

离层注浆技术中关于离层高度的计算讨论

崔仲仲¹ 韩永胜¹ 段希波¹ 刘飞²

(1. 山东水利职业学院水利工程系, 山东日照 276826;

2. 宿州学院, 安徽省宿州 234099)

摘要: 离层注浆作为煤炭离层填充的措施, 已经应用于煤矿塌陷区的治理。离层高度的计算是非常复杂的工作, 本文将岩层简化为一端固定、一端可移动铰支座的岩梁, 得到离层的高度 Δw 的计算公式。此结论可与将岩梁当作两端固定且考虑弹性地基的结论做对比参考, 更加精确的预测离层的高度, 从而为离层注浆做更好的技术支持。

关键词: 离层注浆; 离层高度; 力学

一、离层注浆技术

煤炭不仅是我国现代化建设的重要能源, 也是重要的化工原料。然而, 随着易采煤开采完毕及开采规模的扩大, 不少煤矿已经进入衰退期, 随着自然资源的枯竭, 不少资源型城市也面临着转型的问题。煤炭在支持社会发展的同时, 产生的环境问题同样不容忽视, 如燃烧煤炭造成的大气污染、开采煤炭导致的地表沉降、燃烧煤炭后煤灰处理等问题。据不完全统计, 我国因煤炭开采造成的采煤沉陷区已经超过 200 万公顷倍, 尤其是占全国煤炭产量七成的山西、陕西、内蒙古地区。如何治理塌陷区, 保证塌陷区地表建筑物、道路和生态系统的保持原样是急需解决的问题。

对塌陷区域的岩石裂隙进行填充, 是再次开采“三下煤炭”的重要技术手段。填充方案可采用膏体、固体填充物、水, 但是这些手段会与开采煤矿的过程有冲突, 因此不能作为开采进行中煤矿地表塌陷的处理。另外一种不相互冲突的填充手段就是离层注浆技术。

离层注浆是将燃烧后的煤灰粉加水搅拌, 然后通过泵输送至因开采导致的岩层裂隙的离层处, 因注浆内的水地表压力下会沿着裂隙渗出, 且在地表压力下煤灰粉会逐步压实, 将裂隙填充完成, 从而达到减少地表沉降的目的。其工作原理如下图 1 所示。

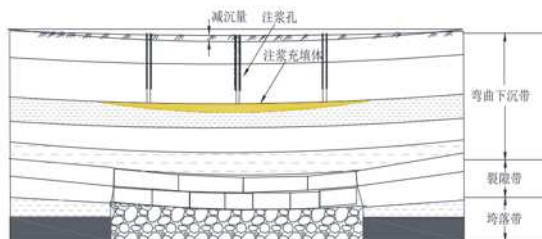


图 1 离层注浆技术减沉技术示意图 [2]。

张建全、王素华提出, 离层下部分岩体破碎后可当作关键层的弹性地基梁, 离层上部分的岩梁简化为两端固定受均布荷载作

用的超静定梁, 两者之间的差值度 Δw 为离层高度, 离层高度的计算是预测注浆量的重要依据。本文就离层高度计算提出一种新的计算方法, 与将岩梁当作两端固定且考虑弹性地基的结论做对比参考, 更加精确的预测离层的高。

离层上部分的岩石在位移求解的过程中, 一般将岩层简化为两端固支的岩梁。但是仔细观察煤炭的开采过程, 随着开采机的深入开采, 破碎区逐渐形成, 垮落带跟裂隙带也逐渐扩大, 如下图 2 所示。在垮落带和裂隙带扩大的过程中, 若破碎区上侧的地表已经发生沉降, 侧裂隙带上侧的弯曲沉降带在沉降区已经与非开采区域的约束产生了变化, 若再使用与非开采区域相同的约束条件, 已经不合适, 计算的沉降也有差异。

在未开采区域离层部分的岩层及离层下部分岩层岩梁的边界条件均可认为是固定端约束。在开采过的区域, 两部分区域岩梁的支撑已经不能完全当作固定端支撑, 因此, 本文将开采过的区域部分的岩梁当作可移动铰支座支撑来求解。得出的结论可以与将岩梁当作两端固定且考虑弹性地基的结论做对比参考, 更加精确的预测离层的高度。



图 2 (a) 开采机工作时, 开采机身后岩层示意图; (b) 开采机前进后, 开采机身后岩层示意图。

二、岩梁力学模型

根据分析未开采区域与已开采区域的力学模型如下图3所示。在分析区域将岩梁建立相关的坐标系进行位移的求解，岩梁变形示意图如下图4所示，注意在 $x=3l/8$ 处，剪力为0。

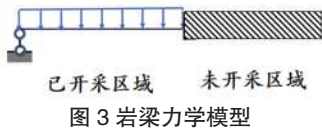


图3 岩梁力学模型

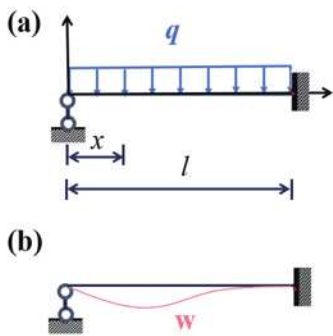


图4 (a) 岩梁坐标系及受力示意图；(b) 岩梁位移示意图。

三、离层高度求解

根据材料力学的相关知识，岩层的位移岩层所承受的弯矩之间存在着微分关系，如(1)式所示。

$$EI \cdot \frac{dw^2}{dx^2} = M \quad (1)$$

梁所受的弯矩与荷载集度 q (单位长度上的力) 之间存在微分关系(2)，

$$\frac{dM^2}{dx^2} = q \quad (2)$$

因此，由(1)、(2)可知，位移与荷载集度存在这微分关系，位移的四阶导与荷载集度相等(3)。

$$EI \cdot \frac{dw^4}{dx^4} = q \quad (3)$$

考虑岩层的约束条件：未开采区域岩梁的位移与转角均为0(4)；开采区域的终端位移为0；在 $x=3l/8$ 处，剪力为0，弯矩有极值，相应的转角为0(5)。

$$w_{\perp}(0) = w'_{\perp}(l) = 0 \quad (4)$$

$$w'_{\perp}(0) = w'_{\perp}\left(\frac{3}{8}l\right) = 0 \quad (5)$$

因此将(4)、(5)的边界条件带入至(3)中，可推导出离层的上部分岩层位移的方程：

$$w_{\perp}(x) = \frac{q_{\perp}}{24E_{\perp}I} \left(x^4 - \frac{23}{14}lx^3 + \frac{9}{14}l^2x^2\right) \quad (6)$$

(6)中， $E_{\perp}I$ 为离层上侧岩梁的抗弯刚度， q_{\perp} 为离层

上部分所受的荷载集度。

离层的下部分考虑最严重的塌陷区域，可忽略地基的支持力，可采同样的力学模型，得到离层下部分岩层的位移方程(7)。

$$x_{\perp}(x) = \frac{q_{\perp}}{24E_{\perp}I} \left(x^4 - \frac{23}{14}lx^3 + \frac{9}{14}l^2x^2\right) \quad (7)$$

中， $E_{\perp}I$ 为离层下侧岩梁的抗弯刚度， q_{\perp} 为离层下部分所受的荷载集度。

离层上部分岩层与离层下部分岩层之间的距离 Δw 可用(8)式表示

$$\Delta w = \frac{1}{24} \left(\frac{q_{\perp}}{E_{\perp}I} - \frac{q_{\perp}}{E_{\perp}I}\right) \left(x^4 - \frac{23}{14}lx^3 + \frac{9}{14}l^2x^2\right) \quad (8)$$

四、结论

本文通过将关键层与离层下部分的岩层都简化为一端固定、一端可移动铰支座的岩梁，可以得到离层的高度 Δw 的计算公式：

$$\Delta w = \frac{1}{24} \left(\frac{q_{\perp}}{E_{\perp}I} - \frac{q_{\perp}}{E_{\perp}I}\right) \left(x^4 - \frac{23}{14}lx^3 + \frac{9}{14}l^2x^2\right)$$

所得上述结论可以与将岩梁当作两端固定且考虑弹性地基的结论做对比参考，可以更加精确的预测离层的高度，从而为离层注浆做更好的技术支持。

参考文献：

[1] 李树志. 我国采煤沉陷区治理实践与对策分析 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47 (01) : 36-43.
 [2] 刘旺. 采动覆岩离层注浆减沉控制研究 [D]. 中国矿业大学, 2022.
 [3] 张建全, 廖国华. 覆岩离层产生的机理及离层计算方法的探讨 [J]. 地下空间, 2001 (S1) : 407-411+417-587.
 [4] 王素华, 高延法, 付志亮. 注浆覆岩离层力学机理及其离层发育分类研究 [J]. 固体力学学报, 2006 (S1) : 164-168.
 [5] 王素华, 宋朝亮, 刘永. 覆岩离层动态发育规律的实验研究 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (4) : 663-667

基金项目：本文是日照市自然科学基金项目青年基金项目资助 (编号：RZ2022ZR58)