

高熵合金微尺度磨削力实验研究

温雪龙, 桂宏泽, 巩亚东, 王蒙山

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 通过分析磨屑形成机理,建立了高熵合金微磨削力的理论模型,并推导了磨削力公式,通过正交和单因素实验,探究了磨削参数、磨粒粒度、微磨具表面涂层对磨削力的影响规律,对比了不同种类高熵合金的磨削力,分析了磨粒粒度、加工参数及力对磨屑形貌的影响.结果表明:对磨削力影响最大的是进给速度,影响最小的是磨削深度;与磨削力呈正相关的是进给速度和磨削深度,负相关的是磨削速度;使用500#磨粒微磨具所受微磨削力较大,且产生的磨屑呈小节距锯齿状;涂层微磨具所受切向磨削力比未涂层的微磨具小,而法向磨削力大;增加Al含量和加入Mo元素会导致微磨削力增大.最后比较了理论模型计算值与实验值,验证了微磨削力模型的准确性.

关键词: 高熵合金;微尺度磨削;磨削力;磨屑

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)12-1734-10

Experimental Study on the Micro-scale Grinding Force of High-Entropy Alloys

WEN Xue-long, GUI Hong-ze, GONG Ya-dong, WANG Meng-shan

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WEN Xue-long, E-mail: wenxl@me.neu.edu.cn)

Abstract: By analyzing the formation mechanism of grinding chips, a theoretical model of micro-grinding force of high-entropy alloys was established, and the formula of grinding force was derived. Through orthogonal and single-factor experiments, the influencing laws of grinding parameters, particle sizes and surface coating of micro-grinding tools on the grinding force were explored, as well as the grinding force comparison of different high-entropy alloys. The effects of grain size, processing parameters and grinding force on the morphology of grinding chips were analyzed. The results showed that the feed speed has the greatest effect on grinding force and the least effect on grinding depth. With the increase of feed speed and grinding depth, the grinding force gradually increases, and the grinding force gradually decreases with the increase of grinding speed. The micro-grinding force of the 500# abrasive particle is larger, and the grinding chips produced are bar spacing sawteeth. The tangential grinding force of the coated microabrades is smaller than that of the uncoated microabrades, while the normal grinding force is larger. The increase of Al content and the addition of Mo element will lead to the increase of the micro-grinding force. Finally, the calculated values of the theoretical model were compared with the experimental values, and the accuracy of the micro-grinding force model was verified.

Key words: high-entropy alloy; micro-scale grinding; grinding force; abrasive debris

高熵合金是由多种元素以等摩尔或近等摩尔的比例混合形成的一种新型合金,其在抗氧化性、硬度、耐腐蚀性、强度、耐磨性等方面具有优

异的性能,学术研究价值可观^[1].

很多学者对微尺度磨削加工进行了研究. Li等^[2]研究了进给速度和磨削深度对微晶玻璃磨

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275412).

作者简介: 温雪龙(1985-),男,辽宁沈阳人,东北大学副教授,博士生导师; 巩亚东(1958-),男,辽宁本溪人,东北大学教授,博士生导师.

削力的影响,结果表明进给速度对磨削力的影响更大. Adibi等^[3]基于磨粒轨迹的运动学分析和磨粒与工件之间的切削微观机制得出的瞬时未变形切屑厚度来预测法向和切向磨削力的分量. Gao等^[4]采用直径为1 mm的电镀金刚石磨棒对SiC_p/Al复合材料进行加工,结果表明对粗糙度影响最大的是主轴转速,最小的是进给速度. Zhou等^[5]建立了微磨镍基单晶高温合金表面粗糙度的预测模型,并进行了实验验证,其次,通过单因素实验分析了磨削参数对微磨削表面粗糙度的影响.结果表明:随着主轴转速的增加和磨削深度的减小,微磨镍基单晶高温合金的表面粗糙度呈下降趋势;随着进给速度的增加,表面粗糙度明显增加. Zhao等^[6]制备了32个具有高体积分数的SiC_p/Al试样并测量了其加工参数,然后测试试样的表面质量,并分析磨削参数对微磨削表面质量的影响.结果表明,应选择较高的主轴转速可以获得更好的表面质量,最终的表面质量与摩擦系数、表面粗糙度、破碎程度以及缺陷的数量和分布有关,应选择较低的进给量、较低的磨削深度和适当较高的主轴转速,以获得较好的表面质量. Sun等^[7]在分析和实验研究的基础上,研究了犁耕和切屑成型,开发了DDS材料的新型分析力模型,与传统方法相比,该模型可以更准确地与实测结果吻合微研磨力模型.目前,微尺度磨削加工主要研究内容包括磨削力、表面粗糙度、磨削温度和磨削工艺参数优化等,但是对于磨削力的影响因素没有完善的研究.

本文通过对微磨削力理论模型的分析,得到了单个磨粒受到的磨削力公式.通过正交和单因素实验,分析磨削参数对磨削力影响的显著性,探究磨削参数、磨粒粒度、微磨具表面涂层对磨削力的影响规律以及不同种类高熵合金的磨削力对比情况,分析了粒度、磨削速度及磨削力对磨屑形貌的影响.分析高熵合金的微磨削加工性,能够推动高熵合金的加工工艺理论的建立,从而推进高熵合金的实际应用.

1 磨屑的形成机理

1.1 磨屑的形成机理

磨粒刀刃与工件表面材料发生作用时,在接触区域内刀刃对试件的表面施加了较大的摩擦力与法向力.直接接触区域产生塑性变形,同时在基体内部材料的抵抗作用下在塑性变形区与

基体间形成弹塑性变形区域,见图1中区域II,在塑性变形区内随着磨粒向前移动至材料边缘区,局部材料便会逃离基体的约束,形成磨屑.如果磨削深度进一步增大,塑性变形区也会扩大直至超出刀刃与试件表面材料的接触区域,材料则直接在刀刃运动前方溢出形成磨屑.

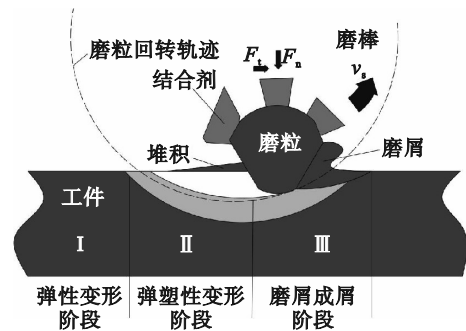


图1 单颗磨粒与工件表面间的相互作用

Fig. 1 Interaction between a single abrasive particle and the workpiece surface

微尺度磨削的材料去除量极少,移除材料的厚度和刀刃角半径的大小处在同一数量级,因此磨屑形成的过程不可忽视刀刃角半径的影响^[8].传统磨削中认为切削层材料和基体材料于刀尖点处分离,在剪切面滑移而生成切屑的理论不适合直接应用在微尺度磨削加工中^[9].需要涉及到最小切削厚度这个概念,即当磨粒的实际切深大于某一个临界值的情况下才会有切屑的生成,而微尺度磨削机理的研究就需要将影响到成屑的磨粒刃口半径考虑在内.磨粒刃角半径 R_p 对微磨削成屑的影响,在切深 a_p 大于等于最小切削厚度 a_{min} 的情况下才会有磨屑的生成.当切深 $a_p < a_{min}$ 时,磨粒经过切削层材料时只产生弹性变形并不会材料被切除,如图2a所示;在 $a_p \approx a_{min}$ 时,工件表层材料被磨粒挤压产生塑性变形区,并在刀具的剪切作用下形成磨屑,但这时的弹性变形量很大,如图2b所示,导致了实际切深与理论切深间有较大的数值差;如图2c所示,在 $a_p > a_{min}$ 时,磨屑受弹性变形的影响忽略不计,切深内的材料基本被磨粒去除形成磨屑.

通过分析发现最小切削厚度影响磨屑的形成,确定其数值大小对微磨削加工工艺的优化改善有极大的帮助作用. Yuan等^[10]考虑刀具锋利度、切削力和摩擦系数的影响后给出了一个简单解析表达式. Son等^[11-12]又提出新的最小切削厚度模型,其变量因素为刀具刃口半径和刀屑接触面之间的摩擦系数,如式(1)所示:

$$a_{\min} = R_n \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) \right]. \quad (1)$$

式中 β 是磨粒与工件材料摩擦时的摩擦角:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}. \quad (2)$$

其中 μ 为摩擦系数.通过式(1)可以推测出,要实现薄而稳定的磨削加工,可以增大磨刃与工件之间的粗糙程度,或提高刃口锋利程度.

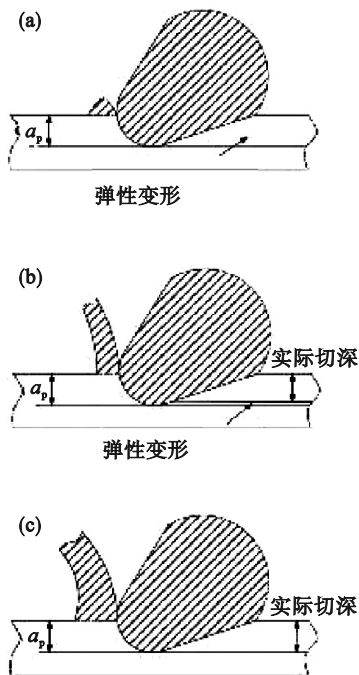


图2 最小切削厚度效应

Fig. 2 Minimum cutting thickness effect

(a)— $a_p < a_{\min}$; (b)— $a_p \approx a_{\min}$; (c)— $a_p > a_{\min}$.

微磨削加工过程中的磨粒与工件间的相互作用有下述几种状况:切深过小,磨粒仅在工件表面间造成弹性变形;切深 a_p 小于 a_{\min} 时,磨粒挤压和犁型工件表面材料产生犁沟与隆起;切深 $a_p \geq a_{\min}$,磨粒磨削工件表面材料生成磨屑.

微磨削在加工不同类型的材料时,生成的磨屑形态存在着差异,磨屑形态一般有以下几种:带状、锯齿形、单元磨屑和崩碎磨屑.本文实验用的高熵合金为塑性材料,塑性材料的磨屑通常呈带状或锯齿状.

1.2 磨屑的形貌分析

微磨具上的磨粒尺寸不一且分布不均匀,所以磨粒在微磨具表面突出高度具有很大差异,在相同加工参数下产生的磨屑形状各不相同,本文在同一加工参数下分析500#和200#两种粒度微磨具磨削时产生的磨屑形貌.500#微磨具磨削时产生的磨屑如图3所示,从图中可以看出,大多为

长且窄的细小碎屑,磨屑的尺寸集中分布在长约10~30 μm ,宽约3~5 μm 的范围内,此外,还生成一部分尺寸比较大的块状磨屑,图中最大的一块磨屑尺寸长约50 μm ,宽约20 μm .200#微磨具磨削时产生的磨屑如图4示,从图中可以看出,磨屑的尺寸集中分布在长约45~70 μm ,宽约10~15 μm 的范围内,生成的较大的磨屑形态不一,磨削过程中产生了锯齿形条状磨屑、片状磨屑以及块状磨屑.分析原因,由于不规则形状的磨粒和磨粒在磨具电镀层上镶嵌位置及方位角的随机性,使磨削过程中既存在锐角磨削又存在钝角磨削.当磨粒上的磨刃以正前角磨削时,磨刃比较锋利,最小磨削深度较小,因此产生非常薄的片状磨屑;当磨粒上的磨刃以较大的负前角磨削时,磨刃变钝,刃角半径的增大使最小磨削深度变大,因此产生较厚的块状磨屑.

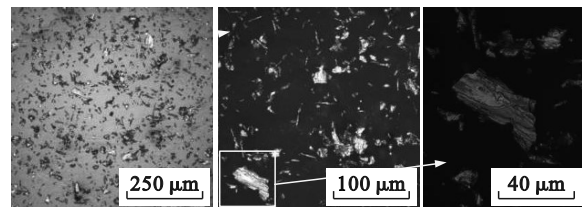


图3 500#微磨具产生的磨屑

Fig. 3 500# microabrasives produced abrasive debris

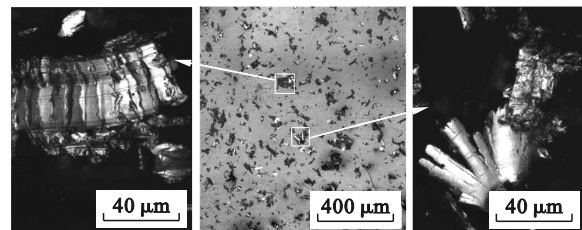


图4 200#微磨具产生的磨屑

Fig. 4 200# microabrasives produced abrasive debris

高熵合金微磨削加工时产生的磨屑大多为锯齿形磨屑,本文用共焦显微镜观察不同磨削速度时产生的锯齿状磨屑的特征.磨屑形貌如图5所示,磨削速度对磨屑节距的影响如图6所示,从图中可以看出,锯齿状磨屑的节距发生了较为明显的变化,用共焦显微镜测量连续均匀的3个锯齿块的长度,随着磨削速度的提高,节距逐渐降低,且在低速范围内,磨屑的锯齿节距明显比高速范围内下降得快.分析原因,在 $\text{FeCoNiCrAl}_{0.1}$ 高熵合金的微磨削过程中,随着速度的提高,单位时间内有更多的磨粒参与到磨削过程中,磨粒对工件做功增大,剪切面的塑性应变率增大,产

生更多热量并积聚在一处,使剪切面上的绝热剪切发生频率显著提高,且速度的增加减小了未变形切削厚度,进一步加强了锯齿化程度.

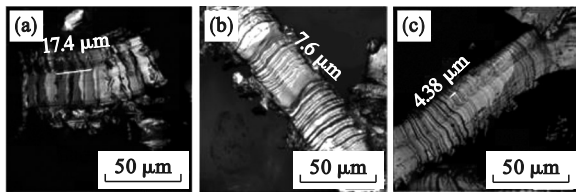


图 5 不同磨削速度下的磨屑形貌

Fig. 5 Debris morphology at different grinding speeds (a)— $v_s=0.942$ m/s; (b)— $v_s=1.885$ m/s; (c)— $v_s=2.827$ m/s.

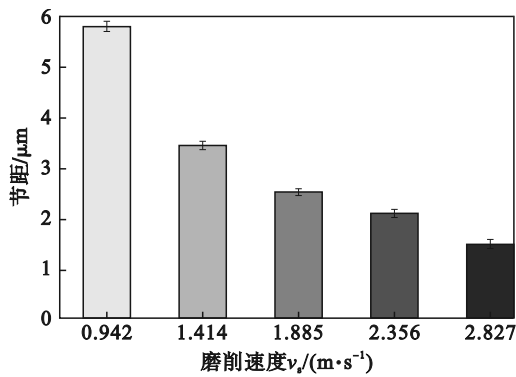


图 6 磨削速度对磨屑节距的影响

Fig. 6 Effect of grinding speed on chip pitch

2 高熵合金微磨削力的理论模型及实验研究

2.1 磨削力的理论

微磨削过程是许多磨粒相互作用的累积输出,所以建立单个磨粒与工件间的相互作用模型有利于进一步了解磨削机理,磨削过程示意图如图 7 所示. Park 等^[13]将磨粒形状视为球形,在此基础上推导出了单颗磨粒磨削力公式,单个磨粒相互作用模型,在微加工领域,微切削机制可通过将 Merchant 模型^[14]应用于每一个无穷小单元来表示,微磨削力的模型如图 8 所示.

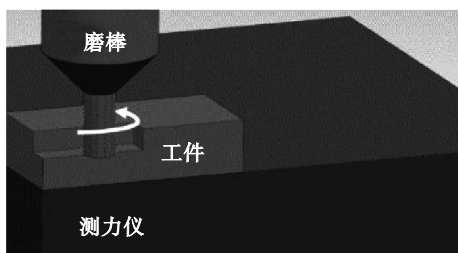


图 7 磨削过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of grinding process

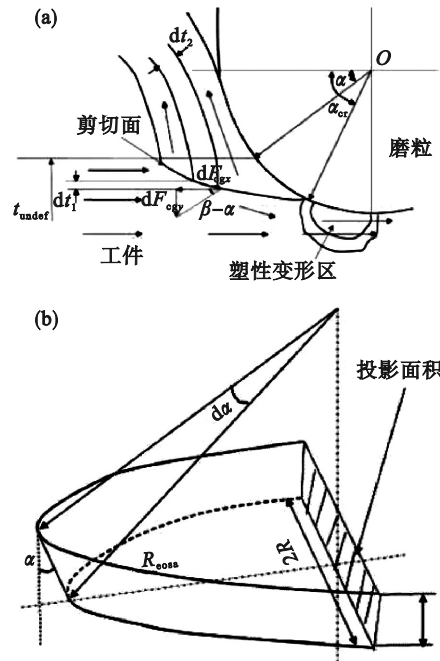


图 8 球形磨粒的磨削力建模

Fig. 8 Modeling of grinding force for sphere abrasive (a)—单个磨粒相互作用模型; (b)—球形磨粒结构.

未变形切屑厚度单元 dt_1 在对应的局部前角位置被切削,单元内材料的切向力增量可以表示为

$$dF_{cg,x} = \frac{\tau_s \cos(\beta_i - \alpha_i)}{\sin\phi_i \cos(\phi_i + \beta_i - \alpha_i)} dt_1. \quad (3)$$

式中: τ_s 是材料的剪切强度; β_i 是瞬时摩擦角; α_i 是瞬时前角; ϕ_i 是剪切角. 如图 8b 所示,将模型扩展至三维并对其积分,可以得到单个磨粒的切向切屑形成力:

$$F_{cg,x} = \int_{\alpha_c}^{\alpha_s} \frac{\tau_s \cos(\beta_i - \alpha_i)}{\sin\phi_i \cos(\phi_i + \beta_i - \alpha_i)} 2R^2 \cos^2 \alpha_i d\alpha_i. \quad (4)$$

同样根据图 8a 中的关系,可以得到单个磨粒的法向切屑形成力:

$$F_{cg,y} = \int_{\alpha_c}^{\alpha_s} \frac{\tau_s \sin(\beta_i - \alpha_i)}{\sin\phi_i \cos(\phi_i + \beta_i - \alpha_i)} 2R^2 \cos^2 \alpha_i d\alpha_i. \quad (5)$$

最小切屑厚度以下的工件材料在微磨削过程中会出现不同的现象. 在这个区域,工件在磨粒的前面发生塑性变形,没有形成磨屑. 这种情况类似于球形压痕过程^[11]. 布氏硬度值 HB 被定义为载荷 $F_{brinell}$ 与压痕弯曲面积的比值:

$$HB = \frac{2F_{brinell}}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (6)$$

式中: D 为压头直径; d 为压痕平均直径.

在这一分析中,作用在 α_c 方向上相对于法向的压痕力归因于犁削力,相对的运动也存在摩擦

作用.将压痕效应与摩擦作用相结合估算单颗磨粒的切向和法向犁削力:

$$F_{pg,y} = F_{brinell}(\sin\alpha + \mu_p \cos\alpha), \quad (7)$$

$$F_{pg,x} = F_{brinell}(\cos\alpha - \mu_p \sin\alpha). \quad (8)$$

式中, μ_p 为犁削时的摩擦系数, 可表示为^[15]

$$\mu_p = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{w}{2R} \right)^{-2} \sin^{-1} \left(\frac{w}{2R} \right) \left(\left(\frac{w}{2R} \right)^{-2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (9)$$

Cheng 等^[16]将单个磨粒的形状简化成圆柱台, 如图 9a 所示.

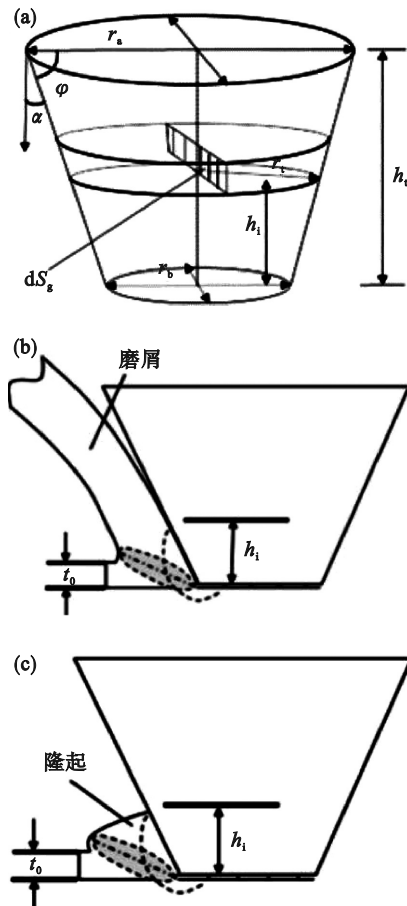


图 9 圆锥形磨粒的磨削力建模

Fig. 9 Grinding force modeling of conical grinding particles

- (a) 磨粒的形状和结构;
- (b) 一屑交互模型;
- (c) 一犁交互模型.

如图 9b 所示, 当磨粒的切削深度大于最小切削厚度时, 产生切屑, 单个磨粒受到的磨削力为

$$F_{cx} = \int_0^{h_m} \frac{\tau_s \cos(\beta_i - \alpha_i)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_i}{2} + \frac{\alpha_i}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta_i}{2} - \frac{\alpha_i}{2}\right)} 2 \left[r_a - \frac{h_i(r_a - r_b)}{h_t} \right] dh, \quad (10)$$

$$F_{cy} = \int_0^{h_m} \frac{\tau_s \sin(\beta_i - \alpha_i)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_i}{2} + \frac{\alpha_i}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta_i}{2} - \frac{\alpha_i}{2}\right)} 2 \left[r_a - \frac{h_i(r_a - r_b)}{h_t} \right] dh. \quad (11)$$

如图 9c 所示, 在磨粒的切削深度低于最小切削厚度时, 磨粒只在表面耕犁和滑擦, 并不产生磨屑, 此时, 单个磨粒受到的磨削力为

$$F_{px} = F_{cx} + \int_0^{h_m} \sigma_c \mu_p \cos(\beta_i - \alpha_i) 2 \left[r_a - \frac{h_i(r_a - r_b)}{h_t} \right] dh, \quad (12)$$

$$F_{py} = F_{cy} + \int_0^{h_m} \sigma_c \mu_p \sin(\beta_i - \alpha_i) 2 \left[r_a - \frac{h_i(r_a - r_b)}{h_t} \right] dh. \quad (13)$$

2.2 实验材料及设备

实验材料为铸态 FeCoNiCrAl_{0.1}, FeCoNiCrAl_{0.5} 和 FeCoNiAlMo_{0.2} 高熵合金. 加工设备为 JX-1A 精密磨削机床, 如图 10 所示, 其最高主轴转速可达 60 000 r/min. 磨削力检测设备为 MEFC-K3D60 三轴测力仪, 如图 11 所示. 实验采用的 CBN 微磨具如图 12 所示, 磨头直径 $d=0.9$ mm, 磨粒粒度分别为 200# 和 500#, 部分 500# 微磨具上涂覆有 TiC 涂层.

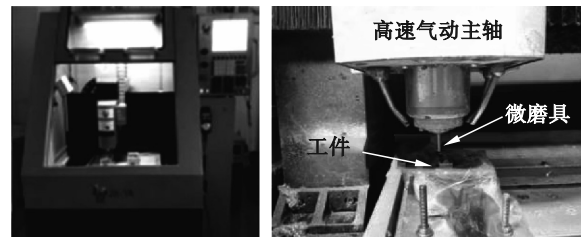


图 10 JX-1A 精密磨削磨床

Fig. 10 JX-1A precision grinder

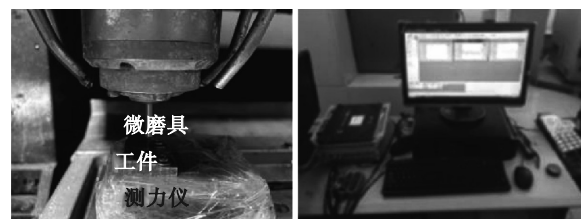


图 11 磨削力信号测试系统

Fig. 11 Grinding force signal testing system

2.3 实验方案

本文设计三因素五水平 $L_{25}(5^3)$ 微磨削正交实验, 分析加工参数对高熵合金微磨削力的影响规律, 正交实验方案如表 1 所示. 然后设计单因素

实验,研究单一因素对高熵合金微磨削力的影响规律,单因素实验方案如表 2 所示.本实验在每个磨削参数组合下进行 3 次重复实验,采用平均值作为微磨削力变化规律的有效绘图数据.

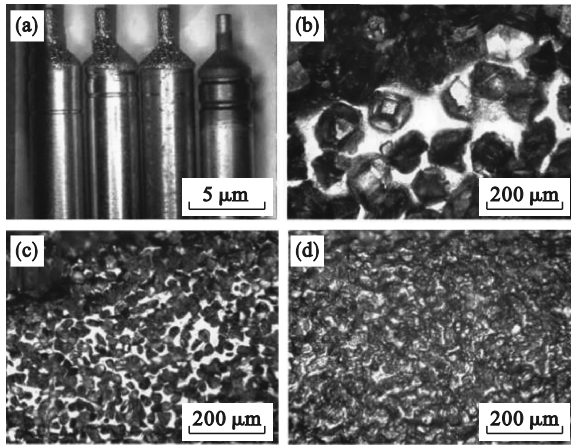


图 12 微磨具及其表面形貌图

Fig. 12 Microabrasive tool topography
(a)—微磨具; (b)—500#磨粒形貌;
(c)—200#磨粒形貌; (d)—500#涂层形貌.

表 1 正交实验方案

Table 1 Orthogonal experiment scheme

因素	水平				
	1	2	3	4	5
$v_s/(m \cdot s^{-1})$	0.942	1.414	1.885	2.356	2.827
$v_w/(\mu m \cdot s^{-1})$	20	40	70	100	200
$a_p/\mu m$	3	6	9	12	15

表 2 单因素微磨削实验方案

Table 2 Single factor micro-grinding test scheme

编号	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_w/(\mu m \cdot s^{-1})$	$a_p/\mu m$
1	0.942, 1.414, 1.885, 2.356, 2.827	70	9
2	1.414	20, 40, 70, 100, 200	9
3	1.414	70	3, 6, 9, 12, 15

3 微磨削实验结果分析

3.1 正交实验结果分析

根据正交实验数据绘制 FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金磨削力的极差图与方差图,分别如图 13 和 14 所示.从图中可知,极差、方差最大的是进给速度,最小的是磨削深度.因此,FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金在磨削加工中,磨削参数对磨削力的影响由大到小的顺序为:进给速度对磨削力的影响最大,磨削深度对磨削力的影响最小.

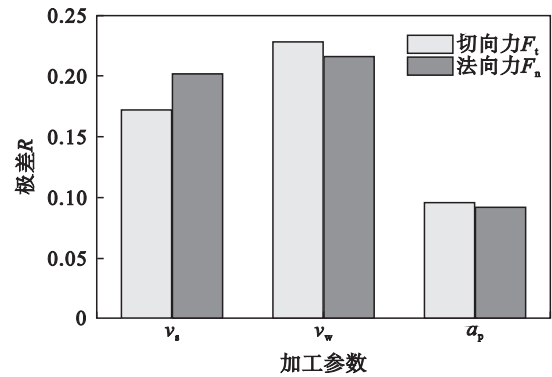


图 13 微磨削力极差图

Fig. 13 Micro-grinding force range diagram

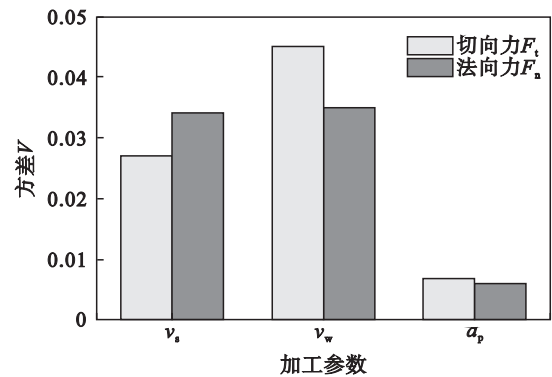


图 14 微磨削力方差图

Fig. 14 Micro-grinding force variance diagram

3.2 磨削参数对磨削力的影响规律

磨削速度对磨削力影响的实验结果如图 15 所示,磨削深度为 9 μm ,进给速度为 70 $\mu m/s$,从图中可以看出,切向磨削力和法向磨削力都随磨削速度增大而减小,切向力 F_t 下降至 0.141 N,降低了 41.72%;法向力 F_n 下降至 0.214 N,降低了 53.23%.这是因为磨削速度增加使工件材料的塑性变形程度加剧,塑性应变率显著提高,磨粒和切削材料接触面上的摩擦程度加剧,这些变化导致了磨削温度的提高,材料屈服应力降低,同时速度的增加导致单颗磨粒磨削的最大未变形切削厚度 h_m 值明显减小,单颗磨粒磨削受到的力变小,也导致总的磨削力减小.

磨削深度对磨削力影响的实验结果如图 16 所示,磨削速度为 1.414 m/s,进给速度为 70 $\mu m/s$,由图可知,高熵合金的切向和法向磨削力都随着磨削深度的增加而变大,切向力 F_t 上升至 0.294 N,上升了 78.18%,法向力 F_n 上升至 0.324 N,上升了 23.66%.这是因为磨削深度变大提高了单位时间内磨削去除材料的体积,单颗磨粒磨削时的最大未变形切削厚度也相应增加,增大了单颗磨粒的磨削力,导致总的磨削力增大.

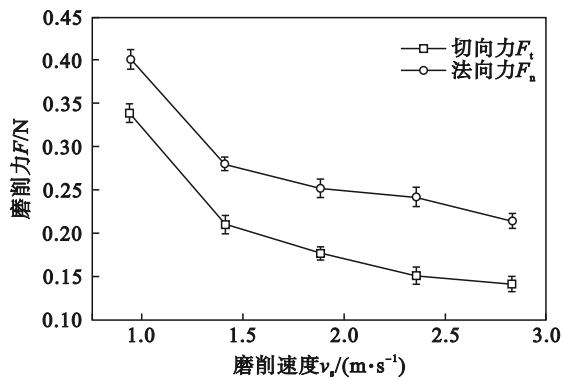


图 15 磨削速度对磨削力的影响

Fig. 15 Effect of grinding speed on grinding force

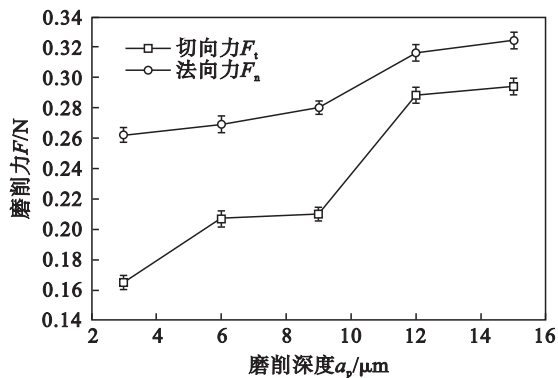


图 16 磨削深度对磨削力的影响

Fig. 16 Effect of grinding depth on grinding force

图 17 是在磨削速度为 1.414 m/s, 磨削深度为 9 μm 的条件下, 进给速度变化对磨削力的影响. 从图中可以看出, 随着进给速度的增大, 切向力和法向力都有明显增大, 分别上升了 50% 和 56.33%. 这是因为增大进给速度导致单位时间内磨削去除材料的体积增大, 磨削过程中每颗磨粒未变形的最大切削厚度也随之增加. 因此, 单颗磨粒磨削时受到的力也相应增大, 导致总的磨削力增大.

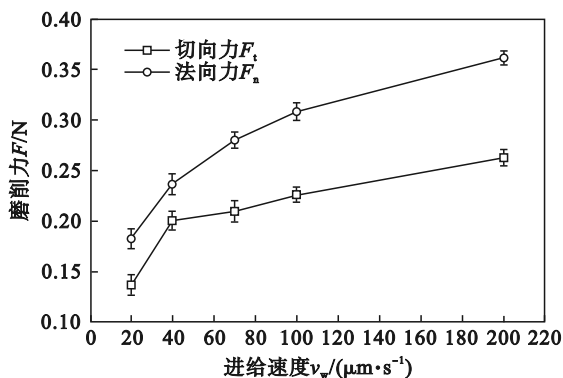


图 17 进给速度对磨削力的影响

Fig. 17 Effect of feed speed on grinding force

3.3 涂层对磨削力的影响

不同进给速度下涂层对磨削力的影响如图 18

所示, 由图可看出, 随着进给速度的增加, 无涂层微磨具切向磨削力增加到 0.263 N, 法向磨削力增加到 0.361 N, 涂层微磨具切向磨削力增加到 0.278 N, 法向力增加到 0.538 N. 当微磨具表面涂覆涂层时, 切向磨削力比无涂层的要小, 法向磨削力大于无涂层的法向磨削力, 这是因为磨粒涂层的覆盖作用, 降低了磨削接触区的摩擦系数, 减小了磨削阻力, 且在加工参数较小的情况下作用显著, 但同样由于涂层的涂覆作用, 使磨刃变钝, 磨粒间的排屑空间减小, 滑擦抛光现象显著, 增大了磨削阻力, 且在加工参数较大的情况下作用愈加显著.

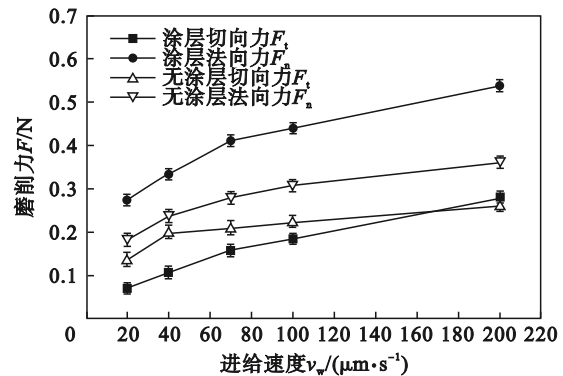


图 18 不同进给速度下涂层对磨削力的影响

Fig. 18 Effect of coating on grinding force at different feed speeds

图 19 为不同磨削速度下涂层对磨削力的影响, 由图可以看出, 随着磨削速度的增加, 无涂层微磨具切向磨削力减小到 0.141 N, 法向力减小到 0.214 N, 涂层微磨具切向力减小到 0.101 N, 法向力减小到 0.163 N. 涂覆涂层的切向磨削力小于没有涂层的, 涂覆涂层的法向力大于无涂层的, 涂覆涂层的法向磨削力有较大的变化幅度, 这是因为磨粒由于涂层的覆盖作用, 降低了磨削接触区的摩擦系数, 减小了磨削阻力, 且在加工参数较小的情况下作用显著, 但同样由于涂层的涂覆作用, 使磨刃变钝, 磨粒间的排屑空间减小, 滑擦抛光现象显著, 增大了磨削阻力, 且在加工参数较大的情况下作用愈加显著.

3.4 不同材料对磨削力的影响

不同磨削速度下不同材料对磨削力的影响如图 20 所示. 由图可以看出, 对于切向力 F_t , 3 种高熵合金分别减小至 0.141, 0.188, 0.146 N. 对于法向力 F_n , 分别减小到 0.214, 0.266, 0.470 N. 整体上 FeCoNiCrAl_{0.5} 高熵合金磨削力大于 FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金磨削力, 这是因为 Al 的增加导致高熵合金内部晶格畸变程度加剧, 显著地

提高了材料的硬度,同时也使材料的强度增加,磨粒需要更大的力去抵抗材料变形产生的切削抗力,从而导致整体磨削力增大. FeCoNiAlMo_{0.2}高熵合金磨削力大于 FeCoNiCrAl_{0.5}高熵合金磨削力. Mo原子半径较大,晶体间的固溶强化及晶格畸变作用,增大了bcc结构的晶格常数,合金硬度、强度及塑性有很大提升,因此加入 Mo后法向和切向磨削力也呈现出较为明显的上升趋势.

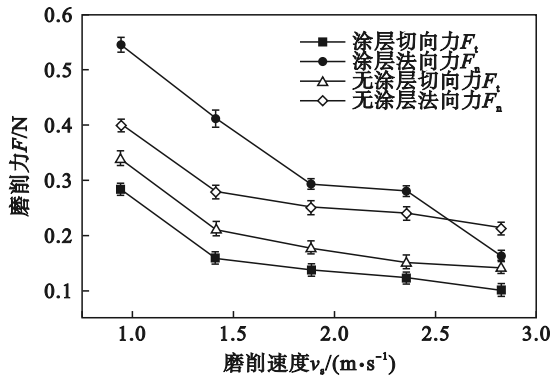


图 19 磨削速度改变时涂层对磨削力的影响
Fig. 19 Effect of coating on grinding force when grinding speed changes

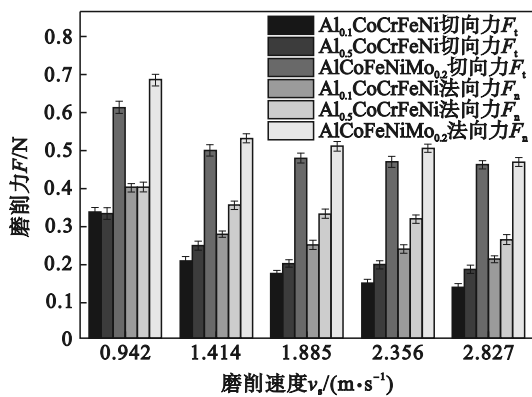


图 20 不同材料对磨削力的影响
Fig. 20 Influence of different materials on grinding force

3.5 粒度对磨削力的影响

图 21 为不同磨削速度下磨粒粒度对磨削力的影响,随着磨削速度的增加,500#磨棒切向力减小了 58.28%,法向力减小了 46.77%. 200#磨棒切向力减小了 55.88%,法向力减小了 59.865%.当粒度减小时,磨粒表面密度减小,有效磨粒之间的间距增大,磨粒间间隙增大,磨削排屑空间增大,加大了单颗磨粒受到的力,可以看出 200#的磨削力小于 500#的磨削力,这是因为排屑空间增大而导致磨削力减小的作用大于单颗磨粒受力增大的作用.

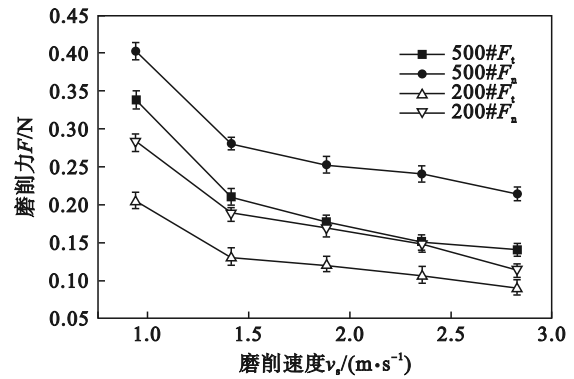


图 21 磨削速度改变时粒度对磨削力的影响
Fig. 21 Influence of grain size on grinding force when grinding speed changes

不同进给速度下磨粒粒度对磨削力的影响如图 22 所示,随着进给速度增加,200#磨棒切向力增大了 63.44%,法向力增大了 44.85%. 500#磨棒切向力增大了 47.91%,法向力增大了 49.31%.这是因为当粒度减小时,磨粒表面密度减小,有效磨粒之间的间距增大,磨粒间间隙增大,磨削排屑空间增大,加大了单颗磨粒受到的力,可以看出 200#的磨削力小于 500#的磨削力,这是因为排屑空间增大而导致磨削力减小的作用大于单颗磨粒受力增大的作用;晶粒度小,材料的强度和硬度都高,磨削过程中材料去除所需要的能量大,会引起磨削力增大.

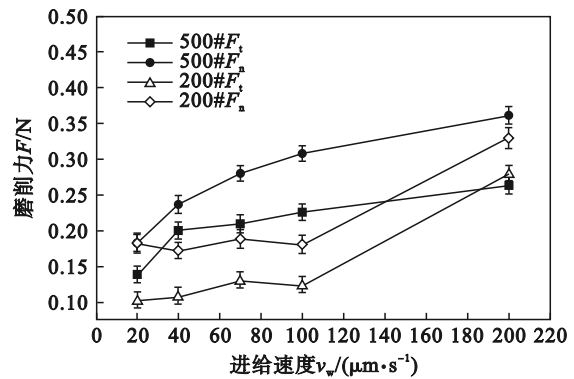


图 22 进给速度改变时粒度对磨削力的影响
Fig. 22 Influence of grain size on grinding force when feed speed changes

3.6 磨屑大小与磨削力的关系

不同粒度的磨粒在同一参数下产生的力对磨屑的影响如图 23 所示,由图可以看出,磨粒粒度越大磨粒越小,磨削力越大,产生的磨屑越小,200#磨粒磨削时产生的磨屑大小平均为 57.5 μm ,500#磨粒磨削时产生的磨屑大小平均为 20 μm .分析原因,磨削力越大,最大未变形切削厚度越小,材料剪切去除所需要的能量越少,剪切滑移

程度加剧,而磨粒越小,磨粒越锋利,越容易使材料发生断裂,产生的磨屑较小.

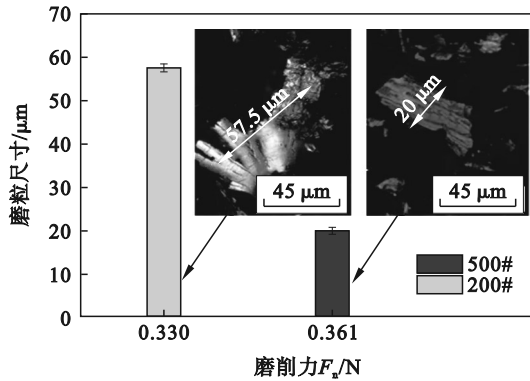


图 23 不同粒度下磨削力对磨屑的影响

Fig. 23 Influence of grinding force on grinding chips at different particle sizes

图 24 为不同磨削速度产生的力对磨屑的影响,从图中可以看出,随着磨削速度的增加,磨削力从 0.525 N 减小到 0.256 N,相应的磨屑节距从 5.8 μm 减小到 1.52 μm . 分析原因,随着磨削速度的增加,磨削力增大,材料应变率大幅提高,从而绝热剪切效应更明显,使材料的“热软化作用”更加明显,剪切滑移的约束力降低,所以产生的磨屑节距更小.

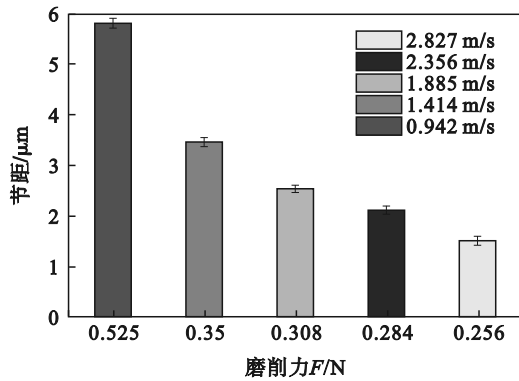


图 24 不同磨削速度下磨削力对磨屑的影响

Fig. 24 Influence of grinding force on grinding chips at different grinding speeds

3.7 磨削力实验结果与理论值对比

图 25 为微磨削 FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金过程中磨削力在不同磨削速度下的实验值与理论值的对比,由图可知,当磨削速度改变时,磨削力的理论计算值与实验测量值在变化趋势上是相同的,都随磨削速度增大而减小,在磨削速度为 1.414 m/s 时理论值与实验值的误差最小,切向力误差为 0.47%,法向力误差为 9.68%. 综上分析,实验测得的磨削力与理论值变化趋势一致,本文所建立模型可以很好反映微磨削加工参数变化造

成的微磨削力的变化.

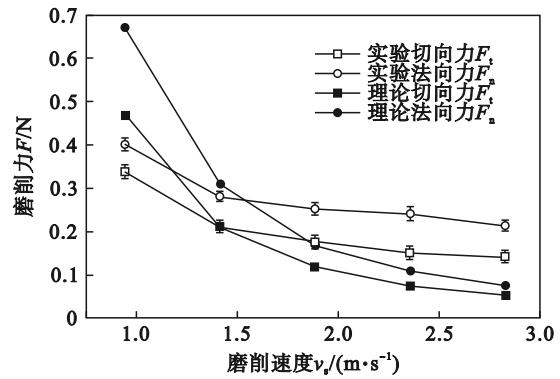


图 25 不同磨削速度下实验值与理论值的对比

Fig. 25 Comparison of experimental and theoretical values at different grinding speeds

4 结 论

1) 微磨削力与磨削速度呈负相关,与进给速度和磨削深度呈正相关. 经验证,磨削力的理论计算值与实验测量值之间误差较小,在变化趋势上一致.

2) 在同一加工参数下使用涂层微磨具时, FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金所受切向微磨削力比未涂层的小,最大相差 0.177 N,法向微磨削力比未涂层的大,最大相差 0.094 N.

3) 在相同磨削条件下磨削时, FeCoNiCrAl_{0.5} 高熵合金所受微磨削力大于 FeCoNiCrAl_{0.1} 高熵合金所受微磨削力, FeCoNiAlMo_{0.2} 高熵合金所受微磨削力大于 FeCoNiCrAl_{0.5} 高熵合金所受微磨削力.

4) 在相同磨削条件下对 FeCoNiCrAl_{0.1} 进行磨削时,使用 500# 磨粒磨棒工件所受磨削力与使用 200# 磨粒磨棒工件所受磨削力数值变化趋势基本一致. 使用 500# 磨粒磨棒磨削时,磨削速度增大得到的锯齿状磨屑节距变小,所受微磨削力减小.

参考文献:

[1] Arif Z U, Khalid M Y, Ur Rehman E, et al. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 225-273.

[2] Li P, Chen S Y, Jin T, et al. Machining behaviors of glass-ceramics in multi-step high-speed grinding: grinding parameter effects and optimization[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4): 4659-4673.

[3] Adibi H, Jamaati F, Rahimi A. Analytical simulation of grinding forces based on the micro-mechanisms of cutting between grain-workpiece [J]. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(7):4781-4801.
- [4] Gao Q, Guo G Y, Wang Q Z. Study on micro-grinding mechanism and surface quality of high-volume fraction SiC_p/Al composites [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(7):2885-2894.
- [5] Zhou Y G, Wen X L, Yin G Q, et al. Study on theoretical model of roughness and wear of the microgrinding tool in microgrinding nickel-based single crystal superalloy [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(6):317.
- [6] Zhao X, Gong Y D, Liang G Q, et al. Face grinding surface quality of high volume fraction SiC_p/Al composite materials [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1):3.
- [7] Sun Y, Su Z P, Gong Y D, et al. Analytical and experimental study on micro-grinding surface-generated mechanism of DD5 single-crystal superalloy using micro-diamond pencil grinding tool [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21:1-22.
- [8] 蒋放, 王西彬, 刘志兵. 微细切削的尺度效应研究 [J]. *工具技术*, 2004(8):6-9.
(Jiang Fang, Wang Xi-bin, Liu Zhi-bing. Study on scale effect of micro cutting [J]. *Tool Technology*, 2004(8):6-9.)
- [9] 周泽华. 金属切削原理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984:220.
(Zhou Ze-hua. Principles of metal cutting [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984:220.)
- [10] Yuan Z J, Zhou M, Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62(4):327-330.
- [11] Son S M, Lim H S, Ahn J H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(4):529-535.
- [12] Son S M, Lim H S, Ahn J H. The effect of vibration cutting on minimum cutting thickness [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(15):2066-2072.
- [13] Park H W. Development of micro-grinding mechanics and machine tools [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [14] Liu K, Li X P. Ductile cutting of tungsten carbide [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1):348-354.
- [15] Goddard J, Wilman H. A theory of friction and wear during the abrasion of metals [J]. *Wear*, 1962, 5(2):114-135.
- [16] Cheng J, Gong Y D. Experimental study of surface generation and force modeling in micro-grinding of single crystal silicon considering crystallographic effects [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 77:1-15.