

# 纸质湿帘力学特性及其测试方法

王莉, 丁小明

(农业部规划设计研究院设施农业研究所, 北京 100125)

**摘要:** 纸质湿帘材料是目前温室湿帘-风机降温中应用最为广泛的工业化产品, 其质量影响着使用效果, 但目前尚缺少力学特性的试验测试及评价方法。通过对纸质湿帘进行力学试验研究, 提出了“抗压强度”和“剥离强度”的概念并给出定义, 将其作为评价纸质湿帘质量的力学性能参数。还分析论述了“抗压强度”和“剥离强度”的试验原理, 研究确定了测试方法, 通过采用干燥和浸湿 2 种状态下的湿帘进行测试, 对测试方法进行了验证。结果表明, 测试方法需要的仪器设备具有通用性, 易于达到试验要求的条件, 试验数据有较高的重复性, 能够反映出湿帘的质量, 因此可以用作湿帘产品力学特性的质量评价。

**关键词:** 力学特性, 抗压强度, 剥离, 测试, 湿帘

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.045

中图分类号: S625.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0267-05

王莉, 丁小明. 纸质湿帘力学特性及其测试方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 267-271.

Wang Li, Ding Xiaoming. Mechanical performance and test method for water wet-pad[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 267-271. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

湿帘-风机降温是温室中应用最为广泛的降温措施, 不仅在现代化温室中使用, 近年来在日光温室中也较多采用<sup>[1]</sup>。湿帘风机降温设备的核心部件是湿帘, 可以制作湿帘的材料有很多, 如经特殊处理的湿强纸、杨木刨花、猪鬃、草垫、竹编、麻质纤维、特殊加工的陶瓷以及塑料等等。纸质湿帘是工业化产品, 自 20 世纪 80 年代初随温室引进中国后, 在消化吸收国外技术的基础上, 中国逐步开发出自己的产品, 经历了 20 余年, 越来越多品牌的产品出现在市场<sup>[2]</sup>。影响纸质湿帘性能的因素很多。如湿帘用纸的吸水性与其他性能、湿帘用胶的质量与数量、湿帘压型工艺及切制工艺等等。纸质湿帘性能, 如换热效率、通风阻力、强度、尺寸精度、比表面积和湿涨率等, 影响到湿帘-风机降温系统的降温性能、工程安装质量以及设备使用的经济性<sup>[3]</sup>。

虽然在开发湿帘产品过程中为了解产品性能, 有些企业也进行过必要的试验测试, 但迄今为止没有统一的性能要求和测试方法技术标准。

为了在行业中开展湿帘产品性能评价和质量合格评价工作, 农业部规划设计研究院承担了制定《纸质湿帘性能测试方法》农业行业标准的任务。本文拟在试验研究的基础上对纸质湿帘力学特性参数及测试方法进行探讨。

## 1 湿帘受力特点分析

材料在力的作用下显示出的与弹性和非弹性反应相关或包含应力-应变关系的性能称为材料的力学性能, 也就是材料在经受外力作用的过程中呈现的变形规律和破坏形态<sup>[4]</sup>。材料的力学性能需要通过试验进行测定。用于温室进行直接蒸发降温的湿帘材料在温室中担负了蒸发降温的换热媒介的功能, 同时又承担着温室围护结构材料的功能, 研究及测定其力学性能是非常必要的。

用于表述材料力学性能的参数因材料而异, 如金属材料的主要参数有各类强度、硬度、韧度和疲劳等<sup>[5]</sup>, 而瓦楞纸板的主要参数有耐破强度、边压强度、粘合强度等<sup>[6]</sup>。这些用来描述材料性能的参数都是材料用于生产实践中经长期总结提炼的结果, 最能够反映材料受到各类外载荷作用时表现出的变化情况和破坏特征。

采用何种参数规范湿帘材料的力学性能以及采用何种试验测试方法来明确这些力学性能是本研究需要解决的问题。

抗拉、抗压、抗弯曲强度是一般工程材料的主要力学性能参数, 基于湿帘材料的使用特点和材料运输方式, 主要以承受压力载荷为主, 故承压能力应是材料需具备的主要能力。湿帘材料是由多层波纹纸板粘合而成, 基于湿帘材料的结构工艺特点, 考核波纹纸板间粘合的牢固程度又显得尤为重要, 考核波纹纸板间粘合的牢固程度就是要考核粘胶剂的性能。因此, 首先需要进行材料的压缩试验与剥离试验来考核和规范材料的抗压强度与剥离强度 2 个关键性能参数。

湿帘在温室中使用时呈现的状态有干燥状态和浸湿状态 2 种。干燥状态就是湿帘在自然环境中呈现的状态, 未经水浸泡或淋湿, 或者浸湿后经蒸发干燥后的状态都

收稿日期: 2009-10-26 修订日期: 2010-12-06

基金项目: 农业部行业标准制定“纸质湿帘性能测试方法”

作者简介: 王莉(1963—), 女, 研究员, 主要从事设施农业和果蔬加工领域技术装备的研究及工程设计咨询。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院, 100125。Email: wanglicaae@163.com

属于干燥状态,湿帘作为产品走出工厂在运输过程中呈现的状态也都处于干燥状态。所谓浸湿状态指湿帘在蒸发降温使用过程中水不断流过使其完全浸湿的状态或者将湿帘放入水中浸泡后取出的状态,它是湿帘工作过程中呈现的一种状态。因此,对于湿帘力学性能的考虑需包括干燥和浸湿2种状态下的特征。

## 2 试验原理和方法

### 2.1 压缩试验

压缩试验需要在压力试验机上进行,对材料试样施加压力,考察材料随施加的压力呈现出的变化情况。

湿帘材料的结构由波纹形纸板交错叠放粘合而成,再经过剪裁制作出长方体块状湿帘产品。各厂家生产的湿帘材料的波纹形状和大小各异,波纹纸板叠放时交错的角度不同,剪裁时湿帘的切断面与湿帘波纹的夹角也不相同,总之不具有材料结构的相同性。另外,与金属、玻璃等各向同性材料不同,湿帘材料沿不同方向的力学性能有较大的差异,因此在进行材料压缩试验时,有必要明确湿帘材料的方向。

为能够准确反映出提供给用户使用的湿帘成品材料的抗压力学性能,材料的使用状态是材料试验确定方向的基础。无论各厂家湿帘材料的结构如何,产品外观均呈矩形,制作成箱体或在温室中安装使用也是以矩形为单元码成墙体状,垂直方向流水,水平方向通过气流。因此,以湿帘产品立方体块的3个方向也就是湿帘使用时的长、高和厚度方向做为力学试验的方向基准是最为合理的。如图1所示,试样按照湿帘产品立方体所确定的3个面的方向进行切割取样,湿帘工作时的竖直方向为压缩试验的施力方向。

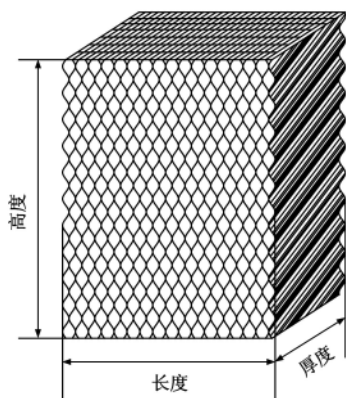


图1 湿帘试样  
Fig.1 Wet pad sample

由于湿帘材料呈现出的多孔性,当受到压力载荷时会沿受力方向产生收缩变形,压缩试验的原理就是基于材料的这一变形规律性,试验的方法是利用压力试验机沿试样中心轴方向,以恒定的速度压缩试样,测定试样压缩量与压力载荷之间的关系。

### 2.2 剥离试验

剥离试验是为了考证粘胶剂的“剥离强度”而进行的试验。剥离是胶粘接合处常见的破坏形式之一,其特

点是外力并非作用于整个胶接面,而是集中在一条线上,也称为线应力。当作用于这条线上的外力大于粘胶剂的粘接强度时,被粘接物体之间开始分离。剥离试验中被粘的两物体至少有一件是挠性材料。目前国内外常用的剥离试验方法主要有180°剥离法、T剥离法、滚筒剥离法和浮辊剥离法等<sup>[7-11]</sup>。

湿帘纸为挠性材料,湿帘的粘合为两两波纹纸板之间的粘合,由于波纹纸板之间交错一定的角度,粘合呈点接触。鉴于湿帘纸为挠性材料及其粘合特点,选用T剥离法进行试验,如图2。剥离试验时作用力集中的作用线应该是粘接点形成的直线,因此应保证作用力的方向与瓦楞线的方向垂直。取样方法如图3所示,在湿帘高度和厚度方向形成的平面内截取矩形试样,试样长度方向为剥离方向,宽度方向与一层波纹纸的波纹方向平行,通过手工剥离的方法使试样有完整的两层波纹纸。试样宽度 $b_{bl}$ 应保证平行于波纹方向的每排胶粘点数相同,多余胶粘点应手工剥开。

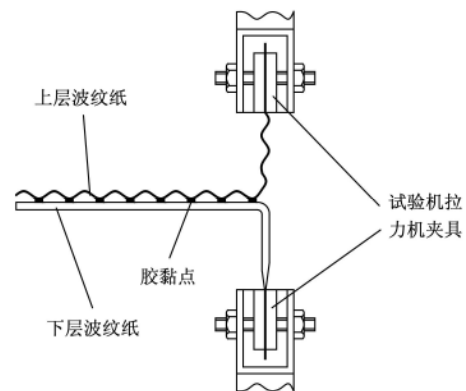
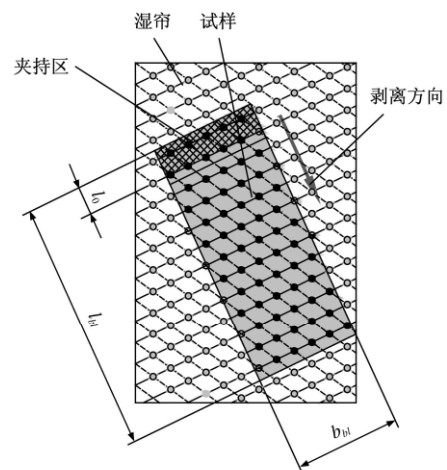


图2 T型剥离法原理示意图  
Fig.2 Sketch of "T" style peeling method



注:  $l_0$ 为夹持区长度;  $l_{bl}$ 为试样长度;  $b_{bl}$ 为试样宽度

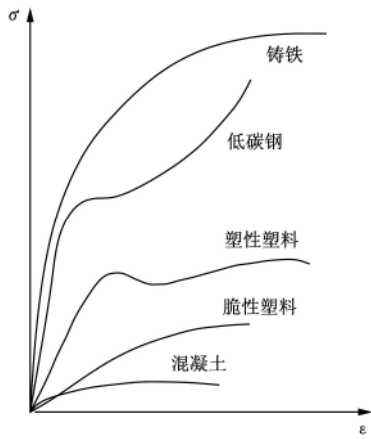
图3 剥离试验试样截取  
Fig.3 Sample cutting for peeling test

## 3 力学性能参数的确定

### 3.1 抗压强度

湿帘元件在受到压力作用时呈现的变形情况与工程

中常用材料不同，工程中常用材料如钢材、工程塑料和混凝土材料等在进行压缩试验时呈现的应力 ( $\sigma$ ) 与应变 ( $\epsilon$ ) 关系见图 4。这些材料对于材料的抗压性，采用了不同的参数进行描述，铸铁、脆性塑料和混凝土采用的参数有“压缩强度”和“x%应变时的压缩应力”；塑性塑料采用的参数有“屈服压缩应力”、“压缩强度”和“破坏时的压缩应力”；而低碳钢则由于进入强化阶段后承受的压力会呈直线上升，无法确定压缩极限，而在屈服阶段前压缩曲线与拉伸曲线基本重合，所以采用拉伸试验来测定压缩性能<sup>[12-17]</sup>。如何描述湿帘的抗压强度值得探讨。



注：σ 为应力；ε 为应变

图 4 材料压缩试验时的 σ-ε 曲线

Fig.4 σ-ε curves for compressing tests of materials

经试验，湿帘材料受压时，压力与位移的关系如图 5。湿帘受压变形情况虽然与这些材料不同，但仍表现出明显的弹性阶段和屈服阶段，弹性阶段材料的变形随力载荷呈比例增长的关系。而由于湿帘纸所独具的塑性，进入屈服阶段后，承压能力不断上下波动，但不会出现断裂破坏点。

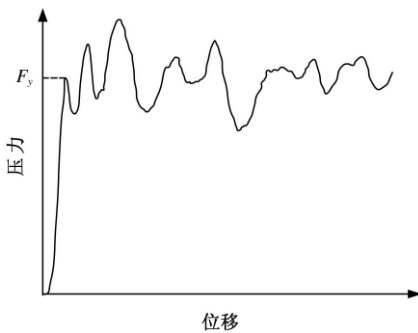


图 5 湿帘受压时，压力与位移的关系

Fig.5 Relationship between physical strength and displacement while sample being pressed

虽然湿帘有显著的弹性阶段，但是通过 70-90 型（湿帘波纹高度 7 mm，两层波纹纸波纹角之和为 90°）和 50-90 型（湿帘波纹高度 5 mm，两层波纹纸波纹角之和为 90°）湿帘材料试验得出的结果表明，弹性阶段对应的变形量很小，2 种规格材料均小于 5 mm，并且不随试样承压面

积的改变而变化，如图 6。这一点也说明了纸质湿帘材料的承压能力很弱。

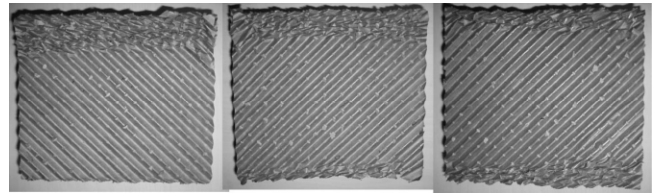


图 6 湿帘受压时变形情况

Fig.6 Changes of wet-pad after compressing test

湿帘受压时，材料沿作用力两端发生破坏，其特征表现为褶皱叠合。从第一次出现压力不增加开始，材料就已经出现了塑性破坏，之后出现的波动性压力升高表现出端部材料叠合承压的能力，但这种承压能力也很有限，随着位移量的继续增加，材料的破坏继续向内部延伸，而压力不会继续升高。这种变形现象能够清晰地反映出湿帘材料结构的松散特征和传力特点，说明材料的变形并不是沿整个材料同时发生，而是从边缘到内部顺序进行，并且边缘已经发生破坏的时候中部材料仍不受影响，试样变形与试样高度无关，因此用单位变形的承压量来描述湿帘的抗压强度是不具有任何意义的。

本研究提出将位移量增加而第一次出现压力不增加时的应力作为湿帘的“抗压强度”，如图 5 中所示的  $F_y$  对应的应力  $\sigma_y$ ，可按式 (1) 计算。

$$\sigma_y = \frac{F_y}{L_t \cdot B_t} \quad (1)$$

式中， $\sigma_y$  为抗压强度，单位为  $N/mm^2$ ； $F_y$  为试样受压时，变形量增加而第一次出现压力不增加时的压力，N； $L_t$  为试样长度，mm； $B_t$  为试样厚度，mm。

### 3.2 剥离强度

按照相关标准的规定，剥离强度是指在规定的剥离条件下，使胶接试样分离时单位宽度所能承受的载荷，计算公式为式 (2)。

$$\sigma_T = \frac{F_T}{b_{bl}} \quad (2)$$

式中， $\sigma_T$  为剥离强度， $N/mm$ ； $F_T$  为剥离力，N； $b_{bl}$  为试样宽度，mm。

对于湿帘材料粘接的特殊性，用“单位宽度所能承受的载荷”规定湿帘的剥离强度存在一定的缺陷。由于湿帘为点接触粘合，当取样宽度与湿帘波纹间距成整数倍关系时，相同取样宽度内的粘接点数可能会出现不相同的情况，其试验结果会产生较大误差。因此本研究确定用单位粘接点承受的剥离载荷作为剥离强度。

按照上述取样方法进行剥离试验时，试验机拉力与位移的关系见图 7。可以看出在每排胶粘点处出现了拉力峰值，这些峰值是剥离每排胶粘点需要的剥离力，两峰值间拉力的迅速下降明示了两排胶粘点间的空隙状况。

本研究确定用剥离每排胶粘点峰值拉力计算剥离强度，如式 (3)。

$$f_T = \frac{F_{T1} + F_{T2} + F_{T3} + \dots + F_{TN}}{N_T} \quad (3)$$

式中,  $f_T$  为剥离强度, N/胶结点;  $F_{T1}$ 、 $F_{T2}$ 、 $\dots$ 、 $F_{TN}$  为第 1 至第  $N$  排的剥离力, N;  $N_T$  为试样的总胶结点数。

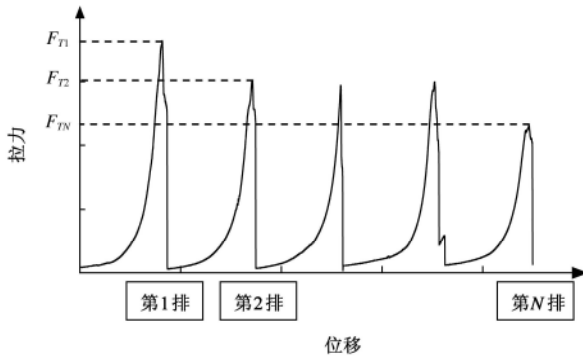


图 7 剥离试验时拉力与位移的关系

Fig.7 Relationship between physical strength and displacement during peeling test

## 4 试验验证与结果分析

### 4.1 抗压强度试验

#### 1) 试样的裁切

选择规格 50-90 和 70-90, 厚度分别为 100、150 mm 的湿帘, 按图 1 的要求, 裁切试验样品, 每种试样取 3 个, 见表 1。

表 1 抗压强度试验结果

Table 1 Results of tensile strength tests

湿帘规格*	试验状态	波纹纸层数	抗压强度/kPa	标准差率/%
50-90-100	试验干燥	19	138.7	4.2
		29	128.7	
		39	138.3	
	浸湿饱和	19	85.9	3.2
		29	80.5	
		38	82.8	
50-90-150	试验干燥	19	151.7	1.7
		29	152.2	
		39	156.4	
	浸湿饱和	19	85.5	3.4
		29	85.6	
		39	90.6	
70-90-100	试验干燥	14	57.3	2.8
		20	60.5	
		26	58.5	
	浸湿饱和	14	33.8	3.2
		20	35.3	
		26	33.1	
70-90-150	试验干燥	14	62.0	4.6
		21	66.8	
		27	61.5	
	浸湿饱和	14	40.0	4.9
		19	39.0	
		28	36.3	

注: \*湿帘规格用波纹高度、波纹角和湿帘厚度表示。

#### 2) 试验干燥状态下的试样准备

用量程范围为 300 mm, 最小读数刻度为 0.2 mm 的游标卡尺测量试验样品的宽度和厚度, 并记录湿帘纸的层数。干燥状态试样在温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度为  $50\% \pm 2\%$  的环境下进行状态调节 24 h 以上。

#### 3) 浸湿饱和状态下的试样准备

选择规格 50-90 和 70-90, 厚度分别为 100、150 mm 的湿帘, 按图 1 的要求, 裁切试验样品各 3 个。记录湿帘纸的层数。将样品完全浸泡于清水中, 时间不少于 4 h, 取出沥干后, 用量程范围为 300 mm, 最小读数刻度为 0.2 mm 的游标卡尺测量试验样品的宽度和厚度。

#### 4) 试验

在温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度为  $50\% \pm 2\%$  的环境下试验, 依次将表 1 中的样品放入试验机, 试验机满足 GB/T 16491—2008 中规定的 05 级<sup>[18]</sup>, 试验速度为 50 mm/min。测试湿帘试样的抗压强度。

#### 5) 试验结果

表 1 给出了抗压强度试验结果。从表 1 中可以看出, 不同波纹纸层数的湿帘试样在同一试验状态下进行试验时其结果具有较高的一致性, 可以认为抗压强度不受波纹纸层数的影响, 因此在标准中可以对取样时的波纹纸层数作出限定。

从表 1 中还可以看出, 经浸泡后的湿帘抗压强度明显下降, 本试验采用的产品其下降幅度达 38~43%。可见对于湿帘产品, 有必要分别在干燥状态和浸湿状态下进行试验, 以判明产品处于不同状态下所表现出的性能。

### 4.2 剥离强度试验

#### 1) 试样的裁切

选择规格 50-90-200 和 70-90-200 的湿帘, 按图 3 的要求裁切试验样品, 每种试样取 3 个, 见表 2。50-90-200 和 70-90-200 规格的湿帘用于试验的粘接点分别为 6 个和 5 个。

#### 2) 干燥状态下的试样准备

干燥状态试样在温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度为  $50\% \pm 2\%$  的环境下进行状态调节 24 h 以上;

#### 3) 浸湿饱和状态下的试样准备

将样品完全浸泡于清水中, 时间不少于 4 h, 取出沥干 10 s 后试验。

#### 4) 试验

在温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度为  $50\% \pm 2\%$  的环境下试验, 依次将表 2 中的样品放入试验机, 试验机满足 GB/T 16491—2008 中规定的 05 级, 试验速度为 50 mm/min。测试试样的剥离力。

#### 5) 试验结果

表 2 给出了剥离强度的试验结果。可以看出, 湿帘单个胶结点的承载力较小, 经浸湿后会呈明显下降, 本试验采用样品下降达 21%~26%, 因此在不同状态下测试剥离强度很有必要。

试验结果还可以看到, 70-90 型湿帘的剥离强度大于 50-90 型, 观察试验用湿帘样品的胶结点, 70-90 型的粘

胶点面积要大于 50-90 型。可见, 不同产品的粘胶状况不同, 剥离强度能够反映出波纹纸之间的粘合情况。

表 2 剥离强度试验结果

Table 2 Samples and results of peeling strength tests

湿帘规格	试样状态	剥离强度/(N·胶粘点 <sup>-1</sup> )
70-90	浸湿饱和	2.67
	试验干燥	3.37
50-90	浸湿饱和	1.94
	试验干燥	2.61

## 5 结 论

本文针对影响湿帘质量的最重要的两方面力学性能特性进行了研究, 提出了抗压强度和剥离强度 2 个评价纸质湿帘质量的力学性能参数, 并研究确定了试验测试方法。通过选用波纹角为 90°, 波纹高度分别为 5 和 7 mm, 厚度分别为 100 和 150 mm 的湿帘产品进行试验, 验证了该试验测试方法的科学合理性。试验结果表明, 提出的 2 个力学性能参数能够反映出湿帘产品质量状况, 其测试方法具有很好的重复性, 并且试验测试利用通用材料试验机<sup>[18-19]</sup>就可以完成。经过干燥状态和浸湿状态的对照试验, 可见湿帘的力学性能明显改变, 说明规定在不同状态下进行试验测试对于科学评价湿帘产品质量非常必要。

### [参 考 文 献]

[1] 王铁良, 李天来, 白义奎, 等. 湿帘降温系统在东北型节能日光温室中的降温效果[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 837-840.  
Wang Tieliang, Li Tianlai, Bai Yikui, et al. Experimental research on the application of wet screen-air blower cooling system in northeast style energy saving solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(6):

837-840. (in Chinese with English abstract)  
[2] 金羽周, 黄之栋, 崔引安. 温室蒸发湿帘风机降温系统热环境的研究[J]. 农业工程学报, 1987, 3(1): 47-58.  
Jin Yuzhou, Huang Zhidong, Cui Yinan. Research on heat environment in a greenhouse with fan-pad cooling system[J]. Transactions of the CSAE, 1987, 3(1): 47-58. (in Chinese with English abstract)  
[3] 周长吉, 崔引安. 蜂窝纸湿帘用胶粘剂的试验研究[J]. 北京农业工程大学学报, 1988, 8(2): 36-44.  
Zhou Changji, Cui Yinan. Experimental study on adhesive used in alveolate pad made of paper[J]. Transactions of the Beijing Agricultural Engineering University, 1988, 8(2): 36-44. (in Chinese with English abstract)  
[4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
[5] GB/T 10623-2008 金属材料力学性能试验术语[S].  
[6] GB/T 6544-2008 瓦楞纸板[S].  
[7] GB/T 2790-1995 胶粘剂 180°剥离强度试验方法 挠性材料对刚性材料[S].  
[8] GB/T 2791-1995 胶粘剂 T 剥离强度试验方法 挠性材料对挠性材料[S].  
[9] GB/T 7122-1996 高强度胶粘剂剥离强度的测定 浮辊法[S].  
[10] YBB 0010-2003 剥离强度测定法[S].  
[11] GB/T 2790-1995 胶粘剂 180°剥离强度试验方法 挠性材料对刚性材料[S].  
[12] GB/T 14484-2008 塑料 承载强度的测定[S].  
[13] GB/T 1041-2008 塑料 压缩性能的测定[S].  
[14] GBJ81-85 普通混凝土力学性能试验方法[S].  
[15] GB-T1964-1996 多孔陶瓷抗压强度试验方法[S].  
[16] GB/T 22873-2008 瓦楞纸板 粘胶抗水性的测定(浸水法)[S].  
[17] GB-T 7314-2005 金属材料 室温压缩试验方法[S].  
[18] GB/T 16491-2008 电子式万能试验机[S].  
[19] GB/T 261-2007 试验机 通用技术要求[S].

# Mechanical performance and test method for paper wet-pad

Wang Li, Ding Xiaoming

(Institute of Facility Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Fan-pad cooling is one of the most popular and economic cooling method in greenhouse. Wet-pad is the most important component of the fan-pad cooling equipment. Wet-pad made of paper is the industrialized product and widely used. The quality of wet-pad affects the using results. Besides thermal and ventilating resistance performances, the mechanical performances are needed to evaluate the wet-pad quality. By now there is no evaluating method for the mechanical performances of wet-pad. In this paper, based on mechanical performances tests of wet-pad, two new concepts which were tensile strength and peeling strength of wet-pad were put forward and used as the parameters to describe mechanical performances. Also the test principles and methods were discussed. Besides, the methods were verified through the wet-pad tests in two conditions which were dry and wet. The results show that the test equipment are common used and test data have good repeatability. The method can be used to evaluate the mechanical performances of wet-pad.

**Key words:** mechanical properties, tensile strength, peeling, testing, wet-pad