

采动巷道煤柱分区演化特征及控制技术研究

Evolution of Area Characteristics of Coal Pillars in Mining Influenced Roadway and Its Control Technology

何建宏, 龙鑫, 韩连昌(贵州盘江精煤股份有限公司金佳矿, 贵州六盘水 553000)

摘要:本文以某公司110303工作面回风巷道为研究对象,针对采动巷道帮部变形量大、变形持续时间长的问题,采用现场调研、理论分析和数值模拟相结合的方法分析工作面回采对巷道保护煤柱稳定性的影响规律。以巷道保护煤柱水平应力和垂直应力为研究对象,进行巷道煤柱应力分区,提出巷道煤柱应力分区判据,并对各分区特征进行描述。根据巷道帮部围岩变形规律受邻近工作面回采影响的特征,分析采动巷道煤柱分区演化特征。研究表明,非稳定区向破碎区演化,稳定区向非稳定区演化时采动巷道帮部破坏的根源。提出将锚杆、索锚固段安置于煤柱深部稳定区的控制方案,针对性控制采动巷道大变形的问題,为类似工程条件提供理论和实践基础。

关键词:采动巷道;煤柱;分区演化;加强支护

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)01-0020-05

Abstract: This paper took the 110303 return airway of a certain company as the research object and researched the influence law of working face mining on the stability of roadway surrounding rock. Firstly, the paper investigated the problem of large deformation and long duration of deformation of the roadway gang. Then the horizontal and vertical stresses of the roadway protection coal pillar were taken as the research object, the coal pillar stress division of the roadway was carried out, the stress criterion of the coal pillar stress of the roadway was proposed, and the characteristics of each section are described. According to the characteristics of the surrounding rock deformation of the roadway gangs affected by the mining of adjacent working faces, the evolution characteristics of the coal pillars in the mining roadway were analyzed, and the unsteady zone evolves to the fracture zone, and the mining zone gangs are destroyed when the stability zone evolves to the unsteady zone. The control scheme of anchoring anchor and cable anchoring section and deep stability zone of coal pillar was proposed, and the problem of large deformation of mining roadway was controlled in a targeted manner, which provides theoretical and practical basis for similar engineering conditions.

Key words: mining roadway; coal pillar; area evolution; reinforced support

1 前言

工作面回采对巷道顶板、底板和两帮围岩产生二次扰动,使原本稳定的巷道围岩再次变形破坏,其对巷道稳定性的影响规律一直是巷道围岩控制领域的研究重点^[1-3]。工作面回采对巷道围岩稳定性的影响形式主要包括应力重新分布对巷道围岩稳定性的影响和近距离煤层群开采对邻近巷道稳定性的影响。

工作面回采过程中,在工作面前方、侧方应力调整,垂直应力集中导致工作面邻近围岩破坏,且未破坏的岩层处于高压区^[4]。应力集中影响下的已掘

巷道(双巷布置、沿空留巷、切顶成巷)和待掘巷道(沿空掘巷)的稳定性产生不利影响^[5-8]。

此外,近距离煤层群开采工作面回采过程中对邻近工作面巷道围岩稳定性。在工作面顶板掘进巷道,巷道位于裂隙带或弯曲下沉带,巷道围岩稳定性差,控制难度大^[9]。工作面底板岩巷也受工作面回采过程影响,巷道围岩破碎^[10]。

其中,工作面回采应力重新分布对巷道围岩稳定性影响案例更为普遍,是相关领域研究的中重点。康红普等通过现场实测了工作面侧方巷道受本工作面超前支承压力作用后的变形规律。贾后省等研究了采动巷道应力场环境,发现工作面侧方10~50m范围内,主应力比值可达2~5,容易引发巷道冒顶。王其洲等研究发现煤层回采等造成巷道周围应力非均称分布,导致围岩变形以顶板非均称下沉和两帮不对称位移为主。然而,针对性的巷道围岩控制措

[作者简介] 韩连昌(1994—),男,云南宣威人,研究生学历,工程师,主要从事采矿工程方面研究。

[引用格式] 何建宏,龙鑫,韩连昌.采动巷道煤柱分区演化特征及控制技术研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):20-24+43.

施很少。因此,本文以受工作面回采影响的巷道为研究对象,重点分析工作面采动对邻近巷道的帮部围岩应力分布的影响,并提出针对性的控制方案。

2 110303 回风巷道工程概况

2.1 采动巷道布置

由于工作面接续和施工技术要求,公司矿井 110303 回风巷道需要在 110305 工作面回采之前掘进施工,110305 工作面回采过程相邻巷道布置如图 1 所示。110305 工作面回采过程,工作面回采引发的侧向应力调整,对 110303 工作面回风巷道围岩稳定性产生影响,特别是回风巷道煤柱侧帮部,造成巷道围岩稳定性差。

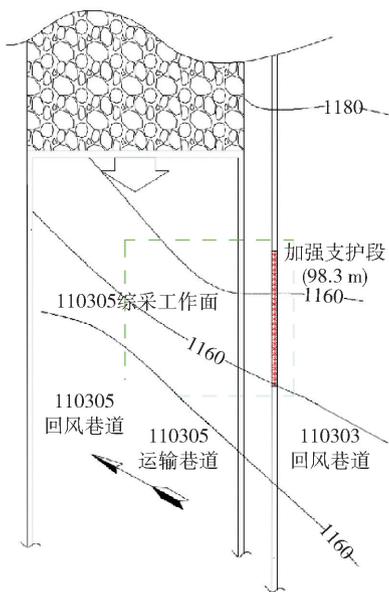


图 1 巷道位置平面图

2.2 采动巷道围岩条件

110305 工作面开采 6 号煤,煤层赋存稳定,结构简单,一般含一层夹矸,平均 2.2 m。顶、底板为砂质泥岩,稳定性差。此外,顶板之上有 5.6 m 厚的泥岩。具体巷道岩层柱状图如图 2 所示。

2.3 巷道围岩破坏特征

110303 回风巷道采用锚杆锚索支护,具体支护参数如图 3 所示。

采用如图 3 所示的支护参数进行 110303 回风巷道围岩的支护,初期阶段,巷道变形量不大。但是,后期受 110305 工作面回采影响,部分巷道围岩稳定性遭到破坏,具体表现为:110303 回风巷道受采动影响范围内煤柱侧帮部变形量大,变形持续时间长,需要多次修复,严重影响巷道在服务期限内的正常使用。

柱状图	岩性	厚度/m	备注
	粉砂岩	7.9	
	泥岩	6.6	
	粉砂岩	2.6	基本顶
	砂质泥岩	4.2	直接顶
	煤层	2.2	6号煤
	砂质泥岩	3.1	直接底
	细砂岩	6.3	基本底
	粉砂岩	10.6	

图 2 岩层柱状图

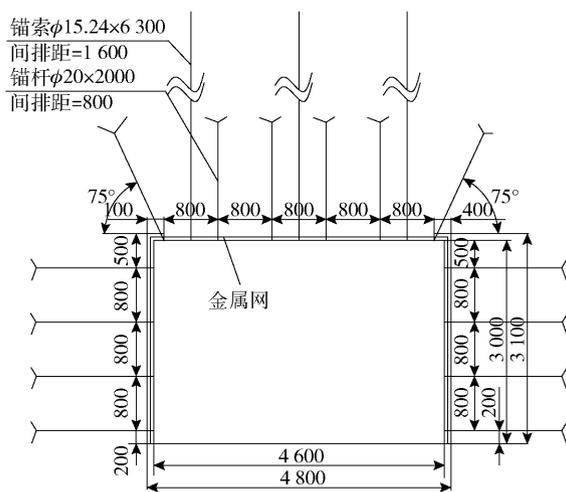


图 3 巷道支护参数(单位:mm)

因此,本文针对采动巷道帮部变形量大、变形持续时间长的问题开展系统研究,揭示帮部大变形机理,提出控制措施。

3 采动巷道煤柱分区演化特征

3.1 数值模型建立

为了探究 110303 回风巷道的帮部围岩变形量大、变形持续时间长的机理,采用 FLAC3D 模拟 110303 回风巷道保护煤柱在工作面回采前后的应力分布特征。模型上部应力为上覆岩层自重,巷道平均埋深 350 m,侧压系数为 1.5;岩石物理力学参数根据现场实测结果设置。数值模型平面图如图 4 所示,模型尺寸 $x \times y \times z = 100 \times 100 \times 50$ m,110303 回风巷道保护煤柱宽度为 20 m。

模拟工作面推进到距离模型边界 20 m 位置停止推进,此时模拟范围内巷道底板位置水平和垂直

应力场分布分别如图 5a 和图 5b 所示。

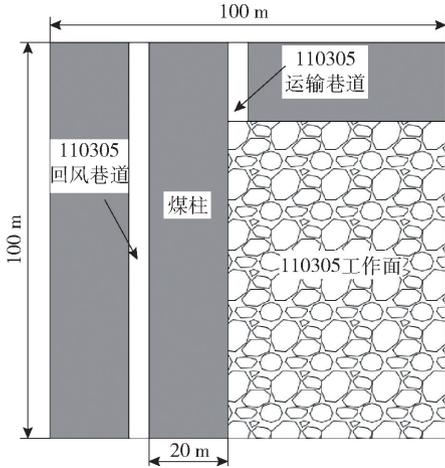


图 4 模拟范围平面图

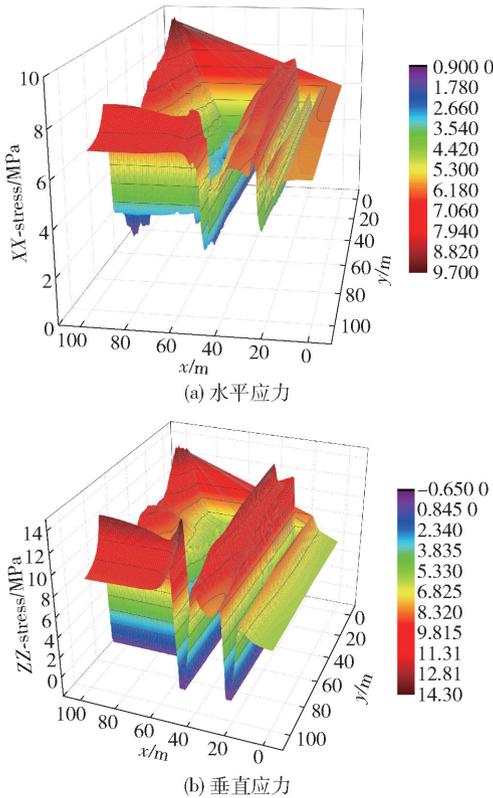


图 5 工作面回采后应力重新分布(单位:MPa)

根据图 5 所示模拟结果,110305 工作面回采后,对 110303 回风巷道影响最为显著的位置是侧向支承压在煤柱产生应力集中,显著影响煤柱稳定性,巷道帮部产生大变形,影响巷道稳定性。煤柱宽度为 20 m 时,水平应力峰值为 7.61 MPa;垂直应力峰值为 13.04 MPa。煤柱上应力分布呈双峰分布模式,双峰之间存在一定宽度的稳定“中性面”,意味着煤柱中部存在一定宽度的低应力区^[11],能够起到稳定承载和隔绝采空区的作用。

3.2 工作面回采前煤柱应力分布特征

巷道掘进后,煤柱水平应力和垂直应力重新分布,其中垂直应力在巷道煤体弹塑性交界位置存在最大值。在巷道帮部,煤体的极限平衡状态根据摩尔-库伦强度准则确定,极限平衡区之前,煤柱上垂直应力与位置的关系如式(1)所示^[12-13]。随着距离巷道帮部的距离增大,垂直应力逐渐减小,然后趋于稳定。

$$\sigma_{zz} = \sigma_0 e^{\frac{2f}{m} \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) x} \quad (1)$$

式中, σ_{zz} 为煤柱垂直应力,MPa; σ_0 为巷道帮部水平应力,MPa; φ 为煤体内摩擦角,(°); f 为层间摩擦系数; m 为煤层厚度,m。

进一步通过数值模拟研究巷道开挖后煤柱垂直应力和水平应力的分布规律,模拟结果如图 6 所示。仅考虑 110303 回风巷道,煤柱垂直应力分布先增大的峰值,然后降低,最后趋于稳定;对应的水平应力先增高,然后趋于稳定。因此将回风巷道侧煤柱分为 3 个部分。

(1) 巷道帮部的应力集中导致帮部位置煤体破坏,破坏煤体承载能力显著降低,因此,将垂直应力低于原岩应力的区域称为破碎区;该区域水平应力显著小于原岩应力。

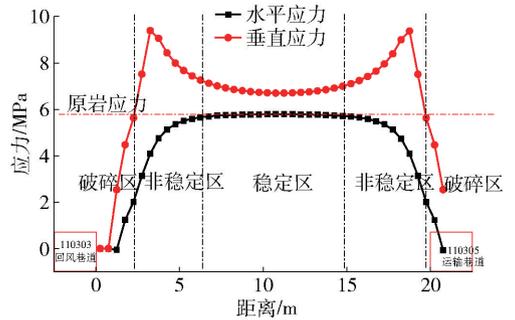


图 6 工作面回采前煤柱应力分布特征

(2) 随着距离增大,垂直应力先增大的峰值位置,然后减小,最后趋于稳定;水平应力逐渐增大至原岩应力值。该区域垂直应力集中,水平应力降低,容易发生破坏,将该区域称为非稳定区。

(3) 非稳定区以后,煤柱水平应力和垂直应力趋于稳定,与原岩应力相等或者略大于原岩应力,该部分稳定性较好,为稳定区。

容易看出,工作面回采前,巷道煤柱塑性区范围为 0~3.0 m,非稳定区范围为 3.0~6.5 m,稳定区范围为 6.5~14.9 m,距离继续增大,进入相邻巷道非稳定区。工作面回采前,稳定区水平应力的应力

集中系数为 1.00,垂直应力的应力集中系数为 1.18。

3.3 工面回采后煤柱应力分布规律

工作面回采后,煤柱应力重新分布规律如图 7 所示,巷道煤柱破碎区范围为 0~4.9 m,非稳定区范围为 4.9~7.4 m,稳定区范围为 7.4~13 m。巷道帮部破碎区和非稳定区范围增大,变形量大。

稳定区水平应力的应力集中系数为 1.16,垂直应力的应力集中系数为 1.94。工作面回采后稳定区应力集中程度更高,巷道长期服务期限内容易发生蠕变破坏,巷道变形持续时间增加。

3.4 采动巷道煤柱分区演化特征

巷道受工作面回采影响,巷道煤柱的分区演化规律概括为:塑性区范围增大,非稳定区范围减小,稳定区范围增大;非稳定区应力集中系数增大,塑性

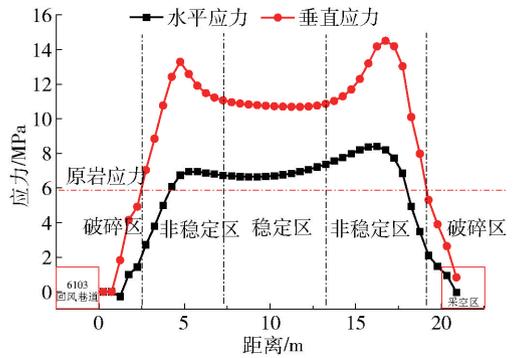


图 7 工作面回采后煤柱应力分布特征

破坏风险增大,稳定区应力集中系数增大,向非稳定区的过渡风险增大。

根据煤体应力分布去顶煤柱分区特征和回采影响下煤柱分区演化规律见表 1。

表 1 煤柱分区演化特征

煤体	受力状态	煤柱分区	回采扰动演化特征
	$k < 1$ $\lambda < 1$	破碎区	破碎区范围增大
	$k > 1$ $\lambda < 1$	非稳定区	非稳定区范围增大 k, λ 增大,易破坏
	$k = 1$ $\lambda = 1$	稳定区	稳定区范围减小 k, λ 增大,容易向非稳定区发展

σ_{s0}, σ_{s0} 为水平和垂直原岩应力

4 煤柱破坏演化规律与控制技术

4.1 煤柱破坏特征

为了验证采动巷道煤柱分区演化特征,在 110303 回风巷道施工孔径 32 mm 钻孔,现场钻孔窥视采动影响前,巷道帮部变形量很小阶段和采动影响后,巷道帮部大变形后煤柱破碎情况,窥视情况如图 8 所示。

未受工作面回采影响巷道煤柱破碎深度为 3.48 m,深度增加,内部煤体基本区域稳定,未见明显裂缝出现。受采动影响后,巷道帮部发生大变形,煤柱距离巷道 5.52 m 位置仍旧出现破碎区域,破碎深度显著增加,符合煤柱分区演化规律。

4.2 采动巷道煤柱控制技术

分析原有支护方案,煤柱侧帮部采用长度为 2 m 的锚杆进行支护,在巷道掘进初期巷道稳定性较好,但随着巷道破碎区的形成,锚固段处于破碎区内,锚固位置不稳定,巷道容易发生变形。在后期回采扰动影响的情况下,锚固段位置的围岩进一步破



(a) 未扰动区域完整



(b) 扰动区域破碎

图 8 采动影响前后煤柱破坏情况
碎发生大变形,破碎区向内部发展,稳定性进一步降低。

分析认为煤柱的非稳定区由于应力集中的影响,后期在巷道长时服务年限内仍然有破坏的可能,在工作面回采的影响下,这种可能显著增加。因此,稳定区为一个合适的锚固位置。

所以,采用10 m长锚索进行补强支护,锚索采用21.8 mm × 10 000 mm钢绞,设计锚固力为400 kN,将锚固段置于煤柱稳定区内,可以极大程度延长巷道服务年限,减小巷道帮部围岩变形,进一步实现巷道稳定性控制,帮部的加强支护方案如图9所示。

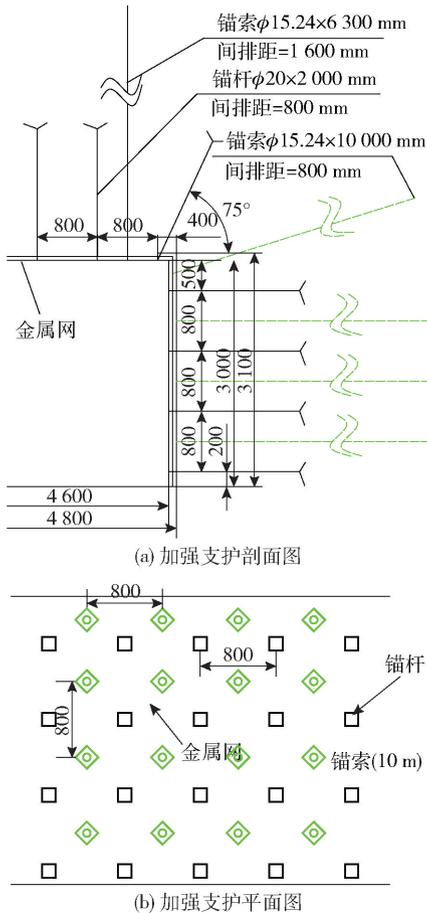


图9 加强支护方案

加强支护后,110303回风巷道帮部变形与未加强支护位置巷道围岩两帮移近量对比如图10所示。加强支护前,巷道两帮变形量达900 mm,且后期有持续变形发生;加强支护后,巷道两帮移近量小于400 mm,且变形持续时间较短。巷道围岩变形量为巷道围岩变形量显著减小,而且达到稳定变形所用的时间缩短,巷道后期蠕变变形破坏不明显,稳定区没有继续发展的趋势,能够实现巷道围岩的稳定控制。

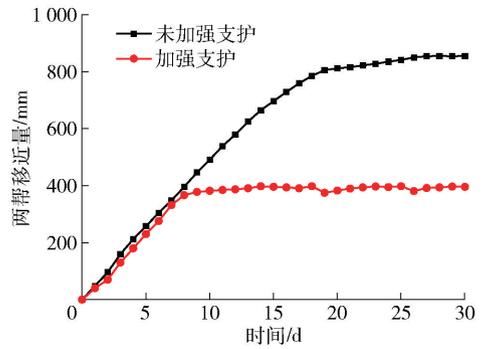


图10 补强支护效果

5 结论

以受工作面回采影响巷道为研究对象,针对巷道帮部围岩变形量大、变形持续时间长的问题,以帮部煤柱应力分布为研究对象,巷道围岩稳定性研究及控制对策分析。具体得到以下结论:

(1) 以巷道保护煤柱水平应力和垂直应力为研究对象,进行巷道煤柱应力分区,提出巷道煤柱应力分区判据,并对各分区特征进行描述。

(2) 根据巷道帮部围岩变形规律受邻近工作面回采影响的特征,分析采动巷道煤柱分区演化特征,非稳定区向破碎区演化,稳定区向非稳定区演化时采动巷道帮部破坏的根源。

(3) 提出将锚杆、索锚固段安置与煤柱深部稳定区的控制方案,针对性控制采动巷道在扰动下煤柱变形量大、变形持续时间长的问题,两帮移进量由未补强支护之前的900 mm减小到400 mm,效果明显,为类似工程条件提供理论和实践基础。

[参考文献]

[1] 贾后省,李国盛,王路瑶,等. 采动巷道应力场环境特征与冒顶机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017(4):707-714.

[2] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):1-5.

[3] 王其洲,谢文兵,荆升国,等. 非均称变形巷道变形破坏规律及支护对策[J]. 采矿与安全工程学报,2016(6):985-991.

[4] 钱鸣高,石平五,许家林,等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.

[5] 康红普,颜立新,郭相平,等. 回采工作面多巷布置留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):2022-2036.

(下转第43页)