

# 基于 SPH-FEM 的油菜茎秆磨粒气体射流切割仿真与试验

韩明兴, 余 锴, 段宏兵\*, 熊利荣, 徐 琨, 李 淼, 刘 琦

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**摘要:** 针对传统油菜收获切割刀具振动大、茎秆缠绕磨损及效率低等问题, 该研究提出一种油菜茎秆磨粒气体射流切割技术, 以实现作业机具与油菜无接触式切割和高效低耗收获。采用光滑粒子流体力学与有限元 (smooth particle hydrodynamic-finite element method, SPH-FEM) 耦合仿真对油菜茎秆射流动态切割过程进行分析, 揭示气-固间能量传递规律, 获取射流切割动态特性, 并搭建试验系统进行射流切割试验验证。研究结果表明, 采用 4 mm 孔径高速喷嘴, 射流压力为 20 MPa 时气流及磨粒最高速度分别为 741 和 411 m/s, 约 95% 加速过程发生在喉管段与扩张段; 喷嘴外流场流速呈现先下降后上升的变化规律, 射流压力越大速度变化越剧烈; 射流束主要通过气体膨胀-收缩-膨胀的加速过程将压力能转化为射流束动能; 入口压力从 3 MPa 增加至 10 MPa 时, 磨粒最大速度提升率从 31% 下降至 11%。当压力超过 3 MPa 后, 随射流压力提高, 射流束压力能-动能转换效率显著减小; 在相同条件下 0.1 mm 粒径磨粒的最大速度比 0.3 mm 粒径磨粒大 19%; 粒径越大磨粒获得的切割动能越大, 0.3 mm 粒径磨粒切割动能最大, 其次为 0.2 与 0.1 mm 粒径磨粒; 磨粒速度在 120 m/s 时可以实现茎秆有效切割, 对应射流压力约为 0.4 MPa; 横移速度为 5 mm/s、靶距在 10 mm 以内可一次切断茎秆, 横移速度超过 5 mm/s 时无法一次切断茎秆; 靶距 5 mm、横移速度 5 mm/s 时, 可获得最小切割侵蚀体积, 切口宽度在 1~6 mm 之间; 射流切割能力主要受横移切割速度影响, 切割靶距影响相对较小; 茎秆切割效果主要受靶距影响, 横移速度影响相对较小。研究成果还可用于其他类似作物茎秆的切割, 可为农业非接触式高效切割技术装备的开发提供理论与技术支撑。

**关键词:** 流固耦合; 仿真; 光滑质点动力学; 磨粒气射流; 油菜茎秆; 切割

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403040

中图分类号: S232.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-17-0082-11

韩明兴, 余锴, 段宏兵, 等. 基于 SPH-FEM 的油菜茎秆磨粒气体射流切割仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 82-92. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403040 <http://www.tcsae.org>  
HAN Mingxing, YU Kai, DUAN Hongbing, et al. Simulation and experiments of abrasive gas jet cutting for rapeseed stem using SPH-FEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(17): 82-92. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403040 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

油菜是重要经济作物, 也是世界性的主要油料作物, 中国油菜年产量稳定在 1 350 t 左右<sup>[1]</sup>。当前国内油菜生产机械化普及率不高<sup>[2]</sup>, 多采用传统机械割刀式割台, 主要为往复或旋转式刀片切割<sup>[3-4]</sup>, 其面临机械振动大、效率低、刀具缠绕磨损严重等问题, 极大制约了油菜生产机械向现代高效智能装备的发展。

磨粒射流切割是一种利用由喷嘴小孔射流高速磨粒, 并通过粒子高速碰撞剪切作用达到磨削去除材料的加工工艺<sup>[5-6]</sup>。由于磨粒射流使用非固定自由颗粒, 其射流束能够到达许多传统刀具难以到达的地方, 如角落和孔洞等, 因此其在破煤、机械制造、土木工程、食品加工<sup>[7-11]</sup>等多个领域都有着广泛应用。ZHANG 等<sup>[12]</sup>采用 CFD (computational fluid dynamics, CFD) 仿真与高速摄像机,

对磨粒射流中流场特性与磨粒颗粒运动特性进行了分析。王凯等<sup>[13]</sup>利用离散相模型 (discrete phase model, DPM) 对不同颗粒体积浓度下叶轮离心泵固液两相流进行求解, 揭示颗粒体积浓度、叶顶间隙泄漏和过流部件表面磨损规律的关联机制。韩明兴等<sup>[14]</sup>采用 ADAMS (automatic dynamic analysis of mechanical systems, ADAMS) 对油菜茎秆动态夹持力学性能进行了仿真与试验研究。赵吉坤等<sup>[15]</sup>建立了水稻秸秆茎秆离散元模型, 进行了力学性能仿真分析。LEBLICQ 等<sup>[16-17]</sup>基于离散元模型对柔性作物茎秆力学特性进行了研究。谭秋亭等<sup>[18]</sup>采用 SPH (smooth particle hydrodynamic, SPH) 方法对黏土剪切破坏模型进行了验证。高涛等<sup>[19]</sup>基于 SPH 法对不同形状刀具土壤切削过程进行了模拟仿真。

射流切割技术具有切割精度高、无切割热区等优点, 在材料加工领域得到广泛应用。相比较而言农作物茎秆所需切割能量远小于金属、木材、石料等材料, 射流切割技术可适用于农作物茎秆切割。相关研究<sup>[20-22]</sup>表明射流技术已逐渐应用于甘蔗、卷心莴苣等作物切割及去皮加工, 该技术有着优良切割性能及较好的适用性。

针对目前相关仿真研究所构建的植物茎秆离散元力

收稿日期: 2024-03-06 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32101627)

作者简介: 韩明兴, 博士, 研究方向为农机装备机电液一体化设计。

Email: hmx524@126.com

\*通信作者: 段宏兵, 博士, 副研究员, 研究方向为农业机械化技术与装备。

Email: duanhb@mail.hzau.edu.cn

学模型较为单一、未考虑茎秆内外茎差异等问题，本文提出一种基于 SPH-FEM (smooth particle hydrodynamic-finite element method) 的油菜茎秆复合模型仿真方法，采用 LS-DYNA (life-simulating dynamics, LS-DYNA) 与 Fluent 进行油菜茎秆磨粒气体射流非接触式切割过程仿真研究，以期为后续相关射流切割生产装备提供技术支持，研究成果也可用于其他作物茎秆切割作业，为农业非接触式高效低耗切割技术装备的开发提供新途径。

### 1 磨粒气体射流切割仿真模型

#### 1.1 SPH-FEM 耦合仿真原理

SPH 是一种无网格纯拉格朗日法，用于求解网格点在任意时刻速度和能量。这些点都具有一定质量，称为粒子<sup>[23]</sup>。在某一个时间段内，要正确地表征粒子运动，须构造一个表征粒子运动信息的近似函数，其定义为

$$\prod^h f(x) = \int f(y) W(k, h) dy \quad (1)$$

式中  $\prod^h$  表示对函数  $f(x)$  求积分近似； $h$  为光滑长度，光滑长度随时间和空间变化； $k$  为两粒子之间的距离； $W(k, h)$  为核函数 (插值核)，使用辅助函数  $\theta(x)$  进行定义，即：

$$W(k, h) = \frac{1}{h(x)^d} \theta(x) \quad (2)$$

式中  $d$  为空间维数； $P(u, h)$  是尖峰函数，其在 SPH 方法中最常用的光滑核是三次样条，定义为

$$P(u, h) = C_1 \times \begin{cases} 1 - 1.5u^2 + 0.75u^3, & |u| \leq 1 \\ 0.25(2 - u)^3, & 1 \leq |u| \leq 2 \\ 0, & 2 \leq |u| \end{cases} \quad (3)$$

式中  $C_1$  为归一化常数，由空间维数确定； $u = \frac{k}{h}$ 。

在 LS-DYNA 中，SPH 粒子被视为特殊节点单元，控制参数为节点编号、质量及其空间位置。SPH 粒子与 FEM 有限元模型耦合，通过罚函数将质点力作用于有限元单元表面，SPH-FEM 耦合采用点面接触方式，接触类型定义为 Node To Surface<sup>[24]</sup>。SPH 粒子定义为从体，接触界面上的有限元单元表面定义为主体，在每一个计算时间步  $\Delta t$  内修正构形之前搜索所有未与主体面接触的从体节点，检查其是否在  $\Delta t$  内穿透了主体面。如果从体节点穿透主体表面，则缩小  $\Delta t$ ，使穿透主体面的从体节点并不贯穿主体面而是正好到达主体面。仿真计算时若从体节点穿透主体面，罚函数会在从体节点与被穿透主体面之间引入一个界面接触力，其大小与穿透深度、主面刚度成正比。若节点没有穿透主体面，则不做任何处理，图 1 为接触耦合算法原理示意图<sup>[25]</sup>。

#### 1.2 气-固两相流流体模型

Fluent 中离散项模型 DPM (discrete phase model, DPM) 可较为准确地对磨粒气体射流中颗粒速度进行计算<sup>[26]</sup>。本文所设计喷嘴装置如图 2a 所示，图 2b 为流体计算域及网格模型。流体仿真计算时网格数量决定了计算精度和计算时长，为兼顾计算精度及计算效率，进行

网格无关性分析，以确定合适的网格数。分析时设置入口压力 3 MPa，提取两相流中流体及颗粒速度，如表 1 所示。当网格数大于 430 292 时，颗粒与流体速度均趋于稳定，网格单元数量已无较大影响，选取喷嘴装置仿真模型网格数量为 430 292。

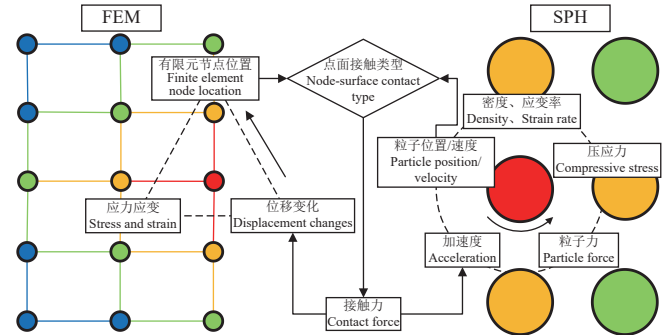
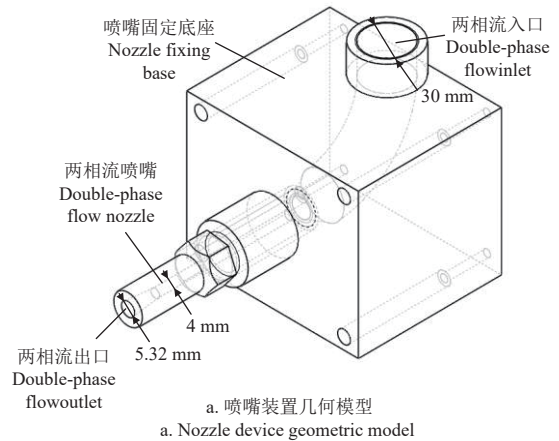
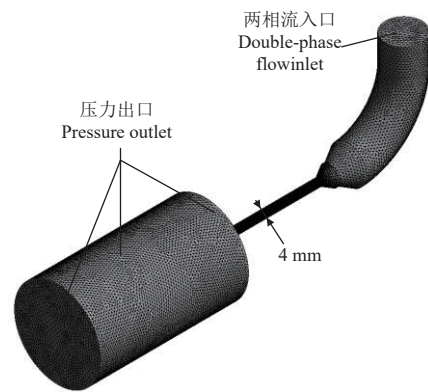


图 1 SPH-FEM 耦合原理示意图  
Fig.1 SPH-FEM coupling principle



a. 喷嘴装置几何模型  
a. Nozzle device geometric model



b. 流体计算域及网格划分  
b. Fluid computing domains and meshing

图 2 喷嘴模型及网格划分

Fig.2 Nozzle model and meshing

表 1 网格数量对流体仿真结果影响

Table 1 Impact of mesh quantity on simulation results

网格数量 Mesh quantity	颗粒速度 Particle velocity/ (m·s <sup>-1</sup> )	流体速度 Flow velocity/ (m·s <sup>-1</sup> )
1 400 502	312.15	637.31
1 260 958	312.18	637.56
430 292	312.17	637.61
215 105	313.04	639.87
107 668	311.56	635.24

### 1.3 油菜茎秆连续-离散复合模型

油菜茎秆外表皮由连续且规则结构的纤维组织构成, 内部是松散絮状物, 整体结构较为复杂, 仅采用有限元或离散元模型描述存在局限性。为减少仿真模型与实际模型结构偏差对仿真结果影响, 本文采用 FEM-SPH 耦合的方法, 将油菜茎秆构建为一个外部为有限元模型、内部为无网格节点单元离散元模型的复合仿真模型, 如图 3 所示。

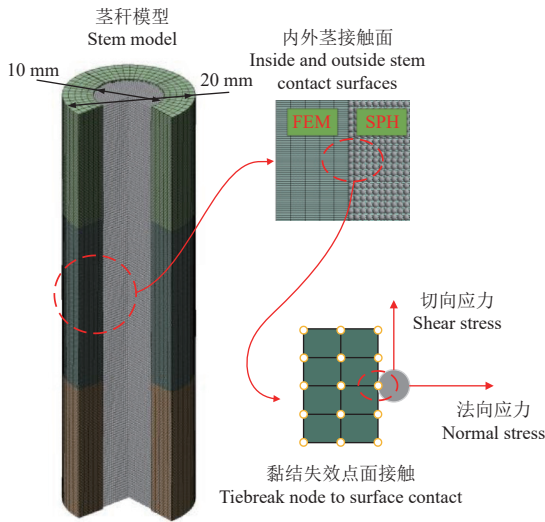


图 3 油菜茎秆复合模型  
Fig.3 Composite model of rape stem

利用有限元单元描述油菜茎秆外茎的规则形状, 无网格节点单元描述内部松散的絮状物结构, 兼顾有限元与无网格法的优点, 内外茎之间通过失效黏结接触 TIEBREAK NOED TO SURFACE 关键字耦合, 通过分别赋予内外茎不同的材料属性体现出破秆过程中内外材料力学性能差异。

### 1.4 射流切割模型及材料

选择收获期油菜作为试验靶材, 秆径 15 mm、长度 60 mm, 射流束由关键字 SPH-INJECTION 粒子注射源定义相关仿真参数<sup>[27]</sup>。磨粒材料本构参数以及射流束初始状态压力, 分别由 LS-DYNA 中 NULL 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程定义 (如式 (4) 所示)<sup>[28]</sup>。

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (4)$$

式中  $P$  为初始压力, MPa;  $\rho_0$  为靶材密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $C$  是  $v_s - v_p$  曲线截距;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  是  $v_s - v_p$  曲线的斜率系数 ( $v_s$ 、 $v_p$  分别表示材料中冲击波速度与粒子速度, m/s);  $\gamma_0$  是 GRUNEISEN 方程的常数;  $a$  是对  $\gamma_0$  的一阶体积修正;  $\mu$  是由相对体积  $v_r$  定义的体积参数, 其形式如式 (5) 所示;  $E$  为单位体积内能,  $\text{J/m}^3$ ;  $v_r=1$  时  $\mu=0$ , 此时初始压力即可由式 (6) 定义。磨粒材料本构模型主要参数见表 2。

$$\mu = \frac{1}{v_r} - 1 \quad (5)$$

$$P = \gamma_0 E \quad (6)$$

目标靶体材料采用收获期油菜茎秆, 其茎秆内外部力学参数见表 3<sup>[29-31]</sup>。

表 2 磨粒材料本构模型参数

参数 Parameter	数值 Value
密度 Density $\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4 000
截距 Intercept $C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4 569
斜率系数 Slope coefficient $S_1$	2.56
斜率系数 Slope coefficient $S_2$	0
斜率系数 Slope coefficient $S_3$	0
一阶体积修正系数 First order volume correction coefficient $a$	1
常数 Constant $\gamma_0$	1
初始压力 Initial pressure $P / \text{Pa}$	1 000 000
相对体积 Relative volume $v_r$	1

表 3 收获期油菜茎秆内外部的力学参数

参数 Parameter	数值 Value
表皮密度 Epidermal density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	944.30
内茎密度 Inner stem density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	782.60
表皮剪切模量 Skin shear modulus / MPa	5.07
内芯剪切模量 Inner core shear modulus / MPa	2.13
表皮泊松比 Epidermal Poisson's ratio	0.33
内茎泊松比 Poisson's ratio of inner stem	0.33
极限切向应力 Ultimate tangential stress / MPa	5
极限法向应力 Ultimate normal stress / MPa	40
失效应变 Failure strain	0.01~0.05

采用 MAT\_ELASTIC 材料模型定义茎秆内外部材料, 由于茎秆破坏主要是延性破坏, 添加关键字 MAT\_ADD\_EROSION 作为失效模型。油菜茎秆外部材料采用应变失效准则, 油菜茎秆内部材料采用应力失效准则。对油菜茎秆仿真模型进行网格无关性分析, 选取 3 MPa 时喷嘴入口压力进行仿真计算, 提取切割时茎秆最大应力值, 结果如表 4 所示, 当网格数大于 452 072 时, 最大应力趋于稳定, 选取油菜茎秆仿真模型网格数为 452 072。

表 4 网格数量对动力学仿真结果影响

网格数量 Mesh quantity	最大应力 Maximum stress / $\times 10^6 \text{Pa}$
1 533 672	1.484
1 186 158	1.485
452 072	1.483
227 456	1.414
124 325	1.323

### 1.5 油菜茎秆射流切割仿真方法

本文采用 SPH-FEM 的仿真方法, 对油菜茎秆射流动态切割过程进行仿真分析, 如图 4 所示。整体上分为喷嘴 CFD 两相流仿真与 LS-DYNA 磨粒粒子动态茎秆切割仿真两大部分, 从 CFD 流体仿真中获取射流束流场特性, 经过分析筛选后, 将射流束流场特性导入 LS-DYNA 中进行动力学仿真, 获得茎秆切割的动态特性。

在 CFD 流体仿真中, 定义两相流入口为压力入口, 两相流出口为压力出口, 其余部分为墙壁, 湍流模型选择  $k-\varepsilon$  Realizable 模型并附加增强壁面函数, 气体材料选择可压缩的理想气体, 磨粒选择惰性颗粒并设置材料密度为  $4 000 \text{ kg/m}^3$ , 磨粒质量流量设为  $0.02 \text{ kg/s}$ 。出口压



力设置为 0.1 MPa，仿真参数见表 5。

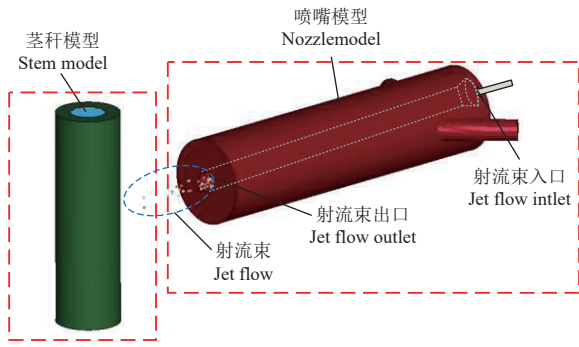


图 4 磨粒气体射流切割动态仿真模型

Fig.4 Dynamic simulation model of abrasive gas jet cutting

在茎秆切割仿真中，射流束通过 SPH-INJECTION 关键字添加，射流束在喷嘴内部混合后由喷嘴出口对外射出，增加横向位移以模拟横向切割过程，油菜茎秆采用外表皮两端固定支撑，内部絮状物两端 3 个方向节点

0 位移约束。

表 5 流体仿真边界条件参数

Table 5 Fluid simulation boundary condition parameters

参数 Parameter	数值 Value
入口压力 Inlet pressure/MPa	0.5、1、3、5、10、20
出口压力 Outlet Pressure/MPa	0.1
颗粒粒径 Particle size/mm	0.1、0.2、0.3
颗粒密度 Particle density/(kg·m <sup>-3</sup> )	4 000

## 2 仿真结果分析

### 2.1 两相流射流束动能传递规律

两相流射流束速度场如图 5 所示，在外流场最大扩张与最小收缩部位分别设置 A、B 截面（图 5a），流场最高速度随射流压力增大而增加，速度由 567.95 m/s（图 5f）增加至 736.37 m/s（图 5a），喷嘴外射流束流场高速射流区域的距离与宽度显著增加，射流速度在喷嘴外先下降后上升，射流压力越大其速度收缩扩张的变化过程越剧烈。

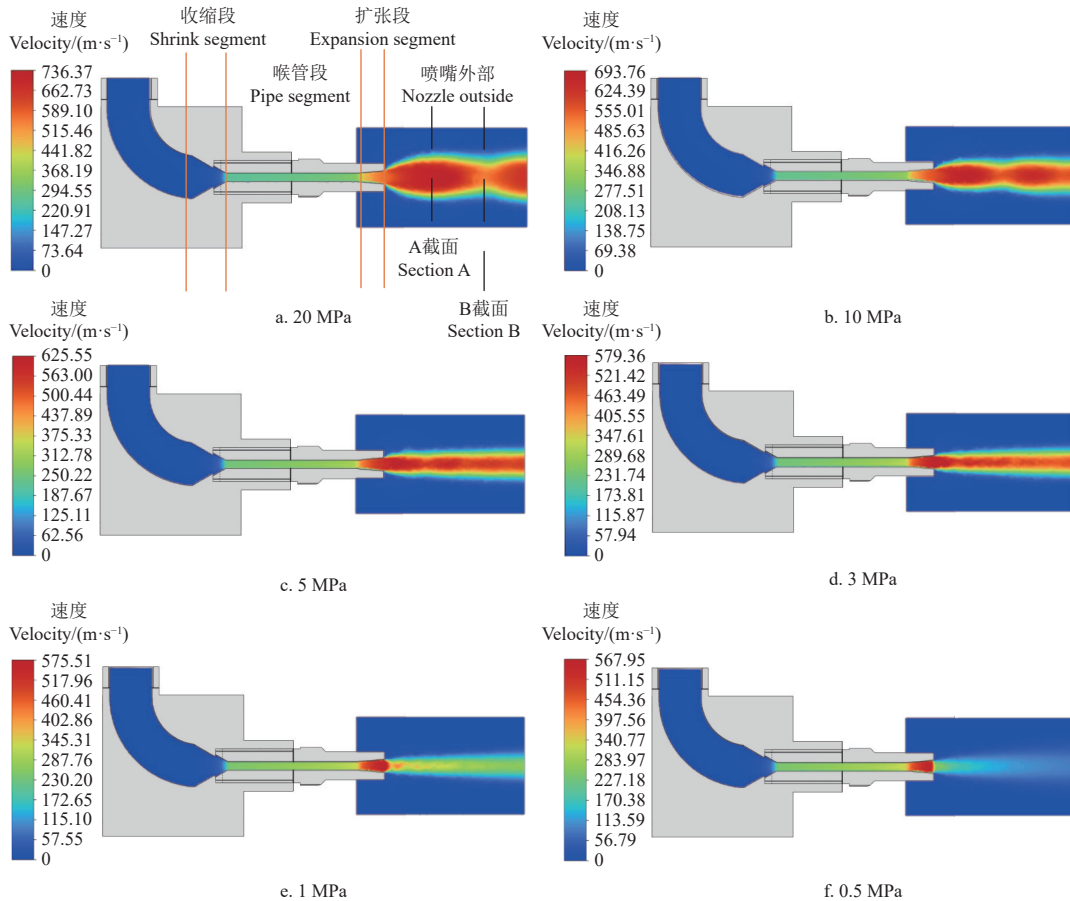


图 5 不同压力下流场速度分布云图

Fig.5 Contour of flow field velocity distribution under different pressures

图 6 为射流速度沿喷嘴轴线分布曲线，不同射流压力条件下在喷嘴收缩段、喉管段以及扩张段的流速变化基本一致。流场速度在射流束离开喷嘴后开始大幅下降，流场最高速度出现在喷嘴出口处。射流压力对流场速度的影响，主要集中在高压射流束离开喷嘴后的外场区域。随着射流压力的增加，两相流射流束的射流动能显著提高，离开喷嘴后射流束的高能集束保持能力得到明显

加强，极大减小了射流速度在径向的扩散性，射流最高速度发生部位会随着射流压力的增大逐渐远离喷嘴出口部位。

如图 7 所示为磨粒速度沿喷嘴轴线分布曲线，射流压力由 0.5 MPa 增加至 1 MPa 时磨粒最大速度提升约 43%，由 1 MPa 提升至 3 MPa 时磨粒最大速度提升约 57%，由 3 MPa 提升至 5 MPa 时磨粒最大速度提升约 31%，由

5 MPa 提升至 10 MPa 时磨粒最大速度增加约 11%，由 10 MPa 提升至 20 MPa 时磨粒最大速度仅提升约 3%。入口压力小于 3 MPa 时通过提高射流压力可提升磨粒最大速度，当压力从 3 MPa 增加至 10 MPa 时，磨粒最大速度提升率从 31% 下降至 11%，在射流压力高于 3 MPa 时压力势能转化为动能的效率会大幅下降。在射流压力为 20 MPa 时，磨粒最大速度为 411.46 m/s，磨粒约 95% 加速过程发生在喉管段与扩张段。10、5 和 1 MPa 射流压力下磨粒加速过程与 20 MPa 基本一致，0.5 MPa 射流压力下磨粒离开喷嘴后速度几乎不变，为 120.43 m/s。

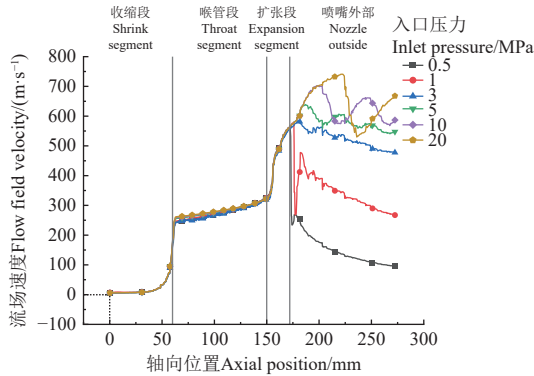


图 6 沿喷嘴轴线的流场速度与压力曲线

Fig.6 Velocity and pressure curve along axis of nozzle

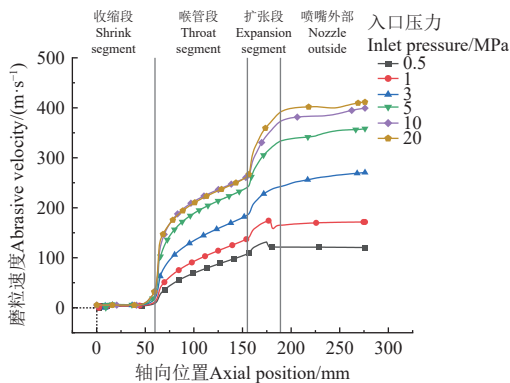


图 7 磨粒速度与入口压力曲线

Fig.7 Abrasive velocity and inlet pressure curve

提取射流压力为 20 MPa 时射流束 A、B 两截面处的压力场云图，如图 8 所示。A 截面对应喷嘴射流束第一次到达最大膨胀进而转为收缩的位置，B 截面对应喷嘴射流束第一次达到最小收缩进而转为膨胀的位置。A 截面处流场内圈压力小于流场外圈压力，内外圈存在的压差导致后续气流向内收缩，流场速度降低；B 截面射流束经过向内收缩后，流场内圈压力大于外圈压力，后续气流再次向外膨胀，流场速度再次上升。射流束主要通过气体膨胀-收缩-膨胀的加速过程，将压力能转化为射流束动能。射流束持续循环波动加速过程，直至射流压力与环境压力相等。

射流压力为 3 MPa 时，气体从收缩段进入喉管段时气体压力第一次急剧下降至 2 MPa 左右，此时流场速度和颗粒速度第一次大幅上升，流场上升至 254.71 m/s，喉管段内气体压力下降梯度变缓，对应流场速度及颗粒

速度的加速也逐渐平缓。从喉管段到扩张段时气体压力再次急剧下降至 0.5 MPa，并在扩张段内逐渐下降至 0.1 MPa，此时流场速度也从 340.96 m/s 进一步提升至 637.61 m/s，颗粒速度从 219.10 m/s 进一步提升至 273.17 m/s。气体离开喷嘴后速度开始出现波动，此时高速气流依然可以为颗粒加速，颗粒在喷嘴外部缓慢加速至 312.17 m/s，达到最大磨粒射流速度。磨粒主要加速区域在喷嘴内部，离开喷嘴磨粒加速大幅降低。

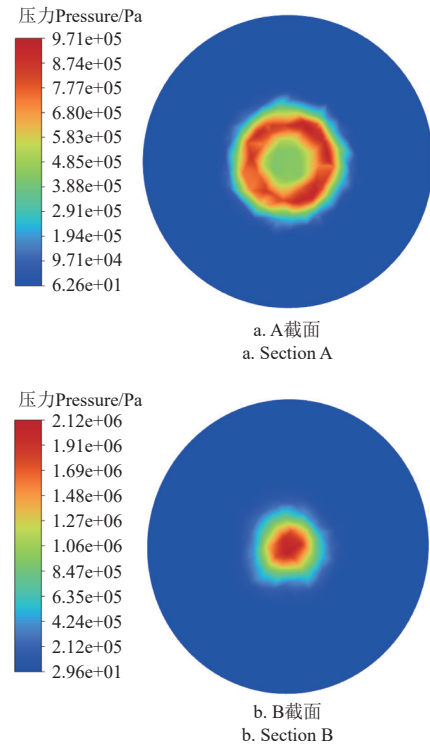


图 8 20 MPa 射流压力下 A、B 两截面压力分布云图

Fig.8 Pressure distribution of sections A and B under 20 MPa jet pressure

图 9 为不同粒径磨粒的速度分布，在相同射流压力及磨粒密度条件下，磨粒最高速度随粒径增大而减小，粒径越大质量惯性越大，需要消耗更多的压力能加速磨粒，其大小会影响加速阶段加速效果。粒径为 0.1 mm 的磨粒最大速度相比于 0.2 mm 粒径的磨粒最大速度高约 15%，0.2 mm 粒径相比于 0.3 mm 粒径最大速度高约 4%。

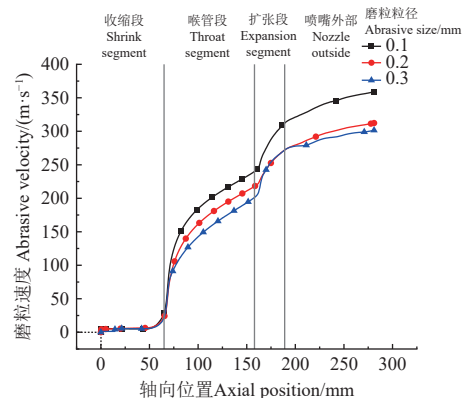


图 9 不同粒径磨粒速度分布曲线

Fig.9 Velocity distribution curve of abrasive particles with different diameters

磨粒大小对其切割动能也有较大影响，如图 10 所示。在相同射流压力及磨粒密度条件下，粒径越大磨粒获得的切割动能越大，0.3 mm 粒径磨粒切割动能最大，为 2.545 J，其后依次为 0.2 与 0.1 mm 粒径磨粒，切割动能分别为 0.817 与 0.134 J。但是粒径越大，喷嘴射流小孔越容易发生堵塞，综合考虑采用 0.2 mm 粒径磨粒。

### 2.2 磨粒气体射流切割过程

图 11 所示为射流压力为 1 MPa、磨粒粒径为 0.2 mm、切割横移速度为 500 mm/s 时，磨粒气体射流切割过程应力分布云图。在 0.00 197 s 时，茎秆外茎受到颗粒冲击发生塑性形变，内茎冲击部位应力扩散方向与外茎应力扩散方向保持一致。由图 11b~11c 可知，射流束在切割过程中会消耗动能，磨粒射流速度迅速减小，致使茎秆在射流束切割前段与终段的材料侵蚀体积不同，整个切

口呈现梯形扩散。由于射流束颗粒对接触面连续冲击剪切作用，切割应力主要集中在射流束侵蚀茎秆接触面上。

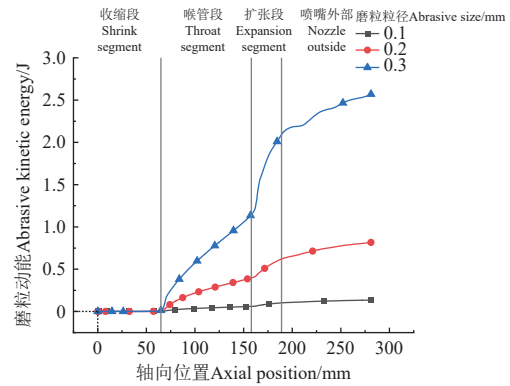


图 10 磨粒动能与磨粒粒径曲线

Fig.10 Abrasive kinetic energy and abrasive size curve

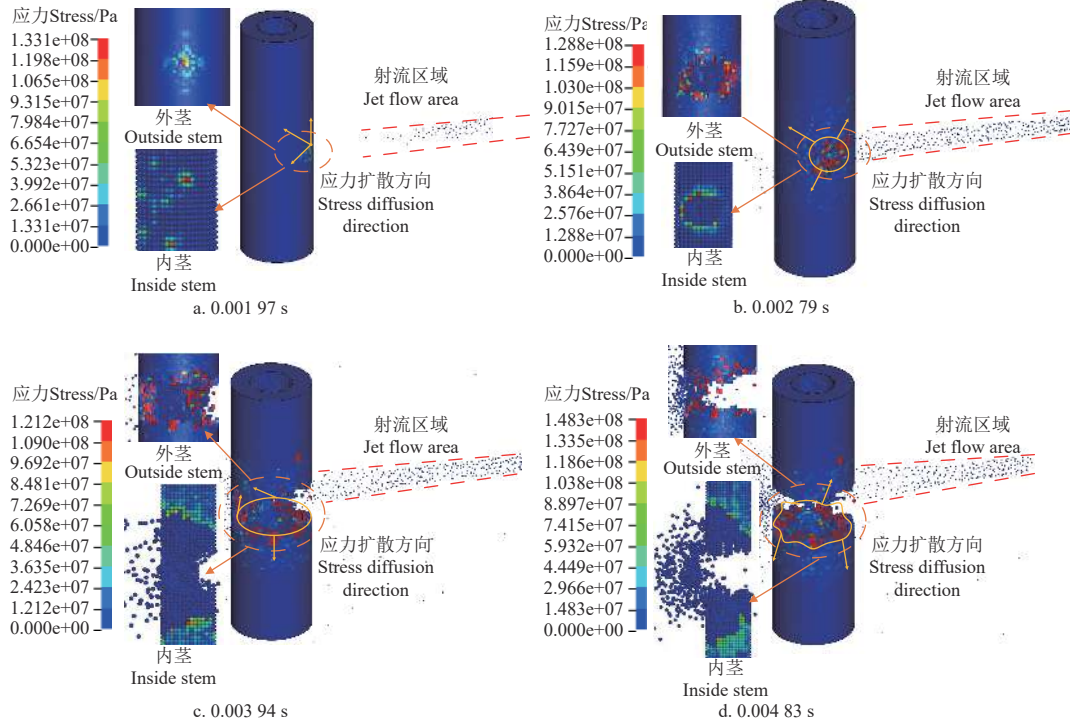


图 11 磨粒气体射流切割过程应力分布云图

Fig.11 Stress distribution diagram of abrasive gas jet cutting process

图 12 为磨粒气体射流切割过程中茎秆切口形状，图 12b 为切割过程中的失效单元分布，浅色部分为切割过程中的失效单元所在区域。

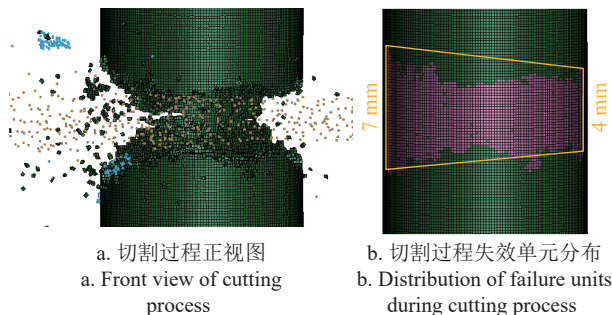


图 12 切割过程中茎秆切口形状及失效单元分布

Fig.12 Stem incision shape and failure units distribution during the cutting process

磨粒在破秆过程中沿径向向外扩散，切口沿射流束轴线呈现扩散梯形，通过统计切口最窄与最宽处的单元数量得出切口宽度最窄部分约 4 mm，最宽部分约 7 mm。

### 2.3 磨粒气体射流切割特性

选取射流靶距、射流压力等关键参数进行射流切割仿真分析，根据喷嘴射流仿真结果选取计算参数如表 6 所示。提取不同条件下茎秆切割侵蚀体积，如图 13 所示，结果表明将射流靶距从 1 mm 增加到 40 mm，侵蚀体积逐渐增加，侵蚀体积与靶距呈三次幂函数相关。射流束磨粒受气流膨胀影响在喷嘴外沿径向扩散，导致射流束产生射流扩散角，增加射流靶距会导致射流束直径增加，茎秆切口侵蚀体积也随之增加。在 1 mm 射流靶距时侵蚀体积最小，此距离内射流束的扩散处于起始阶段，作用于茎秆上的射流束直径较小；1~10 mm 射流靶



距内侵蚀体积第一次快速增大,射流束发生一定扩散,导致茎秆上切割区域明显增大,此时射流束内高速颗粒分布较为密集,冲击切割效率较高;10~30 mm 靶距内射流束扩散距离变大,轴线附近高速颗粒未大范围扩

散,射流束扩散颗粒消耗部分动能,致使侵蚀体积增长出现减缓趋势;大于 30 mm 靶距时,射流束有了充分扩散距离,轴线附近高速颗粒迅速发生扩散,侵蚀体积再次增大。

表 6 侵蚀体积影响因素仿真参数设置

Table 6 Simulation parameter settings for erosion volume influencing factors

影响因素 Influencing factors	喷嘴喉管直径 Nozzle pipe diameter $d$ /mm	射流靶距 Jet target distance $L$ /mm	射流压力 Jet pressure/MPa	磨粒直径 Abrasive diameter $D$ /mm
射流靶距 Jet target distance	4	5、10、20、30、40	3	0.2
气源压力 Pressure	4	20	0.5、1、1.5、2、2.5	0.2

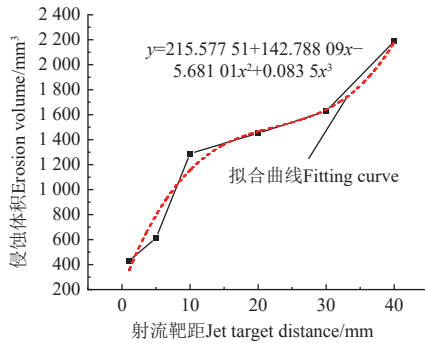


图 13 射流靶距对侵蚀体积的影响曲线

Fig.13 Effect of jet target distance on erosion volume

图 14 为射流压力对侵蚀体积的影响,结果表明将压力从 0.5 MPa 增加到 2.5 MPa 时,切口侵蚀体积逐渐减小,射流压力与侵蚀体积呈三次幂函数相关。增加射流压力会增大射流束磨粒速度,相同靶距时射流束扩散性减弱。射流压力在 3 MPa 以内时动能传递效率较高,增大压力时磨粒速度快速增加,使得射流束在接触茎秆前扩散时间减少,射流束作用于茎秆的面积减小。

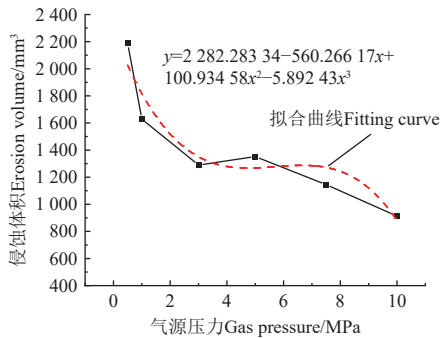


图 14 射流压力对侵蚀体积的影响曲线

Fig.14 Effect of jet pressure on erosion volume

图 15 为低压射流对磨粒速度的影响,0.2 MPa 射流压力时磨粒最高速度为 67.63 m/s,0.3 MPa 射流压力时磨粒最高速度为 102.71 m/s,0.4 MPa 射流压力时磨粒最高速度为 123.85 m/s。结果表明低压时磨粒最高速度出现在喷嘴内部,在离开喷嘴前会降低,压力越高磨粒离开喷嘴前速度降幅越大。

低压射流仿真结果表明,流场速度在离开喷嘴后快速下降,流体内压力势能过低,不足以支撑流体继续加速,相反高速流体会导致射流束内存在负压区,致使大气中空气反向压缩,使磨粒速度降低。在射流压力低于

0.4 MPa 时,射流压力越高,负压的压差越高,磨粒速度降幅越大。

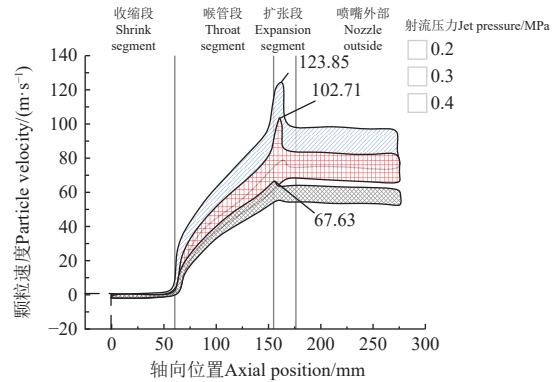


图 15 低压射流对磨粒速度的影响

Fig.15 Influence of low-pressure jet on abrasive velocity

设置不同磨粒速度进行射流切割时临界切割条件的仿真分析,图 16 为磨粒速度与切割效果关系,结果表明磨粒射流速度小于 100 m/s 时候无法完成油菜茎秆切割,对应射流压力为 0.3 MPa;磨粒速度在 120 m/s 时可以实现茎秆切割,此时对应射流压力约为 0.4 MPa。

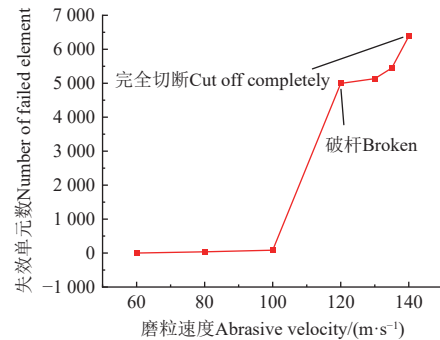


图 16 磨粒速度与切割效果关系

Fig.16 Relationship between abrasive velocity and cutting effect

### 3 油菜茎秆射流切割试验

#### 3.1 试验原理

图 17a~17b 为油菜茎秆磨粒气体射流切割试验系统,主要由气源、连接管路、气路控制阀、喷嘴、气固混合装置、茎秆夹持装置及电器控制系统等组成。高压空压机为整个系统提供气源,最大产气量为 0.3 m³/min;气固混合装置结构如图 17c 所示,为试验系统供给磨粒,磨粒材料为密度为 4×10³ kg/m³ 的白刚玉,通过磨料流量

调节阀可调节射流气体与磨粒的流量；射流喷嘴为 laval 型喷嘴，固定安装于三自由度滑台上，实现射流靶距及横移切割速度的调节。

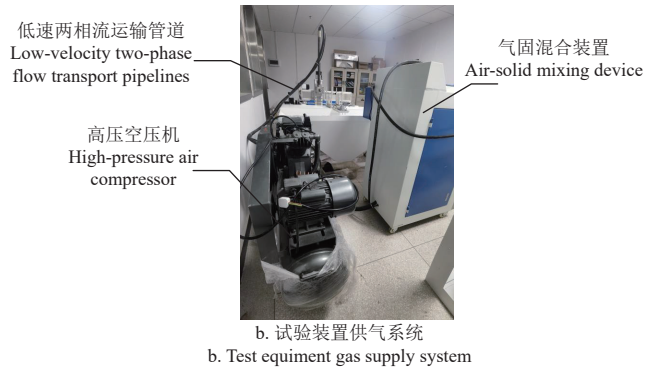


图 17 试验系统  
Fig.17 Test system

试验分 3 组进行，综合对比分析射流靶距与横移切割速度对切割性能的影响。试验射流压力为 3 MPa，喷嘴口径为 4 mm，磨粒密度为 4 000 kg/m<sup>3</sup>，切割靶距为 5~20 mm，横移切割速度为 5~20 mm/s，具体试验方案参数见表 7。试验记录切断茎秆所需切割次数、切口截面形状、平整度及切口宽度，综合分析切割效果。

表 7 磨粒气体射流切割试验参数

Table 7 Abrasive air jet cutting test parameters

试验组 Test group	靶距 Target distance/mm	切割速度 Cutting velocity/(mm·s <sup>-1</sup> )
1	5	5、10、20
2	10	5、10、20
3	20	5、10、20

选取直径为 10~20 mm 收获期油菜茎秆作为试验靶材，其弹性模量约为 1 000 MPa，剪切模量约为 0.5 MPa，屈服应力约为 15 MPa，最大剪切应力为 1.33~20.03 MPa，泊松比为 0.23~0.33。试验前对试验样品切割区域用方框进行初始标记，如图 18a 所示，试验切割过程如图 18b 所示。

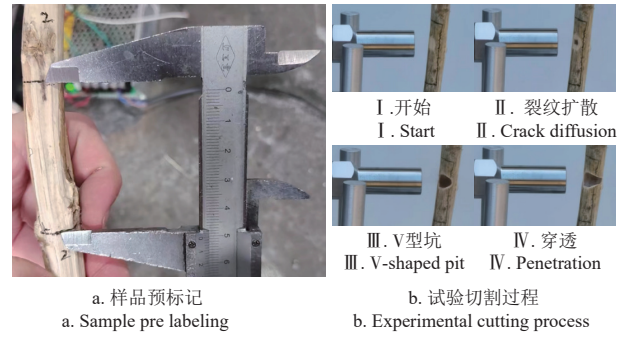


图 18 切割试验  
Fig.18 Cutting test

### 3.2 试验结果与分析

磨粒气体射流切割试验效果如图 19 所示，切口为不平整、不规则的向外扩散形状，外形与仿真结果基本一致，表 8 为不同试验参数的测试结果。

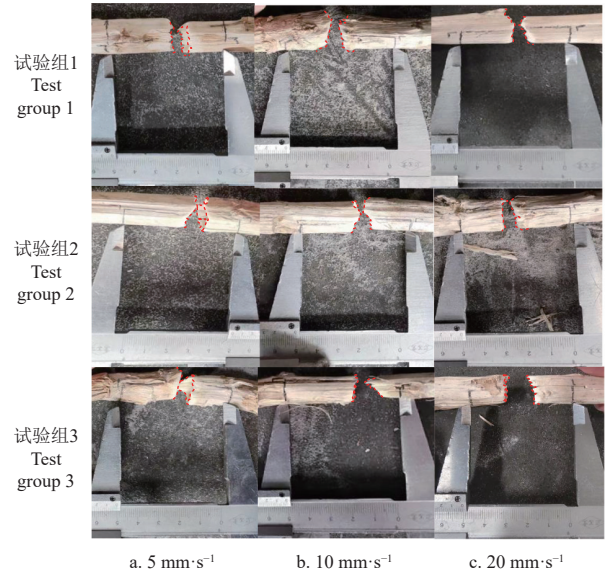


图 19 切割效果图  
Fig.19 Cutting effect images

表 8 不同试验参数的切割效果

Table 8 Cutting effects under different test parameters

靶距 Target distance/mm	切割速度 Cutting velocity/(mm·s <sup>-1</sup> )	切割次数 Cutting times	时间 Time/s	最小切口宽度 Min cutting width/mm	最大切口宽度 Max cutting width/mm
5	5	1	0.4~0.6	1.87	6.23
	10	2~3	0.8~1.4	3.09	6.76
	20	2~4	0.9~1.8	3.21	6.97
10	5	1~2	0.4~0.9	3.14	8.21
	10	2~4	0.8~1.7	3.56	8.43
	20	3~5	1.5~2.1	3.83	8.77
20	5	1~2	0.6~0.9	4.11	9.78
	10	3~4	1.4~1.7	4.24	10.15
	20	3~5	1.6~2.3	5.37	10.37

横移切割速度为 5 mm/s 时，试验组 1 中切割次数为 1 次，试验组 2 与试验组 3 中切割次数最多需要 2 次；横移切割速度均为 10 mm/s 的条件下，试验组 1 切割次数最少为 2 次，最多为 3 次，试验组 2 最少切割次数为 2 次，最多为 4 次，试验组 3 最少切割次数为 3 次，最多为 4 次；横移速度均为 20 mm/s 的条件下，试验组 1



最多切割次数为4次, 试验组2、3均需要3~5次才能完全切断。试验表明切割靶距会影响磨粒气体射流切割能力, 切割能力会随切割靶距增加而减弱。

在试验组1中, 横移速度为5 mm/s时最小切口宽度1.87 mm, 最大切口宽度6.23 mm, 横移速度为10 mm/s时最小切口宽度最大, 为3.09 mm, 横移速度为20 mm/s时最大切口宽度为6.76 mm, 最小切口宽度的最小值和最大值相差1.22 mm, 最大切口宽度的最小值和最大值相差0.53 mm; 在试验组2和试验组3中最小切口宽度的最小值和最大值差值分别为0.69 mm与1.26 mm, 最大切口宽度最小值和最大值相差0.56和0.59 mm。综合对比3组试验, 横移速度均为5 mm/s时, 最小切口宽度分别为1.87、3.14和4.11 mm, 最大切口宽度分别为6.23、8.21和9.78 mm, 切口宽度随靶距增大而增大, 且相对于横移切割速度切割靶距对切口宽度的影响作用更大。试验结果表明, 油菜茎秆磨粒气体射流切割装置在3 MPa气源压力、5 mm靶距、5 mm/s横移速度时可稳定高效地切割油菜茎秆。

本文将射流技术应用于油菜茎秆切割, 开展的仿真及试验均采用单株油菜茎秆以及单喷嘴。在实际收获作业中, 油菜茎秆含水率、切割部位、切割数量以及切割角度等均会影响最终切割效果<sup>[32]</sup>。因此, 关于油菜茎秆射流切割技术仍有较多问题需要探索, 后续可从多个角度开展, 将该技术从理论研究向实际应用推进。在射流技术中, 通过使用不同射流压力、磨粒材料、不同喷嘴形式、入射角度等可赋予射流不同性能<sup>[33]</sup>, 因此, 射流技术不仅可用于油菜茎秆切割, 通过改变关键工艺参数可使其在作物茎秆切割方面有更广泛应用。

## 4 结 论

1) 射流束在喷嘴外受气流内部压力及气体膨胀作用下, 呈现膨胀-收缩-膨胀的加速过程, 可有效将压力能转化为射流动能。在20 MPa射流压力时, 流场最大速度为736.37 m/s, 磨粒最大速度为411.46 m/s, 最大速度均在喷嘴外流场, 磨粒的加速过程约95%发生在喉管段与扩张段。

2) 磨粒气体射流压力从0.5 MPa增加到20 MPa时, 射流束中磨粒最大速度从120.43 m/s提升到411.46 m/s。随着射流压力增加, 压力势能转化为磨粒动能的效率下降。当压力从3 MPa增加至10 MPa时, 磨粒最大速度提升率从31%下降至11%。在相同射流压力下, 磨粒粒径与磨粒最大速度呈反比。磨粒粒径越大获得的动能越大, 0.3 mm磨粒粒径的切割动能最大, 其后依次为0.2与0.1 mm粒径磨粒。磨粒粒径越大喷嘴射流小孔越容易发生堵塞, 宜采用0.2 mm粒径磨粒。

3) 当射流靶距从1 mm增加到40 mm, 侵蚀体积逐渐增加; 当射流压力从0.5 MPa增加到10 MPa时, 侵蚀体积逐渐减小。仿真结果表明, 茎秆切割侵蚀体积随射流靶距增加而变大, 随射流压力增加而变小。侵蚀体积与靶距、射流压力均呈三次幂函数相关。磨粒速度在

120 m/s时可以实现茎秆有效切割, 对应射流压力约为0.4 MPa。

4) 油菜茎秆气体射流切割能力, 主要受横移切割速度影响, 切割靶距影响相对较小; 茎秆切割效果主要受切割靶距影响, 横移速度影响相对较小。横移切割速度为5 mm/s, 且切割靶距小于10 mm时可稳定一次切断; 横移切割速度超过5 mm/s时均无法一次切断; 切割靶距为5 mm, 横移切割速度为5 mm/s时, 切口最小宽度和最大宽度值均最小, 分别为1.87和6.23 mm。

## [参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] 国务院. 关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[国发(2018)42号][EB/OL]. (2018-12-21) [https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content\\_5355467.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5355467.htm).
- [3] 冉军辉, 沐森林, 李海同, 等. 油菜联合收获机往复双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 17-25.  
RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and test of planet gear driver of reciprocating double-acting cutter for rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 17-25. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李仲恺, 谢方平, 刘科, 等. 油菜收获圆盘式切割器的设计与性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 83-88.  
LI Zhongkai, XIE Fangping, LIU Ke, et al. Design and performance evaluation of a disc cutter for rape harvest[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(1): 83-88. (in Chinese with English abstract)
- [5] HU Y, PAN J B, DAI Q W, et al. Solid particle erosion-wear behavior of SiC particle-reinforced Si matrix composite and neat Si-A comparison[J]. *Wear*, 2022, 496-497: 204286.
- [6] MELENTIEV R, FANG F Z. Recent advances and challenges of abrasive jet machining[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, 22: 1-20.
- [7] 张宏图, 杨耀浦, 刘勇, 等. 低压磨料空气射流切槽辅助TBM滚刀破岩规律研究[J/OL]. 煤炭学报, (2023-11-02). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0770  
ZHANG Hongtu, YANG Yaopu, LIU Yong, et al. Study on rock breaking law of TBM hob assisted by low pressure abrasive air jet grooving[J/OL]. Journal of China Coal Society, (2023-11-02). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0770 (in Chinese with English abstract)
- [8] TSAI F C, KE J H. Abrasive jet polishing of micro channels using compound SiC abrasives with compound additives[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5): 1151-1159.
- [9] 钱炳坤, 孙玉利, 张桂冠, 等. 低温微磨料气射流加工微流道专用机床[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(1): 93-100.  
QIAN Bingkun, SUN Yuli, ZHANG Guiguan, et al. Micro-channel special machine tool for cryogenic micro abrasive air jet machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(1): 93-100. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [10] 刘勇, 代硕, 魏建平, 等. 低压磨料空气射流破硬岩规律及特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1172-1182.  
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Experimental study on hard rock breaking laws and characteristics by low-pressure abrasive air jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1172-1182. (in Chinese with English abstract)
- [11] LI S, CHEN S S, HAN F, et al. Development and optimization of cold plasma pretreatment for drying on corn kernels[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 217-221.
- [12] ZHANG G G, SUN Y L, GAO H, et al. Characteristics of cryogenic abrasive air-jet direct write machining: A comparison with abrasive air jet direct-write machining at oblique angles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117394.
- [13] 王凯, 柳涵宇, 王李科, 等. 颗粒体积浓度对半开式叶轮离心泵泄漏涡和磨损的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 44-53.  
WANG Kai, LIU Hanyu, WANG Like, et al. Effects of particle volume concentration on the leakage vortex and erosion characteristics of semi-open centrifugal pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩明兴, 李淼, 段宏兵, 等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 109-118.  
HAN Mingxing LI Miao DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 109-118. (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵吉坤, 宋武斌, 李晶晶. 基于 EDEM 的水稻秸秆建模及力学性能分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1086-1093.  
ZHAO Jikun, SONG Wubin, LI Jingjing. Modeling and mechanical analysis of rice straw based on discrete element mechanical model[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1086-1093. (in Chinese with English abstract)
- [16] LEBLICQ T, SMEETS B, VANMAERCKE S, et al. A discrete element approach for modelling bendable crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 141-149.
- [17] SADRMANESH V, CHEN Y. Simulation of tensile behavior of plant fibers using the discrete element method(DEM)[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2018, 114: 196-203.
- [18] 谭秋亭, 方瀚祯, 杨其锦, 等. 采用 SPH 方法的黏土切削特性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 49-57.  
TAN Qiuting, FANG Hanzhen, YANG Qijin, et al. Cutting characteristics analysis of clay using SPH method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(19): 49-57. (in Chinese with English abstract)
- [19] 高涛, 谢守勇, 胡嫚, 等. 基于亚塑性本构模型的土壤-触土部件 SPH 互作模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 47-55.  
GAO Tao, XIE Shouyong, HU Man, et al. Soil-soil engaging component SPH model based on a hypoplastic constitutive model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 47-55. (in Chinese with English abstract)
- [20] THANOMPOTRA S, KIATIWAT T. Simulation study of cutting sugarcane using fine sand abrasive water jet[J]. Agriculture and Natural Resources, 2016, 50: 146-153.
- [21] HAGELE F, NUBLING S, SCHWEIGERT R M, et al. Comparison of fresh-cut iceberg (*Lactuca sativa* L) and endive (*Cichorium endivia* L)[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(12): 2071-2081.
- [22] CARRENO-OLEJUA R, HOFACKER W C, HENSEL O. High-pressure water-jet technology as a method of improving the quality of post-harvest processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(6): 853-860.
- [23] 张文超, 武美萍, 任仲贺. 基于 LS-DYNA 仿真的射流加工参数分析[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 268-276.  
ZHANG Wenchao, WU Meiping, REN Zhonghe. Analysis of jet flow machining parameters based on LS-DYNA simulation[J]. Surface Technology, 2017, 46(10): 268-276. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吕东喜, 黄燕华, 唐永健, 等. 基于 SPH 算法的磨粒冲击工件表面过程数值模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 169-174.  
LU Dongxi, HUANG Yanhua, TANG Yongjian, et al. Simulating process of abrasive impacting a workpiece surface based on SPH method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 169-174. (in Chinese with English abstract)
- [25] CUI Y, LI Z, FANG J, et al. Crater effects of shallow burial explosions in soil based on SPH-FEM analysis[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1114178.
- [26] 刘勇, 李志飞, 魏建平, 等. 磨料空气射流破煤冲蚀模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1733-1742.  
LIU Yong, LI Zhifei, WEI Jianping, et al. Erosion model of abrasive air jet used in coal breaking[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1733-1742. (in Chinese with English abstract)
- [27] XU X Y, TIAN L Y, YU P. Multiscale SPH simulations of viscoelastic injection molding processes based on bead-spring chain model[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2023, 149: 213-230.
- [28] 周新超, 马小晶, 廖翔云, 等. 磨料水射流冲击孔隙岩体的 SPH 模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 731-739.  
ZHOU Xinchao, MA Xiaojing, LIAO Xiangyun, et al. Numerical simulation of abrasive water jet impacting porous rock based on SPH method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 731-739. (in Chinese with English abstract)
- [29] 谢伟, 彭磊, 蒋蕤, 等. 收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112-120.  
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112-120. (in Chinese with English abstract)

- [30] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73-82. LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [31] 蒋亚军, 廖宜涛, 廖庆喜. 基于 P-K 失效模型的饲用油菜茎秆仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(3): 309-318. JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Simulation parameters calibration for P-K failure model of fodder rapeseed stalk[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(3): 309-318. (in Chinese with English abstract)
- [32] BERTHET M A, GONTARD N, ANGELLIER-COUSSY H, et al. Impact of fiber moisture content on the structure/mechanical properties relationships of PHBV/wheat straw fibers biocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2015, 117: 386-391.
- [33] 胡焰, 陈加东, 戴庆文, 等. 磨料射流加工技术的发展与研究现状[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 80-98. HU Yan, CHEN Jiadong, DAI Qingwen, et al. Recent advances and status of abrasive jet machining technology[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 80-98. (in Chinese with English abstract)

## Simulation and experiments of abrasive gas jet cutting for rapeseed stem using SPH-FEM

HAN Mingxing, YU Kai, DUAN Hongbing<sup>\*</sup>, XIONG Lirong, XU Kun, LI Miao, LIU Qi

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Rapeseed harvest cutting tools have been confined to large vibrations, entanglement, wear, and low efficiency. In this study, gas jet cutting was proposed for rapeseed stems using abrasive particles. This technique aimed to achieve the non-contact cutting between the machinery and the rapeseed, thereby ensuring efficient and low-consumption harvesting of rapeseed. The dynamic jet cutting of rapeseed stems was simulated using the smooth particle hydrodynamics-finite element method (SPH-FEM). The energy transfer between gas and solid phases was obtained for the dynamic behavior of the jet cutting. A test system was constructed to experimentally verify the jet cutting. The research results indicate that the maximum speeds of the airflow and abrasive particles were 741 and 411 m/s, respectively, when using a high-speed nozzle with a 4 mm diameter at a jet pressure of 20 MPa. Approximately 95% of the acceleration occurred in the throat and expansion sections. The external flow field of the nozzle exhibited a fluctuating pattern with the first decreasing and then increasing. The greater the jet pressure was, the more pronounced the velocity contraction and expansion fluctuations were. The jet beam primarily accelerated during gas expansion-contraction-expansion, thus converting the pressure into the kinetic energy of the jet beam. Once the inlet pressure increased from 3-10 MPa, the acceleration efficiency of the abrasive particles decreased from 31% to 11%. When the pressure exceeded 3 MPa, there was a further increase in the jet pressure, leading to a significant reduction in the efficiency of converting jet beam pressure energy to kinetic energy. At the same time, the maximum speed of abrasive particles with a diameter of 0.1 mm was 19% higher than that with a diameter of 0.3 mm. The larger the diameter of the abrasive particles were, the greater the cutting kinetic energy they obtained. Among them, 0.3 mm diameter abrasive particles exhibited the highest cutting kinetic energy, followed by 0.2 mm, and then 0.1 mm diameter. The minimum jet pressure of 0.4 MPa was required for the cutting rapeseed stems, with a lateral movement speed of 5 mm/s. Therefore, the stem was cut through in a single pass at a target distance of 10 mm. Once the lateral movement speed exceeded 5 mm/s, there was no cutting through in a single pass. When the jet nozzle was positioned 5 mm away from the target and the lateral movement speed was 5 mm/s, the minimum volume of cutting erosion was achieved in the incision widths ranging from 1 to 6 mm. The findings can also be applied to the cutting of similar crop stems. Theoretical and technical support can also be offered for the non-contact high-efficiency cutting equipment in modern agriculture.

**Keywords:** fluid structure coupling; simulation; smooth particle dynamics; abrasive air jet; rapeseed stem; stem cutting