

# 非煤地下矿山受限空间锚杆支护应用困境及改进技术路径

高 林<sup>1,2,3</sup>, 李 胜<sup>1</sup>, 温世平<sup>4</sup>, 汤 绒<sup>1</sup>, 翟浩然<sup>1</sup>

(1. 贵州大学矿业学院; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭行业巷道支护与灾害防治工程研究中心;  
3. 贵州大学喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室; 4. 贵州新恒基矿业有限公司)

**摘要:**深入探讨了非煤地下矿山受限空间锚杆支护应用所面临的困境及改进技术路径。非煤地下矿山矿体赋存条件复杂,薄矿体开采、切割上山等情况产生的受限空间普遍存在,导致锚杆安装效率与支护效果显著下降,使得传统锚杆支护难以有效应用。分析了非煤地下矿山受限空间的特点及其对锚杆支护的影响,得出空间高度不足、设备适配性差、托盘结构和受力不匹配及预紧力控制技术困难等问题是制约锚杆支护效果的主控因素。从关键技术及工程应用挑战两方面,系统综述了锚杆支护方面的研究进展。针对非煤地下矿山受限空间锚杆支护应用困境,提出了包括钻机小型化、异形托盘创新及预紧力精准控制技术等在外的集成化改进技术路径。展望了非煤地下矿山支护技术的未来发展方向,强调通过设备适应性提升、控制精度强化与材料性能突破等方法,为深部资源开发提供全要素技术支撑,不断提高非煤地下矿山开采的安全性与高效性。

**关键词:**非煤矿山;地下开采;受限空间;巷道支护;树脂锚杆;技术路径

中图分类号:TD353+.6

文章编号:1001-1277(2025)10-0019-08

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251003

## 引 言

锚杆支护作为一种重要的加固支护方式,在边坡、岩土深基坑、隧道、采场等地下硐室施工中被广泛应用<sup>[1]</sup>。与井工煤矿相比,非煤地下矿山矿脉形态多变,机械化开采程度相对较低。薄矿脉开采条件下,脉内掘进的切割上山、中(分)段平巷等普遍形成相对低矮的作业空间(如图1所示),本文定义为“受限空间”。随着非煤地下矿山开采向深部延伸,矿体赋存条件日趋复杂,加之受限空间的普遍存在,导致锚杆安装效率与支护效果显著下降的情况屡见不鲜,非煤地下矿山树脂锚杆支护技术应用与推广陷入困境。

在此背景下,传统锚杆支护技术在非煤地下矿山受限空间中应用的局限性愈发明显。例如:现有锚杆钻机整体设计未充分考虑地下矿山空间约束特性,钻机的设计参数与非煤地下矿山受限空间不匹配,机身高度过高,无法正常竖直作业,导致锚杆倾斜安装工况成为常态(如图2所示)。这种非理想安装方式普遍存在预紧力不足、剪切荷载集中及锚固失效等问题<sup>[2]</sup>,钻机动力系统与受限空间不匹配,破岩效率低,除尘系统效率低。此外,普通锚杆托盘无法适应锚杆倾斜安装要求,导致扭矩传递与预应力扩散失效,强度匹配失衡,围岩表面不平整进一步降低托盘与围岩的贴合度,削弱荷载传递效率。同时,锚杆倾斜安装



a) 切割上山



b) 脉内平巷

图1 贵州某金矿井下受限空间示意图

Fig. 1 Diagram of a confined space in a gold mine underground in Guizhou Province

收稿日期:2025-07-08; 修回日期:2025-08-01

基金项目:2024 年度贵州省科技创新人才团队建设项目(定向)(黔科合人才 CXTD(2025)012)

作者简介:高 林(1986—),男,副教授,博士,从事矿山岩体力学及岩层控制方面的研究工作;E-mail:lgao@gzu.edu.cn

造成预紧力沿锚杆轴线的有效传递效率降低,加上施工工艺限制和工人操作技能水平不足,导致预紧力难以有效精准控制,严重制约树脂锚杆发挥支护效果。面对上述技术应用困境,亟待构建适用于非煤地下矿山受限空间约束条件下的树脂锚杆支护技术与方法体系。



a) 安装形态



b) 支护失效

图2 锚杆倾斜安装示意图

Fig. 2 Diagram of inclined installation of bolts

近年来,围绕锚杆支护理论及技术研究,国内外学者取得了较为丰硕的研究成果。例如:在煤矿领域,中国已构建以机械化锚杆钻机为核心的成套装备体系,并配套形成智能化施工工艺。这一技术体系通过集成液压控制、自动钻孔、多臂协同作业及实时监测等功能,实现了巷道支护从人工操作向机械化、智能化作业的跨越式发展<sup>[3-5]</sup>。当前,煤矿智能化支护技术正向“掘锚运一体化”方向深化<sup>[6-7]</sup>,这些技术成果为非煤地下矿山提供了从单机智能化到成套装备体系化的升级路径,特别是在复杂环境条件下,煤矿领域的技术积累具有显著的跨领域应用前景,为非煤地下矿山支护技术提供了有益借鉴。

基于上述研究背景,以非煤地下矿山受限空间锚杆支护为研究对象,系统分析了其应用存在的主要困境,并提出主要改进技术路径。研究成果旨在破解非煤地下矿山受限空间锚杆支护应用困境,为推动非煤

地下矿山智能化支护装备研发提供科学依据。

## 1 矿山锚杆支护主要类别及优缺点分析

非煤地下矿山受限空间的稳定性对于确保矿山安全、高效生产至关重要,对其支护难题的解决直接关系到作业人员的生命安全与矿山的长远发展。随着科学技术的不断进步,矿山支护手段正逐步从被动型向主动型转变。在传统的被动支护模式下,支护措施主要依赖于在巷道开挖后,于围岩外部设置支架类构造,如U型钢、U型棚及砌碇支护等。这些支护方式通过其自身的坚固程度来支撑围岩,防止其变形或坍塌。然而,被动支护模式存在明显的局限性,它无法从根本上改变围岩的受力状态,只能被动承受围岩的压力,因此在面对复杂地质条件或高应力环境时,往往难以达到理想的支护效果。相比之下,主动支护模式则是一种更为先进、有效的支护方式。它同样在巷道开挖后进行,但不同之处在于,主动支护是将锚杆、锚索等支护材料植入围岩内部,通过施加预应力使围岩与锚杆协同作用,共同承受压力。这种支护方式不仅增强了围岩的整体强度,还显著提高了其自承能力,从而实现了围岩变形的有效控制<sup>[8]</sup>。

锚杆支护的类型多种多样,包括机械锚固式锚杆、黏结锚固式锚杆、摩擦锚固式锚杆及混合锚固式锚杆等,各种主要锚杆类型及其优缺点如表1所示<sup>[9-11]</sup>。在众多锚杆类型中,树脂锚杆凭借其高强度和可施加更大预紧力的特性,在矿山巷道支护中发挥着至关重要的作用。与被动支护相比,树脂锚杆支护作为主动支护手段,通过施加预紧力,在围岩中建立主动压力场<sup>[12]</sup>,使锚杆始终处于高应力状态,从而显著提升支护体系的整体刚度。这种预应力主导的支护机制,使树脂锚杆能够有效抑制围岩早期离层,降低巷道变形量,尤其对软岩破碎带展现出的控制效果,使其成为现代矿山巷道支护的绝对主力<sup>[13]</sup>。近年来,非煤地下矿山也逐步采用树脂锚杆进行支护,这主要得益于其显著的技术优越性。树脂锚杆的锚固力远超传统锚杆,同时,其强度高、质量轻、柔性好等优点使其更能适应复杂地质条件<sup>[14]</sup>。此外,树脂锚杆的应用还显著降低了支护成本,提高了矿山开采的经济效益。

## 2 受限空间树脂锚杆支护应用困境

基于现场调研,非煤地下矿山受限空间中的树脂锚杆支护面临施工作业空间约束、设备适配性差、托盘结构与受力不匹配及预紧力控制技术等多方面的难题,严重制约了矿山开采的安全性与高效性。这些

表 1 主要锚杆支护类型及其优缺点

Table 1 Main types of bolting support and their advantages and disadvantages

| 材质    | 锚固方式     | 类型     | 优点                                | 缺点                                    |
|-------|----------|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 金属锚杆  | 机械锚固式    | 楔缝式锚杆  | 结构简单,安装便捷;锚固力直接作用于坚硬岩壁            | 仅适用于坚硬完整岩层;岩层软化或破碎时,锚固力急剧下降;易因围岩变形而失效 |
|       |          | 倒楔式锚杆  | 锚固可靠,可通过调整活动楔增强锚固力                | 适用条件苛刻,安装精度要求高,围岩变形时易松动               |
|       |          | 涨壳式锚杆  | 通过旋转杆体实现快速锚固,对中硬岩层适应性较好           | 锚固力依赖岩壁完整性,软岩或破碎岩层中效果差                |
|       | 黏结锚固式    | 树脂锚杆   | 锚固力强且可靠,适应大多数岩层,可端部/加长/全长锚固,施工速度快 | 树脂成本较高,药卷质量与混合工艺影响锚固效果,高温环境下性能可能下降    |
|       |          | 中空注浆锚杆 | 兼具注浆加固功能,适用于破碎岩层;全长黏结锚固,刚度高       | 施工复杂,注浆质量难控制,成本高于普通锚杆                 |
|       | 摩擦锚固式    | 管缝式锚杆  | 全长摩擦锚固,及时支护;抗动压性能较好               | 需专用安装设备,钻孔直径需精确匹配,含水岩层中易锈蚀失效          |
|       |          | 胀管式锚杆  | 通过高压水膨胀锚固,适应含水岩层;全长锚固,刚度高         | 安装复杂,成本高,适用场景有限                       |
| 非金属锚杆 | 机械或黏结锚固式 | 木锚杆    | 成本低,易切割                           | 强度低,易腐蚀,服务寿命短,仅用于临时支护                 |
|       |          | 玻璃钢锚杆  | 抗腐蚀性强,可切割,适用于高瓦斯巷道煤帮              | 抗剪能力弱,延伸率低,锚固端易滑脱,成本高于金属锚杆            |

问题相互关联、相互影响,单一技术的改进难以取得显著效果。本文结合相关文献详细分析受限空间树脂锚杆支护面临的主要困境。

2.1 施工作业空间高度不足

非煤地下矿山受限空间的核心特征是空间高度显著不足,这一条件直接影响树脂锚杆的安装方式与

受力状态(如图3所示)。在矿脉较薄的开采场景中,开采高度往往与矿层厚度一致,导致作业空间高度不足,使得钻机在井下无法正常竖直作业,被迫采用侧方施工方式,这种非常规作业方式使得钻孔效率大幅度降低<sup>[15]</sup>。

狭小空间同样使得树脂锚杆无法按常规垂直方

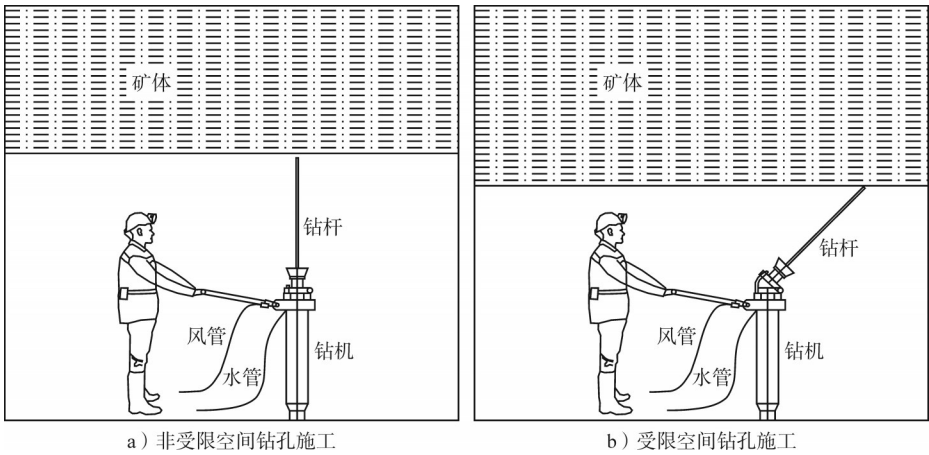


图 3 不同空间钻孔施工对比示意图

Fig. 3 Comparison of drilling construction in different spaces

式安装,只能采用倾斜布设方式,倾斜安装的锚杆无法穿透围岩的软弱岩层<sup>[16]</sup>(如图4所示),导致锚杆锚固力不足。同时在处于高应力环境时,倾斜锚杆会同时承受围岩施加水平荷载与垂直荷载的联合作用,在此情形下,其发生破断失效的风险显著增加<sup>[17]</sup>。锚杆破断现象往往具有隐蔽性与突发性,这无疑对现场作业人员的安全构成了严重威胁。一旦锚杆发生破断,轻则造成支护系统失去效用、巷道围岩出现变

形,重则可能引发巷道围岩的失稳与破坏<sup>[18-20]</sup>。从力学角度分析,倾斜安装会显著改变锚杆的受力机制。常规垂直安装时,锚杆轴向应力均匀分布,能有效承担围岩荷载;而倾斜安装后,锚杆承受的拉剪复合应力显著增加<sup>[21]</sup>。在锚杆安装角度大于15°且拉应力达到屈服点的情况下,锚杆长期受载会造成锚杆螺纹段弯曲出现裂缝,致使锚杆达不到破断荷载就发生断裂<sup>[22-23]</sup>。

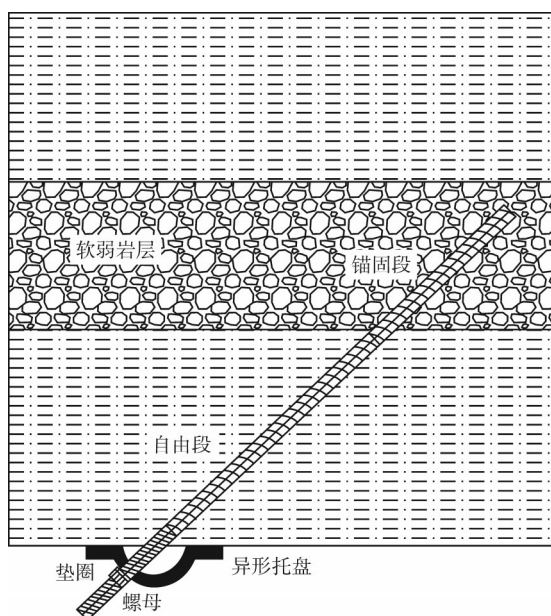


图4 锚杆锚固区位于软弱岩层

Fig. 4 Bolt anchorage zone located in weak rock strata

空间高度不足还会导致支护作业的操作空间受限,施工人员难以精准控制钻孔角度和深度。同时,倾斜安装使得树脂锚固剂的填充均匀性下降,锚固剂与孔壁的黏结面积减少,直接影响锚固强度<sup>[24]</sup>。

## 2.2 钻机设备及其构件适配性缺陷

煤矿锚杆钻机经历了漫长的发展过程,从最早采用普通凿岩,人工安装锚杆,使用扳手预紧螺母到集机械、电气、液压和自动控制于一体的掘锚一体机<sup>[4]</sup>(如图5所示)。锚杆转载机是近年新研发的巷道支护设备,整合了转运、破碎和支护多项功能,取代了传统的梭车和破碎机。该设备在确保物料处理的同时,利用原有设备作为支护平台,紧跟掘进设备完成全部支护作业,实现了掘进与支护的并行。相比普通钻车,它节省了巷道空间,提高了设备集成度,避免了交替作业,从而提升了施工效率<sup>[25]</sup>。

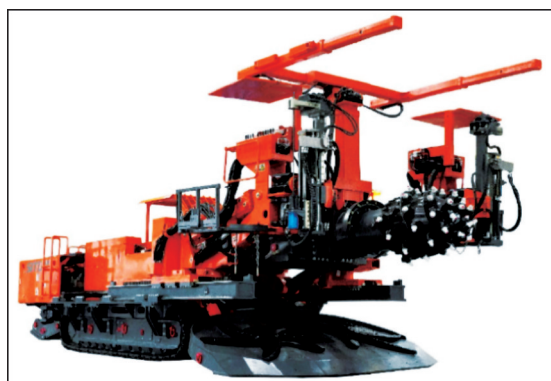


图5 掘锚一体机

Fig. 5 Integrated excavation-bolting machine

与煤矿相比,现有锚杆钻机的设计参数与非煤地下矿山受限空间的适配性差。煤矿主流锚杆钻机的

机身高度普遍在2 m以上,这一设计是基于煤矿巷道相对开阔的作业环境。然而,非煤地下矿山受限空间的有效作业高度通常低于1.8 m,这种差异导致无法满足钻机在非煤矿山井下正常使用。

钻机动力系统与受限空间的匹配问题同样突出。煤矿常用的旋转式锚杆钻机,适用于普氏硬度系数 $f < 8$ 的岩石<sup>[4]</sup>。在非煤矿山的高硬度围岩中,供气压力不足,其输出扭矩和转速分别下降,导致破岩效率显著降低。此外,钻机的除尘系统在狭小空间内效率低,不仅危害工人健康,还会影响钻孔精度<sup>[26]</sup>。

在钻机构件方面,钻机的钻杆长度与受限空间高度显著不匹配。现有标准钻杆长度多为1.0 m、1.5 m和2.0 m,而受限空间的有效作业高度通常不足1.8 m,当采用1.5 m钻杆钻进锚杆孔时,由于受限空间高度限制,不仅要考虑钻机机身高度,还需考虑钻杆长度问题,因此只能倾斜钻进锚杆孔,实际钻孔深度难以达到设计要求的1.5 m。同样,钻杆的连接与拆卸在狭小空间中操作困难,常规钻杆采用螺纹连接,在高度不足1.8 m的空间中,人工接卸钻杆效率低,连接精度难以保证。并且在气动锚杆钻机接卸钻杆时,需要频繁调整钻机位置,导致单孔施工时间增加。

非煤地下矿山锚杆钻机及其构件设计参数与受限空间适配性缺陷的原因主要有以下几点:

1)机身高度与作业空间矛盾。非煤地下矿山地质条件复杂多变,巷道断面形状和尺寸差异较大,而现有锚杆钻机的设计参数相对固定,难以适应这种变化。

2)动力系统不足及除尘系统效率低。非煤地下矿山对锚杆钻机性能要求较高,需要钻机具备更高适应性和灵活性,而现有钻机在结构设计上存在一定的局限性。在除尘系统方面,非煤地下矿山受限空间内粉尘浓度高、扩散条件差,除尘系统效率面临严峻挑战。

3)钻杆长度与空间高度不匹配。非煤地下矿山在锚杆钻机钻杆选型和使用过程中,缺乏针对受限空间作业的专门考虑和优化。

## 2.3 托盘结构与受力不匹配

托盘作为树脂锚杆支护体系中的关键部件,在锚杆支护系统中发挥的作用大致可归纳为2个重要方面<sup>[27]</sup>:一方面,将施加的压力转化为锚杆轴向预应力并均匀扩散至围岩,形成主动支护压应力区,抑制围岩早期离层与松动,提升其自承能力;另一方面,当围岩变形荷载作用于托盘时,其将荷载传递至锚杆激发其抗力,锚杆吸收能量后的反力又经托盘扩散回围岩深部,优化应力分布,控制塑性区扩展并防止局部破

坏。然而,在非煤地下矿山受限空间中,由于锚杆施工角度与锚杆托盘之间不匹配(如图6所示),托盘的上述功能因安装条件受限而严重削弱。采用普通锚杆托盘,托盘不能适应其特殊要求,存在三大技术缺陷<sup>[28]</sup>:

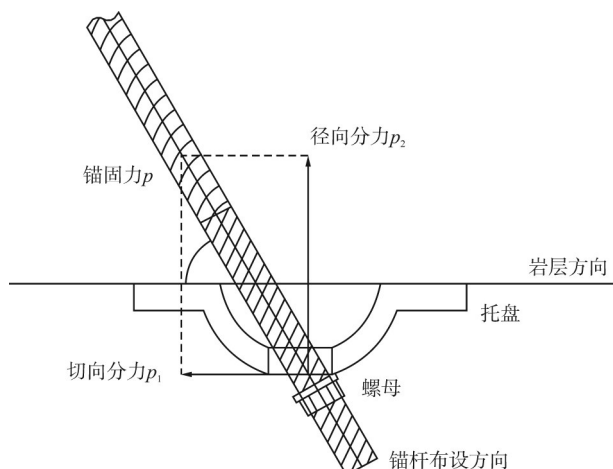


图6 倾斜安装锚杆受力示意图

Fig. 6 Diagram of forces on inclined bolts

1)几何适配性不足导致力学失效。当锚杆倾斜安装时,托盘接触界面将产生剪切分力,这种非垂直布置方式造成杆体与托盘接触部位出现应力集中,引发弯曲变形直至断裂。

2)扭矩传递机制失效。螺母与托盘接触不良导致锁紧力矩传递效率显著降低,接触界面呈现点线接触状态,使得初锚力无法满足设计要求。

3)强度匹配性失衡。随着开采深度增加,地应力呈非线性增长趋势,现有支护系统虽通过增大杆体直径和长度提升承载能力,但未同步优化托盘强度,导致锚杆-托盘强度匹配系数失衡,在深部高应力环境下易诱发锚固系统整体失效。

同时,常规矩形托盘在偏心载荷下边缘翘起,引起应力集中,易发生塑性弯曲或撕裂;围岩表面不平整进一步降低贴合度,削弱荷载传递效率,使锚杆难以充分发挥抗变形能力<sup>[29]</sup>。这些失效问题最终导致支护系统刚度下降,围岩变形失控。刘少伟<sup>[30]</sup>通过理论分析和试验表明,偏心荷载在球壳上的水平分力是使托盘出现破坏的力源。托盘与围岩表面的贴合度问题也不容忽视。受限空间的围岩表面常因爆破开挖而凹凸不平,常规平面托盘难以紧密贴合,支护系统的刚度匹配性下降。这会使托盘的支撑刚度降低,无法有效传递锚杆的预紧力<sup>[29]</sup>。

## 2.4 预紧力施加失效

侯俊领等<sup>[31]</sup>对预紧力在锚杆支护中的作用进行了深入研究,指出预紧力对锚杆支护效果起着关键作用,合适的预紧力能有效提高锚杆的支护性能。王子

越等<sup>[32]</sup>的研究表明,随着锚杆预紧力的提高,支护系统的刚度大幅提升,能有效限制结构弱面的张开和活动。康红普等<sup>[33]</sup>研究中提出的高预应力、强力支护理论也强调了锚杆预应力及其扩散的决定性作用。但树脂锚杆的预紧力施加在受限空间中面临多重技术障碍。

1)倾斜安装导致预紧力沿锚杆轴线的有效传递效率降低。试验表明,与垂直安装相比,锚杆倾斜安装角度越大,锚杆预应力形成的有效压应力区越小<sup>[34]</sup>。而且,较高的压应力主要集中在锚杆尾部附近,在锚杆中部与端部压应力则较小,不利于锚杆支护作用的充分发挥。

2)树脂锚固剂的固化时间与预紧力施加时机的匹配难度增加。在空间高度不足的情况下,施工人员难以准确判断锚固剂的固化状态,过早或过晚施加预紧力均会导致锚固效果下降。

3)非煤地下矿山工人的操作技能水平也是制约因素。与煤矿相比,非煤地下矿山树脂锚杆安装的自动化程度相对较低,工人对预紧力重要性认知不足,这种操作偏差会使锚杆的初期支护刚度降低,无法及时抑制围岩的早期变形,导致围岩松动范围扩大<sup>[35]</sup>。

## 3 受限空间锚杆支护改进技术路径

针对非煤地下矿山受限空间树脂锚杆支护应用面临的上述困境,传统单一技术改进难以突破。本文提出集成化技术路径(如图7所示),即通过钻机系统矮化与智能升级解决空间适应性矛盾,依托异形托盘结构创新优化荷载传递机制,结合预紧力精准控制技术强化支护刚度。研究成果旨在构建适用于非煤地下矿山特殊工况的树脂锚杆主动支护技术体系,为深部资源安全高效开发提供核心支撑。

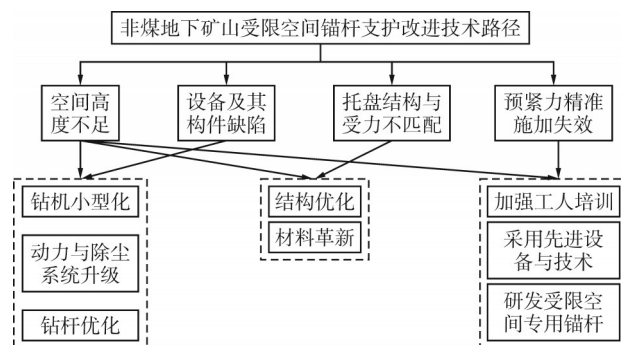


图7 受限空间锚杆支护改进技术路径

Fig. 7 Diagram of the improved technical path for bolt support in confined spaces

### 3.1 钻机设备及其构件改进

为了改善非煤地下矿山锚杆钻机在受限空间中的作业效率,可以采取以下措施:为解决机身高度与

作业空间矛盾,应开发低矮型锚杆钻机,将机身高度降低至1.5 m以下,以适应非煤地下矿山受限空间的有效作业高度。同时,采用折叠式或可伸缩式结构设计,使钻机在运输和存储时占据更小空间,提高便携性。此外,引入自适应控制系统,实时监测巷道高度并自动调整钻机姿态,确保在低矮空间内的稳定作业。

为适配非煤地下矿山受限空间巷道的施工需求,针对传统三级推进缸筒钻机存在的整机高度过大与频繁更换短钻杆导致的工效降低技术瓶颈,石家庄煤矿机械有限责任公司通过系统性技术创新实现关键突破。采用五级伸缩气缸替代三级结构,改变了导向连接形式,缩短了缸筒之间的重合度,提高了支腿推进过程的稳定性,在机身大幅度降低的同时,增加了有效行程,由此诞生的MQT-130/3.0C4型气动锚杆钻机<sup>[36]</sup>,整机最小高度降至830 mm,充分满足高1.8 m低矮巷道的锚杆安装需求。可参考该款锚杆钻机,进一步研制适应非煤地下矿山的矮型化、大功率受限空间专用锚杆钻机,使设备适应不同复杂地质环境。

针对矿体厚度薄、倾角大等开采技术条件,开发一种具备自动调整钻进参数能力的系统,能依据顶板硬度、旋转速度变化、钻杆规格、钻孔深度及水流速率等因素,智能调节进给压力,从而有效预防钻杆转速失控及弯曲等异常状况。陆承达等<sup>[37]</sup>在钻进过程智能优化领域,构建了钻速预测模型,提出了自适应钻速优化算法,并针对多目标约束提出了最优钻进轨迹规划方法。该研究形成了从钻速预测到轨迹规划的完整技术体系,为地质钻进智能化控制提供了理论支撑。

针对动力系统与围岩条件不匹配的问题,应研发高扭矩液压马达,提升输出扭矩,以增强钻机在高硬度围岩中的破岩能力。同时,优化钻机动力系统,引入智能监测技术,根据围岩条件自动调整钻进参数,提高钻机的适应性和灵活性。此外,采用多档位变速设计,使钻机能够根据不同围岩硬度选择合适的钻进速度,进一步提高施工效率。针对除尘系统在狭小空间内效率低的问题,对除尘系统进行升级。采用湿式除尘与负压吸尘组合系统,提高除尘效率,降低粉尘浓度,保护工人健康。同时,引入智能除尘技术,根据粉尘浓度自动调节除尘功率,实现节能与高效的平衡。

同步推进研发适用于巷道受限空间的专用短钻杆。可以研发0.5 m或1.0 m一节的短钻杆,这种短钻杆在接卸时更加方便快捷,能够有效提高施工效率。同时,配合专门设计的短钻杆连接装置,确保钻杆连接的精度和稳定性,减少连接问题导致的钻杆脱落事

故。采用高强度的螺纹连接方式,并增加防松脱装置,可降低螺纹松动导致的钻杆脱落事故发生率。此外,还需考虑短钻杆的刚度和强度问题,可采用高强度合金钢制造短钻杆,并对其内部结构进行加强,提高短钻杆的刚度和强度,使其在满足受限空间作业需求的同时,保证钻孔的精度和质量,控制钻孔的偏斜度。

### 3.2 异形托盘创新

在非煤地下矿山受限空间中,根据不同的受限空间条件和围岩特性,开发特定形状和尺寸的异形托盘。通过对托盘球形部位按照与锚杆安装方向夹角设计钻孔孔位,能使托盘紧贴岩面<sup>[38]</sup>,有效改善锚杆受力状态。例如:张军<sup>[28]</sup>针对矿山巷道肩角等特殊部位,研制出矿用碟状异形锚杆托盘。在一些围岩表面不平整的受限空间中,异形托盘可以更好地适应围岩形状,增大与围岩的接触面积,从而提高托盘的支撑刚度,减少托盘处锚杆断裂情况的发生。从力学性能方面分析,潘立志<sup>[39]</sup>对托盘承载特性的研究表明,设计合理的异形托盘能够优化应力分布,提高托盘的承载能力。通过理论分析和数值模拟,研究异形托盘的结构参数对其承载能力和应力传递的影响,确定最优的设计方案,可使托盘在受限空间中更好地发挥支护作用。

异形托盘需深度契合非煤地下矿山受限空间的复杂工况,在材料革新、结构创新方面实现突破。基于现有碟状曲面设计,托盘采用高强度合金钢,需根据不同围岩情况研发高适应性托盘,使围岩贴合度提升,解决托盘无法垂直围岩导致锚固性能下降的难题。

### 3.3 预紧力精准控制技术

为优化预紧力精准控制技术,首先应加强对工人的培训,提高对预紧力重要性的认识,规范操作流程。制定详细操作手册,明确预紧力标准值与施加流程,并对工人进行定期培训考核,确保操作规范。同时,采用先进的预紧力施加设备和技术,如智能锚杆预紧装置,该设备能够实时监测预紧力,并根据设定值调整预紧扭矩,确保预紧力的精确施加。

针对倾斜安装锚杆导致的支护效能不足问题,可采用适用于受限空间的专用短锚杆,利用“短锚杆+锚索”联合支护方式,短锚杆加固浅部围岩与长锚索加固深部围岩的联合支护技术<sup>[40]</sup>,通过缩短杆体长度规避传统长锚杆因空间受限导致的倾斜植入问题,短锚杆设计可精准适配狭小作业环境,确保锚杆以近垂直角度高效植入围岩。同时,柔性锚索的弧形适配特性突破了刚性锚固系统的形态局限,可弯曲性<sup>[41]</sup>使其能够主动贴合复杂岩层界面,从而实现支护体系提升。

该组合设计通过“形态-力学”协同优化,为受限空间支护工程提供了兼具适应性与可靠性的技术解决方案。

对于树脂锚固剂固化时间与预紧力施加时机匹配困难的问题,可研发锚固剂凝胶时间测试仪等专用设备,精确测定锚固剂的胶凝时间,为施工提供关键数据支持。例如:刘小虎<sup>[42]</sup>针对此类问题研制出了不同环境下的树脂锚固剂胶凝时间测试设备,可精确测定不同类型锚固剂在不同环境下的胶凝时间,为地下矿山锚杆安装工艺设计提供了依据。

#### 4 结论与展望

本文总结了各类主要锚杆类型及其优缺点,全面分析了非煤地下矿山受限空间树脂锚杆支护面临的技术困境,提出了钻机设备及其构件改进、异形托盘创新和预紧力精准控制的改进技术路径,旨在推动非煤地下矿山受限空间树脂锚杆支护技术的安全高效应用。

未来,非煤地下矿山受限空间树脂锚杆支护技术的发展将围绕设备适应性提升、控制精度强化及智能化施工工艺等核心方向展开。在设备适应性方面,未来的钻机设备将进一步实现小型化、模块化,以适应更加复杂的受限空间环境。同时,钻机设备的自动化和智能化水平也将得到显著提升,减少人工干预,提高施工效率和安全性。

1)未来非煤地下矿山支护设备及其构件的研发应充分考虑受限空间地质赋存条件的多样性、复杂性,研发适用于受限空间的掘锚设备,着重提高受限空间装备的适应性。

2)控制精度的强化将是未来支护技术发展的另一重要方向。通过引入更先进的传感器和监测系统,实现对预紧力等关键参数的实时反馈和精细调整,将显著提高支护效果,降低锚杆破断失效的风险。此外,随着材料科学的不断进步,新型锚固材料和托盘材料的研发将成为推动支护技术发展的关键力量。这些新材料将具备更高的承载能力和耐久性,进一步提升锚杆支护系统的整体性能。

3)在智能化施工工艺方面,未来的非煤矿山支护系统将实现与矿山整体生产系统的深度集成和优化。通过自动化钻孔、锚杆安装等智能化施工工艺的应用,将显著提高施工效率和质量,降低人工成本和安全风险。同时,智能化施工工艺还将为矿山开采提供更加精准的数据支持,助力矿山实现数字化、智能化转型。

上述发展方向的实现,将推动非煤地下矿山树脂锚杆支护技术体系为深部资源开发提供更加安全、高

效的技术支撑。

#### [参 考 文 献]

- [1] 李英明,赵呈星,丛利,等.基于实际围岩变形的全长锚固锚杆杆体应力分布特征分析[J].煤炭学报,2019,44(10):2 966-2 973.
- [2] 刘学生,武允昊,谭云亮,等.深部高水平应力巷道倾斜锚杆破断机制及加强支护时机[J].煤炭学报,2023,48(2):609-622.
- [3] 申宝宏,雷毅,刘见中,等.煤炭机械装备国内外技术现状及发展展望[J].煤矿开采,2015,20(1):1-4.
- [4] 康红普,姜鹏飞,刘畅,等.煤巷锚杆支护施工装备现状及发展趋势[J].工矿自动化,2023,49(1):1-18.
- [5] 高志强,郭治富.国内外自动锚杆钻架类型特点及研究方向[J].煤炭科学技术,2023,51(3):212-224.
- [6] 王虹,王建利,张小峰.掘锚一体化高效掘进理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(6):2 021-2 030.
- [7] 康红普,姜鹏飞,王子越,等.煤巷钻锚一体化快速掘进技术与装备应用[J].煤炭学报,2024,49(1):131-151.
- [8] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等.国内外煤巷支护技术研究进展[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2 377-2 403.
- [9] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1 071-1 081.
- [10] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(1):1-10.
- [11] 杨新安,陆士良.中国煤矿的锚杆支护[J].中国煤炭,1995,21(3):5-8.
- [12] 林健,石垚,孙志勇,等.端部锚固锚杆预应力场分布特征的大型模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2 237-2 247.
- [13] 康红普,姜铁明,高富强.预应力在锚杆支护中的作用[J].煤炭学报,2007,32(7):680-685.
- [14] 王军.新型树脂锚杆巷帮支护技术及其应用[J].煤矿安全,2017,48(8):56-58,62.
- [15] 胡磊,任高峰,任少峰,等.页岩最佳钻孔角度的实验研究[J].工程爆破,2013,19(6):1-3,12.
- [16] 徐磊.深部高应力软岩巷道支护技术研究与实践[J].煤矿现代化,2025,34(4):79-82.
- [17] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):24-37.
- [18] 李大伟,侯朝炯.巷道锚杆支护特性分析与应用[J].煤炭学报,2008,33(6):613-618.
- [19] 张俊文,宋治祥,刘金亮,等.煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J].煤炭科学技术,2022,50(2):27-36.
- [20] 刘学生,武允昊,谭云亮,等.锚杆抗疲劳性能对深部动载扰动硐室围岩稳定性影响[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):449-458.
- [21] 侯俊领,李垂宇,黄童李,等.高预紧力应力均布型锚杆在静-动载作用下的力学响应[J].中国安全科学学报,2025,35(1):50-59.
- [22] 吴拥政.锚杆杆体的受力状态及支护作用研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2009.
- [23] 吴拥政,康红普.强力锚杆杆体尾部破断机理研究[J].煤炭学报,2013,38(9):1 537-1 541.
- [24] 胡滨,林健,姜鹏飞.锚固剂环形厚度对树脂锚杆锚固性能影响的研究[J].煤矿开采,2011,16(4):20-22.
- [25] 袁兴康.煤巷锚杆支护施工装备现状及发展趋势[J].中国煤

- 炭, 2023, 49(增刊2): 359–362.
- [26] 陈颖兴. 碎软煤层钻孔干式孔口除尘装置研究与应用[J]. 煤炭工程, 2025, 57(3): 206–210.
- [27] 林健, 康红普. 螺纹钢树脂锚杆的研究现状与趋势[J]. 煤矿开采, 2009, 14(4): 1–4.
- [28] 张军. 矿用碟状异形锚杆托盘的研制与应用[J]. 煤炭工程, 2009, 41(7): 46–47.
- [29] 康红普, 吴建星. 锚杆托板的力学性能与支护效果分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 8–16.
- [30] 刘少伟. 偏心载荷作用下煤巷顶板托盘失效的理论与实验分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1 166–1 169.
- [31] 侯俊领, 李垂宇, 赵能, 等. 高预紧力均布承载型锚杆力学响应及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 92–101.
- [32] 王子越, 姜鹏飞, 孟宪志, 等. 预紧力锚杆支护效果及机理数值对比研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 56–66.
- [33] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649–664.
- [34] 康红普, 姜铁明, 高富强. 预应力锚杆支护参数的设计[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 721–726.
- [35] 宋硕, 任富强, 常来山. 含预应力锚杆煤岩组合体破坏及声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊1): 449–460.
- [36] 石家庄煤矿机械有限责任公司. 带五级推进缸筒的矮支腿气动锚杆钻机: 201320679943.2[P]. 2014–04–23.
- [37] 陆承达, 甘超, 陈略峰, 等. 地质钻进过程智能控制研究进展与发展前景[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 31–43.
- [38] 任晓玥. 基于托盘表面应变演化规律的锚杆载荷反演研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [39] 潘立志. 矿用托盘承载特性及支护协同作用机理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.
- [40] 郑建彬, 王其洲, 杨森, 等. 重复采动影响下巷道围岩变形规律及其稳定控制技术[J]. 煤矿开采, 2015, 20(3): 76–80, 105.
- [41] 刘文涛, 王安舍, 张正斌, 等. 中空注浆锚索在沿空留巷支护中的应用[J]. 煤炭工程, 2011, 43(6): 42–44.
- [42] 刘小虎. 温度压力耦合作用下全长锚固体受力变形机理及应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.

## Application dilemmas and improved technical path of bolt support in confined spaces in non-coal underground mines

Gao Lin<sup>1,2,3</sup>, Li Sheng<sup>1</sup>, Wen Shiping<sup>4</sup>, Tang Rong<sup>1</sup>, Zhai Haoran<sup>1</sup>

(1. Mining College of Guizhou University; 2. Coal Mine Roadway Support and Disaster Prevention Engineering Research Center, China University of Mining and Technology (Beijing); 3. National & Local Joint Engineering Laboratory of Efficient Utilization of Advantageous Mineral Resources in Karst Areas, Guizhou University; 4. Guizhou Xinhengji Mining Co., Ltd.)

**Abstract:** The application dilemmas and improved technical path of bolt support in confined spaces in non-coal underground mines were thoroughly investigated. Non-coal underground mines often feature complex orebody occurrence conditions, and confined spaces are commonly encountered during thin orebody mining and up-hill cutting, leading to significantly reduced bolt installation efficiency and support effectiveness, which makes traditional bolt support difficult to apply effectively. The characteristics of confined spaces in non-coal underground mines and their impact on bolt support were analyzed, revealing that insufficient space height, poor equipment adaptability, mismatched plate structure and stress, and difficulties in pre-tension control technology were the main factors restricting bolt support effectiveness. Research progress in bolt support was systematically reviewed from both key technologies and engineering application challenges. To address the application dilemmas of bolt support in confined spaces in non-coal underground mines, an integrated improved technical path was proposed, including drill rig miniaturization, innovative special-shaped plates, and precise pre-tension control technology. The future development direction of support technology in non-coal underground mines was outlined, emphasizing that improved equipment adaptability, enhanced control precision, and breakthroughs in material performance can provide comprehensive technical support for deep resource development and continuously improve the safety and efficiency of non-coal underground mining.

**Keywords:** non-coal mine; underground mining; confined space; roadway support; resin bolt; technical path