

# Study on Calculation Methods of Mining Failure Depth of Coal Seam Floor

Xiangshuai Meng, Haifeng Lu\*, Manman Zhang, Guifang Zhang, Chao Li

School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui  
Email: \*19966590832@189.cn

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Jul. 7<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 14<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The research on mining failure depth of coal seam floor is of great significance to the prevention and control of floor water damage and gas drainage. It is one of the most important topics in research of coal mining. A number of scholars have carried out research on it and made remarkable achievements. Based on the work of predecessors, this paper summarizes the research progress of calculation methods of mining failure depth of coal seam floor, introduces four calculation methods of mining failure depth of coal seam floor, including theoretical calculation, on-site detection, numerical simulation and similar material simulation, systematically combs the principle, the calculation process of each research method and the work of predecessors, and the development prospect of the four methods is prospected, the purpose is to provide some reference for related research.

## Keywords

Floor Failure Depth, Theoretical Calculation, On-Site Detection, Numerical Simulation, Similar Simulation

---

# 煤层底板采动破坏深度计算方法研究

孟祥帅, 鲁海峰\*, 张曼曼, 张桂芳, 李超

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: \*19966590832@189.cn

收稿日期: 2020年6月22日; 录用日期: 2020年7月7日; 发布日期: 2020年7月14日

---

## 摘要

煤层底板采动破坏深度的研究对底板水害防治和瓦斯抽采具有重要意义, 是煤炭开采研究中极为重要的  
\*通讯作者。

课题之一,大量学者对其开展了研究并取得了显著成果。文章基于前人所作的工作对煤层底板采动破坏深度计算方法的研究进展进行了综述,介绍了理论计算、现场探测、数值模拟和相似材料模拟四种常用的底板采动破坏深度计算方法,系统地梳理了各研究方法的原理、计算过程以及前人所作的工作,并对四种方法的发展前景进行了展望,旨在能够为相关研究提供一定的参考。

## 关键词

底板破坏深度,理论计算,现场探测,数值模拟,相似模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在承压水上采煤时,因采动压力和承压水的联合作用导致底板变形破坏,破坏后的底板直接导通下部承压含水层,发生突水事故,严重制约了煤矿的安全生产。近几十年来,随着我国煤矿开采深度的不断增大,因底板破裂导致的煤矿突水事故频繁发生[1][2],相关部门对这一问题给予了高度重视,成立了很多关于底板采动破坏问题的攻关项目。众多学者和现场工作者在底板采动破坏方面做了大量的工作,提出了许多重要的理论成果,如“下三带理论”[3]、“关键层理论”[4]、“下四带理论”[5]、“薄板理论”[6]等。这些成果的提出为准确预测底板突水提供了必要的理论基础。在这些理论中,底板采动破坏深度的确定是重点问题之一,准确确定底板破坏深度对煤矿突水危险性评价和瓦斯抽采具有重要意义。由于准确计算底板采动破坏深度的重要性,其计算方法受到学者们的普遍重视,成为采矿工程研究中的热点课题之一,众多学者对其展开研究,取得了大量新的研究成果。薛卫峰等[7]基于力学理论研究了承压水矿区切顶沿空留巷底板破坏规律,并与现场实测结果进行了对比分析;董书宁等[8]建立了华北型煤田改造奥灰顶部岩层段厚度的判别准则,并通过数值模拟以具体矿区为例给出了采深、采宽和采高三因素影响的底板破坏深度预测模型;李见波等[9]通过相似模型研究了承压水作用下煤层顶板切顶卸压对煤层底板破坏深度的影响,得出了切顶卸压和不切顶卸压条件下的底板破坏规律。本文综合前人的研究成果,详细介绍了理论计算,现场探测、数值模拟和相似材料模拟四种常用方法在底板采动破坏深度计算方面的应用,系统地梳理了各种研究方法的原理、计算过程以及前人所作的工作,并对四种研究方法的发展前景进行了展望,以期能够为相关行业的研究提供一定的参考。

## 2. 理论计算

基于底板突水理论,前人在底板采动破坏深度计算方面做了大量研究,得出了许多较为突出的研究成果。李白英[3]通过理论推导给出了煤层底板下三带的计算公式,其中底板破坏深度  $h_1$  的计算公式为:

$$h_1 = 0.0085H + 0.1665\alpha + 0.1079L - 4.3579 \quad (1)$$

式中, $H$ ——平均开采深度, m;  $\alpha$ ——地层倾角,°;  $L$ ——工作面斜长, m。之后这一公式被确定为规范公式。文中同一符号变量前后文含义相同,仅说明一次。

施龙青等[10]后基于 Matlab 和 Excel 函数分析功能利用多元线性回归分析对规范计算公式改进得到下式:

$$h_1 = -2.0234 + 1.48 \times 10^{-26} H^9 + 0.1913\alpha + 1.0637M + 0.1016L - 5.5536D + 7.5070I \quad (2)$$

该公式在规范公式的基础上,增加了底板抗破坏能力  $D$ 、煤层采厚  $M$  及有无切穿型断层及破坏带因子  $I$  的考虑,提高了计算结果的可靠度。

张金才、刘天泉[6]等提出煤层底板在受采动后会发不同程度的破坏,但总是由导水破坏带和隔水带组成的理论,在该理论中将煤层底板看作一个四周固定,上部受压的薄板,并通过弹塑性力学理论得出了底板破坏深度的计算公式,即:

①弹性力学理论公式:

$$h_1 = \frac{n+1}{2\pi} H \left( ctg\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi \right) - \frac{C}{\gamma tg\varphi} - mH \quad (3)$$

②塑性力学滑移线场理论公式:

$$h_1 = \frac{0.015H \cos\varphi}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)tg\varphi} \quad (4)$$

以上两式中,  $n$ ——最大支承压力系数;  $\varphi$ ——底板岩体平均内摩擦角,°;  $C$ ——底板岩体平均内聚力,MPa;  $\gamma$ ——底板岩体平均容重,KN/m<sup>3</sup>;  $m$ ——采空区降压系数。

张彦青[11]在前人研究的基础上基于板模型理论得出了底板破坏深度计算公式:

$$h_1 = \frac{1.57\gamma^2 H^2 L}{4R_c^2} \quad (5)$$

式中,  $R_c$  为岩体单轴抗压强度。

施龙青[12]在下四带理论中基于力学分析推导了底板采动破坏深度的理论计算公式:

$$h_1 = 59.88 \ln \frac{K_{max} \gamma H}{\sigma_1} \quad (6)$$

式中,  $K_{max}$ ——矿压最大集中系数;  $\sigma_1$ ——底板裂隙断裂强度,MPa。

而后在充分考虑了底板岩层损伤因子的基础上,给出了底板破坏深度的经验公式:

$$h_1 = \frac{0.0091H + 0.0448\alpha - 0.3113f + 7.9291 \ln\left(\frac{L}{24}\right)}{1 - \frac{L_w}{L_t}} \quad (7)$$

式中,  $f$ ——底板坚固性系数;  $L_w$ ——钻孔漏水段总长度, m;  $L_t$ ——钻孔总长度, m。

### 3. 现场探测

现场探测是采用地球物理手段对采动现场进行直接探测而获取底板采动破坏深度的一类重要方法[13],是获取底板破坏深度最直接有效、结果可靠度最高的方法。孔间电阻率 CT 法、微震监测和超声波探测是目前最常用的三种现场探测方法。

#### 3.1. 孔间电阻率 CT 法

孔间电阻率 CT 法是基于不同岩性地层间、地层与岩石孔隙间的电性差异,在待测岩层中进行钻孔施工与设备布置,从而获得不同岩体中电场分布特征的一种物探方法[14]。该方法操作简单,适用性强,分辨率高,对于破坏岩层的识别具有很高的灵敏性。孔间电阻率 CT 法的核心是孔间电阻率成像,其原

理是在一个或多个钻孔中按一定间距设置激发装置,在另一个或多个钻孔中按一定间距设置接收装置,通过在激发装置处激发电磁波,在地下形成稳定人工电流场,依据接收装置处得到的电位值构建两孔或多孔间介质物理性质差异的图像。目前孔间电阻率 CT 探测技术已较为成熟,其在底板采动破坏研究方面也得到了广泛的应用。高召宁等[15]以淮北某煤矿 1028 工作面为研究对象,采用动态直流电阻率 CT 探测煤层底板破坏深度,得出了底板采动裂隙演化规律和底板破坏深度。

### 3.2. 微震监测

微震监测是利用岩体破坏产生的震动信息来监测对象的破坏状况、安全状况的地球物理监测方法。其起源于矿山开采引发的矿震监测,经不断发展,形成了完善系统的微地震监测技术,目前,除矿山应用外,微震监测还广泛应用于核能工业、油库监测、地下隧道工程等非矿山行业。微震监测包括微震传感器布设、微震波形特征分析、震源定位与成像、微震监测预警等[16]。微震监测在底板破坏研究中的应用具体指的是在煤矿内的各个方位通过设置具有特定功能的传感器,对矿井内的振动情况进行记录分析,从而推断出底板岩体的应力变化特征及破坏情况。李书奎[17]、张平松[18]等均就底板破坏深度的微震监测进行了研究,达到了预期效果。

### 3.3. 超声波探测

超声波探测是利用超声波在被检材料中传播引起的响应关系来检测材料中存在的孔洞、裂隙及其发育范围的一种物理探测方法。超声波探测法具有对裂隙反应比较灵敏,费用低、施工方便、省时省力等特点,是确定煤层采动破坏深度的一种重要手段。其具体方法是在工作面的前后分别打好钻孔,在一个钻孔内设置超声发射器或小型爆破源,同时在另一个钻孔内设置接受探头,测量超声发射器或爆破产生的震荡波场在岩体内的传播速度,可间接地测量出底板的破坏程度。若工作面前方的波速较高,则说明岩体未遭破坏;若工作面后方的波速降低,则说明底板的完整性较差,底板已经破坏[19]。张平卿[20]以朝川矿 21090 工作面为研究对象,采用超声波探测技术监测底板岩层波速,得出了 21090 工作面煤层采动破坏深度,与规范公式计算结果进行对比,验证了超声波探测技术的可行性。

## 4. 数值模拟

煤层底板破坏实质上是在采动压力和承压水的联合作用下,岩层内裂隙增生、扩展、贯通,最终导致岩体失稳破坏的全过程。运用理论计算固然可以量化底板破坏规律及深度,但理论计算有时过于复杂,又会出现多个解析解的情况,另外理论计算不能直观地认识底板失稳破坏的全过程,数值模拟方法则以其精准度高,操作简单,可视化程度高的优点具有很大优势[21]。

底板采动破坏数值模拟的基本步骤是:①根据实测数据生成网格模型;②固定边界条件;③给定初始条件;④使模型达到平衡状态;⑤模型煤层开挖;⑥采动模型求解。

数值模拟方法仅依靠计算机即可实现对煤层底板采动破坏情况的研究,并且可以同时针对不同方案进行测试评估,因此被很多学者所采用并取得了大量的研究成果。马功社等[22]以黄陵二矿 2 煤层为研究对象,利用 FLAC3D 模拟软件,对 203 工作面底板进行数值模拟。查明了工作面底板应力分布情况和分布规律,得出了煤层底板最大破坏深度及位置,并与经验公式进行对比,验证了模拟结果的可靠性;刘进晓等[23]采用 ANSYS 软件进行固流耦合数值模拟,得出了葛亭煤矿 11601 工作面不同推进距离时的底板破坏情况,确定了底板三带高度值;涂敏等[24]对徐州某矿区开采工作面底板破坏特征进行研究,利用 RFPA2D 软件建立数值模型模拟煤层开挖,得出了不同工作面推进距离下的底板采动破坏深度变化规律及工作面底板极限损伤距离。

## 5. 相似材料模拟

在实际过程中,对于一些问题的研究,理论计算太复杂或者解析解太多,而数值模拟又因其固定程式与现实情况很难相符,通过现场模型的室内缩制的相似材料模拟进行研究则成为重要的手段之一。相似材料模拟的实质是按几何相似条件,采用与原型物理力学性质相似的材料制作缩小试验模型,给模型施加与原型相似的外部条件,观测并分析外部条件改变时的模型变化情况,以此来研究实际情况下难以现场研究的问题。在煤层开采研究中的相似材料模拟是根据相似理论,将实际工作面缩小制成适合实验室的一定比例模型,对各参数进行比例缩小,借助实验室内的设备,对工作面底板的应力及位移进行观测,将所得结果用于指导实践的一种方法,是研究底板变形和破坏规律的有效手段。

相似材料模拟要满足以下相似条件:①几何相似:试验模型形状与原型相似;②作用力相似:模型作用力与原型作用力相似;③运动相似:模型各点运动情况与原型相似;④边界条件和开采条件相似:模型边界条件和开采过程与原型保持一致。

刘天泉、张金才<sup>[25]</sup>等采用平面应力模型,利用弹簧模拟水压,模拟了煤层及其顶、底板的应力、位移变化情况。但早期试验模型均采用平面应力模型,与实际情况相差较大,也难以反映水压情况。姜耀东<sup>[26]</sup>、赵继忠等<sup>[27]</sup>相继开发了承压水模拟装置、相似模拟试验平台,并以工程实例为背景进行了模拟试验,验证了试验装置的可行性。

## 6. 结论

1) 随着实际的需要和研究的深入,关于底板采动破坏的理论越来越成熟,很多专家学者提出的理论都很好地应用于了工程实践,底板破坏深度理论计算方法也更加多样化,计算结果也更加准确。

2) 基于计算机的数值模拟技术和室内的相似材料模拟技术逐渐成为主要的研究手段。现在采用越来越多的则是模拟技术与理论计算相结合,模拟为主,理论计算为辅,通过对比验证,提高计算结果的准确性。

3) 随着技术手段的不断进步,现场探测逐渐成为底板破坏深度确定的重要方法,以微震监测和超声波技术等为主要研究手段的现场测量的可实施性和可靠性日益提高,在煤层底板破坏深度研究中发挥着越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 刘伟韬,王东辉,穆殿瑞.深部承压水上开采煤层底板破坏特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(9):920-926.
- [2] 张蕊,姜振泉,李秀晗,等.大采深厚煤层底板采动破坏深度[J].煤炭学报,2013,38(1):67-72.
- [3] 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(自然科学版),1999(4):11-18.
- [4] 黎良杰,殷有泉,钱鸣高.KS结构的稳定性与底板突水机理[J].岩石力学与工程学报,1998(1):40-45.
- [5] 施龙青,韩进.开采煤层底板“四带”划分理论与实践[J].中国矿业大学学报,2005(1):19-26.
- [6] 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(2):46-55.
- [7] 薛卫峰,王苏健,黄克军,等.承压水矿区切顶沿空留巷底板破坏理论分析与现场实测[J/OL].煤炭学报,1-9.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20200606.1407.011.html>,2020-06-10.
- [8] 董书宁,王皓,张文忠.华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J].煤炭学报,2019,44(7):2216-2226.
- [9] 李见波,郝伟,王新梅.承压水作用下切顶卸压对煤层底板破坏深度影响的试验研究[J].煤矿安全,2019,50(5):31-34+38.
- [10] 施龙青,徐东晶,邱梅,等.采场底板破坏深度计算公式的改进[J].煤炭学报,2013,38(S2):299-303.



- [11] 张彦青. “下三带”理论对承压水上采煤底板突水的预测研究[J]. 山西煤炭, 2014, 34(4): 50-52.
- [12] 施龙青. 底板突水机理研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 17-23
- [13] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348-356.
- [14] 周坤, 王华. 跨孔 CT 法在地铁工程桩基间距探测中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5): 747-752.
- [15] 高召宁, 孟祥瑞, 赵光明. 煤层底板变形与破坏规律直流电阻率 CT 探测[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 90-96.
- [16] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 83-96.
- [17] 李书奎, 张连福, 张少峰. 微震监测技术在煤层底板突水防治中的应用[J]. 煤矿开采, 2011, 16(5): 94-96.
- [18] 张平松, 鲁海峰, 韩必武, 等. 采动条件下断层构造的变形特征实测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 351-356.
- [19] 陈国胜, 王心义, 翟宇, 等. 煤层底板采动破坏深度探查技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 96-98.
- [20] 张平卿. 基于超声波技术的采煤扰动底板破坏深度探测[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 118-121.
- [21] 苗飞. 大采深工作面煤层底板采动破坏及特征研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [22] 马功社, 孙四清, 郑凯歌, 等. 采动效应下煤层底板变形破坏数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 202-205+209.
- [23] 涂敏, 缪协兴, 马占国, 等. 承压水上开采底板失稳破坏规律研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(2): 26-28.
- [24] 刘进晓, 郭惟嘉, 尹忠昌. 高承压水上采煤固流耦合数值模拟[J]. 煤矿开采, 2009, 14(3): 35-37.
- [25] 黎良杰, 钱鸣高, 殷有泉. 采场底板突水相似材料模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 1997(1): 35-38.
- [26] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1571-1578.
- [27] 赵继忠, 冯利民, 陈舰艇, 等. 承压水上开采工作面底板破坏深度相似模拟试验[J]. 煤矿安全, 2015, 46(6): 32-35.