

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.08.013

# 桌面型微注塑机锁模机构设计与分析<sup>\*</sup>

王寰宇<sup>1,2</sup>, 仇中军<sup>1,2</sup>, 路瑞军<sup>3</sup>, 房丰洲<sup>1,2</sup>(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津微纳制造工程技术中心, 天津 300072;  
3. 天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

**摘要:** 为了设计桌面型微注塑机的锁模机构, 在对注塑机锁模肘杆机构的运动学特性和力学特性进行理论分析的基础上, 确定了最佳的肘杆几何参数, 对肘杆机构进行了运动学仿真分析和静力学分析。结果表明, 设计的桌面型微注塑机的肘杆锁模机构能够满足慢—快—慢的理想速度特性, 并且在能够提供 100 kN 锁模力的前提下, 满足刚度和强度的要求。

**关键词:** 微注塑机; 肘杆机构; 运动学仿真; 静力分析

**中图分类号:** TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)08-0054-05

## Design and Analysis of Clamping Mechanism for Desktop Model Micro-Injection Molding Machine

Wang Huanyu<sup>1,2</sup>, Qiu Zhongjun<sup>1,2</sup>, Lu Ruijun<sup>3</sup>, Fang Fengzhou<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology &amp; Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Centre of Micro-Nano Manufacturing Technology, Tianjin 300072, China;

3. Tianjin Institute of Metrological Supervision Testing, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** In order to design a clamping mechanism of desktop model micro-injection molding machine, based on the theoretical analysis for the kinematics characteristics and mechanical properties of the elbow rod clamping mechanism for the injection molding machine, the optimal geometric parameters of the elbow rod were determined, and kinematics simulation and static analysis for the elbow rod were carried out. The results showed that the elbow rod clamping mechanism of desktop model micro-injection molding machine met the ideal slow—fast—slow speed characteristics, and it could meet the requirements of rigidity and strength on the premise of being able to provide 100 kN clamping force.

**Keywords:** micro-injection molding machine; elbow rod mechanism; kinematics simulation; static analysis

随着微/纳米科学技术的蓬勃发展, 微型聚合物元器件在微驱动器、微传感器及微生物芯片等微系统产品中的应用需求越来越大, 作为聚合物元件主要制造方法的微注塑成型技术也逐渐被广泛关注。由于微注塑成型技术制造的聚合物器件的质量为毫克级, 几何尺寸(或特征尺寸)为微米级<sup>[1]</sup>, 因此与传统注塑成型技术相比, 无论是注塑工艺和机理都有着很大不同, 不能照搬传统注塑工艺方法和理论来指导微注塑成型生产, 这就给微注塑成型设备、模具, 聚合物材料和微注塑成型工艺提出了新的课题<sup>[2]</sup>。其中微注塑机是实现微注塑成型的最根本保证, 因此微注塑机性能的好坏直接影响着微注塑成型技术在各领域中的进一步应用和发展<sup>[3]</sup>。

目前, 国内外主要的商业化微注塑机的锁模结构主要为双曲肘肘杆锁模结构, 由于在锁模过程中需要提供较大的锁模力, 锁模结构的尺寸都比较大,

并且流道过长, 造成原料利用率低, 物料浪费严重等问题<sup>[4-6]</sup>。为解决以上问题, 以德国 Dr. Boy 公司、Babypast 公司及英国 Rondol 公司等为代表, 开发了一系列微型注塑机, 尽管目前市场上的商用微型注塑机的整体尺寸及流道长度减小, 提高了物料的利用率, 但是无论其注射速度还是锁模力都无法满足微注塑成型所需的高注射速度和大锁模力的要求, 实现真正意义上的微注塑成型还有一定的难度。特别是由于桌面型微注塑机整体结构尺寸的减小, 会使锁模机构的尺寸也随之减小, 使其刚度和强度随之降低, 难以满足微注塑成型加工对锁模力的要求。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50905125)、天津市自然科学基金重点项目(12JCZDJC27900)、教育部装备预研项目(625010309)

联系人: 仇中军, 副教授, 主要研究方向为超精密加工, 微纳制造

收稿日期: 2012-06-19

笔者通过分析桌面型微注塑机锁模肘杆机构的运动特性与力学特性,研究肘杆锁模机构的几何参数对行程放大比和力放大比的影响,探讨桌面型微注塑机肘杆机构的设计方法,在满足刚度、强度要求的前提下,实现微注塑成型所需的锁模力条件,并通过对锁模机构进行静力学分析和运动学仿真研究,设计完成具有理想运动特性的小尺寸肘杆机构,以达到设计桌面型微注塑机的目的。

## 1 注塑机锁模机构的运动特性和力学特性

锁模机构是注塑机的重要部件之一,其主要功能是实现动模板的启—闭运动,同时使模具闭合时产生锁模力,将模具锁紧。根据锁模过程的特点,锁模机构应满足以下要求<sup>[7-8]</sup>:动模板的启—闭运动应高速平稳,并且有慢—快—慢的理想速度特性;合模机构应具有足够的系统刚性并能提供足够的锁模力。笔者选择双曲肘锁模肘杆机构作为锁模机构。

双曲肘锁模肘杆结构的运动简图如图1所示。在图1中, $L_1$ 表示后肘杆, $L_2$ 表示前肘杆, $L_3$ 表示后肘杆上小销轴到后肘杆上前销轴的距离, $L_4$ 表示小连杆, $L_5$ 表示后肘杆上小销轴到后模板上销轴的距离, $E_d$ 表示后支铰D到十字头上小销轴的垂直距离。 $\alpha_{\max}$ 为 $L_1$ 在锁模过程中的旋转最大角, $\theta$ 为斜排角, $\gamma$ 为后肘杆角, $\varphi$ 为小连杆与水平线的夹角。

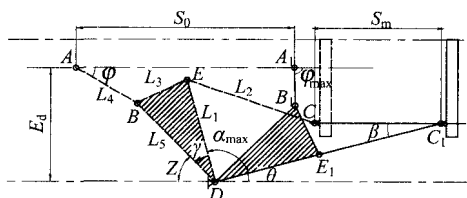


图1 双曲肘锁模机构运动原理

根据图1可以得到十字头的行程 $S_0$ 和动模板的行程 $S_m$ 的表达式<sup>[8]</sup>:

$$S_0 = L_5 [\cos(\theta + \gamma) - \cos(\theta + \gamma + \alpha_{\max})] - \frac{\sqrt{L_3^2 - [E_d - L_5 \sin(\theta + \gamma)]^2} + \sqrt{L_3^2 - [E_d - L_5 \sin(\theta + \gamma + \alpha_{\max})]^2}}{2} \quad (1)$$

$$S_m = L_1 \left\{ \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \cos \theta - \cos(\alpha_{\max} + \theta) - \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \left[ \sin(\alpha_{\max} + \theta) - \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \sin \theta \right]^2} \right\} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ ——后肘杆与前肘杆的长度比。

根据(1)式和(2)式可以得到行程放大比 $K_s$ <sup>[8]</sup>:

$$K_s = S_m / S_0 \quad (3)$$

力的放大比 $M$ 是指在移模过程中移模力 $P_m$ 与电机驱动力 $P_0$ 的比值,它是双曲肘合模机构设计

的重要参数,较大的 $M$ 可减小驱动电机的功率和能耗。如不考虑摩擦、自重和惯性力等的影响,根据静力及力矩的平衡关系可得到 $M$ 的计算公式<sup>[8]</sup>:

$$M = \frac{L_5 \cdot \sin(\alpha + \theta + \gamma + \varphi)}{L_1 (1 + \lambda) \cos \varphi \cdot \alpha} \quad (4)$$

对(1)~(4)式分析可知,后肘杆与前肘杆的长度比 $\lambda$ 与后肘杆角 $\gamma$ 增大,则 $K_s$ 增大, $M$ 减小;斜排角 $\theta$ 增大,则 $K_s$ 和 $M$ 同时随之减小;选取较大的 $\alpha_{\max}$ 可获得较大的 $K_s$ ,当 $\alpha$ 逐渐减小并趋近于0时, $M$ 大幅增大。根据此变化趋势并考虑运动干涉等因素,结合桌面型微注塑机的设计指标,确定双曲肘锁模肘杆结构的几何参数如表1所示。

表1 设计的双曲肘锁模肘杆结构的几何参数

项目	数值	项目	数值
$L_1 / \text{mm}$	100	$L_4 / \text{mm}$	21
$L_2 / \text{mm}$	130	$\alpha_{\max} / (^\circ)$	100
$\lambda$	0.77	$\varphi_{\max} / (^\circ)$	89
$\gamma / (^\circ)$	20	$S_0 / \text{mm}$	87.3
$\theta / (^\circ)$	5	$S_m / \text{mm}$	150
$E_d / \text{mm}$	40	$K_s$	1.717
$L_5$	45	$M (\alpha=2^\circ)$	19.990

## 2 桌面型微注塑机锁模结构的运动仿真

为了检验设计的锁模机构的运动是否正确,能否完成预期的运动,各零件间是否发生干涉,进而对机构进一步改进<sup>[9]</sup>,利用软件Pro/E的Pro/Mechanism模块对设计的锁模机构进行运动学仿真,探讨锁模机构的运动特性及动模板的运动规律。

首先,建立各零件的3D模型,并组成一个装配体。装配好的模型如图2所示。

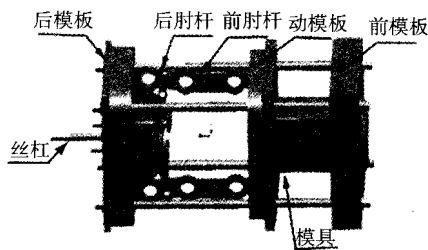


图2 锁模机构 Pro/E 装配图

建立好装配图后要在丝杠处进行电机驱动,用电机直接驱动十字头,可根据十字头的运动特性设置驱动电机的运动特性。由表1可以看出,十字头的行程 $S_0$ 为87.3 mm,且添加电机驱动的运行时间为10 s,因此先将电机驱动的运动速度设定为9 mm/s。经过仿真分析后发现全程无干涉,且得到后肘杆 $L_1$ 的最大旋转角 $\alpha_{\max}$ 为88.1°,根据表1的设计数据可知,设计的 $\alpha_{\max}$ 为100°,为了在无干涉情况下得到最大的 $\alpha_{\max}$ ,即尽可能地得到最大的

行程放大比,因此修改十字头行程即修改电机的运行速度为  $9.5 \text{ mm/s}$ 。

根据机构的运动仿真,并通过运动分析可以得到锁模机构中动模板的几何位置变化、速度及加速度的变化,将其相关运动数据导出后作运动分析曲线,分别如图3、图4和图5所示。

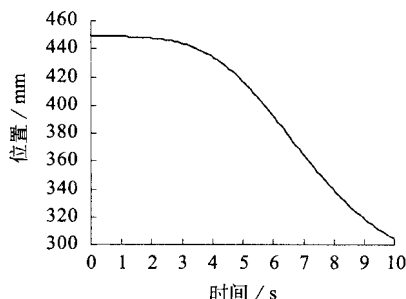


图3 动模板运动位置曲线

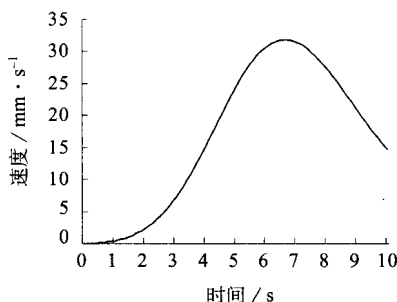


图4 动模板运行速度曲线

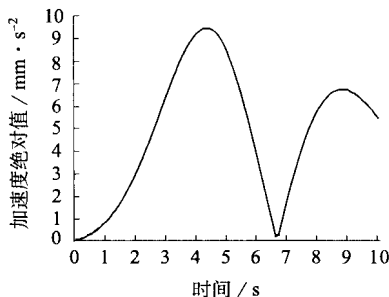


图5 动模板加速度绝对值曲线

利用约束检验可知,在锁模机构运行到  $9.9 \text{ s}$  时,肘杆跟后模板发生干涉现象。为了避免这种情况发生,将开模极限位置设定为第  $9.5 \text{ s}$  时的位置。此时后肘杆  $L_1$  转过的角度为  $92.2^\circ$ ,根据十字头的速度,可得到十字头的行程为  $90.25 \text{ mm}$ 。由图3可以计算得出动模板运行的行程为  $134.4 \text{ mm}$ 。由图4可以看出,在整个锁模运行过程中,动模板的速度呈现理想的慢—快—慢的特点。由图4、图5可知,在整个运行过程中,动模板的加速度先正向增加后减小,然后反向增加最后减小,直至运动结束,满足动模板慢—快—慢的运动特性。

### 3 锁模机构的静力分析

由于桌面型微注塑机的锁模机构长时间在受力状态下工作,桌面型微注塑机的锁模机构除了需要满足特定的运动特性外,还需满足一定的刚度、强度要求。为缩小微注塑机的空间尺寸,将其前后肘杆及大销轴的尺寸明显减小,因此需对其刚度、强度进行分析。肘杆和销轴的形状及受力比较复杂,通过数值计算比较困难,利用 ANSYS Workbench 软件对其进行静力学分析。

建模时,单独对前后肘杆建模并进行静力分析无法得到准确的受力分析结果。笔者对整个锁模机构进行建模,并在最符合锁模机构受力的情况下对各关键零件进行静力分析。由于前、后模板并非主要分析对象,建模时对其进行了简化处理。建立的模型如图6所示,模型各部分的数据如表2所示。

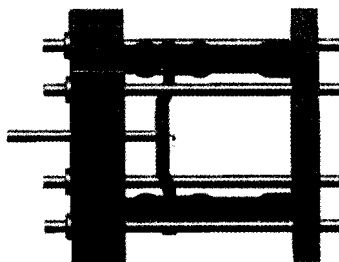


图6 肘杆机构的 Pro/E 模型

表2 建立模型的关键数据

大销轴孔直径/mm	小销轴孔直径/mm	肘杆宽度/mm	肘杆厚度/mm	肘杆外圈圆直径/mm	肘杆材料
40	20	50	20	60	45# 钢

将建立的模型导入 ANSYS Workbench 软件中,并施加载荷(见图7),在动模板的模具位置施加水平向左大小为  $100 \text{ kN}$  的锁模力,在后模板的导轨螺母与模板的接触处施加全约束条件,在丝杠处施加全约束载荷,可得到各关键零件的应力分布和变形分布,如图8~图13所示。由图8和图10可以看出,后肘杆和前肘杆的最大应力分别为  $157 \text{ MPa}$  和  $169 \text{ MPa}$ ,最大应力处均为肘杆与销轴的连接位置,后肘杆与前肘杆的最大受力都是由锁模阶段锁模力的反作用力产生的,该力经过动模板与前肘杆传递给后肘杆,经过动模板直接传递给前肘杆,在前、后肘杆与销轴的接触处形成应力集中,产生最大应力;此处的应力如果过大,会导致前、后肘杆变形,使得在锁模过程中的控制不精确,影响注塑件的质量,甚至会直接压断肘杆,造成注塑机严重损坏。笔者选用的前、后肘杆材料均为  $45^\#$  钢,其许用压应力为  $216 \text{ MPa}$ ,可知前、后肘杆的应力在安全范围内。

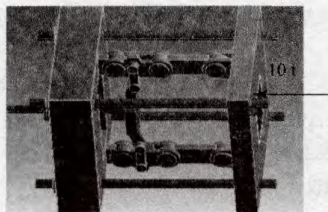


图7 肘杆机构施加载荷

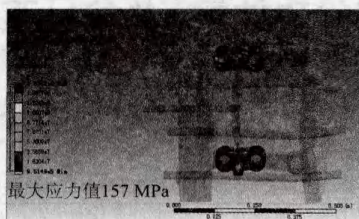


图8 后肘杆应力分布

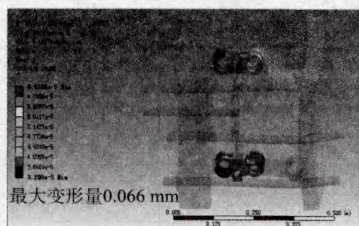


图9 后肘杆变形分布

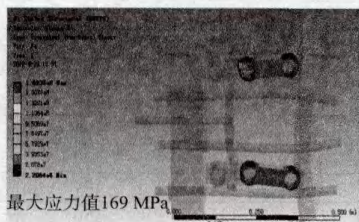


图10 前肘杆应力分布

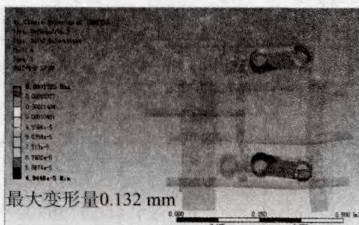


图11 前肘杆变形分布

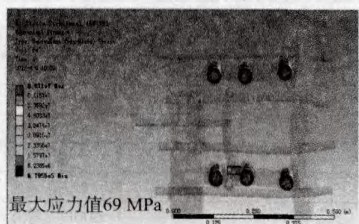


图12 大销轴应力分布

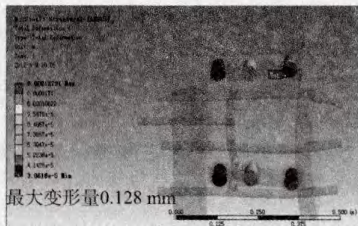


图13 大销轴变形分布图

由图9和图11可以看出,后肘杆和前肘杆的最大变形量分别仅约为0.066 mm和0.132 mm,变形量较小。

由图12可以看出,大销轴的最大应力为69 MPa,最大应力处为销轴中间,并且此处力的类型为剪切应力,笔者选用的大销轴材料为45#钢,其许用剪切应力为80 MPa,在可接受的安全范围内。由图13可以看出,最大变形量约为0.128 mm,变形较小。如果大销轴在实际过程中受到的剪切力过大,同样会影响整个锁模结构的精度,严重的会直接剪断大销轴,使锁模机构严重损坏。

由以上分析可知,在锁模极限位置,即各重要零件受最大应力时,零件的应力和应变都在可接受的范围内,设计的锁模肘杆机构在减小尺寸后,可以满足刚度、强度的要求。

#### 4 结论

针对传统微注塑机整体尺寸较大引起流道过长,减小锁模机构造成零件刚度、强度不够,难以提供足够锁模力等问题,在分析注塑机肘杆机构的运动特性和力学特性基础上,设计了满足桌面型微注塑机要求的双肘杆锁模机构,并对设计结构进行运动仿真分析和静力分析,得出如下结论:

(1) 设计的肘杆机构(后肘杆长度为100 mm,前肘杆长度为130 mm)具有理想的慢—快—慢的速度特性,符合启闭模的工艺要求。

(2) 设计的肘杆机构锁模机构可以在锁模过程中提供100 kN的锁模力,并且在整体尺寸减小的情况下,锁模机构的各关键部件都能满足刚度、强度要求。

#### 参考文献

- [1] Kukla C, Loibl H, Detter H, et al. Micro-injecting molding-the aims of a project partnership [J]. Kunststoffeplast Europe, 1998, 88 (9): 6-7.
- [2] 仇中军,郑辉,房丰洲,等. 纵向超声波辅助微注塑方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10 (2): 170-176.
- [3] 姜爱菊,吴洪武. 微注塑成型技术的最新进展[J]. 塑料工业, 2008, 36 (8): 1-4.



- [4] Knights M. Micro molding sizing up the challenges. *Plastic Technology*, 2001 (8): 54-62.
- [5] 庄俭,张建国,高世权,等. 微注塑成型机的研究现状与进展[J]. *塑料科技*, 2009, 37 (5): 92-95.
- [6] 姜炳炎,蓝才红,楚纯朋,等. 微量注塑机的现状与发展趋势[J]. *工程塑料应用*, 2008, 36 (9): 72-76.
- [7] 王兴天. 注塑技术与注塑机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 122-124.
- [8] 北京化工大学, 华南理工大学. 塑料机械设计[M]. 北京: 轻工业出版社, 1995: 360-390.
- [9] 孙亮波,陈岳林,赵越. 机械结构仿真的可行性和可行域研究[J]. *机械设计与制造*, 2007 (8): 173-175.

## 欢迎订阅 2012 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国工程塑料工业协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等 26 项国家、省部委级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2012 年定价 15 元/期,全年 180 元。1986 年以来的期刊价目见表 1。欢迎读者来函(附名片)免费索取样刊。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获 6 项省部委级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2012 年定价 15 元/期,全年 90 元。创刊号以来的期刊价目见表 2。欢迎读者来函(附名片)免费索取样刊。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 我社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2011 年底共 39 卷 266 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2011 年底共 20 卷 84 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 500 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 200 元。

### 邮局汇款:

收款单位: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号杂志社

邮编: 250031 传真: (0531)85947355

电话: (0531)85878057 85878223 85878278

### 银行汇款:

户 名: 中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>

表 1 《工程塑料应用》单册期刊、合订本价格表

年份	期数	每册单价/元	全年定价/元	合订本/元
1986~1989	16	0.825	13.2	19
1990~1992	12	1.4	16.8	23
1993, 1994	10	2.4	24	30
1995	6	2.8	16.8	23
1996	6	3	18	24
1997	6	3.5	21	27
1998	12	3.5	42	48
1999	12	4	48	54
2000	12	5	60	66
2001	12	5.5	66	78 (两本)
2002	12	6	72	84 (两本)
2003	12	6.5	78	90 (两本)
2004	12	7	84	96 (两本)
2005	12	7.5	90	102 (两本)
2006	12	8	104	116 (两本)
2007	12	9	108	120 (两本)
2008	12	10	120	132 (两本)
2009	12	12	144	156 (两本)
2010	12	13	156	168 (两本)
2011	12	15	180	192 (两本)
2012	12	15	180	180 (单册)
合计	236		1200 (优惠)	1300 (优惠)

表 2 《化学分析计量》单册期刊、合订本价格表

年份	期数	每册单价/元	全年定价/元	合订本/元
创刊号~1998	9	3	27	33
1998~2001	14	4	56	62
2002	6	5	30	72
2003	6	6	36	
2004	6	7	42	93
2005	6	7.5	45	
2006	6	8	48	108
2007	6	9	54	
2008	6	10	60	66
2009	6	12	72	78
2010	6	13	78	84
2011	6	15	90	96
2012	6	15	90	90 (单册)
合计	89		600 (优惠)	650 (优惠)