

磨料电化学射流加工SiC_p/Al 复合材料仿真和试验*

刘 壮,邱 一,郭 超,高长水

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)具有优异的物理及力学性能,但是其二次加工极为困难。仿真和试验研究了SiC_p/Al复材的磨料电化学射流加工。结果表明,随着铝基体的去除,SiC增强体与铝基材之间的结合界面不断减小,界面的疲劳寿命随界面面积减小而呈现若干数量级式降低。当结合界面面积下降到较低水平时,SiC增强相会从基体材料上脱落,同时在加工表面留下微坑。加工表面的粗糙度与这些微坑的数量和尺寸高度相关。SiC增强相尺度越大或含量越高,则加工表面越粗糙。

关键词: 特种加工;复合加工;磨料电化学射流加工;碳化硅增强铝基复合材料;加工机理;表面粗糙度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.08.038



刘 壮

工学博士、副教授,主要研究方向为精密电化学加工技术、复合加工技术。主持/参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、国家科技重大专项、江苏省科技计划等课题 10 余项。

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)是航空航天、光学精密仪器和电子产品部分结构的理想材料,极具推广应用价值^[1-2]。由于SiC_p/Al中包含大量的高硬度SiC颗粒,使用机械加工工艺去除该类复材会面临严重的刀具磨损现象^[3-4]。因此,利用特种加工工艺进行SiC_p/Al复材的去除加工越来越受到关注,如电火花加工(EDM)、激光加工(LBM)、电化学加工(ECM)和磨料水射流加工(AWJ)等。

电化学射流加工技术(Electrochemical Jet Machining, ECJM)是电化学加工方法的一个分支,它通过电解液束蚀除金属材料,适用于金属表面微小特征的加工,如凹槽、流道和微型腔^[5-8]。Bisterov等^[7]尝试运用计算机辅助制造软件结合

ECJM加工设备在金属表面上制造出较为复杂的表面结构。Martin等^[8]利用100μm直径射流、100μm加工间隙、质量分数30%的硝酸钠电解液进行了不锈钢材料的电解射流车削加工研究。在SiC_p/Al材料加工方面,Hackert-Oschätzchen等^[9]利用中性电解液对低体积分数(5%和10%)SiC_p/Al复材的电化学射流加工进行了探索。

磨料电化学射流加工(Abrasive Electrochemical Jet Machining, AECJM)是一种复合加工方法^[10],它将电化学射流加工和磨料水射流加工复合在一起达到高效去除金属材料的目的。在电化学射流中添加磨料的优点在于,磨料的高速冲击能够破坏工件表面的氧化层,加快金属表面的电化学反应,提高材料去除速率。AECJM的加工成形能力与ECJM相似,主要包括微槽、微型

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1105900);国家科技重大专项(2017-VII-0015-0111)。

腔及微坑等。Zhao^[11]、Liu^[12]等研究了AECJM在304不锈钢材料表面加工复杂微槽的能力,分析了加工电压、加工间隙和磨料浓度等工艺参数对槽深和槽宽的影响规律。Hackert-Oschätzchen等^[13]试验研究了ECJM加工WC材料表面微型腔的能力。AECJM加工方法的适用性取决于材料的金属基体是否能够被电化学溶解去除,因此,铝基、铜基、钛基的颗粒增强复合材料均应能够被该方法加工去除。AECJM加工SiC_p/Al复合材料去除效率与加工精度研究方面尚没有公开资料的报道。Sankar等^[14]开展了铝基复合材料的磨料辅助电化学加工试验,通过响应面法建立了材料去除率和表面粗糙度的预测模型。Gao等^[10]对AECJM加工不锈钢表面微槽的加工表面粗糙度进行研究,建立了基于二次多项式的表面粗糙度预测模型。上述研究结果对AECJM加工SiC_p/Al复材具有借鉴意义。

在AECJM加工SiC_p/Al复材过程中,射流中大量存在的磨粒会对SiC增强相产生脉冲式冲击作用,加速增强相与基体材料之间结合界面的疲劳失效破坏,促进SiC增强相的

去除。本文旨在通过仿真和加工试验来研究SiC_p/Al复材在AECJM加工过程中增强相的去除机理。

材料去除机理分析

磨料电化学射流的加工原理如图1(a)所示。该工艺通过电化学阳极溶解和磨粒冲刷的协同作用去除材料。AECJM加工SiC_p/Al的材料去除机理比加工单一金属材料的机理更为复杂。一方面SiC是一种非导电材料,在电化学腐蚀性环境下不会被阳极溶解;另一方面铝基材较易通过电化学溶解方式去除。但是,在NaNO₃电解液的加工环境下,铝基材表面极易出现钝化膜,而混合在电解液中的磨料能够通过高速冲刷作用破坏并去除这些钝化膜。因此,如图1(b)所示,磨料电化学水射流加工SiC_p/Al复材的去除方式应该包含如下过程:(1)射流中的磨料冲蚀去除铝基体表面的钝化层及铝基体;(2)铝基材通过电化学阳极溶解去除;(3)SiC颗粒通过磨料和电化学射流的持续冲刷而被去除。

由于Al₂O₃磨粒的硬度(约18~20GPa)明显低于SiC增强相(21~26GPa),因此本研究中使用的

磨料(Al₂O₃颗粒)很难对SiC增强相形成冲蚀破坏^[15]。而铝材的电化学溶解机理研究已经较为成熟,因此本文将主要研究SiC_p/Al复材中SiC增强相的去除机理。

射流冲击下增强相-铝基材结合界面的疲劳寿命仿真

1 SiC增强相的受力分析

根据实际加工试验条件,将Al₂O₃磨料简化为直径10μm的球体, SiC增强相简化为直径50μm的球体。图2(a)是增强相的受力示意图,在某个瞬态, SiC颗粒承受由液体射流引起的冲击力 F_1 ,以及由单个磨料引起的冲击力 F_2 。 F_1 的大小沿Y轴方向恒定不变,而 F_2 的方向则随冲击角 β 的变化而变化。可以将 F_2 分解为沿X方向的分量 F_{2x} 和沿Y方向的分量 F_{2y} 。在很短的时间内,将会有大量的Al₂O₃磨粒撞击SiC增强相,仿真计算只考虑沿Y轴方向的冲击力。因此,在一段时间内,射流对SiC的作用力可以简化为一个恒定压力 F_1 和一个脉冲力 F_{2y} 之和,即 $F_{3y}=F_1+F_{2y}$,其中 F_{2y} 的大小随冲击角度变化而变化,如图2(b)所示。仿真的目标是计算在图2(b)所示的

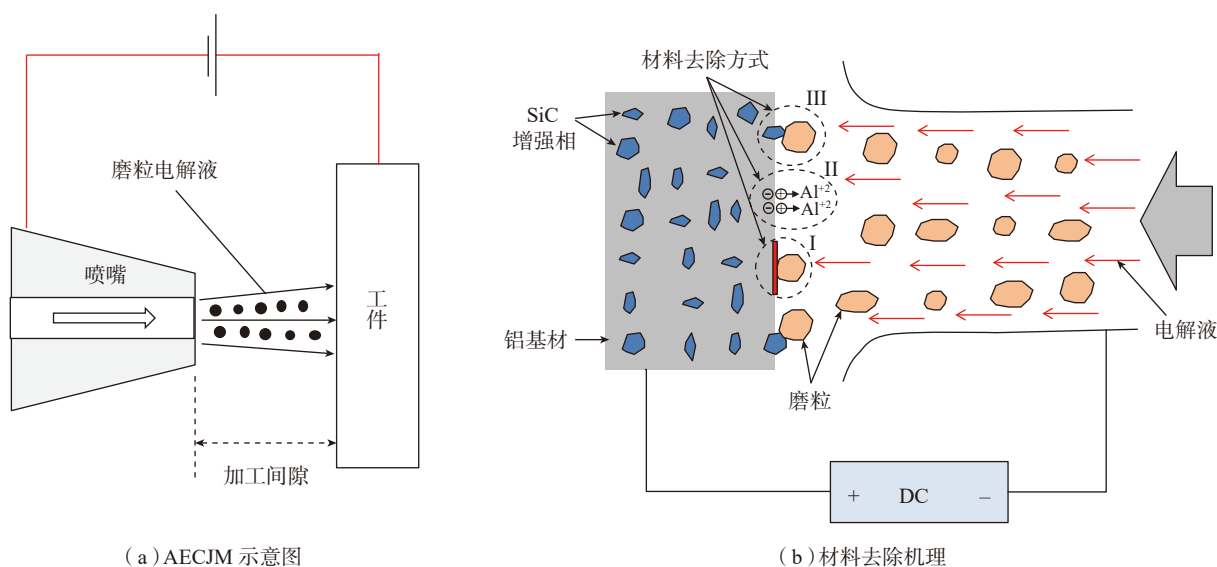


图1 SiC_p/Al复合材料的磨料电化学射流加工机理

Fig.1 Mechanism of abrasive assisted electrochemical jet machining of SiC_p/Al composites

作用下 SiC 增强相与铝基体结合界面的疲劳寿命。

表 1 列出了与仿真相关的一些参数条件。采用 ANSYS 中的 LS-DYNA 和 Fatigue-Tool 两个模块分别计算 SiC 增强颗粒所受的冲击力以及增强体与基体之间结合界面的疲劳寿命。假设 SiC 增强材料和 Al₂O₃ 磨料都是刚性体, SiC 颗粒沿结合界面固定, 并且将 Al₂O₃ 磨粒的撞击速度与射流速度设定为相同值。

2 单磨料对 SiC 增强体的冲击力计算

单磨料与 SiC 增强体发生碰撞时, 其速度和方向将发生变化。速度的变化(加速度)表征了磨料与 SiC 增强体碰撞时产生的冲击力大小。图 3、4 和 5 分别显示了在冲击角度 β 为 90°、60°、30° 时, 单磨料的加速度沿 Y 方向随时间变化的仿真

计算值。可以看出, 磨料的峰值加速度随冲击角 β 而变化。90° 的冲击角获得了最大的加速度, 为 $30 \times 10^6 \text{m/s}^2$, 这意味着该冲击角度产生了沿 Y 方向的最大冲击力。该加速度随冲击角的减小而显著降低。例如, 在冲击角为 30° 时, 峰值加速度大约为 $4.5 \times 10^6 \text{m/s}^2$, 仅为 90° 冲击角的 15%, 换句话说, 冲击角为 90° 的冲击力大约是冲击角为 30° 时的 6~7 倍。

单颗磨料沿 Y 向的冲击力 F_{2y} 可由单磨粒的质量与所对应的最大加速度的乘积计算得到, 结算结果如图 6 所示。可以看出, Y 方向的磨粒冲击力随冲击角的增大而增大。在当前条件下, 由单个 Al₂O₃ 磨粒的冲击而产生的沿 Y 方向的冲击力是一个从 0 到 $6.25 \times 10^{-5} \text{N}$ 之间的随机值。

3 结合界面的疲劳寿命计算

SiC 增强体与铝基体结合界面的寿命可以通过在图 2 (b) 所示的受力情况下的疲劳失效时间计算而得到。通过表 1 中的数据可以得出, 每秒撞击 SiC 增强体表面的液固两相流体总体积为 $1.57 \times 10^{11} \mu\text{m}^3$ 。在此体积中, 根据 Al₂O₃ 磨粒的体积分数, 计算出其中磨粒的总体积为 $3.93 \times 10^8 \mu\text{m}^3$ 。因此, 每秒撞击 SiC 的磨料总数约为 7.5×10^5 , 这些磨粒对 SiC 颗粒的冲击角度是随机的。计算得到电化学射流在 SiC 增强体上产生的恒定压力大约为 $F_1 = 7.85 \times 10^{-3} \text{N}$ (按照 4MPa 射流压力计算)。假定以 1ms 为一个周期, 则在此周期内 SiC 增强体受到的磨料撞击力总数为 750, 这些力的大小范围在 0 到 $6.25 \times 10^{-5} \text{N}$ 随机变化。据

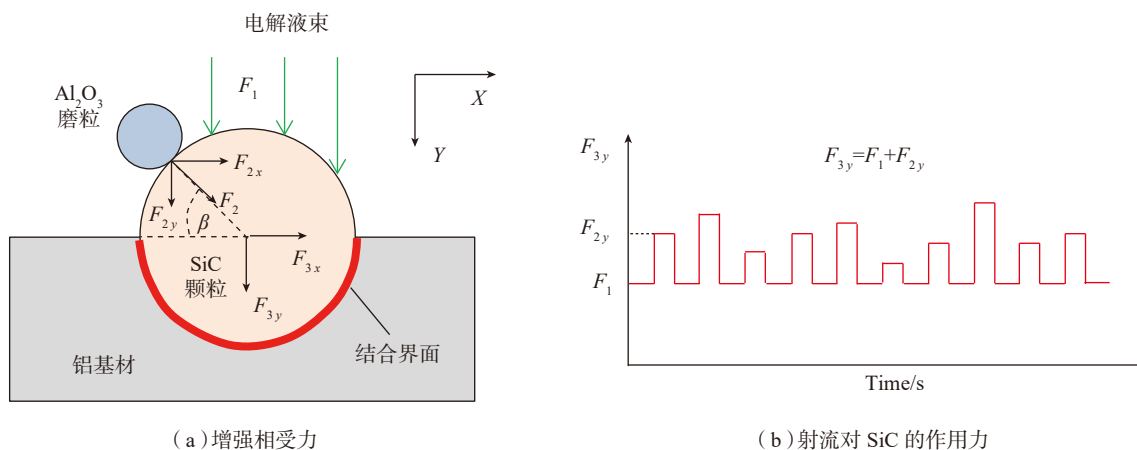


图2 SiC颗粒的受力情况

Fig.2 Analysis of forces on a single SiC particle

表1 仿真计算参数

Table 1 Parameters used in simulation

参数	值
SiC 增强颗粒直径	50 μm
SiC 颗粒密度	3.2g/cm ³
Al ₂ O ₃ 磨料直径	10 μm
Al ₂ O ₃ 磨料密度	3.8g/cm ³
射流直径	300 μm
射流速度	80m/s
磨料浓度	1%

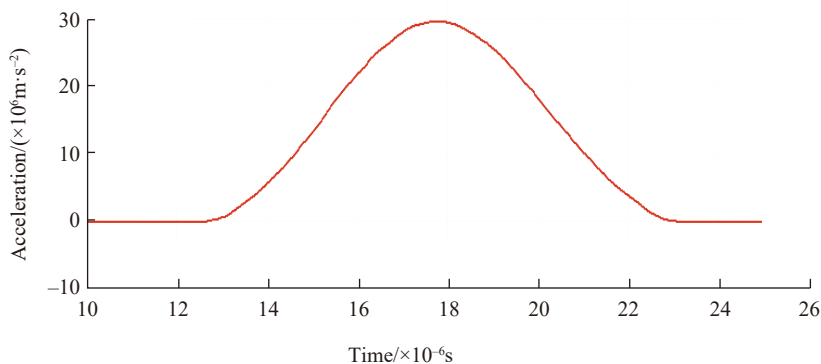


图3 冲击角度为90°时磨粒的加速度变化

Fig.3 Acceleration due to impact angle of 90°

此定义 1ms 周期内施加在 SiC 增强体上的载荷谱,如图 7 所示。利用 ANSYS Fatigue-Tool 模块对结合界面的疲劳寿命进行仿真计算。在有限元计算过程中,将增强体与铝基体的结合面的网格定义为 Bonder。失效准则参考文献 [16] 中的铝材疲劳失效数据,如图 8 所示^[16]。

据结合界面占 SiC 增强体总面积百分比,按照 50% 和 25% 的情况进行结合界面疲劳寿命计算,如图 9 所示。50%—结合界面表示 SiC 增强体的 1/2 面积与基体结合,25%—结合界面表示 SiC 表面的 1/4 与基体结合。图 10 为按照图 7 所示载荷谱加载情况的结合界面寿命仿真结果。结果表明,随着射流冲击时间的增加,结合界面的失效从接近铝基体表面处开始,并逐渐扩展到 SiC 增强体的底部。对于 50%—结合界面,界面单元的最短寿命为 0.0057s,最长寿命为 4.016×10^6 s。对于 25%—结合界面,界面单元的最短和最长寿命分别为 0.0039s 和 428.46s。以界面单元全部失效为判断准则,50%—结合界面和 25%—结合界面的寿命分别约为 4×10^6 s 和 428s。

因此,根据仿真结果可以得出如下结论:单磨粒对 SiC 增强体的冲击力大小取决于磨粒的质量与碰撞速度, SiC 增强体与铝基体结合界面的疲劳寿命随着界面的减小呈若干数量级式减小,例如,25%—结合界面的寿命仅为 50%—结合界面的大约 0.01%,如图 11 所示。因此可以推断,随着结合界面面积减小,界面的疲劳寿命将快速缩短。当界面面积减小到一定水平时, SiC 增强体在射流的冲击作用下最终从基体上脱落。由于 SiC 增强体的脱落,会在加工表面上留下能够被明显观测到的微坑。这些微坑的尺寸大小与 SiC 增强体的尺寸呈正比例关系。

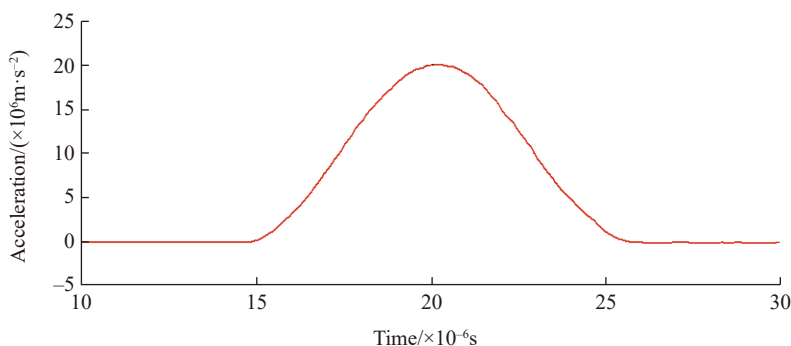


图4 冲击角度为60°时磨粒的加速度变化
Fig.4 Acceleration due to impact angle of 60°

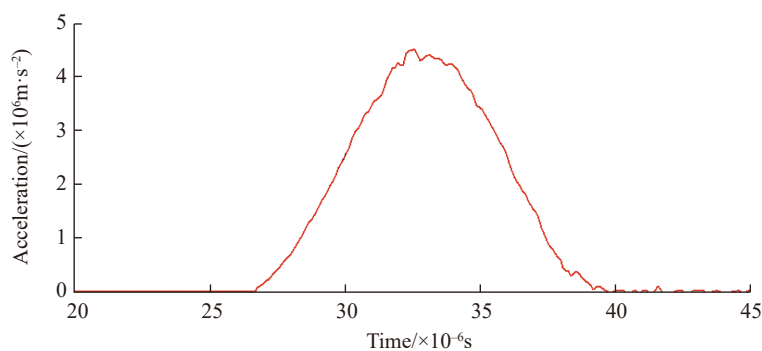


图5 冲击角度为30°时磨粒的加速度变化
Fig.5 Acceleration due to impact angle of 30°

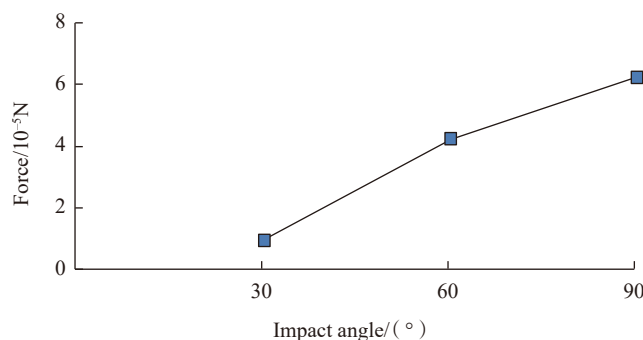


图6 单颗磨料所产生的Y向冲击力随冲击角度的变化
Fig.6 Impact force along Y direction due to a single abrasive as a function of impact angle

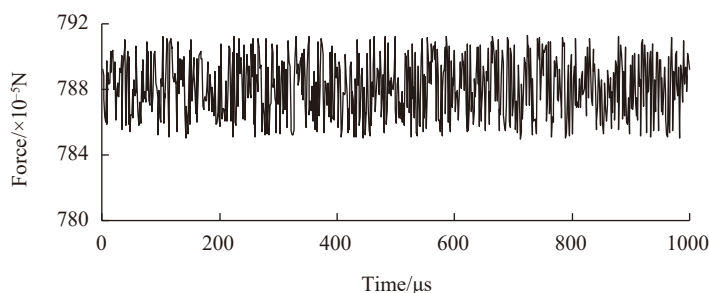


图7 1ms周期内SiC增强体的受载荷载谱
Fig.7 Load spectrum on a single SiC particle in 1ms periodic time

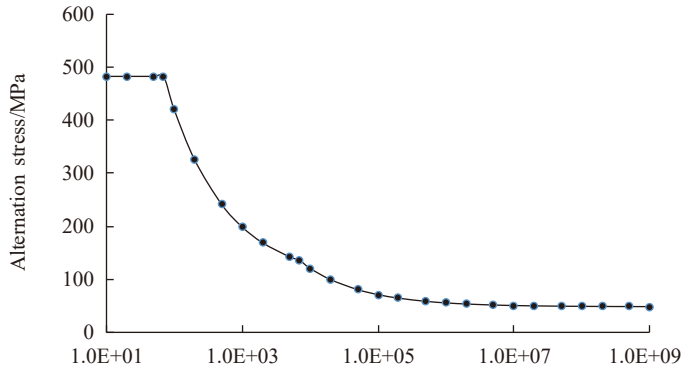


图8 铝材疲劳失效数据
Fig.8 Fatigue curve for aluminum

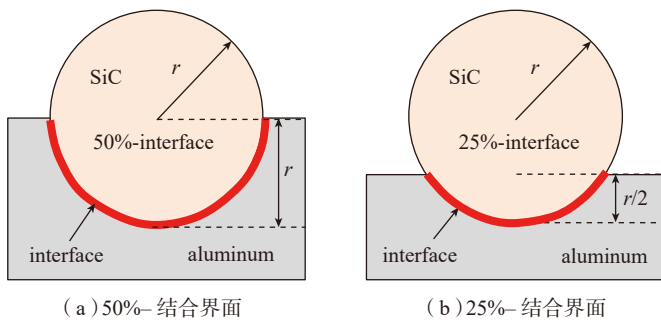


图9 结合界面疲劳寿命的计算情况
Fig.9 Cases of lifetime simulation

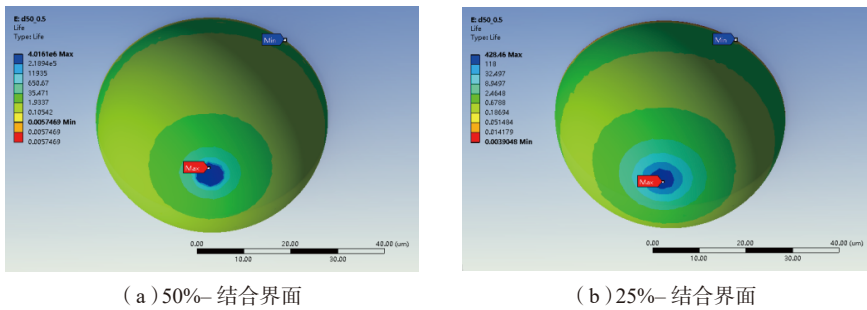


图10 结合界面寿命仿真计算结果
Fig.10 Results of lifetime simulation for interface

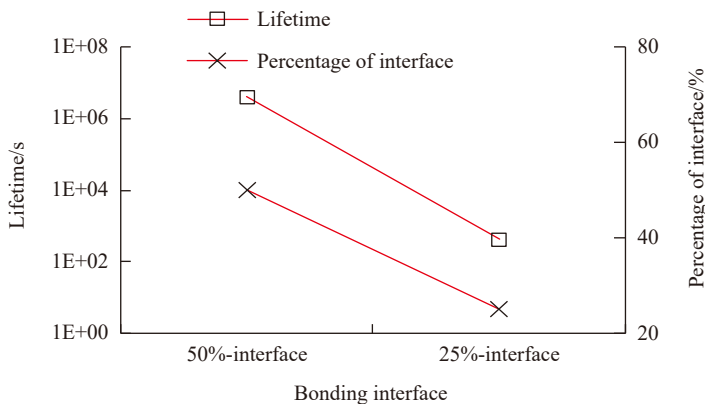


图11 结合界面疲劳寿命与界面面积大小的关系
Fig.11 Relation between lifetime and area of interface

加工试验

1 试验条件

试验装置由 X-Y 移动平台、喷嘴、隔膜计量泵、工作液箱、脉动阻尼器和直流电源组成,如图 12 所示。隔膜计量泵的最大输出压力为 6.7MPa,喷嘴由不锈钢制成,喷嘴内装配有内径为 300 μ m 的蓝宝石喷嘴。直流电源用于在金属喷嘴和工件之间提供加工电压,最大输出电压为 200V。工件安装在 X-Y 移动平台。

准备 3 种具有不同体积分数的 SiC_p/Al 复合材料进行加工试验。如表 2 所示,3 种材料的增强相体积分数分别为 20%、45%、65%。试件的尺寸均为 20mm × 10mm × 5 mm。表 3 列出了试验中的各项加工条件。为了避免射流回弹至喷嘴从而造成二次溶解,选择加工间隙为 2mm,这远大于常规电化学加工所需的 0.1~1mm 加工间隙,因此,考虑到极间电解液降压较大,为保持材料去除效率,选择 150~160V 的加工电压。

表2 试验所采用的SiC_p/Al复材参数
Table 2 Parameters of SiC_p/Al used in experiment

材料种类	增强相体积分数 /%	增强体尺寸 / μ m
20%-SiC _p /Al	20	30~50
45%-SiC _p /Al	45	80~100
65%-SiC _p /Al	65	100~120

表3 试验条件

Table 3 Experimental conditions

参数	值
射流直径	300 μ m
射流压力	4MPa
加工间距	2mm
电解液种类及质量分数	15%-NaNO ₃
加工电压	150V, 160V
加工时间	25s, 1min
磨粒种类及浓度	1.0%-Al ₂ O ₃
磨粒尺寸	10 μ m

工作液是由 15%–NaNO₃ 电解液与 1%–Al₂O₃ 磨料混合而成。加工 20%–SiC_p/Al 和 45%–SiC_p/Al 复材的时间设定为 25s。由于 65%–SiC_p/Al 复材较难去除,所以将其加工时间设定为 1min。

2 结果及讨论

图 13~15 为不同增强相体积分数 SiC_p/Al 复材的加工结果。主要加工条件包括射流压力 4MPa、靶距 2mm、电解液 15%–NaNO₃ 和磨料浓

度 1%。加工结果用奥林巴斯显微镜 (DSX-510) 进行三维形貌检测。从三维形貌数据中提取粗糙度轮廓,粗糙度值 R_a 的测量参数为:取样长度 250 μ m 及评价长度 800 μ m。

测量结果显示,20%–SiC_p/Al 复材加工所得盲孔的入口直径为 898 μ m,深度为 286 μ m,表面粗糙度 R_a 为 4.08 μ m。45%–SiC_p/Al 加工所得盲孔入口直径为 858 μ m,深度为 295 μ m,粗糙度 R_a 为 5.50 μ m。65%–

SiC_p/Al 加工所得盲孔入口直径 883 μ m,深度 336 μ m 和 $R_a=14.55\mu$ m。如图 13~15 所示,在加工表面上可以观察到一些深浅不一的微坑。这些微坑是由于 SiC 增强体从铝基体中脱落而形成,且微坑尺寸随 SiC 增强相尺寸的增大而增大。这与前文的结合界面寿命仿真结果吻合,即当结合界面面积缩小到一定水平时, SiC 增强颗粒极易被高速射流冲刷而脱落。由此,可以推导出磨料电化学射流加工 SiC_p/Al 复材的机理:(1) 铝基体主要通过电化学溶解及磨粒冲蚀去除,其中电化学溶解占主导作用;(2) 由于铝基体的不断去除, SiC 增强体和铝基体之间的结合界面面积不断减小;(3) 当结合界面减小到占 SiC 颗粒总表面积 20% 以下后,在磨料电解液射流的复合冲击作用下, SiC 增强体最终从铝基体上脱落。

加工结果同时显示,加工表面粗糙度 R_a 与增强相的体积分数和尺寸高度相关。这与 SiC_p/Al 材料的加工去除机理一致。加工表面上的微坑是由于 SiC 增强体脱落而形成,因此,这些微坑的尺寸和 SiC 增强体尺寸紧密相关。较高含量的 SiC 增强相会导致在加工表面留下更多数量的微坑。因此,在 3 种试样材料加工中,20%–SiC_p/Al 复材的加工表面粗糙度 R_a 最小(4.08 μ m),而 65%–SiC_p/Al 的加工表面粗糙度值 R_a 最大(14.55 μ m)。SiC 增强相的尺寸和体积分数会明显影响加工表面的粗糙度。

图 16 为不同体积分数 SiC_p/Al 复材的 AECJM 加工去除率对比。其中,20%–SiC_p/Al 的材料去除率为 0.18mm³/min,45%–SiC_p/Al 的材料去除率为 0.179mm³/min,65%–SiC_p/Al 的材料去除率为 0.086mm³/min。可以发现,随着该复材中 SiC 增强相尺度及体积分数的增大,材料去除率呈现下降趋势。产生该结果的原因是:

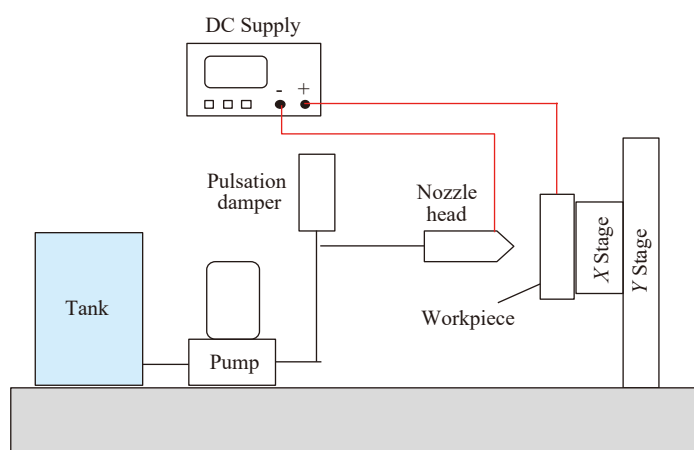


图 12 试验装置示意图

Fig.12 Schematic of experimental apparatus

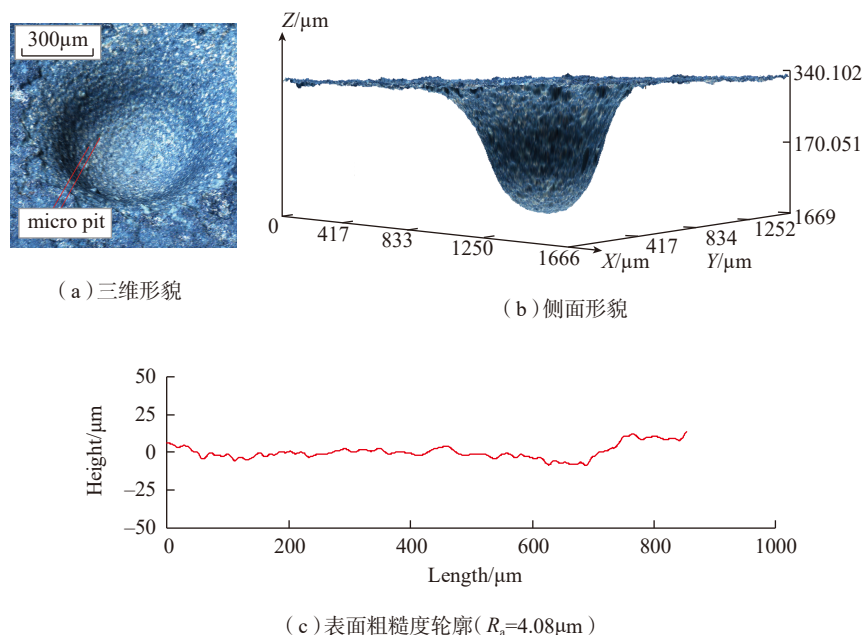


图 13 20%–SiC_p/Al 的加工结果: 160V 加工电压及 25s 加工时间

Fig.13 Result of machining 20%–SiC_p/Al: 160V working voltage and 25s processing time

(1) SiC 颗粒大及含量多导致了较多 SiC 材料包围较少铝基材的情况出现, SiC 颗粒之间包围的铝材面积狭小, 在射流冲击区域形成若干微小的溶解池, 随着 SiC 颗粒的不断暴露, 这些微小溶解池的工作液流动条件变差, 导致铝基材溶解速率变慢;(2)

大尺度 SiC 颗粒与铝基材的结合面积大, 其结合力也较大, 结合界面的疲劳寿命变长, 导致 SiC 颗粒不易脱落。与此同时, 从图 13~15 中加工形状侧面形貌中可以看出较大尺度 SiC 颗粒也导致了加工形状的不规则。

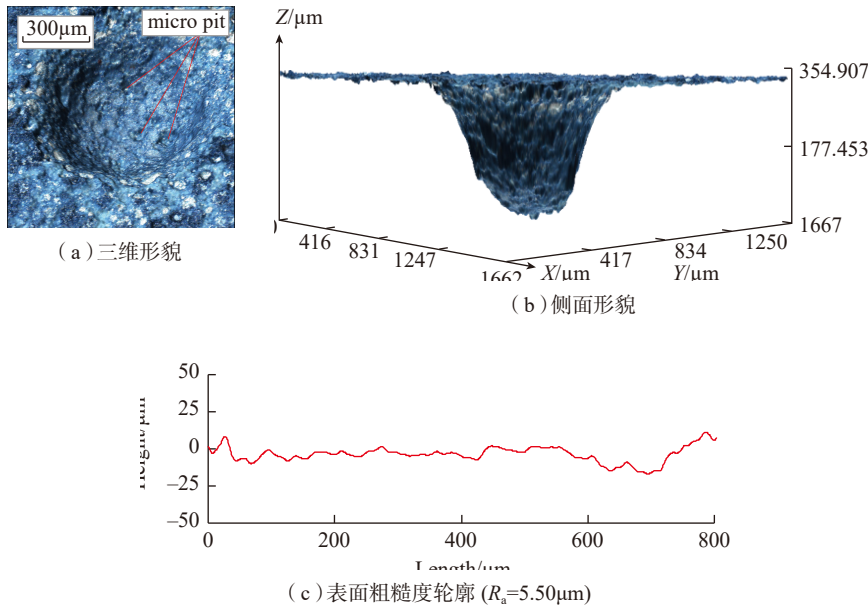


图14 45%–SiC_p/Al的加工结果: 160V加工电压及25s加工时间
Fig.14 Result of machining 45%–SiC_p/Al: 160V working voltage and 25s processing time

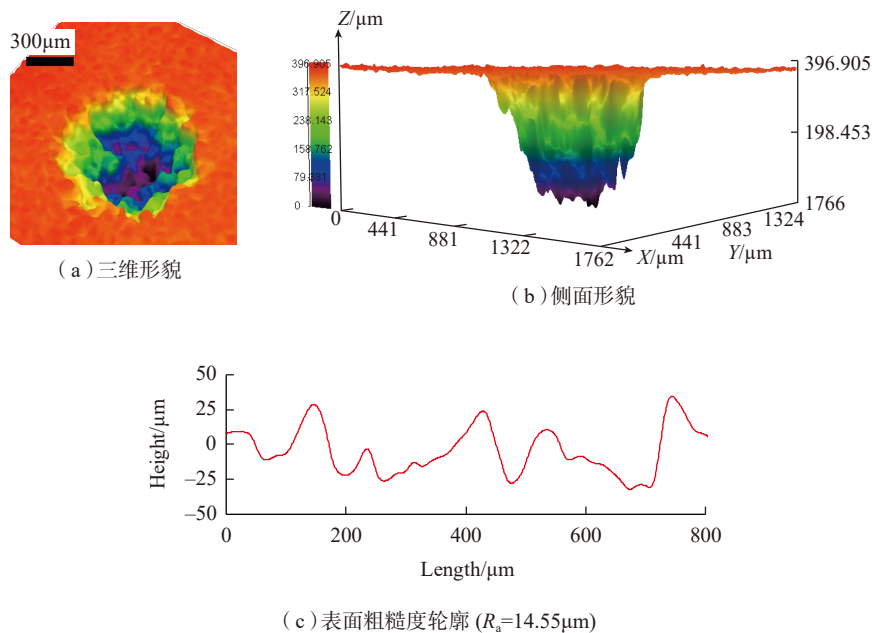


图15 65%–SiC_p/Al的加工结果: 150V加工电压及1min加工时间
Fig.15 Result of machining 65%–SiC_p/Al: 150V working voltage and 1min processing time

为了进一步研究 AECJM 加工 SiC_p/Al 材料的去除机理, 图 17 显示了纯磨料浆体射流加工 65%–SiC_p/Al 的结果, 其工艺条件为: 射流压力 4MPa、靶距 2mm、磨料浓度 1%、加工时间 1min。可以看到, 磨料浆体射流加工对该材料的去除能力非常微弱, 没有形成可观测的加工形状, 加工表面存在少量浅坑(10~20µm 深度), 应该是铝基材被冲蚀或者 SiC 颗粒脱落所形成。该试验表明, 当前工艺条件下的磨料冲蚀对 SiC 颗粒间的铝材具有一定的冲蚀去除作用, 但去除能力非常微弱。主要原因在于: (1) 加工间距(2mm) 远小于常规磨料浆体射流加工靶距(10~20mm), 磨料在离开喷嘴 2mm 后尚未达到最高速度, 磨料的冲击动能相对较小;(2) 射流中的磨料以离

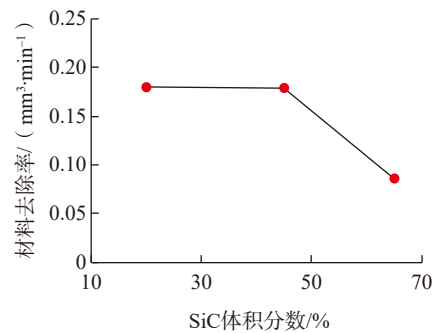


图16 材料去除率随SiC体积分数变化
Fig.16 Material removal rate as a function of SiC content

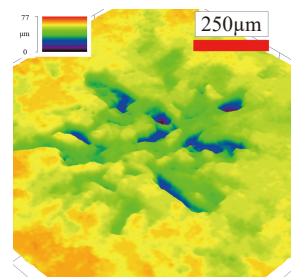


图17 纯磨料浆体射流加工65%–SiC_p/Al 结果
Fig.17 Result of machining 65%–SiC_p/Al by abrasive jet

散相形式存在,对 SiC 与基材结合界面处的铝材去除能力较弱,难以达到快速减少结合界面的目的,导致 SiC 颗粒难以脱落。因此,在 AECJM 加工 SiC_p/Al 材料中,铝基材的去除应该是电化学溶解作用为主、磨粒冲蚀作用为辅。

结论

(1) 在磨料电化学射流去除 SiC_p/Al 复材的过程中,铝基体以电化学溶解及磨粒冲蚀方式去除,其中电化学溶解占据主导作用。随着 SiC 颗粒周围铝基材的不断去除,增强相与基体之间的结合面积不断减小。当结合面积减小到一定值时,混合有大量磨粒的液束的冲击作用能破坏结合界面,最终将 SiC 增强体从基体上去除。

(2) 结合界面的疲劳寿命仿真证明了上面提出的去除机理。仿真结果显示,结合界面的寿命与结合面面积所占 SiC 增强体表面积的比例高度相关。50%—结合界面疲劳寿命约为 4×10^6 s,然而 25%—结合界面的疲劳寿命仅有约 400 s。这说明结合界面的寿命随着结合面积的减小而呈若干数量级式递减。在结合界面面积缩减为零之前,增强体就已经被射流冲刷而脱离基体。

(3) 由于增强体的脱落,加工表面上会留下微坑。这个现象显著影响到加工表面粗糙度。加工表面粗糙度会随着增强相体积分数以及增强相尺寸的增加而增大。SiC 增强相体积分数对材料去除率也有一定影响, SiC 体积分数越高则单位时间内材料去除体积越小,加工效率越低。

参考文献

[1] HUANG S T, GUO L, YANG H C, et al. Study on characteristics in high-speed

milling SiC_p/Al composites with small particles and high volume fraction by adopting PCD cutters with different grain sizes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9): 3563–3571.

[2] NICHOLLS C J, BOSWELL B, DAVIES I J, et al. Review of machining metal matrix composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9–12): 2429–2441.

[3] PRAMANIK A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 86: 44–61.

[4] MÜLLER F, MONAGHAN J. Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(9): 1351–1366.

[5] SCHUBERT N, SCHNEIDER M, MICHAELIS A. Electrochemical machining of cemented carbides[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 47: 54–60.

[6] LOHRENGEL M M, RATAJ K P, SCHUBERT N, et al. Electrochemical machining of hard metals—WC/Co as example[J]. Powder Metallurgy, 2014, 57(1): 21–30.

[7] BISTEROV I, MITCHELL-SMITH J, SPEIDEL A, et al. Specific and programmable surface structuring by electrochemical jet processing[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 460–465.

[8] MARTIN A, HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, LEHNERT N, et al. Analysis of the fundamental removal geometry in electrochemical profile turning with continuous electrolytic free jet[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 466–470.

[9] HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, LEHNERT N, MARTIN A, et al. Jet electrochemical machining of particle reinforced aluminum matrix composites with different

neutral electrolytes[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 118(1): 012036.

[10] GAO C S, LIU Z, QIU Y, et al. Modelling of geometric features of micro-channel made using abrasive assisted electrochemical jet machining[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(1): 94–108.

[11] ZHAO K. Prediction of surface roughness in abrasive assisted electrochemical jet machining of micro-channels[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13: 5460–5473.

[12] LIU Z, GAO C S, ZHAO K, et al. An empirical model for controlling characteristics of micro channel machined using abrasive assisted electrochemical jet machining[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 719–724.

[13] HACKERT-OSCHÄTZCHEN M, MARTIN A, MEICHSNER G, et al. Microstructuring of carbide metals applying jet electrochemical machining[J]. Precision Engineering, 2013, 37: 621–634

[14] SANKAR M, GNANAVELBABU A, RAJKUMAR K. Effect of reinforcement particles on the abrasive assisted electrochemical machining of aluminium-boron carbide-graphite composite[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 381–389.

[15] WANG Z G, BI Y Z, LI Y, et al. Effects of SiC and Al₂O₃ particles on micro-abrasion behavior of Ti–25Nb–3Mo–3Zr–2Sn alloy[J]. Rare Metal Material Engineering, 2019, 48(5): 1421–1428.

[16] YAHR G T. Fatigue design curves for 6061–T6 aluminum[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 119(2): 211–215.

通讯作者: 刘壮, E-mail: liuzhuang@nuaa.edu.cn。

(下转第 67 页)