

覆岩两带发育规律及其在矿井水害防治中的应用

王晓玉

安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月27日

摘要

为掌握煤矿工作面垮落带、导水裂隙带的发育高度及分布规律, 防控顶板水害、保障安全生产, 本文采用理论计算与孔内电法探测相结合的手段, 开展两带发育特征研究。理论计算结合工作面地质、煤层赋存及开采参数, 得出垮落带高度8.04~12.44 m、导水裂隙带高度33.46~44.67 m; 现场孔内电法探测得出垮落带高度12 m、导水裂隙带高度41 m。通过对比两种方法结果, 明确了两带实际发育特征, 验证了理论计算与探测技术的可靠性。研究所得参数及结论, 可为工作面顶板水害治理提供坚实地质依据, 对保障高效安全开采具有重要工程意义。

关键词

导水裂隙带, 垮落带, 并行电法, 覆岩破坏

The Development Law of Two Zones of Overlying Strata and Its Application in Mine Water Disaster Prevention and Control

Xiaoyu Wang

Anhui Huizhou Geology Security Institute CO, LTD, Hefei Anhui

Received: April 15, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 27, 2026

Abstract

In order to grasp the development height and distribution law of caving zone and water flowing fractured zone in coal mine working face, prevent and control roof water damage and ensure safe production, this paper studies the development characteristics of two zones by means of theoretical

calculation and borehole electrical detection. The height of caving zone is 8.04~12.44 m and the height of water flowing fractured zone is 33.46~44.67 m by theoretical calculation combined with the geology of working face, coal seam occurrence and mining parameters. The height of the caving zone is 12 m and the height of the water-conducting fracture zone is 41 m. By comparing the results of the two methods, the actual development characteristics of the two bands are clarified, and the reliability of the theoretical calculation and detection technology is verified. The parameters and conclusions obtained from the study can provide a solid geological basis for the roof water disaster control of the working face, and have important engineering significance for ensuring efficient and safe mining.

Keywords

Water Flowing Fractured Zone, The Collapse Zone, Parallel Electrical Method, Overlying Rock Failure

Copyright © 2026 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

煤层在开采过程中,会打破上覆岩层原有的应力平衡状态,引发岩体应力重新分布,导致覆岩发生渐进式变形与破坏,形成以垮落带和导水裂隙带为主要特征的采动影响区域[1]。其中,垮落带作为覆岩破坏的下部区域,岩体呈破碎垮落状态,而导水裂隙带位于垮落带上部,由大量贯通性裂隙构成,是采空区与上部水体沟通的主要通道[2]。若导水裂隙带向上贯通至含水层或地表水体,极易诱发采空区突水、溃沙等重大矿井灾害,不仅会破坏矿井正常生产秩序,更会严重威胁井下作业人员的安全[3][4],因此,垮落带与导水裂隙带的发育特征及演化规律,是煤矿顶板水害防治领域的核心研究内容[5]。

围绕垮落带演化特征、导水裂隙带发育规律及高度预测这一核心课题,国内外研究者已开展了大量系统性研究,并取得了丰硕的研究成果。在两带高度研究过程中,广泛采用现场监测、数值模拟、相似模拟及专用试验平台等多种技术方法,其中现场监测方法涵盖钻孔注水漏失量测试、钻孔电视观测、冲洗液漏失量监测、井下分段注水监测、井-地联合微震监测以及分布式光纤监测等[6]-[11],通过捕捉覆岩变形、裂隙发育及信号变化等特征,精准确定导水裂隙带与垮落带高度,深入阐释两带动态发育规律与空间分布特征;数值模拟手段则用于进一步剖析两带发育的内在机制,辅助完善高度预测体系[12]-[14];相似模拟试验可初步预测导水裂隙带发育高度,结合现场实测技术可实现高度的精准标定,为现场监测工作提供可靠技术路径[15]。

并行电法作为一种高效、便捷的地球物理监测方法,在两带监测研究中得到了逐步应用与推广。该方法基于不同岩层及含水体的导电差异,通过监测覆岩电阻率的变化特征,捕捉垮落带、导水裂隙带的发育范围与延伸高度,可实现对两带动态演化过程的实时监测,具有监测范围广、连续性强、操作简便且成本较低的优势;能够有效弥补传统监测方法在大范围、动态监测中的不足,为两带高度预测及水害防治提供了技术支撑,丰富了两带监测的方法体系[16]-[18]。

当前,针对垮落带、导水裂隙带的研究,虽积累了丰富的理论与实践成果,形成了多方法融合的研究体系,但不同矿区地质条件存在显著差异,覆岩破坏特征及导水裂隙带发育规律也有所不同,现有研究方法及其成果难以完全适配各类矿井的实际需求。为此,本文采用经验公式对导水裂隙带发育高度进行初步预测,结合现场实测数据验证预测结果的准确性,为同类地质条件矿井的水体下安全采煤提供科学指导与技术参考。

2. 工程概况

某矿位于童亭背斜东翼北端，地层走向在浅部为近于南北向。工作面标高-478.9~504.1 m，地面标高+26.1~+27.9 m，走向长度 560.5 m，倾斜长 230 m。回采山西组 10 煤层，为较稳定煤层，煤厚 0~4.2 m，平均 3.0 m，采高为 3.75 m 倾角 1°~16°，平均 5°，煤体结构为均一状结构。10 煤层上距铝质泥岩底界面 51.6~70.7 m，平均 62.9 m，10 煤层下距太原组一灰顶界面 51.1~70.4 m，平均 62.8 m，工作面柱状图如图 1 所示。工作面顶板水主要为 10 煤顶底板砂岩水，该砂岩裂隙含水层是工作面直接充水水源，由 10 煤顶底板砂岩地层构成。据相邻采区钻孔抽(注)水试验数据，其富水性弱。结合工作面机、风巷及底抽巷施工实揭情况，顶板水主要以滴、淋水方式进入工作面，可通过排水系统排出。为进一步保障回采安全，工作面回采前已施工顶板砂岩水疏放钻孔，所有钻孔均终孔于铝土层位，累计完成工程量 4920 m/41 孔，且所有钻孔均无水。

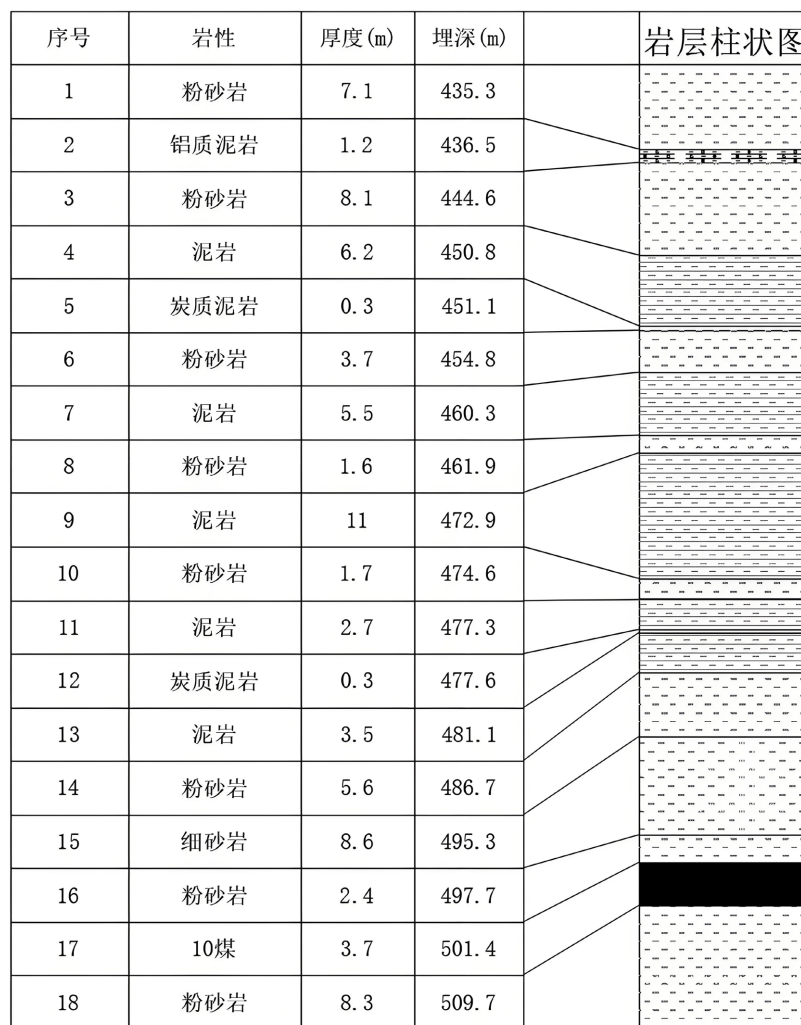


Figure 1. Columnar diagram of the overburden in the working face of the study area
图 1. 研究区工作面覆岩柱状图

3. 工作面覆岩“两带”发育高度理论计算

对工作面顶板上方 69.5 m 范围内岩层按砂岩、泥岩两类进行统计：砂岩类含粉砂岩、细砂岩，占比

55.8%；泥岩类含泥岩、铝质泥岩及炭质泥岩，占比 44.2%。依据岩性与预测参数相关关系表开展加权计算，结果表明该段岩层单轴抗压强度介于 30~60 MPa 之间。据此，按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》¹相关要求，采用经验公式对垮落带高度、导水裂隙带高度进行计算与预测：

$$H_m = \frac{100\Sigma M}{4.7\Sigma M + 19} \pm 2.2 \tag{1}$$

$$H_{li} = \frac{100\Sigma M}{1.6\Sigma M + 3.6} \pm 5.6 \tag{2}$$

式中： H_m 为垮落带高度； H_{li} 为导水裂隙带高度； ΣM 为煤层平均厚度， $\Sigma M = 3.75$ m。

根据公式(1)、(2)计算可知垮落带高度为 8.04~12.44 m，导水裂隙带高度为 33.46~44.67 m。

4. “两带”高度钻孔实测

4.1. 孔内电法监测技术原理

并行电法为直流电阻率法的一种，是在高密度电法勘探基础之上发展起来的一种新技术。它既具有集电测深和电剖面法于一体的多装置、多极距的高密度组合功能；同时，还具有多次覆盖叠加的优势，能够探测钻孔外围一定范围的能力，最大侧向探测距离为电极控制段的长度。

根据工作面顶板覆岩破坏特征及已有的巷道条件，在工作面风巷中布置电法观测孔，开孔位置位于风巷 2#钻场内，在钻孔中布置电极对顶板覆岩破坏变化规律开展电法监测。图 2 为电法观测钻孔布置平面图，表 1 为钻孔施工参数。

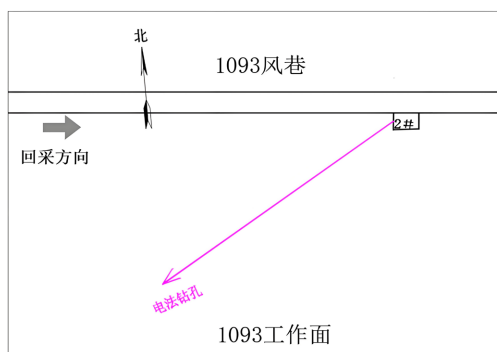


Figure 2. Plan view of borehole layout for electrical resistivity tomography (EDT)
图 2. 电法观测钻孔布置平面图

Table 1. Borehole construction parameters
表 1. 钻孔施工参数

位置	开孔位置	孔深	套管长度	方位角	倾角
电法观测孔	风巷 2#钻场内	90 m	6 m	242.6° (与风巷夹角 32.4°，朝向工作面面内)	42.5°

4.2. 观测孔的成果分析

图 3 为电法观测钻孔视电阻率成果图。图 3(a)为未回采时的视电阻率结果图，由图可见钻孔控制范围内的岩层基本不受工作面采动影响，将当日测得的视电阻率值作为观测孔的背景值，可代表孔内电法

¹<https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/201707/W020190911694189457062.pdf>

由图 3(d)可知,回采工作面距孔口 16.9 m 时,数据完整性较好。观测段内煤层顶板绝大部分岩层处于采空区上方,此时整个观测剖面以高电阻率值分布为主,电阻率值呈现明显的分带特征。

总体来看,煤层垂高 12 m 以下高电阻率分布范围最广,表明采空区形成一定推进步距后,应力集中导致岩体破坏程度较高,顶板近煤层岩体发生垮落,垮落带发育充分,岩体位移量较大,裂隙区进一步扩展。此时视电阻率值升至 260 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,约为背景值的 5.2 倍,该特征符合垮落带发育规律,据此判定垮落带探测发育高度约为 12 m,垮采比为 3.2。观测剖面上部区域电阻率升高幅度较小,高阻区多呈垂直分布且分布不均,为导水裂隙带发育特征。上部泥岩层位高阻区发育范围略有变化,电阻率值升至 190 $\Omega\cdot\text{m}$ 左右,约为此处背景值的 2.2 倍[19]。同时,高阻区最大发育高度趋于稳定,未继续向上扩展。综合不同时段电阻率测深剖面与背景剖面的对比结果可见,顶部岩层层位电性分布特征与背景值基本无差异,未受采动影响,因此导水裂隙带探测发育高度约为 41 m,裂采比为 10.9。

5. 结论

经理论计算与现场实测对比分析,采用理论计算公式得出本工作面垮落带高度为 8.04~12.44 m,导水裂隙带最大发育高度为 33.46~44.67 m,通过现场孔内电法监测实测得到垮落带高度为 12 m、导水裂隙带高度为 41 m,实测结果与理论计算区间基本吻合;因此,本次研究成果可为区域内类似矿井煤层开采条件下导水裂隙带发育高度研究及防治水工作提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996(3): 2-7.
- [2] 中华人民共和国应急管理部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[R/OL]. <https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/201707/W020190911694189457062.pdf>, 2026-05-24.
- [3] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控 I: 顶板溃水溃砂[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 903-921.
- [4] 冯健, 张彪, 师素珍, 等. 导水裂隙带发育高度的精细刻画技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2025, 37(4): 31-36+50.
- [5] 张玉军, 张志巍. 煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 85-97.
- [6] 闫和平, 李文平, 段中会, 等. 黄陇煤田典型特厚煤层综放开采涌水机理与导水裂隙带发育规律[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 129-138.
- [7] 陈国红. 顶板砂岩水下煤层开采覆岩导水裂隙带发育高度研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(5): 281-286.
- [8] 刘成勇, 宋伟, 盛奉天, 等. 强含水层下特厚煤层综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 114-124.
- [9] 丛森, 程建远, 王云宏, 等. 导水裂隙带发育高度的微震监测研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(3): 126-131.
- [10] 侯恩科, 范继超, 谢晓深, 等. 基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 89-96.
- [11] 周禹良, 杨雪, 许发强. 综放工作面导水裂隙带高度分布式光纤监测技术[J]. 中国矿业, 2022, 31(12): 108-114.
- [12] 程香港, 乔伟, 李路, 等. 煤层覆岩采动裂隙应力-渗流耦合模型及涌水量预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2890-2900.
- [13] 王毅, 周余, 张丁丁, 等. 综采工作面采动覆岩导水裂隙带发育高度综合研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(5): 132-141.
- [14] 张鑫, 陈优阔, 孟海伦, 等. 巨厚煤层分层开采覆岩“两带”发育探测及破断特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 106-117.
- [15] 曹志国, 张建民, 王皓, 等. 西部矿区煤水协调开采物理与情景模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 638-651.
- [16] 王国梁, 王飞, 王树勇, 等. 寺河煤矿大采高超宽工作面导水裂隙带发育规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 82-90.
- [17] 章俊, 刘盛东, 杨彩, 等. 薄基岩工作面覆岩破坏电性响应特征及动态监测技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(11): 5068-5081.

-
- [18] 胡雄武, 邓日新, 王二满. 煤层采动覆岩破裂数值模拟与电法监测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(6): 651-658.
- [19] 程久龙, 于师建. 覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 699-706.