

# 深部超大硐室施工过程中“主动+被动” 协同支护技术体系构建

刘建卫

金诚信矿业管理股份有限公司 北京 101500

**摘要：**深部超大硐室施工面临复杂地质条件，单一支护技术难以满足工程需求。“主动+被动”协同支护技术体系通过融合锚杆-索、注浆等主动支护与钢管混凝土支架等被动支护技术，依据地质条件合理选型，经数值模拟优化参数，结合现场监测动态调整。该体系可有效控制围岩变形，平衡施工经济性与可靠性，为深部超大硐室安全施工提供重要保障。

**关键词：**深部超大硐室；“主动+被动”；协同支护技术

## 1 深部超大硐室施工地质条件分析

### 1.1 地应力特征与分布规律

深部超大硐室施工受复杂地应力环境制约，其特征与分布直接关乎硐室稳定及施工安全。垂直方向上，地应力源于上覆岩层自重，深度每增1m，垂直应力约升2.5-3.0MPa；水平方向受地质构造、岩层产状等因素干扰，应力比值在0.5-1.5间波动，复杂区域超2.0，呈现明显方向性与不均匀性。实测与模拟显示，深部地应力场以水平应力主导，褶皱、断层处易现应力集中，数值可达正常区2-3倍。硐室开挖后，围岩应力失衡，易产生变形，威胁施工安全与硐室长期稳定。因此，精准掌握地应力分布规律，是保障深部超大硐室安全施工的基础。

### 1.2 岩性特征与稳定性评价

岩性是影响深部超大硐室稳定性的关键要素。深部地层岩性多元，砂岩强度高、抗风化，但节理裂隙发育时易垮落；泥岩、页岩亲水性强，遇水软化，软化系数常低于0.5，膨胀压力会挤压支护结构；灰岩虽硬，却易被水溶蚀形成溶洞，破坏围岩稳定<sup>[1]</sup>。为评估岩性影响，常采用岩石质量指标（RQD）、岩体完整性系数等，结合现场取样与地质雷达、声波探测获取参数，运用巴顿Q系统、霍克-布朗等分级标准，对围岩稳定性综合评判，为支护方案设计提供依据。

### 1.3 水文地质条件与施工风险

水文地质条件深刻影响深部超大硐室施工，复杂状况潜藏诸多风险。深部地层含水层多样，孔隙含水层富水性与颗粒特性相关，裂隙含水层依赖裂隙发育程度，岩溶含水层以管道、溶洞为储水通道。施工中，地下水易引发涌水、突水灾害，前者恶化施工环境、降低效率，后者突发性强、危害大，可致人员伤亡与重大经济

损失。地下水还会软化围岩，削弱其强度，影响支护结构稳固。某深部矿山硐室施工因水文调查不足，突水事故致施工中断数月。因此施工前需全面勘察水文地质，制定有效防水措施，降低风险。

## 2 主动支护技术在深部超大硐室施工中的具体应用

### 2.1 锚杆-索支护技术的应用与效果

锚杆-索支护技术是深部超大硐室施工中常用的主动支护手段。锚杆主要依靠杆体与围岩之间的摩擦力和粘结力来传递拉力，将不稳定的围岩与深部稳定岩层连接起来，形成组合拱效应，增强围岩的承载能力。锚索则具有更大的锚固力和作用范围，能够有效控制围岩的大变形和深部位移。在锚杆-索支护技术应用过程中，锚杆（索）的参数设计至关重要，包括长度、直径、间距、锚固方式等。锚杆长度应根据围岩的破碎程度和不稳定区域的厚度确定，一般为2-4m；锚索长度通常在6-12m之间，以确保锚固在稳定岩层中。锚杆（索）的间距应根据围岩的稳定性合理调整，一般为0.8-1.2m。锚固方式可分为端部锚固、全长锚固和加长锚固，不同的锚固方式适用于不同的围岩条件。通过现场监测数据表明，锚杆-索支护技术能够显著降低围岩的变形量。在某深部地下硐室施工中，采用锚杆-索联合支护后，硐室拱顶下沉量较未支护时减少了70%以上，两帮收敛量降低60%左右，有效保证硐室的施工安全性和稳定性。

### 2.2 注浆加固技术的实施与效果评估

注浆加固技术是通过向围岩中注入浆液，填充裂隙、孔隙，改善围岩的物理力学性质，提高围岩的整体性和强度，从而实现对围岩的主动加固。注浆材料的选择是注浆加固技术的关键，常用的注浆材料包括水泥浆、水泥砂浆、化学浆液等。水泥浆具有成本低、强度

高、耐久性好等优点,适用于裂隙较宽的围岩;化学浆液则具有良好的渗透性和粘结性,能够在细小裂隙中扩散,适用于破碎、软弱围岩。注浆加固技术的实施过程主要包括钻孔、注浆和封孔等环节。钻孔的深度、间距和角度应根据围岩的地质条件和注浆加固要求进行设计。注浆压力是影响注浆效果的重要因素,一般根据围岩的性质和裂隙发育程度确定,通常在0.5-2.0MPa之间。注浆过程中应根据注浆量和压力变化情况,合理调整注浆参数,确保浆液充分填充围岩裂隙。注浆加固效果评估主要通过现场取样试验、声波测试和位移监测等方法进行。现场取样试验可获取注浆后围岩的强度、弹性模量等物理力学参数,与注浆前进行对比,评估注浆加固效果。声波测试能够反映围岩的完整性和密实度,通过对比注浆前后的声波速度,判断注浆效果。位移监测则可以实时掌握围岩的变形情况,评估注浆加固对围岩稳定性的影响。

### 2.3 其他主动支护技术(如卸压技术等)的应用与案例分析

除锚杆-索支护技术和注浆加固技术外,卸压技术也是深部超大硐室施工中常用的主动支护技术之一。卸压技术的原理是通过人为改变围岩的应力状态,释放围岩中的高应力,降低围岩的应力集中程度,从而减少围岩变形和破坏。常见的卸压技术包括钻孔卸压、爆破卸压和切缝卸压等。钻孔卸压是在硐室围岩中布置一定数量和深度的钻孔,使围岩中的应力向钻孔方向转移,达到卸压目的。钻孔的直径、间距和深度应根据围岩的应力状态和卸压要求进行设计<sup>[2]</sup>。爆破卸压则是通过在围岩中进行控制爆破,破坏围岩的完整性,形成卸压带,释放围岩应力。切缝卸压是利用机械或爆破方法在硐室围岩中切割出一定宽度的缝槽,改变围岩的应力传播路径,实现卸压。以某深部煤矿超大硐室为例,该硐室处于高地应力区域,采用常规支护技术难以控制围岩变形。在施工过程中,采用钻孔卸压与锚杆-索支护相结合的方法,在硐室周边布置了间距为1.5m、直径为100mm、深度为8m的卸压钻孔。通过卸压,硐室围岩的应力集中程度降低了40%左右,配合锚杆-索支护,有效控制围岩变形,保证硐室的施工安全和长期稳定性。这一案例表明,卸压技术在深部超大硐室施工中具有重要的应用价值,能够与其他支护技术协同作用,提高支护效果。

## 3 被动支护技术及其在深部超大硐室施工中的应用

### 3.1 钢管混凝土支架的设计与施工

钢管混凝土支架是一种将钢管与混凝土相结合的被动支护结构,具有强度高、刚度大、承载能力强等优

点,适用于深部超大硐室的强支护需求。在设计钢管混凝土支架时,需要考虑硐室的断面形状、尺寸、围岩压力大小以及地质条件等因素。支架的钢管材质一般选用Q235或Q345钢材,钢管直径根据承载要求确定,通常在200-400mm之间。混凝土强度等级一般不低于C30,以保证支架具有足够的强度和耐久性。钢管混凝土支架的施工过程主要包括支架加工、安装和混凝土浇筑等环节。支架加工应严格按照设计要求进行,保证钢管的尺寸精度和焊接质量。安装时,应确保支架的位置准确、连接牢固,支架之间通过连接件进行可靠连接,形成整体支护结构。混凝土浇筑应在支架安装完成后及时进行,采用泵送或人工浇筑的方式,确保混凝土填充密实。为提高混凝土的早期强度和密实度,可在混凝土中添加早强剂和微膨胀剂。在某深部地下工程超大硐室施工中,采用钢管混凝土支架进行支护。现场监测数据显示,支架安装后,有效控制硐室围岩的变形,在地应力作用下,支架未出现明显的变形和破坏,承载能力满足设计要求,保证了硐室的长期稳定。

### 3.2 U型钢支架的应用与效果

U型钢支架是一种常用的被动支护形式,具有可缩性好、安装方便等特点,能够适应围岩的变形,在深部超大硐室施工中得到广泛应用。U型钢支架的型号根据围岩压力大小和硐室断面尺寸选择,常用的型号有U25、U29、U36等。不同型号的U型钢支架具有不同的承载能力和可缩量。U型钢支架的安装主要包括支架架设、卡缆连接和背板铺设等步骤。支架架设应保证支架的垂直度和间距符合设计要求,支架之间通过卡缆进行连接,卡缆的拧紧力矩应达到设计标准,以确保支架的整体稳定性。背板铺设在支架与围岩之间,起到传递压力、防止围岩局部垮落的作用,背板材料可选用木板、钢板或钢筋网等。通过现场应用表明,U型钢支架能够有效控制围岩的变形,在一定程度上适应围岩的动态变化。在某深部矿山超大硐室施工中,采用U29型钢支架支护后,硐室两帮收敛量在初期阶段得到有效控制,随着围岩变形的发展,支架的可缩性发挥作用,避免了支架因围岩压力过大而发生破坏<sup>[3]</sup>。

## 4 深部超大硐室施工过程中“主动+被动”协同支护技术体系的构建

### 4.1 协同支护技术体系的构建原则

构建深部超大硐室施工“主动+被动”协同支护技术体系应遵循以下原则。首先,应充分考虑地质条件,根据围岩的地应力特征、岩性和水文地质条件,合理选择主动支护和被动支护技术及其参数。其次,协同支护技

术体系应具有动态适应性。深部超大硐室施工过程中,围岩的应力状态和变形特征会随着开挖进度和时间发生变化。因此支护体系应能够根据围岩的动态变化及时调整支护参数和方式,确保支护效果。最后,协同支护技术体系应注重经济性和可靠性的平衡。在保证施工安全和硐室长期稳定的前提下,应尽量降低支护成本,提高支护效率。通过优化支护设计和施工工艺,选择合适的支护材料和设备,实现经济性和可靠性的最佳结合。

#### 4.2 协同支护技术体系的具体构建方法

##### 4.2.1 主动支护与被动支护的协同作用机制分析

主动支护和被动支护在深部超大硐室支护中具有不同的作用机理,但它们相互补充、协同作用。主动支护通过锚杆、锚索、注浆等手段,改善围岩的物理力学性质,提高围岩的自稳能力,减少围岩的变形和破坏。它能够在硐室开挖后迅速对围岩施加约束力,控制围岩的初期变形,防止围岩松动和垮落。被动支护则主要依靠自身的结构强度和刚度,承受围岩压力,限制围岩的进一步变形。当主动支护无法完全控制围岩变形时,被动支护能够发挥作用,承担剩余的围岩压力,保证硐室的稳定性。主动支护与被动支护的协同作用体现在多个方面,一方面,主动支护能够降低围岩压力,减少被动支护结构所承受的荷载,从而延长被动支护结构的使用寿命。另一方面,被动支护为主动支护提供了稳定的基础,使主动支护能够更好地发挥作用。

##### 4.2.2 协同支护技术体系的设计与实施步骤

协同支护技术体系的设计与实施步骤主要包括以下几个方面。首先,进行详细的地质勘察和地应力测试,获取围岩的地质参数和应力状态,为支护设计提供依据。然后,根据地质条件和硐室的使用要求,选择合适的主动支护和被动支护技术,并初步确定支护参数。在设计过程中,采用数值模拟和理论分析相结合的方法,对不同支护方案进行模拟计算,评估支护效果,优化支护参数。实施阶段,按照设计要求进行支护施工。先进行主动支护施工,如锚杆-索安装、注浆加固等,待主动支护达到一定强度后,再进行被动支护施工,如钢管混凝土支架或U型钢支架的安装。在施工过程中,加强现场

监测,实时掌握围岩的变形和支护结构的受力情况。根据监测数据,及时调整支护参数和施工工艺,确保支护效果。

##### 4.2.3 协同支护效果的评估与优化方法

协同支护效果的评估主要通过现场监测和数据分析进行。现场监测内容包括围岩位移、支护结构受力、地下水变化等。通过全站仪、收敛计、压力盒等监测设备,定期对硐室围岩和支护结构进行监测,获取监测数据。对监测数据进行分析处理,判断支护效果是否达到设计要求。若发现围岩变形过大、支护结构受力异常等问题,应及时分析原因,采取相应的优化措施<sup>[4]</sup>。优化方法包括调整支护参数,如增加锚杆(索)的长度、密度,提高注浆压力等;改进支护结构形式,如更换支架型号、加强支架连接等;调整施工工艺,如改变开挖方法、控制开挖速度等。通过不断评估和优化,确保“主动+被动”协同支护技术体系能够有效保证深部超大硐室的施工安全和长期稳定性。

#### 结束语

本文系统研究了深部超大硐室施工中“主动+被动”协同支护技术体系的构建。从地质条件分析到支护技术应用,再到体系构建,形成了一套完整的技术方案。研究成果对保障深部超大硐室施工安全、提高工程质量具有重要意义。未来,随着深部工程建设的推进,协同支护技术仍需不断创新与完善,以适应更复杂的工程需求。

#### 参考文献

- [1]温新茂.超大断面交通隧道塌方施工处理技术[J].交通世界,2022,No.624,32-34.
- [2]谭云亮,范德源,刘学生,等.煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展[J].煤炭学报,2022,47(1):180-199.DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1810.
- [3]刘学生,王新,谭云亮,等.深部超大断面分选硐室群布置方式优化研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):32-39. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1501.
- [4]刘琪.深部软岩大断面硐室围岩稳定性控制技术研究[J].山西化工,2023,43(4):154-155,158.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2023.04.054.