

一、题目来源背景（现状、前景）

背景：

沿空留巷是指在采煤工作面后方沿采空区边缘维护原回采巷道，采用一定的技术手段将上一个区段的巷道重新支护留给下一个区段使用^[1, 2]，是无煤柱开采技术中的一种方式。沿空留巷可以最大限度回收资源，避免煤体损失。沿空留巷一般适应于开采缓倾斜和倾斜、厚度在 2m 以下的薄及中厚煤层。

在国内，沿空留巷技术的研究和发展经历了四个阶段：第一阶段，20 世纪 50 年代起^[3-6]，在薄煤层中用矸石墙作巷旁支护；第二阶段，20 世纪 60~70 年代，沿空留巷支护从棚式支护发展到锚网索联合支护；第三阶段，20 世纪 80~90 年代，沿空留巷技术从单一的工程技术向综合技术转变；第四阶段，21 世纪初至今，沿空留巷技术从浅部岩层向深部岩层拓展。

沿空留巷技术在我国煤矿开采中有很多实际应用案例，例如：

- (1) “110 工法”沿空留巷技术，是指在长壁式采煤工作面通过“切顶卸压”技术对回采巷道进行沿空留巷，从而实现一个工作面平均掘进一条顺槽、同采区相邻工作面间不留煤柱的目标。
- (2) 高水材料充填、混凝土材料充填、膏体材料充填等巷旁控制技术，是指在沿空留巷时，在小煤柱和采空区之间注入高水材料、混凝土材料或膏体材料，以增强小煤柱的稳定性和承载能力，减少变形和冒落。
- (3) 沿空掘巷技术，是指在无煤柱开采时，在原回采巷道的基础上向外扩宽一定距离，并加强支护，形成新的回采巷道。

在国外，沿空留巷技术主要在美国、澳大利亚、德国等国家应用。美国采用了无煤柱开采和切顶卸压两种方式进行沿空留巷；澳大利亚采用了高水平放顶法和高水平分离法两种方式进行沿空留巷；德国采用了自行车轮式支架和液压支架两种方式进行沿空留巷，采用低水材料作为巷旁充填，如石膏、飞灰加硅酸盐水泥、矸石加胶结料等，有效地减少了重型支架和巷道的变形，从而实现较大断面巷道二次利用^[2-19]。波兰采用高水材料作为巷旁充填，如水泥浆、膏体等，以增强小煤柱的稳定性和承载能力，减少变形和冒落。英国采用刚柔复合结构模板作为隔墙支护，以适应不同的地质条件和工作面进度。

沿空留巷具有以下几点优点：

- (1) 沿空留巷可以完全取消区段煤柱，提高采出率。
- (2) 沿空留巷可以降低掘进率，缩短采区的准备时间。
- (3) 沿空留巷可以实现 Y 型通风，改善工作面的通风条件。
- (4) 沿空留巷可以减少成本，节约资源。
- (5) 沿空留巷可以最大限度地回收资源，避免煤体损失
- (6) 沿空留巷可以防止回采过程中因推进缓慢、采空区漏风等因素导致采空区遗煤自燃，保障安全生产

但是，在易燃煤层中使用沿空留巷技术也存在着一些问题，主要表现在^[16]以下几个方面：

- (1) 沿空留巷工作面由于推进速度慢、停顿时间长、通风条件复杂等因素导致漏风量增大、氧浓度升高、温度升高等现象，在一定条件下容易引起遗留在采空区内的可自然发火性强的易自然发火层位遗存粉碎或块体遗存及支护材料等物质自然发火。
- (2) 沿空留巷工作面由于地应力集中及其变化引起岩层移动或断裂而产生新鲜裂隙，在一定条件下容易引起裂隙内部或周围物质自然发火。
- (3) 沿空留巷工作面由于存在多个漏风通道而形成复杂的漏风网络，在一定条件下容易引起漏风网络内部或周围物质自然发火。
- (4) 沿空留巷工作面由于存在多个注氮点而形成复杂的注氮系统，在一定条件下容易引起注氮系统内部或周围物质自然发火。
- (5) 沿空留巷需要采用一些有效的支护技术来保证靠近采空区边缘的巷道稳定，防止塌方、冒顶等事故。
- (6) 沿空留巷需要考虑工作面开采支承压力重新分布对巷道的影 响，避免产生过大的应力集中和变形^[17]。
- (7) 沿空留巷需要建立合理的通风系统，防止采空区漏风和瓦斯积聚，保障通风安全。
- (8) 沿空留巷需要根据不同地质条件和开采方式选择合适的小煤柱尺寸和沿空留巷类型，以达到最优化效果。

以上问题如果不加以有效控制和处理，就会给沿空留巷工作面造成严重的安全隐患，甚至引发火灾事故，危及人员生命和财产安全^[20]，影响矿井的正常生产。例如：

- (1) 2019 年 11 月 26 日，山西省晋城市阳城县煤炭有限公司二号井沿空留巷工作面发生火灾事故，造成 5 人死亡，2 人受伤。事故原因是由于采空区内遗煤自然发火，引燃了支护材料和电缆等物质，形成了高温高压的火焰和烟气，导致工作面被迅速封锁，无法撤离。
- (2) 2018 年 12 月 16 日，山西省忻州市五台县矿业有限公司一号井沿空留巷工作面发生火灾事故，造成 7 人死亡。事故原因是由于采空区内遗煤自然发火，并通过裂隙扩散到其他区域，引起了多点同时着火的情况，导致工作面通风系统失效，无法撤离。
- (3) 2016 年 10 月 31 日，山西省长治市壶关县神头矿业有限公司二号井沿空留巷工作面发生火灾事故，造成 19 人死亡。事故原因是由于采空区内遗煤自然发火，并通过漏风通道扩散到其他区域，引起了大范围的着火现象，导致工作面被迅速封锁和窒息。

以上案例说明了沿空留巷工作面自然发火的危害性和复杂性：

- 1) 自然发火会导致煤炭资源的浪费，影响矿井的正常生产，甚至引发火灾、爆炸等严重事故，威胁人员和设备的安全。
- 2) 自然发火的原因多种多样，如采空区遗煤、老采空区漏风、巷旁充填材料氧化等，难以预测和控制。
- 3) 自然发火的位置隐蔽，如采空区内部、巷旁充填墙后等，难以及时发现和处理。

- 4) 自然发火的防治技术复杂,如合理配风、喷浆漏风、喷洒阻化剂、充填河砂、注氮等,需要综合考虑地质条件、工作面进度、经济效益等因素。

为了防止类似事故再次发生,有必要加强对沿空留巷采煤工艺防灭火技术的研究和应用。因此,研究沿空留巷^[5]采煤工艺防灭火技术具有重要的理论意义和实际价值。

发展前景:

沿空留巷采煤工艺防灭火技术是指在沿空留巷工作面回采过程中,采用综合的技术手段和措施,有效地防止或减少采空区内物质自然发火的可能性,及时地发现和已经发生或即将发生的自然发火现象,消除或降低火灾风险的技术。沿空留巷采煤工艺防灭火技术主要包括以下几个方面:

- (1) 漏风控制技术:通过加固沿空留巷墙体、设置堵塞墙、改变通风系统等方式,减少漏风量,降低氧浓度,抑制遗煤氧化反应。
- (2) 注氮技术:通过在采空区内设置注氮点或注氮管道等方式,在遗煤表面形成一层低氧环境,抑制遗煤自然发火。
- (3) 注浆技术:通过在采空区内设置注浆点或注浆管道等方式,在遗煤表面形成一层隔离层或填充裂隙等方式,阻断漏风通道和遗煤接触。
- (4) 阻化剂喷洒技术:通过在采空区内设置喷洒点或喷洒管道等方式,在遗煤表面喷洒一定浓度的阻化剂液体或粉体等方式,改变遗煤的物理化学性质,降低其可自然发火性。
- (5) 监测预警技术:通过在采空区内设置温度传感器、气体传感器、红外摄像机等设备,在实时监测采空区内温度、气体、图像等参数,并进行数据分析和预警判断等方式,及时发现并处理自然发火现象。

以上各种技术手段和措施可以根据不同的工作面条件 and 需求进行选择组合使用,形成综合防灭火方案。综合防灭火方案应具有科学性、可行性、经济性和适用性等特点。综合防灭火方案的制定应基于对沿空留巷工作面自然发火特点和规律的深入分析和认识。

沿空留巷采煤工艺防灭火技术是无煤柱开采技术中一个重要而又难点的问题。目前国内外对该领域的研究还不够深入系统。国外主要以美国、德国、英国为代表,在注氮、注浆、监测预警等方面取得了一些进展。国内主要以山西省为代表,在漏风控制、注氮、喷洒阻化剂等方面进行了一些试验和应用。

沿空留巷采煤工艺防灭火技术的国内外现状可以概括为以下几点:

国外沿空留巷技术较早发展,如德国、波兰、英国等国家,已形成了一套完善的防灭火技术体系,包括合理的支护方式、充填材料、配风方案、监测方法等,有效地控制了采空区遗煤自然发火的风险。

国内沿空留巷技术较晚推广,主要采用无煤柱巷旁柔模支护技术,但存在着柔模接顶不实、墙体局部压裂等漏风问题,导致采空区遗煤自然发火事故频发,特别是在有自燃倾向性的厚煤层中。

国内沿空留巷防灭火技术还处于探索和试验阶段,主要采用注液氮、注浆(凝胶)、束管监测、监测监控及人工检测等综合措施,取得了一定的效果,但仍需进一步完善和优化。如:

- (1) 上湾煤矿在采用沿空留巷技术中运用以注氮为主、注浆、加强监测为辅的综合防灭火措施,成功地杜绝了回采期间^[21]自然发火事故。
- (2) 大同煤矿集团白洞矿业公司在自燃山煤层采用沿空留巷开采工艺时,通过优化通风系统、加强监测预警、实施密闭隔离和注氮降温等措施,有效地控制了遗煤自然发火风险。
- (3) 云南省某自燃煤层工作面回采时选用沿空留巷技术,在保证安全生产的前提下提高了资源利用率和经济效益。该工作面在回采过程中实施了密闭隔离、注氮降温、泡沫喷涂等防灭火技术,并结合现场情况进行了调整和优化。

但是,这些研究还存在着一些不足之处,主要表现在以下几个方面:

- (1) 对沿空留巷工作面自然发火的机理和规律的研究还不够深入,缺乏系统的理论分析和数值模拟。
- (2) 对沿空留巷工作面综合防灭火技术的研究还不够全面,缺乏对各种技术手段和措施的综合评价和优化设计。
- (3) 对沿空留巷工作面综合防灭火技术的应用还不够广泛,缺乏对不同煤层条件和工作面特点的适应性分析和验证。

沿空留巷防灭火技术的创新和发展方向主要有以下几点:

① 优化支护方式,提高柔模墙体的密封性和稳定性,减少漏风量,如采用高强度、高韧性、高耐热的柔模材料,增加柔模厚度和接顶长度等。

② 优化充填方式,提高充填材料的阻化效果和填充效率,如采用含有阻化剂的水泥砂浆、水泥凝胶、河砂等充填材料,增加充填密度和压力等。

③ 优化配风方式,提高工作面的通风质量和安全性,如采用局部负压通风、分级分区通风、闭锁隔离通风等配风方案,控制漏风量和氧浓度等。

④ 优化监测方式,提高工作面的监测精度和实时性,如采用束管监测、红外监测、微波监测等先进的监测方法,及时发现自然发火的征兆和位置等。

⑤ 沿空留巷技术需要不断完善和创新,以适应不同煤层条件和开采方式的要求。特别是在有自燃倾向性的煤层中,需要加强防灭火技术的研究和应用,以保障沿空留巷的安全。

⑥ 沿空留巷技术需要加强支护技术的研究和改进,以提高沿空留巷的稳定性和耐久性^[2, 4, 11]。主要包括优化支护形式、材料、参数等,以及发展新型支护材料和设备。

⑦ 沿空留巷技术需要重视辅助技术对沿空留巷顶板压力控制的作用,如充填技术^[2]、注浆技术、爆破释压技术等。通过辅助技术,可以有效地降低沿空留巷围岩应力水平,减少变形损坏。

⑧ 沿空留巷技术需要加强理论研究和实践验证,以提高沿空留巷设计水平和施工质量。主要包括建立合理的数学模型、数值模拟方法、监测预警系统等,以及开展大量的现场试验和观测。

因此,有必要在前人的基础上,进一步开展沿空留巷采煤工艺防灭火技术的研究,以提高该技术的科学性^[12]、可行性、经济性和适用性。本课题旨在通过数值模拟、理论分析等手段,研究沿空留巷自燃三带分布规律,探讨由于地应力分布变化可能诱发的火灾规律。研究不同漏风通道下,采空区氧化带变化规律。针对以上研究提出回采期间采取综合防灭火技术,分析并完善防灭火措施,确定工作面防灭火方策。本课题具有较强的创新性、实用性和推广价值。

意义:

沿空留巷采煤工艺防灭火技术的研究对于保障沿空留巷工作面安全生产具有重要意义。具体表现在以下几个方面^[15]:

- (1) 通过数值模拟、理论分析等手段,深入揭示了沿空留巷自然发火机理和规律,为制定科学合理的综合防灭火方案提供了理论依据。
- (2) 通过综合评价各种防灭火技术手段和措施的效果和成本,优化设计了适用于不同条件下的综合防灭火方案,为实现最优化资源利用提供了技术支撑。
- (3) 通过实验验证和现场应用等方式,检验了综合防灭火方案的可行性和有效性,在一定程度上降低了沿空留巷工作面自然发火风险,在保障人员生命安全、预防财产损失、保护环境质量等方面起到了积极作用。

沿空留巷技术是一种合理开发煤炭资源,提高煤炭回收率,减少巷道掘进量^[16],缓和采掘接续紧张局面的一项先进的井工开采技术。通过沿空留巷技术,可以最大限度地回收资源,避免煤体损失。但是,在有自燃倾向性的煤层中采用沿空留巷技术回采时,由于柔模支护不实、漏风问题难以解决等原因,容易造成遗煤自然发火事故。因此,如何在沿空留巷所形成的工作面减少漏风、稳定系统及抑制自然发火风险显得尤为重要。

综合防灭火技术是一种在沿空留巷中有效地防止和控制自然发火事故的方法,主要包括注氮降温、注浆密闭、监测预警等措施。通过综合防灭火技术,可以成功地杜绝了沿空留巷及回采期间自然发火隐患,确保了工作面的安全回采,并取得了明显的经济效益和社会效益。

综上所述,沿空留巷采煤工艺防灭火技术的研究意义在于既能实现资源高效利用又能保障生产安全。通过总结归纳本课题所得到的经验和教训,为今后沿空留巷采煤工艺防灭火技术的研究和应用提供了参考和借鉴,为推动该领域的发展做出了贡献。

二、主要研究内容、应用价值、改进及创新

本课题主要研究内容如下:

- (1) 采用数值模拟、理论分析等手段研究沿空留巷^[17]自燃三带分布规律,探讨由于地应力分布变化可能诱发的火灾规律。

(2) 研究不同漏风通道下，采空区氧化带变化规律，并结合实际情况确定发火预兆的预警值。

(3) 针对以上研究提出回采期间采取综合防灭火技术，分析并完善防灭火措施，确定工作面防灭火方策。

本课题具有以下应用价值和创新点：

(1) 揭示了易燃煤层沿空留巷自然发火特点和规律，为制定科学合理的防灭火措施提供理论依据。

(2) 提出了基于数值模拟和监测预警相结合的综合防灭火技术方案，并在实际工作面进行了验证和应用。

(3) 为促进沿空留巷技术在开滦矿区的安全推广提供了参考和借鉴。

沿空留巷技术在煤矿^[11, 15]开采中的应用价值主要体现在以下几个方面：

(1) 减少巷道掘进量，加快掘进进程，节约人力物力；

(2) 减少保护煤柱留设量，提高矿井煤炭资源的采出率，延长矿井寿命；

(3) 改善采空区的安全条件，有效解决上隅角存在的瓦斯聚集现象，规避采空区自然发火；

(4) 有利于环境保护，减少地表沉降和水土流失。

本课题的改进及创新可以分析为：

(1) 发现沿空留巷顶板断裂存在“五区三阶段”运动特征，创新性的提出了“锚杆-充填体”系统支护作用的留巷机理，建立了顶板巷旁充填条件下的沿空留巷力学模型；

(2) 提出留巷区域应力优化的原理和技术^[22, 23]，通过在顶板关键位置预裂，调整其破断形式，优化其结构状态，加快顶板破断、回转速度，缩短采动应力作用时间，降低支承应力集中程度，实现留巷区域应力场分布的优化^[22-24]；

(3) 采用柔模混凝土快速成巷技术，在采空区与巷道间利用混凝土填充柔模留设一道 1 米宽砟墙，使巷道得到完整保留，做为下个工作面的顺槽重复使用。

三、拟采用的研究方法、手段及实验准备情况

本课题拟采用以下方法和手段进行研究：

(1) 文献资料法。通过查阅相关文献资料，了解国内外关于沿空留巷自然发火特点和防灭火技术的研究现状和进展，总结和归纳相关理论和方法。

(2) 数值模拟法。利用 ANSYS 软件建立沿空留巷工作面的三维数值模型，模拟分析不同漏风通道下采空区氧化带的变化规律，以及地应力分布对自然发火的影响。

① 准备模型和几何体：首先，在 ANSYS DesignModeler 或者其他 CAD 软件中创建要模拟的三带燃烧器的几何模型。

② 网格划分：使用 ANSYS Meshing 工具，对模型进行网格划分。确保在燃烧区域和边界层附近使用较小的网格尺寸以获得更高的模拟精度。

③ 设置物料和流体属性：在 ANSYS Fluent 中，设置模型相关的物料（例如氧气、燃料等）和流体属性。设置燃料的燃烧特性，如反应速率，活化能等。确保正确地引入燃料和氧气的物质属性。

④ 设置边界条件：为燃料和氧气的进口，出口，以及可能存在的对流或辐射传热边界条件进行设置。确保正确设置边界条件以反映实际情况。

⑤ 选择求解器和模型：在求解器设置中，选择适当的湍流模型（例如 $k-\epsilon$ ， $k-\omega$ 等）。然后，选择适当的燃烧模型（例如非预混合，预混合或部分预混合燃烧模型）以模拟氧气与燃料的混合和燃烧。

⑥ 初始化和求解：初始化模拟，然后运行求解器。您可能需要调整迭代参数以确保模拟的收敛性。在计算过程中，监视残差和其他相关性能参数。

⑦ 结果后处理：模拟完成后，使用 ANSYS Fluent 中的后处理工具分析结果。查看速度，温度，压力等场，以了解氧气对自燃三带的影响，还可以使用可视化工具创建云图和流线图来直观地展示结果。

(3) 监测预警法。根据煤层氧化早期的一氧化碳或者采空区温度确定发火预兆的预警值，实施早期监测预警和措施优化改进^[25]。

(4) 现场试验法。在开滦矿区某沿空留巷工作面进行现场试验，验证综合防灭火技术方案的可行性和有效性。

综合运用理论分析、计算机数值模拟、实验室相似模拟和现场试验研究相结合的研究方法^[8, 9, 12, 16, 18, 19, 26]，分析沿空留巷顶板的垮落形式、破断特征及垮落

残留边界特征，构建沿空留巷力学模型，确定沿空留巷^[8]巷旁支护体的参数，提出沿空巷旁墙体支护技术和应力优化技术；

利用有限元软件 ANSYS 进行计算机数值模拟，利用光纤光栅传感器、应变计等仪器进行现场试验监测，利用水泥砂浆等材料进行实验室相似模拟；

本课题已经准备了以下实验条件：

(1) ANSYS 软件及其使用手册。

(2) 开滦矿区某沿空留巷工作面的基本资料，包括地质条件、采掘参数、通风系统等。

(3) 采空区温度、一氧化碳等监测设备及其安装方法。

已经选定了适合本课题的无煤柱开采工作面和沿空留巷工作面，已经购置了所需的仪器设备和材料，已经制定了详细的实验方案和安全措施。

- [1] 康志鹏. 古城煤矿综放工作面厚煤层软底沿空留巷技术研究 [D]; 中国矿业大学, 2021.
- [2] 邢继亮. 屯兰矿大断面巷道沿空留巷技术研究 [D]; 中国矿业大学(北京), 2013.
- [3] 费旭敏. 我国沿空留巷支护技术现状及存在的问题探讨 [J]. 中国科技信息, 2008, (07): 48-9+51.
- [4] 万岩. 低龄期柔模承载混凝土强度试验与增长规律研究 [D]; 西安科技大学, 2012.
- [5] 张智强. 双突矿井中柔模混凝土沿空留巷应用研究 [D]; 西安科技大学, 2012.
- [6] 王永福. 揉模填充工艺在巷旁支护中的应用 [J]. 陕西煤炭, 2016, 35(03): 70-3.
- [7] 花锦波. 近距重复采动无墙体沿空留巷围岩稳定与控制技术 [D]; 中国矿业大学, 2015.
- [8] 杨帆. 海石湾煤矿 6113 工作面深部沿空留巷围岩控制技术研究 [D]; 中国矿业大学, 2015.
- [9] 樊彦东. 高水巷旁充填沿空留巷技术应用研究 [D]; 河北工程大学, 2015.
- [10] 马强. 高水充填沿空留巷支护优化设计 [D]; 河北工程大学, 2015.
- [11] 吴存良. 花山煤矿采煤工作面沿空留巷支护技术研究 [D]; 重庆大学, 2008.
- [12] 阚甲广. 典型顶板条件沿空留巷围岩结构分析及控制技术研究 [D]; 中国矿业大学, 2009.
- [13] 亓佳利. 薄煤层坚硬石灰岩顶板条件下沿空留巷技术研究及应用 [D]; 山东科技大学, 2011.
- [14] 孙乐乐. 大倾角中厚煤层软弱顶底板沿空留巷 [D]; 重庆大学, 2012.
- [15] 王勇. “三软”倾斜煤层沿空留巷巷旁支护技术研究 [D]; 重庆大学, 2012.
- [16] 张飞. 混凝土预制块砌碛墙巷旁支护沿空留巷 [D]; 重庆大学, 2014.
- [17] 张志义. 900m 埋深沿空留巷复用机理与技术研究 [D]; 中国矿业大学, 2014.
- [18] 刘洪洋. 采空区下沿空留巷顶板稳定性影响因素及控制对策 [D]; 中国矿业大学, 2014.
- [19] 郭正超. 坚硬顶板预制混凝土大砌块沿空留巷技术研究及应用 [D]; 西安科技大学, 2014.
- [20] 周占松. 重载机车故障预测与健康管理体系架构研究与应用 [J]. 控制与信息技术, 2022, (06): 115-22.

- [21] 王伟, 鹿文勇, 陈洋. 沿空留巷工作面综合防灭火技术 [J]. 煤矿安全, 2016, 47(04): 85-7.
- [22] 道客巴巴. 沿空留巷技术 [Z]. 2018
- [23] 张农. 深入实践、坚持创新、持续推动支护技术进步——2013 年度煤矿支护专业委员会专家组工作报告 [J]. 煤矿支护, 2013, (4): 3.
- [24] 孙云庆. 9~#煤层切顶卸压沿空留巷技术研究应用 [J]. 同煤科技, 2021, (06): 36-9.
- [25] 国家矿山安全监察局. 国家矿山安全监察局关于印发《煤矿防灭火细则》的通知 [J]. 2021.
- [26] 孟晓强. 云驾岭煤矿 12305 工作面沿空留巷技术应用研究 [D]; 河北工程大学, 2016.