

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-303-05

# 带热回收的氨制冷雪橇雪道制冰系统的性能分析

邵月月<sup>1</sup> 许树学<sup>1</sup> 孙育英<sup>1</sup> 全贞花<sup>1</sup> 孙向辉<sup>2</sup> 王伟<sup>1</sup> 马国远<sup>1</sup>

(1.北京工业大学 北京 100124; 2.北京北控京奥建设有限公司 北京 100124)

**【摘要】** 针对 2022 年北京冬奥会延庆地区的雪橇雪道氨制冷循环进行性能分析。研究单独制冷、制冷+热泵辅助热回收两种循环方式的运行性能。研究表明,在单独制冷模式下,随着冷凝温度的升高,系统的制冷性能下降;在制冷+热泵辅助热回收模式下,利用回收的热量将冷水预热,当冷凝温度为 30℃ 时,系统综合 COP 可达到 5.46;并且以系统冷凝温度 30℃ 蒸发温度 -18℃ 为例,进行经济性分析,表明回收冷凝热制取生活用水所需的费用仅为热泵直接加热热水的 40%。

**【关键词】** 冬奥会; 制冰; 热泵; 热回收

中图分类号 TB61+5/TB657 文献标识码 A

## Performance Analysis of the Ice-making System with Heat Recovery Via Ammonia Cooling for Sleigh Track

Shao Yueyue<sup>1</sup> Xu Shuxue<sup>1</sup> Sun Yuying<sup>1</sup> Quan Zhenhua<sup>1</sup> Sun Xianghui<sup>2</sup> Wang Wei<sup>1</sup> Ma Guoyuan<sup>1</sup>

(1.Beijing University of Technology, Beijing, 100124; 2.Beijing Beikong Jingao Construction, Beijing, 100124)

**【Abstract】** In this paper, the performance analysis of the refrigeration system of the toboggan runway in the Yanqing area of the Beijing Winter Olympic Games in 2022 is carried out. The operating performance of the system under the two modes of refrigeration, refrigeration and heat pump assisted hot water is studied. The results show that in the single cooling mode, the cooling performance of the system decreases with the increase of the condensing temperature. In the cooling + heat pump auxiliary heat recovery mode, the recovered heat is used to preheat the cold water and when the condensing temperature is 30℃. The system comprehensive COP can reach 5.46; the system condensing temperature 30℃ evaporation temperature -18℃ as an example, economic analysis shows that the cost of recovering condensing heat to prepare domestic water is only 40% of the heat pump directly heating hot water.

**【Keywords】** Winter Olympics; ice making; heat pump; heat recovery

作者简介: 邵月月 (1995-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1310494556@qq.com

通讯作者: 许树学 (1981-), 男, 助理研究员, 硕士生导师, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2019-07-02

## 0 引言

2022 年中国将举办第 24 届奥林匹克冬奥会, 延庆地区作为主要赛区之一, 将建成国家雪车雪橇中心。雪车雪橇赛道全程采用氨直接蒸发制冷系统, 要求赛道冰面厚度达到 50mm, 冰面温度保持 -11℃。在对制冷剂环保性要求不断上升的今天, 氨以其独特的制冷特性和高效能, 不仅是大型工业制冷的

流制冷剂, 近年来更是广泛应用于小型制冷系统中<sup>[1]</sup>。而对于直接蒸发氨制冷系统, 运行中必然会产生一定的冷凝热, 冷凝热直接排出不仅是一种资源浪费, 还会给周边环境带来影响。

目前, 国内外针对冷凝热回收的研究有很多。姜衍礼等<sup>[2]</sup>对空气源热泵系统在洗浴场所应用的冷凝热回收进行了探讨, 分析结果表明空调供冷的同

时回收冷凝热制取洗浴热水，可以减少重复投资，降低综合造价，节约运行费用的效果明显。王一军等<sup>[3]</sup>对双冷凝器热回收方式进行了经济性比较，计算分析表明，采用热回收冷水机组加热生活热水，可以降低生活热水能耗，且对冷水机组的制冷运行影响较小，其经济效益显著，投资回收期短。舒建国等<sup>[4]</sup>提出了基于冷凝热回收的氨高温热泵系统，并对其系统原理、能效计算等方面做了详细介绍，结果表明，该系统可满足 40℃~80℃ 热水需求。刘群生等<sup>[5]</sup>提出了基于双级压缩制取 95℃ 左右高温热水的热回收方案，该方案只需在原有压缩机排气至冷凝器和冷凝器至储液器两处的管路上开口连接即可，非常适合同时有冷、热需求场合，

也可作为新设计的热回收制冷系统参考方案。

本文对雪车雪橇赛道采用的氨直接蒸发制冷系统进行理论循环研究，对单独制冷系统、热泵辅助热回收两种循环方式进行对比分析，为实际氨制冷系统的节能设计、性能评价提供借鉴。

### 1 工作原理

2022 年冬奥会的雪车雪橇赛道将采用氨直接蒸发制冷系统。图 1 所示为冬奥会延庆地区雪橇雪道的氨直接蒸发制冷系统的原理图。

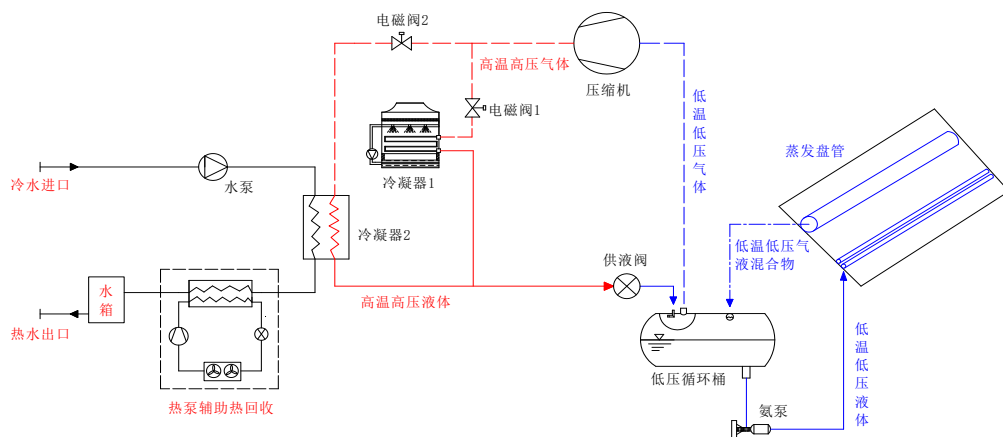


图 1 氨直接蒸发制冷系统循环原理

Fig.1 Ammonia direct evaporation refrigeration system cycle principle

雪橇雪道氨制冷系统由压缩机、冷凝器、节流装置、低压循环桶、氨泵以及蒸发管束组成；冷凝器有 2 台，冷凝器 1 为蒸发式冷凝器，特点首先是冷凝效果好，制冷剂与空气逆向流动提高了传热效率；其次是耗水量小，仅为水冷式冷凝器的 5%~10%<sup>[6]</sup>。冷凝器 2 是水冷式冷凝器，作用是热回收。系统运行时将氨气冷凝过程释放的大量冷凝热提取出来，加热产生出生活热水。

系统工作过程如下：首先，经压缩机压缩的高温高压氨气进入冷凝器冷凝成常温高压氨液，经节流降温降压后进入低压循环桶，氨泵将低温低压的氨液供至赛道下制冷盘管中蒸发制冷，制取并维持雪橇雪道的冰面。汽液两相氨经回汽管回至低压循环桶进行分离，氨气回至压缩机吸气口再次被压缩，氨液再次供至赛道下制冷盘管，如此周而复始循环。

该制冷循环系统有如下两种运行模式：

单独制冷：氨的流动顺序如下，压缩机—电磁阀 1—冷凝器 1—供液阀—低压循环桶—氨泵—蒸发器—低压循环桶—压缩机。

制冷+热泵辅助热回收：压缩机—电磁阀 2—冷凝器 2—供液阀—低压循环桶—氨泵—蒸发器—低压循环桶—压缩机。

### 2 计算条件

雪车雪橇赛道的冰面厚度要求 50mm，冰面温度全天保持在 -11℃。制冷系统的冷凝温度受到环境变化影响较大。查取延庆地区 2017—2018 年冬季室外温度的情况，并以其为例进行氨制冰系统的理论分析，温度分布情况如表 1 所示。

表 1 室外温度情况表

Table 1 Outdoor temperature table

11 月	12 月	1 月	2 月	3 月

平均高温	6.8	1.90	-2	2	12.42
平均温度	0.73	-3.84	-5.21	-4	5.47
平均低温	-5.33	-9.58	-12.42	-10	-1.48

根据表 1 可知, 延庆地区冬季气温总体偏低, 平均低温最低可达到 $-13^{\circ}\text{C}$ , 12 月、1 月、2 月气温较为稳定, 也处于全年最低水平, 日平均温度 $-10^{\circ}\text{C}$ 左右。

氨直接蒸发系统的压缩机选用某品牌  $\text{NH}_3$  用开启式螺杆压缩机, 冬奥会雪橇雪道制冷系统所需冷量较大, 需多台压缩机并联提供冷量, 对单台压缩机的制冷能力也有一定的要求, 以某品牌开启式螺杆压缩机为例进行理论计算。压缩机具体型号如下表 2 所示。压缩机运行点限制范围如图 2 所示。

表 2 压缩机参数表

Table 2 Compressor Parameter Table

型号	转速 r/min	排气量 $\text{m}^3/\text{h}$	重量 kg	最大功率 输入 kW	最大压 力 bar
OSKA95 103-K	2900	1015	660	374.0	19-28

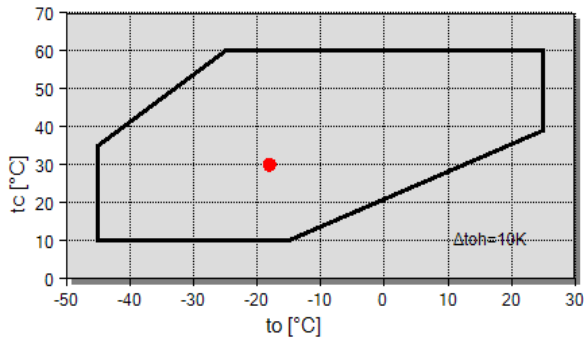


图 2 压缩机运行点限制范围

Fig.2 Compressor operating point limit range

计算过程中选取氨制冷系统的蒸发温度为 $-18^{\circ}\text{C}$ , 再根据图 2 的压缩机运行点限制范围图, 可知当蒸发温度为 $-18^{\circ}\text{C}$ 时, 冷凝温度的范围为 $10\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 计算结果

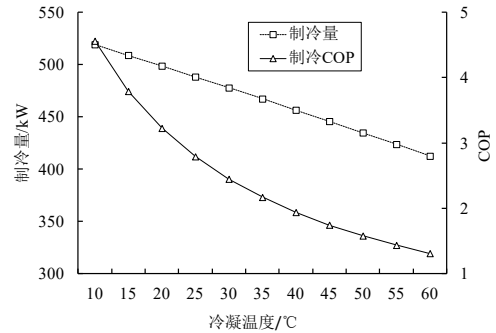
根据雪橇雪道氨制冷系统原理图以及选定计算条件进行相应理论计算, 计算结果如下。

#### 3.1 单独制冷系统

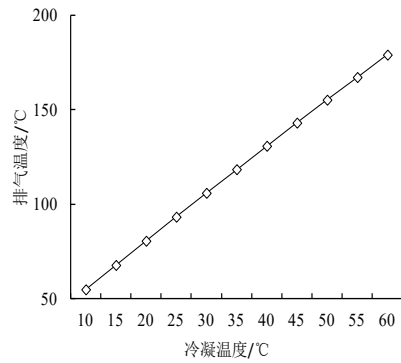
对于系统单独制冷时, 冷凝器 1 运行, 冷凝器 1 为蒸发式冷凝器, 蒸发式冷凝器的冷凝温度随湿球温度变化, 而湿球温度一般比干球温度低 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ ,

也就说明选用蒸发式冷凝器可以选取更低的冷凝温度以降低系统能耗。结合延庆地区室外干球温度, 压缩机运行限制范围对该运行模式进行理论分析。

对于普通蒸发制冷系统, 随着冷凝温度的变化其制冷量、COP 以及排气温度的变化情况如图 3 所示。



(a)



(b)

图 3 系统性能随冷凝温度的变化

Fig.3 System performance changes with different condensing temperature

根据压缩机的运行限制范围, 对系统在冷凝温度为 $10\sim 60^{\circ}\text{C}$ 时的运行性能进行分析。由图 3 (a) 可知, 单独制冷模式下, 制冷量和制冷 COP 均随冷凝温度的增大而减小。冷凝温度为 $10^{\circ}\text{C}$ 时其制冷量可达到 $520\text{kW}$ , 当冷凝温度为 $60^{\circ}\text{C}$ 时制冷量下降到 $412\text{kW}$ , 制冷 COP 从 $4.56$ 下降至 $1.13$ ; 由图 3 (b) 可知, 随着冷凝温度的增大, 排气温度急剧增大, 从 $55^{\circ}\text{C}$ 增长至 $179^{\circ}\text{C}$ 。由此可见, 冷凝温度过高会导致系统制冷量不足, 制冷 COP 过低、排气过热等一系列问题, 因此实际运行时, 特别是在制取冰阶段, 冷凝温度应尽量保持在较低的温度, 以使得整个系统保持在较高的能效水平。

#### 3.2 制冷+热泵辅助热回收系统

延庆地区奥运赛场的附近存在生活区域, 需要

大量的生活用热水。如果单独通过电加热系统来为其提供热水，能源消耗很大。制冰机组经冷凝器放出的热量通过冷却塔排向周围环境，这不仅是对热源的浪费，还会对周围环境带来热污染。

由图 3 可知，若单独用系统的冷凝热来将冷水加热到生活用水的温度，对系统的冷凝温度要求较高，而当系统冷凝温度较高时，整个系统的制冷量得不到保障，且会降低制冷效率。热泵辅助热回收循环可以有效地解决这个问题，即用通过辅助热泵装置，回收氨液的冷凝热，再用热泵对热水进行二次加热，温度达到生活用水所需要的温度。

本计算将生活热水的温度定为 45℃，为保障雪橇雪道系统的制冷量以及能效水平，选定系统蒸发温度为-18℃、冷凝温度为 20℃、25℃、30℃、35℃和 40℃进行制冷+热泵热回收循环的理论计算。计算结果如图 4 所示。

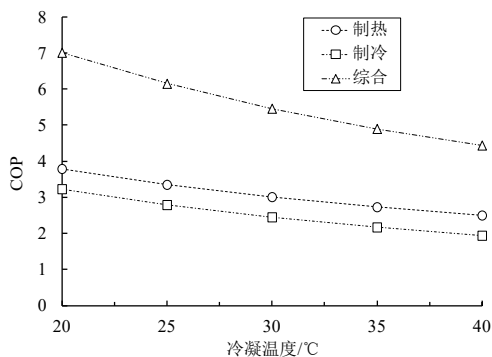


图 4 制冷+热泵热回收系统性能随冷凝温度的变化

Fig.4 Performance of refrigeration + heat pump heat recovery system's variety with different condensing temperature

由图 4 可知，当系统的冷凝温度为 20~40℃时，制冰系统的制冷 COP 随冷凝温度的升高呈现下降趋势，约从 3.23 下降至 1.92。制冰系统产生的冷凝热被热泵回收加热热水后，制冰系统的冷凝温度上升期间，系统的制热 COP 也呈现下降趋势，从 3.79 下降至 2.5。当考虑冷凝热回收时，系统的综合 COP 也呈现下降趋势，当冷凝温度为 20℃时，系统综合 COP 最高，达到 7.0。当冷凝温度为 40℃时系统综合 COP 最低，为 4.44。相比于单独制冷

系统，制冷+热泵热回收模式在冷凝温度为 40℃时的综合 COP 与单独制冷模式时冷凝温度为 10℃时的 COP 相当。

### 3.3 经济性分析

结合冬奥会实际情况，以制冰系统冷凝温度为 30℃，蒸发温度-18℃，最大日热水需求量  $V=100\text{m}^3/\text{天}$ ，北京供暖季自来水温度 5℃，制冰系统水冷换热器出水温度 28℃，热泵热水机组制热量 500kWh，电费 0.5 元/kWh，据此进行经济性分析。

#### 3.3.1 用热泵热水机组直接加热自来水

热泵热水机组所需运行时间计算如下。

热泵热水机组直接加热自来水所需耗热量：

总耗热量=水的比热×每小时（每日）热水总量×（热水出水水温-热水进水水温）

加热生活热水日耗热量：

$$Q_1=cV(t_2-t_1) \quad (1)$$

$$Q_1=4.18 \times 100 \times 1000 \times (45-5)=1.672 \times 10^7 \text{kJ}$$

该部分热量如果全部由热泵热水机组提供，则热泵热水机组的运行时间：

$$T_1=Q_1/3600/Q_h/n \quad (2)$$

$$T_1=1.672 \times 10^7/3600/500/1=9.29\text{h}$$

即热泵热水机组需要持续运行 9.29h 才能满足热水需求。

#### 3.3.2 利用回收冷凝热预热自来水

热泵热水机组所需运行时间计算如下。

热泵热水机组加热来自氨直接蒸发系统的预热水：

根据氨系统中的冷凝温度范围，以预热水为 28℃进行计算。

总耗热量=水的比热×每小时（每日）热水总量×（热水出水水温-热水进水水温）

加热生活热水日耗热量：

$$Q_1=4.18 \times 100 \times 1000 \times (45-28)=7.106 \times 10^6 \text{kJ}$$

则热泵热水机组的运行时间：

$$T_1=7.106 \times 10^6/3600/500/1=3.95\text{h}$$

即热泵热水机组只需连续运行 3.95h 就能满足热水需求。

表 3 两种加热方式在供暖季运行费用对比表

Table 3 Comparison table of two heating methods in the heating season

加热方式	热水机组日运行时间 (h)	日耗电量 (kW)	电费 (元/日)	供冷季 (天)	供冷季运行费用 (万)
直接加热	9.29h	4645	0.5	120	27.87

冷凝热预热	3.95h	1975	0.5	120	11.85
-------	-------	------	-----	-----	-------

根据表 3 我们可以看出, 相比于用热泵热水机组直接加热热水, 利用回收冷凝热预热生活用水可以大量减少热泵热水机组的运行时间, 减少运行费用。在以上设定条件下, 利用回收冷凝热预热生活用水在整个供暖季的费用仅为直接加热热水所花费用的 40%, 这表明合理的系统设计, 实现充分利用氨制冷过程的冷凝余热具有理论的合理性和经济价值。

#### 4 结论

本文对 2022 年冬奥会雪橇雪道用氨直接蒸发冷却系统的理论循环进行了研究, 对单独蒸发制冷、制冷+热泵热回收两种运行模式进行了分析。分析了不同冷凝温度下, 系统制冷量以及 COP 的变化趋势, 同时对系统的热回收经济性进行了讨论, 得到结论如下:

(1) 单独蒸发制冷系统的运行较为简单, 随冷凝温度的上升系统性能下降, 当系统冷凝温度为 10℃时, 系统制冷 COP 最高可达到 4.56。

(2) 制冷+热泵热回收系统对冷凝热进行回收利用, 利用冷凝热先将冷水进行预热, 再进入热泵热水机组进行二次加热, 此种运行模式不需要过高的冷凝温度保证了系统的制冷量以及制冷 COP,

当冷凝温度为 30℃时, 系统的制冷 COP 为 2.45, 制热 COP 为 3.01, 综合 COP 可以达到 5.46。

(3) 以制冰系统冷凝温度为 30℃、蒸发温度 -18℃ 进行热回收经济性分析, 相比于用热泵热水机组直接加热热水, 利用回收冷凝热预热生活用水时, 达到设定生活用水水温时其在整个供暖季的费用仅为直接加热热水所花费用的 40%。

#### 参考文献:

- [1] Niels P Vestergaard, Torben Funder-Kristensen, 肖伦, 等. 氨制冷系统在工业领域的成功应用[J]. 制冷与空调, 2019,19(1):61-66.
- [2] 姜衍礼, 董信林, 崔从明. 冷凝热回收空气源热泵系统在洗浴场所应用的技术探讨[J]. 给水排水, 2017,53(S1): 257-260.
- [3] 王一军. 福建某酒店热回收冷水机组应用比较[J]. 江西建材, 2017,(19):28-29.
- [4] 舒建国, 白单英. 基于冷凝废热回收的氨高温热泵系统性能分析[J]. 制冷技术, 2018,38(2):22-26.
- [5] 刘群生, 周丹, 程花蕊, 等. 基于双级压缩的制冷系统热回收[J]. 低温与超导, 2017,45(7):92-96.
- [6] 许国锋, 张楠楠, 郑大字. 论蒸发式冷凝器的节能与分析[J]. 冷藏技术, 2016,(2):13-15.