

煤矿掘进工作面事故原因分析及预防方法

罗五一¹, 侯周熠¹, 王俊明¹, 梁佩文¹, 李雨涵¹, 傅贵¹, 徐永^{1,2,3,4}

¹中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京

²江苏建筑职业技术学院建筑管理学院, 江苏 徐州

³河南鑫安利安全科技股份有限公司, 河南 郑州

⁴徐州高新区安全应急装备产业技术研究院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年9月11日

摘要

为使人们深刻地认识到煤矿掘进工作面事故的发生不仅仅是水、火、瓦斯、煤尘自然等自然因素, 而更为重要的是人因因素所致, 即人的不安全行为。首先收集了近3年掘进工作面事故案例, 依据安全法规获得了掘进工作面事故的关键原因, 即掘进工作面班组长违章指挥、班组成员违章操作与违章行动是事故发生的关键原因; 其次进一步采用事故致因“2-4”模型分析新疆天山机电事故的事故致因链, 获得了事故的组织原因、个体原因与事故原因间的作用路径, 研究表明掘进工作面的班组安全管理体系不完善是导致作业人员的安全知识不足、安全意识不强、安全习惯不佳的直接原因; 最后基于事故致因“2-4”模型动态版构建具有班组文化特征的组织因素与个体因素联动的具有动态特征的综合性干预路径, 提出了建立掘进工作面班组安全文化、优化管理体系、提升个体安全能力及智能化设备的改造与升级的动态管理策略, 以期提高煤矿工人的安全意识进而促进生产安全和生产效率。

关键词

掘进工作面, “2-4”模型(24Model), 事故致因, 组织行为, 个人行为

Analysis of Accident Causes in Coal Mine Tunneling Faces and Corresponding Prevention Measures

Wuyi Luo¹, Zhouyi Hou¹, Junming Wang¹, Peiwei Liang¹, Yuhan Li¹, Gui Fu¹, Yong Xu^{1,2,3,4}

¹School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing

²School of Construction Management, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou Jiangsu

³Henan Xin'anli Security Technology Co., Ltd., Zhengzhou Henan

⁴Xuzhou High Tech Zone Safety Emergency Equipment Industrial Technology Research Institute, Xuzhou Jiangsu

文章引用: 罗五一, 侯周熠, 王俊明, 梁佩文, 李雨涵, 傅贵, 徐永. 煤矿掘进工作面事故原因分析及预防方法[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 943-951. DOI: 10.12677/me.2025.135107

Abstract

To enhance awareness that accidents in coal mine tunneling faces are not solely attributed to natural factors such as water, fire, gas, coal dust, or spontaneous combustion, but more importantly to human factors, specifically unsafe behaviors. Initially, a comprehensive analysis of accident cases from the past three years was conducted, which identified critical causative factors through alignment with safety regulations. The findings revealed that primary accident triggers stemmed from safety regulation violations by team leaders and improper operations by crew members. Subsequently, an in-depth application of the 24Model of Accident Causation to the Xinjiang Tianshanjidian accident elucidated complete causal relationships and established distinct causal pathways. The research demonstrates that deficiencies in team-level safety management systems directly contribute to three critical workforce vulnerabilities: insufficient safety knowledge, weak safety awareness, and poor safety habits among operators. Building on these insights, the study proposes a dynamic prevention framework incorporating four synergistic measures: cultivating team-specific safety culture, optimizing management protocols, enhancing individual safety competencies, and implementing intelligent equipment retrofitting. This integrated approach aims to establish an organizational-individual interaction mechanism with distinctive team cultural characteristics, ultimately improving miners' safety awareness while concurrently enhancing both production safety and operational efficiency.

Keywords

Coal Mine Tunneling Faces, 24Model, Accident Causes, Organizational Behavior, Individual Behavior

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冲击地压、瓦斯灾害、矿井水害、煤层自燃与火灾、复合动力灾害等自然灾害的防控关键技术取得历史性突破,形成了灾害预测和防控的理论与技术体系[1]-[3]。在煤矿开采中,掘进开采过程操作人员作业的安全性直接关系“采掘平衡,采掘接续”问题[4]。统计 2001~2021 年发生 490 起煤与瓦斯突出事故,突出事故主要发生于工作面掘进和回采作业中[2]。而不断完备的理论与技术体系仍然不能完全遏制掘进工作面事故的发生。事故调查结果表明,工人的不安全行为仍是煤矿事故的直接原因[5]-[9]。在 2016 年至 2022 年期间,煤矿事故的作业地点分布情况显示,掘进工作面共发生了 13 起机电事故,煤矿机电事故类型中人的不安全行为导致事故发生的情况共计出现了 52 次,人的不安全行为是引发煤矿机电事故的主要因素,而其中发生次数最为频繁的不安全行为类型为违章作业[10]。2024 年 12 月 3 日贵州晴隆久丰紫马煤矿“12·3”顶板事故,掘进工作面煤层变厚、顶板抬升,矿长张某某等因违章指挥造成 1 人死亡。这表明,在掘进工作面的安全管理与行为控制中仍然存在某些问题没有引起足够的重视。以往人们认为煤矿的主要事故类型是水、火、瓦斯、煤尘等自然条件引起的灾害。然而,掘进工作面的事故并非仅仅局限于这些自然因素,人因因素与管理因素同样是导致事故发生的重要原因。部分学者研究了

煤矿掘进工作面不安全行为影响因素。钱敏研究认为个体影响因素中工作技能和工龄是主要影响因素[11]。而孙林辉等对掘进作业岗位不安全因素进行分析,其中 I 级风险因素未体现人的不安全行为[4]。人们目前还没有完全认识到掘进工作面事故人因因素仍在事故发生中占据相当大的比例。因此,亟需探究掘进工作面事故的关键性原因是什么,以及其中蕴含着班组行为及个人的行为究竟如何引发事故。

事故的原因追溯和事故预防对策的制定的理论依据是事故致因理论,自 1978 年以来,中国学者提出了 20 多种事故致因模型,其中事故致因“2-4”模型是一种基于行为演化机制的模型,在国内外得到了比较广泛的引用和应用[12]-[14]。为使人们认识到人因因素在掘进工作面事故发生中仍占据相当大的比例,同时为探析导致掘进工作面事故各原因间深层次的关系。本研究选择近三年 11 起掘进工作面事故作为研究案例,研究煤矿机掘工作面引发的事故的原因,基于事故致因“2-4”模型分析其中一起事故案例中的事故原因及原因间的作用路径,结合事故关键原因及事故致因因素间的逻辑关系,提出预防掘进工作面事故的综合性措施,以提高煤矿生产的安全性和生产效率以及人们的安全意识。

2. 掘进工作面事故的原因分析

甄选近三年内可查报告的典型 11 起煤矿掘进工作面事故案例,如表 1 所示。依据《安全生产法》《煤矿安全规程》《煤矿安全生产条例》,分析获得掘进工作面事故的关键原因。案例 1、2、7、9、10 数据来源于事故调查报告,其余案例来源政府与地方煤监局官方发布于微信公众号或者新闻报告中。

表 1 中的 11 起机电事故中,四个事故案例发生违章指挥,即新疆天山矿业“10·4”事故、河南平煤十二矿“1·12”事故、山西程家沟煤矿“8·24”事故及山西东坪煤业“7·12”事故,说明这个矿的掘进工作面班组长或班队长采掘工作面的安全知识严重不足、安全意识不强、日常生产过程中严重思想麻痹导致习惯性违章指挥;含有违章操作的矿井有 9 个矿井占比 81.8%,含有违章行动的矿井有 8 个矿井占比 72.7%。以上分析结果表明掘进工作面的事故类型多数可能是违章指挥、违章操作及违章行动等人的不安全行为所致,说明作业班组工作人员安全能力不足。下一节将以新疆天山“10·4”机电事故,详细分析不安全行为间的逻辑关系,以制定应对掘进工作面事故的策略。

Table 1. Accident cases and causes of tunneling working faces

表 1. 掘进工作面事故案例及其事故原因分析

序号	事故案例描述	关键原因
1	2024 年内蒙塔然高勒煤矿“11·8”一般机电事故。掘进二队副队长徐某组织早班会并布置工作任务,强调安全注意事项。当掘进作业完成后开始支护和检修工作。两天前安排加工的带式转载机架连接板被要求当班装上,检修工于某决定带徒弟刘某借助手拉葫芦更换该连接板,需要起吊工具将带式转载机机尾升高约 0.1 米。刘某使用五环链、锚索头将 3 吨手拉葫芦吊钩挂在机尾正上方顶板的支护锚索上,其主链末端捆绑在带式转载机机尾第一、二节之间的连接架上,此时手拉葫芦的主链处于 61.5 度的倾斜状态。于某拉拽手拉葫芦的手动链条,逐渐提升转载机尾部,期间刘某负责拆除连接板的销子,更换连接板。当转载机捆绑处提升了约 0.08 米,手拉葫芦的主链突然崩断,转载机瞬间下落,将正在转载机第三节机架下方弯腰穿行的梁某挤压,造成梁某死亡。	检修工于某、刘某违规选用额定负荷不足的手拉葫芦起吊带式转载机,梁某违章弯腰穿行被挤压致死。
2	2024 新疆天山矿业“10·4”一般机电事故。掘进工作面班长兼掘进机司机张某等作业人员完成巷道掘进和支护工作后。张某将掘锚一体机停机,但未将截割滚筒断电闭锁。此后,张某带领某、韩某等 3 人使用手持气动锚杆机对硐室无法使用机载锚杆钻机支护区域补打锚杆。韩某站在滚筒护板上连接顶部锚网。张某为方便谢某、尹某张拉掘锚一体机机尾处巷道顶部锚索,使用遥控器对掘锚一体机尾部进行调整,操作时突然启动了截割滚筒,导致正在连网的韩某坠落到滚筒上,韩某下半身被卷入滚筒,最终韩某经过抢救后死亡。具体细节见 2.2 节。	作业人员在运转设备上违规作业;掘进机司机违章操作掘锚一体机且违章指挥。

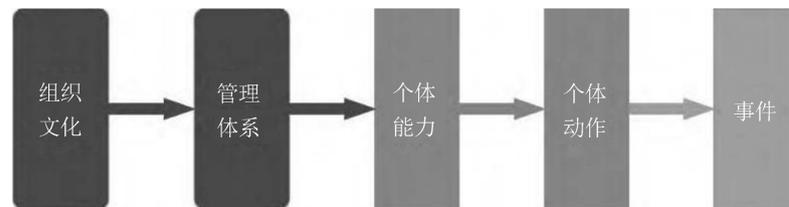
续表

3	2024 山西万鑫安平煤业“4·3”事故。运输下山 2#煤探巷掘进工作面，掘进机司机张某某在未确认作业区域人员是否全部撤离的情况下，直接启动掘进机。设备启动时，此时支护工李某正在工作面迎头处进行锚索施工，被突然启动的掘进机截割头绞伤致死。	掘进机司机张某某违章操作掘进机；李某违章行动正在工作面迎头处。
4	2024 山西朔州晋能控股集团轩岗煤电麻家梁煤矿“3·15”一般机电事故，造成 1 人遇难。事故发生在下午 3 点 55 分，地点为 4 煤层 14504 胶带顺槽掘进工作面迎头。当时，机掘二队的普工李某某正在使用掘进机清理底渣，因胶管缠绕在截割头上，作业人员在拉拽胶管时被截割头割伤不幸身亡。	掘进机司机张某某违章操作掘进机；李某违章行动正在工作面迎头处。
5	2024 年山西临汾蒲县宏源集团富家凹煤业“3·14”一般机电事故。11309 回风顺槽掘进工作面进行掘进作业，司机张某某在未对设备周围进行安全巡视确认的情况下操作锚杆转载机，锚杆转载机向左帮偏移，将滞留在设备作业范围内的工友挤伤致死。	司机张某某违章操作掘进机；作业人员违章行动滞留在设备作业范围内。
6	2024 年山西长治武乡东庄煤业“3·12”一般机电事故。井下 150109 运输顺槽掘进工作面发生了一起一般机电事故，造成 1 人遇难。事故发生时，掘进机司机石某某在未确认作业人员安全撤离的情况下违章开始挪移掘进机截割头，掘进机在挪动过程中，将站在工作面迎头工友撞伤致死。	掘进司机石某某违章操作；作业人员违章行动站在工作面迎头
7	2024 年河南平煤十二矿“1·12”煤与瓦斯突出事故，事故发生在己 15-31090 进风巷外段掘进工作面，该巷道为连接己 15-31090 进风巷和己 15-31090 进风石门的一段巷道，连通后用于己 15-31090 工作面回采煤炭的运输。2024 年 1 月 1 日开始施工该巷道，在保护层保护范围内采用综掘工艺，进入保护层保护范围外后改为爆破落煤、综掘机清煤工艺，至事故发生已掘进 64.3 米。该掘进工作面迎头位于保护层工作面实际停采线外 10.7 米处(保护层保护范围以外 18.4 米)，处于正在揭开己 16.17 煤层位置，标高-828 米，埋深 1108 米。造成 16 人遇难、5 人受伤，直接经济损失 2197.29 万元。	未严格落实两个“四位一体”综合防突措施，未消除煤与瓦斯突出危险，仍违规掘进作业，综掘机清煤过程中发生煤与瓦斯突出。
8	2023 年山西付家焉煤业“11·21”一般机电事故，造成 1 人死亡。事故发生在井下运输巷道。掘进二组在井下掘进机扫底出渣作业时，未安排专人在行人侧警戒线处警戒。材料员童某军违章越过警戒线进入掘进机作业危险区域，在机尾处滑倒被挤压致死。	掘进二组违章指挥；作业人员违章行动进入掘进机作业危险区域。
9	2023 年山西程家沟煤矿“8·24”一般机电事故，造成一人死亡。2023 年 8 月 24 日 22 时 22 分，大同煤矿集团阳方口矿业有限责任公司程家沟煤矿 52602 回风顺槽回风绕道掘进工作面发生一起一般机电事故，造成 1 人遇难。掘进队跟班队长违章指挥支护工操作掘进机，掘进机截割头绞住被埋压的风镐风管，导致违章进入掘进机作业范围内拖拽风管的作业人员滑倒并落入掘进机截割头右下部，被绞伤致死。	掘进队跟班副队长违章指挥无证人员王某曹作掘进机；支护工违章操作掘进机。
10	2022 年山西临汾北峪煤业“5·21”一般机电事故，综掘班长杨某召开早班班前会，安排 1102 切眼掘进工作面进行设备检修、刮板输送机延伸、清障等掘进一个循环的作业工作，并强调安全注意事项。13 时左右，支护工李某、韩某在刮板输送机两侧清理浮煤，支护工刘某、高某看护掘进机二运跑道，安全员汪某在掘进机右后侧设置警戒和看护线缆，杨某(无特种作业操作证)操作掘进机割煤。因 1102 回风顺槽胶带输送机多次故障停机，汪某先后两次到切眼口处打电话询问停机原因，离开警戒位置期间未停止掘进机割煤作业。在汪某离开警戒位置期间，韩某违章从正在割煤的掘进机右侧进入工作面迎头，被运转的掘进机耙爪刮倒绞伤，并被割落的煤炭埋压。随后杨某沿途通知本班组人员下班，期间未集中清点人数。此后，白某开始操作掘进机清理工作面迎头浮煤。白某发现一人被埋压，随后两人合力将其从浮煤中挖出，挖出时韩某已无生命体征。	负责警戒的汪某违章行动离开警戒点；支护工韩某违章行动从正在割煤的掘进机右侧进入工作面迎头。
11	2022 年陕西冯家塔煤矿“5·4”机电事故，造成 1 人死亡。一名作业人员于 8506 准备工作面运输顺槽开展工作，该作业人员正在解除平板车上捆绑钢轨的操作，然而，在作业过程中，意外突然发生，胶带输送机在运行中突发故障，导致机械部件失控，该工作人员在未停机、未断电的情况下冒险进行设备检修或清理作业，被卷入机械传动部位。事故发生后，矿井启动应急响应，但未能挽回人员生命。	工作人员违章操作未严格按照操作规程进行机电设备的操作。

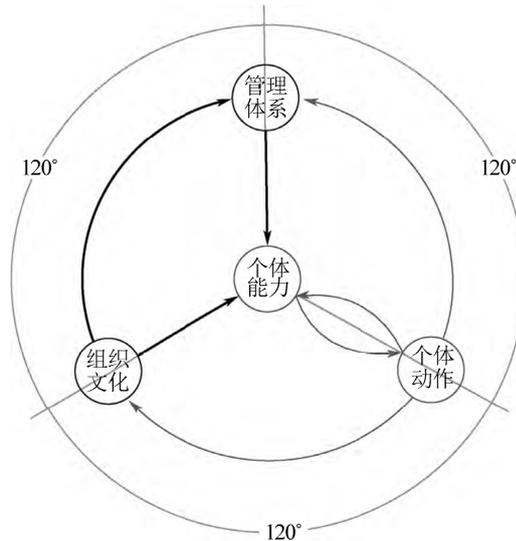
3. 事故致因“2-4”模型与掘进工作面事故原因间的作用路径

3.1. 事故致因“2-4”模型[12]

事故致因“2-4”模型简述为24Model，能够追溯事故原因和制定事故预防对策，其充分表达自身的系统性、动态性和非线性。24Model揭示了直接原因、间接原因、根本原因与根源原因之间的行为演化关系，分别对应于个体动作、个体能力、管理体系与安全文化的欠缺，并按照事故发生的过程，将事故致因因素分为个体因素和组织因素两大类；其中，后两者是组织因素，前两者是个体因素。安全文化指与事故发生密切相关的若干条相关行业通用的原理[12]；根据国际标准化组织给出的管理体系定义和安全管理标准，组织的管理体系就是该组织的安全管理即事故预防工作方案，具体包括安全方针、组织结构、程序文件及作业文件等[12]；间接原因即安全能力是所有直接原因发出者的状态，包含安全知识、安全意识、安全习惯、安全生理和安全心理；24Model的动作是指与当次事件发生有关的组织中所有成员中的个体动作。本论文案例的不安全动作的判定标准为《煤矿安全规程》。24Model静态版表达了安全业绩与事故的致因因素及其相互关系和形成过程，而动态版则表达了24Model的系统性和行为演化过程，其静态结构与动态结构如图1所示。



(a) 24Model 的静态结构



(b) 24Model 的动态结构

Figure 1. Accident cause 24Model structure diagram

图1. 事故致因“2-4”模型结构图

3.2. 事故致因“2-4”模型分析掘进工作面事故原因间的作用路径

为进一步分析掘进工作面事故原因及事故各原因间的关系与作用路径，基于24Model，选择2024新

疆天山矿业“10·4”机电事故为典型事故案例，建立掘进工作面掘进机作业事故原因路径图。2024年10月4日16时许，新疆天山矿业掘进二区张某组织召开班前会，安排72101材料道掘进工作面掘进2m，并对钻机硐室进行扫底和补打锚杆(锚索)。19时50分许，72101材料道掘进工作面班长兼掘进机司机张某等10名作业人员到达工作面后开始掘进作业。23时55分许，张某为了方便谢某、尹某2人张拉掘锚一体机机尾处巷道顶部锚索，使用遥控器对掘锚一体机尾部进行调整，操作时突然启动了截割滚筒，导致正在连网的韩某坠落到滚筒上，邢某看到后，立即大喊“赶紧停、有人”，听到喊声后张某立即停机，发现韩某下半身被卷入滚筒。造成1人遇难，直接经济损失145.18万元。依据煤矿伤亡事故分类规定，本起事故为机电事故；依据《矿山生产安全事故报告和调查处理办法》，本起事故等级为一般事故。事件中的个体动作按照影响事故的时间顺序与逻辑关系进行分析，除安全文化外，如图2描述了“10·4”机电事故的致因链，其中UA代表不安全动作，SM代表安全管理体系。

如图2所示，从个体层面看，导致事故发生的最直接原因是事件UA2，即掘进机司机未进行安全确认操作掘进机，在掘锚一体机停机但未将截割滚筒断电闭锁的情况下，截割滚筒突然启动，致使站在滚筒护板上的韩某死亡。24Model中的直接原因包含违章指挥、违章作业及违章行动[15]。事件UA6未使用登高作业设备，事件UA4张某违章指挥韩某站在掘锚一体机上补打锚杆(锚索)，事件UA6与UA4同时在失控中起作用导致韩某违章行动站在滚筒护板上作业。事件UA4发生是由于巷道未按照掘锚一体机使用说明进行设计、部分锚杆靠人工补充锚杆支护。间接原因是掘进二区作业班组掘锚一体机驾驶员张某安全、设计巷道员工等人员安全知识不足，韩某安全意识较差且未有充分的安全知识。除班组长兼掘进司机韩某违章操作掘锚一体机、违章指挥作业人员作业、韩某违章行为外，尹某、邢某等班组成员违章行动。此外，从事故报告中发现现场无登高作业设备推断作业班组安全习惯不佳，有可能长期站在掘锚一体机上对巷道顶部补打锚杆。

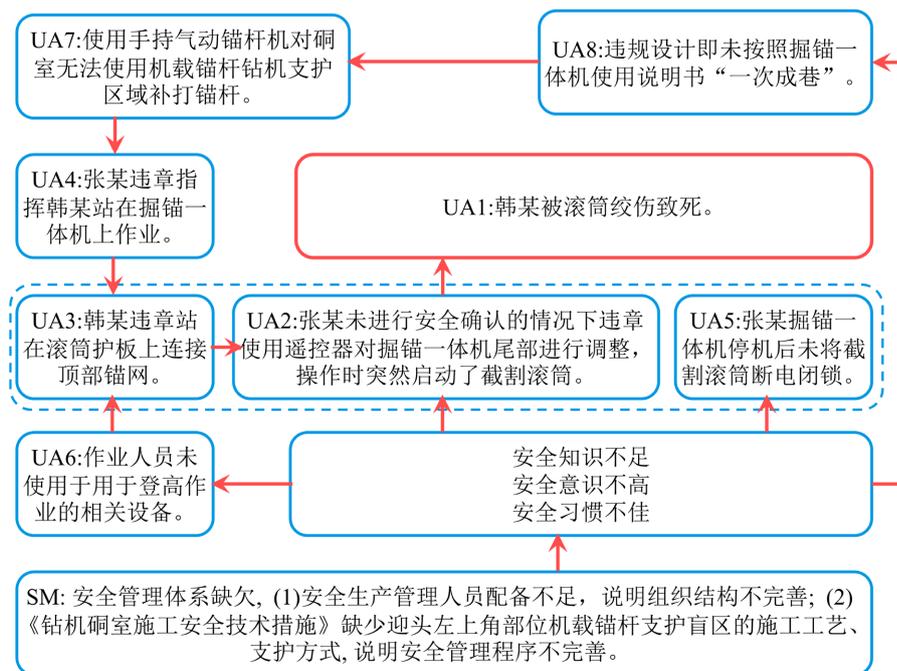


Figure 2. Safety management system, individual capabilities and individual action path diagram
图2. 安全管理体系、个体能力及个体动作作用路径图

从组织层面看，天山矿业公司安全管理体系上欠缺，例如事故报告中披露的人员配备不足，说明组

织结构不完善；缺少迎头左上角部位机载锚杆支护盲区的施工工艺、支护方式，说明掘进工作面的作业指导、技术规范不完善。尽管事故报告中说明了部分安全文化问题，例如培训不足。但从本案例的事故致因链中可以推断出掘进工作面机电事故的发生不仅是人的不安全操作问题，即违章指挥、违章操作和违章行动，而且更为重要的是掘进工作面作业员工安全能力不足，即安全知识不足、安全意识不强；更为深层次的原因是掘进工作面安全管理体系不完善与安全文化的指导性行为不强。根据掘进工作面的事故原因，下一节重点讨论组织因素与个体因素联动的综合性预防方法。

4. 掘进工作面作业事故预防方法

国家与各地方针对本地区发生的掘进工作面事故发布事故调查报告、警示教育片等，以起到警示、示范及预防事故的作用。例如，2024年12月16日国家矿山安全监察局内蒙古局公开了《国家能源集团杭锦能源有限责任公司塔然高勒煤矿“11·8”一般机电事故调查报告》，报告中并给出了作业现场安全管理不到位、现场交叉作业管控不到位等事故教训，提出了事故防范和整改措施，例如强化现场作业安全管理的建议等，此后发布了警示教育片。2025年1月河南平煤神马集团平顶山天安煤业十二矿2024年“1·12”重大煤与瓦斯突出事故警示教育片，公布了重大煤与瓦斯突出事故案例暴露出的主要问题，一是未按规定落实防突措施，二是违规组织生产，三是故意弄虚作假，四是安全管理存在漏洞，同时“1·12”事故调查报告中给出了改进措施。尽管事故调查报告中提出了预防掘进工作面人因事故的建议与方法，但实际操作上需要更为具体的实施方法。

事故致因“2-4”模型是不仅仅用于分析事故原因，也是赋能作业员工安全能力的系统化方法。上文11案例分析说明掘进工作面事故的发生主要是人的不安全行为所致、同时安全文化与安全管理体系存在不足的问题。而改变人的不安全行为的核心的解决办法是增强个体的安全能力。如图1(b)所示的24Model动态结构，个体动作被三条路径影响，一是组织文化作用于个体能力进而影响个体动作，二是组织文化影响安全管理体系进而作用于个体能力改良个体动作，三是安全管理体系直接影响个体能力进而推动个体动作改变[12]。24Model的个体动作有三条路径反作用于个体能力、安全管理体系及安全文化。因此，从增强组织行为与个体行为两个方面，建立组织因素与个体因素联动的方法应对安全知识欠缺、安全意识不足、安全意识不佳的问题。如图3所示，从四个方面构建具有班组文化特征的组织因素与个体因素联动的具有动态特征的综合性干预路径，具体预防掘进工作面事故的方法如下：

(1) 构建班组安全文化。24Model安全文化是指导行为，表1中11起掘进工作面事故，每一起事故均含有作业人员的不安全行为，违章指挥、违章作业、违章行动三个方面至少含有两个方面，说明构建班组安全文化的重要性。24Model中包含32个安全文化元素，在班组安全文化构建上，安全纪律方面领导负责程度体现在赋能班组长的安全意识上，班组上既是执行者又是指挥者，现场最了解实际工作情况的第一责任人，其负责监督、约束与落实安全技术措施；定期进行安全培训，采用虚拟现实VR与增强现实AR等科学技术，依托典型掘进工作面机电事故视频案例，促使班组成员理解与熟知发生事故的背景知识、违反条例、原理与事故造成的后果，塑造安全能力进而规范行为。

(2) 优化掘进工作面管理制度。优化班组长安全行为规范与奖惩方案，设计一份包含具体检查项目和标准的《掘进工作面班组安全行为规范检查表》，修订掘锚等机械设备检查与维修方案及其操作流程，完善掘进工作面施工组织结构。实行高风险作业需安监员+技术员“双监护”，并开发手机APP可直接报矿长与总工程师建立“隐患直报”通道。形成制度约束，班组、安全员、技术员共同监督的闭环机制。

(3) 个体安全能力提升的手段。开发一个基于手机APP的、包含动态知识问答和模拟场景判断的培训模块原型，在实施掘进工作前，在安全交底的过程中进行动态化的知识测试并实时反馈结果，强化安全知识、增强安全意识、矫正不良习惯，进而促使掘进工作面作业人员正确使用设备且能够及时应对突

发情况。

(4) 规范个体行为且智能化设备的改造与升级二者联动约束人的行为，提高人机交叉作业安全。应用智能化技术对煤矿掘进工作面进行监测与预警，智能化掘进机必须配备人员接近感应闭锁装置并与截割部联动停机[16]。

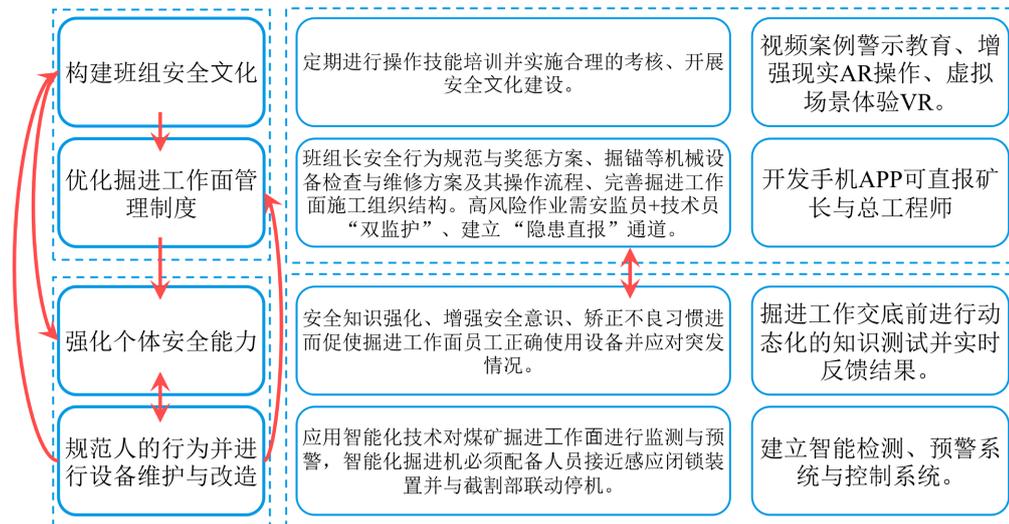


Figure 3. Method for preventing accidents in tunneling working faces based on 24Model
图 3. 基于 24Model 构建预防掘进工作面作业事故方法

5. 结论

本研究基于近三年典型掘进工作面事故案例，运用事故致因“2-4”模型理论，系统分析了掘进工作面事故的关键致因机制，并构建了组织与个体协同的预防干预体系，主要研究结论如下：

(1) 事故类型特征分析表明，掘进工作面事故不仅由水、火、瓦斯、煤尘等自然因素引发，更突出表现为人为因素主导的安全问题，其中班组长违章指挥与班组成员违章操作等不安全行为是导致事故发生的直接原因。

(2) 机电事故专项研究发现，该类事故主要源于双重因素，一是作业人员安全技能与风险认知存在显著不足，二是现有安全管理体系在制度设计、执行监督等环节存在系统性缺陷。

(3) 基于“2-4”模型动态理论，构建了“四位一体”的预防干预体系，通过培育班组特色安全文化、优化管理体系架构、强化个体安全能力培育、推进智能化设备升级等措施，形成组织因素与个体因素协同联动的动态防控机制，全面提升煤矿安全生产水平。

(4) 研究创新性地提出组织行为与个体行为的双维联动机制，该机制通过动态强化路径可实现弥补设备固有缺陷、提升人员安全素质、规范作业行为标准，从而有效遏制人因事故。虽然研究结论建立在扎实的理论基础和 11 个典型案例分析之上，但未来研究仍需在以下方面深化，包括扩大样本规模进行验证性分析、采用量化统计方法评估班组安全状态，探索人工智能技术在人员安全能力提升中的应用路径。

基金项目

中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目资助(202412001)；江苏省安全应急装备技术创新中心(BM2022013)；2024 年校级教育科学研究课题新质生产力背景下“职业健康安全”课程开发与实践研究(ES2024-2)；江苏省高职院校教师企业实践培训项目资助(2024QYSJ042)。

参考文献

- [1] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
- [2] 张超林, 王培仲, 王恩元, 等. 我国煤与瓦斯突出机理 70 年发展历程与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 59-94.
- [3] 王虹, 陈明军, 张小峰. 我国煤矿快速掘进 20a 发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1199-1213.
- [4] 孙林辉, 尚康, 袁晓芳. 基于 LEC 法的煤矿掘进作业岗位安全风险评价研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 248-252.
- [5] Tong, R., Zhai, C., Jia, Q., Wu, C., Liu, Y. and Xue, S. (2018) An Interactive Model among Potential Human Risk Factors: 331 Cases of Coal Mine Roof Accidents in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, Article 1144. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061144>
- [6] 李磊, 折亚亚, 马梦格, 等. 基于 SNA 的煤矿工人安全信息认知影响因素研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 244-248.
- [7] 李琰, 岳雪娇, 陈侠君. 矿工不安全行为特征的关联规则分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(12): 247-252.
- [8] Yang, L., Birhane, G.E., Zhu, J. and Geng, J. (2021) Mining Employees Safety and the Application of Information Technology in Coal Mining: Review. *Frontiers in Public Health*, **9**, Article 709987. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.709987>
- [9] 解学才. 以组织为范围的煤与瓦斯突出事故原因研究及预防应用[D]: [博士学位论文] 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- [10] 程磊, 孙洁. 2016-2022 年我国煤矿事故统计与规律分析[J]. 煤炭工程, 2023, 55(11): 125-129.
- [11] 钱敏, 何敏洁, 王尚武. 智能化煤矿掘进工作面不安全行为影响因素及防控措施[J]. 技术与创新管理, 2023, 44(1): 104-110.
- [12] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第 6 版的研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 12-19.
- [13] Yuan, C., Fu, G., Zhao, J., Wu, Z., Lyu, Q. and Wang, Y. (2023) Comparative Study of Fault Tree Analysis and 24model: Taking the Cause Analysis of the Quanzhou Xinjia Hotel Collapse Accident as an Example. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, **30**, 108-118. <https://doi.org/10.1080/10803548.2023.2259698>
- [14] Fu, G., Xie, X., Jia, Q., Li, Z., Chen, P. and Ge, Y. (2020) The Development History of Accident Causation Models in the Past 100 Years: 24model, a More Modern Accident Causation Model. *Process Safety and Environmental Protection*, **134**, 47-82. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.027>
- [15] 栗婧, 辛艳丽, 蔡忠杰, 等. 基于 SOR 模型的煤矿工人违章行为分析[J]. 煤矿安全, 2023, 54(4): 244-250.
- [16] 喻川. 基于 UWB 精确定位技术的掘进工作面人员接近防护系统[J]. 智能矿山, 2024, 5(2): 79-83.