

水冷式冷水机组大温差运行特性试验

韩彦斌 张彦昌

(郑州中南科莱空调设备有限公司)

摘要 在冷冻水大温差、冷却水大温差、冷冻水和冷却水同时大温差3种条件下,对按照国家标准名义工况设计制作的水冷式冷水机组试验样机进行测试。结果表明,在保持制冷量不变(相当于空调冷负荷一定)情况下,冷冻水大温差对冷冻水进、出水温度影响明显,对机组性能系数、压缩机排气温度、机组冷凝压力影响不明显;冷却水大温差时,冷冻水进、出水温度略有升高、机组性能系数明显降低、压缩机排气温度和机组冷凝压力明显升高;冷冻水和冷却水均大温差时,对以上参数的影响为冷冻水和冷却水分别大温差影响的叠加。

关键词 冷水机组;大温差;运行特性

Operation characteristics test on water-cooled chiller with large temperature difference

Han Yanbin Zhang Yanchang

(Zhengzhou Midsouth Ke Lai Air Conditioning Equipment Co., Ltd.)

ABSTRACT The experimental prototype of water-cooled chiller which is designed and manufactured based on the nominal working condition of national standard is tested under three conditions of chilled water with large temperature difference, cooling water with large temperature difference, and chilled water and cooling water with large temperature difference at the same time. The results show that under the same cooling capacity which means the same air-conditioning cooling load, the large temperature difference of chilled water influences inlet and outlet chilled water temperature significantly, but the influences is not obvious on the coefficient of performance, the exhaust temperature of the compressor, and condensing pressure. As cooling water with large temperature difference, inlet and outlet chilled water temperature increase slightly, the coefficient of performance decreases obviously, and the exhaust temperature of the compressor and the condensing pressure increase significantly; as the chilled water and cooling water with large temperature difference at the same time, the influences on above parameters are the superposition of the chilled water and cooling water respectively with large temperature difference.

KEY WORDS chiller; large temperature difference; operation characteristics

从节能的角度出发,大温差水冷式冷水机组的应用越来越普遍,对其运行的节能效果及冷水机组运行特性的理论分析和研究也有很多,结论不尽一致,甚至相反。大温差冷水机组的应用选型多基于生产厂家的性能修正曲线图或修正系数表,而生产厂家也多是按照国家标准名义工况设

计制作,再进行大温差条件的理论修正。由于工况条件变化导致的机组工作状态参数变化,理论计算结果与实测数据会有偏差,笔者正是基于这种情况进行试验验证,先由确定的水温差计算出对应的理论水流量,再通过试验测出该理论水流量下的实际冷冻水进、出水温度及其他参数。

收稿日期:2015-05-19

作者简介:韩彦斌,本科,工程师,总工程师,主要研究方向为制冷空调设备与技术。

目前,国内大温差空调系统的应用有多种形式,与作为空调系统冷源的冷水机组关联度较高的大温差形式可分为3种:①冷冻水大温差,即冷水机组蒸发器进出口水温差为6~10℃;②冷却水大温差,即冷水机组冷凝器进出口水温差为6~10℃;③冷冻水和冷却水同时大温差,即冷水机组蒸发器和冷凝器进出口水温差均大于国家标准名义工况下的温差(约5℃)。无论采取哪一种大温差形式,均需要保证冷水机组制冷量与冷负荷相匹配。笔者通过保持冷水机组在各大温差工况下制冷量与国家标准名义工况相同,得到冷水机组在各大温差工况下的运行数据,对试验数据进行分析,得出冷水机组在不同大温差工况下运行时,进/出水温度、性能系数、压缩机排气温度、机组冷凝压力等参数的变化情况,以及安全运行的大温

差极限,供暖通空调行业和机组设备制造行业研究人员参考。

1 试验介绍

1.1 试验装置

试验装置为依据GB/T 18430.1—2007《蒸气压缩循环冷水(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》^[1]建立的液体载冷剂法试验装置,测量设备经检定校准。其原理图如图1所示,操作界面如图2所示。该装置的测量范围为300~1000 kW(制冷量),并以主要试验的测量结果为计算依据,测量在机组试验工况稳定1 h后进行,每隔5 min取一组数据,每一个数据点的采集周期为10 s,共取7组数据,取数据的平均值作为当次试验的测量结果。校核试验允许偏差不大于规定计算值。

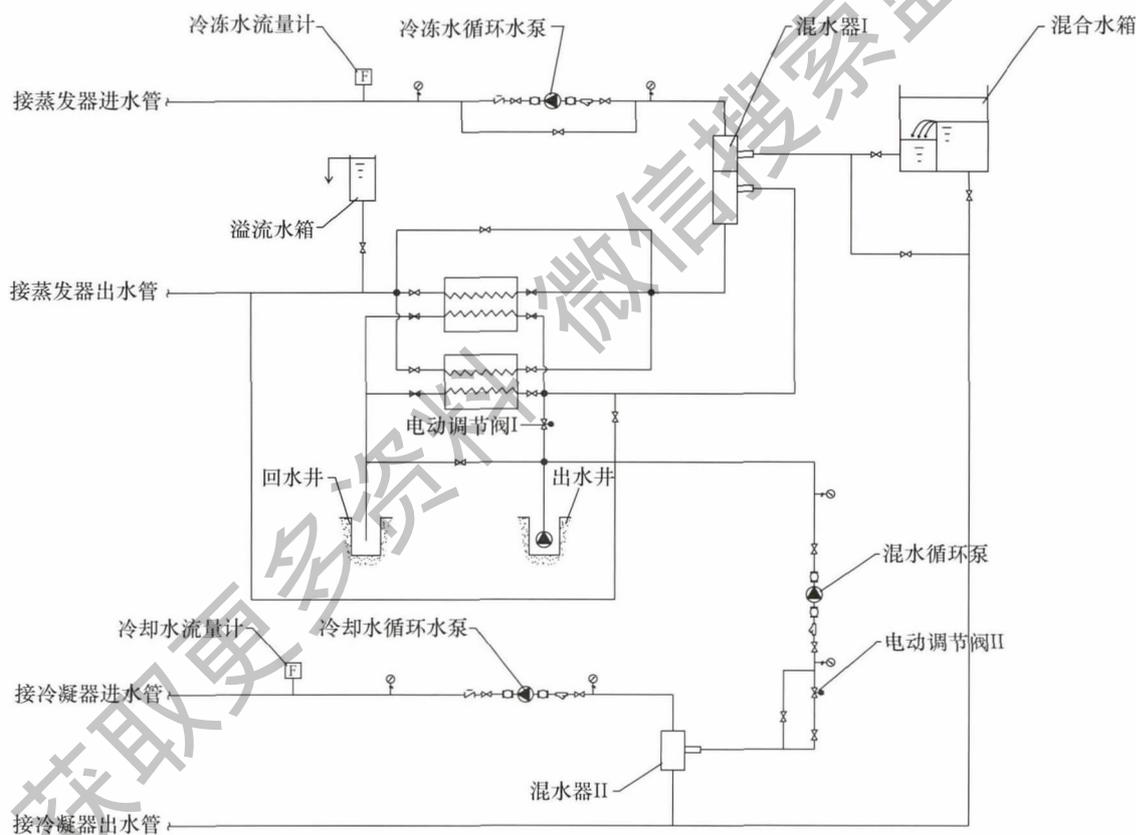


图1 冷水机组试验装置原理图

1.2 试验样机描述

试验样机采用螺杆式压缩机、R22制冷剂、满液式蒸发器和壳管式冷凝器;油分离器内置于冷凝器壳体内,机组外部无油冷却器及其他辅助设备;吸气过热度控制;蒸发器、冷凝器及蒸发器至压缩机吸气端管路采用30 mm厚橡塑保温棉板进

行隔热处理。如图3所示。

1.3 计算公式

依据GB/T 10870—2014《蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法》^[2],蒸发器侧换热量即机组制冷量,

$$Q_n = c q_m (t_1 - t_2) \quad (1)$$

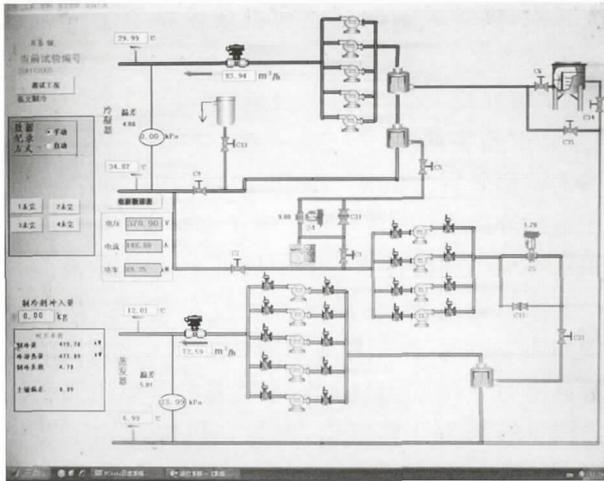


图 2 试验操作界面



图 3 螺杆式冷水机组试验样机

式中： Q_n 为机组净制冷量(W)； c 为平均温度下水的比热容(J/(kg·°C))； q_m 为冷水质量流量(kg/s)； t_1 为蒸发器进水温度(°C)； t_2 为蒸发器出水温度(°C)。

考虑分析的直观性，在试验的温度范围内忽略水的比热容变化的影响，取 $c = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，水的密度取 25 °C 时的值 $997 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，则式(1)可变换为

$$Q_n = 1\ 163 Q_m \Delta t \quad (2)$$

式中： Q_m 为冷冻水体积流量(m^3/h)； Δt 为冷冻水进出口温差(°C)。

冷凝器侧换热量即机组排热量，

$$Q_h = c q_{mw} (t_{w2} - t_{w1}) = 1\ 163 Q_{mw} \Delta t_w \quad (3)$$

式中： Q_h 为机组排给冷却水的总热量(W)； q_{mw} 为冷却水质量流量(kg/s)； t_{w1} 为冷凝器进水温度(°C)； t_{w2} 为冷凝器出水温度(°C)； Q_{mw} 为冷却水体积流量(m^3/h)； Δt_w 为冷却水进出口温差(°C)。

2 试验方法

机组的运行过程是一个动态的稳定过程，随着工况条件的变化而达到一个新的运行状态。由于这个变化过程及变化部分的制冷量不便测量，

为了模拟机组实际运行过程，在试验过程中均通过调节混入蒸发器侧水系统热水量，控制维持机组制冷量不变(相当于空调负荷一定)。因试验中保持制冷量不变，那么冷凝侧的放热量若有变化也是由于消耗功率的变化所引起，而引起消耗功率变化的因素是机组运行水温、水量的变化导致的蒸发温度的改变，最终反映在 EER 的变化上，具体方法是：依据 GB/T 18430.1—2007 规定的名义工况条件和试验方法，首先测得样机名义工况满负荷运行时，蒸发器和冷凝器的进/出水温度、循环水量等主要运行参数及机组制冷量、性能系数、压缩机排气温度、机组冷凝压力等性能参数，其次计算出保持测试样机制冷量不变时，不同冷冻水/冷却水温差值所对应的水流量值，测试得出不同冷冻水/冷却水流量下机组满负荷运行的各主要参数。

1) 冷冻水大温差试验

按照国家标准名义工况设计制作的冷水机组在名义工况下运行，当减小使用侧水流量(相当于冷冻水大温差)时，制冷量将减小，末端的供冷量减小，末端送、回风温度升高，继而末端供、回水温度升高，即机组的冷冻水进、出水温度均有升高，机组的制冷量部分回升而达到新的稳定运行工况。此时，机组蒸发温度会有所升高，冷凝侧放热量不会减少，故试验时保持冷凝器名义工况下的循环水量和进水温度不变。

2) 冷却水大温差试验

按照国家标准名义工况设计制作的冷水机组在名义工况下运行，当减小放热侧水流量(相当于冷却水大温差)时，机组冷凝温度将升高，制冷量减小，末端的供冷量减小，末端送、回风温度升高，继而末端供、回水温度升高，即机组的冷冻水进、出水温度均有所升高，机组的制冷量部分回升而达到新的稳定工况运行。此时，机组的冷凝温度和蒸发温度均升高，冷却水进水温度不会低于名义值，冷冻水进、出水温度均会升高，故设定：
① 冷凝器侧不同冷却水温差对应的冷却水流量值，同时通过调节进水量(试验过程中发现进水量几乎不用调节，冷却水进、出水温均升高，出水温升幅度大于进水温升幅度)保持冷凝器进水温度不低于名义工况值；
② 蒸发器侧循环水量保持不变。

3) 冷冻水和冷却水同时大温差试验

由冷冻水大温差试验方法和冷却水大温差试验

方法,分别测试不同冷冻水大温差对应不同冷却水大温差时机组满负荷运行的上述各主要参数。

试验过程中,保持测试样机的运行控制参数(依机组设计工况而设定)不变,至样机不能正常运行时不做任何调整,样机运行中不会出现保护性停机,每一种大温差的试验均为连续过程,不同大温差的试验过程之间有间歇。按照国家标准名义工况设计制作的冷水机组和末端在大温差条件下,用户侧空调

温度随温差的增大而升高,会偏离设计值或达不到设计要求。具体偏离情况作为一个课题留待以后研究,目前仅考察机组有关参数的变化。

3 试验结果及分析

3.1 冷冻水大温差试验结果

将冷冻水流量分别调整到满足冷冻水进、出口温差 6 °C, 7 °C, 8 °C, 9 °C 和 10 °C 时的值,得到各参数的变化情况,见表 1。

表 1 冷冻水大温差试验数据

冷冻水进出水温差/°C	5	6	7	8	9	10
冷却水进水实测温度/°C	30.13	30.11	30.21	30.11	30.14	30.15
冷却水出水实测温度/°C	35.06	35.07	35.23	35.15	35.10	35.20
冷冻水进水实测温度/°C	12.09	12.93	14.26	15.11	16.65	17.56
冷冻水出水实测温度/°C	7.16	7.06	7.32	7.24	7.87	7.87
冷凝压力/bar	14.1	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
压缩机排气温度/°C	68.2	68.0	68.0	68.0	68.0	67.9
EER	4.56	4.58	4.56	4.57	4.57	4.57

由表 1 可得:

1) 随着机组冷冻水进出水温差从 5 °C 逐渐增大至 10 °C, 冷冻水进、出水温度逐渐升高, 冷冻水的进水温度升高的幅度较大, 从进出水温差 5 °C 时的 12.09 °C 升高至进出水温差 10 °C 时的 17.56 °C;

2) 冷冻水出水温度在进出水温差从 5 °C 逐渐增大至 10 °C 时升高的幅度较小, 从 7.16 °C 升高至 7.87 °C;

3) 机组的 EER 值在冷冻水不同大温差时, 基本维持在 4.60 左右, 其微小波动幅度是因测试工况参数在正常范围内的波动所引起。

另外, 冷冻水出水温度在冷冻水温差为 6 °C 和 8 °C 时略微下降, 在温差为 10 °C 时, 较 9 °C 时无

变化。由测试数据发现, 在冷冻水进出水温差为 6 °C, 8 °C 和 10 °C 时, 样机测试制冷量较标准工况下测试制冷量降低了约 1.2%。因此可以认为, 冷冻水出水温度随着冷冻水进出水温差的增大, 应逐渐升高, 但温升不明显。同时从测试数据还发现, 在冷冻水进出水温差由 6 °C 增大到 10 °C 时, 压缩机排气温度维持在 67~68 °C, 机组冷凝压力维持在 14.0~14.1 bar, 对应的冷凝温度约 39 °C。

3.2 冷却水大温差试验结果

类似冷冻水大温差的试验, 试验过程中, 将冷却水流量分别调整到满足冷却水温差 6 °C, 7 °C, 8 °C, 9 °C 和 10 °C 时的值, 各参数随冷却水温差的变化情况如表 2 所示。

表 2 冷却水大温差试验数据

冷却水进出水温差/°C	5	6	7	8	9	10
冷却水进水实测温度/°C	30.13	30.14	30.10	30.17	30.21	30.21
冷却水出水实测温度/°C	35.06	36.12	37.20	38.32	39.50	40.64
冷冻水进水实测温度/°C	12.09	12.39	12.81	12.87	13.54	13.92
冷冻水出水实测温度/°C	7.16	7.44	7.81	7.80	8.59	8.94
压缩机排气温度/°C	68.2	70.0	72.0	73.6	77.0	78.0
冷凝压力/bar	14.1	14.4	14.9	15.1	15.8	16.0
EER	4.56	4.46	4.32	4.19	4.03	3.96

由表 2 可知:

1) 随着机组冷却水进出水温差从 5 °C 增大至 10 °C, 冷冻水进、出水温度升高, 但升高得不太明显, 温度升高幅度均在 2 °C 以内;

2) 机组的 EER 值在冷却水进出水温差增大时呈明显下降趋势;

3) 压缩机的排气温度随冷却水进出水温差的

增大同步升高, 但未到压缩机喷液冷却控制设定温度;

4) 机组冷凝压力随冷却水进出水温差的增大同步升高, 但远低于高压保护设定值及压缩机运行范围限值。

另外, 冷冻水出水温度在冷却水进出水温差为 8 °C 时较温差为 7 °C 时略微下降, 系测试工况在

正常范围内波动所致,冷冻水出水温度随冷却水温差增大而升高的趋势不变。在温差为 13 °C 时, EER 值约为 3.75, 低于 GB 19577—2004《冷水机组能效限定值及能源效率等级》^[3] 的规定值。由于试验装置的调节因素, 本次未做该工况的试验。

3.3 冷冻水和冷却水均为大温差试验结果

依前述试验方法, 分别测得不同冷冻水进出水温差 6 °C, 7 °C, 8 °C, 9 °C 和 10 °C 时对应不同冷却水进出水温差 6 °C, 7 °C, 8 °C, 9 °C 和 10 °C 时, 各参数随水温差的变化情况, 如图 4 所示。

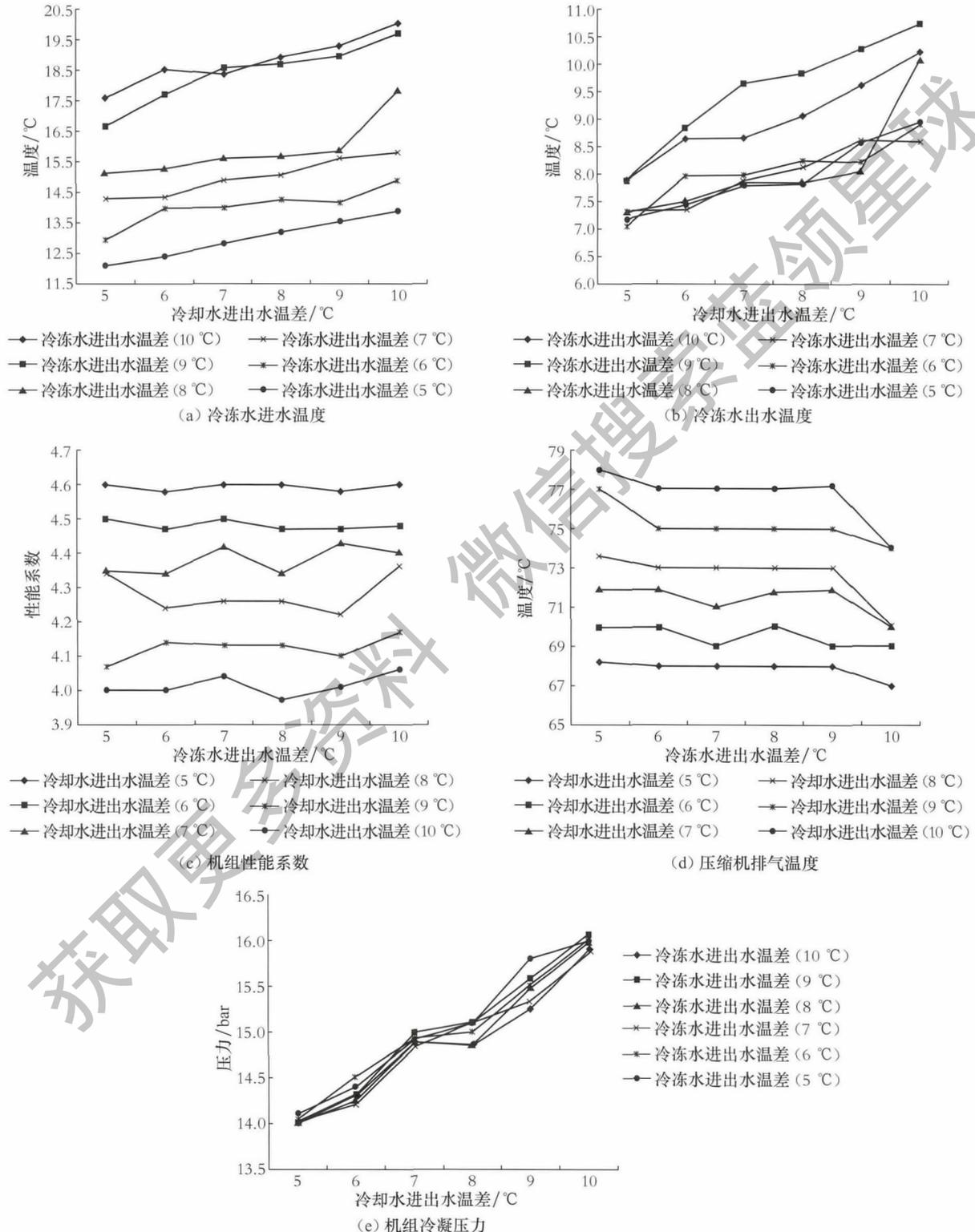


图 4 冷却水、冷冻水进出水温差变化测试数据

由图 4 可以看出:

1) 冷冻水进、出水温度随冷冻水和冷却水温差的增大而升高,随冷冻水温差增大升高幅度大,随冷却水温差增大升高幅度小,但较冷冻水和冷却水单一温差时升高幅度要大。

2) 机组性能系数随冷冻水温差的增大基本不变,随冷却水温差的增大而降低;但随冷冻水温差不同波动幅度不同,且随冷却水温差增大波动幅度有增大趋势。究其原因:一是测试工况在正常范围内波动的影响;二是随着温差的增大,机组运行的平稳性可能有所变化,需要进一步研究分析。

3) 压缩机排气温度随冷却水温差的增大而升高,随冷冻水温差增大基本不变,在冷冻水温差为 10 °C 且冷却水温差 7 °C 及以上时有明显下降,系对吸气过热度调整的原因。

4) 机组冷凝压力随冷却水温差增大而升高;随冷冻水温差增大基本不变,在冷却水温差为 7 °C 及以上时有波动。

冷冻水和冷却水同时大温差试验结果与单一大温差试验结果,所揭示的机组运行特性和变化规律相符。在冷冻水温差 10 °C,冷却水温差为 7 °C,8 °C,9 °C 和 10 °C 时,测试样机回油效果变差,对其过热度控制值进行调整,以保证测试的安全进行,这从图 4(c)~(e)参数的变化可以看出其相符性。

3.4 试验结果定性分析

水温差的变化对机组运行和性能参数的影响见表 3。

1) 从节能角度考虑,随着冷冻水温差的增加,冷冻水泵流量减小,可节省冷冻水泵的初期投资,冷冻水泵的运行费用可以降低。但冷冻水进水温度会明显升高,势必会使末端设备换热面积或风量增大,又增加了末端设备的初期投资。

(下接第 95 页)

3) 通过提升安全阀动作压力、增加膨胀水箱容积,可改善现场安装高度差较大、水系统体积超标的情况。

参考文献

- [1] 王荣光. 低温地板辐射采暖[J]. 煤气与热力, 1999 (4): 53-55.
- [2] ASHRAE. 2000 ASHRAE handbook. HVAC systems and equipment.
- [3] 高养田. 闭式水系统膨胀水箱的选用[J]. 暖通空调,

表 3 水温差变化对主要运行和性能参数的影响

运行参数	冷冻水大温差	冷却水大温差	冷冻/冷却水均大温差
冷冻水进水温度	明显升高	略有升高	明显升高
冷冻水出水温度	略有升高	略有升高	明显升高
机组性能系数	基本不变	明显降低	明显降低
压缩机排气温度	基本不变	明显升高	明显升高
机组冷凝压力	基本不变	明显升高	明显升高

2) 冷却水温差的增加,会使冷却水泵的流量减小,可节省冷却水泵的初期投资,冷却水泵的运行费用可以降低;但冷冻水进水温度会略微升高,在进行空调末端设计选型时,需要考虑末端设备换热面积或风量的增大,可能增加末端设备的初期投资。而单从机组的节能方面考虑,能效比是明显降低的。

3) 在冷冻水温差达到 9 °C 时,随着冷却水温差的增大,机组运行的稳定性及回油效果变差。因此,以国家标准设计制造的水冷式冷水机组大温差运行范围以不超过 10 °C 为宜。

4 结束语

采用大温差水系统进行空调系统设计时,应当以工程的实际情况,考虑工程初投资成本和综合能效以及系统运行的稳定性,确定采用何种大温差形式。

参考文献

- [1] 蒸气压缩循环冷水(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:GB/T 18430.1—2007[S].
- [2] 蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法:GB/T 10870—2014[S].
- [3] 冷水机组能效限定值及能源效率等级:GB 19577—2004[S].
- [4] 张鑫. 低温热水地面辐射采暖用定压膨胀水箱选型算法[J]. 建筑节能, 2012, 40(5): 26-28.
- [5] 住房和城乡建设部工程质量安全监管司, 中国建筑标准设计研究院. 全国民用建筑工程设计技术措施(2009)暖通空调·动力[S].
- [6] NIST. REFPROP standard reference database 23. NIST Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures[S]. Version 7. 0. USA: Thermophysical Division, National Institute of Standards and Technology, 2002.