

# 非圆等距型面轮廓 $X-C$ 轴联动高速磨削试验

刘 伟<sup>1</sup> 石新宇<sup>1</sup> 袁厚才<sup>1</sup> 何新维<sup>2</sup> 刘 涛<sup>1</sup>

(1 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭 411201)

(2 中联重科工程起重机公司,长沙 410000)

**文 摘** 针对非圆等距型面轮廓磨削加工存在表面质量差的问题,建立基于恒磨除率 $X-C$ 轴联动磨削理论模型。选用陶瓷CBN砂轮进行三段弧非圆等距型面轮廓的高速磨削正交试验,探究砂轮线速度、工件速度和磨削深度对磨削比能、切向磨削力、磨削温度、表面粗糙度的影响规律。分析表明,砂轮线速度对切向磨削力、表面形貌的影响最大,磨削深度对磨削比能、磨削温度、表面粗糙度的影响最大。进行表面形貌观测未探测到明显的磨削烧伤区域,证明恒磨除率 $X-C$ 轴联动磨削方式可用于非圆等距型面轮廓磨削加工。

**关键词** 非圆等距型面轮廓, $X-C$ 轴联动,高速磨削,恒磨除率

中图分类号: TG580

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.013

## High-speed Grinding of $X-C$ linkage for non-circular isometric profile

LIU Wei<sup>1</sup> SHI Xinyu<sup>1</sup> YUAN Houcai<sup>1</sup> HE Xinwei<sup>2</sup> LIU Tao<sup>1</sup>

(1 Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 Mobile Crane Branch Company of Zoomlion Heavy Industry Science & Technology Co. Ltd., Changsha 410000)

**Abstract** In order to solve the problem of poor surface quality in the non-circular isometric profile grinding, a theoretical model of  $X-C$  linkage grinding was established based on the constant removal rate. The ceramic CBN grinding wheel was used in the orthogonal experiments for high speed grinding of the three-arc non-circular isometric profile. The influences of the grinding wheel velocity, workpiece speed and grinding depth on the grinding specific energy, tangential grinding force, grinding temperature and surface roughness were investigated. The analysis shows that the grinding wheel velocity has the greatest influence on the tangential grinding force and surface topography, and the grinding depth has the greatest influence on the grinding specific energy, grinding temperature and surface roughness. No obvious grinding burn is detected by surface topography observation, which is proved that the method of  $X-C$  linkage grinding with the constant removal rate can be used for the non-circular isometric profile grinding.

**Key words** Non-circular isometric profile,  $X-C$  linkage, High-speed grinding, Constant removal rate

### 0 引言

随着机械部件结构设计不断地优化,对机械运转性能、精度、扭矩、转速提出了更高的要求。传统轴类部件的固定采用键联接的形式,但键联接存在应力集中、承载能力弱等缺点。非圆等距型面轮廓拆装简单,不存在键装夹所需的凹槽和锐边,减小了应力集中现象的产生,可以延缓零件的失效期限,具有良好的应用前景<sup>[1]</sup>。

磨削作为非圆等距型面轮廓成型加工的最后一道工序,加工效果决定了零件的成型质量<sup>[2]</sup>。型面无

键联接件的主要失效形式表现为接触疲劳失效,型面轮廓加工质量对其使用寿命有重大影响<sup>[3]</sup>。对于非圆等距型面零件,传统的磨削工艺复杂、需要专门化的磨床来实现,只能加工单一非圆廓形工件,通用性差,而且存在较大的加工误差,加工过程中工件表面形成波纹甚至烧伤,从而限制了该类型面零件的进一步发展<sup>[4]</sup>。

随着数控技术的不断提升,大大降低了非圆等距型面等非圆轮廓轴类零件的加工难度。非圆轮廓轴类零件数控 $X-C$ 轴联动高速磨削技术在保证加工

收稿日期:2021-03-11

基金项目:湖南省教育厅科学研究(20A202),湖南省自然科学基金(2020JJ5178),湖南省电磁装备设计与制造重点实验开放基金(DC201901)

第一作者简介:刘伟,1986年出生,博士,副教授,主要从事难加工材料高效精密智能磨削研究工作。E-mail:lw1986tiger@163.com

效率的同时也可获得良好的成型质量,其原理是工件绕C轴做自转运动,砂轮则沿着X轴进行水平往复运动,使得砂轮与工件时刻处于相切状态<sup>[5]</sup>。该技术有效地解决了非圆轮廓类零件加工精度低、成型质量差等问题<sup>[6]</sup>。关于X-C轴联动高速磨削技术,国内外进行了许多相关的研究。

Huang<sup>[7]</sup>采用粒子群算法对砂轮架、工件旋转轴伺服系统的输入信号进行优化处理,降低了伺服轴的速度变化幅度,以提高加工精度。杨寿智<sup>[8]</sup>计算出X轴伺服系统最大的响应能力,并反求得工件主轴最优的转速值,降低因伺服系统响应滞后造成的轮廓误差。Wang<sup>[9]</sup>针对非圆零件两轴数控伺服机构存在不同程度的滞后问题,建立了基于同步滞后控制策略的轮廓误差模型,从而减小零件轮廓的误差。邓朝晖<sup>[10]</sup>研究了工艺参数对凸轮磨削温度的影响规律。沈南燕<sup>[11]</sup>研究了磨削工艺参数对于非圆轮廓类零件磨削过程中功率消耗的影响规律。

非圆轮廓类零件的磨削研究主要是对磨削过程中工件主轴转速的优化调整,以实现较高的轮廓精度,但对其磨削表面质量缺少深入研究。非圆等距型面轮廓加工性能较差,工件表层因磨削力、磨削温度耦合作用产生表面形貌缺陷,影响其使用性能。本文针对非圆等距型面轮廓开展高速磨削试验研究,探究砂轮线速度、工件速度、磨削深度对磨削比能、切向磨削力、磨削温度、表面粗糙度的影响规律,并对工件表面形貌进行观测,采用极差分析法对试验结果进行分析,为实现非圆等距型面高效精密磨削提供理论依据。

## 1 非圆等距型面轮廓恒磨除率磨削数学模型

### 1.1 非圆等距型面轮廓方程

非圆等距型面轮廓是指轮廓曲线上任意两平行切线之间的距离都相等的型面<sup>[12]</sup>。三弧段非圆等距型面作为典型的型面轮廓,由三段大圆弧和三段小圆弧构成,具有轴对称性,轮廓如图1所示。为了便于表述,将三弧段非圆等距型面简称为等距型面。 $r_f$ 表示分度圆半径, $r_d$ 为大圆弧段 $S_2S_3$ 的半径, $r_x$ 为小圆弧段 $S_1S_2$ 的半径, $r_j$ 为基圆半径。 $A、B、C$ 是分度圆上对应等距型面三个凸起点 $D、F、G$ 的三点, $H、I、J$ 为等距型面上的基圆点, $\alpha_x$ 表示小圆弧段 $S_1S_2$ 对应的中心角。

设 $m$ 表示分度圆半径与小圆弧段半径的比值,即:

$$m = r_f/r_x \quad (1)$$

小圆弧段对应的中心角 $\alpha_x$ 可由式(2)求解:

$$\alpha_x = 2\arctan\left(\frac{1}{2m + \sqrt{3}}\right) \quad (2)$$

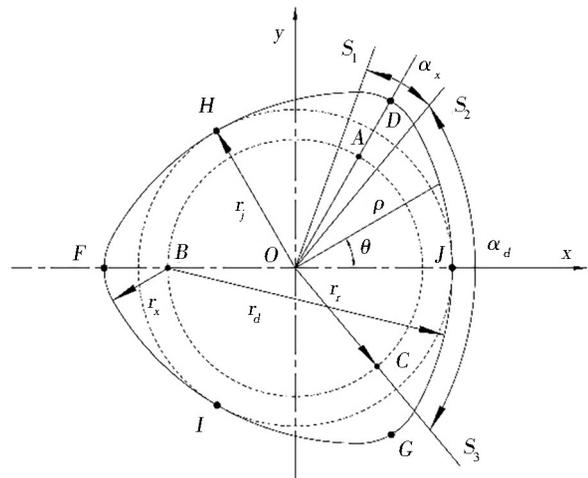


图1 等距型面轮廓

Fig. 1 Isometric profile

对于小圆弧段 $S_1S_2$ ,轮廓方程为:

$$\rho = r_x \sqrt{1 - [m \cos(\theta + 30^\circ)]^2} + m \sin(\theta + 30^\circ) \quad (3)$$

$$(60^\circ - 0.5\alpha_x \leq \theta \leq 60^\circ + 0.5\alpha_x)$$

对于大圆弧段 $S_2S_3$ ,轮廓方程为:

$$\rho = r_x \left\{ \sqrt{(1.732m + 1)^2 - (m \sin \theta)^2} - m \cos \theta \right\} \quad (4)$$

$$(-60^\circ + 0.5\alpha_x \leq \theta \leq 60^\circ - 0.5\alpha_x)$$

### 1.2 X-C联动磨削数学模型

图2为X-C轴联动磨削示意图。定义等距型面轮廓曲线的表达式为 $\rho = \rho(\theta)$ ,绕O点逆时针转动,以基圆点J为磨削起始点,点P为任意当前磨削点,磨削点转过的角度为 $\angle JOP = \theta$ ,等距型面实际转角为 $\angle JOO_2 = \alpha$ ,基圆点处的转速为 $\omega_0$ ,砂轮中心为 $O_2$ ,砂轮半径为 $r_s$ ,砂轮绕 $O_2$ 旋转并在水平方向沿x轴移动, $M$ 为等距型面的速度瞬心。

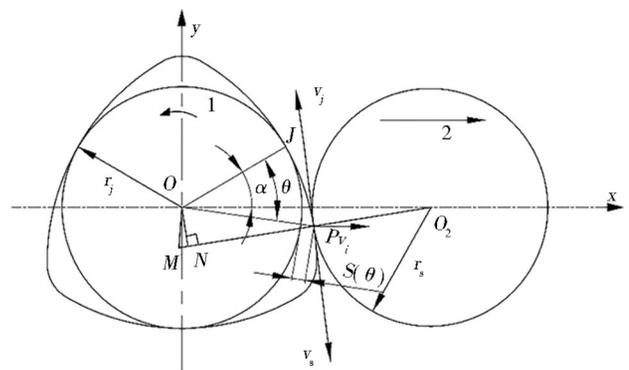


图2 等距型面轮廓X-C轴联动磨削示意图

Fig. 2 X-C linkage grinding for isometric profile

P点为砂轮与工件的接触点,有:

$$\overline{OP} = \rho(\theta) = r_j + S(\theta) \quad (5)$$

$$OM = dS(\theta)/d\theta \quad (6)$$

$$\varphi = \angle OPN = \arctan(\overline{OM}/\overline{OP}) \quad (7)$$

在三角形OPN与 $OO_2N$ 中:

$$\overline{ON} = \overline{OP} \sin \phi \quad (8)$$

$$\overline{O_2N} = \overline{PN} + \overline{PO_2} = \overline{OP} \cos \phi + r_s \quad (9)$$

$$\delta = \angle OO_2P = \arctan(\overline{ON} / \overline{O_2N}) \quad (10)$$

从而可得到:

$$\alpha = \theta - \angle POO_2 = \theta - (\phi - \delta) \quad (11)$$

$$\overline{OO_2} = \sqrt{\overline{OP}^2 + r_s^2 - 2\overline{OP} \cdot r_s \cdot \cos(\pi - \phi)} \quad (12)$$

$$X(\theta) = \overline{OO_2} - r_j - r_s \quad (13)$$

即得到其X-C轴联动的运动模型:

$$\begin{cases} X(\theta) = \sqrt{\overline{OP}^2 + r_s^2 - 2\overline{OP} \cdot r_s \cdot \cos(\pi - \phi)} - r_j - r_s \\ C = \alpha = \theta - [\arctan(\frac{\overline{OM}}{\overline{OP}}) - \arctan(\frac{\overline{ON}}{\overline{O_2N}})] \end{cases} \quad (14)$$

对砂轮位移 $X(\theta)$ 一阶求导,即可计算得到砂轮X轴进给速度。

### 1.3 恒磨除率计算模型

磨除率是指单位时间内磨削弧长、磨削深度和磨削宽度的乘积:

$$Z = \rho(\theta) \cdot \omega \cdot a_p \cdot b \quad (15)$$

式中, $\omega$ 为工件速度, $a_p$ 为磨削深度, $b$ 为磨削宽度。

磨削深度与磨削宽度在磨削前已确定,因此磨除率与单位时间内磨削弧长成线性关系。设磨削点单位时间转过角度 $d\theta$ ,沿轮廓轨迹走过的弧长为 $ds$ ,单位时间内磨削弧长为<sup>[13]</sup>:

$$ds = \frac{d\theta}{dt} \sqrt{\rho^2(\theta) + (\frac{d\rho(\theta)}{d\theta})^2} \quad (16)$$

已知等距型面的磨削深度与宽度均为定值,设基圆点处的磨削弧长为 $k$ ,可知 $k=r_j\omega_0$ 。令其余磨削点位置处单位时间内磨削弧长也为 $k$ ,即可实现等距型面恒磨除率磨削:

$$k = \omega \sqrt{\rho^2(\theta) + (\frac{d\rho(\theta)}{d\theta})^2} \quad (17)$$

从而可得工件主轴转速:

$$\omega = \frac{r_j\omega_0}{\sqrt{\rho^2(\theta) + (\frac{d\rho(\theta)}{d\theta})^2}} \quad (18)$$

## 2 磨削试验

### 2.1 磨削试件与试验设备

磨削所用试件为JT-0.4型矿用提升绞车减速器中的非圆等距型面轴毛坯,如图3所示。截面基圆半径值为26.87 mm,分度圆半径值为22.39 mm,小圆弧段半径值为10.61 mm,大圆弧段半径值为49.39 mm,型面轮廓端长度为75 mm,工件总长为200 mm。

选用CNC8325数控复合磨床进行非圆等距型面宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第4期



图3 三弧段非圆等距型面轴

Fig. 3 Three-arc non-circular isometric profile shaft

轮廓X-C轴联动高速磨削试验,图4为磨削试验系统。砂轮选择陶瓷结合剂CBN砂轮,砂轮浓度为175,粒度为120#,直径与宽度分别为400 mm与25 mm,选择金刚石滚轮对其进行修整。选用WT300E系列数字功率仪在线采集磨床功率变化数据,红外热成像仪FLIR-SC325实时测量工件的磨削温度,采用粗糙度测量仪Marsurf M300测量轮廓表面粗糙度,采用超景深三维显微系统VHX-500FE检测轮廓表面形貌。

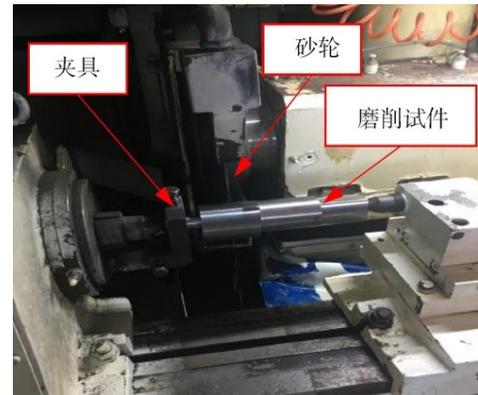


图4 高速磨削试验系统

Fig. 4 High speed grinding experiment system

### 2.2 试验方案

采用高速切入式逆磨,试验考察的主要工艺参数分别是砂轮线速度 $v_s$ 、工件速度 $v_w$ 和磨削深度 $a_p$ 。为了提高试验效率,并保证试验结果的准确性,设计了三因素四水平的磨削正交试验方案,采用干磨方式以便于测量磨削温度。试验中工艺参数取值如表1所示。

表1 试验参数表

Tab. 1 Experiment parameters

因素	参数/单位	水平			
		1	2	3	4
A	$v_s/m \cdot s^{-1}$	60	80	100	120
B	$v_w/r \cdot \min^{-1}$	30	50	70	90
C	$a_p/\mu m$	10	20	30	40

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 正交试验结果

为了确保非圆等距型面轮廓高速磨削试验结果数据的准确性,减少偶然误差,故将每组试验重复五次,试验值取平均值。表2为每组试验对应的磨削比能、切向磨削力、磨削温度、表面粗糙度的试验值。

磨削比能表征磨床加工时,去除单位体积材料

所消耗的能量<sup>[14]</sup>:

$$SEG = \frac{P_{MR}}{Z} = \frac{0.833(P_T - P_E)}{Z} \quad (19)$$

式中: $P_{MR}$ 为磨削时消耗功率, $P_E$ 为机床空载功率, $P_T$ 为机床总功率。

切向磨削力的计算模型如下<sup>[15]</sup>:

$$F_t = \frac{P_{MR}}{v_s} = \frac{0.833(P_T - P_E)}{v_s} \quad (20)$$

表2 试验方案与结果

Tab. 2 Experiment scheme and results

编号	因素			磨削比能/ $J \cdot mm^{-3}$	切向磨削力/N	磨削温度/ $^{\circ}C$	表面粗糙度/ $\mu m$
	A	B	C				
1	1	1	1	58.85	16.50	361.2	1.81
2	1	2	2	20.41	25.54	764.6	2.33
3	1	3	3	19.95	29.56	570.3	2.62
4	1	4	4	8.52	40.90	760.8	3.24
5	2	1	2	54.21	16.41	620.5	2.33
6	2	2	1	14.19	20.98	860.4	2.19
7	2	3	4	13.47	31.23	654.9	2.71
8	2	4	3	32.51	19.88	366.5	2.80
9	3	1	3	29.56	17.91	770.9	2.20
10	3	2	4	68.20	16.43	367.1	2.65
11	3	3	1	10.71	23.57	827.3	2.12
12	3	4	2	17.57	25.86	600.2	2.69
13	4	1	4	25.36	14.92	910.7	2.74
14	4	2	3	31.27	14.22	560.4	1.99
15	4	3	2	46.62	13.67	447.3	1.67
16	4	4	1	11.55	15.93	757.4	1.85

#### 3.2 磨削比能

由图5可知,磨削比能随砂轮线速度增大而增大,但达到一定值之后,磨削比能又会呈现下降的趋势。因为在砂轮线速度较小阶段,随着速度的增加,导致单颗磨粒的切削深度减小,从而使滑擦和耕犁阶段的能耗增加,但该阶段不会发生材料去除,由此造成了磨削比能的增加;当砂轮线速度继续增大时,高速度的磨粒会使得材料变形体积减小,研究证明超高速的砂轮磨粒作用只产生极微小的磨屑,消耗的功率也很小,所以磨削比能减小<sup>[16]</sup>。当工件速度或磨削深度增加,单颗磨粒切削深度会增大,使滑擦和耕犁在三个磨削阶段中所占的比例减小,消耗的功率减小,磨削比能降低。

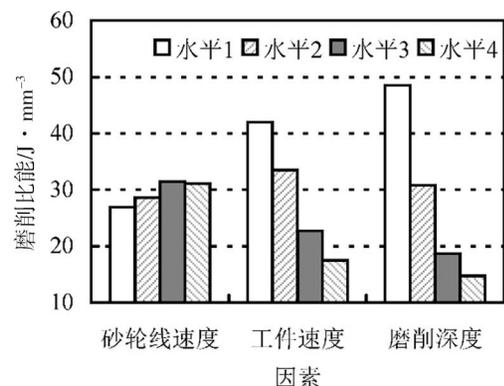


图5 磨削比能分析图

Fig. 5 Analysis for grinding specific energy

#### 3.3 切向磨削力

从图6可知,切向磨削力随砂轮线速度增大而降低,随工件速度、磨削深度增大而增大。砂轮线速度

的极差值最大,表明其对切向磨削力的作用最显著。因为砂轮线速度增大导致磨粒最大未变形切屑厚度减小,切向磨削力也随之减小;而工件速度、磨削深度的增大,使得磨粒最大未变形切屑厚度和材料去除率增大,导致切向磨削力也随之增大。

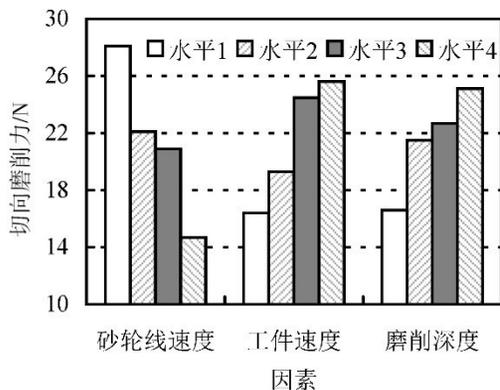


图6 切向磨削力分析图  
Fig. 6 Analysis for tangential grinding force

### 3.4 磨削温度

从图7可知,非圆等距型面轮廓的磨削温度随砂轮线速度、磨削深度的增大而增大,其中,磨削深度对磨削温度的影响最大。砂轮线速度的增大,消耗的机床功率会增加,但材料去除率并没有发生很大波动,以致更多的能量以热量的形式传入工件。而磨削深度的增大,使得磨削弧长增大,材料去除率增加将导致更多的热能传入磨削区,磨削散热效果变差,也会使得磨削温度上升。工件速度提高,砂轮与工件之间的接触时间减少,传递给工件的热能减小,使磨削温度呈现下降的趋势。

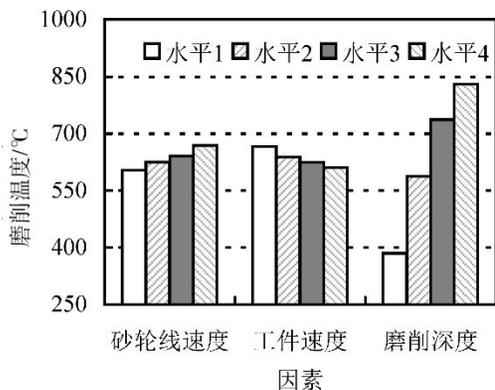


图7 磨削温度分析图  
Fig. 7 Analysis for grinding temperature range

### 3.5 表面粗糙度

从图8可知,表面粗糙度随砂轮线速度增大而降低。砂轮线速度增大,磨粒最大未变形切屑厚度变小、材料边缘隆起减小,使得表面粗糙度值也随之减小。工件速度和磨削深度的增大使材料去除率变大,导致磨削过程中的磨削力增加,工件表面塑性变

形加剧,导致磨削后工件表面粗糙度增大<sup>[17]</sup>。

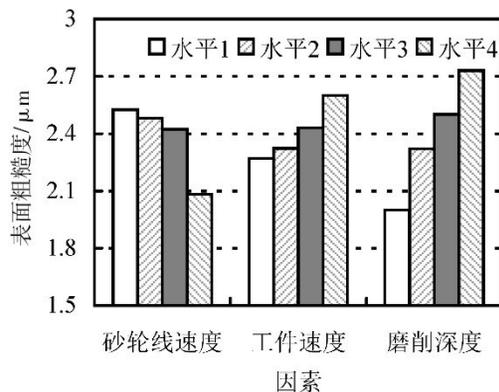


图8 表面粗糙度分析图  
Fig. 8 Analysis for surface roughness

### 3.6 表面形貌

图9为4组轮廓典型表面形貌图。第4组试验的轮廓表面划痕明显,表面粗糙度值最大,达到 $3.24 \mu\text{m}$ ,且其磨削比能最小、切向磨削力最大。第10组试验的轮廓表面塑形隆起较小,表面质量较好,其磨削比能最大。第13组试验的轮廓小圆弧段有浅褐色斑纹;由于该区域曲率变化大,砂轮架的跟踪速度变化较快,磨削温度值最高,存在磨削烧伤的现象。第15组试验的轮廓表面无烧伤痕迹,划痕较少,其切向磨削力与表面粗糙度值最小,分别为 $13.67 \text{ N}$ 、 $1.67 \mu\text{m}$ 。对于非圆等距型面轮廓X-C轴联动高速磨削,砂轮线速度是影响轮廓表面形貌的主要因素,且呈现正相关性。

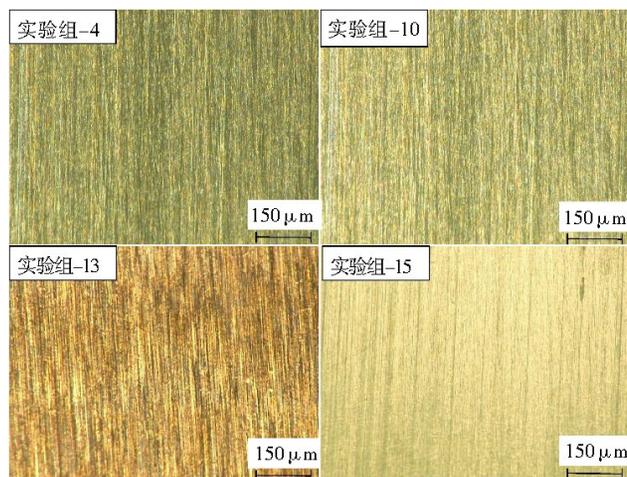


图9 表面形貌图  
Fig. 9 Surface topography

## 4 结论

(1) 基于X-C轴联动恒磨除率模型,采用极差分析法直观分析高速磨削工艺参数对非圆等距型面轮廓磨削结果的影响。其中砂轮线速度对切向磨削力、表面形貌的影响最大,分别呈现负相关性、正相关性;磨削深度对磨削比能、磨削温度、表面粗糙度的影响最大,分别呈现负相关性、正相关性、正相关性。

(2) 检测磨削后的工件轮廓表面形貌,未观测到明显烧伤区域;仅当砂轮线速度较高,且磨削深度较大的情况下,轮廓小圆弧段表面存在局部烧伤。证明采用恒磨除率 $X-C$ 轴联动磨削的方式,能减少甚至避免产生磨削烧伤等表面缺陷,可用于非圆等距型面轮廓磨削加工。

(3) 材料去除率的降低可明显提高非圆等距型面轮廓表面质量。基于极差分析结果,在试验设定工艺参数范围下,选取最大砂轮线速度和工件速度,以及最低的磨削深度,能够获得综合较优的表面质量与机床能耗。

### 参考文献

[1] 杜新宇. 型面无键联接及制造[M]. 长沙:华中科技大学出版社, 2016.

DU X Y. Keyless Connection and manufacturing of profile [M]. Changsha: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.

[2] DENG H, XU Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 4546-4569.

[3] LI W, YAN Q. Failure analysis of an isometric polygonal shaft fracture [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 58: 192-205.

[4] 陶寄明. 机械连接设计示例与分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.

TAO J M. Mechanical connection design example and analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[5] 周志雄, 罗红平, 宓海青, 等. 切点跟踪磨削法磨削曲轴零件的若干问题探讨[J]. 中国机械工程, 2002, 13(23): 2004-2006.

ZHOU Z X, LUO H P, MI H Q, et al. Discussion on some problems of grinding crankshaft parts by tap-point tracking grinding method[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(23): 2004-2006.

[6] 蔡力钢, 彭宝营, 韩秋实, 等. 一种新的非圆曲面零件切点跟踪磨削加工模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 2445-2452.

CAI L G, PENG B Y, HAN Q S, et al. New non-circular surface parts tangential point tracing grinding model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(10): 2445-2452.

[7] HUANG Y, MING W Y, GUO J W, et al. High-speed CNC grinding process optimization of non-circular rotary parts based on particle swarm optimization[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 528: 237-246.

[8] 杨寿智, 邓朝晖, 吴桂云, 等. 凸轮轴数控磨削工件主轴转速优化建模与实验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(5): 652-657.

YANG S Z, DENG Z H, WU G Y, et al. Modeling and experimental study of workpiece spindle speed optimization in NC

camshaft grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(5): 652-657.

[9] WANG J, SUI Z, TIAN Y T, et al. A speed optimization algorithm based on the contour error model of lag synchronization for CNC cam grinding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8): 1421-1432.

[10] 邓朝晖, 刘涛, 廖礼鹏. 凸轮轴高速磨削温度的实验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2717-2722.

DENG Z H, LIU T, LIAO L P. Experimental study on camshaft high speed grinding temperature[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(20): 2717-2722.

[11] 沈南燕, 王为东, 李静, 等. 非圆磨削加工过程中磨削能耗建模与分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 208-216.

SHEN N Y, WANG W D, LI J, et al. Modeling and analysis of grinding energy consumption in non-circular grinding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 208-216.

[12] 李映平. 三边等距圆弧型面联接的研究[J]. 机械科学与技术, 1999, 7(2): 6-8.

LI Y P. Study on the connection of tri-sided equal distance circular arc shape [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 1999, 7(2): 6-8.

[13] 蔡力钢, 彭宝营, 韩秋实, 等. 非圆曲面零件 $X-C$ 恒磨除率变速磨削研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(12): 3155-3161.

CAI L G, PENG B Y, HAN Q S, et al. Research on  $X-C$  constant grinding rate variable speed grinding for noncircular surface parts[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(12): 3355-3161.

[14] 李涛, 孔露露, 张洪潮, 等. 典型切削机床能耗模型的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 102-111.

LI T, KONG L L, ZHANG H C, et al. Research status and development trend of typical cutting machine tool energy consumption model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 102-111.

[15] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京:北京电子工业出版社, 2011.

REN J X, HUA D A. Grinding principle[M]. Beijing: Beijing Electronic Industry Press, 2011.

[16] 赵恒华, 孙顺利, 高兴军, 等. 超高速磨削的比磨削能研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5): 453-456.

ZHAO H H, SUN S L, GAO X J, et al. Research on specific grinding energy of ultra-high speed grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(5): 453-456.

[17] 俞兴华. 陶瓷结合剂CBN砂轮高速磨削钛合金(TC4)的实验研究[D]. 泉州:华侨大学, 2011.

YU X H. Experimental study on high speed grinding of titanium alloy (TC4) with ceramic bonded CBN wheel [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2011.