

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-089-05

原料药合成工艺中自然冷源冷却技术经济分析

薛永明¹ 冯江发¹ 姜宇¹ 薛红香² 张峰³

(1. 山东省医药工业设计院有限公司 济南 250101;

2. 泰安市特种设备检验研究院 泰安 271000;

3. 中海油石化工程有限公司 济南 250101)

【摘要】 针对原料药合成工艺对常温乙二醇溶液的冷却需求, 提出一种自然冷源与机械制冷相结合的复合制冷系统。研究结果表明, 在冬季和过渡季节使用时, 能够显著降低制冷能耗和运行电耗, 提高产品运行的经济效益, 符合国家的节能降碳政策。

【关键词】 原料药合成; 自然冷源; 冷却技术; 乙二醇溶液; 机械制冷
中图分类号 TU83 文献标志码 A

The Economic Analysis on the Natural Cold Source Cooling Technology of Synthesis Process of the Active Pharmaceutical Ingredients

Xue Yongming¹ Feng Jiangfa¹ Jiang Yu¹ Xue Hongxiang² Zhang Feng³

(1. Shandong Pharmaceutical Industry Design Institute Co., Ltd, Jinan, 250101;

2. Tai'an Special Equipment Inspection Institute, Tai'an, 271000;

3. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd, Jinan, 250101)

【Abstract】 A compound refrigeration system combining natural cold sources and mechanical refrigeration is proposed, which is employed to meet the cooling requirements of ethylene glycol solution with normal temperature in the synthetic process of active pharmaceutical ingredients. The research results show that both the cooling energy consumption and operating power consumption can be significantly reduced during winter and transition seasons, and therefore improve the economic benefits of the synthetic products of active pharmaceutical ingredients, which means the cooling technology comply with the national energy conservation and carbon reduction policies.

【Keywords】 Synthesis of active pharmaceutical ingredients; Natural cold source; Cooling technology; Ethylene glycol solution; Mechanical refrigeration

0 引言

自然冷源主要是指冬季室外的低温空气、深层地下水、天然冰等在自然中存在的可以直接用来制冷空调、消除热量的资源。自然冷源因地理位置和季节不同可以采用科学、合理有效的利用方式^[1-3,8-11]。金洪文、龚恒勤等^[4]阐述了数据中心严寒期联合使用自然冷却和机械制冷方式是单一机械制冷能耗的24%, 显著降低了制冷能耗; 孙海

峰^[5]从数据中心制冷系统整体能耗出发, 通过改善冷却塔换热、降低管道局部阻力、优化水泵与制冷机组运行平衡等方面, 深度挖掘自然冷源制冷系统的节能潜力。

在化学原料药合成工艺中, 乙二醇溶液作为常用的冷却液, 当其进入工艺冷凝器或者夹套管内, 通过间接换热将反应釜内物料冷却后, 乙二醇溶液自身的温度会升高, 为了使乙二醇溶液循环利用,

必须对升温后的乙二醇溶液进行冷却。根据化学原料药的合成工艺需求，常采用低温乙二醇溶液（-10℃~ -20℃）或常温乙二醇溶液（20℃~ 25℃）作为冷却介质。当低温乙二醇溶液作为原料药合成的冷却介质时，制冷方式是低温乙二醇作为载冷剂的低温冷冻机组；当常温乙二醇溶液作为原料药合成的冷却介质时，制冷方式采用机械制冷机组制取

7℃冷冻水，然后冷却常温乙二醇溶液。

随着国家对节能减碳、碳中和和碳达峰的日益重视，完全采用机械制冷的制冷模式存在以下问题：（1）采用制冷机组制取的7℃冷冻水直接冷却25℃乙二醇溶液，造成制冷成本升高和能源浪费。（2）未充分利用冬季和过渡季节的自然冷源。传统的乙二醇溶液冷却系统流程图如图1所示。

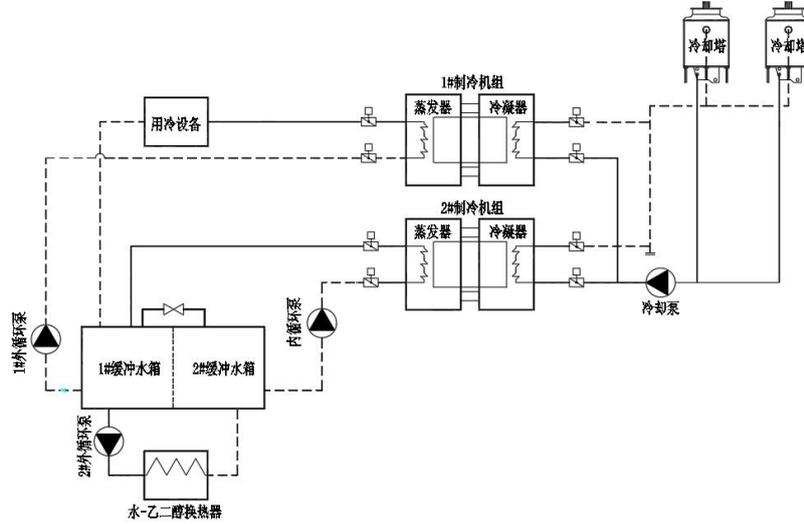


图1 传统乙二醇溶液冷却系统流程图

Fig.1 Flow chart of traditional ethylene glycol solution cooling system

1 自然冷源与机械制冷耦合冷却系统

1.1 基本组成

自然冷源与机械制冷耦合冷却乙二醇溶液系统主要设备包括冷水机组、自然冷源水-水板式换热器、工艺用冷用户、水-乙二醇板式换热器、1#

缓冲水箱、2#缓冲水箱、1#外循环泵、内循环泵、2#外循环泵、1#冷却水泵、冷水池、2#冷却水泵、冷却塔等。自然冷源与机械制冷耦合冷却系统流程图如图2所示。

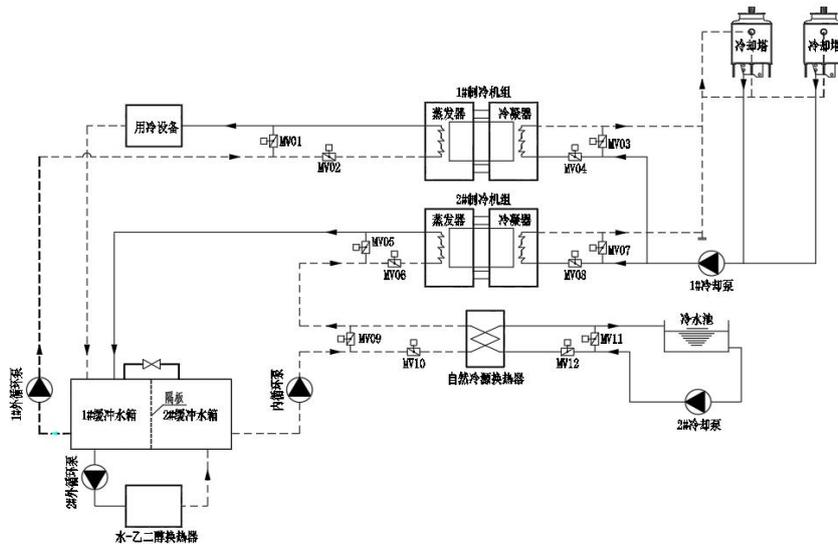


图2 自然冷源与机械制冷耦合系统流程图

Fig.2 Flow diagram of natural cooling source and mechanical refrigeration coupling system

1.2 运行工况

根据季节不同, 自然冷源与机械制冷耦合冷却系统采用三种运行工况: (1) 完全冷机制冷工况, 即夏季运行工况。(2) 完全自然冷却工况, 即冬季运行工况。(3) 部分自然冷却工况, 即过渡季节运行工况^[5-7]。

1.2.1 完全冷机制冷工况

完全冷机制冷工况: 夏季运行时, 1#缓冲水箱的 12℃冷水经 1#外循环泵送至 1#制冷机组的蒸发器, 温度降低至 7℃后, 送至工艺设备用冷, 供冷后的 12℃冷水返回至 1#缓冲水箱, 完成工艺设备用冷外循环; 2#缓冲水箱的 17℃冷水经内循环泵送至 2#制冷机组的蒸发器, 温度降低至 12℃后, 返回至 1#缓冲水箱, 再由 2#外循环泵送至水—乙二醇板式换热器, 使乙二醇溶液由 30℃降低至 25℃, 实现对乙二醇溶液的制冷后, 升温至 17℃的冷水返回 2#缓冲水箱, 完成冷却常温乙二醇溶液循环; 冷却塔返回的 32℃冷却水经 1#冷却水泵分别送至 1#制冷机组和 2#制冷机组的冷凝器, 温度升高至 37℃后, 返回冷却塔, 完成制冷机组冷却水循环。该运行工况 1#制冷机组和 2#热制冷机组开启, 自然冷源水—水板式换热器关闭。

1.2.2 完全自然冷源冷却工况

完全自然冷源冷却工况: 冬季运行时, 1#缓冲水箱的 12℃冷水经 1#外循环泵送至 1#制冷机组的蒸发器, 温度降低至 7℃后, 送至工艺设备用冷, 供冷后的 12℃冷水返回至 1#缓冲水箱, 完成工艺设备用冷外循环; 2#缓冲水箱的 17℃冷水经内循环泵送至自然冷源水—水板式换热器, 经冷却水冷却后, 温度降低至 12℃后, 返回至 1#缓冲水箱, 再由 2#外循环泵送至水—乙二醇板式换热器, 使乙二醇溶液由 30℃降低至 25℃, 实现对乙二醇溶液的制冷后, 升温至 17℃的冷水返回 2#缓冲水箱, 完成冷却常温乙二醇溶液循环; 冷水池返回的 10℃冷却水经 2#冷却水泵送至水—乙二醇溶液换热器, 温度升高至 15℃后, 返回冷水池, 完成冷却水循环。该运行工况 1#制冷机组和自然冷源水—水板式换热器开启, 2#制冷机组关闭。

1.2.3 部分自然冷源冷却工况

部分自然冷源冷却工况: 春季、秋季过渡季节运行时, 12℃/7℃工艺设备用冷流程与夏季运行工况相同; 2#缓冲水箱的 17℃冷水经内循环泵依次

送至自然冷源水—水板式换热器和 2#制冷机组, 经冷却水冷却后, 温度降低至 12℃后, 返回至 1#缓冲水箱, 再由 2#外循环泵送至水—乙二醇板式换热器, 使乙二醇溶液由 30℃降低至 25℃, 实现对乙二醇溶液的制冷后, 升温至 17℃的冷水返回 2#缓冲水箱, 完成冷却常温乙二醇溶液循环; 冷却塔返回的 32℃冷却水经 1#冷却水泵分别送至 1#制冷机组和 2#制冷机组的冷凝器, 温度升高至 37℃后, 返回冷却塔, 完成制冷机组冷却水循环; 冷水池返回的 10℃冷却水经 2#冷却水泵送至水—乙二醇板式换热器, 温度升高至 15℃后, 返回冷水池, 完成冷却水循环。

3 种运行模式的设备和电磁阀开关如表 1 所示。

表 1 三种运行模式的设备和电磁阀开关运行表

Table 1 Equipment and solenoid valve switch operation table for three operating modes

制冷模式	夏季 工况	冬季 工况	过渡季 节工况
1#制冷机组	开	开	开
2#制冷机组	开	关	开
自然冷源水— 水板式换热器	关	开	开
MV01	关	关	关
MV02	开	开	开
MV03	关	关	关
MV04	开	开	开
MV05	关	开	关
MV06	开	关	开
MV07	关	开	关
MV08	开	关	开
MV09	开	关	关
MV10	关	开	开
MV11	开	关	关
MV12	关	开	开
MV13	开	关	关
MV14	开	关	关
MV15	关	开	关
MV16	关	开	关

2 数学模型

水—乙二醇换热器的换热量如式 (1) 所示。

$$Q_g = G_g \times c_g \times \rho_g \times (t_{g2} - t_{g1}) \quad (1)$$

式中： Q_g 为水—乙二醇换热器的冷交换量，kW； G_g 为乙二醇溶液的流量， m^3/h ； c_g 为乙二醇溶液的比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ； ρ_g 为乙二醇溶液的密度， kg/m^3 ； t_{g1} 为水—乙二醇换热器的进口乙二醇溶液温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{g2} 为水—乙二醇换热器的出口乙二醇溶液温度， $^\circ\text{C}$ 。

制冷机组的制冷量如式(2)所示。

$$Q_0 = G_0 \times c \times \rho \times (t_{02} - t_{01}) \quad (2)$$

式中： Q_0 为制冷机组的制冷量，kW； G_0 为制冷机组的冷冻水流量， m^3/h ； c 为水的比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ； ρ 为水的密度， kg/m^3 ； t_{01} 为制冷机组的冷冻水出口温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{02} 为制冷机组的冷冻水进口温度， $^\circ\text{C}$ 。

制冷机组冷凝侧的水流量如式(3)所示^[12]。

$$G = 0.215 \times Q_0 \quad (3)$$

式中：0.215为制冷机组冷凝侧的单位制冷量水流量， $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{kW})$ 。

自然冷源换热器的换热量如式(4)所示。

$$Q_1 = G_1 \times c \times \rho \times (t_{L2} - t_{L1}) = G_2 \times c \times \rho \times (t_{C2} - t_{C1}) \quad (4)$$

式中： Q_1 为自然冷源换热器的冷交换量，kW； G_1 为自然冷源换热器用冷侧水流量， m^3/h ； c 为水的比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ； ρ 为水的密度， kg/m^3 ； G_2 为自然冷源换热器自然冷源侧水流量， m^3/h ； t_{L1} 为自然冷源换热器用冷侧的冷水出口温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{L2} 为自然冷源换热器用冷侧的冷水进口温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{C1} 为自然冷源换热器自然冷源侧的冷却水进口温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{C2} 为自然冷源换热器自然冷源侧的冷却水出口温度， $^\circ\text{C}$ 。

为了便于分析讨论，假定水—乙二醇换热器、自然冷源换热器无换热损失，换热效率为100%，根据能量系统热平衡可知， $Q_0 = Q_g = Q_1$ 。

3 技术经济分析

下面以某原料药合成项目的具体工程为例，分析采用机械制冷与自然冷源耦合系统产生的节能效果和经济效益。工艺条件如下：工艺设备所需的冷冻水流量为 $230\text{m}^3/\text{h}$ ，进、出工艺设备的冷冻水温度

分别为 7°C 和 12°C ，水的比热容 $c=4.186\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；常温乙二醇溶液的流量为 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，溶液浓度为40%，从 30°C 冷却至 25°C 。 25°C 、40%乙二醇溶液的密度 $\rho=1055\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热 $c=3.502\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

为了便于计算自然冷源产生的经济效益，仅对常温乙二醇溶液采用机械制冷和自然冷源冷却两种冷却方式进行分析比较。

3.1 传统冷水机组冷却方式

根据乙二醇溶液基础数据查询， 25°C 、40%乙二醇溶液的密度 $\rho=1055\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热容 $c=3.502\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，流量为 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，根据热平衡方程，计算得出： 7°C 冷冻水流量为 $220.65\text{m}^3/\text{h}$ ，常温乙二醇溶液的制冷量为 1282.25kW ；工艺冷冻水流量 $230\text{m}^3/\text{h}$ ，冷冻水进、出水温度 7°C 、 12°C ，计算得出：工艺冷冻水所需的制冷量为 1337.21kW 。

设备选用：(1)选用SLB1600JV-2A螺杆式冷水机组2台，详细参数如下：制冷量 $Q=1602\text{kW}$ ，输入功率 $N=263\text{kW}$ ，冷冻水进、出水温度： $12^\circ\text{C}/7^\circ\text{C}$ ，冷冻水流量 $G_1=276\text{m}^3/\text{h}$ ，冷却水流量 $G_2=344\text{m}^3/\text{h}$ ；(2)冷冻水内循环泵3台(2用1备)：流量 $300\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程20m，功率30kW；(3)冷冻水外循环泵3台(2用1备)：流量 $300\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程38m，功率55kW；(4)缓冲水箱1台：容积 90m^3 ；(5)乙二醇—水板式换热器1台：换热量 1285kW ，40%乙二醇溶液流量 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，乙二醇溶液进、出口温度： $30^\circ\text{C}/25^\circ\text{C}$ ，冷冻水进、出口温度： $7^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}$ ，冷冻水流量 $250\text{m}^3/\text{h}$ ；(6)冷却水泵3台(2用1备)：流量 $380\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程30m，功率45W；(7)冷却塔2台：循环水量 $400\text{m}^3/\text{h}$ ，进、出水温度： $37/32^\circ\text{C}$ 。

3.2 自然冷源与机械制冷耦合系统

与传统冷却相比，自然冷源与机械制冷耦合系统额外配置1台自然冷源水—水板式换热器和1个冷却水池，自然冷源水—水板式换热器技术参数：热量： 1285kW ，冷水进、出口温度： $17^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}$ ，冷水流量： $220\text{m}^3/\text{h}$ ；冷却水进、出口温度： $10^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$ ，冷却水流量： $220\text{m}^3/\text{h}$ 。

传统乙二醇溶液冷却系统的主要设备投资如表2所示，自然冷源与机械制冷耦合系统的主要设备投资如表3所示。

表 2 传统乙二醇溶液冷却系统主要设备投资费用表

Table 2 Traditional ethylene glycol solution cooling system main equipment investment cost table

序号	设备名称	主要技术参数	数量	单价/万元	总价/万元
1	螺杆式冷水机组	SLB1600JV-2A, 制冷量: 1602kW, 功率: 263kW	2 台	65.00	130.00
2	冷冻水外循环水泵	流量: 300m ³ /h, 扬程: 38m, 功率: 55kw	3 台	1.95	5.85
3	冷冻水内循环水泵	流量: 300m ³ /h, 扬程: 20m, 功率: 22kw	3 台	1.08	3.24
4	水—乙二醇换热器	换热量: 1285kW, 换热面积: 36m ²	1 台	7.50	7.50
5	冷却水循环水泵	流量: 380m ³ /h, 扬程: 30m, 功率: 45w	3 台	1.65	4.95
6	冷却塔	循环水量: 500m ³ /h	2 台	12.50	25.00
合计					176.54

表 3 自然冷源与机械制冷耦合系统主要设备投资费用表

Table 3 Natural cooling source and mechanical refrigeration coupling system main equipment investment cost table

序号	设备名称	主要技术参数	数量	单价/万元	总价/万元
1	螺杆式冷水机组	SLB1600JV-2A, 制冷量: 1602kW, 功率: 263kW	2 台	65.00	130.00
2	冷冻水外循环水泵	流量: 300m ³ /h, 扬程: 38m, 功率: 55kw	3 台	1.95	5.85
3	冷冻水内循环水泵	流量: 300m ³ /h, 扬程: 20m, 功率: 22kw	3 台	1.08	3.24
4	水-乙二醇换热器	换热量: 1285kW, 换热面积: 36m ²	1 台	7.50	7.50
5	冷却水循环水泵	流量: 380m ³ /h, 扬程: 30m, 功率: 45w	3 台	1.65	4.95
6	冷却塔	循环水量: 500m ³ /h	2 台	12.50	25.00
7	自然冷源水— 水板式换热器	换热量: 1285kW, 换热面积: 100.2m ²	1 台	15.00	15.00
8	冷却水池	——	1 座	5.00	5.00
合计					196.54

与传统乙二醇溶液冷却系统相比, 自然冷源与机械制冷耦合系统运行时, 按照夏季冷机完全制冷工况、冬季完全自然冷却工况和过渡季节部分自然冷却工况 3 种运行模式分析。在实际运行中, 因过渡季节自然冷源的运行时间难以准确确定, 本实例中做如下假定: (1) 全年运行时间 $t=360$ 天 (其中夏季运行时间 $t_1=90$ 天, 冬季运行时间 $t_2=90$ 天, 过渡季节运行时间 $t_3=180$ 天)。(2) 夏季为冷机完全制冷工况, 自然冷源不运行; 冬季为完全自然冷源冷却工况, 冷机不运行; 过渡季节折算成完全自然冷源冷却的运行时间为 90 天。

假定当地电费单价为 0.72 元/度, 采用自然冷源与机械制冷耦合系统后, 全年节省的用电量: $263 \times (90+90) \times 24/10000=113.6$ 万度, 节省的电价: $113.6 \times 0.72=81.8$ 万元。

与传统乙二醇溶液冷却方式相比, 设备投资仅增加 1 台自然冷却水—水板式换热器和 1 个冷却水池, 增加设备投资费用 20 万元, 运行的节能效益显著。

4 结论

(1) 阐述了自然冷源与机械制冷耦合运行系统, 运用于医药原料药行业, 充分利用了冬季和过渡季节的自然冷源, 通过一个具体的工程实例分析, 降低制冷能耗, 提高了企业的经济效益, 实现了国家倡导的节能降碳要求。

(2) 与传统的机械制冷方式相比, 自然冷源与机械制冷耦合运行系统设备投资费用增加 20 万元, 因充分利用了冬季和过渡季节的自然冷源, 年度节省用电量 113.6 万度, 节省电费 81.8 万元。

参考文献:

- [1] 刘斌, 尹从绪, 石胜强, 等. 自然冷源在冷库中的应用可行性研究[J]. 冷藏技术, 2020, 43(3): 1-9.
- [2] 王世清, 张岩, 朱英莲, 等. 自然冷源利用的状况与前景展望[J]. 农机化研究, 2010, 32(6): 237-240.

(下转第 132 页)

气流组织形式,并且可以降低工程投资。

(2) 对净化要求有竖向分区的高大厂房,在工艺生产过程中无较大产生尘且房间的密闭性较好的前提下,净化通风的区域宜以净化工作区有效体积为研究对象,换气次数可以参照国家标准的推荐值,并可适当减少,根据温晓军等^[10]人研究,换气次数取规范推荐值的 30%~80%即可满足要求。

(3) 当高大洁净厂房内有产尘量较大的工艺设备排风时,为保证洁净室的洁净度及静压要求,降低净化空调机组的能耗,建议设置独立的排风系统将工艺设备产生的含尘气体直接排至室外。

(4) 对室内外静压差要求严格的洁净通风空调系统,在送风管道上设置定风量阀、回风管道上设置变风量阀的主动压差控制系统,不仅能根据房间静压差实时调控新、回风量从而维持室内温湿度、洁净度及压差波动,还可以很大程度的降低运行管理难度。

参考文献:

[1] 国家原子能机构,核技术应用概述[EB/OL].[https://](https://www.caeca.gov.cn/n6760340/n6760353/index.html)

www.caeca.gov.cn/n6760340/n6760353/index.html.

- [2] GB 50073-2013,洁净厂房设计标准[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [3] 董秀芳,肖武,赵彬.高大洁净厂房分层净化 CFD 模拟与节能性分析[J].暖通空调,2012,42(11):58-62.
- [4] 李兆坚,张晓航,宋道宏,等.高大洁净厂房净化换气次数与洁净度关系的测试研究[J].暖通空调,2015,(1):1-4.
- [5] 佟歆.高大洁净厂房分层净化空调设计[J].洁净与空调技术,2017,(1):36-38.
- [6] 陆耀庆.实用供热空调设计手册(第二版)[J].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [7] 张永建,田冀锋.高大厂房分层空调数值模拟[J].建筑节能,2010,38(7):24-26.
- [8] 冯宝岳,陈之日,郝军,等.高大洁净厂房分层空调系统的设计[J].暖通空调,2001,31(2):44-46.
- [9] 薛永明,冯廷龙,冯江发,等.定变风量阀在实验室通风空调系统的应用探讨[J].制冷与空调,2024,38(2):249-256.
- [10] 温晓军,林素菊,赵华.高大厂房洁净室设计[J].洁净与空调技术,2012,(1):55-57.

(上接第 93 页)

- [3] 乔雅静,袁培,刘海,等.自然冷源在数据中心空调系统中的应用[J].制冷与空调,2022,22(4):71-77.
- [4] 金洪文,龚恒勤,赵家楠,等.基于自然冷却系统的数据中心在冬季节能潜力分析[J].制冷与空调,2023,23(11):75-79.
- [5] 孙海峰.基于自然冷源的数据中心制冷系统节能潜力的分析[J].发电与空调,2016,37(4):69-73.
- [6] 一种自然冷源与制冷机组耦合运行的乙二醇溶液冷却系统[P].中国专利:CN217715583U,2022.11.01.
- [7] 一种利用自然冷源的节能空调系统[P].中国专利,CN107990454A,2018.05.04.
- [8] 王伟,吴小虎,龙澜,等.数据中心自然冷源与余热回收

节能应用研究[J].电信工程技术与标准化,2023,36(S1):207-210.

- [9] 张润霞,顾兆林,王赞社,等.基于自然冷源的蓄冷材料制备及蓄释冷实验研究[J].建筑节能,2021,49(2):86-90.
- [10] 崔华玉,李红旗,罗宇辰.自然冷源及蒸发冷却机房空调的运行能耗分析[J].建筑热能通风空调,2020,39(12):59-63.
- [11] 黄成达,许树学,马国远,等.利用自然冷源过冷改善 R32 热泵制热性能的实验研究[J].制冷与空调,2018,32(4):423-427.
- [12] GB/T 18430.1-2007,蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组:第 1 部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组[S].北京:中国标准出版社,2023.