西安科技大学

本科生科研基金项目申请书

项目名称：	近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置研究		
项目负责人：	李少博	联系电话：	17747395366
指导教师：	丁自伟	联系电话：	13991812828
所属学院：	能源与矿业工程学院		
起止时间：	2025.06.01——2027.05.31		

西安科技大学科技处

二〇二四年制

一、项目基本信息

项目名称	近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置研究				
项目负责人	李少博	性别	男	出生年月	2005 年 06 月
所属学院	能源与矿业工程学院	学号	24403020111	学制年级	二年级
指导教师	丁自伟	性别	男	出生年月	1987 年 05 月
所属学院	能源与矿业工程学院	专业技术职务	教授	是否获批国基金项目	是
研究方向	通过相似模拟、理论模型、数值模拟结果与现场实测数据耦合的方法，研究近距离煤层重复采动覆岩演化与应力规律；通过相似模拟结果校准数值模型参数，数值模拟拓展相似模拟无法覆盖的工况的方法，研究近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置方法；通过构建 FLAC3D 三维数值模型，按实际地质条件还原煤层的层位关系，模拟超长工作面推进过程，得出近距离煤层超长工作面重复采动覆岩垮落、运动、裂隙发育与采场应力演化规律。				
预期成果	得出近距离煤层超长工作面重复采动覆岩垮落、运动、裂隙发育与采场应力演化规律；通过相似模拟实验得出的数据，提出近距离煤层群巷道合理布置方式；申请国家专利 1 项，发表科技类论文 1 篇。				
申请经费（万元）	2.00				

二、主要研究人员：

姓名	年龄	性别	技术职称	所属学院	签名
李少博	21	男	学生	能源与矿业工程	李少博
李翔宇	19	男	学生	能源与矿业工程	李翔宇
张浩阳	23	男	学生	能源与矿业工程	张浩阳
陈明远	18	男	学生	能源与矿业工程	陈明远
吴恒宇	18	男	学生	能源与矿业工程	吴恒宇
汪灵曦	18	女	学生	能源与矿业工程	汪灵曦

三、审查意见

负责人所在单位审查意见
学院审查意见（申请者素质、研究能力和科学作风以及内容的真实性）： 负责人签字：李少博　指导教师签字：　单位(公章)： 年　月　日

一、立项依据与研究内容

1、项目的立项依据：

1.1 研究意义

煤炭作为我国“双碳”目标下能源安全的核心支撑，其高效开发对保障国民经济稳定运行具有战略意义。据《中国能源展望 2030》预测数据显示，2030 年原煤产量比重和消费比重仍将占据一次能源生产结构和消费结构的 58.7%和 49%，在未来相当长的时间内，煤炭安全高效开采将面临巨大的挑战。党的二十届四中全会中为我国能源领域的发展指明了全新方向。会议明确提出要加快建设新型能源体系、建设能源强国。要推动能源绿色低碳转型，一方面大力发展非化石能源，另一方面推进化石能源清洁高效利用，推动煤电转为支撑调节性电源，完善煤炭产能储备政策体系。在强化能源安全保障方面，完善煤炭产能储备政策体系以增强供应弹性，同时对保持煤矿安全生产的稳定性和安全性提出更高标准，要杜绝安全事故导致的产能波动，为煤炭安全开采划定了明确方向。

我国煤炭资源赋存多变，地质条件极其复杂，煤矿地应力高、变化梯度大，瓦斯含量高、煤与瓦斯突出灾害严重，地质小构造多、探测难度大，煤炭开采难度越来越大。我国近距离煤层群和极近距离煤层群分布广泛，但在这类煤层开采中，下煤层面临的核心难题集中在超长工作面矿压显现与遗留煤柱应力叠加的双重影响。随着开采强度提升，近距离煤层群中越来越多采用超长工作面布置，超大开采空间使得采场应力环境更趋复杂，传统开采模式已难以适配。

先开采上煤层后，遗留煤柱会形成显著的底板应力集中，且应力向两侧采空区传递有限，主要向底板岩层纵深传递，会造成底板岩层破碎度增加，直接影响下煤层的应力环境，为下煤层工作面回采增加了难度。对于下煤层超长工作面而言，这种应力集中与超长工作面自身的矿压特征叠加，进一步加剧了巷道布置的难度。如果巷道位置未能避开遗留煤柱的应力影响区，极易引发围岩大变形、顶板失稳等问题。因此，精准掌握遗留煤柱底板应力传递规律，确定下煤层超长工作面巷道与上覆遗留煤柱的合理错距，成为保障工作面安全高效回采的关键。研究近距离煤层超长工作面矿压演化规律，以及遗留煤柱影响下的巷道合理布置策略，通过理论分析、数值模拟等手段明确错距临界值，避开应力集中叠加区，不仅能为矿山支护方案优化提供理论

依据，减少顶板事故、瓦斯积聚等安全隐患，保障作业人员生命安全，还可以在保证社会及安全效益的同时提高煤炭开采效率，最大程度的减小煤炭资源损失与浪费，为实现我国煤矿资源合理、安全、高效开采提供重要技术保障。明确近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理并能提供合理的巷道布置形式是深入贯彻落实国家安全发展理念、坚决遏制矿井生产安全事故、提升矿井防灾减灾能力的重大需求。

陕西小保当矿业有限公司小保当一号煤矿作为榆神矿区核心矿井，井田面积 97.4010km²，设计生产能力 2000 万吨/年，矿井范围内赋存 9 层可采煤层，其中 3^{-1}煤层埋深为 240.40～445.26m，与上覆 2^{-2} 煤层间距 27.80-43.18m，平均层间距约 37m，属典型近距离煤层群开采工况，且 2^{-2} 煤层已完成部分开采，形成采空区面积达 15.85km²。根据《煤矿地质工作细则》（矿安〔2023〕192 号）综合评定，该矿地质类型为中等，矿井井田内构造形态简单，截至目前仅揭露 3 条正断层，最大落差 11m，2^{-2}煤层与 3^{-1} 煤层均属稳定型煤层。结合近距离煤层开采特性，矿井浅部开采存在显著顶板灾害风险：受上覆 2^{-2}煤层采空区扰动影响，3^{-1}煤层顶板覆岩运动规律异常复杂，易引发顶板失稳、围岩过度变形，且导水裂隙带可能导通上覆采空区积水，形成顶板水害叠加风险。同时，矿井采用 400m 超长工作面开采工艺，工作面加长后进一步凸显关键问题：一是超长工作面形成的超大开采空间导致矿压显现强烈，上覆采空区顶板二次活化、遗留煤柱应力集中等因素叠加，加剧动压灾害；二是大跨度围岩变形特征与传统支护方案严重不适配，巷道围岩破坏风险升高；三是超长工作面一次采空面积巨大，区段煤柱易受矿压破坏，导致采空区联通，增加漏风及自然发火风险。由于 3^{-1}煤层顶板覆岩运动规律、应力演化特征较单一煤层开采更为复杂，且超长工作面加剧了多灾害耦合风险，传统支护与布设方式难以满足安全高效开采需求。**因此，探究近距离煤层群开采下的加长面回采巷道围岩破坏机理及合理工作面布设方式，是解决矿井顶板控制问题的关键，对保障矿井设计生产能力稳定发挥、实现近距离煤层群安全高效开采具有重要必要性。**

1.2 国内外研究现状及动态发展

我国近距离煤层群分布范围广，其开采方法以下行开采为主。随着煤层间距减小，上下煤层间开采的相互影响会逐渐增大。当煤层间距较小时，下部煤层开采前上覆岩层的完整性已受上部煤层开采破坏，

上部煤层遗留区段煤柱会在底板形成应力集中，叠加采空区矸石垮落的附加影响，成为制约下部煤层安全高效开采的核心问题。近年来，专家学者们对此进行了系统性研究，并取得了一系列关键成果。

（1）近距离煤层群开采应力破坏机理研究

通过掌握近距离煤层群下煤层开采应力破坏机理是对近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置研究的基础。杨健辉等[1]研究得出破碎顶板的工程地质特点，解释了断层附近顶板冒落的原因。赵毅鑫[2]推导并解析了巷柱式采空区交汇处顶板岩梁弯曲下沉挠度函数，并建立了工作面走向不同区段载荷对底板采动附加应力与底板岩层损伤破坏深度模型，为近距离煤层群下煤层开采应力破坏建立了模型与数据基础。孟祥瑞[3]等采用弹性半平面体力学模型给出了采场底板岩层应力的解析解，提供重要的数值依据。张华磊等[4]采用附加应力计算方法建立了采场底板应力分布的力学模型及采动支承压力传播的力学模型；程志恒[5]对近距离煤层群保护层开采裂隙演化及渗流特征的采动煤岩体应力场、裂隙场以及瓦斯渗流场进行研究，获得了近距离煤层群条件下保护层开采后应力场、裂隙场与渗流场的时空变化规律。闫淑缘等[6]研究了深部近距离煤层群下向卸压开采高应力演化的特征。侯运炳等[7]采用连续损伤模型对上煤层开采引起的底板损伤规律进行研究，并依据层间基本顶在采空区损伤区域的层位对基本顶进行了分类，获得了损伤基本顶初次断裂长度计算公式。洛锋等[8]对近距离煤层群下行逐层开采条件下底板裂隙岩体的应力-应变演化过程进行研究，得出覆岩采空区压实和膨胀区均参与底板应力重新分布过程，应变数值和变化规律与上覆岩层压实范围、原始压力载荷基数、空间边界有关；马振乾等[9]对近距离煤层重复开采过程中煤层底板应力的动态演化规律及底板巷道围岩应力及位移分布进行研究，得出煤层底板应力分布具有明显的周期性波动现象；张向阳等[10]分析了上下采空极近距离煤层开采过程中采场围岩应力分布规律、位移变化及变形破坏特征；蔡光顺[11]通过理论分析，数值模拟和模型实验分析了极近距离煤层开采中上层煤开采后对下层围岩应力及结构的影响；理论分析了不同参数对上煤层煤柱稳定性的影响，给出了考虑煤层倾角的稳定煤柱的计算公式。于洋等[12]通过数值计算研究了极近距离上位煤层采空区下底板岩层的应力分布规律及下位煤层巷道变形破坏特征,确定了下位巷道顶板控制原则。

（2）近距离煤层群覆岩运动与超长工作面矿压特征研究

随着开采强度提升，超长工作面在近距离煤层群中逐渐推广，其超大开采空间与上覆采空区、遗留煤柱的叠加影响，使矿压显现更趋复杂。李树刚等[13]对单层开采和重复采动条件下覆岩移动、 裂隙分布与演化规律、支承压力分布特征及采动裂隙带形态进行研究，得到上覆岩层在重复采动条件下形成破断裂隙和离层裂隙，并经历产生、扩张、压实、再扩张、再压实等 5 个动态变化阶段。张宏伟等[14]分别对近距离煤层群开采覆岩结构变化特征、应力分布及应力变化率演化规律、采动形成的裂隙带综合形态特征等进行研究，实现煤体性质整体改善、上下煤层安全高效回采；朱雷等[15]基于滑移线理论构建了采场岩体破坏模型并确定了上煤层开采后底板的最大破坏深度，通过数值模拟分析了近距离下煤层煤柱的尺寸效应及失稳机理进一步研究回采巷道空间位置与围岩形变的响应特征，发现采用不低于 6 m 的内错式布置巷道可有效缓解采动应力叠加效应。郭万平等[16]着重对“两带”（即垮落带和导水裂隙带）发育规律、矿压分布规律及底板破坏深度等关键因素展开深入探讨。通过运用 FLAC3D 数值计算模拟技术，综合考量覆岩塑性区、应力场、位移场等多场变化规律，详细分析了工作面在不同推进距离下“两带”的发育高度、底板破坏深度以及覆岩应力分布的具体情况。冯宇峰[17]研究了特厚煤层大采高综放开采条件下的覆岩结构含近距离亚关键层的失稳机制及矿压显现规律。于斌[18]建立了特厚煤层开采大空间采场岩层结构演化模型，通过分析表明覆岩近场关键层为“竖 O-X”破断的“悬臂梁+砌体梁”结构，远场关键层为“横 O-X”破断的“砌体梁”结构模型。黄光平等[19]采用离散元数值模拟软件 UDEC 6.0 对煤层开采过程中的采场围岩运移情况及应力分布规律进行了系统地分析研究，揭示了缓斜近距离多煤层群采动影响区内的复杂应力场分布、上覆岩层变形破坏形态及煤层间相互影响规律。韩帅杰[20]借助 PHASE2D 有限元软件建立双工作面开采模型，分析覆岩塑性区演化、地表沉降量及保护煤柱支承压力分布得出增加工作面长度将加剧塑性区的扩展、地表沉降及保护煤柱的支承压力。李明忠等[21]针对液压支架顶梁载荷及受载力学特性不明的问题，通过建立弹性支座上的二维连续梁模型、运用矩阵位移法和单跨梁微分方程计算，结合 3DEC 数值模拟、现场压力数据验证及 ANSYS 有限元分析，研究顶梁不均衡载荷分布及力学响应。方志强[22]采用数值模拟方法，系统分析了上层煤层开采过程中底板应力场的演化特征，

发现高应力集中区域主要分布于煤柱中心线垂直投影范围。李健光等[23]运用现场实测与数值模拟相结合的方法，对煤层开采过程中的围岩应力分布及塑性区演化特征进行了研究。张海峰[24]采用 FLAC3D 数值模拟对不同的煤层工作面布置方式及联合开采方式进行综合研究，分析不同布置方案下围岩应力的分布特征。张钢举等[25]采用理论分析、数值模拟手段对极近距离条件下采空区煤柱底板三维应力分布规律进行研究，对比分析下伏巷道层间顶板厚度变化对巷道围岩变形规律及破坏特征的差异性，揭示极近距离下伏巷道渐变层间顶板厚度变化与巷道围岩破坏的内在联系。 黄庆享等[26]以榆家梁煤矿 43207 工作面为工程背景，采用现场实测、物理模拟、理论分析相结合的方法，研究了煤柱覆岩“倒梯形”结构随下部间隔岩层的运动及其载荷传递特征，分析了超前支承压力和支架载荷的转化规律，建立了“煤柱－间隔岩层台阶岩梁”耦合结构力学模型，得出了强矿压瞬间和顶板切落稳定后的支架载荷计算公式。

（3）近距离煤层群围岩控制技术

针对不同距离煤层巷道的围岩变形规律与失稳风险，研发适配性强、可靠性高的围岩控制技术，是保障巷道长期稳定服役的关键技术保障。国内外学者围绕巷道支护方案优化、新型支护材料应用、主动控制技术研发（如注浆加固、卸压解危等）、控制参数与煤层距离的匹配关系等方面开展了系统性研究，形成了一系列基于理论机理与工程实践的围岩控制技术体系，并在不同地质与开采条件下得到了广泛应用与优化完善。朱涛等[27]对极近距离煤层下煤层顶板结构与控制以及回采巷道矿压规律进行了研究。杨常德[28]以近距离煤层开采煤柱底板回采巷道稳定为研究对象，综合采用理论分析、实验室试验、数值模拟、物理相似模拟和现场工业性试验等方法，研究近距离煤层采动煤柱底板应力演化规律，揭示近距离煤层遗留煤柱底板动压巷道变形破坏机理，开发近距离煤层遗留煤柱下采动巷道围岩稳定控制技术。于辉[29]对近距离煤层开采覆岩运动及矿压显现规律进行研究，得到对近距离煤层开采煤层间覆岩结构分类、覆岩结构运动特征及工作面矿压显现规律、基本顶破断失稳力学模型、支架工作阻力及承载特性；张升等[31]对极近距离煤层固体充填开采充实率协同控制覆岩运移规律进行研究。刘旭东[32]通过对比垮落法与固体充填法开采条件下的覆岩运移特征，得到了极近距离煤层覆岩运移控制关键。马全礼[33]通过研究得出单体锚索与顶板是点接触，在顶板破碎的情况下，控制范围

大幅减少。单体锚索倾斜布置，顶板岩块顶两帮挤压，使巷道中部的岩块易发生大变形和跨落的结论。陈翔宇[34]以某矿东十采区 3_上、3_下煤层开采为背景,采用现场实测、理论分析、物理相似实验、数值计算和工业性试验相结合的方法,对 3_上煤层开采覆岩运移规律、底板采动损伤深度及岩层应力时空演化规律等进行了较为系统的研究。于辉[35]综合采用理论分析、计算机数值模拟、室内相似模拟实验以及现场矿压观测等手段,对近距离煤层开采覆岩运动及矿压显现规律进行深入系统的研究。孙健新等[35]以正利煤业 14103 工作面作为研究对象，采用理论分析、数值模拟与现场实测相结合的方法，开展回采巷道合理布置及围岩控制技术的研究。寇德睿等[36]研究围岩强度差异对塑性区发育、应力场分布及位移演变规律有控制作用，研究成果可为类似地质条件下巷道支护方案优化设计提供理论依据。马力[37]针对性提出极近距离煤层回采巷道顶板分区域支护方案。许家林等[38].以神东矿区浅埋煤层开采为工程背景,对浅埋煤层覆岩关键层结构的类型及其破断失稳特征进行了研究。杨治林等[39]应用初始后屈曲理论和尖点突变模型探讨了顶板岩层分岔失稳的机理及其屈曲后的不稳定性,得出了采场老顶初次来压时断裂下沉的计算公式,建立了顶板破断后台阶下沉的判据,给出了台阶下沉量。浦仕江[40]以贵州省金沙县盛安煤矿为背景,采用现场实测、理论分析、数值模拟、相似模拟及现场工程实践相结合的方法对近距离煤层群重复采动下的巷道围岩失稳规律进行研究。 王志刚[41]基于对小峪煤矿南 II 盘区极近距离煤层，预计回采动压对巷道掘进维护有很大影响的支护实践，通过桁架锚索对破碎顶板的支护作用得出桁架锚索支护方案。李强[42]基于山西西山煤电股份有限公司西铭矿三号煤矿极近距离煤层开采的研究，采用长壁全部跨落法管理顶板，留取段煤进行护巷，确定合理采巷合理位置有效的支护方式。马瑞等[43]为确保此类矿井的安全高效开采,结合冯家塔煤矿 1402 综采工作面实际,对该煤矿进行了煤柱破坏与覆岩移动规律的物理相似材料实验模拟研究。刘宗柱[44]以沙曲矿近距离煤层赋存条件为基础,结合试验地点具体情况,通过理论分析和数值模拟方法分析了近距离煤层开采底板岩层应力分布规律和底板岩层破坏规律,依据巷道围岩变形规律和围岩变形破坏机理,提出了近距离煤层底板动压回采巷道单体液压支柱临时加强支护+W 钢带+锚网索非对称联合支护方案。张忠温等[45]以平朔矿区 11 煤回采工作面巷道掘进为工程背景，在对矿区 11 煤围岩地质力学测试与评估、围岩

可锚性试验和锚杆支护作用理论分析的基础上,根据煤层顶板层间距离的不同,提出了"锚杆+锚索"、"锚杆+短锚索"、"全长预应力锚杆"等以锚杆支护为主的巷道支护方案,彻底改变了近距离煤层巷道必须使用架棚支护的传统观念。彭瑞等[46]认为围岩强度差异对塑性区发育、应力场分布及位移演变规律有控制作用,其研究成果可为类似地质条件下巷道支护方案的优化设计提供理论依据。郝江涛[47]通过建立数值模型分析了巷道支护强度对极近距离破碎软岩响应安全阈值,基于双屈服应变硬化有限元模型揭示了柔性网均布分散采空区残余应力控制机理。黄海龙等[48]理论分析表明,在极近距离下部特厚煤层回采过程中,上煤层回采形成的下位基本顶“砌体梁”结构会发生再垮落、再断裂,造成下煤层工作面小周期来压;综放工作面继续推进,上位基本顶发生周期性破断,造成下煤层工作面大周期来压。邢有望[49]通过矩阵位移法求解顶板挠度及支架顶梁不均衡载荷解析解,结合3DEC 三维数值模拟(含随机节理与桩结构单元支护模拟)、电液控数据分析及 ANSYS 有限元分析,研究顶板挠度分布、不均衡载荷特征及对液压支架的影响并开展支架结构优化。张晓亮[50]针对下层煤工作面回采巷道垂直上覆区段煤柱的情况,通过数值模拟结合软件分析不同宽度区段煤柱下巷道顶板的应力分布规律,对不同应力分区的巷帮采取增加锚杆密度或锚索等方式进行加强支护,取得了较好的围岩控制效果。

(4)近距离煤层群巷道与煤层的空间距

巷道与煤层的空间距离是影响开采效率、巷道稳定性及安全生产的关键参数,距离煤层的巷道布置合理性直接决定了资源回收效果与工程建设成本,因此成为国内外采矿工程领域的重点研究方向之一。国内外学者围绕不同开采条件下巷道与煤层的最优距离确定、布置形式优化、距离参数对巷道受力及围岩变形的影响等核心问题,开展了大量理论分析、数值模拟与现场试验研究。梁涛等[51]采用水岩相似材料模拟试验对不同荷载、岩层性质及开采速度等因素影响下煤层开采后覆岩垮落及裂隙演化特征进行研究;张百胜[52]对极近距离煤层群顶板分类、下部煤层开采矿山压力显现规律、工作面顶板控制,合理巷道位置及开采技术保障体系进行研究,形成了极近距离下部煤层开采辅助技术体系。高士岗等[53]通过数值模拟计算论证了方案的可行性,通过现场巷道变形观测、物理相似模型试验及数值模拟计算的综合分析方法,得出 1-2 上煤层中巷道的变形规律及引起巷道变形的主要影

响因素，并对下煤层巷道分别布置于上煤层采空区下与区段煤柱下的变形情况进行了对比分析。魏杰[54]利用 FLAC3D 模拟软件，构建三维模型，对上层煤采空区留设煤柱对下煤层回采巷道布置的影响进行研究分析，并给出合理的巷道布设位置，这对近距离煤层群开采巷道布置具有重要的应用和参考价值。 张春雷等[55] 结合煤层地质条件，采用理论分析确定下煤层巷道采用外错式布置方式，在加固条件及合理的锚杆锚网支护作用下，巷道稳定性良好，巷道围岩变形得到了有效控制，能够满足工作面正常推进的要求。方新秋等[56]对近距离煤层群开采过程中下层煤回采巷道失稳机制进行研究，得出了巷道的布置、保护煤柱宽度和支护方案等因素对巷道稳定的影响。王广辉[57]通过不同巷道布置方式对近距离煤层群开采的对比研究，得出河东煤矿 9 号，10 号煤层联合开采时巷道的合理布置方式，以及各煤层巷道合理煤柱尺寸。安宏图[58]以金达煤矿二采区极近距离煤层赋存条件为基础，对上煤层 9 号煤采后的上覆坚硬顶板岩层沿倾向形成的结构进行了分析，确定上覆坚硬顶板岩层沿倾向能够形成稳定的"类砌体梁"结构。白庆升等[59]提出了描述特厚煤层综放开采垮落带压实特征的采空区压实理论，揭示了特厚煤层大采高综放面围岩大范围、长时间、强扰动的影响机理。高奎英等[60]针对浅埋近距离煤层群上部遗留煤柱影响下的下部工作面巷道合理布置位置确定问题，以活鸡兔井为例，采用离散元方法(DEM)模拟研究了遗留煤柱底板应力分布与上、下煤层开采采空区裂隙发育特征。杨增越等[61]采用数值模拟和现场实测方法对近距离煤层超长工作面在复杂环境下的回采技术方案进行实践研究，以解决超长工作面面临陷落柱、号煤层遗留煤柱和号煤层采空区积水影响的技术难题。苏夏收[62]通过场调研、理论分析、现场工业性试验，就该超长工作面回采过程中的采场矿压显现规律进行了系统研究，为今后该矿及类似条件煤层安全开采提供了借鉴。付世雄[63]运用理论分析、数值模拟及现场钻孔窥视技术，系统探讨了采空区底板破坏深度、巷道合理布置及围岩控制技术。覃疏捷[64]采用现场调研、理论分析、数值模拟、工业性试验相结合的研究方法，系统研究了近距离煤层下煤层巷道布置及分区支护技术研究，并进行了现场应用。李群航等[65]采用现有的极限平衡理论，并结合现场实测数据以及数值模拟数据进行分析得出在合理错距下进行采掘可以有效避免集中应力并能控制围岩变形的结论。郭明功等[66]以平煤八矿深部极近距离煤层群工作面开采为研究背景，通过 FLAC3D 模拟研究了底抽巷不同布置层位下巷

道围岩塑性分布状态的变化、上覆已15和己16-17煤层的应力分布及变形特征;在兼顾安全性及经济性的条件下确定了底抽巷最优的布置层位。刘义孟等[67]综合采用现场调研、理论分析、数值计算和工业性试验的方法，分析了煤层开采后底板岩层损伤特征、底板应力演化规律，确定了煤层首采工作面巷道采用内错布置方式。马军刚[68]采用数值模拟分析比较对比3种顶板条件下巷道围岩在原支护方案与优化支护方案下巷道围岩变形量，得出优化支护后围岩变形量明显减小，支护效果较好。张伟等[69]通过近距离煤层综放工作面巷道合理位置的选取对后期支护控制起到关键性作用进行研究，得出巷道采用内错距24 m布置时，巷道围岩松动破坏深度及变形量均在可控范围内。马世杰等[70]采用数值模拟、理论分析计算和现场实测等方法，对近距离煤层采空区下巷道布置及支护技术进行探讨。陈学亚等[71]基于滑移线理论构建了采场岩体破坏模型并确定了上煤层开采后底板的最大破坏深度,通过数值模拟分析了近距离下煤层煤柱的尺寸效应及失稳机理。针对近距离煤层开采后遗留煤柱下位特厚煤层回采巷道布置的技术难题,以开滦集团唐山矿为研究对象,综合采用理论分析、数值模拟和现场实测等研究手段,对上位煤层采动后的底板破坏深度、残留煤柱底板应力分布及下位煤层巷道顶板非均布载荷下易被破坏的原因进行了研究。蔡渝梁等[72]煤层开采引起的支承应力导致的最大破坏深度为31.5 m,对下位煤层回采巷道布置产生影响;煤柱底板的垂直应力分布具有明显的非均布性,下位煤层回采巷道更易达到抗拉极限而产生变形破坏的结论为特厚煤层回采巷道布置提供了借鉴依据。李健光等[73]对煤层开采过程中的围岩应力分布及塑性区演化特征进行了研究.通过对比不同煤柱尺寸(6 m、8 m、10 m、12 m、15 m)条件下巷道围岩的应力和塑性区分布规律,得出煤柱宽度为8 m时,能够有效降低巷道帮部的最大破坏深度,同时保证巷道的稳定性,避免资源过度浪费.提出了10103轨道顺槽支护方案，围岩控制效果良好。

综上所述，我国近距离煤层群以下行开采为主，上部煤层开采引发的覆岩破坏、应力集中及破碎顶板支护难题，已成为制约下部煤层安全高效开采的核心瓶颈。国内外学者针对该领域开展了系统研究，围绕近距离煤层群开采应力破坏机理、覆岩运动与裂隙演化规律、底板损伤深度及应力分布特征等核心问题，通过理论分析、数值模拟、物理相似模拟及现场工业性试验等多种方法，建立了采场应力传播、覆岩破断等相关力学模型，明确了区段煤柱留设、巷道布置方式（内

错、外错、重叠式等）对围岩稳定性的影响机制。同时，针对破碎顶板支护需求，研发了锚网索联合支护、分区域支护等技术方案，优化了近距离煤层群开采巷道布置参数与支护体系，并通过现场实践验证了技术的可行性与有效性，为类似地质条件下的开采工程提供了重要理论支撑与技术参考。现有研究成果已较为全面地覆盖了近距离煤层群开采的关键技术环节，为后续进一步深化研究、提升开采安全性与效率奠定了坚实基础。

参考文献：

[1.] 杨健辉，蔡美峰．不稳定顶板条件下煤巷锚网索梁支护实践[J]．煤炭科学技术，2002，30(8)：8-11．

[2.] 赵毅鑫．近距离煤层蹬空开采围岩应力及裂隙演化规律[J]．煤炭学报，2022(3)．

[3.] 孟祥瑞，徐铖辉，高召宁，等．采场底板应力分布及破坏机理[J]．煤炭学报，2010(11)．

[4.] 张华磊．采场底板应力传播规律及其对底板巷道稳定性影响研究[D]．中国矿业大学，2011

[5.] 程志恒．近距离煤层群保护层开采裂隙演化及渗流特征研究[D]．中国矿业大学（北京），2015．

[6.] 闫书缘，杨科，廖斌琛，等．潘二矿下向卸压开采应力演化特征试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2013(9)．

[7.] 侯运炳，何尚森，谢生荣．近距离煤层层间基本顶损伤及破断规律研究[J]．岩土力学，2017，38(10)．

[8.] 洛锋，曹树刚，李国栋，等．近距离下行逐层开采底板应变时空差异特征[J]．采矿与安全工程学报，2018，35(5)．

[9.] 马振乾，姜耀东，杨英明，等．芦岭矿近距离煤层重复开采下底板巷道稳定性研究[J]．岩石力学与工程学报，2015，34(S1)．

[10.] 张向阳，常聚才．上下采空极近距离煤层开采围岩应力及破坏特征研究[J]．采矿与安全工程学报，2014，31(4)．

[11.] 蔡光顺．中兴矿极近距离煤层开采巷道布置及支护技术研究[D]．中国矿业大学（北京），2013．

[12.] 于洋，神文龙，高杰. 极近距离煤层下位巷道变形机理及控制[J]. 采矿与安全工程学报，2016，33(1).

[13.] 李树刚，丁洋，安朝峰，等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙形态及其演化规律实验研究[J]. 采矿与安全工程学报.

[14.] 张宏伟,韩军,海立鑫,等. 近距煤层群上行开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报，2013，31(1).

[15.] 朱雷，于杭尔，傅康. 近距离煤层下回采煤层巷道合理位置研究[J]. 山东煤炭科技，2025，43(9).

[16.] 郭万平，赵子敬，马金林，等. 深埋近距离煤层开采覆岩活动规律研究[J]. 能源科技，2025，23(4).

[17.] 冯宇峰，商晶志，赵善坤，等. 近距离亚关键层大采高综放开采覆岩失稳机制及矿压规律[J]. 煤矿安全，2015，46(10).

[18.] 于斌，朱卫兵，高瑞，等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报，2016，41(3).

[19.] 黄光平,曾晓明,卢平,等. 近距离煤层群超长工作面采场矿压分布及围岩运移规律研究[J].煤炭技术,2020,39(03):39-43.

[20.] 韩帅杰. 大采高超长工作面矿压显现规律研究[J].陕西煤炭,2025,44(08):67-71

[21.] 李明忠,邢有望,张金虎,等. 超长工作面液压支架受不均衡载荷影响研究[J/0L].煤炭科学技术,1-19[2025-11-12].

[22.] 方志强. 近距离煤层采空区下巷道布置方式与围岩控制方案设计[J].凿岩机械气动工具,2025,51(07):30-32.

[23.] 李健光,卫政宇,李雨田. 近距离煤层下位煤层巷道布置与控制技术研究[J].山西焦煤科技,2025,49(04):13-18.

[24.] 张海峰. 基于FLAC3D数值模拟的近距离煤层工作面布置应力分布研究[J].当代化工研究,2024,(11):122-124.

[25.] 张钢举,梁冰. 极近距离煤层渐变层间距下伏巷道分区域支护技术研究[J].中国煤炭,2025,51(04):86-97.

[26.] 黄庆享，张谦，贺雁鹏，等. 浅埋近距离煤层过平行煤柱开采强矿压机理研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2024，6(5):

053022.

[27.] 朱涛，张百胜，冯国瑞，等. 极近距离煤层下层煤采场顶板结构与控制[J]. 煤炭学报，2010(2).

[28.] 杨长德. 近距离煤层下工作面回采巷道围岩稳定性控制研究[D]. 中国矿业大学.

[29.] 于辉. 近距离煤层开采覆岩结构运动及矿压显现规律研究[D]. 中国矿业大学（北京），2015.

[30.] 孙健新，赵正军. 极近距离煤层群下部煤层回采巷道布置及围岩控制技术研究[J]. 煤炭工程，2025，57(8).

[31.] 张升，张吉雄，闫浩，等. 极近距离煤层固体充填充实率协同控制覆岩运移规律研究[J]. 采矿与安全工程学报，2019，36(4).

[32.] 刘旭东. 近距离煤层遗留煤柱下巷道稳定机理及控制技术研究[D]. 中国矿业大学，2023.

[33.] 马全礼，代进，李洪. 锚杆支护对围岩破碎区的作用分析[J]. 矿山压力与顶板管理，2005，22(1).

[34.] 陈翔宇. 近距离下伏煤巷围岩稳定机理及控制研究[D]. 中国矿业大学，2019.

[35.] 于辉. 近距离煤层开采覆岩结构运动及矿压显现规律研究[D]. 中国矿业大学（北京），2015.

[36.] 寇德睿，王茂林，李燕娇，等. 近距离煤层回采巷道围岩稳定性分析[J]. 能源新观察，2025(10).

[37.] 马力. 极近距离煤层下伏回采巷道分区支护技术及应用[J]. 煤炭工程，2024，56(3).

[38.] 许家林，朱卫兵，王晓振，等. 浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J]. 煤炭学报，2009，34(7).

[39.] 杨治林，余学义，郭何明，等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. 岩土工程学报，2007(12).

[40.] 浦仕江. 近距离煤层群重复采动下巷道围岩失稳规律与控制研究[D]. 贵州大学.

[41.] 王志刚. 近距离煤层开采动压下巷道支护技术[J]. 煤炭工程，

2021(7).

[42.] 李强. 极近距离煤层群开采下位煤层巷道布置[J]. 煤炭科学技术.

[43.] 马瑞，来兴平，曹建涛，等. 浅埋近距煤层采空区覆岩移动规律相似模拟[J]. 西安科技大学学报，2013，33(3).

[44.] 刘宗柱. 近距离煤层群下煤层回采巷道布置及围岩控制技术研究[D]. 太原.太原理工大学，2022

[45.] 张忠温，吴吉南，范明建，等. 近距离煤层采空区下巷道支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报.2022，52（6）：61-77

[46.] 彭瑞，郑迪，张腾，等. 近距离煤层下位巷道顶板分区支护技术研究[J]. 华北科技学院学报，2025，22(5).

[47.] 郝江涛. 极近距离煤层下位巷道变形机理及控制技术[J]. 西部探矿工程，2025，37(10).

[48.] 黄海龙，冯宇峰. 近距离煤层综放工作面覆岩稳定性分析及巷道布置优化[J]. 中国煤炭，2020，46(10).

[49.] 邢有望.小保当煤矿超长工作面不均衡载荷及支架抗偏载优化研究[D].煤炭科学研究总院,2025.

[50.] 张晓亮. 近距离煤层采空区及煤柱下巷道分区支护研究[J]. 煤炭科学技术.2023.42（6）：178-182

[51.] 梁涛，刘晓丽，王思敬. 采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究[J]. 煤炭学报，2019，44

[52.] 张百胜. 极近距离煤层群开采围岩控制理论及技术研究[D]. 太原理工大学，2008.

[53.] 高士岗，杨俊哲，高登彦，等. 近距离煤层开采回采巷道布置方式及变形规律[J]. 西安科技大学学报，2022，42(2).

[54.] 魏杰. 近距离煤层开采下煤层巷道位置布设研究[J]. 内蒙古煤炭经济，2017(10).

[55.] 张春雷，张勇. 近距离煤层同时开采巷道布置优化研究[J]. 煤炭科学技术，2014，42(10).

[56.] 方新秋，郭敏江，吕志强. 近距离煤层群回采巷道失稳机制及

其防治[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(10).

[57.] 王广辉. 河东煤矿近距离煤层群开采巷道合理布置方式[J]. 煤炭工程.

[58.] 安宏图. 近距离煤层群下煤层回采巷道布置及围岩控制技术研究[D].沈阳.东北大学.2021

[59.] 白庆升，屠世浩，袁永，等. 基于采空区压实理论的采动响应反演[J]. 中国矿业大学学报，2013，42.（2）193-198

[60.] 高奎英，张翔，王乙桥，等. 覆岩应力-漏风综合影响下浅埋煤层群下煤层开采巷道布置研究[J]. 中国煤炭，2024，50(8).

[61.] 杨增越,王炯,刘帅,等. 复杂环境近距离煤层超长工作面回采实践研究[J].煤炭科学技术,2018,46(S1):1-5+22.

[62.] 苏夏收. 近距离煤层300m超长工作面采场矿压显现规律研究[J].煤炭科技,2016,(04):1-4.

[63.] 付世雄. 近距离下煤层回采巷道支护设计与围岩控制技术研究[J].凿岩机械气动工具,2025,51(09):135-137.

[64.] 覃疏捷.近距离煤层下煤层巷道布置及分区支护技术研究[D].湖南科技大学,2025.

[65.] 李群航,朱永建,王希之,等. 极近距离薄煤层下分层巷道的合理错距[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(02):1-9.

[66.] 郭明功，李延河，宋大钊，等. 深部极近距离煤层群开采底抽巷层位布置研究[J]. 煤矿安全，2024，55（3）：155-165.

[67.] 刘义孟,张自政,王克伟,等. 近距离煤层下煤层巷道合理布置及分级支护技术研究[J].煤炭技术,2024,43(08):114-119.

[68.] 马军刚. 近距离煤层回采巷道顶板稳定性分类及支护技术研究[J].煤炭科技,2024,45(05):163-168+175.

[69.] 张伟,张国俊,石永光,等. 近距离煤层采空区下综放工作面巷道合理位置研究[J].工矿自动化,2024,50(09):90-97.

[70.] 马世杰. 近距离煤层采空区下巷道内错布置与支护技术分析[J].江西煤炭科技,2024,(02):61-64.

[71.] 陈学亚,刘立明,付世雄,等. 近距离下煤层煤柱宽度与回采巷

道合理布置研究[J]. 能源与环保,2025,47(9):247-253,262.

[72.] 蔡渝梁,翟成,余旭,等. 近距离特厚煤层回采巷道合理布置优化研究[J]. 煤炭工程,2024,56(4):8-15.

[73.] 李健光,卫政宇,李雨田. 近距离煤层下位煤层巷道布置与控制技术研究[J]. 山西焦煤科技,2025,49(4):13-18.

2、项目的研究内容、研究目标以及拟解决的关键科学问题：

2.1 研究内容

研究内容一：近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理

采用钻孔窥视、数值模拟及理论分析等手段，研究近距离煤层重复采动上覆采空区顶板二次活化运动特征、裂隙相互导通规律以及采动应力场叠加分布特征和演化规律，分析层间距、层间岩层性质、上覆区段煤柱位置等因素对下煤层采场覆岩活动、裂隙发育和应力分布及演化规律的影响，并实测岩石物理力学参数，为煤层群开采巷道合理布置、顶板灾害治理研究提供理论基础。

研究内容二：近距离煤层采空区下超长工作面矿压特性研究

收集 3^{-1}煤层及上覆 2^{-2}煤层已采工作面的矿压监测数据，同步采集工作面地质参数、开采参数及采空区分布数据，明确超长工作面推进过程中应力环境基础。构建 FLAC3D 三维数值模型，按实际地质条件还原 3^{-1}煤层与 2^{-2}煤层的层位关系，模拟超长工作面推进过程，监测巷道围岩应力分布、覆岩位移演化、裂隙发育范围。在此基础上，研究不同影响因素对矿压显现的作用，结合相似模拟与数值模拟得到的应力-位移数据，建立矿压显现强度与开采参数、地质参数的关联关系，明确减少围岩损害的关键影响因子。

研究内容三：近距离煤层回采巷道合理布置方式

基于 2^{-2}煤层开采底板应力分布和破坏特征分析，从有利于矿压控制的安全角度分析，研究 3^{-1}煤回采巷道合理的布置方式。通过数值模拟手段研究：上覆煤层采空后，残余应力场分布规律，上煤层遗留区段煤柱不同水平错距下的 3^{-1}煤层工作面回采巷道围岩应力及变形情况，基于软件构建数值模型，重点模拟层间距、层间岩性、上覆煤柱位置三大核心因素，分析不同组合条件下下煤层采场应力分布、覆岩变形及巷道围岩稳定性差异，确定 3^{-1}煤层回采巷道的控制方式

与上方 2^{-2}煤层工作面遗留煤柱的合理错距。

2.2 研究目标

项目通过技术调研、理论分析、数值模拟，联合监测等多种手段，掌握近距离煤层超长工作面重复采动覆岩垮落、运动、裂隙发育与采场应力演化规律，研发“理论分析-数值模拟-相似模拟-现场监测”四维融合研究方法，实现从室内试验到现场验证的全链条分析。创新采用离散元3DEC与有限元FLAC3D耦合模拟的方法动态还原近距离煤层重复采动下覆岩垮落、应力演化及巷道围岩变形全过程，提升模拟结果的精准度。基于相似模拟的应力监测数据，量化不同错距条件下巷道围岩的应力集中程度与变形量，通过多组对比试验，确定最优错距阈值，为巷道合理布置提供试验支撑。

科学问题一：近距离煤层群巷道的围岩控制技术

基于FLAC3D数值模拟，研发“理论分析-数值模拟-相似模拟-现场监测”四维融合研究方法，通过灵敏度分析量化各参数，明确主导控制因素。结合现场钻孔窥视与微震监测数据，通过理论推导与数值模拟，明确导水裂隙导通采空区积水后对围岩的软化系数，量化漏风导致的遗煤自燃热量对围岩力学性能的衰减效应，揭示多灾害耦合下巷道围岩“应力骤增 -强度骤降”的突发破坏机理，为围岩控制提供多灾害协同视角。

科学问题二：近距离煤层群巷道的合理布置

通过FLAC3D模拟与现场应力监测，确定最优巷道错距及与上覆煤柱的相对位置、巷道走向等布置参数，明确应力集中区的动态迁移规律。建立错距动态调整模型，根据工作面推进过程中的矿压监测数据，优化回风顺槽、辅运顺槽的错距，规避应力集中叠加区与覆岩破碎带，实现巷道围岩变形量最小化、稳定性最大化，实现全开采周期的巷道稳定性控制，形成煤层群巷道布置的系统方法论。

3、拟采取的研究方案及可行性分析：

3.1 拟采用的研究方案

本项目拟采用现场调研、数值模拟、相似模拟、理论计算、现场试验等相结合的综合研究方法开展项目研究。四项研究内容研究思路与方法如下：

（1）近距离煤层覆岩活动、裂隙发育与应力演化规律研究

根据矿井地质资料，3^{-1}煤首采区15盘区与上覆2^{-2}煤层间距32.73-43.18m，属于近距离煤层开采。3^{-1}煤的开采是建立在2^{-2}煤的基础之上，在153101工作面回采前，2^{-2}煤11盘区的112201-112209工作面已经回采结束。因此，采用相似模拟与数值模拟相结合的方法进行11盘区2^{-2}煤112201-112209工作面依次回采后上覆岩层垮落破坏、裂隙发育高度与范围，面间遗留煤柱载荷与底板应力演化规律研究；在明确11盘区2^{-2}煤上覆岩层垮落破坏情况的前提下，进行3^{-1}煤开采，研究近距离煤层重复采动上覆采空区顶板二次活化运动特征、裂隙相互导通规律以及采动应力场叠加分布特征和演化规律，分析层间距、层间岩层性质、上覆区段煤柱位置等因素对下煤层采场覆岩活动、裂隙发育和应力分布及演化规律的影响。具体研究步骤如下：

①调研整理矿井研究区域工程地质资料，收集矿井11盘区、15盘区工作面地质钻孔资料、采掘工程平面图、煤岩物理力学参数及2^{-2}煤层已采工作面矿压监测数据，明确层间距、采空区分布等基础条件，为相似模拟与数值模拟研究提供理论基础。

②收集112201-112209工作面以往历次矿压显现、覆岩垮落监测数据、三带高度实测数据及相关研究报告资料，整理已采面矿压规律及上覆岩层垮落规律，通过单一工作面实测矿压数据校核、验证相似模拟与数值模拟的可靠性，为整个覆岩活动、裂隙发育与应力演化规律研究提供现场校验基准。

③根据11盘区、15盘区综合钻孔柱状图及112201-112209工作面、153101-153107工作面实际布置与回采情况，利用本单位“西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室”大比例采场相似模拟实验平台，建立小保当煤矿近距离煤层综采工作面开采模型，结合全站仪测量、DIC等测量手段，对覆岩破断特征、破断后形成的空间结构及空间结构随采动后的演化特征进行研究。

④在现场监测数据与相似模拟的基础上，根据11盘区、15盘区112201-112209工作面、153101-153107工作面实际布置与回采情况，采用离散元3DEC模拟软件，基于11盘区、15盘区综合钻孔柱状图、工作面地质条件及煤岩物理力学参数，建立数值模拟地质模型，分析400m超长工作面覆岩破断岩层运移全程动态演化规律。基于此得到研究区域2^{-2}煤与3^{-1}煤不同工作面分别开采结束后的垮落特征。

⑤为掌握上覆煤层遗留煤柱载荷与底板应力演化规律以及近距离下煤层重复采动应力场叠加分布特征和演化规律，根据11盘区、15盘区112201-112209工作面、153101-153107工作面实际布置与回采情况，采用有限元FLAC3D数值模拟软件，基于11盘区、15盘区综合钻孔柱状图、工作面地质条件及煤岩物理力学参数，建立数值模拟地质模型，分析遗留煤柱载荷实际大小与底板应力传递范围以及不同条件下的变化规律，分析下煤层重复采动工作面不同采掘阶段与上覆遗留煤柱应力的叠加效应。

（2）近距离煤层回采巷道合理布置方式研究

通过矿井采掘工程平面图与盘区钻孔柱状图以及矿井生产地质报告，得到上覆2^{-2}煤层11盘区区段煤柱与下覆3^{-1}煤层15盘区工作面实际错距，实际错距范围12-231m，其中有一半的巷道错距小于80m，最小的仅有12m。因此，下煤层巷道的合理留设位置对下煤层巷道掘进有重要意义。有必要对近距离煤层回采巷道合理错距进行理论数值研究。具体研究步骤如下：

①首先建立遗留煤柱底板力学模型，分析遗留煤柱尺寸、煤柱两侧采空区宽度、煤层开采深度、上覆岩层垮落角、上下煤层间距等因素对遗留煤柱底板应力分布的影响，确定采空区遗留煤柱喜下3^{-1}煤层合理错距临界值；其次通过数值模拟根据理论计算合理值进行相互验证。

②通过数值模拟研究下煤层重复开采不同采掘阶段与遗留煤柱底板应力场叠加分布特征和演化规律，分析层间距、层间岩层性质、上覆区段煤柱位置等因素对下煤层巷道围岩变形破坏分布及应力演化规律的影响，得到巷道实际错距小于合理错距时，巷道围岩的变形破坏程度，可能产生的围岩灾害。

③针对实际错距小于合理错距的巷道围岩面临的围岩灾害，在无法改变巷道布置的情况下，从巷道围岩应力环境和现有防控措施方面，提出建设性防控意见，例如在应力叠加影响范围内进行补强支护方案设计，在顶板上方进行切顶卸压方案设计，降低甚至阻断应力的传递。从而是巷道围岩变形得到有效的控制。

（3）近距离煤层超长工作面围岩控制技术研究

矿井3^{-1}煤层需在2^{-2}煤层近距离采空区下开展400m超大工作面

开采，属国内首次实践。受上覆煤层坚硬岩层赋存、采空区遗留煤柱及重复采动影响，叠加超长工作面本身开采强度高的特点，工作面矿压显现极强，回风顺槽等回采巷道面临严重底鼓、帮鼓及顶板失稳等大变形问题，巷道布置与围岩控制难度极大。为解决上述难题，重点围绕巷道布置方式、破坏机理、控制措施及工业性试验验证开展研究：

①基于相似模拟试验与学校实验室内试验数据，结合岩力学、弹塑性力学及“砌体梁”矿压理论，分析采动应力场、覆岩运移及破断能量演化特征，建立岩层活动力学模型，揭示近距离采空区与超长工作面耦合作用下巷道围岩破坏机理，优化巷道布置参数。

②开展针对性相似模拟与室内试验，模拟巷道锚杆索受力特性、顶板离层与滑移变形规律，以及超前支承压力、侧向支承压力的时空分布特征，系统总结顶板运动与巷道应力演化的内在关联，为支护参数设计提供理论支撑。

③结合现场关键监测数据，采用多套数值模拟软件，重点分析上覆采空区、遗留煤柱与本工作面超前支承应力对留巷围岩应力及变形的耦合影响，明确不同回采阶段、不同工程条件下围岩演化规律，通过多方法对比验证结论可靠性。

④依托矿井顶板矿压综合监测预警系统，对 153101 工作面支架工作阻力进行监测，结合相似模拟试验结果，分析矿压显现强度，拟合支架增阻参数，精准掌握周期来压步距、持续时间及影响范围，为围岩控制提供数据支撑。

⑤借助冲击矿井相关监测技术思路，开展覆岩活动三维空间模拟监测，分析顶板及上位关键层破断位置与能量分布特征，建立岩层破断能量事件与矿压显现、应力场的关联关系，揭示远场顶板损伤-断裂-垮落的时空演化规律。

⑥基于相似模拟、室内试验及现场监测结果，对 153101 工作面回采巷道支护质量进行全面评估，优化支护参数体系，针对回风顺槽强矿压顶板管理难题，提出针对性防治措施，并通过工业性试验验证控制技术的有效性与适用性。

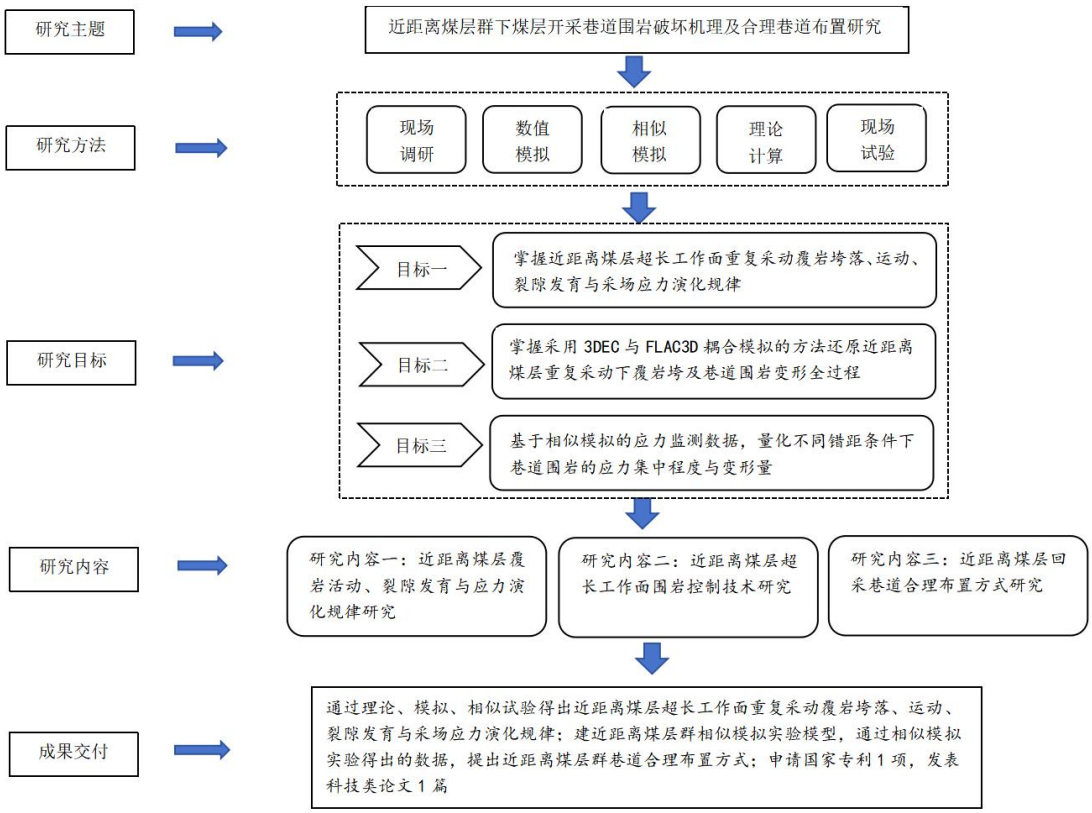


图 1 项目拟采取的技术路线图

3.2 可行性分析

（1）项目组指导教师及主要参与者由西安科技大学西部矿井开采 及灾害防治教育部重点实验室相关研究人员组成，课题组成员长期从事矿山岩体力学、巷道围岩稳定性评价、矿山压力与岩层控制、实验岩石力学细观测定、孔隙介质损伤等方面的基础理论与工程应用研究，申请者先后主持和与国家自然科学基金等基础研究项目 10 余项，主持校企合作研究项目 20 余项，在《Rock Mechanics and Rock Engineering》、《Fuel》、《Transport in Porous Media》、《Energy Science & Engineering》、《煤炭学报》、《中国矿业大学学报》等国内外高水平期刊发表相关论文 20 余篇。项目组成员具有与本课题研究内容相关的理论基础、试验能力及工程实践能力，能够按照研究计划顺利开展项目研究工作。

（2）项目指导教师在攻读研究生学位期间一直从事矿山岩体力学 与岩层控制相关领域的研究工作。项目指导教师在美国密苏里科技大学 联合培养学习期间，开展了砂岩细观结构方面的系统研究工作，为本项目积累了一系列细观力学试验方法、数据综合处理分析、理论模型构建等方面的知识；此后，项目指导教师于 2015 年获批国

家自然科学 基金青年科学基金项目《基于细观结构的煤（岩）体三轴抗压强度快 速评价模型研究》,2018 年获批国家自然科学基金(面上）项目《区段承载煤柱损伤演化及失稳机制的多尺度研究》，通过前期的研究，建立了煤岩体细观结构与力学性质对应关系，为本项目模型的细观表征、结构损伤动态演化机制研究等奠定了基础。

（3）项目指导教师以青年科学基金项目和面上项目为基础进行了充分的科研准备和研究工作，并结合陕西小保当矿业有限公司小保当一号煤矿近距离煤层群开采现场工程实践，通过对研究思路的进一步梳理拓宽，在对现有的实验设备及研究手段充分调研论证的基础之上，严谨务实地提出了该项目的研究内容，并拟定了清晰系统的研究思路与明确合理的技术路线，为该项目研究工作的顺利进行奠定了可靠的基础。

综上所述，本项目拟采取的研究方案及技术路线合理可行，项目组具有较好的研究背景和较丰厚的研究积累，能够保证本项目研究按计划实施并实现预期研究目标。

4、本项目的特色与创新之处：

（1）本项目基于相似模拟实验与 FLAC3D 数值模拟，针对近距离煤层重复采动的特殊性，构建近距离煤层群相似模型，精准复刻层间距、煤柱分布及实际开采顺序，通过灵敏度分析量化各参数的影响权重,明确主导控制因素。基于相似理论，采用河沙、石膏、碳酸钙等材料模拟煤岩介质，精准复刻小保当一号煤矿 2^{-2} 与 3^{-1} 煤层的赋存特征，包括煤层厚度、层间距、顶板岩性分层及 2^{-2} 煤层采空区。

（2）基于相似模拟试验数据，突破传统单一煤层理论局限，遵循矿井先采 2^{-2} 煤层、后采 3^{-1} 煤层的实际开采顺序，得出近距离煤层覆岩演化规律，量化遗留煤柱应力传递范围，明确巷道需避开应力集中区的理论依据。采用 FLAC3D 模拟不同错距下巷道围岩应力与变形，验证围岩最大移近量。以相似模拟结果校准数值模型参数，再通过数值模拟拓展相似模拟无法覆盖的工况，为研究近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置提供新的思路。

5、年度研究计划

本项目研究期限为两年，年度研究计划如下：

2025.11-2026.05：选取典型工程案例；完成国内外相关技术文

献及生产资料的检索与调研；完成矿井基础地质与力学参数收集，现场取样后实验室实验测定及数据分析；确定相似模拟试验方案，搭建试验平台并完成材料配比验证，为后续覆岩演化模拟奠定基础。

2026.06-2026.12：完成近距离煤层大采场覆岩活动、裂隙发育与应力演化规律数值模拟及理论分析研究；完成2^{-2}煤层单一开采相似模拟试验，揭示单一煤层采动下覆岩垮落-裂隙-应力演化规律；采用 FLAC3D 模拟2^{-2}煤层开采，对比数值模拟与相似模拟的“两带”高度、应力峰值位置，校准数值模型本构参数。

2027.01-2027.06：完成3^{-1}煤层在2^{-2}煤层采空区下的重复采动相似模拟试验，揭示重复采动下覆岩二次活化、裂隙导通、应力叠加规律，量化层间距、工作面长度等因素的影响。

2027.07-2027.11：汇总2^{-2}煤层单一开采与3^{-1}煤层重复开采的相似模拟数据，绘制“推进步距-覆岩垮落高度-应力峰值”综合曲线，明确重复采动下应力叠加系数；基于相似模拟最优方案，建立巷道合理布置预测模型，提出巷道布置安全系数计算方法；检查与汇总研究成果，撰写研究报告及结题。

6、预期研究成果

（1）通过理论、模拟、相似试验得出近距离煤层超长工作面重复采动覆岩垮落、运动、裂隙发育与采场应力演化规律；

（2）构建近距离煤层群相似模拟实验模型，结合几何相似比、容重相似比、应力相似比等相似准则设计，通过灵敏度分析量化各参数的影响权重，明确主导控制因素。通过现场实测、数值模拟结果相互验证，精准呈现演化规律。

（3）通过相似模拟实验得出的数据，提炼近距离煤层覆岩演化核心规律，提出近距离煤层群巷道合理布置方式；

（4）申请国家专利 1 项，发表科技类论文 1 篇

二、研究基础与工作条件

1、工作基础：

本项目课题组依托西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室，课题组由重点实验室有关研究人员组成，课题组成员结构及研究方向分布合理，在矿山岩体力学、巷道围岩稳定性评价、

矿山压力与岩层控制、实验岩石力学细观测定、孔隙介质损伤等方面分别进行了大量基础理论与工程应用研究，课题组成员先后主持和参与国家自然科学基金、陕西省自然科学基金等相关科研项目 10 余项，主持校企合作研究项目 20 余项。近年来，在《Rock Mechanics and Rock Engineering》、《Fuel》、《Transport in Porous Media》、《Energy Science & Engineering》、《煤炭学报》、《中国矿业大学学报》等国内外高水平期刊发表相关论文 20 余篇。

与本项目相关的研究工作积累有：

2013 年，项目指导教师在密苏里科技大学进行博士论文研究期间， 对砂岩的细观结构进行了细致研究，通过前期研究，为本项目奠定了 思路的开创，积累了实验尺度细观力学试验方法、数据综合处理分析、 理论模型构建等方面的知识。

2015 年，项目指导教师承担国家自然科学基金青年科学基金项目 《基于细观结构的煤（岩）体三轴抗压强度快速评价模型研究》（批 准号：51504183），通过该项目的实验研究，建立了煤岩体细观结构 与力学性质对应关系，为本项目模型的定量化表征、结构损伤演化的 机制研究等奠定基础。

2018 年，项目指导教师承担国家自然科学基金面上项目《区段承载煤柱损伤演化及失稳机制的多尺度研究》（批准号：51874232），项目基于煤体细观结构形态与特征的数学模型，揭示细观损伤导致宏观破坏的力学机制，从而形成煤柱稳定性评价准则，为本项目考虑裂隙尺寸效应的含损伤本构模型的建立提供重要理论参考，并且为申请项目的技术理论与多尺度研究方法奠定坚实基础。

2020 年，项目指导教师承担国家自然科学基金面上项目《近距离突出煤层群开采多场耦合致灾机理及预警基础研究》（批准号：52074209），项目基于裂隙尺寸效应的含瓦斯煤岩体损伤本构模型、含瓦斯煤岩体损伤破坏的能量判别准则两个重要科学问题研究，明确了基于采动应力场作用下能量耗散与本构行为和破坏模式相互关系的多场耦合作用机制，为本项目研究近距离煤层群下煤层开采巷道围岩破坏机理及合理巷道布置研究奠定理论基础。

本项目课题组与企业开展了 20 余项校企合作及政府咨询等项目课题，积累大量现场方案布置、测试方法、数据处理及问题分析解决等方面相关经验，为理论实践紧密结合奠定坚实基础。

由此可见，课题组对本项目有关研究已有相当的理论与实践积累支撑，受到学术界与企业认可，有助于申请项目取得预期研究成果。

2、**工作条件：**

本项目课题组隶属的西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室具有现场实测所需各类监测仪器仪表、细观结构分析测试设备、电液三轴伺服岩石力学实验系统、损伤测试系统、多通道声发射测试系统、“固-液-气”三相介质相似模拟实验系统等实验条件，可进行开采扰动作用下巷道围岩体内部损伤破裂、裂隙演化及动力失稳预测预报、煤与瓦斯突出等问题分析；受采动影响的围岩破断运动过程中煤与瓦斯突出，瓦斯聚集与运移过程分析；采动影响的煤岩体裂隙时空演化与分布规律相似模拟；以及地下工程材料的单轴加载、三轴压缩、高温高压岩石力学破坏试验与孔隙渗流特性试验分析；拥有研究所需的 FLAC^{3D}、PFC^{3D}、COMSOL、ANSYS、AVIZO、Image J 2x、MATLAB 等数值模拟及图片计算重构的分析软件，可进行含瓦斯煤岩体物理力学以及细观结构特性的表征，建立考虑裂隙宏-细观尺寸效应的损伤本构模型，裂隙场瓦斯运移模拟，块体系统不连续变形分析，采动应力场与位移场数值模拟，多场流固耦合仿真，信息融合的神经网络模型等分析。

项目指导教师丁自伟，美国密苏里科技大学与中国矿业大学（北京）联合培养博士，在矿山岩体力学、巷道围岩稳定性评价、 矿山压力与岩层控制、实验岩石力学细观测定、孔隙介质损伤等方面分别进行了大量基础理论与工程应用研究。申请人李少博、李翔宇进行了充分的科研准备和研究工作，并结合开采现场工程实践，协助开展采动影响下巷道围岩内部损伤破裂、裂隙演化的实验准备工作，包括实验仪器的调试、煤岩试样的制备与参数测定，协助指导教师和项目组成员进行部分数值模拟的前期数据整理与模型搭建工作，如参与采动应力场与位移场数值模拟的基础数据收集和模型初始化设置等

可见，本项目所需工作条件已基本具备。

3、**申请人与指导教师简介**（包括申请人、指导教师和项目组主要参与者的学历和研究工作简历，近期已发表与本项目有关的主要论著目录和获得学术奖励情况及在本项目中承担的任务。论著目录要求详细列出所有作者、论著题目、期刊名或出版社名、年、卷（期）、起止页码等；奖励情况也须详细列出全部受奖人员、奖励名称等级、

授奖年等）

申请人

李少博，男，2005 年生，西安科技大学本科生，现就读于西安科技大学采矿工程（本硕）2401 班，现任本班团支书。在本项目中负责相似模拟模型的具体搭建与调试，按设计尺寸完成煤岩分层铺设。协助整理相似模拟数据，为理论模型提供实测校准依据。辅助完成数值模拟结果与相似模拟数据的对比分析，验证数值模型的可靠性

李翔宇，男，2006 年生，西安科技大学本科生，现就读于西安科技大学采矿工程（本硕）2401 班。在本项目中负责采用 FLAC3D、3DEC 软件构建三维地质模型，还原 2^{-2}煤层采空区分布、3^{-1}煤层超长工作面布置，模拟不同巷道错距下围岩应力与变形特征，整合理论推导与数值模拟结果，为相似模拟试验方案优化提供数值支撑。

指导教师

丁自伟，博士，教授，博士生导师，陕西省“百人计划”特聘教授，陕西省青年科技新星。现任西安科技大学能源学院副院长、校团委副书记，兼任国家矿山安全监察局陕西局煤矿安全生产专家，陕西省岩土力学与工程学会理事，中国岩石力学工程学会委员，《西安科技大学学报》、《煤炭工程》青年编委。

主要从事矿山岩体力学与岩层控制、巷道矿压理论与灾害防治、巷道快速掘进、智慧矿山建设等方面的教学和研究工作。主持国家自然科学基金 3 项，陕西省自然科学基金、陕西省教育厅专项基金等省部级课题 5 项、西安科技大学教育教学改革项目、研究生课程案例库建设项目等校级课题 6 项，主持政府咨询和业合作项目 100 余项；获省部级科技成果二等奖 2 项；发表学术论文 50 余篇，获授权专利 8 项；指导学生各类科技作品竞赛获国家级一等奖 1 项，二等奖 1 项，省部级一等奖 1 项。

作为指导教师在本项目中负责统筹设计相似模拟整体方案，确定几何相似比、应力相似比等核心参数，指导煤岩相似材料配比优化及模型搭建标准。指导数值模拟软件的选型与模型参数校准，明确本构模型选择的依据。指导分析层间距、工作面长度等关键因素对覆岩演化的影响权重，为巷道合理错距公式提供核心推导思路。

科研获奖：

1.深井多元致灾因子耦合作用下TBM智能化高效掘进与灾变防控技术研究，中国煤炭工业协会，中国煤炭工业科学技术奖，二等奖，2022，排名第二。

2.复杂条件突出煤层巷道安全快速掘进工艺与关键技术，中国煤炭工业协会，中国煤炭工业科学技术奖，二等奖，2021，排名第一。

3. 面向煤炭产业转型升级的采矿工程专业改造探索与实践，获陕西省人民政府一等奖，2022，排名第五。

4.陕西省“青年科技新星”特聘教授，陕西省科学技术厅，2021。

近期已发表与本项目有关的主要论著目录：

1.丁自伟,高成登,张玲,等.基于数据驱动的TBM掘进地层岩性识别预测方法[J].采矿与安全工程学报,2025,42(01):147-160.

2.丁自伟,李帅,张杰,等.近距离煤层回采巷道非对称破坏机理及其控制[J].采矿与安全工程学报，2024，41(02)：242-254.（EI）

3.丁自伟,巩欣伟,张杰,等.煤层群下行开采底板应力演化规律与合理巷道错距研究[J].西安科技大学学报,2024,44(02):213-225.

4.丁自伟,高成登,王耀声,等.低阶长焰煤细观结构定量分析与表征单元确定[J]. 煤炭科学技术，2023，51(03)：116-129.（EI）

5.Ding ZW, Li XF, Huang X, et al. Feature extraction, recognition, and classification of acoustic emission waveform signal of coal rock sample under uniaxial compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022(160): 105262.（SCI）

6.Ding, Z. W.; Zhang, C. F.; Huang, X.; Liu, Q. S.; Liu, B.; Gao, F.; Li, L.; Liu, Y. X. Recognition Method of Coal-Rock Reflection Spectrum Using Wavelet Scattering Transform and Bidirectional Long-Short-Term Memory [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2023,55,4765-4781.(SCI,WOS: 001090366900002)

7.Ding, Z., Nguyen, H., Bui, X. et al. Computational Intelligence Model for Estimating Intensity of Blast-Induced Ground Vibration in a Mine Based on Imperialist Competitive and Extreme Gradient Boosting Algorithms [J]. Nature Resources Research,2020,29(2): 751–769.

三、经费申请说明

本次申请研究经费共计人民币 20000 元（大写：贰万元整），经费主要用于项目核心研究环节，包括相似模拟试验、成果产出等的必要开支，具体明细如下。

表 1 经费申请说明

序号	费用类别	预算金额（元）	预算说明
1	研究费	3500	研究过程中文献资料检索、数值模拟软件临时授权、现场调研零星费用。
2	劳务费	2500	相似模拟模型搭建、数据采集(4 人次，每次 3 天)、实验室数据整理（2 人次，累计 4 天），按 100 元/人/天标准核算，保障试验高效推进。
3	相似模拟材料费	8000	购置相似模拟试验所需核心材料：河沙 1.5 吨、大白粉 50kg、石膏 30kg 等；购置试验监测所需传感器及配件：高精度应力传感器 3 个、位移传感器 2 个，配套数据采集线及固定支架。
4	论文版面	2000	计划发表科技类论文 1 篇，按 2000 元 / 篇标准核算，覆盖论文审稿、排版及发表费用。
5	专利费	3000	计划申请国家专利 1 项，覆盖专利申请官费及基础代理费。
6	打印及其他杂费等	1000	用于项目研究报告打印（阶段性报告 4 份、最终报告 2 份，A4 彩印+装订）、数据表格制作、U 盘 2 个及配套耗材等。
	合计	20000	

科研诚信承诺书

1．本人承诺在本科生项目实施（包括项目申请、执行、结题等过程）中，遵守科学道德和诚信要求，严格执行《西安科技大学本科生科研基金资助项目管理办法》（西科办发〔2024〕72 号）管理规定，不发生下列科研不端行为：

（1）在简历、研究基础等方面提供虚假信息；

（2）抄袭、剽窃他人科研成果；

（3）捏造或篡改科研数据；

（4）其它科研不端行为。

2．如本人被举报在项目实施中存在科研不端行为，将积极配合学校开展调查。

3．如违背上述承诺，本人愿接受学校做出的处理决定。

项目负责人签字：李少博

2025 年 11 月 13 日