DOI: 10.13382/j.jemi.B2104584

基于砂带表面磨粒分布的螺杆曲面重复磨削区域表面粗糙度预测*

董浩生[1,2] 杨赫然[1,2] 孙兴伟[1,2] 董社序[1,2] 刘 寅[1,2]
(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870;2. 辽宁省复杂曲面数控制造技术重点实验室 沈阳 110870)

摘 要:为提高螺杆转子磨削效率开发螺杆同步磨削装置,分别采用不同方式对螺杆凹凸两面进行磨削,由此会在连接处产生重复磨削区域。为保证重复磨削区域表面质量满足螺杆使用要求,对该区域表面粗糙度进行预测。首先基于瑞利分布建立砂带表面磨粒分布模型;在此基础上,根据磨削去除机理及螺杆廓形对磨削后的螺杆表面形貌进行预测;其次,依据表面粗糙轮廓度定义得到不同工艺参数下的表面粗糙度预测值。最后通过螺杆磨削及测量实验验证提出算法的准确性。实验结果表明提出的算法平均误差为 6.27%,最低误差为 0.16%,因此提出的算法可为螺杆转子砂带磨削表面粗糙度预测提供理论依据。

关键词:磨削;表面粗糙度;形貌预测
中图分类号:TH161+.1;TN05 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.4030

Prediction of surface roughness in repeated grinding area of screw surface based on abrasive particle distribution on abrasive belt surface

Dong Haosheng[1,2] Yang Heran[1,2] Sun Xingwei[1,2] Dong Zhixu[1,2] Liu Yin[1,2]
(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University of technology, Shenyang 110870, China; 2. Key Laboratory of Numerical Control Manufacturing Technology for Complex Surfaces of Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to improve the grinding efficiency of screw rotor, a screw synchronous grinding device is developed. Different ways are used to grind the concave and convex sides of screw respectively, which will produce repeated grinding areas at the joints. In order to ensure that the surface quality of the repeated grinding area meets the requirements of the screw, the surface roughness of the area is predicted. Firstly, based on Rayleigh distribution, the abrasive particle distribution model on the surface of sand belt is established. On this basis, the surface morphology of the ground screw is predicted according to the grinding removal mechanism and screw profile. Secondly, according to the definition of surface roughness profile, the predicted values of surface roughness under different process parameters are obtained. Finally, the accuracy of the proposed algorithm is verified by screw grinding and measurement experiments. The experimental results show that the average error of the proposed algorithm is 6.27% and the minimum error is 0.16%. Therefore, the proposed algorithm can provide a theoretical basis for the prediction of surface roughness in screw rotor abrasive belt grinding.

Keywords: grinding; surface roughness; shape prediction

0 引 言

螺杆转子作为压缩机、螺杆泵等设备的核心部件,广泛应用于石油钻采等行业。影响螺杆转子工作性能的主要因素之一为表面粗糙度[1-3]。目前,尚未有商用软件对磨削过程进行系统模拟[4],因此以表面粗糙度数据为基础的相关预测显得有为重要[5-6]。王奕首等[7]陈述并分析了磨粒的典型特征;Kong 等[8]利用标准的叶斯线性回归(BLR)建立了表面粗糙度预测模型,对铣削加工表面粗糙度进行预测;Pritima 等[9]以粒子速度、防区外距离(SOD)和撞击角作为输入因子,通过响应面法(RSM)实现了参数效应和表面粗糙度优化;Feng 等[10]提出了一种基于刀具轨迹和加工表面响应的表面粗糙度预测分析模

收稿日期:2021-08-01 Received Date:2021-08-01
*基金项目:辽宁省自然科学基金计划指导计划(2019-ZD-0206)、辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1905003)、中央引导地方科技发展专项资金(2020JH6/10500048)、辽宁省博士启动项目(2019BS181)资助

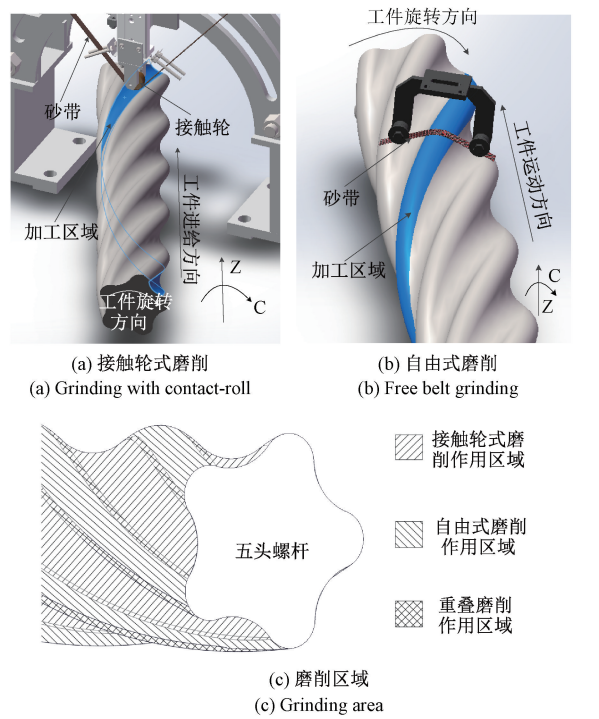
型;Zhu 等[11]根据磨粒的随机性建立了铝合金和碳化硅表面粗糙度的理论模型;李伦等[12]通过建立磨粒材料去除模型得到了粗糙度预测公式;刘国梁等[13]将符号规则与深度学习相结合并建立表面粗糙度加工模型来预测表面粗糙度;李聪波等[14]提出一种基于多源异构数据的数控铣削表面粗糙度预测方法,验证了基于多源异构数据的数控铣削表面粗糙度预测方法的优越性;张广鹏等[15]提出了一种火花图像信息的砂带磨削去除率方法,用以分析砂带磨削去除率;张彤等[16]利用逾渗理论建立了表面形貌的模型,并对其进行了量化表征;Berat 等[17]提出了一种利用人工神经网络对 AZ91 D 镁合金车削表面粗糙度进行建模和预测的方法。针对磨削加工,磨粒的分布状态对工件表面的粗糙度起到决定性影响。通过王文玺等[18]的研究发现,砂带磨粒之间的距离分布呈现正态分布;朗献军等[19]通过研究砂带磨粒的分布高度情况,得到其磨粒呈现瑞利分布。刘博文[20]则认为砂带磨粒的三维形状可分为圆锥体、四棱锥体、球体等几种。目前砂带采用“静电植砂”工艺将碾压后的针状磨粒大体均匀地植在砂带表面,由于在磨粒发生尖端放电效应而使绝大部分磨粒尖部向上,针状尾部植于砂带表面,因此外露的磨粒采用圆锥体描述较为合理。

通过研究前人的研究成果,发现虽然对工件表面粗糙度预测的研究已经很深入,但是由于加工过程差异性较大,且预测算法特点各异,因此对于螺旋类曲面表面粗糙度预测仍有深入研究的必要。针对开发的同步磨削机构,本文基于概率理论知识完成砂带表面磨粒分布建模工作,即将砂带磨粒的形状数字化,利用磨粒高度信息、位置间距信息,形成磨粒位置、高度矩阵;以圆锥体近似描述磨粒形状,依据磨粒位置、高度矩阵可得到砂带表面磨粒的样貌;在此基础上,根据材料去除机理及工件初始样貌,可预测磨削后工件的表面形貌。

1 同步磨削装置及重复磨削区域

同步式磨削装置包括两部分,自由式砂带磨削机构用于螺杆凸起部分的加工,接触轮式砂带磨削机构则用以加工螺杆凹处,如图 1(a)、(b)所示。加工时,螺杆自转及磨削装置整体沿螺杆轴线方向的直线运动为进给运动,需要进行插补。磨削装置中砂带的线性运动为主运动,实现最终材料去除。由于同步式磨削装置采用两种不同的方式进行磨削,在二者磨削过程中会产生重复磨削的区域,此区域的面积大小受加工时的参数影响,不同的加工参数下重复磨削区域略有不同,在以往文章中进行过分析,故不再进行赘述。为保证表面的一致性,有必要对磨削结果进行预测。

图 1 为接触轮式磨削与自由式装置分别磨削的作用区域,可以看出二者存在公共磨削的区域,此区域的大小受多因素的影响,如磨削压力、张紧力等。



(a) 接触轮式磨削
(a) Grinding with contact-roll

(b) 自由式磨削
(b) Free belt grinding

(c) 磨削区域
(c) Grinding area

图 1 装置磨削作用区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grinding action area of device

2 曲面表面形貌预测

表面粗糙度反应工件表面微观不平整度,粗糙度值越低,微观表面形貌越平稳,反之则越动荡。首先根据概率论及磨粒参数建立砂带表面磨粒分布样貌,再通过研究砂带磨削工件的具体磨削过程,表征出最后砂带磨削之后螺杆的表面形貌,步骤如下:

1)利用三维椎体数学表达式来描述出砂带表面磨粒,根据瑞利分布函数得到磨粒高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}$;

2)根据磨粒坐标位置以及砂带型号,运用正态分布得出磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$;

3)磨粒高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}$ 和磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$ 生成砂带表面形貌图;

4)根据砂带表面形貌图的单颗粒磨削深度 a_p 模型、磨削参数得出每颗磨粒的磨削深度 a_p,得到磨粒出刃高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}'$;

5)根据磨粒出刃高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}'$ 和磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$ 仿真磨粒磨削轨迹 z_{ij},表征出工件表面形貌。

形貌预测流程如图 2 所示。

2.1 三维椎体砂带表面形貌仿真分析

根据砂带的基本参数(磨粒高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}$、磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$ 等信息),利用正态分布定义一基体矩阵,该矩阵

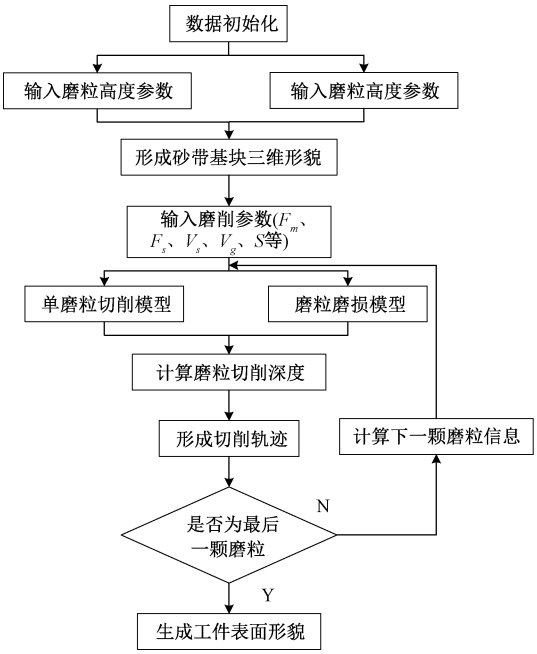


图 2　螺杆曲面砂带磨削表面形貌预测流程

Fig. 2　Flow of surface morphology prediction of screw curved surface abrasive belt grinding

为 10 阶方阵;该矩阵包含了磨粒的位置及高度信息。假设磨粒的形状近似为圆锥体,用三维实体来近似表示单颗磨粒的形貌。由磨粒在一个基体矩阵上的瑞利分布为基础,扩展至接触区域的砂带。以磨粒在一个基体矩阵上的划分网格的瑞利分布为例,具体的过程如下:

1)选择初始位置,正方体网格中心;

2)依据瑞利分布建立磨粒尺寸;

$$\boldsymbol{H}_g = Raylrnd(B,m,n) \tag{1}$$

式中:*Raylrnd* 函数作用为产生一组服从瑞利分布的随机数,$\boldsymbol{H}_g$ 为磨粒的随机尺寸矩阵;B 为瑞利分布参数;m、n 代表生成矩阵的行数与列数。对所得的随机尺寸矩阵 $\boldsymbol{H}_g$ 中所有的尺寸进行区域划分,区间长度为 4 μm,取每个区间的平均值代替整个区域的磨粒尺寸。计算公式如式(2)、(3)所示。

$$k = floor\left(\frac{\boldsymbol{H}_g - H_{\min}}{\Delta H}\right) \tag{2}$$

$$H_{ij} = H_{\min} + \frac{\Delta H}{2} + k\Delta H \tag{3}$$

式(2)中,k 表示区域编号,式(3)中 $H_{\min}$ 代表最小磨粒尺寸,ΔH 表示区域间隔(50 μm),H_{ij} 代表取整之后的磨粒高度。将区域内的磨粒个数进行排布,得出磨粒区域分布,如表 1 所示。

将各区域磨粒尺寸分布情况绘制成分布图,如图 3 所示。下述所做磨粒分析,均为 P120 型号砂带。

表 1　各区域磨粒高度数目分布情况

Table 1　Distribution of abrasive particle height in each area

分布区间/μm	区间分布均值	磨粒数量
100~104	102	1
104~108	106	9
108~112	110	18
112~116	114	27
116~120	118	17
120~124	122	14
124~128	126	8
128~132	130	6
132~136	134	0

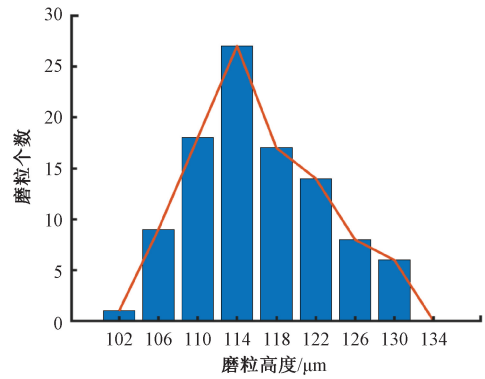


图 3　磨粒高度分布示意图

Fig. 3　Schematic diagram of abrasive particle height distribution

3)磨粒间隔大小呈正态随机分布,根据正态分布特点建立磨粒间距矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$,具体流程如下:

(1)根据磨粒位置信息,得到磨粒初始位置矩阵 $[\boldsymbol{x}_{ij},\boldsymbol{y}_{ij}]$;

(2)根据正态分布分别得出磨粒移动位移量 Δx_{ij}、Δy_{ij};

(3)根据步骤(1)中磨粒初始位置矩阵 $[\boldsymbol{x}_{ij},\boldsymbol{y}_{ij}]$ 以及步骤(2)中磨粒移动位移量 $\Delta\boldsymbol{x}_{ij}$、$\Delta\boldsymbol{y}_{ij}$,得到磨粒范围方程;

(4)磨粒范围方程与其他已经得到磨粒范围方程无交点,则生成磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$;

(5)步骤(4)中若磨粒范围方程与其他已经得到磨粒范围方程有交点,则返回至步骤(2),直至磨粒范围方程与其他已经得到磨粒范围方程无交点,生成磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$。

$$\boldsymbol{B}_{ij} = (X_{ij},Y_{ij}) \tag{4}$$

式中:X_{ij}、Y_{ij} 各自表示位于 i 行 j 列的小网格更新之后的磨粒新坐标位置。

为更准确地反映出砂带磨粒的情况,磨粒的中心位置坐标不能是固定不变的,需要进行随机确定。在保证

磨粒相互不会干涉的情况下，中心坐标要在所划分的网格中随机变换，变换分为 x、y 两个方向。可由式(5)表示。

$$(X_{ij},Y_{ij})=(x_{ij}+\Delta x,y_{ij}+\Delta y) \tag{5}$$

式中：X_{ij}、Y_{ij} 各自表示位于 i 行 j 列的小网格更新之后的磨粒新坐标位置，Δx、Δy 表示在各自坐标轴上的偏移量。砂带磨削过程中，磨粒不会彼此重叠，所以磨粒在两个方向上的位移量不能与其他磨粒的范围相互交叉。因为假设的磨粒几何形状为顶角 $2\theta=90°$ 的圆锥体，所以其磨粒高度尺寸与底部直径尺寸相等，即底部尺寸 $D_{ij}=H_{ij}$。

在 x、y 坐标轴方向，当 $(1,1)\leqslant(i,j)\leqslant(m,n)$ 时，为保证磨粒随机变换不会与其他磨粒相重叠，正向最大距离应为此磨粒与后一磨粒变换之后的坐标差减去两颗磨粒半径和，反向最大距离为此磨粒与前一磨粒变换之后坐标差减去两磨粒半径和。因此，Δx 与 Δy 应该满足式(6)~(7)。

$$\Delta x_{ij}=rand\begin{cases}\left(D_{ij}-r,X_{i+1j}-X_{ij}-\dfrac{D_{i+1j}+D_{ij}}{2}\right),i=1\\ \left(X_{i-1j}-X_{ij}-\dfrac{D_{i-1j}+D_{ij}}{2},X_{i+1j}-X_{ij}-\dfrac{D_{i+1j}+D_{ij}}{2}\right),1<i<m\\ \left(X_{i-1j}-X_{ij}-\dfrac{D_{i-1j}+D_{ij}}{2},r-D_{ij}\right),i=m\end{cases} \tag{6}$$

$$\Delta y_{ij}=rand\begin{cases}\left(D_{ij}-r,Y_{i+1j}-Y_{ij}-\dfrac{D_{i+1j}+D_{ij}}{2}\right),j=1\\ \left(Y_{i-1j}-Y_{ij}-\dfrac{D_{i-1j}+D_{ij}}{2},Y_{i+1j}-Y_{ij}-\dfrac{D_{i+1j}+D_{ij}}{2}\right),1<j<n\\ \left(Y_{i-1j}-Y_{ij}-\dfrac{D_{i-1j}+D_{ij}}{2},r-D_{ij}\right),j=n\end{cases} \tag{7}$$

式中：$rand$ 表示随机在范围内选择一数值作为磨粒位置变换值，X、Y 为变换之后的坐标。r 代表两磨粒之间的间距，根据研究表明，砂带磨粒间距与磨粒个数之间存在关联，砂带磨粒的间距服从正态分布。取方差 $\sigma=0.1$ mm，平均磨粒间距 $\mu=0.5$ mm，生成随机数，再将其十等分，取区间右端点值作为间距值，得到表 2 与图 4。

4)根据磨粒尺寸与磨粒间距建立砂带表面形貌图。

在得到了磨粒高度矩阵、磨粒间距矩阵之后，生成一组三维数据，以此来表征磨粒三维形貌，生成砂带表面形貌图如图 5 所示。

表 2 各区域磨粒间距数目分布情况

Table 2 Distribution of abrasive particle spacing in each area

分布区间/μm	区间分布均值(取上)	磨粒数量
<85	85	1
85~90	90	3
90~95	95	10
95~100	100	14
100~105	105	22
105~110	110	24
110~115	115	24
115~120	120	14
120~125	125	8
125~130	130	4

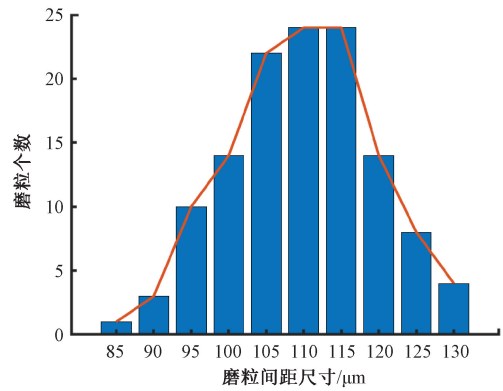


图 4 磨粒间距分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of abrasive particle spacing distribution

2.2 砂带磨粒磨损对磨粒高度分布影响分析

与砂轮磨削相类似，在磨削过程中，工件材料的去除往往伴随着砂带磨粒的磨损，这些磨粒磨损在初期磨削时会较为明显，待加工一段时间之后，就会趋近于某一稳定值，整个砂带磨削过程可分为 3 个阶段，其磨损时间与磨损高度的关系如图 6 所示[21]。

在经历磨损之后，砂带磨粒材料会逐渐演变脱落，由最初的圆锥顶角尖锐的形态变成顶角为钝角且平缓的形态。演变过程如图 7 所示。

根据磨粒磨损周期，可以定义磨粒的磨损率 β_m：

1)磨粒在前期、中期磨损阶段，每参与过一次磨削过程，就会相应的减少磨粒一部分的材料，取其在相应的磨损过程中的总去除量与总时间的比值作为磨粒的磨损率，如式(8)所示。

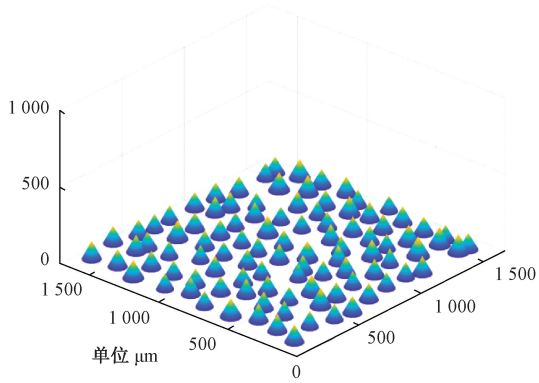


图 5　砂带表面磨粒三维形貌仿真示意图

Fig. 5　Simulation diagram of three-dimensional morphology of abrasive particles on the surface of abrasive belt

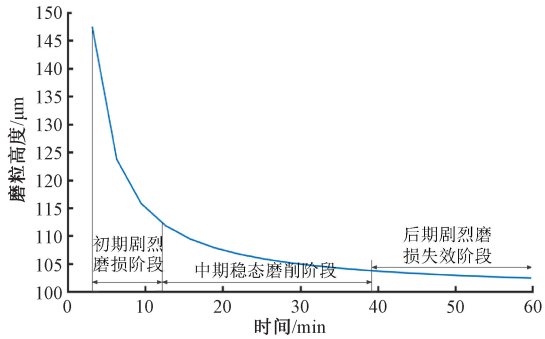


图 6　砂带磨粒磨损周期示意图

Fig. 6　Schematic diagram of abrasive wear cycle of abrasive belt

$$\beta_m = K_\beta \frac{\Delta h}{t_z - t_c} \tag{8}$$

式中:β_m 为磨损率,Δh 为整个磨削初期的磨粒高度去除量,$t_z - t_c$ 为磨削初期的总时间。K_β 与工件速度 V_g 成反比,与砂带速度 V_s 成正比。

2)磨粒在后期磨损阶段,此时磨粒的磨损去除量已经很低,去除高度与时间的曲线接近水平,所以此时可以认为磨粒已经不会被磨损,此时 $\beta_m = 0$。

依据磨粒磨损周期与磨粒磨损演变过程的原理,可以得到砂带磨粒在实际磨削过程中的变化过程,有利于后续仿真的真实性。

2.3　螺旋曲面砂带磨削最大切削深度建模

根据单颗粒磨削深度模型、磨削参数(砂带速度、装置轴向进给速度、砂带张紧力、磨削压力等)可得出每颗磨粒的磨削深度,并且得到各磨粒出刃高度。最大磨削深度需要通过磨粒切刃法向压力等有关,所以需要进行单颗粒磨削深度值计算,磨粒磨削示意图如图 8 所示。

1)自由式砂带磨削深度计算

当磨削方式为自由式砂带时,磨削的二维示意图如图 9 所示。

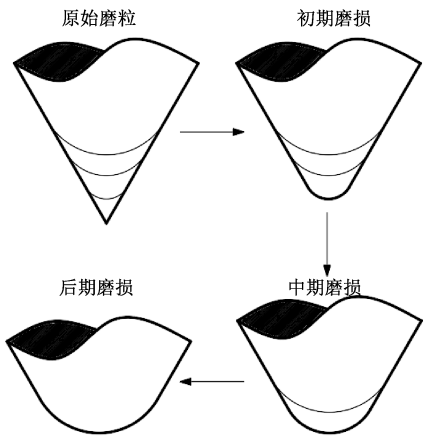


图 7　砂带磨粒磨损演变过程

Fig. 7　Abrasive wear evolution process of abrasive belt

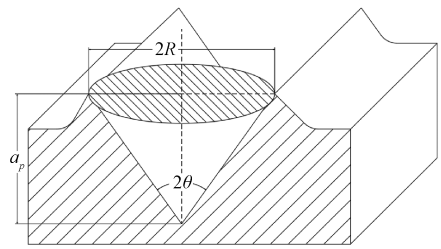


图 8　单颗粒磨粒磨削工件表面理论模型

Fig. 8　The oretical model of workpiece surface grinding with single particle abrasive

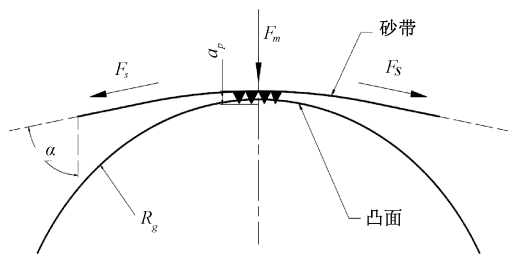


图 9　自由式砂带磨削二维示意图

Fig. 9　Two dimensional schematic diagram of free abrasive belt grinding

图 9 中,R_g 为螺杆的曲率半径,α 为砂带与螺杆的夹角。与此同时,根据弹性力学的观点,磨削深度 a_p 与砂带张紧力 F_s、磨削压力 F_m 之间存在一定的关系,其关系如式(9)所示,其中 k_1 与 k_2 是基于工件与砂带的材料而计算的,具体与二者材料的弹性模量与泊松比有关。

$$a_p = \sqrt[3]{\left(\frac{9\pi^2 (F_m + 2F_s \cdot \sin\alpha)^2 (k_1 + k_2)^2 (R_g + h)}{16 R_g \cdot h}\right)} \tag{9}$$

其中:k_1 与 k_2 根据式(10)得出:

$$k_1 = \frac{1-\mu_1^2}{\pi B_1}, k_2 = \frac{1-\mu_2^2}{\pi B_2} \tag{10}$$

式中:h 为磨粒的高度,μ_1、μ_2、B_1、B_2 分别代表工件与砂带磨粒的泊松比与弹性模量。又因为工件凸面曲率半径远大于磨粒高度,所以式(9)可以化为式(11)。

$$a_p = \sqrt[3]{\left(\frac{9\pi^2(F_m + 2F_s \cdot \sin\alpha)^2(k_1+k_2)^2}{16h}\right)} \tag{11}$$

2)接触轮式砂带磨削深度计算

同理,当磨削方式为接触轮式磨削时,根据其接触关系二维示意图(如图 10 所示),得到接触轮式砂带磨削凹面时的 a_p 表达式如式(12)所示。

$$a_p = \sqrt[3]{\left(\frac{9\pi^2(F_m - 2F_s \cdot \cos\alpha)^2(k_1+k_2)^2}{16h}\right)} \tag{12}$$

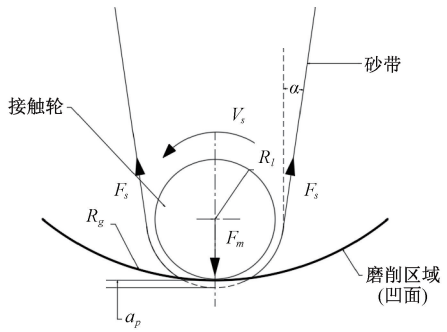


图 10 接触轮式砂带加工凹面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of concave surface processing of contact wheel abrasive belt

2.4 工件表面形貌仿真建模

根据磨削参数得出每颗磨粒的磨削深度 a_p 与磨粒高度 h 的比值 K,重新计算出磨粒出刃高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}'$根据式,式(13)、(14)中 K_1,K_2 分别为自由式与接触轮式砂带的表达式。

$$K_1 = \frac{a_p}{h} = \sqrt[3]{\left(\frac{9\pi^2(F_m + 2F_s \cdot \sin\alpha)^2(k_1+k_2)^2(R_g+h)}{16R_g \cdot h^4}\right)} \tag{13}$$

$$K_2 = \frac{a_p}{h} = \sqrt[3]{\left(\frac{9\pi^2(F_m - 2F_s \cdot \cos\alpha)^2(k_1+k_2)^2(R_g+h)}{16R_g \cdot h^4}\right)} \tag{14}$$

利用上述步骤的磨粒出刃高度矩阵 $\boldsymbol{H}_{ij}'$和的磨粒位置矩阵 $\boldsymbol{B}_{ij}$ 计算磨粒磨削轨迹 $\boldsymbol{z}_{ij}$;

利用磨粒出刃高度矩阵、磨粒位置矩阵将磨粒切削过程数字化,拟合之后得到磨削轨迹,将磨削轨迹最小值最为工件表面最大值,表征出工件表面形貌。拟合过程为如式(15)、(16)所示。

$$z_{ij} = \min(polyval(p_{ij}, H_{ij}', B_{ij})), i,j \in (1,10) \tag{15}$$

$$p_{ij} = polyfit(u_n, v_n), i,j \in (1,10); n \in (1,3) \tag{16}$$

式(15)与(16)中,z_{ij} 是根据拟合函数确定的磨削轨迹 *polyfit*,与 *polyval* 是二次拟合的表达函数,p 是三点确定的二次拟合函数,u_n、v_n 表示拟合点位置坐标,$n \in (1,3)$。

根据最终的 z_{ij} 结果,结合单颗粒磨削模型以及砂带仿真参数进行首次磨削自由式,二次磨削为接触轮式的加工仿真。选用的数据为磨削正压力气压 F_m = 0.5 MPa,砂带张紧气压 F_s = 0.3 MPa,砂带速度 V_s = 8.7 m/s,装置轴向进给速度 V_g = 200 mm/min。根据磨削速度方向绘制工件表面磨削轨迹图,如图 11 所示;并生成如图 12 所示的磨粒磨削零件表面的仿真图。由于砂带磨削为工件经过磨粒切削而去除材料的破坏加工,且仿真基于静态模型,结果为最终砂带磨削所能达到的理想情况,即磨削深度范围内的原工件表面材料在加工过程中均被去除;此外,实际加工中,磨削加工处于精加工阶段,待加工表面质量较高,磨削去除量较小,故而在磨削过程中未对工件初始表面精度加以考虑。

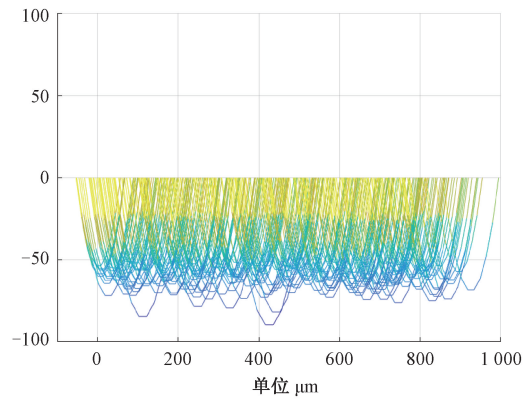


图 11 磨粒切削轨迹示意图

Fig. 11 Schematic diagram of abrasive cutting trajectory

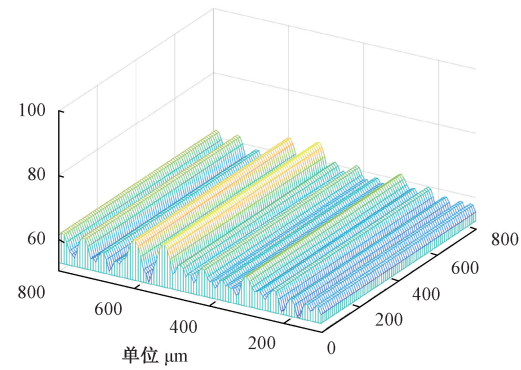


图 12 零件表面磨削样貌示意图

Fig. 12 Schematic diagram of part surface grinding appearance

2.5　工件表面粗糙度预测

目前,表面粗糙度的表达方式有很多种,但最为常见的当属用轮廓算术平均差来表示其粗糙度,具体计算其数值是利用在一个取样长度范围 l 内,以表面形貌表达的函数 $z(x)$ 的绝对值与取样长度的比值。其图示与算法如图 13 与式(17)表示。

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |z(x) - h_V| \mathrm{d}x \tag{17}$$

式中:l 代表取样长度,h_V 代表轮廓中线。

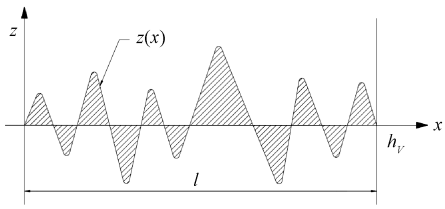


图 13　轮廓算术平均偏差示意图

Fig. 13　Schematic diagram of arithmetic mean deviation of contour

影响表面粗糙度的因素较多,能够在实验中加以控制的参数有砂带速度、装置轴向进给速度、磨削压力和砂带张紧力等。在得到工件表面形貌图之后,根据式(17)计算工件表面粗糙度。经过表面形貌仿真之后,可得到二次磨削的表面粗糙度数值,表 3 即为二次磨削之后的 5 组数据。表中,由于磨削压力与张紧力是通过主气缸及张紧气缸来得到的,所以直接采用气缸压力作为参数。F_m、F_s、的单位为 MPa,V_s 单位为 m/s,V_g 单位为 mm/min。

表 3　螺杆磨削仿真参数及结果

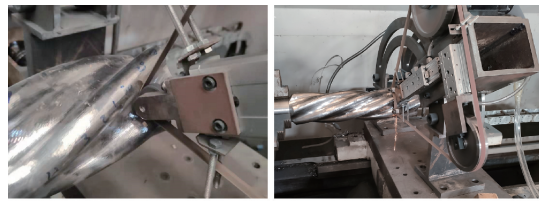
Table 3　Simulation parameters and results of screw grinding

组数	首次磨削(自由式磨削)				二次磨削(接触轮式磨削)				R_a/μm
	F_m	F_s	V_s	V_g	F_m	F_s	V_s	V_g	
1	0.5	0.3	4.4	300	0.5	0.4	4.4	100	1.609
2	0.5	0.3	8.7	300	0.5	0.4	13.1	100	1.269
3	0.4	0.3	4.4	100	0.4	0.3	13.1	300	0.621
4	0.4	0.2	4.4	300	0.5	0.4	13.1	100	1.026
5	0.5	0.3	13.1	300	0.5	0.4	8.7	100	1.334

3　实验验证

根据上述仿真模拟的表面粗糙度数据,进行实验验证。实验用螺杆的材质为 45 钢,大径为 110 mm,导程为 650 mm;自主研发的多头螺杆同步砂带磨削装置。按照表 3 仿真的数据进行实验,实验加工图如图 14 所示。

磨削完成后采用 Taylor Hobson S3C 型表面粗糙度测量仪进行测量。表面粗糙度测量实验布置如图 15 所示,图 16 为单次粗糙度测量界面。为提高测量精度,在进行表面粗糙度测量前,对示值误差进行校准;测量过程中,在不同方位测量 3 次,并以 3 次测量结果的平均数值作为最终结果。



(a) 接触轮式磨削　(b) 自由式磨削

(a) Grinding with contact-roll　(b) Free belt grinding

图 14　实验加工布置

Fig. 14　Experimental processing layout

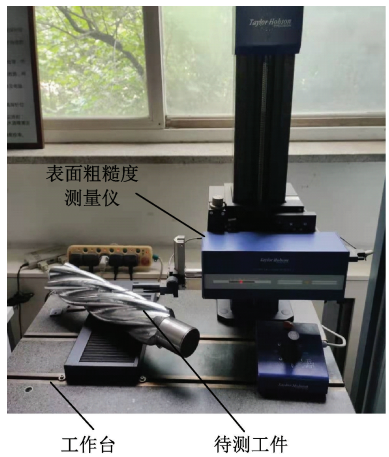


图 15　表面粗糙度测量仪器布置

Fig. 15　Arrangement of surface roughness measuring instruments

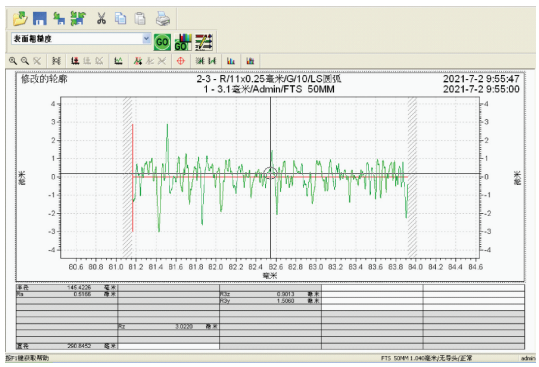


图 16　表面粗糙度测量界面

Fig. 16　Surface roughness measurement interface

实验测得数据如表 4 所示。

表 4 螺杆磨削实验参数及结果

Table 4 Experimental parameters and results of screw grinding

组数	首次磨削(自由式磨削)				二次磨削(接触轮式磨削)				R_a/
	F_m	F_s	V_s	V_g	F_m	F_s	V_s	V_g	μm
1	0.5	0.3	4.4	300	0.5	0.4	4.4	100	1.703
2	0.5	0.3	8.7	300	0.5	0.4	13.1	100	1.271
3	0.4	0.3	4.4	100	0.4	0.3	13.1	300	0.599
4	0.4	0.2	4.4	300	0.5	0.4	13.1	100	0.921
5	0.5	0.3	13.1	300	0.5	0.4	8.7	100	1.492

将粗糙度数据与之前仿真数据进行对比,如表 5 所示。

表 5 实验数据与仿真数据对比

Table 5 Comparison between experimental data and simulation data

实验数据 R_a/μm	预测数据 R_a/μm	绝对误差/%
1.703	1.609	5.52
1.271	1.269	0.16
0.599	0.621	3.67
0.921	1.026	11.40
1.492	1.334	10.59

对比仿真数据与实验数据,平均误差为 6.27%,最低误差为 0.16%,表明了预测方法的准确性。

4 结 论

为保证螺杆砂带磨削中重复磨削区域的表面质量满足使用要求,对该区域表面粗糙度进行了预测。以磨粒形状为圆锥体进行分析,建立了磨粒高度服从瑞利分布,磨粒位置服从正态分布的砂带磨粒分布模型,并根据磨削去除机理及螺杆廓形建立磨削后的螺杆表面形貌,并对不同工艺参数下的表面粗糙度进行预测。最后通过螺杆磨削及测量实验验证提出算法的准确性,实验结果表明提出的算法平均误差为 6.27%,最低误差为 0.16%,因此提出的算法可为螺杆转子砂带磨削表面粗糙度预测提供理论依据。

参考文献

[1] 刘坚,路恩会,易怀安,等. 基于图像质量的磨削表面粗糙度检测[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(3):374-381.
LIU J, LU EN H, YI H AN, et al. Grinding surface roughness measurement based on image quality assessment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(3):374-381.

[2] 刘星洲,刘明昆,柴晓彤,等. 螺距螺杆转子车削工艺研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(2):169-173.
LIU X ZH,LIU M K,CHAI X T, et al. Machining with numerical control lathe and clearance design of fixed pitch screw rotor[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020,40(2):169-173.

[3] BIZZARRI M, BARTO M. Manufacturing of screw rotors via 5-axis double-flank CNC machining[J]. Computer-Aided Design,2021, 132:1-12.

[4] 黄云,刘帅,黄涛,等. 钛合金材料砂带磨削表面残余应力形成模型及其实验研究[J]. 表面技术,2020,49(4):30-37.
HUANG Y,LIU SH,HUANG T, et al. Model of residual stress formation on belt grinding surface of titanium alloy and experimental research [J]. Surface Technology, 2020,49(4):30-37.

[5] WANG G C, HAN J J, LIN Y, et al. Investigation on size effect of surface roughness and establishment of prediction model in micro-forming process[J]. Materials Today Communications, 2021(1): 102279.

[6] 杨赫然,何源,孙兴伟,等. 螺杆转子砂带磨削装置开发及材料去除率预测[J]. 中国机械工程,2021,32(17):2055-2062.
YANG H R,HE Y,SUN X W, et al. Development of belt grinding device for screw rotor and research on thepredictionof material removal rate [J]. China Mechanical Engineering, 2021,32(17):2055-2062.

[7] 王奕首,吴迪恒,朱凌,等. 滑油磨粒在线传感技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3):73-83.
WANG Y SH, WU D H, ZHU L, et al. Progress on on-line sensing technology for wear debris in lubricant[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3):73-83.

[8] KONG D D, ZHU J J, DUAN C Q. Surface roughness prediction using kernel locality preserving projection and Bayesian linear regression[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2021,152(2):1-24.

[9] PRITIMA D, DHINAKARAN V, STALIN B. Surface roughness prediction and parametric optimization of shot blasting of Al7068 using RSM[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 988:012100.

[10] FENG Y X, HU F C, LU Y T. Surface roughness prediction in ultrasonic vibration-assisted milling[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,2020,14(4):1-14.

[11] ZHU C M,GU P,WU Y Y. Surface roughness prediction model of SiCp/Al composite in grinding [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019,

155:98-109.

[12] 李伦,李淑娟,汤奥斐,等. 金刚石线锯横向超声振动切割 SiC 单晶表面粗糙度预测[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19):204-212.
LI L,LI SH J,TANG AO F, et al. Prediction of surface roughness of SiC single crystal cut by transverse ultrasonic vibration with diamond wire saw [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52 (19): 204-212.

[13] 刘国梁,余建波. 基于知识深度置信网络的加工粗糙度预测[J]. 机械工程学报,2019,55(20):94-106.
LIU G L, YU J B. Prediction of machining roughness based on knowledge depth confidence network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (20): 94-106.

[14] 李聪波,龙云,崔佳斌,等. 基于多源异构数据的数控铣削表面粗糙度预测方法[J]. 中国机械工程,2022, 33(3):318-328.
LI C B,LONG Y,CUI J B, et al. Prediction method of surface roughness in NC Milling Based on multi-source heterogeneous data [J]. China Mechanical Engineering, 2022,33(3):318-328.

[15] 张广鹏,任利娟,王启文. 基于图像信息的砂带磨削材料去除率预测模型[J]. 仪器仪表学报,2019,40(12): 127-134.
ZHANG G P, REN L J, WANG Q W, Image-based prediction model for material removal rate of abrasive belt grinding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12): 127-134.

[16] 张彤,刘小君,董磊,等. 三维表面形貌的逾渗特性表征[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):2933-2942.
ZHANG T, LIU X J, DONG L, et al. Percolation characterization of three-dimensional surface topography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(12): 2933-2942.

[17] BERAT B, AYDIN Ş. ANN surface roughness prediction of AZ91D magnesium alloys in the turning process[J]. Materials Testing,2017,59(10):916-920.

[18] 王文玺,李建勇,樊文刚,等. 砂带三维表面形貌特征量化评价方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016,44(12):14-22.
WANG W X, LI J Y, FAN W G, et al. Quantitative evaluation method for 3D surface topography of abrasive belt[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016,44(12):14-22.

[19] 郎献军,何玉辉,唐进元,等. 基于磨粒突出高度为瑞利分布的磨削力模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3386-3391.
LANG X J,HE Y H,TANG J Y, et al. Grinding force model based on prominent height of abrasive submitted to Rayleigh distribution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (10): 3386-3391.

[20] 刘博文. 砂带磨损仿真分析及对材料去除影响研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
LIU B W. Simulation analysis of abrasive belt wear and study about the influence of material removal [D]. Changchun:Jilin University,2020.

[21] 魏和平. 整体叶盘叶片内外弧型面砂带磨削技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
WEI H P. Research on abrasive belt grinding of blisk blade inner and outer profile[D]. Chongqing: Chongqing University,2014.

作者简介

董浩生,于 2019 年在沈阳工业大学获得学士学位,现为沈阳工业大学硕士在读,主要研究方向为复杂曲面磨削。
E-mail:donghaosheng0202. 163. com

Dong Haosheng received a B. Sc. degree from Shenyang University of technology in 2019 and is now a M. Sc. candidate of Shenyang University of technology. His main research interest includes complex surface grinding.

杨赫然(通信作者),分别于 2006 年、2008 年和 2012 年在吉林大学获得学士、硕士和博士学位,现为沈阳工业大学机械工程学院副教授,主要研究方向为复杂曲面数字化制造技术与装备。
E-mail: yangheran@ sut. edu. cn

Yang Heran (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Jilin University in 2006, 2008 and 2012, respectively. He is now an associate professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include digital manufacturing technology and equipment of complex surface.