

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.05.016

# 氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度研究

王贺<sup>1</sup>, 谢飞<sup>2</sup>(1. 金肯职业技术学院, 江苏 南京 211156;  
2. 南京迈得特光学有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**通过单因素试验研究磨削深度、工件进给速度、砂轮速度以及单次横向进给量对氮化硅陶瓷型套端面磨削表面质量的影响。利用超景深仪器观测加工表面形貌,并进一步利用粗糙度测量仪对磨削表面粗糙度进行测量,获得不同磨削参数下表面粗糙度为0.218 6~0.456 3  $\mu\text{m}$ 的氮化硅陶瓷型套端面。试验结果表明:提高砂轮速度可以有效改善加工表面质量,增加磨削深度、增大进给速度都将使磨削表面粗糙度值增大,单次横向进给量变大会导致表面粗糙度略有增大。基于经验公式建立氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度预测模型,为其磨削加工参数的合理确定提供了参考依据。

**关键词:**氮化硅陶瓷;型套;端面磨削;表面质量;预测模型

**中图分类号:**TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)05-0077-05

## Study on Surface Roughness of Silicon Nitride Ceramic Shape Sleeve in End Surface Grinding

WANG He<sup>1</sup>, XIE Fei<sup>2</sup>

(1. Jinken Vocational and Technical College, Nanjing 211156, China; 2. MDT-Optics Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:**The influence of grinding depth, workpiece feed rate, grinding wheel speed and single transverse feed rate on the surface quality of silicon nitride ceramic shape sleeve in end surface grinding was studied by single factor test. The ultra-depth instrument was used to observe the machined surface micro-morphology, the roughness measurement instrument was further adopted to measure the grinding surface roughness, and the values of surface roughness of 0.218 6 to 0.456 3  $\mu\text{m}$  were obtained in grinding end surface of silicon nitride ceramic shape sleeve by different grinding parameters. The results show that increasing the grinding wheel speed can effectively improve the quality of the machined surface. Increasing the grinding depth and feed speed will increase the surface roughness value of the grinding surface. The increase of single transverse feed will lead to a slight increase in the surface roughness. A prediction model for the surface roughness of the silicon nitride ceramic shape sleeve in end surface grinding is established based on the empirical formula, which provides a reference basis for the reasonable determination of its grinding parameters.

**Keywords:**silicon nitride ceramics;shape sleeve;end surface grinding;surface quality;prediction model

## 0 引言

透镜按照面型可分为球面、非球面和其他异形面3种类型。非球面透镜不仅能够消除成像时边缘失真现象,还可以减少镜头中镜片的使用数量,降低镜头的体积和质量。玻璃非球面镜片可以获得较高的精度,且使用寿命长,从而得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。目前玻璃非球面镜片以模压加工方式为主,模压成型的模具中需要一个起定位支撑作用的型套,用以确定模压位置精度和成型质量。氮化硅工程陶瓷具有高耐磨性、耐腐蚀、

低密度以及良好的热稳定性等优良特性,是一种较好的型套用材料<sup>[4]</sup>。然而,氮化硅陶瓷型套材料属于难加工材料,常采用近净成形烧结,并以金刚石砂轮进行磨削加工为主,获得所需加工表面质量。

在探究氮化硅陶瓷材料磨削后加工表面质量方面,学者们进行了大量相关研究。吴玉厚等<sup>[5-8]</sup>通过实验与仿真的方法研究了不同磨削参数下的磨削热特性以及磨削力的变化趋势,在此基础上讨论了磨削温度对表面质量的影响,探究了磨削力对表面粗糙度与亚表面损伤的影响,并

**基金项目:**金肯职业技术学院校级重点科研项目(JKKY202201Z)

**第一作者简介:**王贺(1988—),女,黑龙江鹤岗人,讲师,硕士,研究方向为先进制造技术与设备,455862307@qq.com。

进一步利用经验公式建立了各磨削参数项的指数,假定其为相同值的氮化硅陶瓷磨削表面粗糙度模型,在一定程度上能够较准确地预测表面粗糙度。李霞<sup>[9]</sup>利用实验方法分析了不同磨削温度下表面裂纹扩展情况,研究得到了磨削温度对裂纹扩展深度的影响。赵玲刚<sup>[10]</sup>基于分子动力学模型研究了磨削参数对磨削温度的影响,并对磨削表面烧伤情况进行了分析。伊士成<sup>[11]</sup>基于超声辅助磨削方法,探究了超声振动对氮化硅陶瓷材料脆塑转变临界切削力、临界深度和材料去除方式的影响,进一步研究得到了工艺参数与表面粗糙度和损伤深度的关系。郑迪昊等<sup>[12]</sup>利用激光诱导微沟槽辅助磨削加工方法,有效降低了氮化硅陶瓷的磨削力与表面粗糙度值,实现了表面质量的提高。刘伟等<sup>[13-14]</sup>利用单颗磨粒进行了磨削氮化硅陶瓷的仿真与试验研究,分析了划痕形貌、切削力等随磨削参数的变化规律,得到切削力随砂轮速度的增加而减小,随切削深度的增加而增大,在此基础上基于响应曲面法对砂轮速度、工件进给速度、磨削深度进行了多目标优化,得到了最优组合工艺参数。

在玻璃非球面透镜模压成型中,氮化硅陶瓷型套端面表面质量对成型精度有较大影响,小的表面粗糙度值能够有效提高配合表面平稳性,从而增加其使用性能<sup>[15]</sup>。目前,尽管一些研究关注了氮化硅陶瓷材料的磨削工艺与特性,但对于氮化硅陶瓷型套的环形端面磨削加工表面质量鲜有报道,仅有李颂华等<sup>[16]</sup>通过双端面磨削实验分析了氮化硅陶瓷轴承套圈端面磨削表面质量,得到了砂轮进给速度和砂轮转速对表面粗糙度的影响关系。本文通过单因素试验分析了磨削深度、进给速度、砂轮速度以及单次横向进给量对氮化硅陶瓷型套端面磨削表面质量的影响,在观察表面形貌、测量分析表面粗糙度的基础上,建立了基于经验公式的表面粗糙度预测模型。

## 1 氮化硅陶瓷型套端面磨削试验

### 1.1 氮化硅陶瓷型套

以玻璃非球面模压用氮化硅陶瓷型套为研究对象,对其环形端面进行磨削试验。氮化硅陶瓷型套外径为 72 mm,内径为 65 mm,高度为 16 mm,采用热等静压烧结,其材料性能如表 1 所示,加工表面形状为环形。

表 1 氮化硅陶瓷型套材料性能

性能参数	数值
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	3.24
热导率/(W/m·K)	31
比热容/(J/kg·K)	710
弯曲强度/MPa	890
线膨胀系数/(1/K)	3.2×10 <sup>-6</sup>
弹性模量/GPa	305
断裂韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )	6.5

### 1.2 加工设备及夹具

型套端面磨削属于平面磨削,故利用 BLOHM Orbit 36 CNC 精密平面成形磨床对其端面进行精密磨削加工,如图 1 所示。试验所用金刚石砂轮规格与型号及材料性能参数如表 2 所示。

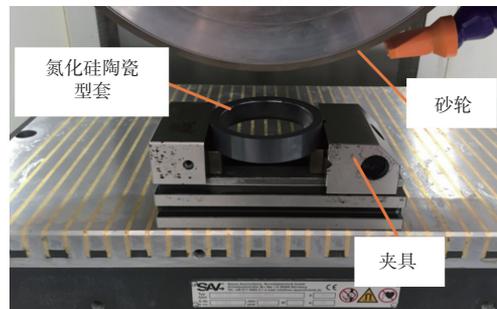


图 1 氮化硅陶瓷型套端面精密磨削

表 2 试验用金刚石砂轮规格与型号及材料性能

项目	性能参数	项目	性能参数
砂轮型号	K1A1-300-20-5	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	3.5×10 <sup>3</sup>
孔径及粒度	φ127×D91	弹性模量/GPa	9.6×10 <sup>2</sup>
结合剂与浓度	K+888NY/C75	泊松比	0.2
基体材料	A	HV 硬度/(kg/mm <sup>2</sup> )	1.1×10 <sup>4</sup>
砂轮形状	平面砂轮	抗压强度/MPa	2.5×10 <sup>3</sup>

### 1.3 磨削表面粗糙度与形貌的测量

如图 2(a)所示,利用 Taylor Hobson S3C 表面轮廓仪对磨削后的表面粗糙度进行测量。为了降低测量误差影响,在圆周方向上随机选取 4 处端面进行测量,取平均值进行分析。如图 2(b)所示,利用 VHX-5000 超景深三维显微系统对磨削后的型套端面质量进行观测。

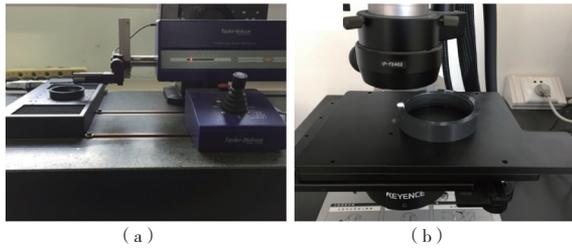


图2 氮化硅陶瓷型套端面测量

### 1.4 磨削试验设计

本文采用单因素实验法对不同磨削深度、工件进给速度、砂轮切削速度以及加工横向进给量进行磨削试验,研究4种磨削参数对氮化硅陶瓷型套端面磨削后表面形貌与表面粗糙度的影响,共进行16组磨削实验,各组实验参数如表3所示。

表3 试验参数设计表

序号	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	进给速度 $v_w/(\text{mm}/\text{min})$	砂轮速度 $v_s/(\text{m}/\text{s})$	横向进给量 $s_w/(\text{mm}/\text{次})$
1—4	1, 3, 4, 5	1 500	50	19
5—8	2	1 000, 2 000, 3 000, 4 000	50	19
9—12	2	1 500	25, 35, 45, 55	19
13—16	2	1 500	50	12, 15, 18, 20

## 2 试验结果与分析

### 2.1 磨削表面形貌分析

氮化硅陶瓷型套端面经过磨削后,利用超景深三维显微镜观察其磨削表面形貌,如图3所示。图3(a)为磨削参数为磨削深度  $2\mu\text{m}$ 、进给速度  $1\,500\text{mm}/\text{min}$ 、砂轮速度  $45\text{m}/\text{s}$ 、单次横向进给量  $19\text{mm}$  时加工表面观测结果;图3(b)为磨削参数为磨削深度  $2\mu\text{m}$ 、进给速度  $1\,500\text{mm}/\text{min}$ 、砂轮速度  $50\text{m}/\text{s}$ 、单次横向进给量  $12\text{mm}$  时加工表面观测结果。

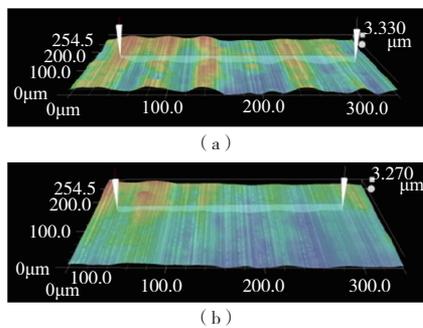


图3 型套端面磨削表面微观形貌

图3中加工表面质量较好,大部分区域表面光滑较平整,且图3(b)加工表面较图3(a)有更好的表面质量,磨粒对表面产生的划痕更浅。从波峰/波谷高度差值来看,图3(a)微观形貌截图最大波峰/波谷高度差值为  $3.33\mu\text{m}$ ,大于图3(b)的  $3.27\mu\text{m}$  值。由此可知,图3(b)的磨削参数组合较图3(a)能够获得更好的磨削表面质量,参数

组合更合理,这也为分析磨削参数对表面粗糙度的影响规律奠定了基础。

### 2.2 磨削表面粗糙度分析

测量获得氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度如图4所示。通过多点测量以平均值作为结果分析,得到加工表面粗糙度随磨削深度、进给速度、砂轮速度及单次横向进给量的变化曲线如图5所示。

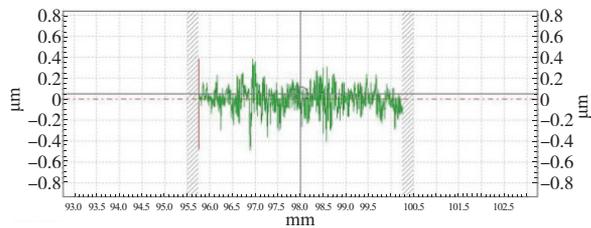


图4 表面粗糙度测量结果

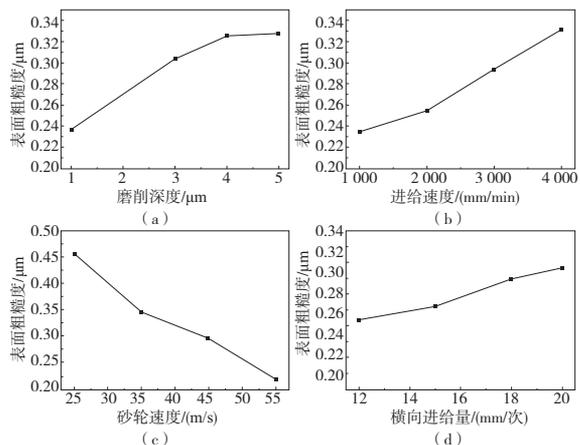


图5 型套端面磨削表面粗糙度

如图 5(a) 所示,当磨削深度增大时,表面粗糙度值呈增加趋势,磨削深度由  $1 \mu\text{m}$  增加到  $5 \mu\text{m}$  时,氮化硅陶瓷型套端面的表面粗糙度由  $0.2367 \mu\text{m}$  增大到  $0.3253 \mu\text{m}$ ,增加了 37.43%。由此可知,加大磨削深度不利于加工表面质量的提升。这是由于磨削深度越大,磨削路径就越长,且在磨削路径上参与磨削的磨粒数越多,增加了磨削阻力,磨削热量亦不能较好地扩散,使磨削温度升高,从而降低了加工表面质量。

如图 5(b) 所示,当工件进给速度增大时,表面粗糙度值呈增大趋势,工件进给速度由  $1000 \text{ mm/min}$  增加到  $4000 \text{ mm/min}$  时,氮化硅陶瓷型套端面的表面粗糙度由  $0.2348 \mu\text{m}$  增大到  $0.3312 \mu\text{m}$ ,增加了 41.06%。由此可知,增大工件进给速度导致加工表面质量的降低。这是因为工件进给速度增大,单颗磨粒与工件的接触弧长变长,增大了最大未变形切屑厚度,使切削路径上未去除材料变多,隆起变高,从而导致表面粗糙度值增大。

如图 5(c) 所示,当砂轮速度增大时,表面粗糙度值呈减小趋势,砂轮速度由  $25 \text{ m/s}$  增大到  $55 \text{ m/s}$  时,氮化硅陶瓷型套端面的表面粗糙度从  $0.4563 \mu\text{m}$  减小到  $0.2186 \mu\text{m}$ ,减小了 52.09%。由此可知,提高砂轮转速可以达到降低表面粗糙度值的效果。这是因为在增加砂轮速度后,单位时间有效参与磨削的磨粒数量增多,使切削路径变短,减小了最大未变形切屑厚度,从而提高了表面质量。

如图 5(d) 所示,当横向进给量增大时,表面粗糙度值略有增大趋势,单次横向进给量由  $12 \text{ mm}$  增加到  $20 \text{ mm}$  时,氮化硅陶瓷型套端面的表面粗糙度从  $0.2436 \mu\text{m}$  增加到  $0.2765 \mu\text{m}$ ,增加了 11.90%。由此可知,增大单次横向进给量将使加工表面粗糙度值有所变大。这是由于试验用砂轮单次最大有效磨削宽度为  $20 \text{ mm}$ ,当单次进给量较小时,有部分磨削表面在两次磨削中重叠,相当于进行了错位二次磨削,而砂轮横截面上不同磨粒颗粒形状尺寸有所差异,这种二次磨削能够削减表面隆起高度,使加工表面获得较小的表面粗糙度值,当单次横向进给量增加时,重叠部分变小,所以加工表面粗糙度值略有增加。进一步分析可知,重复磨削在一定程度上能够改善加工表面质量,但对表面粗糙度的改善影响较小。

从以上试验结果可知,当试验参数为磨削深度  $2 \mu\text{m}$ ,进给速度  $1500 \text{ mm/min}$ ,砂轮速度  $55 \text{ m/s}$ ,单次横向进给量  $19 \text{ mm}$  时,获得了试验最小

表面粗糙度值为  $0.2186 \mu\text{m}$ 。

### 3 基于经验公式的表面粗糙度预测模型

磨削加工表面粗糙度经验模型依据指数变化理论,将各参数的影响认定为是参量的指数关系,并用各参数指数的乘积形式表示。为了对不同磨削参数下加工氮化硅陶瓷型套端面获得的表面粗糙度进行预估,基于经验公式构建氮化硅型套端面磨削表面粗糙度预测模型。经验公式如式(1)所示,以磨削深度、进给速度、砂轮速度与横向进给量 4 个磨削参量作为因变量,研究磨削参数对表面粗糙度的影响以及预测表面粗糙度优化氮化硅陶瓷型套端面磨削参数。

$$R = k \cdot a_p^{b_1} \cdot v_w^{b_2} \cdot v_s^{b_3} \cdot s_w^{b_4} \quad (1)$$

式中: $k$  表示磨削过程中的综合影响系数; $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  分别表示磨削深度、进给速度、砂轮速度与横向进给量的指数,这些指数值的大小能够反映各磨削参数对表面粗糙度的影响程度。将式(1)进行线性化变换得到式(2)。

$$y = \ln R = k_1 + b_1 \ln a_p + b_2 \ln v_w + b_3 \ln v_s + b_4 \ln s_w \quad (2)$$

式中: $k_1 = \ln k$ ;  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  均为待求参数。将实验结果代入式(2),利用最小二乘法对各待求参数进行估计,得到估计值与回归统计值如表 4 所示。最终得到基于经验公式的氮化硅陶瓷型套端面磨削加工表面粗糙度预测模型如式(3)所示。

表 4 回归统计值

待求参数	参数值	标准误差
$k_1$	-0.322 592	0.542 578 8
$b_1$	0.257 387	0.042 190 6
$b_2$	0.199 601	0.046 610 7
$b_3$	-0.808 144	0.077 634 2
$b_4$	0.173 748	0.117 827 5

$$R = 0.724 269 3 \cdot a_p^{0.257 387} \cdot v_w^{0.199 601} \cdot v_s^{-0.808 144} \cdot s_w^{0.173 748} \quad (3)$$

由表 4 可知,拟合判定系数  $R^2$  为 0.93,回归平方和为 0.495 712 7,残差平方和为 0.353 601,  $F$  值为 38.55,而  $F$  检验临界值  $F_{0.01}(4, 11) = 5.668$ ,  $F$  检验统计量大于其临界值,表明拟合效果较好。式(3)能够较好地预测氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度。

为进一步验证预测模型精度,增加了 4 组磨削试验,试验结果与预测值及预测相对误差如表 5 所示,其中负值表示预测值小于试验结果。

表5 表面粗糙度预测值与试验结果比较

磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	进给速度 $v_w/(\text{mm}/\text{min})$	砂轮速度 $v_s/(\text{m}/\text{s})$	横向进给量 $s_w/(\text{mm}/\text{次})$	试验结果/ $\mu\text{m}$	预测值 $R/\mu\text{m}$	相对 误差/%
2	2 500	40	19	0.338 2	0.349 2	3.26
1	2 000	40	16	0.284 5	0.271 2	-4.67
1	4 000	50	10	0.257 6	0.239 7	-6.96
2	4 000	60	16	0.258 1	0.268 3	3.95

由表5可知,基于经验公式的氮化硅陶瓷型套端面磨削加工表面粗糙度预测模型与试验结果相对误差较小,未超过10%,精度较高。

此外,式(3)中砂轮速度的指数为负值,而其他参数的指数均为正值,表明砂轮速度越大,表面粗糙度值越小;而磨削深度、进给速度与横向进给量越大,表面粗糙度值越大。砂轮速度指数的绝对值大于其他参数的指数,表明分析的磨削参数中,砂轮速度对表面粗糙度影响最大,影响程度由大到小的其他磨削参数依次为磨削深度、进给速度、横向进给量。这也说明此预测模型符合实际磨削实验结果。

#### 4 结语

1) 通过试验研究了磨削深度、进给速度、砂轮速度以及横向进给量对氮化硅陶瓷型套端面磨削加工表面质量的影响规律,表面粗糙度值随磨削深度、进给速度及单次横向进给量的增加而变大,随砂轮速度的提高而变小。

2) 在4个磨削参数中,砂轮速度对表面粗糙度值的影响最大,横向进给量的影响最小,磨削深度较进给速度的影响略大。由此可知控制砂轮速度对于获取高质量加工表面较为关键。

3) 根据实验结果,在磨削深度为2  $\mu\text{m}$ ,进给速度为1 500  $\text{mm}/\text{min}$ ,砂轮速度为55  $\text{m}/\text{s}$ ,单次横向进给量为19  $\text{mm}$ 时,表面粗糙度值有最小值,为0.218 6  $\mu\text{m}$ ,获得了较高的磨削表面质量。

4) 根据观测的表面形貌与测量得到的表面粗糙度,基于经验公式构建了氮化硅陶瓷型套端面磨削表面粗糙度预测模型,经F检验表明该模型具有较高的拟合精度,能够根据磨削参数较好地对应表面粗糙度进行预测,为给定磨削参数预估表面粗糙度与确定合理磨削参数提供了参考依据。

#### 参考文献:

[1] 朱科军,欧阳波,许博文,等. 热压成型参数对非球面透镜轮廓偏差的影响[J]. 表面技术,2018,47(7):

67-72.

- [2] 蒋亚丝. 光学玻璃进展:近10年光学玻璃发展[J]. 玻璃与搪瓷,2019,47(3):46-54.
- [3] 曹胜,朱勇建,范玉峰,等. 硫系玻璃非球面透镜的模压温度与应力研究[J]. 浙江科技学院学报,2018,30(5):412-420.
- [4] 闫海鹏,吴玉厚,王贺. 工程陶瓷内圆磨削表面粗糙度研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(4):29-32.
- [5] 吴玉厚,王浩,李颂华,等. 氮化硅陶瓷磨削热特性与表面成形机制[J]. 表面技术,2019,48(12):360-368.
- [6] 吴玉厚,王浩,李颂华,等. 氮化硅陶瓷磨削温度特性与表面质量研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(9):3025-3031.
- [7] 吴玉厚,沙勇,李颂华,等. 氮化硅陶瓷磨削力对表面质量的影响[J]. 陶瓷学报,2019,40(6):718-724.
- [8] 吴玉厚,王浩,孙健,等. 氮化硅陶瓷磨削表面质量的建模与预测[J]. 表面技术,2020,49(3):281-289.
- [9] 李霞. 氮化硅陶瓷磨削温度与表面裂纹扩展研究[J]. 现代制造工程,2021(6):57-62,68.
- [10] 赵玲刚. 氮化硅陶瓷磨削温度与表面变质层的仿真与实验[J]. 机械与电子,2021,39(10):9-14.
- [11] 伊士成. 氮化硅陶瓷超声辅助磨削损伤机理研究[D]. 天津:河北工业大学,2022.
- [12] 郑迪昊,钱炜,吴重军,等. 规则图案影响的氮化硅陶瓷激光辅助磨削机理与质量分析[J]. 机械工程学报,2022,58(15):152-165.
- [13] 刘伟,邓朝晖,万林林,等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. 机械工程学报,2015,51(21):191-198.
- [14] 刘伟,商圆圆,邓朝晖,等. 基于响应曲面法的氮化硅陶瓷磨削工艺参数优化[J]. 兵器材料科学与工程,2017,40(5):5-10.
- [15] 闫海鹏,吴玉厚,孙健,等. 电主轴装配与拆卸工艺的研究[J]. 机械制造,2019,57(5):87-90.
- [16] 李颂华,李祥宇,孙健.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷轴承套圈端面磨削实验及表面质量分析[J]. 表面技术,2021,50(10):363-372.

收稿日期:2023-02-06