

数值仿真分析中散体玉米物理力学参数及应用

孙 戡^{1,2} 聂榕莹² 漆小虎^{1*} 江 浩¹ 苏振华³ 侯江超² 林 何²

1.二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳 618013

2.西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048

3.中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710018

[摘要]玉米颗粒物理及力学特性参数是开展其种采、储运和装卸装备离散元数值仿真的基础,其取值合理性直接影响颗粒流动、堆积和装备输送过程分析结果。为提高玉米相关装备仿真分析中参数选取的针对性和有效性,文中系统梳理了玉米颗粒粒度、密度、摩擦系数、碰撞恢复系数、剪切模量和泊松比等关键参数。进一步以倾斜式螺旋输送机为工程应用对象,建立玉米颗粒离散元模型和螺旋输送机仿真模型,保持螺距、输送距离和进料条件不变,改变螺旋转速,分析 100、150 和 200 r·min⁻¹ 工况下出料质量流量、颗粒平均轴向速度及螺旋轴扭矩变化规律。结果表明,基于文献研究选取的参数能够用于玉米颗粒倾斜输送过程的数值建模;随着转速提高,颗粒平均轴向速度由 0.203 m·s⁻¹ 增加至 0.396 m·s⁻¹,螺旋轴平均扭矩由 108.56 N·m 增加至 344.94 N·m; 150 r·min⁻¹ 工况下平均出料质量流量最高,为 4.67 kg·s⁻¹。研究结果可为玉米颗粒离散元参数选取及倾斜螺旋输送装备仿真分析提供参考。

[关键词]玉米颗粒;数值仿真;物理力学参数;EDEM;倾斜螺旋输送机

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20127

中图分类号: S565

文献标识码: A

Physical and Mechanical Parameters of Loose Corn in Numerical Simulation Analysis and Application

SUN Jian^{1,2}, NIE Rongying², QI Xiaohu^{1*}, JIANG Hao¹, SU Zhenhua³, HOU Jiangchao², LIN He²

1. Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618013, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shanxi, 710048, China

3. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract: The physical and mechanical properties of corn particles are the basis for conducting discrete element numerical simulations of their planting, harvesting, storage, and handling equipment. The rationality of their values directly affects the analysis results of particle flow, stacking, and equipment transportation processes. In order to improve the pertinence and effectiveness of parameter selection in simulation analysis of corn related equipment, the article systematically sorted out key parameters such as corn particle size, density, friction coefficient, collision recovery coefficient, shear modulus, and Poisson's ratio. Further taking the inclined screw conveyor as the engineering application object, establish a discrete element model of corn particles and a simulation model of the screw conveyor, keep the pitch, conveying distance, and feeding conditions unchanged, change the screw speed, and analyze the variation laws of discharge mass flow rate, average axial velocity of particles, and screw shaft torque under 100, 150, and 200 r·min⁻¹ working conditions. The results indicate that the parameters selected based on literature research can be used for numerical modeling of the inclined conveying process of corn particles; As the rotational speed increases, the average axial velocity of particles increases from 0.203 m·s⁻¹ to 0.396 m·s⁻¹, and the average torque of the helical shaft increases from 108.56 N·m to 344.94 N·m; Under the working condition of 150 r·min⁻¹, the average discharge mass flow rate is the highest, which is 4.67 kg·s⁻¹. The research results can provide reference for the selection of discrete element parameters for corn particles and the simulation analysis of inclined spiral conveying equipment.

Keywords: corn granules; numerical simulation; physical and mechanical parameters; EDEM; inclined screw conveyor

引言

在全球农业经济的壮阔版图中,玉米的种植采集、储运^[1-3]及装卸构成保障国家粮食安全与稳定供应的重要支柱,其战略意义深远,关乎国计民生与社会稳定。随着数值模拟^[4,5]在工程领域的广泛应用,为农业生产各环节提供了强大的支持。特别是在玉米仓储设备的设计优化和运输过程^[6,7]模拟分析中,数值模拟技术凭借其能够精确模拟玉米颗粒行为,成为提高生产效率、降低成本和保障玉米安全的重要手段^[8]。然而,数值模拟的准确性依赖于玉米颗粒的物理及力学特性的准确输入,这就对玉米等颗粒特性的研究提出了更高的要求。

玉米颗粒的物理及力学特性显著影响其种采、仓储、运输以及装卸等过程。粒度决定了其在设备中的适配性与流动性;密度影响仓储空间利用与运输负荷;摩擦系数左右颗粒间及与设备间的摩擦作用;碰撞恢复系数反映颗粒碰撞后的能量损失与运动轨迹;剪切模量和泊松比反映颗粒接触变形特性。本文首先梳理了玉米颗粒在数值分析中常用物理及力学参数,随后,以倾斜式螺旋输送机为应用对象开展单因素性能分析,为玉米散粮输送装备数值建模与参数设置提供参考。

1 玉米颗粒的基本物理特性

1.1 玉米颗粒的粒度

颗粒粒径定义为物料颗粒的几何维度参数。对于非连续介质形态的散粒材料而言,其空间几何特征通常表现为三个正交方向上的线性尺度分布。玉米颗粒的三维几何尺寸通常用厚(T)、宽(W)、长(L)来表示。由于玉米品种比较多,在实际粒度测试时,不同的学者针对不同的品种开展了相关的研究。通过对不同玉米品种颗粒进行测量,得到其长度大致介于8~13mm,宽度介于6~9mm,厚度介于4~7mm,且不同品种和测量样本的玉米颗粒三维尺寸存在一定差异。

1.2 玉米颗粒的密度

玉米种子的物理特性中,密度是一项关键指标,它包含实体密度与容积密度两个层面,分别反映种子内部物质的实际质量和单位体积的质量,是评估种子质量与生长潜能的重要参数。在运用离散元方法进行模拟分析时,颗粒的实际密度为所需的关键参数之一。玉米粒的实际密度通过其质量 m 与相应体积 V 的比例计算得出。

众多学者采用排液法测量不同品种玉米颗粒密度,结果表明不同品种的玉米颗粒密度不同,密度受品种和含水率影响。

2 玉米颗粒的力学特性

2.1 玉米颗粒动摩擦系数

在物体间接触并进行无滑动滚动过程中,因接触面形变所导致的对滚动的阻力现象^[9],被定义为“滚动摩擦”。滚动摩擦的量化通常借助阻力矩这一指标,该力的强度受到多种因素的影响,包括物质的特性,接触面的几何构造以及被推动物体的重量。

通过对玉米种子与不同材料(如有机玻璃、镀锌钢板等)的滚动摩擦系数进行研究,实验观测表明,具有不同形态特征及遗传背景的玉米籽粒,其滚动摩擦性能参数存在显著差异。在保持界面材料一致性的条件下,籽粒的几何不规则度与滚动摩擦性能参数呈现正相关关系,即外形越偏离规则形态的玉米颗粒,其滚动摩擦系数表现出更高数值。

2.2 玉米颗粒静摩擦系数

依据库仑定律的基本原理,静摩擦力可表征为静摩擦系数与法向压力(法向反作用力)的乘积关系。通过数学推导可得,静摩擦系数应定义为静摩擦力与法向压力的比值,这一无量纲参数反映了接触界面间的摩擦特性。对玉米种子与不同材料的静摩擦系数进行研究,不同形状和品种的玉米种子静摩擦系数不同;不同含水率的玉米颗粒静摩擦系数有所不同,通常情况下,含水率较高的玉米颗粒,其静摩擦系数相对较大。

2.3 玉米颗粒碰撞恢复系数

将玉米颗粒从高度为 H 的位置释放,玉米颗粒在重力的作用下,玉米颗粒与其正下方的碰撞平面发生碰撞后瞬间速度与碰撞前瞬间速度的比值^[10]。

随着含水率的增加,碰撞恢复系数呈下降趋势;不同品种玉米种子间的碰撞恢复系数具有显著差异;在与不同材质接触时,其碰撞恢复系数亦表现出变化,其中有机玻璃与玉米种子组合的系数最低,塑料板次之,铸铁与玉米种子之间的系数最高;随着碰撞速度提升或下落高度增加,碰撞恢复系数趋于降低。

2.4 玉米颗粒剪切模量

剪切模量,又称切变模量或弹性刚度系数,指材料在线弹性范围内受剪切应力作用时,剪应力与对应剪应变的比值。作为表征材料抗剪切变形能力的重要物理量,其数值大小直接体现了材料的刚性特征:剪切模量数值越高,则材料抵抗变形的能力越显著。随着含水率的降低,剪切模量按照线性规律逐步增加。

研究发现,玉米颗粒的剪切模量受含水率和加载速度

影响。在加载速度方面,加载速度增大对剪切模量影响较小;在含水率方面,随着含水率增加,玉米种子的剪切模量减小,且含水率越大,这种减小的变化趋势越平缓,不同品种受含水率影响的程度也有所差异。

2.5 玉米颗粒泊松比

玉米颗粒的泊松比是通过轴向压缩,用纵向应变和横向应变直接测量的方法确定的,因此泊松比的绝对值与纵向应变和横向应变值的比值。

玉米颗粒泊松比是通过轴向压缩测量纵向应变和横向应变确定的,其载荷大小对玉米颗粒泊松比有一定的影响;不同测量方法会得到不同的泊松比结果,该物性参数也是 EDEM 开展颗粒输送设备仿真的关键基础输入^[11]。

3 颗粒参数选取及倾斜螺旋输送 EDEM 仿真分析

3.1 玉米颗粒离散元分析参数选取

选取典型马齿形玉米颗粒作为建模对象。考虑真实玉米籽粒具有一端较宽、中部饱满、前端收缩的非规则形态,采用多球组合法建立颗粒模型。根据文献中玉米颗粒长度约 8~13mm、宽度约 6~9mm、厚度约 4~7mm 的范围,建立 8 球组合颗粒模型,颗粒等效尺寸控制在该范围内。接触模型采用 Hertz-Mindlin(no slip)模型,颗粒与钢制输送机几何体间的参数的确定来自前述参考文献,如表 1 所示。

3.2 倾斜式螺旋输送机模型与仿真方案

倾斜式螺旋输送机由输送筒体、螺旋轴、螺旋叶片、进料口和出料口组成,仿真设置筒体及进出料口固定,螺旋轴和螺旋叶片作为同一旋转几何体绕轴线做匀速转动,输送倾角保持 30°。颗粒工厂设置于进料口上方。为保证不同转速工况下结果具有可比性,颗粒工厂位置、生成

方式、颗粒模型、材料参数及接触参数均保持一致,仅改变螺旋轴转速。为分析螺旋转速对玉米颗粒倾斜输送过程的影响,设置 100、150 和 200r/min 三组工况。后处理中提取出料质量流量、颗粒平均轴向速度和螺旋轴扭矩作为评价指标。其中,质量流量用于评价输送能力,颗粒平均轴向速度用于评价颗粒沿输送方向的运动连续性,螺旋轴扭矩用于表征输送负载和能耗变化趋势。

3.3 评价指标与数据处理方法

EDEM 后处理中,在出料口设置统计区域,导出质量流量随时间变化数据。由于统计面法向方向可能与实际出料方向相反,质量流量曲线会出现负值,取其绝对值进行计算;颗粒平均轴向速度通过统计颗粒在输送方向上的速度分量获得;螺旋轴扭矩由旋转几何体的 Torque 结果导出。考虑仿真初期存在进料和填充过程,选取 7.0~9.9s 作为统计区间,计算各指标平均值;同时提取最大瞬时扭矩作为冲击载荷参考指标。

3.4 仿真结果与分析

(1) 颗粒速度分布特征

图 1 为不同螺旋转速下玉米颗粒速度分布云图。由图可知,在不同转速条件下,颗粒均能在螺旋叶片推动作用下沿倾斜筒体向出料端运动。由于输送机具有一定倾角,颗粒在重力作用下主要分布于筒体下部区域,靠近叶片推送面处速度较高,筒体底部及叶片背面区域存在部分低速颗粒,说明倾斜输送过程中存在一定的颗粒滑移和局部滞留现象。随着转速提高,颗粒整体速度水平升高,进料口和出料口附近高速颗粒增多,表明高转速增强了叶片对颗粒的推送与抛送作用,但也会使颗粒扰动和碰撞现象更加明显。

表 1 玉米颗粒 EDEM 仿真参数选取

参数类别	参数名称	取值
玉米颗粒	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1150
玉米颗粒	泊松比	0.40
玉米颗粒	剪切模量/Pa	1.00×10^8
钢材	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7850
钢材	泊松比	0.30
钢材	剪切模量/Pa	7.90×10^{10}
玉米-玉米	碰撞恢复系数	0.45
玉米-玉米	静摩擦系数	0.34
玉米-玉米	滚动摩擦系数	0.05
玉米-钢	碰撞恢复系数	0.50
玉米-钢	静摩擦系数	0.38
玉米-钢	滚动摩擦系数	0.05

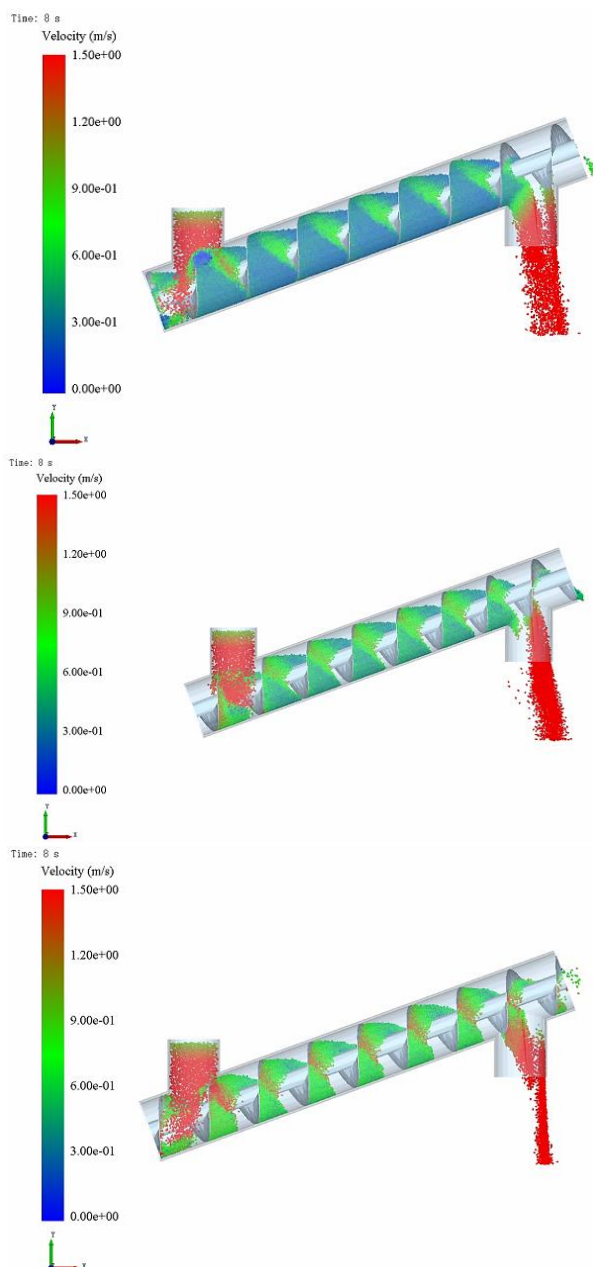


图1 不同转速下玉米颗粒速度分布云图

(2) 出料质量流量分析

由图2可知,不同转速下出料质量流量均具有波动特征,这是螺旋叶片周期性推送、颗粒碰撞及局部堆积共同作用的结果。100r/min 工况下颗粒开始出料时间相对较晚,出料质量流量相对较低;当转速提高至 150r/min 时,出料质量流量明显增大,说明适当提高转速能够增强叶片推送能力并提高单位时间出料量;当转速继续提高至 200r/min 时,虽然颗粒速度继续增大,但平均出料质量流量较 150r/min 有所降低,说明过高转速下颗粒扰动、碰撞和局部回流增强,出料稳定性受到影响。

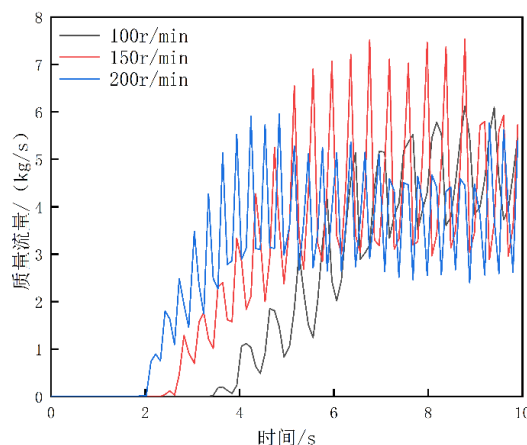


图2 不同转速下出料质量流量随时间变化曲线

(3) 颗粒平均轴向速度分析

由图3可知,颗粒平均轴向速度随螺旋转速升高而增大。统计结果表明,100、150和200r/min 工况下颗粒平均轴向速度分别为0.203、0.298和0.396m/s。与100r/min 工况相比,200r/min 工况下颗粒平均轴向速度提高约95.4%,表明提高转速能够明显增强螺旋叶片对颗粒的轴向输送作用。

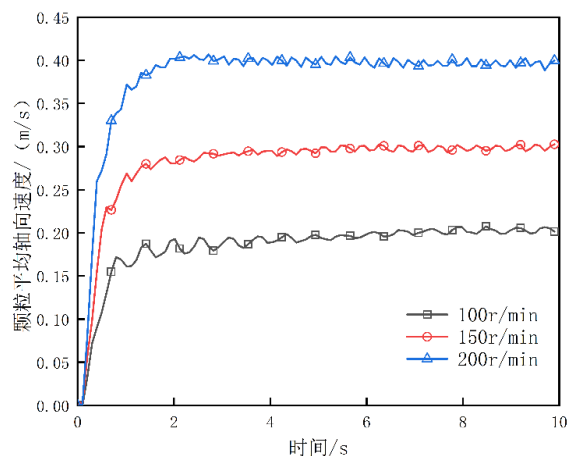


图3 不同转速下颗粒平均轴向速度随时间变化曲线

(4) 螺旋轴扭矩分析

图4为不同转速下螺旋轴扭矩随时间变化曲线。由图可知,扭矩曲线存在明显波动和瞬时峰值,说明倾斜输送过程中颗粒堆积状态及叶片接触负载具有非连续性。随着螺旋转速升高,螺旋轴平均扭矩总体增大,表明颗粒与叶片之间的接触频率、碰撞强度及推挤阻力增加。其中150 r/min 和 200 r/min 工况出现较高瞬时扭矩峰值,说明高转速下局部堆积或瞬时挤压会使螺旋轴受到较大的冲击载荷。因此,在评价输送负载时,平均扭矩可作为能耗趋势指标,最大瞬时扭矩可作为冲击载荷参考指标。

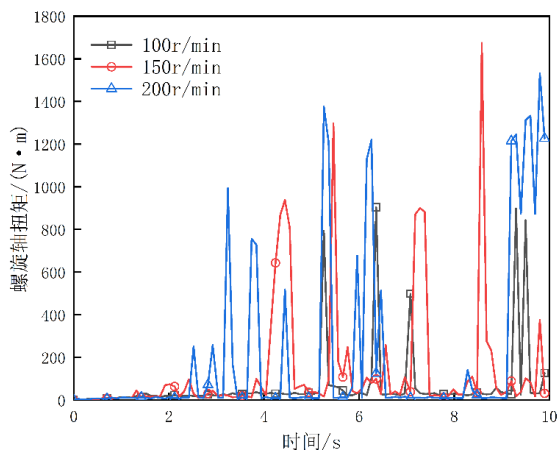


图4 不同转速下螺旋轴扭矩随时间变化曲线

表2 不同转速工况下 EDEM 后处理结果

转速/ (r/min)	平均质量流量/ (kg/s)	颗粒平均轴向 速度/(m/s)	平均扭矩/ (N·m)	最大瞬时扭矩 /(N·m)
100	3.55	0.203	108.56	897.91
150	4.67	0.298	212.92	1674.91
200	3.86	0.396	344.94	1531.44

由表2可知,在所设工况范围内,螺旋转速对玉米颗粒输送性能具有明显影响。随着转速由100r/min增加至200r/min,颗粒平均轴向速度持续增大,说明转速提高能够强化颗粒沿输送方向的运动能力。平均出料质量流量在150r/min时达到最大,为4.67kg/s;当转速提高至200r/min时,出料质量流量反而降低至3.86kg/s,说明过高转速并不一定带来更高的稳定出料能力。与此同时,螺旋轴平均扭矩随转速升高而增加,200r/min工况下平均扭矩达到344.94N·m,输送负载明显增大。综合质量流量、轴向速度和扭矩结果,150r/min工况具有较高的出料能力和相对适中的输送负载,在本文设定参数条件下综合输送性能较优。

4 总结与展望

本文以数值仿真分析中玉米颗粒物理及力学参数选取为主线,系统梳理了玉米颗粒粒度、密度、摩擦系数、碰撞恢复系数、剪切模量和泊松比等仿真关键参数,并进一步开展了倾斜式螺旋输送机 EDEM 仿真分析。结果表明,不同品种和含水率条件下玉米颗粒尺寸、密度及接触参数存在一定差异。玉米颗粒长度大致介于8~13mm,宽度介于6~9mm,厚度介于4~7mm;密度受品种和含水率影响;滚动摩擦系数、静摩擦系数和碰撞恢复系数受颗粒形状、接触材料和含水率影响明显;剪切模量和泊松比则反映颗粒接触变形特性,是离散元仿真中确定法向接触刚度和能量耗散的重要参数。

对玉米颗粒倾斜螺旋输送模型开展 EDEM 分析,完成100、150和200r/min三种转速下的性能分析。结果表

明,随着转速提高,颗粒平均轴向速度持续增大;平均出料质量流量在150r/min工况下达到最大,为4.67kg/s;螺旋轴平均扭矩随转速升高而增加,说明高转速会提高输送负载和能耗趋势。综合分析认为,在所设螺距、输送距离和进料条件下,150r/min工况具有相对较好的综合输送性能。

EDEM 仿真部分主要用于说明综述参数在玉米颗粒散粮输送装备中的应用方法,尚未开展物理样机试验验证。后续研究可进一步结合堆积角试验、输送台架试验和参数标定方法,对玉米颗粒离散元参数进行校准,并扩展倾角、螺距、填充率等因素的多因素耦合分析,从而提高仿真结果的工程适用性和预测精度。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51805402);湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题项目(KDTL2023002)。

[参考文献]

- [1]张振峰.大豆玉米带状复合种植机械装备与应用[J].中国农机装备,2024(7):45-47.
 - [2]赵卿颖,马天碧,单常尧,等.中国玉米绿色储运与生物安全处置技术进展[J].植物保护学报,2022,49(5):1329-1341.
 - [3]安蓉蓉,曹阳,程绪铎,等.稻谷内摩擦角的测定与实验研究[J].粮食储藏,2009,38(3):31-33.
 - [4]田立勇,李志焱,于宁.基于离散元法的平仓机驱动轮与玉米颗粒的相互作用研究[J].河南农业大学学报,2021,55(6):1118-1127.
 - [5]董晓倩,高帅,杨开敏,等.低湿地区玉米就仓通风干燥数值模拟研究[J].粮食储藏,2024,53(5):25-32.
 - [6]吴海峰,张学军,史增录,等.顶杆夹持式玉米精量排种器设计与试验[J].中国农机化学报,2025,46(3):11-18.
 - [7]陈国强,闫俊霞,张连仁.玉米颗粒堆积特性的离散元法模拟研究[J].轻工机械,2020,38(6):11-14.
 - [8]尹蓉蓉,林浩,贾欢丽.烘干玉米食品安全指标在收购和储存过程中的变化分析[J].中国食品工业,2021(14):50-51.
 - [9]支帅,连政国,陈明东,等.西洋参种子物理特性试验[J].农业工程,2020,10(7):93-97.
 - [10]邹翌,郝向泽,何瑞银.基于 EDEM-Fluent 耦合的气流分配式排种器数值模拟与试验[J].华南农业大学学报,2017,38(4):110-116.
 - [11]王媛,陈颐,唐玉春,等.基于 EDEM 的倾斜式螺旋输送机输送效率及能耗研究[J].材料导报,2025,39(1):639-642.
- 作者简介:孙戡(1984—),男,西安工程大学副教授,博士,研究方向为结构设计及优化、结构完整性评价以及工程中有限法等。