矿用 CO_2 开放式制冷仿真系统设计与优化

曹 利 波[1,2]

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院,重庆 400039;2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆 400037)

摘 要: 针对 CO_2 开放式制冷在避难硐室、救生舱等有限密闭空间中应用的重要性,利用 FLOWMASTER 热流体计算仿真软件,设计了一种用于有限密闭空间的 CO_2 开放式制冷仿真系统,在满足设计制冷量和气动风机进出口压降、温降的条件下,对蒸发器管长进行优化,获得了最佳蒸发器长度,同时对非设计工况下的制冷系统特性及不同制冷量进行校核,并对该制冷仿真系统进行了试验验证,仿真值与试验值吻合良好,验证了系统仿真的准确性和精确性。

关键词: CO_2 开放式制冷; 有限密闭空间; 热流体系统; 紧急避险; 避难硐室

中图分类号: TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2013)03-0096-04

Design and Optimization on Simulation System of Mine CO_2 Open Loop Cycle Refrigeration

CAO Li-bo[1,2]

(1. *Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corporation, Chongqing* 400039, *China*;
2. *National Key Lab of Gas Disaster Control and Emergency Technology, Chongqing* 400037, *China*)

Abstract: According to the importance of the CO_2 open loop cycle refrigeration applied to the rescue cabin, the refuge chamber and other limited airtight space, the FLOWMASTER simulation software of the thermal fluid system was applied to design the simulation system of the CO_2 open loop cycle refrigeration applied to a limited airtight space. Under the conditions to meet the designed refrigeration value and the pressure drop and temperature drop at the inlet and outlet of the pneumatic blower, the tube length of the evaporator was optimized and the optimum length of the evaporator was obtained. Meanwhile the refrigeration system features and the different refrigeration value under the non designed performances were checked. The test certification was conducted on the refrigeration simulation system. The simulated value and the test value were well fitted and the simulation accuracy and precision of the system were verified.

Key words: CO_2 open loop cycle refrigeration; limited airtight space; thermal fluid system; emergency; refuge chamber

0 引 言

紧急避险系统中的煤矿救生舱和避难硐室主要包括安全防护结构、喷淋气幕系统、通信监测系统、动力系统、降温除湿系统、空气净化系统等,降温除湿系统是其重要组成和技术核心。鉴于矿井条件限制及安全性的要求,目前主要采用的制冷方式有相变制冷和绝热放气2种。相变制冷是指利用相变材料相变吸收潜热进行制冷,救生舱主要采用冰蓄冷,具有安全性高、系统简单、容易实现等优点,但由于其平时需要辅助设备进行蓄冷,存在维护费用高、能耗高、经济性差等缺点。绝热放气制冷是指利用气体绝热膨胀降温的制冷方式,平时存放不需要辅助设备维护,具有经济好、可靠性高等突出优点。二氧化碳无毒、无臭、无污染、不爆、不燃、无腐蚀,加之二氧化碳的蒸发压力较高,蒸发后的气体可以驱动气动马达以带动通风机,是对电源使用有严格限制的救生舱降温除湿系统的理想工质。FLOWMASTER作为先进的热流体计算仿真软件,由各种空气调节器、控制器、管路等部件按照不同方式连接形成的制冷系统网络模型,可实现系统性能的分析与优化。笔者搭建一种 CO_2 开放式制冷系统仿真模型,开展了系统设计、蒸发器管长优化及工况与制冷量的校核等工作,并进行了试验验证,对小型密闭空间制冷

收稿日期: 2012-08-10; **责任编辑:** 赵 瑞

作者简介: 曹利波(1979—),男,吉林农安人,工程师,硕士。Tel: 023-65239439, E-mail: caolibo20080828@163.com

引用格式: 曹利波. 矿用 CO_2 开放式制冷仿真系统设计与优化[J]. 煤炭科学技术,2013,41(3):96-99.

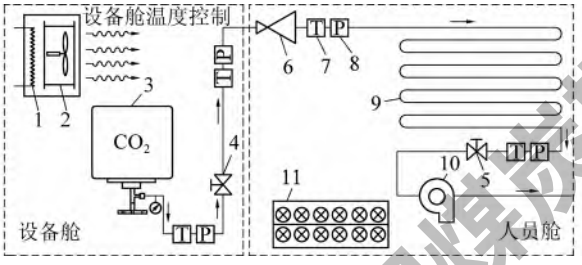
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

系统的研究与实施具有一定的参考意义。

1　CO_2 开放式制冷仿真系统

1.1　系统工作原理

CO_2 开放式制冷仿真系统工作原理如图 1 所示,图中箭头表示 CO_2 流动方向。高压 CO_2 储罐倒立放置,液态 CO_2 从储罐出口流经节流装置,引起温度和压力的降低,低温低压 CO_2 进入蒸发器,在气动风机的带动下和舱内空气换热,使得舱内空气温度降低实现制冷,吸收舱内气体热量后气化的 CO_2 气体则用于驱动气动风机,然后排出舱外。CO_2 临界温度为 31.1 ℃,根据 CO_2 的存储环境不同,CO_2 开放式制冷可分为亚临界、临界和超临界制冷,笔者对 CO_2 存储温度分别为 25、30 和 35 ℃三种典型工况的制冷性能进行研究与对比,得出不同工况下的 CO_2 压焓(图 2)。



1—空调器; 2—离心通风机; 3—CO_2 储罐; 4、5—手动调节阀; 6—节流装置; 7—温度传感器; 8—压力变送器; 9—蒸发器; 10—气动马达; 11—负荷模拟装置

图 1　CO_2 开放式制冷仿真系统工作原理

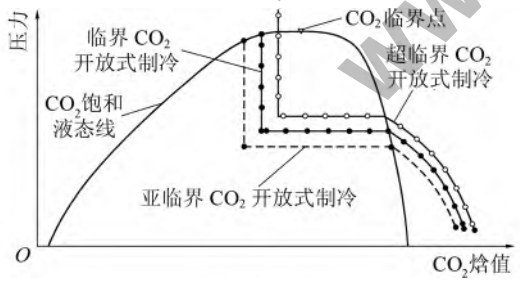
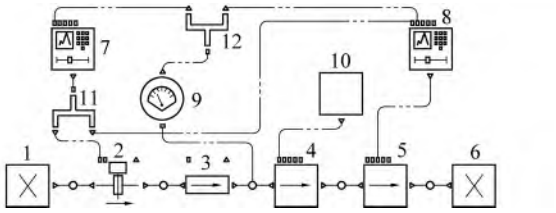


图 2　不同工况下的 CO_2 压焓示意

1.2　系统设计、优化与校核

1.2.1　系统仿真模型建立

利用 FLOWMASTER 建立如图 3 所示的 CO_2 开放式制冷系统仿真模型,部件 1—6 为软件模拟部件,其中部件 1 和 6 用于模拟 CO_2 气瓶高压供气及 CO_2 在 1 个大气压环境下的自由出气,提供 CO_2 流和终止 CO_2 流。通过部件 2 和 3 进行温降压降、吸收热量,部件 4 和 5 用于模拟气动马达的温降、压降部件。



1—上游压力源; 2—节流装置; 3—蒸发器; 4、5、10—通用压力控制器; 6—下游压力源; 7、8—计算器; 9—压力仪表; 11、12—信号分流器

图 3　CO_2 开放式制冷系统仿真模型

1) 制冷量计算。图 3 中的仪表、信号分流器、计算器构成了 CO_2 开放式制冷系统的制冷量控制模块,由仪表采集蒸发器出口温度信号 T,计算器根据温度与焓的关系式(1)可以将蒸发器出口温度转化为焓值 h,进一步通过式(2)可以得出蒸发器中的 CO_2 质量流量 M_{CO_2},即

$$h = h_0 + c_p(T - 25 - 273.15) \quad (1)$$

$$M_{CO_2} = W/(h - h_{in}) \quad (2)$$

其中: h_0 为 25 ℃气态 CO_2 焓,取 500.22 kJ/kg; c_p 为 CO_2 的定压比热容,取 0.895 kJ/(kg·K); W 为制冷量,取 1.2 kW; h_{in} 为蒸发器入口 CO_2 压焓,kJ/kg。计算器编入式(2),通过蒸发器出口温度控制 CO_2 质量流量,即可控制 CO_2 开放式制冷系统的制冷量为 1.2 kW。

2) 在 CO_2 开放式制冷系统中,利用气动马达带动通风机抽风增强蒸发器换热。气动马达压降与温降间的关系由通用压力控制器、计算器、信号分流器及仪表来完成,部件 4 控制马达进出口压降为 0.5 MPa,马达出口温度,即 CO_2 气体出口温度 T_o 为

$$T_o = T_i\{1 - \eta_t[1 - (p_o/p_i)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}]\} \quad (3)$$

马达的输出功率 P_c 为

$$P_c = M_{CO_2}c_p(T_i - T_o) \quad (4)$$

式中: T_i 为马达进口温度,由图 3 中采集; η_t 为马达效率,取 0.4; p_i、p_o 分别为马达进出口压力; κ 为绝热指数,取 1.288; M_{CO_2} 由计算器输出。

计算器根据式(3)、式(4)即可计算出马达的进出口温差和马达的输出功率。

1.2.2　系统设计与优化

系统设计要求如下: ①CO_2 属于高压液化气体,根据矿用救生舱的实际工作条件,气瓶充装系数为 0.6 kg/L 时,CO_2 温度 30 ℃、压力 7.2 MPa 为系统设计工况,25 ℃、6.42 MPa 和 35 ℃、8.08 MPa 为系

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

统校核工况。②在没有外部电源及材料供给的状态下，其舱内温度始终不得高于 35 ℃。③笔者研究的救生舱(额定 8 人)要求其制冷能力不低于 1.2 kW，气动马达前的压力应为 0.5 ~ 1.0 MPa。

CO_2 流经蒸发器进行热量交换时，管长越长，换热面积越大，蒸发器换热效率和对 CO_2 制冷量的利用率也随之改变，然而管长增加的同时也增加了蒸发器的流阻，因此，需要对蒸发器管长进行合理优化。CO_2 开放式制冷系统的蒸发器，由外径 10 mm、内径 6 mm 的铜管盘成，其排气驱动气动马达，带动舱内空气形成强迫对流，与自然对流换热相比，具有传热效果好、结构紧凑等优点。图 4、图 5 给出了 CO_2 存储温度 30 ℃、压力 7.20 MPa 的设计工况，蒸发器长度从 42 m 增加到 70 m 时，每隔 2 m 计算其出口温度和流量变化情况。

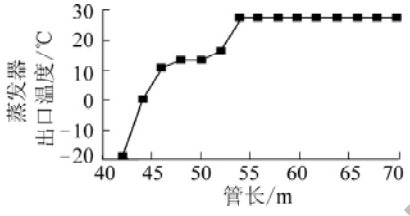


图 4　蒸发器出口温度随管长的变化曲线

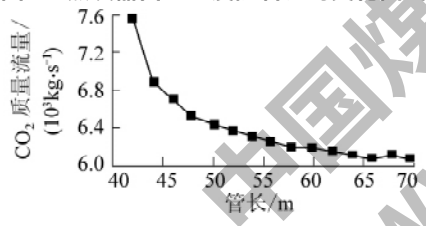


图 5　CO_2 质量流量随管长的变化曲线

由图 4 可知，蒸发器出口温度随着管长的增加而升高，当管长 54 m 时，蒸发器出口温度升至 27.35 ℃且维持不变，该温度接近舱内环境温度，说明 CO_2 制冷剂的冷量已充分利用，继续增加管长对于制冷能力没有改善。由图 5 可知，CO_2 质量流量在管长大于 54 m 时也大约保持在 6.2×10^3 kg/s，这是因为气液混合态的 CO_2 在蒸发器进行热量交换时，其流量主要集中在含有液态 CO_2 流的蒸发器前部，有制冷效果，蒸发器后部全为气态 CO_2 流，并无换热效果。综合考虑管长对于蒸发器出口温度与 CO_2 质量流量的影响，选择 54 m 作为本模型的最佳蒸发器管长，考虑 1.2 的安全系数，则管长为 65 m。

1.2.3　系统校核

1) 工况校核。避难硐室、救生舱等密闭空间的外部环境温度会受到气候和地域的影响，因而需要考察不同工况下的制冷系统性能。选择不同温度和压力的 3 种设计工况校核 CO_2 开放式制冷仿真系统的性能参数是否满足设计要求，经 FLOWMASTER 软件计算得到的结果见表 1。

表 1　FLOWMASTER 计算结果

工况	温度/℃	压力/MPa	蒸发器管长/m	蒸发器出口温度/℃
1	30	7.20	65	27.35
2	25	6.42	59	27.35
3	35	8.08	76	27.35

图 6 显示工况 2 和工况 3 的蒸发器内 CO_2 温度随管长的变化曲线与工况 1 曲线变化趋势基本相同，蒸发器前部的 CO_2 是气液混合态，CO_2 温度会随着管内压力的降低而降低；而蒸发器后部则全为气态 CO_2，气态 CO_2 温度由于吸收环境热量而升高，蒸发器的出口温度接近环境温度。

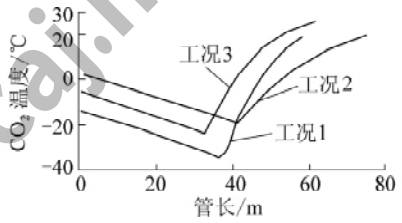


图 6　3 种工况下蒸发器内 CO_2 温度随管长的变化曲线

2) 制冷量校核。对于矿用避难硐室救生舱，制冷量的大小是制冷性能好坏的关键指标。因此，校核制冷量对该制冷系统至关重要。笔者以 CO_2 开放式制冷作为救生舱的制冷方式，其结构热负荷为 336 W，人均热负荷为 108 W，对于最多容纳 8 人的舱体，制冷系统总负荷(结构热负荷与人员热负荷之和)为 1.2 kW，当舱内容纳人数发生变化时，需要校核该系统的制冷性能是否满足设计要求。

CO_2 作为气动马达的工作介质，其压力能可转化为带动通风机的机械能，舱内空气在通风机扰动作用下能更好地与蒸发器进行换热。在不同制冷量的情况下，CO_2 流量不同，引起的通风机风量 Q 不同，马达所需功率 N 也就不同，Q 和 N 可通过以下公式计算：$Q = W/(c_a \Delta t \rho_a)$，$N = KPQ/(\eta\eta_m)$，$P = P_s + P_d = 0.07LV^{1.7}/d + bV^{1.7} + \rho_a V^2/2$，$V = Q/A = Q/e^2$，其中：$c_a$ 为空气定压比热容，取 1.005 kJ/(kg·K)；Δt 为通风机进出口温差，K；ρ_a 为空气密度，取 1.205 kg/m^3；K 为马达安全系数，取 1.2；P 为全压；η 为全压效率，取 0.4；η_m 为机械效率，取 0.3；A 为

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

通风机出口面积,m^2; e 为通风机出口边长,m; P_s、P_d 为静压和动压,Pa; L 为蒸发器管长,m; V 为空气流速,m/s; d 为蒸发器铜管直径,m; b 为系数,取 10。

CO_2 开放式制冷仿真系统在 30 ℃、7.2 MPa 工况下,由式(1)和式(2)控制舱体容纳 1 ~ 12 人的制冷量,由式(3)和式(4)计算各制冷量下的模拟马达功率,并与上述计算得到的马达所需功率进行对比(图 7)。

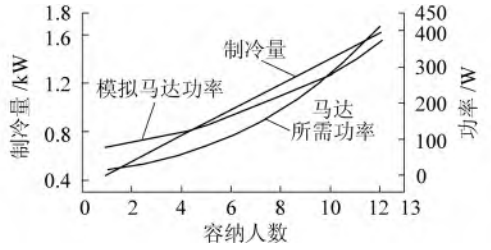


图 7　舱体不同容纳人数时所需功率与模拟马达功率对比

由图 7 可知,当容纳人数不多于 10 人时,FLOWMASTER 计算的模拟马达功率始终大于满足对应制冷量所需的马达功率,这符合安全系数为 1.2 的设计,即完成了该系统的制冷量校核。

2　试验验证

在 22 ℃、6.34 MPa 的工况下,将 CO_2 开放式制冷仿真系统计算求得的 CO_2 质量流量等参数,与等仿真值在相同工况和设计条件下的试验值进行对比,结果见表 2。

表 2　FLOWMASTER 仿真值与试验值的对比

参数	仿真值	试验值	仿真值/试验值
CO_2 质量流量/(10^3 kg·s^{-1})	5.42	4.99	1.01
节流装置进出口温降/℃	25.74	23.44	1.01
节流装置进出口压降/MPa	2.98	2.60	1.15
蒸发器进出口温降/℃	28.69	25.01	1.15
蒸发器进出口压降/MPa	2.85	3.27	0.87

由表 2 可知,基于 FLOWMASTER 计算得到的仿真值与试验值的比例约为 1,试验过程中蒸发器由多排铜管制成,局部流阻的影响较大,使得其压降略大于模型中计算的蒸发器进出口压降,但仍在合理范围之内,试验结果证明了系统仿真的准确性。

3　结　　论

1) 高压液化气体 CO_2 在充装系数 0.6 kg/L、温度 30 ℃、压力 7.2 MPa 等不同的设计工况下,通过 FLOWMASTER 建立仿真模型,设定 CO_2 制冷量的同时,控制由 CO_2 驱动的气动马达压力在一定范围内,对于 CO_2 开放式制冷系统的设计研究具有一定的参考价值。

2) 在对系统蒸发器管长进行优化时,CO_2 出口温度随着管长的增大先下降后升高,这是由于 CO_2 在管内首先处于蒸发降温阶段,完全蒸发后不断吸热升温,以 30 ℃、7.2 MPa 的设计工况为例,当管长达到 65 m 时,其出口温度接近环境温度且 CO_2 质量流量也趋于稳定,表明 65 m 可作为本模型最佳的蒸发器管长。

3) 在对系统工况和制冷量进行校核时,30 ℃、7.2 MPa 设计工况下的制冷系统满足设计要求,当舱体容纳人数为 10 人以下时,其模拟马达功率大于对应制冷量所需的马达功率,均满足设计要求。

4) 以 25 ℃、6.34 MPa 工况为例,将此模型的仿真值与救生舱的 CO_2 开放式制冷试验在相同设计参数下进行 CO_2 质量流量,节流装置进出口温降、压降以及蒸发器进出口温降、压降比较,结果显示二者比值约为 1,验证了此模型的正确性及精确性。

5) CO_2 高压驱动气动风机可减少避险设备对电力的依赖性,工作性能更加优越; 由于 CO_2 在不同储存温度下的制冷性能不同,故此,在高温矿井需要对其进行降温维护,气瓶的防泄漏措施至关重要。

参考文献:

[1] 张云峰,窦明泰,张　宇,等. 基于 Matlab 的 CO_2 制冷系统的仿真设计与研究[C]//中国制冷学会 2007 学术年会论文集,上海 [出版者不详],2007:731 - 738.

[2] 张　敏,李　涛,王焕强,等. 密闭空间的职业病危害与控制技术[J]. 工业卫生与职业病,2005(1):5 - 8.

[3] 史　敏,贾　磊,钟　瑜,等. 二氧化碳制冷技术[J]. 制冷与空调,2007,7(6):1 - 5.

[4] 李丽霞,姬长发,赵文秀. CO_2 制冷系统的技术进展[J]. 能源技术,2008(7):30 - 34.

[5] 陈海松,张锡中,孙永盛,等. 基于 FLOWMASTER 的工程机械热平衡仿真分析[J]. 矿山机械,2007,35(6):118 - 121.

[6] 刘安全,李　义. 一种矿用救生舱应急制冷系统: 中国,200920110630.9[P]. 2009 - 08 - 05.

[7] TAO Y B,HE Y L,TAO W Q,*et al*. Experimental Study on the Performance of CO_2 Residential Air - Conditioning System with an Internal Heat Exchanger[J]. Energy Conversion and Management,2010,51(1):64 - 70.

[8] 张光鹏,许　诺,张武平. FLOWMASTER 在暖通空调中的应用[J]. 制冷与空调,2006,20(3):34 - 36.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net