

# 16Cr3NiWMoVNbE 钢碳氮共渗层磨削力 试验研究

石峰<sup>①</sup> 刘芳<sup>①</sup> 宋铁军<sup>②</sup> 张高峰<sup>③</sup> 殷升<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002; <sup>②</sup>湘潭大学机械工程和力学学院, 湖南 湘潭 411105;  
<sup>③</sup>长沙学院机电工程学院, 湖南 长沙 410022)

**摘要:** 为了提高 16Cr3NiWMoVNbE 钢的使用性能, 通常需要进行碳氮共渗表面硬化处理。为了解决 16Cr3NiWMoVNbE 钢碳氮共渗层易出现磨削烧伤、裂纹等问题, 开展了白刚玉砂轮磨削力试验。首先, 分析了磨削 3 要素(磨削速度、工件进给速度和磨削切深)对磨削力的影响规律; 其次, 分析了白刚玉砂轮磨粒大小、砂轮硬度和气孔率对磨削力的影响规律; 最后, 分析了磨削 3 要素对工件表面形貌的影响规律。结果表明, 随着磨削切深的增大, 磨削力增大; 随着工件进给速度的增大, 磨削力增大; 随着砂轮速度的增大, 磨削力减小。随着砂轮磨粒的增大, 磨削力减小; 为了减小磨削力、提高砂轮切削性能, 白刚玉砂轮适合选用 J 级硬度和 4 号组织号。减小磨削切深、工件进给速度, 增大砂轮速度, 可改善工件表面形貌。

**关键词:** 碳氮共渗钢; 磨削力; 磨粒粒度

中图分类号: TH161.5 文献标识码: B

DOI: [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.09.020](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.09.020)

## Experimental study on grinding of 16Cr3NiWMoVNbE carbonitriding steel

SHI Feng<sup>①</sup>, LIU Fang<sup>①</sup>, SONG Tiejun<sup>②</sup>, ZHANG Gaofeng<sup>③</sup>, YIN Sheng<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, CHN; <sup>②</sup>School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN; <sup>③</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410022, CHN)

**Abstract:** In order to improve 16Cr3NiWMoVNbE steel's service permance, it is subjected to carbonitriding surface hardening treatment. In order to solve the problems of grinding burns and cracks in the carbonitriding layer of 16Cr3NiWMoVNbE steel, the grinding force test of white corundum grinding wheel was carried out. Firstly, the influence laws of three grinding factors (grinding speed, workpiece feed speed and grinding depth)on the grinding force were analyzed. Secondly, the influence laws of abrasive size, grinding wheel hardness and porosity of white corundum grinding wheel on the grinding force were analyzed. Finally, the influence laws of the three grinding factors on the surface topography of the workpiece were analyzed. The results show that the grinding force increases with the increase of grinding depth. The grinding force increases with the increase of the workpiece feed speed. With the increase of grinding wheel speed, grinding force decreases. With the increase of grinding grains, the grinding force decreases. In order to reduce the grinding force and improve the cutting performance of grinding wheel, white corundum grinding wheel is suitable for selection of J grade hardness and No. 4 microstructure. The surface topography of the workpiece can be improved by reducing the grinding depth, the workpiece feed speed and increasing the grinding wheel speed.

**Keywords:** carbonitriding steel; grinding force; grinding grain size

碳氮共渗可提高材料表面硬度、耐磨性和疲劳强度, 是航空工业中应用广泛的表面强化技术。

16Cr3NiWMoVNbE 钢的热强性能较好, 是航空发动机承载齿轮、轮轴等传动零部件的主流材料<sup>[1]</sup>。

现有研究者对 16Cr3NiWMoVNB 材料进行了渗氮、渗碳和碳氮共渗热处理工艺研究<sup>[2-4]</sup>。碳氮共渗处理后的工件表面比较粗糙，工件所需的表面质量和尺寸精度通常需要通过后续磨削加工来获得。但是，16Cr3NiWMoVNB 钢具有合金元素含量高、渗层硬度高、有磨削烧伤倾向的特点，是典型的难加工材料。宋晓宁<sup>[5]</sup>研究了不同磨削工艺参数对 16Cr3NiWMoVNB 渗碳层表面组织和性能的影响，结果显示砂轮速度对试样表面裂纹分布影响最大。方园园等<sup>[6]</sup>采用弹振珩磨光整工艺对 16Cr3NiWMoVNB 渗碳航空直齿轮进行光整加工，分析了不同珩磨周期对齿轮面粗糙度、形貌、表面残余应力等表面完整性的影响。

目前，关于 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层磨削加工的研究报道很少。磨削力是磨粒对工件材料的弹、塑性变形抗力和磨粒与工件表面的摩擦所产生的，这是磨削热、磨削残余应力产生的基础<sup>[7-13]</sup>。它是影响加工效率、表面质量和刀具寿命的关键参数，主要受工件材料、磨削参数、砂轮、冷却润滑等因素的影响。磨削力过大可能会造成工件变形、热损伤、磨料磨损、表面质量降低，因此关于磨削力量的研究非常重要。本文采用不同磨削 3 要素、不同磨粒粒度、砂轮硬度和组织号的白刚玉砂轮磨削 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层，研究不同磨削工艺参数对 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层磨削力的影响，对优化磨削加工工艺、改善零件加工质量和服役性能具有重要意义。

## 1 试验条件和试验方法

### 1.1 试验条件

试验在精密平面磨床 MGK7120×60 上进行，磨床主轴最大转速为 3 000 r/min，试验采用陶瓷结合剂白刚玉砂轮，型号为 P200×20×32WA，选择不同类型砂轮参数，磨粒号为 60、200、200、240；硬度等级为 J、K；组织号为 4、8、10。磨削方式为逆磨，冷却方式为水基磨削液冷却。砂轮修整器为单晶金刚石笔，金刚石顶角为 100°。工件材料为 16Cr3NiWMoVNB，使用气体碳氮共渗工艺处理，碳氮共渗时向炉中同时滴甲苯和通氨气，其硬度为 HR15N≥85，尺寸为 8 mm×8 mm×10 mm 的长方体。工件碳氮共渗层金相组织如图 1 所示，渗层组织厚度约 0.4 mm。

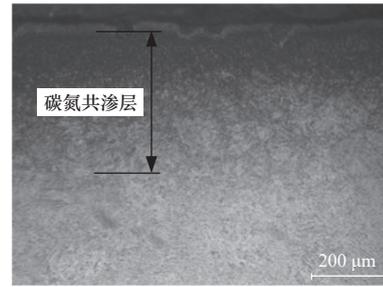


图 1 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗金相组织

### 1.2 试验方法

本试验主要测试不同磨削工艺条件对磨削力和表面形貌的影响。磨削过程中采用 Kistler 9257B 三向测力仪进行测力，测量采样频率为 1 kHz。采用选用高分辨场发射扫描电子显微 LoVac/Apreo S 对磨削工件表面形貌进行观测。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 磨削 3 要素对磨削力的影响

采用 P200×20×32WA200KV 砂轮磨削，研究不同磨削深度  $a_p$ 、工件进给速度  $v_w$  和砂轮速度  $v_s$  对磨削力的影响。

磨削深度对磨削力的影响规律如图 2 所示。由图 2 可知，磨削力随着磨削切深的增大而增大。

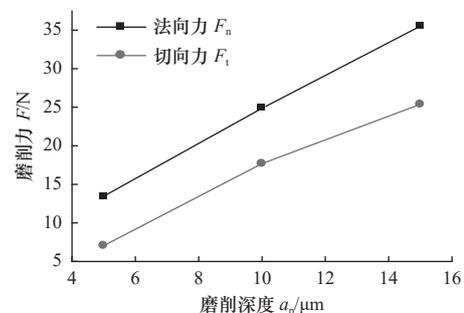


图 2 磨削切深对磨削力的影响规律 ( $v_w=5 \text{ m/min}$ ,  $v_s=30 \text{ m/s}$ )

最大未变形切削厚度  $h_{gm}$ <sup>[14]</sup> 为

$$h_{gm} = \left( \frac{1}{N_d \tan \theta} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中： $\theta$  为磨粒圆锥角一半； $N_d$  为动态有效磨刃密度； $d_s$  为砂轮直径。

由式 (1) 可知，随着磨削深度的增加，砂轮单颗磨粒的未变形切屑厚度增加，磨削力增大。

磨削力随着工作台进给速度增大的变化规律如图 3 所示。磨削力随着工作台速度的增大而增大。这是因为随着工作台进给速度的增加，砂轮单颗磨粒的未变形切屑厚度增加，所以磨削力增大。

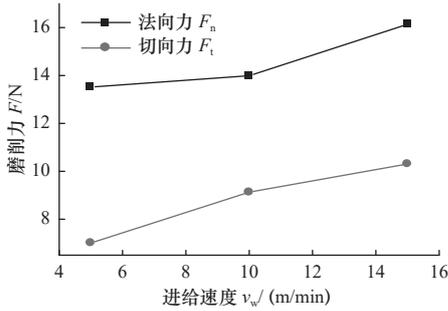


图3 进给速度对磨削力的影响规律 ( $a_p=5 \mu\text{m}$ ,  $v_s=30 \text{ m/s}$ )

砂轮速度对磨削力的影响规律如图4所示。磨削力随着砂轮速度的增大而减小。这是因为随着砂轮速度的增加,砂轮单颗磨粒的未变形切屑厚度减小,磨削力减小。

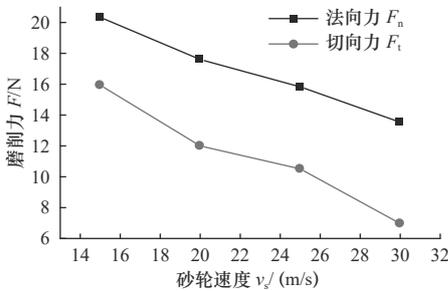


图4 砂轮速度对磨削力的影响规律 ( $a_p=5 \mu\text{m}$ ,  $v_w=5 \text{ m/min}$ )

### 2.2 砂轮粒度对磨削力的影响

工件进给速度为6 m/min,砂轮速度为30 m/s,采用60、100和240粒度号砂轮磨削工件碳氮共渗层,磨削力随磨削深度变化的趋势如图5和图6所示。由图可知,在相同条件下,随着砂轮粒度尺寸的减小,法向磨削力和切向磨削均增大,切向力最大增加76.86%。这是由于随着磨粒的减小,其顶锥角越小,磨粒凸出砂轮表面的高度降低,数量变少,由式(1)可知,最小切屑厚度变大,磨削力呈现出增大的趋势。

当磨削切深较小(5、10  $\mu\text{m}$ )时,100和240粒度号砂轮磨粒砂轮的磨削力相差不大。这可能是因为在小磨削切深条件下,小磨粒砂轮主要以滑擦和犁耕方式作用在工件上,而切削力占比很小,所以磨削力相差不明显。

### 2.3 砂轮硬度对磨削力的影响

工件速度为6 m/min,砂轮速度为30 m/s,采用超软F级、软J级和中软K级这3种硬度等级,粒度号为60的白刚玉砂轮磨削碳氮共渗层,切向磨削力和法向磨削力变化趋势如图7和图8所示。由

图可知,处于中间状态的软J级砂轮磨削力最小,表明J级砂轮自动磨砺过程进行得很顺利,K级砂轮太硬,被磨钝的磨粒不能及时脱落,磨削力增加;F级砂轮太软,磨粒易从砂轮上脱落,进入磨削区,使磨削力增大。

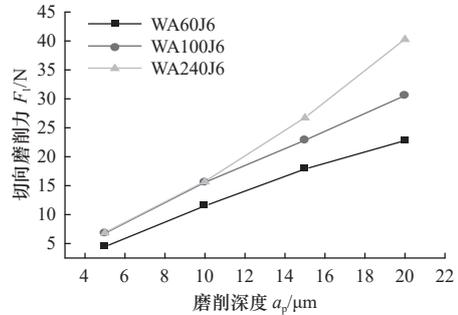


图5 砂轮粒度对磨削切向力影响规律

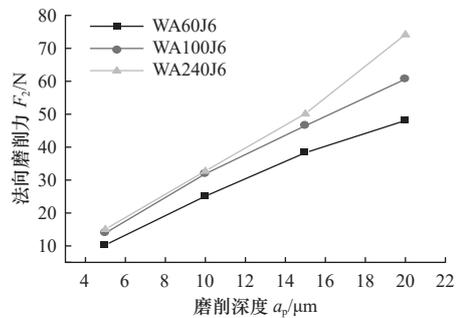


图6 砂轮粒度对磨削法向力影响规律

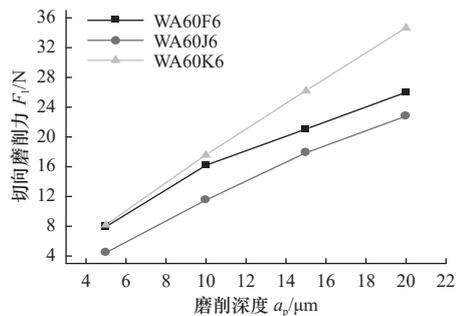


图7 砂轮硬度对磨削切向力影响规律

### 2.4 砂轮组织号对磨削力影响

工件进给速度为6 m/min,砂轮速度为30 m/s,采用4、8和10这3种组织号,粒度号为100的白刚玉砂轮磨削碳氮共渗层,切向磨削力和法向磨削力变化趋势如图9和图10所示。由图可知,组织号8和10属于疏松等级,其磨削力相差不大,组织号4的中等组织砂轮产生的磨削力较大。这可能是由于疏松砂轮的容屑排屑条件好、不易堵塞,发热量低、磨削力小。

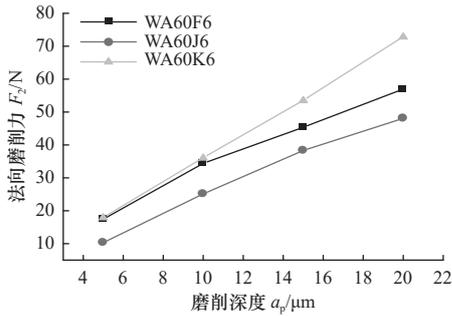


图8 砂轮硬度对磨削法向力影响规律

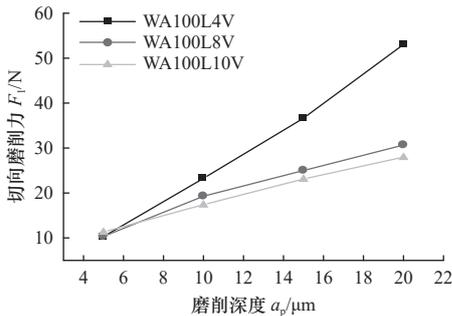


图9 砂轮组织号对磨削切向力影响规律

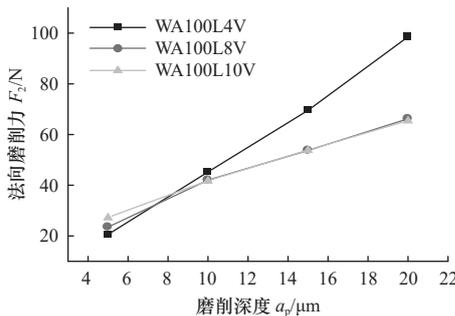


图10 砂轮组织号对磨削法向力影响规律

为了分析不同组织号砂轮磨粒与工件的干涉程度，用磨削切向力除以磨削法向力得到磨削力比，其变化趋势如图11所示。磨削力比值为0.2~0.7时，较小的磨削力比值表示磨削过程中磨粒较钝，磨粒的切入深度较小；而较大的磨削力比值表示磨粒较尖锐，磨粒切入工件较深。由图11可知，组织号4砂轮磨粒磨削力比值最大且大于0.5，表明切入工件更深，切削性能更好。

### 3 磨削3要素对工件表面形貌的影响

采用P200×20×32WA200KV砂轮，在不同磨削3要素条件下磨削碳氮共渗层，使用电子扫描电镜检测工件表面形貌。

#### 3.1 磨削切深对表面形貌的影响

工件进给速度为5 m/min，砂轮速度为30 m/s，

表面形貌随磨削深度的变化规律如图12所示。由图可知，当磨削深度  $a_p=5\mu\text{m}$  时，工件表面形貌较为完整，磨痕较浅；当磨削深度  $a_p=10\mu\text{m}$  时，磨痕较深且有断裂不连续。当磨削深度  $a_p=15\mu\text{m}$  时，工件表面出现撕裂及金属碎片的黏附。这是由于磨削深度的增加使单颗磨粒切削厚度增大，表面硬化材料碳氮共渗层脆性去除加剧。测量工件表面粗糙度，结果如图13所示，表面粗糙度随着磨削切深的增大，表面粗糙度  $R_a$  越大，符合表面形貌特征。

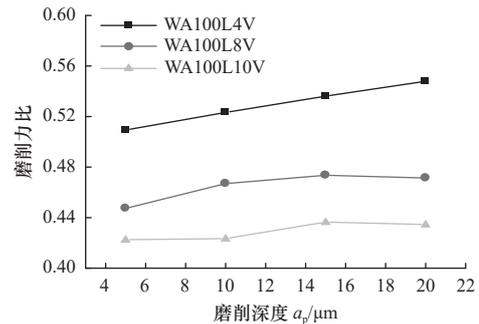


图11 砂轮气孔率对磨削力比影响规律

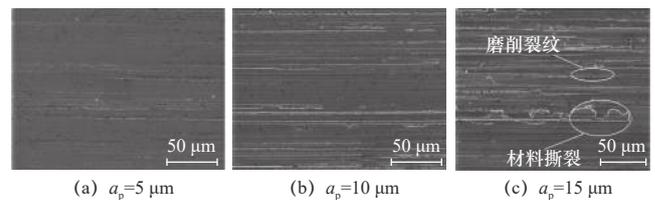


图12 磨削切深对工件表面形貌影响规律

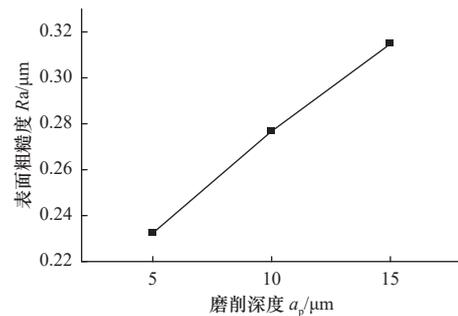


图13 磨削切深对工件表面粗糙度影响规律

#### 3.2 进给速度对表面形貌的影响

磨削切深为  $5\mu\text{m}$ ，砂轮速度为30 m/s，表面形貌随进给速度的变化规律如图14所示。由图可知，随着进给速度的增加，表面形貌越差。这是因为进给速度越大，未变形切屑厚度越大，超过了材料的塑性去除临界值，出现更多的脆性去除。测量工件表面粗糙度，结果如图15所示，表面粗糙度随着进给速度的增大而越大，符合表面形貌特征。

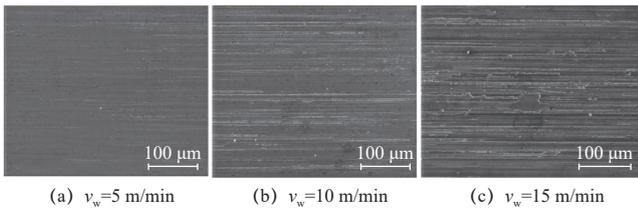


图 14 进给速度对工件表面形貌影响规律

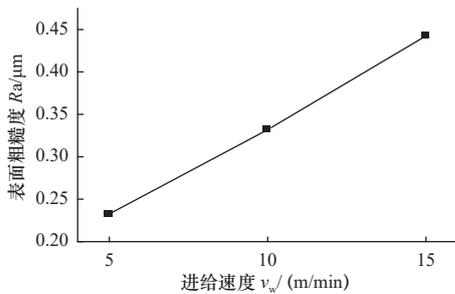


图 15 进给速度对工件表面粗糙度影响规律

### 3.3 砂轮线速度对表面形貌的影响

磨削切深为  $5 \mu\text{m}$ ，进给速度为  $5 \text{ m/min}$ ，表面形貌随砂轮速度的变化规律如图 16 所示。由图可知，随着砂轮速度的增加，表面完整性越好。这是因为砂轮速度越大，未变形切屑厚度越小，工件材料越容易以塑性方式去除，表面完整性越好。分别对  $v_s$  为 20、30 m/s 工件表面进行粗糙度测量，表面粗糙度  $R_a$  分别为 0.28、 $0.23 \mu\text{m}$ ，印证了表面形貌的结论。

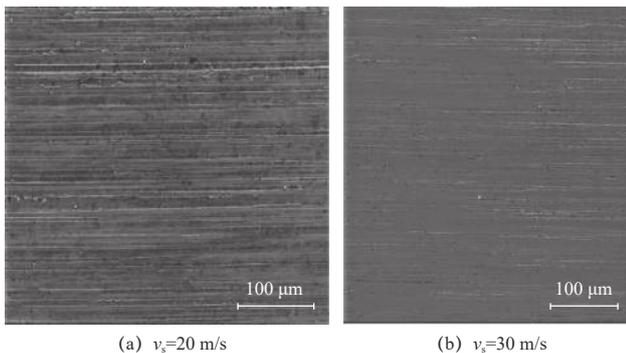


图 16 砂轮速度对工件表面形貌影响规律

## 4 结语

(1) 在相同条件下，白刚玉砂轮磨削 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层时，增大磨削切深、增大工件进给速度和降低砂轮速度，磨削力越大。

(2) 在相同条件下，白刚玉砂轮磨削

16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层时，随着砂轮粒度尺寸的减小，法向磨削力和切向磨削均增大，切向力最大增加 76.86%。磨削 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层，适合选用 J 级硬度等级和 4 号组织号砂轮。

(3) 在相同条件下，白刚玉砂轮磨削 16Cr3NiWMoVNB 碳氮共渗层，磨削切深越小、工件进给速度越小、砂轮速度越大，工件表面形貌越好。

### 参 考 文 献

- [1] 赵宝奇, 高凯雄, 张斌, 等. 低温离子渗氮对 16Cr3NiWMoVNB 齿轮钢摩擦学性能的影响 [J]. 材料研究与应用, 2023, 17(1): 118-124.
- [2] Wang H J, Wang B, Wang Z D, et al. Optimizing the low-pressure carburizing process of 16Cr3NiWMoVNB gear steel [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(7): 1218-1227.
- [3] 邱荣春, 陈葵, 文毅, 等. 航空齿轮材料 16Cr3NiWMoVNB 二次叠加渗碳热处理工艺研究 [J]. 机械传动, 2020, 44(8): 165-170.
- [4] 操应刚, 王帅棋, 聂翔宇, 等. 渗碳与激光相变强化复合处理 16Cr3NiWMoVNB 钢的组织演化 [J]. 表面技术, 2022, 51(10): 10-19, 29.
- [5] 宋晓宇. 渗碳磨削工艺对 16Cr3NiWMoVNB 表面组织与性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [6] 方园园, 刘伟, 姚金鑫, 等. 16Cr3NiWMoVNB 航空齿轮弹振珩磨光整表面完整性试验研究 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 124-130.
- [7] Yang H, Zhang L, Li D, et al. Modeling and analysis of grinding force in surface grinding [C]. IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2011.
- [8] Zhe H, Li J Y, Liu Y M, et al. Single-grain cutting based modeling of abrasive belt wear in cylindrical grinding [J]. Friction, 2020, 8: 208-220.
- [9] Wang X Z, Liu Q Y, Zheng Y H, et al. A grinding force prediction model with random distribution of abrasive grains: considering material removal and undeformed chips [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120: 7219-7233.
- [10] 王小松, 胡晖, 张小民, 等. TC4 钛合金平面磨削力分析与验证 [J]. 制造技术与机床, 2022(6): 74-79.
- [11] 高腾, 李长河, 张彦彬, 等. 纳米增强生物润滑剂 CFRP 材料去除力学行为与磨削力预测模型 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(13): 325-342.
- [12] 崔歆, 李长河, 张彦彬, 等. 磁力牵引纳米润滑剂微量润滑磨削力模型与验证 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(9): 344-358.
- [13] 贾东洲, 李长河, 张彦彬, 等. 钛合金生物润滑剂电牵引磨削性能及表面形貌评价 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 198-211.
- [14] 王栋, 陈磊, 张志鹏. 外圆磨削 18CrNiMo7-6 力模型及表面完整性研究 [J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 381-393.

第一作者: 石峰, 男, 1983 年生, 高级工程师, 研究方向为难加工材料加工工艺与装备研究。E-mail: 108821307@qq.com

通信作者: 宋铁军, 男, 1985 年生, 讲师, 研究方向为难加工材料高效加工。E-mail: tie8yu@163.com

(编辑 李 静)

(收修改稿日期: 2024-05-07)

文章编号: 20240923

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。