

SiC_p/Al 复合材料高速铣削切削力模型建立^{*}

High-Speed Milling-Force Model for SiC_p/Al Composites

南京航空航天大学 边卫亮 傅玉灿 徐九华 张 帅
南京工程学院 葛英飞

[摘要] 使用聚晶金刚石(PCD)刀具并采用正交试验设计法,对含不同体分比的碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/2009Al)进行高速铣削试验。在测量切削力和切屑厚度的基础上,建立了剪切角、剪切应力和摩擦角的预测模型,并结合金属切削基本理论公式建立了切削力的预测模型。该模型包含铣削速度、每齿进给量、径向切宽、增强颗粒体分比等重要参数,模型对进给方向最大铣削力预测值的平均误差为5.9%,对铣刀径向切深方向最大铣削力预测值的平均误差为9.2%,皆高于普通经验公式的预测精度,从而可对SiC_p/2009Al复合材料高速铣削时的铣削力进行有效预测。

关键词: 颗粒增强铝基复合材料 高速铣削 铣削力模型 PCD 刀具

[ABSTRACT] High-speed milling tests are carried out on the SiC_p/Al composites with different volume fraction using PCD tools at dry machining condition by the method of orthogonal experiments design. Prediction model of shear angle, shear stress and frictional angle are established on the foundation of cutting forces and chip thickness measuring. The prediction model of milling-forces is also established according to the basic theory of metal cutting formula. This model contains the important parameters, such as cutting speed, feed rate, radial cutting width and volume fraction of SiC particle. Using this model, mean error of predictive value of maximum cutting force in the feed direction and in the radial cutting depth direction are 5.9% and 9.2%, respectively. The prediction accuracy is considerably higher than that of the traditional empirical formulas. Therefore, the newly established model can accurately predict the cutting forces when high-speed milling SiC_p/2009Al composites.

Keywords: Particle reinforced aluminum composites High speed milling Milling force model PCD tool

碳化硅颗粒增强铝基(SiC_p/Al)复合材料兼具金属与非金属的综合性能,与传统的金属相比,具有高比强度、高比模量、耐磨、导电/导热性好、抗辐射、热膨胀系数低等性能,目前已成为发达国家争夺高新技术优势的热点之一,并作为先进复合材料将逐步取代部分传统的金属材料而应用于航空航天、汽车、电子、光学仪器以及其他民用工业等领域^[1]。虽然SiC_p/Al复合材料的应用范围越来越广,应用前景越来越广阔,但这种复合材料本身的特点也给它的切削加工带来了很大的困难和挑战。上述SiC_p/Al复合材料的优良性能,主要是由于材料中包含了硬度高、刚性好、低热膨胀系数的SiC增强相,这些增强相在提高材料的综合性能的同时,也使复合材料的后续加工变得非常困难。高速切削SiC_p/Al复合材料时,坚硬的SiC(硬度约为HV2700~3500)不仅会使刀具发生严重的磨粒磨损,而且会对切削刃产生相当大的冲击作用,诱发切削颤振及失稳等问题,使被加工零件发生变形,严重影响零件的加工精度和产品的最终性能。由于铣削加工中的振动变形、刀具磨损破损、加工表面质量等跟铣削力都有直接关系,因此准确地预测铣削力对控制高速铣削加工工艺过程稳定性具有重大意义^[2]。

近年来,高速切削技术开始在SiC_p/Al复合材料的高效、精密加工中得到应用,但对各类切削加工的研究以车削和钻削为主,关于高速铣削方面的研究十分有限,而针对SiC_p/Al复合材料高速铣削切削力建模的研究更是十分缺乏,到目前为止取得的相关研究成果非常有限。Kishawy等人^[3]在不同的切削参数下对不同体分比的铝基复合材料进行了正交切削试验,建立了一种基于能量法的切削力预测模型。Pramanik^[4]等人采用PCD刀具对SiC_p/Al复合材料进行了车削试验研究,考虑了材料的去除方式和机理,将切削力分为3个来源:切屑变形力、犁耕力和颗粒断裂力,建立了切削力预测模型。

本文采用PCD刀具在600~1200m/min速度范围内对SiC_p/2009Al复合材料进行高速铣削加工试验,根据Merchant直角切削模型并考虑切削参数、工件材料特性等对铣削力的影响,在建立直角切削模型中的3个基本量(剪切角、剪切应力和摩擦角)的数学模型基础上,建

^{*} 国家高技术发展研究计划(863)(2009AA04Z116)、江苏省高校自然科学基金(09KJB460004)、南京工程学院科研启动基金(No. KXJ08024)资助。

立一种新型的适合 SiC_p/2009Al 复合材料的高速铣削力预测模型。

1 铣削力建模基本理论

使用直齿立铣刀对工件材料进行高速侧铣时,铣刀刀片的主切削刃与副切削刃同时参与切削,但由于高速铣削采用小进给、高转速,切削深度远远大于每齿进给量,主切削刃参加切削的长度也要比副切削刃参加切削的长度大很多,因此实际建模时通常主要考虑主切削刃上的切削力而忽略副切削刃的切削力^[5]。直齿立铣刀在铣削过程中,切削刃的切削厚度不断变化,在铣削的某一时刻,切削刃上的切削厚度相同,而 Merchant^[6]切削模型假设切削厚度和宽度均不变。为了使 Merchant 切削模型可以用于直齿立铣加工,将铣削过程分解为许多取值很小的时间段,在这个时间段内,整条切削刃的切削厚度可认为是瞬时不变的。这样,参与切削的直齿立铣刀上的整条切削刃在每个时间段内的铣削过程可以等效为基本的直角切削过程^[7],且高速切削时第一变形区的宽度可以近似视为一个平面^[8]。因此,本文适用 Merchant 提出的单一剪切平面模型来研究直角切削过程。

众所周知,金属切削时,切向力与径向力的理论公式为^[8]:

$$\begin{cases} F_t = bh \cdot \frac{\tau \cdot \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ F_r = bh \cdot \frac{\tau \cdot \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \end{cases}, \quad (1)$$

进一步分析可得到剪切角、剪切应力和摩擦角的理论公式^[9]:

$$\phi = \arctan \frac{\gamma \cos \alpha}{1 - \gamma \sin \alpha}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{(F_t \cos \phi - F_r \sin \phi) \sin \phi}{bh}, \quad (3)$$

$$\beta = \alpha + \arctan \frac{F_r}{F_t}, \quad (4)$$

式中, ϕ 为剪切角, τ 为剪切面上的剪切应力, β 为刀具前刀面和切屑之间的摩擦角, α 为刀具前角, h 为切削厚度, γ 为切削比 (h/h_c , h_c 为切屑厚度), b 为切削宽度。

2 铣削力理论模型的分析

图 1 为直齿圆柱立铣刀侧铣加工示意图,其中, a_e 为径向切宽, D 为铣刀直径, θ 为瞬时接触角(即刀齿所在位置与切出位置之间的夹角), w 为铣削角速度。

理论上,铣削加工中刀齿的轨迹为摆线,考虑到高速切削加工中进给速度与切削速度相比非常小,可近似地将切削轨迹视为圆弧^[8]。

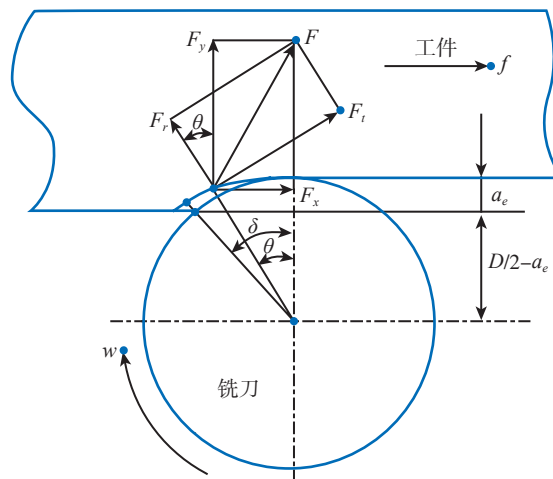


图1 直齿圆柱立铣刀侧铣加工示意图
Fig.1 Peripheral milling process of straight tooth cylinder end mill

由图(1)可知,切削厚度^[8]:

$$h = f_z \cdot \sin \theta, \quad (5)$$

式中, f_z 为每齿进给量; θ 为瞬时接触角。

由式 5 可知, θ 角越大,切削厚度 h 越大,且最大切削厚度在 $\theta = \delta$ 处。由图(1)中的几何关系可得:

$$\delta = \arccos \{ [(D/2) - a_e] / (D/2) \}, \quad (6)$$

$$h_{\max} = f_z \cdot \sin \delta. \quad (7)$$

将切向力 F_t 和径向力 F_r 分解为沿着机床导轨方向的 2 个分力 F_x 和 F_y ,由图 1 中的几何关系可得:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_r \\ F_t \\ F_z \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

综上所述,切削力与剪切角 ϕ 、剪切应力 τ 和摩擦角 β 有直接联系, ϕ 、 τ 和 β 是 Merchant 直角切削模型中的 3 个切削基本量,如果能够根据式(2)、(3)和(4)得到三者的数值,并将其代入式(1)和(8)就可求出切削力的大小。以下将通过 PCD 刀具高速铣削 SiC_p/2009Al 复合材料的直齿切削试验建立起 ϕ 、 τ 和 β 3 个切削基本量的数值模型,进一步分析建立 x 方向和 y 方向的最大铣削力预测模型,从而实现铣削力的准确预测。由于直齿立铣刀在铣削过程中,沿主轴方向的 Z 向分力变化很小,而且对机床的切削过程影响比较小,因此在这里不再进行分析讨论。

3 切削基本量数值模型的建立

迄今,剪切角 ϕ 预测模型主要包括不依赖于切削试验的理论预测模型和通过切削试验建立的经验预测模型(在一定切削参数范围内适用)2 种。Nakayama^[10]的研究表明,经验预测模型往往比理论预测模型的精度

更高。本文采用剪切角 ϕ 、剪切面平均剪应力 τ 和前刀面平均摩擦角 β 的经验预测模型,建立 ϕ 、 τ 和 β 与切削参数及复合材料本身特性之间的指数经验预测公式:

$$\phi = C_\phi v^{x_\phi} f_z^{y_\phi} vol^{z_\phi} a_e^{u_\phi} \quad (9)$$

$$\tau = C_\tau v^{x_\tau} f_z^{y_\tau} vol^{z_\tau} a_e^{u_\tau} \quad (10)$$

$$\beta = C_\beta v^{x_\beta} f_z^{y_\beta} vol^{z_\beta} a_e^{u_\beta} \quad (11)$$

以上经验预测公式可以统一表达成以下数学模型表达式:

$$P = C_p v^{x_p} f_z^{y_p} vol^{z_p} a_e^{u_p} \quad (12)$$

式中, v 为铣削速度, f_z 为每齿进给量, vol 为体分比, a_e 为径向切宽, C 为系数,与刀具、被加工材料和切削条件有关; x 、 y 、 z 、 u 为指数,分别表示各参数对 ϕ 、 τ 和 β 影响的程度。

4 试验条件与方案

工件材料为 SiC_p/2009Al 复合材料(由沈阳金属研究所提供), SiC 增强颗粒平均尺寸为 3.5 μm , 体分比分别为 17%、20%、35%。高速铣削试验在 MIKRON UCP710 五坐标高速加工中心上进行,该机床功率为 12kW,最高转速为 18000r/min。

试验采用 PCD 复合刀片(规格为 ZDGT 150408 R-85),其前角为 0°,后角为 10°,刀尖圆弧半径为 0.8mm,修光刃长度为 1.2mm,刀具材料晶粒度为 25 μm 。PCD 刀片由希波尔刀具制造并焊接在 Walter 硬质合金基体上,刀片安装在直径为 25mm 的刀杆上(规格为 F3040.H63A.025.Z02.15)。铣削方式为侧铣平面(干式铣削),轴向切深定为 6mm。

对直齿立铣加工过程进行受力分析可知,直齿铣削过程可以离散等效成直角切削过程的叠加组合。如图(1)所示,当直齿铣刀切削刃运动到瞬时切削厚度为最

大时 $\theta = \delta$, $h_{\max} = f_z \cdot \sin \delta$,此时 h_{\max} 对应式(1)中的切削层厚度 h 、 x 方向和 y 方向的铣削分力最大且分别记为 $F_{x\max}$ 和 $F_{y\max}$,此刻的切屑厚度对应于加工生成的最大切屑厚度 h_c 。将此刻前后的微小时间段内的铣削过程视为一个直角切削过程, $F_{x\max}$ 和 $F_{y\max}$ 则分别对应式(8)中的 F_x 和 F_y ,本次试验中轴向切深定为 6mm,即式(1)中 $b=6\text{mm}$ 。将以上数据代入方程组(8)可求解出 F_r 和 F_t 。将求出的 F_r 和 F_t 分别代入式(2)、(3)、(4),计算得到不同因素水平组合条件下的剪切角、剪切面平均剪应力和前刀面平均摩擦角。

试验过程中,通过 Kistler 测力仪测量铣削力(铣削力的方向定义为:进给方向为 x ,铣刀径向切深方向为 y ,刀具轴向为 z),并使用数据处理软件 DynoWare 进行处理,得到当前切削参数条件下 x 向和 y 向的最大铣削力 $F_{x\max}$ 和 $F_{y\max}$ 。同时,任意选取 3 个当前切削参数下加工生成的切屑,通过螺旋测微仪分别测量得到这 3 个切屑的最大厚度值,再取其平均值作为 h_c 。

为在较少的试验次数下充分考察铣削速度 v 、每齿进给量 f_z 、体分比 vol 以及径向切宽 a_e 对剪切角、剪切面平均剪应力和前刀面平均摩擦角 3 个切削基本量的影响,试验采用 4 因素 3 水平正交表安排,试验各因素及其所取水平如表 1 所示。

5 铣削力预测模型的建立

如上文所述,剪切角 ϕ 、剪切面平均剪应力 τ 和前刀面平均摩擦角 β 经验预测公式可以统一表达成式(12)的形式,将式(12)两边取对数,则有:

$$\lg P = \lg C_p + x_p \lg v + y_p \lg f_z + z_p \lg vol + u_p \lg a_e \quad (13)$$

令 $w = \lg P$, $a = \lg C_p$, $b = x_p$, $c = y_p$, $d = z_p$, $e = u_p$, $x = \lg v$, $y = \lg f_z$, $z = \lg vol$, $u = \lg a_e$,经过替换后,其数学模型转化

表1 正交试验设计与计算结果表

| 序号 | 铣削速度 $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$ | 径向切宽 a_e / mm | 体分比 $vol / \%$ | 切屑厚度 h_c / mm | $F_{x\max} / \text{N}$ | $F_{y\max} / \text{N}$ | 剪切角 / (°) | 摩擦角 / (°) | 剪应力 / MPa |
|----|--|--|---------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1200 | 0.25 | 0.5 | 20 | 0.328 | 547.4 | 1076.3 | 0.210 | 0.187 | 553.40 |
| 2 | 1200 | 0.15 | 1.5 | 17 | 0.200 | 713.6 | 907.4 | 0.342 | 0.172 | 789.25 |
| 3 | 1200 | 0.08 | 3 | 35 | 0.142 | 615.5 | 656.8 | 0.351 | 0.046 | 915.12 |
| 4 | 900 | 0.25 | 3 | 35 | 0.380 | 1149.6 | 1185.5 | 0.404 | 0.063 | 594.77 |
| 5 | 900 | 0.15 | 1.5 | 20 | 0.251 | 660 | 1056.9 | 0.277 | 0.063 | 750.42 |
| 6 | 900 | 0.08 | 0.5 | 17 | 0.131 | 201.6 | 320 | 0.170 | 0.278 | 427.55 |
| 7 | 600 | 0.25 | 1.5 | 17 | 0.422 | 710 | 981.3 | 0.274 | 0.131 | 423.10 |
| 8 | 600 | 0.15 | 0.5 | 35 | 0.242 | 379.9 | 675.3 | 0.172 | 0.229 | 484.17 |
| 9 | 600 | 0.08 | 3 | 20 | 0.228 | 770.4 | 578 | 0.224 | 0.220 | 619.90 |

为:

$$w = a + bx + cy + dz + eu \quad (14)$$

式(14)即为求得的回归方程,其中, b 、 c 、 d 、 e 为回归方程的回归系数, w 、 x 、 y 、 z 、 u 一般为数组向量,回归系数可以采用最小二乘法原理确定。

将表1中正交直齿铣削试验的 ϕ 、 τ 和 β 计算结果分别代入式(14),应用数值计算软件 MATLAB 进行多元线性回归分析,得到 ϕ 、 τ 和 β 经验预测公式的系数和指数,从而得到切削基本量的经验预测公式:

$$\phi = 0.0183 \cdot v^{0.4228} f_z^{0.2341} vol^{0.0483} a_e^{0.3336} \quad (15)$$

$$\phi = 8.661 \cdot v^{0.5372} f_z^{-0.1120} vol^{0.1069} a_e^{0.1834} \quad (16)$$

$$\phi = 131.333 \cdot v^{-0.7684} f_z^{-0.2851} vol^{-0.6821} a_e^{-0.5094} \quad (17)$$

将3个切削基本量的经验预测公式代入式(8),即得到本文的铣削力预测模型:

$$\begin{cases} F_{x_{\max}} \\ F_{y_{\max}} \end{cases} = \begin{cases} -\sin \delta & \cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{cases} \begin{cases} bh_{\max} \cdot \frac{\tau \cdot \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ bh_{\max} \cdot \frac{\tau \cdot \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \end{cases} \quad (18)$$

6 试验验证

根据上述切削基本量经验预测公式,可以建立切削参数及工件材料特性与3个切削基本量之间的联系。根据实际切削试验中的切削参数经由切削基本量经验预测公式可以得到剪切角、剪切面平均剪应力和前刀面平均摩擦角的数值,将其代入本文的铣削力预测模型,可以解出 $F_{x_{\max}}$ 和 $F_{y_{\max}}$ 。为验证本文所建立的铣削力预测模型的精确性,进行了另外4组试验来检验预测值和实测值的一致性,实测结果与模型计算、经验公式计算结果列于表2。

表2中,预测1是本文建立的模型预测值,预测2是铣削力经验公式预测值。由表2可知,经验公式预测 X 方向最大铣削力的平均误差为12.8%, Y 方向最大铣削力的平均误差为13.1%,而本文建立的模型预测 X 方向最大铣削力的平均误差为5.9%, Y 方向最大铣削力的平均误差为9.2%,说明本文所建模型预测值和试验数据符合度较好,精度比经验公式高。由表2还可知,本文建立的模型最大计算误差为18.1%,而采用铣削力经验模型,计算误差最大为22.2%。

表2 切削力实测结果、模型计算、经验公式计算对比

| 序号 | $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$ | a_e / mm | $vol / \%$ | $F_{x_{\max}} / N$ 误差/% | | | | | $F_{y_{\max}} / N$ 误差/% | | | | |
|--------|--|---|-------------------|------------|-------------------------|---------|-----|--------|------|-------------------------|---------|------|---------|------|
| | | | | | 实测 | 预测1 | 误差 | 预测2 | 误差 | 实测 | 预测1 | 误差 | 预测2 | 误差 |
| 1 | 600 | 0.25 | 0.5 | 20 | 590.43 | 554.36 | 6.1 | 463.05 | 21.6 | 1110.32 | 908.85 | 18.1 | 863.24 | 22.2 |
| 2 | 900 | 0.25 | 0.5 | 20 | 554.64 | 504.03 | 9.1 | 472.34 | 14.8 | 1036.27 | 975.13 | 5.9 | 949.23 | 8.4 |
| 3 | 1200 | 0.08 | 0.5 | 20 | 264.59 | 256.45 | 3.0 | 251.04 | 5.1 | 471.07 | 471.47 | 0.08 | 438.41 | 6.9 |
| 4 | 1200 | 0.25 | 3 | 20 | 1398.41 | 1469.92 | 5.1 | 1261.5 | 9.7 | 1740.19 | 1516.84 | 12.8 | 1480.06 | 14.9 |
| 平均误差/% | | | | | | | 5.9 | | 12.8 | | | 9.2 | | 13.1 |

为了将建立的铣削力预测模型与铣削力经验公式进行对比,本文同时建立了铣削力经验公式。在金属切削中,切削力经验公式的通用形式一般为:

$$F = C_F v^{x_F} f_z^{y_F} vol^{z_F} a_e^{u_F} \quad (19)$$

式中: C_F 为系数,与刀具、被加工材料和切削条件有关; x_F 、 y_F 、 z_F 、 u_F 为指数,分别表示各参数对 F 的影响程度。

采用上述回归分析的方法,利用 MATLAB 对试验结果进行多元线性回归分析,获得参数 C_F 、 x_F 、 y_F 、 z_F 、 u_F ,从而得到 x 、 y 方向铣削力最大值 $F_{x_{\max}}$ 、 $F_{y_{\max}}$ 与切削速度 v 、每齿进给量 f_z 、体分比 vol 、径向切宽 a_e 之间的线性回归模型。

$$F_{x_{\max}} = 1042.571 \cdot v^{0.0490} f_z^{0.5671} vol^{0.0119} a_e^{0.5403} \quad (20)$$

$$F_{y_{\max}} = 528.831 \cdot v^{0.2342} f_z^{0.7371} vol^{0.0531} a_e^{0.2103} \quad (21)$$

7 结论

建立了PCD刀具高速铣削SiC_p/2009Al复合材料切削力的预测模型,该模型中不仅考虑了铣削速度、每齿进给量及径向切宽等切削参数对切削基本量的影响,而且还考虑了复合材料体分比的影响。模型对进给方向最大铣削力预测值的平均误差为5.9%,对铣刀径向切深方向最大铣削力预测值的平均误差为9.2%,皆高于普通经验公式的预测精度。

本文共有参考文献10篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 晓立)