

【综述】

# 双螺杆磨浆机设计理论的研究与进展

王 平, 沈晓阳

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 在分析国内外双螺杆磨浆机设计和使用中存在问题的基础上, 提出双螺杆磨浆机设计理论进一步研究的思路: 以单螺杆挤出机挤出理论为基础, 并借鉴塑料工业双螺杆挤出机和食品工业双螺杆挤压膨化机设计理论的研究成果; 对双螺杆磨浆机设计理论的深入研究还需要明确双螺杆磨浆机的特殊性, 研究制浆造纸材料的物理和机械性能. 本文对单螺杆挤出机挤出理论和双螺杆挤出机设计理论的研究进行了综述, 并对双螺杆磨浆机的特殊性进行了分析. 本文的工作对双螺杆磨浆机设计理论的研究具有一定的指导意义.

**关键词:** 双螺杆磨浆机; 设计理论; 单螺杆挤出机

**中图分类号:** TS733.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6510 (2007) 03-0084-05

## Research and Evolvement on Design Theories of theTwin Screw Pulping Extruder

WANG Ping, SHEN Xiao-yang

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Based on analyzing existent problems in design and usage of the twin screw pulping extruder (TSPE) currently in domestic and abroad, a way to further study design theories of the TSPE is put forward. With the foundation of the extrusion theories of a single-screw extruder, use for reference to research results of design theories of twin screw extruders in plastic industry and twin screw bulking extruders in food industry, to study design theories thoroughly of the TSPE is still need to know the particularity of the TSPE and to research physical and mechanical behaviors of paper making raw materials. The extrusion theories of a single-screw extruder and the design theories of twin screw extruders have been summarized, and the particularity of the TSPE have been discussed also. The work of the paper is significant to study design theories of the TSPE.

**Keywords:** twin screw pulping extruder (TSPE); design theories; single-screw extruder

双螺杆磨浆机(又称双螺旋辊式磨浆机、双螺杆揉搓机)是一种资源节约型的新型磨浆设备,它采用挤压与剪切原理将制浆材料(如杨木片、棉秆等)加工成一定长度纤维状的纸浆,其核心部件是双螺杆磨

浆机构. 双螺杆磨浆机构是由两个相互平行、彼此啮合、转向相同的特殊螺杆和与其配合的机筒组成的机构,特殊螺杆上的螺旋正反向交替,反向螺旋上开有数个斜槽,如图 1 所示. 在磨浆过程中,制浆材料由进

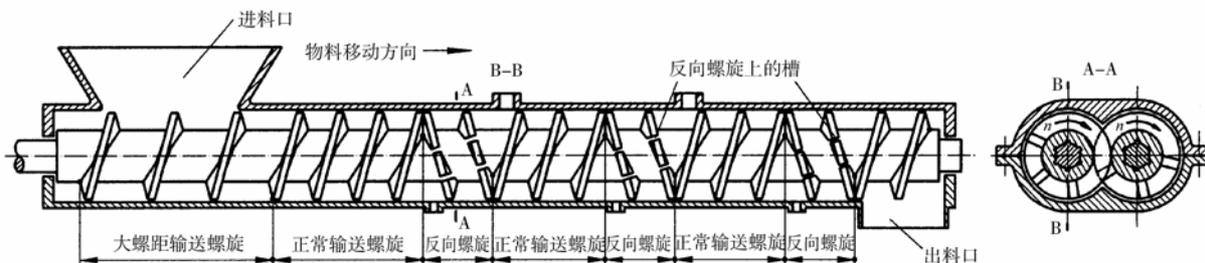


图 1 双螺杆磨浆机结构示意图

Fig. 1 Frame sketch of the twin screw pulping extruder

收稿日期: 2007-03-10; 修回日期: 2007-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675155); 天津科技大学重点基金资助项目(20040104)

作者简介: 王 平(1957—), 男, 湖北人, 教授, 博士.

料口送入,沿正向螺旋的螺旋槽向前移动,被推向反向螺旋,在正、反向螺旋挤压作用下物料被压缩.由于正向螺旋挤压作用较大,物料被迫从反向螺旋的斜槽通过而被撕裂揉碎,进入下一个挤压区.如此反复,在出料口物料被磨制成纸浆.

国内外研究表明<sup>[1-10]</sup>,双螺杆磨浆机具有以下特点:(1)磨浆质量好:磨浆浓度高达25%~40%,纤维切断作用小,轴向挤压强度大,有利于纤维细化,提高纸品强度;(2)磨浆能耗低:与目前普遍使用的盘磨机相比,比能耗降低20%~50%;(3)用水量少:用水量相当于盘磨机的10%~15%,减少了排污,特别有利于环境保护;(4)功能多:在浆料挤压过程中,同时可以进行脱液、洗涤和漂白等操作;(5)设备结构简单,操作方便,维护费用较低.因此,双螺杆磨浆机具有广阔的应用前景,可用于化学机械浆和半化学浆等高得率浆的生产、渣浆再磨、废纸处理、浆料漂白和洗涤等工艺.双螺杆磨浆机可以替代目前广泛使用的盘磨机或者配合盘磨机提高机械浆的质量.

## 1 问题的提出

2004年作者曾经在文献[5]中阐述了双螺杆磨浆机国内外的研究发展情况,本文着重论述双螺杆磨浆机设计理论研究的有关问题.双螺杆磨浆机实际上是一种具有特殊螺杆的同向旋转啮合型平行轴双螺杆挤出机.双螺杆挤出机在早期发明时主要是应用在塑料工业和食品加工工业中,后来经过变型设计,推广到制浆造纸工业中.所以目前双螺杆磨浆机的设计主要采用类比法,参考塑料工业双螺杆挤出机或者食品工业双螺杆挤压膨化机的设计理论和经验.但是,由于加工物料不同和螺杆的结构不同,加之塑料工业和食品工业的双螺杆挤出机一般螺杆直径较小,而双螺杆磨浆机螺杆直径较大,所以有时没有可以类比的参数,只能靠经验估计.在近年的研究和实践中,作者发现我国双螺杆磨浆机设计还存在以下问题:

(1)双螺杆磨浆机螺杆齿形用梯形螺纹代替,梯形螺纹参数只能根据经验确定,其啮合性能和挤压性能无法衡量,加工效率是否完全发挥,节电是否达到最佳效果无法确定;

(2)转速选择没有依据,由于螺杆结构复杂,设计时生产率难以计算;

(3)螺杆上承受的扭矩、轴向推力、磨浆机功耗等无法计算,电机选择是否合理只能通过试验来比较,轴承寿命无法计算,该设备长时间连续工作的可

靠性难以保证;

(4)螺杆和机筒磨损问题,尤其是反向螺旋及所对应的机筒内壁磨损严重,如何提高耐磨性,延长使用寿命也是一个重要问题.

上述问题的解决都需要双螺杆磨浆机设计理论的研究.因此,双螺杆磨浆机设计理论的研究是制约我国双螺杆磨浆技术推广使用的瓶颈.

## 2 双螺杆磨浆机设计理论的研究思路

对于一个机械产品,设计理论就是其主要参数设计计算或者选择的依据,包括计算公式、图表和流程等.完全靠类比法设计的产品,设计时需要参照大量同类产品的数据或者经验,在知识产权保护的情况下是比较困难,也是比较盲目的;具有一套比较完整设计理论的产品,是一种比较成熟的产品,尤其是理论研究对于创新设计是十分必要的.

双螺杆磨浆机设计的流程一般是:根据生产率的要求,选择螺杆外径、螺旋角和长径比,计算和确定螺纹的有关参数和螺杆转速,然后计算所消耗的功率和螺杆轴向力,再进行传动装置的设计和绘图.螺杆几何参数(螺杆外径、螺旋角、长径比、中心距)及螺纹几何参数(螺纹导程、螺纹头数、螺槽深度、螺棱顶宽及螺纹法截面的尺寸参数)应保证双螺杆的啮合关系、挤压作用和生产率要求,并满足安装要求;运动和动力参数(螺杆转速、功耗、螺杆轴向力等)应满足传动系统的强度、寿命要求,并不产生电动机动力的冗余.

目前双螺杆磨浆机的研究主要包括制浆机理研究<sup>[1-10]</sup>、设计理论研究<sup>[11-14]</sup>、结构和参数优化<sup>[15]</sup>和螺杆磨损机理的研究<sup>[16,17]</sup>,这些研究主要是结合制浆造纸的特点,将双螺杆挤出机的有关理论和研究成果应用在双螺杆磨浆机的设计和实践中.这些研究虽然在不同程度上揭示了双螺杆磨浆机的有关规律,但仍然解决不了双螺杆磨浆机设计中存在的问题.作者经过分析研究和实践,提出图2所示双螺杆磨浆机设计理论进一步深入研究的思路.

如图2所示,单螺杆挤出机挤出理论与设计理论是各种双螺杆挤出机的理论基础,双螺杆磨浆机的设计理论研究必须借鉴塑料工业双螺杆挤出机和食品工业双螺杆挤压膨化机的设计理论,还要搞清双螺杆磨浆机与这两种挤出机的不同,即特殊性,研究制浆造纸材料的物理和力学性能,根据生产的需要和生产中出现的问题,研究其设计理论和方法.

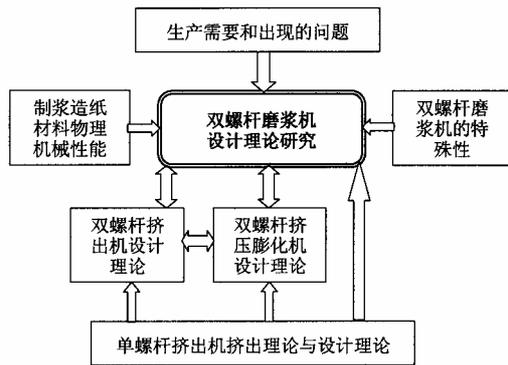


图2 双螺杆磨浆机设计理论研究思路

Fig.2 Research notion on design theories of the twin screw pulping extruder

塑料工业双螺杆挤出机加工物料是塑料颗粒，食品工业双螺杆挤压膨化机加工物料是食品原料，两者均需要机筒加热一定的温度（20~400℃），加工过程主要是混炼、熔融和挤出成型，加工过程以化学反应为主。而双螺杆磨浆机加工物料是制浆造纸材料（如杨木片、麦秆和棉秆等），这些物料加工前要切割成较小的尺寸并用化学药剂浸泡一定的时间，加工过程主要是挤压、剪切使其纤维化，加工过程是以物理作用为主；双螺杆磨浆机机筒无需加热，并且机筒开有出水孔，使物料中的水分不断被挤出，加工结束时，挤出的纸浆与喂入的物料相比，质量明显减小。因此，加工物料物理机械性能不同、机筒无需加热、加工过程中物料的质量不断减少、不同的双螺杆结构、挤压和剪切使物料纤维化的加工过程是双螺杆磨浆机与其他双螺杆挤出机的不同之处，即特殊性。

塑料颗粒的物理性能主要有真实密度、松密度、安息角、压缩率、散体内摩擦系数、外摩擦系数、熔点、热导率、比热容、热扩散系数，熔融状态的黏度等<sup>[18-20]</sup>。制浆造纸材料也应该有真实密度、松密度、压缩率、含水率、内摩擦系数、外摩擦系数等物理性能，还应该有压缩破裂极限应力、剪切断裂极限应力等机械性能指标，但目前制浆造纸材料的这些物理性能和机械性能研究的很少，由于制浆造纸材料是各向异性材料，对其机械性能的研究测试具有一定的难

度。如果没有制浆造纸材料物理机械性能数据，设计性能可靠的双螺杆磨浆机是很困难的。

### 3 单螺杆挤出机挤出理论与设计理论研究

关于单螺杆挤出理论的研究，北京化工大学朱复华教授做了大量卓有成效的工作<sup>[18,19]</sup>，其研究专著成为该领域的经典论著。在挤出理论方面，他概括了塑料挤压过程中非塞流固体输送理论、塞流固体输送理论、延迟区理论、Tadmor 熔融理论、五区熔融理论、固相破碎理论和熔体输送理论七个区域的理论研究成果，并在此基础上提出了塑料工业单螺杆挤出机的设计理论，包括螺纹参数设计选择、生产率计算、转矩和功耗的计算等。与双螺杆挤出机相比，单螺杆挤出机结构比较简单，出现的较早，设计理论的研究比较成熟。毫无疑问，单螺杆挤出机挤出理论与设计理论是各种双螺杆挤出机设计理论的基础。

### 4 啮合型同向双螺杆挤出机设计理论研究

啮合型同向双螺杆挤出机设计理论包括双螺杆几何学、双螺杆挤出机物料的流动、流量、功耗和螺杆轴向推力的计算等。双螺杆几何学是同向双螺杆螺纹齿形形成的基础，是设计理论的基础；双螺杆挤出机物料的流动是流量即生产率研究的基础，流量建立了基本参数（螺杆外径、螺纹导程、螺纹头数、螺槽深度、螺杆转速等）与双螺杆挤出机生产能力之间的关系；功耗和螺杆轴向力建立了物料性能与磨浆机动力参数之间的关系。螺纹齿形参数、流量、功耗和螺杆轴向推力都是双螺杆磨浆机设计的必要参数。

1978年Booy<sup>[21]</sup>提出了共轭（有些译成“自扫”）啮合型双螺杆的几何学理论，此后Janssen<sup>[22]</sup>、White<sup>[23]</sup>等人都做了许多有益的工作，国内耿孝正<sup>[20]</sup>、盖雨聆等人<sup>[24]</sup>、何继敏<sup>[25]</sup>、刘慧<sup>[26]</sup>和雷焱等人<sup>[27]</sup>也对双螺杆几何学进行了研究，并提出了塑料工业挤出机螺纹齿形修正的问题。式(1)是耿孝正<sup>[20]</sup>给出的修正的啮合型双螺杆挤出机法截面螺纹曲线方程。

$$h(x) = \begin{cases} D_s - C_L + \delta & (0 \leq x \leq \frac{e}{2}) \\ \frac{1}{2} D_s [1 + \cos(\frac{2x-e}{C_L \cdot \sin \psi})] - \frac{1}{2} \sqrt{4C_L^2 - D_s^2 \sin^2(\frac{2x-e}{C_L \cdot \sin \psi})} + \delta & (\frac{e}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}) \\ \delta & (\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b+e}{2}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_s$  为螺杆外径;  $C_L$  为两螺杆的中心距;  $e$  为螺棱顶宽;  $\psi$  为平均螺纹升角(螺旋角);  $T$  为螺纹导程;  $b$  为螺槽顶宽;  $\delta$  为螺杆外径与机筒之间的间隙。

$$\psi = \arctan(T/(\pi C_L))$$

$$e = \frac{T}{2\pi} \left( \frac{\pi}{k} - 2\varphi \right) \cos \psi_s$$

$$b = \frac{T}{2\pi} \left( \frac{\pi}{k} + 2\varphi \right) \cos \psi_s$$

式中:  $k$  为螺纹头数;  $\psi_s$  为外径螺纹升角,  $\psi_s = \arctan(T/(\pi D_s))$ ;  $\varphi = \arccos(C_L/D_s)$ 。

迄今为止,啮合型同向双螺杆挤出机的法截面螺纹齿形大多采用式(1)所示的理论螺纹曲线,在双螺杆挤压膨化机上有时将法截面螺纹齿形简化为梯形,并减小螺棱顶宽,以便于制造和安装。理论螺纹曲线难以加工和测量,特别是对于螺杆直径较大的双螺杆挤出机,简化成梯形是非常有必要的,但目前的简化没有理论依据,缺乏深入的研究,因此双螺杆磨浆机法截面螺纹齿形的简化,仍然是一个亟待解决的问题。

关于双螺杆挤出机物料流动,1978年 Janssen<sup>[22]</sup>指出,由于切向压力和四面体间隙中移动边界的拖拽作用,引起物料由一根螺杆向另一根螺杆传递,并形成绕着两根螺杆的“∞”字形移动,以致物料在螺杆中获得良好的混合;此外还有漏流,漏流是由于存在的四个间隙造成的。这四个间隙分别是螺棱间隙、径向间隙(又称压延间隙)、侧间隙和四面体间隙;四个漏流分别称为螺棱漏流、压延漏流、侧漏流和四面体漏流。文献[21]中对四种漏流产生的压力损失和漏流进行了分析计算。关于双螺杆挤出机流量的计算,目前主要是按照等螺距螺杆的假设推导的。一种方法是通过计算双螺杆挤出机螺槽的容积来计算最大流量;另一种是假设物料为均匀流体来分析流量。Janssen<sup>[22]</sup>采用几何法给出双螺杆挤出机最大流量(容积)的表达式:

$$Q = 2nkV \quad (2)$$

式中:  $n$  为螺杆转速;  $V$  为双螺杆 C 形小室的体积。

$$V = \frac{T}{4k} \left[ \left( \pi - \frac{\alpha}{2} \right) D_s^2 + (D_s - H) \sqrt{2D_s H - H^2} \right] - \left( \frac{D_s}{2} - H \right) \frac{\pi T}{k} - \pi \left[ (D_s H - H^2) b + \left( D_s H^2 - \frac{1}{3} H^3 \right) \tan \theta \right] \quad (3)$$

式中:  $H$  为螺槽深度;  $\alpha$  为啮合区对应的中心角;  $\theta$  为螺纹侧面角。

在此基础上,我国学者陈仪先<sup>[28]</sup>研究了双螺杆挤压膨化机的加工流量计算,顾维忆<sup>[29]</sup>研究了双螺杆挤

压膨化机螺杆结构与参数的设计,史建国等人<sup>[30]</sup>研究了双螺杆挤压膨化机输送螺旋的设计。式(2)只能计算理论最大流量,并且没有考虑加工物料的力学性能和物料与螺槽表面和机筒内表面的摩擦特性。耿孝正<sup>[20]</sup>根据式(3),给出了简化的近似公式:

$$V = 3.1416 \frac{D_s H W}{\cos \psi} \quad (4)$$

式中:  $W$  为螺槽平均宽度。

文献[31]假定双螺杆挤出机熔融塑料为牛顿流体,根据流体力学的理论,推导了考虑流体黏度、压力差和压力梯度的流量表达式。但由于该公式比较复杂,没有得到推广应用。

在功耗和螺杆轴向推力的计算方面,李品华<sup>[32]</sup>假定物料为非牛顿流体,且沿螺槽定常流动,用数值方法求解 Navier-Stokes 方程得到速度方程,并采用量纲分析法得到螺杆轴向力、扭矩和功耗的积分表达式,但由于表达式中的剪应力无法确定仍然无法求解。

2003年耿孝正指出<sup>[20]</sup>:双螺杆挤出机的功耗可采用类比设计、经验统计数据 and 反算法三种方法设计;螺杆轴向推力与螺杆直径、机头静压力和附加动压有关,当螺槽充满物料时,附加动压可忽略不计。文献[20]给出的双螺杆挤出机的螺杆轴向推力  $F$  的估算方法:

$$F = F_1 + F_2 = (1.15 \sim 1.25) F_1 \quad (5)$$

式中:  $F_1$  为机头静压力产生的轴向推力;  $F_2$  为附加动载荷产生的轴向推力。  $F_1 = (\pi D_s^2 / 4 - A_\alpha / 2) p$ , 其中  $p$  为螺杆端部熔融体的压力;  $A_\alpha$  为啮合区的面积。

对于双螺杆磨浆机,由于没有机头,螺杆轴向推力主要来自反向螺旋的阻碍作用和物料与机筒的内壁的摩擦作用,因此,式(5)是不适用的。

由于双螺杆挤出机结构和加工过程复杂,大量的研究是采用实验方法,积累了许多试验数据和图表<sup>[19-23,31]</sup>,揭示了该设备有关参数之间的关系,这些数据图表对于双螺杆挤出机的设计是非常宝贵的。

综上所述,在双螺杆挤出机设计理论方面,理论法截面螺纹曲线难以加工和测量,简化成梯形螺纹没有理论依据;除流量可以按几何学方法估算、带机头的双螺杆挤出机的轴向推力可以估算之外,功耗(扭矩)等重要设计参数都没有理论计算方法。双螺杆挤出机的设计除法截面螺纹参数外,其他螺杆参数、运动和动力参数主要是采用经验法和类比法选择。由于设计大直径的双螺杆磨浆机已经没有可以类比的机型,所以要提高双螺杆磨浆机的质量,设计理论的研究是非常必要和十分重要的。

## 5 结 语

通过上述分析可以得到以下几点:

(1) 双螺杆磨浆机具有优良的特性和广泛的应用前景,但目前设计和生产中出现的问题制约这项新技术的推广应用,因此应该进一步研究双螺杆磨浆机设计理论。

(2) 单螺杆挤出理论和设计理论的研究是各种双螺杆挤出机的基础,双螺杆挤出机、双螺杆挤压膨化机的设计理论为双螺杆磨浆机设计理论的研究奠定了基础。双螺杆磨浆机设计理论的研究还需要明确双螺杆磨浆机的特殊性,并研究制浆造纸材料的物理和机械性能。

(3) 在双螺杆挤出机设计理论中,除螺纹法截面参数可以通过理论计算之外,螺杆其他参数、运动和动力参数主要是采用类比法和经验法设计。前人的经验非常宝贵,但是很不够,在创新设计中应该加强理论研究,并总结经验。

(4) 双螺杆磨浆机设计理论的研究,是双螺杆磨浆机优化设计、计算机辅助结构强度分析和挤压过程模拟的基础,没有设计理论的研究基础,双螺杆磨浆机优化设计和计算机模拟是很困难的。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈樵鉴. Bivis 法制浆机理的探讨[C]//中国造纸学会编. 中国造纸学会第八届学术年会论文集:上册. 北京:中国轻工业出版社,1997:111—117.
- [2] 刘长恩,岳金权. 双螺旋辊式新型磨浆机及其应用[J]. 中国造纸,2000,19(6):21—25.
- [3] 刘长恩,岳金权. 辊式多功能磨浆机结构及其挤浆机理[J]. 中华纸业,2000,21(10):25—28.
- [4] 刘长恩,岳金权. 动态挤压磨浆[J]. 中国造纸,2003,22(5):23—26.
- [5] 王平,沈晓阳,薛强. 双螺杆磨浆机的研究与应用[J]. 中国造纸,2004(1):45—48.
- [6] 冯振华,冯连勋. 双螺杆磨浆机及其研究综述[J]. 中华纸业,2005,26(8):46—49.
- [7] Kurdin J A, Bohn W L. Mechanical pulping by extrusion[C]//Tappi Pulping Conference, San Francisco C A, USA: TAPPI PRESS,1984:265—274.
- [8] Van Roekel G J, Lips S J J. Extrusion pulping of true hemp bast fibre [C]//Tappi Conference, Chicago, USA: TAPPI PRESS,1995:477—485.
- [9] Time Scott C, Zauscher S. Pulp extrusion at ultra-high consistencies[C] //1997 Tappi Environmental Conference & Exhibit, Minneapolis, USA: TAPPI PRESS,1997:739—743.
- [10] Westenbroek, Annita P H. Extrusion pulping of natural fibres [D]. Netherlands: Wageningen,2000.
- [11] 王平,沈晓阳. 双螺杆磨浆机正向螺旋的设计研究[J]. 轻工机械,2004(1):15—17.
- [12] 王平,沈晓阳,薛强. 双螺杆磨浆机设计理论的初步研究[J]. 机械设计,2004(7):42—44.
- [13] 邢德强,王平. 双螺杆磨浆机螺杆几何学研究[J]. 天津科技大学学报,2005,20(4):44—47.
- [14] Roos E, Steffens M, Zimmermann D. Screw design for co-rotating twin-screw extruders[J]. Plastics, Additives and Compounding,2004,6(2):38—41.
- [15] 刘小平,王平. 双螺杆磨浆机传动系统的优化设计研究[J]. 天津科技大学学报,2005,20(1):45—48.
- [16] 王泽刚,刘延俊,穆长春. 双螺杆磨浆机螺旋转子的研究与开发[J]. 中华纸业,2006,27(4):62—64.
- [17] 郭二军,王丽萍,岳金权,等. 双螺旋辊式新型磨浆机螺旋套磨损机理的研究[J]. 摩擦学学报,2005,25(6):593—596.
- [18] 朱复华. 螺杆设计及其理论基础[M]. 北京:轻工业出版社,1984.
- [19] 朱复华. 挤出理论及其应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001.
- [20] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003.
- [21] Booy M L. Geometry of fully wiped twin-screw equipment [J]. Poly Eng & Sci,1978,18(12):973—984.
- [22] Janssen L P B M. 双螺杆挤出[M]. 耿孝正,译. 北京:轻工业出版社,1987.
- [23] White J L. Twin screw extrusion-technology and principles [M]. New York: Hanser Publishers,1990.
- [24] 盖雨聆,孟宪坤,牟广英,等. 双螺杆食品挤压机螺杆齿廓初探[J]. 农业机械学报,1993,24(3):88—93.
- [25] 何继敏. 同向旋转全啮合双螺杆螺纹曲线的形成及修正[J]. 塑料科技,1996(5):39—43.
- [26] 刘慧. 啮合同向双螺杆挤出机几何学的研究[J]. 河北轻化工学院学报,1997,18(3):24—27.
- [27] 雷焱,姜南,朱复华,等. 计算机辅助技术对同向双螺杆螺纹曲线修正的简化[J]. 中国塑料,2000,14(11):90—94.
- [28] 陈仪先. 螺杆挤压膨化机加工流量计算[J]. 武汉工业学院学报,1999(3):50—53.
- [29] 顾维忆. 双螺杆膨化机螺杆结构与参数初探[J]. 水产学报,1998,22(增刊):91—95.
- [30] 史建国,徐刚,梁力克. 双螺杆食品膨化机输送螺旋的设计研究[J]. 包装与食品机械,2005,23(2):27—29.
- [31] 北京化工大学,华南理工大学. 塑料机械设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,1995.
- [32] 李品华,董勋. 全啮合同向旋转双螺杆挤出机挤出工艺参数研究[J]. 机械设计与研究. 1991(1):31—35.