doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.017

绳索离散元模型构建方法与拉伸和弯曲过程力学分析

朱新华　李炳辉　祝正阳　徐子格　谢　意　梅方炜
(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于有限元(FEM)构建的绳索模型结构复杂,主要用于绳索结构力学分析,其准确性受绳索结构影响大,导致模型适应性不好。基于离散元(DEM)构建结构简单、适应性强的绳索模型仍是一个难题。提出了一种基于 DEM 的绳索建模及参数标定方法。构建的绳索模型为圆柱形,内部包含不同尺寸的三角壳体元件及其关节。三角壳体元件之间的力与弯矩分别以线弹性模型和双线性模型连接。通过拉伸和三点弯曲试验,分别以抗拉强度、弹性模量为响应值对绳索模型的离散元参数进行了标定。通过抗拉强度和弹性模量回归方程求解确定了绳索模型离散元参数最优组合。验证试验结果表明,绳索模型抗拉强度误差、弹性模量误差分别为 2.32%、1.74%。拉伸、弯曲曲线平均误差分别为 6.65%、7.35%。力学分析表明,DEM 模型可用于分析绳索受力过程中的局部力学响应。构建的 DEM 基绳索模型为单股结构,与 FEM 基绳索模型相比,结构简单,具有普适性。

关键词: 绳索力学特性; 离散元法; 三角壳体元件; 仿真模型
中图分类号: TP391.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0190-10　　**OSID**:

Discrete Element Modeling Method of Rope and Mechanical Analysis of Tensile and Bending Processes

ZHU Xinhua　LI Binghui　ZHU Zhengyang　XU Zige　XIE Yi　MEI Fangwei
(*College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The rope model constructed based on the finite element method (FEM) has a complex structure and is mainly used for the mechanical analysis of rope structure, and its accuracy is greatly affected by the rope's structure, resulting in poor model adaptability. The construction of structurally simple and adaptable rope models based on the discrete element method (DEM) is still a challenge. A rope modeling and parameter calibration method based on the DEM was proposed. The constructed rope model was cylindrical and contained triangular shell elements with different sizes and their joints. The forces and moments between the triangular shell elements were connected by a linear elastic model and a bilinear model, respectively. The DEM parameters of the rope model were calibrated by tensile and three-point bending tests with tensile strength and elastic modulus as response values, respectively. The optimal combination of the DEM parameters of the rope model was determined by solving the tensile strength and elastic modulus regression equations. The results of the validation tests showed that the tensile strength error and elastic modulus error of the rope model were 2.32% and 1.74%, respectively. The average errors of tensile and bending curves were 6.65% and 7.35%, respectively. Mechanical analyses showed that the DEM model can be used to analyze the local mechanical response of the rope during force application. The DEM-based rope model constructed was a single-strand structure. Compared with the FEM-based rope model, the structure was simple and universal.

Key words: rope mechanical properties; discrete element method; triangular shell element; simulation model

0　引言

绳索是一种细长柔性体,具有独特的机械性能。绳索通常承受较大的拉伸、弯曲载荷,其力学性能往往关系到设备安全和准确性。在农业装备领域,秸秆捡拾打捆机、谷物割捆机、饲草破捆投喂机、生物

收稿日期: 2025-04-12　修回日期: 2025-05-16
基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2025NC-YBXM-220、2023-ZDLSF-62)
作者简介: 朱新华(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备设计与理论研究,E-mail: zxh920@nwsuaf.edu.cn

质发电厂用的秸秆破捆装置等设备研制中，捆绳与机械部件之间的作用机制分析有助于指导机械部件设计。然而，以传统的物理试验方法研究绳索的力学特性具有明显的局限性，难以揭示内部变形和断裂失效机制。因此，探索绳索数值模拟方法具有重要意义。

近年来，许多学者通过物理试验或有限元法（Finite element method，FEM）[1-2]对绳索的力学性能进行研究[3-12]。可见，利用 FEM 可以有效模拟绳索静态或动态力学特性，这是目前绳索力学性能仿真的主要方法[13]。然而，绳索以柔性纤维或金属丝组成，具有明显的力学取向。绳索内部包含有向的增强纤维[14]，在绳索轴向（拉伸）和法向（弯曲）会有不同的力学响应特性。这与 FEM 以材料的各向同性假设的前提相矛盾。为了克服该问题，FEM 绳索模型构建对绳索结构一致性依赖较高[15-16]。而实际的绳索包含多股、多芯，且捻制或编织结构种类繁多。这导致绳索有限元模型结构极为复杂，模型的普适性差。相应地，FEM 基绳索模型构建方法复杂、适应性不强。因此，基于 FEM 模拟绳索力学特性具有明显的局限性。FEM 基绳索模型的研究较多，但一般仅适于钢丝绳等的仿真，侧重于绳索的结构力学分析。然而，对于一些普通绳索，如农用捆绳，其仿真通常不以结构力学分析为重点。这类绳索的仿真模型构建方法鲜有报道。

离散元法（Discrete element method，DEM）是一种基于不连续性假设的数值模拟方法[17]。通过元件键合构建细长柔性体的离散元模型越来越受到重视[18]。文献[19-27]表明基于 DEM 法模拟绳索力学特性具有可行性。然而，迄今为止，鲜见对绳索力学特性的离散元模拟方法报道。

DEM 基绳索模型应满足两个要求：构建的绳索离散元模型能够准确模拟绳索力学特性；构建的绳索离散元模型结构简单，普适性好。因此，基于 DEM 构建结构简单、适应性强的绳索模型仍是一个巨大的挑战。

本文提出一种基于 DEM 的绳索模型构建及其参数标定方法；探究绳索模型拉伸、弯曲过程中的力学特性。基于 Rocky DEM 的三角壳体元件构建聚丙烯绳索离散元仿真模型，并分析绳索与夹具接触区的力学响应。

1　材料与方法

1.1　柔性纤维绳机械性能试验

1.1.1　测试材料准备

试验材料为聚丙烯三绞绳，直径 2.30 mm。拉伸试验试样长为 220 mm，其中两端夹具夹持段长为 60 mm，中间拉伸段为 100 mm。三点弯曲试验试样长 100 mm。绳索试件两端 10 mm 长被热熔合。

1.1.2　绳索抗拉性能试验

拉伸试验使用的设备为 DDL10 型电子万能试验机（长春机械科学研究院有限公司），载荷精度为 ±0.5%。使用横双孔锁绳器作为拉伸试验的固定夹具。锁绳器主体为正六边形棱柱，两个通孔直径为 5 mm，孔距 10 mm。试验时将绳索试样的夹持段穿过 2 孔形成半环，并通过孔侧螺柱锁紧。将绳索试样的夹持段半环穿过直径为 10 mm 的销轴与试验机的夹头固定。拉伸速度设置为 50 mm/min。每个拉伸试验重复 10 次，结果取平均值。

1.1.3　绳索弯曲性能试验

三点弯曲试验使用 DDL10 型电子万能试验机。将长 100 mm 的绳索试件横向居中放置在跨距为 60 mm 的支架上。通过万能试验机的圆柱压头（直径 10 mm）在绳索试样长度中点施加载荷。加载速度为 10 mm/min。每个弯曲试验重复 10 次，结果取平均值。

1.2　绳索离散元建模方法

本研究构建绳索离散元模型的关键是准确模拟绳索的拉伸和弯曲特性，反映绳索轴向和法向力学响应。此外，充分考虑绳索模型的离散元元件数量，以提高计算效率。因此，本研究使用商用离散元软件 Rocky DEM（ESSS，2021R2）建立绳索的离散元模型，并进行柔性塑料绳拉伸、三点弯曲仿真。

1.2.1　三角壳体元件模型

对比多种非球型元件，认为三角壳体元件对于模拟片状或细长状柔性物料具有突出优势[28-30]。因此本研究采用三角壳体元件相互连接来模拟绳索。三角壳体元件是具有一定厚度的三角形薄片，其边缘为球柱体（图 1）。壳体元件的相邻边之间相互键合可形成复杂几何体模型。两个三角壳体元件的邻边相互键合形成虚拟关节。壳体元件与元件之间的法向接触力由 Hertzian spring-dashpot 模型决定，切向接触力由 Mindlin－Deresiewicz 模型决定。当元件受力时，在关节上发生线性变形（法向和切向）或角变形（弯曲和扭转）。

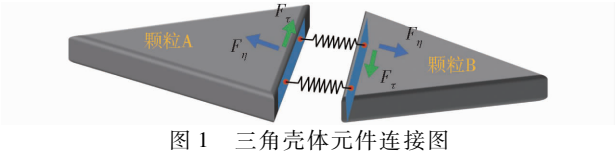


图 1　三角壳体元件连接图

Fig. 1　Triangular shell element connection diagram

元件之间的实体 bonding 键限制了空间变形。三角壳体元件通过关节变形可以产生多种空间角变

形,在模拟细长柔性材料的变形上具有显著优势。这是选择三角壳体元件的重要原因之一。

三角壳体元件之间的关节有 3 种变形(图 2),对应 3 个力矩分量。关节受到的法向、切向力用线弹性模型表示,公式分别为

$$F_\eta = K_\eta^j d_\eta^{rel} + C_\eta^j v_\eta^{rel} \tag{1}$$

$$F_\tau = K_\tau^j d_\tau^{rel} + C_\tau^j v_\tau^{rel} \tag{2}$$

式中 K_η^j——关节法向刚度

K_τ^j——关节切向刚度

d_η^{rel}——关节中心点法向相对位移

d_τ^{rel}——关节中心点切向相对位移

C_η^j——关节法向阻尼系数

C_τ^j——关节切向阻尼系数

v_η^{rel}——关节中心点法向相对运动速度

v_τ^{rel}——关节中心点切向相对运动速度

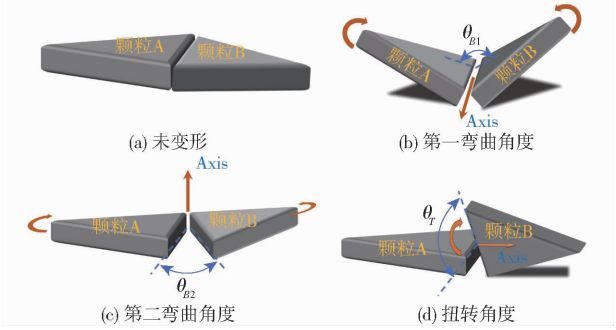


图 2 三角壳体元件关节变形示意图

Fig. 2 Joint deformation of triangular shell elements

关节中受到的弯曲力矩 M 用双线性模型来表示,公式为

$$M = \begin{cases} K_e^j\theta + C^j\omega^{rel} & (\theta \leqslant \theta_e) \\ K_{ep}^j(\theta - \theta_e) + K_e^j\theta + C^j\omega^{rel} & (\theta > \theta_e) \end{cases} \tag{3}$$

式中 K_e^j——关节弹性刚度

K_{ep}^j——关节弹塑性刚度

θ——关节弯曲角度

θ_e——弹性阶段与弹塑性阶段临界角度

C^j——关节阻尼系数

ω^{rel}——关节相对角速度

1.2.2 绳索离散元模型构建方法

在 Rocky DEM 中利用三角壳体元件建立绳索离散元模型,步骤如下:

(1)绳索投影平面图导入:如图 3 中步骤(1)所示,将绳索试样(长 100 mm,直径 2.5 mm)在平行于绳轴线的平面中投影,得到一个投影面。利用软件绘制投影平面,并将此平面导入 Rocky DEM 中。本研究中的投影为矩形,采用 Solidworks 软件绘制一个矩形平面。如果是变径绳索试样,则应根据投影绘制平面。

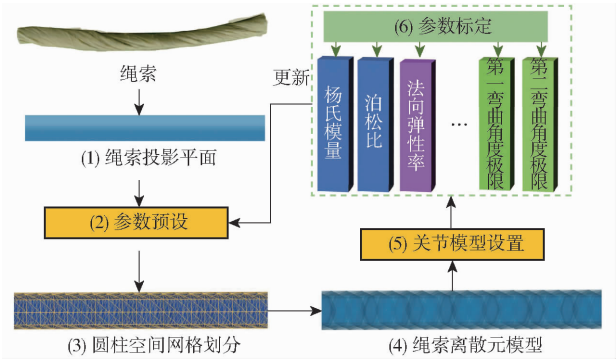


图 3 绳索离散元模型构建过程图

Fig. 3 Diagram of process of constructing discrete element model of rope

(2)绳索模型参数预设:如图 3 中步骤(2)所示,在 Rocky DEM 中,预设绳索模型参数值(密度为 733 kg/m^3、泊松比为 0.335,其余参数取表 1 中参数的中间水平)。

表 1 抗拉强度 PBD 试验因素编码

Tab. 1 Tensile strength PBD test factors and codes

参数	编码		
	-1	0	1
杨氏模量/Pa	1.0×10^9	1.3×10^9	1.6×10^9
泊松比	0.2	0.3	0.4
法向弹性率	0.6	0.8	1.0
切向弹性率	0.4	0.7	1.0
弯曲弹性率	0.30	0.55	0.80
扭转弹性率	0.4	0.7	1.0
塑性率	0.1	0.55	1.0
扭转角度极限/(°)	10	90	170
第一弯曲角度极限/(°)	10	90	170
第二弯曲角度极限/(°)	10	90	170

(3)绳索圆柱空间生成与网格划分:Rocky DEM 软件根据导入的矩形平面生成一个圆柱空间(由绳索长度和长径比定义该空间)。如图 3 中步骤(3)所示,根据设置的三角壳体元件数,Rocky DEM 对圆柱空间进行网格划分。设置绳索模型元件数为 300 个。

(4)元件厚度设置与空间元件填充:对三角壳体元件设置厚度。如图 3 中步骤(4)所示,Rocky DEM 依据网格划分计算三角壳体元件其余尺寸,并完成对圆柱空间的元件填充。三角壳体元件厚度设置为 2.5 mm。

(5)元件关节模型设置:元件填充到空间后,连接两个元件的关节同步生成。如图 3 中步骤(5)所示,分别设置元件之间的法向接触模型和切向接触模型为线弹性模型和双线性模型。

(6)绳索模型参数标定与更新:如图 3 中步骤(6)所示,对绳索模型 DEM 参数进行标定,确定各

个参数最优值。根据标定结果，在 Rocky DEM 中对显著性参数的预设值更新，最终生成绳索 DEM 模型。

离散元仿真中，几何体（拉伸夹具和弯曲支撑）与钢材参数相同。时间步长为 1.443×10^{-7} s，数据存储时间间隔为 0.001 s。仿真在戴尔台式计算机（16 GB 内存，4 核 7th Gen Intel Core i5 - 7500H CPU，NVIDIA GTX 1050 Ti 显卡）上运行。

1.3　绳索离散元参数标定方法

拉伸和弯曲特性是绳索的重要特性。在模型参数标定中首先通过拉伸试验标定拉伸性能显著性参数，然后通过三点弯曲试验标定弯曲性能显著性参数。最后，通过物理试验验证模型及其参数的准确性。

1.3.1　绳索拉伸性能参数标定

（1）抗拉强度 Plackett - Burman 试验设计

使用 Design-Expert 13 进行 Plackett - Burman 试验设计，以抗拉强度作为响应值筛选显著性参数。

通过预仿真确定仿真参数取值范围。仿真参数取高、中、低 3 个水平，如表 1 所示。PBD 试验设置一个中心点进行误差分析。共进行 13 组试验，每组重复 5 次，结果取平均值。

（2）最陡爬坡试验设计

以抗拉强度误差为试验指标，对 PBD 试验中筛选出的显著参数设计爬坡试验，以进一步确定参数范围和爬升方向（正与负）。非显著参数取 PBD 试验的中间水平值。

（3）Box - Behnken 试验设计

根据最陡爬坡试验确定的显著性参数范围，设计 Box - Behnken Design（BBD）试验。显著性参数设为高、中、低 3 个水平，并分配代码为 -1、0、1，试验方案见表 2。非显著因素选取 PBD 试验的中心水平值。BBD 试验设置 3 个中心点进行误差估计，共进行 27 组试验。

表 2　抗拉强度 BBD 试验因素编码

Tab.2　Tensile strength BBD test factors and codes

参数	编码		
	-1	0	1
杨氏模量/Pa	1.15×10^{9}	1.30×10^{9}	1.45×10^{9}
泊松比	0.25	0.30	0.35
法向弹性率	0.7	0.8	0.9
切向弹性率	0.55	0.70	0.85

1.3.2　绳索弯曲性能参数标定

（1）弹性模量参数 PBD 试验设计

弯曲特性参数标定在已确定的拉伸性能显著性参数基础上进行，以避免相同参数的不统一性。在固定 4 个显著性拉伸性能参数的情况下，通过 PBD 试验从 6 个非显著性拉伸性能参数中筛选出对弹性模量具有显著性影响的参数。共进行 13 组试验（表 3）。每组重复 5 次，取结果平均值。

表 3　弹性模量 PBD 试验因素编码

Tab.3　Modulus of elasticity PBD test factors and codes

参数	编码		
	-1	0	1
弯曲弹性率	0.10	0.18	0.26
扭转弹性率	0.4	0.7	1.0
塑性率	0.1	0.5	0.9
扭转角度极限/(°)	10	90	170
第一弯曲角度极限/(°)	5	20	35
第二弯曲角度极限/(°)	10	90	170

（2）弯曲特性回归模型建立

根据弹性模量 PBD 试验筛选出来的显著性参数，优化试验结果，建立弹性模量与显著性参数的回归模型，求解寻优，得到显著性参数最优值。

1.4　绳索 DEM 模型建立和参数验证

以标定的显著性参数值和非显著性参数中间水平值对绳索模型开展仿真。以抗拉强度误差和弹性模量误差为指标对模型和参数进行验证。

以抗拉强度表示绳索的拉伸性能，计算式为

$$\sigma_t^{\max}=\frac{F_t^{\max}}{A\times10^{6}} \tag{4}$$

式中　$\sigma_t^{\max}$——绳索抗拉强度，MPa

$F_t^{\max}$——最大拉伸力，N

A——绳索横截面积，m^2

以弹性模量表示绳索的弯曲性能，计算式为

$$E_b=\frac{F_bL_s^3}{48SI} \tag{5}$$

式中　E_b——绳索弹性模量，MPa

F_b——圆柱压头所承受的压力，N

L_s——两个支架之间的距离，取 60 mm

S——挠度，mm

I——绳索试件截面惯性矩，mm^4

因为绳索截面近似为圆形，惯性矩计算式可表示为

$$I=\frac{\pi D^4}{64} \tag{6}$$

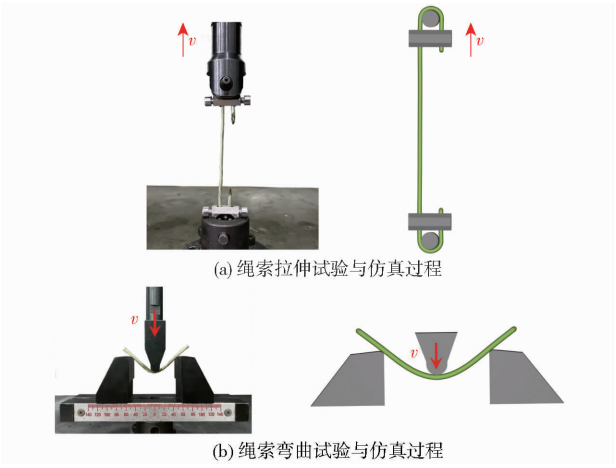
式中　D——绳索横截面直径，mm

绳索 DEM 模型和参数验证中，拉伸物理试验与仿真如图 4a 所示。三点弯曲物理试验与仿真如图 4b 所示。拉伸、弯曲物理试验和仿真均重复 5 次，结果取平均值。

2　结果与分析

2.1　绳索拉伸、弯曲物理试验结果

根据绳索拉伸物理试验数据，通过式（4）计算



(a) 绳索拉伸试验与仿真过程

(b) 绳索弯曲试验与仿真过程

图 4 绳索模型参数验证

Fig. 4 Validation of rope model parameters

得抗拉强度 $\sigma_t^{\max}$ 为 109.35 MPa。

根据绳索三点弯曲物理试验数据,通过式(5)计算得弹性模量 E_b,为 191.98 MPa。

2.2 绳索模型拉伸仿真与参数标定结果

2.2.1 显著性参数筛选及参数范围

(1)显著性参数筛选结果

抗拉强度 PBD 试验结果如表 4 所示,表中 $A \sim J$ 为表 1 中各仿真参数编码值。由方差分析可知,杨氏模量、泊松比、法向弹性率、切向弹性率对抗拉强度影响显著($P < 0.05$)。杨氏模量、法向弹性率和切向弹性率对抗拉强度有正影响,而泊松比对抗拉强度有负影响。其它参数对抗拉强度影响不显著。

表 4 抗拉强度 PBD 试验方案与结果

Tab. 4 Tensile strength PBD test scheme and results

试验序号	因素										抗拉强度 $\sigma_t^{\max}$/MPa
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	118.57
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	61.52
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	171.13
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	73.95
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	70.89
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	77.21
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	90.86
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	84.75
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	99.21
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	96.57
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	170.10
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	54.19
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104.91

(2)显著性参数范围确定

最陡爬坡试验结果如表 5 所示。其中,第 3 组相对误差最小,为 4.06%。因此,各显著性参数最优区间为:杨氏模量[1.15×10^9, 1.4×10^9] Pa、泊松比[0.25,0.35]、法向弹性率[0.7,0.9]、切向弹性率[0.55,0.85]。

表 5 最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 5 Scheme and results of steepest climbing test

试验序号	杨氏模量/Pa	泊松比	法向弹性率	切向弹性率	抗拉强度 $\sigma_t^{\max}$/MPa	相对误差 δ/%
1	1.00×10^9	0.40	0.60	0.40	53.38	51.19
2	1.15×10^9	0.35	0.70	0.55	74.36	32.00
3	1.30×10^9	0.30	0.80	0.70	104.91	4.06
4	1.45×10^9	0.25	0.90	0.85	134.05	22.58
5	1.60×10^9	0.20	1.00	1.00	171.33	56.67

2.2.2 抗拉强度回归方程及参数求解

表 6 为 BBD 试验结果。根据试验结果建立了抗拉强度 $\sigma_t^{\max}$ 与显著性参数之间的回归方程

$$\sigma_t^{\max} = 102.45 - 0.11A + 46.17B + 178.43C - 265.11D + 71.30BC + 699.45BD + 78.09CD - 879.41B^2 - 98.84D^2 \quad (7)$$

表 6 抗拉强度 BBD 试验方案与结果

Tab. 6 Tensile strength BBD test scheme and results

试验序号	因素				抗拉强度 $\sigma_t^{\max}$/MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	0	0	91.68
2	1	-1	0	0	117.34
3	-1	1	0	0	89.84
4	1	1	0	0	113.88
5	0	0	-1	-1	86.58
6	0	0	1	-1	98.60
7	0	0	-1	1	101.05
8	0	0	1	1	117.75
9	-1	0	0	-1	91.27
10	1	0	0	-1	104.92
11	-1	0	0	1	99.82
12	1	0	0	1	125.90
13	0	-1	-1	0	99.82
14	0	1	-1	0	94.32
15	0	-1	1	0	111.64
16	0	1	1	0	107.57
17	-1	0	-1	0	84.34
18	1	0	-1	0	106.75
19	-1	0	1	0	97.79
20	1	0	1	0	122.03
21	0	-1	0	-1	95.34
22	0	1	0	-1	90.66
23	0	-1	0	1	96.77
24	0	1	0	1	113.07
25	0	0	0	0	104.92
26	0	0	0	0	103.89
27	0	0	0	0	106.14

对表 6 结果进行方差分析,结果为:抗拉强度回归方程极显著,决定系数 R^2 为 0.953 3。其中,参数 A、C、D 影响极显著,BD 影响显著。

以绳索拉伸试验中抗拉强度 109.35 MPa 作为响应值,求解式(7)得到抗拉强度显著性参数最优组合为:杨氏模量 1.4×10^9 Pa、泊松比 0.335、法向

弹性率 0.854、切向弹性率 0.637。

2.3　绳索模型弯曲仿真与参数标定结果

2.3.1　弹性模量显著性参数筛选

PBD 试验方案及结果如表 7 所示。对 PBD 试验结果进行方差分析。弯曲弹性率对弹性模量 E_b 有显著的正影响($P<0.05$),其他参数对弹性模量 E_b 的影响不显著,在仿真中取中间水平。

表 7　弹性模量 PBD 试验方案与结果

Tab.7　Modulus of elasticity PBD test scheme and results

试验序号	因素						弹性模量
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	E_b/MPa
1	1	1	−1	1	1	1	273.50
2	−1	1	1	−1	1	1	133.22
3	1	−1	1	1	−1	1	236.45
4	−1	1	−1	1	1	−1	107.46
5	−1	−1	1	−1	1	1	128.98
6	−1	−1	−1	1	−1	1	58.58
7	1	−1	−1	−1	1	−1	239.09
8	1	1	−1	−1	−1	1	121.93
9	1	1	1	−1	−1	−1	262.91
10	−1	1	1	1	−1	−1	107.46
11	1	−1	1	1	1	−1	241.74
12	−1	−1	−1	−1	−1	−1	58.58
13	0	0	0	0	0	0	197.63

2.3.2　弹性模量回归方程及参数求解

仅弯曲弹性率对弹性模量影响显著,因此对其进行单因素仿真,结果见图 5。随着弯曲弹性率增大,弹性模量 E_b 逐渐增大。

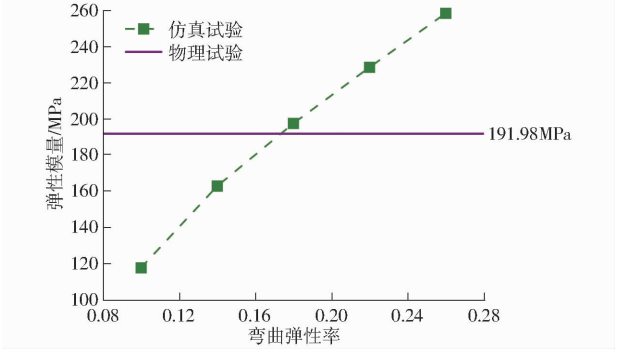


图 5　单因素试验结果

Fig.5　Results of one-factor test

建立弹性模量 E_b 与弯曲弹性率参数之间的关系方程为

$$E_b = -453.445e^{\frac{-A'}{0.275}} + 433.835 \qquad (8)$$

式中　A'——弯曲弹性率

以三点弯曲物理试验的弹性模量 191.98 MPa 为响应值求解式(8),得到弯曲弹性率为 0.173。

2.4　绳索模型拉伸、弯曲特性验证结果

在标定的显著性参数和非显著性参数中间水平下开展拉伸和三点弯曲仿真。

绳索拉伸试验与仿真结果如图 6a 所示。绳索拉伸过程总体上以线弹性变化为主,塑性变形不明显。仿真模型与拉伸试验的应力-应变曲线一致,曲线平均误差为 6.65%。抗拉强度仿真值误差为 2.32%。因此,构建的绳索模型及其标定的参数能准确地反映绳索的拉伸性能。

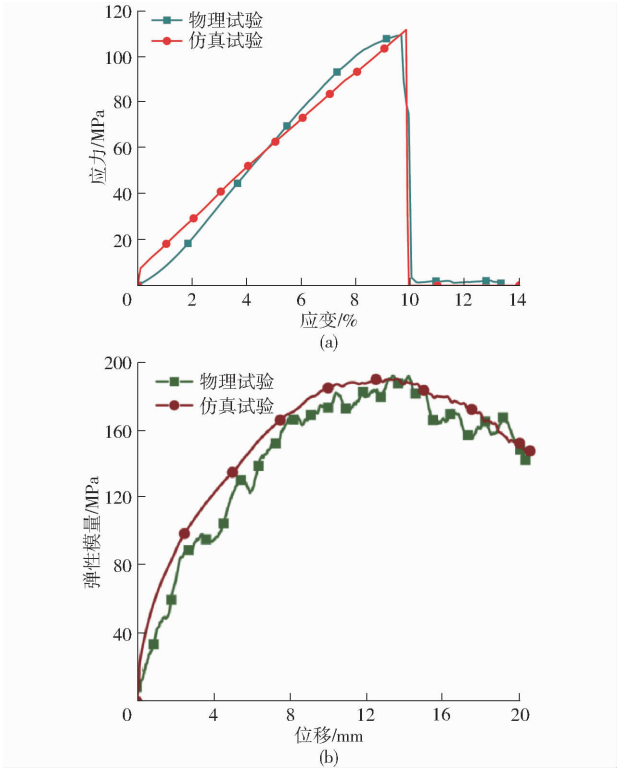


图 6　绳索模型的仿真与试验结果比较

Fig.6　Comparison of simulation and experimental results of rope model

绳索三点弯曲试验与仿真结果如图 6b 所示。弯曲仿真与试验的弹性模量-位移曲线一致,曲线平均误差为 7.35%。弹性模量仿真值(188.64 MPa)误差为 1.74%。表明构建的绳索模型准确地反映了弯曲性能。

2.5　绳索模型拉伸、弯曲过程力学分析

绳索 DEM 模型可用于分析绳索在拉伸、弯曲过程中的力学特性,包括绳索受力、绳索与夹具接触区的力学特性。

2.5.1　绳索模型拉伸过程力学分析

拉伸过程中,绳索模型受力、绳索-夹具之间的局部受力变化如图 7 所示。图 7 中 A、B 分别表示正六边形棱柱形双孔锁绳器的其中一个孔的上部、下部分别与绳索的接触区。在锁绳器中,接触区 A、B 均包含几个与绳索接触的三角网格(图 7)。图 7 中的接触区 A、B 的应力为与绳索接触的几个三角网格法向应力的平均值。

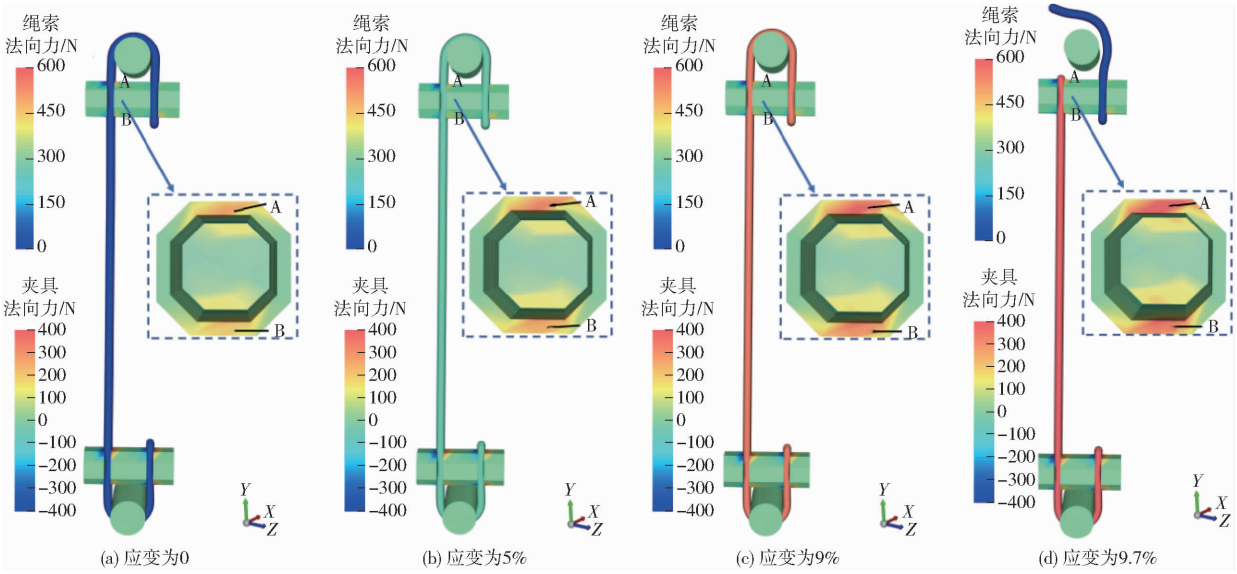


图 7 绳索模型拉伸过程受力分析

Fig. 7 Analysis of forces during stretching of rope model

图 7 为绳索模型在不同应变时的受力变化。可以看到两方面的变化。其一是,绳索模型应力随应变增大逐渐增大,由应变为 0 时的蓝色(图 7a)逐渐变化为应变 9.7% 时的红色(图 7d)。图 7d 中,绳索断裂为2 段,其中非拉伸段应力云图恢复为初始的蓝色。

其二是,在接触区 A 和 B,绳索与锁绳器的接触应力随着拉伸应变的增大而逐渐增大,且接触区 A 的接触应力始终大于接触区 B。图 8 给出了接触区 A、B 的接触应力随着拉伸应变的变化规律。绳索断裂时,接触区 A、B 的接触应力分别达到峰值 679 MPa 和 403 MPa。说明绳索在接触区 A 存在应力集中,导致了断裂。

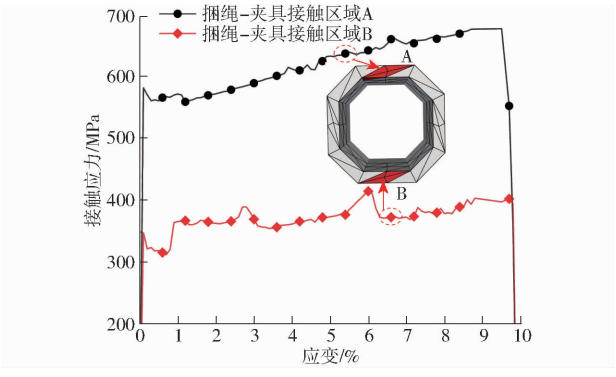


图 8 拉伸过程中应变对接触区 A 和 B 接触应力的影响

Fig. 8 Effect of strain on contact stresses in contact areas A and B during tensile stretching

2.5.2 绳索模型弯曲过程力学行为

绳索模型三点弯曲过程中的力学行为分析如图 9 所示。图 9 中绳索与压头、绳索与支撑之间的接触分别用接触区 C 和 D 表示。图 9a ~ 9d 中的接触应力为接触区部件(压头或支撑)与绳索间的法向力,用彩色箭头表示;绳索内部法向力用颜色表示。图 9e 表示接触区 C 和 D 的接触应力随挠度变化情况。

绳索自身的弯曲力变化:图 9a ~ 9d 中,绳索自身的弯曲力先逐渐增大(蓝色-棕色-红色),然后减小(变为棕色)。

接触区 C 和 D 的接触力和接触应力变化:图 9a ~ 9d 中,随着挠度增大,接触区 C 的接触力先逐渐增大(箭头长度和颜色变化),然后逐渐减小。而接触区 D 的接触力在挠度达到 15 mm 后才迅速增大。图 9e 给出了这一过程中接触区 C 和 D 的接触应力的连续变化。随着挠度增大,接触区 C 的接触应力先逐渐增大,然后逐渐减小。而接触区 D 的接触应力在挠度达到 15 mm 后才迅速增大。

3 讨论

基于有限元法的绳索模型极为复杂,且适应性差。迄今为止,基于离散元法的绳索模型模拟方法尚未见报道。本文提出了一种基于离散元的绳索模型构建方法,可反映真实绳的拉伸和弯曲特性,并可用于分析绳索拉伸、弯曲的力学特性。本研究构建的模型适用于大多数普通绳索仿真,尤其适于不以结构力学分析为重点的场合。

本研究构建的绳索模型具有较高的准确性,提出的绳索模型构建方法用途广泛。绳索模型抗拉强度误差、弹性模量误差分别为 2.32% 和 1.74%。拉伸、弯曲曲线平均误差分别为 6.65% 和 7.35%。结果表明,基于离散元法构建的模型可准确模拟绳索的拉伸、弯曲、断裂特性。从 2.5 节的绳索拉伸、弯曲力学分析可以看出,绳索 DEM 模型不仅可反映绳

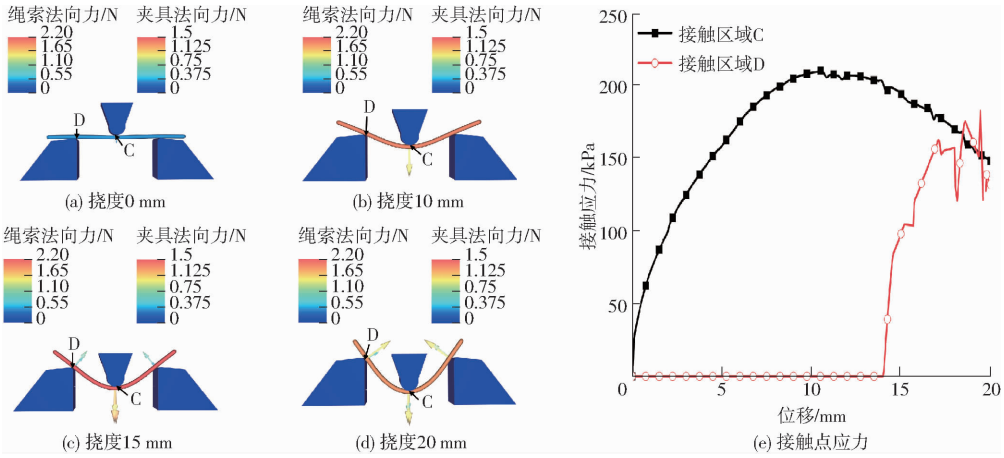


图 9　绳索模型三点弯曲过程受力分析

Fig. 9　Force analysis of three-point bending process of rope model

索在拉伸、弯曲过程中的绳索自身的受力，还可反映绳索与夹具接触区在不同阶段受力变化。这些力学分析可用于揭示绳索在拉伸、弯曲过程中断裂、磨损机理，也有助于分析绳索与机械部件之间的互作机理，如打捆、绳索切割等。此外，本研究提出的基于离散元法的绳索建模方法也可用于其它细长柔性体的力学仿真，例如，可穿戴设备的柔性储能电极，柔性传感器、柔性纤维组件以及以柔性树脂为材料的人造血管等。

与 FEM 基绳索模型相比，构建的 DEM 基绳索模型结构很简单，具有普适性。同时，DEM 基绳索模型构建方法也很简单。这是 DEM 基绳索模型最重要的优势。绳索模型由不同尺寸的三角壳体元件及其关节组成，外形为圆柱形。三角壳体元件之间的法向接触模型和切向接触模型分别为线弹性模型和双线性模型，使得绳索内部力学各向异性。这种结构决定了 DEM 基绳索模型可被用于模拟拉伸、弯曲、断裂特性，也有助于分析绳索与机械部件之间的力-形变响应。在有限元仿真中，由于材料各向同性的假设，绳索模型的结构对其力学特性具有重要影响。因而，FEM 基绳索模型的准确性依赖于结构一致性，使得模型结构极为复杂。常见的 FEM 基绳索模型一般由多股构成，每股含有多芯。更为复杂的是，实际绳索具有多种捻制或编织结构，导致其在受到拉伸、扭转、剪切、弯曲等多种作用时可能产生接触摩擦和塑性变形，并在局部产生复杂的非线性变形。绳索的复杂结构和力学特性导致其有限元几何模型和力学模型极其复杂，且普适性差。然而，在 DEM 基绳索模型中，无论哪种结构、材料的绳索，多数情况下，模型构建可不必考虑绳索内部的复杂结构。这是由于，DEM 基绳索模型中的元件及其关节具有力学各向异性。虽然 DEM 基绳索的模型外形简单，但其内部包含众多三角壳体元件和关节，具有复杂的组织结构。同时，DEM 基绳索模型参数具有强大的校准和适应能力，因而，外形简单的 DEM 基绳索模型可准确模拟各种结构绳索的力-形变响应，具有普适性。

提出的 DEM 基绳索模型方法也存在不足。比较绳索拉伸试验和仿真结果可以发现，在绳索断裂阶段，拉伸应力试验曲线与仿真曲线存在一定的差异（图 6a）。拉伸应力试验曲线中，拉伸力由线性增大逐渐过渡为非线性增大，到达最大值时绳索断裂。而在仿真曲线中，拉伸力全程为线性增加，直至绳索断裂。这可能是由于，真实绳为 3 股螺旋结构，在拉伸时，各股绳之间的螺旋结构变形以及非同时断裂导致了拉伸力为非线性增长。本研究中建立的 DEM 基绳索模型为单股圆柱结构，断裂过程中，绳索表现为线弹性变形。对于仿真精度要求高的研究，构建绳索离散元模型时，可考虑采用有限元基绳索模型的多股结构。

4　结论

（1）基于 DEM 的三角壳体元件，提出了 DEM 基绳索建模方法。构建的绳索模型为圆柱形，内部包含不同尺寸的三角壳体元件及其关节。三角壳体元件之间的力与弯矩模型分别为线弹性模型和双线性模型。

（2）通过绳索拉伸和三点弯曲试验，分别以抗拉强度、弹性模量为响应值对绳索模型的离散元参数进行了标定。建立了拉伸强度和弹性模量回归方程，并通过方程求解确定了绳索模型离散元参数最优组合为：杨氏模量 1.4×10^{9} Pa、泊松比 0.335、法向弹性率 0.854、切向弹性率 0.637、弯曲弹性率 0.173。

（3）对绳索模型及其离散元参数进行验证试验，绳索模型抗拉强度误差、弹性模量误差分别为 2.32% 和 1.74%。拉伸、弯曲曲线平均误差分别为

6.65%和7.35%。结果表明构建的绳索模型及其离散元参数准确,证明本研究提出的基于DEM的绳索模型构建方法可行性。

(4)绳索DEM模型拉伸、弯曲过程中的力学分析表明,构建的绳索DEM模型可用于分析绳索受力过程中的力学行为。除了可分析绳索自身受力和变形外,还可用于分析绳索与机械部件接触区的力学特性。

(5)与FEM基绳索模型相比,构建的DEM基绳索模型结构简单,具有普适性。

参 考 文 献

[1] CHANG X D, PENG Y X, ZHU Z C, et al. Breaking failure analysis and finite element simulation of wear-out winding hoist wire rope[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 1 - 17.

[2] GHOREISHI S R, DAVIES P, CARTRAUD P, et al. Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part Ⅱ: a linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(9): 2943 - 2960.

[3] LEECH C M. The modelling of friction in polymer fibre ropes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(3): 621 - 643.

[4] CHAILLEUX E, DAVIES P. Modelling the non-linear viscoelastic and viscoplastic behaviour of aramid fibre yarns[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2003, 7(3): 291 - 303.

[5] HUANG W, LIU H, LIAN Y, et al. Modeling nonlinear creep and recovery behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings[J]. Applied Ocean Research, 2013, 39: 113 - 120.

[6] JIANG W G. A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 54(1): 69 - 73.

[7] JIANG W G, HENSHALL J L, WALTON J M. A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(1): 63 - 86.

[8] BELTR N J F, BRAVO T. Evaluation of the coupled effect of strain localization and asymmetric damage distribution on rope response: numerical approach based on a nonlinear cable-beam element[J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110258.

[9] BELTR N J F, DE VICO E. Assessment of static rope behavior with asymmetric damage distribution[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 84 - 98.

[10] BELTR N J F, VARGAS D. Effect of broken rope components distribution throughout rope cross-section on polyester rope response: numerical approach[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64(1): 32 - 46.

[11] SHAO H, KAN Z, WANG Y, et al. Dynamic analysis and numerical simulation of arresting hook engaging cable in carried-based UAV landing process[J]. Drones, 2023, 7(8): 530.

[12] 沈文厚, 赵治华, 任革学, 等. 拦阻索冲击的多体动力学仿真研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 73 - 77,94.
SHEN Wenhou, ZHAO Zhihua, REN Gexue, et al. Multi-body dynamic simulation of impact on cross deck pendant[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 73 - 77,94. (in Chinese)

[13] TANG Z, LIANG Y, WANG M, et al. Effect of mechanical properties of rice stem and its fiber on the strength of straw rope[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 180: 114729.

[14] SYDUZZAMAN M, SULTANA R S, FAIZA F F, et al. Mapping the recent advancements in bast fiber reinforced biocomposites: a review on fiber modifications, mechanical properties, and their applications[J]. Results in Materials, 2023, 20: 100448.

[15] SMITH D M, CUNNINGHAM L S, CHEN L. Efficient finite element modelling of helical strand cables utilising periodicity[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 263: 108792.

[16] 杜文正,马保珠,曹大志, 等. 钢丝绳拉伸疲劳寿命仿真分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(17): 261 - 269.
DU Wenzheng, MA Baozhu, CAO Dazhi, et al. Simulation and tests for tensile fatigue life of steel wire rope[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(17): 261 - 269. (in Chinese)

[17] 朱新华, 伏胜康, 李旭东, 等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 34 - 41.
ZHU Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 34 - 41. (in Chinese)

[18] LIU F, ZHANG J, CHEN J. Modeling of flexible wheat straw by discrete element method and its parameter calibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 42 - 46.

[19] GUO Y, WASSGREN C, CURTIS J S, et al. A bonded sphero-cylinder model for the discrete element simulation of elasto-plastic fibers[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 175: 118 - 129.

[20] GUO Y, WASSGREN C, HANCOCK B, et al. Validation and time step determination of discrete element modeling of flexible fibers[J]. Powder Technology, 2013, 249: 386 - 395.

[21] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 1 - 15.

[22] 夏俊芳，张朋，苑宏文，等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：174－184.
XIA Junfang，ZHANG Peng，YUAN Hongwen，et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(9)：174－184.（in Chinese）

[23] 张喜瑞，胡旭航，刘俊孝，等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：121－130.
ZHANG Xirui，HU Xuhang，LIU Junxiao，et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(5)：121－130.（in Chinese）

[24] XIA Y，KLINGER J，BHATTACHARJEE T，et al. An experiment-informed discrete element modelling study of knife milling for flexural biomass feedstocks[J]. Biosystems Engineering，2023，236：39－53.

[25] XIA Y，NAVAR R，TASNIM Z，et al. The role of flexural particles in the shear flow of pine residue biomass：an experiment-informed DEM simulation study[J]. Powder Technology，2024，440：119771.

[26] ZHANG Z，MEI F，XIAO P，et al. Discrete element modelling and simulation parameters calibration for the compacted straw cube[J]. Biosystems Engineering，2023，230：301－312.

[27] LI X，ZHAO J，KWAN J S H. Assessing debris flow impact on flexible ring net barrier：a coupled CFD－DEM study[J]. Computers and Geotechnics，2020，128：103850.

[28] HAN J，SHEN K，GUO Y，et al. Discrete element simulations of flexible ribbon-like particles[J]. Powder Technology，2023，429：118950.

[29] LIU L，JI S. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field[J]. Applied Ocean Research，2018，75：53－65.

[30] 李涛，王振华，翟改霞，等. 苜蓿草植株离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊2)：187－199.
LI Tao，WANG Zhenhua，ZHAI Gaixia，et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model of alfalfa plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp.2)：187－199.（in Chinese）

（上接第 189 页）

[26] SUN Zhenjiao，CHEN Lianjun，MA Hui，et al. Study on flow characteristics of vertical pneumatic conveying of stiff shotcrete materials based on CFD－DEM[J]. Powder Technology，2024，439：119716.

[27] SUN Zhenjiao，CHEN Lianjun，MA Guanguo，et al. An experimental study on the elbow pressure drop and conveying stability of pneumatic conveying for stiff shotcrete based on response surface methodology[J]. Processes，2023，11(5)：1574.

[28] ZHOU Mengmeng，WANG Shuai，KUANG Shibo，et al. CFD－DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. Powder Technology，2019，354：893－905.

[29] CHEN Lianjun，MA Hui，GAO Kang，et al. Experimental study on the flow characteristics of horizontal pneumatic conveying of stiff shotcrete[J]. Journal of Building Engineering，2023，73：106765.

[30] 吴孟宸，丛锦玲，闫琴，等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(23)：30－38.
WU Mengchen，CONG Jinling，YAN Qin，et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(23)：30－38.（in Chinese）

[31] 李继伟，袁文胜，翟欢乐，等. 气力输送技术在农业机械中的应用[J]. 中国农机化学报，2023，44(1)：85－92，115.
LI Jiwei，YUAN Wensheng，ZHAI Huanle，et al. Application of pneumatic conveying in agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(1)：85－92，115.（in Chinese）

[32] 常金丽，张晓辉. 2BQ－10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2011，27(1)：136－141.
CHANG Jinli，ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(1)：136－141.（in Chinese）

[33] MA Haolin，ZHAO Chunjiang，YANG Shuo，et al. Research on a new-designed Venturi ejector and dazomet particle motion characteristics for dilute-phase pneumatic conveying systems based on CFD－DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，213：108240.

[34] 林礼群，王志勇. 工船养殖颗粒饲料气力输送系统参数优化[J]. 船舶工程，2020，42(增刊2)：51－55.
LIN Liqun，WANG Zhiyong. Parameter optimization of feed pneumatic conveying system for aquaculture vessel[J]. Ship Engineering，2020，42(Supp.2)：51－55.（in Chinese）

[35] 纪云. 喷浆物料长距离管道气力输送特性研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2019.
JI Yun. Research on pneumatic conveying characteristics of spraying materials in long distance pipeline[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2019.（in Chinese）

[36] 尚坤，李永祥，宋海豪，等. 基于气固耦合散粮旋流输送弯管流场特性研究[J]. 包装工程，2024，45(5)：180－187.
SHANG Kun，LI Yongxiang，SONG Haihao，et al. Field flow characteristics of grain particle swirl conveying bend based on gas-solid coupling[J]. Packaging Engineering，2024，45(5)：180－187.（in Chinese）