

# 经编间隔织物球形压缩试验与仿真分析

沈瑶, 刘慧, 钱静

(江南大学, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 在经编间隔织物静态缓冲性能研究的基础上, 采用了试验和有限元仿真的分析方法, 探讨了间隔织物在球形压缩情况下的压缩特性, 提出了各因素对织物压缩性能影响的主次关系, 为获取具有理想力学舒适性的坐垫、床垫材料或其他缓冲包装材料提供依据。

**关键词:** 经编间隔织物; 球形压缩试验; 有限元仿真分析

中图分类号: TB484.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0001-04

## Spherical Compression Test and Simulation Analysis for Warp-Knitted Spacer Fabric

Shen Yao, Liu Hui, Qian Jing

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Based on the research of the static cushioning properties of warp-knitted spacer fabric, spherical compression properties of warp-knitted spacer fabric are explored, and the primary and secondary relations of factors affecting the fabric compression properties are proposed by using test and finite element simulation analysis. Then it also provides the basis for gaining the cushions, mattresses or other cushioning packaging materials with the ideal mechanics and comfort.

**Key words:** warp-knitted spacer fabric; spherical compression test; finite element simulation analysis

经编间隔织物是一类具三维立体结构的产品<sup>[1]</sup>, 如图1所示。

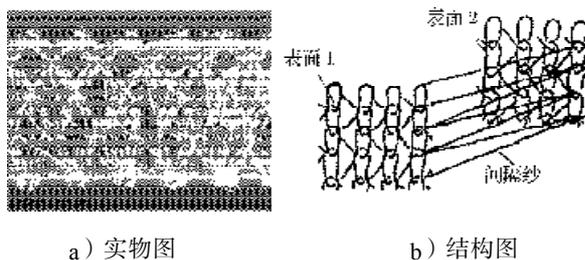


图1 经编间隔织物示意图

Fig. 1 The sketch of warp-knitted spacer fabric

经编间隔织物的两面层间存在着一由单丝支撑的大容积空间, 厚度可达60 mm, 可容纳大量空气。正因这种独特的结构, 它具有特殊的压缩特性和微气候调节能力, 被广泛应用于服装和装饰等领域。作为一种

新型衬垫材料, 它具有良好的抗压回弹性、舒适性、透气透湿性、原料适应性和可回收利用等特点<sup>[2]</sup>, 因此将可能广泛应用于包装领域。本文基于其静态缓冲性能研究<sup>[3]</sup>之上, 通过试验和有限元仿真, 探讨间隔织物在球形压缩情况下的压缩特性, 从而获取具有理想力学舒适性的坐垫、床垫材料或其它缓冲包装材料。

## 1 球形压缩理论

对于球形压缩, 当球体压入时, 接触球面(半径为 $a$ )上的压力分布是不均匀的, 其数值是随着压力点离开压力面中心的距离 $r$ 的增加而不断减小的一个函数, 如图2所示, Hertz接触理论<sup>[4]</sup>在满足: 1) 材料是均质的; 2) 小应变; 3) 每个物体可被看做是一个弹性半空间; 4) 表面无摩擦等条件的情况下, 计算了接触面呈圆形的压力分布, 即:

$$P(r) = \frac{3P}{2\pi \cdot a^3} \sqrt{a^2 - r^2}, \quad (1)$$

式中:  $P(r)$  为离开压力面中心  $Z$  轴距离  $r$  处的点压力, 单位为  $\text{kPa}$ ;  $P$  为作用于球体上的压力, 单位为  $\text{N}$ ;  $a$  为接触球面半径, 又称接触半宽, 单位为  $\text{mm}$ ;  $r$  为压力点离开压力面中心  $Z$  轴的距离, 单位为  $\text{mm}$ 。

由式 (1) 可知, 在压力中心处:

$$P_{r=0} = 3P / (2\pi \cdot a^3) = P_0, \quad (2)$$

在压力边缘处有:  $P_{r=a} = 0$ 。 (3)

据弹性力学布希涅司克问题集中应力作用原理<sup>[5]</sup>, 在接触区表面正下方沿  $Z$  轴垂直压应力表达式为:

$$\sigma_z = P_0 \cdot \left( \frac{a^2}{a^2 + z^2} \right), \quad (4)$$

式 (4) 中:  $z$  为球形压缩时压陷顶点离开初始压缩面的深度, 单位为  $\text{mm}$ ;  $\sigma_z$  为球形压缩时压陷顶点 (即最大压陷深度所对应的点) 的垂直压应力, 单位为  $\text{kPa}$ 。

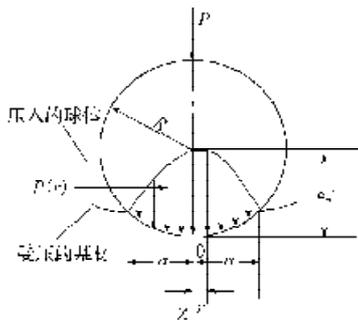


图2 球形压缩时球体压入基材后的压力分布示意图

Fig. 2 The distribution of pressure sketch after spherical compression ball into the substrate

## 2 球形压缩试验条件及方法

### 2.1 试验条件

1) 试验仪器设备: LRX plus 电子材料试验机、恒温恒湿试验机 THS-AOC-100AS、自制圆形压头  $\phi 100 \text{ mm}$ ;

2) 试验环境条件: 温度为  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $(50 \pm 5)\%$ ;

3) 试验样品: 试验所用样品为常州市武进五洋纺织机械有限公司提供的一系列不同结构的间隔织物。按照试验标准要求, 在此选择每种试验样品的数量为 8 件, 试验前试验样品在恒温恒湿试验机中进行至少 16 h 的预处理。试验样品的具体参数见表 1。

结构参数简介: 间隔丝细度 (单位为  $\text{mm}$ ) 即间隔丝横截面的直径; 面密度即单位面积上间隔丝 (纱) 的根数, 有纵密和横密之分, 纵密用  $\text{cpc}$  表示, 横密用  $\text{wpi}$  表示; 垫纱角度 (单位为  $^\circ$ ) 是间隔丝 (纱) 与织物表面所成的角度, 它决定了间隔织物的静态稳定性; 间隔距离 (单位为  $\text{mm}$ ) 即织物的厚度。

表 1 不同结构间隔织物规格变化表

Tab. 1 Different spacer fabric structure specifications variation table

编号	间隔丝细度 $\phi$ /mm	面密度 $\rho$ /cpc	垫纱角度 $\theta$ /°	厚度 $d$ /mm**
A <sub>1</sub>	0.22	10	90	4 × 9
A <sub>2</sub>	0.18	10	90	4 × 9
A <sub>3</sub>	0.15	10	90	4 × 9
B <sub>1</sub>	0.22	8.5	60	4 × 9
B <sub>2</sub>	0.22	7.5	60	4 × 9
B <sub>3</sub>	0.22	6.5	60	4 × 9
B <sub>4</sub>	0.22	4.5	60	4 × 9
C <sub>1</sub>	0.22	8	90	4 × 9
C <sub>2</sub>	0.22	8	60	4 × 9
C <sub>3</sub>	0.22	8	45	4 × 9
C <sub>4</sub>	0.22	8	30	4 × 9
D <sub>1</sub>	0.22	10	90	4 × 9
D <sub>2</sub>	0.22	10	90	4 × 16
D <sub>3</sub>	0.22	10	90	4 × 20

\*: 考虑到  $90^\circ$  垫纱角度的不稳定性 and 附着性, 一般穿插有  $45^\circ$  的间隔丝。

\*\* : 考虑试验标准对样品厚度的要求, 选取 4 层样品进行叠加试验。

本文讨论的经编间隔织物两表层材质为 500D 144F 涤纶 FDY, 间隔丝为不同直径的涤纶单丝。

### 2.2 试验方法

进行球形压缩试验时, 需将自制的球形压头放置到间隔织物或海绵上, 考虑到球形压头自重对试验样品的影响, 应设置预载荷, 然后再进行压缩试验, 通过压力传感器即可测得压陷顶点的压力值。压缩情况如图 3 所示, 图中  $H$  为间隔织物初始厚度;  $l$  为间隔织物受压后的压陷深度;  $H_1$  为间隔织物受压后的厚度;  $P_1$ 、 $R_1$  为压力与反压力;  $S_1$  为间隔织物受压面积;  $S_2$  为间隔织物受压时的下陷投影面积, 且  $S_1 > S_2$ 。

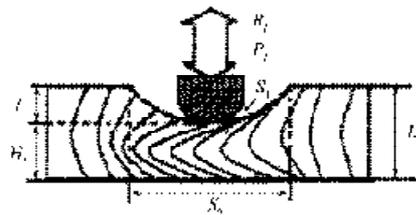


图3 间隔织物纵向截面中间隔丝受球形压缩后的弯曲示意图

Fig. 3 The bending diagram of spacer thread after spherical compression in the vertical cross-section of spacer fabric

## 3 球形压缩试验结果

### 3.1 试验及数据处理

对表 1 中不同结构的间隔织物分别进行球形压缩试验, 可得到压力中心处的压力值  $P_0$ , 结合公式 (2)、(4), 可得到不同结构间隔织物在 25%、40% 和 65% 应变情况下压力中心处 (即球形压缩的压陷顶点) 的垂直应力值, 见表 2。

### 3.2 讨论与分析

表2中, 当变化间隔织物的单丝直径和间隔距离时, 应力值的变化较明显, 因为根据单丝压杆力学模型<sup>[6]</sup>可知, 单丝越细或越长, 所能承受的临界压力  $F_{Cr}$  越小, 当施加较大压力时, 单丝容易出现失稳倒伏现象, 所以变化单丝的细度和长度 (即间隔距离) 其整

体应力值将有明显变化。

当变化间隔织物面密度和垫纱角度时, 应力值呈梯度变化, 变化规律和平板压缩<sup>[7]</sup>相似, 随着面密度和垫纱角度的增大应力值逐渐递增。具体缓压性能须根据外界压力和间隔织物对接触物体的包容性确定。

表2 间隔织物单丝不同应力值

Tab. 2 The stress of different spacer fabric thread Fineness kPa

试样	25% 应变时应力值				40% 应变时应力值				65% 应变时应力值			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	65.62	26.64	53.24	65.62	94.60	33.68	76.31	94.60	120.72	75.18	91.27	120.72
2	34.34	18.03	23.62	25.59	77.20	23.68	31.63	32.50	104.58	51.04	69.39	71.14
3	17.09	16.37	14.40	15.10	32.52	21.01	18.48	20.52	71.70	39.32	37.64	29.13
4		14.25	12.40			17.90	16.37			36.22	34.09	

## 4 球形压缩的有限元仿真

为了简化模型, 在建模之前进行如下假设:

1) 间隔织物受压时, 间隔纱发生弯曲, 随着外力的增大, 弯曲越严重; 外力消除后, 它又恢复原状。在压缩过程中, 主要是间隔纱弯曲导致织物厚度减小; 虽然织物表面层受到压力的作用, 但表面层的压力都传递到间隔纱上, 因此织物表面层发生的厚度减少可忽略不计, 只有当压力很大时, 间隔织物被压缩到密实状态, 间隔织物表面层厚度才被压缩, 所以在压缩的初始阶段我们把间隔织物的表面层厚度忽略。

2) 织物在压缩过程中, 织物两表面在水平方向几乎没有滑移, 织物表面的组织结构保持稳定, 所以把间隔织物假想成间隔纱的集合体, 间隔纱没有线圈转移现象, 压缩过程中间隔纱两端都固定在两个压缩面上, 只有转动, 没有水平方向的移动, 仅仅是间隔纱发生弹性弯曲。因此可以把间隔纱看成是弹性杆, 受压时间隔纱的长度保持不变。

3) 间隔纱由于直径与长度相比很小, 可认为它们间相互独立, 压缩过程中不发生相互挤压作用<sup>[8]</sup>。

4) 在压缩初始阶段, 把间隔织物理想化为一个弹性体, 它的面层结构可看成是一个弹性壳。

根据以上假设, 对于间隔织物这类复杂材料, 试验证实其材料特性具有非线性的特性, 其应力-应变关系<sup>[3]</sup>较复杂, 本文选择正交各向异性的材料模型<sup>[9,10]</sup>, 与之相关的参数分别为:

表层单元类型 SHELL63, EX 1.0E11, PRXY 0.3, DENS 40; 间隔丝单元类型 BEAM4, EX、EY、EZ、PRXY、PRYZ、PRXZ、GXY、GYZ、GXZ输入栏中分别输入 1.0E11、5.0E11、5.0E11、0.3E-3、0.3、0.3、0.5E11、1.92E11、1.92E11, DENS 2E2; 半球单元类型 Solid92, EX 1.5E11, PRXY 0.27, DENS 7300。

间隔织物网格划分后的模型如图4所示, 对网格划分后的模型进行耦合位移约束, 并设置半球上的所

有节点 X、Z 方向的位移量为 0, 以保证加载过程中球体不发生左右滑动, 然后在半球截面上加载均布面载荷。当球形压缩求解结束后, 选取间隔织物的上表面, 显示变形结果, 窗口中可看到间隔织物的上表面在受球形压缩后的变形情况, 见图5。然后选择压陷顶点处的节点 (即间隔织物与半球体初始的接触点), 执行 Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solution 命令, 选择 List Nodal Solution 对话框中的 Nodal Solution, 单击 Stress 下面的 Y-Component of stress, 窗口中将显示该节点处的应力值。

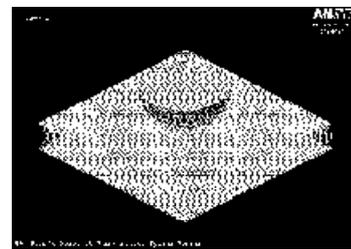


图4 球形压缩的网络划分结果

Fig. 4 The meshing results of spherical compression

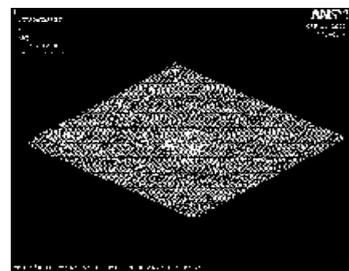


图5 压缩后的变形情况

Fig. 5 The deformation after compression

分别设置 Y-应力、Y-应变与时间的变化关系, 然后生成应力-应变曲线, 见图6, 利用 List Results 命令可读出应变为 25%、40% 和 65% 时的不同应力值。选择编号为  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_1$  的间隔丝进行球形压缩有限元仿真, 可得出 4 种结构下的仿真结果, 见表 3。

表3 不同参数下仿真与试验的应力值对比

Tab. 3 The stress comparison between simulation and experiment with different parameters kPa

类别	25% 应变时应力值				40% 应变时应力值				65% 应变时应力值			
	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_1$	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_1$	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_1$
仿真结果	46.27	20.11	25.47	77.18	81.55	26.82	35.57	100.23	126.42	63.97	85.71	148.35
试验结果	34.34	18.03	23.62	65.62	77.20	23.68	31.63	94.60	104.58	51.04	69.39	120.72

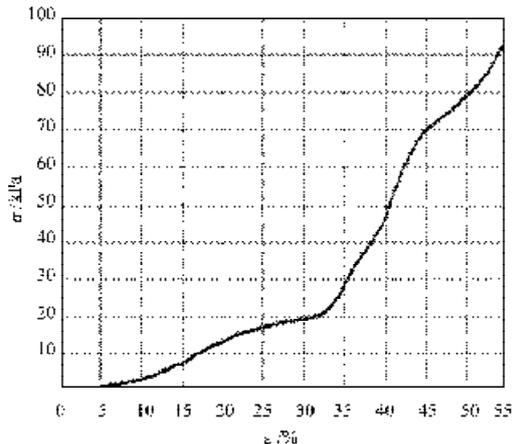


图6 间隔织物球形压缩过程中的应力-应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curve of spacer fabric in the course of spherical compression

比较仿真与实验结果,对于参数 $A$ 和 $D$ ,25%和65%应变时应力偏差较大(最大偏差为25.78%,最小偏差为14.98%),而40%应变时应力值偏差较小(最大偏差只有5.62%);对于参数 $B$ 和 $C$ ,25%和40%应变时应力偏差较小(最大偏差只11.70%),而65%应变时应力值偏差较大(最小偏差19.04%)。这主要是因为单丝在压缩过程中的不稳定性,而参数 $A$ 和参数 $D$ 对单丝的不稳定性影响较大,这与单丝力学模型相吻合,也从理论上进一步说明了仿真的准确性。

利用有限元模型可得出球形压缩情况下不同结构参数在应变25%、40%和65%时对应的应力值,再运用SAS软件对它们进行方差和回归分析,找出各参数之间的主次关系,并依此对间隔织物的结构进行设计优化。各因素的影响关系和回归方程如下:

$$\begin{cases} 25\%: x_4 > x_1 > x_3 > x_2; \\ 40\%: x_1 > x_3 > x_4 > x_2; \\ 65\%: x_4 > x_2 > x_3 > x_1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} 25\%: Y = 659.9043906x_1 + 7.4722461x_2 + \\ \quad 0.7750082x_3 - 1.2382053x_4 - 174.0383706; \\ 40\%: Y = 771.2956913x_1 + 10.3371122x_2 + \\ \quad 1.0360452x_3 - 1.8018133x_4 - 204.6070415; \\ 65\%: Y = 757.3691137x_1 - 14.2407879x_2 + \\ \quad 1.2824391x_3 + 2.2130953x_4 - 197.0383510. \end{cases}$$

其中 $Y$ 为应力值; $x_1$ 为间隔丝细度; $x_2$ 为面密度; $x_3$ 为

垫纱角度; $x_4$ 为间隔距离。

实际生产中,对于这4种影响因素,间隔纱密度和垫纱角度较容易进行改变,而间隔距离和间隔丝细度变化起来相对困难一些,同时还要结合实际的生产成本,做结构优选,既能满足应用需要又能降低成本。比如在应力差别较小的情况下,可变换次要影响因素垫纱角度来进行调节,这样它的密度不发生变化,克重几乎也没有变化,而生产成本则大大降低。

## 5 结语

本文在球形压缩试验和仿真分析的基础上,探讨了间隔织物在球形压缩情况下的压缩特性,通过模型仿真,提出了各因素对织物压缩性能影响的主次关系,为获取具有理想力学舒适性的坐垫、床垫材料或其它缓冲包装材料提供依据,在生产过程中可依此确定合适的结构参数,避免试织样品,节约生产成本,具有较高的理论指导意义。

## 参考文献:

- [1] 蒋高明. 现代经编产品设计与工艺[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2002: 412-415.
- [2] 蒋高明, 李大俊. 经编间隔织物的结构与性能[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2003, 2(4): 395-398.
- [3] 沈瑶, 钱静. 经编间隔织物静态缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008(3): 39-41.
- [4] Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业译. 北京: 高等教育出版社, 1992: 57-63.
- [5] Hanus J, Militky J. Synergy in 3D Nonwoven-PU Form Composite[C]//3rd INDO-CZECH Textile Research Conference. Dubrovnik: Croatia, 2004.
- [6] 单祖辉. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 263-283.
- [7] 缪旭红. 床垫用经编间隔织物的压缩性能[J]. 纺织导报, 2005(12): 66-68.
- [8] 叶晓华. 功能性间隔织物的结构与性能研究[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2006.
- [9] 刘坤, 吴磊. ANSYS有限元方法精解[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [10] 江克斌, 屠义强, 邵飞. 结构分析有限元原理及ANSYS实现[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(责任编辑: 廖友媛)