

掘锚一体机作业安全防护措施研究

陈建波

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘要: 本文系统分析了掘锚一体机作业过程中的主要危险源,包括机械伤害、粉尘与瓦斯积聚、顶板冒落、电气故障及人机协同作业风险。在此基础上,从机械防护装置设计、智能联锁与紧急停机系统、通风除尘与瓦斯监测、临时支护与锚固协同控制、电气安全防护、人员定位与接近预警、作业规程与应急培训等七个方面,提出了全链条安全防护措施体系。研究表明,掘锚一体机的安全防护应从“被动隔离”向“主动感知-智能决策-快速响应”转变,构建人-机-环协同的安全防护网络。本文可为掘锚一体机的安全设计、现场管理及标准制定提供理论依据。

关键词: 掘锚一体机; 安全防护; 危险源辨识; 智能联锁; 瓦斯监测

引言

随着我国煤矿开采深度与强度的不断增加,巷道快速掘进技术成为保障采掘接续、提高生产效率的关键。掘锚一体机将掘进机与锚杆钻机集成在同一平台,实现截割与支护平行作业,使单月进尺从传统模式的300~500m提升至800~1500m。然而,装备集成度的提升带来了新的安全挑战。截割滚筒高速旋转产生的机械伤害风险、多组锚杆钻机同时作业时的空间干涉与高压液流风险、粉尘浓度升高引起的爆炸与职业病风险、以及复杂地质条件下临时支护不及时造成的顶板事故,均对作业人员及设备安全构成严重威胁。近年来,掘锚一体机在井下应用中发生的伤亡事故表明,单纯依赖操作人员经验已难以满足安全要求,必须从设备设计、控制系统、环境监测及管理制度等多个层面系统构建安全防护体系。

1 掘锚一体机作业危险源辨识

1.1 机械伤害风险

掘锚一體機的主要機械危險源包括:截割滾筒(截齒脫落、滾筒纏繞衣物)、鏟板星輪(卷入)、運輸機刮板鏈(斷裂彈射)、錨杆鑽機(旋轉部件夾傷、錨杆折斷甩動)、行走履帶(碾壓、擠傷)及液壓管路(高壓油噴射刺穿皮膚)。尤其值得注意的是,錨杆鑽機在狹小空間內多機同時作業,操作人員易進入鑽機活動範圍,造成擠傷或絞傷。此外,截割過程中產生的振動與沖擊可能導致緊固件松脫飛出。

1.2 頂板與圍岩失穩風險

掘锚一体机作业时,截割头破坏原岩应力平衡,若临时支护未能及时覆盖新暴露的顶板,极易发生局部冒

顶或片帮。锚杆钻孔作业期间,钻机振动进一步扰动围岩,加剧失稳风险。地质构造带(断层、破碎带)及软弱夹层地段是顶板事故的高发区域。此外,锚杆预紧力不足或锚固剂未充分固化时,顶板可能突然离层,造成冒顶砸击设备与人员。

1.3 瓦斯与粉尘爆炸风险

截割过程产生大量煤尘,若通风不足、除尘器效率低下,煤尘浓度达到爆炸极限($30\sim 2000\text{g}/\text{m}^3$)遇火源即发生爆炸。掘锚一体机截齿与岩石摩擦可能产生火花,成为点火源。同时,巷道前方瓦斯涌出异常时,截割扰动可能引发瓦斯突涌,形成瓦斯-空气混合物。瓦斯爆炸往往伴随煤尘参与爆炸,破坏力极大。

1.4 电气与液压系统风险

掘锚一体机集成了高电压(1140V/660V)电气系统及高压液压系统(压力可达35MPa)。电缆拖拽过程中绝缘层破损可能引发放电、触电或火灾。液压系统泄漏形成油雾,高温表面(如电机壳体)可点燃油雾^[1]。电气短路或过载产生的电弧也可能引燃周围可燃物。

1.5 人机协同作业风险

掘锚一体机作业时,锚杆钻机操作人员、截割司机、支护辅助人员及设备巡检人员之间需密切配合。由于视野盲区、通信不畅或协调失误,可能出现人员进入截割区域、锚杆钻机回转范围内等情况。遥控操作模式下,操作者位置不固定,更容易发生意外接近危险区域。

2 机械系统安全防护设计

2.1 危险区域隔离与防护装置

截割滚筒外围应设置固定式防护罩（开口角度控制在截割所需最小范围），并配备与截割电机联锁的护罩门开关——护罩打开时截割电机自动断电且无法启动。铲板两侧设置防卷入挡板，高度不低于 200mm。运输机机尾加装防夹人装置（红外光幕或机械触发式拉绳开关）。锚杆钻机钻臂回转范围应设置机械限位挡块及透明防弹材料制成的隔离围栏，防止人员肢体进入钻机活动区。所有旋转轴端加装轴端护罩。

2.2 紧急停机与连锁保护系统

掘锚一体机应在司机操作位、锚杆钻机操作位及机身两侧设置多个紧急停机按钮（红色蘑菇头，自锁式），按下后所有动力源（截割、行走、运输、锚杆钻机液压泵）立即切断，并同时启动制动器。紧急停机按钮的安装高度距底板 1.2~1.5m，间距不超过 10m。控制系统应实现“截割与锚杆钻机不能同时启动”（非互锁模式），但允许锚杆钻机在截割停止后作业。行走与截割臂升降之间设置互锁——截割臂升起超过限位时行走速度自动限制在 0.2m/s 以下。

2.3 液压系统安全措施

液压管路采用钢丝编织缠绕层的高压软管，并在管接头处加装防脱链与护套。各液压回路设置溢流阀作为过载保护，其设定压力不超过系统最高工作压力的 1.1 倍。在锚杆钻机进给回路中配置平衡阀，防止钻杆因自重快速下落。液压油箱配备液位、油温及污染度传感器，当油温超过 70℃或滤芯堵塞时发出报警并限制作业^[2]。所有液压执行元件（油缸、马达）的进出口须配置防爆裂阀（或称“软管爆破阀”），一旦管路爆裂立即锁闭油路，防止高压油喷溅及负载失控下落。

3 通风、除尘与瓦斯安全防护

3.1 通风系统配置与风量要求

掘锚一体机作业巷道必须采用局部通风机压入式或混合式通风，通风机须实现“双风机、双电源、自动切换”。风筒出口距工作面距离不超过 5m，风筒直径不小于 800mm。工作面风速应满足：煤巷 $\geq 0.25\text{m/s}$ ，半煤岩巷 $\geq 0.15\text{m/s}$ ，岩巷 $\geq 0.1\text{m/s}$ ；同时最高风速不超过 4m/s。风量按瓦斯涌出量、工作面人数及一次爆破所需风量（若涉及）的最大值计算，并应保证瓦斯浓度稀释至 0.5% 以下。通风机须安设开停传感器及风量传感器，风量低于设计值的 80% 时自动切断掘锚一体机电源。

3.2 除尘系统设计

掘锚一体机必须配备湿式除尘器或干式过滤除尘器，除尘风量应达到截割产生粉尘量的匹配要求，一

般不低于 $250\text{m}^3/\text{min}$ 。吸尘罩布置在截割滚筒上方及后方，吸尘口风速 $\geq 1.5\text{m/s}$ 。除尘器与截割电机实现电气连锁——除尘器未启动或故障时截割无法启动。对于湿式除尘，喷雾供水压力不低于 1.5MPa，喷嘴雾化角 $90^\circ\sim 120^\circ$ ，喷雾覆盖截齿切割区。在司机及锚杆钻机操作位设置气幕隔离装置，形成清洁空气保护区域。每班检测呼吸性粉尘浓度，不得超过国家规定限值（煤尘 $\leq 2.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，岩尘 $\leq 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ）。

3.3 瓦斯监测与断电控制

在工作面回风侧距掘锚一体机 5m 范围内设置瓦斯传感器（T1），在巷道回风口 10~15m 处设置 T2 传感器。T1 报警浓度设置为 0.8%，断电浓度 1.0%。（具体按煤矿安全规程执行，不同矿井等级有差异）。瓦斯传感器须定期标定（每 7 天一次）。当瓦斯浓度达到断电值时，系统自动切断掘锚一体机及附近非本质安全型电气设备的电源，并发出声光报警。瓦斯电闭锁装置必须采用双路冗余设计，闭锁解除须由专职瓦检员确认浓度降至 0.5% 以下且稳定 10min 后方可人工复位。在截割电机、电气开关箱等可能产生电火花的部位加装瓦斯超限自动切断装置。

4 顶板管理与临时支护安全

4.1 临时支护装置的安全要求

掘锚一体机应配备机载临时支护装置（如液压伸缩梁或折叠式支护架），其支护宽度不小于截割宽度，支护长度能覆盖从截割头至已支护区边缘的距离（通常为 2~3m）。临时支护装置的支撑力应能承受 1.5 倍预计顶板载荷（按松动圈理论计算）^[3]。支护装置与截割系统连锁：截割完成后，必须首先伸出临时支护并接触顶板后，方可进行锚杆钻孔作业；临时支护未收回时，截割启动被禁止。临时支护顶梁应带有压力传感器，实时显示支撑力，低于设定值（如 5MPa）时报警提示操作人员重新支撑。

4.2 锚杆钻机与锚固协同安全

多组锚杆钻机作业时应遵循“由外向里、先顶后帮”的顺序，每组钻机之间保持不小于 1.5m 的安全间距。钻机进给速度应可调并设有最大扭矩限制（防卡钻扭矩达到设定值时自动反转退钻）。钻孔过程中若出现钻杆急剧弯曲、异常响声或钻屑量突然增大，应立即停钻，检测前方地质情况，防止钻通含水层或瓦斯异常区。锚杆安装时，锚固剂搅拌时间、等待时间及预紧力必须严格执行设计参数，预紧力矩检测仪应在钻机上集成，未达到设计预紧力（如 $300\text{N}\cdot\text{m}$ ）时报警并禁止下一根锚杆作业。

4.3 围岩监测与预警

在掘锚一体机机身安装便携式围岩离层仪或顶板动态监测仪,实时监测掘进头后方 20m 范围内的顶板离层值。离层量超过临界值(如 20mm)时发出预警,超过 30mm 时自动停止掘进与支护作业并通知撤离。同时,可利用截割比能耗变化(通过截割电机电流监测)反演岩石强度变化,提前发现破碎带或断层,向操作人员发出地质异常警报。

5 电气与控制系统安全防护

5.1 电气防爆与接地保护

掘锚一体机所有电气设备必须为矿用隔爆型或本质安全型,防爆标志 ExdI 或 ExibI。电缆采用矿用屏蔽型橡套电缆,并每隔 1m 用电缆夹固定在机身侧面,避免拖地磨损。电缆引入装置处须设置防拔脱及防转动装置。设备外壳设置接地端子,接地电阻 $\leq 2\Omega$ (井下规定)。同时,安装漏电保护装置,动作时间 $\leq 0.1s$,漏电动作电流 $\leq 30mA$ (附加直流检测型)。对截割电机、油泵电机等大功率设备实行过载、短路、缺相及过热保护。

5.2 控制系统安全设计

掘锚一体机的可编程控制器(PLC)应采用冗余 CPU 架构,关键信号(紧急停机、瓦斯断电)采用双通道输入。控制程序应遵循 ISO13849 标准中的 PLr(性能等级)要求,安全相关功能的 PLr 至少达到 d 级。遥控器与机身之间采用 2.4GHz 跳频通信,且设置独立的安全通道——当遥控信号丢失或信号强度低于阈值时,设备在 0.5s 内自动停机^[4]。操作面板上的启动按钮必须与“使能开关”配合使用(即需先按压使能开关,启动按钮才有效)。在司机位、锚杆钻机位及机身显眼位置设置声光报警器,设备启动前发出 10s 预警声光信号。

5.3 防误操作与权限管理

采用钥匙开关或密码分级管理操作权限:普通操作员只能执行截割、行走等标准作业;维修模式需要专门钥匙或密码,且进入维修模式后必须强制启用机械锁定装置(如截割滚筒锁止销)。防止未经授权的人员误操作。另外,在设备关键部位(如电控箱门、液压阀组盖板)设置位置开关,打开时自动切断相应动力源。

6 人员防护、培训与应急管理

6.1 人员定位与接近预警系统

在掘锚一体机机身四周安装 UWB(超宽带)精确定位基站,与下井人员佩戴的定位标签协同工作。当人员进入设备周围危险区域(如截割滚筒前 3m、履带两侧 1.5m)时,设备自动发出语音报警:“危险区域,请远

离”;若人员继续靠近至最小安全距离(如 1m)且设备未停机,控制系统自动执行减速或停机。同时,操作司机位显示屏上实时显示设备周围人员位置热力图。该系统须具备自检及故障导向安全功能。

6.2 个体防护装备要求

掘锚一体机所有作业人员必须配备安全帽(带下颌带)、防尘口罩(KN100 级别)、防噪音耳塞(SNR $\geq 25dB$)、防护手套(防割型)及矿灯。靠近截割区域的人员应加穿防砸鞋及防护面罩。锚杆钻机操作者应佩戴防冲击护目镜,防止钻屑飞溅伤眼。

6.3 作业规程与安全培训

制定《掘锚一体机安全操作规程》,内容至少包括:开机前检查(各防护罩、急停按钮、瓦斯浓度等)、截割与支护转换程序、临时支护操作流程、异常情况停机与报告程序。所有操作人员须经过不少于 72 学时的理论和实操培训,并通过考核后方可上岗。每季度组织一次模拟事故应急演练(如机械伤人、瓦斯超限、顶板冒落等场景),演练后评估改进。建立“手指口述”安全确认制度,各关键操作步骤(启动、截割、移机、钻孔)前必须进行安全确认。

7 结语

掘锚一体机在提升掘进效率的同时,带来机械伤害、顶板失稳、瓦斯煤尘爆炸、电气液压故障及人机协同等多重耦合风险。本文构建涵盖机械防护、紧急连锁、通风除尘、瓦斯监控、顶板支护、电气安全及人员预警培训的七维防护体系。研究表明,传统被动防护已难满足需求,须融合 UWB 接近预警、瓦斯电闭锁双冗余、临时支护压力传感、围岩离层监测等主动智能技术,实现“辨识—评估—干预”闭环。规范操作与人员培训是措施落地的关键保障。未来,安全防护将向无人远程操控、数字孪生与智能预警方向发展,所提框架可为煤矿管理、设备设计及标准修订提供参考。

参考文献

- [1] 李志强,王长友,张建勋.掘锚一体机作业中的机械伤害风险分析与防护设计[J].煤炭科学技术,2021,49(7):145-152.
- [2] 刘振宇,陈光,马晓东.煤矿巷道掘进工作面瓦斯与粉尘耦合爆炸防控技术[J].煤矿安全,2020,51(9):88-93.
- [3] 王明,赵海峰.基于 UWB 定位的掘进装备人员接近预警系统研究[J].工矿自动化,2022,48(5):72-78.
- [4] 孙建国,周涛,李伟.掘锚一体机临时支护与顶板协同控制技术研究[J].煤炭工程,2021,53(12):56-60.