

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1589-07

倾斜煤层底板破坏特征的微震监测

孙 建^{1,2}, 王连国¹, 唐芙蓉², 沈义峰², 龚世龙³

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 淮北矿业集团 桃园煤矿, 安徽 宿州 234116)

摘 要: 带压开采是承压水上采煤的主要方法, 底板采动破坏深度的确定是实现带压开采的关键和前提。针对底板采动破坏深度现场测量方法的局限性, 特别是倾斜煤层(煤层倾角在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间)底板采动破坏深度的现场测量。以桃园煤矿 1066 工作面为例, 利用高精度微震监测技术, 对承压水上倾斜煤层底板的采动破坏特征进行了连续的、动态监测。监测结果表明: (1) 工作面运输巷(下顺槽)附近的底板比工作面回风巷(上顺槽)附近的底板破坏深度更深, 破坏范围更大; (2) 倾斜煤层工作面底板破坏形态整体呈现为一个下大上小的非对称形态。根据微震监测结果, 确定了 1066 工作面回风巷和运输巷附近底板的最大破坏深度, 划分了倾斜煤层工作面底板突水危险区域。将微震监测的倾斜煤层底板破坏深度与经验公式计算的底板破坏深度进行了对比, 指出了经验公式存在的不足。

关 键 词: 倾斜煤层; 微震监测; 破坏深度; 底板突水

中图分类号: TD 324

文献标识码: A

Microseismic monitoring failure characteristics of inclined coal seam floor

SUN Jian^{1,2}, WANG Lian-guo¹, TANG Fu-rong², SHEN Yi-feng², GONG Shi-long³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. Taoyuan Coal Mine, Huaibei Mining Industry Group, Suzhou, Anhui 234116, China)

Abstract: “Mining above aquifer”, as the main method to explore coal seams above confined aquifer, in which the determination of coal seam floor failure depth is the key factor and precondition. Taking the 1066 workface of Taoyuan Coal Mine for example, the high-precision microseismic monitoring technique is used to monitor the continuous and dynamic failure characteristics of an inclined coal seam floor above a confined aquifer, which can overcome the limitation of traditional method in field measurement of floor failure depth, especially for the failure depth of an inclined coal seam floor (the inclined angle of coal seam is between 25° and 45°). The monitoring results show that: (1) compared to the coal seam floor nearby the workface return airway (upper crossheading), the failure depth of coal seam floor nearby the workface conveyance roadway (lower crossheading) is deeper, with wider failure zone. (2) from the whole aspect, the failure zone of the inclined coal seam workface floor presents an asymmetric form. According to the results of microseismic monitoring, the maximum failure depth of the coal seam floor nearby the workface return airway and the workface conveyance roadway as well as the dangerous area of water-inrush from floor are determined. Finally, the floor failure depth determined by microseismic monitoring is compared with the failure depth calculated by the empirical formula; some existing deficiency of the empirical formula for calculating the floor failure depth are pointed out.

Key words: inclined coal seam; microseismic monitoring; failure depth; water-inrush from floor

1 引 言

“带压开采”是承压水上采煤的主要方法, 实现“带压开采”的关键是正确认识煤层底板在采动压力和水压力共同作用下的破坏机制^[1-3]。煤层开

采引起底板破坏, 降低底板隔水层隔水能力, 使得煤层下伏承压水冲破底板隔水层的阻隔, 以突发、缓发或滞发的形式进入工作面造成底板突水。因此, 正确认识煤层底板破坏机理、确定底板采动破坏深度是底板突水理论研究和现场实际观测的主要内

收稿日期: 2010-08-02

基金项目: 973 计划项目 (No. 2010CB202210, No. 2007CB209400); 国家自然科学基金项目 (No. 50874103); 江苏省自然科学基金重点项目 (No. BK2008135); 江苏省青蓝工程项目; 江苏高校优秀科技创新团队项目。

第一作者简介: 孙建, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事底板突水及采场围岩稳定性监测方面的研究。E-mail: sunjian007700@vip.sina.com

容。“下三带”理论^[4-5]把开采后的煤层底板岩层自上而下分为：底板采动破坏带、完整岩层带、承压水导升带。王作宇等^[6-7]利用滑移线场理论分析了底板采动破坏带深度及破坏形态；雷文杰等^[8]采用有限元强度折减法求得底板岩体破坏滑移面，证明其滑移线与理论形态相接近；张金才等^[9-10]将完整岩层带视作板模型，采用弹塑性力学理论推导了底板完整岩层所能承受的极限水压力计算公式，对煤层底板突水进行预测；左宇军等^[11]应用突变理论研究底板关键层在动力扰动下的失稳，给出了失稳判据；田干、王经明等^[12-14]研究了承压水在上覆隔水层中的侵入导升现象，确认了承压水导升带的存在。在“下三带”理论中对底板隔水层隔水能力影响最大的是底板采动破坏深度，目前主要依据经验公式及现场观测来确定底板采动破坏深度^[15-19]。由于煤层赋存条件的复杂性和开采方法的多样性，利用经验公式确定的底板采动破坏深度与实际的破坏深度可能存在较大的误差^[15-16]。而底板破坏深度的现场观测，主要是通过钻孔注水或放水试验以观测煤层开采后引起的底板采动裂隙深度，或是在钻孔中设置位移或压力传感器以观测底板在采动前后位移或压力的变化，以此确定底板采动破坏深度^[17-19]。由于钻孔数量的有限性及现场施工条件的复杂性，这种静态的现场观测法所确定的底板采动破坏深度具有点的局限性，与实际的破坏深度之间可能存在较大的误差，尤其是确定倾斜煤层（煤层倾角在 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间）底板的采动破坏深度。

本文以桃园煤矿 1066 工作面为例，利用高精度微震监测技术^[20-23]，对承压水上倾斜煤层底板的采动破坏特征进行了连续的、动态监测。监测结果表明，倾斜煤层工作面底板破坏带整体呈现为一个下大上小的非对称形态；工作面运输巷附近的底板比工作面回风巷附近的底板不仅破坏深度更深，而且破坏范围更大。根据微震监测结果，确定了 1066 工作面运输巷和回风巷附近底板的最大破坏深度，划分了倾斜煤层工作面底板突水的危险区域。最后，将微震监测的倾斜煤层底板破坏深度与经验公式计算的底板破坏深度进行了对比，指出了经验公式存在的不足。

2 微震监测定位原理

国内外大量研究资料表明，岩体在应力作用下发生破坏之前，必然持续一段时间以微震和声波的形式释放积蓄的能量，这种能量释放的强度，随着结构临近失稳而变化，每一个微震信号都包含着岩

体内部状态变化的丰富信息，对接收到的微震信号进行处理、分析可以作为评价岩体稳定性的依据，也可以确定破裂发生的位置，并在三维空间上显示出来^[24-25]。为进行微震事件定位，首先应在监测的岩体周围根据一定的监测原则，安装一些微震检波器，当观测范围内出现岩石破裂等异常情况时，它所产生的微震波会沿（近似）射线路径传播到各个检波器。在岩体发生破坏产生微震信号时，已知的是各个测点检波器的坐标和它所接收到微震信号的时刻，未知的是发生微震的震源位置和时刻。设震源位置的空间坐标为 (x, y, z) ，发生时刻为 t ；埋设的第 i 个测点检波器坐标为 (x_i, y_i, z_i) ，检波器接受到微震波的时刻为 t_i ；由于微震波在岩体中 P 波的传播速度较 S 波快，初至时间易于识别，所以在进行微震事件定位时常采用 P 波定位。由于 P 波的传播速度很快，且微震监测的区域通常为方圆几百米的小区域，因此，可假定 P 波以常速度 v 传播，实际监测现场 P 波传播速度 v 通过人工震源的速度结构校正、检波器一致性校正等方法现场具体确定。震源与第 i 个测点检波器之间的走时方程为

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = v^2(t_i - t)^2 \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, m)$$

式中： m 为接收到微震信号的检波器个数； (x, y, z, t) 为震源的时空参数。方程（1）为非线性系统，直接求解非常困难，这就需要寻找一个线性系统来代替此非线性系统。用第 i 个测点检波器的走时方程减去第 k 个测点检波器的走时方程可得到如下线性系统：

$$2(x_i - x_k)x + 2(y_i - y_k)y + 2(z_i - z_k)z - 2v^2(t_i - t_k)t = x_i^2 - x_k^2 + y_i^2 - y_k^2 + z_i^2 - z_k^2 - v^2(t_i^2 - t_k^2) \quad (i, k = 1, 2, 3, \dots, m)$$

通过两个不同测点检波器走时方程的组合，一共可以产生 $m(m-1)/2$ 个线性方程，其中只有 $(m-1)$ 个线性独立的方程。利用这些独立的线性方程组中的 4 个就可以求出震源的空间位置及相应的发生时间，进行三维空间反演就可以对微震事件进行空间定位^[26-27]。在进行微震事件三维空间定位时，可以将微震监测空间分为“内场”和“外场”，利用“内场定位”和“外场定位”相结合技术可以使微震事件的定位精度基本满足各种目的微震监测工程需要^[23]。与传统技术相比，微震监测技术具有连续、动态、三维监测的特点，另外，根据震源情况可进一步确定岩体破裂尺度及其性质。因此，微震监测技术为研究采场底板空间破坏范围、破坏形态，预测底板

突水提供了一种新的技术手段。

3 倾斜底板破坏特征的微震监测

3.1 工作面概况及微震监测方案

淮北矿业集团有限责任公司桃园煤矿 1066 工作面位于北 6 采区右翼, 左起 6 采区轨道上山, 右至 F_2 断层煤柱, 其上方是 1064 工作面采空区。1066 工作面走向长为 790 m, 倾向长为 112 m, 煤层埋深为 500 m, 煤层厚度为 3.4 m, 煤层倾角为 28° , 煤层顶底板以细砂岩、粉砂岩及中砂岩为主。煤层底板下方 53 m 左右为太原组灰岩含水层, 其水压高达 3 MPa 左右, 工作面在回采过程中存在底板突水危险。因此, 必须确定 1066 倾斜煤层工作面底板采动破坏深度, 预测底板突水的可能性。



图 1 井下防爆微震监测仪

Fig.1 Underground explosion-proof microseismic monitoring system

表 1 底板钻孔及检波器布置参数
Table 1 Setting parameters of detectors for different floor boreholes

钻孔编号	检波器编号	在工作面前方 / m	与水平面夹角 / ($^\circ$)	钻孔深度 / m
1	1#	50	-60	15
2	2#	50	-60	60
3	3#	50	-10	15
4	4#	100	-10	15
5	5#	100	-60	30
6	6#	100	-10	30
7	7#	100	-60	15
8	8#	150	-10	15
9	9#	150	-60	30
10	10#	150	-10	30
11	11#	150	-60	15
12	12#	200	-60	15
13	13#	200	-60	60
14	14#	200	-10	15

本次微震监测采用 Comise 井下防爆微震监测仪, 如图 1 所示, 它是专门进行煤矿井下微震监测的先进设备。通过在工作面两侧的巷道中打设底板钻孔注浆的方法将 14 个检波器固定在倾斜煤层底

板岩层内, 埋设的检波器位置参数如表 1 所示, 打设完钻孔安装好检波器后, 立即对钻孔注浆固定检波器, 同时封堵整个钻孔。其中 2#及 13#检波器钻孔深度为 60 m, 与水平面成 -60° 的夹角, 钻孔末端在煤层底板岩层内的位置距离煤层底板的垂直距离为 31.8 m, 距离含水层的垂直距离为 21.2 m。因此, 钻孔不会穿透底板隔水层进入太原组灰岩含水层。埋设的检波器在煤层底板内的三维空间分布位置及 X - Y 平面内的投影如图 2 所示, 红色三角形为检波器三维空间分布, 蓝色方块为检波器在 X - Y 平面内的投影分布。埋设的检波器在工作面走向、倾向及竖直方向可以形成一个 $250\text{ m} \times 180\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的内外场监测空间, 监测 1066 工作面回采过程中底板的破坏特征, 确定煤层底板采动破坏深度, 预测底板突水的可能性, 为实现承压水上 1066 工作面的安全高效回采提供重要现场依据。

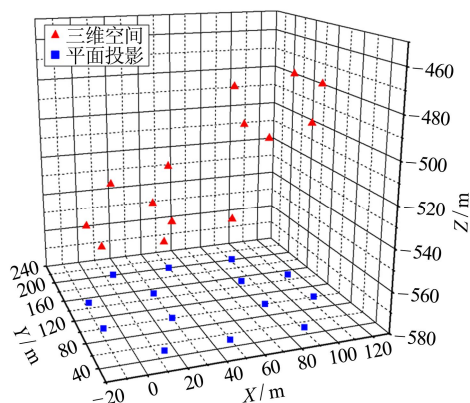


图 2 底板监测区域检波器三维空间分布

Fig.2 Three-dimensional distribution and plane-projected of detectors for the floor monitoring area

3.2 微震监测推断的底板破坏深度

微震监测从 2009 年 10 月 10 日开始, 至 2009 年 12 月 10 日结束。为了更好地显示煤层底板破坏特征, 在进行微震事件定位及分析时略去了发生在底板上方的微震破裂事件。在微震监测阶段共获得 189 个有效的底板破裂微震事件, 这些微震事件特征明显, 能够反映倾斜煤层工作面回采过程中底板的动态破坏特征。图 3 为 2009 年 11 月 2 日, 00: 39: 02 A48 事件波形图, 通过排除干扰信号, 确定有效的微震波信号初至时间, 依据微震监测定位原理, 可以计算出监测到的微震事件三维空间坐标及相应的发生时间。通过对所有监测到的微震信号进行类似处理, 就可以计算出发生的所有微震破裂事件的三维空间坐标及相应的发生时间, 对微震事件进行

三维空间定位, 就可以确定底板的采动破坏深度、破坏形态, 划分倾斜煤层底板突水危险区域, 预测底板突水的可能性。

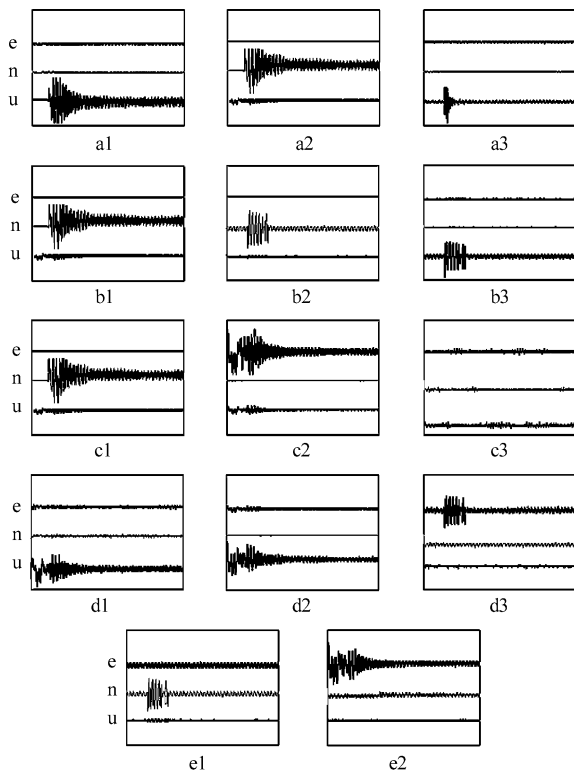


图3 2009年11月2日00:39:02 A48事件波形图
Fig.3 Wave graphs of A48 event at 00:39:02 on Nov. 2, 2009

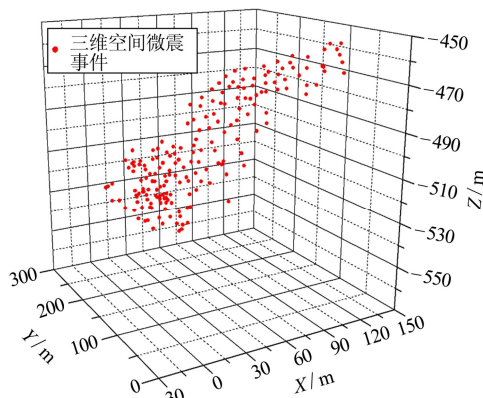


图4 微震事件三维空间分布图
Fig.4 Three-dimensional distributions of microseism incidents

利用 Matlab 软件编制求解线性方程组 (2) 的程序, 就可以求解出微震事件的三维空间坐标及相应的时间, 进行三维空间反演生成微震监测到的 189 个有效的底板破裂微震事件在三维空间分布形态图, 如图 4 所示, 红色的圆点代表微震破裂事件。从图 4 可以看到, 工作面运输巷 (下顺槽) 附

近区域底板内的微震破裂事件明显多于工作面回风巷 (上顺槽) 附近区域底板内的微震破裂事件。图 5 为监测到的微震事件沿工作面走向的平面投影图。从图 5 可以看到, 微震破裂事件主要集中在工作面运输巷、回风巷附近区域的底板岩层中, 这主要由于回采后工作面在运输巷、回风巷附近区域形成应力值较大的剪应力区。利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件^[28]建立 1066 工作面走向长壁开采三维数值计算模型, 模型底边为固定约束, 前后、左右各边界为位移约束, 模型边界初始条件符合实际情况, 由于 1066 工作面开切眼与 F₂ 断层之间留有约 50 m 宽的保护煤柱, 在建立模型时没有考虑 F₂ 断层对底板破坏的影响。图 6 为 1066 工作面回采后的沿煤层倾斜方向工作面剪应力 σ_{xz} 云图, 从图 6 可以看出, 回采后工作面在运输巷、回风巷附近区域形成 2 个应力值较大的剪应力区, 这 2 个高剪应力区是底板岩体遭受破坏最为严重的部位, 当周期来压时, 工作面运输巷、回风巷附近剪应力区中的构造往往重新活化, 从而使不导水的构造变为导水构造。因此, 要将这 2 个高剪应力区域作为预防底板突水的重点区域, 特别是此区域存在断层的条件下。由于 1064

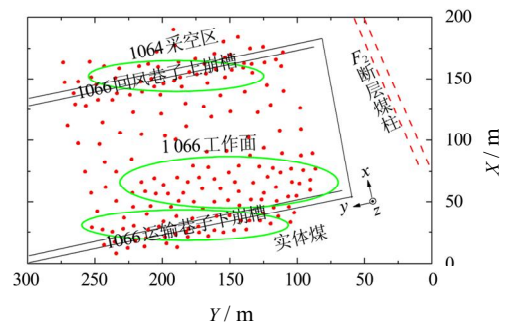


图5 微震事件沿工作面走向的平面投影图
Fig.5 Plane-projected of microseism incidents along the advanced direction of workplace

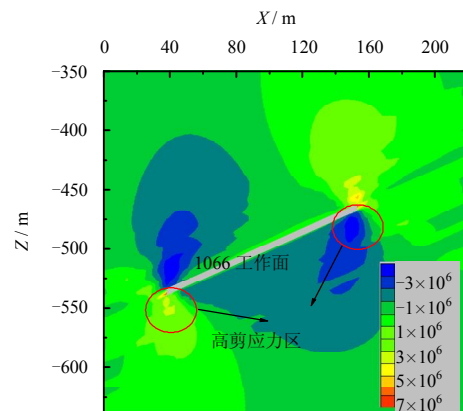


图6 回采后 1066 工作面剪应力云图
Fig.6 Shearing stress nephogram of 1066 workplace

采空区冒落的矸石及其破坏的底板再次受到 1066 工作面开采的扰动, 在 1064 采空区内也发生一些微震破裂事件; 而在 1066 工作面另一侧的实体煤区域内微震破裂事件相对较少, 且主要集中在运输巷巷帮边缘区域, 说明实体煤下方的底板岩体处于相对稳定状态。

图 7 为监测到的微震事件沿工作面倾向的剖面投影图。从图 7 可以看到, 发生的微震破裂事件在倾斜煤层底板内的分布呈现非对称的特征, 工作面运输巷附近的底板比工作面回风巷附近的底板不仅破坏深度更深, 而且破坏范围更大; 工作面底板破坏带整体呈现为一个下大上小的非对称形态。从微震破裂事件在倾斜煤层底板内的分布位置可知, 工作面运输巷附近的底板最大破坏深度在 16 m 左右, 工作面回风巷附近的底板最大破坏深度在 12 m 左右, 这 2 个区域是底板岩体遭受破坏最为严重的部位, 也是预防 1066 倾斜煤层工作面底板突水的重点区域, 尤其是工作面运输巷附近的底板区域。

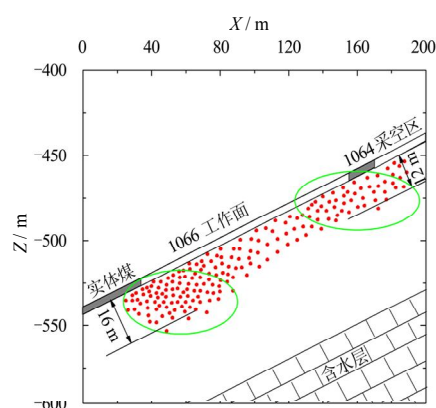


图 7 微震事件沿工作面倾向的剖面投影图

Fig.7 Profile-projected of microseism incidents along the tilted direction of workface

图 8 为回采后的沿煤层倾斜方向 1066 工作面塑性区云图。由于 1066 工作面的回采, 工作面顶板出现拉应力, 底板出现卸压区, 工作面运输巷及回风巷附近形成应力集中区。因此, 工作面运输巷及回风巷附近的底板岩层中微震破裂事件相对较为集中, 这 2 个区域是底板岩体遭受破坏最为严重的部位, 是预防底板突水的重点区域。从图 8 可以看到, 回采后的 1066 倾斜煤层工作面底板塑性区分布形态呈现非对称的特征: 工作面运输巷附近底板的塑性区比工作面回风巷附近底板的塑性区范围更大、更深。另外, 数值模拟的工作面运输巷附近底板塑性区扩展的最大深度约为 15.5 m, 工作面回风巷附近底板塑性区扩展的最大深度约为 13 m, 这与微震

监测的底板破坏深度及破坏形态接近一致, 间接证明微震监测的有效性及其可靠性。

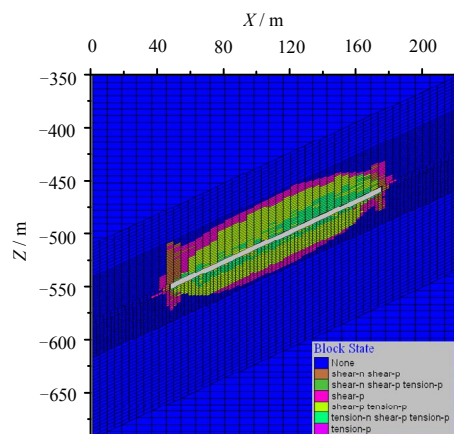


图 8 回采后 1066 工作面塑性区云图

Fig.8 Plastic zone nephogram of 1066 workface

3.3 经验公式计算的底板破坏深度

根据全国已有的十多个工作面底板破坏深度的实测资料^[29], 通过对各种影响底板破坏因素的对比分析, 并考虑到数学描述的可能性, 选取开采深度、煤层倾角、岩石强度和工作面斜长等 4 个主要因素, 进行多元逐步回归分析, 得到计算底板采动破坏深度的回归公式 (相关系数为 0.944 4) 为

$$h_1 = 0.110 \ 5L + 0.006H + 0.451 \ 4F - 0.008 \ 5\alpha - 2.39 \quad (3)$$

式中: h_1 为底板采动破坏深度 (m); L 为工作面斜长 (m); H 为煤层开采深度 (m); F 为岩石坚固性系数 (普氏系数); α 为煤层倾角 ($^\circ$)。

对于桃园煤矿 1066 工作面而言, $L = 112 \text{ m}$, $H = 500 \text{ m}$, $F = 4$, $\alpha = 28^\circ$, 由公式 (3) 可计算底板采动破坏深度 $h_1 = 14.55 \text{ m}$, 即煤层底板最大采动破坏深度为 14.55 m 左右。由式 (3) 计算出的 1066 工作面底板的最大破坏深度 14.55 m 比实际微震监测的 1066 工作面运输巷 (下顺槽) 附近的底板最大破坏深度 16 m 小 1.45 m, 比工作面回风巷 (上顺槽) 附近的底板最大破坏深度 12 m 大 2.55 m。由于底板破坏深度计算式 (3) 所包含的影响底板破坏的因素较少, 例如没有考虑煤层厚度、开采方法等对底板采动破坏的影响^[18-19], 使得由式 (3) 计算的底板破坏深度与实际的破坏深度之间存在较大的误差。另外, 该公式只能计算底板的最大破坏深度, 无法描述底板的破坏特征: 对于近水平煤层, 底板的破坏具有“对称”的特征; 对于倾斜煤层, 底板的破坏具有“非对称”的特征。对于倾斜煤层底板破坏而言, 工作面上、下顺槽附近的底板岩体

破坏深度相差较大, 4 m 左右, 这一点可以从现场的倾斜煤层底板破坏特征的微震监测结果得到证实。

4 结 论

(1) 微震监测结果表明: 工作面运输巷(下顺槽)附近的底板比工作面回风巷(上顺槽)附近的底板破坏深度更深, 破坏范围更大; 倾斜煤层工作面底板破坏带整体呈现为一个下大上小的非对称分布形态。

(2) 工作面运输巷附近的底板最大破坏深度在 16 m 左右, 工作面回风巷附近的底板最大破坏深度在 12 m 左右, 与经验公式计算的底板最大破坏深度 14.55 m 之间存在一定的误差, 主要由于经验公式中所包含的影响底板采动破坏的因素较少。

(3) 依据微震监测结果, 确定了 1066 倾斜煤层工作面底板突水的危险区域, 突水危险区域的确定为实现桃园煤矿承压水上倾斜煤层的安全高效开采提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [2] 赵阳升, 胡耀青. 承压水上采煤理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [3] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268—277.
YANG Tian-hong, TANG Chun-an, TAN Zhi-hong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(2): 268—277.
- [4] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报, 1999, 18(4): 11—18.
LI Bai-ying. “Down Three Zones” in the prediction of water inrush from coalbed floor aquifer: Theory, development and application[J]. **Journal of Shandong Institute of Mining & Technology**, 1999, 18(4): 17—23.
- [5] 施龙青. 底板突水机制研究综述[J]. 山东科技大学学报, 2009, 28(3): 17—23.
SHI Long-qing. Summary of research on mechanism of water-inrush from coal seam floor[J]. **Journal of Shandong University of Science & Technology**, 2009, 28(3): 17—23.
- [6] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [7] 王作宇, 刘鸿泉, 王培彝, 等. 承压水上采煤学科理论与实践[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 40—48.
WANG Zuo-yu, LIU Hong-quan, WANG Pei-yi, et al. Theory and practice of coal mining discipline on confined water[J]. **Journal of China Coal Society**, 1994, 19(1): 40—48.
- [8] 雷文杰, 汪国华, 薛晓晓. 有限元强度折减法在煤层底板破坏中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 299—303.
LEI Wen-jie, WANG Guo-hua, XUE Xiao-xiao. Application of finite element strength reduction method to destruction in coal seam floor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 299—303.
- [9] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [10] 张金才, 刘天泉. 论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 46—54.
ZHANG Jin-cai, LIU Tian-quan. On depth of fissured zone in seam floor resulted from coal extraction and its distribution characteristics[J]. **Journal of China Coal Society**, 1990, 15(2): 46—55.
- [11] 左宇军, 李术才, 秦泗凤, 等. 动力扰动诱发承压水底板关键层失稳的突变理论研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2361—2366.
ZUO Yu-jun, LI Shu-cai, QIN Si-feng, et al. A catastrophe model for floor water-resisting key stratum instability induced by dynamic disturbance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2361—2366.
- [12] 田干. 煤层底板隔水层阻抗高压水侵入机制研究[硕士学位论文 D]. 西安: 煤炭科学研究总院西安分院, 2005.
- [13] 王经明. 承压水沿底板递进导升机制的模拟与观测[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 546—549.
WANG Jing-ming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(5): 546—549.
- [14] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机制的物探法研究[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 40—43.
WANG Jing-ming. Physical investigation on water inrush from coal floor induced by pressure water progressive up into protective aquiclude[J]. **Coal Geology & Exploration**, 1999, 27(6): 40—43.
- [15] WANG Lian-guo, ZHANG Zhi-kang, LU Ying-long, et al. Combined ANN prediction model for failure depth of coal

- seam floors[J]. **Mining Science and Technology**, 2009, 19(5): 684—688.
- [16] 张红日, 张文泉, 温兴林, 等. 矿井底板采动破坏特征连续观测的工程设计与实践[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(4): 1—4.
- ZHANG Hong-ri, ZHANG Wen-quan, WEN Xing-lin, et al. The design of continuous observation work on mining failure feature in the floor of mine and its practice[J]. **Mining Research & Development**, 2000, 20(4): 1—4.
- [17] 张文泉, 张红日, 徐方军, 等. 大采深倾斜薄煤层底板采动破坏形态的连续探测[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(2): 39—42.
- ZHANG Wen-quan, ZHANG Hong-ri, XU Fang-jun, et al. Continuous exploration for the mining failure from of the incline and thin coal seam's floor under high depth[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2000, 28(2): 39—42.
- [18] 张文泉, 李加祥, 温兴林. 缓倾斜煤层底板采动破坏深度与回采参数关系的研究[J]. 山东矿业学院学报, 1993, 12(1): 45—49.
- ZHANG Wen-quan, LI Jia-xiang, WEN Xing-lin. Research on the relationship between the mining parameters and the broken depth of the floor of gently-inclined seams[J]. **Journal of Shandong Institute of Mining & Technology**, 1993, 12(1): 45—49.
- [19] 付继武, 姜增平. 浅析缓倾斜煤层底板采动破坏深度与回采参数关系[J]. 煤炭技术, 2003, 22(2): 34—36.
- FU Ji-wu, JIANG Zeng-ping. Talking about relationship between the destruction depth of floor mining at flatly inclined seam and actual mining parameters[J]. **Coal Technology**, 2003, 22(2): 34—36.
- [20] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23—25.
- JIANG Fu-xing, XUN Luo, YANG Shu-hua. Microseismic monitoring study on spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 23—25.
- [21] 姜福兴, XUN Luo. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147—149.
- JIANG Fu-xing, XUN Luo. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 147—149.
- [22] 姜福兴, 杨淑华, XUN Luo. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 357—360.
- JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua, XUN Luo. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseismic monitoring techniques[J]. **Journal of China Coal Society**, 2003, 28(4): 357—360.
- [23] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932—1938.
- JIANG Fu-xing, YE Gen-xi, WANG Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1932—1938.
- [24] 芦东平, 潘一山. 矿山微震监测结果可视化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(增): 107—109.
- LU Dong-ping, PAN Yi-shan. Visualization of microseismic monitoring results of mine[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2008, 27 (Supp.): 107—109.
- [25] 李全晓, 姜福兴, 王存文, 等. 微震监测结果在矿图上的定位合成及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 165—168.
- LI Quan-xiao, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, et al. Location synthesis of micro-seismic monitoring results on mining map and its application[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(2): 165—168.
- [26] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 微地震的线性方程定位求解及其病态处理[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 60—62.
- PANG Huan-dong, JIANG Fu-xing, ZHANG Xing-min. Study on nonhomogeneous material's AE by image processing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.): 60—62.
- [27] 李会义, 姜福兴, 杨淑华. 基于Matlab的岩层微地震破裂定位求解及其应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 154—158.
- LI Hui-yi, JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua. Research and application of microseismic monitoring location of strata fracturing based on Matlab[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(2): 154—158.
- [28] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [29] 张文泉, 杨传国, 姜培旺, 等. 矿井水害预防与治理[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.