

新书介绍

农业生产建筑的蒸发冷却系统

贺致存 摘译 崔引安 审校

原著者: M.A. Hellickson J.N. Walker

书名: Ventilation of Agricultural Structures

出版单位: An ASAE Monograph

St. Joseph, Michigan 49085

Chapter 6, Evaporative Cooling 1983 1st edi.

蒸发冷却已在很多鸡舍和温室中成为典型措施,在美国西南部地区也常用于猪舍及奶牛舍中。

在美国北部地区,为寒冷气候条件下所设计的温室及密闭畜舍,当夏季偶而出现暴热天气时,几乎无法进行控制。如无缓解措施,炎热的夏季将造成明显的死亡损失。然而大部分的损失呈较隐蔽的形式出现,如降低生产能力和繁殖效率。这种由热应激所造成的损失可以采用适当的蒸发冷却系统而得到降低。

一、蒸发冷却降温原理

当非饱和的空气与自由水分相接触,而两者又与外界热源相隔绝时,就会发生质量和热量的转移。由于自由水面的蒸汽压力高于不饱和的空气,为反应这种压力差别水的转移即出现。这种转移涉及到从液态到汽态的变化,需要吸收汽化热。这种状态变化所需的热量来自空气和水中所含的显热,结果使两者的温度均下降。当紧靠界面处的温度下降后,即在空气与水蒸汽的混合体内产生温度梯度(温差),当整个系统达到热力平衡时,即出现热传导。

由于在此过程中外界并未对之加热,总的热含量不曾发生变化。这时仅产生潜热和显热间的绝热变化。然而因水的状态变化和空气——水蒸汽混合体的变化,造成了环境的变化。当这种交换发生时,一般能使舒适状态大为改善。

利用空气湿度图这种过程可以得到最佳的描绘。在图1中,如A点代表进入冷却器内的室外空气状态,混合体的状态沿一条湿球线达到B点,它即代表了湿球温度,如果能达到完全饱和,即可假定它是空气的温度。但是,完全的饱和没有发生,离开冷却器的空气——水蒸汽混合体最后只能达到C点的状态。湿球温度保持不变,但是干球温度却降下来了,空气的相对湿度提高了。

“蒸发冷却器效率”是商人们惯用的一个名词，用以表示饱和效率。它是所达到的饱和变化与潜在的饱和变化之间的比值。在湿度图1上，饱和效率在数值上等于AC线段长度被AB线段除。结果的数值被认为是一种稳定状态，使循环水温度不再变化。

饱和效率有助于描述冷却器的性能，但是很少说明冷却的容量。所有的温度降落、效率、所涉及到的空气数量均包括在内，方能更全面地反映冷却容量。

由于这种过程是绝热的（不获得或损失热量），因此用千焦耳或卡等热量单位来额定蒸发冷却器是会引起误解的。因为，在制冷空调中实际上并未由空气中取走热量。一种被称为蒸发冷却性能单位ECP

(Evaporative Cooler Performance)有时被用做测量和额定蒸发冷却器。ECP值在数值上即在交换中所涉及到的热量单位，可按显热或潜热来进行计算。

然而ECP单位并不能在基准状态下测出绝对性能，以供比较。因为热交换的总量取决于湿球的下降值。一种修正过的测量单位为“单位ECP”，此处

$$\text{单位ECP} = \text{ECP} / \text{湿球下降值} \quad (1)$$

这个单位说明每小时每度冷却潜势所给出的冷却效果，消除了当地条件有关的参数。

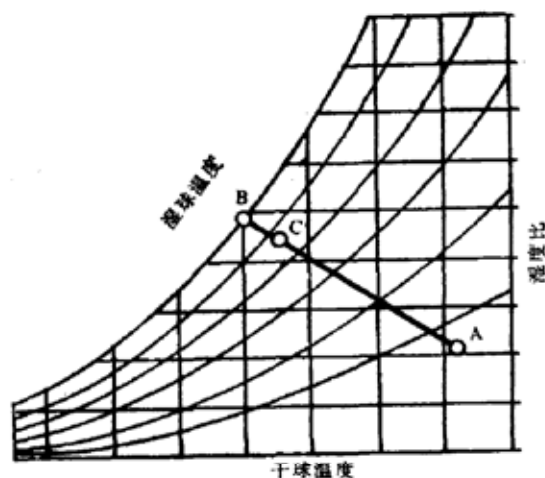


图1、对空气进行绝热补湿

二、原理的运用

当蒸发冷却原理应用于某建筑物时，如果只让静止空气接触自由水面，这种过程就太慢了。当强制空气通过一个扩大了，供蒸发用的液态水面的面积时，热量及质量的传递速度即可大为增加。

通常空气的流动系由鼓风机或轴流通风机来完成。为了提供较大的水表面积有几种可能性，但在实际使用中常有两种办法。或者以极细的雾滴形式将水直接喷入空气流中，或者使空气流过一打湿了的多孔物质。通常使用最广泛的即为后一种——潮湿的多孔垫系统。

喷雾通常被称为空气清洗，而且它的主要用途是控制湿度而不是降温。它需要设计良好和价格比较昂贵的设备。以最少量的未蒸发的自由水滴来取得所需控制的目的。由于为了满足使水能够通过过滤层和必需的压力来维持喷嘴持续工作，运转费用可能很高。在很多系统中使用高达2500千巴的压力。

使空气通过一打湿了的多孔物质，或称为垫，这是一种使用最为广泛的保持空气和水分接触的办法。多孔垫可由垂直安装在垫的上缘的滴入水打湿，或将水甩入或喷入垫的表面内，或转动一水平安装的圆筒状垫使其下部浸入水中。这些方法常被分别称为滴入法，投掷法或旋转法。

投掷法必需将水顺着气流的方向，而不是逆着气流的方向，因此应位于垫的背着鼓风机或调制空气的一侧。在室外露天装置的情况下，有必要配置一个防护罩或覆盖物，以保护微

小的水滴使其不致于被自由的空气流带到冷却垫以外的其它处所。此法打湿垫所耗的能量要高于滴入法的冷却装置。

一个旋转型的冷却器包括一大型的水平圆筒，筒的外表面系用多孔垫料构成。圆筒的一端被封闭，另一端包括一鼓风机或空气排出口。圆筒的大约三分之一浸没在一个水池中。当圆筒转动时，垫被有效地浸湿。此时无需用泵抽水，降低了动力消耗，但需用动力转动圆筒。一台旋转型垫筒，虽然一次性投资较高，却有连续清洗垫料和简单可靠沥净多余水分以减少矿物质沉积的优点。

冷却装置的设计

冷却装置的效率取决于湿垫的性能。湿垫必需以最大限度的潮湿表面暴露于空气流之中，以保证空气与水份接触的时间足够长，能使空气临近被水饱和的状态。冷却垫对空气流动的阻力应尽可能的低，湿垫还必需能耐腐蚀，保持原来的形状和纤维的朝向。在特殊的应用中，例如：特定的植物生产和研究中，冷却垫还必需能够滤掉空气中的粉尘、花粉和昆虫。然而在农业生产中对这一空气净洁指标很少有具体要求。

一般说来合理地满足湿垫的设计要求，或保证农业生产较为满意的水平是容易做到的。但在广泛的应用中，确保生产的高水平要求是相当困难的。

湿垫材料

制造厂曾用木材、金属、矿物、玻璃作为湿垫材料，近年来还采用塑料和水泥。虽然更为稳定的材料性能比木材更耐腐蚀和具有较长的使用寿命，但它们大多数缺乏灯芯般的吸水性能以确保水份的良好分配。在少孔隙的材料中，水分以聚积在一起的细流向下流淌，仅仅打湿了较小的表面积。

白杨木刨花曾是冷却器中的毡状湿垫最佳材料之一。虽然它比其它的木材更耐腐蚀，但腐烂仍是一个问题，以至在使用一年之后，这种材料的湿垫丧失掉大部分效能。在使用季节的中间用清水清洗滞留的灰尘和杂物，有助于保持使用效能和延长寿命，但仍应每年更换一次。

聚氯乙烯 (PVC) 制成的刚性垫，浸渍过防腐剂的纸垫，或涂敷过水泥的蔗渣垫均有生产。聚氯乙烯垫和纸垫系采用交叉流道设计，可具有逆流或交变流的特性。这些垫的常用厚度范围为10~30厘米。这些垫的单位面积费用要高于杨木刨花，但是曾报导它们在较高的表面速度下能取得较高的效率，对某一设计空气流量下只需较小的面积。另外，这些湿热能维持较长的使用寿命，无需像白杨刨花那样每年更换一次。

涂敷水泥的蔗渣湿垫常用厚度为2.5厘米，预期使用寿命至少为十年。但是比较重 ($18\text{kg}/\text{m}^2$)，而且一次投资较高。对于这种类型的湿垫推荐使用比较低的表面速度。对于某一给定的空气流量需增加湿垫面积，因此更增加了费用。

所有这些湿垫的冷却性能报告是可比的。但是大部分数据系根据新的，干净的湿垫作出的。对于更为耐久的类型，在农业应用中常出现盐分及灰尘的沉积，同时使用多年的性能数据也很少见。

湿垫的朝向

在农业应用中通常在通风机对面的侧墙及山墙上连续布置，湿垫的高度常介于0.5~2.5米之间，垂直安装，以便取得均匀的水流。

在多尘的地区，一个带有滴水系统（图2）的典型垂直湿垫常被灰尘颗粒完全堵塞，妨碍了自由空气流动。没有空气流动，总的冷却性能大为降低。当应用于农业，特别是涉及到畜牲建筑中，这将是一个很严重问题。一种替代的系统采用了水平放置的湿垫（图3），能有效地解决灰尘问题。在这种系统中松散的刨花被放置在水平支撑的铁丝网之中。不是将水从一端滴入，而是将水喷射在湿垫的整个表面上，把它完全打湿。在喷水过程中，水流喷射也形成了经常的湿垫冲洗，空气被迫向上或向下通过湿垫，然后水平地向外流或成夹角流入被冷却的区域内。这种系统已证明不但能保持一个干净的湿垫，而且在整个夏季内提供有效的冷却，即使在一个灰尘相当多的环境中仍然取得同样的良好效果。当灰尘颗粒被空气流夹持进入湿垫时，它们将被冲洗进入循环贮水池中。贮水池应足够大，以保证灰尘颗粒能沉积在池底。沉积物应定期清除，当贮水池足够大时，这种清除仅限于每季度一次。

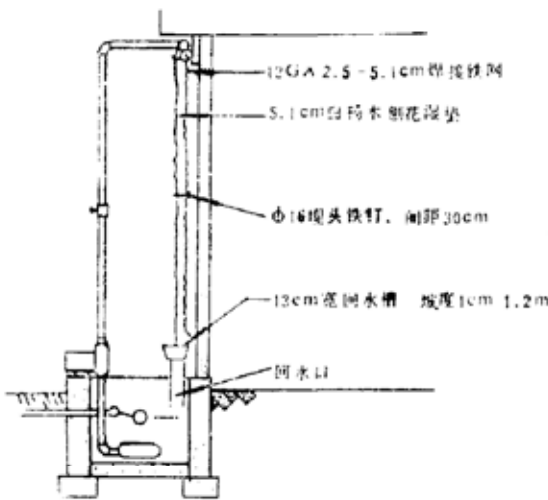


图2、使用于很多鸡舍及温室中的垂直湿垫

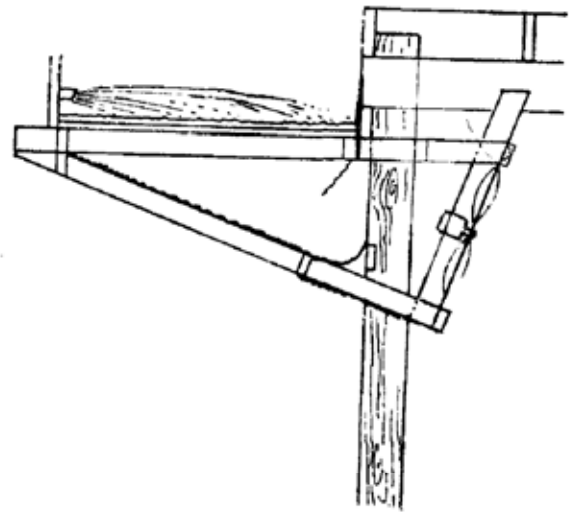


图3、牛荫棚内使用的水平湿垫系统

供建筑冷却用的水平湿垫结构常涉及到多层次的湿垫排列。三至五层水平湿垫即可提供所需的湿垫面积，使湿垫的宽度限制在易于更换和保养的尺寸范围以内。湿垫的框架可安装成稍微倾斜，以便接近而又不至于取消水平朝向的优点。

湿垫的厚度和密度

增加湿垫的厚度直接增大了垫对空气流通的阻力，同时也增加了空气流过湿垫的接触时间。当空气流经增加了厚度的垫时，水蒸汽的压差也减少了。这将造成当空气连续通过湿垫的途中，在即定设备内蒸发的速度降低了。其精确的关系现在尚无法详知。

增加湿垫的密度提高了总的孔隙率或毛细管作用，有利于水分更为均匀的分布，但是它也要求较大的水流量和克服空气流过的阻力。在垂直朝向中，稠密的湿垫似乎比疏松的结构具有更大的自行支撑的能力，但是不管任何密度的湿垫都需某种程度的支撑框架来防止坠

陷。任何坠陷均为空气直接穿过打开孔道，所以应该特别注意，以免严重影响冷却效率。

瓦特 (Watt) 总结了垂直白杨木湿垫的厚度和密度要求，认为最佳的湿垫大致应具有每立方米装有32公斤白杨木刨花的密度，上部的密度应稍高些，以保证那个高度的水分分配。刨花片应主要具有水平的排列。在密度确定之后，厚度可调整到所需的饱和效率，或取得每单位能耗的最大的冷却效果。

在水平结构中一个未加规定的厚度和密度由支架上的湿垫材料自然沉积所决定。维尔斯马和本赫姆 (Wiersma and Benham) 推荐每平方米的湿垫面积上均匀地分布 4 公斤刨花。

空气速度

在湿垫内通过各不同点的气流速度是不同的，而且很难测出。进入或离开湿垫的速度被称为湿垫的表面速度，表面速度却很容易测得，通常用它来定义湿垫的速度。为了计算湿垫面积，它被做为一个基本设计参数。在表 1 中列举了典型湿垫材料的推荐空气流速值。

表 1 通过不同湿垫材料所推荐的空气速度

类	型	空气表面速度*	
		M/秒	呎/秒
垂直放置的白杨木纤维	50~100mm(2~4吋)厚	0.75	2.5
水面放置的白杨木纤维	50~100mm(2~4吋)厚	1.0	3.3
波纹状赛璐珞	100mm(4吋)厚	1.25	4.2
波纹状赛璐珞	150mm(6吋)厚	1.70	5.8

* 在结构受到限制时速度可提高25%

在较低的紊流速度下，彼得逊 (Petersen) 描述蒸发速度与空气流速的三分之二次方成正比。蒸发速度加倍将造成总用水量增加60%。

托恩伯格 (Thornburg) 推荐居室冷风机内用白杨木垫时，1.25米/秒的表面速度可以认为是实用的和有效的。维尔斯马和本赫姆发现在垂直湿垫中最大效率发生于1.25米/秒的速度下，而在水平湿垫中更接近于1.5米/秒。大于1.5米/秒的速度趋向于将自由水分带入到气流中。

制造商的资料表明在15厘米厚的蜂窝状纸垫中0.8米/秒的速度可获得高于80%的效率。在30厘米厚的纸垫中高达1.8米/秒的速度可获得高于90%的效率。据报导压力降分别为0.005和0.02千巴。

涂敷水泥蔗渣湿垫的制造商推荐用0.75米/秒的表面速度。据报导通过2.5厘米厚度的湿垫压力差小于0.0125千巴。

湿垫中的水流

对于任何既定容量的冷却器而言，随着被冷却的的空气的性质的变化，冷却器的饱和效率仍能保持相对稳定。唯一例外是发生于特别炎热干燥的空气中，这时驱除水分的速度高于循环水再润湿湿垫纤维的速度。因此在选定水的循环速度时必须要考虑最极端的情况。在表 2 中列举了不同类型湿垫材料的一些典型推荐流量。这些数据一般可使用于干燥及潮湿地区，

表2 垂直安装的冷却用湿垫材料推荐使用的水流量和贮水池容量

湿垫种类和厚度	单位直线长度湿垫的最小水流量		单位湿垫面积的最小贮水池容量	
	升/分·米	加仑/分/呎	升/平米	加仑/平方呎
白杨木纤维50~100mm(2~4吋)	4	0.3	20	0.5
白杨木纤维(沙漠情况)50~100mm(2~4吋)	5	0.4	20	0.5
波纹状赛璐珞100mm(4吋)	6	0.5	30	0.8
波纹状赛璐珞150mm(6吋)	10	0.8	40	1.0

因为这两类区域的极端情况是类似的。

在任何给定的情况下存在着一个最佳流量，但过多的流量所造成的危害要小于用水不足。如果纤维的含水量未达到饱和，冷却效率马上就会减少，这是由于通过的空气缺乏足够使用的水分。而且也会造成浸湿纤维的所有水份均被蒸发掉，使水中所含的矿物质均沉积在纤维上，而不是被冲洗走，这会进一步降低效率。

过多的水分减少了表面积，使打湿了的粗糙纤维表面变成一个光滑的水棒表面。当纤维层互相紧靠时，水份充实了它们之间的空隙，消除了一些可与空气接触的表面积。一个高的水流量确有能经常冲洗湿垫的优点，特别是水平朝向时，冲洗减少灰尘的堵塞及盐分的积累。

瓦特曾在不同厚度的垂直白杨刨花湿垫上进行了一系列的试验。对于50mm(2吋)厚和正常情况的湿垫，取得最佳冷却效率时，空气和水的重量比大约为每40公斤空气需要1公斤的水。这种情况未能反应出空气摄入水分的能力的变化。一个更为常用的评价指标将指明每蒸发1公斤水分所对应的水被泵送的速度，便于在任何情况下的计算。在瓦特试验中，最佳的空气—水量的比例下，每蒸发1公升水平均泵送7.5公升循环水。因此，对于既定空气流量和效率的冷却器而言，可对任何部位计算出空气蒸发水份的速率，选择水泵能输送7.5倍蒸发率的水流量。

在亚利桑那为温室和鸡舍设计的白杨木冷却器时，维卡特(Welchert)推荐每米直线长度的湿垫供水量为6升/分。这是一种通用的推荐值，适合于1~2米的典型湿垫高度。与瓦特的推荐值接近一致。

维尔斯玛和本赫姆对水平和垂直式白杨湿垫朝向进行过流量试验。他们的结论认为当水流量小于瓦特推荐的数值时，即可取得合理的效率和良好的水分分布。但是，当考虑到经济，分布，干净的作业，保养和有效的冷却时，他们推荐一个7/8乘蒸发率的供水量，或每平方米的湿垫面积每分钟供水2.4升。

对于蜂窝状赛璐珞湿垫而言，每平方米水平面积推荐供循环水60升/分钟，高度超过2米的湿垫可再增加10~20%。制造水泥涂敷的蔗渣湿垫的厂家推荐每平方米的湿垫面积供水量为7.2升/分钟。

泄放速率和贮水池容量

为了节省用水和保持湿垫经常被湿润，需设置贮水池和排水阀。贮水池容量取决于水泵的类型，湿垫的种类，以及沥出的速度。虽然在表2中列出了一些常用的推荐值，但是，

再循环的流量实际是对湿垫必需的供水数量。水泵应能提供额外的流量，足够保证经常沥出一部分水流以防止矿物质的积累。沥出的速度取决于供水中的矿物质含量。如果沥出的水流量等于蒸发掉的水流量，矿物质的含量稳定在大约为输入水源的一倍。削减沥出水量至原来的一半，仍能使循环水的含盐浓度维持在一个可以允许的水平。有一种在商业中已获得广泛采用的粗略办法，即为空气流量 1 立方米/秒配备 8 升/小时的泄放量。此法常造成贮水池内的矿物质浓度要比供水源内高出两倍。

对于即定矿物质含量、蒸发率和贮水池容量，相应的任何允许浓度的泄放率可以计算出来。计算必需泄放率的工作要比提供和保持这一泄放率的计算简单得多。泄放废水流量是很小的，通常在循环管路中设置一个三通管来完成。在这个支管内设置一个孔板来限制流量到所需数值。只要这个孔板保持清洁畅通，排放流量是相当稳定的。但是，灰尘和杂物很快会改变甚至完全阻断这个流量，除非进行正常的保养工作。

替代这种泄放系统，有些操作者使用排放器或泵排系统来保持循环水相当地新鲜（即用定期全部排放的办法代替连续泄放部分循环水——译者注）。在这种系统中整个贮水池内的存水定期用新鲜水置换。

家禽用蒸发冷却

差不多美国西南部所有的环境控制家禽舍均由蒸发进行冷却。在美国更为潮湿的地区内很多也采用蒸发进行冷却。这种型的家禽舍已经证实能够增加生产，改善饲养效果和减少禽类的死亡率。

在设计上存在着相当多的变化，但大多数的系统均属于下列类型中的一种。

1. 传统的家用冷却器
2. 塔楼和压力仓
3. 湿垫和风机

传统的家用冷却器

当应用于家禽舍内时，家用冷却器通常安装在舍顶的脊部（图 4）。蒸发冷却了的空气系在正压之下向舍内输送。位于禽舍两侧连续的夹墙内的排气口大小做成在最大空气流量下能使排气速度为 3 米/秒（每分钟 600 呎）。

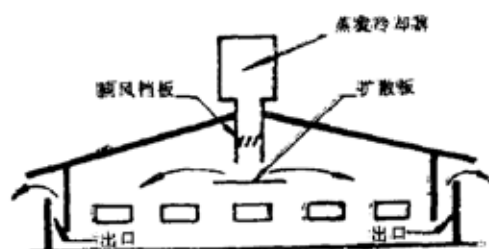


图 4、安装在屋顶上的传统冷却器

冷却器的进气管内常备有扩散板以改善空气流的分布。在管内还有一个回风挡板，以防止在低的通风要求期间，只有部分冷却器在工作时，舍内空气由不工作的冷却器逸出。用双速电机和恒温器或定时开关组合起来提供不同的通风率。

这种系统的最大缺点是对冷却器保养工作要求较高。配水系统必需每天检查，以保证湿垫的完全湿润。冷却器湿垫必需经常清洗以清除灰尘的积聚。风机皮带也要定期检查。虽然这些工作对大多系统而言都是共有的，但是，安装在炎热舍顶上的很多个独立的冷却器，使这种系统的常规保养变得复杂费力。

塔楼和压力仓

塔楼式冷却器仅为传统的家用冷却器设计的变型（图 5）由于大量的空气流动发生于一

个中心位置,空气必需通过压力仓或配气管系统进行分配。排气量必需通过墙上的连续孔口系统或通过排气烟囱来进行控制。配气管道价格昂贵并且要求设计严格,以保证良好的空气分布。

湿垫和风机

在湿垫和风机系统中,风机安装在一侧檐墙上或山墙上,以便从安装在对面墙上的湿垫(一个或多个)抽取空气。垂直或水平湿垫均可使用(图6和图7)。湿垫应安装在进风口的墙上。而且应该是连续的,从一个墙角延续到另一个墙角,以避免在舍内产生死角,影响降温效果。如果一侧墙面太小,不能安装所需要的全部湿垫面积,湿垫可绕过墙角延伸到另一个墙面。对于既定的侧墙长度,通过一组水平湿垫可比垂直湿垫提供更大的湿垫面积。禽舍必需严格封闭以便控制全部的进气量均通过湿垫。这种系统造价便宜,运行方便,当设计适当时可提供良好的气流分布。在禽舍内的空气流速比较低,被冷却的空气在流经舍内的路程中易于向地面降落,使地面处的禽群有较为适宜的环境。其动力消耗远比塔楼和压力仓系统低。

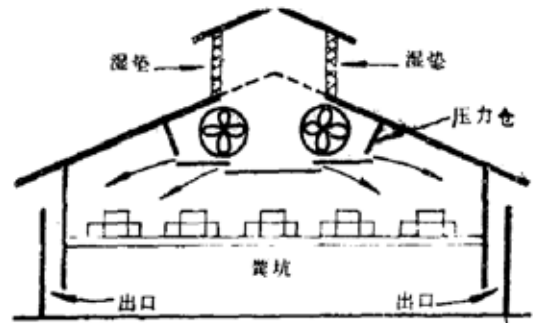


图5、工厂定制的塔楼和压力仓系统



图6、带垂直湿垫的湿垫和风机系统

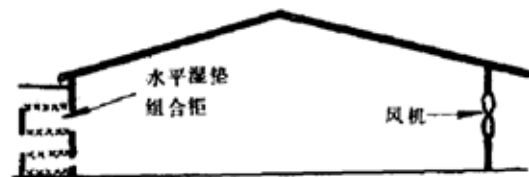


图7、装有多层水平湿垫的湿垫和风机系统

对于所有类型的冷却系统所需的空气流量必需与所需置换的热负荷相匹配。就一般隔热良好的舍顶和传统的家禽容量而言,所需的空气流量约为全舍每分钟换气一次。

使用机械控制环境的无窗密闭禽舍内,在动力中断(停电)的情况下会产生很大的经济损失。必需配备一个可靠的报警系统,遇停电时能立即报警,并马上开动备用动力系统,以便迅速恢复湿垫通风系统的运行。

温室用蒸发冷却

大多数温室用的蒸发冷却系统具有类似在鸡舍中常用的湿垫风机系统的结构型式。在温室内的系统被用于冷却和饱和进入的空气。植物(不像动物那样)在暴露于高湿度下仍能生长良好,因为蒸发了的水分对叶子的应激压力是很低的。从 21°C 到 27°C 是植物最佳(白天)温度,所要求的相对湿度范围为 $70\% \sim 80\%$ 。光合作用的快慢随太阳辐射水平和作物的种类而异。

温室与隔热的建筑不同。温室蒸发冷却的设计负荷应包括已冷却过的空气,在进入温室之后还会从太阳得到热量。因此,打湿了的湿垫应保持高效率,以便补偿空气—水蒸汽混合体的温度上升和相对湿度的下降。在晴朗的天气,靠近湿垫风口一侧的 90% 的相对湿度,在前进3米之后很容易下降到 80% 。

植物叶子的功能如同蒸发湿垫,以致从湿垫到风机的温度和湿度梯度的变化明显地受植物水分蒸腾作用的影响。曼特罗(Montero)发现当相对湿度为 80% 或更低时,叶子能依

靠蒸发使其本身接近空气温度或更冷一些。当相对湿度高于80%时，在晴朗的阳光照射下，一片直接受到阳光辐射的植物叶子常比空气温度高3℃或更多。因此，为了减少水份和温度对温室植物的应激(凋萎)，一个70%~80%的相对湿度水平对植物生长发育都是最合适的。

温室中最低换气量为每分钟换3/4到1次气。这是应用于温室中的推荐通风量。从空气入口到出口的温度上升量与空气流量成反比。在良好的阳光照射下，每分钟3/4次的换气量将使温度上升大约6℃。而换气一次将使温度上升约5℃。

对于海拔超过600米和光照水平超过54千勒克斯(5000呎一烛光)时，最大设计通风率应有所增加。然而，很少报导这方面的设计数据。由于这种温室常被涂上白色的遮荫材料以减少温室内部的太阳加热负荷。

常用的湿垫到风机的距离为30~50米。对于大跨度的温室，可将风机安装在温室的脊部，湿垫安装在两侧檐墙上，这将有利于减小穿过植物的风速。但是，一个温度较高的滞流区会出现在风机的正下方。当空气入口到风机的距离(D)小于30米时，在温室内以米/秒计风速(V)通常应增大以增加对植物和工作人员的蒸发冷却。所需的风速可由下式计算出来：

$$V = \frac{5.5}{\sqrt{D}}$$

在通风率选定之后再设计湿垫的面积。如同表1中所示，对于给定的湿垫材料，湿垫面积应调整到能满足所推荐的风速。

为了保护湿垫组合最好将其安装在空气入口的内墙面。空气入口的开孔不一定是横向贯通整个墙面，但应均匀分布。如果将湿垫组合安装在空气入口的外面，则开口应该是横向贯通的。没有大的障碍物时，湿垫与空气入口应对中。通过入口的最大设计风速为1.8米/秒。当一个垂直湿垫超过入口高度时，湿垫应自入口处墙面后退至少相当于高度差的一半的距离。

一些双坡屋顶的大跨度温室内，在植物上面安装垂直的挡板，与气流方向垂直，以免将整个屋顶部分内的空气冷却。但在大多数应用中这种措施是不必要的，因为冷却过的空气要比屋顶部分的空气密度大，易于降落到作物生长区。有时将挡板安装在工作台下面的三分之二的面积上，以便使工作台高度得到更好的冷却。

在湿垫和风机的容量选定之后，最好再选择风机的型号及风机间距，以使气流均匀地流过温室。气流接近任何植物的风速不应高于1米/秒。风机之间的间距不应大于7.5米，最好安装在温室的背风的一侧。所有的风机外面均应安装严实的挡风窗(羽板窗)，以防止植物受冬季寒风的损害。

由于很多大型商业用温室建筑间距相当小，几乎靠在一起。为了避免一个温室排出的空气对准另一个温室的湿垫，在风机配置上是一个很重要的问题。如果风机面对面的安装，一个冷却系统的风机将会抵销另一台风机，除非相对风机间的距离至少相当于风机直径的四倍。

猪舍的蒸发冷却

除了产舍之外，用蒸发冷却系统来空调猪舍尚未得到广泛的采用。在美国西南部冷却产舍是常见的。由于在产舍内动物的热负荷是不高的，系统的设计比较简单。用普通蒸发冷却

器安装在墙上和舍顶上，排气口的布置应保证空气的良好分配。在舍内备有漏缝地板和厩肥坑时，使空气通过粪坑向外排除较为理想。空气的流通量将取决于周围的情况和建筑设计，但每两分钟换气一次通常能获得较好效果。

在母猪中热应激的最大害处是反应在繁殖效率上。虽然热应激和繁殖效率间的许多相互关系仍不明确，但是，存在的问题已经清楚，这些资料主要来源于美国猪的主要饲养地区。关于用传统型式的蒸发冷却系统改善猪繁殖效率的研究是有限的，但喷淋或喷雾已得到广泛的应用。大多数商业化生猪生产系统包括水泥地面和漏缝地板，喷洒在猪床上或地面上的多余水分都能很快排走，对猪不会产生不利的影响。与空调用的蒸发冷却相比，这种冷却方式更为直接，它能使附着在动物身体表面的水分直接进行蒸发。用强制通风的办法可以增加冷却速度。在完全密闭的猪舍内，不可能产生自然空气流动时，风机是重要的。喷洒器常常安装自动控制开关，以产生间歇的淋湿和干燥。开启和关闭的持续时间取决于喷水率和天气状况。一般开30秒和关5~15分钟的喷水系统用水很少但能产生有效的冷却。喷雾器近于连续运转。空气流应来自舍外的新鲜干燥空气。而不是再循环舍内已经饱和的空气。在每一个圈养区内的空气分配是关系不大的。主要是保证每头猪均能接受喷洒和气流。它们能在圈养区域内自行选择最适合的舒适位置。

育肥猪的舒适与否似乎关系不大，虽然并不是没有好处。用喷雾器或喷淋器的冷却系统已被广泛应用，是否需要强制通风系统取决于猪舍的型式。

奶牛用的蒸发冷却

蒸发冷却也可被用来作为改善奶牛小气候的一种经济的办法。在炎热的夏季中奶牛遭受相当大的热应激，不但会减少牛奶产量，而且也严重地影响了牛群繁殖。

奶牛和奶牛舍饲系统不允许像对养猪那样采用连续喷洒系统，因而环境的改善只能依靠冷却空气。在那些热应激问题较为突出的地区，传统的奶牛舍是完全开放的，使得采用蒸发冷却改善牛舍环境变得似乎更困难。

在亚利桑那，蒸发冷却已被广泛采用，奶牛被散养于敞开的牛栏内，只用荫棚来防止太阳的照射。用一种专门设计的冷却器装在荫棚的一侧，将空气吹入奶牛的遮荫区域。荫棚的一侧常筑有一堵墙来减少自然空气流的干扰。由于这种半开放的条件，实际需要比密闭舍更多的空气流。目前的推荐值要求每头牛至少为 $0.5\text{米}^3/\text{秒}$ 的通风量。由于一头产奶母牛需要 $4\sim 5$ 平方米的遮荫面积，这样空气流相当于每分钟换气 $2\sim 2\frac{1}{2}$ 次。在这种改善过的舒适条件下，每头牛每年比只有荫棚时多产奶50公斤。另外繁殖性能大为改善，大致相当于因提高产奶量而带来的经济效益。虽然这种系统是昂贵的，但其综合经济效益大大超过了因采用蒸发冷却而增加的费用。

曾在美国的其它地区，包括密西西比，印地安那，路易西安那，阿卡拉荷马和佛罗里达进行过奶牛蒸发冷却的试验，在这些地区因较高的相对湿度影响了蒸发冷却效果。因此，蒸发冷却系统的经济效益似乎不够明显。

肉牛生产用的蒸发冷却

肉牛对热应激的反应为每日的增重减少，如果在较短的炎热天气之后，气候即变得温和

起来，有些肉牛可能因为补偿的增重而弥补部分损失。与体重增长有关的总的生理机能所产生的热量要比奶牛的泌乳和怀孕为少，因此，肉牛所受的热应激要比奶牛小。对肉牛饲养场而言，繁殖并非业务的一部分，因此，任何环境改善所需的费用必需由增重的提高来加以补偿。在加利福尼亚和亚利桑那所进行的试验表明通过采用蒸发冷却可使生产性能有所改善，但提高的水平还赶不上所耗的费用。因此，为肉牛生产装备蒸发冷却系统不能认为是切实可行的。