

[引用格式] 王玉刚, 闵韵然. 两种叉流式间接蒸发冷却器的焓分析比较[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2026, 31(2): 210-216. DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.08.

两种叉流式间接蒸发冷却器的焓分析比较

王玉刚^{1,2}, 闵韵然^{1,2}

- (1. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了明确叉流式露点间接蒸发冷却器和传统间接蒸发冷却器能量利用特性的差异, 建立了间接蒸发冷却器的焓分析模型。在预设条件下, 计算了两种冷却器的有效输出焓、输入焓、焓损失、焓效率, 并对计算结果进行了对比分析。结果显示, 在输入焓相等的情况下, 露点间接蒸发冷却器的有效输出焓和焓效率较传统间接蒸发冷却器分别提高 8.19%、2.5%; 两种冷却器的热力性能存在显著差异, 露点间接蒸发冷却器的排风焓损失大于传统间接蒸发冷却器, 但其内部焓损失小于传统间接蒸发冷却器。由于两种冷却器的热力性能特点不同, 其适用场景因而也不同。

[关键词] 间接蒸发冷却器; 焓分析; 叉流; 露点

[中图分类号] TU 831 [文章编号] 1007-7405(2026)02-0210-07 DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.08

Exergetic Performance Comparison of Two Cross-Flow Indirect Evaporative Coolers

WANG Yugang^{1,2}, MIN Yunran^{1,2}

- (1. College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Development of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: To clarify the disparities in energy utilization between cross-flow dew-point indirect evaporative coolers (IECs) and conventional IECs, an exergy analysis model for IECs was established. Under the designated operating conditions, this model was applied to calculate the specific exergy, specific exergy destruction and exergy efficiency of both humid air and water streams in the two types of IECs, with a subsequent comparative analysis conducted on the calculation results. The results demonstrated that at an equal input exergy, the dew-point IEC achieves an increase of approximately 8.19% in useful output exergy and an improvement of around 2.5% in exergy efficiency compared with that of the conventional IEC. There are significant thermodynamic performance disparities between the two IECs, the dew-point IEC exhibits high exergy destruction in the exhaust air, its internal exergy destruction is lower, each type of IEC has its own applicable scenarios.

Keywords: indirect evaporative cooler; exergy analysis; cross-flow; dew-point

[收稿日期] 2025-08-31

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (52308096)

[通信作者] 王玉刚 (1978—), 副教授, 从事蒸发冷却技术方向研究, E-mail:yugang0312@jmu.edu.cn

0 引言

据统计,供暖、通风和空调系统(HVAC)的能耗约占建筑物总能耗的50%^[1-3]。当前HVAC系统的制冷设备多采用机械压缩式制冷技术,该技术的能效系数偏低,能耗和碳排放量偏大,一定程度上加剧了全球气候变暖^[4-5]。随着建筑行业对碳减排和节能降耗的关注度持续提升,在建筑领域应用推广可再生能源可显著降低化石燃料消耗引发的温室效应^[6-7]。蒸发冷却空调以水为制冷剂,以干空气能为制冷驱动力,兼具节能和环保特性^[8],是传统机械压缩式空调的高效替代方案之一^[9-10],近年来在建筑领域中应用广泛。

相较于直接蒸发冷却器,间接蒸发冷却器可在不改变空气含湿量的前提下实现空气降温^[11],故而其应用范围更为广泛^[12]。理论上,传统间接蒸发冷却器可将空气冷却至其湿球温度,但其实际湿球效率仅在50%到85%之间^[13]。Maisotsenko等^[14]提出的露点间接蒸发冷却器,有效改善了传统间接蒸发冷却器冷却能力受限问题。理论上,露点间接蒸发冷却器可将一次空气冷却至其湿球温度以下,直至达到其露点温度^[15]。

目前,已有多篇综述文章^[10,12,16-18]对间接蒸发冷却技术的研究工作进行了总结分析,从中可以看出研究工作多是基于热力学第一定律进行的实验和数值模拟研究。如:间接蒸发冷却器的冷却性能受循环水的流速影响较大,受喷嘴的数量和尺寸影响较小^[13];当二次空气为室内空调回风时,冷却器的冷却性能均更佳^[19];逆流式露点间接蒸发冷却器的冷却性能主要受冷却器通道长度和高度、二次空气流量比、空气流速等影响,循环水温对其冷却性能几乎没有影响^[20];冷却器二次空气的饱和状态主要受空气流速和通道宽度影响^[21];当冷却器空气通道从平板式改为不规则形状后,其冷却性能提升的同时压力损失却会降低^[22]。这些针对不同形式和结构的间接蒸发冷却器进行的比较研究,主要集中在结构参数和运行参数对冷却器冷却性能的影响方面^[23-27]。

而利用热力学第二定律研究间接蒸发冷却器性能的报道较少,有也主要集中在:利用热力学第二定律分析单台露点间接蒸发冷却器或者传统间接蒸发冷却器的焓流、焓效率、焓效比的影响因素和变化规律^[28-29];利用实验结果分析直接蒸发冷却器、间接蒸发冷却器和两级蒸发冷却空调机组的焓效率和不可逆损失,以此确定它们的适用气候区^[30];将不同形式的传统间接蒸发冷却器用于余热回收和预冷新风时,分析不同形式的间接蒸发冷却器的焓利用及焓损失规律,确定间接蒸发冷却器用于余热回收时的性能缺点^[31];利用焓分析方法评估蒸发冷却和机械制冷复合系统中各部件的能源利用效率及热力学损失,以期减少机械制冷的应用时长^[32]。这些研究皆未见有利用热力学第二定律对传统间接蒸发冷却器与露点间接蒸发冷却器的热力性能开展对比分析。

本研究拟建立传统间接蒸发冷却器和露点间接蒸发冷却器的焓分析模型,在典型工况下对两种间接蒸发冷却器进行热力性能计算分析,由此获得它们的热力性能差异,再量化两种冷却器的能效与焓损失特征,明确其热力学优劣及适用场景,为工程选型、优化及技术升级提供热力学理论与工程应用依据。

1 焓分析模型

以给定的环境为基准,能够最大限度转换为有用功的那部分能量理论上称之为焓^[33]。间接蒸发冷却器的入口空气为环境空气,由干空气和水蒸气组成,相对于 1 kg 干空气,温度、压力、含湿量分别为 T 、 P 、 d 的湿空气的比焓为:

$$e_a = e_{ph} + e_{ch} \quad (1)$$

其中: e_{ph} 为比物理焓 (kJ/kg); e_{ch} 为比化学焓 (kJ/kg); 下角标 a 代表湿空气。

比物理焓的计算公式为:

$$e_{ph} = (c_{p,da} + dc_{p,v}) \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + (R_{da} + dR_v) T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

其中: c_p 为干空气的定压比热 (kJ/(kg·K)); d 为含湿量,即空气中湿空气与干空气的比 (g/kg); T 为湿空气的开氏温度 (K); R 为气体常数 (kJ/(kg·K)); P 为空气压强 (Pa); 下角标 da 代表干空气; 下角标 v 代表水蒸气; 下角标 0 代表焓分析的参考状态,本文参照文献 [33] 选取环境状态下的饱和空气作为焓分析的参考状态。

比化学焓的计算公式为:

$$e_{ch} = T_0 \left[(R_{da} + dR_v) \ln \left(\frac{R_{da} + d_0 R_v}{R_{da} + dR_v} \right) + dR_v \ln \frac{d}{d_0} \right] \quad (3)$$

水的比焓计算公式为:

$$e_w = i_w(T) - i_v(T_0) - T_0 [s_w(T) - s_v(T_0)] + [P_1 - P_{sat}(T)] v_w(T) - R_v T_0 \ln(\phi_0) \quad (4)$$

其中: ϕ 为空气的相对湿度; 下角标 w 代表水; 下角标 sat 代表饱和状态。

为了避免冷却器结构尺寸以及风量等因素对焓分析过程的影响,本文采用基于焓平衡方程的广义模型来分析冷却器处理空气的热力过程。间接蒸发冷却器焓平衡方程为:

$$e_{in} - e_{out} - e_d = 0 \quad (5)$$

其中: e_{in} 为总输入焓, e_{out} 为有效输出焓, e_d 为焓损失。

总输入焓包括冷却器入口空气焓和水焓,计算公式为:

$$e_{in} = 2m_{a1}e_{a1} + m_w e_w \quad (6)$$

有效输出焓为冷却器出口一、二次空气焓,计算公式为:

$$e_{out} = m_{a2}e_{a2} + m_{a3}e_{a3} \quad (7)$$

焓损失为:

$$e_d = T_0 S_{g0} \quad (8)$$

将式 (6)、(7)、(8) 带入式 (5), 可得:

$$2m_{a1}e_{a1} + m_w e_w - m_{a2}e_{a2} - m_{a3}e_{a3} - T_0 S_g = 0 \quad (9)$$

其中: m 为质量流量 (kg/s); S_g 为熵产 (kW/K); 下角标 a_1 为入口空气, a_2 为出口一次空气, a_3 为出口二次空气。

2 性能评价

焓效率用于衡量冷却器能量品质的利用程度,能够体现能量中可转化为有用功的部分,反映冷却过程中可用能的有效利用程度。焓效率定义为有效输出焓与输入焓的比值。

其中: 有效输出焓为系统实际转化为有用能的焓; 输入焓为输入系统的总焓。本文采用焓效率来评价两种间接蒸发冷却器的能量利用情况, 计算公式^[28]为:

$$\eta_e = \frac{e_{a_2}}{2e_{a_1} + e_w} = 1 - \frac{e_d}{2e_{a_1} + e_w}。$$

(6)

其中: η_e 为冷却器的焓效率; e_{a_1} 为入口空气的比焓 (kJ/kg); e_{a_2} 为一次空气出口的比焓 (kJ/kg); e_w 为水的比焓 (kJ/kg); e_d 为冷却器的比焓损失 (kJ/kg)。

3 实验结果与分析

3.1 焓分析预设参数

焓分析所需的空气状态参数和冷却器运行参数如表1所示。工程应用中传统叉流式间接蒸发冷却器实测湿球效率一般为0.55~0.76^[34]。基于此, 本文取0.7作为传统间接蒸发冷却器湿球效率的预设值。科罗拉多公司称其生产的叉流式露点间接蒸发冷却器湿球效率在常规工况下可达1.1^[35]。考虑到产品的工程适用性, 本文取1.0为叉流式露点间接蒸发冷却器湿球效率预设值。

为验证分析结论的可靠性, 本研究对预设参数开展单参数敏感性分析。结果表明, 核心参数在工程合理偏差范围内波动时, 空调性能指标最大相对偏差≤6%, 即本结论具备良好的可靠性与工程适用性。

3.2 两种冷却器的比焓对比分析

基于上述焓分析模型, 对两种间接蒸发冷却器的空气处理过程进行计算分析, 结果如图1所示。在入口空气比焓相等的条件下, 露点间接蒸发冷却器的一次空气出口比焓高于传统间接蒸发冷却器, 原因是一次空气出口温度较低。空气焓值越高, 其能量可利用的价值就越大, 因此露点间接蒸发冷却器一次空气所包含的能量中可以转化为有用功的占比更高。同时, 露点间接蒸发冷却器所消耗水的比焓大于传统间接蒸发冷却器, 说明其耗水量更大, 核心原因在于露点间接

表1 焓分析预设参数
Tab.1 Parameters considered for exergy analysis

参数	数值
环境空气温度/℃	35
环境空气相对湿度/%	30
参考温度/℃	35
参考相对湿度/%	100
二次空气流量÷一次空气流量	1
传统间接蒸发冷却器湿球效率	0.7
露点间接蒸发冷却器湿球效率	1

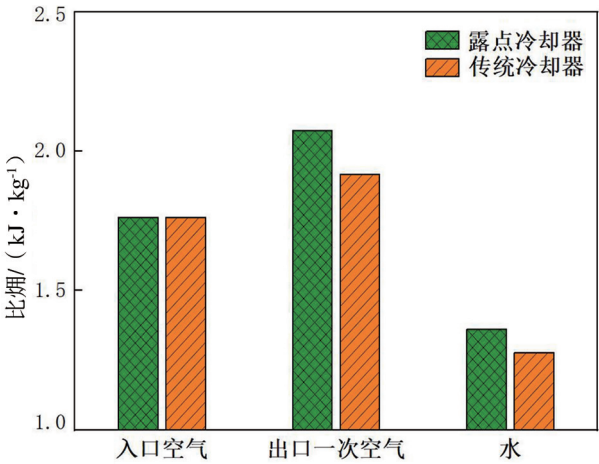


图1 比焓的比较结果

Fig.1 Results of the specific exergy

蒸发冷却器的二次空气预冷不充分, 二次空气由于干通道进入湿通道后, 需要通过湿通道内水的蒸发潜热带走更多干通道内空气的湿热, 因此消耗了更多的水。虽然露点间接蒸发冷却器可以获得温度更低的一次空气, 但是其消耗了更多的水, 因此其在水资源受限地区的应用将会受到一定影响。

3.3 两种冷却器的焓损失对比分析

两种间接蒸发冷却器的焓损失情况如图 2 所示。冷却器内部焓损失大小由于通道空气和湿通道空气之间的温差以及冷却器湿球效率决定。露点间接蒸发冷却器干通道空气和湿通道空气之间的温差较大，导致热量传递过程中的不可逆性更强，因此焓损失更大。露点间接蒸发冷却器湿球效率较高，因此其内部焓损失较大。

排风焓损失的大小取决于排风温度和含湿量。露点间接蒸发冷却器湿通道内的空气温度低于传统间接蒸发冷却器，其排风温度相应更低，与焓分析参考温度的温差更大，因此露点间接蒸发冷却器排风的热能焓高于传统间接蒸发冷却器。又流式露点间接蒸发冷却器对二次空气的预冷能力较弱，二次空气进入湿通道时其相对湿度偏低，但仍具有较强的使水蒸发能力，且二次空气经预冷后，干、湿通道间的空气温差变大，进一步促进湿通道内的水蒸发换热。因此相较于传统间接蒸发冷却器，露点间接蒸发冷却器的排风含湿量更高，加之排风温度较低，含湿量较大，排风更接近饱和状态，越接近焓分析的参考相对湿度，因此其排风的化学焓更低。

综合热能焓和化学焓的叠加效应，露点间接蒸发冷却器的排风焓损失整体大于传统间接蒸发冷却器。露点间接蒸发冷却器通过增加水耗释放低品位潜热焓，大幅降低系统内部不可逆焓损（热力学核心损耗），虽伴随排风焓损的增量，但该增量为焓的转移排放而非不可逆耗散，且内部焓损降低幅度远大于排风焓损增量，最终实现总焓效率净提升。其本质是通过优化焓流结构与焓损结构，提升能量品质利用效率，是露点间接蒸发冷却技术区别于传统间接蒸发冷却技术的核心热力学优势。

3.4 两种冷却器的焓效率对比分析

根据式（6）计算得到两种冷却器的焓效率，具体如图 3 所示。露点间接蒸发冷却器的焓效率比传统间接蒸发冷却器的高约 2.5%，总输入焓增加约 1.77%，有效输出焓增加约 8.19%。由此可以看出，露点间接蒸发冷却器对输入焓的利用更加充分，性能更好。

4 结论

本研究构建了间接蒸发冷却器的焓分析模型，并在预设工况下，对叉流式露点间接蒸发冷却器和传统间接蒸发冷却器的能量

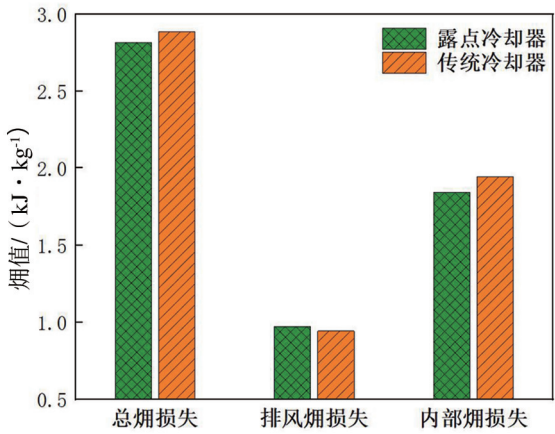


图 2 焓损失的比较
Fig.2 Comparisons of the specific exergy destruction

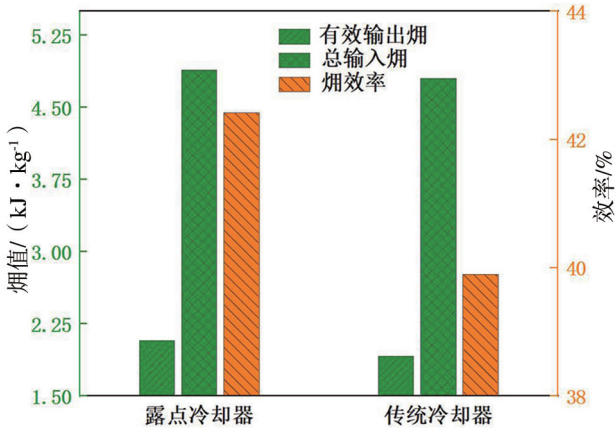


图 3 能量利用情况的比较
Fig.3 Comparisons of energy efficiency

利用情况开展了系统性对比分析。研究表明:露点间接蒸发冷却器能量利用效率更优,其有效输出焓和焓效率分别较传统间接蒸发冷却器提升了8.19%和2.5%;二者热力性能存在显著差异,露点间接蒸发冷却器的排风焓损失较大,需要消耗更多的水,因此其在水资源受限地区的应用将会受到影响,其更适用于水资源充足、对送风温度要求严苛的地区;传统间接蒸发冷却器的湿球效率较低,致使其内部焓损失较大,但是其在低冷却负荷和运维条件有限的场景以及水资源受限的干旱地区具备不可替代的应用优势。两种间接蒸发冷却器形成互补而非替代关系,需综合考虑项目气象条件、负荷需求、运维能力等因素来确定其各自适用性。

本研究后续将继续围绕冷却器实验验证、运行参数、结构参数等方面的优化设计开展进一步研究,共同推动蒸发冷却空调技术的实际应用。

[参 考 文 献]

[1]SU X W,YUAN Y P,WANG Z J,et al. Human thermal comfort in non-uniform thermal environments;a review[J]. Energy and Built Environment,2024,5(6):853-862.

[2]GUPTA V,DED C. Envelope design for low-energy buildings in the tropics;a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,186:1-22.

[3]WU Y Y,ZHAO J Q,CAO B. A systematic review of research on personal thermal comfort using infrared technology[J]. Energy and Buildings,2023,301:1-20.

[4]GONZALEZ-TORRES M,PEREZ-LOMBARD L,CORNEL J F,et al. A review on buildings energy information;trends,enduses,fuels and drivers[J]. Energy Reports,2022,8:626-637.

[5]SULTAN M,EL-SHARKAWY M,MIYAZAKI T,et al. An overview of solid desiccant dehumidification and air conditioning systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,46:16-29.

[6]KIBRIA M T,ISLAM M A,SAHA B B,et al. Assessment of environmental impact for air-conditioning systems in Japan using HFC based refrigerants[J]. Evergreen, 2019,6(3):246-253.

[7]DONG Y B,COLEMAN M,MILLER S A. Greenhouse gas emissions from air conditioning and refrigeration service expansion in developing countries[J]. Annual Review of Environment and Resources,2021,46:59-83.

[8]黄翔. 面向环保、节能、经济及室内空气品质联合挑战的蒸发冷却技术[J]. 建筑热能通风空调,2003(4):1-3.

[9]CHEN J J,WANG X X,WU X H,et al. Experimental investigation on the thermal and flow performance of a thermodynamically-balanced packed bed humidification system[J]. Applied Thermal Engineering,2024,236:1-9.

[10]YANG H X,SHI W C,CHEN Y,et al. Research development of indirect evaporative cooling technology;an updated review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,145:1-23.

[11]DUAN Z Y,ZHAN C H,ZHANG X X,et al. Indirect evaporative cooling:past,present and future potentials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16:6823-6850.

[12]SAJJAD U,ADDAS N,HAMID K,et al. A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2021,122:1-30.

[13]ANTONELLIES S D,JOPPOLO C M,LIBERATI P,et al. Experimental analysis of a cross flow indirect evaporative cooling system[J]. Energy and Buildings,2016,121:130-138.

[14]MAISOTSENKO V S,GILLAN L E,HEATON T L,et al. Method and plate apparatus for dew point evaporative cooler: US6581402B2[P]. 2000-09-27.

[15]MAHMOOD M H,SULTAN M,MIYAZAKI T,et al. Overview of the Maisotsenko cycle;a way towards dew point evaporative cooling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,66:537-555.

[16]LV J,XU H D,ZHU M Y,et al. The performance and model of porous materials in the indirect evaporative cooling system;a

- review[J]. Journal of Building Engineering,2021,41:1-23.
- [17] ZHU G Y, WEN T, WANG Q W, et al. A review of dew-point evaporative cooling; recent advances and future development [J]. Applied Energy, 2022, 312:1-18.
- [18] XIAO X, LIU J J. A state-of-art review of dew point evaporative cooling technology and integrated applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 191:1-26.
- [19] KIM H J, HAM S W, YOON D S, et al. Cooling performance measurement of two cross-flow indirect evaporative coolers in general and regenerative operation modes[J]. Applied Energy, 2017, 195:268-277.
- [20] ZHAO X D, LI J M, RIFFAT S B. Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28:1942-1951.
- [21] LIN J, THU K, BUI T, et al. Study on dew point evaporative cooling system with counter-flow configuration[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 109:153-165.
- [22] XU P, MA X, DIALLO T M O, et al. Numerical investigation of the energy performance of a guideless irregular heat and mass exchanger with corrugated heat transfer surface for dew point cooling[J]. Energy, 2016, 109:803-817.
- [23] WANG Y G, HUANG X, LI L. Comparative study of the cross-flow heat and mass exchangers for indirect evaporative cooling using numerical methods[J]. Energies, 2018, 11(12):3374.
- [24] BOLOTIN S, VAGER B, VASILJEV V. Comparative analysis of the cross-flow indirect evaporative air coolers[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 88:224-223.
- [25] KASHYAP S, SARKAR J, KUMAR A. Comparative performance analysis of different novel regenerative evaporative cooling device topologies[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176:1-11.
- [26] SOHANI A, SAYYAADI H, MOHAMMADHOSSEINI N. Comparative study of the conventional types of heat and mass exchangers to achieve the best design of dew point evaporative coolers at diverse climatic conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 158:327-345.
- [27] LI W Y, LI Y C, ZENG L Y, et al. Comparative study of vertical and horizontal indirect evaporative cooling heat recovery exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124:1245-1261.
- [28] LIN J, BUI D T, WANG R Z, et al. On the exergy analysis of the counter-flow dew point evaporative cooler[J]. Energy, 2018, 165:958-971.
- [29] 裴秀英, 王玉刚, 马益民. 三级蒸发冷却空调系统空气处理过程的焓分析[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2019, 24(2):133-138.
- [30] FARMAHINI-FARAHANI M, DELFANI S, ESMAEELIAN J. Exergy analysis of evaporative cooling to select the optimum system in diverse climates[J]. Energy, 2012, 40:250-257.
- [31] LI W Y, LI Y C, SHI W X, et al. Energy and exergy study on indirect evaporative cooler used in exhaust air heat recovery [J]. Energy, 2021, 235:1-16.
- [32] TAUFIQ B N, MASJUKI H H, MAHLIA T M I, et al. Exergy analysis of evaporative cooling for reducing energy use in a Malaysian building[J]. Desalination, 2007, 209:238-243.
- [33] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1988:32-60.
- [34] 黄翔. 蒸发冷却空调原理与设备[M]. 北京:机械工业出版社, 2019:63.
- [35] ZHAN C, ZHAO X, SMITH S, et al. Numerical study of a M-cycle cross-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling [J]. Building and Environment, 2011, 46:657-668.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)