

煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组的设计

王 来 孟令通 李 永

鄂尔多斯市金通矿业有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要:为解决煤矿井下应急防火、瓦斯稀释需求,针对井下高温高湿、瓦斯易燃易爆的复杂环境,设计一种移动式新型碳分子筛制氮机组。基于变压吸附原理,优化整体结构与核心部件选型,集成防爆、智能控制技术,实现灵活移动与高效制氮。机组氮气纯度 $\geq 97\%$,产气量 $50-100\text{m}^3/\text{h}$,防爆等级达ExdIMb,可适配井下运输与作业约束,提升运行稳定性与安全性,为煤矿井下安全生产提供可靠装备支撑。

关键词:煤矿;井下移动式;新型碳分子;筛制氮机组;设计

引言:煤矿井下火灾、瓦斯积聚是重大安全隐患,注氮防火与瓦斯稀释是核心防控手段。现有制氮设备存在体积大、移动不便、效率低或防爆性能不足等问题,难以适配井下狭窄、复杂的作业环境。基于此,本文设计煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组,融合集成化、防爆化、智能化设计,破解现有设备痛点,满足井下应急与常规作业需求,保障矿工生命与矿井财产安全。

1 煤矿井下移动式制氮机组相关理论与技术基础

1.1 碳分子筛制氮核心原理

(1) 变压吸附(PSA)技术原理:氧氮分离的核心是吸附与解吸的交替过程,加压时碳分子筛优先吸附氧气,氮气通过形成产品气;降压时氧气脱附,分子筛再生,两塔交替实现连续制氮。(2) 碳分子筛的吸附特性:其孔径结构可选择性吸附氧氮分子,对氧气吸附能力远大于氮气;吸附容量随压力升高、温度降低而增大,反之则下降,是工艺调控的关键依据。(3) 制氮工艺参数的影响:吸附时间、压力、流量直接调控氮气纯度和产气量,需合理匹配三者参数,避免纯度下降或产气量不足。

1.2 煤矿井下作业环境要求

(1) 井下环境特点:具有空间狭窄、高温高湿、粉尘浓度高、瓦斯易燃易爆的特殊性,对设备防护要求严苛。(2) 井下设备安全标准:设备必须达到ExdIMb防爆等级,且通过煤安(MA)认证,确保符合井下安全运行规范。(3) 移动式设备适配要求:机组体积、重量需适配井下运输,移动方式灵活,可适应巷道转弯、坡度等复杂路况。

1.3 移动式制氮机组关键技术

(1) 集成化设计技术:将制氮各模块与移动载体紧凑整合,优化空间布局,减少占用体积,保障各部件协同运行。(2) 防爆防护技术:对电气元件、管路接口做

隔爆密封处理,增设防静电、防高温结构,规避井下安全隐患。(3) 智能控制技术:以PLC为控制核心,实现制氮参数实时监测与自动调控,提升机组运行稳定性和便捷性。

2 煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组整体设计

2.1 机组设计目标与技术指标

(1) 设计目标:满足井下应急防火、瓦斯稀释需求,实现灵活移动、高效制氮、安全可靠运行。针对井下火灾初期控火、瓦斯积聚区域稀释等场景,机组可快速移动至作业点,在复杂环境下稳定输出合格氮气,兼顾应急响应速度与长期运行稳定性,降低井下安全风险。(2) 核心技术指标:氮气纯度 $\geq 97\%$ (应急工况可提升至 99.5%),产气量为 $50-100\text{m}^3/\text{h}$,运行压力 $0.6-0.8\text{MPa}$,移动速度 $\geq 1.5\text{m/s}$ (适配井下巷道运输),防爆等级达到ExdIMb,能耗 $\leq 8\text{kWh}/100\text{m}^3$ 氮气,连续运行时间 ≥ 72 小时,满足井下长时间作业需求。(3) 设计约束条件:井下空间尺寸约束为巷道宽度 $\geq 1.8\text{m}$ 、高度 $\geq 2.2\text{m}$,机组整体重量 $\leq 8\text{t}$ (适配井下轨道运输极限),环境温度范围 $-10\text{℃}\sim 45\text{℃}$ 、相对湿度 $\leq 95\%$ (无冷凝),供电条件为井下 $1140\text{V}/660\text{V}$ 三相交流电,需适配井下供电波动特性^[1]。

2.2 机组整体结构设计

(1) 移动载体设计:选用MT-1.2型矿用平板车作为基础载体,对车架进行加固改造,增加4组弹簧减震装置(减震行程 $15-20\text{mm}$),采用螺栓+防滑垫板双重固定结构,确保机组在巷道坡度 $\leq 15^\circ$ 、转弯半径 $\geq 5\text{m}$ 的条件下平稳移动,载体尺寸控制为 $4500\text{mm}\times 1600\text{mm}\times 1800\text{mm}$,适配井下常规巷道通行。(2) 制氮系统集成设计:空气预处理单元、吸附单元、氮气缓冲与输送单元采用“纵向紧凑布局”,总占地面积 $\leq 7.2\text{m}^2$ 。预处理单元位于前端,吸附单元居中(4塔并

联布置), 缓冲与输送单元位于后端, 各单元间距 $\geq 300\text{mm}$, 预留检修空间, 同时优化管路走向, 减少气体阻力, 提升制氮效率。(3) 辅助系统设计: 冷却系统采用矿用隔爆型水冷散热器, 散热功率 $\geq 15\text{kW}$, 控制机组运行温度 $\leq 40^\circ\text{C}$; 排污系统设置自动排污阀, 排污周期 30min , 单次排污量 500mL , 避免杂质堆积; 应急停机系统集成手动+自动双重控制, 响应时间 $\leq 0.5\text{s}$, 可在压力超标、瓦斯浓度超限 ($\geq 0.5\%$) 时自动停机。

2.3 核心部件选型与设计

(1) 碳分子筛选型与装填设计: 选用新型CMS-300型碳分子筛, 其比表面积 $\geq 1200\text{m}^2/\text{g}$, 吸附效率较传统分子筛提升 15% , 使用寿命 ≥ 5 年。采用等压装填+振实密实工艺, 装填压力控制在 0.15MPa , 振实频率 50Hz , 装填密度 $1.1\text{g}/\text{cm}^3$, 优化装卸料口结构, 设置密封法兰与防尘盖, 装卸料时间 $\leq 2\text{h}/\text{塔}$ 。(2) 吸附塔设计: 采用圆柱形吸附塔结构, 筒体材质为Q235B不锈钢, 壁厚 12mm , 内径 800mm , 高度 2200mm , 封头采用椭圆形结构 (承压 $\geq 1.2\text{MPa}$); 采用4塔两组并联布局, 每组2塔交替进行吸附与解吸, 进出气方式采用“低进高出”设计, 进气口距塔底 300mm , 出气口距塔顶 200mm , 减少气体短路, 吸附效率提升 10% 。(3) 空气预处理部件选型: 选用防爆型螺杆式空压机, 型号为BKF-110, 排气压力 0.8MPa , 排气量 $16\text{m}^3/\text{min}$, 电机功率 110kW ; 搭配3级过滤器 (前置粗滤+精密过滤+活性炭过滤), 过滤精度依次为 $10\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$, 去除气源中粉尘、油雾等杂质; 选用冷干机型号为LD-20, 制冷量 20kW , 将气源露点降至 -20°C , 避免分子筛受潮失效^[2]。(4) 阀门与管路设计: 选用防爆型气动阀 (型号Q641F-16C), 响应时间 $\leq 0.3\text{s}$, 均压阀选用可调式减压阀 (调节范围 $0.2\text{--}0.8\text{MPa}$), 消音器选用矿用防爆型 (降噪量 $\geq 25\text{dB}$); 控制气路采用 $\phi 16\text{mm}$ 硬铜管, 管路连接采用焊接+防爆密封接头, 密封压力 $\geq 1.0\text{MPa}$, 避免气体泄漏, 管路走向贴合载体布局, 减少占用空间。

2.4 防爆与安全结构设计

(1) 电气系统防爆设计: 选用ExdIMb级防爆PLC (型号S7-1200Ex), 安装于隔爆腔体内, 防护等级IP65; 隔爆电磁阀选用防爆等级ExdIMb, 额定电压 24VDC ; 防爆电机选用YB3系列, 功率 110kW , 防护等级IP54, 所有电气部件均通过煤安认证 (MA), 接线处采用防爆密封盒密封, 避免电气火花引发安全事故。

(2) 机械安全设计: 设备外壳采用Q235B钢板焊接, 厚度 10mm , 抗冲击强度 $\geq 10\text{J}/\text{cm}^2$, 可承受井下落物冲击; 设置专用接地端子, 接地电阻 $\leq 4\Omega$, 进行全面防静电

电处理; 在吸附塔、缓冲罐顶部设置压力泄爆装置, 泄爆压力设定为 1.0MPa , 泄爆方向朝向巷道侧面, 避免泄爆伤人^[3]。(3) 环境适配设计: 设备外壳采用防尘防潮涂层 (厚度 $\geq 80\mu\text{m}$), 进气口设置防尘罩 (过滤精度 $5\mu\text{m}$), 避免粉尘进入设备内部; 优化散热结构, 使机组在 45°C 高温环境下仍能正常运行; 通过隔音棉包裹与消音器配合, 控制机组运行噪声 $\leq 85\text{dB}$ (距离设备 1m 处), 符合井下作业噪声标准。

图表说明: 本文核心数据可通过以下图表直观呈现, 贴合技术设计需求:

表1 核心部件选型及关键参数表

核心部件	型号	关键参数
碳分子筛	CMS-300	比表面积 $\geq 1200\text{m}^2/\text{g}$, 寿命 ≥ 5 年
空压机	BKF-110	排气压力 0.8MPa , 功率 110kW
吸附塔	定制圆柱形	内径 800mm , 壁厚 12mm , 承压 $\geq 1.2\text{MPa}$
防爆PLC	S7-1200Ex	防爆等级ExdIMb, 防护等级IP65

3 煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组控制系统设计

3.1 控制系统总体设计方案

(1) 控制模式确定: 自动控制为主、手动控制为辅, 支持远程监测与调控。正常工况下, 系统自动完成制氮全流程控制, 无需人工干预; 应急或检修时, 可切换手动模式精准操作, 同时支持与井下监控中心联网, 实现运行参数远程查看、启停及参数调控, 提升操作便捷性。(2) 控制系统架构: PLC单片机为主控核心, 传感器、执行器、显示单元的连接设计。采用模块化架构, 以隔爆型PLC为核心, 通过总线连接各类传感器、执行器及显示单元, 信号传输采用屏蔽线缆, 传输距离 $\leq 50\text{m}$, 确保信号稳定, 各模块独立工作、协同联动, 降低故障影响范围。(3) 控制流程设计: 开机自检、吸附-解吸循环控制、参数调控、故障应急处理流程。开机后系统自动完成传感器、执行器及电路自检, 自检合格后启动制氮流程; 通过PLC控制吸附塔交替完成吸附 (120s) 与解吸 (90s) 循环; 实时监测参数并自动调控, 出现故障立即触发应急停机, 同时发出报警信号^[4]。

3.2 硬件选型与电路设计

(1) 核心控制器选型: 隔爆型PLC选型, 适配井下环境的抗干扰、抗震、防潮性能要求。选用ExdIMb级隔爆型PLC (型号S7-1200Ex), 防护等级IP65, 工作温度 $-10^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$, 具备抗电磁干扰、抗震 ($10\text{--}50\text{Hz}$, 加速度 1g)、防潮性能, 可直接安装于井下作业环境, 支持多模块扩展, 满足控制需求。(2) 传感器选型与安装: 氮气纯度、压力、温度、瓦斯浓度等传感器选型, 安装

位置优化。氮气纯度传感器选用隔爆型（测量范围95%-99.9%，精度±0.1%），安装于氮气输出管道；压力传感器（测量范围0-1.6MPa）安装于吸附塔进出口；温度传感器（测量范围-20℃~80℃）安装于机组内部；瓦斯浓度传感器（测量范围0-1%，精度±0.05%）安装于机组周边1m处，确保监测精准。（3）执行器与显示单元设计：隔爆电磁阀、气动阀控制电路设计，防爆触摸屏与报警单元设计。执行器选用隔爆型电磁阀、气动阀，控制电路采用直流24V安全电压，设置过载保护；显示单元选用7英寸隔爆触摸屏，实时显示运行参数；报警单元采用声光报警，报警音量 ≥ 85dB，报警灯采用红色LED，故障时同步触发本地与远程报警。

3.3 软件程序设计

（1）主程序设计：机组启停控制、吸附与解吸循环自动切换程序。主程序采用模块化设计，包含启停控制模块、循环控制模块，实现机组一键启停，通过PLC定时器精准控制吸附、解吸时间，完成4塔两组交替循环，确保制氮连续稳定。（2）参数调控程序：氮气纯度、产气量、压力等参数的实时监测与自动调节程序。实时采集各传感器数据，当氮气纯度低于97%时，自动调整吸附时间；压力偏离0.6-0.8MPa范围时，调节空压机输出压力；产气量根据需求自动适配，确保参数稳定在设定范围。

（3）故障诊断与报警程序：设备故障（温度过高、压力异常、纯度不达标）检测与报警程序。实时诊断各类故障，温度 ≥ 45℃、压力 ≥ 1.0MPa或 ≤ 0.4MPa、纯度 ≤ 96%时，立即触发应急停机，记录故障类型与时间，同时发出声光报警，便于快速排查维修^[5]。

3.4 控制系统抗干扰设计

（1）硬件抗干扰设计：电路屏蔽、接地处理，电源滤波设计。控制电路采用金属屏蔽罩包裹，屏蔽外界电磁干扰；采用单点接地方式，接地电阻 ≤ 4Ω，避免静电积累；电源端加装滤波器，过滤电网杂波，确保供电稳定，提升系统抗干扰能力。（2）软件抗干扰设计：程序冗余设计、数据滤波算法，避免误触发与数据失真。在程序中增加冗余指令，防止程序跑飞；采用滑动平均滤波算法处理传感器数据，剔除异常数据，采样周期设置为1s，确保数据精准，避免因干扰导致的误报警、误操作。

结束语

本文完成煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组的整体设计、核心部件选型与控制系统设计，通过优化结构布局、强化防爆防护与智能调控，实现机组高效、安全、灵活运行，各项技术指标均满足井下作业要求。该机组有效解决现有设备适配性差、效率低等问题，为煤矿井下防灭火与瓦斯治理提供新方案，对推动煤矿安全装备升级、提升安全生产水平具有重要现实意义。

参考文献

- [1]胡福杰,徐扬,付云生,等.DT型煤矿用移动式碳分子筛制氮装置设计[J].煤矿安全,2022,8(10):39-42.
- [2]赵益芳,刘世华.煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组的设计[J].煤矿设计,2021,5(12):90-93.
- [3]邬晓璐.矿用分子筛制氮机系统触屏控制器的应用研究[J].机械管理开发,2021,34(05):226-227.
- [4]刘益民.煤矿井下移动式新型碳分子筛制氮机组的设计.装备维修技术,2023,(12):151-154.
- [5]张慧芳.碳分子筛制氮机在煤矿灭火中的应用[J].机械管理开发,2020,35(10):12-13.