

石墨烯铝基复合材料超声辅助微铣削工艺研究

徐林红, 陈勇, 韩光超, 那昊波

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北, 武汉 430074)

摘 要: 超声辅助微铣削作为一种新兴复合加工技术, 在加工硬脆材料和复合材料中具有独特的优势. 针对石墨烯铝基复合材料在工业应用中存在难加工、加工精度要求高、加工效率低等问题, 本文以纯铝及石墨烯铝基复合材料为研究对象, 对不同配比的石墨烯铝基复合材料进行了超声辅助微铣削实验. 通过正交实验分析石墨烯含量、每齿进给量以及超声振幅对铣削力和加工表面粗糙度的影响, 从而确定石墨烯铝基复合材料在超声辅助微铣削下的最佳工艺参数. 实验结果表明, 当每齿进给量为 $1 \mu\text{m}/\text{z}$, 超声振幅为 $3.05 \mu\text{m}$ 时, 石墨烯铝基复合材料的加工性能最优.

关键词: 石墨烯; 铝基复合材料; 超声辅助微铣削; 铣削力

中图分类号: TG663

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2021)08-0894-07

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.125

Machinability Research on the Ultrasonic Assisted Micro-Milling for Graphene Based Aluminum Matrix Composite

XU Linhong, CHEN Yong, HAN Guangchao, NA Haobo

(Faculty of Mechanical & Electrical Information, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: As a new composite processing technology, ultrasonic assisted micro-milling represents unique advantage in processing hard and brittle materials and composites. In order to solve the problems of difficult machining, high machining accuracy requirement and low processing efficiency in industrial applications of graphene-based aluminum matrix composites, a pure aluminum and graphene-based aluminum matrix composite were taken as research objects to carry out ultrasonic assisted micro-milling experiments for graphene-based aluminum matrix composites with different ratios. The effects of graphene content, feed rate per tooth and ultrasonic amplitude on milling force and surface roughness were analyzed based on orthogonal experiment, and the optimal process parameters of graphene aluminum matrix composite under ultrasonic assisted micro milling were determined. The results show that the graphene-Al matrix composites can put up a best processing performance under $1 \mu\text{m}/\text{z}$ feed per tooth and $3.05 \mu\text{m}$ ultrasonic amplitude.

Key words: graphene; aluminum matrix composites; ultrasonic assisted micro-milling; milling force

轻质金属基复合材料由于其高强度、轻量化特点已成为复合材料的一个研究热点. 研究者们通常利用碳纳米管、陶瓷颗粒等作为增强体提高铝合金

基体的力学性能, 并在汽车、航空、光学器材等领域得到了应用. 随着石墨烯在 2004 年发现以后, 这一独特的二维结构材料就受到了世界各国材料界的重

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22078296)

作者简介: 徐林红(1970—), 女, 博士, 副教授, E-mail: xulinhong@cug.edu.cn.

视^[1], 石墨烯的二维结构使其在分散性和润湿性上都有很大的提高, 从而使得石墨烯可以更有效地与基体材料结合。此外石墨烯在受力时会伴随着如裂纹止裂或偏转等现象的产生, 可以有效防止裂纹在复合材料中的扩散, 从而提高复合材料的使用寿命^[2-4]。目前已有的研究也表明将石墨烯添加到铝或铝合金中能提高基体的力学性能, WANG 等^[5]采用粉末冶金工艺制备石墨烯纳米片(Graphene Nano-Flakes, GNFs)/Al 复合材料, 并通过表面改性强化石墨烯和基体之间的界面结合能力, 提高复合材料抗拉强度。YAN 等^[6]采用热等静压工艺制备石墨烯铝基复合材料, 实验结果表明当石墨烯含量达到 0.5% 时, 材料的抗拉强度从 373 MPa 提高到 467 MPa, 屈服强度从 214 MPa 提高到 319 MPa。尽管石墨烯的加入可以提高铝及铝合金基体的性能, 但在其制备技术的研究中由于石墨烯的均匀分散技术和制备成本等因素, 使得制品的尺寸大小受到了限制, 应用领域主要集中在小型精密零件上, 这对成品的尺寸精度提出了更高的要求。

微铣削技术在加工复杂精密零件时具有高效率和高柔性的特点, 可以满足石墨烯铝基复合材料的加工需求^[7]。但在微铣削加工过程中, 由于刀具刃口半径和最小切屑厚度与石墨烯特征尺寸相近, 石墨烯的含量和分散性也可能影响刀具的运动轨迹, 使得 GNFs/Al 复合材料的微铣削过程不同普通的铝基复合材料^[8]。另一方面, 由于铝基体和石墨烯强化相性能差异较大, 采用常规的微铣削工艺进行加工时容易由于铣削力过大造成刀具磨损严重以及加工表面损伤等问题, 为了改善这一现象, 本文中引入超声辅助加工技术来降低铣削力提高加工质量^[9]。复合材料的超声辅助铣削方面目前已进行了大量的研究。ZHI 等^[10]对铝基碳化硅复合材料进行超声辅助铣削发现有超声加工比无超声加工的工件表面质量更好。蒋振邦等^[11]通过正交试验得到超声辅助铣削镁基碳纤维增强复合材料时对铣削力影响最大的是每齿进给量。董志国等^[12]对碳化硅增强铝基复合材料进行超声辅助微铣削实验发现在相同切削参数条件下, 超声辅助的铣削力较普通铣削力减小 10%~50%。

针对石墨烯铝基(GNFs/Al)复合材料的研究主要集中在制备工艺上, 而在超声辅助微铣削条件

下的最优加工参数还缺乏深入的探究。因此本文中采用热压烧结法制备石墨烯铝基复合材料, 并利用超声辅助铣削平台完成微铣削实验, 分析石墨烯铝基复合材料在超声辅助下不同加工参数对微铣削过程中的铣削力和表面粗糙度的影响并对工艺参数进行优化。

1 材料制备与表征

1.1 复合材料的制备

文中采用乙醇超声法、低速球磨法以及热压烧结法制备不同含量的石墨烯铝基复合材料如表 1 所示。将物理法制备的石墨烯粉末(厚度<3 nm, 平均粒径为 $6 \times 6 \mu\text{m}$, 纯度 $\geq 99.7\%$)与雾化法制备的纯铝粉(球形, 纯度 $\geq 99\%$, 平均粒径为 10~15 μm)在无水乙醇中超声振荡 15 min, 并在 80 °C 的真空环境下干燥 3 h。随后在全方位行星式球磨机中进行球磨, 球料比为 20:1, 球径比为 5:4:3, 球磨速度为 150 r/min, 球磨时间为 3 h, 真空度为 -0.06 MPa, 最后将球磨后的复合粉体置于石墨模具中进行热压烧结, 烧结压力为 1 T, 烧结温度为 600 °C, 升温速率为 20 °C/min, 保温时间为 10 min, 随炉冷到室温后取出, 最终得到直径为 20 mm、高为 10 mm 的石墨烯铝基复合材料试样。

表 1 复合材料成分

Tab. 1 Composition of composite materials

名称	Al/%	GNFs/%
Al	100	0
0.5% GNFs/Al	99.5	0.5
1.0% GNFs/Al	99	1.0
1.5% GNFs/Al	98.5	1.5
2.0% GNFs/Al	98	2.0

1.2 复合材料的表征

使用 NIKON ECLIPSE MA100N 型倒置金相显微镜、HV-1000A 型显微硬度仪以及阿基米德排水法对复合材料晶粒大小、显微硬度以及密度进行测量, 所得的金相图像及各项相关性能指标分别如图 1 和表 2 所示。

从图 1 可以清晰地看出, 黑色的石墨烯均匀地分布在晶界处, 并且随着石墨烯含量的增加, 晶界处的黑色区域随之增加, 这主要是因为石墨烯团聚现象导致的。

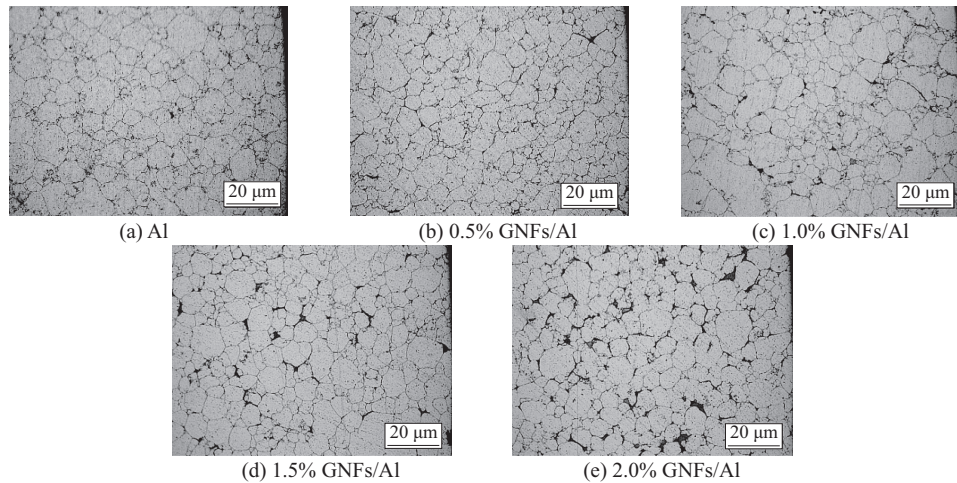


图 1 纯铝及 GNFs/Al 复合材料金相图像

Fig. 1 Metallographic image of pure aluminum and different GNFs/Al composites

表 2 复合材料密度、显微硬度及晶粒度

Tab. 2 Density, microhardness and grain size of different composites

样品	实际密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	理论密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度 /%	显微硬 度/HV	晶粒粒 度/ μm
Al	2.68	2.70	99.26	26	9.21
0.5% GNFs/Al	2.66	2.69	99.89	37	6.78
1.0% GNFs/Al	2.65	2.68	98.88	36	7.66
1.5% GNFs/Al	2.63	2.66	98.87	31	8.12
2.0% GNFs/Al	2.61	2.65	98.49	29	8.37

从表 2 中可以看出,GNFs/Al 复合材料的晶粒大小会随着石墨烯含量的上升而增大,但始终小于纯铝晶粒的粒度,这是因为石墨烯特殊的褶皱结构抑制了铝基体晶粒的粗化与长大,从而达到晶粒细化的效果.但随着石墨烯含量的继续增加,由于团聚现象的出现而使得增强相石墨烯被还原至石墨,进而导致晶粒细化作用减弱^[13].

从表 2 中的数据还可以发现,随着石墨烯含量的增加其复合材料的密度则会降低.这可能是过多的石墨烯团聚形成缺陷造成的.同时 GNFs/Al 复合材料的显微硬度随着石墨烯含量的增加呈现“上升-下降”的趋势,这主要归结于石墨烯能够在晶界处形成高密度位错区^[8],使形成的复合材料能够承受更大的外力负荷.但石墨烯含量对复合材料的性能提升有在一定的阈值范围,原因是大量的石墨烯因为团聚现象被还原成石墨,加剧了复合材料中孔隙和裂纹的扩大,从而降低了 GNFs/Al 复合材料的显微硬度.

2 超声辅助微铣削试验

2.1 实验平台及设备

本实验的铣削平台为 DMM-22-55 四轴数控曲

面精雕机,主轴转速为 20 000 r/min. 试样切成尺寸为 15 mm×18 mm×10 mm 的方块,采用直径为 1 mm、刃口半径约为 2 μm 的两刃涂层立铣刀加工长度为 15 mm、轴向深度为 200 μm 的通槽. 超声辅助微铣削实验平台的搭建如图 2 所示. 实验过程中为了能够准确地测量超声辅助微铣削过程中的铣削力,将工件固定在超声变幅器上,并利用万向球将 Kistler9257B 型测力仪和超声变幅器连接起来,万向球的滚动和超声变幅杆的法兰可以实现超声振动平台沿进给方向水平超声振动^[14],此外通过调整超声输出功率的大小实现超声振幅的变化,当超声输出功率为 30%、50%、70%和 90%时,对应的超声振幅依次为 1.17、2.24、3.05、3.86 μm .

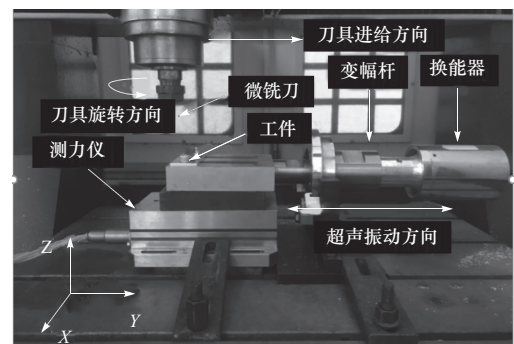


图 2 超声辅助微铣削实验平台

Fig. 2 Experimental platform of ultrasonic assisted micro milling

2.2 实验方案

为了分析石墨烯含量、每齿进给量和超声振幅对超声辅助微铣削过程中的铣削力以及表面粗糙度的综合影响规律,本文设计了三因素五水平的正交实验,如表 3 所示.

表 3 正交实验参数

Tab. 3 Orthogonal experiment parameters

水平	石墨烯质量 分数/%	每齿进给量 $f_z/(\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$	超声振幅 $A/\mu\text{m}$
1	0	0.25	0
2	0.5	0.50	1.17
3	1.0	0.75	2.24
4	1.5	1.00	3.05
5	2.0	1.25	3.86

正交实验的极差分析中 3 个重要的参数是 K_{ij} 、 k_{ij} 和 R_j , 其中, i 代表水平, j 代表因素. K_{ij} 代表每个因素对应的所有水平结果之和, k_{ij} 代表每个因素对应的所有水平结果的平均值, $k_{ij} = K_{ij}/5$.

极差 R_j 的计算公式为 $R_j = k_{ij\max} - k_{ij\min}$.

正交实验的方差分析中 5 个重要的参数分别是偏差平方和 S 、自由度 f 、方差 σ 、 F 值以及 F_a 显著水平. 其中, 实验的总偏差平方和 S_T 的计算式为

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式中: S_T 为所有实验数据 k_{ij} 的总和; $\bar{x}$ 为全部实验数据平均数; n 为实验的水平个数; k 为实验的因素个数.

单个因素 A 的偏差平方和 S_i 的计算式为

$$S_i = n \sum_{i=1}^k (x_{i1} - \bar{x})^2 \quad (2)$$

表 4 铣削力极差分析表

Tab. 4 Analysis of milling force range

实验号	实验参数			指标	实验号	实验参数			指标
	$w_t/\%$	$f_z/(\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$		$w_t/\%$	$f_z/(\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$
1	0	0.25	0	0.815	17	1.5	0.50	3.86	0.751
2	0	0.50	1.17	0.681	18	1.5	0.75	0	0.982
3	0	0.75	2.24	0.791	19	1.5	1.00	1.17	0.619
4	0	1.00	3.05	0.651	20	1.5	1.25	2.24	0.760
5	0	1.25	3.86	0.770	21	2.0	0.25	2.86	0.584
6	0.5	0.25	1.17	0.738	22	2.0	0.50	0	0.894
7	0.5	0.50	2.24	0.810	23	2.0	0.75	1.17	0.744
8	0.5	0.75	3.05	0.859	24	2.0	1.00	2.24	0.523
9	0.5	1.00	3.86	0.648	25	2.0	1.250	3.05	0.596
10	0.5	1.25	0	1.110	k_{1j}	0.742	0.686	0.958	
11	1.0	0.25	2.24	0.730	k_{2j}	0.833	0.796	0.739	
12	1.0	0.50	3.05	0.845	k_{3j}	0.876	0.856	0.723	
13	1.0	0.75	3.86	0.902	k_{4j}	0.735	0.686	0.703	
14	1.0	1.00	0	0.989	k_{5j}	0.668	0.830	0.731	
15	1.0	1.25	1.17	0.913	R_j	0.208	0.170	0.255	
16	1.5	0.25	2.24	0.564					

因为 k_{ij} 的大小可判断第 j 列因素的最优水平和最优组合, 所以根据表 4 中 k_{ij} 的值分析可知: 随着石墨烯质量分数的增加, k_{i1} 呈现先增大后减小的趋势, 当石墨烯质量分数为 2% 时实验结果最好. 原因是 0.5% GN-

误差的偏差平方和 S_e 的计算式为

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C) \quad (3)$$

实验的总自由度 f_T , 各个因素的水平自由度 f_i , 误差的自由度 f_e 的计算式为

$$f_T = N - 1, f_i = n - 1, f_e = f_T - k f_i \quad (4)$$

总均方 σ_T 、组间均方 σ_i 、组内均方 σ_e 的计算式分别为

$$\sigma_T = \frac{S_T}{f_T}, \sigma_i = \frac{S_i}{f_i}, \sigma_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (5)$$

根据各部分的均方计算构造分布量 F , 并根据显著水平来判断因素对实验的影响程度.

$$F = \frac{\sigma_i}{\sigma_e} \quad (6)$$

3 实验结果及分析

3.1 铣削力分析

采用测力仪对超声辅助微铣削过程中垂直于进给方向的铣削力 F_x 、进给方向的铣削力 F_y 和竖直方向的铣削力 F_z 进行采集. 铣削合力 $F_{\text{合}}$ 的计算公式为

$$F_{\text{合}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (7)$$

3.1.1 工艺参数最优化分析

通过对铣削力的采集和计算得到各因素各水平的均值以及各因素的水平极差, 详细结果如表 4 所示, 表中 w_t 为石墨烯的质量分数.

FS/Al 复合材料的硬度和致密度都接近峰值, 在加工过程中刀具和工件之间会产生强烈的振动, 从而使切削力产生较大波动. 而当石墨烯质量分数为 2% 时, 石墨烯的润滑作用使得刀具在切削过程中与切屑更容易分

离,铣削力下降. 用相同的方法选出每齿进给量为 $1\text{ }\mu\text{m/z}$ 、超声振幅为 $3.05\text{ }\mu\text{m}$. 另外,极差 R_j 的大小可以判断各因素对实验结果的影响主次关系. R_j 值越大表示该因素对结果影响越大,该因素越重要, R_j 值越小,因素影响越小. 因此从表 4 中可以看出,在超声辅助微铣削过程中对铣削力影响大小的因素依次为超声振幅、石墨烯质量分数以及每齿进给量. 原因是当施加超声振动后,刀具与工件出现间歇性地分离和接触,脉冲式的冲击加速了切削方向的微小裂纹的产生,使得铣削力和刀具磨损减小. 但随着超声振幅的增大,铣削力出现先减小后增大的趋势,说明过小或过大的超声振幅在对铣削力的改善并不明显. 而在超声辅助微铣削实验中每齿进给量的尺寸效应和石墨烯润滑作用作为次要因素也在一定程度上影响铣削力的变化.

3.1.2 显著性分析

为了分析该正交实验中因素引起的变异和误差引起的变异和评价各个因素的显著性,相应的方差分析表如表 5 所示.

表 5 铣削力方差分析表

Tab. 5 Analysis of variance of milling force

方差来源	S	f	σ	F	显著性	$F_{0.01(2,4)}$
石墨烯质量分数(因素 A)	0.134 475	4	0.033 618 75	23.19	***	18.00
每齿进给量(因素 B)	0.128 905	4	0.032 226 25	22.23	***	
超声振幅(因素 C)	0.222 605	4	0.055 651 25	38.39	***	
误差	0.017 394	12	0.001 449 5			
总计	0.503 379	24				

通过查 F 临界表可知 $F_{0.01(2,4)} = 18.00, F_C > F_A > F_B > F_{0.01(2,4)} = 18.00$. 即复合材料中石墨烯的质量分数、每齿进给量以及超声振幅对微铣削过程中铣削力的变化影响非常显著. 其中,超声振幅为主要影响因素、其次为石墨烯含量和每齿进给量,这与铣削力的极差分析结果一致. 因此为使刀具受到的铣削力更低,GNFs/Al 复合材料的超声辅助微铣削最佳方案为石墨烯质量分数为 2%,每齿进给量为 $1\text{ }\mu\text{m/z}$ 、超声振幅为 $3.05\text{ }\mu\text{m}$. 由于石墨烯质量分数为 2% 时,其密度和硬度等性能指标相对较低,一般情况下不采用.

3.2 铣槽表面粗糙度分析

采用 B-6C 触针式表面粗糙度测量仪对超声辅助微铣削后的材料表面粗糙度 R_a 进行测量,选取不同的地方分别测量 3 次,将平均值作为最终的表面粗糙度值 R_a ,如表 6 所示,同时得到超声辅助微铣削后的槽底放大图如图 3 所示. 根据极差理论和表 6 中的数据可知,在超声辅助微铣削过程中对表面粗糙度影响最大的是石墨烯质量分数,其次为超声振幅,最后为每齿进给量. 由表中 k_{ij} 的值分析可知:随着复合材料中石墨烯质量分数的增加,石墨烯的晶粒细化和润滑作用大大降低了超声辅助微铣削过程中的刀具与工件的摩擦,表面粗糙度呈现先减小后缓慢增大的趋势,并在石墨烯质量分数为 1.5% 时表面粗糙度值最小. 用相同的方法选出每齿进给量为 $1\text{ }\mu\text{m/z}$ 、超声振幅为 $3.05\text{ }\mu\text{m}$.

表 6 表面粗糙度极差分析表

Tab. 6 Surface roughness range analysis

实验号	实验参数			指标	实验号	实验参数			指标
	$w_i/\%$	$f_z/(\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$			$w_i/\%$	$f_z/(\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	
1	0	0.25	0	1.289	17	1.5	0.50	3.86	0.639
2	0	0.50	1.17	1.226	18	1.5	0.75	0	0.982
3	0	0.75	2.24	0.922	19	1.5	1.00	1.17	0.565
4	0	1.00	3.05	0.893	20	1.5	1.25	2.24	0.657
5	0	1.25	3.86	0.962	21	2.0	0.25	3.86	0.822
6	0.5	0.25	1.17	0.734	22	2.0	0.50	0	0.935
7	0.5	0.50	2.24	0.821	23	2.0	0.75	1.17	0.681
8	0.5	0.75	3.05	0.707	24	2.0	1.00	2.24	0.609
9	0.5	1.00	3.86	0.653	25	2.0	1.250	3.05	0.723
10	0.5	1.25	0	1.187	k_{1j}	1.058	0.826	1.007	
11	1.0	0.25	2.24	0.706	k_{2j}	0.820	0.873	0.783	
12	1.0	0.50	3.05	0.745	k_{3j}	0.757	0.738	0.743	
13	1.0	0.75	3.86	0.689	k_{4j}	0.626	0.730	0.729	
14	1.0	1.00	0	0.933	k_{5j}	0.754	0.848	0.753	
15	1.0	1.25	1.17	0.712	R_j	0.432	0.143	0.278	
16	1.5	0.25	3.05	0.579					

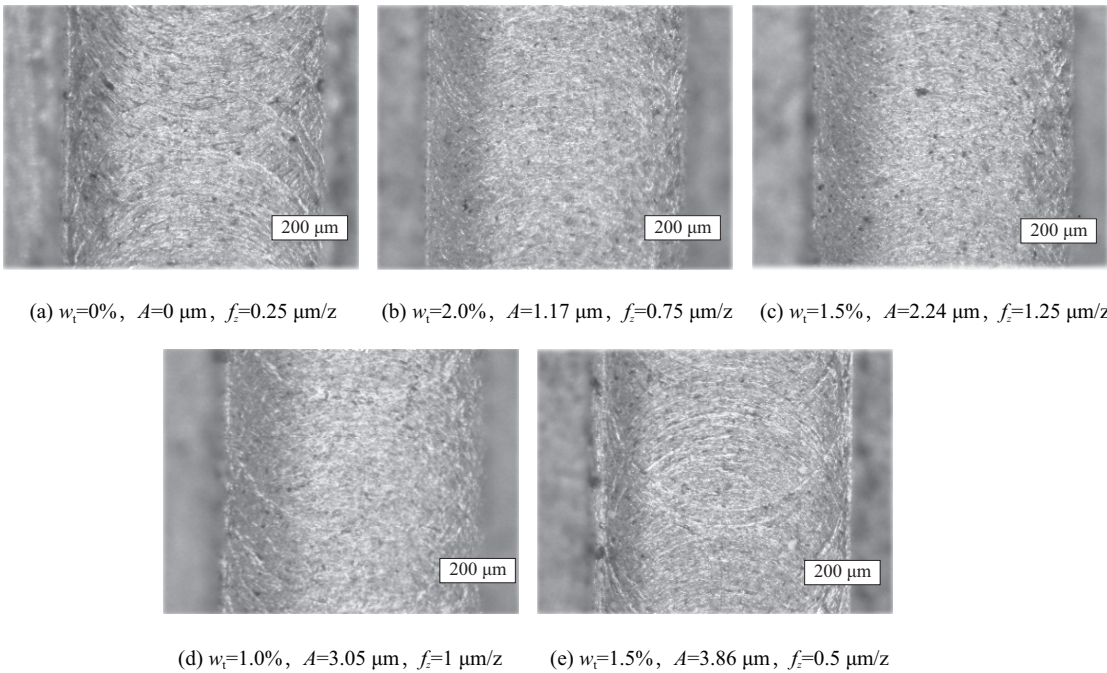


图 3 超声辅助微铣削槽底面放大图

Fig. 3 Enlarged view of ultrasonic assisted micro-milling groove bottom

3.2.1 工艺参数最优化分析

另外,从表 6 中还可以看出,随着超声振幅的增大,铣槽的表面粗糙度呈现出先减小后增大的变化趋势。分析可知:施加超声振动后刀具和工件材料产生间歇性的分离和接触,降低了微铣削过程中的切削热进而铣槽表面粗糙度降低,并在超声振幅为 3.05 μm 达到最小值。但当超声振幅大于 3.05 μm 时,刀具切削刃对工件的冲击作用增大会产生往复挤压式的切

削。同时冲击作用也会使刀具与工件的相对振动增大,从而使得铣槽的表面粗糙度变大^[15]。

3.2.2 显著性分析

正交实验中的极差分析对数据的平均值进行了评价,但其中仍然包含误差的干扰,因此需要考虑误差对实验结果的影响,通过方差分析来验证实验结果的显著性可以有效解决这一问题,如表 7 所示。

表 7 铣槽表面粗糙度方差分析表

Tab. 7 Analysis of variance of surface roughness of milling groove

方差来源	S	f	σ	F	显著性	$F_{0.01(2,4)}$	$F_{0.05(2,4)}$	$F_{0.10(2,4)}$	$F_{0.25(2,4)}$
石墨烯含量	0.505 80	4	0.126 45	18.25	***				
每齿进给量	0.085 04	4	0.021 26	3.07	*	18.00	6.94	4.32	2.00
超声振幅	0.267 96	4	0.066 99	9.67	**				
误差	0.083 13	12	0.006 93						
总方和	0.94193	24							

通过查 F 临界表可知 $F_{0.01(2,4)}=18.00, F_{0.05(2,4)}=6.94, F_{0.10(2,4)}=4.32, F_{0.25(2,4)}=2.00, F_A>F_{0.01(2,4)}>F_C>F_{0.05(2,4)}>F_{0.10(2,4)}>F_B>F_{0.25(2,4)}$ 。可以看出,复合材料中石墨烯质量分数对铣槽的表面粗糙度变化影响非常显著。超声振幅对表面粗糙度的影响次之,而每齿进给量对铣槽的表面粗糙度影响最弱。这与铣槽表面粗糙度的极差分析结果一致。因此为了有效的提高铣槽的表面质量,GNFs/Al 复合材料的超声辅助微铣削最佳方案为石墨烯质量分数为 1.5%,

每齿进给量为 1 μm/z,超声振幅为 3.05 μm。

4 结束语

通过对石墨烯铝基复合材料进行超声辅助微铣削正交实验,探索了石墨烯质量分数、每齿进给量、超声振幅对铣削力和表面粗糙度的影响规律,所得结论如下。

① 影响石墨烯铝基复合材料在超声辅助微铣削过程中铣削力大小的主次关系为:超声振幅>石墨烯含量>每齿进给量;影响石墨烯复合材料在超

声辅助微铣削过程中的主次关系为石墨烯质量分数>超声振幅>每齿进给量。

② 在实验因素水平范围内,GNFs/Al 复合材料超声辅助微铣削的最佳方案为石墨烯质量分数为1.5%,每齿进给量为 $1\text{ }\mu\text{m/z}$,超声振幅为 $3.05\text{ }\mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] LIU W W, XIA B Y, WANG X X, et al. Exfoliation and dispersion of graphene in ethanol-water mixtures[J]. *Frontiers of Materials Science*, 2012, 6(2): 176 - 182.
- [2] RAFIEE M A, RAFIEE J, SRIVASTAVA I, et al. Fracture and fatigue in graphene nanocomposites[J]. *Small*, 2010, 6(2): 179 - 183.
- [3] 杨宇凯, 张宝, 王旭东, 等. 石墨烯及碳化硅增强铝基复合材料的冲击力学行为[J]. *材料工程*, 2019, 47(3): 15 - 22.
YANG Yukai, ZHANG Bao, WANG Xudong, et al. Mechanical behavior of graphene or SiC reinforced aluminum matrix composites under dynamic loading[J]. *Materials Engineering*, 2019, 47 (3): 15 - 22. (in Chinese)
- [4] 梁建权, 赵宇宏, 陈利文, 等. 石墨烯纳米片增强铝基复合材料的制备及研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(6): 652 - 656.
LIANG Jianquan, ZHAO Yuhong, CHEN Liwen, et al. Preparation and analysis of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloy*, 2019, 39 (6): 652 - 656. (in Chinese)
- [5] WANG J Y, LI Z Q, FAN G L, et al. Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 66(8): 594 - 597.
- [6] YAN S J, DAI S L, ZHANG X Y. Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 612: 440 - 444.
- [7] 石文天, 侯岩军, 刘玉德, 等. 微切削毛刺形成机理及研究进展综述[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(23): 2809 - 2819, 2828.
SHI Wentian, HOU Yanjun, LIU Yude, et al. Overview on formation mechanism and research progress of burrs in micro cutting [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30 (23): 2809 - 2819 , 2828. (in Chinese)
- [8] ARORA I, SAMUEL J, KORATKAR N. Experimental investigation of the machinability of epoxy reinforced with graphene platelets[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(4): 1007 - 1014.
- [9] 向业, 许磊, 廖鹏飞, 等. 航空难加工材料超声振动辅助切削技术现状及发展趋势[J]. *工具技术*, 2018, 52(8): 8 - 11.
XIANG ye, XU Lei, LIAO Pengfei, et al. Present situation and development of ultrasonic vibration assisted cutting of difficult to machine materials for aviation[J]. *Tool Technology*, 2018, 52 (8): 8 - 11. (in Chinese)
- [10] ZHI X T, XIANG D H, DENG J Q. Research on high volume fraction SiCp/Al removal mechanism under condition of ultrasonic vertical vibration[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 373 - 375: 2038 - 2041.
- [11] 蒋振邦, 袁松梅, 李真, 等. 镁基碳纤维增强复合材料超声辅助切削试验研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(11): 55 - 62.
JIANG Zhenbang, YUAN Songmei, LI Zhen, et al. Research on ultrasonic assisted cutting carbon fiber reinforced Mg-Matrix composite[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2019, 62(11): 55 - 62. (in Chinese)
- [12] 董志国, 魏秋艳, 刘建成, 等. SiCp/Al 轴向超声振动微铣削的切削特性试验研究[J]. *制造技术与机床*, 2020(1): 34 - 37.
DONG Zhiguo, WEI Qiuyan, LIU Jiancheng, et al. Experimental research on cutting characteristics of SiCp/Al axial ultrasonic vibration micro milling[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2020 (1): 34 - 37. (in Chinese)
- [13] 梁建权, 赵宇宏, 陈利文, 等. 石墨烯纳米片增强铝基复合材料的制备及研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(6): 652 - 656.
LIANG Jianquan, ZHAO Yuhong, CHEN Liwen, et al. Preparation and nalysis of graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2019, 39(6): 652 - 656. (in Chinese)
- [14] 韩光超, 吴文, 徐林红, 等. 工件超声振动辅助微通道铣削成形试验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2016(9): 119 - 124.
HAN Guangchao, WU Wen, XU Linhong, et al. Experimental study on the milling of microchannels with assistant ultrasonic vibration of workpiece[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016(9): 119 - 124. (in Chinese)
- [15] 徐林红, 刘忠, 韩光超, 等. 不同晶粒度 45# 钢超声辅助微铣削实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(11): 1105 - 1110.
XU Linhong, LIU Zhong, HAN Guangchao, et al. Experimental study on ultrasonic assisted micro-milling of 45 # steel under different grain size conditions[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(11): 1105 - 1110. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)