

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-752-05

# 空气幕性能测试分析

包继虎 曹晨 陆磊 徐军 丁辉 刘骏亚 周坤 付炜

(合肥通用机械研究院有限公司 合肥 230031)

**【摘要】** 基于JB/T 9067-1999《空气幕》的性能试验方法,详细解读了空气幕的空气侧和热水侧的性能,并对空气侧和水侧的热平衡性进行分析,指出水侧换热量与辅侧换热量存在本质区别,空气幕的性能测试均依据0Pa静压进行,同时,对风量和风速的测量方法进行解读,归纳了现行空气幕产品标准中存在的问题和不足,并给出了相应的建议,对于这类年代比较长的标准,建议结合社会需求,考虑产品的发展和检验检测技术的进步,及时对相关标准加以制(修)订。

**【关键词】** 热水源热平衡;空气幕;性能测试;分析

中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Analysis on Performance Test of Air curtain

Bao Jihu Cao Chen Lu Lei Xu Jun Ding Hui Liu JunYa Zhou Kun Fu Wei

(Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd, Hefei, 230031)

**【Abstract】** Based on the performance test methods in JB/T 9067-1999 “air curtain”, the performance of the air side and the water side of the air curtain is interpreted in detail. The heat transfer balance between air side and water side is analyzed. Heat transfer capacity of water side is different from that of the auxiliary side. The performance tests are based on 0Pa static pressure. At the same time, the measurement methods of air volume and wind speed are interpreted. Summaries the problems and deficiencies of current product standards for air curtain. For such standards with a long time, it is suggested that the relevant standards should be revised in time, taking into account the social needs, the development of products and the progress of inspection method and testing technology.

**【Keywords】** thermal equilibrium; air curtain; performance test; analysis

## 0 引言

空气幕是以水为冷媒,通过风机(贯流、离心或轴流式)对盘管进行强制热交换,使用条状喷口送出的具有一定速度、温度和厚度的幕状气流的空调设备,可以用来隔断另一气流<sup>[1]</sup>。广泛运用于商场、影剧院、宾馆等公共建筑以及厂房、冷库等工业建筑中,由于人或器材的频繁进出,导致外门必须长时间开启,安装空气幕可以阻隔室内外空气的对流,使采暖建筑减少冬季热负荷,同时也可以使供冷建筑减少夏季冷负荷<sup>[2-4]</sup>。其性能水平的高低

对空气幕阻隔空间的热环境、建筑能耗等影响是关键<sup>[5-7]</sup>。因此,空气幕性能测试的可靠性对控制产品质量、评估产品性能、保证行业的良性发展有举足轻重的意义。

从所查阅的文献资料看,目前并没有针对空气幕性能测试和评价的国家标准,仅有机械行业标准JB/T 9067-1999《空气幕》<sup>[8]</sup>(以下简称“JB/T 9067-1999”) 对空气幕的性能要求及测试进行了规范,该标准对我国空气幕产品质量的快速提升和行业的健康发展起到了显著的促进作用。从标

基金项目: 国家重点研发计划项目: 数据中心和5G基站用冷却设备质量评价技术体系研究及应用示范(No.2020YFF0218600)

作者(通讯作者)简介: 包继虎(1977-),男,高级工程师,博士, E-mail: tiger0203@163.com

收稿日期: 2022-02-17

准年代号来看, JB/T 9067-1999已实施23年, 但JB/T 9067-1999自2000年1月1日实施以来, 在执行过程中, 仍有企业检测人员对标准中性能测试的条款理解上常常出现歧义或对换热量计算公式中一些参数提出质疑, 汇总起来主要有三个方面: 一是JB/T 9067-1999中为什么没有供冷工况的测试要求? 二是水侧供热量的计算公式中出现输入功率项不理解; 三是供热性能测试如何界定热平衡稳态条件?

从上述问题描述情况看, 问题均涉及空气幕的性能测试, 当前高度自动化的性能检测平台已大大弱化了专业限制, 但空调产品性能的准确检测是探究空调产品运行状态和提高其能源效率的技术基础, 而对产品标准的正确理解是实现空调性能检测的前提, 产品标准的错误解读可能导致检测结果与样机提供的技术参数存在差异, 一定程度上给空调产品的开发能否达到设计要求增加了不确定性, 严重时可能对空调产品做出不合理的判定结论。基于上述问题, 本文将依据JB/T 9067-1999对涉及空气幕性能检测的相关问题进行详细解析, 以帮助使用者更好的理解标准中的性能检测方法, 确保检测结果能准确反映空气幕的真实性能。

## 1 空气侧性能分析

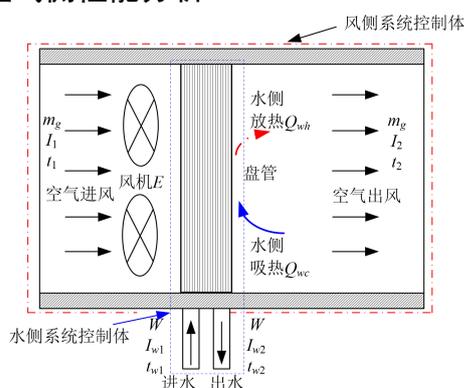


图1 焓值法原理

Fig.1 Schematic diagram of the enthalpy method

JB/T 9067-1999在附录A中对空气幕(以下简称“空气幕”)的性能试验装置、计算方法等进行了规范, 从试验装置和计算方法可知空气幕的热交换原理为焓值法, 其运行模式可简化为图1所示结构, 通过环境工况机调控出来的温度稳定的水进入到盘管中。空气幕中的通风机以恒定转速运转, 将

稳定温度、流量的空气在空气幕中与盘管进行热交换。系统达到稳态后, 通过计算空气侧和水侧的焓值增减即可获得空气幕的换热量。

根据空气幕的换热特点, 可以将空气侧视为一个开口系统控制体(如图1点画线所示), 根据稳态稳流能量方程, 对于风量为 $m_g$  (kg/s)的空气, 其空气侧供热量为<sup>[9]</sup>:

$$Q_{sh} = m_g (I_2 - I_1) \quad (1)$$

式中,  $I_1$ 和 $I_2$ 分别为进入和离开空气幕的空气焓值,  $J/kg_{\text{干空气}}$ ;  $Q_{sh}$ 为空气幕空气供热量,  $W$ ;  $m_g$ 为湿空气中干空气的质量流量,  $kg/s$ 。干空气质量不便于测量, 通常将其表示为湿空气质量和含湿量的函数。湿空气是水蒸汽和干空气的混合物, 由此可知, 干空气质量可推导表述如下:

$$m = m_g + m_q = m_g \left(1 + \frac{m_q}{m_g}\right) = m_g (1+x) \Leftrightarrow m_g = \frac{m}{1+x} \quad (2)$$

式中,  $m$ 为单位时间内空气幕的供风空气质量,  $kg/s$ ;  $m_q$ 为水蒸汽的质量,  $kg/s$ ;  $m_g$ 为干空气的质量,  $kg/s$ ;  $x$ 为湿空气的含湿量,  $kg/kg_{\text{干空气}}$ 。将式(2)代入式(1)可得:

$$Q_{sh} = \frac{m}{1+x} (I_2 - I_1) \quad (3)$$

空气幕供热运行时不涉及热湿处理, 其焓值仅和干球温度有关(干空气的焓值为 $I=C_{pa} \cdot t_a$ ,  $C_{pa}$ 为空气的定压比热,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $t_a$ 为空气的干球温度)

(在一般通风空调工程中, 将加热时湿球加湿视为等焓过程<sup>[10]</sup>), 因此, 在空气幕供热运行时, 空气幕供热量只存在显热交换, 其计算公式(3)可进一步简化为:

$$Q_{sh} = \frac{LC_{pa} (t_2 - t_1)}{V'_n (1+x)} \quad (4)$$

式中,  $t_1$ 和 $t_2$ 分别为进入和离开空气幕空气的干球温度,  $^\circ C$ ;  $L$ 为空气的风量,  $m^3/s$ ;  $V'_n$ 为湿空气的比容,  $m^3/kg$ ;  $m = L/V'_n$ 。式(4)与JB/T 9067-1999在附录A中所给空气幕空气供热量计算公式一致。

分析图1焓值原理可知, 空气幕可以实施供冷运行, 目前, 在一些超市、商场中也得到了较好的利用。空气幕供冷运行时, 其空气侧供冷量可表述如下:

$$Q_{sc} = m_g (I_1 - I_2) \quad (5)$$

式中,  $Q_{sc}$ 为空气幕空气供冷量, W。将式(2)代入式(1), 且将空气质量采用风量和比容进行描述, 式(5)可进一步简化为:

$$Q_{sc} = \frac{L}{V'_n(1+x)}(I_1 - I_2) \quad (6)$$

从空气幕风侧供冷运行的理论分析来看, 空气幕是可以实现供冷运行的, 因此, 建议在标准中增加空气幕空气侧供冷工况的测试条件和要求。

## 2 水侧性能分析

为方便研究, 将空气幕热水侧视为一个开口系统控制体(如图1虚线所示), 空气侧和水侧系统达到稳态后, 水流量在表冷器入口和出口保持不变, 忽略水的动能及位能的变化, 根据稳态稳流能量方程, 对于流量为  $W$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 的水, 空气幕水侧换热量为<sup>[9]</sup>:

$$Q_w = W(I_{w1} - I_{w2}) \quad (7)$$

式中:  $I_{w1}$ 和 $I_{w2}$ 分别为进入和离开空气幕盘管的水的焓值, J/kg;  $Q_w$ 为空气幕水侧换热量, W。工程应用中, 常将水的焓值表示为水的比热与水温的乘积, 因此, 空气幕水侧供冷量和供热可进一步简化如下:

$$\begin{cases} Q_{wc} = WC_{pw}(t_{w2} - t_{w1}) \\ Q_{wh} = WC_{pw}(t_{w1} - t_{w2}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $C_{pw}$ 为水的定压热, J/(kg·°C);  $t_{w1}$ 和 $t_{w2}$ 分别为进入和离开空气幕的水温度, °C;  $Q_{wc}$ 和 $Q_{wh}$ 为分别为空气幕水侧的供冷量和供热量, W。JB/T 9067-1999在附录A中给出的空气幕水侧供热量计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$Q_{wh} = WC_{pw}(t_{w1} - t_{w2}) + E \quad (9)$$

式中,  $E$ 为空气幕的总输入功率, W。比较式(8)和式(9)可知, JB/T 9067-1999中的供热量计算公式中多出了空气幕的总输入功率 $E$ 。分析发现, 总输入功率项的产生是由于空气侧热量平衡导致的, 式(9)的准确定义应该是辅侧供热量计算公式, 不能将其定义为水侧供热量计算公式, 理由如下:

空气幕在供热条件下运行时水侧放热, 空气侧吸热, 出水温度降低, 出风温度升高。因此, 水侧

的焓值减小, 空气侧的焓值增加。根据热力学第一定律可知, 空气幕在运行条件下水侧和空气侧的能量守恒方程可表示如下:

$$\begin{cases} WI_{w1} - Q_{wh} = WI_{w2} \\ m_g I_1 + Q_{wh} + E = m_g I_2 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)第一式中 $Q_{wh}$ 表示水侧释放的热量, 第二式中 $Q_{wh}$ 表示空气侧吸收的热量。将式(10)进行简单变化可得:

$$\begin{cases} Q_{wh} = W(I_{w1} - I_{w2}) = WC_{pw}(t_{w1} - t_{w2}) \\ Q_{sh} = Q_{wh} + E = m_g(I_2 - I_1) = \frac{LC_{pa}(t_2 - t_1)}{V'_n(1+x)} \end{cases} \quad (11)$$

从上面分析可知, 空气幕空气侧供热量可以采用两种方式进行表示, 一种是采用空气幕进出风的焓差进行描述, 这是空气幕的使用侧, 行业内通常将其定义为“主侧”; 另一种是采用水侧放热量加上总输入功率进行表示, 这是空气幕的热量“平衡侧”, 热量“平衡侧”行业内通常将其定义为“辅侧”。JB/T 9067-1999在附录A.2.2.1中指出: 水侧供热量按式(A6)计算, 即本文中式(7)进行计算显然不合适。合理的描述应该是: 空气幕“辅侧”供热量按式(A6)进行计算。显然, 水侧供热量和辅侧供热量存在本质区别。

当空气幕供冷运行时, 水侧吸热, 空气侧放热, 出水温度升高, 出风温度降低。因此, 水侧的焓值增加, 空气侧的焓值减小。根据热力学第一定律可知, 空气幕在运行条件下水侧和空气侧的能量守恒方程可表示如下:

$$\begin{cases} WI_{w1} + Q_{wc} = WI_{w2} \\ m_g I_1 - Q_{wc} + E = m_g I_2 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)第一式中 $Q_{wc}$ 表示水侧吸收的热量, 第二式中 $Q_{wc}$ 表示空气侧释放的热量。将式(12)进行简单变化可得:

$$\begin{cases} Q_{wc} = W(I_{w2} - I_{w1}) = WC_{pw}(t_{w2} - t_{w1}) \\ Q_{sc} = Q_{wc} - E = m_g(I_1 - I_2) = \frac{L(I_1 - I_2)}{V'_n(1+x)} \end{cases} \quad (13)$$

从上面分析可知, 空气幕空气侧供冷量也可以采用两种方式进行计算, 一种是采用空气幕进出风的焓差进行计算, 这是空气幕的使用侧(主侧); 另一种是采用水侧吸热量减去输入功率进行表示,

这是空气幕的热量“平衡侧”(辅侧)。显然, 水侧供冷量和辅侧供冷量存在本质区别。从空气幕水侧供冷运行的理论分析来看, 空气幕是可以实现供冷运行的, 因此, 建议在标准中增加空气幕水侧供冷工况的测试条件和要求。

### 3 性能试验方法分析

JB/T 9067-1999 在第6条试验方法中给出了空气幕的性能试验工况, 理论上, 空气幕在进行性能试验时风量和静压均需达到名义值, 但实际性能测试过程中, 由于风量和静压的关联性, 只能保证其中一个条件, JB/T 9067-1999 并没有对该问题进行明确, 目前行业内通行的做法是按照静压 0Pa 进行性能试验。依据 JB/T 9067-1999 第 6.1.1 条, 在不供水的条件下, 按照 0Pa 静压测试空气幕的风量、静压和输入功率即可。

#### 3.1 风量和输入功率测试

JB/T 9067-1999 规定空气幕的风量依据表9工况测试, 输入功率依据表6工况测试。空气幕的风量和输入功率测试时只需依据0Pa静压值进行测试即可。长期的实际测试发现: 在风量和静压测试过程中, 常有测试人员将风量和静压理解为实测风量和实测机外静压。JB/T 9067-1999附录A2.1.3中明确指出<sup>[8]</sup>: 由试验测得的风量应换算成标准状态(相当于大气压为101.3Pa), 温度为20℃, 密度为1.2kg/m<sup>3</sup>干空气的风量, 即

$$L_s = L / (1.2V_n') \quad (14)$$

式中:  $L_s$  为标准空气状态下的风量, m<sup>3</sup>/s。

另外, 空气幕的性能试验时需注意以下几个问题:

(1) 空气幕的性能试验时进风口不设风管, 仅在出风口装设风管, 风管与焓差台位的连接以空气幕的外形尺寸为基准, 换算出连接风管的尺寸。即如果空气幕的尺寸: 长×宽= $a \times b$ , 则连接风管的长度必须大于  $2.5\sqrt{ab}$ , 风管的每个面上均需设置静压孔, 静压孔位置与机组的距离等于  $2\sqrt{ab}$ , 同时, 确保回风口取样装置距离空气幕回风口150mm之间, 另外, 需要注意, 风管材料尽可能选用隔热较好的材料。JB/T 9067-1999中仅对空气取样装置的布置进行了明确, 但对风管尺寸的计算以及风管材质均没有描述, 风管结构尺寸以及风管材料对热

平衡偏差、漏热等因素有重要影响, 因此, 建议在后续相关标准制(修)定中加以明确。

(2) JB/T 9067-1999中对空气幕性能测试稳态工况没有进行明确, 大量的性能试验发现, 当测试工况均在允许偏差范围内, 且主辅侧热平衡在某个规定范围以内(末端类空调产品热平衡偏差通常取大于-5%小于5%)时即认为测试系统达到稳态, 此时采集数据是合理的。建议在标准中对稳态运行条件进行说明。另外, 数据采集需注意: 数据采集较大的“时间间隔”会导致数据的实时性较差, 可能导致误差较大的测试结果。从空气幕连续稳态运行状态来考虑, 采集数据的周期越短, 采集的数据越多, 数据的实时性越好, 最终所有数据的平均值也越接近空气幕的实际运行情况。因此, 建议在后续相关标准的制(修)订中对稳态运行时数据采集的时间间隔进行量化处理, 以减小测试误差对测量结果的影响。同时明确每次记录的数据应该是该时间间隔内所有采集周期数据的平均值。

#### 3.2 风速测量

风速是评价空气幕的关键指标, JB/T 9067-1999 在附录C对风速试验进行了详细规范, 其测点空间分布如图2所示<sup>[8]</sup>。JB/T 9067-1999 中对风速测量的描述理解上有一些困难, 特别是部分关键指标出现笔误, 另外, JB/T 9067-1999 中所给平面测点图中涉及空间测点。现将其解析如下。

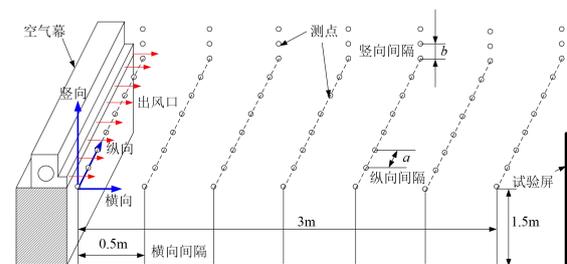


图2 风速测点分布

Fig.2 Distribution of wind speed measuring points

风速测点匀布于空气幕出风口水平面内, 风速测定的基准面位于空气幕流场的横向坐标上, 从出风口至3m处分七个测试位置, 每两个测试横向位置间隔0.5m(此处需要注意, JB/T 9067-1999 中对间隔描述存在笔误, 将0.5m写成了1.5m), 每个测试位置按空气出风口名义宽度均匀分布不同测点(名义宽度600mm时均布8个测点, 名义宽度900mm时均布10个测点, 名义宽度1200mm时均

布 12 个测点, 名义宽度 1500mm 时均布 14 个测点, 名义宽度 1800mm 时均布 16 个测点)。测点之间纵向间隔  $a$  采用下式计算<sup>[8]</sup>:

$$a = \frac{\text{出风口名义宽度}}{\text{出风口纵向测点数}} \quad (15)$$

当出风口气流厚度小于 100mm 时, 测量基准面所有位置的风速即可, 出风口气流厚度每增加 50mm, 竖向增加一个基准面风速测点, 基准面在竖向之间间隔  $b$  采用下式计算<sup>[8]</sup>:

$$b = \frac{\text{出风口气流厚度}}{\text{基准面数量}} \quad (16)$$

经过多次实际测试发现(测试中均采用一个风速传感器依次对测点风速进行测量): 空气幕的试验风速波动范围较大, 加之采用单个风速传感器进行测试, 导致风速测量的实时性无法保证, 风速测量重复性较差。对此, 建议 JB/T 9067-1999 应对风速测量进行明确, 即采用一个风速传感器依次测量还是采用与测点数相同个数的风速传感器同步进行测试, 风机振动频率各个时刻均不一样, 采用一个风速传感器依次进行风速测量从原理上是不合理的, 也无法保证所有测点风速测量的实时性。因此, 建议在 JB/T 9067-1999 中对风速传感器的使用进行规范, 同时对采集周期和采集时间进行规范, 建议采用与测点数相同个数的风速传感器对所有测点同步进行测试, 并采集一段时间内的风速平均值, 通过这种方式采集的数据才能较为准确、客观的反映风速。

另外, 针对标准 JB/T 9067-1999 中风速的测量提两点建议:

一是风速对于空气幕来讲是一个极为重要的参数, 它在很大程度上决定了是否能真正隔断需要阻隔的气流。但现有测试方法采用水平条件下测试, 目前常见的空气幕都是垂直向下吹风, 因此, 建议将水平条件下测试调整为垂直条件下测试;

二是空气幕在输送热空气时由于热空气密度小于环境空气密度, 理论上实测风速会小于不供水工况的风速。JB/T 9067-1999 中仅对干风量给出了技术要求, 对于供水条件下的风量并没有给出技术要求, 结合长期空气幕性能测试情况, 建议在标准中增加供水条件下风量的技术要求, 以便给企业产品选型提供技术支撑。

## 4 结语

基于焓值理论, 推导了空气幕风侧和水侧供热量计算公式, 对其涉及参数的机理进行详细解读, 并对空气幕的风量、输入功率和风速等测量方法进行分析。结论如下:

(1) 水侧供热量并非辅侧供热量, 两者存在本质区别, 为准确描述空气幕的热平稳, 建议在 JB/T 9067-1999 中增加“辅侧供热量”的定义, 将供热时的“辅侧供热量”定义为水侧供热量与输入功率之和, 同时, 给出空气幕性能测试时稳态工况的主辅侧热平衡限值。

(2) 空气幕的性能试验均是在 0Pa 静压下实施, 测试风量需转换为标准空气状态下的风量。

(3) JB/T 9067-1999 已使用超过 23 年, 对于这类年代比较长的标准, 建议结合社会需求, 考虑产品的发展和检验检测技术的进步, 及时对相关标准加以制(修)订, 如在标准中增加供冷工况的性能要求、考虑性能测试时风管漏热修正问题等。

## 参考文献:

- [1] 黄松, 何川. 空气幕研究现状及展望[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(5): 23-26.
- [2] 孙策, 杨华, 李志伟, 等. 冬季商场入口空气幕对室内热环境影响研究[J]. 建筑节能, 2017, 45(3): 15-18, 23.
- [3] 陈江平, 冯欣, 穆景阳. 吹吸式非等温双层空气幕紊流特性数值分析[J]. 制冷学报, 2001, (4): 16-20.
- [4] 何丽娟, 沈永年. 热风幕气幕空调伞温度场分布与舒适性研究[J]. 流体机械, 2001, 29(6): 56-58, 4.
- [5] Kuo-Chung Lee. The study of energy conservation and flow field simulation for air curtain[D]. Taibei: Tatung University, 2006.
- [6] Kai Siren. Technical dimensioning of a vertically upwards-blowing air curtain-part I[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(6): 681-695.
- [7] Kai Siren. Technical dimensioning of a vertically upwards-blowing air curtain-part II[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(6): 697-705.
- [8] JB/T 9067-1999, 空气幕[S]. 北京: 机械工业部机械标准化研究所出版, 1999.
- [9] 邱信立, 廉乐明, 李力能. 工程热力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [10] 田忠保. 空气调节[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.