

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.010



冬季空调不加湿对室内参数的影响

赵玲玲¹, 王辉涛¹, 秦进², 葛众³, 韩金蓉¹

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省城乡规划设计研究院, 昆明 650228);
3. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084

摘要:基于质量守恒方程导出了冬季空调系统不加湿时房间内的含湿量计算式, 综合考虑影响室内含湿量的主要因素, 得出冬季空调可以不加湿时应满足的条件, 考察了中国典型气候区代表性空调房间冬季空调不加湿时室内相对湿度能否满足设计要求。研究表明: 中国各地区的商场, 夏热冬冷地区的餐厅及三星级及以下酒店多功能厅, 夏热冬暖地区的影剧院、办公室、酒店客房及多功能厅、餐厅, 温和地区的办公室、三星级及以下酒店客房、酒店多功能厅及餐厅空调系统不加湿即可达到设计湿度要求; 严寒地区及寒冷地区的影剧院、办公室、酒店客房、酒店多功能厅及餐厅, 夏热冬冷地区的影剧院、办公室、酒店客房、四星级及以上酒店多功能厅以及温和地区的影剧院、四星级及以上酒店客房等房间的空调系统必须加湿才能达到设计要求。

关键词:质量守恒; 空调; 加湿; 相对湿度; 气候分区

中图分类号: TU831.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)04-0063-08

Humidity analysis of air-conditioned rooms without humidification in winter

Zhao Lingling¹, Wang Huitao¹, Qin Jin², Ge Zhong³, Han Jinrong¹

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China; 2. Urban & Rural Planning & Design Institute of Yunnan, Kunming 650228, P. R. China; 3. Key Laboratory for Thermal Science Power Engineering of MOE, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: Based on the mass conservation equation, the calculation formula of the moisture content in the air-conditioned room without humidification in winter are deduced. Synthetically considering major influencing factors of the indoor moisture content, the criterion used to estimate the relative humidity of air-conditioned rooms without humidification in winter are established. Furthermore, the relative humidity in typical air-conditioned rooms without humidification in typical climate regions in winter is checked against the criterion. The main conclusions are as follows: the relative humidity of air-conditioned supermarket all around our country, restaurants and the multi-purpose halls of 3-star and below 3-star hotel in the “hot summer and cold winter” climatic region, movie theaters, office, the bedrooms and multi-purpose halls of hotel, restaurants in the “hot summer and warm winter” climatic region, and office, the

收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51366005, 51066002)

作者简介: 赵玲玲(1993-), 女, 主要从事空调及建筑节能研究, E-mail: zhaoll613@sina.com。

王辉涛(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: energywht@sina.com。

Received: 2017-09-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51366005, 51066002)

Author brief: Zhao Lingling (1993-), main research interests: air-conditioning and building energy saving, E-mail: zhaoll613@sina.com.

Wang Huitao (corresponding author), professor, PhD, E-mail: energywht@sina.com.

bedrooms of 3-star and below 3 star hotel, the multi-purpose halls of hotel and restaurants in the “mild” climatic region can meet the required value without humidification. But, the relative humidity of air-conditioned movie theaters, office, the bedrooms and multi-purpose halls of hotel and the restaurants in the “cold” and “severe cold” climatic region, movie theaters, office, the bedrooms of hotels, and the multi-purpose halls of 4 star and over 4 star hotels in the “hot in summer and cold in winter”, and movie theaters, the bedrooms and multi-purpose halls of 4-star and over 4-star of hotels in the “mild” climatic region can not meet the required value without humidification.

Keywords: mass conservation; air-conditioning; humidification; relative humidity; climatic regions

近年来,中国各地的酒店客房、多功能厅、餐厅、影剧院及商场等功能性房间加设中央空调系统,以保证房间温度、湿度、新风量等参数达到室内设计要求。相对湿度是影响人体舒适性的一个重要设计参数,主要影响人体皮肤表面的蒸发散热^[1],尤其在冬季,当室内相对湿度太低时,一方面会使人体的皮肤因缺少水分而变得粗糙甚至开裂,降低人体对疾病的免疫力^[2];另一方面使人体产生静电,静电可能引起人体心率异常,诱发早搏^[3],也可能使血液中的碱性升高,影响人的机体生理平衡^[4],还可能引起脑神经细胞电流传导异常,影响人的中枢神经,使人感到疲劳、烦躁等。当室内湿度太高时,会影响人体舒适感以及为室内环境中的细菌、霉菌及其他微生物提供了生长繁殖条件,加剧室内微生物污染,导致人体容易患呼吸道或消化道疾病^[5]。冬季室内相对湿度若能在不加湿的情况下达到设计要求,一方面能降低设备造价,另一方面能节省运行维护成本,对空调系统具有较大益处。

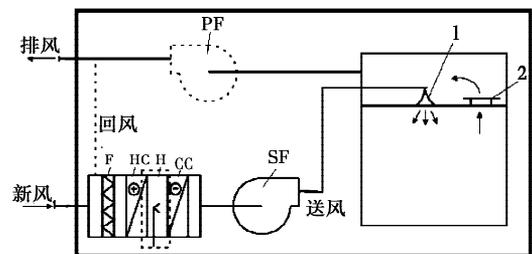
学者们对空调系统加湿特性做了大量研究,刘乃玲等^[6]用实验法研究了风机盘管加湿膜空调系统对房间温湿度的影响规律及该系统对室内温湿度的改善程度;徐宏庆等^[7]根据风机盘管热湿交换机理,对空调变工况运行时房间的含湿特性进行了分析;Ghazikhani等^[8]选取特定房间研究了通风空调系统中等焓加湿和等温加湿过程中的能量消耗量和有效能损失;Sobrinho等^[9]采用实验的方法量化研究了相对湿度对空调系统性能系数(COP)的影响;Shailendra等^[10]针对炎热干燥地区蒸汽蒸发-压缩的组合式空调系统进行了热力学及舒适性分析;Zhang等^[11]研究了冬季太阳能驱动的热湿交换系统对室内温度及湿度的影响机理。通过查阅文献可知,目前尚缺乏针对中国各气候区冬季空调系统不加湿对室内含湿量及相对湿度影响方面的研究。

中国的气候多样化,按气候不同将中国分为严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区以

及温和地区,各气候区室外环境各不相同,设计人员在设计空调时,应该充分考虑当地气候区的特殊性,分析空调系统的热湿性,争取在满足设计要求的条件下,尽量简化空调系统,降低系统造价。本文基于房间内湿空气含湿量质量守恒方程分析空调房间内含湿特性,并对中国不同地区功能房间冬季空调系统不加湿的条件进行探讨。

1 冬季空调系统不加湿应满足的条件

取空调系统及房间为控制体,如图1所示。



注: 1.送风口; 2.回风口; F.空气过滤器; HC.加热盘管; H.加湿器; CC.表冷器; SF.送风机; PF.排(回)风机

图1 全新风(一次回风)空调系统

Fig.1 Fresh air (return air) air-conditioning system

以空调房间为开式系统进行湿量质量守恒分析,忽略房间围护结构表面传湿时

$$\begin{cases} \frac{\partial(M_N d_N)}{\partial \tau} = \dot{M}_0 (d_w - d_N) + G \\ d_N |_{\tau=0} = d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_N 为空调房间内空气总质量, kg; d_N 为空调房间内空气含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干空气; \dot{M}_0 为空调系统新、排风量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; d_w 为新风含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干空气; G 为空调房间湿负荷, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; d_0 为房间初始含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干空气。当房间处于稳定状态时,房间内的空气质量 M_N 是一个定值,故方程转化为

$$M_N \frac{d(d_N)}{d\tau} = \dot{M}_0 (d_w - d_N) + G \quad (2)$$

导出室内含湿量的计算式为

$$d_N = d_w + \frac{G}{\dot{M}_o} + \left(d_0 - d_w - \frac{G}{\dot{M}_o} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\dot{M}_o}{\dot{M}_N} \tau\right) \quad (3)$$

式中: d_w 与所处气候区有关; G, \dot{M}_o, \dot{M}_N 是与空调房间的设计参数及室内人员活动有关的量, 计算公式为

1) 空调房间内湿负荷^[12]

$$G = G_r + G_s + G_z \quad (4)$$

其中:

$$G_r = n\beta g \quad (5)$$

$$G_s = 3.33n \cdot \beta \times 10 - 6 \quad (6)$$

$$G_z = 0.278F_r \cdot g_z \times 10 - 3 \quad (7)$$

式(4~7)中: G_r 为室内人员散湿量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; G_s 为食物散湿量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 一般除餐厅外, 其余房间的 $G_s = 0$ ^[12]; G_z 为敞开水表面蒸发量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 对于敞开水表面积较大的房间(游泳池)需要计算敞开水表面蒸发量, 其余房间 $G_z = 0$; g 为室内单个人员的散湿量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; β 为群集系数, 取值见表 1^[12]; n 为室内总人数; F_r 为蒸发表面积, m^2 , 3 星级及以下酒店餐厅中 $F_r = 2.5$, 4 星级及以上酒店餐厅中 $F_r = 4$ ^[12]; g_z 为水面的单位蒸发量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 空调建筑物内的群集系数

Table 1 The cluster coefficient in air conditioning buildings

工作场所	影剧院	商场	酒店	餐厅
群集系数	0.89	0.89	0.93	0.93

2) 新风、排风量

$$\dot{M}_o = V_{\min} \cdot \rho_g \cdot n \quad (8)$$

式中: ρ_g 为新风空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V_{\min} 为最小新风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$ 。

3) 空调房间内总空气质量

$$M_N = A_N \cdot h \cdot \rho_N \quad (9)$$

式中: A_N 为房间的面积, m^2 ; h 为房间的高度, m ; ρ_N 为室内空气的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 计算式为^[13]

$$\rho_N = 0.003484 \frac{B}{273.15 + t_N} - 0.00134 \frac{P_{\text{bq}}}{273.15 + t_N} \quad (10)$$

式中: P_{bq} 为干球温度下水蒸汽的饱和压力, Pa ; B 为当地大气压, Pa ; T 为房间内设计温度, $^{\circ}\text{C}$ 。得出非餐厅类房间的含湿量的函数表达式为

$$d_N = d_w + \frac{\beta \cdot g}{V_{\min} \cdot \rho_g} + \left(d_0 - d_w - \frac{\beta \cdot g}{V_{\min} \cdot \rho_g} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot V_{\min} \cdot P_F}{h} \tau\right) \quad (11-1)$$

餐厅内的含湿量函数表达式为

$$d_N = d_w + \frac{\beta \cdot g'}{V_{\min} \cdot \rho_g} + \left(d_0 - d_w - \frac{\beta \cdot g'}{V_{\min} \cdot \rho_g} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot V_{\min} \cdot P_F}{h} \tau\right) \quad (11-2)$$

式中: P_F 为室内人员密度, $\text{人} \cdot \text{m}^{-2}$; α 为新风空气密度与室内空气密度之比; $g' = g + 3.3 \times 10^{-6}$; 当室内温度达到设计温度且室内参数趋于稳定时, 非餐厅类房间含湿量为

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} d_N = d_w + \frac{\beta \cdot g}{V_{\min} \cdot \rho_g} \quad (12-1)$$

餐厅类房间含湿量为

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} d_N = d_w + \frac{g' \cdot \beta}{V_{\min} \cdot \rho_g} \quad (12-2)$$

由式(12)可知, 对不加湿的空调房间, 影响冬季室内含湿量的因素有新风含湿量、新风空气密度、群集系数、新风量、室内单个人员散湿量; 新风含湿量、群集系数及室内单个人员散湿量越大, 稳定时含湿量越大; 新风空气密度及新风量越小, 稳定时含湿量越大; 而影响含湿量增加速度的因素有初始时刻含湿量、新风含湿量、群集系数、单个人员的散湿量、室内外空气密度、新风量、室内人员密度以及房间高度; 新风含湿量、群集系数、人员密度、室内单个人员散湿量及新风与室内空气密度比越大, 含湿量增长越快; 初始时刻含湿量越小, 房间高度越低, 含湿量增长越快。

房间湿空气相对湿度的计算为

$$\varphi_N = \frac{d_N \cdot B}{(0.622 + d_N) \cdot P_{\text{bq}}} \quad (13)$$

用 Clapeyron 方程^[14]计算湿空气的饱和蒸汽压力与温度的关系。

$$\begin{cases} \ln P_r = (9.031645 + 2.993 \times (1 - t_r)^{1.89} + 47.5 \times (1 - t_r)^{5.67}) \ln t_r \\ P_r = \frac{P_{\text{bq}}}{P_c}, t_r = \frac{t_n + 273.15}{t_c} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $t_c = 647.35 \text{ K}$, $P_c = 22103000 \text{ Pa}$ 。

根据规范要求的冬季空调房间室内设计参数范围: $30\% \leq \varphi_N \leq 60\%$, 以设计范围的中点 45% 为设计相对湿度, 即可得到不加湿时若要达到室内设计要求, 室内相对湿度需要满足的条件。

$$|\varphi_N - \varphi_0| \leq 15\% \quad (15)$$

式中: φ_0 为室内设计相对湿度。

故可得非餐厅类房间相对湿度要满足的条件为

$$\left| \frac{d_w \cdot V_{\min} \cdot \rho_g + g \cdot \beta}{(0.622 + d_w) \cdot V_{\min} \cdot \rho_g + g \cdot \beta} \cdot \frac{B}{P_{\text{bq}}} - \varphi_0 \right| \leq$$

$$15\% \quad (16a)$$

餐厅类房间相对湿度要满足的条件为:

$$\left| \frac{d_w \cdot V_{\min} \cdot \rho_g + g' \cdot \beta}{(0.622 + d_w) \cdot V_{\min} \cdot \rho_g + g' \cdot \beta} \cdot \frac{B}{P_{bq}} - \varphi_0 \right| \leq 15\% \quad (16b)$$

由此可见,若不加湿室内相对湿度满足条件(16),则空调系统可以不加湿便能满足设计要求,反之,若不满足该条件,则空调系统必须加湿方能满足设计要求。

2 各气候区典型房间冬季空调系统不加湿的分析

通过对各建筑热工设计分区的地域特点进行分析,严寒地区选取哈尔滨市和乌鲁木齐市两个代表

城市,寒冷地区选取北京市为代表城市,夏热冬冷地区选取武汉市为代表城市,夏热冬暖地区选取广州市为代表城市,温和地区选取昆明市为代表城市以研究冬季不加湿对室内参数的影响。按《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012),查得不同气候区代表城市的空调设计室外空气计算参数。

假定房间初始含湿量与新风含湿量相等,在式(16)的基础上分别选取影剧院、商场、办公室、餐厅(宴会厅)酒店客房及多功能厅等典型的功能性空调房间分析空调系统冬季不加湿时室内含湿特性。不同功能性房间的设计参数不同,各空调房间室内设计参数见表 2^[15]。

表 2 各房间室内设计参数表
Table 2 The design parameters of rooms

房间类型	$t_N / ^\circ\text{C}$	$\varphi_0 / \%$	$V_{\min} / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{人}^{-1})$	$P_F / (\text{人} \cdot \text{m}^{-2})$	h / m	$g / (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{人}^{-1})$	
影剧院	21	45	20	1.00	8.0	0.040	
商场	19	45	16	0.85	5.0	0.134	
办公室	20	45	30	0.25	3.4	0.069	
三星级及以下	客房	21	45	30	0.16	2.8	0.076
	多功能厅	21	45	12	0.62	5.0	0.076
	餐厅	21	45	25	0.67	3.0	0.076
四星级及以上	客房	23	45	40	0.10	2.8	0.089
	多功能厅	23	45	14	0.39	5.0	0.089
	餐厅	23	45	30	0.40	3.0	0.089

图 2~图 7 是根据式(11)计算所得各气候区典型房间的含湿量随时间的变化曲线。

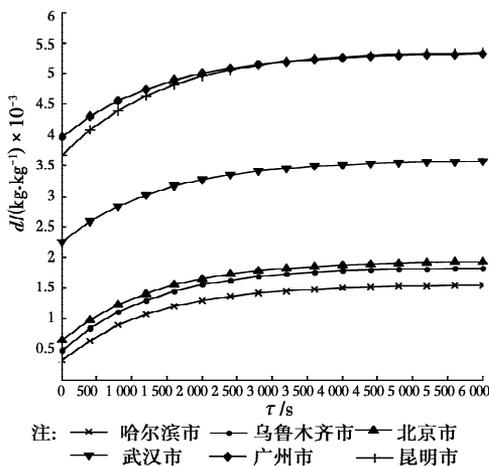


图 2 影剧院室内含湿量随时间的变化曲线

Fig. 2 The upward curves of moisture content in theater

如图 2,当时间达到 4 500 s 时,影剧院内空气参数基本趋于稳定状态,虽然影剧院人员密度大,但因

建筑高度高,最小新风量大,故含湿量随时间变化速度慢,曲线比较平缓,稳定状态时室内含湿量较小。

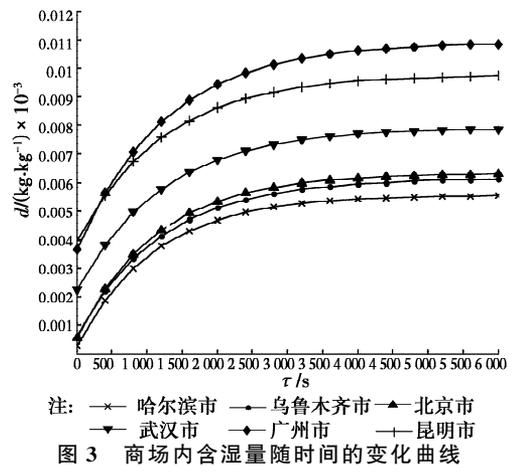
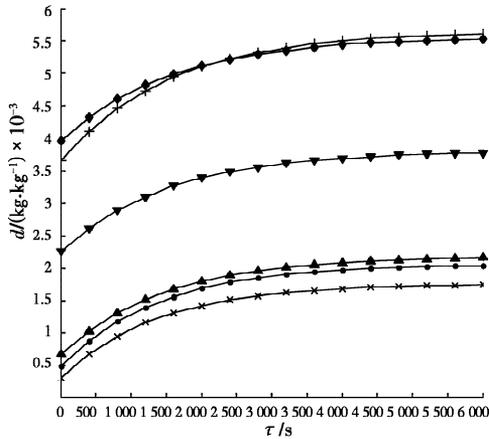


图 3 商场内含湿量随时间的变化曲线

Fig. 3 The upward curves of moisture content in mall

如图 3,当时间达到 4 000 s 时,商场内空气参数基本趋于稳定。商场的人员密度大,新风量小,故含湿量随着时间的增加速度较快,商场内空气参数达

到稳定时含湿量较大。

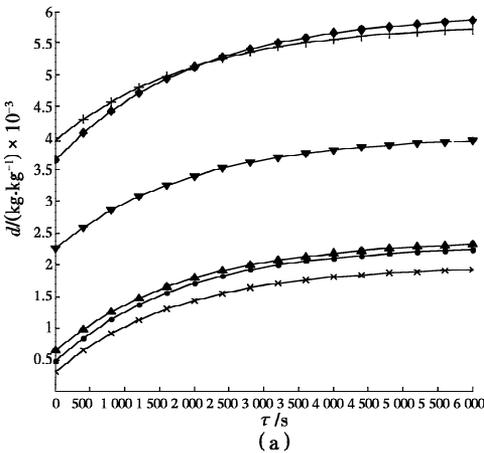


注: —×— 哈尔滨市 —○— 乌鲁木齐市 —▲— 北京市
—▼— 武汉市 —◆— 广州市 —⊕— 昆明市

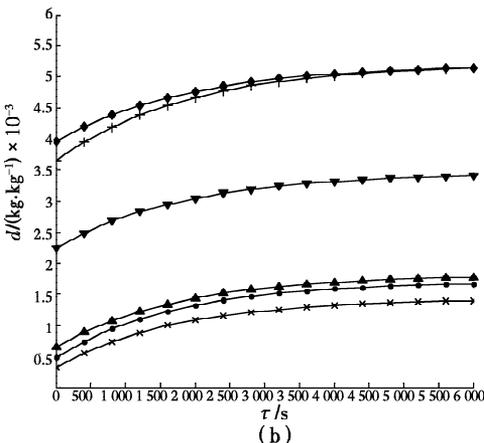
图 4 办公室内含湿量随时间的变化曲线

Fig. 4 The upward curves of moisture content in office

如图 4,当时间达到 4 400 s 时,商场内空气参数基本趋于稳定。办公室的人员密度小,新风量大,故含湿量随着时间上升速度较慢,商场内空气参数达到稳定时含湿量较小。



(a)



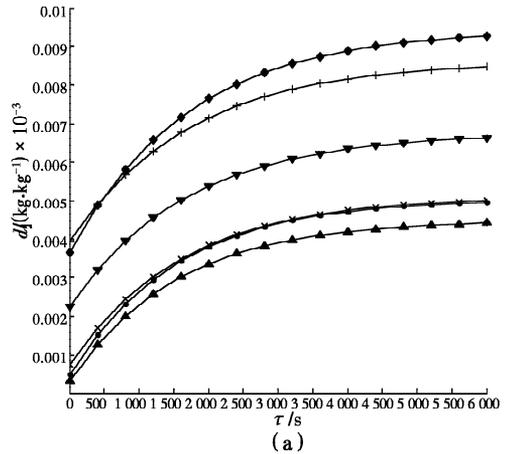
(b)

注: —×— 哈尔滨市 —○— 乌鲁木齐市 —▲— 北京市
—▼— 武汉市 —◆— 广州市 —⊕— 昆明市

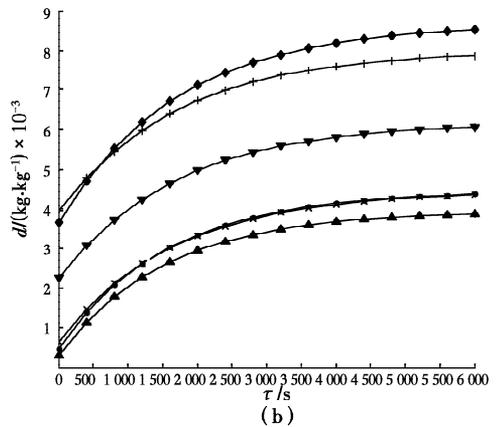
图 5 不同星级酒店客房含湿量随时间变化曲线

Fig. 5 The upward curves of moisture content in rooms of hotel

如图 5,当时间达到 5 000 s 时,酒店客房内空气参数基本趋于稳定。酒店客房内人员密度小,人员散湿量小,故含湿量随着时间变化速度慢,曲线比较平缓;与四星级及以上酒店客房相比,三星级及以下酒店客房新风量小,故三星级及以下酒店客房的室内含湿量增长速度更快,达到稳定时室内含湿量也更大。



(a)



(b)

注: —×— 哈尔滨市 —○— 乌鲁木齐市 —▲— 北京市
—▼— 武汉市 —◆— 广州市 —⊕— 昆明市

图 6 不同星级多功能厅内含湿量随时间变化曲线

Fig. 6 The upward curves of moisture content in the multi-purpose halls of hotel

如图 6,当时间达到 3 800 s 时,酒店多功能厅内空气参数基本趋于稳定。多功能厅内人员密度及人员散湿量较大,房间高度低,故含湿量增长速度较快;与四星级及以上酒店多功能厅相比,三星级及以下酒店多功能厅新风量较小,故三星级及以下酒店多功能厅内含湿量增长速度更快,稳定时含湿量更大。

如图 7,当时间达到 2 500 s 时,餐厅(宴会厅)内空气参数基本趋于稳定。一般的餐厅(宴会厅)都需要配备中西餐,餐厅湿负荷包括人员散湿量和食物散湿量,餐厅内人员密度较大,房间高度较低,故含

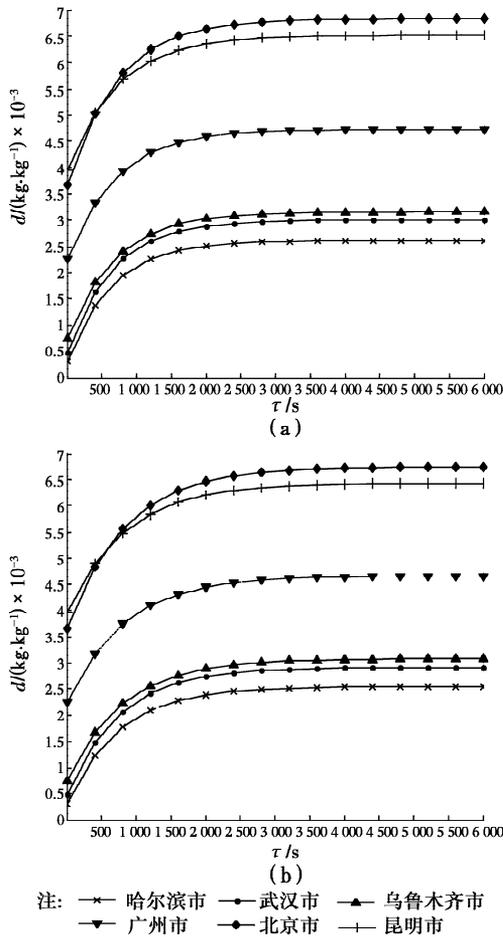


图 7 不同星级餐厅(宴会厅)内含湿量随时间变化曲线
Fig. 7 The upward curves of moisture content in restaurant

湿量随着时间的增加速度较快;与四星级及以上餐厅相比,三星级及以下餐厅新风量较小,故三星级及以下餐厅内含湿量增长速度更快,稳定时含湿量更大。

对大多数功能房间来说,当室内空气相对湿度为 $30\% \leq \varphi \leq 60\%$ 时满足设计要求,本文将相对湿度 $\varphi < 30\%$ 看作“干燥”,将相对湿度为 $\varphi > 60\%$ 看作“湿润”。根据此界定,在冬季空调不加湿情况下,主要气候区各房间空调系统达到稳定时的相对湿度计算及评价情况见表 3 及表 4。

表 3 各气候区影剧院及商场内相对湿度及评价表
Table 3 The relative humidity and evaluation table of mall and theater all around our country

城市	影剧院 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性	商场 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性	办公室 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性
哈尔滨市	9.72	干燥	46.65	满足设计	11.71	干燥
乌鲁木齐市	10.83	干燥	48.33	满足设计	12.80	干燥
北京市	12.57	干燥	52.23	满足设计	15.47	干燥

续表 3

城市	影剧院 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性	商场 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性	办公室 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性
武汉市	23.72	干燥	66.30	湿润	26.62	干燥
广州市	34.69	满足设计	81.03	湿润	38.28	满足设计
昆明市	27.65	干燥	72.05	湿润	31.06	满足设计

表 4 各气候区酒店客房、多功能厅及餐厅内相对湿度及评价表

Table 4 The relative humidity and evaluation of bedrooms and multi-purpose halls of hotels and restaurants all around our country

房间类型	城市	三星级及以上 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性	四星级及以上 $\varphi_N/\%$	空气 干湿性
酒店客房	哈尔滨市	13.52	干燥	9.22	干燥
	乌鲁木齐市	14.63	干燥	10.16	干燥
	北京市	16.66	干燥	11.85	干燥
	武汉市	28.38	干燥	22.14	干燥
	广州市	40.69	满足设计	32.98	满足设计
酒店多功能厅	昆明市	33.16	满足设计	26.35	干燥
	哈尔滨市	19.52	干燥	15.02	干燥
	乌鲁木齐市	20.73	干燥	16.03	干燥
	北京市	23.14	干燥	18.04	干燥
	武汉市	35.05	满足设计	28.52	干燥
餐厅	广州市	47.55	满足设计	41.51	满足设计
	昆明市	40.05	满足设计	32.81	满足设计
	哈尔滨市	22.27	干燥	16.66	干燥
	乌鲁木齐市	23.52	干燥	17.72	干燥
	北京市	26.08	干燥	19.83	干燥
餐厅	武汉市	38.06	满足设计	30.34	满足设计
	广州市	50.64	满足设计	42.38	满足条件
	昆明市	42.98	满足设计	34.65	满足设计

由表 3、表 4 可知,在广州市设计影剧院空调系统时,不加湿即可满足设计要求;中国各地区的商场空调系统冬季室内湿度不加湿便可满足设计要求;在武汉市、广州市、昆明市不加湿时冬季商场相对湿度已超过设计范围,需要采取适当的除湿措施方能达到设计要求;在广州市及昆明市设计办公室及三星级及以下酒店客房以及在广州市设计四星级及以上酒店客房空调系统时,不加湿即可满足设计要求,在武汉市、广州市、昆明市设计三星级及以下酒店多功能厅及餐厅空调系统时,在广州市及昆明市设计四星级及以上酒店多功能厅空调系统时不加湿即可满足设计要求,除此之外的影剧院、办公室、酒店客

房及多功能厅以及餐厅空调系统冬季均需要加湿方能达到设计要求。

3 结论

基于房间内湿空气含湿量质量守恒方程分析空调房间内含湿特性,并对中国不同地区功能房间冬季空调系统不加湿的条件进行分析,得出以下结论:

1)中国各气候区的商场、以武汉为代表的夏热冬冷地区的餐厅及三星级及以下酒店多功能厅,以广州为代表的夏热冬暖地区的影剧院、办公室、酒店客房、酒店多功能厅及餐厅(宴会厅)以及以昆明市为代表的温和地区的办公室、三星级及以下酒店客房、多功能厅及餐厅(宴会厅)的空调系统不加湿时冬季室内相对湿度便能满足设计要求。

2)以武汉市为代表的夏热冬冷地区、以广州市为代表的夏热冬暖地区、以昆明市为代表温和地区商场空调系统在冬季不加湿时室内相对湿度已超过设计范围,尚需采用适当的除湿措施方能达到设计要求。

3)以哈尔滨市和乌鲁木齐市为代表的严寒地区、以北京市为代表的寒冷地区的影剧院、办公室、酒店客房、酒店多功能厅及餐厅(宴会厅),以武汉市为代表的夏热冬冷地区的影剧院、办公室、酒店客房、四星级及以上酒店多功能厅,以及以昆明市为代表的温和地区的影剧院、四星级及以上酒店客房等房间的空调系统需要设置加湿措施以达到设计要求。

参考文献:

[1] 袁萌,王彦淞.室内空气温湿度对人体热舒适性影响的实验研究[J].建筑节能,2014(8):17-20.
YUAN M, WANG Y S. Experimental research on impact of indoor air temperature and humidity on Human thermal comfort [J]. Building Energy Efficiency,2014(8): 17-20. (in Chinese)

[2] 徐昆仑.低湿对人体舒适感影响的实验研究[D].重庆:重庆大学,2016:17-19.
XU K L. Effect of low air humidity on human comfort sensation[D]. Chongqing:Chongqing University,2016: 17-19. (in Chinese)

[3] 李金梅,朱鸣,李强,等.环境温湿度对人体静电电位影响的实验研究[J].消防科学与技术,2014(12):1370-1373.
LI J M, ZHU M, LI Q, et al. Experimental study on human body electrostatic potential effect by environmental temperature and humidity [J]. Fire Science and Technology, 2014 (12): 1370-1373. (in

Chinese)

[4] 任召峰.静电危害及防护[J].现代电子技术,2010,33(21):203-206.
REN Z F. Damage and prevention of static electricity [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(21): 203-206. (in Chinese)

[5] 严汉彬,丁力行.控制空调系统微生物污染的温湿度条件分析[J].制冷与空调,2011,11(2):14-17.
YAN H B, DING L X. Analysis of conditions of temperature and humidity to control microbial contaminant in air-conditioning system [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2011, 11(2): 14-17. (in Chinese)

[6] 刘乃玲,蔡芳芳,吕金全.风机盘管湿膜加湿器对房间温湿度影响的实验研究[J].山东建筑大学学报,2012,27(2):147-151.
LIU N L, CAI F F, LV J Q. Experimental research on the influence of room temperature and relative humidity by fan coil unit with wet film humidifier[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2012, 27(2): 147-151. (in Chinese)

[7] 宋阳光,吴志湘,王谦.传统常用空调系统冬季新风处理的分析与研究[J].发电与空调,2015(3):40-43.
SONG Y G, WU Z X, WANG Q. Fresh air processed analysis and studies for common air condition system [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2015(3): 40-43. (in Chinese)

[8] GHAZIKHANI M, KHAZAEI I, VAHIDIFAR S. Energy analysis of two humidification process methods in air-conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2016, 124: 129-140.

[9] SOBRINHO P M, TUNA C E. Experimental research on the influence of the air humidity conditions in an air conditioning system [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 49: 152-159.

[10] CHAUHANS S, RAJPUT S P S. Thermodynamic analysis of the evaporative-vapor compression based combined air conditioning system for hot and dry climatic conditions [J]. Journal of Building Engineering, 2015(4): 200-208.

[11] ZHANG J Y, GE T S, DAI Y J, et al. Experimental investigation on solar powered desiccant coated heat exchanger humidification air conditioning system in winter, Energy[S]. 2017, ISSN 0360-5442.

[12] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2008:1547-1548.
LU Y Q. Practical heating air conditioning design manual [M]. 2ed edition. Beijing:China Architecture & Building Press, 2008: 1547-1548. (in Chinese)

- [13] PICARD A, DAVIS R S, GLÄISER M, et al. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)[J]. *Metrologia*, 2008, 45(2):149.
- [14] 章霆芳, 章伯其. 湿空气饱和水蒸气压力与温度关系式的改进与应用[J]. *发电与空调*, 2005, 26(4):43-45.
ZHANG T F, ZHANG B Q. Improvement and application of the relationship between the water vapor saturation pressure and temperature of the moist air [J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery*, 2005, 26(4):43-45. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:6-13.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings:GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012:6-13. (in Chinese)

(编辑 胡玲)