

镁基碳纤维增强复合材料 超声辅助切削试验研究*

蒋振邦^{1,2},袁松梅^{1,2},李真^{1,2},李麒麟^{1,2},宋肖珺³,李燕³

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

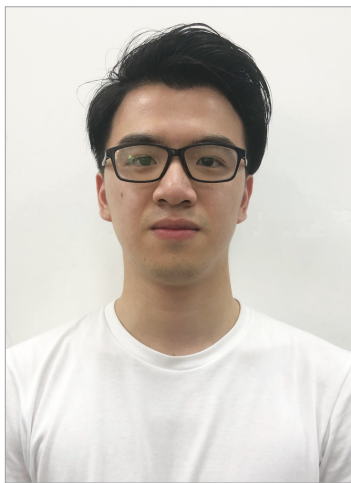
2. 北京市高效绿色数控加工工艺及装备工程技术研究中心,北京 100191;

3. 北京航天新风机械设备有限公司,北京 100854)

[摘要] 为研究镁基碳纤维增强复合材料(C_f/Mg)的切削力与已加工表面质量,开展了硬质合金铣刀与硬质合金钻头超声辅助切削试验研究。通过正交试验得到,超声辅助铣削 C_f/Mg 复合材料时铣削力随每齿进给量及铣削深度的增加而明显增大,随主轴转速的增加而减小;试验中,在超声辅助铣削时每齿进给量0.025mm、铣削深度0.2mm、转速6000r/min加工参数下铣削力最小,每齿进给量0.025mm、铣削深度0.2mm、转速4000r/min加工参数下表面质量较好;采用硬质合金钻头进行单因素钻削试验时,轴向钻削力随主轴转速的升高而减小;与传统钻削相比,超声辅助钻削能减小轴向钻削力,在机床转速6000r/min、机床进给速度100mm/min加工参数下超声辅助钻削相比传统钻削可减小约36%的轴向钻削力;超声辅助钻削相比传统钻削能改善钻孔出口的毛刺、分层等缺陷。

关键词: 镁基碳纤维增强复合材料(C_f/Mg); 超声辅助切削; 切削力; 切削参数; 表面质量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.055



蒋振邦

硕士研究生,主要从事特种加工、复合材料加工等研究。

镁基碳纤维增强复合材料(C_f/Mg)由于其增强相高性能碳纤维(如T700强度4900MPa,弹性模量250GPa)的特性,使其具有低密度(碳纤维密度 $1.76\sim 2.15\text{g/cm}^3$, C_f/Mg 复合材料密度 $1.80\sim 1.92\text{g/cm}^3$)^[1-4]、高比强度和比模量,低热膨胀系数(镁、铝的热膨胀系数在 $20\times 10^{-6}/\text{K}$ 以上)、阻尼性能优异等优点,在航空航天工业和汽车工业中展现出巨大的应用前景,成为高性能结构材料的有力竞争者^[5]。在美国“猛禽”战斗机、“大黄蜂”战斗机等先进武器装备以及土星探测器上都可以看到镁基复合材料的身影^[6]。

在 C_f/Mg 复合材料制备方面,德国柏林科技大学的Hufenbach等^[7]通过压力浸渗法分别制得了单向、二

向纤维增强镁基复合材料(1D、2D- C_f/Mg);德国开姆尼兹大学采用压力浸渗法制得了涂层改性 C_f/Mg 复合材料,具有高碳纤维体积分、高拉伸强度的特性;哈尔滨工业大学的Wu等^[8]采用搅拌铸造法制得了短碳纤维增强镁基复合材料;中科院的Wang等^[9]通过无压浸渗法^[10]制得连续单向 C_f/Mg 复合材料,其拉伸强度与理论计算值基本相符。

在碳纤维增强复合材料与金属基复合材料加工研究方面,Narayana等^[11]通过正交试验建立了碳纤维增强复合材料铣削参数与表面粗糙度的联系,并采用方差分析法分析了参数的显著性;南京航空航天大学的韩胜超^[12]通过正交试验研究了碳纤维增强复合材料侧铣加工参数对切

* 基金项目:国家自然科学基金(U1737201)。

削温度与切削力的影响; 菲拉特大学开展了碳纤维增强铝基复合材料钻削试验研究, 试验结果表明刀具几何参数、切削参数对钻孔质量和效率的影响较大。

在超声加工方面, 大连理工大学的康仁科等^[13]对超声辅助加工技术系统、机理与分类进行了详细的研究。河南理工大学的马星辉^[14]设计传统切削与超声辅助切削 CFRP 复合材料对比试验, 得出超声辅助铣削可以降低切削力, 改善表面质量等结论; 哈工大的张其馨等^[15]设计超声辅助钻削设备, 对超声辅助钻削工艺进行研究; Hocheng 等^[16]设计超声辅助钻削碳纤维复合材料的试验, 针对刀具磨损、钻孔质量进行了研究, 得出超声辅助加工更适合该种材料加工的结论。

目前国内针对 C_f/Mg 复合材料的研究主要在其制备方面, 对其超声加工特性、损伤抑制的研究较少。为研究超声辅助铣削加工参数对铣削力与工件表面质量的影响, 得到较优加工参数, 并改善 C_f/Mg 复合材料在钻削过程中出现的孔出口毛刺等缺陷, 本文使用课题组自主研发的超声振动刀柄对 C_f/Mg 复合材料进行切削试验研究。

试验及方法

试验试件选用 C_f/Mg 复合材料圆盘层压板, 试件尺寸为直径 140mm、厚 7mm, 如图 1 所示。使用专用圆盘型夹具实现试件与测力仪的定位与夹紧。试验用机床为 VMC1270 数控加工中心, 最高主轴转速为 6000r/min。超声辅助加工装置为课题组自主设计超声加工系统, 超声振动加工频率为 17kHz, 采用激光测振仪 SOPTOP LV-S01 测得刀具振幅为 4μm。切削条件为干式切削, 试验现场如图 2 所示。采用 Kistler9257B 测力仪测量切削力, 采用 Dino-lite 数码显微镜观测二维切

削形貌, 采用 TAYLOR HOBSN CCI 非接触式三维轮廓仪观测铣削表面微观三维形貌。

本文采用正交试验法研究铣削深度 a_p 、每齿进给量 f_z 、主轴转速 n 3 个切削参数对 C_f/Mg 复合材料铣削力、表面质量的影响, 三因素三水平正交试验方案见表 1; 采用单因素试验法研究钻削加工时主轴转速 n 、机床进给速度 F 对轴向钻削力的影响, 单因素试验方案见表 2。本次试验所采用的切削刀具为 $\phi 6\text{mm} \times 15\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的硬质合金涂层二刃钨钢铣刀、

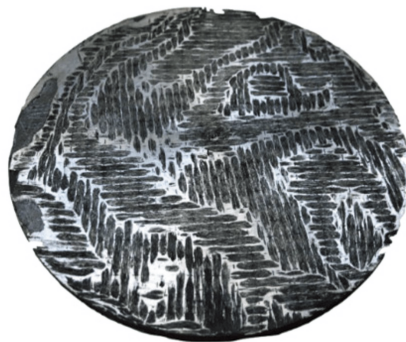


图1 C_f/Mg复合材料试件
Fig.1 C_f/Mg composite test-piece

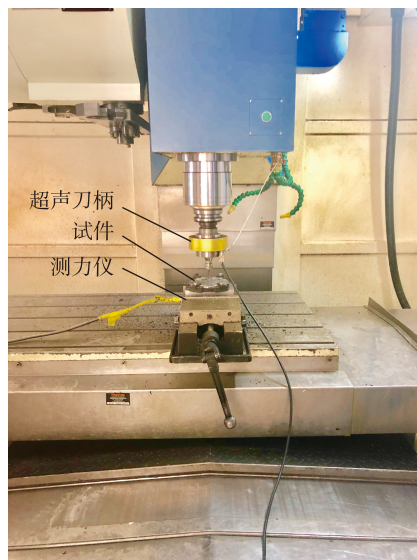


图2 试验现场
Fig.2 Test site

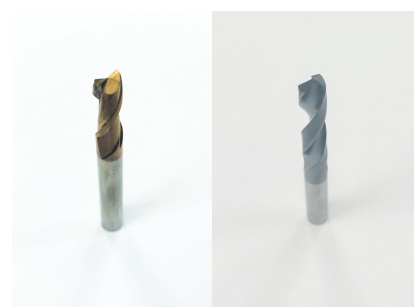
$\phi 6\text{mm} \times 30\text{mm} \times 55\text{mm}$ 的硬质合金钨钢钻头, 刀具刃部为氮化铝钛涂层, 由常州给力工具制造有限公司生产, 见图 3。

试验过程中, 位于试件下方的测力仪实时接收切削过程中的 3 向切削力 F_x 、 F_y 、 F_z , 测得的铣削力信号通过电荷放大器进行放大, 经数据采集系统进行记录和存储。使用 Matlab 软件处理导出的切削力数据, 将切削到中间阶段时连续稳定的切削力信号进行滤波分析, 分别输出 F_x 、 F_y 、 F_z 的测量值。因 F_z 的数值相对较小,

表1 铣削正交试验表

Table 1 Orthogonal factor level table of milling test

| 试验号 | 铣削深度 a_p/mm | 主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 每齿进给量 f_z/mm |
|-----|----------------------|---|-----------------------|
| 1 | 0.2 | 2000 | 0.025 |
| 2 | 0.2 | 4000 | 0.075 |
| 3 | 0.2 | 6000 | 0.125 |
| 4 | 0.4 | 2000 | 0.075 |
| 5 | 0.4 | 4000 | 0.125 |
| 6 | 0.4 | 6000 | 0.025 |
| 7 | 0.6 | 2000 | 0.125 |
| 8 | 0.6 | 4000 | 0.025 |
| 9 | 0.6 | 6000 | 0.075 |



(a) 硬质合金铣刀 (b) 硬质合金钻头

图3 试验刀具
Fig.3 Test tools

表2 钻削单因素试验参数
Table 2 Parameters of drilling test

| 主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 进给速度 $F/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ |
|---|--|
| 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 | 20, 40, 60, 80, 100 |

本次试验只记录和分析 F_x 、 F_y 。

试验结果

1 铣削参数对铣削力的影响分析

按表 1 的铣削参数进行正交试验,测得切削力数据如表 3 所示。

使用 Minitab 统计软件对切削力数值进行 L_9 正交试验分析。采用极差分析法与方差分析法将主轴转速 n 、每齿进给量 f_z 、铣削深度 a_p 3 个切削参数对切削力 F_x 、 F_y 的影响进行主次排序,并优化配比参数以选择最佳组合^[17]。

将表 1、表 3 中的数据输入至 Minitab 进行处理,得到 F_x 、 F_y 的望小信噪比响应统计结果,见表 4、表 5。表中切削参数的 Delta 值越大表明该参数对 F_x 、 F_y 的影响程度越大,与之对应的排秩数越小。在 F_x 、 F_y 信噪比响应表中,铣削深度、每齿进

给量、主轴转速 3 个切削参数分别排秩为 1、2、3,即对 F_x 、 F_y 的影响依次减小。

使用 Minitab 绘制 F_x 、 F_y 信噪比望小主效应图,如图 4 所示。望小特性表示试验值越小对应的质量越好^[18],即期望得到数值较小的 F_x 、 F_y 。根据望小特性可知,主效应图中位置较高

的点对应该切削参数下较低的 F_x 、 F_y 数值。由图 4 可知:随着铣削深度或每齿进给量的增加, F_x 信噪比值减小, F_x 数值增加; 主轴转速对 F_x 信噪比影响相对较小,切削力随主轴转速的升高有减小的趋势; F_y 信噪比主效应图与 F_x 基本一致,由其主轴转速曲线的斜率比 F_x 大,得到主轴转速对 F_y 的影响大于 F_x 。

综合分析上述超声铣削正交试验图表数据可知:本次试验参数中,铣削深度对 F_x 、 F_y 影响最大,每齿进给量其次, F_x 、 F_y 随铣削深度或每齿进给量的增加而增大; 主轴转速对 F_x 、 F_y 的影响相对较小,切削力随主轴转速的升高而降低,且对 F_y 的降低程度大于 F_x 。

2 铣削参数对表面质量的影响分析

采用 Dino-lite 数码显微镜对每

表5 F_y 信噪比响应表
Table 5 SNR response table of F_y

| 水平 | 铣削深度 a_p/mm | 主轴转速 $n/(r \cdot min^{-1})$ | 每齿进给量 f_z/mm |
|-------|---------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | -25.01 | -30.84 | -25.70 |
| 2 | -30.06 | -29.18 | -30.08 |
| 3 | -33.28 | -28.33 | -32.57 |
| Delta | 8.27 | 2.50 | 6.86 |
| 排秩 | 1 | 3 | 2 |

表3 铣削正交试验结果

Table 3 Results of milling orthogonal test

| 试验号 | F_x/N | F_y/N |
|-----|---------|---------|
| 1 | 7.71 | 13.21 |
| 2 | 15.25 | 19.78 |
| 3 | 17.85 | 21.60 |
| 4 | 28.44 | 38.71 |
| 5 | 33.47 | 43.02 |
| 6 | 20.10 | 19.39 |
| 7 | 62.53 | 82.55 |
| 8 | 25.88 | 28.00 |
| 9 | 34.25 | 42.46 |

表4 F_x 信噪比响应表

Table 4 SNR response table of F_x

| 水平 | 铣削深度 a_p/mm | 主轴转速 $n/(r \cdot min^{-1})$ | 每齿进给量 f_z/mm |
|-------|---------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | -22.15 | -27.58 | -24.02 |
| 2 | -28.55 | -27.47 | -27.81 |
| 3 | -31.62 | -27.26 | -30.48 |
| Delta | 9.48 | 0.32 | 6.46 |
| 排秩 | 1 | 3 | 2 |

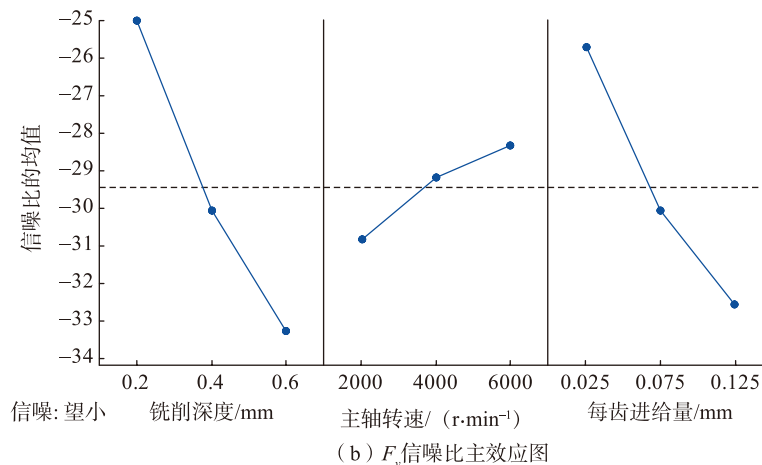
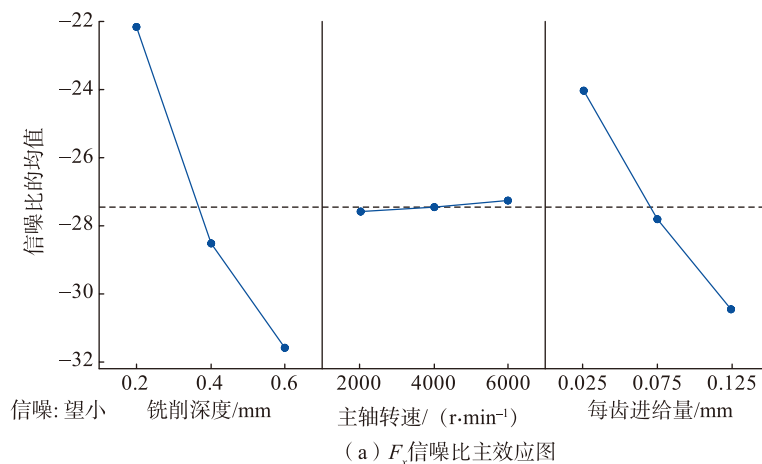


图4 切削力信噪比主效应图

Fig.4 Main effects SNR plot of cutting force

组试验的铣削表面进行初步观测,如图 5、6 所示。观测区域中亮色区域为超声辅助铣削后的基相镁合金,暗色区域为增强相碳纤维。为更好地评价 C_f/Mg 复合材料铣削加工表面质量,本文采用基于区域表面形貌的三维粗糙度评定参数 S_a 来表征:

$$S_a = (1/NM) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |Z_{ij}| \quad (1)$$

式中, Z 为物体表面区域轮廓上点到基准平面的距离, M、N 分别为评定区域中相互垂直两个方向上的采样点数,表示区域形貌的算术平均偏差。相对于一维形貌参数 R_a, S_a 在评判微观领域表面质量时更准确。通过 Taylor Hobson 轮廓仪对铣槽表面进行三维形貌观测,如图 7 所示。图 8 为轮廓仪镜头与试件在干涉距离内的成像,其中鱼鳞状突起的亮色区域为超声辅助铣削后的镁合金,上方暗色不规则区域为碳纤维,其形成原

因为铣削过程中镁合金主要发生塑性变形而碳纤维主要发生脆性断裂。

本文研究铣削深度、主轴转速和每齿进给量在超声辅助铣削作用下对 C_f/Mg 铣削加工区域表面形貌三维粗糙度 S_a 的影响。每个铣削区域取 0.86mm × 0.86mm 的 3 个观测区域,取 3 次测量的平均值为该铣削区域的 S_a 值。得到 S_a 值如表 6 所示,

在 50 倍率放大显微镜下的铣削区域与轮廓仪的三维成像如图 9 和 10 所示。图 9 (a) 槽底铣刀痕迹较明显,图 9 (b) 槽底相对光整。上述铣削区域对应 CCI 轮廓仪下取样得到的三维表面形貌如图 10 (a)、(b) 所示。从色度对比条可知,图 10 (b) 的取样区域表面质量相对较好。

使用 Minitab 统计软件对表 1

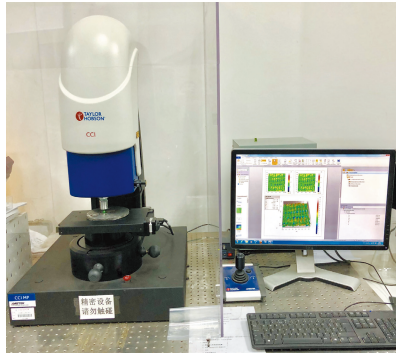


图7 CCI轮廓仪观测

Fig.7 Observation process of CCI contourgraph

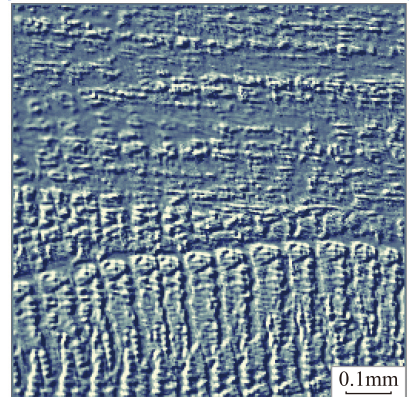


图8 干涉区表面成像

Fig.8 Image of interference area

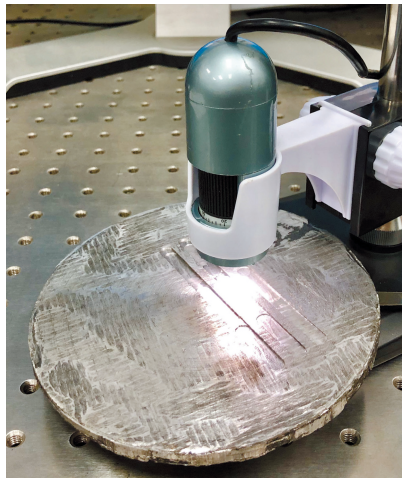
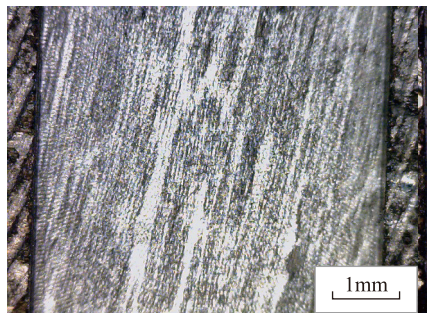
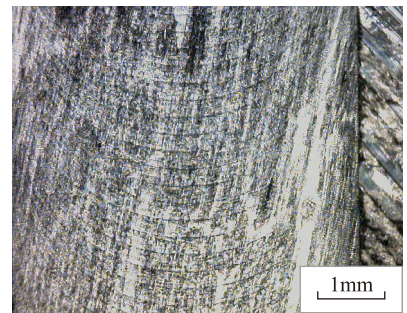


图5 显微镜观测

Fig.5 Observation process of microscope



(a) a_p=0.2mm, n=2000r/min, f_z=0.025mm



(b) a_p=0.6mm, n=6000r/min, f_z=0.075mm

图9 超声铣削槽底形貌

Fig.9 Surface of slot bottom through ultrasonic milling

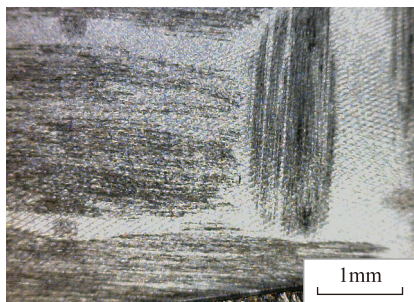
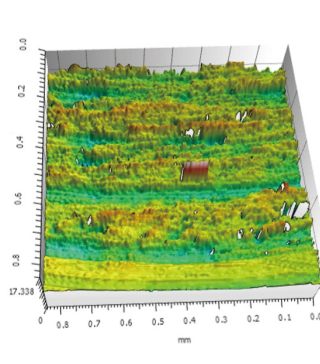
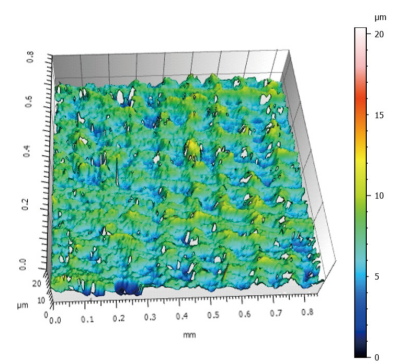


图6 超声铣削表面

Fig.6 Surface of ultrasonic milling



(a) a_p=0.2mm, n=2000r/min, f_z=0.025mm



(b) a_p=0.6mm, n=6000r/min, f_z=0.075mm

图10 槽底三维表面形貌

Fig.10 Three-dimensional shape of slot bottom

和 6 中的数值进行 L_9 正交试验分析得到 S_a 望小信噪比响应表, 统计结果见表 7。在 S_a 信噪比响应表中, 每齿进给量、主轴转速、铣削深度分别排秩为 1、2、3, 说明试验中这 3 个切削参数对 C_f/Mg 复合材料表面质量的影响依次减小。绘制 S_a 的信噪比望小主效应图, 见图 11。随着每齿进给量的增加, S_a 的信噪比值明显减小, 对应 S_a 值增大, 表面质量下降; 主轴转速升高对应信噪比增大, 即较高的主轴转速有利于提高 C_f/Mg 铣削表面质量; S_a 随铣削深度的增加先增大后减小。

综合分析上述超声铣削正交试验图表数据可知: 本次试验参数中, 每齿进给量对 C_f/Mg 超声铣削表面质量影响最大, 且每齿进给量越大表面质量越差; 主轴转速对表面质

量的影响次之, 较高的主轴转速可以降低铣槽 S_a 值; 铣削深度对表面质量的影响较低, 且在本文加工参数下, 铣削深度在 0.4mm 左右时表面质量较差。

本次铣削试验中, 每齿进给量与主轴转速对 C_f/Mg 复合材料铣削力与表面质量的影响具有一致性, 铣削力与铣削表面 S_a 值均随每齿进给量的减小或主轴转速的升高而减小。其原因为 C_f/Mg 复合材料的变形回弹及刀具对碳纤维的推挤作用随切削力的减小而下降, 金属和纤维的破损程度降低, 有利于抑制毛刺的生成并提高铣削表面质量, 即较小的切削

力有利于改善试件的表面质量。

3 钻削参数对轴向钻削力的影响分析

根据单因素试验方案进行超声辅助钻削 C_f/Mg 复合材料试验, 以传统钻削作为对照组。研究主轴转速 n 、机床进给速度 F 对轴向钻削力的影响。根据试验结果, 采用 Origin 软件绘制超声辅助钻削中轴向钻削力的变化曲线, 如图 12、13 所示(其中, 钻削力为稳定钻削阶段轴向钻削力的平均值)。

由图 12、图 13 可知, 在本次试验参数下进行超声辅助钻削 C_f/Mg 复合材料时, 轴向钻削力随机床进给

表 6 正交铣削试验 S_a 值
Table 6 Value of S_a in milling orthogonal test

| 试验号 | 第 1 次测量 | 第 2 次测量 | 第 3 次测量 | 平均值 |
|-----|---------|---------|---------|------|
| 1 | 1.48 | 1.22 | 1.23 | 1.31 |
| 2 | 1.49 | 1.44 | 1.39 | 1.44 |
| 3 | 1.60 | 1.68 | 1.28 | 1.52 |
| 4 | 1.67 | 1.53 | 1.57 | 1.59 |
| 5 | 1.45 | 1.87 | 1.66 | 1.83 |
| 6 | 1.72 | 1.59 | 1.70 | 1.67 |
| 7 | 2.11 | 2.29 | 1.93 | 2.11 |
| 8 | 0.98 | 1.12 | 0.87 | 0.99 |
| 9 | 1.33 | 1.13 | 1.20 | 1.22 |

表 7 S_a 值信噪比响应表
Table 7 SNR response table of S_a

| 水平 | 铣削深度/mm | 主轴转速/(r·min ⁻¹) | 每齿进给量/mm |
|-------|---------|-----------------------------|----------|
| 1 | -3.146 | -4.591 | -2.610 |
| 2 | -4.461 | -3.263 | -3.159 |
| 3 | -3.555 | -3.308 | -5.394 |
| Delta | 1.314 | 1.329 | 2.784 |
| 排秩 | 3 | 2 | 1 |

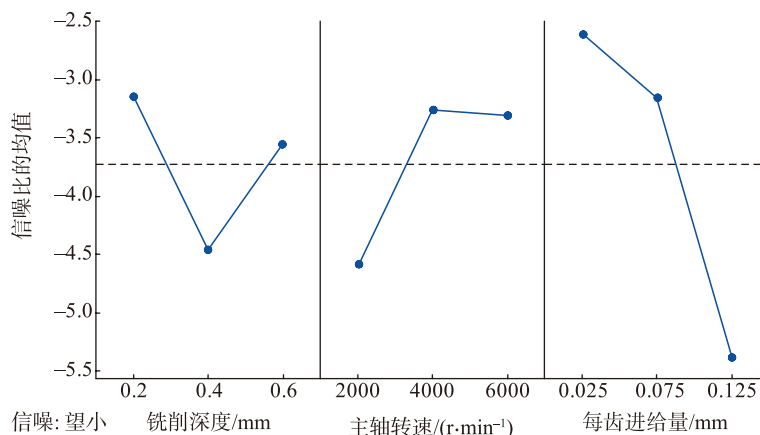


图 11 S_a 信噪比主效应图
Fig.11 Main effects SNR plot of S_a

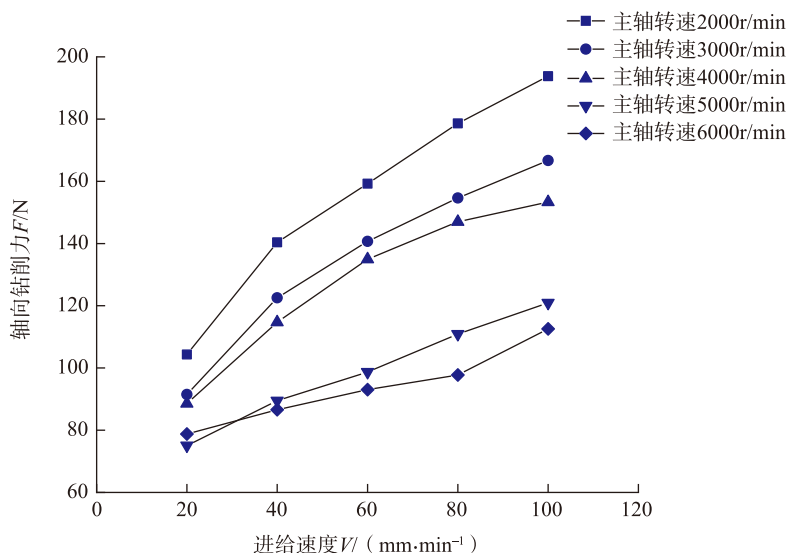


图 12 轴向钻削力与机床进给速度的关系
Fig.12 Relationship between axial drilling force and feed speed

速度的升高而增大,随主轴转速的增加而减小。在主轴转速为 2000r/min 时,较大机床进给速度(100mm/min)下,轴向钻削力相比较小机床进给速度(20mm/min)增加了 86%,而在主轴转速为 6000r/min 时,较大机床进给速度(100mm/min)下,轴向钻削力相比较小机床进给速度(20mm/min)增加了 43%,较低转速下机床进给对轴向钻削力的影响更为显著。在进给速度为 100mm/min 时,较高机床转速(6000r/min)下,轴向钻削力相比较低机床转速(2000r/min)减小了 72%;而在进给速度为 20mm/min 时较高机床转速(6000r/min)下轴向钻削力相比较低机床转速(2000r/min)减小了 32%,可见较高机床进给时主轴转速对轴向钻削力的影响更为显著。

在对照组试验中,超声辅助钻削相比传统钻削能减小轴向钻削力,且在较高机床转速下减小程度更为明显,如图 14 所示。在机床转速 6000r/min,机床进给速度为 100mm/min 时,超声辅助钻削相比传统钻削可减少约 36% 的轴向钻削力。

4 超声辅助钻削与传统钻削孔出口质量对比

C_f/Mg 复合材料厚度随钻削过程的进行而减小,因而在钻削阶段后期易产生纤维撕裂、分层等缺陷。超声辅助振动钻削相比传统钻削可以减少轴向钻削力,进而减小钻削阶段后期 C_f/Mg 复合材料的垂直应力,有利于改善钻孔出口分层等缺陷。同时,文中钻削刀具在采用较高超声振动频率(17kHz)下对碳纤维产生划擦、锤击,加剧材料增强相硬脆碳纤维断裂,有利于改善钻孔出口毛刺等缺陷。

采用 Dino-lite 数码显微镜观测钻孔出口质量,孔径为 6mm,放大倍率为 35 倍。传统钻削孔与超声辅助钻削孔的出口形貌如图 15 所示。随

着转速的升高,孔出口毛刺减少,且超声辅助钻削相比传统钻削可以减少孔出口处纤维撕裂与毛刺等缺陷,改善出口质量。

切削参数范围内得到了不同参数对 C_f/Mg 复合材料切削力与表面质量的影响规律。

(1) 在超声辅助铣削 C_f/Mg 复合材料时,各切削参数对铣削力的影响主次关系为: 铣削深度 $a_p >$ 每齿进给量 $f_z >$ 主轴转速 n ; 铣削力随铣

结论

本文通过切削试验,在所选用的

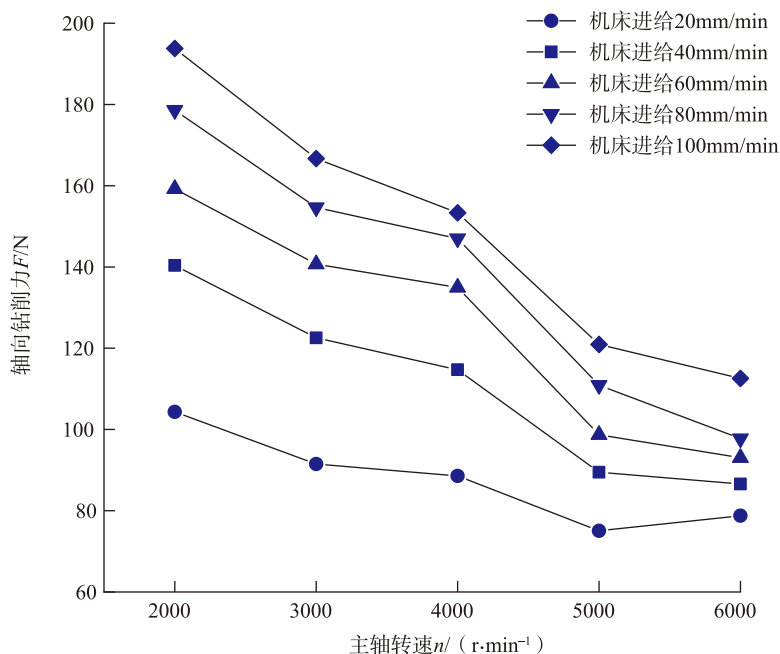


图13 轴向钻削力与主轴转速的关系

Fig.13 Relationship between axial drilling force and feed speed of main shaft

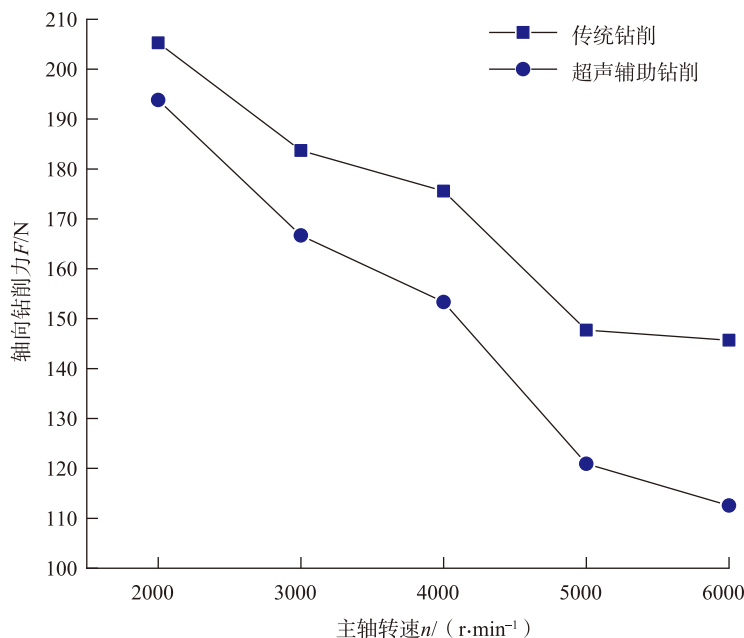


图14 超声钻削与传统钻削轴向钻削力对比

Fig.14 Comparison of ultrasonic drilling and general drilling

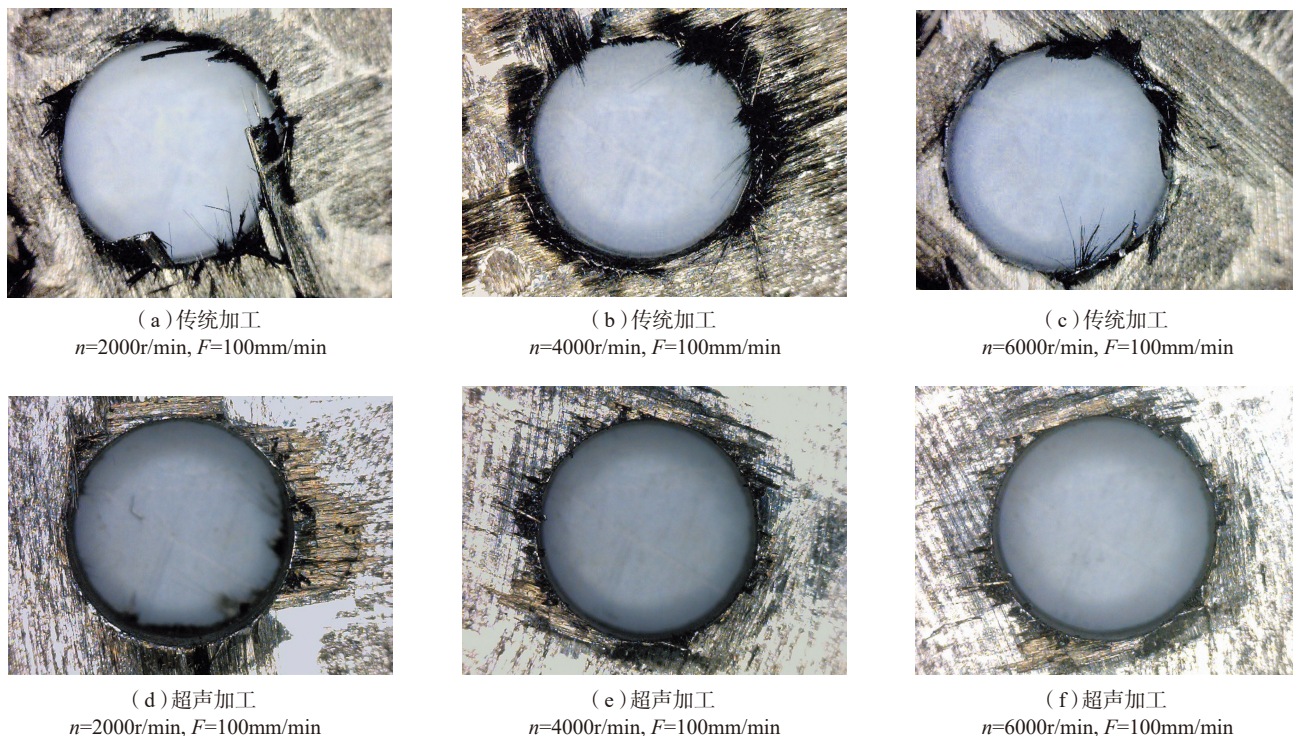


图15 C_f/Mg 钻削孔出口质量对比
Fig.15 Comparison of outside-hole quality

削深度和每齿进给量的增加而增大；主轴转速的升高可以降低切削力，其中对 F_y 降低程度要明显大于 F_x 。文中最小铣削力加工参数为：每齿进给量 0.025mm，铣削深度 0.2mm，转速 6000r/min。

(2) 在超声辅助铣削 C_f/Mg 复合材料时，各切削参数对 S_a 值的影响主次关系为：每齿进给量 $f_z >$ 主轴转速 $n >$ 铣削深度 a_p ； S_a 值随每齿进给量的增加而增大，随主轴转速的升高而减小；铣削深度对 S_a 值的影响较小。文中最低 S_a 值加工参数为：每齿进给量 0.025mm，铣削深度 0.2mm，转速 4000r/min。

(3) 在铣削试验中，随着每齿进给量的减小或主轴转速的升高，铣削力 F_x 、 F_y 减小， S_a 值降低。即 C_f/Mg 复合材料铣削力的减小有利于改善表面质量。

(4) 在超声辅助钻削 C_f/Mg 复合材料时，轴向钻削力随机床进给速度的增加而增大，随主轴转速的增加而减小；较低机床转速(2000~

4000r/min)下，机床进给速度对轴向钻削力的影响更为显著，机床进给速度较高时主轴转速对钻削力的影响更为显著；较高机床转速(4000~6000r/min)加工更适合钻削 C_f/Mg 复合材料。

(5) 超声辅助钻削相比传统钻削能减小轴向钻削力，且减小程度随着机床转速的升高更为显著；在显微镜下观察，超声辅助钻削相比传统钻削可以减少 C_f/Mg 复合材料钻孔出口的毛刺、分层等缺陷。

参考文献

- [1] ELIEZER D, AGHION E, FROES F H. Magnesium science, technology and applications[J]. Advanced Performance Materials, 1998, 5(3): 201-212.
- [2] KULEKCI M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9-10): 851-865.
- [3] 曾小勤, 王渠东, 吕宜振, 等. 镁合金应用新进展[J]. 铸造, 1998(11): 39-43.

Yizhen, et al. New progress in the application of magnesium alloys[J]. Foundry, 1998(11): 39-43.

[4] 张丁非, 彭建, 丁培道, 等. 镁及镁合金的资源、应用及其发展现状[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 72-76.

ZHANG Dingfei, PENG Jian, DING Peidao, et al. The resource, application of magnesium and its alloys and the current development [J]. Materials Review, 2004, 18(4): 72-76.

[5] 欧阳海波, 齐乐华, 李贺军. 液态浸渗法制备碳纤维增强镁基复合材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 67-73.

OUYANG Haibo, QI Lehua, LI Hejun. Development of the carbon fiber reinforced magnesium matrix composites fabricated by liquid metal infiltration[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2008(S1): 67-73.

[6] 翟秀丽. 电流直加热法制备 SiC_p/Mg 复合材料研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

ZHAI Xiuli. Research of the preparation of particulate reinforced magnesium matrix composites by direct current heating[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.

[7] HUFENBACH W, ANDRICH M, LANGKAMP A, et al. Fabrication technology and material characterization of carbon fiber reinforced magnesium[J]. Journal of Materials

Processing Technology, 2006, 175(1-3): 218-233.

[8] WU Y W, WU K, DENG K K, et al. Effect of extrusion temperature on microstructures and damping capacities of Grp/AZ91 composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 506: 688-692.

[9] WANG W G, XIAO B L, MA Z Y. Evolution of interfacial nanostructures and stress states in Mg matrix composites reinforced with coated continuous carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72: 152-158.

[10] EUSTATHOPOULOS N, ISRAEL R, DREVET B, et al. Reactive infiltration by Si: Infiltration versus wetting[J]. Scripta Materialia, 2010, 62: 966-971.

[11] NARAYANA K S, SUMAN K N S, ARUNVIKRAM K, et al. Optimization of surface roughness of fiber reinforced composite material in milling operation using Taguchi design method[J]. International Journal of Mechanics Structural, 2011, 2(1): 31-42.

[12] 韩胜超. CFRP 侧铣加工工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

HAN Shengchao. Research on side milling process of CFRP[D]. Nanjing: Nanjing

University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[13] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2012, 55(16): 44-49.

KANG Renke, MA Fujian, DONG Zhigang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(16): 44-49.

[14] 马星辉. 碳纤维复合材料超声振动铣削的技术基础研究[D]. 洛阳: 河南理工大学, 2009.

MA Xinghui. The basic technology research on the ultrasonic milling of CFRP[D]. Luoyang: Henan Polytechnic University, 2009.

[15] 张其馨, 罗建伟, 曹天河, 等. 碳纤维复合材料振动钻孔初探[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1992(3): 14-17.

ZHANG Qixin, LUO Jianwei, CAO Tianhe, et al. A tentative study of vibration-drilling of carbon-fibre composite[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1992(3): 14-17.

[16] HOCHENG H, TAI N H, LIU C S. Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC

composite material[J]. Composites Part A, 2000, 31(2): 133-142.

[17] 弯艳玲, 张学蕊, 于化东, 等. 高速微铣削铝合金表面粗糙度的多指标正交试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(24): 3278-3282, 3288.

WAN Yanling, ZHANG Xuerui, YU Huadong, et al. A multi-index orthogonal test study of aluminum alloy surface roughness using high speed micro-milling process[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(24): 3278-3282, 3288.

[18] 汪强, 路冬, 李卫生, 等. 基于有限元法和田口法的 Inconel718 超声椭圆振动切削参数优化[J]. 工具技术, 2016(12): 36-42.

WANG Qiang, LU Dong, LI Weisheng, et al. Optimization of cutting parameters in ultrasonic elliptical vibration turning of Inconel 718 based on finite element model and Taguchi method[J]. Tool Engineering, 2016(12): 36-42.

通讯作者: 袁松梅, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进制造、医工结合、微量润滑等, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn.

Research on Ultrasonic Assisted Cutting Carbon Fiber Reinforced Mg-Matrix Composite

JIANG Zhenbang^{1,2}, YUAN Songmei^{1,2}, LI Zhen^{1,2}, LI Qilin^{1,2}, SONG Xiaojun³, LI Yan³

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Engineering Technological Research Center of High-Efficient & Green CNC Machining Process and Equipment, Beijing 100191, China;

3. Beijing Hangtianxinfeng Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100854, China)

[ABSTRACT] This paper aims to study the machinability of carbon fiber reinforced Mg-matrix composite (C_f/Mg), the ultrasonic assisted cutting experiments of carbide milling cutters and carbide drill bits are carried out. Through orthogonal test, it is found that the milling force of ultrasound-assisted milling C_f/Mg composite increases with the increase of feed and milling depth of each tooth, and decreases with the increase of spindle speed. In the test, when ultrasonic assisted milling is carried out, the feed per tooth is 0.025mm, the milling depth is 0.2mm, and the milling force is the minimum under the processing parameters of 6000r/min. The feed per tooth is 0.025mm, the milling depth is 0.2mm, and the surface quality under the processing parameters of 4000r/min is relatively good. When single factor drilling test is carried out with carbide bit, the axial drilling force decreases with the increase of spindle speed. Compared with traditional drilling, ultrasonic assisted drilling can reduce the axial drilling force. Compared with traditional drilling, ultrasonic assisted drilling can reduce the axial drilling force by about 36% when the machine speed is 6000r/min and the feed speed of the machine is 100mm/min. Compared with traditional drilling, ultrasonic assisted drilling can decrease burr and stratification at the drilling exit.

Keywords: Carbon fiber reinforced Mg-matrix composite; Ultrasonic assisted cutting; Cutting force; Cutting parameter; Surface quality

(责编 铃兰)