

SiC_P/Al 复合材料复合加工技术研究进展

田非凡, 宋满新, 余垂有, 欧帆, 胡娟, 何芳

湖南航天诚远精密机械有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年11月17日; 录用日期: 2023年12月14日; 发布日期: 2023年12月22日

摘要

本文综合了近年来碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_P/Al)的主要复合加工技术研究进展, 通过介绍复合加工方式和加工原理, 分析对比其间的优势和特点, 以期SiC_P/Al复合材料的高效高精度复合加工技术的发展提供思路和参考。

关键词

SiC_P/Al 复合材料, 加工技术, 复合加工

Research Progress on Composite Processing Technology of SiC_P/Al Composites

Feifan Tian, Manxin Song, Chuiyou Yu, Fan Ou, Juan Hu, Fang He

Hunan Aerospace Chengyuan Precise Machinery Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Nov. 17th, 2023; accepted: Dec. 14th, 2023; published: Dec. 22nd, 2023

Abstract

In this paper, the research progress of the main composite processing technology of SiC particle reinforced aluminum matrix composites (SiC_P/Al) in recent years is summarized. By introducing the common composite machining methods and processing principles, the advantages and characteristics are analyzed and compared, in order to provide ideas and references for the development of high-efficiency and high-precision composite processing technology of SiC_P/Al composites.

Keywords

SiC_P/Al Composites, Process Technology, Combined Machining



1. 概述

SiC_p/Al 复合材料表现出轻质高强、高热导率和低热膨胀系数等优异性能,既是先进的电子封装材料,也是先进的结构材料。但在材料的加工过程中,常常出现加工精度和加工效率难以共同保证的情况,且高硬度 SiC 颗粒 - 铝基体 - 加工工具之间复杂的相互作用会导致颗粒断裂、界面脱粘和划痕等表面损伤,在很大程度上制约了 SiC_p/Al 复合材料的发展与应用(如图 1)。

近年来,大量研究人员从不同角度对 SiC_p/Al 复合材料的加工技术进行了深入研究,其中传统加工方式包括车削、铣、钻、磨等,非传统加工方式例如超声振动加工、电化学加工、电火花加工和激光辅助加工等,而在电场与超声场相复合的加工技术及其对材料加工性能的深入分析较少,且对于中高体积分数(40~70 vol.%) SiC_p/Al 复合材料的加工研究较少,不足以指导 SiC_p/Al 复合材料的电 - 超声等复合加工相关应用。

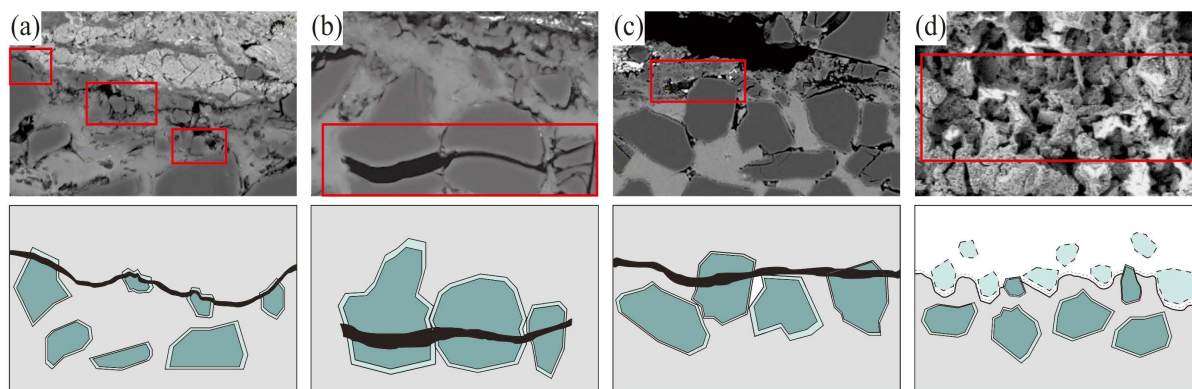


Figure 1. SiCP/Al composite defect type diagram [1]; (a) Interface debonding; (b) Fracture of SiC particles; (c) Al matrix fracture; (d) Corrosion of Al matrix

图 1. SiC_p/Al 复合材料缺陷类型示意图[1]; (a) 界面脱粘; (b) SiC 颗粒断裂; (c) Al 基体断裂; (d) Al 基体腐蚀

图 2 介绍了 SiC_p/Al 复合材料体积分数由低到高的不同特性、重要应用以及具有优良应用效果的复合加工方式。

其中,航空重要承重结构件和导航等领域因其使用环境复杂、负载高、承力大等特点,一般使用具有高强度和高韧性的 10%~30 vol.% SiC_p/Al 替代合金材料,并且为了轻量化等需求,其往往设计有需要大余量去除的镂空结构;另一方面,低体分 SiC_p/Al 复合材料更多的显现为铝基体的性能,在热处理强化前相对较易加工,加工方式选择范围广,但材料受残余应力影响较大,需要通过去应力处理减少构件的变形。对于光机结构件、光学反射镜等精密仪器,则需要在薄壁、异形等复杂结构部位保证其加工精度和表面质量,因此具有高尺寸稳定性的 40~55 vol.% SiC_p/Al 常用于制备整体构件以代替焊接结构,使其能够经受长时振动和冲击条件下的疲劳环境。作为第三代封装材料,高体分(60%~70 vol.%) SiC_p/Al 复合材料既能够用作微组装散热载体,也能作为散热基板和封装盒体在多种严峻环境下保障大功率电子元件的高效工作。但由于其增强体含量较高,电加工困难,且在加工台阶、沟槽等微结构和螺纹孔等难加工部位时容易出现崩裂等缺陷。

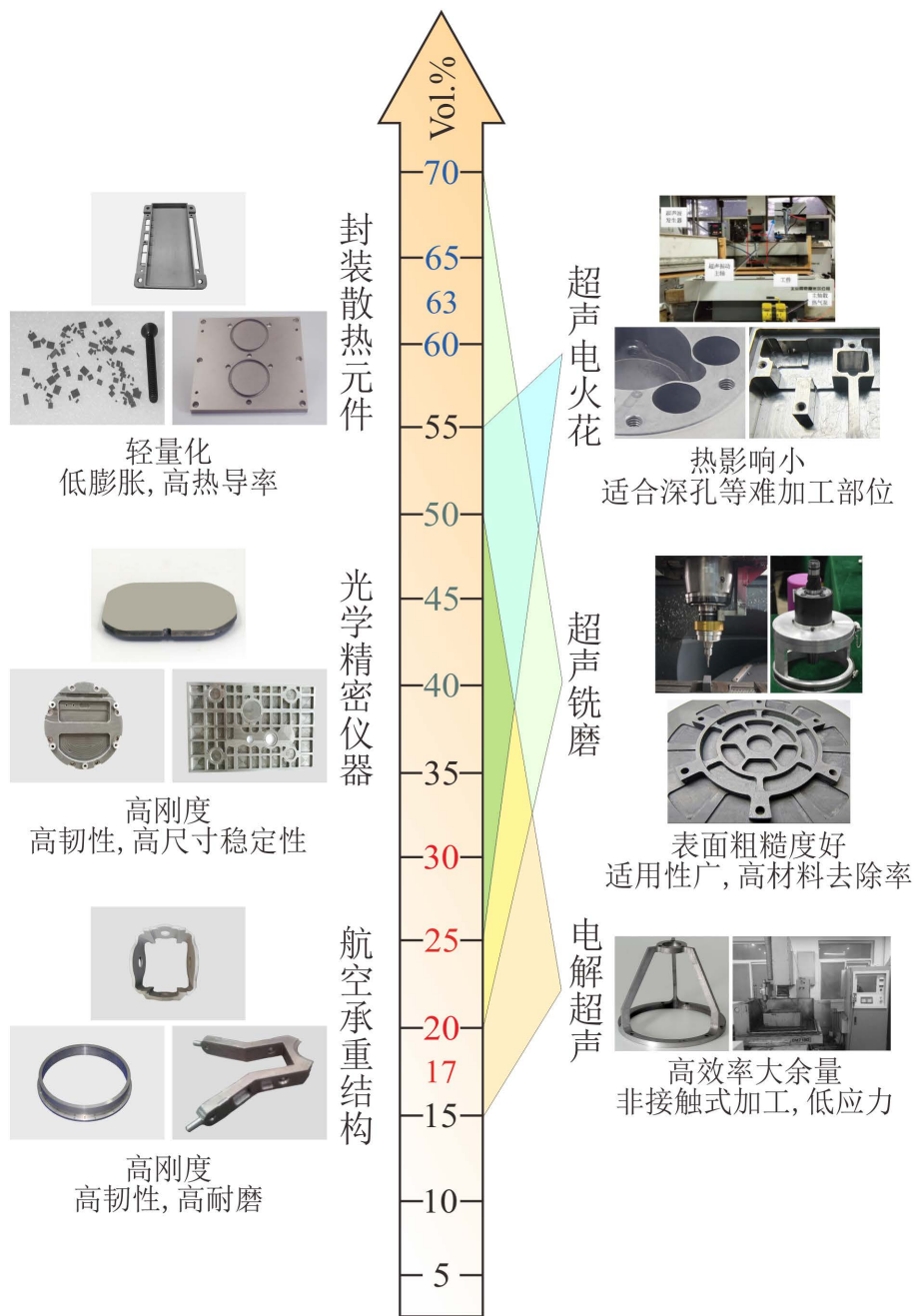


Figure 2. Characteristics of SiC_p/Al composites and composite processing applications [1] [2]
图 2. SiC_p/Al 复合材料及复合加工应用特点[1] [2]

总之,复合材料的性能受 SiC 含量的影响最为显著,在对不同体分、不同应用、不同结构要求的 SiC_p/Al 复合材料进行加工时,需要在不同加工阶段选取合适高效高质量的加工方式。因此,本文通过对现有 SiC_p/Al 复合材料复合加工技术进行研究,分析对比主要加工技术的长处,力求为 SiC_p/Al 复合材料复合加工技术的创新应用做些有意义的工作。

2. SiC_p/Al 复合材料电加工技术

表 1 列举了基于 SiC_p/Al 复合材料的三种常用电加工技术。

Table 1. Common electrical processing technology of SiC_p/Al composites
表 1. SiC_p/Al 复合材料常用电加工技术[3] [4] [5]

电加工技术种类	加工原理	工艺优势	局限性
电火花加工	在电极和工件间施加脉冲电压击穿工作液, 产生火花放电高温蚀除工作面。	深孔、异形孔加工	加工效率低
电弧放电加工	电极间瞬间释放高能量密度的电弧等离子体, 使工件材料发生局部熔化甚至气化。	高效大余量蚀除	表面质量差
电解加工	利用铝基体在电解液中发生电化学阳极溶解。	薄壁结构整体加工	加工精度和加工稳定性差

其中, 电火花加工包括电火花线切割和电火花成形加工, 分别用于型腔和异形不通孔加工; 电弧放电加工是近年来兴起的加工方式, 进行开敞式叶盘[6] [7]、框架结构、离心叶轮[8]、机匣等零部件的加工; 相比于以上两种加工方式, 电解加工的适用范围更广, 如炮管膛线[9] [10]、叶轮叶片、异型孔及异型零件[11] [12]、倒角和去毛刺等加工。

(一) 电火花加工

采用电火花加工技术对 SiC_p/Al 复合材料进行加工时, 将电火花加工原理与材料自身的结构特点相结合, 利用加工基体金属时放电产生的能量使得材料剥落, 甚至是 SiC 的熔化和气化(图 3)。

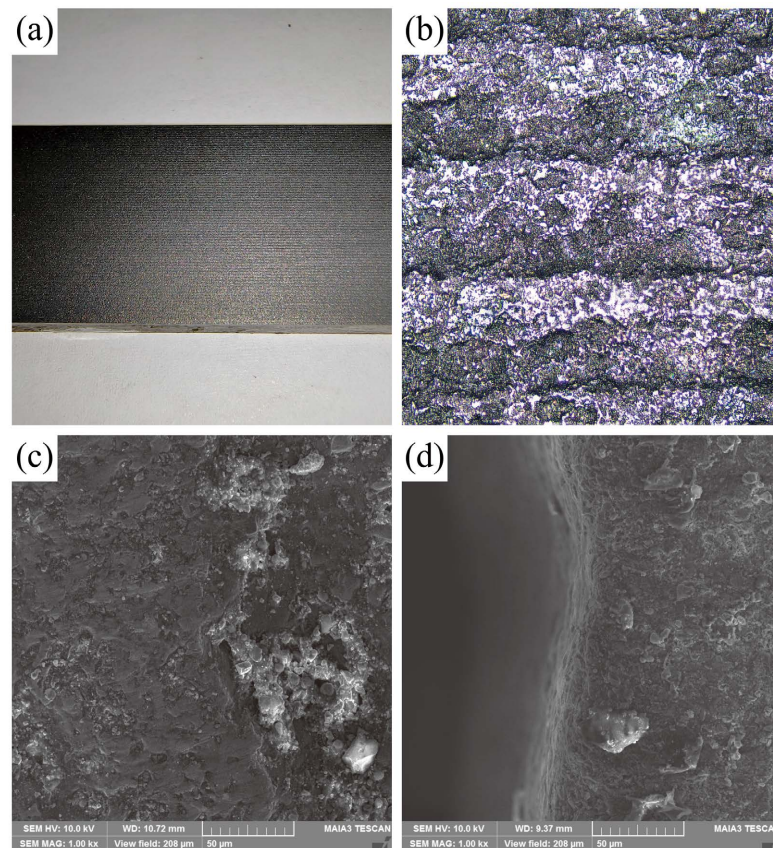


Figure 3. The surface morphology of SiC_p/Al processed by electrical discharge wire-cutting; (a) Working surface; (b) Microscope photo; (c) Micro-characteristics of working surface; (d) Micro-characteristics of cross-section

图 3. 电火花线切割加工 SiC_p/Al 复合材料表面形貌; (a) 加工面; (b) 显微镜下照片; (c) 加工表面微观特征; (d) 加工截面微观特征

图3为电火花线切割加工表面形貌照片,表面较平整,但有具明显走丝方向变换产生的等距条纹,表面粗糙度约为 Ra3.2; SEM 照片显示电火花线切割面出现轻微放电弧坑,截面无可见裂纹等缺陷,热影响区不明显[13]。

唐霖等[14]以 10 vol.% SiC_p/Al 为对象研究了电火花加工单脉冲及多脉冲放电状态下的温度场分布,并进行了内、外冲液对比试验及参数优化,得出电极相对损耗率与加工深度、材料去除率和冲液压力成正比,且内冲液电极相比外冲液电极相对损耗大。于朋等[15]对 35 vol.% SiC_p/2024Al 进行电火花深小孔加工,当采用螺旋电极时材料去除率和孔壁质量明显高于普通圆柱电极,热应力大小和微裂纹宽度深度与放电能量密度有关。刘宇等[16]选择 ZL101A 基体的 65 vol.% SiC_p/Al 复合材料在自搭建的电火花加工实验台上进行实验,验证得出铜钨合金和紫铜电极材料对材料去除率影响不大,且前者损耗远小于后者,最终得到 3.842 mm³/min 的材料去除率。

总的来说,利用电火花加工 SiC_p/Al 复合材料时,由于 SiC 颗粒的屏蔽效应,材料的去除效率较低、工件表面质量不高,且随着中高体分材料中 SiC 增强相体积分数的增加,加工变得越来越困难,因此单一的电火花加工已不再适合 SiC_p/Al 复合材料高效、高精度复杂结构的加工要求。

(二) 电弧放电加工

电弧放电加工技术相比电火花加工具有更高能量密度,其原理是通过电极运动和内冲液作用切断电极与工件之间产生的电弧柱而形成断弧作用,在可控范围内通过非稳态的电弧将加工部位熔融,再利用内外冲液的流体将材料熔融部分快速去除并冷却工件表面[17] (图4, 图5)。

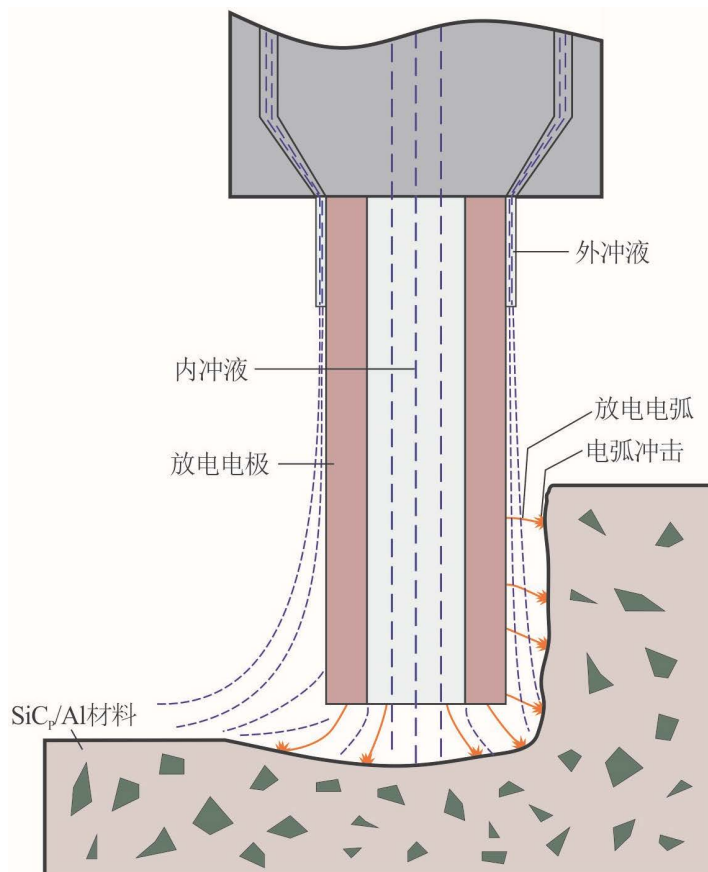


Figure 4. Arc machining principle diagram

图4. 电弧加工原理示意图[18]

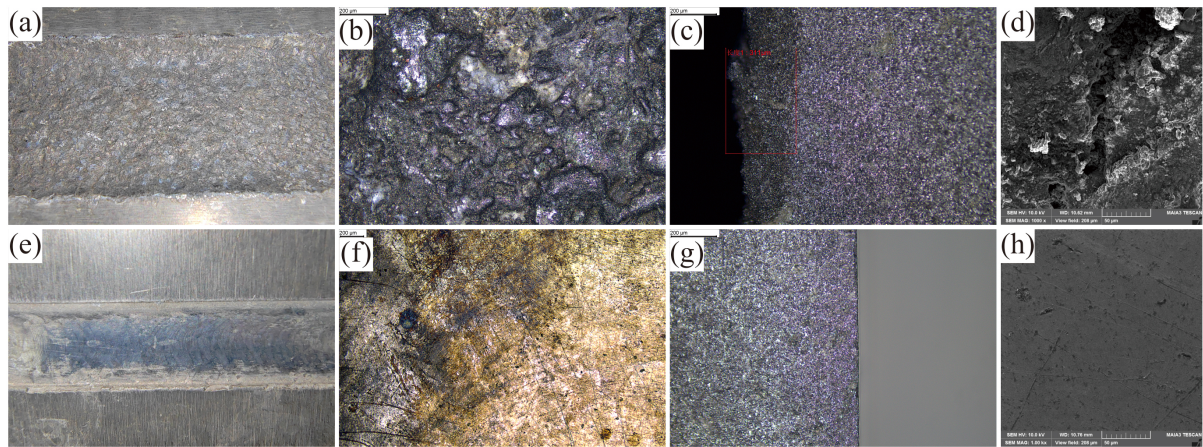


Figure 5. Macro and micro photos of arc machining; (a) High power arc machining surface; (b) The microscopic characteristics of the machined surface; (c) Cross-sectional characteristics under the microscope; (d) SEM photos of machined surface; (e) Low power arc machining surface; (f) The microscopic characteristics of the machined surface; (g) Cross-sectional characteristics under the microscope; (h) SEM photos of machined surface

图 5. 电弧加工宏微观照片; (a) 高功率电弧加工面; (b) 加工表面显微特征; (c) 显微镜下截面特征; (d) 加工表面 SEM 照片; (e) 低功率电弧加工面; (f) 加工表面显微特征; (g) 显微镜下截面特征; (h) 加工表面 SEM 照片

Table 2. Characteristics of processing recast layer and heat-affected layer

表 2. 电弧加工再铸层和热影响层特征

加工方式	高功率电弧加工	低功率电弧加工
整体特征	无可见裂纹，表面粗糙	无可见裂纹，表面颜色泛黄
表面完整性	一般	较好
加工面特征	深浅不一，出现不规则瘤状物	较平整
粗糙度值	>Ra25	Ra1.6
热影响深度	>273 μm	19 μm
维氏硬度(HV)	315.8	246.7

综合图 5 和上表 2 可以看出，高功率电弧加工表面瘤状产物最多，严重影响了表面粗糙度，且热影响深度达 273 μm ，表明随着电弧加工放电功率(加工去除率)的增加，表面反应产物越来越多，表面粗糙度及加工硬化程度就会越高[19] [20]，因此需要对放电功率进行一定范围内的控制，使其在高效大余量去除的同时兼顾一定的加工质量；当采用低功率电弧加工时，其热影响深度较浅，为 20 μm 左右，此时各项指标与数控加工相当，加工表面质量较好、加工精度相对较高。

陈吉朋等[21]研究了高速电弧放电作用力在不同参数下的特性，发现提高脉冲宽度能够有效提高加工效率，而放电作用与峰值电流无明显对应关系，但受开路电压影响较大，且作用力主要出现在放电初期，对材料的抛出不起主要作用。上海交通大学[22]提出的基于复合断弧机制的电弧轮廓切割加工，在加工“天宫二号” 20 vol.% SiCp/Al 支架时，将整个支架结构的切割加工时间降低到 2 h 以内，平均切割面效率可达 550 m^2/min ，远高于电火花加工。

需要注意的是，电子、离子在电场中的运动和电弧等离子体的形成和扩张等效应依然会产生类似于切削应力的作用，因此在加工某些 SiCp/Al 薄壁结构时需要尽可能降低电源参数。

(三) 电解加工

电解加工属于电化学加工(ECM)，其原理是将一定压力的电解液射向工件表面，在加电状态下形成

通路,利用电化学阳极溶解 SiC_p/Al 复合材料中的铝合金基体,再通过流动的电解液带离脱落的 SiC 和废液,结合界面逐步破坏,使 SiC 颗粒剥离表面,从而完成整个加工过程[23]。因此该方法得到的表面粗糙度通常较高(图 6)。

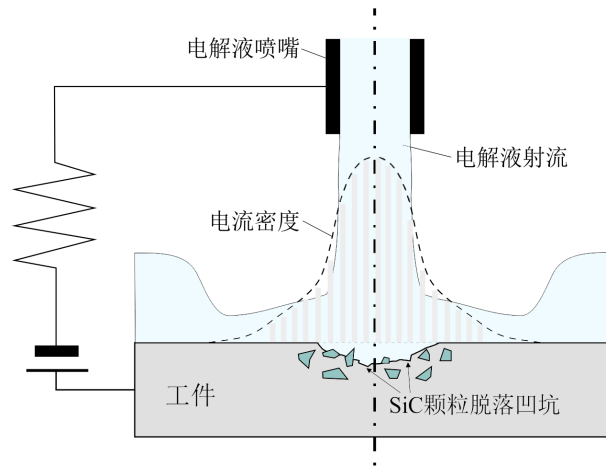


Figure 6. Schematic diagram of electrochemical jet processing
图 6. 电化学射流加工示意图[24]

刘壮等[23] [24]探讨了电化学射流加工和磨粒流加工的材料去除机理,分析了加工参数对加工形貌及材料去除率的影响。研究表明材料去除速率随加工电压的增加,加工过程主要包括铝基体的阳极溶解与 SiC 颗粒的冲刷脱落, SiC 颗粒脱落后在加工表面直接形成微坑,对表面粗糙度具有较大影响。秦向阳[25]在对 17 vol.% SiC_p/Al 进行电解加工时,发现 NaNO_3 电解液的加工稳定性优于 NaCl ,没有发生明显烧蚀现象,但会在材料表面形成钝化层,需要增大电流从而提高加工效率或通过加入 SiC 磨粒以提高较小电流密度下的加工效率和加工质量。

与电火花加工和电弧放电加工能够产生局部高温不同,电解加工中的电化学蚀除作用仅能够作用于 SiC_p/Al 复合材料中的铝合金基体上,对于低体分材料(≤ 25 vol.%)能够具有良好加工效果,而随着材料 SiC 颗粒占比增加,导电性变差,脱落的增强体颗粒增多,一方面会导致蚀坑成片相连,严重影响表面粗糙度,另一方面会恶化电解环境,影响加工稳定性。因此单一电解加工不能满足中高体分 SiC_p/Al 复合材料的加工应用。

3. SiC_p/Al 复合材料超声辅助加工技术

(一) 超声机械加工

目前,随着 SiC_p/Al 复合材料应用领域的拓宽,应用超声波振动切割工艺加工 SiC_p/Al 复合材料的趋势逐年增加,并且在 SiC_p/Al 复合材料的制造中采用了超声振动复合多种机械加工技术。超声振动作用有效促进了材料微观缺陷的消除和晶界的再结晶,通过切削动作和刀具运动方向的周期性波动,使振动切削过程瞬间完成[26]。

河南理工大学向道辉团队[27] [28] [29]利用超声振动铣削加工了 20%、55%和 65%等体分的 SiC_p/Al 复合材料,研究了刀具磨损机理、表面形貌特征、铣削参数对铣削力的影响,实验证明与传统铣削方法相比,降低了切削力、刀具磨损,有效地提高了刀具寿命。

超声加工相较于传统机械加工能够有效降低切削力,提高刀具使用寿命,获得良好的表面质量,且随着 SiC 体积分数的增加,超声振动切削相对于传统加工的优势变得更加明显,但超声加工的加工面积

较小，在加工大尺寸复杂结构件产品时具有局限性。

(二) 激光/超声辅助机械加工

将激光热场引入 SiC_p/Al 复合材料的机械加工区域能够有效软化基体材料，降低颗粒与基体之间的界面结合强度，促进界面脱粘，从而使材料表面塌陷、空洞等缺陷明显减少，提高加工效率[30]。

胡茂顺[31]、彭培成[32]、赵国龙[33]等学者分别研究了 SiC_p/Al 复合材料的激光加工和激光辅助加工(LAM)，这两种方法虽然可以显著提高材料的去除率，并在一定程度上降低刀具磨损，但由于激光的高能高温效应，导致工件加工精度和表面质量不高，还可能出现热裂纹等缺陷，因此不适合该种材料的精密加工。

激光辅助超声铣磨虽然能够及时排出切割区域的热量，增强材料的切割性能，但切削液不适用于激光辅助加工，如果激光功率过大，容易造成较大较深的热影响区，不能有效减少加工过程中的表面损伤，因此也限制了在复合材料中的广泛应用。

4. SiC_p/Al 复合材料复合加工技术

综上所述，机械铣削加工主要存在刀具磨损严重的问题，磨削加工可实现高表面质量和尺寸精度的加工，但难以实现复杂结构的加工；电火花加工常用于槽、孔等结构的加工，但加工效率低，很难实现表面精加工；而电解加工适合低体积分数的 SiC_p/Al 复合材料的加工，不能很好的满足高体积分数材料的加工需求；而超声振动铣削与传统铣削方法相比，虽然降低了切削力和刀具磨损，在加工中高体分薄壁构件时反而容易造成崩边崩缺。

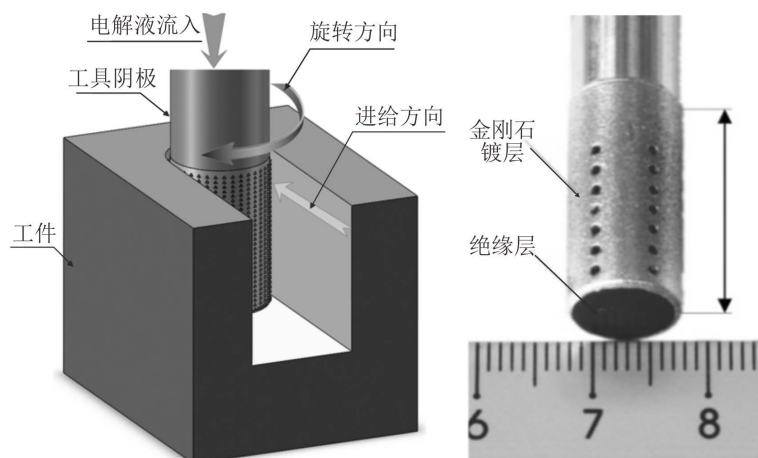


Figure 7. Schematic diagram of electrochemical milling-grinding and tool cathode photo

图 7. 电解铣磨复合加工示意图及工具阴极照片[34]

徐国梁等[34]对 15 vol.% SiC_p/Al 复合材料进行了电解铣磨复合加工(ECGM)，通过流场建模仿真，获得了流速分布均匀的工具阴极结构以保证电场的均匀分布，再在阴极基体表面镀金刚石磨粒和底部绝缘处理，最终实现了材料去除率为 $255.9 \text{ mm}^3/\text{min}$ ，沟槽侧壁粗糙度值为 $\text{Ra}1.933 \mu\text{m}$ 的加工(图 7)。

王系众等[35]针对薄壁零件的电解铣削加工，设计并制作了大直径工具阴极，研究了电压和进给速度对其加工效率和加工深度的影响。试验结果表明：提高加工电压能够提升材料去除率和加工深度，降低进给速度能够获得更大的加工深度；在 40 V 加工电压的参数下，单次进给的最大材料去除率达到了 $279.85 \text{ mm}^3/\text{min}$ ，加工浅槽的最大深度达到了 1.392 mm。

(一) 超声振动 - 电火花

针对传统电火花加工过程中放电性能不稳定、加工生产率低、表面一致性差等问题, 超声振动电火花加工(UVG-EDM)应运而生[36] [37], 相比单一电火花加工可将材料去除率提高 30% 以上, 并且超声振动作用可以有效缓解短路放电和间隙放电时的集中放电现象, 去除放电产生的电蚀凹坑凸边和拉弧烧伤, 显著减少工具磨损。

超声振动电火花加工在 SiC_p/Al 复合材料加工中的应用得到了较为广泛的研究, 而如何选择合适的加工参数和加工策略以达到更好的工艺效果一直是加工中的重要问题。

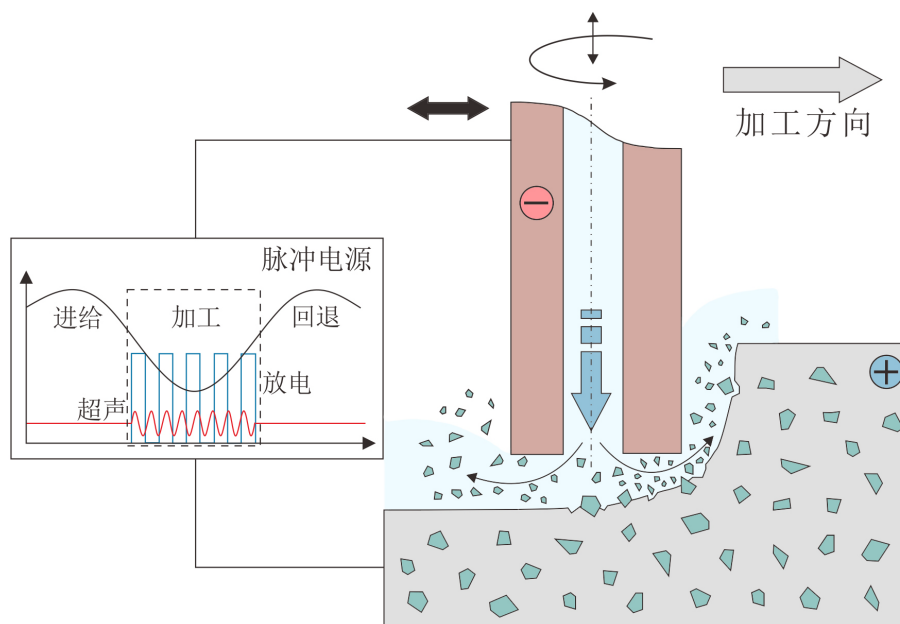


Figure 8. Ultrasonic-EDM schematic diagram

图 8. 超声 - 电火花复合加工示意图[38]

房晓龙等[38]提出了一种超声振动断续式电火花加工方法(图 8), 在加工过程中, 工具电极的快速振动使工作液产生极强的液压冲击, 快速排出加工产物, 减少能量消耗, 提高加工效率, 同时利用脱落的 SiC 颗粒充当磨料, 进一步提高加工表面质量。李护林等[2]在电火花成形机床 SF201 上加装超声波发生器和超声振动主轴(频率 28.3 KHz, 振幅 3 μm), 采用优化后的电火花加工参数对 SiC_p/Al 减重型孔的加工效率约为 16.4 mm^3/min , 表面粗糙度约为 Ra0.8, 重熔层及热影响区域为 3 μm , 进行单个型腔加工后的电极损耗为 8.34%。孟涛等[39]通过超声振动磨削电火花复合加工 52vol.% SiC_p/Al 的正交试验极差分析结果表明, 影响表面粗糙度的因素由小到大依次为: 电流 > 加工脉宽 > 弹簧预紧力 > 脉冲占比; 复合加工放电波形分析结果表明, 加工过程中主要为短路放电和间隙放电组合, 同时, 超声振动作用能够有效减少放电集中, 促进消电离过程。李铠月等[40]将超声振动装置组合在 EDM JMDY-50II 精密电火花加工机床上, 通过专用电极头, 对 30 vol.% 工件进行超声磨削电火花复合加工; 以电火花去除基体为主, 磨削去除 SiC 颗粒为辅, 有效减弱了纯电火花加工时 SiC 颗粒对放电过程的屏蔽作用, 使加工持续进行, 最终获得了粗糙度 Ra2 μm 加工表面。

(二) 电解 - 超声振动

电解 - 超声辅助磨削是建立在电解在线砂轮修整技术(ELID)磨削工艺上的复合加工技术[41] [42], 是利用在线电解作用连续修整砂轮表面获得磨粒凸出, 并借助不断产生的表面氧化物绝缘层达到动态平衡, 再通过超声振动机构辅助提高材料去除率, 最终实现可自适应控制的高质量磨削过程(图 9)。

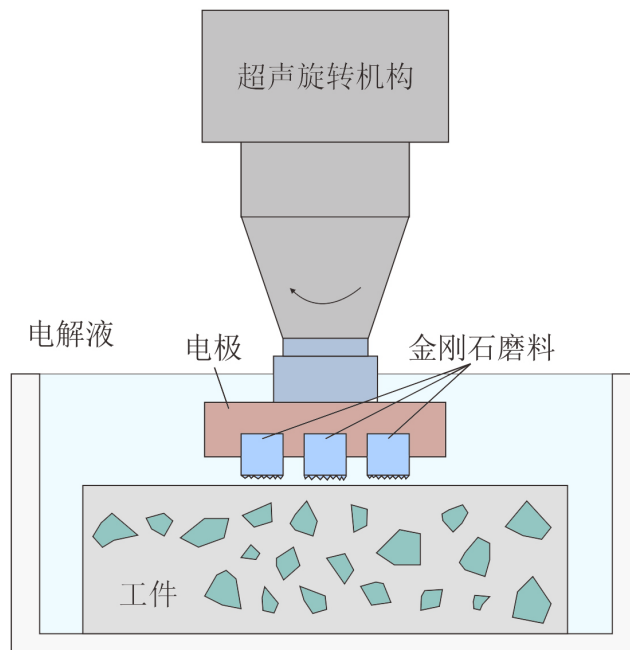


Figure 9. The schematic diagram of ultrasonic assisted electrolytic composite machining [1]

图 9. 超声辅助电解复合加工示意图[1]

在超声电解复合加工过程中，超声高频振动、超声空化作用能够去除电解加工所产生的钝化膜，加速加工区电解液循环和电解产物的排出，进给提高加工效率，提高材料去除率，同时又能保持较好的加工精度和表面质量。南京航空航天大学云乃彰教授和扬州大学朱永伟教授等[43]对超声电解复合加工机理及技术优势进行了探讨，利用自行研制的变幅杆和不同截面的微细工具阴极开展了一系列超声电解复合微细加工基础试验研究，初步证实了这种复合技术的可行性和加工特点。

关佳亮等[44] [45]分别对 40 vol.% 和 60 vol.% SiC_p/Al 进行了 ELID 磨削加工试验并对加工设备和专用电解液做了大量研究，试验得到样件的表面粗糙度分别为 95 nm 和 106 nm，得出加工参数对表面粗糙度的影响程度顺序为：加工深度 > 砂轮线速度 > 占空比 > 电解电流。杨光美等[46]选用 MATLAB 软件建立了超声振动磨削放电加工 30 vol.% SiC_p/Al 的支持向量机预测模型，通过预测结果实现了优选的脉宽、脉间峰值电流、加工电压和电极振幅加工参数。

(三) 电解 - 电火花

电解 - 电火花复合加工常用于高温合金和硬脆材料加工，是集电化学、物理、机械等融合交叉的多场耦合作用下的复合加工技术[47]。在加工过程中，不仅有电化学阳极溶解、放电气化蚀除，还有机械辅助作用下的材料去除，与纯电火花加工不同，整个加工过程均在电解液中进行，因此电解液需要具备较低的浓度和电导率，以同时满足需要导电环境的电解加工和需要低电导率环境的电火花加工。

唐健等[48]对电解 - 电火花复合加工电极磨损机理进行了研究，实验结果表明随着工作液电导率的增加，相对电极损耗率逐渐降低；随着脉冲宽度增加，相对电极磨损率逐渐降低；峰值电流的减小也会使电极损耗降低；最终相比电火花高速穿孔加工电极损耗减少了 14.7%。崔保伟等[47]开展电解 - 电火花加工涡轮静子试验，使用 16% 质量分数的 NaNO_3 电解液，与单独采用电火花加工相比，加工效率提高 52%，设备成本降低 46%。魏志远[49]和王涛[50]将超声振动装置与电解 - 电火花加工设备相结合，形成了超声 - 电解 - 电火花复合加工，实现了难加工材料异形面结构和典型微结构的精密高效加工，如图 10。

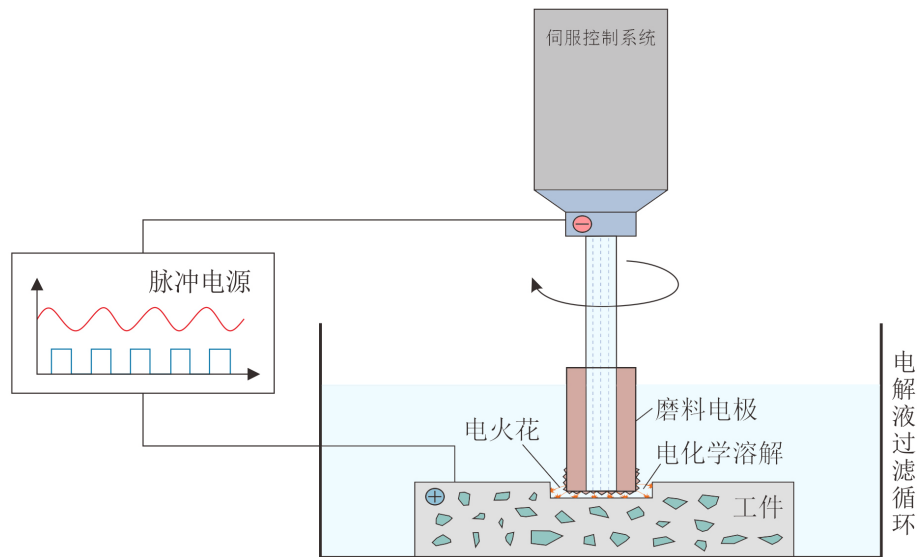


Figure 10. Electrolysis-EDM schematic diagram

图 10. 电解 - 电火花复合加工示意图

作为典型的难加工复合材料，电解 - 电火花复合加工技术也能够很好的运用在颗粒增强铝基碳化硅材料加工上，通过避开对高硬度 SiC 颗粒的直接切削，进行大余量去除及薄壁、镂空、深孔等复杂结构的加工，最终形成高效、低应力、高精度的 SiC_p/Al 复合材料复合加工方式(图 11)。

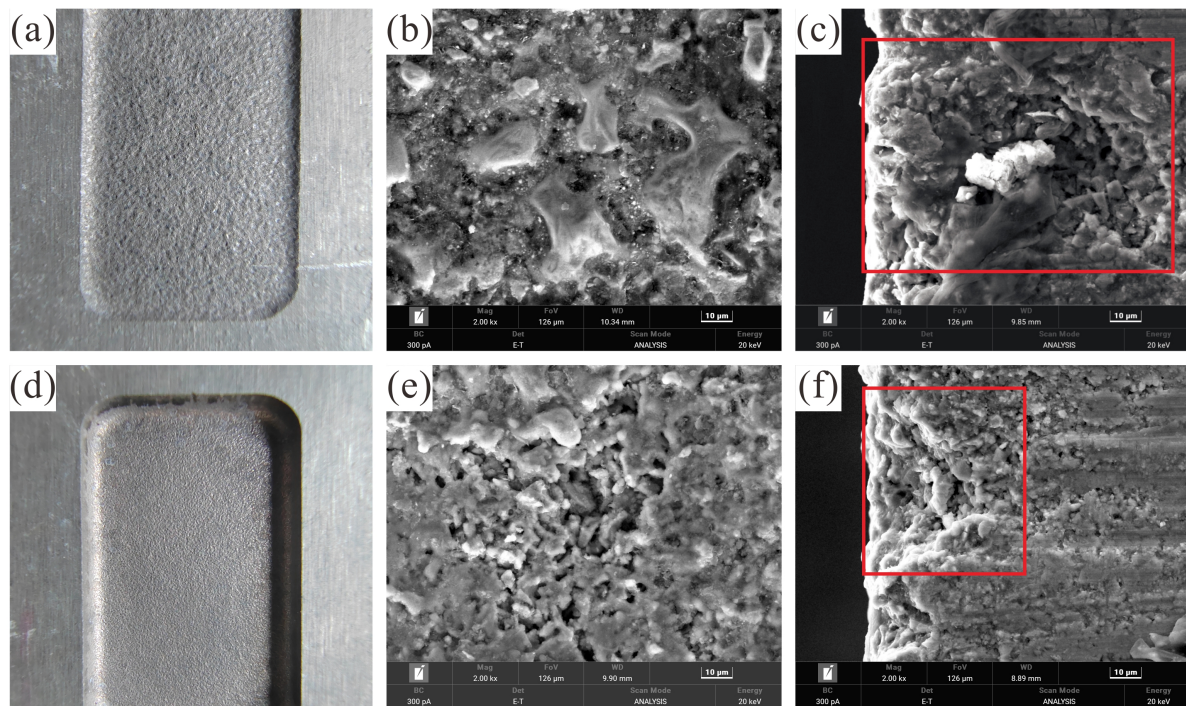


Figure 11. The SiC_p/Al composites surface morphology of electrolytic-EDM composite machining; (a) High power electrolysis-EDM surface; (b) SEM characteristics of machined surface; (c) Cross-sectional characteristics under the microscope; (d) Low power electrolysis-EDM surface; (e) SEM characteristics of machined surface; (f) SEM photos of machined surface

图 11. 电解 - 电火花复合加工 SiC_p/Al 复合材料表面形貌; (a) 高功率电解 - 电火花加工面; (b) 加工表面 SEM 特征; (c) 加工截面 SEM 照片; (d) 低功率电解-电火花加工面; (e) 加工表面 SEM 特征; (f) 加工截面 SEM 照片

5. SiC_p/Al 复合材料组合加工

针对航空航天难加工复杂结构零部件的高效、高质量的加工需求，在同一台加工中心上依次实现大余量去除加工方式和机械铣削等加工功能，粗加工时通过低应力电加工高效大余量去除，然后直接切换到高精度加工模式完成工件关键部位和表面的精加工[51]。

赵万生和康小明[22]以及刘晓等[52]介绍了高速电弧放电-机械铣削组合加工技术和机床设备，其兼具了传统数控加工功能和电弧放电加工的过程控制，进行了必要的防护和绝缘处理，实现了加工状态实时监测和放电间隙伺服控制；在加工时，先进行高能量高去除率加工，然后采用小能量电弧放电改善表面粗糙度和表面精度，从而在后续的铣削精加工时，能够获得刀具磨损小、加工状态稳定，加工变形量低的加工状态。

对 SiC_p/Al 坯料通过高功率电弧加工进行大余量高效去除后，配合去应力退火处理改善后续加工性，防止材料出现变形开裂等问题；在此基础上，降低电弧放电功率进行半精加工，最后通过高精度数控加工完成产品的加工流程。通过对电弧加工工装的多次改进和工艺方案的不断优化，经过多次试验验证，电弧加工相比传统加工工艺效率提升了 2 倍以上，起到了良好的降本增效作用(图 12)。



Figure 12. Arc discharge-mechanical milling combined machining process of SiC_p/Al structural parts; (Left) Blank material; (Medium) High power arc discharge rough machining; (Right) Low arc discharge semi-finishing and digital milling machining
图 12. SiC_p/Al 结构件电弧放电-机械铣削组合加工过程；(左) 坯料；(中) 高功率电弧放电粗加工；(右) 低电弧放电半精加工和数控加工

6. 结论

近年来，随着武器装备和航空航天领域的高速高质量发展，对 SiC_p/Al 等典型的高强度难切削材料的加工制造也提出了越来越高的要求：一是航空航天结构件的加工尺寸精度和表面质量要求越来越高，成本控制越来越严格；二是随着武器装备的不断升级换代和先进材料在航空航天制造中的应用越来越广泛，需要更短的交付周期；三是加工设备的自动化、智能化趋势越来越显著，需要更为系统全面的解决方案；因此，也更加急需需要对这类材料的高效高精度加工技术和相关设备的创新研究。

1、传统机械加工和单一模式的电加工等手段均难以克服 SiC_p/Al 复合材料的难加工特点，无法满足航空航天产品的高品质要求。需要在电解、电火花、超声、机械铣磨等主流加工方法中进行两种甚至两种以上加工方法相复合的思路，在此基础上进行加工设备和装置的改进、复合加工机理研究以及加工仿真模拟等方面的深入探索。

2、超声复合电火花加工方法能够加工出具有较好表面粗糙度且重熔层和热影响区域小的槽、孔和型腔结构，但面对大余量去除的情况时，其加工效率远低于电解加工与超声铣磨加工；电解-铣磨加工能

够达到较高材料去除率和优良表面粗糙度，与常用的超声铣磨加工在加工效率方面相当，但超声铣磨也同样具有机械加工时的刀具磨损、加工应力以及加工区域局限性等问题；电解-电火花复合加工可以在 SiC_p/Al 复合材料表面交替产生电解和电火花作用，结合高可靠控制系统并搭配合理工艺参数能够实现高效高质量复合加工。

3、建立在高可靠控制系统的基础上，使用同一台加工设备上进行两种以上加工方式的组合加工。再与传统加工方式进行精密高效整合，能够大大缩短产品制造周期，降低加工成本，提高加工质量，已成为 SiC_p/Al 复合材料加工技术新的重要发展方向。

参考文献

- [1] Yuan, Z.J., Xiang, D.H., Peng, P.C., *et al.* (2023) A Comprehensive Review of Advances in Ultrasonic Vibration Machining on SiC_p/Al Composites. *Journal of Materials Research and Technology*, **24**, 6665-6698. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.245>
- [2] 李护林, 耿雪松, 薄佑锋. SiC_p/Al 复合材料构件超声振动复合电火花加工工艺研究[C]//第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会暨 2021 航空发动机技术发展高层论坛. 成都: 中国科协航空发动机产学研联合体, 2021: 17-24.
- [3] 周建平, 陈小康, 李雪芝, 等. 放电加工方法及其机理的数值模拟研究综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版) (中英文), 2023, 40(5): 513-525.
- [4] 武鑫磊, 刘永红, 纪仁杰. 电弧铣削技术现状与展望[J]. 电加工与模具, 2021(6): 1-10, 36.
- [5] 候少杰, 白基成, 刘晓萌, 等. 电火花加工放电状态特性试验研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(10): 80-85.
- [6] 贾雨超, 迟关心, 张昆, 等. 闭式整体叶盘成组电极高效电弧成形加工技术[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 285-295.
- [7] 贾雨超, 迟关心, 王振龙, 等. 叶盘流道五轴高效复合放电加工机床及其数控系统设计[J]. 电加工与模具, 2020(z1): 19-23.
- [8] 温博宇. 变轴式电弧铣削极间特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [9] 任融香. 大深径比异形孔电解加工关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [10] 肖晨. 大长径比异型深孔电解加工技术[J]. 西安工业大学学报, 2023, 43(3): 239.
- [11] 黄子豪, 程前前. 自润滑齿轮齿面沟槽电解加工流场设计[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2023, 36(3): 73-78.
- [12] 王晖. 复杂型面零件电解加工夹具结构设计与工艺试验[J]. 山西冶金, 2023, 46(7): 26-27, 31.
- [13] 张廷亮. 电火花加工表面重熔层成形过程仿真和实验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [14] 唐霖, 任磊, 冯鑫, 等. SiC/Al 复合材料电火花加工间隙流场分析[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(5): 457-465.
- [15] 于朋, 许金凯, 崔广续, 等. SiC_p/2024Al 复合材料电火花加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(4): 54-59.
- [16] 刘宇, 曲嘉伟, 李小明, 等. SiC_p/Al 复合材料电火花加工材料去除率及电极损耗研究[J]. 制造技术与机床, 2022(11): 52-58.
- [17] 徐辉, 顾琳, 赵万生, 等. 高速电弧加工的工艺特性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 177-183.
- [18] 徐辉. 电弧微爆内外冲液装置和加工设备[P]. 中国专利, CN110238466B. 2021-02-05.
- [19] 宋丹. 航空铝合金短电弧铣削加工工艺参数优化及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [20] 朱光. 高压激励电弧铣削加工技术及机理研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [21] 陈吉朋, 何国健, 刘晓, 等. 高速电弧加工 SiC/Al 的放电作用力特性研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3): 54-59.
- [22] 赵万生, 康小明, 顾琳, 等. 放电加工技术在航空航天制造中的应用[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 32-46.
- [23] 刘壮, 郭超, 谢天海, 等. 电化学射流加工 SiC_p/Al 复合材料的试验研究[J]. 电加工与模具, 2020(4): 36-40.
- [24] 刘壮, 邱一, 郭超, 等. 磨料电化学射流加工 SiC_p/Al 复合材料仿真和试验[J]. 航空制造技术, 2020, 63(8): 38-45, 67.
- [25] 秦向阳. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的电解加工研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2021.
- [26] 冯真鹏, 肖强. 超声加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 161-172.
- [27] 牛秋林, 高航, 张深圳, 等. 超声振动辅助铣削 SiC_p/Al 复合材料表面质量与切屑形貌实验研究[J]. 工具技术,

- 2022, 56(4): 12-17.
- [28] 牛秋林, 唐玲艳, 向道辉, 等. 硬质合金涂层刀具铣削 SiC_p/Al 复合材料刀具磨损研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 90-93, 111.
- [29] Peng, P.C., Xiang, D.H., Lei, X.F., et al. (2022) Study on the Edge Defects of High Volume Fraction 70% SiC_p/Al Composites in Ultrasonic-Assisted Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **122**, 485-498. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08586-y>
- [30] 吴思怡, 王锋, 康小明. 光催化辅助射流电解加工 SiC_p/Al 实验研究[J]. 电加工与模具, 2023(4): 40-45.
- [31] 胡茂顺, 赵国龙, 李亮, 等. 55% SiC_p/Al 复合材料的脉冲激光诱导行为研究(英文) [J]. 南京航空航天大学学报, 37(S1): 49-57.
- [32] Peng, P.C., Xiang, D.H., Li, Y.Q., et al. (2022) Experimental Study on Laser Assisted Ultrasonic Elliptical Vibration Turning (LA-UEVT) of 70% SiC_p/Al Composites. *Ceramics International*, **48**, 33538-33552. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.298>
- [33] Zhao, G.L., Hu, M.S., Li, L., et al. (2020) Enhanced Machinability of SiC_p/Al Composites with Laser-Induced Oxidation Assisted Milling. *Ceramics International*, **46**, 18592-18600. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.169>
- [34] 徐国梁, 李寒松, 牛岫. 高效精密电解铣磨加工 Al-SiC 铝基复合材料的流场仿真与试验[J]. 电加工与模具, 2020(z1): 42-46, 67.
- [35] 王系众, 李寒松, 李洁, 等. 铝基复合材料高效电解铣削加工试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 6-9, 13.
- [36] 连海山, 徐达华, 陈小军, 等. 工作液超声振动辅助电火花小孔加工装置设计与试验[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 127-132.
- [37] 王鹏翔. 超声辅助电火花微孔加工系统设计与工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2023.
- [38] 房晓龙, 曲宁松, 马曰红. 一种超声振动辅助断续式电火花加工方法[P]. 中国专利, CN202211562667.1. 2023-03-14.
- [39] 孟涛, 陈阳, 张云鹏, 等. 高体分 SiC_p/Al 超声振动磨削放电复合加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2020(5): 60-64.
- [40] 李铠月, 张云鹏, 杨光美, 等. 超声振动磨削放电复合加工 SiC_p/Al 试验研究[J]. 电加工与模具, 2013(6): 28-31, 35.
- [41] 丁翔, 朱永伟, 邹翔. 高硬材料旋转超声辅助电解加工设计与试验[J]. 南方农机, 2023, 54(23): 8-10, 17.
- [42] 丁翔. 旋转超声复合/辅助电解-放电展成加工系统设计与试验[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [43] 朱永伟, 王占和, 云乃彰. 超声电解复合微细加工装置与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(8): 986-991.
- [44] 关佳亮, 赵显辉, 任勇, 等. 航天用 SiC_p/Al 复合材料 ELID 精密磨削磨床设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(1): 134-137.
- [45] 关佳亮, 张龙月, 刘书君, 等. 不同体积分数 SiC_p/Al 复合材料精密磨削试验研究[J]. 工具技术, 2019, 53(7): 23-26.
- [46] 杨光美, 张云鹏, 李铠月, 等. 基于支持向量机方法建立超声振动磨削放电加工预测模型[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(5): 737-741.
- [47] 崔保伟, 关妍, 李嘉亦, 等. 电解与电火花复合加工火箭发动机涡轮泵叶珊环的研究[J]. 电加工与模具, 2023(2): 28-30, 57.
- [48] 唐健, 张彦, MD Rashedul Islam, 等. 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(6): 18-21.
- [49] 魏志远. 超声振动辅助微细电解电火花加工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [50] 王涛. 旋转超声复合机械-电解-放电加工系统设计与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [51] 杨文利. 碳化硅铝基复合材料电弧-电解组合加工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安西安工业大学, 2023.
- [52] 刘晓, 陈吉朋, 顾琳, 等. 50% SiC_p/Al 复合材料的电弧铣削与铣磨组合加工[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(2): 222-227.