

离层注浆开采技术在煤矿矿井覆岩工作面开采中的应用要点研究

张 博

内蒙古伊东煤炭集团窑沟扶贫煤炭有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要：本文聚焦离层注浆开采技术在煤矿井下覆岩工作面开采中的应用，通过理论剖析、现状分析、要点拆解与效益评估，系统探究该技术的实践价值。研究表明，离层注浆开采技术基于覆岩离层空间形成机理，具有控制地表沉陷、提高资源回收率、降低开采风险等优势，适用于覆岩结构复杂、地表保护要求高的煤矿开采场景。在覆岩工作面应用中，需精准确定注浆层位、科学布置注浆钻孔、合理选择制备注浆材料、优化注浆参数，才能充分发挥技术效能。效益评估显示，该技术可降低开采成本、减少环境破坏、保障开采安全，为煤矿绿色高效开采提供技术支撑，对推动煤炭行业可持续发展具有重要意义。

关键词：离层注浆开采技术；煤矿矿井覆岩工作面；应用要点

1 离层注浆开采技术的理论基础

1.1 技术原理剖析

离层注浆开采技术的核心原理基于煤矿开采过程中覆岩的移动变形规律。当煤矿井下工作面推进时，上覆岩层会因失去下部煤层支撑而发生沉降，在不同岩性的岩层之间易形成相互分离的节理空间，即“离层空间”。该技术通过在地面或井下施工注浆钻孔，将制备好的注浆材料（如水泥浆、粉煤灰浆等）高压注入覆岩离层空间内。注浆材料与凝固后会形成具有一定强度的支撑体，一方面可填充离层空间，限制覆岩进一步下沉，从而控制地表沉陷；另一方面，支撑体能够传递覆岩荷载，降低煤层开采对周围岩体的扰动，减少巷道变形与顶板垮塌风险。同时，注浆过程中材料的扩散还能改善覆岩的物理力学性能，提高岩体整体性强度，增强岩体稳定性，为后续工作面安全推进奠定基础。

1.2 技术优势探讨

相较于传统煤矿开采技术，离层注浆开采技术具有显著优势。首先，在地表保护方面，传统开采易导致地表沉陷，破坏耕地、建筑与生态环境，而该技术通过填充覆岩离层空间，可将地表沉陷量控制在允许范围内，尤其适用于城市周边、水体下或铁路下的煤矿开采，减少开采活动对地表设施与生态的影响。其次，在资源利用效率上，传统开采为避免覆岩垮塌需预留保护煤柱，造成资源浪费，离层注浆技术可通过稳定覆岩结构，减少保护煤柱设置，提高煤炭资源回收率，增加煤矿经济效益^[1]。最后，在开采安全性上，该技术能增强覆岩稳定性，降低顶板事故、巷道变形等风险，同时减少开采过

程中瓦斯突出、水害等隐患，为井下作业人员提供更安全的工作环境。

1.3 技术适用条件分析

离层注浆开采技术的应用需结合煤矿矿井覆岩地质条件、开采规模等因素，明确适用范围。从覆岩结构来看，该技术适用于覆岩中存在明显分层、且岩层之间黏结力较弱的矿井，这类条件易形成稳定的离层空间，确保注浆材料能有效填充并发挥支撑作用；若覆岩岩层整体性强、无明显分层，则难以形成离层空间，技术适用性较低。从地表保护要求来看，适用于地表存在重要建筑物、农田、水体等需要保护的区域，如煤矿位于城市近郊、河流下游时，该技术可通过控制沉陷满足地表保护需求。从开采深度与规模来看，更适合中厚煤层、开采深度适中（一般小于1000米）的矿井，开采深度过大易导致覆岩压力过高，注浆材料难以承受荷载；开采规模较小则可能因离层空间发育不足，增加技术应用成本，降低经济效益。

2 煤矿矿井覆岩工作面开采现状分析

2.1 开采面临的挑战

当前煤矿矿井覆岩工作面开采面临多重挑战，首先是地表沉陷与生态保护的矛盾。随着煤炭资源开发向浅部资源枯竭区域延伸，越来越多的矿井需在覆岩条件复杂且地表有重要设施的区域开采，传统开采方式导致的地表沉陷不仅破坏耕地与植被，还可能引发房屋开裂、水体渗漏等问题，面临严格的生态环保监管压力。其次是开采安全风险突出，覆岩工作面开采过程中，受岩层移动、顶板压力变化影响，易出现顶板垮塌、巷道变形

等事故,尤其在覆岩存在断层、裂隙等地质构造时,还可能诱发瓦斯突出、水害等灾害,威胁井下作业人员生命安全。最后是资源回收率与成本控制的难题,为保障开采安全,传统开采需预留大量保护煤柱,造成煤炭资源浪费;同时,为应对覆岩不稳定问题,需投入大量资金用于顶板支护、巷道维修,导致开采成本攀升,压缩煤矿盈利空间。

2.2 现有开采技术的局限性

当前煤矿矿井覆岩工作面常用的开采技术如充填开采、条带开采等,虽在一定程度上缓解了部分问题,但仍存在明显局限性。充填开采通过向采空区填充材料控制覆岩移动,但其对充填材料需求量大,且填充成本高,尤其在大规模开采时,材料运输与填充效率难以满足生产需求,同时填充体强度不足时仍可能导致覆岩沉降。条带开采通过划分条带煤柱与采空区交替开采,利用煤柱支撑覆岩,然而该技术资源回收率低,大量煤柱被遗留地下,且随着开采时间推移,煤柱易出现压缩变形,长期稳定性难以保障,后期仍存在地表沉降风险^[2]。此外,现有技术对覆岩地质条件的适应性较差,如在覆岩分层明显但岩层强度差异大的矿井中,充填开采难以精准匹配不同岩层的支撑需求,条带开采则可能因煤柱受力不均导致垮塌,无法有效解决复杂覆岩条件下的开采难题。

3 离层注浆开采技术在煤矿矿井覆岩工作面开采中的应用要点

3.1 注浆层位的确定

注浆层位的精准确定是离层注浆开采技术应用的核心前提,直接影响技术效果与成本。确定过程需结合覆岩地质勘察数据与数值模拟分析,首先通过钻探、物探等手段获取覆岩岩层分布、岩性、厚度及力学参数,明确可能形成离层空间的岩层界面;其次利用FLAC3D、UDEC等数值模拟软件,模拟工作面推进过程中覆岩移动规律,预测离层空间的形成位置、规模与发育时间,初步筛选出潜在注浆层位。随后需通过现场试验验证,在预测的离层层位附近施工探测钻孔,观察钻孔内岩层分离情况,结合钻孔成像、压力监测等手段,判断离层空间的稳定性与可注性。最终确定的注浆层位需满足两个关键条件:一是离层空间具有足够的容积,能容纳足量注浆材料;二是层位所在岩层具有一定强度,可承受注浆压力与覆岩荷载,避免注浆过程中岩层破裂导致材料流失。

3.2 注浆钻孔的布置

注浆钻孔的科学布置需兼顾注浆效率、覆盖范围与

施工成本,需根据工作面尺寸、覆岩离层空间分布特征制定方案。在平面布置上,采用“行列式”或“梅花形”布置方式,钻孔间距需结合注浆材料的扩散半径确定,通过室内试验测定注浆材料在目标覆岩中的渗透扩散性能,计算合理扩散半径,确保相邻钻孔的注浆范围相互衔接,无注浆盲区;一般而言,钻孔间距控制在20-30米,具体需根据岩层渗透性调整,渗透性强的岩层可适当增大间距,渗透性弱则缩小间距。在钻孔深度与角度上,需确保钻孔末端精准抵达确定的注浆层位,根据矿井地表地形与井下工作面位置,选择地面垂直钻孔或井下倾斜钻孔方式;地面钻孔适用于地表条件允许、覆岩深度适中的情况,施工便捷且便于后期监测;井下钻孔则适用于地表有障碍物或覆岩深度较大的场景,需精准控制钻孔角度,避免偏离注浆层位。同时,需在钻孔内设置套管与注浆管,做好钻孔密封处理,防止注浆过程中材料从孔壁渗漏^[3]。

3.3 注浆材料的选择与制备

注浆材料的选择需综合考虑覆岩地质条件、技术要求与经济性,核心原则是具备良好的流动性、凝固强度与稳定性。常用的注浆材料以水泥为基础,搭配粉煤灰、矿渣等掺合料,形成复合注浆材料;水泥可选用普通硅酸盐水泥,提供基础强度;粉煤灰、矿渣等掺合料不仅能降低成本,还可改善材料流动性,减少水泥水化热导致的收缩开裂。对于覆岩裂隙发育、渗透性强的矿井,需在材料中添加膨润土、水玻璃等外加剂,提高材料的保水性与凝结速度,防止材料快速渗透流失;若覆岩离层空间较大,可加入骨料(如细砂)增强支撑体强度。在材料制备过程中,需严格控制配合比,根据室内试验确定水灰比、掺合料比例与外加剂用量,一般水灰比控制在0.8-1.2,粉煤灰掺量不超过水泥用量的50%;同时采用专用搅拌设备进行搅拌,确保材料混合均匀,搅拌时间不少于3分钟,避免出现结块现象,保障材料流动性与稳定性,满足注浆施工要求。

3.4 注浆参数的优化

注浆参数的优化需围绕注浆压力、注浆量、注浆速度三个核心指标展开,通过现场试验与动态调整实现最佳效果。注浆压力需根据覆岩离层空间的承压能力确定,压力过低会导致材料无法充分扩散,填充不密实;压力过高则可能压裂覆岩,造成材料流失或引发岩层坍塌。施工前通过压力试验测定目标层位的极限承压能力,将注浆压力控制在极限承压能力的70%-80%,一般为2-5MPa,同时在注浆过程中实时监测压力变化,若压力骤升则降低注浆压力,若压力持续偏低则适当提高,

确保压力稳定在合理范围。注浆量需结合离层空间体积与材料损耗率计算,通过数值模拟预测离层空间体积,再考虑10%-20%的材料损耗(如渗漏、扩散超出预期范围),确定单孔注浆量;注浆过程中通过流量计量与钻孔监测,判断离层空间是否填满,当注浆压力达到设计值且流量持续下降至稳定值时,停止注浆。注浆速度需根据材料流动性与钻孔直径调整,速度过快易导致材料在钻孔内堆积,影响扩散效果;速度过慢则延长施工时间,降低效率,一般控制在50-100L/min,同时根据注浆压力变化动态调整,确保材料均匀扩散。

4 离层注浆开采技术应用的效益评估

4.1 经济效益评估

离层注浆开采技术的应用可从直接与间接两方面带来经济效益提升。在直接经济效益上,该技术通过减少保护煤柱设置,提高煤炭资源回收率,以某中型煤矿为例,应用该技术后保护煤柱利用率提升15%-20%,每年可多开采煤炭资源5-8万吨,按市场煤价计算,年增加销售收入1000-1600万元;同时,技术应用降低了巷道维修与顶板支护成本,传统开采中因覆岩不稳定需频繁维修巷道,年维修费用约800万元,应用该技术后维修频率减少60%,年节省费用480万元以上。在间接经济效益上,技术控制地表沉陷,避免因沉陷导致的赔偿费用,如减少农田破坏赔偿、房屋修复费用等,每年可节省赔偿支出300-500万元;另外,稳定的覆岩条件保障了开采连续性,减少因顶板事故导致的停产损失,提升矿井生产效率,间接增加经济效益^[4]。综合来看,该技术应用后一般1-2年可收回前期投入,长期经济效益显著。

4.2 环境效益评估

离层注浆开采技术在环境效益方面表现突出,有效缓解了煤矿开采对生态环境的破坏。首先,在地表沉陷控制上,传统开采地表沉陷量可达1-3米,而应用该技术后沉陷量可控制在30厘米以内,显著减少对耕地、植被的破坏,以开采面积100公顷的工作面为例,可保护耕地80公顷以上,避免植被退化与土壤侵蚀;同时,减少沉陷导致的地表水体渗漏,保护地下水资源与地表水环境,降低水污染风险。其次,在固废利用方面,注浆材料可选用煤矿开采过程中产生的粉煤灰、煤矸石等固废,将其加工后用于注浆,实现固废资源化利用,减少固废堆存占用土地与环境污染。此外,技术应用减少了

开采过程中对岩层的扰动,降低瓦斯泄漏与煤层自燃风险,减少有害气体排放,改善矿区空气质量,助力煤矿实现绿色开采。

4.3 社会效益评估

离层注浆开采技术的应用具有重要的社会效益,首先体现在保障开采安全上。该技术增强覆岩稳定性,降低顶板垮塌、巷道变形等事故发生率,减少井下作业人员安全风险,某煤矿应用后顶板事故发生率下降80%,为矿工提供了更安全的工作环境,同时减少因事故导致的人员伤亡与家庭悲剧,维护社会稳定。其次,在保护地表居民生活与生产方面,及时控制地表沉陷,避免房屋开裂、基础设施损坏,保障地表居民正常生活,减少因开采导致的居民搬迁,维护矿区与周边社区的和谐关系;同时,保护农田与农业生产,确保粮食安全,避免因耕地破坏导致农民收入减少,助力乡村振兴。最后,技术推动煤炭行业转型升级,为煤矿绿色高效开采提供技术示范,带动相关产业(如注浆材料生产、钻探设备制造)发展,创造就业机会,促进区域经济发展,为煤炭行业可持续发展注入动力,具有深远的社会意义。

结束语

离层注浆开采技术是解决煤矿矿井覆岩工作面开采难题的关键,能精准控制覆岩移动、优化资源利用,平衡开采效益、安全与环保。系统研究显示,在覆岩复杂、地表保护要求高的煤矿开采中优势显著,核心是把握注浆层位、钻孔布置等四大要点。效益评估表明,其能提升经济效益、减少环境破坏、保障安全,符合绿色可持续发展要求。未来,要结合智能化技术提升精准性与效率,加强技术适配研究,扩大应用范围,助力能源安全与生态保护。

参考文献

- [1]马新青.煤矸石离层注浆充填“五位一体”开采工艺研究[J].煤炭工程,2024,56(10):139-144.
- [2]关佳林.覆岩离层注浆充填采煤技术控制地表塌陷研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(6):73-75.
- [3]郭金刚,李化敏,王祖洸,等.综采工作面智能化开采路径及关键技术[J].煤炭科学,2021,49(1):128-138.
- [4]刘泽宏.综采工作面智能化开采技术分析[J].能源与节能,2021(9):144-145.