

单张封口条离型纸剥离机理分析和机构设计

陈为泽, 张国凤

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月14日; 录用日期: 2023年9月20日; 发布日期: 2023年9月27日

摘要

为了解决现包装企业剥离封口条上离型纸这一工序依旧是人工来完成, 从而设计一套剥离装置。封口条离型纸为单张离散的, 且底纸里嵌入了细铁丝, 因此不能采用成卷式标签的剥离方法。故模仿人工剥离, 先使用刀具对离型纸边界的粘接力进行破坏, 达到初剥离的效果, 后利用夹持装置进行完全剥离。由于挠性试件在剥离过程中会使得刚度下降, 从而影响夹持效果, 故采用comsol的粘附和剥离对离型纸剥离进行仿真, 得出最佳的夹持距离为7 mm。后根据设计要求, 设计刀具运动轨迹, 提出一套凸轮连杆机构来实现刀具运动轨迹, 在matlab中绘制凸轮, 导入Solidworks进行运动仿真, 来验证轨迹。

关键词

Comsol, 剥离仿真, 剥离机构, 离型纸, 凸轮连杆

Design and Test of Stripping Device for Single Sheet Sealing Strip Release Paper Verification

Weize Chen, Guofeng Zhang

School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 14th, 2023; accepted: Sep. 20th, 2023; published: Sep. 27th, 2023

Abstract

In order to solve the problem that the process of stripping the release paper on the sealing strip of

the current packaging enterprise is still manual, a set of stripping device is designed. The release paper of the sealing strip is single and discrete, and the thin iron wire is embedded in the back paper, so the stripping method of rolled label cannot be used. Therefore, to simulate manual stripping, first the tool is used to destroy the adhesive force of the release paper boundary to achieve the effect of initial stripping, and then the clamping device is used to completely peel. Because the rigidity of the flexible specimen will decrease during the stripping process, which will affect the clamping effect, the adhesion and stripping of comsol are used to simulate the stripping of the release paper, and the best clamping distance is obtained. Then, according to the design requirements, the paper designs the tool motion path, proposes a set of cam linkage mechanism to realize the tool motion path, draws the cam in matlab, and imports Solidworks for motion simulation to verify the path.

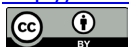
Keywords

Comsol, Stripping Simulation, Stripping Mechanism, Release Paper, Cam Linkage

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

烘焙产业蒸蒸日上, 数据显示, 2011~2017年, 我国烘焙食品消费额的年复合增长率 11.9%, 远高于烘焙市场已然成熟的美国(2.2%)和日本(0.11%)。2018年以后烘焙行业增长整体放缓, 但仍处快速发展期。近年来, 随着环保意识逐渐深入人心, 简化、绿色成了食品包装的主流, 焙烤食品也不例外, 故自带铁丝封口的纸袋广泛用于烘焙食品的封装。

目前, 我国的纸袋和封口条的生产已有比较完善和成熟的流水线设备, 但是将封口条粘贴在袋口处这道工序依旧需要人工来完成, 工人需用手将封口条上的离型纸剥离, 再将带有粘胶剂那一面的封口条较为精准地粘贴到纸袋口, 即完成此工序, 看似并不复杂的工序, 但在数量极其庞大的纸袋前, 工作量大, 需要大量的人工成本。

现市面上标签剥离大多是针对成卷式标签的连续剥离, 此类标签剥离的原理是标签跟随纸带贴合在剥离板上运动, 当标签随底纸匀速运动时, 由于标签自身挺度 EI 及惯性作用, 黏结力不足以使标签产生较大曲率, 固标签脱落。由于封口条为单张形态, 且底纸上带有铁丝卷边, 故成卷式标签的剥离方法并不适用于封口条离型纸的剥离。

本文采用 comsol 的粘附和剥离对离型纸剥离进行仿真, 得出最佳的夹持距离, 并设计一套封口条离型纸剥离装置。后根据设计要求, 设计刀具运动轨迹, 提出一套凸轮连杆机构来实现刀具运动轨迹, 在 matlab 中绘制凸轮, 导入 Solidworks 进行运动仿真, 来验证轨迹。

2. 封口条离型纸剥离机理研究

2.1. 封口条组成结构特征

本文采用的封口条来自温州某包装企业, 封口条由离型纸和带有铁丝卷边的底纸组成, 如图 1 所示。离型纸通过胶粘剂黏附在底纸上。

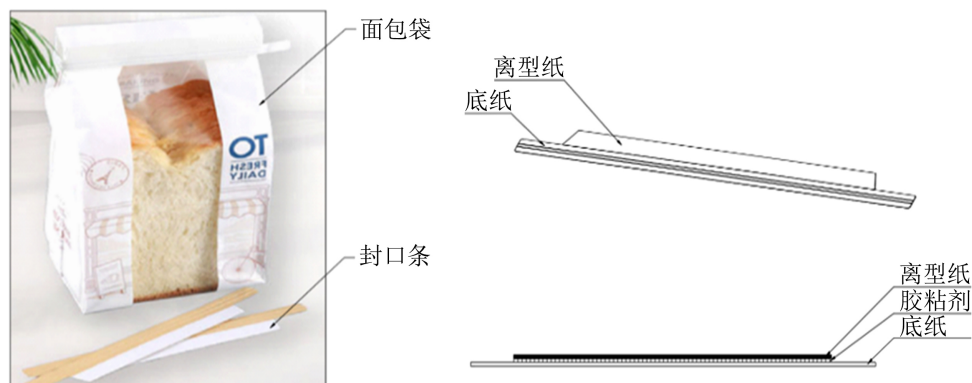


Figure 1. Composition of sealing strip
图 1. 封口条的构成

2.2. 封口条剥离机理分析

封口条是将离型纸粘接在底纸上, 离型纸剥离时, 剥离刀刃切入封口条的离型纸和底纸之间, 使得离型纸剥离时粘接边界处产生界面破坏(即胶层全部与被粘物脱开)。克服粘接力脱开的边界条件为:

$$F = F_d \quad (1)$$

剥离时离型纸所受到胶粘剂的粘接力可以等效为受到一个均布载荷 $q(x, y) = q$, 封口条一端为固定端, 一端为自由端。自由端受到粘接边界的集中应力, 等效于受到一个集中的粘接力 F 和剥离刀具对粘接边界 Z 方向的分力 F_d 的共同作用。等效模型如图 2 所示。

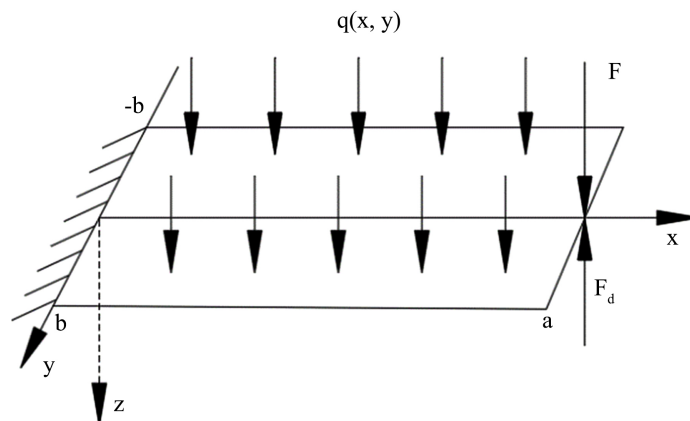


Figure 2. Force equivalent model of release paper
图 2. 离型纸受力等效模型

影响标签剥离的关键因素是粘接的剥离强度, 剥离强度是指在规定的剥离条件下是粘接件分离时单位宽度所能承受的最大负荷, 其单位一般为 N/m 。通常测量粘接件的 180° 剥离强度。剥离强度受试样宽度、厚度、胶层厚度、剥离速度和剥离角度等因素的影响。一般情况下, 剥离强度随着剥离角的增大而下降, 剥离角为 180° 时的剥离强度最小; 剥离强度随着加载速度的增加而提高[1] [2]。

由于封口条属于挠性试件与挠性试件的粘接, 所以标签剥离强度的测定需采用 GB/T2791-1995 中规定的测量方法来测量[3]。 180° 剥离强度的测定在电子式材料试验机上进行, 对于两个挠性试件的粘接需采用 T 型剥离[4], 加载速度为 200 mm/min , 试样宽为 25 mm , 长度大于 200 mm , 测试原理图 3 所示。

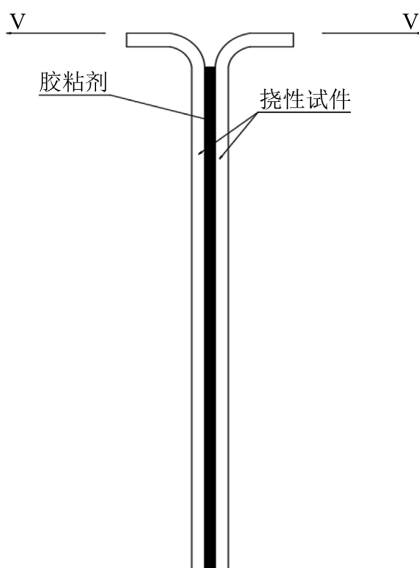


Figure 3. Schematic diagram of T-type stripping
图 3. T 型剥离原理图

以恒定的拉伸速度施加载荷, 自动记录上得到应力 - 应变曲线图, 胶层破坏后, 利用以下公式计算剥离强度[5]:

$$S_b = KA/ab \quad (2)$$

式中: S_b 为剥离强度; K 为应力 - 应变曲线图上单位高度所表示的负荷量; A 为曲线图形的面积; a , b 分表表示曲线图形底线的长度和试件宽度。

经测定封口条的 180°剥离强度为 8 N/25 mm。封口条离型纸粘接宽度为 8 mm, 所以离型纸的剥离强度为 $s_b = 2.56$ N/8 mm。

2.3. 基于 Comsol 的剥离仿真

Comsol 中固体力学模块里的剥离功能可以模拟两层结构的剥离, 剥离仿真采用的内聚力模型 (cohesive zone model, 简称 CZM) 是基于以下应用条件的材料模型:

- 1) 粘结层的应力随着边界分离距离的增加而增大。
- 2) 在两个边界的分离距离到达一定程度之前, 粘结层表现出线弹性行为。
- 3) 在物体的弹性变形达到峰值后, 应力随着进一步变形而减小。
- 4) 消耗完一定的能量后, 两层之间的粘接将彻底断裂。
- 5) 如果在粘结完全断裂之前卸载负载, 层结构将被视为受到了损坏, 其弹性刚度则随之减小。

剥离仿真参数的确定:

由于 comsol 中的粘附是依靠罚函数来模拟的, 可以视作使用了一个刚性的弹簧来模拟接触。由于测得的离型纸剥离强度为 $s_b = 2.56$ N/8 mm。故将罚刚度设为: $P_n = 320$ N/mm³。

把封口条组成材料中上层的离型纸薄膜记为材料 1, 下层的底纸记为材料 2。

查材料手册可知:

材料 1 的弹性模量 $E_1 = 2800$ MPa, 泊松比 $\nu_1 = 0.41$, 密度 $\rho = 1570$ kg/m³; 材料 2 的弹性模量 $E_2 = 2000$ MPa, 泊松比 $\nu_2 = 0.25$ 。密度 $\rho = 380$ kg/m³。

针对不同的本构定律, 可以从三个选项中做出相应的选择, 如图 4 所示。

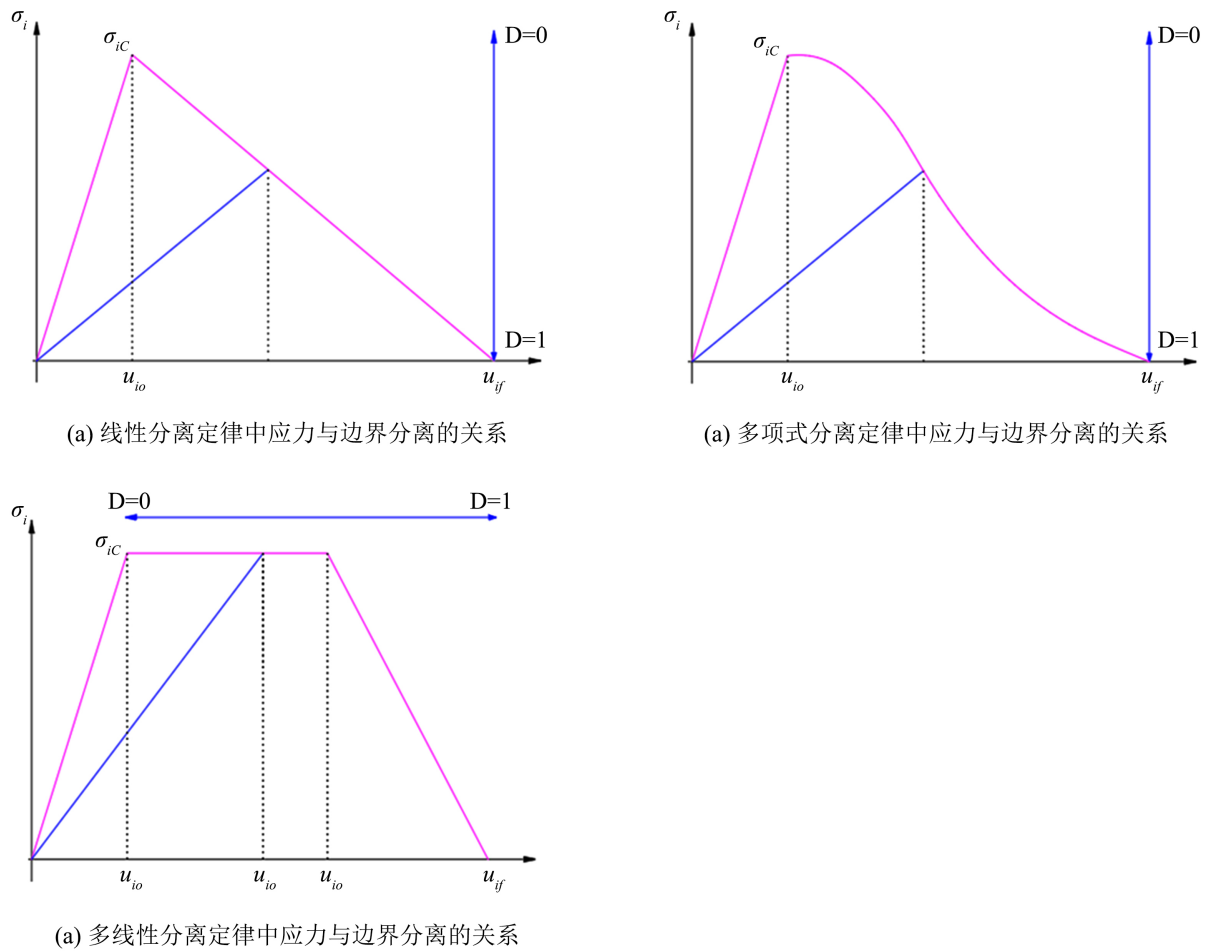


Figure 4. Relationship between stress and boundary separation in different separation laws
图 4. 不同分离定律中应力与边界分离的关系

Table 1. Summary of material properties of CZM interface
表 1. CZM 界面的材料属性汇总

名称	符号	大小
法向抗拉强度	σ_t	32 MPa
剪切强度	σ_s	20 MPa
临界能量释放率(张力)	G_{ct}	0.97 [kJ/m ²]
临界能量释放率(剪切)	G_{cs}	1.72 [kJ/m ²]
罚刚度	P_n	320 N/mm ³
Benzeggagh 和 Kenane (B-K) 准则指数	α	2.284

将参数输入到 Comsol 全局定义参数中, 如表 1 所示, 建模, 在离型纸裂纹边界处施加一个持续的杠杆力来代替剥离刀具的剥离力, 如图 5 所示。

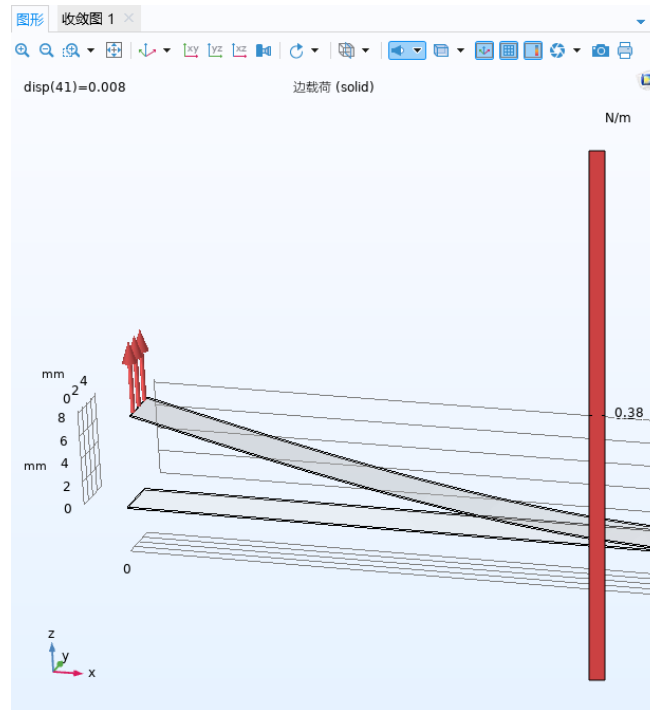


Figure 5. External load diagram
图 5. 外加载荷图

通过图 6 可得出, 剥离时, 裂纹边界处的应力最大。

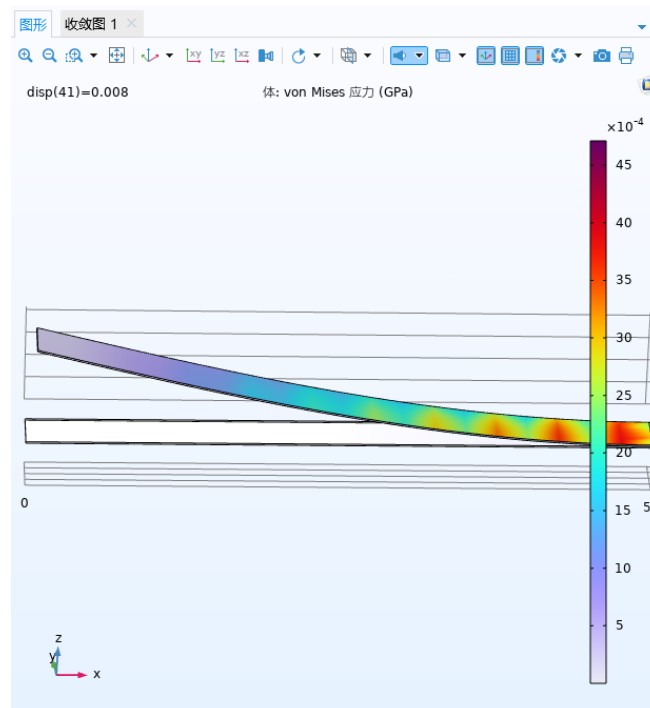


Figure 6. Stress distribution diagram
图 6. 应力分布图

在 Comsol 模型开发器的结果里生成载荷位移曲线图, 如图 7 所示, 从中得出施加的载荷超出粘接力所承受的最大载荷, 开始剥离, 超过峰值载荷后, 载荷开始减小, 直到约 7 mm 处, 载荷开始增加, 但刚度会永久性降低。故夹持装置设置在预剥离约 7 mm 处最为合理。

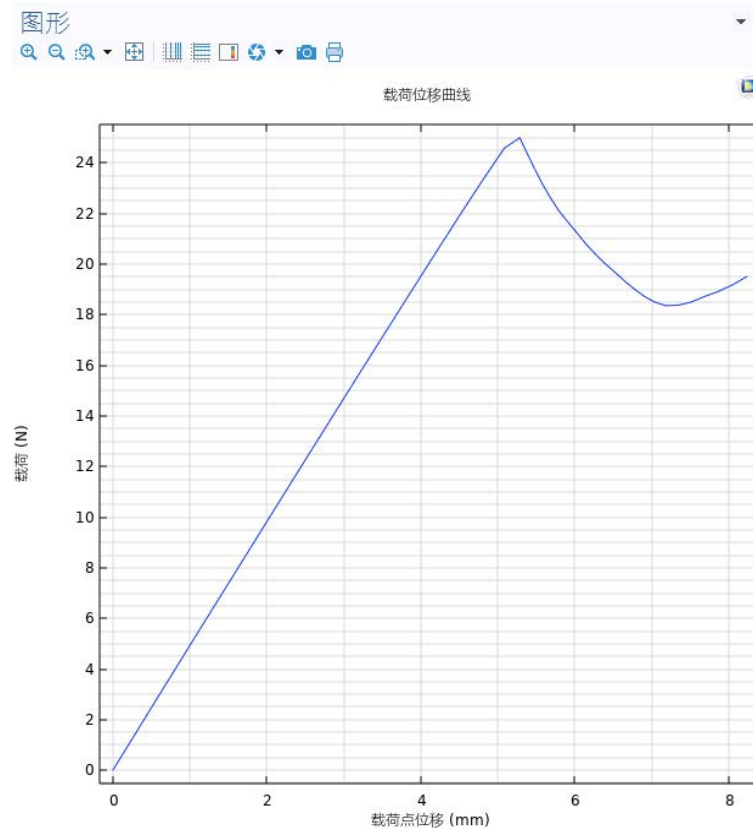


Figure 7. Load-displacement curve
图 7. 载荷 - 位移曲线图

3. 封口条离型纸剥离装置的机构设计

3.1. 封口条离型纸剥离装置功能要求

包装机械一般由驱动机构、传动机构、执行机构、控制机构等组成。封口条离型纸剥离机构需要实现的任务是将黏附在纸袋封口条上的离型纸进行剥离[6]。

根据上述剥离机理分析, 采用机械式的剥离方法, 剥离刀具刀头给与一定压力抵在封口条底纸上方, 然后进行一个横向进给运动, 将封口条离型纸进行剥离, 如图 8 所示。

刀头剥离离型纸的机构, 在刀具剥离过程中, 刀头始终给定一定压力贴合在底纸表面上, 为保证贴合压力不变, 剥离刀具剥离轨迹需为直线, 并且在剥离过程中, 刀具的姿态需始终保持不变, 以保证有稳定的剥离力剥离离型纸, 并要求在回程中避让开封口条, 以免对胶粘剂进行破坏, 因此回程的轨迹可以为弧线或与进给轨迹不在同一水平高度的其他类型轨迹, 回程剥离刀具的姿态并无要求。

工作轨迹一般有以下四种, 如图 9 所示。

比较分析上述四种执行端的工作轨迹, 结合实际情况, 为了便于执行端在回程中快速复位[5], 便于进行下一次剥离的进给, 回程中机构控制的简便, 因此选择如图 9(a)所示的执行端运动轨迹。

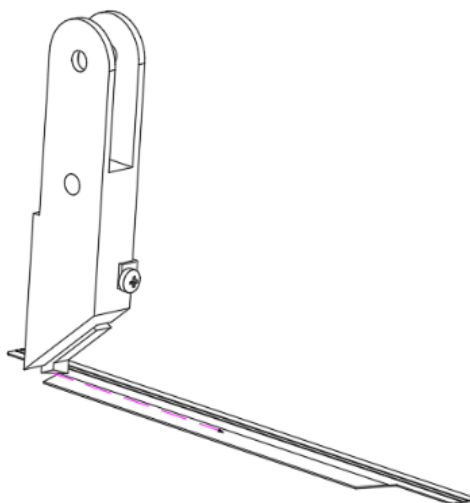


Figure 8. Schematic diagram of tool stripping
图 8. 刀具剥离示意图

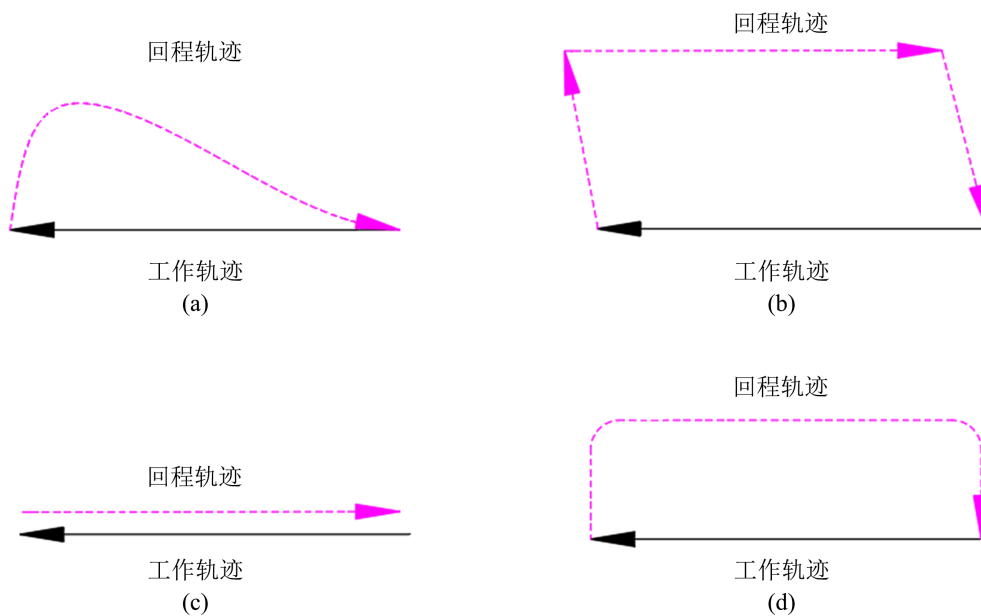


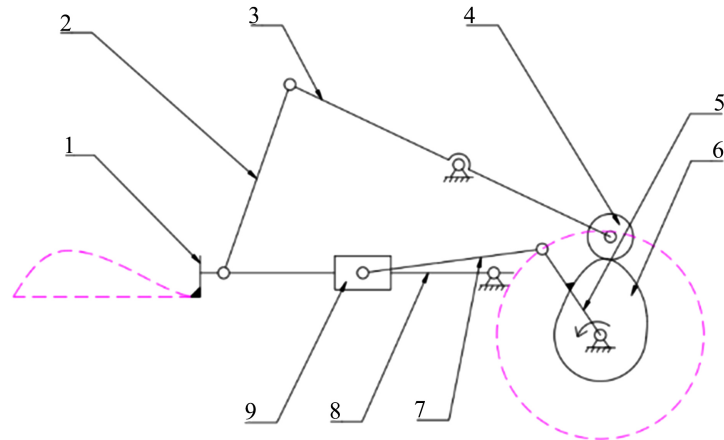
Figure 9. Motion track of execution end
图 9. 执行端运动轨迹

3.2. 机构的提出

机构的所需轨迹形状确定以后, 可以根据理论轨迹筛选基本机械机构作为基础机构和附加机构, 用基础机构来初定大致轨迹, 后在基础机构上来增加附加机构来调整轨迹[7]。

设计构思: 结合工艺要求, 将所要剥离轨迹进行分解, 即看成是水平方向和垂直方向的位移叠加。以叠加组合理论为基础, 采用 3 型叠加组合机构为指导思想, 即附加机构安装在基础机构的可动构件上, 设置在基础机构的可动构件上的动力源作为附加机构的运动输入, 驱动附加机构运动。

在基础机构中选型[8], 利用机构叠加组合设计思想, 执行头水平推送和回复行程通过连杆实现, 凸轮机构实现执行头的垂直运动, 如图 10 所示。



1——剥离刀具；2——连杆①；3——连杆②；4——滚子；5——曲柄；6——凸轮；7——连杆③；8——滑轨；9——滑块

Figure 10. Schematic diagram of mechanism movement
图 10. 机构运动简图

3.3. 剥离刀具横向进退的曲柄滑块机构设计

3.3.1. 曲柄滑块机构尺度参数设计

曲柄滑块机构往往具有急回特性[9] [10], 即当曲柄匀速转动时[11] [12], 从动件在位移相等的正反行程中所需时间不同。一般用行程速度变化系数来反映急回特性。

$$K = \frac{\text{从动件快行程平均速度}}{\text{从动件慢行程平均速度}} (\geq 1) \quad (3)$$

极为夹角为:

$$\theta = 180^\circ \frac{K-1}{K+1} \quad (4)$$

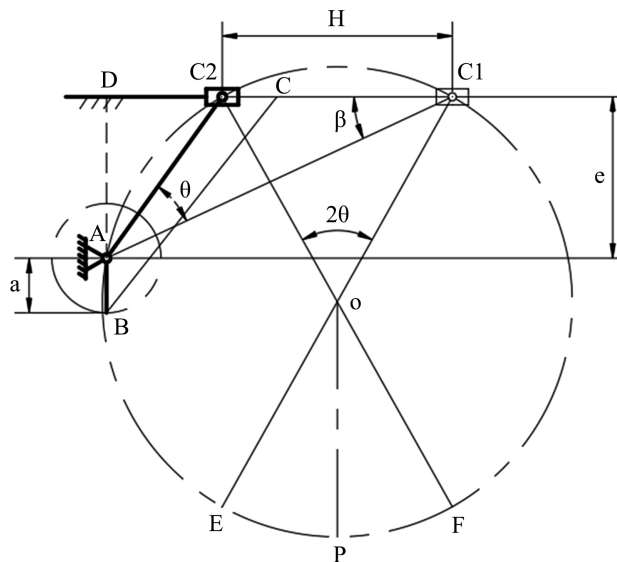


Figure 11. Crank slider mechanism
图 11. 曲柄滑块机构

1) 选定极位夹角 θ

根据设计要求, 每分钟需完成 40 次剥离。因此, 曲柄转速设置为 40 r/min。剥离周期 $T = \frac{60}{40} = 1.5$ s。

初设推程周期为 $t_1 = 0.8$ s, 回程周期为 $t_2 = 0.7$ s。则 $K = \frac{t_1}{t_2} = 1.143$, 极为夹角 $\theta = 180^\circ \frac{K-1}{K+1} = 12^\circ$ 。

2) 选定滑块行程 L 和偏置距离 e

已知离型纸长度为 112 mm, 并且为了和摆动凸轮机构组合, 增加装配的可行性并需要留出一部分长度用于控制机构的执行件回程时的轨迹和姿态。故初设 $L = 150$ mm, $e = 50$ mm。

3) 曲柄长度和连杆长度的确定

分析滑块处于极限位置时, 其位置尺寸和角度之间的关系, 得到曲柄、连杆、偏距和行程、极位夹角的相互关系, 如图 11 所示。

由曲柄滑块机构参数计算公式推导得到:

$$\frac{\left(\frac{L^2}{4} - a^2 \cos^2 \frac{\theta}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} - a^2 = \frac{L \cdot e}{\sin \theta} \quad (5)$$

$$\frac{b^2 - \left(\frac{L^2}{4} - b^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)}{\cos^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{L \cdot e}{\sin \theta} \quad (6)$$

根据公式(5)、(6)可得:

$$a = \sqrt{\frac{L^2}{4} - \frac{L \cdot e}{2} \tan \frac{\theta}{2}} \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\frac{L^2}{4} + \frac{L \cdot e}{2} \cot \frac{\theta}{2}} \quad (8)$$

将 $L = 112$ mm, $e = 50$ mm 代入式(7)、(8)可得: $a = 72.3$ mm, $b = 203.2$ mm。

其中 a 为曲柄长度, b 为连杆③长度。

3.3.2. 曲柄滑块机构最下传动角校核

传动角指的是连杆和滑块导轨方向垂直方向之间的夹角, 传动角越大, 传动性能越好, 为不影响传动性能, 一般机构最小传动角应大于许用传动角 $[\gamma] = 40^\circ$ [13]。

根据图 11 所示, 在 $\triangle AC_1C_2$ 中, 根据正弦定理:

$$\frac{a+b}{\sin(\beta+\theta)} = \frac{L}{\sin \theta} \Rightarrow a+b = \frac{L \cdot \sin(\beta+\theta)}{\sin \theta} \quad (9)$$

$$\frac{b-a}{\sin \beta} = \frac{L}{\sin \theta} \Rightarrow b-a = \frac{L \cdot \sin \beta}{\sin \theta} \quad (10)$$

解得:

$$a = \frac{L \cdot \sin(\beta+\theta) - \sin \beta}{2 \sin \theta} \quad (11)$$

$$b = L \frac{\sin(\beta + \theta) + \sin \beta}{2 \sin \theta} \tag{12}$$

$$e = (a + b) \sin \beta = \frac{L \cdot \sin \beta \cdot \sin(\beta + \theta)}{\sin \theta} \tag{13}$$

由式(9)~(13)可得最小传动角:

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{a + e}{b} \tag{14}$$

将数据代入(14)求得:

$$\gamma_{\min} = \arccos \frac{a + e}{b} = 53^\circ \geq [\gamma] = 40^\circ \tag{15}$$

可以满足机构要求, 最终得出曲柄滑块机构参数, 如表 2 所示。

Table 2. Parameters of crank slider mechanism

表 2. 曲柄滑块机构参数

执行端行程	曲柄长度	连杆③长度	偏心距	γ_{\min}
150 mm	72.3 mm	203.2 mm	50 mm	53°

3.4. 剥离刀具上下运动的摆动凸轮设计

3.4.1. 曲柄滑块机构和摆动凸轮工作循环图分析和设计

由于剥离机构由一个曲柄滑块和一个摆动凸轮共同组成的组合机构, 为使得剥离机构的各组成机构运动能够协调、配合, 绘制曲柄滑块机构和摆动凸轮机构的工作循环图[14], 如图 12 所示。

划分和确定各执行机构循环组成区段:

t_1 执行端推程段(对应凸轮近休止段) t_2 执行端推程段(对应凸轮近推程段)。

t_3 执行端推程段(对应凸轮远休止段) t_4 执行端推程段(对应凸轮回程段)。

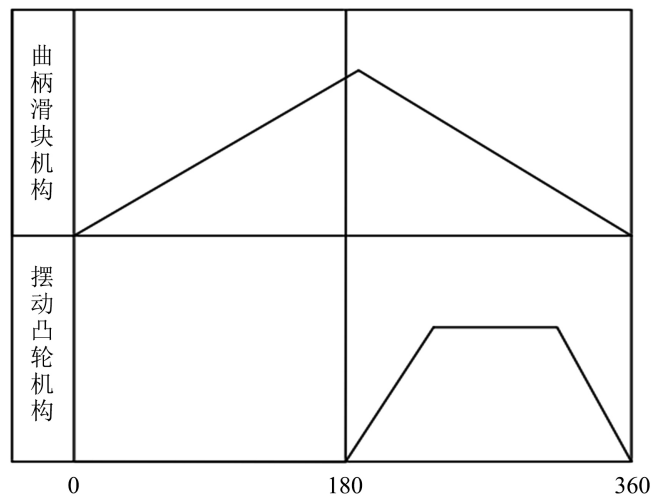


Figure 12. Working cycle diagram of combined mechanism

图 12. 组合机构工作循环图

通过 matlab 程序编制建立滚子从动件在各个运动阶段内的运动规律的数学模型[15][16], 利用 matlab 中函数编辑、计算功能, 求出所需设计的凸轮的理论轮廓曲线和实际轮廓曲线, 如图 13 所示。

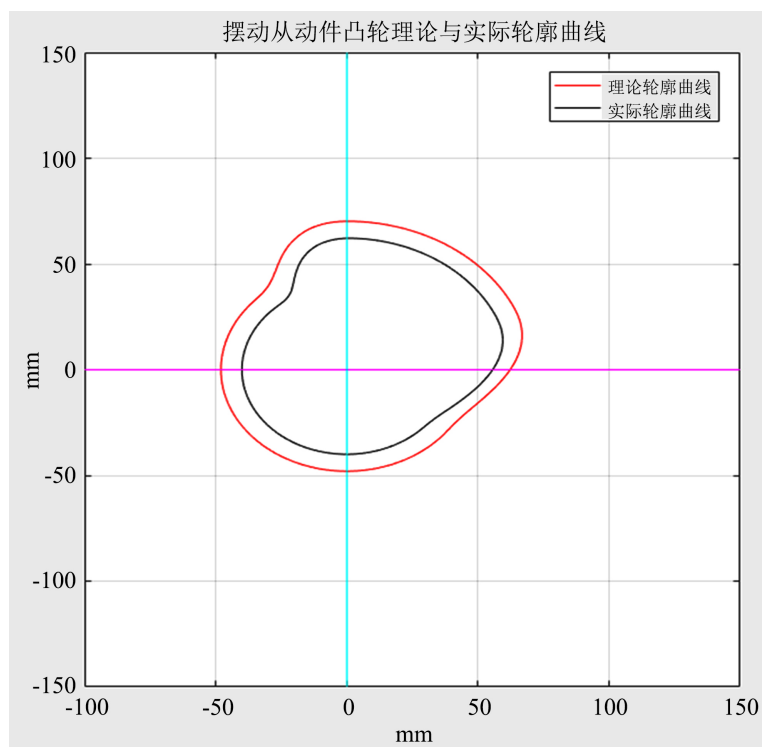


Figure 13. Theoretical contour curve and actual cam curve of the cam
图 13. 凸轮的理论轮廓曲线和实际凸轮曲线

3.4.2. 剥离机构三维建模及轨迹验证

根据 Comsol 仿真得出最佳的夹持位置为预剥离约 7 mm 处。如图 14 所示, 通过剥离刀具和弹簧板将离型纸夹持剥落。

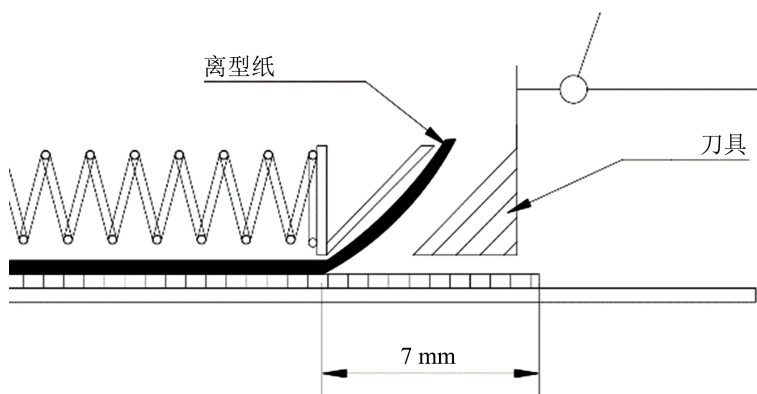


Figure 14. Schematic diagram of clamping device
图 14. 夹持装置示意图

将 matlab 中的凸轮参数导入到 Solidworks 绘制凸轮, 装配。对装置进行三维建模, 如图 15 所示。

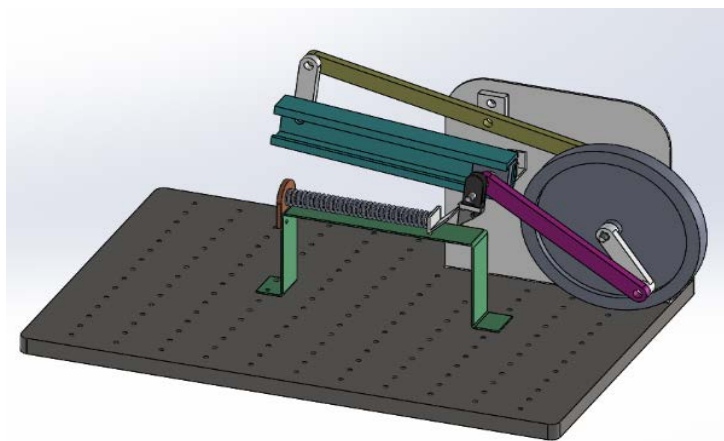


Figure 15. Three-dimensional modeling diagram of stripping device
图 15. 剥离装置三维建模图

对机构进行运动仿真, 并记录刀头轨迹, 如图 16 所示, 刀头的工作轨迹为直线段, 回程轨迹具有明显的回程避让线段, 符合设计要求。

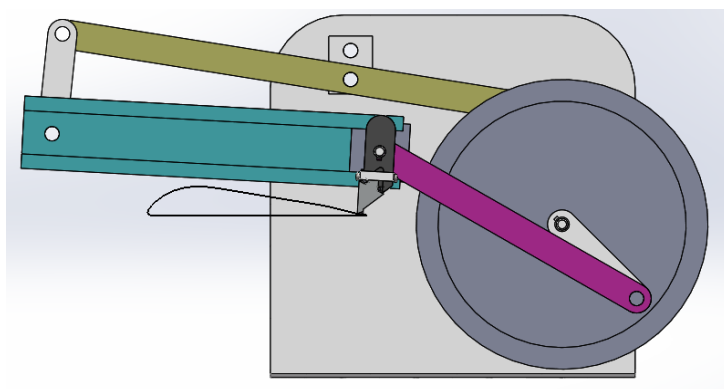


Figure 16. Stripping tool motion path
图 16. 剥离刀具运动轨迹图

4. 结语

本研究通过对封口条离型纸剥离的机理以及人工剥离方法的技术分析, 基于 Comsol 的剥离仿真模块, 设计了一套封口条离型纸剥离装置, 最终完成的结果如下:

- 1) 采用 Comsol 的粘附和剥离对离型纸剥离进行仿真, 得出最佳的夹持距离为 7 mm。
- 2) 模仿人工剥离方法, 来确定理想剥离刀具的轨迹, 设计刀具运动方案和夹持装置方案, 以及整体机构的设计建模。
- 3) 设计一套凸轮连杆机构, 并通过 matlab 求解凸轮轮廓线, 以达到机构运动实现理想剥离刀具的轨迹。
- 4) 运用 Solidworks 对机构进行建模, 并利用其中的 Motion 对机构的运动轨迹进行仿真验证。

基金项目

纸质包装后道加工设备的关键技术研究(项目号: LGYJY2021001)。

参考文献

- [1] 迈克尔·费尔利. 图解标签技术百科全书[M]. 北京: 引述工业出版社, 2006.
- [2] 李子东, 李广宇, 刘志军. 实用胶粘技术[J]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 450-512.
- [3] 赵艳东. 不干胶标签常见应用问题分析[J]. 印刷杂志, 2005(3): 9-10.
- [4] 潘慧铭, 黄素娟. 表面, 界面的作用与粘接机理(一) [J]. 粘接, 2003, 24(2): 5-10.
- [5] 杨晓清. 包装机械与设备[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [6] 黄德良, 任子文, 史志芳. 实现有速度要求轨迹的凸轮连杆组合机构设计[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(4): 32-34.
- [7] 陈亚琴, 孔凌嘉, 张春林. 机构叠加组合与创新设计[J]. 机械设计与研究, 2001(4): 49-50.
- [8] 杨黎明, 杨志勤. 机构选型与运动设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [9] 唐家玮. 平面连杆机构的综合[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
- [10] 梁崇高. 平面连杆机构的计算设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [11] 李明, 赖尚丁, 李春晔. 也谈同时按K和 α 设计平面曲柄滑块机构的解析法[J]. 机械设计, 2011(6): 35-36.
- [12] 苏有良. 给定行程、极位夹角解析设计偏置曲柄滑块机构法[J]. 滁州职业技术学院, 2010, 9(3): 64-80.
- [13] 李学荣, 应瑞森. 连杆曲线图谱[M]. 重庆: 重庆出版社, 2003.
- [14] 马洪杰, 刘晓日, 赵哲, 黎苏. 内燃机教学中工作循环的线图表示法[J]. 教育现代化, 2018, 5(33): 174-179.
- [15] 杨捷. 基于 Matlab 的平面机构分析解析法[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2013.
- [16] 周智峰. 基于 MATLAB 和 VRML 的凸轮机构虚拟设计研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2005.