

特轻薄异型件的定位及运动学分析

顾立志^① 杨康^② 邢蕾^② 孙红旗^②

(^① 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021; ^② 佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要 根据特轻薄异型件——新式组合瓶盖衬垫的结构特点、与外体组合压装前的位置与运动关系, 分析确定其定位方式. 进行衬垫止口与导向键配合过程的运动学分析, 确定最佳导向键斜角的大小. 将衬垫抽象为某一质量 m 、质心 $O(a, b)$ 的准自由落体, 其运动为自由落体基本运动和绕固定点回转的牵连运动. 在此基础上, 探讨衬垫与外体组合前下落的姿态. 它为确定衬垫准确落入外体, 提供确切的结构与运动的参数.

关键词 特轻薄异型件, 定位, 运动学分析, 衬垫, 参数

中图分类号 TG 506.6; TH 113.2⁺ 2

文献标识码 A

迄今, 一种新式瓶盖组合式易拉盖已经问世. 因其设计精巧, 结构紧凑, 具有易启、防爆、不损瓶口和环保等特点或功效, 适应当前灌装生产, 正在部分地替代已有 300 余年历史的皇冠盖. 这种组合式易拉盖有一个重要部件——衬垫, 其直径约 27 mm, 壁厚 0.2 mm, 马口铁材料, 在边缘开有止口. 它与外体组合压装并塑封, 成为一个完整的瓶盖, 如图 1 所示. 衬垫的定位以及在与外体压装组合前的运动状态都将直接影响到压装的质量, 从而成为该种瓶盖生产的关键技术问题. 对其详细分析和系统研究, 可为设计和制造生产组合式瓶盖的工艺装备提供可靠的技术保证.

1 衬垫的结构特点及定位方式分析

零件能否在机床或夹具上正确定位是保证加工质量的重要手段^[1]. 使外体与衬垫压装时的正确配合, 必须保证其在压装机上可靠定位. 由于衬垫属于特轻薄异型件, 不仅轻、薄, 而且异型, 其定位方式有别于其它零件, 应给予特殊考虑. 目前能够实现这类零件定位的方式有限^[2], 且现有定位方式也不完全适于衬垫的定位. 按组合式易拉盖生产要求, 衬垫应能在运动的过程中自动定位, 从而顺利地与外体配合. 从这一具体要求出发, 我们确定了衬垫定位方式, 如图 2 所示. 这种定位方式是借助于在衬垫沿下料落料孔下滑的过程中, 衬垫上的止口始终与导向键配合, 从而

保证衬垫沿落料孔自由下滑后, 仍能保证其止口的朝向, 即实现定位. 定位的原理实质上是限制物体的自由度, 以保证其具有正确的位置. 衬垫的定位方式属于不完全定位. 在图 2 所示的主视图上, 假设水平方向为 X 坐标, 垂直方向为 Y 坐标, 垂直与纸面的方向为 Z 坐标. 那么当采用导向键时限制了衬垫绕 Y 轴的转动, 同时下料孔限制了衬垫沿 X 轴与 Z 轴方向移动. 至于衬垫沿 X 轴和 Z 轴的转动可以通过下料口的高度来调节. 当高度低于一定数值时, 衬垫即使转动, 也只会转动很小的角度即可落下, 不会影

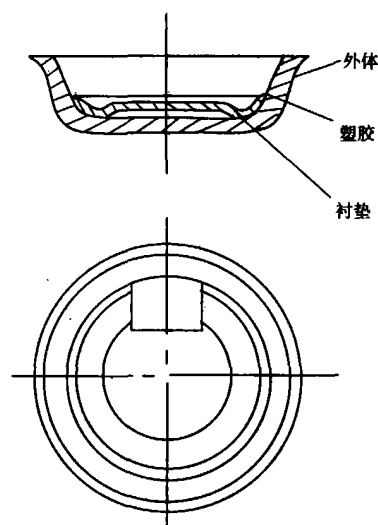


图1 新式组合易拉盖

收稿日期 2004-01-08

作者简介 顾立志(1956-), 男, 教授, 博士, 主要从事金属切削与先进制造技术的研究. E-mail: gulizhi168@hotmail.com

基金项目 黑龙江省科技计划重点基金资助项目(G99A13 1)

响其正确位置, 也不会产生翻转现象. Y 方向的移动是不必限制的自由度. 从以上分析可以看出, 这样定位方式可以实现衬垫在运动过程中的可靠定位.

2 衬垫止口与导向键配合过程的运动学分析

2.1 摩擦轮与衬垫传动关系分析

当衬垫由滑道运动至图 2 所示的位置时, 衬垫的边缘顶住导向键的边缘, 衬垫无法向前移动, 且止口也无法与导向键配合. 为了使止口能与导向键配合实现正确定位, 可在图 2 中所示由衬垫轴线的位置加一摩擦轮, 让摩擦轮带动其转动. 摩擦轮带动衬垫转动时, 衬垫的位置可能是千差万别的, 主要指止口的位置不同, 可能正对着导向键, 也可能在圆周上的任意位置, 但无论在任何位置都需要衬垫转动一定的角度. 最大转动角度出现在衬垫止口刚好转过导向键, 约为一周角. 所以, 必须确保衬垫能转动一周. 由于衬垫与摩擦轮接触后产生相对运动, 有一定的弹性滑动-速度损失. 为保证摩擦轮转动一定时间后, 能带动衬垫转一周, 设摩擦轮转动 $\frac{1}{3}$ 周时, 衬垫转一周. 这样即使在转动中存在弹性滑动, 也可充分保证转动的可靠性. 其传动关系可表示为

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{(1-\varepsilon)D_1} \approx \frac{D_2}{D_1} \tag{1}$$

在式(1)中, i 为传动比; n_1, n_2 分别为摩擦轮、衬垫的转速($r \cdot \min^{-1}$); D_1, D_2 分别为摩擦轮、衬垫的直径(mm); ε 为速度损失率, 取 1%. 从上面公式可知由衬垫直径 D_2 及传动比即可摩擦轮的直径, 同时取定摩擦轮的转速, 也能求出衬垫的转速, 从而得出衬垫转一转所需的时间, 即衬垫需多长时间才能使止口与导向键接触.

2.2 导向键倾角的分析与确定

当止口与导向键接触后, 由于摩擦轮的带动, 衬垫与导向键进行类似于轮齿啮合运动. 衬垫在滑道中不同位置及衬垫止口与导向键的接触状况, 如图 3 所示. 在图 3 中可以看出, 当衬垫运动到一定位置后, 止口的右侧开始与导向键接触, 这时导向键的一角将阻碍衬垫的继续运动. 为排除阻碍现象的发生, 须切去导向键的一角, 切去的尺寸及角度需根据极限位置求得, 这一极限位置可保证衬垫止口能顺利的进入到导向键. 由图 3 可知, 当衬垫的轴线位于与导向键左侧共线的位置时, 即 O_2 位置, 衬垫与导向键的接触点为最高接触点, 即当轴线位于其他位置时, 衬垫与导向键的接触点都低于这个最高接触点. 如果衬垫上的止口在此位置时能进入导向键, 那么在此前的一切位置都可进入, 而且在此后的一切位置可借助于止口与导向键的左侧接触长度的减小而顺利进入导向键. 通过分析可知, 在衬垫与导向键配合过程中, 当衬垫处于 O_2 轴位置时, 为其极限位置. 衬垫与导向键的右侧接触点为 C , 若沿 DC 线切下, 则可保证衬垫进入导向键中. C 点位置的求解公式为

$$\angle CDM = \arctg \frac{[t - b \cdot \sin(\arccos \frac{b}{2R})]}{b} \tag{2}$$

在式(2)中, t 为止口的深度(mm), b 为止口的宽度度(mm), R 为衬垫的半径(mm). 将有关的数据代入式(2), 即可求 C 点的位置, 沿 DC 线切去即可保证所需的角.

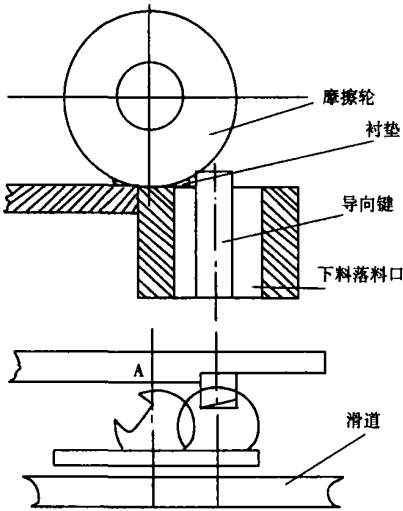


图 2 衬垫的定位

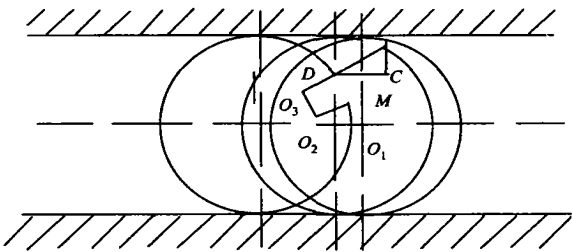


图 3 衬垫止口与导向键的接触及导向键倾角

3 衬垫沿导向键下落过程的运动学分析

由于衬垫属于特轻薄异型件, 其下落过程同其它形状物体的下落状态存在差异. 它的止口对下落过程, 具有特殊影响.

3.1 假设其为无止口的薄圆板件

在衬垫下落过程中, 希望其周边不与下料孔内壁接触. 但实际上, 衬垫的边缘会与内壁接触, 不接触的几率极小. 下面从两种情况分析下落状态.

3.1.1 理想状态下的衬垫周边与内壁不接触 当处于这种理想状态, 衬垫会受到重力 G 和空气对其产生的浮力 F 作用, 因为衬垫重量轻, 浮力对其影响不能忽略. 由于衬垫下落时的初始速度为零, 所以在两个力的作用下, 将作自由落体运动. 其下落过程的运动方程为

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1} g t^2. \quad (3)$$

在式(3)中, ρ_1 , ρ_2 分别为马口铁、空气的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$). 将数据代入式(3), 可得到其下落过程的运动方程为

$$S = 4.895 t^2.$$

3.1.2 在下落过程中与内壁有接触 下落过程衬垫与下料孔的接触为点接触, 且接触点的位置是随机的, 可能是圆周方向的任意一点. 此点可以看成是衬垫绕其转动的支点, 而且由于重力作用衬垫又向下移动, 在接触点处衬垫与下料孔壁有相对运动, 并存在一定的摩擦力. 所以衬垫共受 3 个作用力. 重力的作用点在圆心, 且方向垂直向下. 浮力也作用于圆心, 方向垂直向上. 摩擦力在接触点处垂直向上. 这样, 摩擦力与重力中的一部分形成力矩, 使圆板转动. 其余力的矢量和使圆板运动. 所以圆板边下落边转动. 根据刚体的转动微分方程^[3], 有

$$I = \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = M = f_{\text{摩}} \cdot R. \quad (4)$$

在式(4)中, I 为转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); R 为板半径(m); Φ 为转动的角度(rad); f 为摩擦力(N). 将圆板的转动惯量 $I = \frac{1}{4} m R^2$ 代入式(4), 可得

$$\frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \frac{4f_{\text{摩}}}{mR}. \quad (5)$$

将式(5)积分, 得到转角与下落时间的函数关系为

$$\Phi = \int \frac{4f}{mR} \cdot t \cdot dt = \frac{2ft^2}{mR}. \quad (6)$$

将有关数据代入式(6), 可得到在此情况下下落过程中转角 Φ 与时间 t 的关系式为

$$\Phi = 47.33 t^2.$$

除转动外, 物体还做下落运动. 其作用力大小为重力减去空气浮力及摩擦力, 方向垂直向下. 在此力作用下的运动方程为

$$S = \frac{1}{2} \cdot \frac{(G - f_{\text{浮}} - f_{\text{摩}})}{m} t^2. \quad (7)$$

将有关数据代入式(7), 得到 $S = 3.46 t^2$. 从以上分析可以看出, 在下落过程中衬垫与内壁有接触时, 它的运动状况是边下落边转动. 随着下落时间的加长, 其转动的角度也将相应增大. 当大到一定数值时, 圆板会发生翻转现象, 这样就会影响定位的可靠性. 为防止翻转, 可通过调节下落高度来控制.

3.2 衬垫存在止口

在第一种情况中, 对假设衬垫上无止口, 进行了分析, 但实际上, 衬垫具有止口. 那么由于止口的存在会使衬垫的质心发生改变, 止口对衬垫运动状态的影响须经过分析才知道. 首先求形心的位置. 由材料力学可知薄片圆形形心的坐标 x_c , y_c , 可得

$$x_c = \frac{\int_s x ds}{S}, \quad y_c = \frac{\int_s y ds}{S}. \quad (8)$$

在式(8)中, s 为薄片的横截面积; x, y 为其中任一微面积 ds 的坐标. 现将此圆形如图 4 所示分为 1, 2, 3 等 3 个部分, 取该图形的对称轴为 Y 轴. 由于对称, $x_c = 0$. 有

$$y_c = \frac{y_1 s_1 + y_2 s_2 + y_3 s_3}{s_1 + s_2 + s_3}.$$

因为 x 轴为 1, 3 的对称轴, 所以 $y_1 = y_3 = 0$, $y_2 = \frac{2R-t}{2}$. 代入相应数据 $R = 13.4 \text{ mm}$, $t = 5 \text{ mm}$, 得到 $y_2 = 10.9 \text{ mm}$. 为便于求 $s_1 + s_2 + s_3$, 现先求出阴影部分的面积 $S_{\text{阴}}$. 阴影部分由圆 $x^2 + y^2 = R^2$ 及直线 $x = \frac{b}{2}$ 围成. 用积分求其面积得

$$S_{\text{阴}} = \int_0^{\sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}} \left(\sqrt{R^2 - y^2} - \frac{b}{2} \right) dy. \tag{9}$$

积分后得到

$$S_{\text{阴}} = \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}}{R} - \frac{b}{2} \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}. \tag{10}$$

用数据代入式(10), 得

$$S_{\text{阴}} = 101.158 \text{ (mm}^2\text{)}.$$

那么

$$\begin{aligned} s_1 + s_2 + s_3 &= S_{\text{半圆}} + 2S_{\text{阴}} + S_{\text{矩}} = \\ &= \frac{\pi R^2}{2} + R^2 \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}}{R} - \frac{b}{2} \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}} + b(R - t). \end{aligned} \tag{11}$$

用数据代式(11), 得

$$s_1 + s_2 + s_3 = 534.616 \text{ (mm}^2\text{)}.$$

同理

$$\begin{aligned} s_2 &= S_{\text{矩}} + S_{\text{半圆}} + 2S_{\text{阴}} = \\ &= b(R - t) + \frac{\pi R^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}}{R} + \frac{b}{2} \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}. \end{aligned} \tag{12}$$

用数据代入式(12), 得

$$s_2 = 129.984 \text{ (mm}^2\text{)}.$$

将所求数据代入 y_c 表达式, 可得到 $y_c = 2.65 \text{ mm}$. 由于薄板是均质的, 其形心即为质心. 从上面所求的结果, 可看出带止口同无止口的薄板相比质心发生了变化. 下面仍从理想下落和非理想状态进行分析.

3.2.1 理想状态下有止口 衬垫周边不与下落孔内壁接触 这时虽然因止口形心发生改变, 但其在下落过程中受力不变, 仍受到重力和浮力的作用. 由于是均质的薄板, 重力和浮力的作用点都在形心, 但方向相反. 所以, 衬垫的下落运动仍是自由落体运动. 运动方程为

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \right) g t^2.$$

式中 ρ_1, ρ_2 分别为马口铁、空气的密度. 由此可见, 在这种情况下, 同无止口薄板的下落过程相同, 即

$$S = 9.79 t^2.$$

3.2.2 非理想状态 在衬垫下落过程中, 其周边与内壁接触, 产生摩擦力, 且接触点的位置也是随机的, 可能是圆周上的任一方向, 其位置决定了衬垫转动方向. 由于止口的存在形心有所改变, 摩擦力与重力中的一部分所构成的力偶的力臂也将改变. 当接触点不同时, 力臂的长短也不一样, 导致转角不同. 但通过计算得知形心改变不大, 仍在圆心附近. 所以可以把这时的转动情况, 近似地看成与无止口并存在

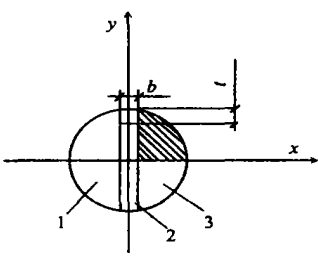


图 4 衬垫的形心与质心

摩擦力似的情况相近. 另外, 衬垫的下落是在止口处沿导向键下落, 这时止口的侧面与导向键的侧面也必然存在摩擦力, 也会产生使圆板转动的力矩. 也就是说衬垫的转动是以上两个转动的合成, 但是由于摩擦力的作用点随机不定, 所以合成结果也各不相同. 为了简化问题, 取两个极限位置来研究问题. 第一种情况是当两个作用点的位置接近在一条直线上时, 这时两个摩擦力与重力构成的力矩产生的转角可认为相互抵消, 即转角为零或很小. 这是极小值. 另一种情况是当两作用点接近的重合位置, 这时摩擦力可以为无止口时的 2 倍, 转角为最大值. 这时前面推导的公式仍然适用, 只是摩擦力取前者的 2 倍, 则转角与下落时间的关系为

$$\Phi = 94.66t^2.$$

同时, 下落的位移与时间的关系变为

$$S = 2.02t^2.$$

3.2.3 衬垫下落过程中的姿态分析 由于衬垫属于特轻薄异形件, 其在下料孔中的下落状况(图 5)会同一些偶然因素有关, 在下落过程中的姿态(图 6)也会有所不同. 首先把下料孔作为圆柱形的桶类件, 衬垫看成均质的圆板, 以垂直与下料孔壁的水平面作为标准平面, 建立坐标系. 选取平行与衬垫平面方向为 y 坐标轴, 垂直与衬垫平面方向为 x 坐标轴. 假设衬垫在经摩擦轮带到下料孔口时为水平状态. 如果它不与孔内壁接触, 且由于衬垫是具有止口的薄圆板, 圆板的质心已经偏离了圆心, 所以在下落过程

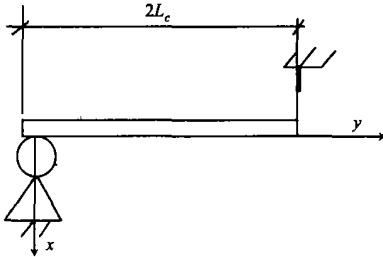


图 5 衬垫下落前姿态

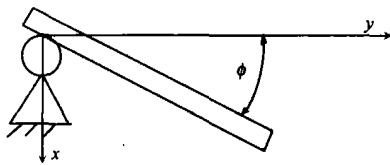


图 6 衬垫下落中姿态

中一定有偏转. 在下落过程中会有多种不同的姿态, 一种情况是衬垫不与孔内壁接触, 则其下落的姿态仅与自由落体下落状态有关. 另一种情况是衬垫与孔内壁相接触, 则其绕侧壁接触点作转动, 其下落的姿态是与自由落体运动与绕侧壁的转动的合成运动状态有关. 这种情况往往是最不利的. 由于在前面分析中已经求出质心位置 $C(0, 2.65, 0)$, 可直接利用其进行计算. 选取衬垫刚刚进入下料口为 1 状态, 即 $t_2 = 0$ 时刻; 选取衬垫翻转最大倾角时刻为 2 状态, 即 t_2 时刻. 将均质圆板抽象为细杆件, 其杆长 $L = 2(r + y_c) = 2L_c$, r 为衬垫的形心到边缘的距离. 衬垫在下料孔口所处状态相当于图 5 和图 6. 由动量定理, 可知

$$J_A \varepsilon = mgL_c, \quad J_A = \frac{1}{3} mL^2.$$

所以

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{3gL_c}{L^2} = \frac{3g}{4L_c}, \\ L &= 2L_c, \\ t &= t_2 - t_1, \\ t &= t_2, \end{aligned} \right\}$$

则转角

$$\Phi = \frac{1}{2} \varepsilon t_2^2 = \frac{3g}{8L_c} t_2^2.$$

衬垫在下落孔中的高度位置是其自由落体运动与转动的垂直分量的和. 质心离左端距离为 L_c , 质心所在瞬时位置为

$$x = x_r + x_f = L_c \sin \Phi + \frac{1}{2} g t_2^2 \quad y = y_r = L_c \cos \Phi$$

设衬垫允许最大倾角为 45° , 求出

$$t = 0.06 \text{ (s)}, \quad x = 26.7 \text{ (mm)}.$$

4 应用与结论

我们在新式组合易拉盖组合压装机的设计和制造中, 运用上述研究与分析结果, 取得了预期的效果. 现介绍其主要相关设计参数. 下落孔径 28 mm, 高度为 50 mm, 衬垫直径 26.8 mm, 止口深 5 mm, 宽 8 mm. 由此可见, 该衬垫沿下落孔下落时, 随着下落时间增加, 转动的角度加大, 易发生翻转, 此种情况必须避免^[4-6]. 按上述研究结果采取设置活动隔板的措施, 即将下落孔用活动隔板分成段, 以减小衬垫转角. 分段之后每段的高度减小, 相应转角随之减小. 另一方面应使活动隔板数最少, 以增强系统的可靠性并降低成本. 具体做法是在 50 mm 高度的一半处加隔板, 此隔板可自由开合. 当衬垫落至隔板上时, 其速度迅速减小到零. 然后, 再急速打开隔板, 让衬垫以初速度为 0 继续自由下落. 这样, 下落过程被分解为 2 个相同的过程, 下落高度相应减小一半, 转角也减至 20° . 此外, 加设最后一段自由下落活动隔板, 其行程取 10 mm, 转角小于 10° , 保证了衬垫准确而平稳进入外体, 实现了正确可靠组合压装.

至此, 我们讨论了组合式瓶盖衬垫的结构特点, 并根据生产要求在分析其定位条件的基础上确定了它的不完全定位方式. 基于衬垫止口与导向键配合过程的运动学分析, 确定了导向键的合理倾角. 基于衬垫在下落孔中下落过程的运动学和动力学分析, 确定了衬垫受力和运动状态. 同时, 将其抽象为一质量为 m , 质心为 $O(a, b)$ 的自由落体, 其基本运动和绕一固定点回转的自由转动的牵连运动, 详细探讨衬垫与外体组合前下落的姿态. 从而, 这为确定衬垫准确落入外体, 提供了确切的结构参数与运动参数.

参 考 文 献

- 1 罗 陈. 环式瓶盖输送装置的运动分析[J]. 包装工程. 1999(4): 30~ 32
- 2 郝兆星, 赵连忠. 塑性分析在机构设计中的应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1987. 58~ 73
- 3 哈尔滨工业大学理论力学教研室编. 理论力学[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社. 1981. 76~ 89
- 4 余载强. 压力机给料、出料自动装置[J]. 锻压机械, 1997(2): 18~ 19
- 5 周宛华. 浮动销定位在工件设计中的应用[J]. 机械制造, 1999(1): 16~ 17
- 6 张志忠. 中外含气饮料灌装压盖设备的发展动向[J]. 食品与机械, 1988(3): 23~ 25

Location and Kinematic Analysis of Extra Light and Extra Thin Component with Irregular Shape

Gu Lizhi^① Yang Kang^② Xing Lei^② Sun Hongqi^②

(^① College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China;

^② College of Mech. Eng., Jiamusi Univ., 154007, Jiamusi, China)

Abstract With regard to a new type combined lining of bottle cap as extra light and extra thin component with irregular shape, the authors analyse and determine its locate mode according to its structural characteristic and its positional and motional relation with outer body of bottle before assembling and pressing; and give a kinematic analysis on the fitting process between the notch of lining and the key of guidance, so as to determine the optimal degree of bevel angle of guidance key. The lining is abstracted to be a quasi freely falling body with mass m and centroid $O(a, b)$; and its motion, to be basic motion of freely falling body and involving motion revolving around fixed point. On this basis, the falling attitude of the lining before it combines with outer body is investigated. For ascertaining that the lining falls exactly into outer body, the precise structural and motional parameters are thus offered.

Keywords extra light and extra thin component with irregular shape, location, kinematic analysis, lining, parameter