

螺纹管吸附式名优茶采收器设计与试验

陈建能^{1,2} 李杭¹ 任萍³ 贾江鸣^{1,2} 赵润茂^{1,2} 武传宇^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 浙江省余姚市农业机械化技术推广中心, 余姚 315402)

摘要: 针对名优茶选择性采摘时,因茶叶附壁导致收集成功率低的问题,根据一芽二叶的物理参数设计了一种螺纹管吸附式茶叶采收器。通过预试验得到了影响茶叶收集成功率的因素:负压、螺纹线数和螺纹导程的参数范围;采用 Fluent 仿真和 Box - Behnken 响应面分析法,研究各因素对茶叶收集成功率的影响。试验结果表明:3 个因素改变管内近壁面处的空气切向速度;各因素对收集成功率的影响显著性主次排序为:负压、螺纹导程、螺纹线数;以茶叶收集成功率为优化目标对各参数进行优化并对优化后的参数取整,得到参数为:负压 $H = 120\text{ Pa}$ 、螺纹线数 $N = 9$ 、螺纹导程 $S = 95\text{ mm}$ 。以优化后的参数进行吸附式收集试验,结果表明收集成功率为 98%,即优化后收集成功率相较于优化前提高 26 个百分点,试验值与预测值的相对误差小于 5%,优化模型结果可靠。

关键词: 名优茶; 采收器; 螺纹管吸附式

中图分类号: S225.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0131-09 OSID: 

Design and Experiment of Threaded Tube Adsorption Type Famous Tea Harvester

CHEN Jianneng^{1,2} LI Hang¹ REN Ping³ JIA Jiangming^{1,2} ZHAO Runmao^{1,2} WU Chuanyu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China

3. Yuyao Agricultural Mechanization Technology Promotion Center of Zhejiang Province, Yuyao 315402, China)

Abstract: In order to solve the problem of low collection success rate caused by the attachment of tea leaves to the wall during selective picking of famous tea, a tea harvester was designed according to the physical parameters of one bud and two leaves. The factors that affecting the success rate of tea collection were obtained through pre-test: the negative pressure value, the number of thread lines and the parameter variation range of thread lead. Fluent simulation and Box - Behnken response surface analysis were used to study the interactive influence of various factors on the success rate of tea collection. The experimental results showed that three factors changed the tangential velocity of air near the wall in the pipe; in the order of significance, the influence of each factor on the success rate of collection was negative pressure value, thread lead and thread number; taking the success rate of tea collection as the optimization goal, the parameters were optimized and rounded, and the parameters were obtained as follows: negative pressure value $H = 120\text{ Pa}$, thread number $N = 9$, thread lead $S = 95\text{ mm}$. The optimized parameters were used to carry out adsorption collection test, the results showed that the success rate of tea collection under this condition was 98%, that was, the success rate of tea collection after optimization was 26 percentage points higher than that before optimization, and the relative error between the experimental value and the predicted value was less than 5%, so the optimization model was reliable.

Key words: famous tea; harvester; threaded tube adsorption type

0 引言

近年来,名优茶产值占比逐年提高^[1-3],成为茶产业的支柱。目前,大宗茶的采摘基本实现了机械化,而名优茶的采摘主要依靠人工,但随着“采茶工荒”现象^[4]日益严重以及劳动力成本的上升,制约了茶叶的产量和效益。目前,名优茶机械化采摘主要分为:茶叶识别^[5-8]、定位^[9-10]、机械臂轨迹规划^[11-12]、采收器设计及茶叶收集^[13-14]。其中,采收器负责完成茶叶采摘;负压收集装置完成茶叶收集。

对于名优茶采收,国内外学者进行了相关研究。如许丽佳等^[15]设计了一种可夹提式的茶叶嫩梢采收器,通过将采收器安装在串联机械臂上并采用负压收集的方式对被采茶叶进行收集。贾江鸣等^[16]设计了一款手持式茶叶采收器,其通过仿生原理,即模拟人工采茶时手指的采摘动作,将茶芽提拉断梗后,通过主从动手指的转动将茶叶送至采收盒内。ZHU 等^[17]设计的采收器通过钢丝绳的提拉动作形成两刀片的剪切动作,待采芽叶被剪断后通过负压作用进入收集箱。由于茶园环境复杂、采收器整体结构过大等原因,以上提出的采收器难以实现机械化采茶并且工作效率有待进一步提高。

对茶叶进行吸附式收集时,发现有部分茶叶贴附在管壁上,导致这部分茶叶无法收集。部分学者对气固或固液两相流动中的颗粒沉积(附壁)这一问题进行了研究。李立军^[18]采用起旋管生成螺旋流,从而增加海水携带天然气水合物的能力,能够有效降低水合物沉积管壁所造成的管道堵塞现象。李郁^[19]采取气力输送物料并利用螺旋叶片产生的螺旋流解决物料沉积在管壁这一问题;该方法同时也能够提高物料的输送效率。梁俊等^[20]通过纽带起旋生成螺旋流进而解决水合物颗粒沉积所造成的管道堵塞问题。由此可见,螺旋流对气固两相流中的颗粒沉积问题具有一定的改善效果。

为实现名优茶的选择性采摘及高效收集,本文根据名优茶采收机理进行采收器结构设计并进行采收试验;对茶叶附壁导致收集成功率低的问题进行优化。基于名优茶的物理参数设计采收器并进行采收试验。对茶叶进行吸附式收集时,采用波纹管的方式在管壁附近生成螺旋流,以期解决茶叶附壁问题,提高茶叶收集成功率。对影响茶叶收集成功率的3个因素进行响应面优化试验,进行参数寻优,并对最优参数进行试验验证。

1 名优茶采收器设计

名优茶采摘主要以一芽二叶为主,同时也包含

单芽、一芽一叶。相较于一芽二叶,单芽、一芽一叶的叶展、叶宽、剪切力较小,为实现采收器对名优茶采摘的适用性,本文以一芽二叶为研究对象。

1.1 一芽二叶物理参数测定

如图1所示,通过确定一芽二叶的叶展 a 、叶宽 b 、剪切力 F 以及茶园中一芽二叶的生长密度 S_A 来合理设计名优茶采收器结构。

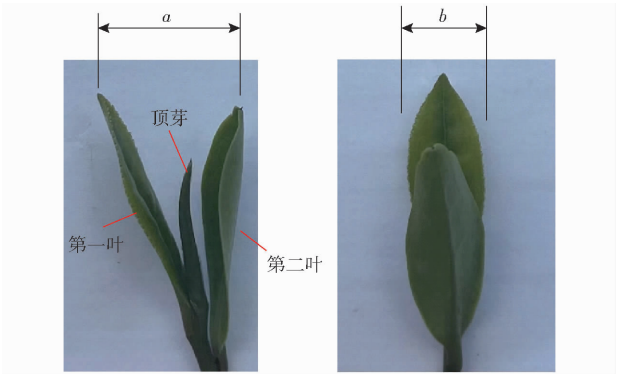


图1 茶叶尺寸参数

Fig.1 Size parameters of tea

在国家茶叶产业技术体系丽水综合试验站测量茶叶物理参数。茶叶品种为龙井43,茶叶物理特性的测量样本为随机选取的50片新鲜茶叶。如图2所示,测量工具是精度为0.01 mm的德国艾瑞泽游标卡尺;精度为示值0.5%以内的WDW-1000型微机控制电子万能试验机(温州韦度电子有限公司)。 S_A 的量具为自制方框,边长为0.29 m。测量方法是将方框放置在茶树树冠上,框架内茶芽数为 x , S_A 计算式为

$$S_A = \frac{x}{0.29 \times 0.29} \tag{1}$$

共测量20次。



图2 茶叶剪切力及生长密度测量

Fig.2 Measurement of shear force and growth density of tea

对测量结果进行统计,如表1和图3所示。结果表明,一芽二叶存在较大的个体差异,因此,要求

表1 茶叶物理参数

Tab.1 Physical parameters of tea

参数	最大值	最小值	平均值	标准偏差
叶展/mm	25.90	8.40	15.35	3.47
叶宽/mm	11.50	5.90	8.60	1.45
剪切力/N	3.90	2.10	2.89	0.53
生长密度/(个·m ⁻²)	130.8	71.3	103.7	18.1

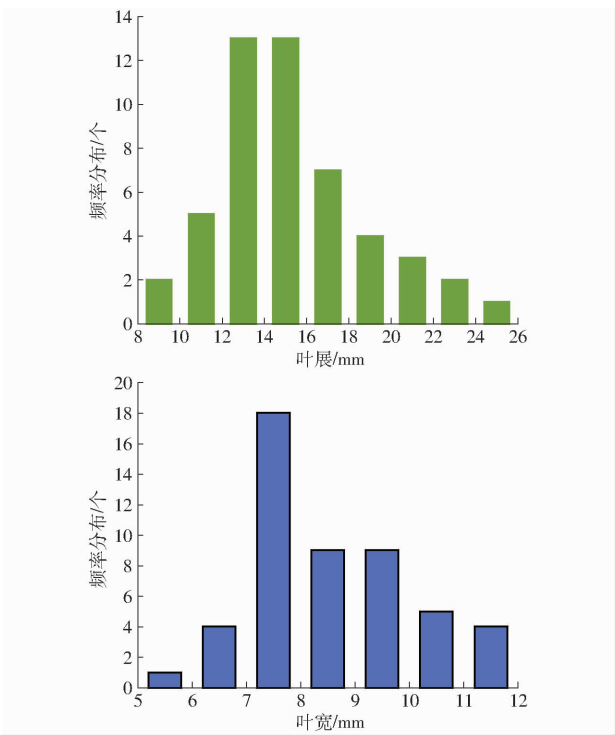


图 3 尺寸参数频率分布

Fig.3 Frequency distributions of dimension parameters

茶叶采收器具有较强的适应性。

1.2 采收器整体结构与工作原理

根据茶叶嫩芽主要分布在树冠表层这一特点，采用自上而下的采摘方式可有效减少障碍物干扰。采收器结合轻量化、集成化要求进行设计，如图 4 所示，包括舵机、末端管、传动机构和剪切机构。

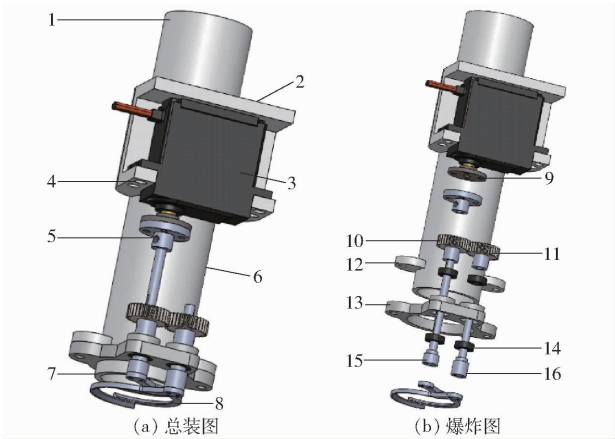


图 4 茶叶采收器

Fig.4 Tea harvester

1. 末端管上管口 2. 连接平台 3. 舵机 4. 舵机支架 5. 连接法兰 6. 末端管 7. 末端管下管口 8. 环形刀 9. 舵盘 10. 主动凸台齿轮 11. 被动凸台齿轮 12. 固定法兰 13. 固定安装板 14. 轴承 15. 第 1 阶梯轴 16. 第 2 阶梯轴

舵机作为源动件，其扭力与环形刀最后所形成的剪切力密切相关。为保证环形刀的剪切力足以剪断嫩芽，故本文选用 DS3135 型舵机，其力矩为 4 N·m，转角为 180°。

综合表 1 茶叶物理参数中叶展、叶宽、密度、茶园采摘环境等因素，设定末端管内径 $D = 30\text{ mm}$ ，考虑到采收器的各零部件安装所需空间，设定末端管高 $h = 150\text{ mm}$ ，末端管采用 3D 打印成型，材料为 PLA。

传动机构为齿轮传动。主要由连接法兰、一对相啮合的凸台齿轮、2 根阶梯轴组成。其中，连接法兰与舵盘通过螺栓紧固在一起；连接法兰与主动凸台齿轮紧固在第 1 阶梯轴上，被动凸台齿轮紧固在第 2 阶梯轴上。

剪切机构为固定在 2 根阶梯轴底部的一对环形刀，环形刀半径与末端管下管口的半径相适应，可以有效避免刀片与目标物周围的障碍物发生干涉。

茶叶采收器工作步骤如下：采收器到达剪切点上方后负压收集装置开启，在末端管内及下管口附近产生负压。并联机械臂带动采收器垂直下降至剪切点位置，待采茶叶在负压引导的作用下进入末端管内，舵机间接驱动环形刀片完成剪切动作；被采下来的茶叶依次经过末端管、波纹管后进入负压收集装置内部的收集盒，与此同时，舵机控制环形刀复位。

1.3 采收器试验

搭建整机试验平台如图 5a 所示。其中，末端管上管口通过波纹管连接到负压收集装置；末端管内壁光滑且上管口负压为 100 Pa。图 5b 为采收器固定在机械臂动平台上的局部视图。

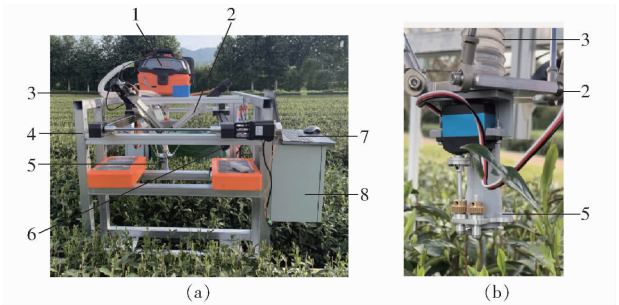


图 5 试验平台

Fig.5 Test platform

1. 负压收集装置 2. 并联机械臂 3. 波纹管 4. 底盘 5. 采收器 6. 相机 7. 显示器 8. 控制箱

试验中，采收器能够有效完成茶叶嫩芽采摘，但对被采茶叶进行吸附式收集时，部分茶叶会出现如图 6 所示的附壁现象导致收集失败。其中，图 6a 为茶叶附壁现象的模拟图，图 6b 为相机拍摄到的茶叶附壁现象（仰视图）。收集成功率计算式为

$$\eta = \frac{n_1}{n} \times 100\%$$

(2)

式中

n ——每组试验需要收集的茶叶数量

n_1 ——成功收集茶叶数量

η ——收集成功率

随机收集 50 个采摘的芽头,重复 5 组试验并取平均值。由式(2)得到收集成功率 η 为 72%。

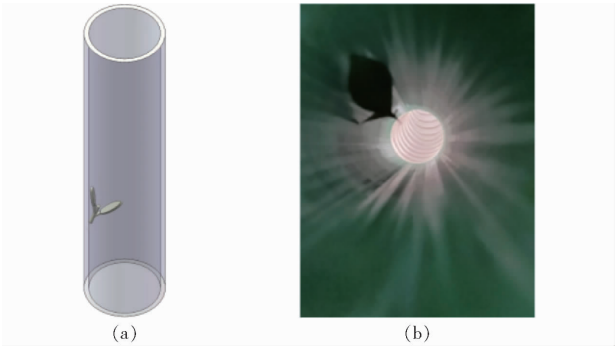


图 6 茶叶附壁现象

Fig. 6 Phenomenon of tea adhering to wall

2 茶叶收集影响因素

排除末端管上的舵机支架等无关因素,可将末端管简化为内径 $D = 30\text{ mm}$ 、高 $h = 150\text{ mm}$ 的螺旋管。在对茶叶进行吸附式收集时,螺旋管内螺旋线能够在管壁附近产生螺旋流;利用螺旋流携带固体颗粒能力强以及螺旋流的切向速度容易将附壁的茶

叶“拖拽”悬浮于主流中这一特点来提高茶叶收集成功率^[21-22]。此外,本文设定茶叶收集成功率大于 60% 为有效收集。

2.1 影响因素确定

伯努利方程为

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gl = C \tag{3}$$

式中 p ——流体中某点压强
 ρ ——流体密度
 v ——流体中某点流速
 g ——重力加速度
 l ——该点所在高度 C ——常量

由式(3)可得负压与管内空气流速密切相关,而管壁附近空气切向速度是影响茶叶附壁问题的重要因素:管壁附近的切向速度越大,其携带茶叶能力越强,能够有效改善茶叶附壁所导致的收集成功率低的问题^[23-26]。螺旋管内壁螺纹线的参数有:螺纹线数、螺纹导程、螺纹截面形状等。

为确定各因素对茶叶收集成功率是否存在影响,分别对负压以及螺纹导程、螺纹线数、螺纹截面形状不同的螺旋管进行单因素预试验,由图 7 可得,负压、螺纹导程、螺纹线数的变化使得茶叶收集成功率发生了显著改变,但截面形状的变化并未引起茶叶收集成功率发生显著改变。

综上所述,忽略不显著因素,得到茶叶收集成功率的影响因素分别为负压、螺纹线数、螺纹导程。

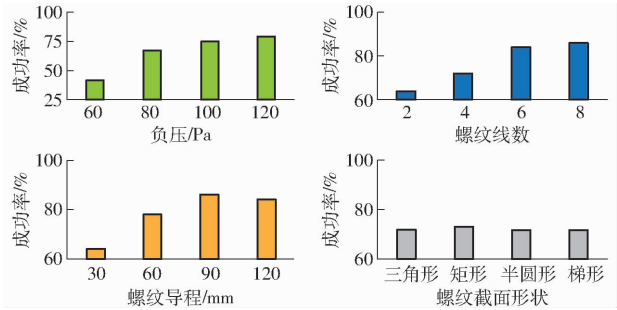


图 7 预试验中各因素对收集成功率的影响

Fig. 7 Influence of various factors in pre-test on collection success rate

受限于螺旋管下管口进气速度场较为复杂且无成熟的分析方法^[27],本文拟定下管口处的气压为大气压。螺旋管内螺旋流流速可分为轴向速度、切向速度(周向速度)以及径向速度,但一般情况下径向速度分布并无规律且径向速度极小,因此不作研究讨论^[28],故认为 X 、 Y 轴方向速度矢量和为切向速度, Z 轴方向为轴向速度。利用 Fluent 软件仿真螺旋管近壁面处螺旋流速度矢量图如图 8 所示。其中,图 8a 为螺旋流的主视图及局部区域轴向速度图;图 8b 为螺旋流的俯视图及局部区域切向速度矢量图。由图 8b 可得,近壁面处速度矢量主要表现为周向运动,非近壁面处速度矢量垂直于该截面作轴向运动。由于切向速度具有旋转对称性,故仿真结果中的速度有正负之分(坐标轴指向为正,相反则为负)。仿真分析相关设置如表 2 所示。

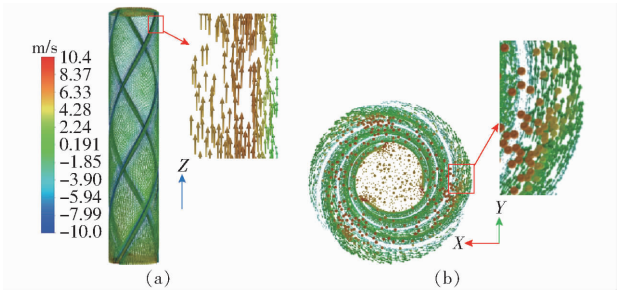


图 8 螺旋流速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector diagrams of spiral flow

表 2 仿真分析相关设置

Tab. 2 Simulation analysis related settings

项目	设置
网格类型	非结构网格
膨胀层层数	3
边界条件	压力出入口
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$
求解器	Simple
流动状态	稳态
收敛精度	0.000 1

2.2 影响因素水平确定

基于预试验发现管口上方负压 80 ~ 120 Pa 能

够对茶叶进行有效收集。当负压 $H < 80\text{ Pa}$ 时,难以将茶叶吸入管内,即茶叶收集成功率小于 60%,原因在于部分茶叶所受到的负压吸力不足以克服自身重力;若将负压装置的功率调至最大,测得螺旋管上管口负压 $H = 120\text{ Pa}$ 。因此,设负压水平为 $80 \sim 120\text{ Pa}$ 。

基于单因素试验发现,当螺纹线数 $N < 3$ 时,附壁现象没有明显改善,即对茶叶收集成功率影响甚微;受限于螺纹线加工精度,螺旋管内螺纹线数最大为 9。因此,设定螺纹线数水平为 $3 \sim 9$ 。

根据螺旋管高度 $h = 150\text{ mm}$ 以及螺纹线截面形状为线径 $r = 2\text{ mm}$ 的半圆(受限于加工精度),初步设定螺纹导程为 $2 \sim 150\text{ mm}$ 。当螺纹导程 $S = 2\text{ mm}$ 时,管内壁被螺纹线铺满一层,此参数的螺旋管与内壁光滑的螺旋管通过在不同负压的条件下进行试验,发现二者负压收集成功率之差仅在 0.6% 以内,可忽略不计。故认为螺纹导程 $S = 2\text{ mm}$ 时,管内径为 30 mm 且内壁光滑。因此,最终设定螺纹导程水平为 $0 \sim 150\text{ mm}$ (螺纹导程 $S \leq 2\text{ mm}$ 时,管内壁光滑)。

3 影响因素试验优化

3.1 试验设计

对负压及螺旋管参数进行三因素三水平 Box - Behnken 茶叶收集试验,试验因素编码如表 3 所示。各螺旋管参数如表 4 所示,三维图及实物图如图 9 所示。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Experimental factors codes

编码	因素		
	负压/Pa	螺纹线数	螺纹导程/mm
1	120	9	150
0	100	6	75
-1	80	3	0

表 4 各螺旋管参数
Tab.4 Parameters of each threaded pipe

螺旋管编号	螺纹线数	螺纹导程/mm
1-1	0	0
1-2	3	150
1-3	6	150
1-4	9	150
2-2	3	75
2-3	6	75
2-4	9	75

注:编号 1-1 为内壁光滑的螺旋管。

3.2 单因素仿真与试验

搭建试验平台如图 10 所示。负压收集装置使

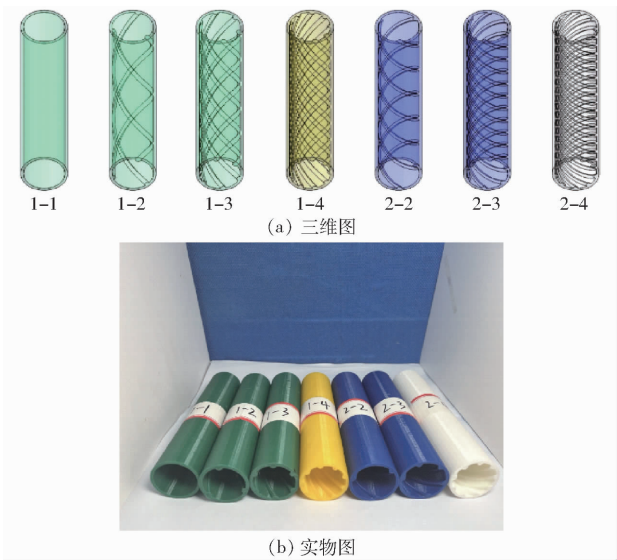


图 9 各螺旋管三维图及实物图
Fig.9 Three-dimensional drawing and physical drawing of each threaded pipe

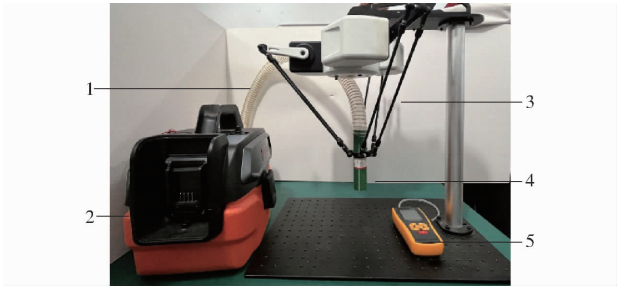


图 10 茶叶收集试验平台
Fig.10 Test platform for tea collection
1. 波纹管 2. 负压收集装置 3. 机械臂 4. 螺旋管 5. 数显真空计

用 YL6281D 型真空吸盘机(上海亿力电气有限公司)。经改装后,内部最大负压为 0.9 kPa ,可通过旋钮无级调节。使用 DP360 型数显真空计。由于空间布置及气体输送需要,选用内圈含有钢丝的柔性波纹管。基于预试验发现,当茶叶离开螺旋管进入波纹管时,有个别茶叶因波纹间褶皱的阻挡作用而无法进入收集装置内;此外,考虑到波纹管的柔性变形属于不可控因素,故本文认为当茶叶从螺旋管内脱离即属于成功收集。

对茶叶进行吸附式收集时,茶叶在管内的运动本质上是气固两相流动,该过程十分复杂^[29];此外,由于茶叶在运动时可能发生无规则的柔性变形,因此,难以将其拟化成颗粒状固体或采用颗粒填充的方式进行气固耦合计算。故本文通过改变各影响因素进行试验。为尽可能避免茶叶失水而造成物理性能产生误差^[30],每组试验所用的茶叶嫩芽即采用并在 5 min 内完成本组试验。由于采收器在工作时是定点盲采存在误差,故采用人工投喂茶叶的方式进行收集试验,试验时手持茶叶位于管口中央下方

5 mm 左右。

3.2.1 负压对茶叶收集成功率的影响

在螺纹管螺纹线数 $N = 6$, 螺纹导程 $S = 75$ mm 条件下, 对螺纹管分别在负压为 80、100、120 Pa 的条件下进行 Fluent 仿真与试验。仿真结果如图 11 所示, 随着负压增大, 管内近壁面处 X 、 Y 轴方向的切向速度逐渐增大, 能够有效降低茶叶附壁的可能, 从而提高茶叶收集成功率。该条件下茶叶收集成功率试验结果如图 12a 所示。由图 12a 可知, 随着负压的增大, 收集成功率逐渐提高。综合仿真结果与试验结果可得, 在该条件下, 负压与茶叶收集成功率呈正相关。

3.2.2 螺纹线数对茶叶收集成功率的影响

在负压 $H = 120$ Pa, 螺纹导程为 $S = 150$ mm 的条件下, 分别对螺纹线数为 3、6、9 的螺纹管近壁面处的流场进行仿真, 仿真结果如图 13 所示, 随着螺纹线数的增加, 近壁面处的 X 、 Y 轴方向的切向速度呈上升趋势。该条件下的茶叶收集成功率试验结果

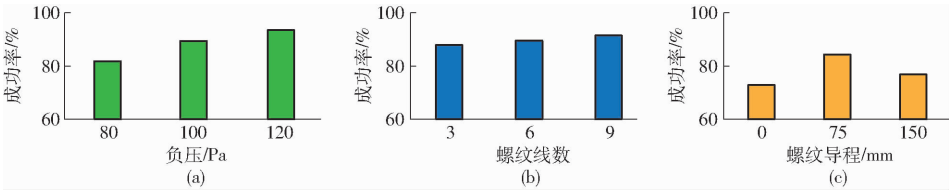


图 12 不同单因素时的收集试验结果

Fig. 12 Influence of different single factors on collecting test results

如图 12b 所示。由图 12b 可知, 随着螺纹线数的增加, 收集成功率呈平稳上升趋势。综合仿真分析与试验结果可以得到在该条件下, 螺纹线数的改变实质上造成了管内近壁面处的切向速度的改变, 因此, 茶叶收集成功率发生变化。

3.2.3 螺纹导程对茶叶收集成功率的影响

在负压 $H = 100$ Pa, 螺纹线数 $N = 3$ 的条件下, 分别对螺纹导程为 0 (光滑管)、75、150 mm 的螺纹管近壁面处的流场进行仿真。仿真结果如图 14 所示。随着螺纹导程的增加, 近壁面处的 X 、 Y 轴方向的切向速度呈现先上升后下降的趋势且速度上升的幅度大于下降幅度。由图 12c 可知, 当螺纹管的螺纹导程由 0 mm 升至 75 mm 时, 茶叶收集成功率也由 72% 骤升至 84%; 但当螺纹导程由 75 mm 提至 150 mm, 茶叶收集成功率下降 8 个百分点。综合仿真分析与试验结果可得, 在该条件下, 茶叶收集成功率的升降幅度与空气切向速度的升降幅度密切相关; 在负压相同的情况下, 螺纹管收集成功率高于光滑管。

3.3 试验方案与结果

根据 Box - Behnken 模型进行三因素三水平的

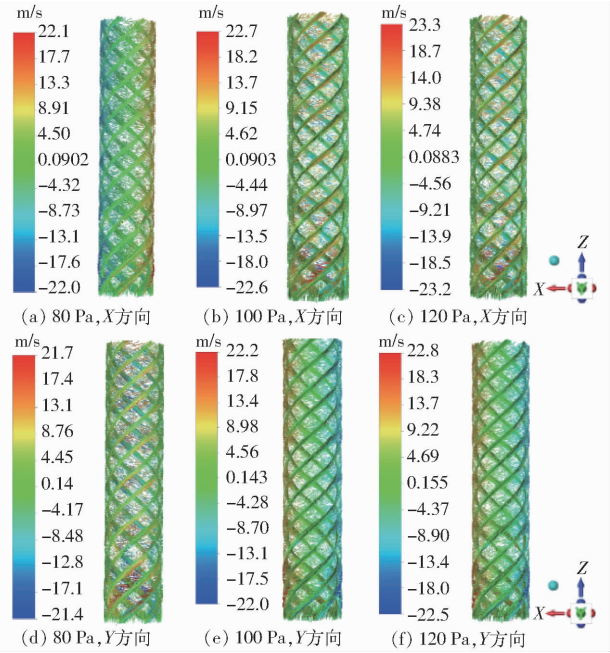


图 11 不同负压下近壁面处的流场切向速度矢量图

Fig. 11 Tangential velocity vector diagram of flow field near wall under different negative pressure values

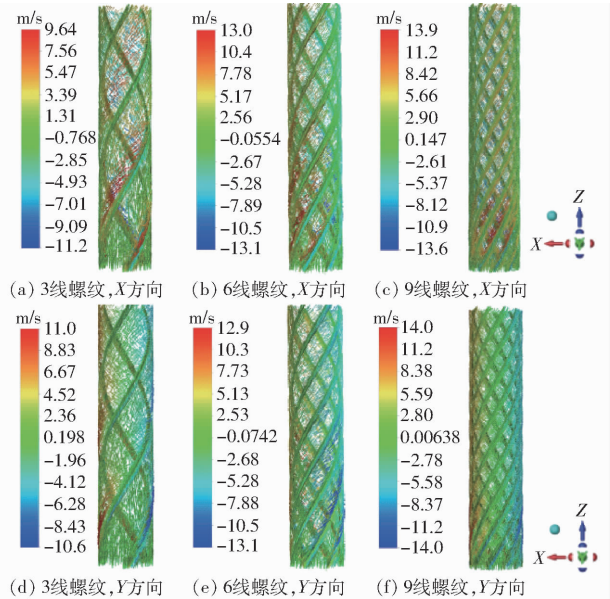


图 13 不同螺纹线数下近壁面处的流场切向速度矢量图

Fig. 13 Tangential velocity vector diagram of flow field near wall with different thread numbers

组合试验, 共试验 17 组。每组试验所采摘的一芽二叶总数为 50 个, 并统计成功收集的茶叶数量, 根据式(2)计算茶叶收集成功率。为减小试验误差, 每

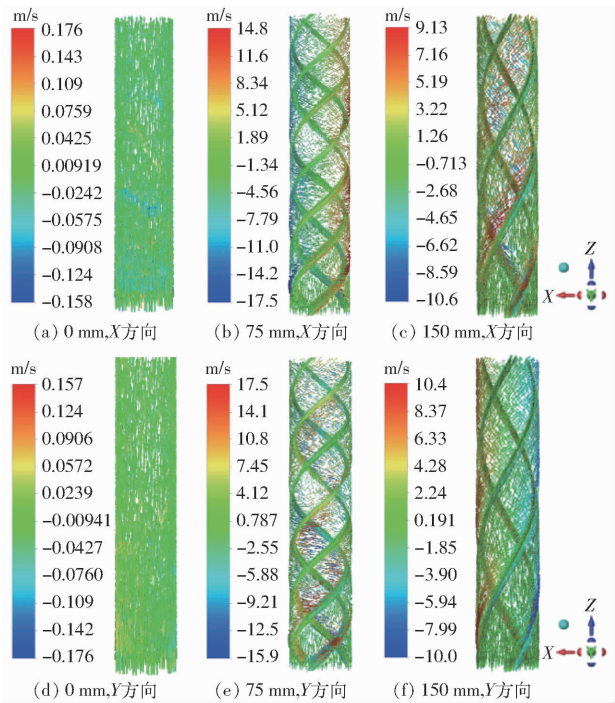


图 14 不同螺纹导程下近壁面处的流场切向速度矢量图

Fig. 14 Tangential velocity vector diagram of flow field near wall under different thread leads

组试验重复 3 次并取平均值。试验结果如表 5 所示。

表 5 试验方案与结果

Tab.5 Experimental scheme and results

序号	负压/Pa	螺纹线数	螺纹导程/mm	成功率/%
1	100	3	0	72
2	80	6	0	64
3	100	9	0	70
4	100	6	75	88
5	120	6	0	86
6	80	3	75	78
7	80	9	75	84
8	120	6	150	90
9	100	6	75	90
10	80	6	150	78
11	120	9	75	96
12	100	6	75	88
13	120	3	75	90
14	100	3	150	76
15	100	6	75	90
16	100	9	150	90
17	100	6	75	90

3.4 结果分析

3.4.1 回归模型建立与检验

根据表 5 中的试验数据,通过 Design-Expert 13 软件建立茶叶收集成功率 η 的多元回归模型,方差分析见表 6(A 、 B 、 C 为因素编码值)。茶叶收集成功率的回归模型 $P < 0.05$,表明该模型显著,模型的失

拟项 $P > 0.05$,表明模型失拟项并不显著,回归模型的拟合程度高。模型决定系数 R^2 为 0.983,表明该模型能够解释 98.3% 以上响应值的变化,实际值与预测值具有高度相关性,试验误差小。其中, A 、 B 、 C 、 BC 、 C^2 对茶叶收集成功率 η 影响极显著; AC 、 B^2 对茶叶收集成功率 η 影响显著,说明负压、螺纹线数和螺纹导程对茶叶收集成功率存在交互影响。故采用多元线性拟合的方式对试验结果进行处理,得到负压、螺纹线数和螺纹导程对茶叶收集成功率 η 影响的回归方程为

$$\eta = 89.20 + 7.25A + 3.00B + 5.25C - 2.50AC + 4.00BC + 0.15A^2 - 2.35B^2 - 9.85C^2 \quad (4)$$

表 6 茶叶收集成功率方差分析

Tab.6 Analysis of variance of success rate of tea collection

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 246.44	9	138.49	44.47	<0.000 1
<i>A</i>	420.5	1	420.5	135.02	<0.000 1 **
<i>B</i>	72	1	72	23.12	0.001 9 **
<i>C</i>	220.5	1	220.5	70.8	<0.000 1 **
<i>AB</i>	0	1	0	0	1
<i>AC</i>	25	1	25	8.03	0.025 3 *
<i>BC</i>	64	1	64	20.55	0.002 7 **
<i>A</i> ²	0.094 7	1	0.094 7	0.030 4	0.866 5
<i>B</i> ²	23.25	1	23.25	7.47	0.029 2 *
<i>C</i> ²	408.52	1	408.52	131.17	<0.000 1 **
残差	21.8	7	3.11		
失拟项	17	3	5.67	4.72	0.083 9
纯误差	4.8	4	1.2		
总和	1 268.24	16			

注: * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

3.4.2 交互因素对试验指标的影响

通过表 6 可得,负压、螺纹线数、螺纹导程存在交互影响,需要更深入地探究各因素对茶叶收集成功率的影响。为更直观地了解各交互因素对试验指标的影响,忽略不显著的交互影响因素,得到各因素交互效应对茶叶收集成功率影响的响应面图,如图 15 所示。

图 15a 为负压 $H = 120$ Pa 时,螺纹线数与螺纹导程对茶叶收集成功率交互影响的响应面。螺纹导程较大时,随着螺纹线数的增加,茶叶收集成功率呈上升趋势,这是由于螺纹线数的增加导致近壁面处的空气切向速度增大,因此可以有效降低茶叶附壁的可能,从而提高茶叶收集成功率。当螺纹线数较大时,随着螺纹导程的增加,茶叶收集成功率呈明显上升后缓慢下降的趋势并在螺纹导

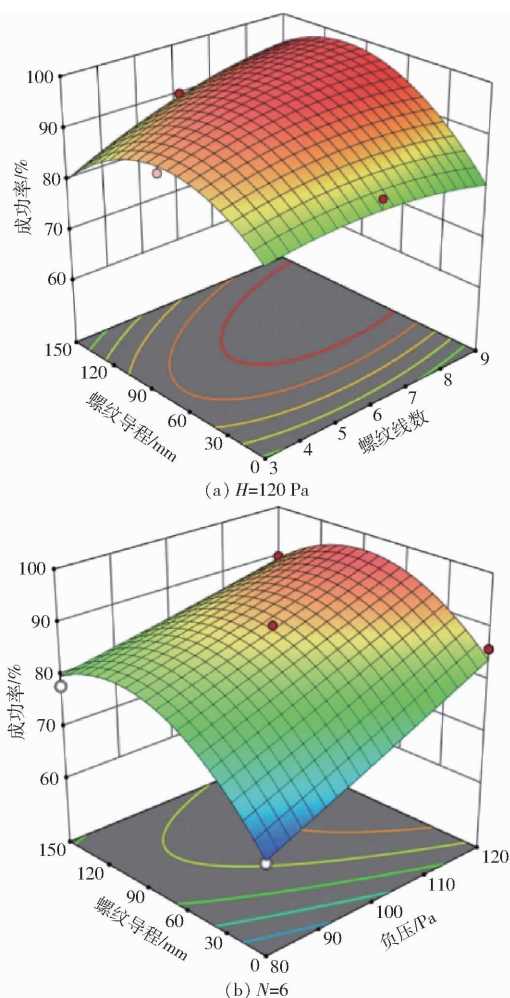


图 15 因素交互作用对成功率的影响响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of factors interaction to success rate

程 $S = 95$ mm 左右达到了最大值,原因在于该条件下管内近壁面处的空气切向速度处于最大值。

图 15b 为螺纹线数 $N = 6$ 时,负压与螺纹导程对茶叶收集成功率交互影响的响应面。当螺纹导程较大时,随着负压的增大,茶叶收集成功率逐渐增大,这是由于负压的增大导致近壁面处空气的切向速度增大,能够有效降低茶叶附壁的可能,从而提高茶叶收集成功率。

3.4.3 参数优化与试验验证

茶叶收集成功率是衡量采收器作业效果的重要指标,以茶叶收集成功率最大为目标函数,对各参数进行优化得到最佳组合参数为负压 $H = 119.9$ Pa,螺纹线数 $N = 8.6$,螺纹导程 $S = 95.1$ mm,茶叶收集成功率为 98.4%。由于螺纹线数必须为整数且加工精度有限,所以基于负压 $H = 120$ Pa,螺纹导程 $S = 95$ mm(取整)的条件下,分别对螺纹线数 $N = 8$ 以及 $N = 9$ 的螺纹管进行试验。在负压 $H = 120$ Pa,螺纹线数 $N = 8$,螺纹导程 $S = 95$ mm 的条件下测得茶叶收集成功率为 97.3%;在负压 $H = 120$ Pa,螺纹线数 $N = 9$,螺纹导程 $S = 95$ mm 的条件下测得茶叶收集成功率为 98%,收集成功率相对误差小于 5%,表明响应面试验能够有效实现优化。由于茶叶收集过程中有很多不可控的因素,如茶叶嫩芽的生长形态不一、大小不同以及采摘点位置的变化,因此茶叶收集成功率有待进一步提高。

4 结论

(1)设计了一种茶叶采收器并进行现场试验,结果表明采收器能够有效完成茶叶的采摘。通过预试验确定了影响茶叶收集成功率的因素分别为:负压、螺纹导程、螺纹线数。

(2)应用 Fluent 仿真和 Box - Behnken 的试验设计,研究各因素对茶叶收集成功率的影响。试验结果表明:3 个因素改变了管内近壁面处的空气切向速度;各因素对收集成功率的影响由大到小为:负压、螺纹导程、螺纹线数。

(3)运用 Design-Expert 13 软件,以茶叶收集成功率最大为优化目标,确定优化参数为负压 $H = 120$ Pa,螺纹线数 $N = 9$,螺纹导程 $S = 95$ mm。对优化后的参数进行吸附式收集试验,结果表明该条件下茶叶收集成功率为 98%,即优化后收集成功率相较于优化前提高 26 个百分点,试验值与预测值相对误差小于 5%。

参 考 文 献

- [1] 肖智,黄贤金,孟浩,等. 2009—2014 年中国茶叶生产空间演变格局及变化特征[J]. 地理研究, 2017,36(1): 109 - 120. XIAO Zhi, HUANG Xianjin, MENG Hao, et al. Spatial structure and evolution of tea production in China from 2009 to 2014[J]. Geographical Research, 2017,36(1): 109 - 120. (in Chinese)
- [2] 李虹. 四川巴中市茶产业现状调查及发展对策分析[D]. 雅安:四川农业大学, 2017. LI Hong. An investigation on current situation and development countermeasures of tea industry in Bazhong, Sichuan[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [3] 管曦,谢向英,林畅,等. 中国茶产业的发展思考及其对策研究(续)[J]. 中国茶叶, 2019,41(1): 39 - 43.
- [4] FIROUZI S, AZARIAN F. Propellants of mechanical pruning and plucking of tea (a case of developing countries)[J]. Information Processing in Agriculture, 2019,6(4): 454 - 461.
- [5] BAKHSHIPOUR A, SANAEIFAR A, PAYMAN S H, et al. Evaluation of data mining strategies for classification of black tea based on image-based features[J]. Food Analytical Methods, 2018,11(4): 1041 - 1050.
- [6] ZHANG L, ZHANG H, CHEN Y, et al. Real-time monitoring of optimum timing for harvesting fresh tea leaves based on machine vision[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019,12(1): 6 - 9.
- [7] LI Y, HE L, JIA J, et al. High-efficiency tea shoot detection method via a compressed deep learning model[J]. International

- Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(3): 159 – 166.
- [8] LI Y, HE L, JIA J, et al. In-field tea shoot detection and 3D localization using an RGB – D camera[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,185: 106149.
- [9] 邵佩迪,吴明晖. 基于视觉测量的茶叶嫩芽定位方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2020,58(9): 50 – 53.
SHAO Peidi, WU Minghui. Tea bud positioning method based on visual measurement[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020,58(9): 50 – 53. (in Chinese)
- [10] 龙樟,姜倩,王健,等. 茶叶嫩芽视觉识别与采摘点定位方法研究[J]. 传感器与微系统, 2022,41(2): 39 – 41.
LONG Zhang, JIANG Qian, WANG Jian, et al. Research on method of tea flushes vision recognition and picking point localization[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022,41(2): 39 – 41. (in Chinese)
- [11] 钟岩. 基于机器视觉的并联式自动采茶机控制系统研究和开发[D]. 青岛:青岛科技大学, 2022.
ZHONG Yan. Research and development of parallel automatic tea picking machine control system based on machine vision [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [12] 高凤. 名优茶并联采摘机器人结构设计及仿真[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
GAO Feng. Structural design and simulation of a high-quality tea parallel plucking robot [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [13] 尚凯歌. 茶叶采摘机器人机械结构设计及控制系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
SHNAG Kaige. Mechanical structure design and control system research of tea-picking robot [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 牟顺海, 李少华. 茶叶采摘机器人手采摘剪刀设计及仿真[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014,39(6): 55 – 58.
MOU Shunhai, LI Shaohua. Design and simulation of picking scissors of tea picking robots[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2014,39(6): 55 – 58. (in Chinese)
- [15] 许丽佳, 刘琦, 代建武, 等. 茶叶嫩梢采摘末端执行器的设计研究[J]. 茶叶科学, 2021,41(5): 705 – 716.
XU Lijia, LIU Qi, DAI Jianwu, et al. Design of end effector for picking tea shoots[J]. Journal of Tea Science, 2021,41(5): 705 – 716. (in Chinese)
- [16] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2022,53(5): 86 – 92.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5): 86 – 92. (in Chinese)
- [17] ZHU Y, WU C, TONG J, et al. Deviation tolerance performance evaluation and experiment of picking end effector for famous tea[J]. Agriculture, 2021,11(2): 128.
- [18] 李立军. 海域天然气水合物固态流化开采螺旋流输送规律研究[D]. 常州:常州大学, 2022.
LI Lijun. Study on spiral flow transport law of solid fluidization exploitation of natural gas hydrate in sea area[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022. (in Chinese)
- [19] 李郁. 螺旋气力吸取料分离过程物料流动特性的试验研究与数值仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
LI Yu. The mathematical simulation and experimental research on the particle flowing nature in the screw-gas bulk sucking and taking equipment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [20] 梁俊, 饶永超, 王树立, 等. 以扭带起旋的气固两相螺旋流流动与传热数值模拟[J]. 石油机械, 2017,45(7): 109 – 116.
LIANG Jun, RAO Yongchao, WANG Shuli, et al. Numerical simulation of spiral flow and heat transfer of gas-solid two-phase spiral flow generated by twisted-tape[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(7): 109 – 116. (in Chinese)
- [21] 孙晓霞. 基于气固两相螺旋流的高效垂直螺旋输送机理研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
SUN Xiaoxia. Investigating on efficient vertical screw conveying theory based on gas – solid two-phase screw flow[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [22] 王晓飞. 管内螺旋流的实验研究与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
WANG Xiaofei. Experimental study and ansysis of spiral flow in pipes[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [23] 常凯, 饶永超, 王树立. 输气管道水合物颗粒螺旋流动数值模拟[J]. 石油机械, 2017,45(3): 107 – 113.
CHANG Kai, RAO Yongchao, WANG Shuli. Numerical simulation of spiral flow of gas hydrate particles in gas transmission pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(3): 107 – 113. (in Chinese)
- [24] 梁俊, 饶永超, 王树立, 等. 天然气水合物管道螺旋流动与传热数值模拟[J]. 油气田地面工程, 2018,37(2): 6 – 11.
LIANG Jun, RAO Yongchao, WANG Shuli, et al. Numerical simulation of spiral flow and heat transfer in natural gas hydrate pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018,37(2): 6 – 11. (in Chinese)
- [25] 饶永超, 王树立, 代文杰, 等. 天然气水合物浆体流变性与安全流动边界研究进展[J]. 化工进展, 2015(10): 3551 – 3556.
RAO Yongchao, WANG Shuli, DAI Wenjie, et al. Research progress on slurry rheological properties and security flow boundary of natural gas hydrate[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015(10): 3551 – 3556. (in Chinese)
- [26] 朱莹, 王树立, 史小军. 基于 PHOENICS 的管道螺旋流数值模拟[J]. 石油机械, 2008,36(7): 19 – 22.
- [27] 张小帆. 基于介观尺度的内燃机进气流场层析图像诊断机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
ZHANG Xiaofan. Diagnosis mechanism of mesoscopic-scale tomography image for airflow field in internal combustion engine [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [28] 王树立, 饶永超, 张琳, 等. 水平管内螺旋流流动特性研究现状与进展[J]. 太原理工大学学报, 2013,44(2): 232 – 236.
WANG Shuli, RAO Yongchao, ZHANG Lin, et al. Research situation and progress on flow characteristics of spiral flow in horizontal pipe[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013,44(2): 232 – 236. (in Chinese)
- [29] 周锋. 煤炭大颗粒气力输送关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHOU Feng. Study on key technology of pneumatic conveying for large coal particles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)
- [30] DU Z, HU Y, BUTTAR N A. Analysis of mechanical properties for tea stem using grey relational analysis coupled with multiple linear regression[J]. Scientia Horticulturae, 2020,260: 108886.