

朱旭晨,王典,刘晋浩,等.双V附翼型负泊松比蜂窝结构参数与原木接触面积耦合关系[J].华中农业大学学报,2021,40(2):253-260.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.028

双V附翼型负泊松比蜂窝结构参数与原木接触面积耦合关系

朱旭晨,王典,刘晋浩,黄青青

北京林业大学工学院/国家林业和草原局林业装备与自动化重点实验室,北京 100083

摘要 为解决林木采伐中进料辊造成树木损伤的问题,以进料辊中的双V附翼型蜂窝结构为研究对象,探究其胞元结构参数对伐倒木圆条树木的损伤机制。基于理论力学构建了双V附翼型结构单位胞元参数与屈服强度的理论模型,进而进行了Y方向压缩实验验证,考察在低速压缩条件下各胞元结构参数对该结构等效应力和能量吸收变化的影响,以及有限元仿真进料辊胞元结构参数与原木接触面积的耦合关系。选定聚氨酯作为辊型驱动应用材料,通过正交试验法,在较优参数 θ_1 、 θ_2 、 t 区间内使进料辊与木材接触面积增大14.56%~26.11%。研究表明,可根据具体工况需求选用确定胞元结构参数,且结构参数厚度 t 是影响负泊松比蜂窝结构密实应变的重要指标;通过双V附翼型负泊松比结构材料的选用和尺寸参数的改变,改善了进料辊作业时与木材的接触面积大小,降低原木所受压强。

关键词 进料辊;双V附翼型结构;负泊松比;林木联合采育机;森林工程;原木损伤;伐倒木

中图分类号 S 776.31; S 776.33 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0253-08

目前,联合采育机和联合收割机逐渐代替单一的收割机械,愈发广泛地应用于农林业生产,同时使得对林木联合采育机的各个部件、装置的研究也更加深入^[1]。伐倒木圆条受林木联合采育机的进料辊钢齿损伤问题亟待解决,因此如何降低木材损伤,提高伐倒木经济价值,显得尤为重要。

针对树木采伐过程中受联合采育机进料辊损伤问题,国内外进行了广泛的研究。Gerasimov等^[2]以俄罗斯林业采伐为例研究了单柄收割机头对工业原木损伤和作业效率损失的影响。Vander-Merwe等^[3]研究了桉树收割机对原木表面的损伤在纸浆价值恢复方面的影响。王栋等^[4]提出一种应用在辊型驱动上的双V附翼型负泊松比结构,该结构可使进料辊齿与伐倒木接触时齿数增多,致使更多压缩后的负泊松比结构受力,进而增大进料辊圆周工作面与伐倒木之间的接触面积,减小进料辊齿对采伐原木的损伤。该研究创新性地引入负泊松比结构解决了林木采伐中树木损伤的问题,但未深入阐述进料辊所受应力及能量消耗。

Lakes^[5]首次明确提出负泊松比这一概念,引起国内外学者广泛关注,相较于传统材料结构,其结构

具有更高的抗剪切、抗压痕和抗冲击性能。负泊松比现象产生的原因是特殊的胞元结构受轴向压缩时会产生内凹效应,结构产生横向收缩变形,致使整体构件向中心收缩。该结构从而表现出压痕阻抗效应,结构的刚度、强度增强。基于负泊松比结构的特点和应用,现有研究提出了多种不同构型的负泊松比蜂窝结构^[6-7]。在双箭头型负泊松比蜂窝结构研究方面,Qiao等^[8]通过理论和有限元的方法研究了其在准静态、动态冲击下的力学性能及变形机制。现有研究通过多种力学分析方法考察了冲击速度、相对密度和结构参数对结构的力学特性和能量吸收效应机制的影响^[9-11]。在工程应用方面,Signund等^[12]研究了负泊松比柔性微观结构的设计与制作,但只进行了微观条件下的应用,对宏观表现没有充分研究。

本研究以某林木联合采育机的进料辊装置为研究对象,评估进料辊在采用双V附翼型负泊松比蜂窝结构后的力学性能,建立双V附翼型负泊松比结构Y方向屈服强度的理论模型,模拟低速冲击下实际工况条件中的双V附翼型负泊松比结构构件胞元等效应力的变化规律和吸收能量的表现,旨在对

收稿日期:2020-09-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0203400)

朱旭晨,E-mail:18811719678@163.com

通信作者:王典,E-mail:wangdian@bjfu.edu.cn

联合采育机进料辊采用双 V 附翼型负泊松比结构进行设计优化时提供一定的参考。

1 树木圆条损伤与辊型驱动结构 Y 方向理论模型的建立

1.1 进料辊蜂窝胞元结构参数与屈服强度理论模型的建立

如图 1A 所示,因伐倒木质量恒定,则伐倒木损伤面积与进料辊蜂窝结构的强度相关,伐倒木损伤面积与构件的屈服强度 σ 的关系为:

$$S_{\text{损}} \propto \frac{1}{\sigma} \quad (1)$$

在推导理论模型时,为研究双 V 附翼型负泊松比蜂窝结构的力学特性,对该结构构件的变形作以下假设:假定双 V 附耳型蜂窝结构在载荷的作用下引起的变形主要是蜂窝壁的弯曲变形,并基于欧拉-伯努利梁理论,忽略蜂窝壁的拉压变形和剪切变形。

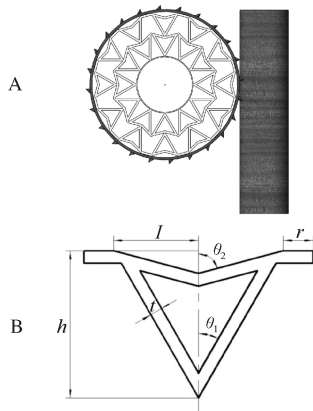


图 1 伐倒木损伤模型(A)和双 V 附翼型(B)负泊松比结构胞元模型示意图

Fig.1 Damage model of felled trees(A) and double V-eared honeycomb cell model(B) schematic diagram

根据文献[12]可知,双 V 附翼型负泊松比的泊松比和弹性模量表达式:

$$\nu_{xy} = \frac{1}{\tan\theta_1 \tan\theta_2} \quad (1)$$

$$E_y = E_s \left(\frac{t}{l} \right)^3 \frac{\sin^3\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^3\theta_2 \cos^2\theta_1}{\sin\theta_1 \sin\theta_2 (\sin\theta_2 \cos\theta_1 - \sin\theta_1 \cos\theta_2)} \quad (2)$$

各胞元参数 θ_1 、 θ_2 、 l 、 t 、 h 、 r 如图 1B 所示。根据文献[8]公式推导,可由该构件的泊松比和弹性模量表达式,计算该结构构件的屈服强度:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ys} \sin\theta_2 \cos\theta_1}{2 \sin(\theta_2 - \theta_1)} \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (3)$$

σ_{ys} 是构件材料的屈服强度。

根据压缩量 y 与结构压缩总长 $l_{\text{总}}$ 推导得到公式(4),其中 $m = 37.873$, m 为根据文献[4]中结构参数计算出的双 V 附翼型负泊松比结构附翼等效比例系数。

$$K = \frac{y}{l_{\text{总}}} \cdot m \quad (4)$$

根据文献[13],可得:

$$\sigma = K \cdot \frac{\sigma_{ys} \sin\theta_2 \cos\theta_1}{2 \sin(\theta_2 - \theta_1)} \left(\frac{t}{l} \right)^2 + \rho_s V^2 \quad (5)$$

其中, σ 为蜂窝结构的等效应力, ρ_s 为胞元结构相对密度, V 为压缩速度。

1.2 准静态压缩条件下负泊松比蜂窝结构 Y 方向压缩试验

利用 3D 打印技术制作负泊松比蜂窝结构,该结构构件 X 方向取 3 个胞元宽度单位, Y 方向取 5 个胞元高度长度, Z 方向取 1 个胞元厚度单位,结构长×高为 220 mm×220 mm,基体材料为尼龙,弹性模量为 1 600 MPa。试验上方为能覆盖结构变形的近似刚体平面(尺寸合适的钢板),中间放入压缩试样,下方放于水平刚体平面(夹具)。从上向下进行匀速压缩,定量位移为 5 mm,试验进给速度 $V = 1$ mm/min,测定正方形双 V 附翼型蜂窝结构在一定压缩量单胞元或者关键区域的微观应变以及总体受压变形云图。试验架设单目相机拍摄试验进程,并利用 DIC 非接触测量技术检测所测结构位移场和应变场变化及分布,试验现场如图 2 所示。



图 2 双 V 附翼型蜂窝结构 Y 方向压缩试验

Fig.2 Y-direction compression experiment of double V-wings honeycomb

由图 3 可知,双 V 附翼型负泊松比结构在受 Y 方向压缩 5 mm 后位移最大值为 2.908 mm,应变最大值 0.013 4,由此可以得出在压缩量为 5 mm 条件下胞元结构最大等效应力为 21.44 MPa。结合对双 V 附翼型负泊松比结构构件在准静态压缩速度(1 mm/min)条件下进行有限元仿真分析,得到理论计算、有限元仿真和实体试验的最大等效应力 σ 结果(表 1)。由表 1 可知,试验结果、理论计算结果与仿真结果存在一定误差,最大误差为 22.8%,最小

误差为12.95%,在可接受范围之内,分析其原因可能是实体模型3D打印过程中存在打印误差,同时试验过程中试验仪器本身存在一定误差。

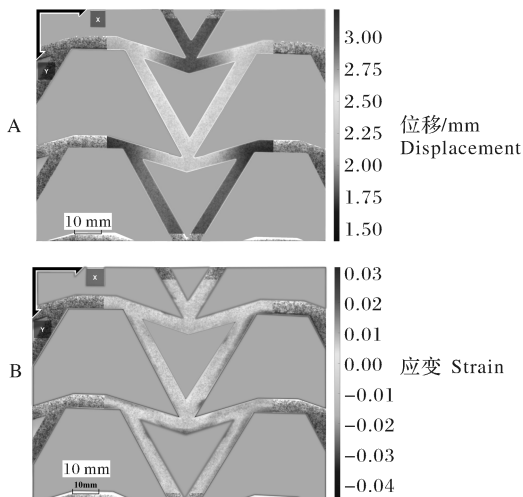


图3 实物试验Y方向位移(A)和应变(B)

Fig.3 Physical experiment results of displacement(A) in Y direction and strain(B)

表1 构件在不同压缩量下最大等效应力

	MPa		
压缩量 Compression	理论计算值 Theoretical calculation results	有限元仿真值 Finite element simulation results	实物试验值 Physical experiment results
Y=3 mm	14.529	13.816	11.830
Y=4 mm	19.373	19.182	17.670
Y=5 mm	24.216	23.541	21.440

2 树木圆条与进料辊接触面积仿真及试验

利用Solidworks三维建模软件建立双V附翼型负泊松比结构实体模型,导入有限元分析软件ANSYS-Workbench/LS-DYNA组件进行有限元模拟仿真(图4)。构件整体为实体模型,规划四面体网格,在计算Y方向轴向冲击时,基于圣维南原理以减少边界条件对测量结果的影响,该结构构件X方向取5个胞元宽度单位,Y方向取8个胞元高度长度,Z方向取1个胞元厚度单位。选定聚氨酯^[13]作为该结构的材料,聚氨酯具有优异的弹性、机械性能强度高、耐疲劳性高、尺寸稳定、蠕变小等优点,聚氨酯材料弹性模量 E 为66.1 MPa,泊松比 ν 为0.36。对双V附翼型负泊松比结构构件进行Y轴方向的准静态压缩和低速冲击下的压缩试验,上压板

以冲击速度 v 进行压缩构件,下底板做固定约束,左右两侧自由。为保证变形的平面应变状态,试件中所有节点面外位移均被限制。

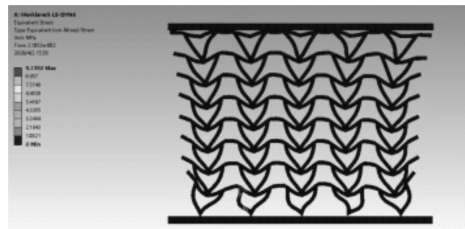


图4 0.025 s时有限元仿真压缩过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of compression process of finite element simulation at 0.025 s

根据实际工况下进料辊在抱合动作时受伐倒木轴向低速冲击,探究双V附翼型负泊松比结构受Y轴轴向低速冲击力学特性研究和变形机制,在ANSYS中进行双V附翼型负泊松比结构压缩构件的低速冲击,设定速度 $v=2$ m/s,选取受压缩构件的中间2个胞元计算所得的最大等效应力的平均值作为计算结果,有限元仿真结果及分析如下。

2.1 最大等效应力

1)尺寸参数角度 θ_1 。如图5所示,随着角度 θ_1 由 40° 至 25° 的变化,其在同等应变条件下等效应力幅值也随之减小,可知随着参数角度 θ_1 由 20° 至 40° 的变化,各构件进入平台应力阶段的应变值也随之增加,构件 $\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_1=25^\circ$ 在应变为0.3左右时进入平台应力阶段,而构件 $\theta_1=30^\circ$ 、 $\theta_1=35^\circ$ 、 $\theta_1=40^\circ$ 则在应变为0.3~0.6依次进入应力平台阶段。其中,由于构件 $\theta_1=20^\circ$ 时最早完成致密化阶段,最终等效应力幅值较其余各组误差大。排除应变为0.75~1.0的数据计算结果,即排除构件受压进入致

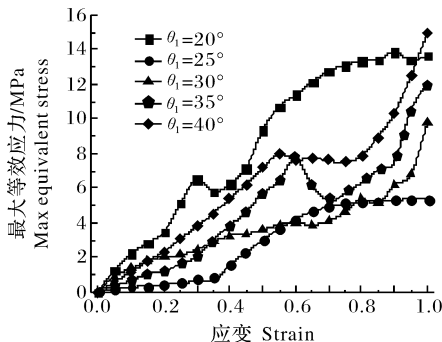


图5 双V附翼型蜂窝构件等效应力随胞元角度 θ_1 的变化曲线

Fig.5 Curves of equivalent stress constants of double V-wings honeycomb with cell angle θ_1

密化阶段的过程,各组所测最终等效应力随着角度 θ_1 由 25° 至 40° 的变化而逐渐增大。

根据胞元结构和有限元应力云图分析,由于 $\theta_2=75^\circ$ 固定,使 θ_1 增大,则胞元上梁和下梁之间夹角减小。该角的角度愈小,胞元结构在受Y轴轴向压缩时更易密实化,即更容易压缩密实,所以在应变为0.75时各组所测的最终等效应力随着角度增大 $\theta_1(20^\circ$ 至 $40^\circ)$ 而逐渐减小。

2)尺寸参数角度 θ_2 。由图6可知,除 $\theta_2=60^\circ$ 外,随着角度 θ_2 由 60° 至 80° ,应力-应变曲线逐步平顺;其中当角度 θ_2 为 60° 时,相比于其他曲线最先出现应力突变的表现,即最早进入应力平台阶段,其余曲线整体变化趋势基本相同。当 θ_2 变大时,双V附翼型负泊松比结构的等效应力变化规律基本保持一致,但最大值依次减小。从结构整体的变形情况来看,首先双V附翼型结构的受冲击端和固定端发生弹性变形,但由于其负泊松比效应,变形区域有内凹趋势,所以最终的整体变形模式呈中段收缩的形状。排除应变为0.75~1.0的数据计算结果,即排除构件受压进入致密化阶段的过程,各组所测最终等效应力随着角度 θ_2 增大(60° 至 80°)而逐渐减小。由于 θ_2 变大,双V附翼型结构的胞元样式在 θ_1 不变的条件下导致胞元上梁和下梁的夹角增大,上下V型构造的顶点间距增大,使胞元上梁挠度增大,导致其胞元整体的等效应力最大值逐渐减小;由于 θ_2 变小,更易得到较大的等效应力区间,但应力波动愈发剧烈。

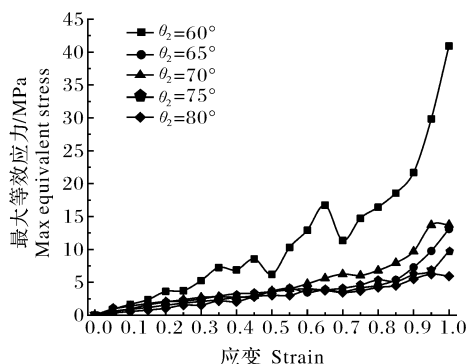


图6 双V附翼型蜂窝构件等效应力
随胞元角度 θ_2 的变化曲线

Fig.6 Curves of equivalent stress constants of
double V-wings honeycomb with cell angle θ_2

2.2 尺寸参数厚度

由图7可知,随 t 由3~7 mm变化,其应力-应变曲线变化趋势上扬,且幅值增大;在冲击刚开始接

触时等效应力应变曲线呈线性趋势,等效应力迅速增大,随后降低为一稳定数值,即进入平台应力阶段,直至被压缩至实密化后应力迅速增加。随着参数厚度 t 的增加,其结构相同应变下的等效应力也随之增加。当应变较大的时候,构件的应力才开始增大,在应力应变曲线中表现为上升的曲线,这是因为随着应变的增大,构件中间部分的胞元由于负泊松比效应而聚集在一起,形成了大于原试样相对密度的局部变形区,使此区域元胞发生失效所需要的载荷更高,从而使试样的应力开始增大。

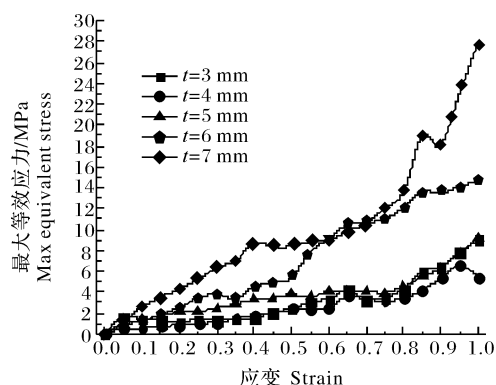


图7 双V附翼型蜂窝构件等效应力
随胞元壁厚 t 的变化曲线

Fig.7 Curves of equivalent stress constants of double
V-wings honeycomb with cell wall thickness t

2.3 能量吸收

1)尺寸参数角度 θ_1 。由图8A可知,各动能-应变曲线陡增点出现时间随角度 θ_1 由 20° 至 40° 变化依次后移;且由动能-应变曲线可以看出,构件 $\theta_1=20^\circ$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为0.24,构件 $\theta_1=25^\circ$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为0.27,构件 $\theta_1=30^\circ$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为0.35,构件 $\theta_1=35^\circ$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为0.43,构件 $\theta_1=40^\circ$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为0.51;即各构件随着参数角度 θ_1 由 20° 至 40° 的变化,各构件进入平台应力的应变值也随之增加,同等效力-应变曲线反映相同趋势。其中,构件 $\theta_1=40^\circ$ 的动能-应变曲线较为明显地表现出所有双V附耳型蜂窝面内动能随胞元角度 θ_1 的变化曲线均都在0.085 s左右完成最后的密实化阶段。

双V附翼型负泊松比结构在角度 θ_1 由 20° 至 40° 变化下的内能随应变变化曲线如图8B所示,结构受低速冲击时其内能吸收量随其参数角度 θ_1 变化规律不明显。由图8B可知,构件 $\theta_1=25^\circ$ 的能量

吸收仅次于构件 $\theta_1 = 40^\circ$ 且动能表现好于其余 4 组参数 θ_1 构件, 故当其余参数一定时, 在角度 θ_1 由 20° 至 40° 变化内, 可得到区间内较优参数为 $\theta_1 = 25^\circ$ 。

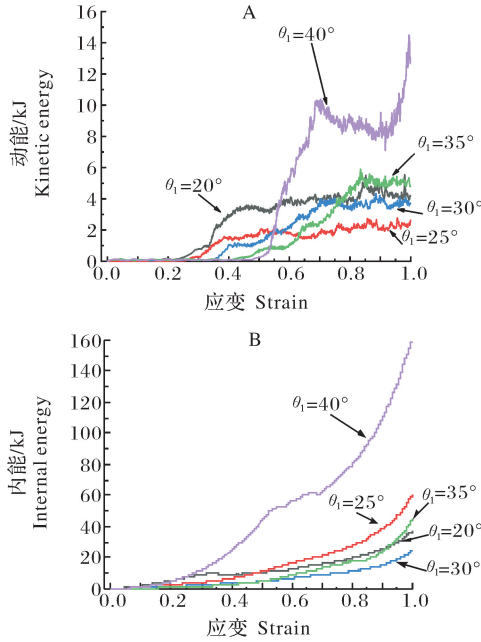


图8 双V附翼型蜂窝面内动能和内能随胞元角度 θ_1 的变化曲线

Fig.8 Curves of in-plane kinetic energy and internal energy of double V-wings honeycomb with cell angle θ_1

2) 尺寸参数角度 θ_2 。由图 9A 可知, 构件 $\theta_2 = 60^\circ$, 动能陡然升高的应变值在 0.3, 其余构件的动能突然升高的应变值都为 0.35 左右, 这个应变值附近, 所有构件进入应力平台阶段, 其中角度 $\theta_2 = 70^\circ$ 和 $\theta_2 = 75^\circ$ 时出现动能平台, 而构件 $\theta_2 = 60^\circ$ 和 $\theta_2 = 65^\circ$ 则在完成致密化阶段后, 动能曲线继续上扬趋势, 这表明构件 $\theta_2 = 60^\circ$ 和 $\theta_2 = 65^\circ$ 较其余 3 组更早完成致密化阶段。

双V附翼型负泊松比结构在角度 θ_2 由 60° 至 80° 变化下的内能随应变变化曲线如图 9B 所示, 结构受低速冲击时其内能总吸收量随其参数角度 θ_2 增大而减小。由于构件 $\theta_2 = 80^\circ$ 能量吸收特性较差, 同时构件 $\theta_2 = 60^\circ$ 和 $\theta_2 = 65^\circ$ 有较强的能量吸收特性, 但较其余 3 组更早完成致密化阶段, 考虑实际工况条件, 选取角度 $\theta_2 = 70^\circ$ 和 $\theta_2 = 75^\circ$ 为较优参数。

3) 尺寸参数厚度 t 。双V附翼型负泊松比结构在厚度 t 为 3~7 mm 变化下的动能随应变变化曲线如图 10 所示, 由图 10A 可知, 在应变 0~0.4 内, 各曲线动能变化极小, 此时间段各构件胞元的胞元壁发生弹性弯曲变形, 由于变形过程短暂, 且基本都

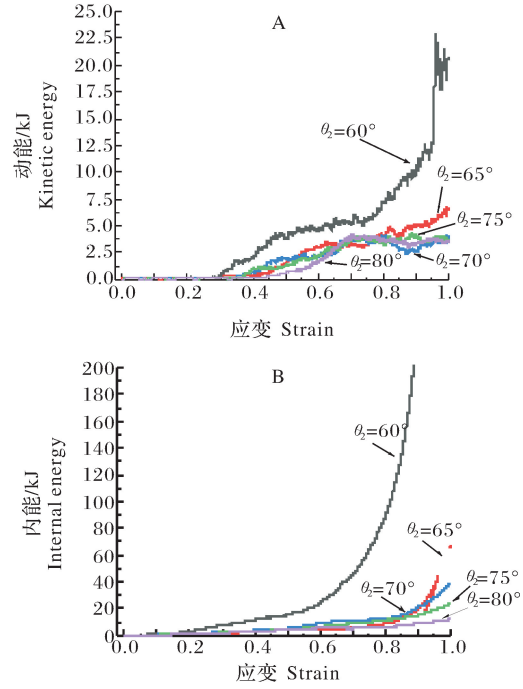


图9 双V附翼型蜂窝面内动能和内能随胞元角度 θ_2 的变化曲线

Fig.9 Curves of in-plane kinetic energy and internal energy of double V-wings honeycomb with cell angle θ_2

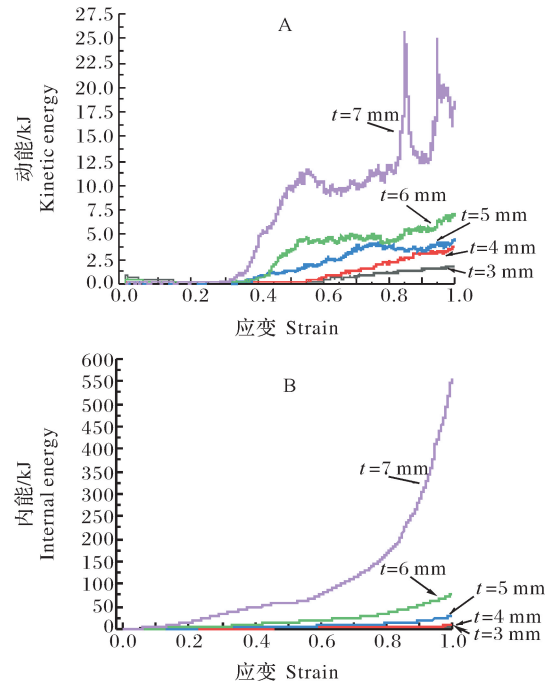


图10 双V附翼型蜂窝面内动能和内能随胞元壁厚 t 的变化曲线

Fig.10 Curves of in-plane kinetic energy and internal energy of double V-wings honeycomb with cell wall thickness t

转化为构件胞元的内能,所以在应变 0~0.4 内各构件动能曲线接近于 0;构件 $t=3\text{ mm}$ 和构件 $t=4\text{ mm}$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为 0.55,构件 $t=5\text{ mm}$ 和构件 $t=6\text{ mm}$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为 0.39,构件 $t=7\text{ mm}$ 进入动能大幅增加阶段的应变值为 0.32。由图 10A 可知,随着尺寸参数厚度 t 的变大,各构件动能曲线的峰值也随之增大,这是因为在其他参数不改变的情况下,尺寸参数厚度 t 的增大导致构件的质量增大、强度增加,且上下 V 构型的顶点间距离减小,使上梁挠度变小,故在进入平台应力阶段后需要更大的负载冲击才能继续压缩构件。所以随着尺寸参数厚度 t 的变大,各构件动能曲线的峰值也随之增大,聚氨酯材料构件关于尺寸参数厚度 t 变化的动能应变曲线整体呈上扬趋势。

双 V 附翼型负泊松比结构在厚度 t 为 3 ~ 7 mm 变化下的内能随应变变化曲线如图 10B 所示,结构受低速冲击时其内能总吸收量随其尺寸参数厚度 t 增大而增大。比较相对应其他参数对内能的影响,结构参数厚度 t 是影响负泊松比蜂窝结构密实应变的重要指标,结合实际工况需求,选取吸能特性较好的尺寸参数厚度 $t=5、6、7\text{ mm}$ 为较优参数。

2.4 圆条接触面积正交试验

选取较优胞元结构参数是多因素多水平的问题,通过正交试验法,优化胞元参数的选取。有限元仿真约束条件如图 11 所示,阴影部分为原木圆条构件。仿真原木圆条在速度 $V=2\text{ m/s}$ 撞击进料辊,C 为固定约束以仿真进料辊的法兰盘固定,如图 12 所示,根据对各图形进行基于像素的实体长度测量方法,得到仿真原木圆条与不同结构参数进料辊的接触面积增大百分比。

确定正交试验所需要考察的因素和水平,选取聚氨酯为试验材料,选定三因素角度 θ_1 、角度 θ_2 、厚度 t 构建进料辊模型,根据前文选定较优参数的附近范围,则每个因素取 3 个水平,进行 3 因素 3 水平正交试验,故采用 $L_9(3^4)$ 正交表来安排试验(表 2)。

由表 2 得到的因素主次顺序依次为厚度 t (因素 B)、角度 θ_1 (因素 A)、角度 θ_2 (因素 C)。主要因素取最好的水平,则最优组合为 $A_1B_1C_3$,在上述正交试验中未出现过,通过补充试验(图 12),得到结构参数 $\theta_1=25^\circ, \theta_2=75^\circ, t=5\text{ mm}$ 进料辊与原木圆

条接触面积增大百分比为 26.11%,大于正交试验结果最大值 23.31%,说明利用正交试验优化胞元结构参数的选取是成功的。

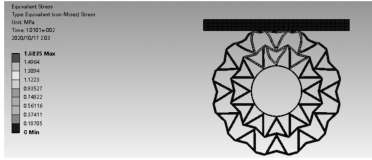


图 11 压缩量为 20 mm 时结构参数 $\theta_1=25^\circ$, $\theta_2=75^\circ, t=5\text{ mm}$ 进料辊构件的等效应力云图

Fig.11 Equivalent stress nephogram of feed roller with structural parameters of $\theta_1=25^\circ, \theta_2=75^\circ, t=5\text{ mm}$ when the compression amount is 20 mm

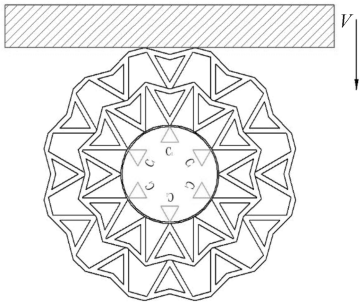


图 12 双 V 附翼型进料辊受原木圆条压缩试验示意图

Fig.12 Experimental diagram of double V-wings feeding roller compressed by log round bar

表 2 正交试验设计与结果

Table 2 Design and result of orthogonal experiment

编号 Number	A 角度 $\theta_1/(^\circ)$ Angle θ_1	B 厚度 t/mm Thickness t	C 角度 $\theta_2/(^\circ)$ Angle θ_2	接触面积 增大比例/% Increase percentage of contact area
1	25	5	65	23.31
2	25	6	70	19.28
3	25	7	75	17.88
4	30	5	70	22.98
5	30	6	75	18.85
6	30	7	65	14.87
7	35	5	75	22.53
8	35	6	65	18.19
9	35	7	70	14.56
K_1	60.47	68.82	56.37	
K_2	56.70	56.32	56.82	
K_3	55.28	47.31	59.26	
k_1	20.16	22.94	18.79	
k_2	18.90	18.77	18.75	
k_3	18.43	15.77	19.75	
R	1.73	7.17	1.00	

3 讨 论

本研究以某林木联合采育机的进料辊装置为研

究对象,构建了双V附翼型负泊松比结构尺寸参数与屈服强度的理论模型,并进行了试验验证。通过对不同尺寸参数的负泊松比结构进行有限元仿真分析,得出其结构的等效应力和能量变化规律。该结构在Y轴向面内低速冲击下表现出动态的负泊松比效应,负泊松比行为的产生机制与准静态加载一致。仿真结果表明,其受冲击过程可分为线弹性阶段、平台阶段、平台应力增强阶段和密实化阶段等4个阶段;其次通过正交试验,优化参数 θ_1 、 θ_2 、 t 的选取,使负泊松比进料辊与木材接触面积增大14.56%~26.11%,且可根据具体工况需求选用确定胞元结构参数;最后,结构参数厚度 t 是影响负泊松比蜂窝结构密实应变的重要指标。

本研究仅分析了Y方向原木损伤与进料辊胞元参数的关系,并未分析X方向压缩时的进料辊结构参数对原木损伤面积的影响情况。后续研究可以分析此结构在择优选取各项参数后整个进料辊受X方向切向冲击的变形机制和吸能效应。

参考文献 References

- [1] 肖洋铁,杨锐,李航,等.联合收获机割台拨禾装置的设计与运动学仿真[J].华中农业大学学报,2020,39(4):156-162.XIAO Y Y,YANG R,LI H,et al.Design and kinematics simulation of pulling device on header of combine harvester[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(4):156-162(in Chinese with English abstract).
- [2] GERASIMOV Y,SELIVERSTOV A,SYUNEV V.Industrial round-wood damage and operational efficiency losses associated with the maintenance of a single-grip harvester head model:a case study in Russia[J].Forests,2012,3(4):864-880.
- [3] VANDER MERWE J P,PULKKI R,ACKERMAN P,et al.The impact of log surface damage caused by harvester *Eucalyptus* debarking on pulp value recovery[J].Southern forests:a journal of forest science,2018,80(2):105-113.
- [4] 王栋,王典,刘晋浩,等.林木联合采育机进料辊填充蜂窝结构的力学特性[J].东北林业大学学报,2020,48(6):93-99,104.WANG D,WANG D,LIU J H,et al.Mechanics characteristics of feeding roller filled with honeycomb structure of forest combine harvester[J].Journal of Northeast Forestry University,2020,48(6):93-99,104(in Chinese with English abstract).
- [5] LAKES R.Foam structures with a negative Poisson's ratio[J].Science,1987,235(4792):1038-1040.
- [6] PRAWOTO Y.Seeing auxetic materials from the mechanics point of view:a structural review on the negative Poisson's ratio[J].Computational materials science,2012,58:140-153.
- [7] 杨智春,邓庆田.负泊松比材料与结构的力学性能研究及应用[J].力学进展,2011,41(3):335-350.YANG Z C,DENG Q T.Mechanical property and application of materials and structures with negative Poisson's ratio[J].Advances in mechanics,2011,41(3):335-350(in Chinese with English abstract).
- [8] QIAO J X,CHEN C Q.Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs[J].International journal of impact engineering,2015,83:47-58.
- [9] 马芳武,梁鸿宇,赵颖,等.内凹三角形负泊松比结构耐撞性多目标优化设计[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(1):29-35.MA F W,LIANG H Y,ZHAO Y,et al.Multi-objective crash-worthiness optimization design of concave triangles cell structure with negative Poisson's ratio[J].Journal of Jilin University (engineering and technology edition),2020,50(1):29-35(in Chinese with English abstract).
- [10] 颜芳芳,徐晓东.负泊松比柔性蜂窝结构在变体机翼中的应用[J].中国机械工程,2012,23(5):542-546.YAN F F,XU X D.Negative Poisson's ratio honeycomb structure and its applications in structure design of morphing aircraft[J].China mechanical engineering,2012,23(5):542-546(in Chinese with English abstract).
- [11] 卢子兴,王欢,杨振宇,等.星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为[J].复合材料学报,2019,36(8):1893-1900.LU Z X,WANG H,YANG Z Y,et al.In-plane dynamic crushing of star-arrowhead honeycomb structure[J].Acta materiae compositae sinica,2019,36(8):1893-1900(in Chinese with English abstract).
- [12] SIGNUND O,LARSEN U D.Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio[J].Journal of microelectromechanical systems,1997,6(2):99-106.
- [13] RUAN D,LU G,WANG B,et al.In-plane dynamic crushing of honeycombs-a finite element study[J].International journal of impact engineering,2003,28:161-182.
- [14] 张聪聪,郑梦凯,李伯耿.软段结构对聚氨酯弹性体性能的影响[J].化工学报,2019,70(10):4043-4051.ZHANG C C,ZHENG M K,LI B G.Effect of soft segment structure on properties of polyurethane elastomers[J].CIESC journal,2019,70(10):4043-4051(in Chinese with English abstract).

Coupling relationship between structure parameters of double-V-wings honeycomb with negative Poisson's ratio and log contact area

ZHU Xuchen, WANG Dian, LIU Jinhao, HUANG Qingqing

College of Engineering/National Forestry and Grassland Administration

*Key Laboratory of Forestry Equipment and Automation, Beijing Forestry University,
Beijing 100083, China*

Abstract The double-V-wings honeycomb (DVWH) structure was used to explore the damage mechanism undermining parameters of its cell structure on the logging woods to solve the problem of damage of timber caused by the logging woods during forest harvesting. Based on theoretical mechanics, a theoretical model of the unit cell parameters and yield strength of the DVWH structure was constructed, and the Y-direction compression experiment was carried out to verify it. The effects of cell structure parameters on the equivalent stress and energy absorption changes of the structure under low-speed compression, and the coupling relationship between the finite element simulation of the feed roller cell structure parameters and the log contact area are investigated. Selecting polyurethane as the material for roller drive applications, the orthogonal test method was used to select the optimal parameters in the θ_1, θ_2, t interval to increase the contact area between the feeding roller and the log by 14.56%-26.11%. Results showed that the cell structure parameters can be selected and determined according to the requirements of specific working conditions. The structural parameter thickness t was an important index affecting the compaction strain of the DVWH structure with negative Poisson's ratio. Changing the materials selected for the negative Poisson's ratio structure and the size parameters of the DVWH negative Poisson's ratio structure can improve the contact area between the feeding roller and the wood and reduce the pressure on the log.

Keywords feeding roller; double-V-wings honeycomb; negative Poisson's ratio; tree combine harvester; forest engineering; log damage; fallen timbers

(责任编辑:陆文昌)