

# 不同铝基体 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料切削力与刀具的磨损研究

段春争,冯占,孙伟,傅程

大连理工大学

**摘要:** 对不同增强相体分比、颗粒尺寸和基体材料的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行切削试验,分析了铝基体材料和颗粒尺寸对高、低增强相体分比  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料切削力的影响。针对  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料切削力的复杂性,提出用分形维数的方法定量描述切削力波动的复杂程度。对不同铝基体  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行刀具磨损试验,研究铝基体对刀具磨损的影响。结果表明:随着增强相体分比和颗粒尺寸的增加,铝基体对切削力的影响减弱;随着增强相体分比增加,颗粒尺寸对于切削力影响有增大趋势;分形维数可以定量描述切削力波动性质,且  $\text{SiC}_p/6063\text{Al}$  切削力波动频率高于  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ ;相对于  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ ,切削  $\text{SiC}_p/6063\text{Al}$  时刀具前刀面粘附磨损加剧而颗粒磨损减少,刀具后刀面磨损程度相对较高。

**关键词:**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料;切削力;分形维数;刀具磨损

中图分类号: TG713;TG529;TH161

文献标志码: A

## Research on Cutting Force and Tool Wear of $\text{SiC}_p/\text{Al}$ Composite with Different Al Matrix

Duan Chunzheng, Feng Zhan, Sun Wei, Fu Cheng

**Abstract:**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  cutting experiment with different volume fraction ratio, particle size and Al matrix material is done. The different influences of matrix material and particle size on cutting force between PMMC with low and high volume fraction ratio is analyzed. In view of the complex fluctuation of cutting force of this material, the fractal dimension is proposed for quantitative description of fluctuation. A tool wear experiment made to study the influence of matrix material on tool wear. The results show that the influence of matrix materials to cutting force reduced and the influence of particle size increased with the increase of volume ratio of SiC. The fractal dimension can describe the extent of fluctuation. The fluctuation frequency of cutting force of  $\text{SiC}_p/6063\text{Al}$  is higher than  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ . Compared to  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ , the tool wear of rake face includes more adhesion wear and less particle wear when cutting  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ . The degree of tool wear of flank face is relatively high.

**Keywords:**  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composite; cutting force; fractal dimension; tool wear

## 1 引言

碳化硅颗粒增强铝基复合材料 ( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ) 具有重量轻、比强度和比刚度高、热膨胀系数低、热稳定性好、导热和导电性能好、耐磨及耐腐蚀性优异的特点,在先进武器系统、汽车、光学精密仪器、电子封装和体育用品等领域的应用前景十分广阔<sup>[1]</sup>。但高硬度增强相的加入导致  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料切削力不稳定,刀具磨损加剧,严重制约了该材料的广泛应用。赵永华<sup>[2]</sup> 对体分比 30%、颗粒尺寸  $5\mu\text{m}$  的  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  进行切削试验及模拟,发现随着切削速度提高切削力有明显下降趋势。周家林<sup>[3]</sup> 对增强相体分比 56% 的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料进行高速铣削试验后发现,随着铣削速度的提高铣削力先下降后上升,其原因归结为:随着切削路程增加,刀具磨损加

剧,切削力增大。谭柱华<sup>[4]</sup> 对不同增强相体分比  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料的动态力学特性进行研究,发现高、低增强相体分比材料的动态力学特性有明显差别。Li X. P. 等<sup>[5]</sup> 研究了  $\text{SiC}$  颗粒尺寸和增强相的比例对铝基复合材料切削加工特性的影响,发现随着颗粒尺寸和体分比的增加刀具磨损加剧。在刀具磨损方面,Ding X. 等<sup>[6]</sup> 发现 PCD 刀具最适合切削加工  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料,且其磨损形式为微量粘附磨损和磨粒磨损。

目前,国内外学者对  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料的切削力与刀具磨损已经进行了大量的研究工作。但主要集中在切削力大小方面,针对其波动性质的研究较少,且对铝基体、颗粒尺寸、增强相体分比对切削力的耦合影响还鲜有涉及。此外,关于铝基体对切削  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料时刀具磨损影响的研究也较少见。

本文对不同增强相体分比、铝基体及颗粒尺寸

的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行切削试验,研究各参数对切削力的耦合影响,为切削力的模型建立和仿真预测提供指导。提出利用分形维数定量描述切削力的波动性质,研究铝基体对切削力波动性质的影响。对 PCD 刀具车削不同铝基体 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时刀具的磨损形貌和磨损机理进行对比分析,研究铝基体对刀具磨损的影响。

## 2 试验条件与方案

采用 CA6140 机床,选用前角 5°、后角 7°、刀尖圆弧半径为 0.4mm 的 PCD 刀具对不同增强相体分比、颗粒尺寸、铝基体的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行切削试验,材料参数见表 1。使用 YDCB-III05 型三向压电石英测力仪测量切削力,采用工具显微镜和 FEI(Q45)电子显微镜对刀具磨损量和微观磨损形貌进行观察。

表 1 试验所用材料

铝基体	2024			6063		
增强相体分比(%)	30	40	50	30	40	50
颗粒尺寸(μm)	30,60	30,60	15,30,60	30,60	30,60	15,30,60

由表 2 可知,两种铝合金化学成分明显不同,因此其物理力学性质也存在明显差异。2024 铝合金的强度、导热性均优于 6063 铝合金,且在高温时仍能保持良好的力学性能。

表 2 2024 和 6063 铝合金化学成分 (wt%)

材料	Cu	Si	Mg	Zn	Ti
2024Al	3.8-4.9	0.5	1.2-1.8	0.25	0.15
6063Al	0.1	0.2-0.6	0.45-0.9	0.10	0.10

## 3 切削力分析

### 3.1 材料参数对切削力的耦合影响

为研究铝基体、颗粒尺寸、增强相体分比对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力的耦合影响,对颗粒尺寸分别为 30μm、60μm,增强相体分比分别为 30%、40%、50%,铝基体分别为 2024、6063 铝合金的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行切削试验,切削速度 120m/s,进给量 0.1mm/rev。图 1、图 2 分别是不同增强相体分比的铝基体和颗粒尺寸对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力的影响程度。其中,铝基体和颗粒尺寸对切削力影响程度分别用  $f_{Al}$  和  $f_d$  表示,计算公式为

$$f_{Al} = \left| \frac{F_{z2024} - F_{z6063}}{F_{z2024}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$f_d = \left| \frac{F_{z60} - F_{z30}}{F_{z30}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

由图 1 可知,随着增强相体分比的增加,铝基体

对切削力的影响显著减弱。这是因为切削低增强相体分比的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时,铝基体的强度和塑性是影响位错能否绕过 SiC 颗粒的主要因素,因此对切削力影响较大;而切削高增强相体分比的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时,材料承受切削力的形式是颗粒和颗粒间组成的网状结构,铝基体对切削力的影响变小。

通过对两种颗粒尺寸下铝基体对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力影响程度的对比发现,随着颗粒尺寸的增加,铝基体对切削力影响明显减弱。这是因为随着颗粒尺寸增加, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削过程中的剪切机制发生变化:由位错绕过增强颗粒造成微裂纹后失稳扩展的切削机制发展为颗粒与颗粒间挤裂形成初始裂纹后失稳扩展的切削机制。因此,随着颗粒尺寸的增加,铝基体对切削力的影响减弱。对于增强相体分比 50%、颗粒尺寸 60μm 的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,铝基体对切削力的影响基本可以忽略不计。

由图 2 可知,随着增强相体分比增加,颗粒尺寸对切削力的影响有着增加趋势。这是因为在低体分比时,切削力由基体材料中位错绕过增强颗粒的能力来决定。随着增强相体分比增加, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料由颗粒与颗粒间形成的网状结构承受载荷,故颗粒尺寸对切削力影响程度有明显增大趋势。

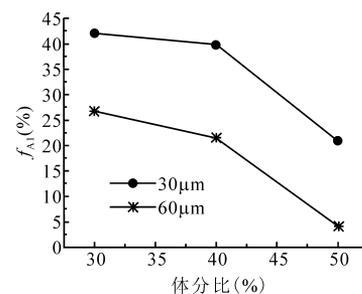


图 1 增强相体分比对  $f_{Al}$  的影响

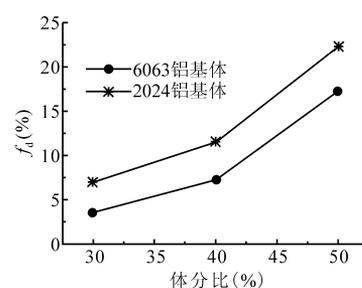


图 2 增强相体分比对  $f_d$  的影响

### 3.2 切削力波动情况分析

图 3 是 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力的功率谱图。由图可知,功率谱分布均匀,没有明显的旁瓣,因此很难定量描述切削力的波动情况。根据对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力的观察发现,切削力波动存在一定

的多尺度相似性,故引入分形维数来定量描述切削力的复杂程度。

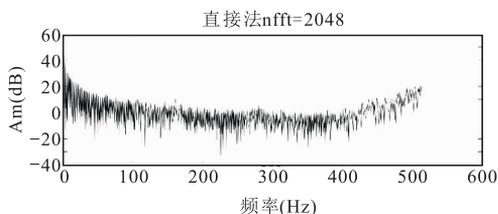


图3 切削力功率谱图

分形维数  $D$  是对具有无序性、自相似特性、自仿射特性和多尺度特征信号的复杂程度进行描述的统计参量。在  $N$  维空间中设一个集合,用边长为  $\varepsilon$  的  $N$  维体积元去覆盖这个集合,设相干涉的体积元数目为  $N(\varepsilon)$ ,则其数学表达式为<sup>[7]</sup>

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (3)$$

两边取对数得到分形维数为

$$D = \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (4)$$

根据 Aleksandar Kalauzi 等<sup>[8]</sup>对功率谱和分形维数关系的研究发现,当输入信号为谐波信号时分形维数与信号频率成正比。当输入信号为叠加的谐波信号时,分形维数为

$$D(y) \approx D\left(\sum_{i=1}^n y_i\right) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \varphi(f_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

式中,  $y_i$  为组成  $y$  的第  $i$  个信号;  $A_i$ 、 $f_i$  分别代表第  $i$  个信号的幅值和频率。因此,分形维数可以定量描述切削力信号的波动频率大小。

图4为增强相体分比50%、颗粒尺寸 $15\mu\text{m}$ 的 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料在不同切削速度下切削力的分形维数。由图可知, $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料的切削力分形维数均保持较大值,并随着切削速度增加增大,而以6063铝合金为基体的复合材料的切削力分形维数较大。作为一种两相材料, $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料铝基体和 $\text{SiC}$ 颗粒的力学性质存在明显差异,切削力波动较大,分形维数保持在较大值。随着切削速度增加,刀具碰上硬质颗粒的概率增大,分形维数有增大趋势。此外, $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料含有适量的 $\text{Ti}$ 元素,抑制了铝合金中 $\text{Mg}$ 等元素与增强颗粒的化学反应,明显提升了界面强度。界面强度的提升使得 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料界面、 $\text{SiC}$ 颗粒和铝基体的力学性能相差不大, $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料的切削力波动程度明显低于 $\text{SiC}_p/6063\text{Al}$ 复合材料,分形维数相对较小。

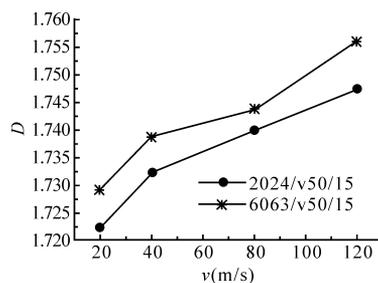


图4  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料切削力分形维数

## 4 刀具磨损

### 4.1 PCD 刀具前刀面磨损机理

图5为PCD刀具以切削速度 $40\text{m}/\text{min}$ 加工 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 时的刀具前刀面微观磨损形貌。可以发现,PCD刀具前刀面出现了大量磨粒磨损造成的划痕,这是磨粒磨损和化学磨损共同作用的结果<sup>[9]</sup>。在切削 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 过程中,刀具前刀面与切屑相接触。在2024铝合金中存在大量的 $\text{Cu}$ 元素,使得刀具表面的聚晶金刚石颗粒出现一定程度的石墨化,伴随着颗粒与前刀面之间出现的划擦作用,共同造成了刀具前刀面的划痕状磨损。在前刀面靠近切削刃的一段距离处,存在大量由聚晶金刚石颗粒剥离造成的坑洞。这是因为在切削过程中,距离主切削刃一段距离处刀具前刀面与切屑之间压力达到最大值,聚晶金刚石颗粒与切屑底部 $\text{SiC}$ 颗粒接触碰撞,从PCD刀具表面剥离并被切屑带走,从而在刀具前刀面形成了类似月牙洼状的磨损形态。同时,在主切削刃靠近刀尖处有崩刃现象存在。因为在切削 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料时,材料力学性质不均匀,造成切削力波动严重,使刀具承受了较大程度的冲击应力;在靠近刀尖处还存在很大的应力梯度和温度梯度,从而产生应力集中现象,这两种因素共同导致PCD刀具在靠近刀尖处出现崩刃现象。

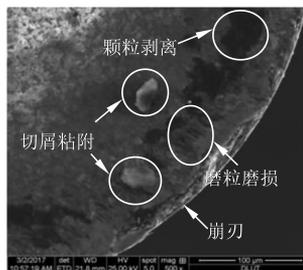


图5  $v=40\text{m}/\text{min}$  时  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  刀具的前刀面磨损

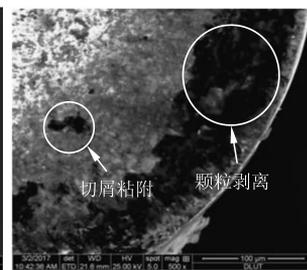


图6  $v=80\text{m}/\text{min}$  时  $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$  刀具的前刀面磨损

图6为PCD刀具以切削速度 $80\text{m}/\text{min}$ 加工 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 时的刀具前刀面微观磨损形貌。与图5对比发现,速度升高时,聚晶金刚石颗粒剥离的现

象加剧。这是因为随着切削速度增大, SiC 与聚晶金刚石颗粒碰撞更加剧烈, 使得金刚石颗粒更易被剥离, 在刀具前刀面形成更加严重的凹坑。

图 7 为 PCD 刀具以切削速度 80m/min 切削 SiC<sub>p</sub>/6063Al 时的刀具前刀面微观磨损形貌。与切削 SiC<sub>p</sub>/2024Al 时的刀具磨损形貌对比发现, 切屑粘附现象更为严重, 且存在微崩刃。因为 6063 铝合金对温度更加敏感, 随着温度升高, 铝基体软化更为严重, 容易发生切屑粘附现象。而 PCD 刀具前刀面磨粒磨损造成的划痕明显减少, 这是由于 6063 铝合金中 Cu 元素含量较少, 金刚石碳化现象减弱, 颗粒划擦造成的刀具表面划痕减少。由图 7b 可知, PCD 刀具前刀面上存在微裂纹, 随着刀具进一步切削, 微裂纹扩展, 这是造成 PCD 刀具破损的主要原因。

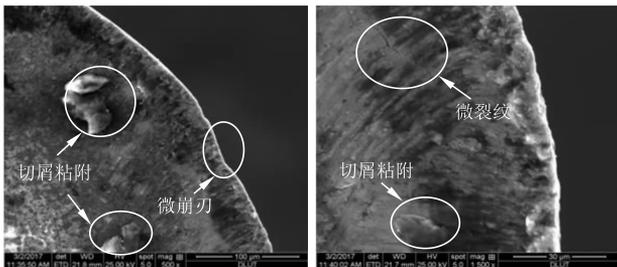


图 7  $v=80\text{m/min}$  时 SiC<sub>p</sub>/6063Al 刀具的前刀面磨损

#### 4.2 铝基体对刀具后刀面磨损的影响

图 8 为 PCD 刀具以切削速度 80m/min 加工 SiC<sub>p</sub>/6063Al 时的刀具后刀面微观磨损形貌。由图可知, 在加工 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时, PCD 刀具后刀面的磨损形式为磨粒磨损, 主要分布在靠近刀尖部位。

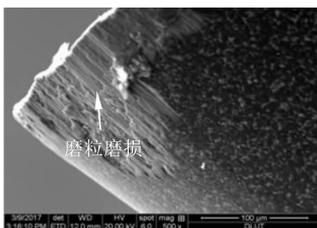


图 8 刀具后刀面磨损形貌

图 9 为切削路程为 350m 时 PCD 刀具切削不同铝基体 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的刀具后刀面磨损状况对比。由图可知, SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料刀具的后刀面磨损量高于 SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料。因为在切削过程中, 刀具后刀面磨损主要是由待加工表面上的 SiC 颗粒划擦刀具后刀面造成的。SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料中的铝基体对切削温度极其敏感, 当切削速度较高时铝基体软化, 导致刀具后刀面与 SiC 颗粒的接触概率增加, 后刀面磨损加剧。切削 SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料时切削力波动较严重, 也加剧了

PCD 刀具后刀面磨损。随着切削速度增大, PCD 刀具后刀面磨损加剧。因为随着切削速度增加, 刀具切削到硬质颗粒的概率增大, 切削力波动更加剧烈, 切削温度升高, 刀具后刀面磨损更为严重。

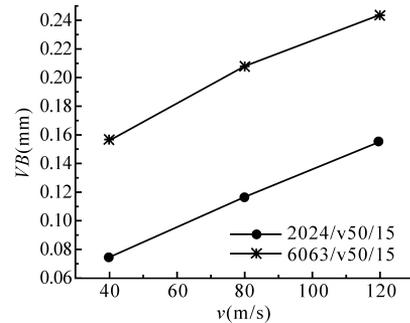


图 9 不同切削速度对刀具后刀面磨损影响

## 5 结语

(1) 随着增强相体分比、颗粒尺寸的增加, 铝基体对切削力的影响减弱。随着体分比增加, 颗粒尺寸对切削力的影响有增大趋势。研究表明, 颗粒尺寸、增强相体分比和铝基体对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削力有耦合影响机制。

(2) 相对于功率谱图, 分形维数能够定量描述 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的切削力波动剧烈程度。随着切削速度增加, 切削力分形维数有增大趋势。SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料的切削力分形维数大于 SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料。

(3) 加工 SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料时, 刀具前刀面磨粒磨损明显多于 SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料, 且切屑粘附较少。相对于 SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料, 加工 SiC<sub>p</sub>/6063Al 复合材料时刀具后刀面磨损更为剧烈。

## 参考文献

- [1] 桂满昌, 王殿斌, 张洪, 等. 颗粒增强铝基复合材料的制备及应用[J]. 材料导报, 1996, 11(3): 65-71.
- [2] 赵永华. SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料切削过程仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] 周家林. SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的高速切削机理研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [4] 谭柱华. 高体积分数金属基复合材料 SiC<sub>p</sub>/2024Al 动力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [5] Li X P, Seah W K H. Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites[J]. Wear, 2001, 247(2): 161-171.
- [6] Ding X, Liew W Y H, Liu X D. Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1225-1234.

# 7075 铝合金铣削残余应力及表面质量试验研究

刘启蒙, 许金凯, 于化东, 于占江, 李一全, 弯艳玲, 廉中旭

长春理工大学精密制造及检测技术国家地方联合工程实验室

**摘要:** 采用直径  $\phi 1$  的 4 刃硬质合金立铣刀(4HCE040110S04)对 7075 铝合金进行单因素铣槽试验, 研究已加工表面粗糙度、铣削表层残余应力以及槽底表面质量随切削参数的变化规律。通过试验得出以下结论: 随着切削速度  $v$  的增大, 槽底面粗糙度逐渐增大, 已加工窄槽表层残余应力逐渐减小, 毛刺与卷边增多; 随着进给速度的增大, 铣削的窄槽底面粗糙度逐渐增大, 已加工窄槽表层残余应力逐渐增大, 毛刺与卷边明显增多; 随着切削深度的增大, 铣削的窄槽底面表面粗糙度逐渐增大, 已加工窄槽表层残余应力逐渐增大, 毛刺与卷边增多; 铣削的窄槽底面两走刀路径之间存在明显的隆起。

**关键词:** 铝合金; 窄槽; 表面粗糙度; 残余应力

**中图分类号:** TG54; TH164

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Residual Stress and Surface Quality of 7075 Aluminum Alloy Milling

Liu Qimeng, Xu Jinkai, Yu Huadong, Yu Zhanjiang, Li Yiquan, Wan Yanling, Lian Zhongxu

**Abstract:** Through the 4 edges of cemented carbide cutter 1 diameter(4HCE040110S04) of 7075 Aluminum-alloy for single factor milling experiments, the machined surface roughness and milling surface residual stress and surface quality with the cutting parameters(the cutting speed, the feed rate and the cutting depth) changes are determined. The experiments following conclusions are below: with increase of the cutting speed, the groove bottom surface roughness increases, the narrow groove machined surface residual stress decreases gradually, and the edge burr increased; with increase of the feed speed, milling slot bottom surface of bottom surface roughness increases, the machined surface residual stress of the narrow groove force increases gradually, and the burr edge increased significantly; with increase of the cutting depth, cutting the narrow groove bottom surface roughness increases, the narrow groove machined surface residual stress increases gradually, and the edge burr increased; the bottom surface of the two narrow groove milling tool path between the apparent uplift, the reason is 7075 aluminum alloy soft material and the cutting width of large plastic flow caused by large effect on milling tool under the extrusion.

**Keywords:** aluminum alloy; narrow groove; surface roughness; residual stress

## 1 引言

微切削技术不仅可加工微小型结构零件, 还具有绿色生产前景。微切削技术现在还没有明确的概念, Masuzawa T.<sup>[1]</sup> 定义微切削中的“微”为“尺度非

常小且不易加工”, 但事实上微切削尺度范围会因技术发展不断变化。Subbiah S.<sup>[2]</sup> 认为微切削技术可以应用于加工微小型零部件产品, 或在大型零部件产品上加工出精密、超精密光滑表面。目前传统加工方式已经不能适应微小型零件的结构形状特异化、材料复合多样化、尺寸与表面质量高精度化的需要, 精密微切削技术成为机械微加工的重要方向<sup>[3]</sup>。其特征在于刀具微型化、加工尺度微纳米

基金项目: 国家自然科学基金(51275056)

收稿日期: 2017 年 4 月

[7] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: Freeman W H and Company, 1982.

[8] Aleksandar Kalauzi, Tijana Bojic, Aleksandra Vuckovic. Modeling the relationship between Higuchi's fractal dimension and Fourier spectra of physiological signals[J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2012(50): 689-699.

[9] 葛英飞, 徐九华, 杨辉, 等. SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料超精密

车削刀具磨损机理研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1293-1296.

第一作者: 段春争, 副教授, 大连理工大学机械工程学院, 116024 大连市

First Author: Duan Chunzheng, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China