



## 双螺杆磨浆机螺杆扭矩和轴向推力的测量与研究

王平, 沈晓阳, 孙建辉, 胡冬奎, 兰州, 蒋升  
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 对双螺杆磨浆机的螺杆扭矩、轴向推力和机筒压力进行了测量实验研究。首先,选择磁电相位差式转矩传感器、应变环式轴向推力测量方法和扩散硅式压力变送器,构建了双螺杆磨浆机的螺杆扭矩、轴向推力和机筒压力测量实验系统,在此基础上进行了实验研究,得到了双螺杆磨浆机螺杆扭矩、轴向推力、机筒压力和流量与螺杆几何参数之间的关系。分析表明:按对双螺杆磨浆机扭矩、功耗和流量影响程度由大到小排序是螺杆转速、反向螺旋螺纹扣数、反向螺旋槽宽和反向螺旋槽数等。本文的工作对合理确定螺杆设计参数、选取电机与轴承及双螺杆磨浆机构挤压模型的建立等都是有意义的。

**关键词:** 双螺杆磨浆机; 螺杆扭矩; 轴向推力; 机筒压力; 流量

中图分类号: TH113.2<sup>+</sup>; TS733<sup>+</sup>.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2009)06-0045-05

## Measurement and Study on Screw Torque and Axial Thrust of Twin Screw Pulping Extruder

WANG Ping, SHEN Xiao-yang, SUN Jian-hui, HU Dong-kui, LAN Zhou, JIANG Sheng  
(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Metrical experimental studies on screw torque, axial thrust, barrel inwall pressure of twin screw pulping extruder (TSPE) were done. At first, a measurement system for TSPE was set up by selecting a sensor of magneto-electric phase-angle difference to measure the screw torque, selecting a strain gauge ring device to measure the screw axial thrust, and selecting diffusion silicon pressure transducers to measure the barrel inwall pressure. Then, metrical experiments were done and effect curves of screw geometric parameters on screw torque, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux were obtained. Analysis shows that effect degree from big to small on screw torque, power consumption and flux sequences screw rotation speed, lead number of reverse thread, slot width in reverse flight, slot number in reverse flight etc. The work is significant for reasonable design of screw geometric parameters, selection of main motor and bearings, and extrusion modeling of twin screw pulping mechanism.

**Keywords:** twin screw pulping extruder; screw torque; screw axial thrust; barrel inwall pressure; flux

双螺杆磨浆机是一种新型磨浆设备,具有设备结构简单、磨浆质量好、能耗低、用水量少和减少排污等特性,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。但由于物料在整个磨浆过程中的形态变化和运动情况复杂,目前,双螺杆磨浆机的螺杆扭矩、轴向推力(轴向力方向指向传动箱方向,与物料流动方向相反)、磨浆机功耗等均无有效的计算方法,主电动机的选择只能根据经验或者实验方法,轴承寿命无法计算,设备长时间连续工作的

可靠性难以保证<sup>[2-5]</sup>。在双螺杆磨浆机工作过程中,原材料进入机筒后将受到双螺杆的挤压、剪切、揉搓和分丝作用,同时物料会给机筒和螺杆施加反作用力,一方面使机筒内产生很高的压力,另一方面对螺杆产生阻力矩和轴向推力。因此,双螺杆磨浆机螺杆扭矩、轴向推力和机筒压力的测量和研究,对于了解螺杆几何参数和结构对其力学性能的影响规律、对于电机功率和螺杆轴承的合理选择、对于双螺杆磨浆机挤压模

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675155)

作者简介: 王平(1957—),男,湖北人,教授,博士,wp2004@tust.edu.cn.

型的研究等都是很有意义的。

### 1 测量方法选择

转轴扭矩(简称转矩)测量属于动态扭矩测量,其关键是扭矩测量仪的选择,目前常用的动态扭矩测量仪有磁电相位差式扭矩仪和电阻应变式扭矩仪<sup>[6-8]</sup>。磁电相位差式扭矩测量技术具有测量灵敏度高,转速范围大,结构简单,抗干扰性强等优点。因此,实验采用 JC2C 型(磁电相位差式)传感器及配套的 JW-3 扭矩仪(湖南湘仪测试仪器有限公司)。

转轴轴向推力的测量通常采用推力传感器或者电子秤。由于轴是旋转的,传感器随着轴同步转动,所以要采用集流环(或称滑环)将传感器采集的信号引出。由于两螺杆中心距很小,花键轴又占据一定的空间,很难布置安装集流环。通过分析,采用结构简单的应变环测量方式,可以满足对原有实验台尽量少的改造和加工的要求。如图 1 所示,螺杆轴向推力通过推力轴承传递到测力环上,在测力环内壁沿轴向粘帖单轴应变片,应变片引线连接到静态应变仪上,并将应变转换为电信号,经过标定可以测量出螺杆所受的轴向推力的大小。这种方法,通过计算设计合理的测力环的结构尺寸,可以达到较高的测量灵敏度。

压力传感器通常是测量液体、气体的压力,双螺杆磨浆机中物料是一种流动的软固体,不是液体,只能借助于液体压力测量方法。扩散硅压力传感器是目

前广泛使用的电阻式压力传感器<sup>[9-10]</sup>,其特点是灵敏度高、测量精度较高、耐冲击和振动、稳定性好,结构简单、适用于各种压力的测量。根据流动物料的特点,应选用开口较大,敏感元件暴露面大的压力变送器。因此,机筒压力测量采用的是开孔直径为 13 mm 的 FDSO5 S 型扩散硅压力变送器(天津市宇畅电子仪表有限公司)和配套的一体式多功能综合仪表(显示记录仪)。压力传感器安装在螺杆第一或第二挤压区正、反向螺旋结合处或者反向挤压区,因为此处充满料塞,通常压力较大,是产生螺杆阻力矩、螺杆轴向推力的主要区域。

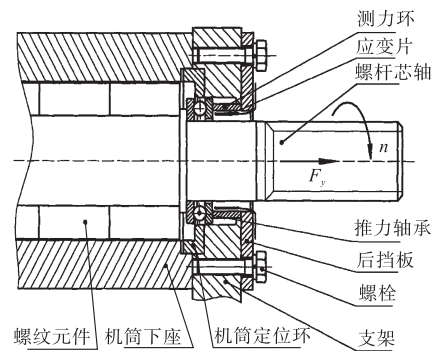


图 1 双螺杆磨浆机轴向推力测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of screw axial thrust measurement of twin screw pulping extruder

测量方法和测试仪器选定之后,便可以组成双螺杆磨浆机螺杆扭矩、轴向推力和机筒压力的测量系统,如图 2 所示。

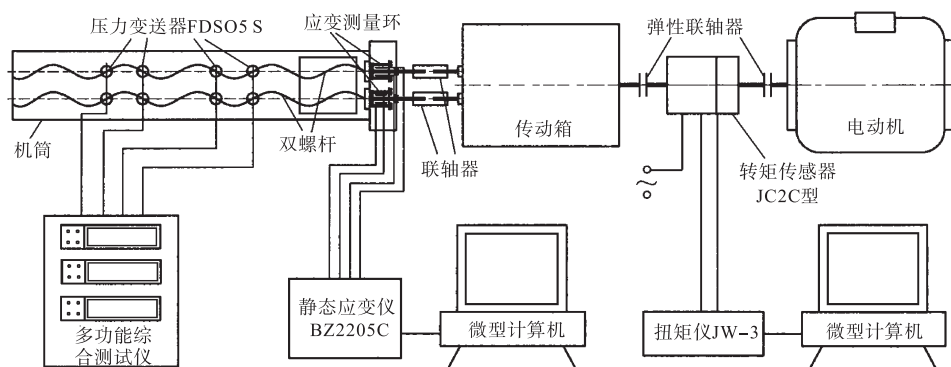


图 2 双螺杆磨浆机螺杆扭矩、轴向推力和机筒压力测量系统示意图

Fig.2 Schematic plan of measurement system on screw torque, screw axial thrust and barrel inwall pressure of TSPE

### 2 测量实验设计

实验目的是测量磨浆过程中螺杆扭矩、轴向推力、机筒压力和流量(单位时间磨浆量),研究双螺杆磨浆机螺杆扭矩、轴向推力、机筒压力和流量与螺杆几何

参数、转速的有关规律,验证双螺杆磨浆机挤压模型。

流量测量采用秒表计时,电子天平称重;此外,实验中还用到光电型转速表、红外测温仪等。

由于影响参数很多,为了减少实验次数和时间,所以要对实验进行设计,采用单因素变化,研究螺杆几何参数、操作参数与螺杆扭矩、轴向推力和机筒压

力的有关规律.

加工物料有棉秆、木片和麦秆,根据制浆要求对物料的处理,物料与水的质量比为 1:4,每 1 kg 的物料加 6% 的纯碱,在常温下浸泡 24 h;或者加 5% 的纯碱蒸煮 0.5 h. 螺杆几何参数的变化范围是:

- (1) 螺杆转速:分别取 100、200、300、465 r/min;
- (2) 挤压区数量:生产型螺杆有三段挤压区;实验螺杆只有一段挤压区;
- (3) 反向螺纹扣数:分别为 2、3、4、5、6、7 扣;
- (4) 反向螺棱槽宽:分别为 8、12、16 mm;
- (5) 螺纹螺距(相当于螺旋角变化):分别为 28、48、36 mm;
- (6) 正向螺棱顶宽:分别为 6.5、9.0、10.5 mm.

实验台机筒采用剖分式结构,便于装卸螺杆和观察螺杆的情况. 螺杆采用带键芯轴和螺杆元件组合的结构,螺杆元件制作成不同的螺距、旋向、螺棱顶宽、槽宽和槽数的螺纹元件(如图 3 所示),通过组合可以得到需要改变的螺纹参数. 实验分别采用具有 3 个挤压区(生产型螺杆)和 1 个挤压区的各种螺杆组合,在具有 1 个挤压区的螺杆上改变螺距、螺棱顶宽、反向螺纹扣数、反向螺棱槽宽和么向螺棱槽数,测量各种螺杆纹元件组合情况下的螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量.



图 3 用于改变螺纹参数的各种不同螺纹元件

Fig.3 Varieties screw elements using to change thread parameters of the twin screw

实验之前,开机预热 20 min 后开始加料,待正常出料时,开始采集和记录扭矩、功耗、螺杆轴力、机筒压力等数据,取 1 min 的出料称重测算流量.

### 3 数据处理

需要测量的是双螺杆磨浆机螺杆扭矩、功耗随螺杆几何参数和转速变化的情况,由于扭矩传感器并不是直接与螺杆相联,而是安装在电机与传动箱之间(如图 2 所示),因此扭矩传感器测量的扭矩并不是螺

杆扭矩,要想得到螺杆扭矩,需要经过必要的换算.

假设转矩传感器测得的扭矩为  $M_m$ ,功耗为  $P_m$ ,转速为  $n_m$ ;实际螺杆扭矩为  $M_s$ ,功耗为  $P_s$ ,转速为  $n_s$ ,根据能量守恒定律,有式(1)成立.

$$2P_s = P_m \eta_{\Sigma} \quad (1)$$

式中,  $\eta_{\Sigma}$  是总传动效率.

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{传动箱}} \eta_{\text{联轴器}} \quad (2)$$

其中,传动箱有 4 对外啮合圆柱齿轮;除此之外,转矩传感器到螺杆还要经过一个弹性和一个刚性联轴器,查手册<sup>[11]</sup>,  $\eta_{\Sigma} = 0.91$ . 代入式(1)可得:

$$P_s = 0.455 P_m \quad (3)$$

由于扭矩  $M$ 、功耗  $P$  与转速  $n$  存在以下关系:

$$M = 9549 \frac{P}{n} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),可得

$$M_s = \frac{1}{2} i \cdot \eta_{\Sigma} M_m \quad (5)$$

式中,  $i = n_m / n_s = 3.23$  为传动箱的传动比,代入式(5)可以得到:

$$M_s \approx 1.47 M_m \quad (6)$$

将实验测量得到的扭矩与功耗代入式(6)和式(3),即可得到双螺杆磨浆机螺杆扭矩和功耗.

## 4 结果与分析

采用 Matlab 软件对实验数据进行绘图和分析,各种测量参数(螺杆转速、反向螺旋螺纹扣数、反向螺棱槽宽、反向螺棱槽数和正向螺棱顶宽)与螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量之间的关系曲线如图 4—图 8 所示.

(1) 常温加工棉秆,采用具有 3 个挤压区的螺杆组合,改变螺杆转速,测得的螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量与螺杆转速的关系如图 4 所示.

可以看出:随螺杆转速增加,螺杆扭矩减小、功耗增大,螺杆轴向推力绝对值减小,机筒压力略有减小,大多在 1~2 MPa 之间,但流量明显增大. 据此,在保证磨浆质量前提下,增加螺杆转速对于提高双螺杆磨浆机产量是很有效的.

(2) 加工棉秆,采用 1~3 个挤压区的螺杆组合,选定螺杆转速,反向螺旋扣数分别为 2、3、4、5、6、7 时,螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的变化如图 5 所示.

可以看出:当反向螺旋螺纹扣数增加,螺杆扭矩和功耗明显增大,螺杆轴向推力的绝对值明显增大,

机筒压力明显增大,但流量变化不明显.除此之外,反向螺旋螺纹扣数与磨浆质量有很大关系,一定数量的反扣可以保证物料充分的揉搓和分丝,延长物料在机筒中的停留时间.根据实验,加工木片时,反扣数应 $\geq$

6;加工棉秆和麦秆时,反扣数应 $\geq 9$ .

(3)采用只有一个挤压区的螺杆组合,选定螺杆转速,其他条件不变,仅改变反向螺旋槽宽,其影响如图6所示.

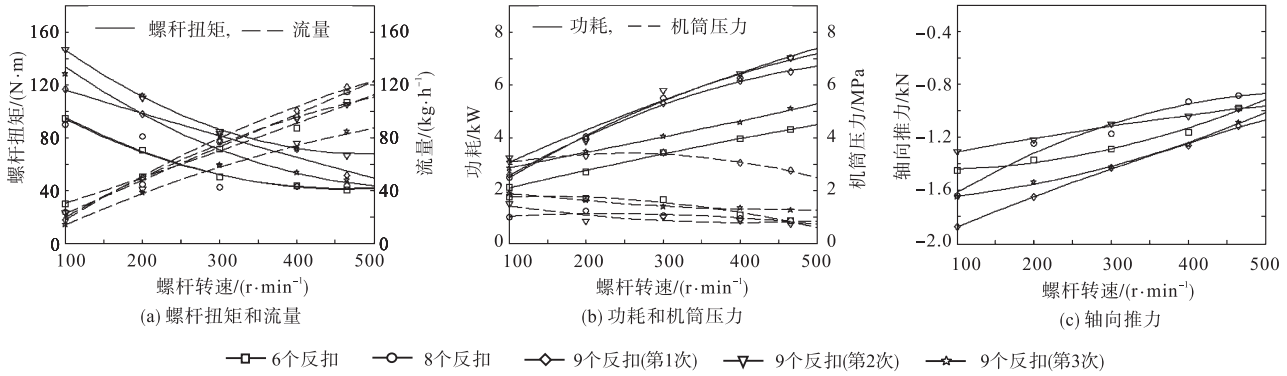


图4 螺杆转速对螺杆扭矩、功率、轴向推力、机筒压力和流量的影响

Fig.4 Effect of screw rotation speed on screw torque, power consumption, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux

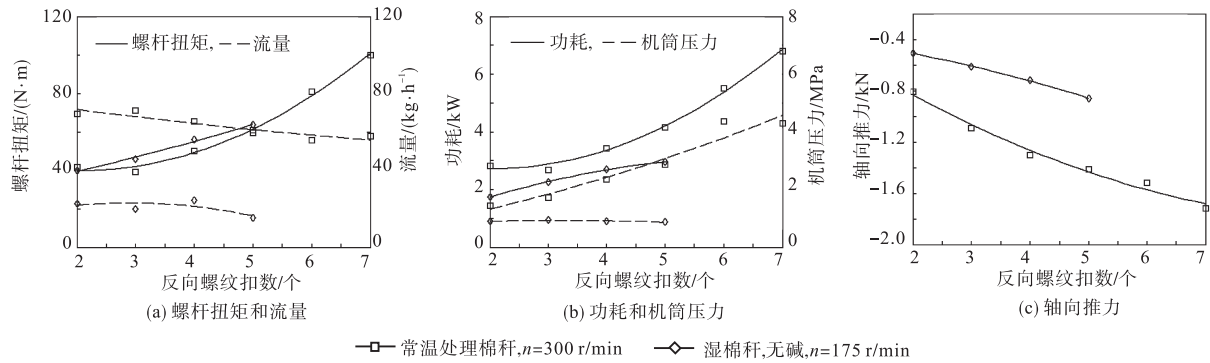


图5 反向螺旋扣数对螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的影响

Fig.5 Effect of lead number of reverse thread on screw torque, power consumption, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux

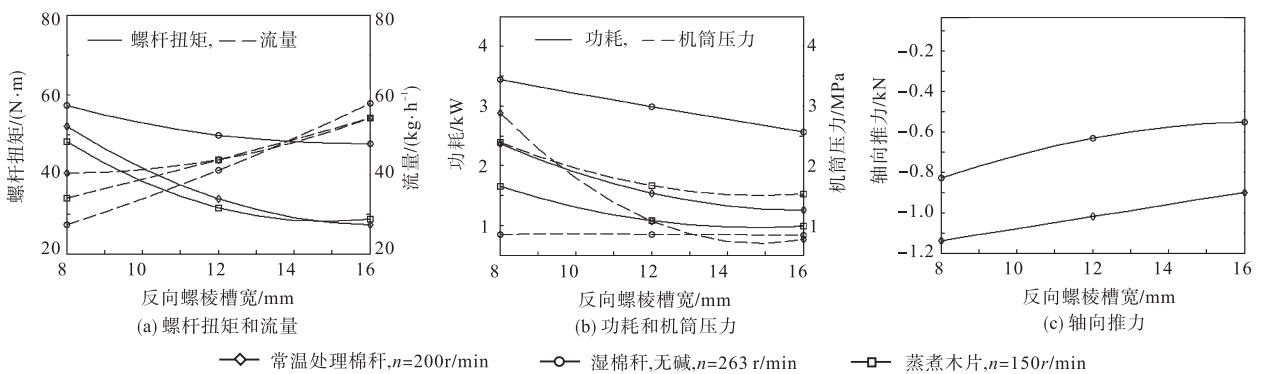


图6 反向螺旋槽宽对螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的影响

Fig.6 Effect of slot width in reverse flight on screw torque, power consumption, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux

可以看出:当反向螺旋槽宽增大时,螺杆扭矩和功耗明显减小,螺杆轴向推力的绝对值减小,机筒压力明显减小,流量明显增大.值得注意的是反向螺旋

槽宽与加工物料的纤维长度和宽度有关,最后一个挤压区的反向槽宽应根据物料加工质量要求确定,前面的挤压区可以逐步增大,以分担剪切分丝任务.

(4)加工棉秆,采用只有一个挤压区的螺杆组合,螺杆转速不变( $n=200\text{ r/min}$ ),反向螺旋槽宽、开槽角

度等均不变,仅改变单位导程反向螺旋槽数,其影响如图7所示.

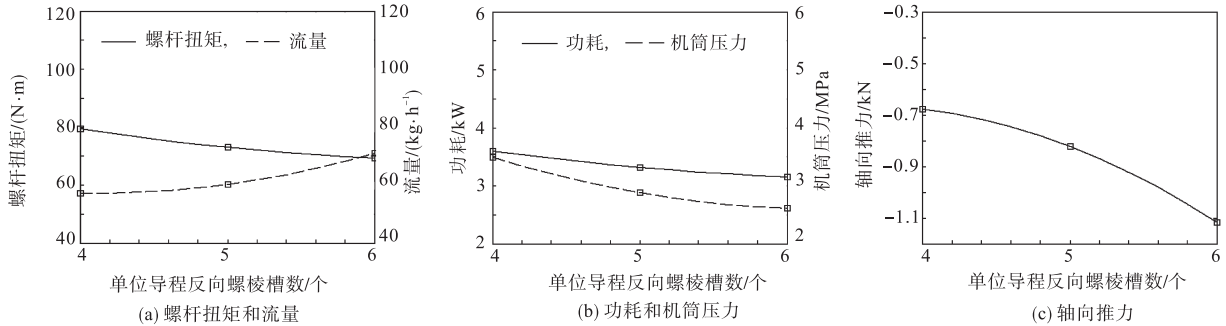


图7 反向螺旋槽数对螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的影响

Fig.7 Effect of slot number in reverse flight on screw torque, power consumption, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux

可以看出:当反向螺旋槽数增加时,螺杆扭矩和功耗减小,螺杆轴向推力的绝对值明显增大,机筒压力减小,流量有增大趋势.反向螺旋槽数应与正向螺旋槽截面积相匹配,开槽数量太小,会使物料被“憋住”,开槽数量太多,会使物料的揉搓、分丝效果

减弱.

(5)加工棉秆,采用只有一个挤压区的螺杆组合,选定螺杆转速,螺杆第一输送区正向螺旋顶宽分别为6.5、9.0、10.5时,螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的变化如图8所示.

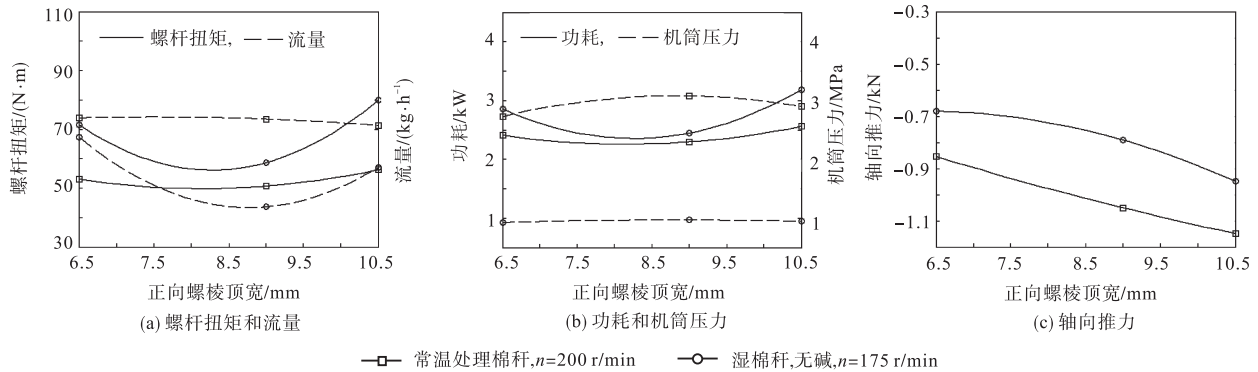


图8 正向螺旋顶宽对螺杆扭矩、功耗、轴向推力、机筒压力和流量的影响

Fig.8 Effect of top width of positive flight on screw torque, power consumption, screw axial thrust, barrel inwall pressure and flux

可以看出:当正向螺旋顶宽增大时,螺杆扭矩和功耗无明显变化,螺杆轴向推力的绝对值明显增大,机筒压力略有增大,流量略有减小.除此之外,螺旋顶宽还与正向位移输送和螺旋的耐磨性有关,螺旋顶宽增大,正向位移输送效果改善;螺旋顶宽太小,螺旋的耐磨性降低.

扭矩、功耗、螺杆轴向推力、机筒压力和流量的影响.

(2)在所测量的双螺杆磨浆机的参数中,根据测量的结果分析,按对双螺杆磨浆机螺杆扭矩、功耗和流量影响由大到小的排序是:螺杆转速、反向螺旋槽数、反向螺旋槽宽、反向螺旋槽数、正向螺旋槽顶宽等.

### 5 结 语

(1)采用剖分式机筒、螺杆芯轴和不同的螺纹元件组合方式和图2的测量系统可以测量双螺杆磨浆机(除螺槽深度、直径变化之外)各种参数变化对螺杆

(3)在上述测量系统中,由于扭矩传感器采用动态测量仪器,扭矩、功耗测量结果可靠;螺杆轴力采用静态应变仪,只能测量轴力的平均值,而实际加工过程中轴力是动态变化的,采用动态应变仪会得到更好的测量效果;机筒压力测量方法可行,因为目前对于

(下转第59页)