

高体积分数 SiCp/Al 复合材料电解-机械组合 低磨损加工方法研究

何斌* 周星雨 陆洪昱 张俊飞 丁凯 李奇林 雷卫宁

江苏理工学院机械工程学院,常州,213001

摘要:为了解决高体积分数铝基碳化硅(SiCp/Al)复合材料在常规机械加工方法下存在的刀具磨损严重、表面质量差、加工效率低等问题,提出了电解-机械组合的加工方法,开展了高体积分数(60%) SiCp/Al 复合材料的组合加工试验。结果表明,在电解加工 SiCp/Al 复合材料中,随着表面铝基体的去除,碳化硅颗粒裸露分布在工件表面;电解加工后的工件表面与基体之间存在一定深度的过渡区,过渡区内的铝基体被局部去除,碳化硅颗粒受到的约束力减小;采用金刚石磨棒对电解加工后的过渡区进行机械加工时不发生铝基体黏附现象,金刚石磨棒几乎无磨损,工件加工表面损伤明显减少。电解-机械组合加工可改善高体积分数 SiCp/Al 复合材料的可加工性。

关键词:铝基碳化硅复合材料;电解加工;工具磨损;金刚石磨棒

中图分类号: TG662

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Low Wear Machining Method of High Volume Fraction SiCp/Al Composite Materials by ECM-mechanical Combined Machining Processes Method

HE Bin* ZHOU Xingyu LU Hongyu ZHANG Junfei DING Kai LI Qilin LEI Weining
School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu, 213001

Abstract: To improve the problems of tool wear, poor surface quality and low machining efficiency of aluminum-based silicon carbide(SiCp/Al) composites with high volume fraction under conventional machining, an ECM-mechanical combined machining method was proposed, and the ECM-mechanical combined machining experiments of 60% volume fraction SiCp/Al composites were carried out. The results show that SiC particles are exposed on the surfaces with the removal of aluminum matrix. There is a certain depth of transition zone between the surface of the workpiece and the matrix after ECM, the aluminum matrix in the transition zone is locally removed, and the binding force of SiC particles is reduced. When the diamond grinding rod is used for machining the transition zone, the aluminum matrix adhesion phenomenon is not observed, the diamond grinding rod has almost no wear, and the surface damages are obviously reduced. The machinability of high volume fraction SiCp/Al composites may be improved by ECM-mechanical machining processes.

Key words: aluminum-based silicon carbide composites (SiCp/Al); electrochemical machining (ECM); tool wear; diamond grinding rod

0 引言

铝基碳化硅(SiCp/Al)复合材料以铝(Al)金属为基体,碳化硅(SiC)颗粒为增强相,具有强度高、耐磨性优、密度小、膨胀率低、导热性强等特性,广泛应用于航空航天、汽车工业、机械设备制造、电子电气、轻量化应用等领域^[1-4]。然而, SiCp/Al 复合材料优异的性能也导致其精密高效加工较为困难。

国内外学者对 SiCp/Al 复合材料加工方法进行了大量探究。关佳亮等^[5]对中高体积分数(40%、60%) SiCp/Al 复合材料进行精密磨削加工研究,发现随着增强体 SiC 颗粒体积分数的增大,材料硬度变高,塑性变差,可加工性能降低,加工表面质量逐渐变差。GUO 等^[6]对 SiCp/Al 复合材料高速磨削的材料去除机理进行研究,发现磨削速度较低时,铝基体发生严重的塑性变形并发生“涂抹”现象,而 SiC 颗粒容易被拔出或推开而产生表面凹坑;高速磨削可以提高铝基体的硬度,抑制其塑性变形,从而降低表面粗糙度。王道辉等^[7]研究了高体积分数 SiCp/Al 复合材料磨削加工砂轮堵塞理论及原因,结果表明磨削

收稿日期:2024-10-30

基金项目:江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB460012);常州市应用基础研究计划(CJ20235044);江苏省研究生实践创新计划(SJCX24_1794);江苏省高等学校自然科学研究重大项目(22KJA460004)

SiCp/Al 复合材料时砂轮堵塞类型主要为黏着型堵塞,超声辅助可以改善砂轮的堵塞状况,延长砂轮的使用寿命。ZHANG 等^[8]对体积分数为 20% 的 SiCp/Al 复合材料开展了铣削加工试验,发现在铣削过程中刀具表面发生粘刀而形成切屑瘤,切屑瘤的不断生成和消失使切削力不断变化,导致加工表面形成不规则的缺陷。LIU 等^[9]通过对体积分数为 45% 的 SiCp/Al 复合材料进行微铣削加工,研究了不同进给率对铝基体与 SiC 颗粒去除机制的影响,发现较小的进给率会导致铝基质未完全去除,而较大的进给率会使 SiC 颗粒发生脆性断裂,导致表面缺陷的形成。LIU 等^[10]对体积分数为 15%、30%、45% 的 SiCp/Al 复合材料进行了钻削试验,发现随着碳化硅颗粒体积分数的增大,切削加工性能变差;加工体积分数为 45% 的 SiCp/Al 复合材料时,孔出口处损伤较为严重。

为了避免机械加工中切削力大、铝基体黏附、工具磨损等问题,可以采用非接触式加工方法对 SiCp/Al 复合材料进行加工,如电解加工和激光加工。AO 等^[11]开展了 20% SiCp/Al 复合材料电解加工试验研究,结果表明在高电压下可以获得较高的加工效率,但加工表面较为粗糙,可以观察到裸露的碳化硅颗粒。LIU 等^[12]研究了 65% SiCp/Al 复合材料电解加工特性,由于碳化硅颗粒不导电,主要被电解液冲刷去除,获得的加工表面粗糙度值较大。ZHANG 等^[13]研究了 45% SiCp/Al 复合材料纳秒激光烧蚀行为,结果表明由于碳化硅的热导率较高,热量会迅速传给铝基体,导致铝基体优先于碳化硅颗粒被去除,加工表面形成碳化硅颗粒凸起而铝基体凹陷的特征,加工表面质量较差。查慧婷等^[14]开展了高体积分数铝基碳化硅复合材料旋转超声铣磨加工试验研究,结果表明超声振动可有效减小切削力从而减少刀具磨损,但加工表面存在 SiC 颗粒破碎脱落形成的众多凹坑。ZHAO 等^[15]开展了激光辅助微细铣削高体积分数铝基碳化硅复合材料研究,利用激光照射工件表面使碳化硅颗粒软化,减少碳化硅对刀具的磨损,实现了微小结构的加工,但加工存在一定的热影响区。

综合上述研究可以发现,目前 SiCp/Al 复合材料加工方法依然存在各种不足,尤其是高体积分数 SiCp/Al 复合材料的精密高效加工依然是挑战。为了解决高体积分数 SiCp/Al 复合材料加工难题,本文提出了 SiCp/Al 复合材料的电解-机械组合加工方法,利用电解加工去除复合材料

中的铝基体,使碳化硅颗粒裸露在工件表面,减少后续机械加工中的作用力和工具磨损,改善高体积分数 SiCp/Al 复合材料的加工质量。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用工件为碳化硅颗粒体积分数占比为 60% 的 SiCp/Al 复合材料板材,使用电火花线切割将板材分割为 10 mm(长)×10 mm(宽)×8 mm(高)的工件,采用 400 号、800 号、1200 号砂纸进行打磨,然后进行超声清洗。图 1 所示为加工前工件的微观形貌,可以清晰地观察到碳化硅颗粒和铝基体的分布。

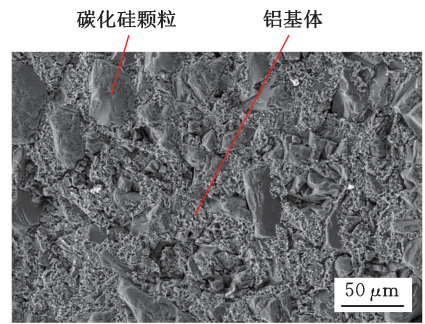


图 1 工件初始表面微观形貌

Fig.1 Micro morphology of workpiece surface

1.2 试验方法

采用自主设计的电解加工装置进行 SiCp/Al 复合材料电解加工试验。如图 2 所示,工具阴极材料为 304 不锈钢,其底端面尺寸为 10 mm(长)×1.5 mm(宽);绝缘套上端装在工具阴极的工作段,底端压紧在工件表面,确保工件只与阴极凸台表面对应区域被加工;通过调整绝缘套高度控制工具阴极底部与工件表面之间的距离为 2 mm,即初始加工间隙为 2 mm。使用质量分数为 5% 的 NaCl 水溶液作为电解液,采用侧向冲液方式。利用该装置开展不同参数下电解加工试验,通过电流传感器和示波器对加工中电流变化过程进行测量和记录。

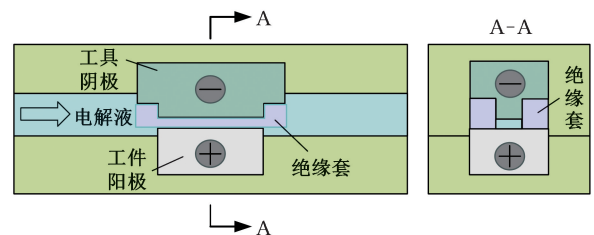


图 2 电解加工装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrochemical machining device

电解加工后的工件使用自主搭建的立铣机进行精加工,所用工具为直径 2 mm 的金刚石磨棒,

粒度为 120 目,主轴转速为 18 000 r/min。每次试验采用试切法保证磨削加工与电解加工的区域重合。加工后的工件通过扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜对加工表面形貌及加工深度进行测量和分析。

2 试验结果及讨论

2.1 SiCp/Al 复合材料电解加工结果

为了探究 SiCp/Al 复合材料电解加工规律,开展了 10 V、30 V、50 V、70 V 不同电压下电解加工试验,试验过程采用恒压模式。图 3 所示为不同加工电压下电流变化过程,可以发现加工电压为 10 V 时,加工电流基本无变化;随着加工电压的增大,电流呈现先下降后保持基本稳定的趋势。这是因为加工中铝基体被去除,工件表面不导电的碳化硅颗粒比例增加,加工电流逐渐减小,从而电解加工作用逐渐减弱而趋于稳定。本研究中,以每次加工结束前 10 s 内的平均电流值为参考线确定加工电流趋于稳定的时间点。以此方法得到加工电压 30 V、50 V、70 V 下加工电流进入稳定的时间分别为 40 s、60 s、70 s。

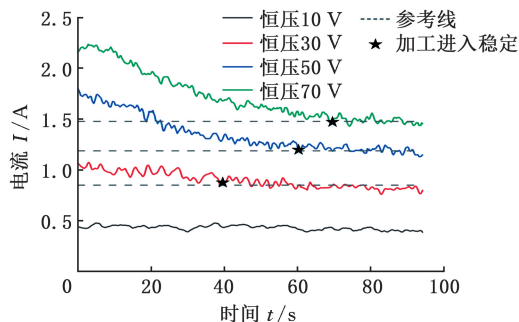


图 3 不同加工电压下电流变化过程

Fig.3 Current changes under different voltages

图 4 和图 5 所示为不同电压下电流达到稳定时的工件表面形貌。由图 4a 和图 5a 可以看出,在加工电压为 10 V 时,工件表面加工区不明显,表明在低电压下电解作用去除材料较少。当加工电压为 30 V 时,从图 4b 中可以清晰地观察到电解加工范围,但加工深度较浅;图 5b 中的加工区形貌显示工件表层的铝已被完全去除,碳化硅颗粒裸露分布在工件表面。当加工电压增大到 50 V 和 70 V 时,加工区的深度明显大于 30 V 时的加工深度,表明一定深度的铝基体和碳化硅颗粒均被去除。由于碳化硅颗粒不导电,因此加工中碳化硅颗粒不可能被溶解去除,而更可能是被电解液冲刷去除。由于电解液冲刷作用有限,故加工区表面依然被裸露的碳化硅颗粒覆盖。相较于低电压,高电压下碳化硅颗粒暴露更充分,且加工表

面以大尺寸碳化硅颗粒为主。通过图 6 所示的不同电压下的加工深度和宽度分布可以发现,随着加工电压的增大,加工深度和宽度均逐渐增大,表明高电压下电解加工去除材料的能力增强。

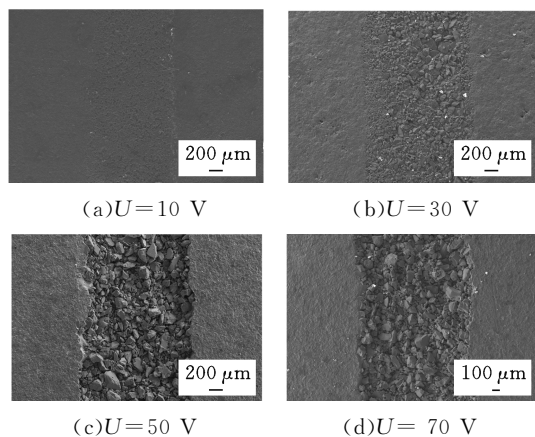


图 4 不同电压下工件加工整体形貌

Fig.4 Overall morphology of workpiece processed under different voltages

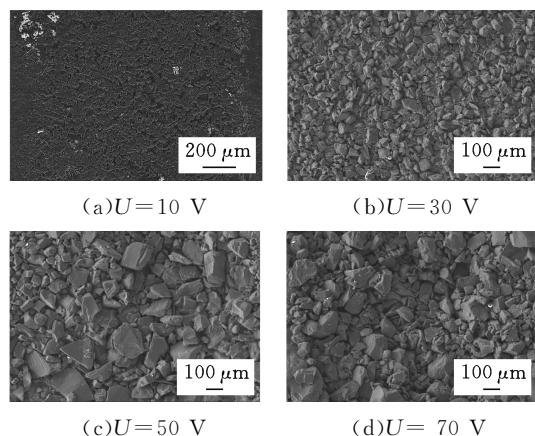


图 5 不同电压下加工区的表面形貌

Fig.5 Surface morphology of processing zone under different voltages

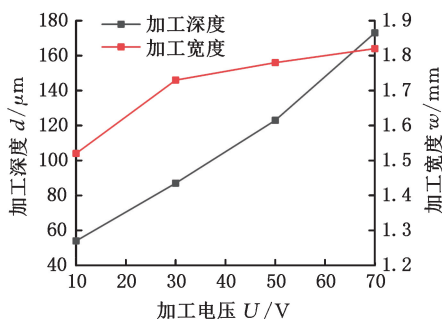


图 6 不同电压下的凹槽加工深度和宽度

Fig.6 Depth and width of the groove processed at different voltages

为了进一步研究电解加工 SiCp/Al 复合材料的材料去除过程,选择低电压 10 V 和高电压 70 V 开展不同加工时间下的电解加工试验,观察工件加工形貌的变化过程。如图 7 所示,在 10 V

电压下,加工时间较短时仅局部发生基体溶解。随着加工时间的增加,基体溶解面积逐渐增大;当加工时间增加到 120 s 时,加工表面依然可以观察到未溶解的铝基体,碳化硅裸露不明显。与低电压下加工不同,在 70 V 高电压下,当加工时间为 2 s 时,表层铝被明显去除;加工 10 s 时,加工表面完全被碳化硅颗粒覆盖,观察不到铝基体;随着加工时间的进一步增加,加工表面残留较大尺寸的碳化硅颗粒,碳化硅颗粒分布疏松,且颗粒间存在明显缝隙。

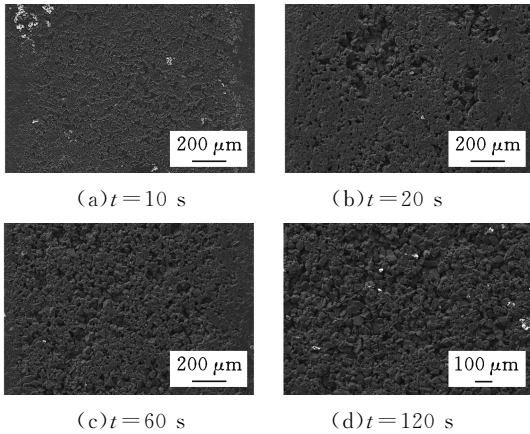


图 7 低电压 10 V 下不同加工时间的工件形貌

Fig.7 Workpiece morphology of different machining times with low voltage of 10 V

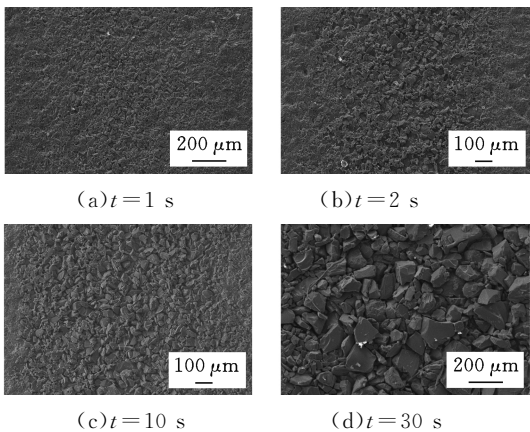


图 8 高电压 70 V 下不同加工时间的工件形貌

Fig.8 Workpiece morphology of different machining times with high voltage of 70 V

2.2 电解加工后 SiCp/Al 复合材料机械加工结果

为了探究电解加工后 SiCp/Al 复合材料的机械加工性能,采用直径为 2 mm 的电镀金刚石磨棒对电解加工后的工件进行加工。为了保证加工的一致性,选择同一个电解加工后的工件进行多次铣削加工。选择对图 4d 中电解加工(电压 70 V、加工时间 70 s)获得的凹槽进行 3 次机械加工,每次磨棒的加工深度相较于工件初始表面分

别为 0.25 mm、0.35 mm 和 0.45 mm,加工结果如图 9 所示。由图 6 可知,电解加工后凹槽平均深度为 0.17 mm,当第一次以 0.25 mm 的加工深度进行加工时,由图 9b 可以发现电解加工后疏松分布的 SiC 颗粒已被去除,但依然可以观察到裸露的碳化硅颗粒,加工表面粗糙度值 $R_a = 2.913 \mu\text{m}$ 。当第二次以更大的加工深度进行加工时,加工表面出现平整区域(图 9c),仅局部存在凹坑,表面粗糙度值 $R_a = 1.178 \mu\text{m}$ 。当加工深度增大到 0.45 mm 时,加工表面均平整(图 9d),表面粗糙度值 $R_a = 0.423 \mu\text{m}$ 。可以发现,电解加工后的工件随着机械加工深度的增大表面粗糙度值逐渐减小,表面质量逐渐改善。出现上述现象是因为电解加工作为一种非接触式加工,不仅可以去除工件表层的铝基体,还可以去除更深层的铝基体。由于碳化硅颗粒的阻碍作用,越往材料内部,电解作用越弱,因此,电解加工后的工件加工表面与基体材料之间存在一定的过渡区,只有当机械加工深度足够时才可以将过渡区完全去除,获得平整的加工表面。

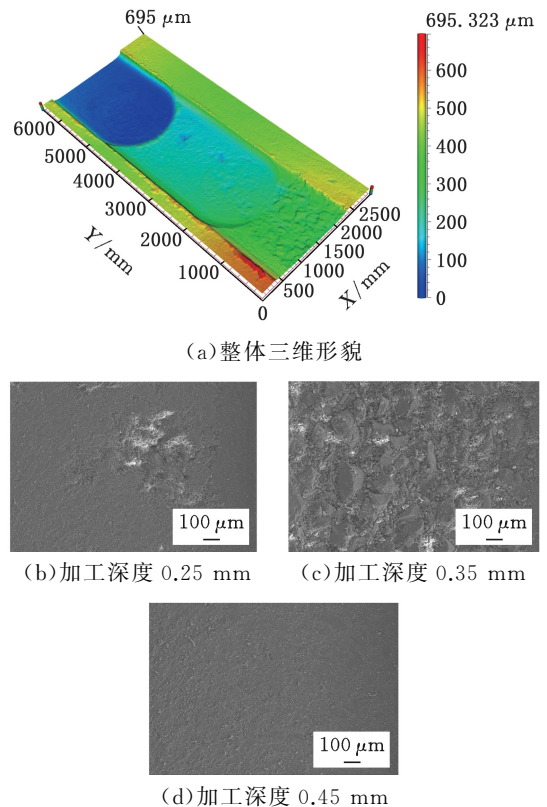
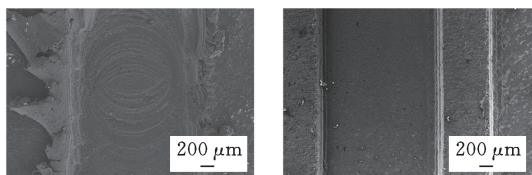


图 9 电解加工后工件在不同机械加工深度下的表面形貌

Fig.9 Surface morphology of the workpiece after electrochemical machining at different machining depths

接下来开展常规机械加工与电解-机械组合加工对比试验。常规机械加工选择加工深度为 0.25 mm、进给速度为 60 mm/min、加工长度为

10 mm。电解-机械组合加工分别选用 70 V、70 s 的电解加工参数和加工深度为 0.45 mm 进行机械加工。加工后对两种方法获得的加工沟槽结果和加工后的磨棒形貌进行观察,结果如图 10 所示。常规机械加工获得沟槽底面存在明显的磨棒旋转痕迹,粗糙度值 $Ra = 0.634 \mu\text{m}$,沟槽上表面存在明显的飞边缺陷;电解-机械组合加工获得沟槽底面平整且无飞边缺陷,底面粗糙度值 $Ra = 0.364 \mu\text{m}$,表面质量明显优于常规机械加工。

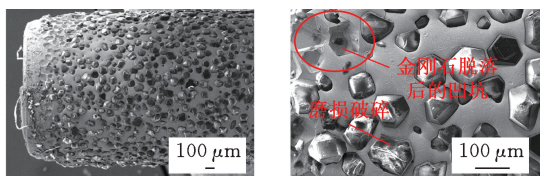


(a) 常规机械加工 (b) 电解-机械组合加工

图 10 常规机械加工和组合加工的沟槽整体形貌

Fig.10 Groove morphology of conventional and combined machining

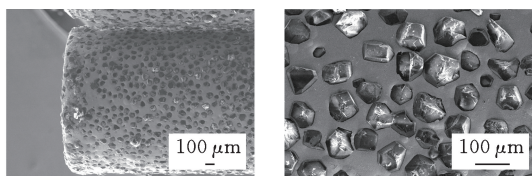
由图 11 可以发现:常规机械加工的磨棒磨损严重,底端的金刚石镀层完全脱落;在加工区的上端,虽然金刚石镀层没有整体脱落,但可以观察到金刚石颗粒脱落剩下的凹坑,并且局部金刚石存在磨损破碎。这是因为铝基体具有较强的黏附性,容易黏附在金刚石表面,导致磨棒失去锋利的切削刃,磨削产生的热量增加,使磨棒的磨损加剧^[16-17]。然而,图 12 显示电解-机械组合加工后的磨棒较为完整,未发生镀层和金刚石颗粒脱落现象,但金刚石磨粒的切削刃发生轻微磨损。



(a) 整体形貌 (b) 局部放大形貌

图 11 常规机械加工磨棒形貌

Fig.11 Morphology of grinding rod after conventional machining



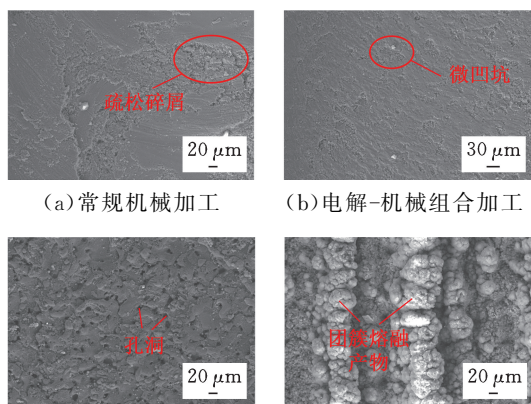
(a) 整体形貌 (b) 局部放大形貌

图 12 组合加工后的磨棒形貌

Fig.12 Morphology of grinding rod after combined machining

为了进一步验证电解-机械组合加工的有效性,对不同加工方法获得的凹槽底部微观形貌进

行了观察,结果如图 13 所示。可以发现:在常规机械加工下表面(图 13a)基体涂覆不均且存在大量疏松的碎屑;采用电解-机械组合加工方法得到的表面(图 13b)铝基体均匀涂覆,仅存在微小凹坑;电火花线切割加工表面(图 13c)呈现冷凝重铸特征,并存在较多的孔洞;纳秒激光加工表面(图 13d)存在大量的团簇熔融产物,表面质量较差。因此,对于高体积分数 SiCp/Al 复合材料,电解-机械组合加工的工件表面损伤明显小于常规机械加工、电火花线切割和纳秒激光加工。



(a) 常规机械加工 (b) 电解-机械组合加工

(c) 电火花线切割加工 (d) 纳秒激光加工

图 13 不同加工方法下凹槽底部微观形貌

Fig.13 Micro morphology of groove bottom in different machining

2.3 电解-机械组合加工机理讨论

由上述研究结果可明晰电解-机械组合加工机理。如图 14 所示,在电解加工阶段,电解作用主要去除铝基体,当加工电压较小时,电解作用只能去除表层较浅的铝基体,使碳化硅颗粒部分裸露。大的加工电压可以完全去除表层铝基体,使碳化硅颗粒裸露并在电解液的冲刷作用下脱落,形成一定的加工深度。对于更深层的材料,电场可以透过碳化硅颗粒间的缝隙去除更深层的铝基

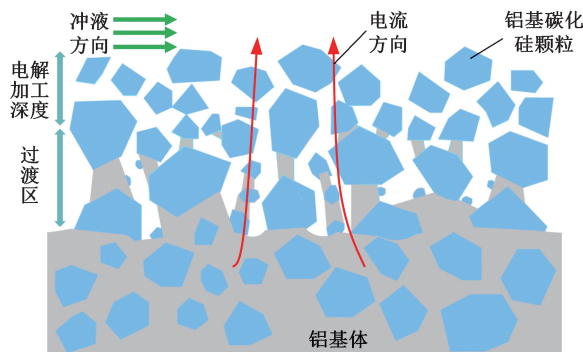


图 14 SiCp/Al 复合材料电解-机械组合加工材料去除过程示意图

Fig.14 Schematic diagram of material removal in electrolytic-mechanical machining of SiCp/Al composite

体,形成一定深度的过渡区,同时导致电解加工后表面较为粗糙。后续通过机械加工对过渡区进行加工,可去除电解加工的影响,提高加工表面质量。在加工过渡区材料时,由于铝已被局部去除,碳化硅颗粒所受基体铝的束缚较小,加工中更容易被去除,同时发生铝黏附的概率减小,从而使加工中的切削力和切削热均小于常规加工。因此,相较于常规方法,电解-机械组合加工方法可以显著减少工具磨损,延长刀具寿命,提高高体积分数 SiCp/Al 复合材料的加工质量。

3 结论

本文提出了高体积分数 SiCp/Al 复合材料电解-机械组合加工方法,探究了该方法电解加工规律和电解加工后的机械加工特性,并对组合加工机理进行了讨论,主要结论如下:

1) 电解加工高体积分数 SiCp/Al 复合材料时,由于表层铝基体被完全去除,完全裸露的碳化硅颗粒被电解液冲刷带走,形成加工深度。加工电压越大,去除铝基体的能力越强,加工深度越大。

2) 电解加工后的 SiCp/Al 复合材料工件表面与基体之间存在一定深度的过渡区,该过渡区的铝基体被局部去除,机械加工时碳化硅颗粒更容易被去除。

3) 电解-机械组合加工 SiCp/Al 复合材料中,机械加工的深度应依据电解加工后过渡区的深度来确定。

4) 相较于常规机械加工,电解-机械组合加工方法可明显减少工具磨损和表面损伤,改善高体积分数 SiCp/Al 复合材料的可加工性。

参考文献:

[1] 师祥利,王雷雷,张雷,等.碳化硅颗粒增强铝基复合材料在三自惯组中的精度提升研究[J].航空精密制造技术,2024,60(4):17-20.
SHI Xiangli, WANG Leilei, ZHANG Lei, et al. Research on Application of Silicon Carbide Particle Reinforced Aluminum Matrix Composite to Improve Navigation Accuracy of "Three-self" Inertial Measurement Combination[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2024, 60(4):17-20.

[2] 陈智明,辜勇,钱静,等.铝基碳化硅复合材料的精密磨削研究[J].机械制造,2021,59(12):32-37.
CHEN Zhiming, GU Yong, QIAN Jing, et al. Research on the Precision Grinding of SiCp/Al Composite Material[J]. Machinery, 2021, 59(12):32-37.

[3] GU Peng, ZHU Chuanmin, MURA A, et al. Grind-

ing Performance and Theoretical Analysis for a High Volume Fraction SiCp/Al Composite [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76:796-811.

[4] MILLER F, MONAGHAN J. Non-conventional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composite [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 41(7):423-427.

[5] 关佳亮,张龙月,刘书君,等.不同体积分数 SiCp/Al 复合材料精密磨削试验研究[J].工具技术,2019,53(7):23-26.
GUAN Jiali, ZHANG Longyue, LIU Shujun, et al. Experimental Study on Effect of Volume Fraction on Grinding Performance of SiCp/Al Composite ELID[J]. Tool Engineering, 2019, 53(7):23-26.

[6] GUO Sai, LU Shouxiang, ZHANG Bi, et al. Surface Integrity and Material Removal Mechanisms in High-speed Grinding of Al/SiCp Metal Matrix Composites [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 178:103906.

[7] 向道辉,马国峰,张玉龙,等.超声辅助磨削碳化硅铝基复合材料改善砂轮堵塞的实验研究[J].制造技术与机床,2015(6):124-128.
XIANG Daohui, MA Guofeng, ZHANG Yulong, et al. Study on the Wheel Loading during Grinding SiCp/Al Composites by the Aid of Ultrasonic Vibration [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(6):124-128.

[8] ZHANG Ke, GAO Qi, WANG Quanzhao. Milling Mechanism and Surface Quality of 20% Volume Fraction SiCp/Al Materials Treated by Natural Aging [J]. Silicon, 2023, 15:1883-1896.

[9] LIU Junwei, CHENG Kai, DING Hui, et al. An Investigation of the Influence of Phases Removal Ways on Surface Quality in Micro Milling SiCp/Al Composites [J]. Procedia CIRP, 2018, 71:59-64.

[10] LIU Chang, LI Cheng, XU Weiwei, et al. Variation Characteristics of Machinability in Drilling of SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix (SiCp/Al) Composite with a Wide Range of Particle Volume Fractions [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(9/10):6285-6302.

[11] AO Sansan, QIN Xiangyang, LI Kangbai, et al. Effects of Process Parameters on Jet Electrochemical Machining of SiC Particle-reinforced Aluminum Matrix Composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112:3351-3361.

[12] LIU Zhuang, GAO Changshui, QIU Yi, et al. Investigation on Electrochemical Jet Machining of High Volume Fraction SiCp/Al Composite [J]. In-

ternational Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(4):3164-3179.

- [13] ZHANG Huizhen, LI Chao, ZHANG Lei, et al. Effect of Laser Pulse Energy Deposition Method on Nanosecond Laser Scanning Ablation of SiCp/AA2024 Composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83:695-704.
- [14] 查慧婷, 冯平法, 张建富. 高体积分数 SiCp/Al 复合材料旋转超声铣磨加工的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 107-113.
- ZHA Huiting, FENG Pingfa, ZHANG Jianfu. An Experimental Study on Rotary Ultrasonic Machining of High Volume Fraction Silicon Carbide-reinforced Aluminum Matrix Composites (SiCp/Al)[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 107-113.
- [15] ZHAO Guolong, MAO Pengcheng, LI Liang, et al. Micro-milling of 65 vol% SiCp/Al Composites with a Novel Laser Assisted Hybrid Process[J]. Ceramics International, 2020, 46(16):26121-26128.
- [16] REDDY K S N, KWANG-SUP S, YANG M. Experimental Study of Surface Integrity during End

Milling of Al/SiC Particulate Metal-matrix Composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 201(1):574-579.

- [17] XIAO Han, XU Dongdong, AXINTE D, et al. On Understanding the Specific Cutting Mechanisms Governing the Workpiece Surface Integrity in Metal Matrix Composites Machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116875.

(编辑 王艳丽)

作者简介:何 斌*,男,1992年生,讲师。研究方向为电解及其复合加工方法。E-mail: binhe06@163.com。

本文引用格式:

何斌,周星雨,陆洪昱,等.高体积分数 SiCp/Al 复合材料电解-机械组合低磨损加工方法研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 753-759.

HE Bin, ZHOU Xingyu, LU Hongyu, et al. Study on Low Wear Machining Method of High Volume Fraction SiCp/Al Composite Materials by ECM-mechanical Combined Machining Processes Method[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4): 753-759.

(上接第 752 页)

- [17] SHARMA A K, TIWARI A K, DIXIT A R, et al. Novel Uses of Alumina/Graphene Hybrid Nanoparticle Additives for Improved Tribological Properties of Lubricant in Turning Operation[J]. Tribology International, 2018, 119:99-111.
- [18] NI Chenbing, ZHU Lida. Investigation on Machining Characteristics of TC4 Alloy by Simultaneous Application of Ultrasonic Vibration Assisted Milling(UVAM) and Economical-environmental MQL Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278:116518.
- [19] KUMAR M N, SUBBU S K, KRISHNA P V, et al. Vibration Assisted Conventional and Advanced Machining; a Review [J]. Procedia Engineering, 2014, 97:1577-1586.
- [20] HOANG T D, NGO Q H, CHU N H, et al. Ultrasonic Assisted Nano-fluid MQL in Deep Drilling of Hard-to-cut Materials[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37(6):712-721.
- [21] GAO Teng, ZHANG Xianpeng, LI Changhe, et al. Surface Morphology Evaluation of Multi-angle 2D Ultrasonic Vibration Integrated with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 51:44-61.
- [22] 王德祥, 张宇, 江京亮, 等. 离子液基和棕榈油基纳米流体在镍基高温合金微量润滑磨削界面的摩擦学机理研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(19):

159-171.

WANG Dexiang, ZHANG Yu, JIANG Jingliang, et al. Study on Tribological Mechanism of Ionic Liquid and Palm Oil Based Nanofluids in Micro-lubricated Grinding Interface of Nickel-based High-temperature Alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(19):159-171.

- [23] 张翔宇, 路正惠, 彭振龙, 等. 钛合金的高质高效超声振动切削加工[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5):133-147.

ZHANG Xiangyu, LU Zhenghui, PENG Zhenlong, et al. High Quality and High Efficiency Ultrasonic Vibration Machining of Titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(5): 133-147.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:郑金滔,男,1998年生,硕士研究生。研究方向为超声辅助纳米流体微量润滑车削技术。E-mail: zhengjintao_2024@163.com。刘国梁*(通信作者),男,1990年生,博士、教授。研究方向为高性能绿色加工技术。E-mail: liuguoliang@qut.edu.cn。

本文引用格式:

郑金滔,马浩然,王进,等.超声辅助纳米流体微量润滑车削钛合金实验研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4):743-752.

ZHENG Jintao, MA Haoran, WANG Jin, et al. Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Turning Titanium Alloys with Nanofluid MQL[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):743-752.