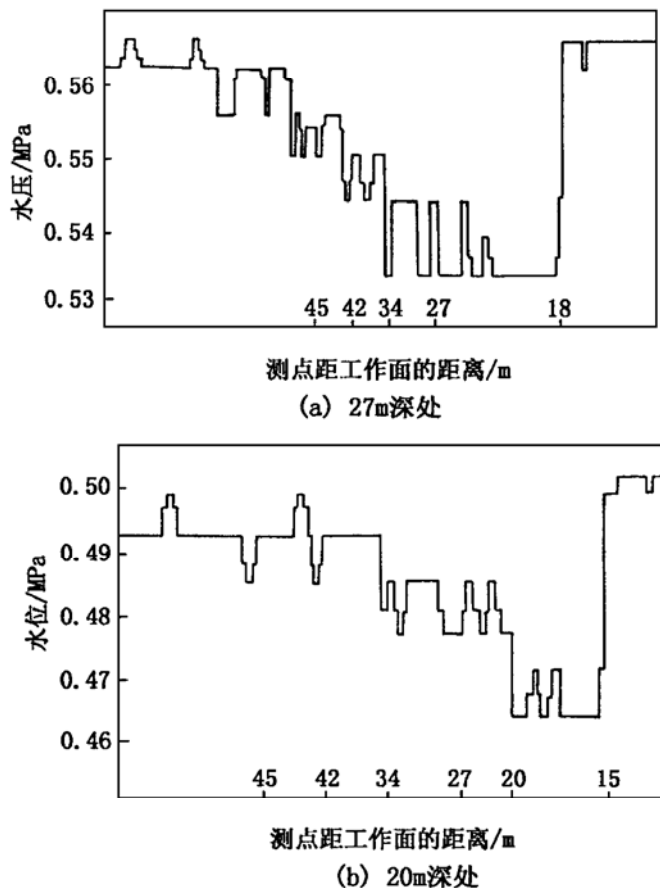


图7 水压随工作面推进的变化曲线

Fig. 7 The curve showing change of water pressure with advance of working face

应力曲线也有相应的变化。当测点在工作面前方 43 m, 底板下 18 m 深处的二次地应力压性转变为张性; 当测点在工作面前方 27 m 时, 张应力猛增, 显示了顶板瞬间来压现象(如图 8 所示); 当测点位于工作面的后方时, 应力又逐渐变为压性, 应力测量曲线显示其变化是梯状的和水压的变化一致, 变化的阶段也和水压变化相对应, 可以认为水压的变化是由应力引起的。

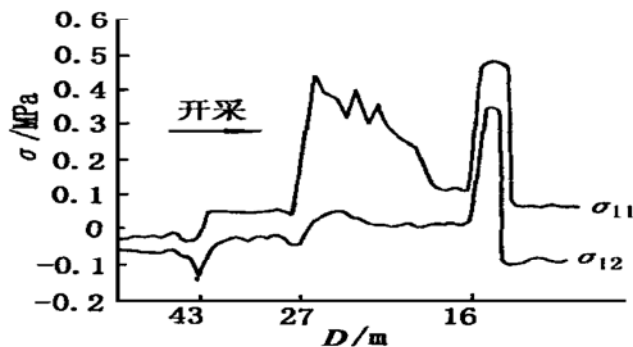


图8 底板 18 m 深处应力随工作面推进的变化

Fig. 8 The curve showing stress change with advance of working face at 18 m under coal floor

5 结 语

通过注水试验、模拟试验和底板预测, 我们认为在工作面前方煤层底板一定深度下, 煤层处于相对拉伸状态是承压水导升发展的环境应力条件, 承压水在裂隙内的楔劈致裂作用是裂隙扩展和导升发展的外荷载之一, 二者的结合是导升高度递进发展的原因, 在适当的条件下, 可导致突水。这就是本文提出的递进导升突水的机理。导升突水可以根据判据 $H_0 + \Delta H + h \geq M$ 判别, 其中 H_0 和 h 可以探测到, 只有 ΔH 需要通过监测水压、水温、应力、应变等标志得到。数值模拟可以对 ΔH 进行预测, 以实现突水预报。

参 考 文 献

- 1 李白英. 采动矿压与底板突水的研究. 煤田地质勘探, 1986 (6): 30~36
- 2 王作禹, 刘鸿泉. 承压水上采煤. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. 1~10
- 3 王成绪, 邓中. 煤层开采过程中底板突水的弹塑性有限元模拟及初步分析. 北京大学学报, 1990(6): 711~719
- 4 王经明, 董书宁. 采矿对断层扰动及水文地质意义. 煤炭学报, 1997(4): 361~365