

DOI:CNKI:61-1390/S.20120223.1724.019

网络出版时间:2012-02-23 17:24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120223.1724.019.html>

玉米秸秆茎叶分离装置的设计与试验

朱新华¹, 杨中平¹, 吴永锋², 查 峥¹

(1 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 江淮汽车股份有限公司乘用车一厂, 安徽 合肥 230601)

【摘 要】 **【目的】**设计玉米秸秆茎叶分离机械, 为农业废弃物玉米秸秆的资源化利用提供技术支持。**【方法】**基于压扁碾搓法原理, 设计了一种由压辊机构、剥辊机构、清理机构等组成的茎叶分离装置, 以实现玉米秸秆的茎叶分离, 并采用含水率为 21.68% 的玉米秸秆对分离装置参数进行了正交试验优选。**【结果】**影响秸秆茎叶分离率的主次因素依次是压辊间隙、剥辊速比和压辊转速。玉米秸秆茎叶分离的优选方案为: 压辊间隙 8 mm, 剥辊速比 1.6, 压辊转速 200 r/min。在此条件下, 玉米秸秆的茎叶分离率可达到 92.9%。**【结论】**该装置可用于玉米秸秆的茎叶分离, 有效提高了分离效果。

【关键词】 玉米秸秆; 茎叶分离; 机械设计; 农业废弃物; 综合利用

【中图分类号】 S226.7⁺9

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)03-0229-06

Design and experiment on stem-leaf separator for corn straw

ZHU Xin-hua¹, YANG Zhong-ping¹, WU Yong-feng², ZHA Zheng¹

(1 College of Mechanical and Electric Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 First PCV Factory, Anhui Jianghuai Automobile Co. Ltd, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: **【Objective】** The study was done to design a machine for stem-leaf separation of corn straw, which can provide technical support for comprehensive utilization of agricultural wastes-corn straw. **【Method】** To utilize the leaf, bark and pith of corn straw separately and efficiently, a kind of stem-leaf separator, consisting of press roller mechanism, separation roller mechanism, cleaning mechanism, etc., was designed based on flatten-robbed method to realize stem-leaf separation of corn straw. Parameters of the separator were optimized by orthogonal experiment of stem-leaf separation with corn straw with a water content of 21.68%. **【Result】** The results showed that the sequence of factors which influence separation efficiency was: gap between press rollers, linear speed ratio between separation rollers and rotate speed of press rollers. The optimal scheme for stem-leaf separation of corn straw was: rotate speed of press rollers, 200 r/min; gap between press rollers, 8 mm; linear speed ratio between separation rollers, 1.6. Under this condition, the separation rate was 92.9%. **【Conclusion】** This machine can be used to separate corn straw into stems and leaves, and has improved separation efficiency.

key words: corn straw; stem-leaf separation; machine design; agricultural wastes; comprehensive utilization

玉米秸秆占我国农作物秸秆的 27.39%^[1], 占我国农作物秸秆可收集资源的 46%^[2], 但综合利用

率较低^[3]。玉米秸秆的叶和髓含有丰富的营养成分^[4-6], 而皮含有丰富的纤维素、半纤维素和木质素。

* [收稿日期] 2011-09-21

[基金项目] 陕西省科学技术研究发展计划项目(2009K01-06); 公益性行业(农业)科研专项(201003063-07)

[作者简介] 朱新华(1967—), 男, 陕西城固人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农产品加工及资源利用研究。

E-mail: zxhjdxy2010@163.com

即玉米秸秆营养主要在叶和髓中,能量在皮中。只有对玉米秸秆叶、皮和髓进行分离,才能达到高效利用的目的^[7-8];反之,则会带来不利影响。如在秸秆代木利用方面,玉米秸秆中的叶和髓会对人造板的性能产生不利影响^[9-10];而在生产纤维素乙醇和低聚糖时,由于玉米秸秆叶、皮和髓生理生化特点的不均一性,造成玉米秸秆各器官对酶的需求不同,因而最终的转化率和转化产物也不同^[11-14]。在玉米秸秆叶、皮和髓的分离中,首先应解决茎叶分离问题。目前,国外几乎没有该方面的研究,国内的研究主要借鉴甘蔗脱叶的方法,采用冲击去叶的原理实现茎叶分离^[15],但尚存在分离率低和冲击部件易损等问题。为此,本研究拟采用压扁碾搓法^[16]的原理设计一种玉米秸秆茎叶分离装置,以实现玉米秸秆茎、叶的高效分离,进而为玉米秸秆资源的高效利用提供支持。

1 玉米秸秆茎叶分离装置的整机结构及工作原理

1.1 整机结构

玉米秸秆茎叶分离装置的整机结构如图 1 所示。该茎叶分离装置由进料槽、压辊机构、剥辊机构、清理机构、传动机构、机架等组成。其中,压辊机构由上下布置的 2 个压辊及压辊间隙调整机构组成。剥辊机构由上下布置的 2 对剥辊以及绕在其上的 2 个剥叶带构成。清理机构由 1 对上下布置的刷辊组成。压辊间隙为 4~12 mm 可调,剥辊间隙和刷辊间隙也可以小范围调整。压辊间的中心线、上下 2 条剥叶带间的中心面和刷辊间的中心线处在同一水平面上。为了避免秸秆阻塞,压辊、剥叶带和刷辊之间的线速度依次增大,即刷辊线速度大于剥叶带线速度,剥叶带线速度大于压辊线速度。为了使剥辊机构具有脱叶功能,上下 2 条剥叶带间具有一定的线速差。

1.2 工作原理

茎叶分离装置采用压扁碾搓法去叶原理实现玉米秸秆的茎叶分离。压扁碾搓法就是通过碾搓、搓擦和撕裂等综合作用,对玉米秸秆进行茎叶分离的一种方法。实际工作时,将去根去梢后的秸秆平铺在进料槽中,使其进入 1 对转速相同、方向相反的压辊进行压扁,压扁可使绝大部分秸秆叶子分布在秸秆压扁后形成的 2 个平面上。秸秆在压辊的向前推送作用下,被送入转向相反且具有一定线速差的 2 条剥叶带之间,剥叶带之间的线速差可在秸秆压扁

后形成的 2 个平面上沿秸秆长度方向产生一定的碾搓、搓擦和撕裂作用,使秸秆叶从秸秆茎上剥离。剥离后的茎和叶在剥叶带的夹持作用下向前传送。最后,秸秆在通过出料端时,刷辊对秸秆进行梳刷,使缠绕在茎秆上的叶子彻底脱离茎秆,最终实现秸秆的茎叶分离。

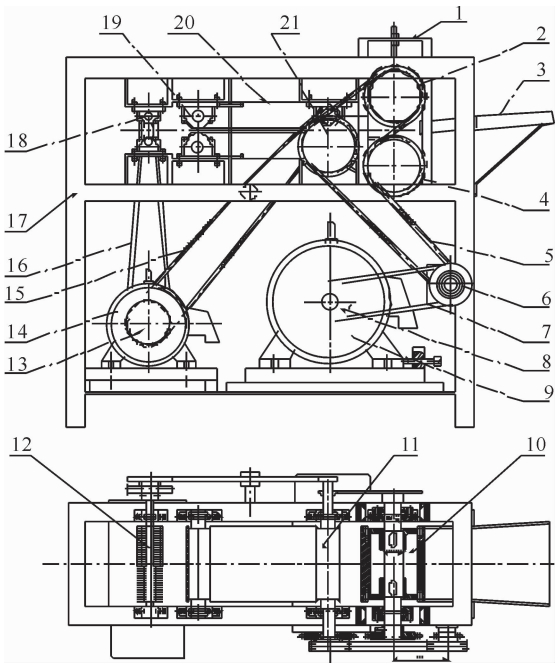


图 1 玉米秸秆茎叶分离装置整机结构示意图

- 1. 压辊间隙调整机构;2. 上压辊链轮;3. 进料槽;
 - 4. 下压辊链轮;5. 链条 I;6. 带轮 II;7. 三角带;
 - 8. 电机 I 带轮;9. 电机 I;10. 上压辊;11. 上剥辊;12. 上刷辊;
 - 13. 电机 II 链轮;14. 电机 II;15. 链条 II;16. 刷辊带;
 - 17. 机架;18. 刷辊机构;19. 剥辊机构;20. 剥叶带;21. 过渡链轮
- Fig. 1 Structure of corn straw stem-leaf separation machine
- 1. Gap adjust device between press rollers;
 - 2. Chain wheel of upper press roller;3. Feed port;
 - 4. Chain wheel of lower press roller;5. Chain I;6. Pulley II;
 - 7. V-belt;8. Pulley of motor I;9. Motor I;
 - 10. Upper press roller;11. Upper separation roller;
 - 12. Upper brush roller;13. Chain of motor II;
 - 14. Motor II;15. Chain II;16. Belt of brush roller;17. Body frame;
 - 18. Brush device;19. Separation roller device;
 - 20. Separation belt;21. Middle wheel

2 玉米秸秆茎叶分离装置关键零部件的设计

2.1 压辊的设计

2.1.1 秸秆入轧条件 如图 2 所示,压辊工作的基本条件是能够抓取秸秆。两压辊为圆柱形,当秸秆与压辊接触时,压辊对秸秆端部具有压力 N 和抓取力 T 。

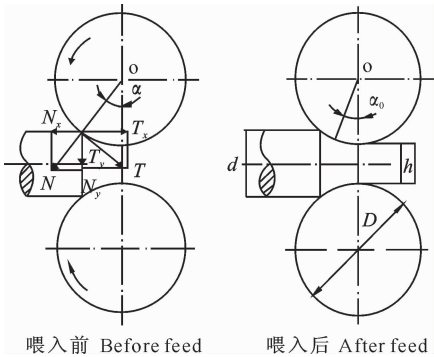


图 2 玉米秸秆茎叶分离装置压辊结构秸秆入轧的条件

Fig. 2 Feeding condition of roll bite of corn straw stem-leaf separation machine

秸秆入轧的条件是:

$$T_x > N_x. \tag{1}$$

式中: $T_x = T \cos \alpha$, $N_x = N \sin \alpha$; 其中 $T = N \mu_j$, μ_j 为压辊对秸秆的抓取系数, α 为压辊对秸秆的起始抓取角。

代入公式(1),化简得:

$$\mu_j > \tan \alpha. \tag{2}$$

式(2)表明,压辊对秸秆起始抓取角的正切值应小于抓取系数。

起始抓取角 α 随着秸秆进入压辊间隙后逐渐减小,变为 α_0 。因 $\alpha_0 < \alpha$,压辊对秸秆的抓取能力增强。

压辊对秸秆的抓取系数 μ_j 因压辊辊面材质和表面形状不同而异。为了增强压辊对秸秆的抓取能力以提高工作可靠性,将压辊表面制成凸凹不平的形状。其抓取系数^[17]为:

$$\mu_j = (1.6 \sim 2.3) f. \tag{3}$$

式中: f 为压辊对秸秆的摩擦系数,铸铁的 $f = 0.4 \sim 0.5$ 。

根据式(3), $\mu_j = 0.7 \sim 1.1$ 。

2.1.2 压辊直径的确定 压辊直径应根据能抓取秸秆的条件确定。压辊直径 D 、秸秆直径 d 、压辊间隙 h 、压辊对秸秆的起始抓取角 α 之间的关系如图 3 所示。

由图 3 可知:

$$\cos \alpha = \frac{OB}{OA} = \frac{\frac{D}{2} - \frac{d-h}{2}}{\frac{D}{2}}. \tag{4}$$

化简得:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{d-h}{D}. \tag{5}$$

由式(5)可以看出,当压辊直径 D 和压辊间隙 h 增大时,起始抓取角 α 变小,对秸秆抓取有利;反之,

则对抓取秸秆不利。

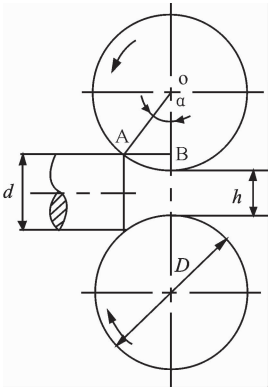


图 3 玉米秸秆茎叶分离装置中压辊直径、压辊间隙和起始抓取角的关系

Fig. 3 Relationship among diameter, gap and starting bite angle of press rollers of corn straw stem-leaf separation machine

因为:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}. \tag{6}$$

代入公式(5)得:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = 1 - \frac{d-h}{D}. \tag{7}$$

即有:

$$D = \frac{d-h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}}. \tag{8}$$

又因为秸秆入轧条件: $\mu_j > \tan \alpha$, 则得:

$$D \geq \frac{d-h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_j^2}}}. \tag{9}$$

式中:玉米秸秆的直径 $d = 15 \sim 32$ mm,压辊间隙 $h = 4 \sim 12$ mm,抓取系数 $\mu_j = 0.7 \sim 1.1$ 。

根据公式(5),当秸秆直径取最大值 32 mm、压辊间隙取最小值 4 mm、抓取系数 μ_j 取最小值 0.7 时,代入公式(9)可以得到保证秸秆入轧条件的压辊最小直径为: $D \geq 155$ mm。

综合考虑,取 $D = 160$ mm。

2.1.3 压辊的结构设计 压辊结构如图 4 所示。由图 4 可以看出,压辊表面的齿形结构可提高其摩擦系数,增强压辊的抓取性能。同时,齿纹结构还会对秸秆表面产生剪切作用,促使叶鞘产生横向断裂,增强压辊对秸秆节位处茎叶结合结构的破坏。

2.2 剥辊机构设计

剥辊机构由上下 2 对剥辊及其上的 2 条剥叶带组成,其结构如图 5 所示。

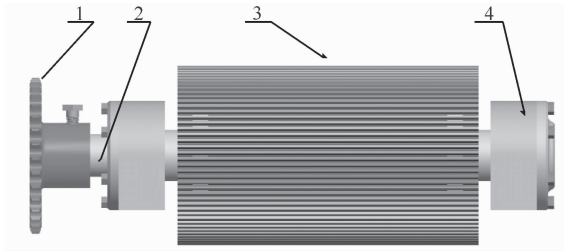


图 4 玉米秸秆茎叶分离装置中压辊机构的示意图

1. 压辊链轮;2. 压辊轴;3. 压辊;4. 滑块

Fig. 4 Structure of press roller of corn straw stem-leaf separation machine

1.Chain wheel of upper press roller;2. Shaft of press roller;3. Press roller;4. Sliding block

2.3 刷辊机构设计

初步试验发现,秸秆通过剥辊碾搓后,叶子虽然从茎秆上剥离下来,但仍会有少量叶子缠绕在茎秆上,为了将残留在茎秆上的叶子彻底清除掉,在剥辊

后增加 1 组刷辊。刷辊的结构如图 6 所示。

2.4 关键零部件的主要设计参数

关键零部件的主要设计参数如表 1 所示。

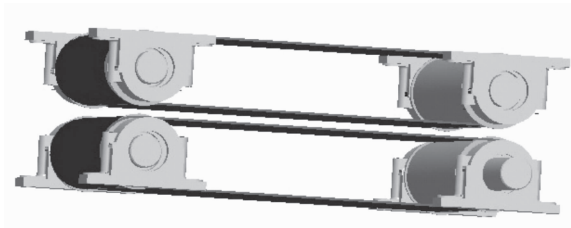


图 5 玉米秸秆茎叶分离装置中的剥辊机构

Fig. 5 Assembly unit of separation rollers of corn straw stem-leaf separation machine

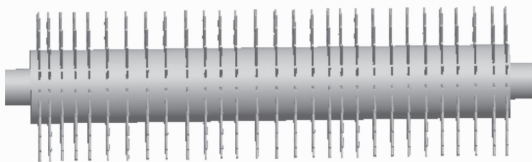


图 6 玉米秸秆茎叶分离装置中的刷辊机构

Fig. 6 Structure of brush roller of corn straw stem-leaf separation machine

表 1 玉米秸秆茎叶分离装置关键零部件的设计参数

Table 1 Summary sheet of key design parameters of corn straw stem-leaf separation machine

项目 Item	直径(Φ)/mm Diameter	转速/(r·min ⁻¹) Rotational speed	线速度/(m·s ⁻¹) Linear velocity	间隙/mm Gap	线速比 Linear velocity ratio
压辊 Press roller	160	100~300	0.84~2.51	4~12	
下剥辊 Lower separation roller	65	258.7~811.4	0.88~2.76		
上剥辊 Upper separation roller	65	310.4~1 622.7	1.06~5.52		
下剥辊与压辊 Lower separation roller & Press roller					1.1
上剥辊与下剥辊 Upper separation roller & Lower separation roller				8±4	1.2~2.0
刷辊与上剥辊 Brush roller & Upper separation roller					1.1~1.3
刷辊 Brush roller	65	341.4~2 109.5	1.17~7.2	8±4	

3 分离试验与结果分析

3.1 试验方法

茎叶分离试验选用“中科 11 号”玉米秸秆作为试验材料。该原料取自陕西杨凌,10 月上旬玉米成熟时收获。自然风干,无霉变,平均含水率21.68%。剪除秸秆梢头,保留根部以上 1.3 m 用于茎叶分离试验。剪去的梢头已到玉米秸秆地上第 11 节,茎秆较细,叶子占到 85%以上,无需进行茎叶分离。试

验中主要考察保留部分的茎叶分离效果,剪除的梢头不计入试验结果。

分离率是分离效果的评定指标,茎叶分离率越大越好,其计算公式为:

$$y=\frac{M_1-M_2}{M_1-M_3}\times100\%。$$
 (10)

式中:y 为茎叶分离率;M₁ 为茎叶分离试验之前未分离秸秆试样的质量(kg);M₂ 为经试验机分离后剩余的秸秆质量(kg),即分离后的茎秆与残留叶子

的总质量; M_3 为 M_2 去除残留叶子后的质量(kg)。三因素三水平进行正交试验,其因素与水平设置见表 2。

3.2 试验设计

在预试验的基础上确定试验因素与水平,选择

表 2 玉米秸秆茎叶分离正交试验的因素与水平

Table 2 Factors and levels of corn straw stem-leaf separation test

水平 Level	因素 Factor		
	A	B	C
	压辊转速/(r·min ⁻¹) Rotational speed of press roller	压辊间隙/mm Gap between press rollers	剥辊速比 Speed ratio between separation rollers
1	100	6	1.4
2	150	8	1.6
3	200	10	1.8

3.3 试验结果与分析

从表 3 可以看出,影响玉米秸秆茎叶分离率的主次因素依次是压辊间隙、剥辊速比和压辊转速。最优方案是 $A_3B_2C_2$,即压辊转速为 200 r/min,压辊

间隙为 8 mm,剥辊速比为 1.6。按最优方案 $A_3B_2C_2$ 选取 50 根秸秆,分 5 组进行验证试验,结果其平均分离率为 92.9%。

表 3 玉米秸秆茎叶分离的正交试验结果

Table 3 Result and analysis of corn straw stem-leaf separation test

试验号 Test number	A 压辊转速 Rotational speed of press roller	B 压辊间隙 Gap between press rollers	C 剥辊速比 Speed ratio between separation rollers	试验方案 Test scheme	分离率/% Separation ratio
1	100	6	1.4	$A_1B_1C_1$	77.95
2	100	8	1.6	$A_1B_2C_2$	85.17
3	100	10	1.8	$A_1B_3C_3$	83.81
4	150	6	1.6	$A_2B_1C_2$	90.07
5	150	8	1.8	$A_2B_2C_3$	83.11
6	150	10	1.4	$A_2B_3C_1$	60.15
7	200	6	1.8	$A_3B_1C_3$	79.49
8	200	8	1.4	$A_3B_2C_1$	91.18
9	200	10	1.6	$A_3B_3C_2$	76.98
K_1	246.932	247.502	229.276		总和
K_2	233.330	259.458	252.219		Overall total
K_3	247.647	220.949	246.414		727.91
k_1	82.311	82.501	76.425		总平均
k_2	77.777	86.486	84.073		overall average
k_3	82.549	73.650	82.138		80.88
极差 Range	14.317	38.509	22.943		

4 结 论

1)为了解决玉米秸秆在秸秆代木、生物转化等方面高效利用时的茎叶分离问题,设计了玉米秸秆茎叶分离装置,该装置由进料槽、压辊机构、剥辊机构、清理机构、传动机构、机架等组成,在分析玉米秸秆喂入压辊的基本条件的基础上,对压辊、剥辊、刷辊等关键部件的设计进行了介绍。

2)选用含水率为 21.68%的“中科 11 号”玉米秸秆进行茎叶分离正交试验,结果表明,影响秸秆茎叶分离率的主次因素依次是压辊间隙、剥辊速比和压辊转速。玉米秸秆茎叶分离的优选方案为:压辊转速 200 r/min,压辊间隙 8 mm,剥辊速比 1.6。在

此条件下,试验机剥叶率达到 92.9%。

3)用压扁碾搓法进行玉米秸秆的茎叶分离具有理想的分离效果,研制的玉米秸秆茎叶分离装置具有良好的分离性能。该研究为玉米秸秆茎叶分离开辟了新途径,为玉米秸秆的高效综合利用奠定了基础。

[参考文献]

[1] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状 [J]. 农业工程学报,2002,18(3):87-91.
Han L J, Yan Q J, Liu X Y, et al. Straw resources and their utilization in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(3): 87-91. (in Chinese)

[2] 崔 明,赵立欣,田宜水,等. 中国主要农作物秸秆资源能源化

- 利用分析评价 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
- Cui M, Zhao L X, Tian Y S, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 291-296. (in Chinese)
- [3] Liao C P, Yan Y J, Wang C Z, et al. Study on the distribution and quantity of biomass residues resource in China [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(2): 111-117.
- [4] 薛红枫, 闫贵龙, 孟庆翔. 玉米秸秆不同部位碳水化合物组分体外发酵动态分析 [J]. 畜牧兽医学报, 2007, 38(9): 926-933.
- Xue H F, Yan G L, Meng Q X. *In vitro* fermentation kinetic analysis of the carbohydrate fractions in various sections of corn stalks [J]. Chinese Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2007, 38(9): 926-933. (in Chinese)
- [5] Hoskinson R L, Karlen D L, Birrell S J, et al. Engineering, nutrient removal, and feedstock conversion evaluations of four corn stover harvest scenarios [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(2/3): 126-136.
- [6] 闫贵龙, 曹春梅, 鲁琳, 等. 玉米秸秆不同部位主要化学成分和活体外消化率比较 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(3): 70-74.
- Yan G L, Cao C M, Lu L. Comparison of main chemical composition and *in vitro* digestibility in various sections of corn stalks [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(3): 70-74. (in Chinese)
- [7] Montross M D, Crofcheck C L. Effect of stover fraction and storage method on glucose production during enzymatic hydrolysis [J]. Bioresource Technology, 2004, 92(3): 269-274.
- [8] Papatheofanous M G, Billa E, Koullas D P, et al. Optimizing multisteps mechanical-chemical fractionation of wheat straw components [J]. Industrial Crops and Products, 1998, 7(2/3): 249-256.
- [9] 王琪, 史宇亮, 李济宁, 等. 玉米秸秆板加工工艺优化 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 199-201.
- Wang Q, Shi Y L, Li J N, et al. Process optimization of corn straw board [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 199-201. (in Chinese)
- [10] 郑凤山, 李月芬, 丁占来. 玉米秸秆制造刨花板的实验研究 [J]. 人造板通讯, 2002(12): 9-18.
- Zheng F S, Li Y F, Ding Z L. Experimental research on corn-straw-based particle board [J]. China Wood-based Panels, 2002(12): 9-18. (in Chinese)
- [11] (美)希默尔 M E. 生物质抗降解屏障: 解构植物细胞壁产生物能 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 2-65.
- Himmel M E. Biomass recalcitrance: Deconstructing the plant cell wall for bioenergy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 2-65. (in Chinese)
- [12] 李红艳, 张增强, 李荣华, 等. 微波酸预处理玉米秸秆纤维素酶水解条件研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 181-187.
- Li H Y, Zhang Z Q, Li R H, et al. Study on cellulase enzymatic hydrolysis of microwave-acid pretreated corn stalk [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(12): 181-187. (in Chinese)
- [13] 陈洪章. 秸秆资源生态高值化理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 23-86.
- Chen H Z. Theory and application of straw resource ecological and high-value utilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 23-86. (in Chinese)
- [14] Jin S, Chen H. Structural properties and enzymatic hydrolysis of rice straw [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(6): 1261-1264.
- [15] 高梦祥. 玉米秸秆茎叶分离机理试验研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001: 1-56.
- Gao M X. Study on the separation mechanism of stalk and leaves of corn straw [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2001: 1-56. (in Chinese)
- [16] 朱新华, 郭文川. 一种秸秆茎叶分离的方法和装置: 中国, ZL 200710018502. 7 [P]. 2010-11-10.
- Zhu X H, Guo W C. A kind of method and device for stem-leaf separation of corn straw: China, ZL 200710018502. 7 [P]. 2010-11-10. (in Chinese)
- [17] 吴守一. 农业机械学: 下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 195-200.
- Wu S Y. Agricultural mechanics: the last of two volumes [M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 195-200. (in Chinese)