

小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究综述

郭飞¹, 吴少康², 唐东旭¹, 简丰坝¹, 杨如欣¹

1. 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200;
2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083

中图分类号: TD353 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)02-0053-11
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.08.002

摘要 随着煤炭资源开采深度和强度的不断加大, 小煤柱工作面巷道的稳定性问题愈发突出。本文综合分析了小煤柱工作面巷道变形的机理及相应的治理技术。在变形机理方面, 详细阐述了采动应力、围岩性质和煤柱尺寸等因素对巷道变形的影响。采动引发的应力重新分布导致围岩应力集中, 而围岩的软弱性质和不合理的煤柱尺寸则进一步加剧了巷道的变形。关于治理技术, 重点介绍了加强支护、优化煤柱设计和注浆加固等方法。加强支护主要采用锚杆、锚索等联合支护方式, 以提高巷道的承载能力; 优化煤柱设计则通过理论分析和数值模拟, 确定合理的煤柱尺寸和布置方案; 注浆加固则能够改善围岩的物理力学性能, 增强其稳定性。同时, 研究还指出, 在实际应用中, 应根据具体的地质条件和开采情况, 综合运用多种治理技术, 以实现最佳的治理效果。然而, 当前的研究仍存在一些不足之处, 例如对复杂地质条件下小煤柱工作面巷道变形的预测精度有待提高, 以及治理技术的成本效益分析尚不完善等。未来的研究需要进一步深入, 以更好地保障煤矿的安全生产和高效开采。

关键词 小煤柱; 变形机理; 采动应力; 注浆加固; 承载能力

1 引言

随着经济的发展, 煤炭在国民经济中的重要性依然不可忽视^[1-2]。与此同时, 由于小煤柱开采技术能够有效减少遗煤率并提高资源的可持续利用, 已在煤矿生产中得到广泛应用^[3-4]。然而, 开采过程中, 小煤柱工作面巷道常常面临变形问题, 严重影响了煤矿的安全生产和高效开采^[5]。因此, 研究小煤柱工作面巷道变形机理及治理技术具有重要理论意义和实践价值。

小煤柱开采是指在煤层中保留一定宽度的煤柱来减轻巷道的压力, 提高煤层采出率^[6]。这种开采方式不仅能有效降低开采成本, 还能在一定程度上降低矿井的灾害风险。然而, 由于其特有的开采特征, 巷道变形问题也随之凸显。不仅影响作业环境, 还会导致设备损坏和人员伤亡, 增加矿井的安全隐患。

巷道变形的机理主要涉及岩层应力分布、变形特征及其相互作用^[7-8]。小煤柱工作面在开采过程中, 煤体与围岩之间的力学关系发生了显著变化, 尤其是在煤柱的支撑和围岩卸载过程中, 巷道的应力状态和变形特征表现出复杂性。近年来, 随着地下工程技术的

进步, 研究者们逐渐认识到巷道变形不仅与开采方式有关, 还与地质条件、矿井设计、支护方式等多种因素密切相关^[9-10]。因此, 深入研究小煤柱工作面巷道变形的机理, 对于提高煤矿的安全性与经济性具有重要意义。

目前, 巷道变形治理技术也在不断发展。传统的巷道支护技术多集中于增强支护结构强度。但对于小煤柱工作面, 单纯依靠增加支护强度难以解决根本问题^[11]。近年来, 学者们提出了一系列新型治理技术, 如应力监测技术、围岩加固技术及智能支护技术等^[12-13]。这些新技术的应用, 不仅提高了巷道的稳定性, 还为后续的开采提供了有力保障。

小煤柱工作面巷道变形的研究不仅有助于深化对煤矿开采过程中力学行为的理解, 还为实际生产提供了重要指导意义, 但仍存在一些不足之处^[14-15]。为进一步深入开展这一领域的研究, 需要对小煤柱工作面巷道变形机理和治理技术进行系统综述。通过对变形机理深入理解, 从而提出针对性治理技术, 提高巷道稳定性, 保障煤矿的安全高效生产。同时也可对相关领域的研究和工程实践提供全面、系统的参考。

收稿日期: 2024 - 10 - 09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52034009); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U23B2093)

作者简介: 郭飞(1990—), 男, 江西吉安人, 工程师, 主要从事巷道支护研究, E-mail: 595495803@qq.com。

通信作者: 吴少康(1996—), 男, 安徽安庆人, 主要从事冲击地压及材料研发等研究, E-mail: wsk13037896248@126.com。

2 巷道变形机理

2.1 采动应力影响

煤炭在开采过程中,原岩应力状态被打破,采动应力场发生演化^[16]。随着煤炭资源的采出,周围岩体的应力重新分布。原本处于相对平衡状态的应力体系被改变,导致某些区域应力集中。这种应力集中使得岩层所承受的压力超过其强度极限,为岩层破断埋下隐患。采动应力场的演化往往会形成高应力区。在高应力作用下,岩层内部的微裂纹和缺陷逐渐扩展。当高应力持续积累且无法得到有效释放时,岩层的承载能力逐渐降低,最终引发岩层破断^[17]。例如,在工作面前方和采空区周围等区域,容易出现高应力集中现象,这些区域的岩层更容易发生破断。同时,采动应力场的变化会引起岩体的变形。岩体在应力作用下发生弹性变形、塑性变形甚至破坏。随着开采的进行,岩体的变形不断累积,当变形达到一定程度时,岩层发生破断。而且,不同岩层的力学性质和变形特性各异,在采动应力场的作用下,各岩层之间的相互作用加剧岩层的破断^[18]。在长壁开采等情况下,采动应力场呈现出一定的周期性变化。随着工作面的推进,顶板岩层会经历周期性的垮落和破断。这种周期性破断与采动应力场的周期性演化密切相关。每次采动都会引起应力的重新分布和调整,当应力积累到一定程度时,就会导致岩层的再次破断。采动应力包括垂直应力和水平应力,其大小和方向随开采位置和时间不断变化。小煤柱承受上覆岩层的部分垂直应力。随着工作面推进,垂直应力逐渐增大,导致小煤柱发生压缩变形。当垂直应力超过小煤柱的承载能力时,煤柱会被压垮,影响巷道稳定性。垂直应力的不均匀分布也会使小煤柱产生倾斜,导致巷道顶板和底板出现不均匀沉降,引起巷道变形。图1为某矿回采顺槽煤柱侧和回采侧的垂直应力分布情况^[19]。

由图1可知,煤体垂直应力在不同阶段呈现出不同特征。在距工作面242 m左右,应力增量有一明显跨越,表明此时开始受采动影响。随着工作面的继续推进,煤柱侧受影响程度更大(较回采一侧),但垂直应力均明显增加。采动过程中产生的水平应力会对小煤柱产生挤压作用。若水平应力较大,小煤柱可能会发生横向变形,甚至出现片帮现象。水平应力还会影响巷道两帮的稳定性,使巷帮向内收缩,导致巷道宽度减小。采动应力场的演化是岩层破断的根本原因。现场监测多数只监测垂直应力。而垂直应力的测试产生的费用较高,大多数矿井无法大量测量,因此,数值模拟目前已成为分析采动应力对覆岩破坏影响的常用方法,将来需要更进一步去探索。

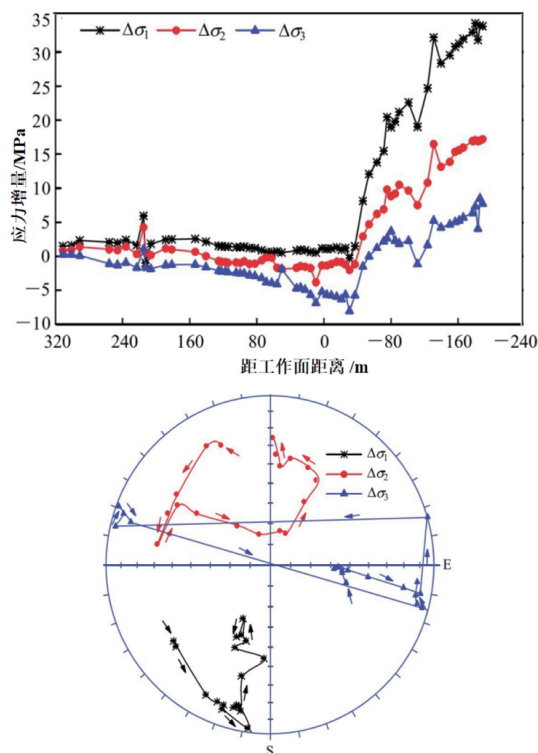


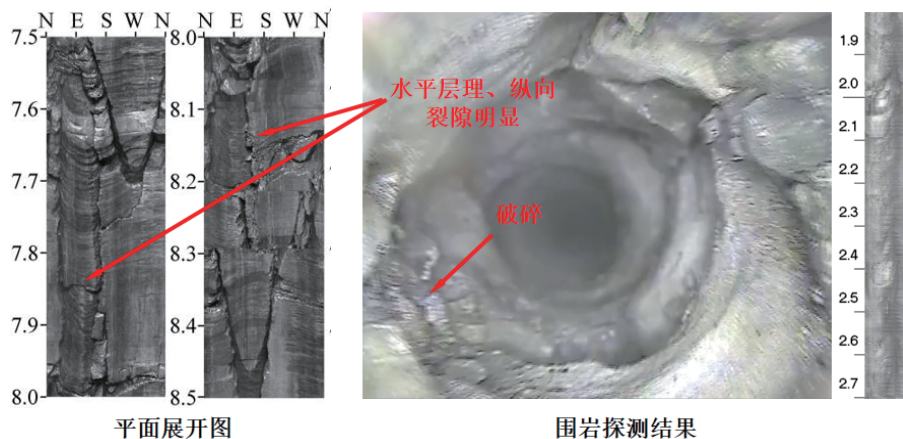
图1 煤体垂直应力分布^[19]

Fig. 1 Vertical stress distribution of coal^[19]

2.2 围岩性质

围岩强度、节理裂隙发育程度、岩层结构等要素直接关系到巷道的稳定性。煤岩体会被巷道围岩中的裂隙、层理等结构面切割,形成破碎块体。当结构面作用在这些块体上的应力及摩擦力不足以让被切割后的块体保持稳定时,块体将冒落或突出。

图2展示了某矿煤层顶板窥视图^[20]。图中清晰显示了顶板岩层中的水平层理、纵向裂隙等结构面。从图中可以清楚看到岩层处于破碎状态,无法形成一整体。小煤柱工作面巷道顶板若为软弱围岩时,极易发生变形。主要原因在于:(1)软弱围岩通常具有较低的抗压、抗拉和抗剪强度。巷道开挖后,顶板岩层难以承受上覆岩层的压力及周围的应力作用,易发生变形破坏。例如,泥岩、页岩等软弱岩层,其矿物成分和结构决定了它们的强度较低,无法为巷道提供足够的支撑力^[21]。(2)很多软弱围岩具有遇水软化的特性。在井下环境中,不可避免地会存在地下水或生产用水。当软弱围岩接触到水后,其强度会大幅降低,进一步加剧了顶板的变形^[22]。(3)软弱围岩一般节理裂隙较为发育。这些节理裂隙不仅降低了岩体的整体强度,还为水的渗透和应力的集中提供了通道。在采动应力的作用下,节理裂隙容易扩展、贯通,使得顶板岩层的稳定性变差发生变形^[23]。(4)在小煤柱工作面,由于煤柱尺寸较小,其支撑能力有限。相邻采空区的压力容易通过煤柱传递到巷道顶板,特别是当顶板为软弱围岩时,更易受到这种压力的影响而发生变形。同时,

图2 巷道顶板结构窥视图^[20](单位 m)Fig. 2 Observation image of roadway roof structure^[20]

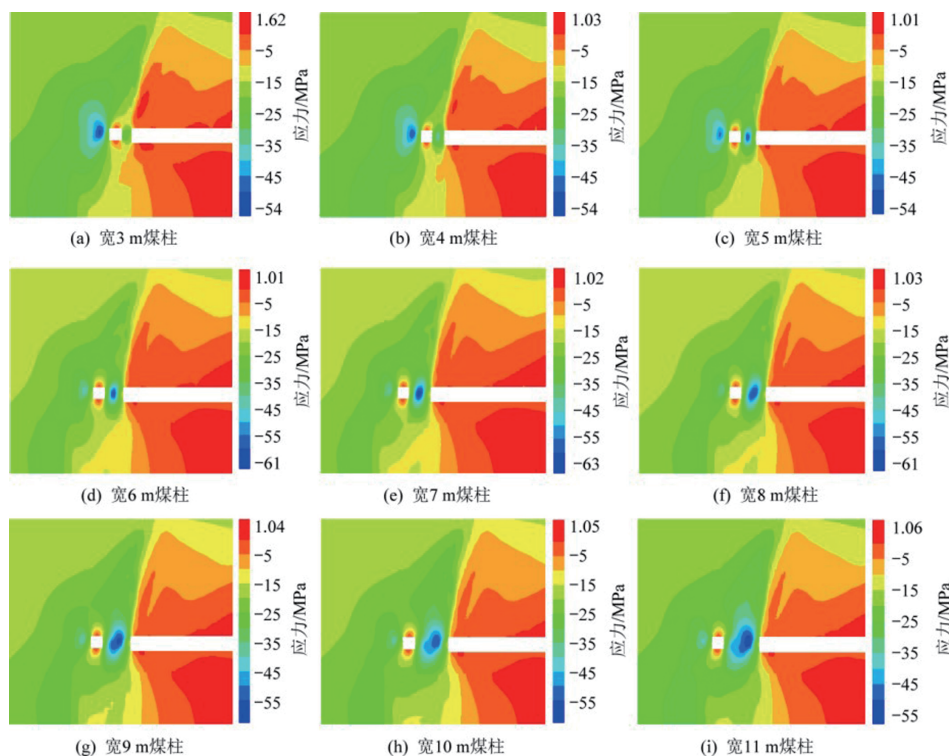
小煤柱的存在也可能导致应力集中,加剧顶板的变形破坏。(5)小煤柱的存在削弱了巷道的整体支护效果,使得软弱围岩更易暴露在不利的应力环境中。(6)软弱围岩中的地质构造复杂,如断层、褶皱等,这些构造在采动影响下更容易活化,导致围岩变形增大。

2.3 煤柱留设尺寸

煤柱的留设尺寸对小煤柱工作面巷道的变形影响显著。郑西贵等^[24]利用数值模拟研究了不同煤柱宽度在回采时煤柱及实体煤侧应力分布规律,得出该矿井地质条件下煤柱宽度为8 m时最佳。彭林军等^[25]对特厚煤层小煤柱尺寸进行了大量分析,通过数值模拟得出合理设置煤柱尺寸是保证巷道稳定的关键。

陈科等人^[26]通过建立力学模型及数值模拟得出小煤柱合理宽度,并对煤柱应力分布进行相应的模拟,通过实践验证了分析的准确性。毕慧杰等^[27]以煤矿现场为例,提出小煤柱合理巷道布置方式,保证了现场的安全高效开采。如图3所示为突出厚煤层沿空掘巷留设不同煤柱尺寸时煤柱围岩垂直应力分布^[28]。

由图3可得,煤柱宽度设置为3、4 m时,巷道左帮应力集中明显,煤柱内几乎无应力集中现象;煤柱宽度设置为5 m时,巷道两帮均处于应力集中状态,但左帮更为明显;煤柱宽度设置为6~9 m时,左帮应力集中不明显,而煤柱内部随着留设宽度的增加,应力集中现象愈发严重;煤柱宽度设置为10、11 m时,

图3 不同煤柱尺寸对应的垂直应力分布^[28]Fig. 3 Vertical stress distribution diagram corresponding to different coal pillar sizes^[28]

较宽度为 6~9 m 煤柱内部应力集中更加明显,影响区域更广泛。因此,分析留设不同煤柱尺寸时煤柱围岩垂直应力分布对小煤柱工作面巷道变形特征和稳定性有重要作用,具体如下^[29-31]:(1)揭示应力传递路径。不同煤柱尺寸下的垂直应力分布情况可以清晰地显示应力在煤柱及围岩中的传递路径。当煤柱尺寸较大时,垂直应力更多地集中在煤柱内部,对巷道围岩的影响相对较小。而随着煤柱尺寸减小,应力向巷道周围围岩转移,使巷道围岩所承受的压力增大,巷道更易变形。(2)确定变形主导因素。小煤柱尺寸下,垂直应力集中在煤柱与巷道交界处,此处的围岩会由于应力集中而发生塑性变形,导致巷道顶板下沉和帮部鼓出。另外,若垂直应力在整个煤柱宽度范围内分布较为均匀,但数值较大,说明上覆岩层的压力主要由煤柱承担,此时煤柱的稳定性将直接影响巷道变形。若煤柱发生失稳破坏,将进一步加剧巷道的变形。(3)评估围岩稳定性。当垂直应力过高且分布不均匀时,围岩易出现局部破坏,如顶板断裂、帮部垮塌等。相反,如果垂直应力分布相对均匀且数值在围岩强度承受范围内,围岩的稳定性相对较好,巷道变形也会较小。(4)指导煤柱尺寸优化。通过比较不同尺寸下的应力分布和巷道变形情况,可以确定既能保证煤柱稳定性又能有效控制巷道变形的最佳煤柱尺寸。这样可以在保证安全生产的前提下,最大限度地提高煤炭资源回收率,降低生产成本。

2.4 支护方式不合理

支护方式是小煤柱工作面巷道变形的重要影响因素之一^[32]。当支护强度不足或支护时机不对以及支护结构不合理时,无法有效控制围岩变形与破坏,导致巷道变形加剧。小煤柱两侧多以锚杆支护为主,若锚杆预应力过低且表面支护不完善,无法限制围岩早期变形,导致松动圈扩大且无法进一步限制围岩运动,煤体表面破碎或托盘翻转变形,最后锚杆、锚索失效^[33-34]。煤柱支护方案设计不合理,不能对煤柱承载力显著提升,导致巷道大变形^[35]。传统沿空掘巷小煤柱两侧支护体结构布置如图 4 所示^[36-37]。由于小煤柱两侧巷道并不是同时掘进,所以小煤柱两侧支护对小煤柱的施加也存在时间上的差异。两侧的支护体间隔时间较长,无法形成有效的力学联系,对强化并提高煤柱自身承载能力的效果有限。当支护较为滞后的煤柱一侧锚杆端头到达煤柱中央位置时,煤柱已经在上一工作面的开采过程中产生的扰动应力下,提前进入了塑性阶段。内部裂隙得到充分发育,在锚固端无法提供较为完整的着力点,锚杆无法发挥应有的支护作用。同时,该阶段内,小煤柱在长期受上覆岩层压力作用下变为塑性区,其变形能力增加,支护时可能出现塌孔。因为塑性区域不能有效传递支护力,支护结构无法稳

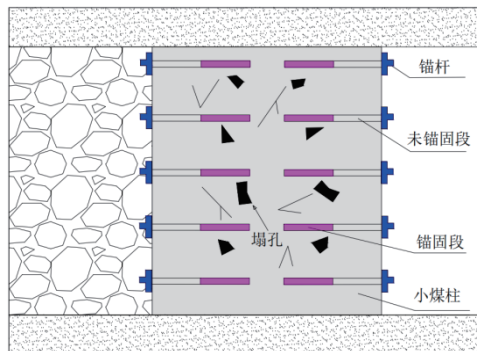


图 4 煤柱两侧支护结构分析

Fig. 4 Analysis of supporting structure on both sides of coal pillar

定支持周围岩体。支护时施加的压力可能导致局部失稳,出现塌孔。

综合以上分析可知,传统沿空掘巷的小煤柱两侧支护体在支护方式不合理时发生变形,具体原因包括以下几个方面:(1)支护强度不足。选用的支护材料强度不够,或者支护构件的布置密度不够,无法提供足够的支撑力来抵抗围岩压力,导致支护体逐渐被压垮而变形。(2)支护时机不当。过早支护可能使支护体承受了过大的初期变形压力,而过晚支护则错过了控制围岩变形的最佳时机,使得围岩变形过大。(3)锚杆锚索的长度和锚固深度不合理。若长度不足或锚固深度不够,就无法有效将支护力传递到深部稳定的岩层中,从而无法有效控制浅部围岩的变形。(4)没有形成有效的支护组合系统。例如,锚杆、锚索、金属网、钢带等支护构件之间的协同作用没有充分发挥,导致支护效果大打折扣。(5)忽视了对帮部和角部的支护。帮部和角部是应力集中的部位,如果对这些关键部位的支护不到位,容易发生变形,影响整个支护体稳定性。

2.5 开采工艺

采煤方式、推进速度等开采工艺参数的选择同样会对巷道变形产生影响。以推进速度为例,快速推进能够缩短采动对巷道的影晌时间,但过快的推进速度可能导致应力集中加剧。图 5 为通过数值模拟得出的某矿不同推进速度与覆岩破坏特征的关系^[38]。

由图 5 可知,随着推进速度的不同,覆岩破坏特征普遍发生变化,对巷道变形的影响程度逐渐增高。实际生产中适当加快综采面推进速度,可以减小巷道变形破坏,有利于保持巷道的稳定性。相反,工作面推进速度较慢,煤壁前方塑性破坏深度增加,煤体剪切破坏程度进一步加强和最大水平位移量增大,端面顶板的破坏高度和下沉量增加,发生煤壁片帮和端面冒顶的概率上升。因此,要保持推进速度大于某一下限值,做好监测工作,防止煤岩体能量聚集过高而发生岩爆等动力灾害,减少事故发生频率,确保工作面

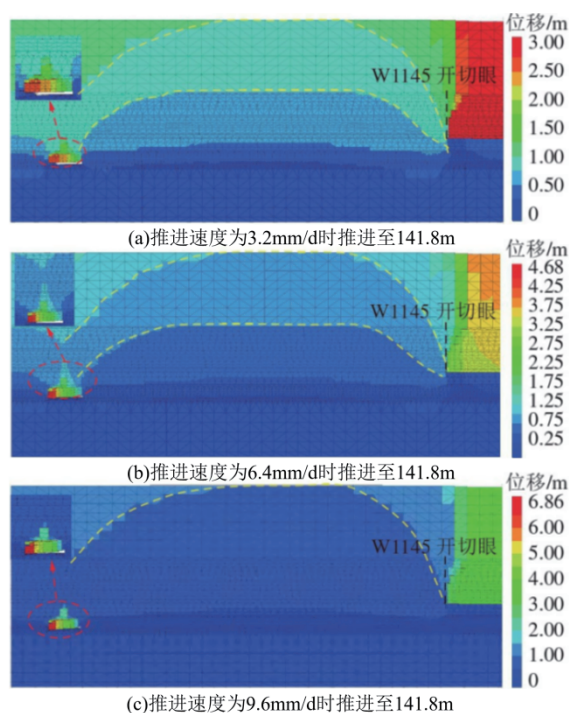


图5 推进速度与覆岩破坏特征关系^[38]

Fig. 5 Relation between thrust velocity and initial breaking strain energy density of overburden^[38]

安全生产。

3 巷道变形治理技术

3.1 加强支护

3.1.1 高强度锚杆与锚索

现阶段煤矿常借助高强度锚杆、锚索对岩层稳定性差的巷道进行加固,保证巷道稳定使其正常作业。锚杆、锚索支护的作用机理是巷道由于掘进破坏了其原有的应力平衡,引起了应力的重新分布,在扰动应力作用下浅部围岩形成了破碎区,破碎区的承载力不足以支撑巷道的正常作业。在巷道围岩打入锚杆、锚索施加预紧力,在预紧力的作用下,锚杆附近的岩体中形成压应力场,锚索能强化更深部的围岩,并且强化锚杆作用的前部围岩应力场,进一步提高围岩的强度。同时将相对稳定的深部围岩与浅部围岩相互作用,提高浅部围岩的承载力,调动深部围岩帮助浅部围岩共同承担围岩应力^[39]。锚杆、锚索形成的压应力场与其施加的预紧力有直接关系,锚杆、锚索直径越大、强度越高,其预紧力越大,所形成压应力场的范围越大、压应力值越高,对围岩的强化作用也会更强^[40]。采用高强度锚杆、锚索支护方式相较于其他支护方式施工操作简单,周期短,抗压性能强,适用性强,能根据不同地质条件灵活选择材料和结构形式,长期维护成本低,使用寿命长,煤矿开采经济效益高。高强度

支护材料在韧性和延展性方面相较其他支护方式有显著优势,能提高巷道的抗冲击能力。

3.1.2 支护密度及间距

支护密度及间距对小煤柱工作面巷道变形治理技术有着重要影响^[41-42]。当支护密度较大、间距较小时,能提供更高的支护强度,对巷道围岩的约束作用明显增强。众多的支护构件共同作用,将围岩紧紧地束缚在一起,有效抵抗上覆岩层的压力和采动应力。例如,锚杆支护密度大时,锚杆之间的协同作用使得浅部围岩形成一个整体的承载结构,能够更好承受外部载荷,减少围岩变形和破坏。在一定程度上可以控制巷道顶板的下沉和帮部的鼓出,提高巷道稳定性。当支护密度较小、间距较大时,支护强度相对较低,围岩得不到充分约束,易在应力作用下发生变形。如图6所示,连续承载结构能抑制浅部塑性围岩的变形破坏向深部发展。适当增加支护密度,缩小锚杆、锚索间距能增大叠加应力区面积,达到强化围岩支护体系的目的。

3.1.3 联合支护

稳定程度较低的小煤柱沿空掘巷巷道单纯采用锚杆、锚索支护对巷道的维护效果已经无法满足工程要求时,可选择两种或两种以上的支护方法联合使用,提高对巷道的维护效果,满足工程要求。如:

- (1)锚杆+锚索+金属网支护:顶板两帮打入锚杆、锚索同时铺设金属网,底板不进行处理;
- (2)锚杆+锚索+金属网+钢架支护:(1)的基础上在顶板和巷道两帮布置钢架;
- (3)锚杆+锚索+金属网+钢架支护+底板锚索:(2)的基础上在底板打入锚索;
- (4)锚杆+锚索+金属网+封闭式钢架:(1)的基础上在钢架沿巷道两帮、巷道顶板和巷道底板布置形成封闭式钢架;
- (5)锚杆+锚索+金属网+封闭式钢架+底部锚杆:(4)的基础上在底板打入锚杆。

3.2 优化开采工艺

3.2.1 开采顺序

煤矿地下活动会破坏原有的原岩应力环境,使上覆岩层应力重新分布,进而遭受扰动,发生变形破坏。单工作面开采时,上覆岩层的损坏受多种因素影响,其采空区上覆岩层主要遭受邻近工作面回采影响。同一煤层相邻工作面开采时,巷道围岩强度减弱,遭受二次扰动影响后,其塑性区和破坏区会显著增大^[43],对巷道支护造成严重影响。所以要合理安排工作面开采顺序,采用跳采等方式,避免相邻工作面开采对

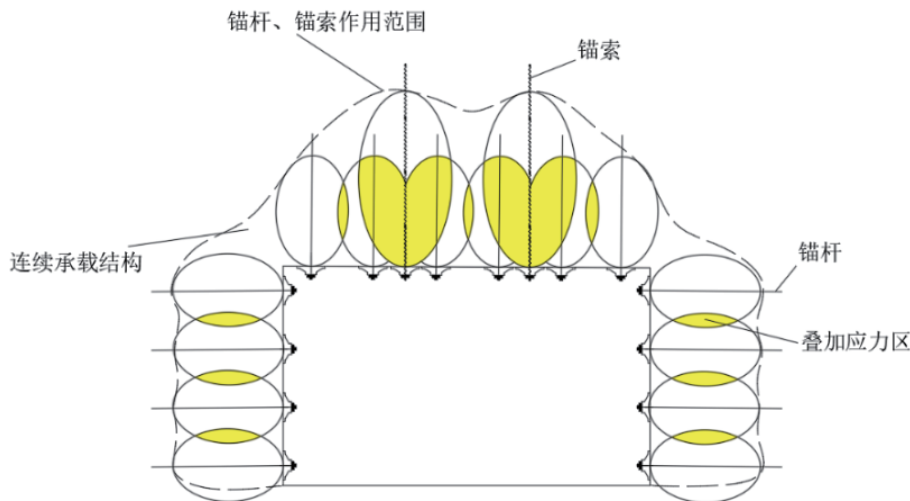


图6 锚杆索叠加机理

Fig. 6 Superposition mechanism of anchor cable

巷道围岩所造成的影响。

3.2.2 采煤速度

开采过程中,上方关键层会随着工作面的推进发生周期性垮落。推进速度较慢时,关键层在自重及上覆岩层压力的作用下内部裂隙得到充分发育,关键层断裂长度减小,可承载能力减小,下沉量增大,工作面来压步距减小,工作面煤壁前方由于扰动应力的持续影响出现较大范围的塑性区,煤壁易出现片帮、冒顶等现象;推进速度较快时,关键层破坏程度小,承载能力增大,来压步距增大,工作面煤壁前方受扰动应力的持续时间较短,塑性区较小,煤壁内部蕴含能量较大,有导致瓦斯突出、冲击矿压的风险^[44]。合理控制开采速度,可以控制上方关键层的断裂位置,必要时可以进行停采让压,停止推进,等待顶板来压后再继续推进。顶板来压较大时,可以减慢推进速度使顶板裂隙发育,让直接顶得到充分垮落,关键层在失稳回转时更易触矸稳定,减小来压强度。

3.3 注浆加固

巷道支护技术主要通过强化围岩的承载力来维持巷道的稳定,当巷道浅部围岩过于破碎时,对巷道进行单纯锚杆、锚索、金属网、钢架等支护方式不能在内部形成足够的锚固力,无法起到显著支护作用^[45]。此时可对巷道采用注浆加固技术。浆液能对巷道内部节理、裂隙、裂纹等结构弱面加固,改善围岩物理力学性质,提高围岩强度和整体性,减少巷道变形。当围岩中裂隙较大时,注浆主要起到充填作用,填补裂隙、孔洞,使其形成连续体。当围岩中裂隙较多时,注浆主要起到黏合和减小裂隙尖端效应的作用,使其内部应力分布均匀。当围岩中存在较多独立分布的孔隙时,注浆可以通过压力作用在孔隙周围形成压应

力区,减小孔隙率,提高围压。当围岩本身较为软弱时,注浆压力可使原有裂隙扩展,形成网脉结构,此时浆液注入,可达到强化围岩材质的效果^[46-47]。山西三元福达煤矿存在地应力水平高、巷道围岩稳定性差、遗留钻场空区影响小煤柱稳定性等问题。基于原有巷道支护方案进行分析,发现存在巷道上帮支护强度较低、两帮采用H形钢带护表,护表范围小,巷道表面控制能力较弱、锚索长度较短,且支护密度较低,导致支护体系对顶板的悬吊能力降低、上帮帮角处应力集中等问题。针对问题进行了支护方案优化,分别对锚杆、锚索材质,锚杆、锚索间排距,以及护表构件和表面喷浆等工艺进行了优化^[48-49]。煤柱过于破碎,会导致采空区的有毒气体泄露到巷道内部,所以在巷道掘进过程中遇到破碎程度较大的煤柱进行了注浆加固处理。先对破碎煤壁进行常规锚杆锚索支护,然后在煤壁表面喷浆处理。待煤柱表面喷浆凝固后,垂直煤壁距底板2 m处,以3 m间距,打设1.5 m深钻孔。通过钻孔往煤壁内部注水泥浆材料,从而填补煤柱裂隙,提高煤柱的承载力,控制煤柱进一步变形破坏。方案实施后分析矿压监测数据得出结论,顶锚杆应力水平高于帮锚杆,顶锚杆应力峰值与帮锚杆应力峰值均远小于锚杆屈服载荷。小煤柱整体应力水平较低,破碎区注浆加固后,具备一定的承载能力。基于十字测站观测结果,巷道两帮及顶板下沉量均在可控范围内,巷道收缩量较小,围岩整体稳定性较好。此方案采用了同时进行加强支护和注浆加固的混合治理技术,在小煤柱工作面巷道使用高强度锚杆、锚索,并进行了注浆加固处理。治理后巷道围岩变形显著减小,极大解决了现场问题。

3.4 卸压技术

巷道在多种应力作用叠加下,内部形成了复杂的

应力集中区,对围岩造成破坏,引起了巷道变形破坏。卸压方式有很多,于健浩等^[50]分析了影响小煤柱巷道的不同因素,包括地应力、自身稳定性及采空区等。利用侧向水力压裂及高水材料充填保证了巷道的稳定性。陆银龙等^[51]利用力学模型得出了小煤柱巷道变形的力源所在,相应提出了卸压+主动支护的措施,有效解决了巷道失稳问题。霍丙杰等^[52]通过对双关键层下采场内外应力场分析,得出小煤柱宽度设置为6 m最佳,并且在现场应用时效果显著。张光辉等^[53]通过爆破手段对小煤柱巷道进行卸压,有效抑制了巷道变形。常见的卸压方式有钻孔卸压、开槽卸压、水力压裂、爆破卸压等。但卸压原理几乎相似,如图7所示为卸压机理。

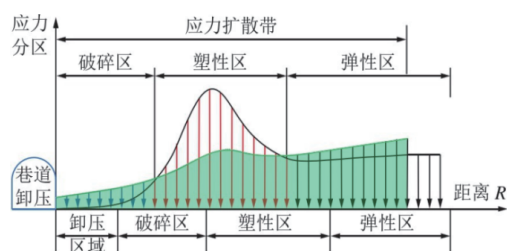


图7 巷道卸压原理^[54]

Fig. 7 Pressure relief schematic diagram of roadway^[54]

钻孔卸压是在巷道的复杂应力集中区周围进行钻孔,在应力的作用下钻孔变形或垮塌,多组钻孔形成破碎塑性区,让集中高应力由弹性能转变为塑性能,应力得到释放并向深部转移^[54-55]。开槽卸压是在巷道帮部开掘出卸压槽,预留巷道变形空间,在高应力作用下巷道围岩向两帮卸压槽转移,释放并改善帮部高应力环境。水力压裂主要是改变巷道围岩应力状态,主要表现如下:(1)切断顶板应力传递。通过在巷道顶板实施水力压裂,切断巷道与上方坚硬顶板岩层的连接。(2)转移应力集中区域。将原本集中在巷道周围的高应力向深部或其他区域转移,避免应力在巷道附近过度集中,减少巷道围岩的变形和破坏风险。其次促进顶板岩层垮落。水力压裂可以使顶板岩层产生裂缝,降低其强度和完整性,促进顶板岩层及时垮落,减小悬顶面积和垮落步距,降低顶板突然垮落的风险,保障工作面的安全生产。除了顶板岩层外,煤矿巷道周围可能存在一些坚硬的岩层,如底板岩层或煤柱中的坚硬部分。这些坚硬岩层会对巷道的开挖和维护造成困难,并且可能在应力作用下产生突然的破裂和变形,对巷道的稳定性产生威胁。水力压裂可以对这些坚硬岩层进行弱化处理,降低其强度和硬度,使其更容易被开挖和支护,同时也减少岩层破裂和变形对巷道的影响^[56-57]。爆破卸压是一种岩土工程技术,主要用于减少地层压力和改善岩石或土体的稳定性。这种方法通常通过控制爆炸来产生冲击波,改变地层应力状态,从而达到卸压目的^[58]。

随着上区段工作面的回采和工作面的推进,一般直接顶会随着开采直接垮落,基本顶会随着工作面推进周期性垮落,并在靠近煤壁上方相互咬合,侧向形成砌体梁结构。但如果坚硬顶板周期来压步距过大,在其断裂时会对巷道产生强大的冲击力,破坏煤岩结构,造成巷道支护设备损坏甚至人员伤亡,或其断裂的位置正好位于煤柱上方。如图8a所示,会对煤柱产生侧向水平集中应力,使巷道位于应力集中区,破坏巷道的稳定性和完整性,使巷道可锚性降低,锚固效果差,引起巷道大变形。此时就需要对顶板进行预压裂,对靠近小煤柱侧的顶板进行钻孔,采用水力压裂或爆破的方法对顶板进行弱化处理,如图8b所示。在上区段回采工作面上覆岩层中形成一个弱化带,达到加速采空区稳定、让坚硬顶板岩块B提前破断的目的,削减破断时的来压总量,同时让采空区承担岩块B的破断自重载荷,缩小采空区悬臂的长度,实现对煤柱的卸压,缓解巷道的片帮、底鼓等破坏^[59]。内蒙古门克庆煤矿所采煤层具有强冲击倾向性,在采用小煤柱工作面后,巷道掘进面后方发生多起矿压显现事件。基于现场条件,提出要对煤体卸压处理,通过煤层钻孔卸压提前释放煤体内过高的弹性势能。同时为降低巷道顶板积聚的能量,尽可能减少对围岩结构的破坏,对顶板进行卸压处理。在距离掘进工作面12 m处向实体煤一侧打设两个与巷道分别呈17°和27°夹角的斜卸压钻孔,钻孔深度分别为31、33 m。在滞后掘进工作面15 m范围内进行正帮卸压钻孔,打设间距2 m、深20 m的大直径钻孔。采用钻孔卸压技术,对煤柱进行大直径钻孔,应力通过围岩塑性变形得到释放,浅部高应力向煤体深部转移,缓解煤柱的应力集中现象,降低了冲击矿压发生的几率,有效地控制了小煤柱工作面巷道的应力集中和变形,提高了矿井

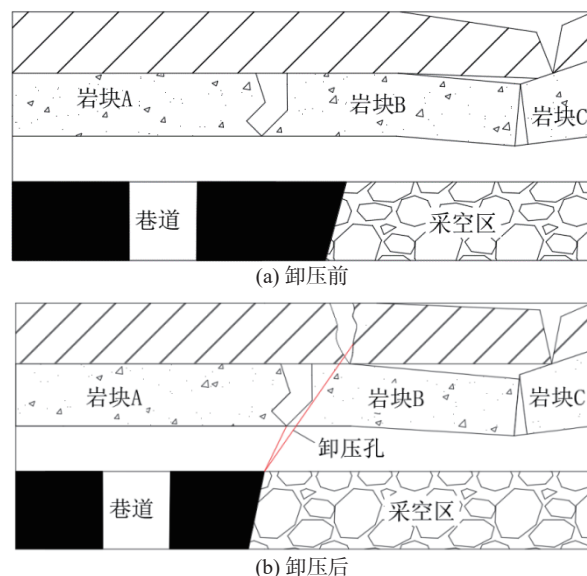


图8 卸压措施前后效果

Fig. 8 Before-and-after effect of pressure relief measures

生产能力。

4 结论与展望

小煤柱工作面巷道变形机理复杂,受多种因素的综合影响。本文通过对小煤柱工作面巷道变形的机理及相应的治理技术进行综述,得出以下结论:

(1)采动应力、围岩性质、煤柱留设尺寸、支护方式及开采工艺等因素对巷道变形会产生影响。巷道变形主要发生在受采煤工作面采动影响期间,且采动应力的分布范围和大小与多个因素(岩层分布、煤岩层强度与结构、原岩应力的方向、巷道布置等)相关;围岩性质直接关系到巷道的稳定性,软弱围岩更易发生变形,节理和裂隙发育的岩层不利于应力传递,增加巷道变形的可能性。不同地质条件下的巷道留设煤柱大小不一样,可通过考虑资源采出率、煤柱稳定性及自身支护、现场工程量问题进行合理留设。支护方式及开采工艺需考虑多种因素,合理的支护方式及开采工艺可起到事半功倍的效果。

(2)小煤柱工作面变形时,可通过在小煤柱工作面采用高强度支护材料(锚杆、网、钢拱架等)和技术(锚杆锚索支护技术、注浆加固技术、钢带与金属网联合支护及液压支架支护技术等),以提高支护结构的稳定性和承载能力;调整采煤工艺参数(采煤方式和推进速度),减少对巷道的变形压力,提高工作面稳定性;利用注浆技术对巷道周围岩层进行加固,可增强岩层承载力,减少变形风险;实施合理的卸压措施,减轻工作面及其支护系统压力,可降低变形程度。

(3)小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究目前已取得一定进展,未来,随着开采深度的进一步增加及后期遇到的不同地质条件,还需在以下几方面进行研究创新:①支护材料和技术创新,如高性能支护材料和智能化监测系统的应用,提高支护效果和变形预警能力。②继续优化采煤工艺参数,探索新的采煤方法,特别是适应小煤柱区域的工艺,减少对巷道的变形压力。③研究多种技术的联合应用效果,如结合注浆加固与卸压等技术,实现更为有效的变形控制。④通过实际工程案例验证研究成果,优化理论模型,确保研究成果在实际应用中的可靠性和有效性。

参考文献:

- [1] ZHANG J, YANG W, LIN B, et al. Strata movement and stress evolution when mining two overlapping panels affected by hard stratum[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(5): 691-699.
- [2] 吴少康, 张俊文, 徐佑林, 等. 煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 24-37.
WU S K, ZHANG J W, XU Y L, et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 24-37.
- [3] 康红普, 徐刚, 王彪, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 7-39.
KANG H P, XU G, WANG B M, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 7-39.
- [4] 吴开智. 特厚煤层综放面小煤柱沿空巷道大变形破坏力学机理及控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WU K Z. Mechanism and control of deformation and failure of roadway along gob in mechanized caving face of extra thick coal seam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [5] 唐建新, 李霜, 侯阳, 等. 急倾斜三软厚煤层留小煤柱沿空护巷技术[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(4): 1392-1400.
TANG J X, LI S, HOU Y Y, et al. Gob side entry protection technology of small coal pillar in steeply inclined three-soft thick coal seam[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(4): 1392-1400.
- [6] 李硕森, 徐青云, 赵晓渝, 等. 小煤柱留设方法探讨及发展趋势分析[J]. *采矿技术*, 2024, 24(2): 1-6.
LI S S, XU Q Y, ZHAO X Y, et al. Discussion on small coal pillar retention method and development trend analysis[J]. *Mining Technology*, 2024, 24(2): 1-6.
- [7] 王小平, 王文杰, 黄永祥, 等. 金川三矿破碎围岩巷道变形控制方式优选研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(10): 65-72.
WANG X P, WANG W J, HUANG Y X, et al. Research on optimal selection of deformation control methods for roadway with fractured surrounding rocks in Jinchuan No. 3 mine[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(10): 65-72.
- [8] 康志鹏, 罗勇, 任波, 等. 复合顶板倾斜薄煤层小煤柱稳定机理与控制研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(9): 40-47.
KANG Z P, LUO Y, REN B, et al. Composite inclined thin coal seam roof of small coal pillar stability mechanism and control research[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(9): 40-47.
- [9] 吴拥政, 付玉凯, 何思锋, 等. 强冲击载荷下巷道围岩变形破坏特征及控制技术[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(9): 76-87.
WU Y Z, FU Y K, HE S F, et al. Characteristics of deformation and failure of surrounding rock in roadway under strong impact load and control technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(9): 76-87.
- [10] 朱威霖, 杨科, 池小楼. 基于光纤光栅传感技术的深部巷道围岩状态精准表征[J]. *中国矿业*, 2024, 33(10): 177-184.
ZHU W L, YANG K, CHI X L. Accurate characterization of surrounding rock state of deep roadway based on fiber grating sensing technology[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(10): 177-184.
- [11] 赵杰, 张宁波, 刘海兵. 关家崖煤矿重复采动巷道变形特征及控制对策研究[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(8): 44-51.
ZHAO J, ZHANG N B, LIU H B. Guan home cliff repeating mining coal mine roadway deformation characteristics and the control countermeasures study[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(8): 44-51.
- [12] 王桂峰, 张崑峰, 王忠宾, 等. 煤体应力随钻监测响应特征及智能感知技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 9(5): 1069-1077.
WANG G F, ZHANG Y F, WANG Z B, et al. Research on drilling characteristics and the intelligent perception technology of coal stress[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2024, 9(5): 1069-1077.
- [13] 刘光旭, 周法政, 赵慧杰, 等. 鲍店煤矿小煤柱巷道超前支护应力监测分析与支护优化研究[J]. *煤矿现代化*, 2024, 33(2): 112-120.
LIU G X, ZHOU F Z, ZHAO H J, et al. Stress monitoring analysis and support optimization research on advanced support of small coal pillar tunnels in Baodian Coal Mine[J]. *Coal Mine Modernization*, 2024, 33(2): 112-120.
- [14] 裴陆慧. 永红煤矿小煤柱沿空掘巷围岩控制技术应用研究[J]. *山*

- 东煤炭科技, 2024, 42(2): 20–24.
- PEI L H. Research and application of surrounding rock control technology for small coal pillar roadway excavation along goaf in Yonghong coal mine[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2024, 42(2): 20–24.
- [15] 钟鑫森. 朱集东煤矿小煤柱沿空掘巷围岩稳定性控制技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- ZHONG X M. Research on stability control technology of surrounding rock in goaf excavation of small coal pillar in Zhujidong Coal Mine [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024
- [16] 钱鸣高. 采场围岩控制理论与实践[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(Z1): 12–15.
- QIAN M G. Theory and practice of surrounding rock control in stope[J]. *Mine Pressure and Roof Management*, 1999(Z1): 12–15.
- [17] KANG H, GAO F, XU G, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines—A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 37–65.
- [18] 吴少康. 高应力软岩巷道应力分布及控制机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- WU S K. Study on Stress distribution and control mechanism of high stress soft rock roadway [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [19] 程利兴, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 深井孤岛工作面巷道围岩采动应力分区演化特征[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4078–4086.
- CHENG L X, JIANG P F, YANG J W, et al. Evolution characteristics of mining stress zone in roadway surrounding rock of isolated mining face in deep well [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 41(12): 4078–4086.
- [20] 康红普, 司林坡, 苏波. 煤岩体钻孔结构观测方法及应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1949–1956.
- KANG H P, SI L P, SU B. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 1949–1956.
- [21] 郝晓琦, 韩刚, 解嘉豪, 等. 鄂尔多斯矿区小煤柱沿空掘巷冲击地压机理[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 36–45.
- HAO X Q, HAN G, XIE J H, et al. Rock burst mechanism of roadway excavation along goaf with small coal pillar in Ordos mining area[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(2): 36–45.
- [22] 宋振骐, 蒋金泉. 煤矿岩层控制的研究重点与方向[J]. 岩石力学与工程学报, 1996(2): 33–39.
- SONG Z Q, JIANG J Q. The current research situation and developing orientation of strata control in coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996(2): 33–39.
- [23] 张百胜, 王朋飞, 崔清, 等. 大采高小煤柱沿空掘巷切顶卸压围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2254–2267.
- ZHANG B S, WANG P F, CUI S Q, et al. Mechanism and surrounding rock control of roadway driving along gob in shallow-buried, large mining height and small coal pillars by roof cutting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2254–2267.
- [24] 郑西贵, 姚志刚, 张农. 掘采全过程沿空掘巷小煤柱应力分布研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 459–465.
- ZHENG X G, YAO Z G, ZHANG N. Stress distribution of coal pillar with gob-side entry driving in the process of excavation & mining[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2012, 29(4): 459–465.
- [25] 彭林军, 张东峰, 郭志彪, 等. 特厚煤层小煤柱沿空掘巷数值分析及应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3609–3616+3632.
- PENG L J, ZHANG D F, GUO Z B, et al. Numerical analysis and application of goaf excavation of small pillar in extra thick coal seam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3609–3616+3632.
- [26] ZANG C, JIANG B, WANG X, et al. Study on damage law and width optimization design of coal pillar with the discrete element method[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2024, 37(6): 555–563.
- [27] 毕慧杰, 莫云龙. 顺序开采工作面小煤柱巷道布置方法研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(7): 145–153.
- BI H J, MO Y L. Research on layout method of small coal pillar roadways in sequential mining faces[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(7): 145–153.
- [28] 周礼杰, 陈亮, 程志恒, 等. 突出厚煤层沿空掘巷煤柱留设宽度优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 92–101.
- ZHOU L J, CHEN L, CHENG Z H, et al. Study on optimization of coal pillar width of gob-side entry driving in thick coal seam with gas outburst[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 92–101.
- [29] 牛明, 李庆国, 刘佳乐, 等. 转龙湾矿浅埋薄基岩厚煤层双巷掘进巷间煤柱合理尺寸研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(9): 25–28.
- NIU M, LI Q G, LIU J L, et al. Research on reasonable width of coal pillars between roadways for double-roadway tunneling in thick coal seams with shallow buried thin bedrock in Zhuanlongwan Coal Mine[J]. *Coal Technology*, 2018, 43(9): 25–28.
- [30] 蔡音飞, 刘健松, 冀哲, 等. 以煤层倾向为参考方向的锐角优化垂线法煤柱设计方法[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(4): 127–132+138.
- CAI Y F, LIU J S, JI Z, et al. Acute-angle optimized perpendicular line method for protective coal pillar design with a reference orientation of seam dip direction[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2019, 51(4): 127–132+138.
- [31] ZHANG D, ZHAO H, LI G. Study on size optimization of a protective coal pillar under a double-key stratum structure[J]. *Applied Sciences—Basel*, 2022, 12(22), 11868.
- [32] 杨森. 复杂条件下煤巷快速掘进迎头顶板变形机理及动态分次控制技术[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- YANG S. Deformation mechanism and dynamic grading of heading roof in rapid excavation of coal roadways under complex conditions control technology [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [33] CHEN J, ZHANG W, MA J, et al. An analytical approach to study the reinforcement performance of rock anchors[J]. *Engineering Failure Analysis*. 2024, 160(1): 1–20.
- [34] 赵旭伟. 节理化岩体高铁隧道失稳机制与主动控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- ZHAO X W. Instability mechanism and active control of high-speed railway tunnel in jointed rock mass [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [35] 黄万朋, 赵同阳, 江东海, 等. 双巷掘进留窄小煤柱布置方式及围岩稳定性控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 617–629.
- HUANG W P, ZHAO T Y, JIANG D H, et al. Arrangement of double entry driving with a narrow coal pillar in the middle and stability control technology of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 617–629.
- [36] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649–664.
- KANG H P, WANG J H, LIN J. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 649–664.
- [37] 苏超, 康红普, 姜鹏飞, 等. 基于连续实测的煤巷围岩掘—采期间采动应力演化与破坏模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(9): 2201–2213.
- SU C, KANG H P, JIANG P F, et al. Analysis on mining-induced stress evolution and surrounding rock failure mode of roadway during heading-mining period based on continuous measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 43(9): 2201–2213.
- [38] 崔峰, 冯港归, 贾冲, 等. 冲击地压矿井近距离特厚煤层综放工作面合理推进速度研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 287–297.
- CUI F, FENG G G, JIA C, et al. Study on reasonable advancing speed

- of fully-mechanized top-coal caving face in mining contiguous extra-thick coal seams in rockburst mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 51(7): 287-297.
- [39] 李化敏, 王文强, 王祖洸, 等. 特厚煤层沿空掘巷围岩支卸协同控制技术[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(2): 45-51.
LI H M, WANG W Q, WANG Z G, et al. Surrounding rock control technology with synergetic support and pressure relief for gob-side entry driving in extra-thick coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(2): 45-51.
- [40] 黄鹏程. 抗剪锚管索力学性能及其支护机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
HUANG P C. Study on mechanical properties and supporting mechanism of anchor cable with c-shaped tub [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2022.
- [41] 方运买, 李进宝. 锚索支护密度影响下煤矿巷道稳定性分析[J]. *煤炭技术*, 2024, 43(5): 18-23.
FANG Y M, LI J B. Anchor rope supporting density under the influence of coal mine roadway stability analysis[J]. *Coal Technology*, 2024, 43(5): 18-23.
- [42] 殷小亮, 张艳博, 钟科, 等. 浅埋大跨度隧道预应力锚杆锚固参数及支护设计研究[J]. *金属矿山*, 2023(2): 58-66.
YIN X L, ZHANG Y B, ZHONG K, et al. Research on anchorage parameters and support design of prestressed anchors in shallow buried large span tunnels[J]. *Metal Mine*, 2023(2): 58-66.
- [43] 崔国宏, 吴宇, 尹嘉帝, 等. 相邻工作面采动影响下小煤柱巷道围岩应力时空演化特征研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(7): 76-81.
CUI G H, WU Y, YIN J D, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of surrounding rock stress in small coal pillar roadway under influence of adjacent working face mining[J]. *Coal Technology*, 2019, 42(7): 76-81.
- [44] WU S, ZHANG J, SONG Z, et al. Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(11): 3763-3789.
- [45] 杨依卓, 张百胜, 郭俊庆, 等. 综放工作面小煤柱动压巷道切顶卸压-锚注加固协同控制技术研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(3): 27-32.
YANG Y Z, ZHANG B S, GUO J Q, et al. Research on collaborative control technology of cutting top pressure relief and anchor reinforcement of small coal pillar roadway on comprehensive discharge face[J]. *Coal Technology*, 2019, 42(3): 27-32.
- [46] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 裂隙岩体注浆理论研究成果及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 112-126.
HU S Y, LIU Q S, LI S H, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 112-126.
- [47] 葛帅帅, 孙亮, 贺丽峰, 等. 综采坚硬顶板分段水力压裂卸压护巷技术研究[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(7): 165-173.
GE S S, SUN L, HE L F, et al. Investigation on the pressure relief and roadway support by segmented hydraulic fracturing technique in hard roof of fully mechanized mining[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(7): 165-173.
- [48] 石垚. 锚杆不同护表构件支护应力场分布规律试验研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(12): 134-140.
SHI Y. Experimental study on stress distribution law of different bolt surface protection components[J]. *Coal Engineering*, 2019, 55(12): 134-140.
- [49] 原贵阳, 高富强, 王涛, 等. 锚网-围岩接触面注浆充填预应力施加技术[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2222-2230.
YUAN G Y, GAO F Q, WANG T, et al. Prestress application technology of grouting filling at the contact surface of anchor net and surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5): 2222-2230.
- [50] 于健浩, 刘鹏亮, 崔锋. 高应力煤体小煤柱护巷围岩稳定性控制技术[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(12): 71-77.
YU J H, LIU P L, CUI F. Research on stability control technology of high stress coal body and small coal pillar for roadway protection[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(12): 71-77.
- [51] 陆银龙, 韩磊, 吴开智, 等. 特厚煤层沿空掘巷力源结构特征与围岩协同控制策略[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(2): 238-249.
LU Y L, HAN L, WU K Z, et al. Characteristics of stress sources and comprehensive control strategies for surrounding rocks of gob-side driving entry in extra thick coal seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(2): 238-249.
- [52] 霍丙杰, 孟繁禄, 李天航, 等. 多层坚硬顶板特厚煤层综放工作面小煤柱护巷技术[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 13-23.
HUO B J, MENG F L, LI T H, et al. Technology of small coal pillar in full-mechanized caving face with multi-layer hard roof and extremely thick coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 13-23.
- [53] 张广辉, 蒋军军, 邓志刚, 等. 双巷掘进留小煤柱护巷下深浅孔组合爆破卸压技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 33-40.
ZHANG G H, JIANG J J, DENG Z G, et al. Research on pressure relief technology of combined blasting of deep and shallow holes under double roadway with small coal pillar[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 33-40.
- [54] 徐佑林, 吴旭坤, 周波, 等. 煤矿巷道再造高强度承载结构快速支护技术及工程应用[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(2): 34-48.
XU Y L, WU X K, ZHOU B, et al. Rapid support technology and engineering application of roadway reconstruction high strength bearing structure in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 52(2): 34-48.
- [55] 吴少康, 郑伟, 吴旭坤, 等. 断层影响下巷道应力演化规律及围岩控制研究[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(4): 74-79.
WU S K, ZHENG W, WU X K, et al. Research on stress evolution law and surrounding rock control of roadway under the influence of fault[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(4): 74-79.
- [56] ZHANG B, LI Y, YANG X, et al. Influence of size and location of a pre-existing fracture on hydraulic fracture propagation path[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2023, 32(3), 321-333.
- [57] 李鹏, 姜关照, 李红. 某煤矿深部软岩巷道围岩破坏特征及控制技术研究[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(4): 58-64.
LI P, JIANG G Z, LI H. Study on failure characteristics and control technology of surrounding rock in deep soft rock roadway of a coal mine[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(4): 58-64.
- [58] WU H, JIA J, GONG M, et al. Optimization of relief hole blasting satisfying synergistic constraints of rock-breaking area and hole-bottom minimum burden[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 154: 106074.
- [59] 贺国庆, 陈俊智, 任春芳, 等. 基于流固耦合理论的含水巷道稳定性影响因素研究[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(4): 102-110.
HE G Q, CHEN J Z, REN C F, et al. Research on influencing factors of water-bearing roadway stability based on fluid-structure coupling theory[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(4): 102-110.

Review on Deformation Mechanism and Control Technology of Small Coal Pillar Working Face Roadway

GUO Fei¹, WU Shaokang², TANG Dongxu¹, JIAN Fengba¹, YANG Ruxin¹

1. Zhongtian Hechuang Energy Co. Ordos 017200, Inner Mongolia, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: With the increasing mining depth and intensity of coal resources, the stability problem of small coal pillar working faces has become increasingly prominent. This paper comprehensively analyzes the deformation mechanism of small coal pillar working faces and the corresponding treatment technologies. Regarding the deformation mechanism, the influences of mining stress, surrounding rock properties, and coal pillar size on roadway deformation are discussed in detail. The redistribution of stress due to mining results in stress concentration of the surrounding rock, and the weakness of the surrounding rock and the unreasonable coal pillar size further exacerbate the roadway deformation. As for the treatment technologies, the methods of strengthening support, optimizing coal pillar design, and grouting reinforcement are introduced. To enhance the load-bearing capacity of the roadway, combined support methods like anchor rods and anchor cables are mainly adopted for strengthening support. Through theoretical analysis and numerical simulation, the optimal coal pillar design can determine the reasonable coal pillar size and layout scheme. Grouting reinforcement can improve the physical and mechanical properties of the surrounding rock and boost its stability. Meanwhile, the study also indicates that in practical applications, a variety of treatment technologies should be comprehensively utilized according to specific geological and mining conditions to achieve the best treatment effect. However, there are still some deficiencies in the current research. For example, the prediction accuracy of roadway deformation in small coal pillar working faces under complex geological conditions needs to be enhanced, and the cost-benefit analysis of treatment technologies is not flawless. Future research requires further in-depth exploration to better ensure the safe production and efficient mining of coal mines.

Keywords: small pillars of coal; deformation mechanism; mining stress; grouting reinforcement; carrying capacity

引用格式: 郭飞, 吴少康, 唐东旭, 简丰坝, 杨如欣. 小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究综述[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(2): 53–63.

GUO Fei, WU Shaokang, TANG Dongxu, JIAN Fengba, YANG Ruxin. Review on deformation mechanism and control technology of small coal pillar working face roadway[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 53–63.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn