

# 砂带磨削 TC4 磨削力数字建模及其预测

黄智, 董华章, 周振武, 吴湘, 赵燎

(电子科技大学, 成都 611731)

**摘要:** **目的** 探索 TC4 砂带磨削的机理, 优化表面加工质量。**方法** 基于磨粒有序分布和等高性一致的假设, 构建出单位面积磨粒的砂带几何模型, 并建立了相应磨削的数值仿真模型, 开展了模拟与实测接触轮在磨削过程中的弹性变形分析, 建立了与印痕密切相关的砂带磨削力的预测模型, 根据 TC4 的 Johnson-Cook 本构模型以及 Johnson-Cook Shear Damage 失效准则, 模拟磨削区的热力特性。**结果** 切向磨削力随着磨削深度的增加而增加, 随砂带线速度的增加而逐渐减小, 且切向磨削力随深度的变化趋势大于随砂带线速度的变化趋势。磨削温度随磨削深度和砂带线速度的增加而增加, 且磨削温度随砂带线速度的变化趋势大于随深度的变化趋势。预测磨削力与实际实验值的误差在 9% 以内, 通过对实验数据分析得到实验条件下的最优加工参数: 砂带线速度 5 m/s, 进给速度 1 mm/min, 磨削深度 5  $\mu\text{m}$ 。对陶瓷砂带磨削 TC4 进行了验证实验, 预测值与实验值具有一致性。**结论** 该方法建立的砂带磨削仿真模型和预测模型, 可以较准确地预测砂带磨削 TC4 时的磨削力和磨削温度, 为提高砂带磨削航空叶片表面质量的加工参数选择提供参考和指导。

**关键词:** TC4; 砂带磨削; 磨削力; 磨削温度; 数值仿真; FEM

**中图分类号:** TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0250-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.033

## Modeling and Prediction of Grinding Force on Belt Grinding TC4

HUANG Zhi, DONG Hua-zhang, ZHOU Zhen-wu, WU Xiang, ZHAO Liao

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the mechanism of TC4 abrasive belt grinding and optimize the quality of surface processing. The geometric model of the abrasive belt per unit area was built based on the assumption of the ordered distribution of abrasive particles and the consistency of the equal height, and a numerical simulation model for the corresponding grinding was established, accordingly. The elastic deformation analysis of contact wheel in grinding process was carried out, and the prediction model of belt grinding force closely related to the indentation was established. According to the TC4's Johnson-Cook constitutive model and Johnson-Cook shear damage failure criterion, the thermal and force characteristics of the grinding area were simulated. The tangential grinding force increased when the grinding depth increased, and decreased with the increase of belt line speed, while the trend of the change with the depth was greater than that along the belt line speed. The grinding temperature increased when the grinding depth and belt speed increased and the trend of the change along with the belt speed was greater than that along with the depth. The error between the predicted grinding force and the actual experimental value was less than 9%. By analyzing the experiment data, the optimal processing parameters under the experimental conditions were obtained: the

收稿日期: 2018-02-15; 修订日期: 2018-06-06

**Received:** 2018-02-15; **Revised:** 2018-06-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助 (51275078)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51275078)

**作者简介:** 黄智 (1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为难加工材料先进磨削加工技术与数控装备开发。

**Biography:** HUANG Zhi (1977—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: advanced grinding technology for difficult-to-machine material and CNC equipment development.

abrasive belt line speed of 5 m/s, the feed speed of 1 m/min, and the grinding depth of 5  $\mu\text{m}$ . TC4 of ceramic belt grinding was verified to obtain the consistency between the predicted value and the experimental value. The simulation model and prediction model of belt grinding established by such method can nearly predict the grinding force and grinding temperature of belt grinding at TC4 and provide references and guidance for the selection of processing parameters to improve the surface quality of belt grinding.

**KEY WORDS:** TC4; belt grinding; grinding force; grinding temperature; numerical simulation; FEM

钛合金 TC4 具备比强度高、热强度高和抗腐蚀性好等优良的物理特性, 广泛应用于航空发动机等领域。然而 TC4 的导热系数小, 高温化学活性大, 弹性模量低, 是典型的难加工材料<sup>[1]</sup>。磨削作为零件加工最后工序, 其加工表面的质量决定零件性能, 并直接影响相关零部件的服役性能。尽管砂带磨削航发叶片型面具有高效高精优点, 但在磨削过程中, 由于工艺参数不合理, 常导致表面质量不高。因此探索砂带磨削钛合金机理对提高航发钛合金叶片加工质量具有重大的意义。

因为砂带磨粒数量众多、几何形状不规则、磨削深度小且不一致, 导致砂带磨削机理相当复杂, 且钛合金是难加工材料, 增加了磨削实验实时测量和分析过程的困难。随着通用有限元软件的发展和计算机性能的提高, 使得各种模拟实验成为可能, 并成为磨削机理研究的重要手段。王亚杰等人<sup>[2]</sup>建立了砂带磨削去除表面轮廓模型, 并考虑了橡胶接触轮的变形。刘月明等人<sup>[3]</sup>根据实际磨粒在空间中随机运动的数学模型, 提出了三维砂带数值模型的方法。李学坤<sup>[4]</sup>、言兰<sup>[5]</sup>、程泽<sup>[6]</sup>、田霖<sup>[7]</sup>等人都建立了单磨粒磨削的仿真模型, 并进行了单磨粒的磨削实验, 分析了磨削深度、磨削速度、磨粒前角对磨削力及磨削温度的影响。国外对磨削的宏观及微观方面都有比较全面的认识, 同时建立了磨削的三维 FEM 模型<sup>[8]</sup>并构建了理论磨削预测系统。Aslan D 等人<sup>[9]</sup>通过光学显微镜测量出磨粒形态, 考虑温度的影响, 并建立了砂轮磨削力的预测模型。RENTSCH<sup>[10]</sup>根据磨粒的实际外形建立了三维磨粒模型, 并进行相应的磨削研究。AURICH<sup>[11]</sup>根据实测的砂轮外貌模型, 建立了随机分布的砂轮磨粒模型, 未变形的磨粒面积与单位磨削力之间的乘积即为动态的磨削力。以上研究以单颗磨粒磨削为主, 较少考虑砂带磨削多颗磨粒共同作用时的复杂情况。

本文在分析砂带磨削机理的基础上, 根据新型陶瓷磨料砂带表面磨粒有序分布的特点构建了数字模型, 根据砂带接触轮弹性接触计算接触面积, 利用 TC4 材料的本构关系建立单位面积砂带磨削过程有限元模型, 通过分析单位面积砂带磨削过程的磨削力和磨削热, 结合接触面积, 建立砂带磨削过程磨削力的预测模型。开展砂带磨削实验验证预测模型的准确性, 表明本文所建立的预测模型具有针对 TC4 难加

工材料的特殊性, 相较通用的磨削力预测模型具有更好的预测效果, 能够为优化 TC4 的表面加工质量提供参考和依据。

## 1 单颗磨粒的磨削模型与磨削约束

### 1.1 单颗磨粒的磨削模型

砂带磨削过程是由多颗磨粒共同对工件表面产生的复合磨削, 因此单颗磨粒理论模型是解释砂带磨削机理与去除过程的基础和简化。砂带表面的磨粒从微观来看, 就像一种刀尖为圆弧、刃角为钝角或钝圆的切削刀具<sup>[12]</sup>。由于磨粒的这种几何特性, 磨削时的磨削深度一般为 0.005~0.05 mm<sup>[13]</sup>。图 1 表示单颗磨粒磨削工件的过程, 磨粒以一定速度磨削材料, 大部分材料在磨粒前端发生塑性变形而产生切屑, 少部分材料流向磨粒两侧而产生塑性隆起, 发生弹性变形的部分材料在磨粒磨削后发生弹性回复。因此, 单颗磨粒磨削过程中主要变形方式有三种——切屑、塑性隆起、弹性变形及回复, 对应磨削过程中的切削、耕犁、滑擦。

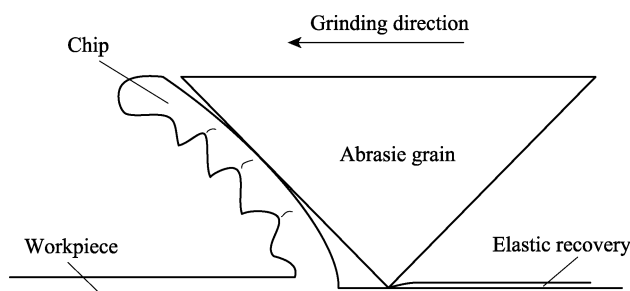


图 1 砂带磨粒的磨削模型

Fig.1 Grinding model of abrasive grain in abrasive belt

### 1.2 磨削的相关约束

以最高磨削效率为目标函数, 以工件进给速度  $V_w$ 、砂带的线速度  $V_s$ 、磨削深度  $a_p$  为优化参数。根据相关磨削手册<sup>[1,14]</sup>查得一般磨削时,  $V_{\min} \leq V_w \leq V_{\max}$ ,  $5 \mu\text{m} \leq a_p \leq 80 \mu\text{m}$ , 其中  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为工作台的最大、最小进给速度。

为了保证工件的磨削质量和磨削效率, 必须同时考虑工件表面粗糙度  $R_a$  和磨削烧伤的影响。根据热

传导分析和实验测量证明, 磨削不发生烧伤的条件为:

$$V_s \cdot l = V_s (D \cdot a_p)^{\frac{1}{2}} \leq C_b \quad (1)$$

式中:  $V_s$  为轮速度 (m/s);  $D$  为砂带接触轮直径 (mm);  $l$  为砂带与工件接触弧长 (mm);  $C_b$  为磨削烧伤界限常数, 与工件材料的硬度及砂带粒度有关, 材料越硬、砂带粒度越细则  $C_b$  值越小, 容易发生烧伤。

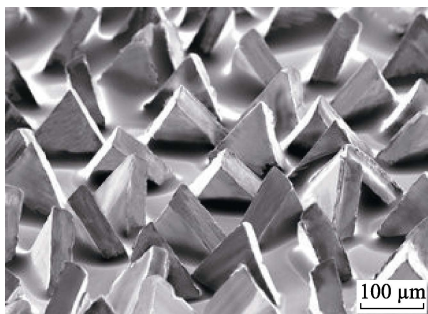
表面粗糙度轮廓最大高度  $R_{vmax}$  可按式(2)计算, 其中  $B$  为砂带宽度, 为了达到工件的表面质量要求, 则需要  $R_{vmax} \leq R_v$ ,  $R_v$  为工件表面要求的粗糙度。

$$R_{vmax} = 1.36 V_s^{\frac{6}{5}} (\cot \gamma)^{\frac{2}{5}} \left( \frac{a_p}{B} \right)^{\frac{2}{5}} \left( \frac{V_w}{V_s} \sqrt{\frac{1}{D}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

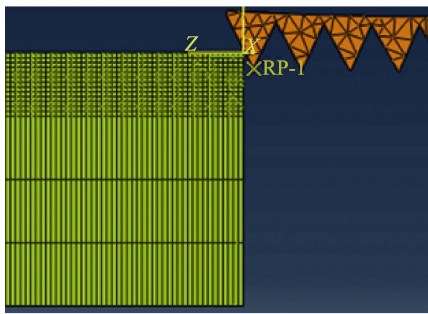
## 2 砂带磨削过程的数字建模

### 2.1 基于有限元法建立砂带磨削模型

图 2a 为某企业研制的新型陶瓷砂带磨粒分布的表面微观照片, 可知该砂带磨粒呈三棱柱形, 磨削过程中磨粒尖峰与工件形成切削, 这种新型磨粒使砂带去除材料的效率更高, 且磨削过程中所需的研磨压力较小。



a 陶瓷砂带表面微观照片



b 砂带磨削有限元模型

图 2 陶瓷砂带磨削的建模

Fig.2 Ceramic belt grinding modeling: (a) microscopic photographs of ceramic belt, (b) finite element model of belt grinding

在文献[10]、[11]基础上建立的有限元砂带磨削模型如图 2b 所示, 该模型以陶瓷磨料砂带磨粒的实际分布为基础, 且磨粒形状与实际磨粒相同, 均为三

棱柱。假设磨粒等高性一致, 并且有序分布。由于磨粒硬度远高于工件硬度, 仿真过程中将磨粒设为刚性。为了减少计算时间, 将工件网格划分简化为两部分, 网格比较密集的为磨削层, 磨削区的网格大小设计为 0.005 mm, 而工件固定端的网格大小为 0.1 mm, 这样既保证磨削的仿真精度, 又降低了模型的网格数量。磨粒以及工件材料的物理属性如表 1。

表 1 TC4 和陶瓷磨料的材料参数  
Tab.1 Material properties of TC4 and Ceramic abrasive grains

Material properties	TC4	Ceramic Abrasive
Modulus of elasticity/GPa	114	320
Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	4430	3460
Poisson ratio	0.33	0.23
Specific heat/(J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	526.3	178
Conductivity coefficient/(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	6.7	20
Coefficient of expansion/(μm·m <sup>-1</sup> )	9	5

### 2.2 TC4 的本构模型

磨削是一个高温、大应变的过程, 工件在磨粒作用下的成屑时间很短, 且被磨削区各处的应变、应变速率和温度受到材料本身性质的影响, 并不是均匀分布。因此描述材料加工中的应变、温度、应变率对应力分布影响的本构方程, 是磨削仿真中的关键。目前, 常用的材料本构模型有: Johnson-Cook 模型<sup>[15]</sup>、Zerilli-Armstrong 模型<sup>[16]</sup>、Bodner-Paton 模型<sup>[17]</sup>和 Follansbee-Kooks 模型<sup>[18]</sup>, 其中 J-C 模型参数可以通过拟合试验数据得到, 且能够反映高应变速率下的材料变形行为。因此本文采用 J-C 本构模型, 该模型表示为应变硬化、应变率强化和温度软化三项的乘积, 本构方程如下:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left[ 1 + C \ln \left( 1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t - t_t}{t_t - t_{melt}} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中:  $A$  为屈服应力;  $B$  为应变强化参数;  $n$  为硬化指数;  $\varepsilon$  为等效塑性应变;  $C$  为应变速率强化参数;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率;  $\dot{\varepsilon}$  为等效塑性应变率;  $m$  为软化指数;  $t$  为温度;  $t_t$  为室温;  $t_{melt}$  为熔点温度。TC4 钛合金的 J-C 模型参数如表 2 所示。

表 2 TC4 Johnson-Cook 本构模型参数  
Tab.2 TC4's J-C constitutive model parameters

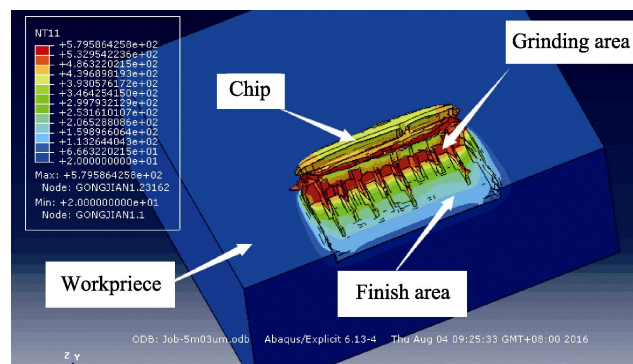
Material	$A$	$B$	$C$	$m$	$N$	$t_{melt}/^{\circ}\text{C}$	$t_t/^{\circ}\text{C}$
TC4	973	617	0.001	0.72	0.144	1630	25

## 2.3 砂带磨削数字仿真

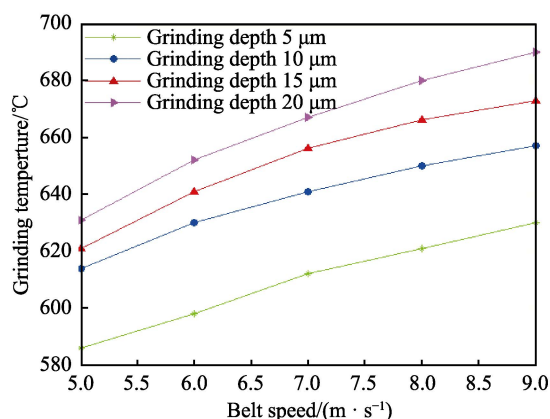
### 2.3.1 磨削温度的仿真

磨削温度对工件表面质量和砂带的使用寿命都有极大的影响, 因此研究磨削过程中磨削温度的分布特点对改善工件表面完整性有重要意义。磨削过程中的主要热源来自于磨粒与工件的摩擦和材料的塑性变形, 热量主要流入工件和磨具, 本文模拟干摩擦状态, 忽略了磨削液的影响。图 3a 为带速 5 m/s、磨削深度 5  $\mu\text{m}$ 、工件进给速度 1 m/min 时的磨削温度场仿真。

由图 3a 可以看出, 在磨粒与工件的接触区, 磨削温度较高, 而且已经磨削完成的面比接触面的温度要低得多。图 3b 为 TC4 在不同磨削参数下仿真得到的磨削区温度曲线, 随着磨削深度和磨削速度的增加, 磨削温度都有一个上升趋势, 且磨削深度对磨削温度的影响较大。



a 砂带磨削过程中的温度场仿真



b 不同砂带线速度下的磨削温度仿真

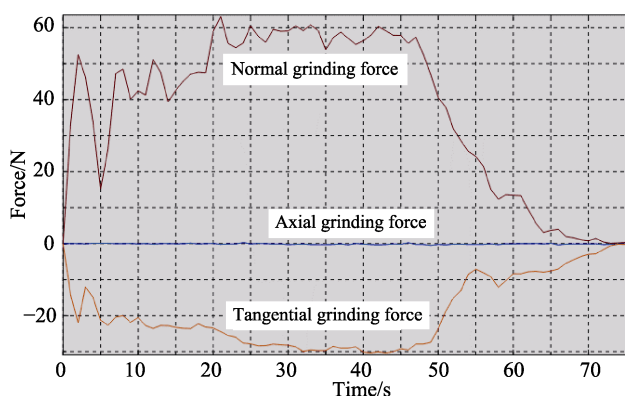
图 3 砂带磨削温度仿真

Fig.3 Temperature simulation in belt grinding process: (a) the simulation of temperature field, (b) the simulation of grinding temperature with different  $V_s$

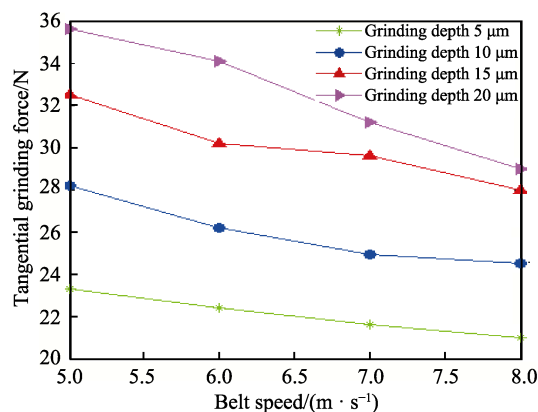
### 2.3.2 磨削力的仿真

砂带磨削过程的另一个极为重要的因素是磨削力, 它影响砂带的磨损及磨削表面质量。本文分别模拟了不同磨削参数下磨削时三维磨削力的情况, 图 4a 为砂带线速度为 6 m/s、进给深度为 10  $\mu\text{m}$  时仿真

磨削力随时间变化的曲线, 可以看到磨削前期, 由于磨粒和工件碰撞而引起较大波动, 在稳定磨削阶段, 磨削力会有逐渐减小的趋势, 这是由于磨削温度较高时引起的材料软化使磨削力有所减小。图 4b 为不同磨削状态下切向磨削力的仿真结果, 可以发现磨削深度  $a_p$  对磨削力的影响较大, 而对轴向磨削力  $F_a$  的影响基本为零, 这与砂带磨削理论一致。仿真结果表明切向磨削力随着磨削深度的增加而增加, 随砂带线速度的增加而逐渐减小, 这是由于在其他磨削参数不变的前提下, 砂带线速度越高, 单位时间有效磨粒数量越多, 使得表面材料的去除速度越快, 砂带与工件之间的接触压力减小, 导致切向磨削力减小。



a 磨削力变化仿真曲线



b 不同砂带线速度下的切向磨削力

图 4 磨削力仿真

Fig.4 The simulation of grinding force: (a) the grinding force's curve of simulation, (b) the tangential force with different  $V_s$

## 3 磨削力预测

利用有限元方法得出砂带与工件之间的压痕及实际接触面积, 结合单位面积砂带磨粒磨削 TC4 数值模型仿真出磨削力, 根据相关数据算出待定参数, 最后结合有效磨削面积预测出砂带磨削力。

### 3.1 磨削力预测理论模型

根据砂带弹性磨削的特点, 建立橡胶接触轮、砂



带与工件接触时的有限元模型,分析在一定磨削深度的条件下接触轮的变形情况,得出砂带与工件接触的面积。由于接触轮的弹性变形,导致砂带上的磨粒与工件之间的接触深度不一致,使得磨削力的预测变困难。国外学者 G. Werner<sup>[19]</sup>以主要磨削参数的函数建立磨削力数学模型,根据磨粒的几何分布及单位面积内有效磨粒数计算得出了相应的公式。G. Werner 首先给出单位面积的动态有效磨粒数  $N_d$  的计算公式(4),以及接触区中可变点  $l$  处的平均切屑横断面  $Q(l)$  的分布函数公式(5),最后给出了接触区内某一点处单位磨削面积的法向磨削力公式(6)。

$$N_D(l) = A_n \cdot [C]^\beta \cdot \left[ \frac{V_w}{V_s} \right]^\alpha \cdot \left[ \frac{a_p}{D} \right]^{\frac{\alpha}{2}} \cdot \left[ \frac{l}{l_k} \right]^\alpha \quad (4)$$

$$Q_n(l) = \frac{2}{A_n} \cdot [C]^{-\beta} \cdot \left[ \frac{V_w}{V_s} \right]^{1-\alpha} \cdot \left[ \frac{a_p}{D} \right]^{\frac{1-\alpha}{2}} \cdot \left[ \frac{l}{l_k} \right]^{1-\alpha} \quad (5)$$

$$F_N(l) = K[Q(l)]^N \cdot N_D(l) \quad (6)$$

式中:  $A_n$  为静态磨刃比例系数;  $C$  为静态磨刃系数;  $l_k$  为接触长度;  $\alpha$ 、 $\beta$  为表面磨粒分布;  $K$  为比例系数;  $N$  为摩擦力与变形率的相对系数。

S. Malkin 将磨削力分为磨粒与工件摩擦力以及磨削时磨屑变形力两个部分<sup>[20]</sup>,并单独确定了两部分的磨削力公式。其单颗磨粒的磨削力公式为:

$$\begin{cases} F_n = KQ + \delta \bar{P} \\ F_t = \frac{\pi K}{4tg\gamma} Q + \mu \delta \bar{P} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为单颗磨粒与工件的接触面积;  $\bar{P}$  为磨粒与工件之间的平均接触强度,其大小与材料硬度成正比;  $\mu$  为工件与磨粒之间的动态摩擦系数。根据公式(4)、(5)、(7)得出预测磨削力的推导公式(8),表示接触区内磨削力的大小。

$$\begin{cases} F_{yn} = \int_0^{l_c} [KQ(l) + \delta \bar{P}] N_D(l) dl \\ F_{yt} = \int_0^{l_c} \left[ \frac{\pi K}{4tg\gamma} Q(l) + \mu \delta \bar{P} \right] N_D(l) dl \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $F_{yt}$  为切向预测磨削力;  $F_{yn}$  为法向预测磨削力;  $l_c$  为砂带与工件的接触弧长。将公式(8)积分得式(9):

$$\begin{cases} F_{yn} = K \frac{V_w}{V_s} a_p + \frac{\delta \bar{p} A_n}{1+\alpha} [C]^\beta \left[ \frac{V_w}{V_s} \right]^\alpha a_p^{\frac{1+\alpha}{2}} D^{\frac{1-\alpha}{2}} \\ F_{yt} = \frac{\pi K}{4tg\gamma} \frac{V_w}{V_s} a_p + \frac{\mu \delta \bar{p} A_n}{1+\alpha} [C]^\beta \left[ \frac{V_w}{V_s} \right]^\alpha a_p^{\frac{1+\alpha}{2}} D^{\frac{1-\alpha}{2}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\bar{\delta}$  为砂带与工件的接触面积,需要通过压痕测试得到相应的值。接触轮直径固定不变,根据相关文献<sup>[5]</sup>查得陶瓷磨粒与 TC4 工件之间的摩擦系数  $\mu$  在 0.5~0.6 之间,通过三组仿真数据即可得到相关系数  $K$  及指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

## 3.2 磨削力预测结果

### 3.2.1 砂带与工件接触面积的计算

砂带磨削 TC4 时,橡胶接触轮可以视为弹性体,根据赫兹接触理论,砂带和橡胶接触轮与工件之间的接触面为椭圆形,其应力空间分布为半椭球。建立砂带、接触轮和工件的有限元模型,如图 5a 所示,模拟不同载荷下接触轮砂带与工件之间的压痕来确定接触面积  $\bar{\delta}$ ,单位面积内的摩擦力乘以接触面积就是磨削过程中的磨削力。图 5b 为接触轮垂直施加不同载荷时仿真和实验得到的椭圆压痕,通过在砂带上的油墨来记录实验加载不同压力时橡胶接触轮与工件的压痕。实验结果与假设基本一致,通过实验得到的印痕大致为一个椭圆。实验与仿真结果的对比如图

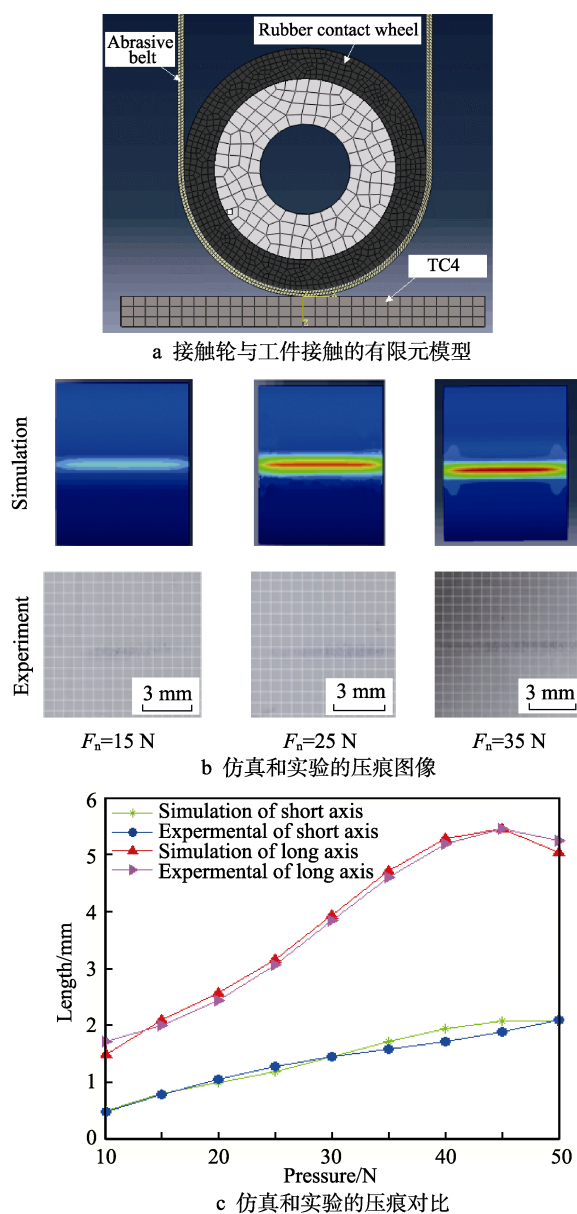


图5 砂带磨削接触面积分析

Fig.5 Analysis of belt grinding contact area: (a) the FEM model of contact, (b) Indentation picture of simulation and experiment, (c) Indentation contrast of simulation and experiment

5c, 可以得出仿真结果与实验的误差在 5% 左右, 证明了所建模型的正确性以及基础面积计算的合理性。

3.2.2 待定系数的计算以及磨削力的预测

通过磨削深度为 5 μm, 工件进给速度为 1 m/min, 砂带线速度为 5、6、7 m/s 三组仿真数据, 可确定磨削力预测理论模型中的相关系数, 带入式(9)解得 α 约为 0.32, β 约为 0.69, K 约为 2 077 407.27 N/mm。将所求得的相关系数值代回公式(9)则可建立磨削力预测模型, 其预测结果如表 3 所示。

表 3 砂带磨削力的预测值  
Tab.3 Prediction of abrasive belt grinding force

Number	$a_p/\mu\text{m}$	$V_s/(m\cdot s^{-1})$	$V_w/(m\cdot min^{-1})$	$\bar{\delta}/mm^2$	$F_{Yt}/N$	$F_{Yn}/N$
1	5	5	1	4.48	15.7	32.3
2	5	6	1	4.48	14.8	31.8
3	5	7	1	4.48	14.5	31.7
4	5	6	2	4.48	17.0	34.8
5	5	6	3	4.48	18.9	38.9
6	10	6	2	6.49	29.4	60.3
7	15	6	2	7.86	35.6	71.4

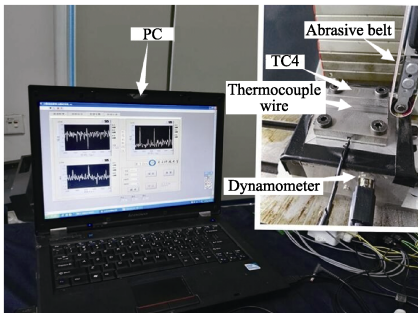
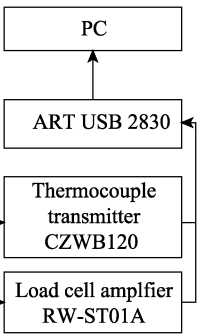
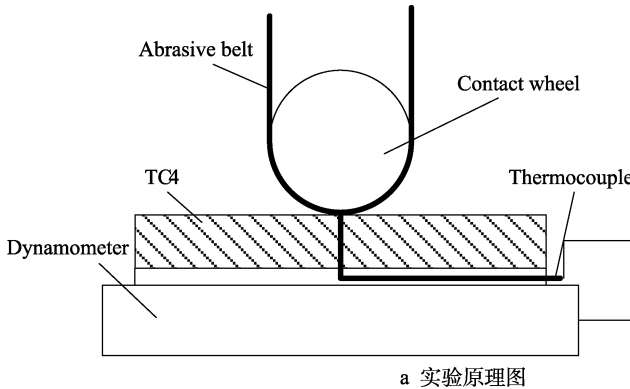


图 6 砂带磨削实验  
Fig.6 Experiment of belt grinding: (a) experimental schematic diagram, (b) experimental site

表 4 因素水平表  
Tab.4 Factor level

Factor	$V_s/(m\cdot s^{-1})$ A	$V_w/(m\cdot min^{-1})$ B	$a_p/\mu\text{m}$ C
1	5	1	5
2	6	2	10
3	7	3	15

表 5 正交实验表  
Tab.5 Orthogonal experiment

Number	$V_s/(m\cdot s^{-1})$	$V_w/(m\cdot min^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$
1	5	1	5
2	6	1	5
3	7	1	5
4	6	2	5
5	6	3	5
6	6	2	10
7	6	2	15

4 砂带磨削实验验证与分析

4.1 砂带磨削力以及磨削温度的测量

实验对象是 60 mm×60 mm×8 mm 的 TC4 试块, 砂带粒度为 P240, 实验机床为自主改装的数控磨床, 如图 6a 所示。试块通过螺栓与自主研发的三维动态磨削力测量平台<sup>[21]</sup>固定在一起, 热电偶丝穿过试块下方的导槽和直径为 1 mm 的孔, 到达试件表面, 得以测量磨削时磨削区的温度, 通过热电偶温度变送器 CZWB120 将放大后的电压信号和测力仪输出信号输入信号采集卡 USB2830 并由 PC 机记录, 实验现场如图 6b。

基于多颗磨粒砂带磨削温度和磨削力的研究, 设置砂带线速度、磨削深度、工件进给速度三个因素, 每个因素设置三水平, 如表 4 所示。为了便于实验结果的分析, 更加直观地反应每个磨削参数与磨削力、磨削温度的关系, 采用正交实验如表 5。考虑到实验的测量误差, 每组实验数据进行 3 次实验。

4.2 数字预测结果与实验数据的对比

按照实验组别中的实验参数分别进行实验, 表 6 记录了每组试验参数 3 次实验的测量值, 图 7a、b 分别为滤波前后 (砂带线速度 6 m/s, 工件进给速度 1 m/min, 磨削深度 5 μm) 磨削力的信号实测图。

切向磨削力实验值与预测值的对比如图 7c 所示, 可知当磨削深度为 5 μm 时, 磨削力预测值与实验值的误差基本在 9% 以内, 表明基于椭圆接触砂带磨削研究的磨削力预测方法具有较好的准确性。当磨削深度增加时, 预测值与实验值的误差逐渐增加, 原因可能包括: ①砂带属于弹性磨削, 随着磨削深度的增加, 接触轮与砂带的变形随之增加, 使得实际磨削的磨削深度比理想进给量小, 磨削力整体偏小; ②磨削深度的增加导致磨削力急剧上升, 可能会使磨粒断裂和磨损, 导致实测磨削力比预测值小。

表 6 实验测量值记录表  
Tab.6 Record of experiment value

Number	1	2	3	Average	Number	1	2	3	Average		
1	$F_n/N$	29.5	30.8	30.5	30.27	5	$F_n/N$	35.7	35.9	36.2	35.93
	$F_t/N$	15.6	14.8	14.8	15.07		$F_t/N$	17.8	16.9	17.3	17.33
	$t/^{\circ}\text{C}$	527.6	528.1	528.5	528.07		$t/^{\circ}\text{C}$	631.2	624.9	626.3	627.47
2	$F_n/N$	29.9	28.2	29.8	29.3	6	$F_n/N$	52.5	54.2	50.1	52.27
	$F_t/N$	14.1	13.2	13.8	13.70		$F_t/N$	24.3	23.4	24.9	24.20
	$t/^{\circ}\text{C}$	578.6	575.8	580.4	578.27		$t/^{\circ}\text{C}$	650.8	648.4	647.5	648.90
3	$F_n/N$	29.7	29.8	27.7	29.07	7	$F_n/N$	58.7	65.8	56.2	60.23
	$F_t/N$	13.4	13.6	13.0	13.33		$F_t/N$	26.8	25.9	27.8	26.83
	$t/^{\circ}\text{C}$	594.8	600.8	598.4	598.00		$t/^{\circ}\text{C}$	686.6	692.6	689.7	689.63
4	$F_n/N$	31.7	32.8	32.5	32.33						
	$F_t/N$	16.5	15.6	16.2	16.10						
	$t/^{\circ}\text{C}$	629.6	628.1	630.8	629.50						

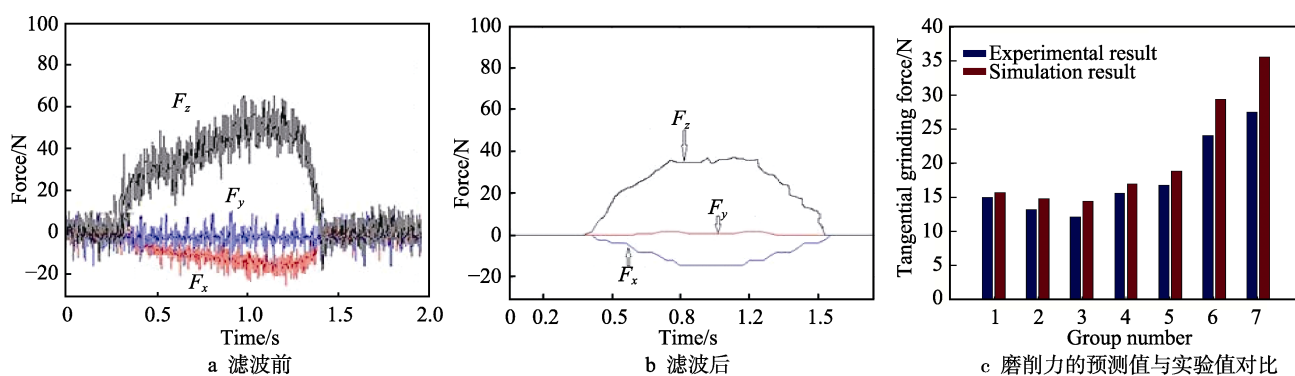


图 7 磨削力测量与对比

Fig.7 Comparison of predicted value and experimental value for grinding force:  
(a) primary signal, (b) filtered signal, (c) comparison chart

图 8a 为磨削深度  $5\ \mu\text{m}$ 、砂带线速度  $5\ \text{m/s}$ 、工件进给速度  $1\ \text{m/min}$  时测量得到的磨削温度。实验的磨削温度与仿真得到的磨削温度如图 8b 所示, 可知仿真温度与实验测量结果的误差在 10% 以内, 实验测量温度总体上高于仿真温度。测量和仿真的差异因素

可能包括: ①仿真环境计算的是理想磨削热生成情况, 温度仅由剪切应变和磨粒与工件之间摩擦产生, 并且不存在磨削与工件的二次接触, 而实际磨削过程中的环境要复杂得多; ②实验时砂带的连续进给可能会造成累计温升, 从而导致实测温度高于仿真值。

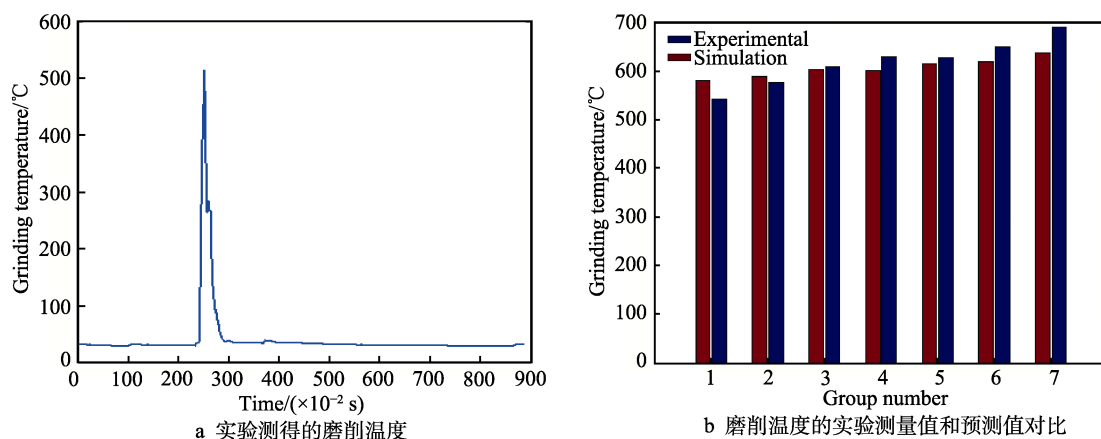


图 8 磨削温度的测量与对比

Fig.8 Measurement and comparison of grinding temperature: (a) grinding temperature measurement, (b) comparison of experimental and predictive values

### 4.3 实验测量结果及分析

根据表 5 和对比图 7c、8b 的测试结果, 通过极差法分析实验结果, 得到磨削力的影响因素顺序为 C (磨削深度) > B (进给速度) > A (砂带线速度), 而磨削温度的影响因素顺序为 A (砂带线速度) > C (磨削深度) > B (进给速度)。实验因素与实验指标的趋势如图 9 所示, 可以更加直观地看出磨削力与磨削温度随实验因素的变化趋势。

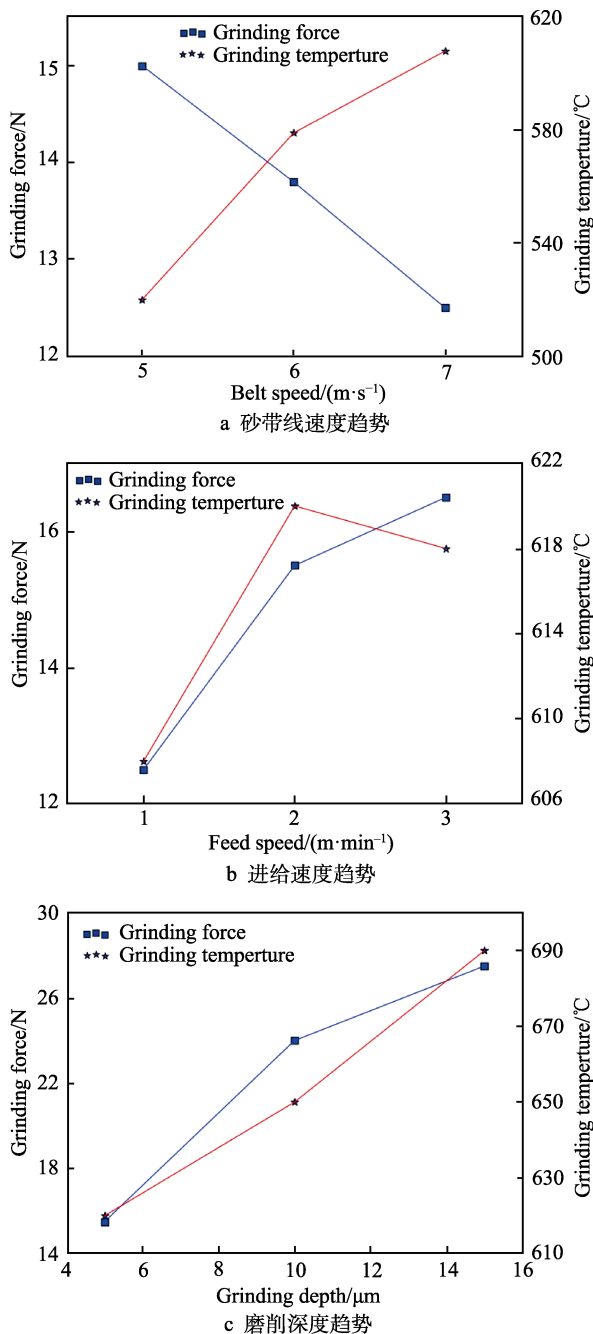


图 9 切向磨削力与磨削温度随各单因素的变化趋势  
Fig.9 Change tendency of tangential grinding force and grinding temperature along with each single factor:  
(a) tendency chart of  $V_s$ , (b) tendency chart of  $V_w$ ,  
(c) tendency chart of  $a_p$

分析图 9 可得, 磨削力最小的最优组合为  $C_1B_1A_3$ , 即磨削深度为  $5\text{ }\mu\text{m}$ , 进给速度为  $1\text{ m/min}$ , 砂带线速度为  $7\text{ m/s}$ 。但是对于磨削温度最小的最优组合为  $A_1C_1B_1$ , 即砂带线速度为  $5\text{ m/s}$ , 磨削深度为  $5\text{ }\mu\text{m}$ , 进给速度为  $1\text{ m/min}$ 。综合考虑指标的影响主次关系, 进而确定最佳工艺条件, 对于因素 C 和 B, 其最优参数一样, 但是对于因素 A, 对于磨削温度是第一影响因素, 而对于磨削力是第三影响因素, 故 A 因素取  $A_1$ , 获得最优组合为  $A_1B_1C_1$ , 即砂带线速度为  $5\text{ m/s}$ , 进给速度为  $1\text{ m/min}$ , 磨削深度为  $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

## 5 结论

1) 针对新型陶瓷砂带磨粒, 提出了一种基于磨削单位面积有效磨粒的砂带磨削力计算模型, 通过仿真和实验分析, 得出砂带与工件之间的压痕规律, 从而为建立砂带磨削力的预测模型提供计算依据。通过进行钛合金磨削实验, 对比实验与仿真结果, 得出预测值在磨削深度较小时误差在 9% 以内, 说明了预测模型的准确性。对比数值计算模型与仿真结果, 其趋势与实际相符, 随着砂带线速度和磨削深度的增大, 磨削温度随之增大; 随着砂带线速度的增大, 磨削力逐渐减小。

2) 通过实验结果分析, 得出磨削力最大的影响因素是磨削深度, 而磨削温度最大的影响因素是磨削速度。因此在保证 TC4 工件不产生烧伤和加工效率较高的前提下, 得出了实验条件下最优加工参数为: 砂带线速度  $5\text{ m/s}$ , 进给速度  $1\text{ m/min}$ , 磨削深度  $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

## 参考文献:

- [1] 陈燕, 杨树宝, 傅玉灿, 等. 钛合金 TC4 高速切削刀具磨削的有限元仿真[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2230-2240.  
CHEN Y, YANG S, FU Y, et al. FEM estimation of tool wear in high speed cutting of Ti6Al4V alloy[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2013, 34(9): 2230-2240
- [2] WANG Y, HUANG Y, CHEN Y X, et al. Model of an abrasive belt grinding surface removal contour and its application[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 82(9-12): 2113-2122.
- [3] WANG W X, LI J Y, LIU Y M, et al. Simulation of abrasive belt topography based on generation of random rough surface[J]. Key engineering materials, 2016, 693: 892-899.
- [4] LI X, WOLF S, ZHI G, et al. The modelling and experimental verification of the grinding wheel topographical properties based on the 'through-the-process' method[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2014, 70(1-4): 649-659.
- [5] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 172-182.  
YAN L, JIANG F, RONG Y M. Grinding mechanism



- based on single grain cutting simulation[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(11): 172-182.
- [6] 程泽, 徐九华, 丁文锋, 等. 单颗磨粒磨削钛合金 TC4 成屑过程仿真研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(2): 17-21.  
CHENG Z, XU J H, DING W F, et al. Simulation of chip formation in grinding titanium alloy TC4 with single abrasive grit[J]. Diamond g. abrasives engineering, 2011, 31(2): 17-21.
- [7] 田霖. 基于磨粒有序排布砂轮的高速磨削基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
TIAN L. Fundamental research on the grinding with regular abrasive distribution high speed wheel[D]. Nanjing: Nanjing University Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [8] SUN Y, VU T T, YEO S H. Study of pressure distribution in compliant contact wheels for robotic surface finishing[C]//MATEC web of conferences. Singapore: EDP Sciences, 2016.
- [9] ASLAN D, BUDAK E. Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 223: 75-90.
- [10] RENTSCH R, BRINKSMEIER E. Tribology aspects in state of the art MD cutting simulations[C]//Proceedings of the 8th CIRP international workshop on modeling of machining operations. Chemnitz: Machining science & technology, 2005.
- [11] AURICH J C, BRAUN O, WARNECKE G, et al. Development of a super abrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2003, 52(1): 275-280.
- [12] 黄智. 基于虚拟仪器的砂带磨削性能参数测试系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
HUANG Z. Research of measurement and test system of coated abrasive grinding parameters based on virtual instrument[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [13] BIGERELLE M, HAGEGE B, EL MANSORI M. Mechanical modelling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding[J]. Tribology international, 2008, 41(11): 992-1001.
- [14] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 12-18.  
LI B M, ZHAO B. Modern grinding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 12-18.
- [15] TSAI J S, LIAO C L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces[J]. Journal of materials processing technology, 1999, 94(2-3): 235-246.
- [16] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations[J]. Journal of applied physics, 1990, 68(4): 1580-1591.
- [17] BODNER S R, PARTOM Y. Constitutive equations for elastic-visco plastic strain-hardening materials[J]. Journal of applied mechanics, 1975, 42(2): 385.
- [18] FOLLANSBEE P S, KOCKS U F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable[J]. Acta metallurgica, 1988, 36(1): 81-93.
- [19] WERNER G. Influence of work material on grinding forces[J]. Annals of the CIRP, 1978, 27(1): 243-248.
- [20] MALKIN S, COOK N H. The wear of grinding wheels[J]. Trans ASME ser B, 1971, 93(4): 1120.
- [21] 黄智, 陈士行, 万从保, 等. 三维动态磨削力测量平台结构设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016(9): 1299.  
HUANG Z, CHEN S H, WAN C B, et al. Structure design of the three-dimensional dynamic grinding force measurement platform[J]. Journal of Northeastern University (Natural science), 2016(9): 1299.