

矿井自动控制均压防灭火系统设计

朱红青, 李 峰, 姜元刚, 潘凤龙, 郝俊伟

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用流体数值模拟软件, 对均压效果进行了模拟分析; 根据均压防灭火技术原理、特点与均压区域两端压力变化和漏风量的关系, 确定了自动控制均压防灭火系统的调压冗余度。针对手动均压中存在频繁调压、调压滞后与调压精度低等问题, 基于 CAN 总线通信协议, 设计了矿井自动控制均压防灭火系统; 同时对风窗自动调节系统进行设计; 根据漏风压差信号传递的滞后性, 采用 Smith 预估和 PID 控制调节方法调节漏风风压。以山西某矿为例, 均压模拟结果表明: 均压前后采空区自燃带宽度由 70 m 降到 20 m, 自燃“三带”分布由紊乱状态转变成规律状态。

关键词: 均压防灭火; 调压冗余度; 自动控制; 风窗自动调节系统; 数值模拟

中图分类号: TD75.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2012)04-0095-05

Design on Automatic Pressure Balanced Fire Prevention and Control System in Mine

ZHU Hong-qing, LI Feng, JIANG Yuan-gang, PAN Feng-long, HAO Jun-wei

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: With a fluid numerical simulation software, the pressure balanced effect was simulated and analyzed. According to the principle and features of the pressure balanced fire prevention and control technology and the relationship between the two end pressure variation and air leakage value of the pressure balance area, the pressure regulated redundancy of the automatic control pressure balanced fire prevention and control system was determined. According to the frequent pressure regulation, pressure regulated delay, low pressure regulated accuracy and other problems existed in the manual pressure regulation, based on the CAN bus communication protocol, a mine automatic control pressure balanced fire prevention and control system was designed. A detail design was conducted on the automatic control system of the air regulator. According to the delay of the air leakage pressure difference signal transmission, the Smith prediction with PID control and regulation method was applied to regulate the air leakage and air pressure. Taking a mine in Shanxi as an example, the pressure balanced simulation results showed that before and after the pressure balanced, the width of the spontaneous combustion zone in the goaf was reduced from 70 m to 20 m and the distribution of the spontaneous combustion “three zones” was changed from disorder status to regular status.

Key words: pressure balanced fire prevention and control; pressure regulated redundancy; automatic control; automatic control system of air regulator; numerical simulation

据统计, 煤炭自燃引发的矿井火灾占矿井火灾总数的 70% 以上。煤层自燃火灾的发生发展不仅直接影响安全生产, 而且极易引发煤尘瓦斯爆炸, 扩大灾害的程度与范围, 是酿成煤矿重大恶性事故的主要原因之一。均压防灭火方法是应用通风原理, 通过减少采空区或火区的氧气补给, 使采空区

的高温区域或火区缺氧窒息或停止氧化。与其他灭火方法相比, 均压防灭火方法具有安全、迅捷、高效、投入少的特点, 目前已广泛应用于井下。通风机-风窗联合均压是均压防灭火中经常使用的方法。在采煤工作面使用通风机-风窗联合均压, 可减少工作面后部采空区的漏风量, 减少氧气补给,

收稿日期: 2011-12-12; 责任编辑: 赵 瑞

作者简介: 朱红青(1969—), 男, 湖南双峰人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 010-62339035, E-mail: zhq@cumtb.edu.cn

网络出版时间: 2012-04-17 09:53:16; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120417.0953.026.html>

引用格式: 朱红青, 李 峰, 姜元刚, 等. 矿井自动控制均压防灭火系统设计 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(4): 95-99.

抑制采空区遗煤氧化,达到防灭火的目的;在应用采空区闭区均压时,使用通风机、调节风窗、均压气室或连通管来调节密闭墙内外的压力差,抑制采空区漏风,从而达到控制防灭火的目的。在使用通风机、风门和风窗进行均压防灭火过程中,平衡漏风通道两端气体压力,并始终维持平衡,是实现均压防灭火的关键。但由于井下通风系统复杂、人员活动频繁、通风设施开关频繁、大气压力变化及采掘活动等,均有可能造成井下通风系统的不稳定,破坏均压区域压力平衡状态,导致采空区或火区漏风状况的变化,如果均压区域压力平衡被打破,现阶段必须通过人为控制来调节通风机转数或风窗过风口的面积才能实现新的风压平衡。由于井下通风压力经常处于变化状态,通常造成调压的不精确与不及时,均压效果不理想,迫使多次调整均压设施的位置与大小,以求均压区域气压平衡。这种多次均压调节引起的气体压力频繁变化,对火区有类似人工呼吸的供氧作用,所以,并不能有效地控制漏风;特别是调压中的误操作,很可能导致均压区域不均压,结果使漏风量增大,威胁采煤工作面的安全回采。基于CAN总线通信协议而设计的自动控制均压防灭火系统能够实现通风机转数和调节风窗过风口面积的自动控制与调节,使均压区域始终保持压力平衡,有效提升均压效果^[1-2]。

1 均压效果模拟分析

以山西某矿为例,工作面长120 m,进风巷和

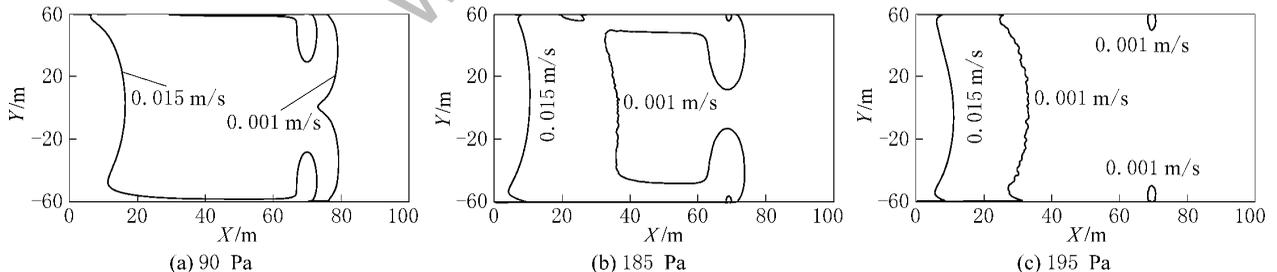


图2 升压后采空区自燃“三带”分布

由图2c可知:当工作面风压增加了195 Pa时,采空区自燃“三带”的分布基本处于规律状态,漏风状态基本被控制,自燃带的宽度降到了20 m,达到了均压目的。因此,可以看出均压的实施能有效控制采空区的漏风状态,大幅减小采空区自燃带的分布范围,有效预防采空区遗煤自燃。

回风巷断面面积 9.5 m^2 ,回采工作面断面面积 13.9 m^2 ,通风量 $25\text{ m}^3/\text{s}$,风速 2.63 m/s ,上隅角风压 $100\ 900\text{ Pa}$,下隅角风压 $100\ 870\text{ Pa}$,工作面压差 30 Pa 。采空区漏风以复杂角联方式为主,有相邻工作面或旧巷道向采空区里面漏风,可以在进风侧安设通风机,在回风侧安装风窗,实行增压调节,来平衡外部风压(2个漏风点风压为 $101\ 080\text{ Pa}$)。

1) 均压前采空区自燃“三带”模拟结果如图1所示。 X 为采空区走向长, $X=0\text{ m}$ 处为采煤工作面; Y 为采空区倾向长, $Y=0\text{ m}$ 处为采煤工作面倾向中点,工作面上部为正,下部为负。这里按风速 0.001 和 0.015 m/s 划分采空区自燃带的范围。

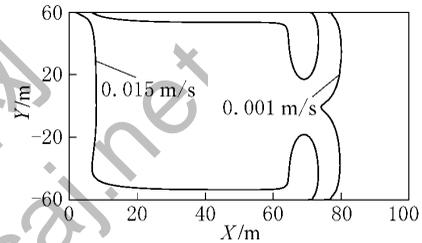


图1 均压前采空区自燃“三带”分布

由图1可知,在均压实施前工作面后部的采空区因漏风影响,自燃“三带”的分布极其紊乱,没有任何规律可循,其自燃带的宽度约为70 m。

2) 均压效果模拟过程分为风压增量90、185、195 Pa采空区自燃“三带”分布变化,结果如图2所示。由图2a和图2b可知:当工作面风压升高时,采空区自燃带分布的区域范围开始缩小,漏风强度有所减弱,均压效果开始显现。

2 确定调压冗余度

根据通风阻力定律,在漏风风阻一定的情况下,采取措施只要使漏风风压为零,即可使采空区漏风量降低到零。实际采用均压法防灭火时,由于采空区漏风通道两端压差随时受矿井通风压力、大气压力以及封闭火区中存在的火风压等因素的影

响;同时,采空区煤自燃存在易燃风速区,过高风速及过低风速都不可能引起采空区遗煤自燃^[3-6]。因此,无需使采空区漏风通道两端风压差降到零,只要使漏风通道两端压差降低到某一安全值,就能防止采空区煤炭自燃(调压冗余度)。调压冗余度推导过程如下,根据通风阻力定律,漏风量 q 为

$$q = (p_a - p_s) / R \quad (1)$$

式中: R 为层流漏风风阻; p_s 、 p_a 分别为采空区采空区内、外空气压力。采空区内空气压力由初始压力 p_{s0} 经时间 t 变化到 p_s (按等温过程进行)。

$$dp_s = p_{s0} \frac{qdt}{V} = (p_a - p_s) p_{s0} \frac{dt}{RV} \quad (2)$$

令 $t=0$, $p_s=p_{s0}$,求解得

$$p_s = p_a - (p_a - p_{s0}) \exp(-p_{s0} \frac{t}{RV}) \quad (3)$$

式中, V 为采空区体积,则

$$q = \frac{1}{R} (p_a - p_{s0}) \exp(-p_{s0} \frac{t}{RV}) \quad (4)$$

可知:当 $t \rightarrow \infty$, $p_s=p_a$ 时, p_s 与 p_a 有平衡的趋势; $t=0$ 时,采空区有最大漏风风量。令 $p_a=p_{a0}+kt$, p_{a0} 为采空区外气压初始值, k 为常数。结合式(1)与式(2)得

$$dq = \frac{1}{R} (k - \frac{1}{V} qp_{s0}) dt \quad (5)$$

漏风通道最大允许漏风量 q_{max} 为

$$q_{max} = \frac{kV}{p_{s0}} [1 - \exp(-\frac{p_{s0}}{RV}t)] = \frac{\Delta p_a V}{p_{s0} \Delta t} [1 - \exp(-\frac{p_{s0}}{RV}t)] \quad (6)$$

其中, Δp_a 为在变化时间 Δt 内采空区外气压的总增量。有关资料认为采空区单位面积的漏风量大于 $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 或小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,都不会发生自燃火灾,漏风通道两端最大允许漏风风压 Δp_w (即调压冗余度)为

$$\Delta p_w = \frac{0.001 p_{s0} t}{h} [1 - \exp(-\frac{p_{s0}}{RV}t)] \quad (7)$$

式中, h 为采空区冒高。

3 自动控制均压防灭火系统组成

自动控制均压防灭火系统主要由井上控制设备与井下分站组成,井下分站接收来自监测现场设备的信号,调制并传输信号,实现井上与井下之间的相互通信,如图3所示。井上井下通信协议采用

CAN总线,CAN总线具有通信速率高、容易实现、且性价比高等优点;CAN节点在错误严重的情况下具有自动关闭输出功能,以使总线上其他节点的操作不受影响,从而保证在网络中不会因个别节点出现问题,而使总线处于死锁状态^[7-11]。

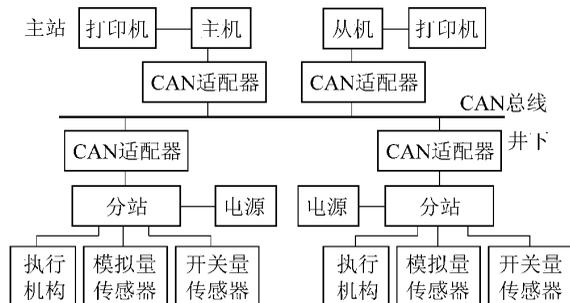


图3 自动控制均压防灭火系统组成

4 自动控制均压防灭火系统设计

自动控制均压防灭火系统设计如图4所示。智能风压传感器与压差传感器所测漏风通道两端气压与风窗两侧的压力差的模拟电信号,通过分站PLC转换为数字信号,经CAN适配器调制信号,传至井上CAN适配器调制成标准RS485数字信号,工控上位机的RS485接口相连,将数字信号采集到工控机内部寄存器进行存储并显示。将采集到的数字信号,经计算软件进行对比、分析和处理,将各种控制信号传输到分站PLC,并与现场变频器1和变频器2通信,发出执行指令调节电流频率并使继电器开关量信号达到控制通风机转速,平衡区域风压与步进电机的正转、反转、启动与停止来控制风窗面积大小的目的,实现均压区域的气压提升与降低,从而控制漏风量,平衡漏风通道两端的漏风压差。当一次调压调节结束时,通风机转速、风窗面积、电流、电压和电流频率等状态信号通过系统反

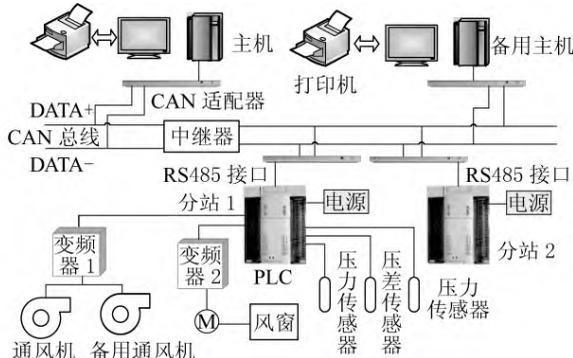


图4 自动控制均压防灭火系统设计

馈给工控上位机进行显示、记录和打印。

5 自动调节风窗的设计

在通风机-风窗联合调压的升压区域,调压通风机产生的压能以克服采煤工作面、进风巷、回风巷的风流阻力和风流通过调节风窗产生的阻力,由于采煤工作面与进风巷、回风巷构成通风系统后,工作面、进风巷与回风巷的风阻值变化不大,因此系统区间升压主要是通过控制调节风窗过风口面积实现的。当系统均压区间升压幅度小时,则调节风窗过风口面积大,风阻小;反之,当系统均压区间升压幅度较大时,则调节风窗过风口面积小,风阻大。所以自动调节风窗是自动均压系统的重要组成部分之一,它的调节精度直接关系到最后的均压效果。风窗自动调节系统是自动控制均压防火系统的子系统,其组成部分如图5所示。

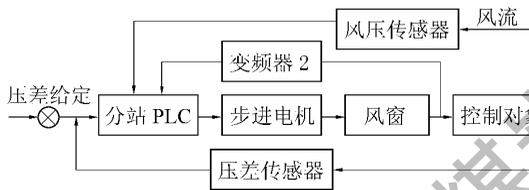


图5 风窗自动调节系统

通过压力传感器测定漏风通道与工作面的风压,给定漏风压差;数据经主站软件处理后发送给分站PLC控制信号,与变频器2通信来控制通风机电机的启动、停止、正转与反转;以漏风压差为调压值,压差传感器测定均压过程均压值,调节风窗过风口面积的大小,直至达到规定的调压值,达到均压目的。通过对井下漏风通道风压差的自动监测,自动调节风窗的开启面积,改变巷道风阻,以实现自动调节漏风通道两端的压差,达到均压,惰化火区的目的,实现煤炭的安全开采。

该系统是一个单回路闭环控制系统,控制对象是漏风通道两端的风压差,动作过程如下:①系统实时监测风压值和风窗前后压差等参数。②系统将检测的漏风通道两端的压差值与给定值进行比较,若满足调压冗余度的要求,则输出指令维持现状;如在调压冗余度的范围外,则按预先编好的程序进行运算和处理,输出控制量给步进电机,步进电机带动风窗运行,风窗面积改变,使风压差发生变化,完成一次均压调节。③系统实时监测并重复步骤②,直至达到控制精度要求为止。

由于此系统的控制对象是漏风通道两端的漏风压差,其随着采煤工作面的回采推进而发生变化,为一时变的纯滞后环节,仅采用常规的PID调节或者单纯的Smith预估控制调节,效果不理想,所以该系统采用Smith预估加PID控制调节方法,来调节控制对象^[12-18]。变频器利用继电器接点形式与分站PLC连接,接收开关量控制信号控制步进电机的正转/反转、启动/停止、微动。

由于采用维持原风量的均压方法,通风机与风窗之间的巷道沿程各点的增压都相同,通风机所增加的风压完全被用来克服风窗所增加的通风阻力。因此,根据测定的调节风窗两侧的通风阻力和工作面风量,确定选用DJ60-II-8型正交型轴流防爆通风机,功率55kW×2,风量460~900m³/min,风压960~7600Pa。

通风机设在工作面进风巷道入风口联络巷附近。通风机设置在靠风一侧,在通风机进风口、出风口处各设置1道板墙或轻质预制块墙,墙中间设有风门。设置的板墙要尽量严密,以避免因产生循环风流引起风压损失。现场使用的压力传感器与压差传感器相应参数,见表1。

表1 压力传感器与压差传感器的技术指标

技术指标	压力传感器	压差传感器
量程/MPa	0~0.200	-0.001~0.001
输出电流/mA	4~20	4~20
精度/(%F.S.)	0.20	0.15
非线性/(%F.S.)	0.20	0.20
迟滞/(%F.S.)	0.2	0.2
直流电源电压/V	21	21
工作温度/°C	-25~400	-25~400
零点漂移/(%F.S.·°C ⁻¹)	0.015	0.015
温度漂移/(%F.S.·°C ⁻¹)	0.008	0.008
稳定性/(%·a ⁻¹)	0.1	0.1
允许过负荷/(%F.S.)	120	150
防爆类型	本安型	本安型

为保证调压效果,通风机安装后要测出调压工作面的风量和通风机两侧风流的压差。根据已知的巷道风阻值,画出安装辅助通风机后工作面进、回风巷的压力坡度线,计算出风路沿程各点的增压值。如果增压值不够,则要更换风量较大的辅助通风机,或者并联1台辅助通风机。其控制调节方法与自动风窗的控制调节方法相同,也采用Smith预估和PID调节控制方法。

6 结 语

根据现场实际条件为基础, 模拟分析了均压防灭火方法的优越性。根据通风阻力定律相关原理, 确定了自动控制均压防灭火系统的调压冗余度; 根据现场对均压系统的实际要求, 完成了对自动控制均压防灭火系统的总体硬件设计; 详细设计了自动调节风窗, 并采用 Smith 预估和 PID 控制调节方法, 来调节控制对象, 取得了良好效果。

参考文献:

- [1] 周心权. 矿井火灾救灾理论与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [2] 朱红青. 火灾防治技术措施决策系统的研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [3] 武建国. 采空区自动控制均压装置的研制与应用 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2007.
- [4] 朱红青, 刘 涛, 刘 伟, 等. 自动控制均压防灭火系统的研制与应用 [C] // 中国职业安全健康协会 2005 年学术年会论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 145-148.
- [5] 朱红青, 王翰峰, 刘 涛, 等. 自动均压系统的均压效果影响分析及研究 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33 (5): 74-76.
- [6] 蔡永乐. 均压防灭火定量分析技术研究及其应用 [J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (6): 59-63.
- [7] 朱 雄, 张 涛. 基于 CAN 总线的煤矿安全智能测控节点

的设计 [C] // 第 18 届全国煤矿自动化与信息化学术会议论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2008: 34-39.

- [8] 田欲康, 鲁慧敏. 基于 CAN 总线的 PLC 设计 [J]. 电工技术, 2003 (10): 21-22.
- [9] 王红蕾. 基于 CAN 总线技术的 PLC 与上位机的通信 [J]. 计算机应用, 2002 (2): 95-96.
- [10] 毕 翔, 张建军, 王跃飞. 基于 CAN 总线的 PLC-PC 控制系统研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28 (6): 599-602.
- [11] 路小俊. 基于 CAN 总线的通讯研究 [J]. 机床电器, 2003 (4): 5-7.
- [12] 臧小杰, 王 焱, 阎笑虹, 等. 井下均压灭火风窗自动调节系统 Smith 预估控制的单片机实现 [C] // 中国控制与决策学术年会论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 118-121.
- [13] 康 毅, 李正文, 吴锦强. 对提高 PLC 系统可靠性的探讨 [J]. 测控技术, 2004 (10): 65-68.
- [14] 张华龙. 图解 PLC 与电气控制入门 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 93-230.
- [15] 何凤有, 谷善茂, 秦绪平, 等. PLC 在煤矿风机自控系统中的应用 [J]. 电工技术, 2005 (12): 46-47.
- [16] 吴忠智, 吴加林. 变频器应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [17] 张选正, 顾红兵. 中高压变频器应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [18] 李芳园. 变频器自动化工程实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

(上接第 94 页)

锡林浩特矿业有限公司 2010 年仅因冻粘问题影响输送带系统运行时间约 540 h, 减少煤炭产量 135 万 t (按每小时生产能力 2 500 t 计算), 产值达 13 500 万元。所以防冻粘滚筒的性价比是普通滚筒的 424 倍, 具有很大的经济效益。

5 结 语

防冻粘滚筒试验的成功, 从根本上解决了冬季严寒地区输送带运输系统冻粘的问题, 不仅保证了系统运行时间, 降低了运行维护成本, 而且防止了输送带跑偏、撕裂、滚筒窜轴等故障的发生, 延长了输送带运输系统的寿命。并为进一步在类似环境下大型、特大型露天矿带式输送机系统冬季防冻粘问题综合治理、研究奠定了坚实的基础, 使高寒地区露天矿剥离工艺冬季不停产成为可能, 预计提高连续生产系统生产能力 25% 左右, 具有很好的推广价值和前景。

参考文献:

- [1] 程居山. 矿山机械 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [2] 杨相柏, 王 勇, 张化乾, 等. 钢丝绳带式输送机头部传动壳改向滚筒的受力情况分析 [J]. 煤矿机械, 2008, 29 (5): 32-34.
- [3] 李倩兮, 吴宏武. 超高分子量聚乙烯成型工艺及其加工设备研究进展 [J]. 机械工程材料, 2007, 31 (6): 1-5.
- [4] 左义海. 超高分子量聚乙烯的性能和加工及应用 [J]. 山西化工, 2008, 28 (2): 47.
- [5] 孙立鸿. 大型超高分子量聚乙烯制件的注射成型研究 [J]. 工程塑料应用, 2005, 33 (5): 34-35.
- [6] 张小霞, 柳和生, 黄兴元. 超高分子量聚乙烯气辅挤出工艺探索 [J]. 塑料科技, 2008, 35 (1): 62-65.
- [7] 王德禧. 超高分子量聚乙烯挤出制品加工技术及进展 [J]. 国外塑料, 2008, 26 (2): 52-55.
- [8] 刘广建. 超高分子量聚乙烯 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 11-15.
- [9] Joris G H, Bernard D L. Composition and Method to Process Polymers Including Ultrahigh Molecular. US, 4853427 [P]. 1989-08-01.