引用格式：张智豪，洪扬，朱烨，等．基于ANSYS/LS-DYNA的海带力学参数与损伤模型[J]．材料工程，2026，54(7)：316-329.
ZHANG Zhihao，HONG Yang，ZHU Ye，et al. Mechanical parameters and damage model of kelp based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：316-329.

基于ANSYS/LS-DYNA的海带力学参数与损伤模型

张智豪[1,2]，洪　扬[2,3*]，朱　烨[2,3]，杨　猛[2,3]，刘　平[2,3]，
江　涛[2,3]，谌志新[2,3]，陈　军[2,3*]

（1 上海海洋大学 工程学院，上海 201306；2 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所，上海 200092；
3 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室，上海 200092）

摘要：海带是海洋中最常见的大型藻类，其存在对船舶和深海探测设备等存在螺旋桨缠绕风险，且生长阶段可作为海岸防护材料、收获后作为食品和化工等原料，因此亟须对其进行水动力学分析和损伤过程的力学研究，但在相关研究中缺乏精准的力学模型。本工作通过实验测得新鲜成熟海带关键力学参数，采用弹塑性本构结合主应力失效的方法，基于ANSYS/LS-DYNA软件，构建了新鲜海带力学模型。结果表明：海带剪切破坏过程表现为从局部渐进撕裂转向突发性断裂，验证性实验与仿真对比，最大误差为8.248%；弹性模量、屈服强度、切线模量、拉伸强度和剪切强度随加载速度的增加呈非线性增长，应变率效应显著；弹性模量、拉伸强度、泊松比、静摩擦因数是影响海带力学模型的关键参数；经应用范围分析，海带极限拉伸强度为2.445 MPa，极限剪切强度为0.693 MPa。结合加载速度、弹塑性本构、主应力失效方法构建的海带力学模型为涉及海带力学特性相关研究提供一定的理论基础。

关键词：海带；剪切；参数标定；有限元
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000493　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000493
中图分类号：TB39　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0316-14

Mechanical parameters and damage model of kelp based on ANSYS/LS-DYNA

ZHANG Zhihao[1,2]，HONG Yang[2,3*]，ZHU Ye[2,3]，YANG Meng[2,3]，LIU Ping[2,3]，
JIANG Tao[2,3]，CHEN Zhixin[2,3]，CHEN Jun[2,3*]

（1 College of Engineering Science and Technology，Shanghai Ocean University，Shanghai 201306，China；
2 Fishery Machinery and Instrument Research Institute，Chinese Academy of Fishery Sciences，Shanghai 200092，China；
3 Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering（Ministry of Agriculture and Rural Affairs），Shanghai 200092，China）

Abstract：Kelp is one of the most common large macroalgae in the ocean. Its presence poses a risk of propeller entanglement for ships，deep-sea exploration equipment，and other such assets. During its growth phase，it can be used as a coastal protection material，and after harvesting，it serves as a raw material for food，chemical industry，and other sectors. Therefore，there is an urgent need to conduct hydrodynamic analysis and mechanical research on its damage process. However，there is a lack of accurate mechanical models in relevant studies. In this paper，key mechanical parameters of fresh and mature kelp were measured through experiments. By adopting the method of combining elasto-plastic constitutive model with principal stress failure，a mechanical model for fresh kelp is established based on the ANSYS/LS-DYNA software. The results show that：the shear failure process of kelp is characterized by a transition from local progressive tearing to sudden fracture；comparison between verification tests and simulations reveals a maximum error of 8.248%；elastic modulus，yield strength，tangent modulus，tensile strength，and shear

strength exhibit non-linear growth with increasing loading rate, showing a significant strain rate effect; elastic modulus, tensile strength, Poisson′s ratio, and static friction coefficient are the key parameters influencing the kelp mechanical model; through application range analysis, the ultimate tensile strength of kelp is 2.445 MPa, and its ultimate shear strength is 0.693 MPa. The kelp mechanical model established by integrating loading rate, elasto-plastic constitutive model, and principal stress failure method provides a certain theoretical basis for research related to the mechanical properties of kelp.

Key words: kelp; shear; parameter calibration; finite element

海带(Saccharina japonica)是全球养殖规模最大的经济海藻品种,亦是中国海洋生态与渔业经济的关键物种之一[1-4]。海带的分类地位为植物界/褐藻门/褐藻纲/海带目/海带科/海带属/海带种,属于海洋大型藻类,一般叶长 1.5～3.0 m、宽 15～25 cm,最长者可达 6 m、宽 50 cm;养殖海带叶片长度多为 2～3 m,宽约 20 cm;成熟海带中带部厚度为 2～4 mm。自然状态下,海带多生长在潮下带、透明度较好的岩石底水域,以柄部短的固着器附着于岩石上,叶片向上生长。在养殖条件下,海带柄固着在漂浮于水面以下的梗绳上,叶片向下漂浮生长。

海带的生态与工程价值体现在两个方面:作为一种能够有效分散海浪冲击力的生物载体,海带通过对海流、海浪等环境流体动力学过程的显著调控作用,可降低海岸侵蚀风险,为基于自然的海岸防护技术提供了重要生物支撑[5-7];同时,其广泛的海洋分布特性也使其成为海洋工程活动中不可忽视的影响因素,例如在船舶推进系统、水下探测器作业中易发生缠绕现象,进而干扰设备正常运行[8-11]。同时,作为经济型海藻在机械化采收中的切割效应直接关乎效率与成本,当前针对此类相关研究却存在明显不足:一是力学参数与损伤机制研究不足。在海带收割装备研发领域,现有研究如捋切式切刀[12]、1/4 反复旋转式切割装置[13-14]、锯齿形割刀[15]等多聚焦于刀具本身的结构优化,未将海带自身的力学特性纳入设计参数体系,导致刀具与海带生物力学特性的适配性缺乏理论支撑,制约了采收效率与能耗优化。二是水动力学研究中替代材料的局限性。为简化实验流程,研究者常采用硅胶片[16]、聚氯乙烯(PVC)片[17]、热塑性聚氨酯(TPU)薄膜[18]等相似材料模拟海带的水动力学行为,但此类材料的力学特性(如拉伸强度、弹性模量等)与真实海带存在显著差异,导致实验数据难以准确反映海带在复杂流场中的变形规律与受力响应,影响了相关理论模型的可靠性。

海带是质构连续的生物材料,其力学模型主要包括本构模型和失效模型,建立精准的力学模型需要解决应力和变形等问题,而有限元分析(finite element analysis,FEA)是将现实中具有无限自由度的连续体,通过离散化处理为有限个形状规则的单元(即网格划分),每个单元视为独立的力学模型,通过节点连接形成整体计算模型,利用数学近似的方法对真实物理系统开展模拟,将复杂的物理学问题转化为计算机可处理的代数方程组求解[19-21],其基于连续性的假设能贴合海带无离散间隙的结构本质,故本工作采用有限元法构建海带力学模型。在有限元分析软件中,ANSYS/LS-DYNA 是一款有限元显式的求解软件,可以解决高度非线性结构动力学问题,连续动态地展现仿真对象的变化过程[22-25],可分析海带的剪切断裂机制。在其他藻类的有限元建模研究中,如紫菜[26]、裙带菜[27]等,均采用了该软件实现建模分析,进一步验证了其适用性。现有海带力学特性相关研究仍存在局限性:如陈天池[28]研究了拉伸强度、弹性模量与拉伸速率成正相关,未深入研究其数学关系;Lubsch 等[29]仅研究了海带中间部位的拉伸强度,缺乏其他关键参数;Dobkow 等[30]仅研究了拉伸强度、弹性模量等参数与形态存在相关性,没有考虑拉伸速率的影响。这些研究均未能构建起完整的海带力学参数模型,无法为海带的有限元仿真提供全面支撑。

上述研究的缺乏不仅限制了海带在海岸防护、海洋工程等领域的高效应用,也制约了海带机械化收割技术的迭代升级。因此,开展海带力学参数及其损伤机制的系统性研究,对于突破工程实践瓶颈、提升科学研究精度具有重要理论价值与应用前景。本工作以筏式养殖成熟海带作为研究对象,围绕海带力学特性开展仿真研究,基于实验数据标定 LS-DYNA 5～100 mm/min 加载速度下的仿真参数,构建加载速度与力学参数的拟合曲线,通过 200 mm/min 加载速度的实验验证拟合曲线的误差,最终建立精确的海带力学模型。该研究成果可为海洋运输及深海探测设备螺旋桨缠绕分析、海带水动力学分析、抗海岸侵蚀生物材料研发等领域提供理论与技术支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用海带为国家水产新品种“海带 205”(Haidai 205),样本于 2025 年 4 月采自威海荣成爱伦湾养殖区(37°10′N,122°35′E),生长期约 6 个月。随机选取完整的、无破损的海带,将其表面的泥渍用海水清洁后,截取易被撕裂的典型部位作为实验样本(靠近柄底部位置截取 0.3 m(图 1(a))),置于干净、6 ℃左右的海水中,于 20 min 内运回实验室,在室温 10 ℃左右下,用哑铃形切刀根据图 1(b)所示,将海带样本切割成标准的哑铃型形状(图 1(c)),并确保切割面平整。

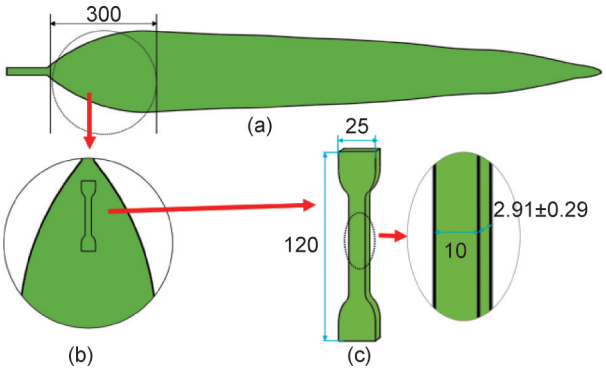


图 1 海带取样示意图

(a)完整海带;(b)取样方式;(c)哑铃型样本尺寸

Fig.1 Schematic diagrams of kelp sampling

(a)intact kelp;(b)sampling method;

(c)dimensions of dumbbell-shaped samples

1.2 实验方法

通过 Archimedes 排水法测量海带样本的密度(ρ)[31-32]。采用视频引伸计测量泊松比(ν)[33-37],主要过程为:采用带孔隔板,向哑铃型海带样本喷涂黄色喷漆,形成有序散斑(图 2(a));采用 BASLER(aca1920-155ucMED)高速相机连续拍摄海带拉伸全过程的变形情况;对照片像素尺寸标定,经机器视觉处理获取散斑位移数据,获得哑铃型海带样本长、宽的变化情况(图 2(b)),通过式(1)计算得到泊松比。

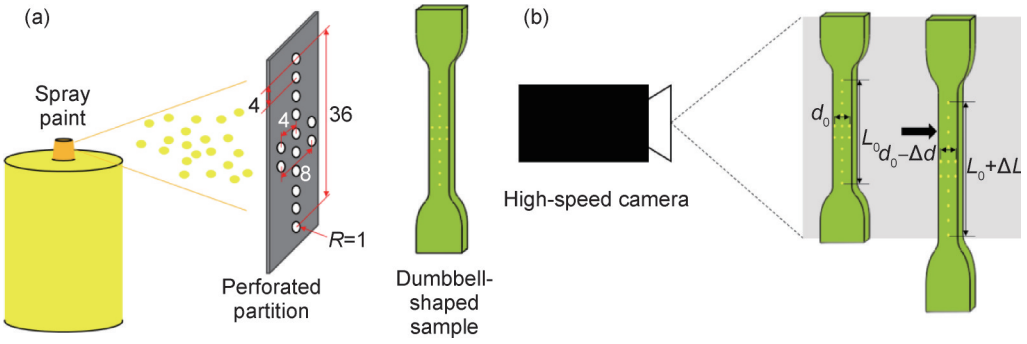


图 2 海带泊松比测量原理

(a)海带样本喷涂散斑示意图;(b)视频引伸计工作原理

Fig.2 Principle of kelp Poisson′s ratio measurement

(a)schematic diagram of kelp sample with sprayed speckles;(b)working principle of video extensometer

$$\nu=-\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}=-\frac{\dfrac{d-d_0}{d_0}}{\dfrac{L-L_0}{L_0}}=\frac{\Delta d}{d_0}\frac{L_0}{\Delta L} \tag{1}$$

式中:ν为泊松比;ε_x为垂直于力方向的应变(即横向应变);ε_y为平行于力方向的应变(即纵向应变);L为样本拉伸时的长度;ΔL为样本拉伸时长度的增量;L_0为样本上散斑的原始长度;d为样本拉伸时的宽度;Δd为样本拉伸时宽度的减小量;d_0为样本上散斑的原始宽度。

采用微机控制电子万能试验机(WDW-2 型,图 3(a))对海带样本品进行力学性能测试:搭配杠杆式夹具(图 3(a),(b))测量海带样品力-位移曲线及工程应力-应变曲线;搭配剪切平台(图 3(d)~(f))测量样品的剪切强度与剪切力。两组实验均依次选用 5、25、50、100、200 mm/min 的加载速度开展 5 组实验,每组实验重复 5 次。

采用斜面提升法[38]测定海带与刀具材料的静摩擦因数。用长 500 mm、宽 300 mm 的 430 不锈钢板,将海带试样静置在斜面上,逐渐增加斜面倾角,当物体刚好有滑动趋势时,根据数显角度尺测得实验台斜面与水平面的夹角 α(图 4(a)),重复实验 10 次,通过式(2),(3)得到海带的静摩擦因数 μ_s。

采用斜面滚动法测定海带与刀具材料的动摩擦因数。用两块长 500 mm、宽 300 mm 的 430 不锈钢板,将其按图 4(b)所示摆放,将海带样本(海带体为片状,不会与刀具材料产生滚动现象,故选取海带柄开展实

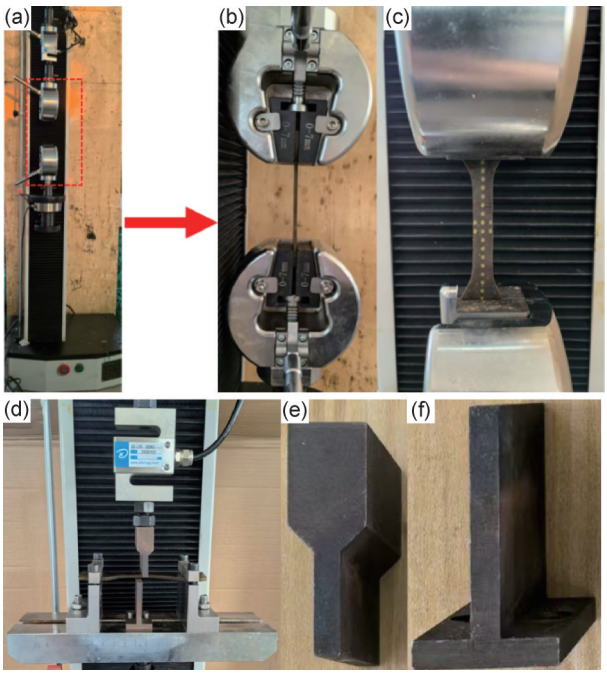


图 3　实验设备

(a)万能试验机;(b)杠杆式夹具正面图;(c)杠杆式夹具侧面图;(d)剪切平台;(e)上切刀;(f)下切刀

Fig.3　Test equipment

(a)universal testing machine;(b)front view of lever-type fixture;(c)side view of lever-type fixture;(d)shear platform;(e)upper cutter;(f)lower cutter

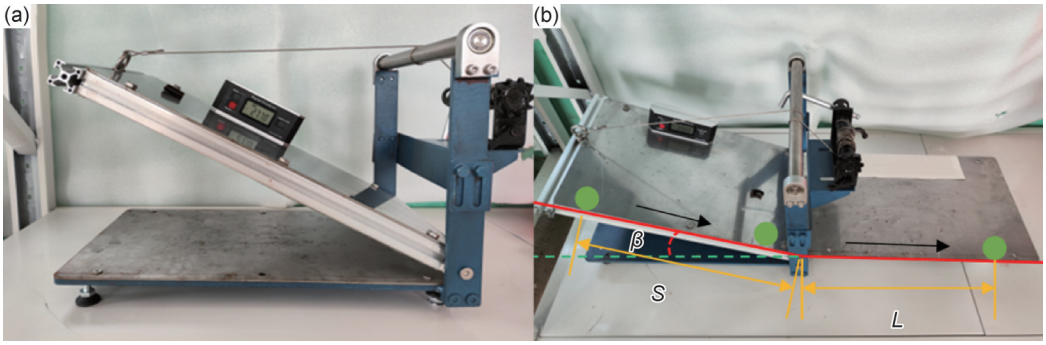


图 4　摩擦因数测量实验

(a)静摩擦因数测量实验;(b)滚动摩擦因数测量实验

Fig.4　Experiment for measuring friction coefficient

(a)experiment for measuring static friction coefficient;(b)experiment for measuring rolling friction coefficient

验)从斜面距离 S 处以初速度为 0 自由向下滚动,待海带样本在水平位置停止后记录水平滚动距离 L。通过预实验确定试样在斜面上滚动距离 S=60 mm,倾斜角度 β=20°,根据式(4),(5)得到滚动摩擦因数 μ_r。

$$G_m \sin\alpha = \mu_s G_m \cos\alpha \tag{2}$$

$$\mu_s = \tan\alpha \tag{3}$$

$$mgS\sin\beta = \mu_r mg\left(S\cos\beta + L\right) \tag{4}$$

$$\mu_r = \frac{S\sin\beta}{\left(S\cos\beta + L\right)} \tag{5}$$

式中:G_m 为试样的重力;m 为样本质量;g 为重力加速度。

1.3　力学模型构建

构建海带力学模型主要分为两个部分:本构模型和失效模型。本构模型是描述材料在外力作用下,其内部力学响应规律的数学表达式。生物材料与大部分工程材料力学特性存在本质差异:工程材料多以弹塑性响应为主,变形的时间依赖性较弱,应力仅与应变相关,应变率的影响可忽略;而生物材料普遍具备黏弹性特征,应力同时受应变与应变率共同作用,呈现为蠕变(恒应力下应变随时间持续增长)和应力松弛(恒应变下应力随时间逐步衰减)现象[39],如苹果[40]、葡萄[41]等。作为典型的褐藻生物材料,海带的

黏弹性已被陈天池[28]通过盐渍海带实验证实，但本工作针对新鲜海带的单轴拉伸实验呈现出阶段特性（即弹性阶段与塑性阶段），根据图 5 应力-应变曲线可知海带的弹性部分符合胡克定律，且塑形部分的曲线与切线模量的拟合 R^2 为 0.997。根据这一实验特征出发，尽管海带本质存在黏弹性，但在同一加载速度下弹塑性模型足以精确描述其变形行为，故本工作采用不同加载速度拟合弹塑性模型参数的方法构建海带的本构模型。

失效模型是用于描述材料在外力作用下从正常过渡到破坏的判断体系。等效应力（Von Mises 应力）是张量分量的标量函数，它能给出张量恰当的整体大小，常用于延性工程材料的失效分析[42]，袁亚豪[43]、Irudayaraj 等[44]提出可将其应用于农业材料。从应力状态的关联来看，已有研究采用单轴压缩实验结果，预测材料在三轴载荷作用下的破坏点和破坏量[45]，这一结论同样适用于海带的力学分析。由于等效应力分析遵循 Von Mises 失效准则，而单轴拉伸与单轴压缩同属于简单应力状态（仅一个方向受力），根据等效应力公式(6)，当海带处于单轴拉伸状态时（即 $\sigma_1=\sigma$，$\sigma_2=0$，$\sigma_3=0$ 时），其主应力等于等效应力（即 $\sigma=\sigma_{Von}$）。这一关键特性可从易操作的单轴拉伸实验中获取主应力数据并推测非单轴载荷下海带的力学响应。因此，基于等效应力原理的主应力失效方法，既符合海带的应力状态关联规律，又具备实验可行性，故用于构建海带的失效模型。

$$\sigma_{Von}=\sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right]} \tag{6}$$

结合万能试验机所测力-位移曲线图，并采用式(7)～(11)计算海带的工程应力-应变曲线和真实应力-应变曲线（图 5(a)）。由图 5(b)可知，A-B 段为弹性变形阶段，斜率（tanα）为弹性模量（E），B 点为屈服点，对应屈服强度（σ_s），B-C 段为塑形变形阶段，斜率（tanβ）为切线模量（E_t），C 点为断裂点拉伸强度（σ_b）。根据剪切实验测得的剪切力通过式(12)计算剪切强度（τ）。根据上述方法，可构建海带本构参数模型，经统计部分参数与加载速度（load speed）有关，具体数据如表 1 所示。

$$\sigma_e=\frac{F}{A_0} \tag{7}$$

$$\varepsilon_e=\frac{\Delta L}{L_0}=\frac{L_t-L_0}{L_0} \tag{8}$$

$$A_0L_0=A_tL_t \tag{9}$$

$$\sigma_t=\frac{F}{A_t}=\frac{FA_0}{A_0A_t}=\sigma_e\frac{A_0L_0}{A_tL_0}=\sigma_e\frac{L_t}{L_0}=\sigma_e(1+\varepsilon_e) \tag{10}$$

$$\varepsilon_t=\int_{L_0}^{L_t}\frac{dL}{L}=\ln\frac{L_t}{L_0}=\ln(1+\varepsilon_e) \tag{11}$$

$$\tau=\frac{F_S}{A_0} \tag{12}$$

式中：σ_e 为海带样本单轴拉伸时的工程应力；F 为海带样本受到的轴向拉力；A_0 为海带样本的原始截面积；ε_e 为海带样本单轴拉伸时的工程应变；为海带样本增加长度；L_t 为海带样本拉伸过程中的长度；L_0 为海带样本的初始长度；A_t 为海带样本在拉伸过程中的截面积；σ_t 为海带样本拉伸时的真实应力；ε_t 为海带样本单轴拉伸时的真实应变；τ 为海带样本剪切强度；F_S 为海带样本剪切时受到的最大力。

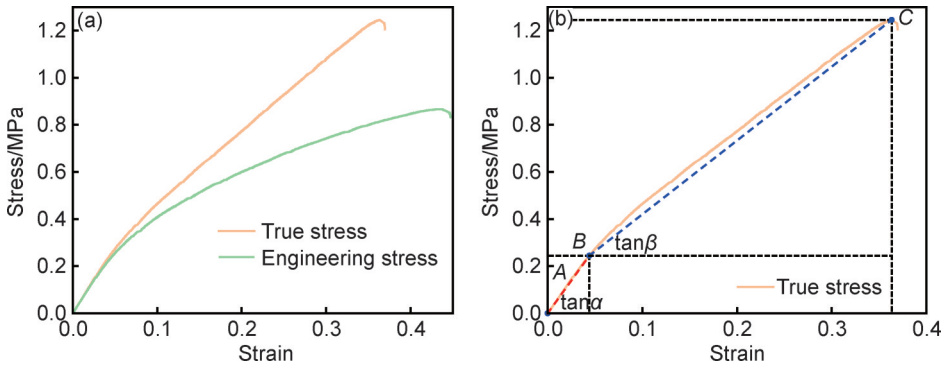


图 5 应力-应变曲线

(a)工程应力-应变曲线和真实应力-应变曲线；(b)真实应力-应变曲线参数点

Fig.5 Stress-strain curves

(a)engineering stress-strain curve and true stress-strain curve；(b)parameter points on the true stress-strain curve

1.4 有限元建模

将实验过程中的剪切平台简化，通过 ANSYS/Space Claim 软件建立哑铃型海带剪切装置的简化三维模型。基于实验数据标定、优化 ANSYS/LS-DYNA 在 5～100 mm/min 加载速度下的仿真参数，构建加载速度与力学参数的数学模型，通过实验验证

表 1　实验统计参数

Table 1　Test statistical parameters

Load speed/(mm·min^{-1})	E/MPa	σ_s/MPa	E_t/MPa	σ_b/MPa	τ_s/MPa
5	5.362±1.007	0.229±0.050	3.454±0.260	1.288±0.168	0.631±0.069
25	5.691±0.480	0.316±0.070	3.942±0.264	1.558±0.264	0.676±0.043
50	6.357±0.984	0.347±0.079	4.120±0.192	1.869±0.275	0.686±0.043
100	6.401±0.556	0.437±0.090	4.371±0.174	2.021±0.303	0.695±0.118
200	7.884±1.505	0.499±0.127	4.938±0.267	2.304±0.474	0.713±0.107
Total	6.339±1.258	0.366±0.125	4.165±0.543	1.808±0.461	0.680±0.080

Note: Other constitutive parameters are as follows, ρ=(1.080±0.020) g/cm^3; ν=0.341±0.061; μ_s=0.364±0.041; μ_r=0.067±0.004

200 mm/min加载速度下该模型仿真结果与真实值误差。在材料属性设置中，根据5～100 mm/min相关参数依据表1中的各数据输入至用户材料模块界面列表；后续分析过程中，可根据实际需求调整修改。为实现哑铃型海带样本的剪切仿真，约束设置如下：哑铃型海带样本两端为固定支撑；下刀具的底端为固定支撑；上刀具沿y轴向下恒速运动（经实验测试，加载速度单因素对剪切力的最大影响误差约2.08%，综合考量，本工作仿真采用运行时间0.02 s，位移3 mm，此时误差约1.02%），约束其他5个自由度。网格划分采用粗细网格结合的方式划分网格，即海带与刀具的接触范围内细化网格（单元定义尺寸为0.25 mm），其余部位粗化网格（图6），约3.16万个节点和12.49万个单元。海带样本剪切有限元仿真的本质是通过主应力失效（即材料主应力方向上的应力到达某一极限值时发生失效，被判定为失效的网格在计算中被删除）实现海带的剪切，故设置刀具与海带样本的接触特性为侵蚀接触，生时间（接触激活时间）为0 s，死亡时间（接触失效时间）为10 s（死亡时间远大于分析时间均可）；接触类型为摩擦接触，静、动摩擦因数按照表1取值。

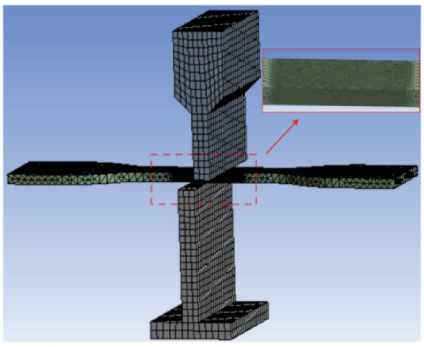


图6　网格划分

Fig.6　Mesh generation

已知剪切力受海带材料厚度的影响，若以实验测得的剪切力均值作为目标值标定，无法保证参数准确性。故本工作以海带均值厚度（2.91 mm）为基准，将不同加载速度下海带剪切强度所对应的剪切力作为目标值。由于海带的本构模型参数较多，为减少实验次数，利用Design Expert开展Plackett-Burman因素筛选实验[46]，以剪切力为响应值，筛选出对响应值影响显著的因素（由于仿真中本构参数的切线模量不能大于弹性模量，100 mm/min加载速度时的切线模量的最大值4.545 MPa大于5 mm/min加载速度时的弹性模量的最小值4.355 MPa，选择25～100 mm/min加载速度下的参数开展Plackett-Burman因素筛选实验），对其各因素开展高、低水平编码，设计实验并仿真计算结果。以Plackett-Burman因素筛选实验结果的显著因素，开展Box-Behnken不同加载速度的实验，其余不显著因素采取各速度下的均值。

2　结果与分析

2.1　实验数据分析

通过图7(a)可以看出，海带的弹性范围较窄，约占总应变的10%～20%，在拉伸断裂过程中，塑性变形占主导地位。对于以塑性变形为主的材料，屈服点（屈服强度）是表征其从弹性阶段过渡到塑性阶段的关键指标，而拉伸强度则反映了材料抵抗断裂的极限能力，因此屈服强度和拉伸强度在海带剪切特性分析中十分关键。

此外，在材料力学中，加载速度直接对应应变率，根据图7(b)～(f)可以看出，海带的弹性模量、屈服强度、切线模量、拉伸强度和剪切强度均随加载速度的增加呈非线性的增长趋势，即参数随应变率升高而增大。这符合应变率效应的典型特征，即材料力学性能会因变形速度的改变而改变，这一特性对于分析海带在动态载荷作用下的力学响应具有重要意义。

由式(13)可知，平均应变率其本质为单位时间内应变的大小，可用于剖析材料在宏观变形阶段的力学

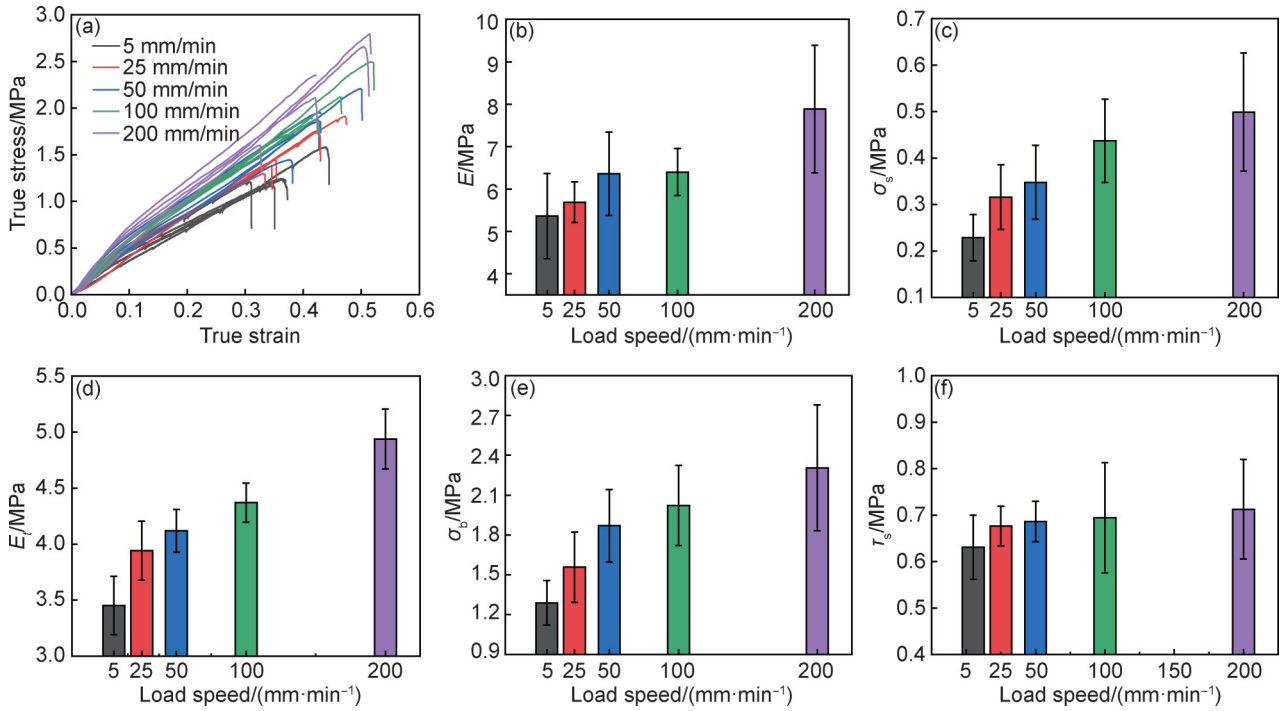


图7 真实应力-真实应变曲线和参数随加载速度变化统计图

(a)真实应力-真实应变曲线;(b)弹性模量;(c)屈服强度;(d)切线模量;(e)拉伸强度;(f)剪切强度

Fig.7 True stress-true strain curves and statistical charts of parameters varied with load speed

(a)true stress-true strain curve;(b)elastic modulus;(c)yield strength;(d)tangent modulus;(e)tensile strength;(f)shear strength

响应规律,如弹性模量、切线模量与应变率之间的关系。根据实验结果,平均应变率与加载速度呈线性关系(如图8(a)所示)。因此,可直接构建加载速度与弹性模量、切线模量的非线性拟合曲线。

屈服点、拉伸强度等瞬态特性参数的分析,可根据式(15)开展真实应变率分析。由图8(a)~(c)可知,在整个变形过程中,真实应变率呈下降趋势,且其下降幅度与平均应变率呈正相关(表2)。这表明加载速度的改变会通过影响真实应变率的衰减规律,直接作用于材料在关键瞬态点的力学响应。此外,在对应平均应变率的变形过程中,加载速度保持恒定,而真实应变率为加载速度的函数,因此可直接构建加载速度与屈服点、拉伸强度的非线性拟合曲线。

$$\dot{\varepsilon}_{avg}=\frac{\varepsilon_t}{t}=\frac{\ln(1+\varepsilon_e)}{t} \tag{13}$$

$$\dot{\varepsilon}_{avg}=0.00021v+0.00027 \tag{14}$$

$$\dot{\varepsilon}=\frac{\mathrm{d}\varepsilon_t}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\ln(1+\varepsilon_e)\right]=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\ln\left(\frac{L}{L_0}\right)\right]=\frac{1}{L}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} \tag{15}$$

式中:$\dot{\varepsilon}_{avg}$为平均真实应变率;t为变形总时长;$\dot{\varepsilon}$为真实应变率(瞬时),其中$\dot{\varepsilon}_0$为真实应变率起始值,$\dot{\varepsilon}_f$为真实

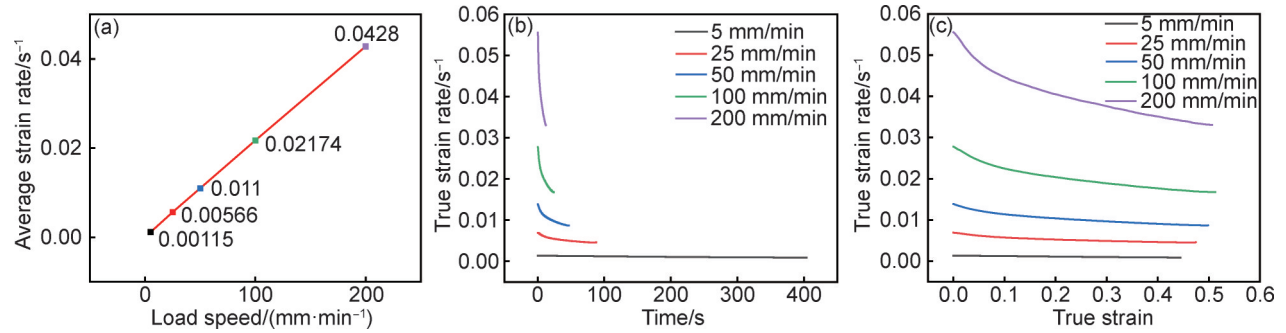


图8 应变率变化趋势

(a)平均应变率-加载速度;(b)真实应变率-时间;(c)真实应变率-真实应变

Fig.8 Trend of strain rate change

(a)average strain rate-load speed;(b)true strain rate-time;(c)true strain rate-true strain

表 2　真实应变率分析

Table 2　True strain rate analysis

$\dot{\varepsilon}_{avg}/s^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_0/s^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_f/s^{-1}$	Reduction ratio/%
1.15×10^{-3}	1.389×10^{-3}	8.96×10^{-4}	35.493
5.66×10^{-3}	6.944×10^{-3}	4.545×10^{-3}	34.551
1.10×10^{-2}	1.389×10^{-2}	8.691×10^{-3}	37.423
2.174×10^{-2}	2.778×10^{-2}	1.677×10^{-2}	39.616
4.28×10^{-2}	5.556×10^{-2}	3.299×10^{-2}	40.609

应变率结束值；$\frac{dL}{dt}$为试件瞬时长度变化率（即瞬时速度，由于实验是恒速的，可表示为速度v）。

2.2　参数分析与仿真验证

Plackett-Burman因素筛选实验各因素开展高、低水平编码（表3），设计实验并仿真计算结果（表4）。表5为实验结果方差分析，样本模型的p值<0.01，表明模型极显著，其中X_6极显著，X_1、X_3、X_8显著，其余5个因素不显著。

表 3　Plackett-Burman 实验因素、编码与水平

Table 3　Factors, code and levels of Plackett-Burman experiment

Level	$\nu(X_1)$	$\rho(X_2)/(g/cm^3)$	$E(X_3)$/MPa	$\sigma_s(X_4)$/MPa	$E_t(X_5)$/MPa	$\sigma_b(X_6)$/MPa	$\tau_s(X_7)$/MPa	$\mu_s(X_8)$	$\mu_r(X_9)$
−1	0.280	1.06	5.211	0.246	3.678	1.294	0.633	0.323	0.063
1	0.402	1.10	6.957	0.527	4.545	2.324	0.813	0.405	0.071

表 4　实验设计方案与结果

Table 4　Experimental design scheme and results

Test No.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	F_S/N
1	0.28	1.1	5.211	0.527	4.545	1.294	0.813	0.405	0.071	16.489
2	0.28	1.06	5.211	0.246	3.678	1.294	0.633	0.323	0.063	15.662
3	0.28	1.1	6.957	0.246	4.545	2.324	0.813	0.323	0.063	24.47
4	0.402	1.1	5.211	0.527	4.545	2.324	0.633	0.323	0.063	20.938
5	0.28	1.06	6.957	0.246	4.545	2.324	0.633	0.405	0.071	24.69
6	0.402	1.06	5.211	0.246	4.545	1.294	0.813	0.405	0.063	15.249
7	0.402	1.1	6.957	0.246	3.678	1.294	0.813	0.323	0.071	13.886
8	0.28	1.06	5.211	0.527	3.678	2.324	0.813	0.323	0.071	21.056
9	0.402	1.06	6.957	0.527	3.678	2.324	0.813	0.405	0.063	22.725
10	0.402	1.06	6.957	0.527	4.545	1.294	0.633	0.323	0.071	14.171
11	0.402	1.1	5.211	0.246	3.678	2.324	0.633	0.405	0.071	20.676
12	0.28	1.1	6.957	0.527	3.678	1.294	0.633	0.405	0.063	17.08

表 5　实验结果方差分析

Table 5　Analysis of variance of experimental results

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value
Model	171.19	9	19.02	100.92	0.0098**
X_1	11.61	1	11.61	61.58	0.0159*
X_2	0.00	1	0.00	0.0001	0.9934
X_3	4.03	1	4.03	21.37	0.0438*
X_4	0.3939	1	0.3939	2.09	0.2852
X_5	2.02	1	2.02	10.71	0.082
X_6	147.13	1	147.13	780.55	0.0013**
X_7	0.0361	1	0.0361	0.1914	0.7045
X_8	3.77	1	3.77	20.00	0.0465*
X_9	2.22	1	2.22	11.75	0.0756
Residual	0.377	2	0.1885		
Cor total	171.57	11			

Note: **indicates that the item is highly significant ($p<0.01$); *indicates that the item is significant ($p<0.05$).

为分析不同速度下4个显著因素的最优参数组合，依据Plackett-Burman实验结果，对X_1、X_3、X_6、X_8参数进行不同加载速度的响应面设计，其中不显著因素选取表1中的均值。实验评价指标为剪切力，每组加载速度下分别进行29组仿真实验。实验因素编码表与实验结果如表6和表7所示。根据表7结果进行多元回归拟合[46]，建立不同加载速度下海带剪切力与X_1、X_3、X_6、X_8编码值的二次多项式回归模型，如式(16)～(19)所示。

$$F_5=18.30-0.8514X_1+0.4043X_3+1.52X_6+0.1675X_8-0.4961X_1X_3+0.2506X_1X_6-0.0851X_1X_8+0.2684X_3X_6+0.0106X_3X_8-0.0371X_6X_8-0.3954X_1^2+0.0932X_3^2+0.0370X_6^2+0.0031X_8^2 \quad (16)$$

$$F_{25}=18.28-1.10X_1+0.0166X_3+2.34X_6+0.4516X_8-0.1762X_1X_3+0.7700X_1X_6-0.1170X_1X_8-0.0609X_3X_6+0.0862X_3X_8+0.1668X_6X_8-0.6940X_1^2+0.0638X_3^2-0.0128X_6^2-0.0019X_8^2 \quad (17)$$

表 6 Box-Behnken 实验因素、编码与水平

Table 6 Factors, coding and levels of Box-Behnken experiment

Load speed/(mm·min^{-1})	Level	X_1	X_3	X_6	X_8
5	−1	0.280	4.335	1.120	0.323
	0	0.341	5.362	1.288	0.364
	1	0.402	6.369	1.456	0.405
25	−1	0.280	5.211	1.294	0.323
	0	0.341	5.691	1.558	0.364
	1	0.402	6.171	1.822	0.405
50	−1	0.28	5.373	1.594	0.323
	0	0.341	6.357	1.869	0.364
	1	0.402	7.341	2.144	0.405
100	−1	0.28	5.845	1.718	0.323
	0	0.341	6.401	2.021	0.364
	1	0.402	6.957	2.324	0.405

表 7 不同加载速度下 Box-Behnken 实验设计方案与响应值

Table 7 Box-Behnken experimental design schemes and response values under different loading speeds

Test No.	X_1	X_3	X_6	X_8	F_s/N			
					5 mm/min	25 mm/min	50 mm/min	100 mm/min
1	−1	−1	0	0	17.9328	18.7675	20.0495	21.5450
2	1	−1	0	0	17.6181	17.0236	18.8772	19.7779
3	−1	1	0	0	19.4413	19.0324	21.4484	22.8094
4	1	1	0	0	17.1424	16.5838	18.2630	20.4098
5	0	0	−1	−1	16.3809	16.2401	18.5599	19.7890
6	0	0	1	−1	19.5620	19.8652	21.4355	23.0912
7	0	0	−1	1	17.2641	16.7359	18.9407	19.7980
8	0	0	1	1	20.2970	21.0282	22.2522	23.6087
9	−1	0	0	−1	18.6777	18.2927	20.7208	21.6919
10	1	0	0	−1	16.9056	15.6586	18.8718	19.9412
11	−1	0	0	1	19.0511	19.3883	20.9461	22.0541
12	1	0	0	1	16.9386	16.2861	18.599	20.4137
13	0	−1	−1	0	16.7852	15.4394	18.3061	19.7264
14	0	1	−1	0	17.3086	16.0308	18.9831	19.9587
15	0	−1	1	0	18.9863	20.3976	20.85	22.5014
16	0	1	1	0	20.5832	20.7453	22.2805	23.7294
17	−1	0	−1	0	17.4770	16.5043	19.1393	20.5941
18	1	0	−1	0	15.1163	13.3156	17.1786	18.5195
19	−1	0	1	0	20.2355	20.2197	22.8227	23.9381
20	1	0	1	0	18.8773	20.1110	20.6974	21.9792
21	0	−1	0	−1	17.9707	18.0243	18.4802	21.3214
22	0	1	0	−1	18.7990	17.5695	20.869	22.0309
23	0	−1	0	1	17.9420	18.8709	20.1606	21.3094
24	0	1	0	1	18.8127	18.7607	21.1706	21.6715
25	0	0	0	0	18.5333	18.4462	20.0063	21.6088
26	0	0	0	0	18.6136	18.9691	21.2698	22.5170
27	0	0	0	0	18.5375	17.8342	21.099	21.9413
28	0	0	0	0	18.3139	18.2220	19.2871	21.4683
29	0	0	0	0	17.5124	17.9102	18.8727	20.1035

$$F_{50}=20.11-1.05X_1+0.5242X_3+1.60X_6+0.2610X_8-0.5032X_1X_3-0.0412X_1X_6-0.1245X_1X_8+0.1884X_3X_6-0.3447X_3X_8+0.1090X_6X_8-0.3477X_1^2-0.0821X_3^2+0.1313X_6^2+0.0764X_8^2 \quad (18)$$

$$F_{100}=21.53-0.9659X_1+0.3690X_3+1.71X_6+0.0825X_8-0.1581X_1X_3+0.0289X_1X_6+0.0276X_1X_8+0.2489X_3X_6-0.0868X_3X_8+0.1271X_6X_8-0.3967X_1^2-0.0071X_3^2+0.0483X_6^2-0.0158X_8^2 \quad (19)$$

对回归模型进行方差分析，结果如表 8 所示。4 个剪切力回归模型的显著性水平 p 值均小于 0.01，可知模型极显著；失拟项显著水平的 p 值均大于 0.05，表明回归模型的拟合度较高可用回归模型代替实验真实点对结果进行分析。4 个模型的决定系数 R^2 分别为 0.9598、0.9633、0.8913、0.9301，说明 4 个模型的 R^2 均处于较高水平，故海带剪切力可以用该模型进行优化。

表 8 不同加载速度下的回归模型方差分析

Table 8 Box-Behnken experimental design schemes and response values under different loading speeds

Source	p-value			
	5 mm/min	25 mm/min	50 mm/min	100 mm/min
Model	<0.0001**	<0.0001**	0.0002**	<0.0001**
X_1	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
X_3	0.0014**	0.9087	0.0166*	0.0263*
X_6	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
X_8	0.1217	0.0067**	0.1971	0.5877
X_1X_3	0.0137*	0.4859	0.1539	0.5489
X_1X_6	0.1765	0.0074**	0.9036	0.9121
X_1X_8	0.6363	0.6418	0.7147	0.9162
X_3X_6	0.1497	0.8081	0.5815	0.3499
X_3X_8	0.9529	0.7315	0.3193	0.7409
X_6X_8	0.8363	0.5090	0.7489	0.6291
X_{12}	0.0126*	0.0030**	0.2060	0.0699
X_{32}	0.5114	0.7464	0.7586	0.9726
X_{62}	0.7927	0.9480	0.6242	0.8148
X_{82}	0.9827	0.9923	0.7751	0.9386
Lack of fit	0.8685	0.4613	0.9931	0.9997

Note: "**" indicates that the item is highly significant ($p<0.01$); "*" indicates that the item is significant ($p<0.05$).

参数对回归模型方程的影响程度可以通过显著性水平 p 值进行评价。在 4 个回归模型方程中 4 个因素对剪切力影响的显著性为拉伸强度>泊松比>弹性模量和静摩擦因数。根据图 9 可以看出，在不同速度下，各显著参数对剪切力的影响趋势相同，证明选取 25～100 mm/min 进行 Plackett-Burman 实验成立。其中泊松比与剪切力成反比，其余三项参数与剪切力成正比。

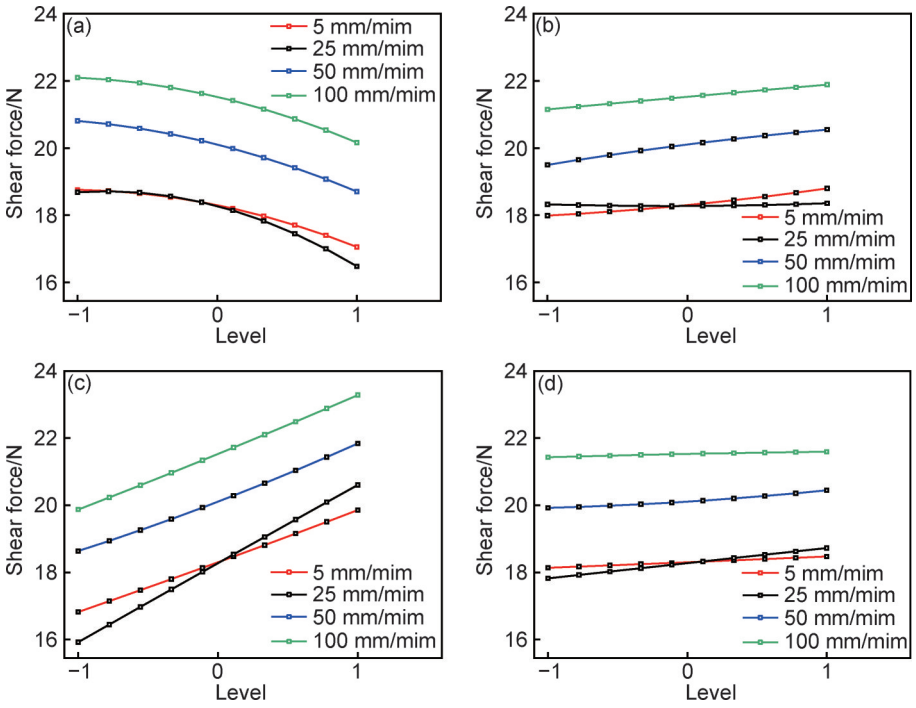


图 9　Box-Behnken 实验各加载速度下单因素对剪切力的影响趋势

(a)泊松比;(b)弹性模量;(c)拉伸强度;(d)静摩擦因数

Fig.9　Trend of influence of single factors on shear force at various loading speeds in box-Behnken experiment

(a)Poisson's ratio;(b)elastic modulus;(c)tensile strength;(d)static friction coefficient

在因素水平范围内,利用 Design Expert 软件寻优功能对参数进行优化。根据海带均值厚度(2.91 mm)不同加载速度下海带剪切强度所对应的剪切力如表 7 所示,基于该目标值对 5 个模型进行求解。通过多次仿真验证,最终选取与目标值最接近的一组解,泊松比为 0.358,静摩擦因数为 0.361 时,5、25、50、100 mm/min 加载速度下的弹性模量分别为 4.691、5.832、6.899、6.944 MPa,拉伸强度分别为 1.343、1.747、1.781、1.811 MPa,如表 9 所示。结果显示,仿真结果的相对误差最大为 1.829%,这表明该组解具有较高的可靠性。基于上述优化实验所获取的参数,针对随加载速度变化的 5 个本构参数进行拟合处理(如图 10 所示),拟合函数为式(20)~(24)。

表 9　不同加载速度下剪切力的目标值与优化参数及误差

Table 9　Target values, optimization parameters, and errors of shear force under different loading speeds

Load speed/(mm·min^{-1})	Mean shear strength/MPa	Shear force corresponding to a thickness of 2.91 mm/N	E/MPa	σ_b/MPa	Simulation value/N	Relative error/%
5	0.6309	18.3601	4.691	1.343	18.155	1.117
25	0.6763	19.6807	5.832	1.747	19.527	0.781
50	0.6860	19.9628	6.899	1.781	20.328	1.829
100	0.6945	20.2112	6.944	1.811	20.427	1.068

在工程应用领域中,应变率按其范围可以分为如下五类:当应变率$<10^{-5}$ s^{-1}时,属于静态/蠕变范围;当应变率介于10^{-4}~10^{-2} s^{-1}时,属于准静态范围;当应变率介10^{-1}~10^{1} s^{-1}时,属于中应变率范围;当应变率介于10^{2}~10^{4} s^{-1}时,属于高应变率范围;而当应变率达到10^{5} s^{-1}时,则属于极高应变率范围[47]。应用海带力学参数进行分析时,一般难以达到极高应变率,以应变率10^{5} s^{-1}为极限,根据式(14)算得不同应变率对应的加载速度,将加载速度带入式(20)~(24)可算得当应变率达到极高应变率(10^{5} s^{-1})时,海带拉伸强度为 2.445 MPa,剪切强度为 0.693 MPa。

$$E=7.09638-2.97617\times0.96124^{v} \tag{20}$$

$$\sigma_s=-0.23263+0.13802\ln(v+23.85934) \tag{21}$$

$$E_t=0.8267\ln(39.26198\ln(v)) \tag{22}$$

$$\sigma_b=1.62413+0.04109\ln(v-4.99893) \tag{23}$$

$$\tau_s=0.6928-0.08411e^{-0.06199v} \tag{24}$$

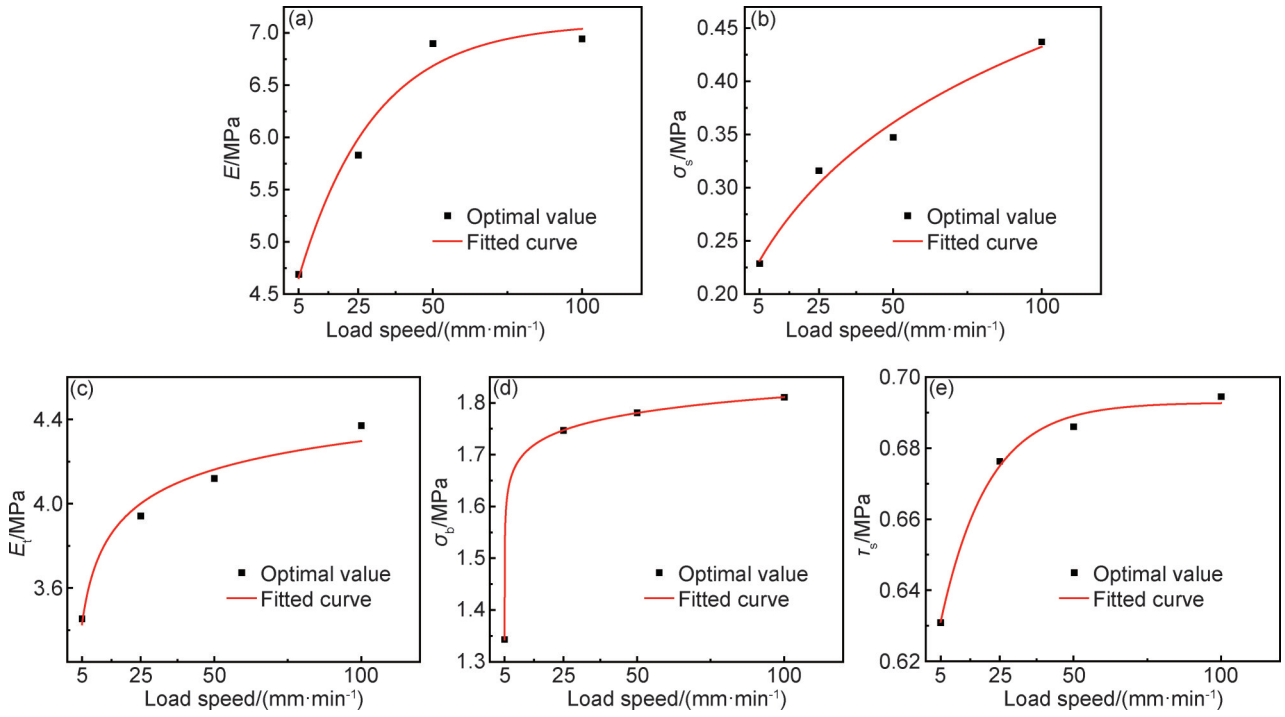


图 10 本构参数与速度的拟合曲线

(a)弹性模量-加载速度;(b)屈服强度-加载速度;(c)切线模量-加载速度;(d)拉伸强度-加载速度;(e)剪切强度-加载速度

Fig.10 Fitted curves of constitutive parameters-load speed

(a)elastic modulus-loading speed;(b)yield strength-loading speed;(c)tangent modulus-load speed;(d)tensile strength-loading speed;(e)shear strength-load speed

2.3 仿真结果分析

以拟合函数求解获得的 200 mm/min 加载速度下的本构参数(表 10)为依据开展仿真分析。仿真结果与实验结果对比如表 11 所示,结果显示,两者最大误差为 8.248%,表明本研究构建的新鲜海带弹塑性本构结合主应力失效的力学模型具有可行性。基于该模型进一步分析海带剪切过程中的等效应力分布特征(图 11)。由图 11(a)可知,上下刀具与海带初始接触,因几何约束和载荷传递,接触区域迅速产生应力集中,说明此时材料以弹性变形为主,应力集中于接触界面附近;由图 11(b)可知,随剪切位移的增加,海带所受应力增大,上下接触部位应力值高于中间,呈现“两端高、中间低”的应力分布特征;图 11(c)为剪切力到达峰值时的应力状态,因海带上下部位应力率先突破极限,发生局部失效,但整体未完全断裂,结构仍有承载能力;图 11(d)为海带样本剪切完成图,在 0.423~0.675 s 内剪切力骤降,虽过程中略有波动,却未超 0.423 s 时的力峰值,说明在 0.423 s 发生的局部破坏在剪切力的作用下快速扩展,失效模式从局部渐进损伤转为整体断裂,其剩余的承载能力不足以抵抗剪切,因此力值未超过峰值。

表 10 200 mm/min 加载速度下的理论本构参数

Table 10 Theoretical constitutive parameters under a load speed of 200 mm/min

E/MPa	σ_s/MPa	E_t/MPa	σ_b/MPa	τ_s/MPa	ρ/(g·cm^{-3})	ν	μ_s	μ_r
7.095	0.514	4.413	1.841	0.693	1.080	0.341	0.364	0.067

表 11 200 mm/min 不同厚度样本实验值与仿真值对比

Table 11 Comparison between experimental values and simulation values of samples with different thicknesses at 200 mm/min

Thickness/mm	Experimental value/N	Simulation value/N	Error/%
2.84	21.74	20.414	6.099
2.81	21.87	21.58	1.326
3.14	21.92	23.232	5.985
3.34	25.12	23.048	8.248

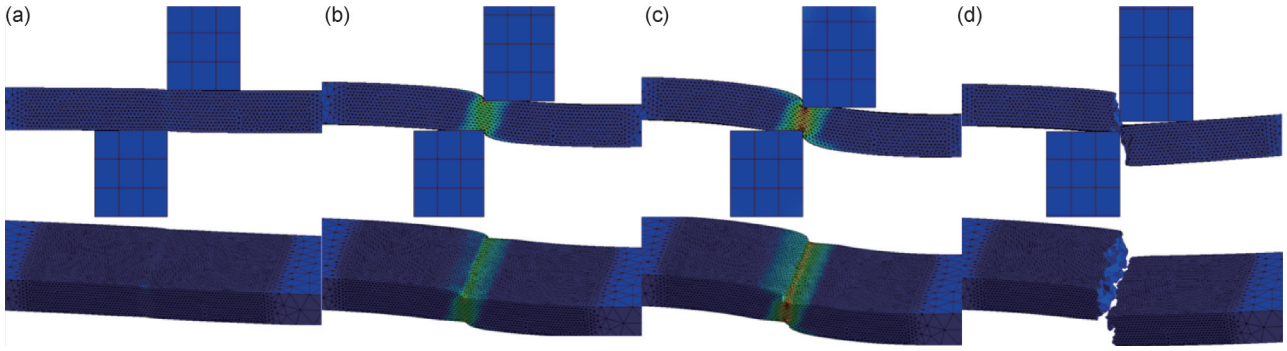


图11　剪切过程仿真图

(a)t=0.063 s;(b)t=0.279 s;(c)t=0.423 s;(d)t=0.675 s

Fig.11　Simulation diagram of the shearing process

(a)t =0.063 s;(b)t =0.279 s;(c)t =0.423 s;(d)t =0.675 s

3　结论

(1)弹性模量、屈服强度、切线模量、拉伸强度和剪切强度均随加载速度的增加呈非线性增长,有显著的应变率效应。

(2)弹性模量、拉伸强度、泊松比、静摩擦因数是影响海带力学模型的关键参数。其中泊松比为0.358、静摩擦因数为0.361时,5、25、50、100 mm/min加载速度下的弹性模量分别为4.691、5.832、6.899、6.944 MPa,拉伸强度分别为1.343、1.747、1.781、1.811 MPa,其余参数选取实验均值,仿真最大误差为1.829%。

(3)本工作采用弹塑性本构结合主应力失效拟合速度的方法构建了新鲜海带力学模型,研究表明其剪切失效模式从局部渐进撕裂转向整体断裂,验证性实验与仿真对比,最大误差为8.248%。

(4)在极高应变率($10^5 s^{-1}$)时,海带拉伸强度为2.445 MPa,剪切强度为0.693 MPa。

参考文献

[1] 刘福利,梁洲瑞,张朋艳,等.中国海带养殖向离岸深水区发展的初步探讨[J].渔业科学进展,2019,40(1):161-166.
LIU F L,LIANG Z R,ZHANG P Y,et al.Preliminary discussion on the development of saccharina Japonica offshore aquaculture in China[J].Progress in Fishery Sciences,2019,40(1):161-166.

[2] 农业农村部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴-2024[M].北京:中国农业出版社,2024.
Bureau of Fisheries and Fishery Administration,Ministry of Agriculture and Rural Affairs.China fishery statistical yearbook[M].Beijing:China Agriculture Press,2024.

[3] 王斌.创新与融合:20世纪50年代中国海带养殖技术体系的建立[J].古今农业,2024(2):1-16.
WANG B.Innovation and integration:the establishment of China's kelp cultivation technique system in the 1950s[J].Ancient and Modern Agriculture,2024(2):1-16.

[4] 李颖,王茵,陈婷茹,等.海带高值化综合利用研究进展[J].渔业研究,2023,45(2):192-201.
LI Y,WANG Y,CHEN T R,et al.Research progress of high-value comprehensive utilization of Laminaria Japonica[J].Journal of Fisheries Research,2023,45(2):192-201.

[5] VETTORI D,NIKORA V.Flow-seaweed interactions of Saccharina latissima at a blade scale:turbulence,drag force,and blade dynamics[J].Aquatic Sciences,2019,81(4):61.

[6] VETTORI D,NIKORA V.Hydrodynamic performance of vegetation surrogates in hydraulic studies:a comparative analysis of seaweed blades and their physical models[J].Journal of Hydraulic Research,2020,58(2):248-261.

[7] NEUFELDT H,WINDT C,BUCK B H,et al.Physical and numerical modeling of seaweed in oceanic waters[J].Aquacultural Engineering,2025,110:102528.

[8] LIU J X,WEI X X,QIN P,et al.CFD simulation and experimental validation of novel cutting device for underwater propeller entanglements[J].Ocean Engineering,2024,309:118400.

[9] IRGENS K E. Experimental assessment of entanglement for an unmanned underwater vehicle with an open,three-bladed propeller[D]. Monterey, CA:Naval Postgraduate School,2020.

[10] ANUAT G V,KLAMO J T,POLLMAN A G.Effects of body geometry and propulsion type on unmanned underwater vehicle interactions with marine vegetation[J].Journal of Autonomous Vehicles and Systems,2022,2(2):021002.

[11] WANG X,WANG Y N,LI Z Z,et al.Research on the three-body kelp harvesting ship based on floating raft aquaculture mode[J].Aquacultural Engineering,2025,110:102545.

[12] JIANG T,HONG Y,LU L F,et al.Design and experiment of a new mode of mechanized harvesting of raft cultured kelp[J].Aquacultural Engineering,2022,99:102289.

[13] 刘和炜,韩冰.仿生型海带采收装置的研究[J].渔业研究,2020,42(5):445-452.
LIU H W,HAN B.Research on bionic kelp harvesting device[J].Journal of Fisheries Research,2020,42(5):445-452.

[14] 刘和炜,卢龙飞,江涛.海带采收模块及其支持船的设计与分析[J].渔业研究,2023,45(3):263-270.
LIU H W,LU L F,JIANG T.Design and analysis of kelp har-

vesting module and its supporting ship[J].Journal of Fisheries Research,2023,45(3):263-270.

[15] TAN Y M,LOU S Y,CHEN Z X.Research on integrated specialized ship for kelp harvesting,classifying and grading[J].Aquacultural Engineering,2020,91:102121.

[16] SURAKSHITHA,RAO M N,RAO S.Hydrodynamic performance of floating kelp farms:wave attenuation and coastal protection potential[J].Ocean Engineering,2025,340:122324.

[17] LIAN Y S,MA J T,LI D A,et al.Experimental investigation on wave attenuation capacity of kelp farms[J].Ocean Engineering,2025,337:121906.

[18] LI C,ZHANG H J,ZHANG H,et al.Wave-attenuation and hydrodynamic properties of twin pontoon floating breakwater with kelp[J].Applied Ocean Research,2022,124:103213.

[19] 梁林.有限元分析技术在农业机械设计中的应用[J].农业工程与装备,2023,50(5):56-57.
LIANG L.Application of finite element analysis technology in agricultural machinery design [J]. Agricultural Engineering and Equipment,2023,50(5):56-57.

[20] MULENGA T K,RANGAPPA S M,SIENGCHIN S.Impact behavior of natural fiber composites:a comprehensive review on theoretical and computational modeling[J].Next Materials,2025,8:100849.

[21] HUANG S Z,ZHANG T,WANG Z B,et al.Asymmetrical cutting-edge design of broaching tool based on FEM simulation[J].Journal of Materials Research and Technology,2023,25:68-82.

[22] 顿国强,杨永振,李海山,等.基于ANSYS/LS-DYNA的大豆锯齿回转切割器作业参数优化[J].河南农业大学学报,2019,53(5):739-744.
DUN G Q,YANG Y Z,LI H S,et al.Working parameters optimization of soybean serration rotary cutter by ANSYS/LS-DYNA [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(5):739-744.

[23] 刘嘉明,赵健,张建忠,等.油用牡丹茎秆切割本构方程及其参数测定[J].北京林业大学学报,2020,42(11):138-144.
LIU J M,ZHAO J,ZHANG J Z,et al.Cutting constitutive equation and its parameter measurement of oil tree peony stem [J]. Journal of Beijing Forestry University,2020,42(11):138-144.

[24] 邱星瀚,宋通,张赛,等.基于MAT_58模型的碳纤维增强复合材料仿真参数捕捉与验证[J].复合材料科学与工程,2025(3):54-62.
QIU X H,SONG T,ZHANG S,et al.Parameters calibration and validation of carbon fiber reinforced composite based on *MAT_58 model [J]. Composites Science and Engineering, 2025(3):54-62.

[25] 刘志兴,郁志宏,苏强,等.基于LS-DYNA的柠条茎杆有限元剪切模型构建[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2025,46(6):61-67.
LIU Z X,YU Z H,SU Q,et al.Construction of finite element shear model of caragana korshinskii kom.stem based on LS-DYNA [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2025,46(6):61-67.

[26] 倪尚.滩涂紫菜采收及输送关键技术与设备优化研究[D].大连:大连海洋大学,2023.

NI S.Study on key technologies and equipment optimization of seaweed harvesting and transportation in tidal flat[D].Dalian:Dalian Ocean University,2023.

[27] 黄伟荣.裙带菜茎叶分离设备研发[D].大连:大连海洋大学,2023.
HUANG W R.Research and development of undaria pinnatifida stem-leaf separation equipment[D].Dalian:Dalian Ocean University,2023.

[28] 陈天池.海带力学特性研究与海带打结机构设计[D].南京:东南大学,2018.
CHEN T C.Study on mechanical properties of kelp and design of mechanisms for knotting kelp[D].Nanjing:Southeast University,2018.

[29] LUBSCH A,TIMMERMANS K.Texture analysis of Laminaria digitata (Phaeophyceae) thallus reveals trade-off between tissue tensile strength and toughness along lamina[J].Botanica Marina,2017,60(2): 229-237.

[30] DOBKOWSKI K A,CROFTS S B.Scaling and structural properties of juvenile bull kelp (*Nereocystis luetkeana*)[J]. Integrative Organismal Biology,2021,3:obab022.

[31] 潘鑫龙,张明君,王波,等.惰性碳源对两步反应烧结碳化硅陶瓷组织和性能的影响[J].功能材料,2025,56(1):1179-1183.
PAN X L,ZHANG M J,WANG B,et al.Influence of the inert carbon source on the microstructure and properties of two-step reaction-sintered silicon carbide ceramics [J]. Journal of Functional Materials,2025,56(1):1179-1183.

[32] PEREIRA JUNIO R F,DE MENDONÇA NEUBA L,PEREIRA A C,et al.Carnauba leaf fibers:correlation among diametrical variation,physical and mechanical properties[J].Journal of Materials Research and Technology,2023,22:1888-1899.

[33] 葛云燕,王健.视频引伸计[J].工程与试验,2015,55(增刊3):24-26.
GE Y Y,WANG J.Video extensometer [J]. Engineering and Test,2015,55(Suppl 3):24-26.

[34] 房永强,余泽利,杨军红,等.视频引伸计标定装置设计及标定方法研究[J].计量学报,2022,43(8):1070-1076.
FANG Y Q,YU Z L,YANG J H,et al.Research on calibration device design and calibration method of video extensometer[J].Acta Metrologica Sinica,2022,43(8):1070-1076.

[35] LEI Y B,XIE S L,SUN Y T,et al.Simultaneously enhanced strength and ductility in a hybrid nanostructured metal[J].Materials Science and Engineering:A,2025,927:147959.

[36] 杨洋,陈新文,孙炜,等.基于数字图像相关方法的CFRP层合板高温压缩性能实验研究[J].材料工程,2021,49(11):62-72.
YANG Y,CHEN X W,SUN W,et al.Experimental study on compressive properties of CFRP laminates at high temperatures *via* digital image correlation[J].Journal of Materials Engineering,2021,49(11):62-72.

[37] KUMAR K,POOLEERY A,MADHUSOODANAN K,et al.Optimisation of thickness of miniature tensile specimens for evaluation of mechanical properties[J].Materials Science and Engineering:A,2016,675:32-43.

[38] 郭辉,郭烈红,李海峰,等.适收期油菜茎秆离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2024,40(24):20-29.

GUO H, GUO L H, LI H F, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters for rapeseed stems during the suitable harvest period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(24): 20-29.

[39] MOHSENIN N N. Physical Properties of Plant and Animal Materials[M]. New York: Gordon and Breach, 197.

[40] 方媛. 苹果的应力松弛和蠕变特性与其品质相关性分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
FANG Y. Correlation analysis between the stress-relaxation or creep properties and quality attributes of apple[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.

[41] 马帅, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 葡萄果实碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 180-186.
MA S, XU L M, XING J J, et al. Study on collision damage experiment of grape and finite element analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(11): 180-186.

[42] 亢石磊. 钙果梳刷采摘力学特性及数值模拟研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2024.
KANG S L. Study on mechanical characteristics and numerical simulation of cerasus humilis picking with comb[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2024.

[43] 袁亚豪. 冲击载荷下玉米籽粒损伤特性和破碎规律研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
YUAN Y H. Study on damage characteristics and crushing law of maize seeds under impact load[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.

[44] IRUDAYARAJ J M K. Finite element simulation of viscoelastic biomaterial behavior during drying[D]. West Lafayette, IN: Purdue University, 1990.

[45] KHODABAKHSHIAN R, EMADI B. Development of a finite element method model to determine mechanical behavior of pumpkin seed[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(2): 231-240.

[46] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
LI Y X, LI F X, XU X M, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 320-327.

[47] 辛春亮. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
XIN C L. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2400800); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-50); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD86)

收稿日期: 2025-09-01; **录用日期**: 2025-10-15

通讯作者: 洪扬(1991—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事渔业设施与装备研究, 联系地址: 上海市杨浦区赤峰路63号中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所(200092), E-mail: hongyang@fmiri.ac.cn; 陈军(1967—), 男, 研究员, 主要从事渔业设施与装备研究, 联系地址: 上海市杨浦区赤峰路63号中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所(200092), E-mail: chenjun@fmiri.ac.cn

(本文责编: 解 宏)