

大巷掘进穿越大水沟保护煤柱区的可行性 与安全控制研究

张孝福¹, 兰天伟^{2,3}, 路凯翔³, 张志佳³

1. 内蒙古伊泰大地煤炭有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

2. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000

DOI: 10.61369/SSSD.2026070021

摘 要 : 针对内蒙古伊泰大地煤炭有限公司大地精煤矿四盘区大巷需穿越大水沟地表水体保护煤柱区的工程背景, 依据煤矿防治水“三区”管理要求, 在缓采区条件下开展大巷掘进可行性与安全性研究。基于矿井地质-水文-采掘技术资料, 采用煤柱弹塑性理论建立保护煤柱塑性区力学模型, 计算巷道掘进诱发塑性区扩展及煤柱核区宽度; 采用概率积分法构建覆岩-地表移动变形预测模型, 量化大巷掘进对地表水体及覆岩稳定性的影响; 进一步利用FLAC3D数值模拟对巷道开挖后的应力场、位移场及塑性区演化进行验证。研究认为, 在严格落实超前探放水、分区监测、强化锚网索喷支护与应急制度条件下, 四盘区大巷穿越大水沟保护煤柱区在力学与灾害控制层面具备工程可行性, 可为类似地表水体缓采区巷道工程提供参考。

关 键 词 : 巷道掘进; 概率积分法; 数值模拟; 地表沉陷; 可行性论证

Feasibility and Safety Control of Main Roadway Excavation Crossing the Protective Coal Pillar Zone of Dashuigou Surface Water Body

Zhang Xiaofu¹, Lan Tianwei^{2,3}, Lu Kaixiang³, Zhang Zhijia³

1. Inner Mongolia Yitai Dadi Coal Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia 017010

2. Erdos Research Institute, Liaoning Technical University, Erdos, Inner Mongolia 017010

3. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000

Abstract : Against the engineering background that the main roadway in the No.4 panel of Dadijing Coal Mine, Inner Mongolia Yitai Dadi Coal Co., Ltd., needs to cross the protective coal pillar zone of Dashuigou surface water body, this study investigates the feasibility and safety of main roadway excavation under the conditions of the restricted mining zone, in accordance with the requirements of the "Three-Zone" management for mine water hazard prevention and control. Based on the mine geological, hydrogeological and mining technical data, the elastoplastic theory of coal pillars was adopted to establish a mechanical model of the plastic zone of protective coal pillars, calculating the plastic zone expansion induced by roadway excavation and the width of the coal pillar core zone. The probability integration method was applied to construct a prediction model for overlying strata and surface movement and deformation, quantifying the impact of main roadway excavation on the stability of surface water bodies and overlying strata. Furthermore, FLAC3D numerical simulation was used to verify the evolution of stress field, displacement field and plastic zone after roadway excavation. The results show that, under the premise of strictly implementing advanced water exploration and drainage, zonal monitoring, reinforced bolt-mesh-cable-shotcrete support and emergency response systems, the excavation of the main roadway in the No.4 panel crossing the protective coal pillar zone of Dashuigou is technically feasible in terms of mechanics and water hazard control. This research can provide a reference for similar roadway engineering projects in restricted mining zones of surface water bodies.

Keywords : roadway excavation; probability integration method; numerical simulation; surface subsidence; feasibility demonstration

项目信息:

鄂尔多斯市标志性创新团队项目 (TD20240005);

鄂尔多斯市科技“突围”工程“揭榜挂帅”重大项目 (JB20251447);

鄂尔多斯市重点研发计划项目 (YF20250274)。

引言

大量研究表明,煤柱的稳定性与巷道掘进后的变形、应力分布、围岩稳定性及水害控制密切相关。煤柱的弹塑性区域宽度、覆岩变形、应力集中等因素都会对煤柱的承载能力和水害风险产生直接影响。基于煤柱弹塑性理论与数值模拟方法,学者们已经提出了多种评估模型,并在实践中得到了验证。然而,在缓采区下,如何科学合理地设计巷道布局与支护体系,确保在开采过程中水害得到有效控制,仍是一个值得深入探讨的问题。

因此,本文结合大地精煤矿四盘区的实际工程情况,依托煤柱弹塑性理论与数值模拟,分析了巷道掘进对煤柱稳定性、地表沉降及水害控制的影响,提出了有效的技术措施,为类似地质条件下的矿井工程提供理论支持和技术参考。

一、工程背景与研究区水文地质条件

(一) 矿井概况与自然地理条件

大地精煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇,属东胜煤田东胜—靖边单斜构造区中南部。井田整体呈向西南缓倾的单斜结构,倾角一般为 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$,构造简单,未发现岩浆岩侵入体。井田总面积为 11.601 km^2 ,开采标高范围为 $+1320 \text{ m}$ 至 $+1115 \text{ m}$,地形总体呈西高东低,海拔约 $1227 \sim 1357 \text{ m}$,为荒漠一半荒漠地貌,表层多被第四系风积砂覆盖,地表径流极少。井田东部大水沟为重要的季节性冲沟,在暴雨时可形成短暂洪峰,平时无常年流水。大水沟是区域内地表水汇集带,同时也是地下水补给的重要通道,对采区水文地质条件有直接影响。区内地震活动微弱,地震动峰值加速度 $0.05g$,基本烈度Ⅵ度,区域工程地质环境总体稳定。

(二) 四盘区水文地质条件分析

四盘区位于井田西南部,其水文地质条件主要受上覆第四系松散层、基岩裂隙含水层以及采动影响下形成的导水裂隙带共同控制。煤系地层中存在若干砂岩裂隙含水层,包括3-2煤层上部砂岩层、4-2与3-2之间砂岩层以及5-1与4-2之间砂岩层。其中,中间两套含水层富水性较弱,多以储集静态地下水为主;但上部3-2顶板砂岩层厚度大、裂隙较发育,是潜在的补给来源。随着上部煤层采空区形成,部分砂岩裂隙含水层已与采空区连通,成为老空区积水来源。四盘区北侧大水沟区域的潜水含水层与煤系裂隙含水层具有一定水力联系,若采动导水裂隙带向上发展至第四系松散层底部,则可能形成贯通通道,导致大水沟区域潜水向四盘区巷道集中补给。

(三) 四盘区大巷布置情况分析

四盘区大巷主要沿5-1、5-2煤层顶板布置,包括5-1煤四盘区回风大巷、5-1/5-2煤四盘区辅运大巷及5-2煤四盘区主运大巷等关键巷道,具体位置。均为矩形断面,支护方式采用锚网索喷,围岩岩性以砂质泥岩、粉砂岩及细砂岩为主,顶板抗压强度一般为 $20 \sim 50 \text{ MPa}$,属中等偏强岩层,埋深约 $100 \sim 180 \text{ m}$,常规条件下围岩稳定性较好。

二、四盘区掘进大巷围岩稳定性分析

(一) 煤柱变形破坏机理

大水沟保护煤柱是四盘区大巷掘进下的重要承载结构,其稳

定性直接关系大巷围岩整体稳定与防水安全。煤柱的变形破坏过程与顶底板岩层的力学性质及接触条件密切相关,主要受两个因素控制:一是煤柱自身的强度与刚度;二是顶底板与煤柱接触面所提供的约束力大小。顶底板约束越强,煤柱横向膨胀越受限制,受力状态由单、双向压缩向三向受压转变,表现出类似三轴压缩条件下的高承载特性,煤柱变形呈“上下小、中间大”的鼓肚形特征。如图1所示。

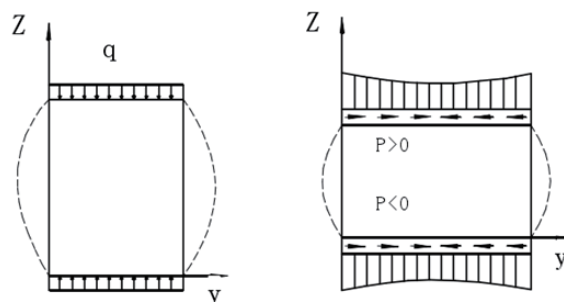


图1 煤柱围岩有约束状态下理想变形特征

当外部载荷逐渐增大并超过煤柱极限承载力时,将产生不同类型的破坏形式:当煤柱较宽时,多由两侧向中部发展剪切破坏;当煤柱较窄时,容易在煤柱中部沿纵向劈裂;当煤柱内部存在弱结构面时,将沿弱面发生剪切错动;当顶底板岩性软弱时,在上覆岩层压力作用下煤柱整体下沉嵌入底板,产生底鼓破坏。如图2所示。

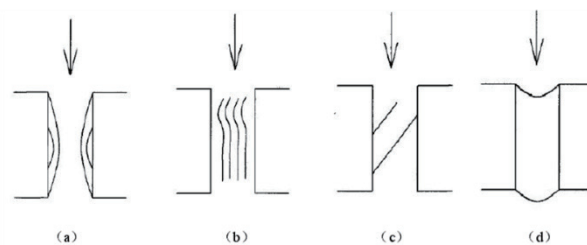


图2 煤柱的常规破坏形式

巷道开挖后,煤柱边缘由三向受力转变为双向或单向受力,边缘煤体首先破坏,集中应力向内部转移,在煤柱内部形成自边缘向内依次为破裂区、塑性区、弹性区和原岩应力区的典型分区,其应力随距边缘距离增大呈负指数衰减,煤柱弹塑性应变分布,如图3所示。四盘区大巷位于5-1、5-2煤层顶板附近,煤柱上下顶底板岩性以砂质泥岩、粉砂岩及细砂岩为主,整体较为坚硬,约束条件较好;巷道间煤柱宽度较大,两侧为大巷而非大面积采空区,应力集中程度有限,整体上为煤柱提供了有利的稳定性基础。

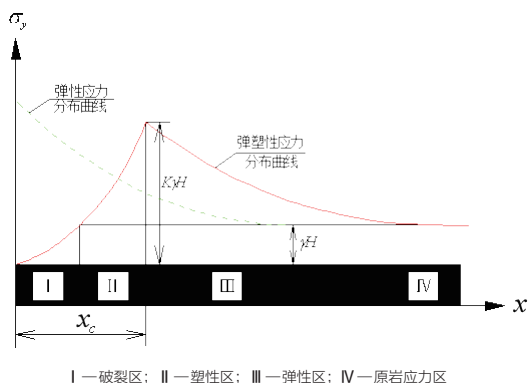


图3 煤柱弹性应力分布示意图

(二) 保护煤柱塑性区宽度与稳定性分析

在此基础上，为定量分析煤柱稳定性，采用摩尔-库仑准则，将煤柱视为连续均质各向同性体，假定煤柱屈服前变形较小、破坏以剪切为主，且破坏面与层面平行，仅受自重应力场作用，中性面位于煤柱宽度中心轴，塑性区边界为极限强度位置。沿煤柱宽度方向建立平面应力力学模型，通过平衡方程与强度条件联立，得到煤柱塑性区宽度计算公式为：

$$x_0 = \frac{m\lambda}{2\tan\phi_0} \ln \frac{K\gamma H + \frac{C_0}{\tan\phi_0}}{\frac{C_0}{\tan\phi_0} + \frac{p_x}{\lambda}} \quad (1)$$

式中： x_0 —煤柱塑性区宽度，m； m —煤柱高度，m； λ —侧压系数， $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ ； ϕ_0 —煤柱与顶底板交界处的内摩擦角； K —塑性区边界面应力集中系数； H —煤层埋深，m； γ —上覆岩层平均容重，kN/m³； C_0 —煤柱与顶底板交界处的粘聚力，MPa； p_x —靠采空区侧煤柱的侧向阻力，MPa。

基于矿井实测参数：5-1煤四盘区大巷巷道长*宽=3.0*2.8m，侧压系数 $\lambda=0.538$ ，煤柱与顶底板界面内摩擦角 $\phi_0=30.8^\circ$ ，应力集中系数 $K=1.5$ ，煤层埋深 $H=119.4$ m、131m，上覆岩层平均容重 $\gamma=25$ kN/m³，界面粘聚力 $C_0=0.81$ MPa，采空区侧向阻力 $p_0=1.0$ MPa，将参数代入式(1)，对四条大巷（掘进条件下煤柱塑性区宽度进行计算。结果表明，四条大巷两侧煤柱塑性区宽度最大仅约0.71m。

在此基础上，保护煤柱弹性核区宽度可由“煤柱总宽度减去两侧塑性区宽度”得到，计算结果显示：四条大巷中保护煤柱弹性核区宽度最小为21.95m，明显大于巷道宽度6m的两倍，说明煤柱内部仍有较宽的弹性承载核心区，具有充足的承载安全储备。

从承载能力角度看，煤柱承受载荷主要包括垂直上覆岩层自重和两侧大巷上方一定范围悬垂岩层重量，可采用平衡拱或拱梁结构简化计算。。根据ZK1825号钻孔柱状图确定的岩层组合与参数，计算得大水沟保护煤柱上承受载荷约为3.27MPa。对比地质报告给出的煤柱平均破坏强度约10MPa，可以得到：煤柱现状承载应力远小于极限破坏强度，煤柱处于弹性稳定状态，不会发生整体屈服和大变形破坏。

(三) 同等条件下巷道布置及支护情况对比分析

为从工程实践角度验证四盘区大巷围岩稳定性分析的合理

性，选取大地精煤矿“三水平5煤组西翼大巷下穿包府公路”的工程实例进行对比。根据《大地精煤矿5煤组水平延深安全设施设计》《大地精煤矿三水平延深初步设计》及相关采掘工程平面图，三水平5煤组西翼下穿包府路四条大巷布置为：5-1煤西翼辅运大巷宽5.6m、高2.8m；5-1煤西翼回风大巷宽5.6m、高2.6m；5-2煤西翼主运大巷宽6.2m、高2.9m；5-2煤西翼回风大巷宽5.6m、高2.6m。巷道埋深约130m，5-1与5-2煤层平均间距约11m，地质条件与四盘区相近。

三、四盘区大巷掘进对覆岩移动与变形的预测分析

(一) 覆岩移动预测方法

为定量评价四盘区大巷掘进穿越大水沟保护煤柱区后对上覆岩层与地表的影响，采用概率积分法进行预测。概率积分法将覆岩视为随机介质，通过对开挖单元影响的概率叠加，能够综合考虑采深、倾角、采动厚度、覆岩结构、主要影响角等多种因素，是目前国内煤矿采动沉陷分析中应用最广、精度最高的方法。结合四盘区大巷均为窄条形开挖的特点，在煤层开采范围内取一微元dF，微元中心点坐标为(s, t)，微元的走向方向为s，倾斜方向为t。s、t坐标轴与地质坐标系坐标轴x, y夹角为 ϕ ，微元内煤层可看作板状结构，微元拐点偏移距为d。当采区内煤层全部开采后，地表任意点(x, y)处的下沉为：

$$W(x, y) = \iint_F f(x, y) dF = \iint_F \frac{qm \cos \alpha}{r^2} e^{-\frac{x-s}{r} - \frac{y-t}{r} - \frac{d}{r}} dF \quad (2)$$

式中： m —采高； α —煤层倾角； r —主要影响半径， $r=h/\tan\beta$ ； h —地面上待计算点(x, y)与煤层上微元点(s, t)的高程差。预测参数采用行业经验进行确定。

基于上述参数，利用MATLAB对四条大巷的开挖区域进行二重积分计算，得到大巷掘进后大水沟区域的覆岩移动与地表变形规律。计算表明，在四条大巷全部掘进完成并充分稳定后，大水沟区域地表最大下沉约为28mm，最大倾斜约为0.4mm/m，最大水平移动约12mm，最大曲率约为 0.1×10^{-4} mm/m。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(2017)要求的地表允许变形限值（水平变形 $\leq \pm 2$ mm/m；倾斜 $\leq \pm 3$ mm/m；曲率 $\leq 0.2 \times 10^{-3}$ 1/m），预测值均远低于控制标准，说明大巷掘进对地表水体、沟谷边坡及周边地表设施的影响极小，不会造成地表移动超限。动态沉陷方面，根据下沉速度公式，计算得地表最大下沉速度约0.38mm/d，低于地表动态沉降识别阈值，不会形成持续性沉陷过程。覆岩结构保持整体性，不会形成贯通裂隙，也不会出现对地表水体有威胁的渗流通道，再次表明大巷掘进引起的覆岩扰动处于可控范围。

四、数值模拟

(一) 数值模型建立与参数取值

依据四盘区实际工程布置，在保护煤柱区域建立尺寸为100m×100m×100m的三维数值模型，共75641个节点、48759

个单元，模型内依次布置4-2、5-1、5-2煤层以及对应的砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等顶底板层，四条大巷按照实际位置掘进。巷道采用“锚网索喷”支护而非裸巷，因此模型在顶底板强度反映上已考虑围岩约束效果，同时以材料本构体现围岩强度。模型完成后，依次模拟5-1煤层两条大巷、5-2煤层两条大巷的开挖过程，并监测煤柱应力重分布、围岩位移与塑性区范围，结合保护煤柱宽度对稳定性进行判别。

（二）结果分析

四盘区大巷掘进后保护煤柱内部应力发生明显重分布：5-1煤层大巷开挖后顶底板应力向两帮集中，顶板应力降低至约0.3MPa，卸压高度约5m，而两帮出现约3.9MPa的局部集中值，较原岩应力（3.4MPa）增加14.7%，但远低于煤岩体强度，属于典型可控应力集中；5-2煤层大巷掘进对上部5-1煤层围岩影响较弱，巷道之间煤柱弹性核区宽度保持在20m以上，显著大于两巷道宽度之和的2倍，煤柱整体保持弹性承载状态，不会产生屈服或剪切破坏。在位移方面，5-1煤层大巷顶板最大垂直位移约50mm，5-2煤层大巷最大约60mm，位移随高度迅速衰减至地表趋近于零，表明覆岩垂向移动受限，不会形成贯通裂隙。塑性区分析显示巷道顶板塑性深度约1.2m，底板约2.5m，塑性带均受限於巷帮附近，未向煤柱内部扩展，保护煤柱保持大范围弹性。综合分析可见，四条大巷掘进后：应力集中可控、顶底板位移小、塑性区有限，且煤柱核心区完整连续，具备足够承载能力，实现

对上覆岩体和大水沟水体的稳定隔离。因此，四盘区大巷掘进穿越大水沟保护煤柱区从数值模拟角度完全可行。

五、结论

(1) 四盘区大巷掘进后煤柱最大受载仅3.27MPa，远低于10MPa极限强度；两侧塑性区最大0.71m，煤柱弹性核区最小仍达21.95m，整体保持稳定，不会产生破坏与渗透通道。

(2) 地表沉陷预测显示最大下沉28mm、倾斜0.4mm/m、水平移动12mm，均远小于规范限值（如倾斜 $\leq 3\text{mm/m}$ ），说明大巷掘进对大水沟地表和沟谷稳定性影响极小。

(3) 数值模拟中巷帮最大集中应力约3.9MPa，仅较原岩应力3.4MPa增加14.7%，未超过岩体强度；上覆岩层未形成贯通裂隙，煤柱始终处于弹性承载区，结构安全可控。

(4) 大巷围岩位移总体较小，5-1煤层顶板最大下沉约50mm、5-2煤层约60mm；塑性区深度1.0 ~ 2.5m，均未延伸至煤柱核心区域，配合锚网

索喷支护可确保长期稳定。

(5) 结合水位实时监测、声波裂隙探测、地质雷达及应急系统，可对水位变化（如1246 ~ 1255m）、围岩变形及水害风险进行动态控制，确保四盘区大巷穿越保护煤柱区的施工安全性。

参考文献

- [1] 乔伟, 王志文, 李文平, 等. 煤矿顶板离层水害形成机制、致灾机理及防治技术 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 507 - 522.
- [2] 张金贵, 赵瑞, 马会民, 等. 区段煤柱留设宽度分析及优化——以崖窑岭煤矿为例 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 172 - 180.
- [3] 马会民, 张金贵, 赵瑞, 等. 特厚煤层区段煤柱合理宽度研究及巷道支护优化 [J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 131 - 138.
- [4] 李强, 王海军, 马会民, 等. 沿空掘巷煤柱合理宽度及薄喷密闭技术研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31(11): 120 - 126.
- [5] 韩磊, 戚鑫鑫, 王天君, 等. 融合动态概率积分法模型和 Logistic 模型的地表采煤沉陷动态预测方法 [J]. 煤矿安全, 2025, 56(4): 285 - 292.