文章编号:0253-4339(2013) 05-0065-06
doi:10. 3969/j. issn. 0253-4339. 2013. 05. 065

矿用救生舱降温除湿系统无霜改进及可行性分析研究

殷 岳[1] 杜 垲[1] 周荣辉[2] 孙长建[1]

(1 东南大学能源与环境学院 南京 210096; 2 南京久鼎制冷空调设备有限公司 南京 210000)

摘 要 无电自驱式矿用救生舱在矿难发生后为井下被困的人员提供了必要的生存条件。针对现有救生舱的 CO_2 降温除湿系统的蒸发器容易出现结霜的问题,提出了一种降温除湿系统的无霜改进设想,介绍了改进后系统的设备构成和工作流程,并详细分析了无霜改进的原理及其可行性;同时还针对系统的可行性进一步阐述了一种运用温度分级控制阀组的控制方法,分析了系统在变负荷工况下的多种控制调节方式。为矿用救生舱的深入研究提供了参考。

关键词 矿难; 救生舱; CO_2 降温除湿系统; 无霜; 分级控制

中图分类号:TD79$^+$2; TU834. 9 **文献标识码**:A

The Frostless Improvement and Feasibility Analysis of Cooling and Dehumidifying System in Mine Rescue Chamber

Yin Yue[1] Du Kai[1] Zhou Ronghui[2] Sun Changjian[1]

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 2. Nanjing Jiuding refrigeration and air conditioning equipment Co., Ltd., Nanjing, 210000, China)

Abstract Powerless self-driven mine rescue chamber supplies essential survival conditions for the people who are trapped during mine accidents. As the evaporator in the CO_2 cooling and dehumidifying system of current rescue chamber has frosting problem, an idea of frostless improvement of the cooling and dehumidifying system is proposed and the equipment structure and working process of the developed system are introduced in this paper. Then, the principle and feasibility of the frostless improvement are analyzed in detail. Furthermore, a control method which uses temperature hierarchical control group valves is stated, and several regulative methods of the system under variable load conditions are analyzed. The results provide reference for further study of mine rescue chamber.

Keywords mine accident; rescue chamber; CO_2 cooling and dehumidifying system; frostless; hierarchical control

近年来国内矿难事故频发,且总是伴随着大大小小的伤亡惨剧,矿工的生命安全得不到保障。根据世界各国对矿井事故的调查,在火灾、爆炸等事故发生现场瞬间受到伤害死亡的矿工只占事故伤亡人数的一小部分,大部分矿工都是因为在矿井透水或火灾、爆炸后不能及时升井或逃离高温有毒有害气体现场,导致溺水、窒息或中毒死亡的[1-2]。矿难发生之后,矿井内的通道会因塌方造成堵塞,给救援工作带来难度,同时进一步导致井下通风不良、温度逐渐升高以及二氧化碳及有毒有害气体聚集,都时时威胁着被困矿工的生命安全。

因此,在矿井下安置无电力驱动的紧急避险设施尤为重要。当矿难发生时,紧急避险设施为无法及时撤离的矿工提供一个安全的密闭空间[1]。此紧急避险救生舱需要能够抵御外部的爆炸冲击、高温烟气,隔绝有毒有害气体;同时,舱体内部还要能为被困矿工提供一定的氧气、食物和饮用水,以及各种应急救生工具、药品,此外还需要对舱内环境进行降温除湿、除去 CO_2 以及净化有毒有害气体等空气处理措施,为被困矿工提供生存条件的同时,也最大限度地为救援工作赢得时间。

1 国内外研究现状简述

一直以来,矿业发达的国家对于矿难事故的应急救援工作十分重视,将救生舱作为地下矿山应急救援工作的重要部分进行了大量的研究。目前,救生舱在矿业发达国家的应用已经较为普遍,在地下坑道中设置和使用救生舱,已经是矿井应急救援中的一项成熟而有效的技术,并且已经有过成功营救的案例[3-4]。2009 年 6 月初,在澳西部的帕赛佛伦斯镍矿发生的一次岩石垮落事故中,澳大利亚的 MineArc 公司的避难舱一展其避险功能,使受困于地下千米的矿工在作

收稿日期:2012 年 9 月 21 日

业点附近的避难舱中避险达 16h,并成功获救[5]。

与国外相比,国内对矿用移动式救生舱的研究起步较晚,其设计思路还不十分成熟,缺少必须的实验和检验支持,其相关的行业标准也正在制订中。随着国家安全监管总局、国家煤矿安监局将救生舱研究列入国家"十一五"科技支撑计划[5]。目前,国内已有多家企业、科研单位从事相关产品研发。最早,有北京科技大学、山西潞安集团和陕西重生矿业科技有限公司承接国家科技支撑计划课题"矿井重大灾害应急救援关键技术研究"的子项目,共同进行救生舱的研制,其研发的救生舱系统已拥有多个自主知识产权。2008 年 7 月,完成了 4 人 96 小时完全模拟井下灾变环境下的入仓实验。2009 年 3 月 21 日,经过中国煤炭工业协会组织国内安全技术领域的专家院士的一致鉴定,陕西重生矿业科技有限公司"矿用可移动式救生舱"项目的整体研究水平已达到国际领先,填补了我国矿山急救领域的空白[6]。

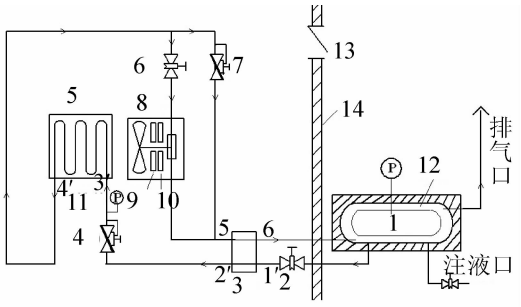
去年,是我国矿用救生舱发展最迅速的一年,国内多家公司研发的救生舱产品实验成功下线,并有部分公司以联合外国企业进行投产。2011 年 3 月 14 日,中平能化集团研发制造的"煤神"牌矿用可移动式分体救生舱通过了中国煤炭工业协会组织的专家鉴定,加快了煤矿井下安全避险"六大系统"的建设[7]。中煤能源集团有限公司旗下的中煤综合利用集团公司将联合美国斯特塔公司,在华组建紧急避险系统产品生产基地,下半年投产后将年产 4000 台煤矿用救生舱[8]。中选公司与青岛兰青公司联合研发制造的国内首台矿用全防型可移动式救生舱在山东能源新汶矿业集团协庄煤矿中选机械公司下线[9]。

最初由于技术不成熟、缺乏实践经验,国内外研发的救生舱的内部空气调节系统都是直接采用普通的分体式空调。然而在矿难发生之后,由于井下供电系统瘫痪,因此对于救生舱内部空气调节系统的设计,需要使其在无外部供电的条件下也能正常有效运行。现阶段国内外研发的救生舱大多都是由蓄电池提供动力使系统运行,因此带来的另一问题就是蓄电池容易产生电火花,在矿难发生后可燃性气体聚集的高危情况下易导致二次爆炸,产生次生灾害[10]。因此,更多的研究开始转向无电自驱式降温除湿系统。

2 降温除湿系统的改进设计

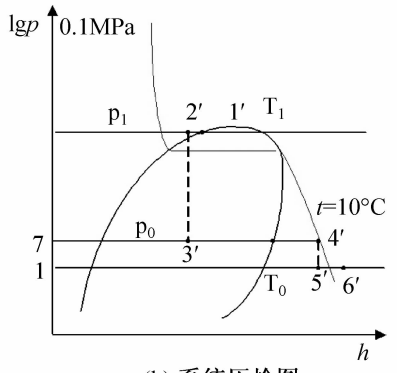
2.1 已有降温除湿系统存在的问题

矿用救生舱需要对舱内密闭环境进行降温除湿、提供氧气、除去人体呼吸产生的二氧化碳以及净化有毒有害气体等空气处理过程,现有的采用 CO_2 驱动的降温除湿系统中,仍存在诸多不完善的地方:因 CO_2 节流背压缺乏相应控制,致使蒸发器外表面温度过低而结霜,严重阻碍了系统稳定可靠运行,影响制冷效果,影响热交换,所以必须除霜。现有的除霜方法,一般采用停机电热除霜或人工除霜,这两种方法均存在难以接受的缺陷。如电加热除霜,虽然较快,但需要额外的电热来提供加热的热量,对于救生舱而言,其本身并无电力驱动,电加热方式显然不适用于此;人工除霜费时费力,并且一旦制冷降温系统停止运行,严重威胁到避难人员的生命安全。因此现有的采用 CO_2 驱动的降温除湿系统对于救生舱而言,如何避免结霜是一个必须解决的问题。



(a) 系统结构示意图

1 CO_2储液罐 2 手动阀 3 回热器 4 恒压阀 5 平行流蒸发器 6 手动调节阀 7 背压调节阀 8 气动风扇 9 CO吸附剂 10 CO_2吸附剂 11 压力表 12 保温夹套 13 单向风门 14 救生舱本体



(b) 系统压焓图

图 1 一种以 CO_2 为制冷剂驱动的制冷系统[10-11]

Fig. 1 A refrigerating system driven by CO_2 as refrigerant

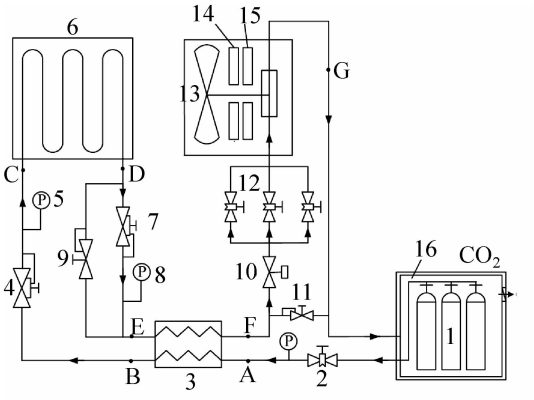
图 1(a)所示为文献[10]和[11]中介绍的以 CO_2 为制冷剂驱动的制冷系统的系统结构示意图,图 1(b)为其压焓图。此 CO_2 制冷系统,采用一次节流一次回热,节流后 CO_2 压力从 6.4MPa 直接降为 0.7MPa,因此温度急剧降低,系统蒸发温度可达到 −49.4℃[10-11],容易引起蒸发器表面出现结霜的问题,使得降温除湿系统无法稳定可靠运行。这里针对此不足,对矿用救生舱无电自驱式 CO_2 降温除湿系

统进行无霜改进,在不降低液体 CO_2 总的制冷能力的前提下,采用二次节流一次回热控制蒸发温度,并在系统中设置一组分级控制阀组,用于调节系统负荷及舱内温度。

2.2 降温除湿系统的改进

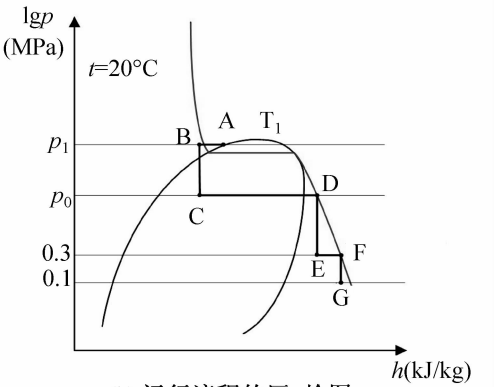
2.2.1 改进后系统的设备构成

改进后的降温除湿系统结构如图 2(a)[12]所示。



(a) 设备构成结构图

1 CO_2储液罐 2 手动阀 3 回热器 4 第一恒压阀 5 第一压力表 6 蒸发器 7 第二恒压阀 8 第二压力表 9 第一安全阀 10 电磁阀 11第二安全阀 12 温度分级控制阀组 13 气动风扇 14 CO吸附剂 15 CO_2吸附剂 16 CO_2贮存间



(b) 运行流程的压-焓图

图 2 改进后的无霜降温除湿系统

Fig. 2 Improved frostless cooling and dehumidifying system

2.2.2 系统运行流程

液态 CO_2 存储于储液罐(1)中,依次经手动阀(2)、回热器(3)、第一恒压阀(4),然后进入蒸发器(6),吸收救生舱内热量,转变为气态 CO_2,气态 CO_2 经第二恒压阀(7)再输送至回热器(3)中,与从储液罐(1)经手动阀(2)输入的液态 CO_2 在回热器(3)中换热,换热后的气态 CO_2 经过电磁阀(10)输入温度分级控制阀组(12),再驱动气动风扇(13)运转,温度分级控制阀组(12)用于控制气态 CO_2 流量和气动风扇的风量,从而控制蒸发器中的蒸发量,达到控制降温除湿系统制冷量目的,实现系统负荷和舱内温度的分级调节;蒸发器(6)、CO 吸附剂(14)和 CO_2 吸附剂(15)设置在气动风扇(13)的风流方向上,气动风扇(13)驱动救生舱内空气循环,使空气流经蒸发器(6)、CO 吸附剂(14)和 CO_2 吸附剂(15),实现空气的净化过滤与降温除湿,同时,空气的循环流动使舱内温度更趋于均匀;之后的 CO_2 气体输送至 CO_2 贮存间(16),再由 CO_2 贮存间(16)的出口排出救生舱。液体 CO_2 经前置回热器(3)回收冷量后分别经第一恒压阀(4)和第二恒压阀(7)两次节流降温,达到蒸发器不结霜和冷量前置回收的目的。CO_2 储液罐(1)设置在 CO_2 贮存间(16)内部,通过排出的较低温度的 CO_2 气体对贮存间(16)进行降温,以提高储存于储液罐(1)内液态 CO_2 总的制冷能力。

为了保证蒸发器(6)和回热器(3)内 CO_2 气体运行安全可靠,在蒸发器(6)的出口和回热器(3)气态 CO_2 侧出口分别设置有第一安全阀(9)和第二安全阀(11),第一安全阀(9)与第二恒压阀(7)并联,第二安全阀(11)与电磁阀(10)、温度分级控制阀组(12)、气动风扇(13)并联。当第二恒压阀(7)操作不当、调节失灵或出现故障时,会引起蒸发器(6)压力过高;当电磁阀(10)或温度分级控制阀组(12)或气动风扇(13)操作不当、调节失灵或出现故障时,会引起回热器(3)压力过高。为避免这些现象的发生,当蒸发器(6)内压力超出设定值时,第一安全阀(9)自动开启,进行泄压;当回热器(3)内压力超过设定的许可值时,第二安全阀(11)自动开启,进行泄压。

第一恒压阀(4)与蒸发器(6)之间设有第一压力表(5),第二恒压阀(7)与回热器(3)之间设有第二压力表(8),分别用于观察第一恒压阀(4)和第二恒压阀(7)出口处的系统压力。

2.2.3 系统运行的各状态点及其热力参数

图 2(b)[12]为改进后的无霜降温除湿系统运行流程的压—焓图。系统各状态点的位置如图 2(a)中各字母所示,并与图 2(b)中字母相对应。其中:A:CO_2 在储液罐(1)中的状态,为饱和液态;B:CO_2 经回热器(3)中过冷后的状态,为液态;C:CO_2 经第一恒压阀(4)节流后的状态,为气液两相;D:CO_2 经过蒸发器(6)换热后出口的状态,为气态;E:CO_2 经第二恒压阀(7)节流后的状态,为气态;F:CO_2 经回热器(3)中过热后的状态,为气态;G:CO_2 经电磁阀(10)和温度分级控制阀组(12),并驱动气动风扇(13)后的状态,为气态。

下面计算各状态点的参数,使用的软件为 Refprop,Refprop 是由美国技术研究院开发,提供了碳氢

化合物制冷剂以及其混合物热力学性质相关物性。

运用 Refprop 软件可以提供两种计算状态参数的方法，一种是“Saturation points (at equilibrium)”，即平衡时的饱和状态点，主要用于气液两相区的状态参数计算。此时只需提供物质的任一状态参数(温度、压力、饱和液体/气体的焓熵值、密度等)，就可计算出该状态下物质的其他参数。另一种是“Specified state points”，即指定状态点，用于非饱和状态的单相区的状态参数计算。此时至少需要提供二种状态参数(温度、压力、焓、熵、密度等)才可确定该物质的状态点及其他参数。

现已知条件如下：CO_2 储存温度为 25℃，且为饱和液体；为防止蒸发器表面结霜，根据经验设定蒸发器入口(即点 C)温度为 −5℃，蒸发器出口(即点 D)温度为 20℃；回热器为逆流，根据经验取 A 点与 F 点处换热温差为 5℃；根据选用的气动风扇进口压力要求，确定 F 点压力为 0.3MPa；G 点压力为大气压。

即可确定：t_A, t_C, t_D, Δt_{A-F}, $p_F = p_E$, p_G 等参数值。因此，可得 t_F。由 p_F、t_F，运用 Refprop 软件，算得 F 点参数(压力、焓、密度及比容等)。由 t_A，运用 Refprop 软件，算得饱和状态 A 点参数。由 t_D，运用 Refprop 软件，算得 p_C、p_D，进而算得 D 点参数。由 h_D 得 $h_E = h_D$ 及 p_E，运用 Refprop 软件，算得 E 点参数。

根据回热器中换热的能量守恒，由 h_E、h_F、h_A 得 $h_B = h_C = h_A - (h_F - h_E)$，运用 Refprop 软件，算得 B 点、C 点参数。由 $h_G = h_F$、p_G，运用 Refprop 软件，算得 G 点参数。综上，所有状态点热力参数全部计算完成，汇总于表 1。

表 1 改进后的无霜降温除湿系统的各状态点参数

Tab. 1 State point parameters of the improved frostless cooling and dehumidifying system

状态参数点	温度 t/℃	压力 p/MPa	密度 ρ/(kg/m^3)	比容 v/(m^3/kg)	焓 h/(kJ/kg)
A	25	6.434	710.5	1.41×10^{-3}	274.78
B	17.26	6.434	825.3	1.21×10^{-3}	242.94
C	−5	3.046	286.1	3.50×10^{-2}	242.94
D	20	3.046	67.44	1.48×10^{-2}	467.82
E	−17.56	0.300	6.374	1.57×10^{-1}	467.82
F	20	0.300	5.504	1.82×10^{-1}	499.66
G	17.69	0.100	1.830	0.547	499.66

2.2.4 改进前后的系统各状态点参数对比分析

通过对比本文表 1 及文献[10]中表 1，即对比改进前后的降温除湿系统的各状态点参数，不难得出，改进前后的降温除湿系统中：

1)改进后的过冷量：

$\Delta q = h_A - h_B = 274.78 - 242.94 = 31.84$kJ/kg

改进前的过冷量：

$\Delta q' = h_1 - h_2 = 274.1 - 263.4 = 10.7$kJ/kg

因此改进后的系统使 CO_2 高压液体的冷量可以得到充分的前置回收。

2)蒸发器内 CO_2 在蒸发过程中由气液两相状态点 C 相变到过热气体状态点 D，可得单位质量制冷量：

$q = h_D - h_A = 467.82 - 242.94 = 224.88$kJ/kg

与改进前的单位质量制冷量：

$q' = h_D - h_A = 486.7 - 263.4 = 223.3$kJ/kg

相比较，略有提高。

3)蒸发压力由改进前的 0.7MPa 提高到了 3.0MPa，蒸发器内制冷剂温度变化范围由改进前的 −49.4～10℃提高到了 −5～20℃，因此可确保蒸发器外表面温度接近 0℃，即保证了总制冷量，又避免了结霜的。

4)气动风机的驱动压力由改进前的 0.7MPa 降为 0.3MPa，满足气动风机的最低驱动压力。由于气动风机出口处压力都为 0.1MPa，因此改进后的系统减小了气动风扇两端压差，可以减少气体泄漏，使得气动风机的运行更加稳定。

3 降温除湿系统的可行性分析

3.1 无霜改进的可行性分析

无电自驱式 CO_2 降温除湿系统基本原理是利用高压液态 CO_2 在特定的系统中节流，使液体在低压下吸收被冷却物理的热量而蒸发产生制冷效应。

根据 CO_2 的物理性质，其三相点为 −56.55℃、0.517MPa，临界点为 31℃、7.37MPa。即温度低于 −56.55℃、压力低于 0.517MPa 时，CO_2 以固态形式

存在;而温度高于 31℃、压力高于 7.37MPa 时,分不出 CO_2 的气液两相。因此 CO_2 在蒸发前的一次节流最低只能达到 0.517MPa。由于在一定压力和温度(25℃、6.434MPa)下的饱和液态 CO_2 节流至低压下所能吸收的热量(即产冷量)是一定的,节流前后压差越大,节流所带来的不可逆损失也就越多。并且,一次性节流所能得到的 CO_2 温度相当低,如 0.7MPa 压力下即可达 -49.4℃[10],容易使蒸发器外表面严重结霜,影响的系统运行的可靠性。因此,采用一次节流的系统无论从能量利用率角度还是在系统安全稳定运行方面都是存在较大缺陷的。

改进后的无霜降温除湿系统完成了两次节流一次热回收,较好地弥补了这些缺陷。具体原理如下:

1)第一次节流:预设第一恒压阀,控制一次节流后的液态 CO_2 压力为 3.05 ±0.05MPa,即控制了蒸发器的蒸发压力和蒸发温度,使 CO_2 液体在相变时温度为 -5℃,由于存在一定的传热温差,因而蒸发器外表面温度可接近 0℃,从而避免了结霜的发生。

此外,为保证对舱内的降温效果,即 CO_2 与空气侧的换热效果,蒸发器出口温度不易太高,因此设定为 20℃。此时若直接利用蒸发器出来的 CO_2 气体驱动气动风扇,1)会导致气动风扇两端压差过大,容易造成气体泄漏;2)温度 20℃压力 3.0MPa 的 CO_2 通过气动风扇节流之后温度会降低至 0 度以下,如节流到 0.30MPa 温度可降低到 -17.56℃,亦会造成气动风扇处结霜;3)此低温 CO_2 气体尚有较多冷量没有利用,若直接排出系统损失较大。因此,需在蒸发器之后设置第二恒压阀进行二次节流,节流后设置回热器对 CO_2 进行冷量回收。

2)第二次节流:预设第二恒压阀,控制二次节流后的 CO_2 压力为 0.30 ±0.05MPa。0.30MPa 为驱动气动风扇所需的最低有效压力,为保证气动风扇的正常有效运行,二次节流后的 CO_2 压力不能低于此值。

3)一次热回收:二次节流到 0.30MPa 后,温度可达到 -17.56℃。设置回热器,气态 CO_2 在回热器中对储液罐出来的液态 CO_2 进行过冷,实现冷量前置回收,使节流后 CO_2 的冷量得以充分回收。根据表 1 数据可得,设置回热器后可使系统的单位质量制冷量增加了:

$$\Delta q = h_F - h_E = 499.66 - 467.82 = 31.84\text{kJ/kg}。$$

与无回热器相比,提高了:

$$\frac{\Delta q}{h_D - h_C} = \frac{31.84}{(467.82 - 242.94)} \times 100\% = 14.16\%。$$

CO_2 驱动的系统不存在外界传递能量或者做功,因此 CO_2 在系统中能释放的最大单位质量制冷量应为储存点 CO_2 的焓值与最终排出系统的 CO_2 的焓值之差,即 $q_{max} = h_{储存} - h_{排出}$。设定 CO_2 储存于常温 25℃和压力 6.434MPa 下,排出系统时其温度为常温 25℃、常压 0.1MPa。运用 Refprop 软件计算出两点的焓值列于表 2。

表 2 CO_2 在储存点与排出点的参数

Tab. 2 CO_2 parameters at storage point and discharge point

状态点	温度 t/℃	压力 p/MPa	焓 h/(kJ/kg)
储存点	25	6.434	274.78
排出点	25	0.1	505.85

因此,得:

$$q_{max} = h_{储存} - h_{排出} = 505.85 - 274.78 = 231.07\text{kJ/kg}$$

与改进后的系统相比,利用率可达:

$$\theta = \frac{q_{max} - q}{q_{max}} = \frac{224.88}{231.07} \times 100\% = 97.32\%。$$

因此,此无霜降温除湿系统从根本上避免了制冷系统普遍存在的结霜问题,两次节流一次回热不仅控制了降温除湿系统的制冷温度,避免了结霜现象的发生,而且使得液态 CO_2 的冷量完全加以利用,利用率接近 100%,从而使得系统得以稳定高效运行。

3.2 系统负荷的控制调节

改进后的降温除湿系统可以根据救生舱的舱内负荷进行控制调节,控制调节的实现通过第一恒压阀、第二恒压阀、温度分级控制阀组及电磁阀来完成,主要有以下三种方法:

1)恒压阀。

利用第一恒压阀控制蒸发压力以保证蒸发器表面不结霜。当救生舱内负荷变化后,蒸发器中的液态 CO_2 气化量会发生相应的变化,第一恒压阀可根据蒸发压力的高低自动调节其开度,当压力升高时,阀的开度自动减小,反之自动增大,从而通过自动恒定其出口处的压力来调节进入蒸发器的供液量。

2)温度分级控制阀组。

系统还可以通过温度分级控制阀组进行人工多级调节。被困人员可根据救生舱内的温度或者人数来调节温度分级控制阀组,如:系统按救生舱满额 12 人设计,当舱内负荷较小,例如人数不足满额人数的 1/3 时,只需开启温度分级控制阀组中的一个。随着负荷或人数的增加,可逐级开启另两个控制阀;反之则可逐级按照开启逆顺序关闭。通过调节温度分级控制阀组控制系统中 CO_2 的流量以及气动风机的转速。当调节温度分级控制阀组动作后,通过第一恒压

阀与第二恒压阀的连锁控制,使温度分级控制阀组前压力恒定,同时,随着温度分级控制阀组逐个开启,阀后压力升高,致使流经气动风扇的 CO_2 流量增大,其转速提高、风量增大。最终,蒸发器中 CO_2 流量的增大以及气动风扇风量的增大,使得蒸发器蒸发量增大,从而增大制冷量。

3) 电磁阀。

电磁阀用于控制系统的停开机。当系统处于定负荷运行时,救生舱内温度一旦达到预设温度时,电磁阀即关闭,使系统停止运行以阻止温度的继续下降;反之当舱内温度升高到预设值时,电磁阀恢复开启,系统重新开始运行。

通过上述三种控制调节方法的共同作用,能够使降温除湿系统在舱内的实际应用方便可靠,并满足各种实际需要。为舱内人员提供了较舒适的生存环境的同时,还可使制冷剂 CO_2 得到最充分利用,最大限度地延长系统有效运行时间,最终达到延长被困人员生存时间的目的。

4 结论

无电自驱式矿用救生舱为矿难发生后井下被困的人员提供了必要的生存条件。针对现有救生舱的降温除湿系统易出现结霜的问题,提出并介绍了一种降温除湿系统的无霜改进的新思路,同时还阐述了一种运用温度分级控制阀组的控制方法。经过对此系统的理论分析与计算,得出以下结论:

1)采用了两次节流一次热回收改进流程后,两次节流可以使系统蒸发器压力提高,同时控制其蒸发温度,可以有效地避免蒸发器表面结霜;

2)采用了两次节流一次热回收流程,不仅可以避免蒸发器表面结霜,同时 CO_2 的冷量可在回热器中实现冷量前置回收,不削弱 CO_2 的制冷能力;

3)采用温度分级控制阀组可方便有效地对舱内负荷与温度进行控制调节,能够最大限度地延长系统有效运行时间。

4)上述推断仅为理论分析,其真实效果有待于实验进一步证实。

参考文献

[1] 高广伟,张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 162-164. (Gao Guangwei, Zhang Luhua. Design principles of movable coal mine refuge chamber[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 162-164.)

[2] Draeger Werk Ag. Modular Protection Chamber for use underground, Germany: DE3839267 (A1) [P]. 1990-05-23.

[3] 汪声,金龙哲,栗婧. 国外矿用应急救生舱技术现状[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 119-123. (Wang Sheng, Jin Longzhe, Li Jing. The present statns of overseas mine emergency refuge chamber technology[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(4): 119-123.)

[4] Fasouletos A M. Parametric Design of a Coal Mine Refuge Chamber [D]. Morgantown: West Virginia University, 2007.

[5] 艾长波. 矿用救生舱国内外发展概况[J]. 舰船防化, 2010(6): 5-8. (Ai Changbo. Research and Application Status of Mine Refuge Chamber in China and Abroad[J]. Chemical Defence On Ships, 2010(6): 5-8.)

[6] 高伟. 生命之舟—中国"矿用可移动式救生舱"研发之路[DB/OL]. http://www.sxcsky.com/nshow.asp? thex=92&Cla=2&Ncla=0&clink=news.asp#. http://www.sxcsky.com/nshow.asp? thex=92&Cla=2.

[7] 王扬,杨跃彬,时达. 中平能化"煤神"牌救生舱通过行业鉴定 整体技术达到国际先进水平[J]. 决策探索(下半月), 2011(3): 77. (Wang Yang, Yang Yuebin, Shi Da. The "Meishen" refuge chamber in Zhongping Nenghua is identified through industry, overall technology reach the international advanced level[J]. Policy Research & Exploration(Second Half), 2011(3): 77.)

[8] 匿名. 中煤联合美企打造煤矿救生舱[J]. 矿山机械, 2011, 39(3): 144. (Anonymous. China National Coal Group Corp. build coal mine rescue capsule with US enterprises[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(3): 144.)

[9] 周峰. 国内首台矿用全防型救生舱在新矿下线[J]. 煤矿机械, 2011(5): 17. (Zhou Feng. China's first whole anti-type mine refuge chamber in the new mines offline[J]. Coal Mine Machinery, 2011(5): 17.)

[10] 孙长建,杜垲,周荣辉,等. 基于 CO_2 制冷的救生舱可行性分析[C]//江苏省暖通空调制冷学术年会专刊, 2011.

[11] 杜垲,周荣辉,李彦军,等. 一种空气冷却除湿与净化系统及方法: 中国, 201010589804.1[P]. 2011-04-13.

[12] 杜垲,周荣辉,孙长建,等. 一种无霜空气降温除湿系统及其方法: 中国, 201110277562.7[P]. 2012-03-28.

通信作者简介

杜垲, 男(1955 -), 教授, 博士生导师, 东南大学, 13951895617, E-mail: du-kai@seu.edu.cn。研究方向: 制冷与空调技术。

About the corresponding author

Du Kai(1955 -), male, Professor, doctoral supervisor, Southeast University, 13951895617, E-mail: du-kai@seu.edu.cn. Research fields: The technology of refrigeration and air-condition.