不同循环加载方式下原棉压缩能耗规律分析

李 勇,李玉霞,陈圆圆,苏晓琴,刘文亮* (塔里木大学机械电气化工程学院,新疆阿拉尔 843300)

摘要 为了研究原棉的压缩能耗变化,利用万能试验机循环加载原棉,薄膜压力传感器采集原棉的应力-应变规律,分析其能耗损失状 况。结果表明,原棉压缩环节存在塑性变形和摩擦阻力,其均会引起压缩能损耗。连续加载原棉,各层能耗呈规律变化;间隔加载原棉, 各层的能耗值均呈无规律波动。随着压缩量的增加,各层能耗均值呈指数型增加。 关键词 原棉:压缩:能耗:循环加载:规律 中图分类号 TS102.2 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2020)12-0182-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.12.052

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 🗎



Change Laws of Energy Consumption of Cotton in the Successive Loading Mode

LI Yong, LI Yu-xia, CHEN Yuan-yuan et al (College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300)

Abstract In order to investigate compression energy consumption of cotton, axial stress was set up through universal test machine on cotton, pressure was collected in pressure sensing system form up , inter and down layer, its axial pressure were obtained in the com-pression process. According to the stress-strain hysteretic curve, the relationship between loading form and energy loss of compression was determined. The results showed that compression causes its energy consumption by which plastic deformation of cotton and frictional resistance from between the cotton and cylindrical vessel accompanied. Energy consumption for various layers changed according to certain rules in the continuous loading, energy consumption for various layers were irregular fluctuation in the interval loading. Energy consumption for various layers were growing by exponential order with the increase of compression amount.

Key words Cotton; Compression; Energy consumption; Continuous loading; Laws

棉花是重要的纺织纤维材料,压缩是其紧密化处理的重 要手段之一。棉纤维的形态结构与秸秆集合体、泡沫材料的 形态结构相似,所展现出的压缩力学性能亦相近[1]。

目前,诸多研究者用经典力学理论、模型研究纤维集合 材料的压缩行为,其中黏弹塑性模型、压力与密度模型是典 型力学模型^[2-3]。霍丽丽等^[4]通过秸秆致密成型过程的应力 应变函数,推导出秸秆压缩能耗计算公式。黄文城等^[5]探究 农业纤维物料在二次压缩过程中的比能耗,发现压缩方向、 初始压缩密度、含水率对压缩比能耗有影响。徐舒等^[6]指出 木材是天然的黏弹性高分子材料,在压载作用下线性变形阶 段木材吸能很小,非线性变形阶段毛细管系统永久性变形、 溃陷来耗散做功。Lee 等^[7]研究纤维集合体压缩力学性能, 提出了随机排列纤维体(考虑纤维卷曲因素)的压缩能量理 论,并指出纤维段能量随压缩应变和泊松比而变,纤维段总 能量取决于各纤维段长度和纤维取向密度函数[8]。

在原棉压缩能耗方面,研究压缩能耗变化规律尚未研 究。笔者以原棉为研究对象,以原棉压缩的黏弹塑性为依据 分析其压缩力学过程。循环加载原棉,采集并计算其能耗 值,分析其能耗变化规律,为原棉生产加工环节提供一定理 论指导。

1 试验部分

1.1 材料与仪器 原料为新疆阿拉尔市新陆中 37 手摘原棉, 原棉提取于新疆新越丝路有限公司。万能材料试验机(上海卓 技仪器设备有限公司)、FA1104 电子天平(上海安亭科学仪器 厂)、原装进口 FSR400 薄膜压力传感器(Interlink Electronics)、 有线薄膜压力传感软件(安徽威科电子有线公司)。

1.2 压缩能量损耗测定 称取 160 g 原棉,装入亚克力圆筒 (外径110 mm, 壁厚3 mm, 填充高度300 mm)中, 在原棉上、中、 下3个位置设置1、2、3号薄膜压力传感器(1号传感器采集上 层压力.2号传感器采集中间压力.3号传感器采集下层压力), 如图1所示。利用万能试验机进行压缩试验(室内温度16~ 22 ℃,相对湿度 42%~56%,加载/回复速度100 mm/min),用薄 膜压力传感器采集原棉压缩-回复的力值。





图 2 为薄膜压力传感器采集的原棉应力-应变曲线。原 棉压缩曲线的积分面积定义为压缩比功w,,回复曲线的积分 面积定义为回复比功w,,原棉的压缩比功与其回复比功的差 值定义为压缩功耗比 e(图 2 中曲线围的阴影区域)。

经积分计算,3个薄膜压力传感器采集的压缩比功分别 为w_{v1}、w_{v2}和w_{v3},回复比功分别为w_{s1}、w_{s2}、w_{s3},压缩功耗比分 别为 e1、e, 和 e3, 连续多次压缩各传感器能耗指标均值用各

国家自然科学基金项目(31760340,11762020)。 基金项目

作者简介 李勇(1986--),男,内蒙古丰镇人,副教授,硕士,从事功能材 料研究与应用。*通信作者,副教授,硕士,从事电气控制 研究 收稿日期 2019-11-16;修回日期 2019-12-02







1.3 循环加载压缩试验

1.3.1 连续压缩原棉。原棉连续压缩,每组连续压缩20次, 各组压缩量依次取100、150、200、250 mm,用1、2、3号薄膜压 力传感器采集压缩-回复的力值。

1.3.2 间隔(连续)压缩原棉。原棉间隔压缩,每次压缩间隔
30 min(间隔时间段内,原棉由圆筒中取出,静置),如此反复操作20次,记为1组。各组压缩量依次取100、150、200、250 mm,
用1、2、3 号薄膜压力传感器采集各次压缩-回复的力值。

2 理论模型

图 2 中原棉的压缩与回复曲线不重合,存在显著的变形和 回复滞后现象^[9]。随着 ε 值的增加,原棉的压力呈抛物线型增加。当 ε 值为 65.9%时,压缩曲线出现拐点 1。定义此拐点 1 为原棉的屈服点,其屈服点压力(σ_s)为 0.115 4 MPa。

假设原棉是由材质均质、各向同性的棉纤维束有规律地堆 砌而成的,用 Nishihara 模型来模拟表征原棉的特征,其机械本 构模型^[10]如图 3 所示。图 3 中, E_1 、 E_2 是指弹性元素弹簧的模 量, η_1 、 η_2 是指黏性元件(阻尼器)的黏度系数,V为摩擦元件, σ_c 为 Bingham 模型的屈服应力, σ_s 为 Bingham 模型的瞬时应 力, θ 是无纲量参数。Nishihara 变形由弹性变形 ε_1 、黏弹性变 形 ε_2 、黏塑性变形 ε_3 组成,其总应变表达式为 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ 。



图 3 本构模型 Fig.3 Mechanical analog of the Nishihara model

参照 Nishihara 模型,原棉的压缩过程以拐点 1 为分界 点,可划分为 2 个阶段:①黏弹阶段($\sigma \leq \sigma_s + \sigma_c/\theta$),此阶段 原棉内部不断发生纤维间空隙排空、纤维体屈曲和迁移,以 黏弹变形(弹性元素 E_1 和黏性单元 η_1 叠加作用)为主,弹性 变形(弹性元素 E_2)伴随压缩全程,展现了非线性黏弹性行 为;②高级黏弹性阶段($\sigma > \sigma_s + \sigma_c / \theta$),此阶段黏弹单元的黏 度系数 η_1 将为0,原棉的应力快速增加,加速线性蠕变,纤维 体受压发生塑性变形。Nishihara 模型转变为标准线性固体 模型。由此可见,压缩拐点1后原棉存在显著塑性变形,同 时纤维集合体的部分压缩能量转变为热能、声能耗散。

原棉在圆筒内单轴压缩,其只能沿着纵向被压缩,横向受限无法膨胀,纤维集合体与筒壁之间存在摩擦力。随着原棉相 对密度的增加,其内部压强愈高,侧壁的摩擦力愈大。当纤维 紧密接触时,还要克服纤维体表面能做功,克服外界压力做功, 压缩紧密后纤维集合体储存部分压力做功能量。同时,压缩期 间压力还要克服纤维间摩擦力做功、体积变形做功^[11]。

原棉由上而下单轴压缩,压缩推进过程中塑性变形能量 耗散与摩擦阻力作用引起原棉压缩能耗损失,且该能耗损耗 并非均匀。

3 结果与分析

3.1 连续压缩原棉 原棉连续压缩(压缩量 200 mm)的 w_y、 w_s、e 值,分别如图 4 所示。

图 4(a)中,原棉的 w_{y1} 值均远大于 w_{y2} 、 w_{y3} 值。首次压缩 后,原棉的 w_y 值趋稳,呈小幅度波动, $\overline{w_y}$ (各次 w_y 值的均值) 分别为 0.394 0、0.317 4、0.270 5 MJ · m³,各均值分别约为各传 感器首次 w_y 值的 57.07%、53.82%、56.64%。比较 3 路传感器采 集的 w_y 值,发现各次压缩传感器采集的 w_y 值均呈 $w_{y1} > w_{y2} >$ w_{y3} ,表明压缩阶段原棉的能量由上向下递减,由上向下推进致 密。首次压缩的 $w_{y1} = w_{y2}$ 、 $w_{y2} = w_{y3}$ 的差值分别为 0.100 7 和 0.112 1 MJ·m³;此后各次压缩 w_{y2} 先趋近于 w_{y3} 、后趋近于 w_{y1} 。

图 4(b)中,3 路传感器采集的 Ws 值均小幅度波动, w_{s1} 、 w_{s2} 、 w_{s3} 分别为 0.244 1、0.148 3 和 0.212 2 MJ · m³。比较 3 路传 感器采集的 w_s 值,发现各次压缩传感器采集的 w_s 值均呈 w_{s1} > w_{s3} > w_{s2} 。这表明回复阶段原棉上下端受约束回复慢,纤维集合 体中部松解程度更快。随着压缩次数的增加,原棉内部回复能 力趋于接近。

图4(c)中,3 路传感器采集的压缩功耗比(e)先降低后小幅波动。比较3 路传感器采集的 e 值,发现第1次呈 $e_1 > e_2 > e_3$ 的规律;第2次呈 $e_2 > e_1 > e_3$ 的规律;第3次之后呈 $e_2 \ge e_1 > e_3$ 的规律。各传感器采集的e(33次之后各 e 值的均值)依次为0.1483、0.1737和0.0521MJ·m³。连续压缩期间,原棉施压端、内部的能耗比最大,末端的能耗比最小。原棉经连续压缩即可排除纤维之间的大量空隙,不间断连续压缩可以促进其内部结构调整致密,使其力学性能不断趋于稳定。

连续压缩 100、150 和 250 mm 时,原棉的 w_y 、 w_s 、e 的变化 规律与连续压缩 200 mm 时相似。不同压缩量下 w_y 、 w_s 、e值 见图 5。由图 5 可知,各压缩量下,连续压缩的能耗值呈 w_{y1} > $\overline{w_{y2}}$ > $\overline{w_{y3}}$, $\overline{w_{s1}}$ > $\overline{w_{s2}}$, $\overline{e_2}$ > $\overline{e_1}$ ≈ $\overline{e_3}$ 的规律。随着压缩量的增加, 连续压缩的 w_y 、 $\overline{w_s}$, \overline{e} 值均按指数函数规律增加。压缩量与连



图 4 原棉连续压缩能耗的变化曲线

Fig.4 Energy change curve of continuous loading of raw cotton



图 5 不同压缩量连续压缩能耗均值曲线

Fig.5 Average energy change curve of continuous loading with different amount of compression

表1 不同压缩量下连续压缩能耗均值拟合方程



					=	
	<i>w</i> ,		w_{s}		e	
类别 Cate- gory	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient
1	$y=0.000 4\exp(x/27.290 9)+0.059 9$	0.996 9 y	$=0.000 2\exp(x/26.236 6) + 0.055 6$	0.993 8	$y = 0.001 2 \exp(x/34.650 1) - 0.04$	5 2 0.998 7
2	$y = 0.000 4 \exp(x/27.179 5) - 0.007 5$	0.999 9 y	$x = 0.000 1 \exp(x/2.822 3) + 0.020 4$	0.997 6	$y = 0.000 2 \exp(x/29.589 9) + 0.00$	4 4 0.999 9
3	$y = 0.000 3 \exp(x/26.734 8) - 0.027 3$	0.999 5 y	$= 0.000 1 \exp(x/24.645 5) + 0.012 8$	0.999 8	$y = 0.000 5 \exp(x/30.631 2) - 0.01$	3 4 0.990 8
计	北百垍的单位休和纶封(MI, ³)	· *	am)			

注:y 指原棉的单位体枳能耗(MJ • m²);x 为压缩量(mm)

Note :y represents the energy consumption per unit volume of raw cotton $(MJ \cdot m^3)$; x represents the amount of compression(mm)

3.2 间隔压缩原棉 间隔压缩原棉 20次,用3路传感器采 集力值,经积分计算得出 w_y、w_s、e值,如图6所示。图6中3 路传感器采集的 w_y、w_s、e数值曲线较为相似,均呈无规律变 化。此归因于间隔时段原棉由圆筒内取出,使原棉的弹性变 形得以回复。同时,每一次压缩均促进了棉纤维在集合体内 部的穿插和滑移,压缩次数越多,原棉内部的致密棉束增多,



图6 原棉间隔压缩能耗曲线

Fig.6 Energy change curve of interval loading of raw cotton

不同压缩量下间隔压缩原棉的能耗均值如图 7 所示。 图 7 中,各压缩量下间隔压缩的能耗均值呈*w*_{v1}>*w*_{v2}>*w*_{v3}、*w*_{v2}> $\overline{w_{s3}} > w_{s1}, \overline{e_1} > \overline{e_2} > \overline{e_3}$ 的规律。随着压缩量的增加,间隔压缩的 $\overline{w_y}, \overline{w_s}, \overline{e_1}$ 均呈指数函数增加。压缩量与间隔压缩各路传感 器采集的 $\overline{w_y}, \overline{w_s}, \overline{e_1}$ 间均存在极佳的非线性拟合结果,见表 2。



图7 不同压缩量间隔压缩能耗均值曲线

Fig.7 Average energy change curve of interval loading under different amount of compression

表 2 不同压缩量下间隔压缩能耗均值拟合方程

Table 2 The average energy-deformation curve fitting functions of interval loading with different amount of compression

类别 Cate- gory	<i>w</i> ,		<i>w</i> _s		e	
	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient	拟合方程 Fitting equation	拟合系数 Fitting coefficient
1	$y = 0.003 7 \exp(x/35.978 9) - 0.030 0$	0.999 7	$y = 0.002 5 \exp(x/41.420 5) - 0.02$	0.999 6	$y = 0.001 9 \exp(x/34.1489) - 0.006$	6 0.999 8
2	$y=0.007 6\exp(x/41.129 1)-0.109 5$	0.996 3 y	$x = 0.004 5 \exp(x/44.365 1) - 0.056 0$	0.994 5	$y = 0.0036 \exp(x/39.319\ 6) - 0.055$	5 2 0.997 1
3	$y = 0.001 4 \exp(x/32.74 49) - 0.034 6$	0.999 7	$y = 0.001 2 \exp(x/36.483 5)$	0.999 2	$y = 0.000 5 \exp(x/30.631 2) - 0.012$	3 4 0.999 8

注:y 指原棉的单位体积能耗(MJ·m³);x 为压缩量(mm)

Note: γ represents the energy consumption per unit volume of raw cotton ($MJ \cdot m^3$); x represents the amount of compression(mm)

4 结论

(1)利用万能试验机压缩亚克力圆筒内的原棉,薄膜压力传感器时时集采其上、中、下3层的力值,获得其压缩-回复的力值曲线。分析原棉的压缩特征,发现原棉压缩屈服点之后存在塑性变形,且压缩期间原棉与筒壁间存在摩擦力。 塑性变形和摩擦阻力均会引起原棉压缩能量损耗。

(2)连续加载原棉,对比薄膜压力传感器采集的各层能 耗值,发现 w_{y1}>w_{y2}>w_{y3}、w_{s1}>w_{s3}>w_{s2}、e₂≥e₁>e₃,表明压缩能 量由上向下递减,回复阶段纤维集合体中部松解程度更快, 连续压缩可排空纤维间空隙,促使纤维体致密化。间隔加载 原棉,各层的能耗值均呈无规律波动,连续压缩的间隔期为 棉纤维结合体提供了自由松解的时间。

(3)对比不同压缩量下连续压缩和间隔压缩原棉各层的 能耗均值,发现随着压缩量的增加,各层能耗均值呈指数函 数增加,且w₁₁>w₂₂>w,3。

参考文献

[1] 陈美玉,来侃,孙润军,等.大麻/聚乳酸复合发泡材料的力学性能[J].

+ • + • + • + • + • + • + • + • +

(上接第181页)

- [6] 张晓玲,潘振刚,周晓锋,等.自毒作用与连作障碍[J].土壤通报,2007, 38(4):781-784.
- [7] RICE E L.Allelopathy [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [8] YU J Q.Autotoxic potential of vegetable crops[M]//NARWAL S S.Allelopathy:Basic and applied aspect.Enfield, New Hampshire, USA:Scientific

纺织学报,2016,37(1):28-34.

- [2] DUNLOP J I.On the compression characteristics of fiber masses[J].Journal of the textile institute, 1983, 74(2):92–97.
- [3] KALIYAN N, VANCE MOREY R. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass[J].Biosystems engineering, 2009, 104(1):47– 63.
- [4] 霍丽丽,赵立欣,田宜水,等.生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型 [J].农业工程学报,2013,29(9):200-206.
- [5] 黄文城,王光辉,王德成.秸秆二次压缩中的比能耗试验[J].江苏大学 学报,2012,33(2):125-129.
- [6] 徐舒,徐信武,吕吉宁,等.木橡复合层积材对横向周期性压载的响应特性[J].东北林业大学学报,2017,45(8):70-75.
- [7] LEE D H, CARNABY G A.Compressional energy of the random fiber assembly part I.Theory[J].Textile research journal, 1992,62(4):185–191.
- [8] LEE D H, CARNABY G A, TANDON S K.Compressional energy of the random fiber assembly part II: Evaluation [J]. Textile research journal, 1992,62(5):258–265.
- [9] YAN J J,FANG C,WANG F M, et al. Compressibility of the kapok fibrous assembly J.Textile research journal, 2013,83(10):1020-1029.
- [10] YAN J J,WANG F M,XU B G,et al.Compressional resilience of the kapok fibrous assembly [J].Textile research journal, 2014,84(13):1441-1450.
- [11] 吴云玉,董玉平,吴云荣.生物质固化成型的微观机理[J].太阳能学 报,2011,32(2):268-271.

Publisher, 1999.

- [9] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D.Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls [J].Chem Ecol, 1988, 14 (1):181–187.
- [10] 张新慧:当归连作障碍机制及其生物修复措施研究[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
- [11] 惠继瑞.当归自毒作用研究[D].兰州:西北师范大学,2008.