深部开采条件下煤矿采掘应力分布规律与安全控制技术

胡国辉¹, 张喜峰²

1. 陕西延长石油榆林可可盖煤业有限公司, 陕西 榆林 719000

2. 陕西延长石油集团横山魏墙煤业有限公司, 陕西 榆林 719000

摘 要 : 随着煤炭资源的不断开采, 浅部煤炭资源逐渐减少, 深部开采成为必然趋势。陕北地区煤炭资源丰富, 深部开采也在逐步推进。本文旨在研究深部开采条件下煤矿采掘应力分布规律, 并提出有效的安全控制技术。通过理论分析、数值模拟等方法, 深入探讨了原岩应力、采动应力的分布特征以及影响因素, 同时对安全控制技术进行了详细阐述, 包括巷道支护、开采顺序优化等, 为陕北地区深部煤矿的安全高效开采提供理论依据和技术支持。

关 键 词 : 深部开采; 采掘应力; 分布规律; 安全控制技术; 陕北地区

Study on Stress Distribution Law and Safety Control Technology of Coal Mining under Deep Mining Conditions

Hu Guohui¹, Zhang Xifeng²

1. Shaanxi Yanchang Petroleum Yulin Kekegai Coal Industry Co., Ltd. Yulin, Shaanxi 719000

2. Shaanxi Yanchang Petroleum Group Hengshan Weiqiang Coal Industry Co., Ltd. Yulin, Shaanxi 719000

Abstract : With the continuous exploitation of coal resources, shallow coal resources are gradually decreasing, making deep mining an inevitable trend. Northern Shaanxi is rich in coal resources, and deep mining is gradually being promoted in this region. This paper aims to study the stress distribution law of coal mining under deep mining conditions and propose effective safety control technologies. Through theoretical analysis and numerical simulation, the distribution characteristics and influencing factors of in-situ stress and mining-induced stress are deeply explored. At the same time, safety control technologies are elaborated, including roadway support and optimization of mining sequence, providing a theoretical basis and technical support for safe and efficient deep coal mining in Northern Shaanxi.

Keywords : deep mining; mining stress; distribution law; safety control technology; northern Shaanxi region

引言

煤炭作为我国重要的能源资源, 在当前能源结构中占据着举足轻重的地位。陕北地区凭借丰富的煤炭储量, 成为我国极为重要的煤炭生产基地之一。但随着浅部煤炭资源历经长期开采, 逐渐走向枯竭, 深部开采已成为保障煤炭稳定供应的关键途径。然而, 深部开采面临着高地应力、复杂地质条件等诸多挑战, 采掘应力分布规律复杂, 容易引发一系列安全问题, 如巷道变形、冲击地压等。因此, 深入研究深部开采条件下煤矿采掘应力分布规律, 并提出切实有效的安全控制技术, 对于保障陕北地区深部煤矿安全生产、提高煤炭开采效率, 具有不可忽视的重要现实意义。

一、深部开采相关理论基础

在深入探究陕北地区深部煤矿采掘应力分布规律与安全控制技术前, 需先夯实理论根基。原岩应力和采动应力是影响煤矿开采安全与效率的关键因素。本章节将详细阐述原岩应力的构成, 包括自重应力和构造应力, 以及采动应力在巷道开挖和采煤工作面回采时的变化, 为后续研究筑牢基础。

(一) 原岩应力

原岩应力是指存在于地层中未受工程扰动的天然应力, 原岩

应力包括自重应力、构造应力、膨胀应力、地热应力等, 其中自重应力及构造应力为组成原岩应力场的主要部分^[1]。在陕北地区, 由于其复杂的地质构造运动, 原岩应力分布较为复杂。

自重应力是由上覆岩层的重力引起的, 其计算公式为: $\sigma_v = \gamma h$, 其中 σ_v 为垂直方向的自重应力, γ 为上覆岩层的平均容重, 25kN/m^3 为深度。根据陕北地区的地质资料, 上覆岩层平均容重约为 h 。随着开采深度的增加, 自重应力呈线性增加。例如, 当开采深度为 1000m 时, 自重应力 $\sigma_v = 25 \times 1000 = 25000\text{kPa} = 25\text{MPa}$ 构造应力在构造形成后的千百年内已经得到充分释放, 因此研究中

认为构造应力为 $0^{[2]}$ 。然而,构造应力实际上是因地壳运动和地质构造作用而产生的应力。就拿陕北地区来说,该区域历经了多期构造运动,这使得构造应力在原岩应力中占据着重要比重。

构造应力的方向和大小在不同区域有很大差别。其分布受褶皱、断层等地质构造的影响显著。通常情况下,在断层附近,由于岩石的连续性被破坏,应力容易集中;在褶皱轴部,岩层变形强烈,同样会出现构造应力集中的现象。这些区域构造应力的集中,极有可能引起原岩应力场的显著变化,对煤矿开采等地下工程活动产生不可忽视的影响。

(二)采动应力

采动应力是指在煤炭开采过程中,由于采掘活动破坏了原岩应力的平衡状态,在采掘空间周围引起的应力重新分布。

当巷道开挖后,巷道周围的煤岩体应力发生变化,形成应力集中区和应力降低区。在巷道周边一定范围内,应力集中系数可达 $2\sim 3^{[9]}$ 。例如,采用数值模拟软件对陕北某深部煤矿巷道开挖进行模拟,结果显示在巷道顶角处应力集中最为明显,应力集中系数达到 2.5 左右。随着距离巷道壁的距离增加,应力逐渐恢复到原岩应力水平。

采煤工作面回采过程中,采场周围的应力分布更为复杂。在工作面前方,存在超前支承压力,其峰值位置一般在工作面前方 $10\sim 30\text{m}$ 范围内,峰值应力可达原岩应力的 3 倍 ~ 5 倍。在工作面后方,随着采空区的形成,顶板垮落,应力逐渐降低,但在采空区边缘仍存在一定的应力集中。

二、陕北地区深部开采条件下煤矿采掘应力分布规律

了解陕北地区深部煤矿采掘应力的分布规律,对保障开采安全和提高效率至关重要。本章节将基于实际测量数据,分析原岩应力随深度和地质构造的变化情况,以及采动应力在巷道掘进和采煤工作面回采过程中的动态分布,揭示应力分布的内在规律。

(一)原岩应力分布规律

科研人员对陕北地区多个深部煤矿展开了全面且深入的地质应力测量工作,并对获取的数据进行了细致分析。研究发现,随着开采深度不断增加,垂直应力和水平应力都呈现出增大的趋势。不过,两者的比值在不同区域存在明显差异。在构造相对简单、地层较为规则的区域,水平应力与垂直应力的比值通常处于 $0.8\sim 1.2$ 之间,并且随着深度的持续加深,该比值会逐渐趋近于 $1^{[4]}$ 。然而,在构造复杂的区域,像存在大型断层、褶皱的地方,情况则大不相同,水平应力与垂直应力的比值可能大于 1.5 ,这充分表明构造应力对原岩应力场的影响十分显著。

整体来看,陕北地区深部煤矿的原岩应力与开采深度呈现出线性增长关系。通过大量实测数据统计可知,深度每增加 100m ,原岩应力大约会增加 $2.5\sim 3.5\text{MPa}$ 。在这个过程中,垂直应力的增加速率相对稳定,而水平应力的增加速率在不同区域会有细微差别,这主要是因为其受地质构造的影响较大,地质构造的复杂程度直接左右着水平应力的变化情况。

(二)采动应力分布规律

在巷道掘进过程中,巷道周围煤岩体的应力分布随掘进距离

的增加而不断变化。在掘进头前方,应力集中区域逐渐向前移动,且应力集中程度逐渐增大。当掘进头距离已掘巷道一定距离后,应力集中区域和应力降低区域的范围基本稳定^[5]。在巷道两帮和顶板,应力集中系数在巷道掘进初期增长较快,之后逐渐趋于稳定。

采煤工作面回采过程中,采场周围的应力分布呈现动态变化。在工作面前方,超前支承压力随着工作面的推进而向前移动,其峰值应力和影响范围也在不断变化。在工作面推进初期,超前支承压力峰值较小,影响范围较窄;随着工作面的持续推进,峰值应力逐渐增大,影响范围逐渐扩大。在工作面后方,采空区顶板垮落后,形成了应力降低区,但在采空区边缘存在侧向支撑压力,其大小和范围与顶板垮落情况、煤柱尺寸等因素有关。

三、影响采掘应力分布的因素

采掘应力分布受多种因素影响,明确这些因素对制定有效控制策略意义重大。本章节从地质构造和开采技术两个方面展开探讨,分析断层、褶皱等地质构造如何改变应力分布,以及巷道布置和开采顺序等开采技术因素对采掘应力的影响机制。

(一)地质构造因素

断层是影响采掘应力分布的重要地质构造。在煤矿开采中,断层附近的原岩应力场会发生明显畸变,致使应力集中现象十分突出。当巷道或采煤工作面逐渐靠近断层时,问题会进一步加剧^[6]。这是因为断层带的岩体破碎,其内部结构松散,强度远低于正常岩体,无法有效分散应力。因此,在这种情况下,应力集中程度会急剧上升,大大增加了巷道变形和破坏的风险。一旦巷道出现变形,不仅会影响正常的通风、运输等工作,还可能威胁到作业人员的生命安全。

褶皱构造同样对采掘应力分布有着显著影响。在褶皱轴部,岩层经历了强烈的挤压和拉伸作用,内部应力高度集中。当采煤工作面在褶皱轴部附近回采时,顶板所受压力不均衡,极易发生顶板垮落事故;煤壁也因应力集中变得不稳定,容易出现片帮现象^[7]。而且,褶皱的形态和规模不同,应力分布的范围和程度也有所差异。大型紧闭褶皱相较于小型开阔褶皱,其应力集中范围更广、程度更高,对采掘工作的危害也就更大。

(二)开采技术因素

巷道的布置方式对采掘应力分布有重要影响。合理的巷道布置可以减少应力集中,降低巷道维护难度。例如,采用沿空掘巷技术时,巷道布置在采空区边缘,由于采空区的应力已经得到释放,巷道所受的应力相对较小。但如果沿空掘巷的位置选择不当,如距离采空区太近或太远,可能会导致巷道处于应力集中区域,增加巷道变形的风险^[8]。

开采顺序的不同会导致采动应力的叠加和转移情况不同。合理的开采顺序可以使采动应力得到有效释放,避免应力集中。例如,采用下行式开采顺序时,先开采上部煤层,使上部煤层开采后形成的应力降低对下部煤层的开采产生有利影响,降低下部煤

层开采时的应力集中程度。相反,如果采用不合理的开采顺序,如上行式开采,可能会导致下部煤层开采时受到上部煤层采动应力的叠加影响,增加开采难度和安全风险。

四、深部开采条件下煤矿安全控制技术

针对陕北地区深部煤矿采掘应力分布规律及影响因素,必须制定切实可行的安全控制技术。本章节将着重介绍巷道支护技术,包括锚杆锚索支护和联合支护;优化开采顺序的方法;以及应力监测与预警技术,为煤矿安全生产提供有力保障。

(一) 巷道支护技术

锚杆锚索支护在深部煤矿巷道支护中应用广泛。锚杆通过特殊的锚固方式牢牢扎根于煤岩体内部,将巷道周边相对破碎、稳定性欠佳的煤岩体,与深部坚实稳定的岩体紧密相连,从而构建起一个协同工作的承载结构,有效提升煤岩体的整体强度与稳定性。锚索凭借其强大的锚固力以及较长的长度,在应对深部高应力巷道时优势显著,成为此类巷道支护的得力手段^[9]。以陕北地区深部煤矿为例,需依据巷道围岩的岩性、完整性等条件,以及所受应力的方向、大小、方向等情况,科学合理地确定锚杆锚索的规格尺寸与布置参数。

在深部复杂地质条件下,单一的支护形式往往力不从心。联合支护技术应运而生,像锚网喷联合支护,先均匀喷射混凝土,将巷道围岩表面严密封闭,有效阻挡围岩风化,抑制膨胀现象。接着铺设金属网,增强防护能力,最后安装锚杆实现稳固锚固,形成稳固的整体支护结构。在地质条件极为复杂的巷道,还可采用锚网喷索+U型钢支架的联合支护方式,进一步强化支护强度,确保巷道安全稳定。

(二) 开采顺序优化

在煤矿开采作业中,根据煤层赋存条件和地质构造情况来合理安排采煤工作面的开采顺序至关重要。尤其是在多煤层开采的情况下,优先开采保护层是极为关键的举措。保护层开采能够有效释放被保护层的瓦斯压力和地应力,这一过程是基于开采保护层后,被保护层周围的应力场重新分布,瓦斯得以逸散,从而大大降低了被保护层开采时的安全风险,减少瓦斯突出、冲击地压等事故发生的可能性^[10]。

对于深部煤矿中地质条件复杂、应力分布不均匀的区域,采

用分区开采的方法是保障开采安全与效率的有效手段。具体做法是将开采区域细致划分为不同的小区块,针对每个区块独特的应力特点和地质条件,量身定制相应的开采方案和安全措施。比如在应力集中区域,采取适当减小开采强度的策略,避免因过度开采引发应力突变,同时增加支护强度,提升巷道和采煤工作面的稳定性;而在应力相对较低的区域,则可提高开采效率,充分利用有利条件,最终实现整个开采过程的安全高效。

(三) 应力监测与预警技术

在深部煤矿开采过程中,建立一套完善的应力监测系统是保障安全生产的关键环节。通过这一系统,能够实时、精准地监测采掘空间周围的应力变化情况。具体而言,采用钻孔应力计、锚杆应力计等专业监测设备,对巷道和采煤工作面周围的应力进行全方位、不间断地监测。这些设备能够收集到应力变化的详细数据,并及时传输反馈。

依据收集到的监测数据,结合现场的实际地质条件、开采进度等情况,科学合理地确定应力预警指标。当监测到的应力值超出预警指标时,系统会迅速、及时地发出预警信号。例如,一旦超前支承压力峰值达到原岩应力的3.5倍,此时便立即启动预警机制。相应地,马上停止采煤作业,防止因继续开采导致应力进一步增大引发危险。同时,迅速加强巷道和采煤工作面的支护,提高其承载能力,并且采取卸压措施,释放集中应力,以此有效防止冲击地压等重大事故的发生。

五、结束语

本文通过对陕北地区深部开采条件下煤矿采掘应力分布规律的研究,得出以下结论:原岩应力中,垂直应力和水平应力随深度增加而增大,水平应力与垂直应力的比值在不同地质构造区域存在差异;采动应力在巷道掘进和采煤工作面回采过程中呈现出复杂的分布特征,且受地质构造和开采技术等因素的影响。针对这些应力分布规律,提出了相应的安全控制技术,包括巷道支护技术、开采顺序优化和应力监测与预警技术等。这些研究成果对于指导陕北地区深部煤矿的安全高效开采具有重要意义,同时也为其他地区深部煤矿开采提供了参考。在未来的研究中,还需要进一步深入研究深部开采过程中应力的动态变化规律,不断完善安全控制技术,以应对深部开采面临的更多挑战。

参考文献

- [1] 周涛, 宁琛瑶, 王琛, 等. 地表山体对煤层原岩应力场分布规律的影响[J]. 煤炭技术, 2014, 33(05): 141-144. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2014.05.053.
- [2] 李佳琳. 管道通过煤矿采掘空化区的应力分析与措施研究[J]. 石化技术, 2020, 27(02): 3-5+185.
- [3] 魏跃东. 煤矿地质构造分析在沙坪煤矿安全生产中的应用[J]. 煤炭工程, 2018, 50(S1): 107-109.
- [4] 蒋金泉, 李小裕, 张培鹏, 等. 复杂采动条件下煤矿巷道围岩稳定性研究[J]. 中国煤炭, 2018, 44(09): 43-48+53. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2018.09.008.
- [5] 刘忠, 张聪, 彭鹤, 等. 煤矿采掘区煤层气开发规律及模式探讨[J]. 中国煤层气, 2014, 11(01): 8-11.
- [6] 陕西陕北矿业有限责任公司韩家湾煤矿[C]/中国煤炭工业安全高效矿井建设年度报告(2010). [出版者不详], 2011: 2.
- [7] 胡亚伟. 煤层采掘应力路径下断层活化过程的力-声-变-形演化规律实验研究[D]. 中国矿业大学, 2020.
- [8] 廉常军. 四川煤矿迎采掘巷护巷煤柱宽度及围岩控制技术研究[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2014.
- [9] 王子锐. 锦瑞煤矿迎采掘巷围岩应力演化规律及控制[D]. 陕西: 西安科技大学, 2022.
- [10] 刘全. 煤矿区域应力场的分布特征及其对冲击地压的影响[D]. 中国矿业大学, 2021.