

醋酸纤维包装缓冲力学性能仿真与试验研究

张鹏¹, 沈伟¹, 钟琳¹, 曹云祥¹, 曾雄伟¹, 褚玮¹, 冯茂硕², 齐佳伟³

(1.湖北中烟工业有限责任公司武汉卷烟厂, 武汉 430000; 2.湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068; 3.燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 探究醋纤包装样棒对爆珠的缓冲力学性能, 减少样棒在高速输送时因受到冲击载荷导致爆珠破损。 **方法** 采用超弹性模型的方法对爆珠材料的本构模型进行定义, 通过仿真与程序迭代完成材料超弹性模型 2 个关键参数的确定; 运用 Abaqus 软件对醋纤包装样棒进行轴向和径向挤压仿真, 最后通过搭建试验台对样棒与爆珠分别进行拉伸试验和挤压试验。 **结果** 超弹性材料参数为 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa 时, 仿真计算出压板下压力 F 与爆珠理论所承受的最大压力值的相对误差为 3.4%, 符合醋纤包装样棒缓冲力学性能的仿真要求。随着样棒径向和轴向挤压量的逐渐增大, 压板的支反力也逐渐增大, 醋纤包装样棒在承受轴向冲击时对爆珠的缓冲效果更优秀。 **结论** 爆珠材料本构模型的建立及仿真试验分析为研究醋纤包装样棒的高速输送提供了理论基础。

关键词: 醋纤包装; 爆珠; 本构模型; 仿真

中图分类号: TB484.9; TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)15-0236-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.031

Simulation and Experimental Study of Cushioning Mechanical Properties of Acetate Fiber Packaging

ZHANG Peng¹, SHEN Wei¹, ZHONG Lin¹, CAO Yun-xiang¹, ZENG Xiong-wei¹, CHU Wei¹,
FENG Mao-shuo², QI Jia-wei³

(1. Wuhan Cigarette Factory, China Tobacco Hubei Industry Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the cushioning mechanical properties of acetate fiber packaging sample rod for burst bead, and reduce the damage of the burst bead caused by the impact load of the sample rod during high speed transportation. The constitutive model of the burst bead material was defined by the superelastic model method, and the two key parameters of the material hyperelastic model were determined through simulation and program iteration. In addition, Abaqus software was used to simulate the axial and radial extrusion of the acetate fiber packaging sample rod. Finally, a test platform was established to carry out tensile test and extrusion test on the sample rod and burst bead. When the superelastic material parameters were $C_{10}=5.2$ MPa and $D_1=0.38$ kPa, the relative error between the pressure F of pressure plate and the maximum pressure borne by the bead burst was 3.4% after calculated through simulation, which met the simulation requirements of the cushioning mechanical properties of the acetate fiber packaging sample rod. With the gradual increase of the radial and axial extrusion displacement of the acetate fiber sample rod, the support force of the

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 湖北省支持企业技术创新发展项目 (2021BAB010); 湖北中烟工业有限责任公司研发基金 (2022JSGY3WH2B003)

作者简介: 张鹏 (1979—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为设备技术研究及管理。

pressure plate also gradually increased, and the cushioning effect of the acetate packaging sample rod on the burst beads under axial force was better. The establishment of constitutive model for burst bead material and the simulation test analysis provide a theoretical basis for the high speed transportation of acetate fiber packaging sample rod.

KEY WORDS: acetate fiber packaging; burst bead; constitutive model; simulation

醋纤包装是缓冲包装的一种, 由醋纤包装样棒本体与爆珠两部分组成。通过使用颗粒嵌珠技术将含香精香料的液体小胶珠嵌入至醋纤包装样棒中, 以此来改善醋纤包装的气味。在使用时, 操作者可通过按压爆珠致其破裂, 使其内置的液态香精香料融入醋纤包装样棒纤维中, 达到增加湿度与提高香气效果的作用。醋酸纤维具有透水量大、不吸附味道、弹性相对较好等特点, 这为爆珠在醋纤包装缓冲提供了一定的保护。通常爆珠由芯材和壁材两部分构成, 壁材为用于包裹芯材的壳体, 常用的壁材通常由明胶或植物胶类构成^[1-2]。

在醋纤缓冲包装实际生产过程中, 醋纤包装样棒的高速输送时速度可达 300 m/min。由于在输送时运输路线曲折且空隙较小, 输送过程非常复杂, 很容易受到冲击载荷导致爆珠破损, 又由于爆珠自身物理特性较脆且易破, 醋纤包装样棒中大概有万分之一的爆珠会发生破裂, 这严重影响了醋纤缓冲包装的产品质量^[3]。与此同时, 由于爆珠被包裹在醋纤包装样棒中, 无法通过肉眼确定是否破损。目前, 国内外常规的醋纤包装样棒外观检测设备多用于检测气泡、颜色等缺陷^[4-6], 近些年来出现了一种醋纤包装样棒爆珠的检测装置, 主要使用图像检测技术根据触发后检测信号的不同显示出不同颜色, 可准确快速地检测出醋纤包装样棒中是否存在爆珠破损, 但该设备处于试验状态, 并未用于生产线的使用^[7-8]。由此可见, 由于醋纤样棒中爆珠破损的情况较为复杂, 且爆珠的破损检测技术还不成熟。为了探究醋纤包装样棒中爆珠破损的主要原因及样棒对爆珠的缓冲性能, 本文采用有限元仿真与试验验证结合的方法对醋纤包装模型进行轴向和径向仿真分析。

1 本构模型

1.1 爆珠材料本构模型建立

含有爆珠的醋纤包装样棒剖面视图见图 1。嵌入醋纤包装样棒中的爆珠为液体小胶珠, 其内部包裹着不同类型的液体香料。根据爆珠材料的非线性特性, 本文选择超弹性模型来进行爆珠材料的定义, 模型定义中的应变能量密度函数用于表征材料的状态和相关的应力。

Neo-Hookean 模型是具有代表性、适用于多种聚合物及高分子材料的超弹模型 (Hyperelastic)^[9]。其应变能密度函数表达式见式 (1)。

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^e - 1)^2 \quad (1)$$

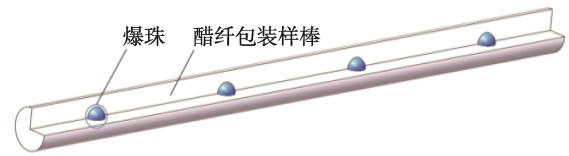


图 1 醋纤包装样棒结构模型

Fig.1 Structural model of acetate fiber packaging sample rod

式中: $\bar{I}_1$ 为偏张量第一不变量; J^e 为弹性体积比; C_{10} 和 D_1 为超弹性材料参数。定义见式 (2)。

$$\begin{cases} C_{10} = \frac{3(K - 2K\mu)}{4(1 + \mu)} \\ D_1 = \frac{2}{K} \\ K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为泊松比; E 为弹性模量。

在爆珠挤压过程中, 外形由球体变为橄榄球形, 形状变化前后如图 2 所示。

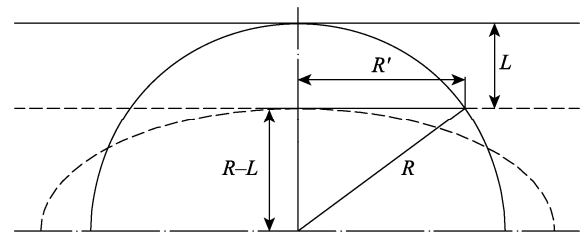


图 2 爆珠的挤压模型

Fig.2 Extrusion model of the burst bead

对于爆珠的材料, 其应力-应变关系呈现出高度的非线性, 需要对其材料参数进行反复验算从而得到准确的参数值。爆珠在受力过程中, 其应变和应力均发生了变化。首先由应变公式 $\varepsilon = L/R$ 、应力公式 $\sigma = F/S$ 、弹性模量公式 $E = \sigma/\varepsilon$ (其中 $S = \pi R'^2$, $R' = \sqrt{R^2 - (R-L)^2}$) 可得, 在挤压位移为 0.57 mm 时的初始弹性模量 $E_0 = 8.12$ MPa。由于爆珠由芯材和壁材组成, 变形以后总体积不变, 可将爆珠的材料看作为体积不可压缩材料, 取其泊松比为 0.499, 代入式 (1) 可得 Neo-Hookean 超弹性模型的初始稳态参数值 C_{10} 和 D_1 。由文献[10]可得, 在压缩速率为 10 mm/min、挤压量为 0.57 mm 时, 直径为 3.5 mm 爆珠的压破强度为 13.87 N。其次在 Abaqus 中计算验证, 在爆珠

初始材料参数为 C_{10} 和 D_1 下,在挤压位移为 0.57 mm 时,计算压板下压力是否达到了爆珠的压破强度。如果未达到爆珠的压破强度则重新进行迭代计算,直到满足要求。经计算弹性模量 $E=20.786$ MPa,材料参数 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa 时,压板下压力近似等于文献[10]中爆珠压破强度。计算流程如图 3 所示。

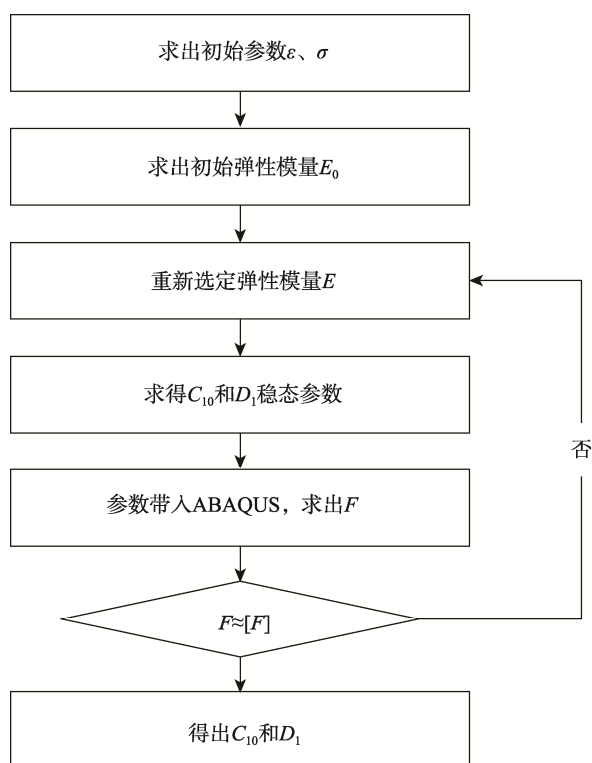


图3 材料参数求解流程

Fig.3 Material parameter solution flowchart

1.2 爆珠材料本构参数的验证

选用 Abaqus 仿真软件对爆珠的材料参数进行验证,材料模型选用 Neo-Hookean 超弹性模型,材料类型为各向同性,输入源选择系数,输入超弹性模型的稳态参数 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa。因爆珠材料具有不可压缩或近似不可压缩的性质,所以需要采用 8 节点六面体杂交减缩单元 C3D8RH 对模型进行网格划分,可得球体网格数量为 73 984。在设置接触属性之前先对上下压板进行刚体化处理,并对压板和爆珠的接触类型设置为面-面接触,2 个刚体与爆珠接触为硬接触。在初始分析步中对下刚体板施加完全固定约束,对上刚体板施加沿 y 轴负方向 0.57 mm 的位移, x 与 z 方向的位移均为 0。采用 Abaqus 静力通用求解器求解,模拟爆珠挤压过程。

由图 4 可知,爆珠在下压位移为 0.57 mm 时,S22 方向上的最大压应力主要集中在爆珠与上下钢板接触区域,最大应力为 11.06 MPa,此时压板所给

予小球的压力 F 为 13.388 N。综上可得,爆珠在材料参数 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa 时,仿真计算出压板下压力 F 与爆珠理论所承受的最大压力的相对误差为 3.4%。验证了爆珠超弹性模型中材料参数的准确性,且满足了醋纤包装样棒缓冲力学性能的仿真要求。

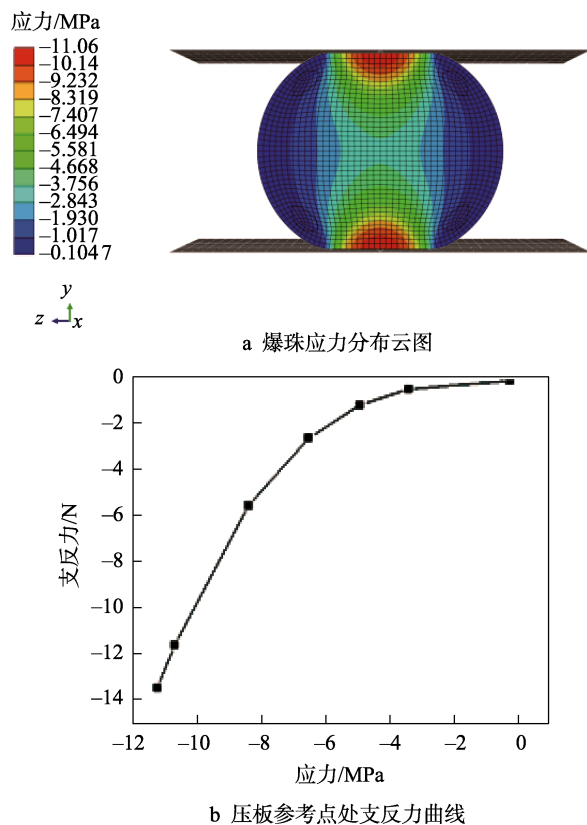


图4 爆珠仿真结果及曲线

Fig.4 Burst bead simulation results and curves

1.3 醋纤样棒本构模型

经扫描电镜 (SEM) 观察可知,醋酸纤维样棒的切口形状较为规则;由其截面形态可看出,纤维无皮芯结构,呈苜蓿叶形,周边较为光滑,少有浅的锯齿;纵面形态显示纤维束表面形态光滑平坦,较为均一,有明显的沟槽^[11-13]。

醋纤包装样棒属于各向异性材料,由大量连续长丝集束并卷曲而成的长条带状纤维束构成,样棒内部都有一定的孔隙率。从图 5a 可知,其应力-应变曲线为非线性关系,其在材料的不同方向上具有不同强度和刚度。样棒整体为圆柱形状,表现最为明显的就是其轴向和径向弹性模量不同。轴向弹性模量要比径向弹性模量大,且两者之间存在一定的倍数关系。醋酸纤维样棒降解前后应力-应变曲线如图 5 所示^[14],降解前后醋酸纤维素过滤棒的平均压缩模量下降了 15.14%。取降解前压缩模量作为样棒径向

的弹性模量。由图 5a 可知, 醋酸纤维应力-应变曲线在 2%~7% 时可看作线性变化, 取应变为 2%~7% 时的曲线图, 并提取醋酸纤维样棒降解前的坐标点, 利用最小二乘法定义径向模量可得样棒径向弹性模量 E 径向为 0.402 MPa。这里样棒轴向弹性模量 E 轴向为 2 MPa。

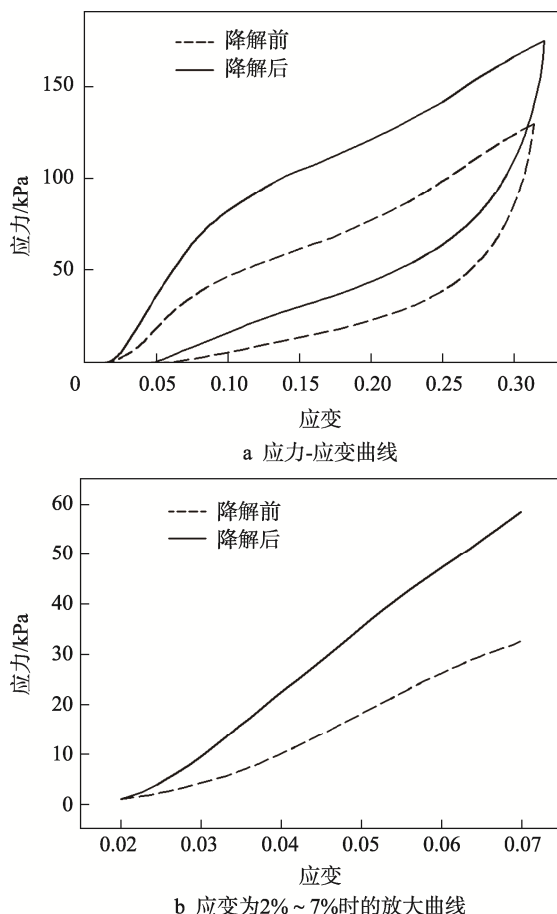


图 5 醋纤包装样棒应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curve of acetate fiber packaging sample rod

2 醋纤包装样棒仿真

爆珠材料模型选用 Neo-Hookean 超弹性模型, 材料类型为各向同性, 超弹性模型的材料参数为 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa; 在醋纤包装样棒径向和轴向材料模型中均选择各向同性的弹性模型, 弹性模量 E 分别为 0.417 MPa 和 2 MPa, 泊松比均为 0.382 7。

仿真模型中考虑到模型的对称性, 建立 3 个参考线对醋纤包装样棒分别进行切分, 取模型的 1/8 进行简化计算, 在靠近爆珠的部分网格设置更加紧密。取爆珠的网格类型为 C3D8RH, 醋纤包装样棒和压板网格类型为 C3D8R, 可得径向模型的网格总数为 640 428, 轴向模型网格总数为 599 603。

如图 6 所示, 对模型 yOz 、 xOz 、 xOy 这 3 个面分别施加对称约束: x ($U_1=UR_2=UR_3=0$)、 y ($U_2=UR_1=UR_3=0$)、 z ($U_3=UR_1=UR_2=0$)。接触类型采用面-面接触。对径向模型上的刚体施加沿 x 轴负方向的径向位移载荷, 数值为 0.85 mm, 如图 6a 所示; 对轴向模型上的刚体施加沿 y 轴负方向的轴向位移载荷, 数值为 2 mm, 如图 6b 所示。采用 Abaqus 通用求解器求解, 模拟醋纤包装样棒挤压过程。

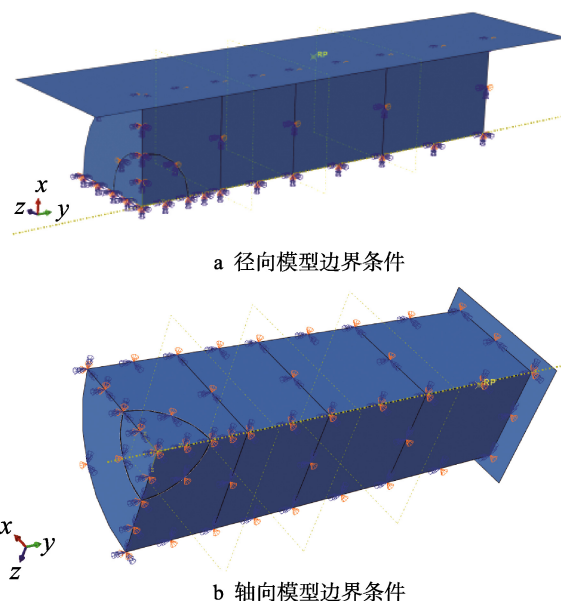


图 6 径向模型和轴向模型的边界条件
Fig.6 Boundary conditions for radial and axial models

醋纤包装样棒径向模型仿真结果如图 7 所示。在 S_{11} 方向上随着下压位移的逐渐增大, 压板的支反力也逐渐增大, 如图 7a 所示。但受到爆珠和醋纤包装样棒 2 种材料的组合的影响, 施加下压位移过大会发生材料的破坏行为, 从而导致仿真出现错误, 如图 7d 所示, 因此在仿真过程中下压位移建议不要超过 0.85 mm。当刚体压板沿 x 轴负方向下压 0.85 mm 时, S_{11} 方向上的最大应力发生在爆珠与醋纤包装样棒的接触区域, 数值为 0.371 MPa, 此时压板支反力 F 为 3.66 N。

醋纤包装样棒轴向模型仿真结果如图 8 所示。在 S_{22} 方向上随着下压位移的逐渐增大, 压板的支反力也逐渐增大, 如图 8a 所示。当刚体压板沿 y 轴负方向下压 2 mm 时, S_{22} 方向上的最大应力发生在样棒与爆珠的接触区域, 数值为 0.151 MPa, 对应的压板支反力 F 为 0.74 N。

综上所述, 对醋纤包装样棒分别进行轴向和径向力学性能分析, 结果如表 1 所示。醋纤包装样棒在径向和轴向受压时其压板支反力均小于爆珠的压破强度, 并且醋纤包装样棒在承受轴向力时对爆珠的缓冲效果更加优秀。

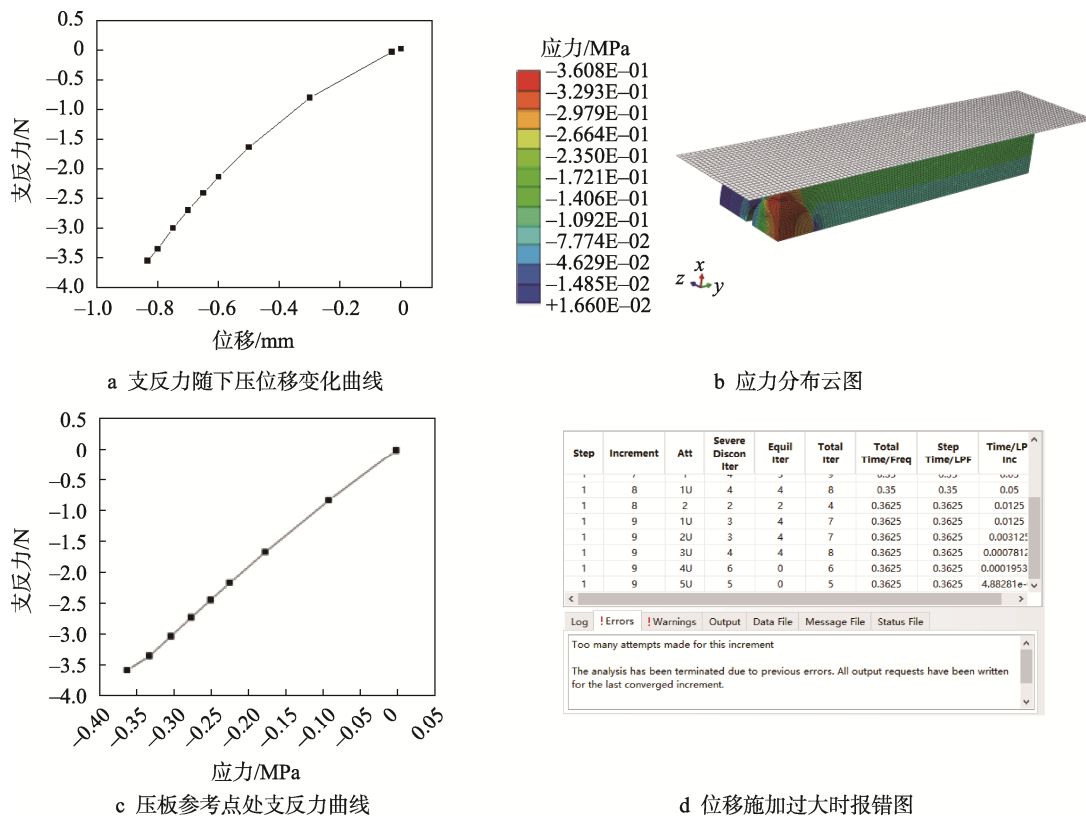


图 7 醋纤包装样棒径向模型仿真结果

Fig.7 Simulation results of radial model of acetate fiber packaging sample rod

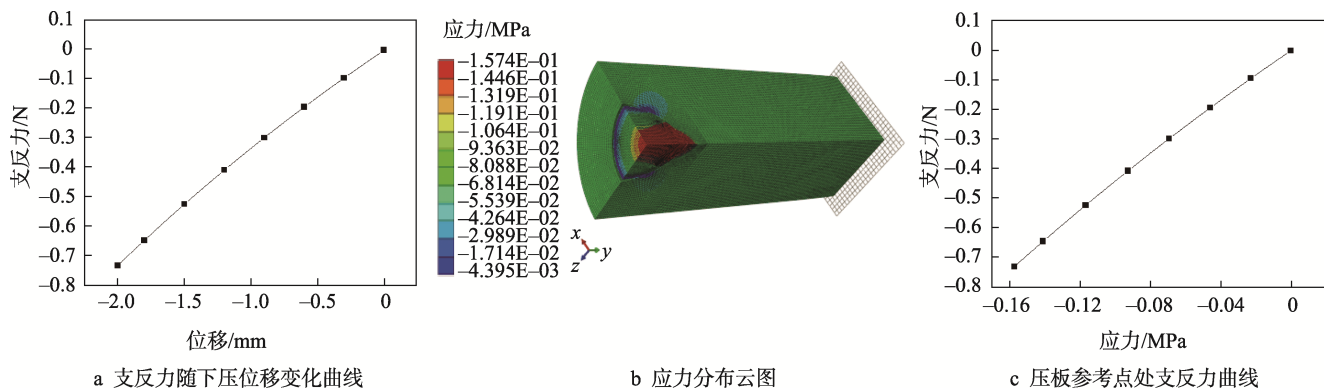


图 8 醋纤包装样棒轴向模型仿真结果

Fig.8 Simulation results of the axial model of acetate fiber packaging sample rod

表 1 径向和轴向受力状态下醋纤包装样棒的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of acetate fiber packaging sample rod under radial and axial stress

力施加方向	挤压量/mm	最大应力/MPa	压板支反力/N	爆珠压破强度/N
径向	0.85	0.371	3.66	13.87
轴向	2	0.151	0.74	13.87

3 试验与分析

3.1 滤棒拉伸试验

设计一款专用工装来固定醋纤包装样棒并进行

拉伸试验^[15],如图 9 所示。工装材质选用不锈钢,均采用 M5 内六角螺栓进行固定。采用万能材料试验机 Zwick Roell Z010 对醋纤包装样棒进行拉伸试验,如图 10 所示。进行拉伸后,带纸皮醋纤包装样棒拉伸曲线和剥皮醋纤包装样棒拉伸曲线分别如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知,带纸皮醋纤包装样棒的拉断强度约为 23.45 N,伸长约为 6.57 mm。载荷位移曲线发生断崖式下滑,这是由于样棒外部纸皮断裂导致的。样棒外部纸皮断裂后,由内部样棒纤维本体继续受力拉伸,拉力逐渐增大,直到发生完全撕裂。由图 12 可知,剥皮样棒的拉断强度约为 19.37 N,伸长量约

为 5.86 mm; 拉伸曲线较为平滑, 滤棒醋酸纤维本体受力拉伸, 拉力逐渐增大, 直到发生完全撕裂。



图 9 固定样棒工装
Fig.9 Fixed sample rod tooling



图 10 样棒拉伸
Fig.10 Sample rod stretching

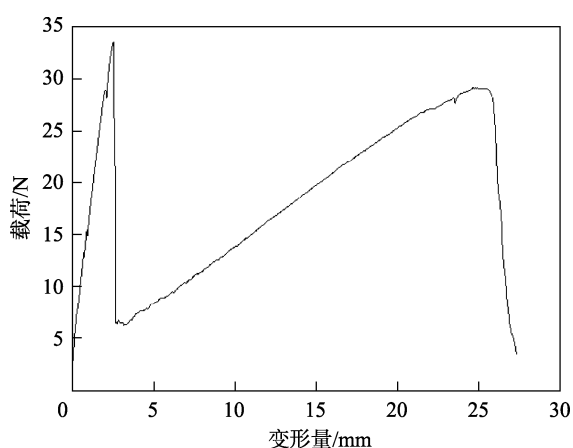


图 11 带纸皮样棒拉伸曲线
Fig.11 Stretch curve of sample rod with paper skin

3.2 爆珠挤压试验

使用万能材料试验机 Zwick Roell Z010 进行操

作, 并将精密拉压工装安装在拉伸杆上进行爆珠挤压试验, 如图 13—14 所示。选取 10 颗粒直径为 3.5 mm 的烟用爆珠样品进行重复性测试, 测试出在压缩速率为 10 mm/min 时爆珠的压破强度和变形量。

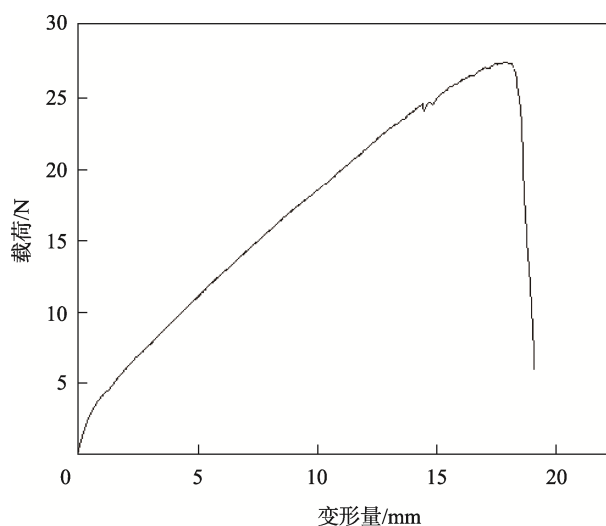


图 12 剥皮样棒拉伸曲线
Fig.12 Stretch curve of sample rod without paper skin

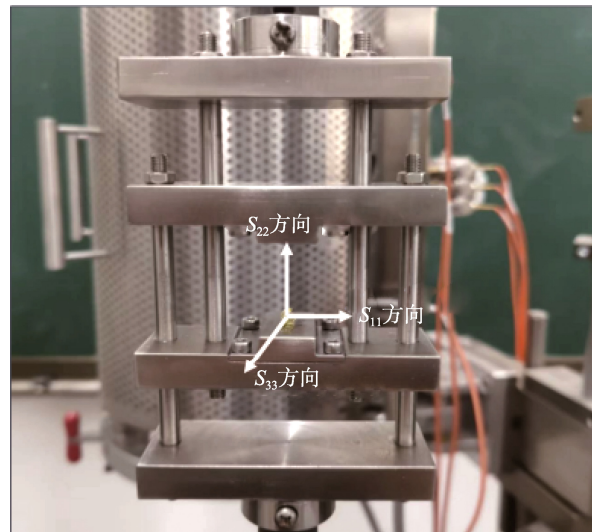
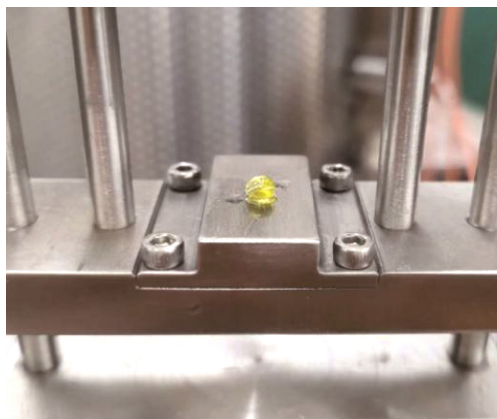
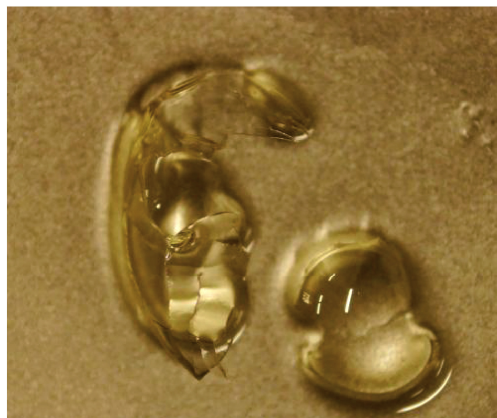


图 13 压爆后工装打开形态
Fig.13 Opening form of tooling after burst

对直径为 3.5 mm 的烟用爆珠样品进行重复性测试, 在 S_{22} 方向上爆珠承受的载荷与变形量如表 2 所示。试验中直径为 3.5 mm 的爆珠的压破强度和变形量结果的相对标准偏差分别为 7.15% 和 7.02%。考虑到试验与标准值中使用爆珠的种类和壁材的不同, 该误差在合理范围内, 验证了直径为 3.5 mm 的爆珠的压破强度及爆珠材料参数 ($C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa) 的准确性。



a 压爆试验台爆珠形态



b 爆珠破裂形态放大图

图 14 爆珠挤压破裂

Fig.14 Crack of burst bead due to extrusion

表 2 直径为 3.5 mm 爆珠样品检测的重复性结果
Tab.2 Repetitive detection results of 3.5 mm burst bead sample

样品编号	载荷/N	位移/mm
1	14.450	0.53
2	16.551	0.55
3	14.830	0.54
4	14.734	0.51
5	14.911	0.54
6	15.270	0.54
7	16.158	0.55
8	14.807	0.51
9	13.925	0.52
10	12.991	0.51
均值	14.863	0.53
标准值	13.870	0.57
相对标准偏差/%	7.15	7.02

4 结语

根据上述分析可以得出结论如下：

1) 经 Abaqus 软件仿真验证, 在超弹性材料参数 $C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa 时, 仿真计算出压板下压力 F 与爆珠理论所承受的最大压力的相对误差为 3.4%, 验证了超弹性模型下爆珠材料参数的准确性。其次, 爆珠材料本构模型参数的选择需分别考虑仿真与爆珠材料两者的特点, 并运用迭代的方式进行纠正, 从而使仿真材料的属性定义趋于真实。

2) 对醋纤包装样棒轴向和径向模型进行仿真试验可知, 随着径向下压位移的逐渐增大, 压板的下压力也逐渐增大, 在径向挤压量为 0.85 mm 时, 压板的下压力为 3.66 N, 轴向挤压量为 2 mm 时, 压板的下压力为 0.74 N。可得醋纤包装样棒在受径向和轴向力时, 压板支反力均小于爆珠压破强度。其次, 醋纤包装样棒在承受轴向力时对爆珠的缓冲效果更加优秀, 为研究醋纤包装样棒在生产输送过程中对爆珠的缓冲特性提供了理论基础。

3) 通过对带纸皮醋纤包装样棒和剥皮醋纤包装样棒进行拉伸试验可知, 带纸皮样棒中的拉伸曲线由于样棒外部纸皮断裂会发生断崖式下降的现象, 而剥皮样棒的拉伸曲线相对来说较为平滑。其次, 通过对爆珠进行挤压试验可知, 试验中直径为 3.5 mm 的爆珠的压破强度和变形量结果的相对标准偏差分别为 7.15% 和 7.02%, 验证了直径为 3.5 mm 的爆珠的压破强度及爆珠材料参数 ($C_{10}=5.2$ MPa、 $D_1=0.38$ kPa) 的准确性。

4) 在仿真过程中, 受爆珠和醋纤包装样棒 2 种材料的组合的影响, 施加下压位移过大时会发生材料破坏行为, 从而导致仿真出现错误。因此在仿真过程中下压位移建议不要超过 0.85 mm。

参考文献:

- [1] 宋磊. 面向活检穿刺试验的明胶假体力学本构关系研究及穿刺参数优化[D]. 济南: 山东大学, 2014.
SONG Lei. Study on Mechanical Constitutive Relation of Gelatin Prosthesis for Biopsy Puncture Test and Optimization of Puncture Parameters[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [2] 古君平, 陶红, 汪军霞, 等. 卷烟滤嘴设计对爆珠单体香料成分释放行为的影响[J]. 烟草科技, 2021, 54(1): 32-45.
GU Jun-ping, TAO Hong, WANG Jun-xia, et al. Effects of Cigarette Filter Design on Release Behavior of Monomer Flavor in Breakable Capsule[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(1): 32-45.
- [3] 杨占平. 烟用二醋酸纤维卷曲工艺探讨[J]. 烟草科技, 2001, 34(9): 9-12.
YANG Zhan-ping. Discussion on Crimp Process of Acetate Tows[J]. Tobacco Science & Technology, 2001,

- 34(9): 9-12.
- [4] 周密. 基于双目视觉的滴丸几何参数在线测量技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHOU Mi. Research on On-Line Measurement Technology of Geometric Parameters of Dropping Pills Based on Binocular Vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] 侯捷. 滴丸几何参数在线检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
HOU Jie. Study on On-Line Detection Technology of Geometric Parameters of Dropping Pills[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [6] 薛文云. 抛丸法胶囊全检分选设备的研发[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
XUE Wen-yun. Research and Development of Full Inspection and Sorting Equipment for Shot Blasting Capsules[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [7] 范礼峰, 吴伟明, 庄雅娟, 等. 一种卷烟爆珠的检测装置及检测方法: China, 110604337B[P]. 2021-07-13.
FAN Li-feng, WU Wei-ming, ZHUANG Ya-juan, et al. Cigarette Filter Capsule Detection Device and Method: China, 110604337B[P]. 2021-07-13.
- [8] 彭黔荣, 周明珠, 韩慧杰, 等. 烟用胶囊颗粒强度检测装置的设计[J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 93-98.
PENG Qian-rong, ZHOU Ming-zhu, HAN Hui-jie, et al. Design of Cigarette Capsule Strength Tester[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(11): 93-98.
- [9] 彭向峰, 李录贤. 超弹性材料本构关系的最新研究进展[J]. 力学学报, 2020, 52(5): 1221-1232.
PENG Xiang-feng, LI Lu-xian. State of the Art of Constitutive Relations of Hyperelastic Materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(5): 1221-1232.
- [10] 李龙津, 乔枫, 顾文博, 等. 卷烟用爆珠压破强度和变形量检测参数的优化[J]. 理化检验-物理分册, 2020, 56(9): 11-15.
LI Long-jin, QIAO Cong, GU Wen-bo, et al. Optimization of Detection Parameters for Crushing Strength and Deformation Amount of Cigarette Breakable Capsules[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2020, 56(9): 11-15.
- [11] 王石磊, 张建波, 董朝红, 等. 醋酸纤维的结构及理化性能[J]. 印染助剂, 2010, 27(9): 24-28.
WANG Shi-lei, ZHANG Jian-bo, DONG Zhao-hong, et al. Structure and Physical Chemical Properties of Cellulose Acetate Fiber[J]. Textile Auxiliaries, 2010, 27(9): 24-28.
- [12] SULTANA Q N, HASAN M M, IQBAL S, et al. Investigation of Mechanical Properties and Morphology of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Cellulose Acetate Fibers[J]. Fibers, 2017, 5(4): 42.
- [13] 盛培秀, 王月江, 黄小雷, 等. 含有醋酸纤维素的纤维纸及滤棒的开发与性能研究[J]. 烟草科技, 2014, 47(1): 5-11.
SHENG Pei-xiu, WANG Yue-jiang, HUANG Xiao-lei, et al. Development and Performance of Filter Rod Made of Fiber Paper Containing Cellulose Acetate Fiber[J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(1): 5-11.
- [14] WANG H, ZHENG H, ZHAN J, et al. Study on Mechanical Properties and Micro Morphology of Acetate Filter Rod before and after Partial Degradation[C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1676(1): 012103.
- [15] 郑卓, 刘艳, 张奇, 等. 万能材料试验机的使用及开放共享[J]. 科学咨询, 2021(22): 90.
ZHENG Zhuo, LIU Yan, ZHANG Qi, et al. Application and Open Sharing of Universal Material Testing Machine[J]. Scientific Consult, 2021(22): 90.

责任编辑: 曾钰婵