SiC_p/Al 复合材料低损伤加工技术研究进展

鲍永杰[1]，朱晓春[2]，卢守相[2]，张红哲[2]

(1. 大连海事大学，辽宁 大连 116026)

(2. 大连理工大学，辽宁 大连 116024)

摘 要：SiC_p/Al 复合材料具有优异的性能，在尖端的空天装备中应用广泛，但由于其组成相碳化硅颗粒和铝合金之间存在的巨大性能差异，使得加工过程中极易出现加工损伤，严重影响 SiC_p/Al 复合材料产品的精度和使役性能，制约着 SiC_p/Al 复合材料的工程化应用。本文围绕 SiC_p/Al 复合材料低损伤加工技术，从加工损伤的形成机理、加工损伤的影响因素、低损伤加工工具和加工工艺 3 个方面对国内外相关的研究进展进行分析，总结目前针对 SiC_p/Al 复合材料低损伤加工技术研究现状和不足之处，并指出发展趋势和方向。

关键词：SiC_p/Al 复合材料；低损伤加工；研究现状；加工

中图法分类号：TB333 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2021)03-1084-12

碳化硅颗粒增强铝基复合材料（下文简称 SiC_p/Al 复合材料）是在铝合金基体中添加碳化硅颗粒增强相所形成的一种金属基复合材料。SiC_p/Al 复合材料具有传统金属无法比拟的优异性能，具有较高的比强度和比模量、耐高温、耐磨损、耐疲劳、热膨胀系数小、尺寸稳定性好等优异性能，因此该种材料在很多领域都得到了广泛的应用。例如，在航空航天领域，中低体积分数 SiC_p/Al 复合材料通常作为铝合金、钛合金的替代材料应用于航空航天飞行器的结构件，达到减轻质量、提高强度的目的[1, 2]；在汽车工业领域，由于高体积分数 SiC_p/Al 复合材料耐磨性和导热性好，被用于制造赛车的刹车片[3]；在电子工业领域，由于高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的热物理性能好，电磁屏蔽性好，且能与半导体芯片材料的热膨胀形成良好匹配，可以作为钼铜合金等重金属封装材料的替代材料[4, 5]。随着 SiC_p/Al 复合材料制备技术的成熟，其在国防、精密仪器、航空航天等领域的应用越来越广泛，其典型应用如表 1 所示[6-18]。

SiC_p/Al 复合材料的优异性能使其成为航空航天领域关键产品的理想材料，复合材料构件的高精度要求和与其他零部件的连接不可避免的需要大量的机械加工，例如钻孔、平面铣削、车削、磨削、开槽、切边等，其加工质量直接影响产品的使役性能，一旦发生精度或质量不合格几乎无法修复或修补。而 SiC_p/Al 复合材料固有的硬度高、磨蚀性高、多界面特征等特性为机械加工带来巨大的困难，使其成为典型的难加工材料。SiC_p/Al 复合材料难加工性主要体现在以下几个方面：(1)构成 SiC_p/Al 复合材料的铝合金基体和碳化硅颗粒所具有的物理和力学性能差异巨大，同时不规则的碳化硅颗粒在铝合金基体中非均匀分布，因此在切削力的作用下，碳化硅颗粒与铝基体间的界面应力分布不均，两者所发生的变形并不一致，加工表面完整性差且加工损伤难以避免[19]。(2)碳化硅颗粒在加工过程中的破碎容易造成加工表面出现凹坑、裂纹、基体撕裂、二次划伤等加工损伤，影响表面完整性[20-22]；(3)随着 SiC_p/Al 复合材料中碳化硅体积分数的增高，材料整体偏硬脆的特性，因此在加工过程中，在工件边缘处极易出现崩边损伤[23,24]。（4）增强相碳化硅颗粒的硬度较高，其硬度大于绝大多数刀具材料，因此在切削加工过程中，SiC 颗粒对刀具的磨抛作用使得刀具磨损严重，刀具的磨损会加剧工件的加工损伤；同时，在磨削加工中，由于铝合金基体质地较软，因此很容易使砂轮出现堵塞的情况，这会加剧工件的加工损伤。

SiC_p/Al 复合材料的加工损伤对于该种材料零部件的使役性能有着较大的影响。加工损伤对于材料的表面和内部均会产生一定程度的破坏，这会严重降低材料的力学性能，限制复合材料结构的优化设计；同时由于加工损伤是裂纹源，在交变载荷的作用下，零部件的疲劳寿命会大大降低。加工损伤严重限制了

收稿日期：2020-03-15

基金项目：国家自然科学基金(51875079)；辽宁省兴辽英才计划(XLYC1907196)；国家自然基金联合基金(U1908228)

作者简介：鲍永杰，男，1980 年生，博士，教授，大连海事大学轮机工程学院，辽宁 大连 116026，电话：0411-84724611，E-mail: yongjie@dlmu.edu.cn

SiC_p/Al 复合材料在各个领域的广泛应用。如何抑制加工损伤，对于 SiC_p/Al 复合材料的应用具有十分重要的意义。因此，国内外学者对此进行了大量的理论与试验研究。

本工作围绕 SiC_p/Al 复合材料低损伤加工技术，从加工损伤的形成机理、加工损伤的影响因素、低损伤加工工具和工艺 3 个方面对国内外相关的研究进展进行总结，指出目前研究的空白和不足之处，并提出降低 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的研究方向。

1 SiC_p/Al 复合材料加工损伤特征与形成机理

1.1 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的典型特征

SiC_p/Al 复合材料的加工损伤按照所处位置可分为表面损伤、亚表面损伤和边缘损伤。从对 SiC_p/Al 复合材料铣削、车削、磨削表面损伤的观察可以看出，表面损伤的典型特征有：SiC 颗粒的拔出形成的孔洞、SiC 颗粒的破碎、由于界面脱粘而在 SiC 颗粒周围形成的裂纹、SiC 颗粒划擦已加工表面形成的沟痕、铝基体的撕裂及其在工件表面的涂覆等，如图 1 所示[25,26]。

SiC_p/Al 复合材料亚表面损伤的研究较少，Tosun[27]等人在钻削试验时发现，孔壁表面以下有一层影响层；Dong[28]等人对超声振动辅助磨削 SiC_p/Al 复合材料的亚表面损伤进行了显微观察，发现亚表面存在 SiC 颗粒的破碎、SiC 颗粒的嵌入以及 SiC 颗粒上的裂纹，如图 2 所示，可见由于铝基体在加工过程中受热软化涂覆在工件表面，掩盖了一部分加工损伤，仅靠对表面损伤的观察并不能完全反映 SiC_p/Al 复合材料的加工质量。

表 1　铝基复合材料的典型应用

Table 1　Typical application of aluminum matrix composite

Classification	Reinforced phase content/%	Application examples
Low volume fraction	10~15	Ventral fin of F-16 fighter, hydraulic brake cylinder block of military V-2 Osprey helicopter
Medium volume fraction	16~20	Aircraft camera frame
	21~25	Vertical tail of F-16 fighter, PW400 engine fan guide vane, radar antenna
	26~35	Engine stator blade, leading edge stiffener
	36~40	Aircraft hydraulic pipe, helicopter landing gear, valve body
	41~45	Guidance gyro support, front mounting plate, strategic missile final stage booster
High volume fraction	50~75	F-22 Raptor fighter remote pilot, power generation unit, pilot head display, electronic counting measurement array and other key electronic systems, module carrier plate, instrument module

在 SiC_p/Al 复合材料平面加工和钻孔加工中，边缘损伤也是常见的加工损伤，主要表现为工件边缘部位的崩边损伤，其中平面加工刀具切出工件部位或钻孔出口部位的崩边损伤尤为严重，如图 3[29]、图 4 所示[30]。崩边损伤属于体内损伤，一旦形成就不可修复，对于某些关键零部件，如果出现不可接受的崩边损伤，只能将工件报废处理。

对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤典型特征的研究表明，SiC 颗粒在加工过程中的力学行为对加工损伤有决定性影响，因此对加工损伤形成机理的研究关键在于揭示 SiC 颗粒在刀具作用下的力学行为。

1.2 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的形成机理

目前对于 SiC_p/Al 复合材料加工损伤形成机理的研究方法主要是将有限元仿真与实验相结合，通过将仿真结果与实验得到的加工损伤形貌进行对比，得到一致的损伤现象，然后分析仿真过程中材料的变形和失效行为，从而揭示加工损伤形成的机理。有限元分析方法的一般思路是：(a) 建立材料的有限元模型；

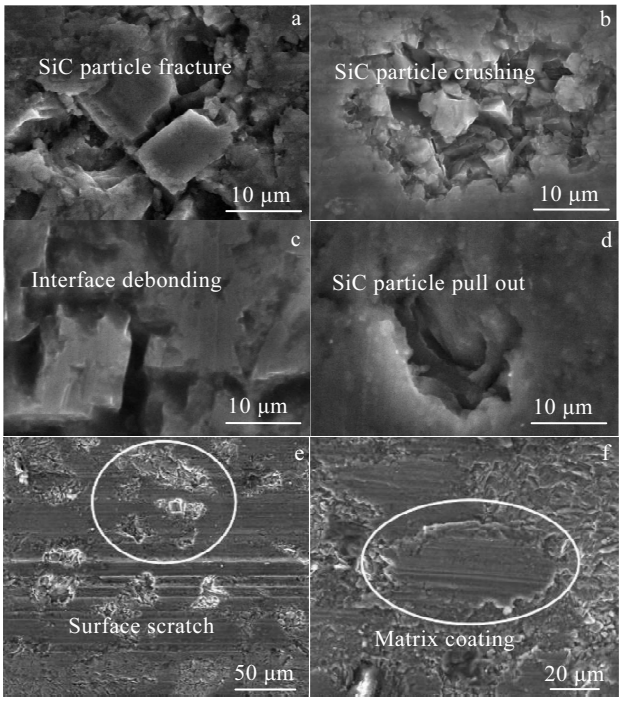


图 1　SiC_p/Al 复合材料加工表面损伤的典型特征

Fig.1　Typical surface damages of SiC_p/Al composites[25,26]: (a) SiC particle fracture, (b) SiC particle crushing, (c) interface debonding, (d) SiC particle pull out, (e) surface scratch, and (f) matrix coating

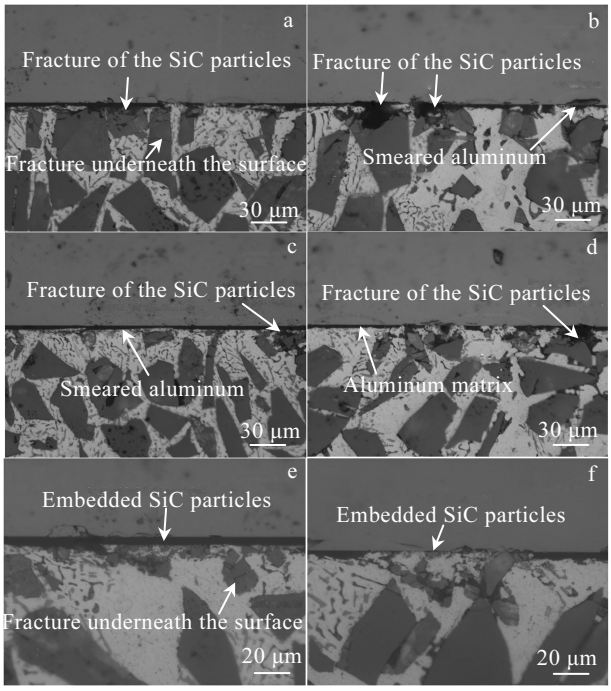


图 2　SiC_p/Al 复合材料典型加工亚表面损伤

Fig.2　Typical subsurface damages of SiC_p/Al composites[28]: (a, c, e) conventional grinding and (b, d, f)ultrasonically assisted grinding

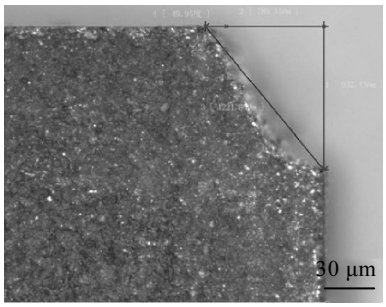


图 3　SiC_p/Al 复合材料直角切削崩边损伤

Fig.3　Edge chipping damage in orthogonal cutting of SiC_p/Al composites[29]

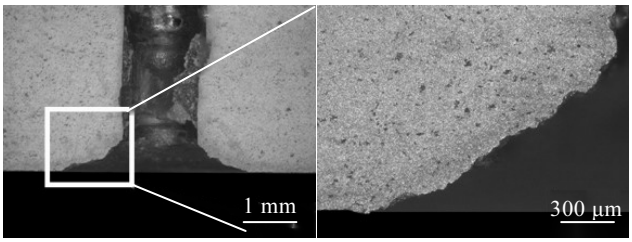


图 4　SiC_p/Al 复合材料制孔崩边损伤的侧壁观测

Fig.4　Sidewall observation of hole exit edge breaking damage of SiC_p/Al composites[30]

(b) 通过本构方程描述材料的物理力学性质；(c) 确定切屑分离准则；(d) 确定边界条件和载荷；(e) 对仿真结果进行分析。材料的有限元模型和本构方程是影响仿真结果准确性的关键。

复合材料加工损伤是细观层面上的，将复合材料等效均质化的仿真方法在模拟切削力时是有效的，但无法将加工损伤形成的过程呈现出来，因此必须分别建立增强体和基体的有限元模型再装配到一起，即建立多相有限元模型。在多相有限元模型中，基体通常采用热弹塑性本构，即 Johnson-Cook 本构方程，而 SiC 颗粒一般采用基于胡克定律的线弹性本构方程。

为了便于定性分析加工损伤机理和节约计算资源，大多数学者将 SiC_p/Al 复合材料有限元仿真模型简化为二维直角切削模型，将 SiC 颗粒简化成圆形或正多边形，在不同的切削刃—SiC 颗粒相对位置下进行切削仿真，如图 5 所示[31]。

Pramanik[32]等人对圆形增强颗粒的金属基复合材料进行了直角切削仿真，结果表明，SiC 颗粒与刀具切削刃的相对位置影响着加工损伤的形貌，当 SiC 颗粒位于切削刃切削路径的下方，SiC 颗粒被压入到基体内部，当 SiC 颗粒位于切削路径的上方，SiC 颗粒从基体拔出形成凹坑，如图 6 所示。Pramanik 的仿真结果解释了部分加工损伤特征，但其将界面简单看作是增强体的延伸，而且没有考虑 SiC 的断裂，只考虑了界面脱粘，其仿真结果有很大的局限性。Ghandeharіun[33]等人的仿真研究综合考虑了 SiC 颗粒的断裂和脱粘，结果表明，由于受到 SiC 颗粒周围基体塑性变形的影响，在切削刃与 SiC 颗粒接触之前就可能发生界面脱粘。切削刃与 SiC 颗粒的接触会导致颗粒发生断裂。Teng[34]等人分别对纳米尺度和微米尺度 SiC 颗粒增强铝基复合材料进行二维直角切削仿真。结果表明，SiC 颗粒直径与切削刃圆弧半径的相对比例对加工表面损伤有重要影响，纳米尺度 SiC 颗粒容易被切削刃圆弧压入基体内，不容易发生断裂，而微米尺度 SiC 颗粒则容易在切削刃接触作用下发生断裂，导致较为严重的加工损伤。

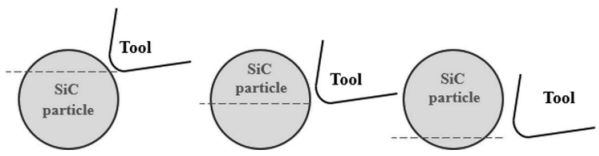


图 5　切削刃与 SiC 颗粒的 3 种典型相对位置

Fig.5　Three typical relative positions between cutter and particle[31]

一些学者以单胞模型为对象，研究只有一个增强颗粒的代表单元在切削过程的力学行为[35-40]。Liu[35]等人的研究表明，SiC 颗粒的去除模式影响着表面损伤形貌，当切削刃位于增强颗粒上方，刀具将犁过增强颗粒，增强颗粒上表面会出现微破碎；当切削刃位于增强颗粒中间位置，增强颗粒的中部将发生断裂；当切削刃位于增强颗粒下部，增强颗粒将被拔出基体，基体表面形成凹坑；在 3 种情况下，界面脱粘现象都有可能发生。Wang[31]等人的仿真研究得到了与 Liu 等人类似的结果，如图 7 所示，此外还发现 SiC 颗粒的尺寸对加工表面质量有重要影响，表面粗糙度的峰-谷值接近 SiC 颗粒半径。Liu[36]等人的另一篇文章研究了切削速度对 SiC 颗粒去除模式的影响。结果表明，在较高的切削速度下，由于基体的加工硬化提高了断裂强度，更多应力作用到 SiC 颗粒上，使 SiC 颗粒上的应力更快、更容易地达到其断裂极限，SiC 颗粒的断裂发生在脱粘之前，使 SiC 颗粒更容易被切断而不是拔出，从而降低了凹坑等较大的加工损伤。Wu[37]等人的仿真得出了不同的结论，认为当切削速度较低时，会导致 SiC 颗粒断裂先于界面脱粘发生。笔者分析上述相互矛盾的结果可能是由于界面失效准则的不同所导致的。

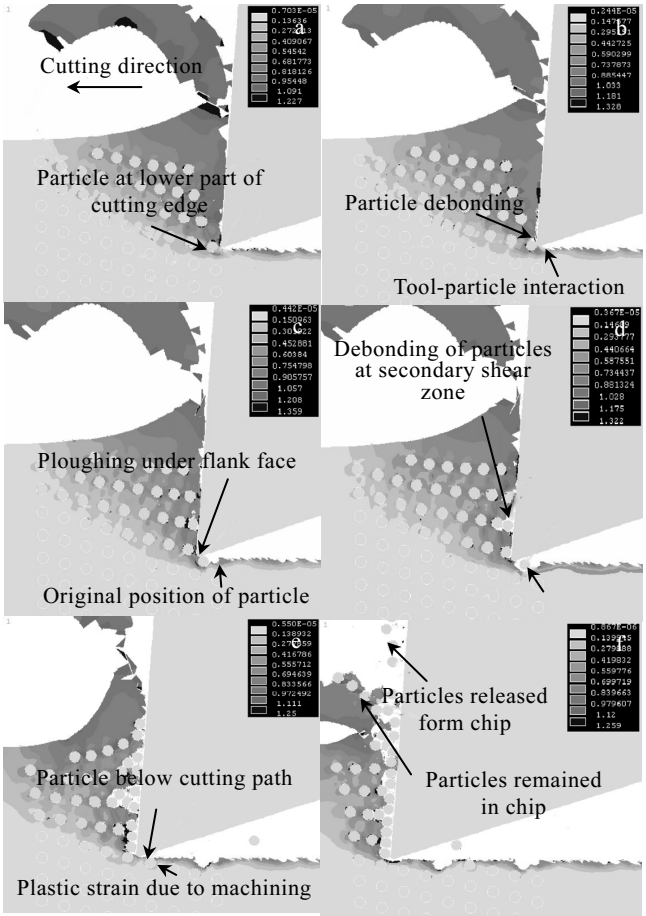


图 6　不同相对位置下的 SiC 颗粒压入和脱粘行为

Fig.6　Compressive and debonding behavior of SiC particles at different relative positions[32]: (a) particle at lower part of cutting edge; (b) particle debonding; (c) ploughing under flank face; (d) debonding of particles at secondary shear zone; (e) particle below cutting path; (f) particles released and remained form chip

上述仿真研究都是在假定 SiC 颗粒具有理想形状且在基体内均匀分布的条件下进行的，虽然可定性揭示机理，但与实际情况有一定的差距。为此，一些学者基于 SiC 颗粒随机分布的有限元模型开展了仿真研究。Zhou[25]等人和 Du[41]等人的仿真结果可以复现实验中发现的所有典型加工损伤形貌，Wang[42]等人还将随机分布的圆形 SiC 颗粒与多边形颗粒有限元模型的仿真结果进行了对比，如图 8 所示，发现在 2 种情况下，都存在增强颗粒的旋转、拔出、断裂和微破碎行为。为了使仿真更接近真实加工过程，Ghandehariun[43-45]等人进行了随机分布球形增强颗粒 SiC_p/Al 复合材料的三维有限元仿真研究，其切削力和亚表面损伤的仿真结果与试验结果比较接近。

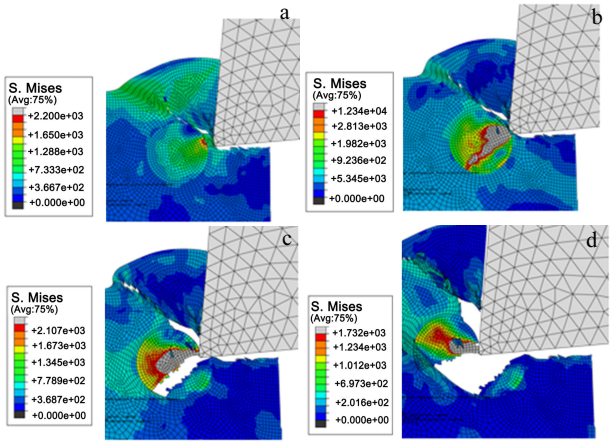


图 7　单个 SiC 颗粒的断裂去除过程

Fig.7　Fracture removal process of single SiC particle[31]: (a) contact, (b) breaking, (c) crack growth, and (d) grain breakage

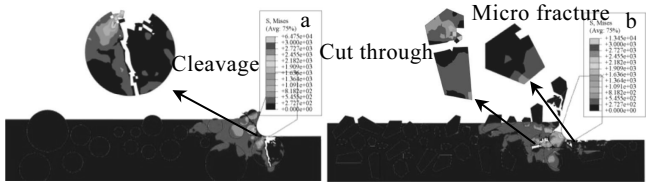


图 8　SiC 颗粒随机分布有限元模型的仿真结果

Fig.8　Simulation results of finite element model of SiC particle random distribution[42]: (a) round particles mode and (b) polygonal particles mode

除了对表面和亚表面损伤的有限元研究，边缘损伤机理的研究也有重要进展。Zhou[46,47]等人对高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的边缘损伤进行了直角切削有限元仿真和试验研究。结果表明，裂纹沿负剪切面扩展导致的颗粒断裂、界面脱粘以及基体韧性断裂是产生崩边损伤的主要原因，如图 9 所示。常国瑞[48]对 SiC_p/Al 复合材料钻孔棱边损伤进行了有限元仿真研究，把棱边损伤的形成过程分为剪切变形、微裂纹萌生、明显应力传播、断裂形成、棱边损伤形成 5 个阶段。田景华[49]和南晓辉[50]分别对 PCD 钻头啄钻高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的棱边损伤进行了仿真和试验研究。结果表明，入口损伤是由于切削刃对棱边材料的剪切、挤压和摩擦形成的，而出口损伤是由于剩余未切削材料不足以承受轴向力，与已加工表面边界处产生的微裂纹扩展造成出口区域材料大面积剥落而形成的。Hu[51]等人对 SiC_p/Al 复合材料钻孔入口损伤的形成机理进行了解释，认为当钻头外缘区域的最大主应力超过材料的抗拉强度极限时，会产生由裂纹张开和脆性断裂引起的边缘损伤。由于 SiC 颗粒分布具有随机性，孔入口边缘不同位置处最大主应力的波动较大，导致不同位置处的边缘损伤程度不同。根据上述文献研究，可见钻孔加工出口损伤的形成机理本质上与直角切削切出阶段的崩边损伤是一致的。

总结 SiC_p/Al 复合材料加工损伤机理的研究现状，目前已经能够通过仿真将所有典型加工损伤形貌复现，并且较为深刻地揭示了加工过程中 SiC 颗粒的力学行为。虽然该方面的研究已经较为完善，但是仍然有提升的空间，例如，对于界面本构模型的基础研究仍不够完善，大部分有限元仿真模型没有考虑界面问题，或者仅采用简单的界面本构模型，容易出现相互矛盾的结论。对于 SiC_p/Al 复合材料界面本构模型的研究将提升仿真的可信性，是很有意义的。

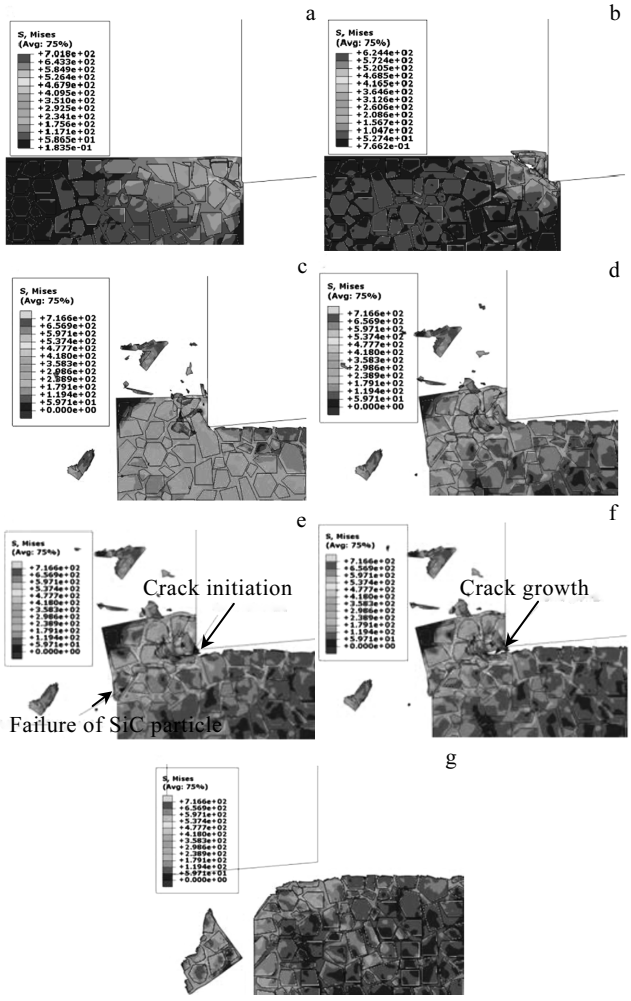


图 9 SiC_p/Al 复合材料边缘损伤的形成过程

Fig.9 Formation process of the edge defects during machining of SiC_p/Al composites[46]: (a) contact, (b) shear deformation, (c) grain breakage, (d) interface failure, (e) failure of SiC particle, (f) crack growth, and (g) edge defect

2 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的影响因素

在对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤机理的研究基础上，厘清加工损伤的影响因素及其作用规律，对于低损伤加工工艺的制定有重要意义。在开展复合材料加工损伤影响因素研究时，如何量化加工损伤是研究者面临的首要问题。早期常用二维表面粗糙度参数 R_a 来评价 SiC_p/Al 复合材料的切削加工表面质量，由于 SiC 颗粒破碎和拔出会在表面形成凹坑，R_a 值并不能反映真实表面形貌，Zheng[52]采用三维表面粗糙度参数 S_q 代替 R_a 来评价加工表面粗糙度，并提出利用对 SiC_p/Al 复合材料表面凹坑更为敏感的表面分型维数 D_s 来表征表面质量。Zhu[53]等人建立了包括整个形貌轮廓高度、表面粗糙度、缺陷的轮廓高度以及等效表面粗糙度的综合评价体系，该评价体系能直观地反映含凹坑的表面形貌，从而更好地指导 SiC_p/Al 加工工艺参数的选择。尽管有学者提出了更好的加工表面损伤评价方法，目前应用最广泛的评价参数仍然是表面粗糙度 R_a。对于边缘损伤，由于主要的损伤形式是崩边，目前常用二维崩边参数（崩边高度、崩边长度或崩边直径）和三维崩边参数（崩边体积）进行量化分析。目前对于 SiC_p/Al 复合材料亚表面损伤研究较少，本工作暂不涉及有关亚表面损伤影响因素研究的讨论。

本节先从切削参数、刀具参数、材料参数 3 个方面讨论 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的影响因素，再指出加工损伤的影响因素研究的薄弱环节。

2.1 切削参数对加工损伤的影响

在 SiC_p/Al 复合材料的加工过程中，切削参数对加工损伤有着重要的影响。若干年来，国内外学者开展了大量的加工试验，若简单地以表面粗糙度为表面损伤的评价指标，则无论车、铣、钻，还是磨削加工，在刀具磨损不显著的阶段基本都能得出相似的结论，即提高切削速度、降低进给速度和切深，有利于降低表面粗糙度[54, 55]。但不同加工方式、具体试验条件的差异导致了切削用量三要素对表面粗糙度的影响程度有所不同，例如，SiC_p/Al 复合材料车削加工试验表明，切削速度对表面粗糙度影响最大，进给量次之，切削深度影响最小[56]；而铣削加工试验结果表明，进给速度对表面粗糙度影响最大，铣削速度和铣削深度的影响较小[57]。

SiC_p/Al 复合材料加工边缘损伤的影响因素研究主要集中于直角切削和钻孔加工的崩边损伤。Zhou[29]等人对 SiC_p/Al 复合材料直角切削崩边损伤进行了试验研究。结果表明，切削深度是影响边缘损伤尺寸的主要因素，切深越大，边缘损伤尺寸越大；切削速度对边缘损伤尺寸影响不大。Huang[58]等人对 SiC 颗粒体积分数为 56%的 SiC_p/Al 复合材料的钻孔加工试验结果表明，进给速率越大，崩边损伤越严重，而切削速度越大，崩边损伤越小。曹波[30]等人对 SiC 体积分数为 45%~65%的 SiC_p/Al 复合材料制孔崩边损伤的研究也得到了相似结论。

2.2 刀具参数对加工损伤的影响

刀具参数主要包括刀具材料的硬度和刀具几何参数。由于 SiC_p/Al 复合材料的增强相 SiC 颗粒莫氏硬度达到 9.5，高于绝大多数材料，如果刀具硬度低于 SiC 颗粒硬度，则切削过程就等同于 SiC 颗粒不断磨蚀刀具的过程，对于加工过程极为不利。有研究表明，对于加工 SiC_p/Al 复合材料，刀具材料硬度越高，表面粗糙度越低[59]，用硬质合金刀具加工 SiC 颗粒体积分数为 17%的 SiC_p/Al 复合材料，其表面粗糙度低于高速钢刀具和 TiN 涂层刀具[60]。对于 SiC 颗粒体积分数较高的 SiC_p/Al 复合材料，目前普遍采用金刚石刀具。

刀具的几何参数也对 SiC_p/Al 复合材料的加工损伤有一定的影响。有研究表明，车削加工时，刀具前角越大，表面粗糙度越低[61]；钻孔加工时，增大锥角可以降低表面损伤[59]。刀具前角对边缘损伤也有影响，随着前角增大，直角切削崩边损伤的尺寸先减小后增大[29]。

总体而言，刀具硬度对 SiC_p/Al 复合材料的加工损伤的影响是决定性的，在刀具硬度不足的前提下，改变刀具几何参数对于降低加工损伤没有意义。

2.3 材料参数对加工损伤的影响

SiC 颗粒的体积分数和平均直径是 SiC_p/Al 复合材料的主要参数，决定了其物理性质和力学性能。Yan[62]和 Sun[63]分别试验研究了不同 SiC 颗粒尺寸和体积分数下的 SiC_p/Al 复合材料应力应变曲线。结果表明，随着增强颗粒尺寸增大、体积分数降低，材料的屈服强度降低。Tan[64]研究了增强颗粒尺寸对 SiC_p/Al 复合材料热导率的影响，发现随着 SiC 颗粒尺寸的增大，SiC_p/Al 复合材料的热导率升高。SiC 颗粒的尺寸和体积分数不同，加工过程的切削力和切削温度不同，材料在切削力和切削热作用下的响应也不同，最终导致了加工损伤程度的不同。SiC 颗粒尺寸越大，体积分数越高，由于 SiC 颗粒断裂、脱粘和拔出导致的加工表面损伤越严重，如图 10 所示[25,65]。

SiC 颗粒的体积分数对钻孔加工边缘损伤的影响尤为明显。随着碳化硅颗粒体积分数的增加，材料整体硬度和脆性明显增强，孔出口处崩边损伤更加严重[30, 58]。SiC 颗粒体积分数的变化对刀具磨损有重要影响，试验研究发现，碳化硅颗粒体积分数越高，刀具磨损量和磨损率越高[58, 66]，工件的加工损伤越严重。

通过上文对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤影响因素的有关文献回顾，可以发现切削参数、刀具参数和材料参数对加工损伤的影响本质上是通过切削力和切削热以及材料对切削力和切削热的响应反映出来的。大量的试验研究表明，降低切削力有利于降低加工损伤。然而，切削热对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的影响存在争议：一方面，温度的升高会减弱铝基体对 SiC 颗粒的支撑作用，造成 SiC 颗粒更易脱粘和拔出；另一方面，铝基体的高延展性使其在高温下涂覆于工件表面，有利于降低表面粗糙度。此外，铝基体的涂覆现象容易掩盖亚表面裂纹，而亚表面损伤对 SiC_p/Al 复合材料构件的力学性能的影响尚未可知，在加工过程中是否需要关注亚表面损伤仍需开展进一步研究。

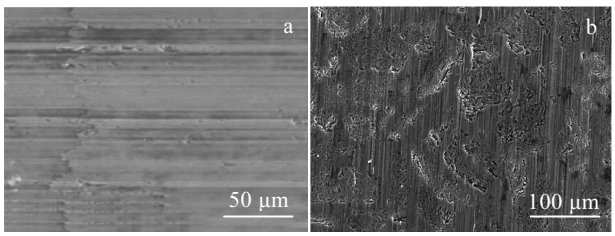


图 10　不同体积分数 SiC_p/Al 复合材料表面损伤形貌

Fig.10　Surface damage morphologies of SiC_p/Al composites with different volume fractions[25,65]: (a) volume fraction=17%, particle size=3 μm; (b) volume fraction=55%, particle size=60 μm

3　SiC_p/Al 复合材料低损伤加工工具与加工工艺研究

3.1　SiC_p/Al 复合材料低损伤加工工具研究

刀具在 SiC_p/Al 复合材料加工过程中占有极其重要的地位。当 SiC 颗粒低体积分数较低时，硬质合金刀具的磨损较慢，可以胜任 SiC_p/Al 复合材料的加工需求[55, 67]。随着 SiC 颗粒体积分数的提高，硬质合金刀具加工 SiC_p/Al 复合材料时磨损过快，已经不具有工程应用价值。SiC_p/Al 复合材料低损伤加工刀具研究的核心是提高刀具耐磨性和刀具的锋利度，目前应用最为广泛的刀具有单晶金刚石刀具、聚晶金刚石（PCD）刀具和金刚石磨粒工具。

单晶金刚石刀具的优点是可以刃磨出非常锋利的切削刃，能在极小的切深下有效去除材料，有利于 SiC 颗粒的延性域去除，从而降低 SiC_p/Al 复合材料的加工损伤。Bian[68]等人采用直径 3 mm 的单晶金刚石铣刀对 SiC 颗粒体积分数为 65%，SiC 颗粒平均直径为 60~80 μm 的 SiC_p/Al 复合材料进行精密铣削加工试验、结果表明，在主轴转速 10000 r/min、每齿进给量 1 μm、切深 2 μm 的加工参数下得到了 R_a=0.078 μm 极低的表面粗糙度，将加工表面的铝基体薄层腐蚀掉之后，观察 SiC 颗粒的形貌，如图 11 所示，可见 SiC 颗粒塑性去除的比例很高，有效地降低了加工表面损伤。虽然加工质量很好，但是单晶金刚石刀具的磨损也较为严重，如图 12 所示，主要有崩刃和后刀面的磨损，其中后刀面磨损的机理是金刚石与 SiC 摩擦造成的化学扩散磨损，同时，SiC 颗粒的机械磨蚀作用也加速了刀具磨损。

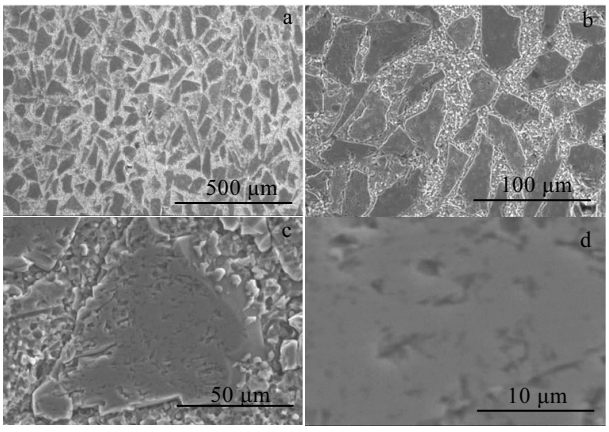


图 11　单晶金刚石刀具加工 SiC_p/Al 复合材料表面形貌

Fig.11　Surface morphologies of SiC_p/Al composites machined by monocrystalline diamond end mill[68]: (a) general view, (b) high magnification view, (c) single SiC_p particle surface, and (d) high magnification view of the partial ductile machined surface

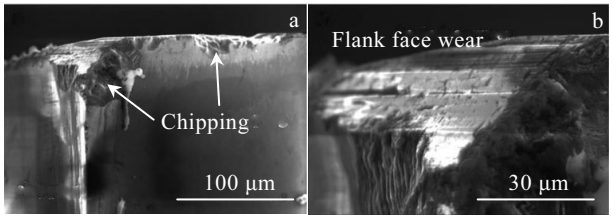


图 12　单晶金刚石刀具的磨损形貌

Fig.12　Wear morphologies of monocrystalline diamond end mill[68]: (a) chipping and (b) flank face wear

单晶金刚石刀具的制造成本很高，仅在极高的加工精度要求下采用。目前应用最为广泛的是 PCD 刀具，PCD 刀具是由金刚石粉末与含钴、镍的结合剂在高温高压下烧结而成，金刚石粉末的粒径对刀具耐磨性能影响很大[69]。Yang[70]等人采用不同金刚石粒径的 PCD 刀具对铝基复合材料进行铣削试验，发现细颗粒的 PCD 刀具磨损最小。Wang[71]等人的研究结果则表明，PCD 刀具的金刚石颗粒尺寸与铝基复合材料中增强颗粒尺寸接近时刀具寿命最佳。而相对于细粒径和粗粒径的单一粒径 PCD 刀具，混合粒径的 PCD 刀具加工表面粗糙度较低[69, 70, 72]。Han 等人[69]利用切削刃带倒棱的 PCD 铣刀对高体分比 SiC_p/Al 复合材料进行铣削加工，发现负倒棱对降低刀具磨损和加工损伤有明显效果。

除了切削加工刀具，采用金刚石砂轮磨削也可以达到较高的表面质量，但是由于铝基体的塑性，砂轮容易堵塞[26, 28]。

3.2　SiC_p/Al 复合材料低损伤加工工艺研究

经过上文对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤影响因素的分析可知，通过优化加工参数可以降低加工损伤，但是传统的加工方法由于其加工机理的限制，难以对加工损伤的抑制效果有根本性的提升，加工工艺方法的改进对于降低复合材料加工损伤有巨大的作用。特种加工具有传统加工无法比拟的优势，但是由于 SiC_p/Al 复合材料特殊的细观结构和物理、力学性质，目前各种特种加工方法对于降低其加工损伤都有一定的局限性。例如，传统超声加工是通过游离磨粒在超声作用下对材料的冲蚀作用进行材料去除，适用于硬脆材料，然而 SiC_p/Al 复合材料的基体相是塑性很强的金属，传统超声加工效率极低，不适合加工 SiC_p/Al 复合材料；电火花加工的机理是通过铝合金基体的导电性使其放电熔化，失去对 SiC 颗粒的包裹作用从而使其脱落，因此容易形成凹坑，影响表面粗糙度，放电加工过程中在材料表面产生重熔层，形成热应力，

不利于材料的疲劳强度，而且 SiC 颗粒对放电加工过程产生屏蔽作用，导致材料去除效率较低，加工成本高[73-75]；激光加工具有能量密度高、切缝窄的优点，材料去除效率很高，可以获得较为光滑的加工表面，然而其热损伤比电火花加工更为严重，在热影响区域可以看到明显的热损伤变形[76, 77]；磨粒水射流加工的材料去除效率很高，而且几乎没有热损伤，但是目前这种加工方式所能达到的加工精度有限，对于精度要求很高的场合并不适用，而且对于非贯穿式加工，其侵入深度较难控制，这也限制了其应用范围[78, 79]。

目前 SiC_p/Al 复合材料低损伤加工工艺的发展趋势是将传统切削加工与特种加工相结合，最大限度地发挥各自的优势。

旋转超声加工方法是在传统铣磨方法的基础上引入轴向超声振动，刀具上磨粒的运动轨迹是由旋转运动和垂直进给运动复合而成，具有断续切削的特点，如图 13 所示[52]。Feng[80,81]等人开展了超声振动辅助单颗粒划切 SiC_p/Al 复合材料的试验研究。结果表明，超声振动的冲击作用能将 SiC 颗粒充分击碎，划切力和磨粒与工件材料的摩擦系数低于普通加工。Dong[28]等人的研究表明，旋转超声加工能降低 SiC_p/Al 复合材料的亚表面损伤层厚度，而且加工质量的稳定性较好。基于超声振动作用的优势，国内外学者开展了大量的加工试验[61, 82-84]，结果表明，旋转超声加工 SiC_p/Al 复合材料，可显著降低切削力、降低刀具磨损，对抑制加工损伤有明显作用，如图 14 所示[28]。

超低温加工是在传统加工工艺的基础上加入液氮冷却系统，以此来实现切削区域的超低温环境。超低温条件下铝基体的塑性降低，对碳化硅颗粒的支撑作用增强[85]，如图 15 所示，可见在超低温磨削条件下，可观察到 SiC_p/Al 复合材料的 SiC 增强颗粒被塑性去除[86]。在线电解磨削（ELID）方法也被应用到 SiC_p/Al

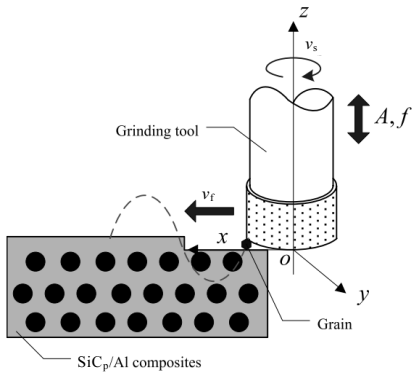


图 13　旋转超声加工示意图

Fig.13　Diagram of rotational ultrasonic machining[52]

复合材料超精密加工中，可以提高磨粒的出刃高度，增加砂轮的容屑空间，如图 16 所示，可见 SiC 颗粒极大比例被塑性去除[87]。上述 2 种方法的共性特征都是采用了磨削加工方法，以极小的单颗磨粒切深加工 SiC_p/Al 复合材料，以达到使 SiC 颗粒处于延性域去除的目的，从而降低了加工损伤。

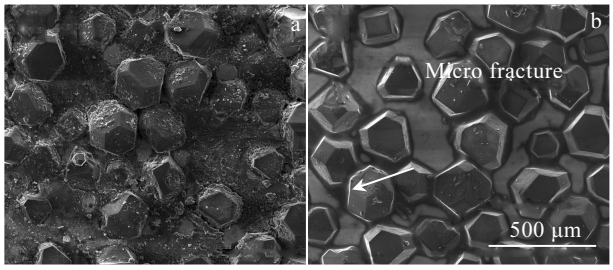


图 14　旋转超声加工抑制砂轮磨损的效果

Fig.14　Effect of rotary ultrasonic machining on restraining grinding wheel wear[28]: (a) conventional grinding and (b) ultrasonically assisted grinding

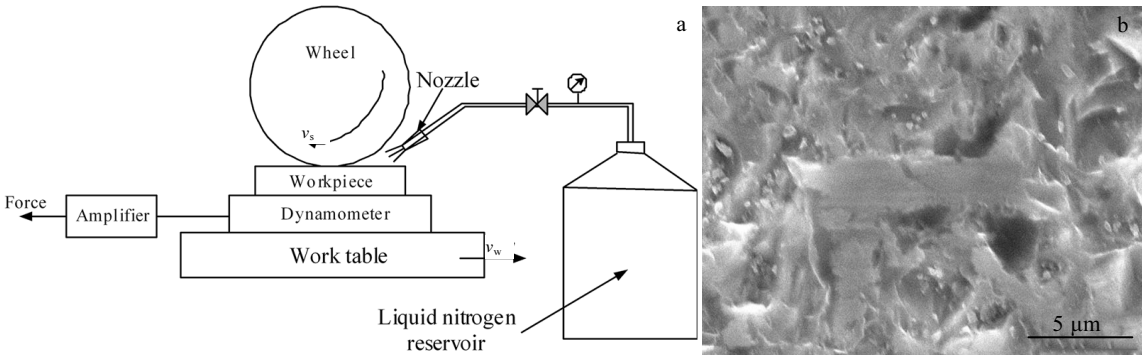


图 15　低温磨削方法加工 SiC_p/Al 复合材料

Fig.15　Cryogenic grinding of SiC_p/Al composites[86]: (a) schematic illustration of the experimental setup with liquid nitrogen; (b) ground surface SEM image of SiC_p/Al composites under cryogenic condition

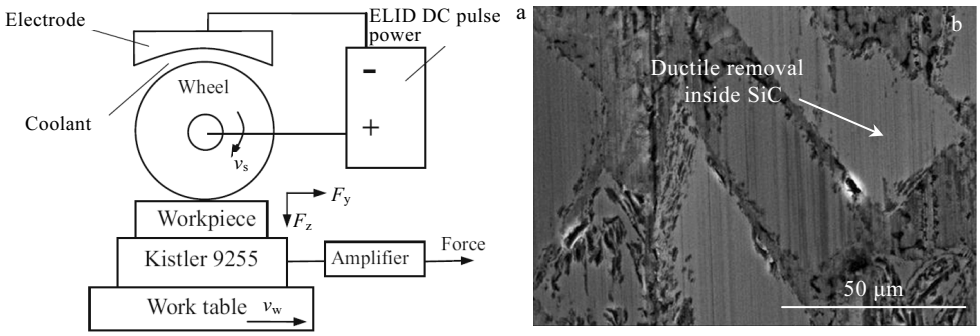


图 16　在线电解修整磨削方法加工 SiC_p/Al 复合材料

Fig.16　Machining SiC_p/Al composites by ELID[87]: (a) schematic illustration of ELID grinding setup; (b) high magnification SEM image of SiC_p/Al composite under ELID condition

激光辅助加工是采用激光器对工件材料进行先导的预热处理，随之进行切削去除材料的加工方法。Barnes[88]等人对 SiC_p/Al 复合材料的加工结果表明，激光预热后进行加工可降低切削力，减小亚表面损伤。Kong[89]等人也进行了激光辅助加工试验，其试验装置如图 17 所示，发现在预热温度 220~320 ℃范围内可显著减轻刀具磨损。从激光辅助加工 SiC_p/Al 复合材料的效果来看，其优势主要在于减轻刀具磨损，而对降低加工损伤的效果并不明显。

通过对旋转超声加工、超低温加工、在线电解修整磨削加工和激光辅助加工方法的有关研究的回顾。可见，通过施加外部条件使 SiC 颗粒处于延性域去除，是降低 SiC_p/Al 复合材料加工损伤最有效的方法，实际加工效果也证明了这一点。开发超低温加工与其他加工方法相结合的新型加工工艺方法，是 SiC_p/Al 复合材料低损伤加工很有前途的发展方向之一。

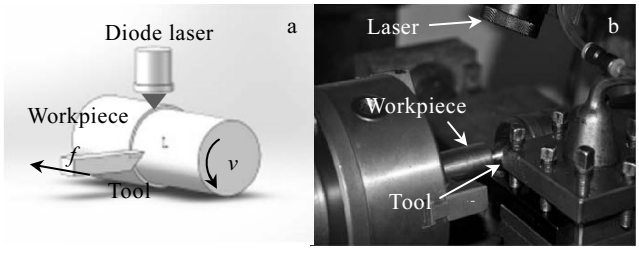


图 17　激光辅助加工方法

Fig.17　Laser assisted machining method[89]: (a) schematic diagram and (b) actual setup

4　结　语

随着 SiC_p/Al 复合材料在航空航天等领域高端产品中应用比例增加，对产品精度和性能提出了更高要求。针对 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的问题，本文对加工损伤的形成机理、加工损伤的影响因素、低损伤加工工具和工艺 3 个方面研究进展进行了综述，大量的理论与试验研究结果表明，降低加工过程的切削力和切削热、通过施加外部工艺条件提高材料的加工性能是解决 SiC_p/Al 复合材料加工损伤的主要思路。采用超硬材料刀具、将传统加工与特种加工方法相结合是降低加工损伤的有效方法。目前，关于 SiC_p/Al 复合材料界面本构模型的研究、加工损伤的评价方法以及亚表面损伤的研究比较薄弱，在加工过程的温度控制、损伤形成机制、加工损伤对材料力学性能的影响以及先进适用的加工工艺装备等方面仍需要进一步的深入研究。

参考文献　References

[1] Wang Xing(王 行), Xie Jingpei(谢敬佩), Hao Shiming(郝世明) *et al*. *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金)[J], 2013, 41(3): 50

[2] Zheng Xijun(郑喜军), Mi Guofa(米国发). *Material & Heat Treatment*(材料热处理技术)[J], 2011, 40(12): 92

[3] Izciler M, Muratoglu M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 132(1-3): 67

[4] Huang Qiang(黄 强), Gu Mingyuan(顾明元), Jin Yanping(金燕萍). *Materials Reports*(材料导报)[J], 2000, 14(9): 28

[5] Zhou Xianliang(周贤良), Wu Jianghui(吴江晖). *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology*(南昌航空工业学院学报)[J], 2001, 15(1): 11

[6] Fan Jianzhong(樊建中), Shi Likai(石力开). *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2012, 42(1): 1

[7] Zhou Yuansheng(周苑生). *New Technology & Products of China*(中国新技术新产品)[J], 2018(3): 129

[8] Li Guoqing(李国庆), Chen Jianhua(陈建华). *Light Metal* (轻金属)[J], 1997(6): 60

[9] Yang Guocai(杨国才). *Aviation Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2009(16): 32

[10] Huang Wei(黄 维), Huang Chunfeng(黄春峰), Wang Yongming (王永明) *et al*. *Defense Manufacturing Technology*(国防制造技术)[J], 2009(3): 42

[11] Hu Haifeng(胡海峰), Zhang Yudi(张玉娣), Zou Shiqin (邹世钦) *et al*. *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010(6): 90

[12] Cui Yan(崔 岩). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2002(6): 3

[13] Jin Peng(金 鹏), Liu Yue(刘 越), Li Shu(李 曙) *et al*. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2009, 23(11): 24

[14] Zhang Wenyu(张文毓). *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2015(3): 82

[15] Xu Xiaojing(许小静), Zhang Xuhu(张绪虎), Wang Liang (王亮) *et al*. *Aerospace Material Technology*(宇航材料工艺)[J], 2011, 41(3): 5

[16] Tian Zhiyu(田治宇). *Metal Materials and Metallurgy Engineering*(金属材料与冶金工程)[J], 2008(1): 3

[17] Fan Jianzhong(樊建中), Xiao Bolv(肖伯律), Xu Jun(徐 骏) *et al*. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2007, 21(10): 98

[18] Li Jie(李 杰). *Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials (Subforum on Composite Application and Industrialization)*(第 17 届全国复合材料学术会议复合材料应用及产业化分论坛)[C]. Beijing: Chinese Academy of Aeronautics, 2012

[19] Zhou L, Huang S T, Yu X L. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2014, 27(5): 869

[20] Ge Yingfei(葛英飞), Xu Jiuhua(徐九华), Fu Yucan(傅玉灿) *et al*. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2012, 36(2): 15

[21] Yu Xiaolin(于晓琳), Huang Shutao(黄树涛), Zhao Wenzhen (赵文珍) *et al*. *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2010(5): 519

[22] Wang T, Xie L J, Wang X B. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 79(5-8): 1185

[23] Zhou L, Hou N, Huang S T *et al*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 72(9-12):1407

[24] Zhou L, Wang Y, Ma Z Y *et al*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2014, 84(6): 9

[25] Zhou L, Cui C, Zhang P F *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 91(5-8):1935

[26] Zhou M, Wang M, Dong G J. *Materials and Manufacturing Process*[J], 2016, 31(5): 673

[27] Tosun G, Muratoglu M. *Composites Science and Technology*[J], 2004, 64(2): 299

[28] Dong Z G, Zheng F F, Zhu X L *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 93(5-8): 2827

[29] Zhou L, Hou N, Huang S T *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 72(9-12): 1407

[30] Cao Bo(曹 波), Gao Hang(高 航), Bao Zicheng(鲍子成) *et al. Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2014, 31(4): 949

[31] Wang Y F, Liao W H, Yang K *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 100(1-4): 963

[32] Pramanik A, Zhang L C, Arsecularatne J A. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2007, 47(10): 1497

[33] Ghandehariun A, Kishawy H A, Umer U *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 82(1-4): 143

[34] Teng X Y, Chen W Q, Huo D H *et al. Composite Structures*[J], 2018, 203: 636

[35] Liu J W, Cheng K, Ding H *et al. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity*[C]. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2016

[36] Liu J W, Cheng K, Ding H *et al. Journal of Mechanical Engineering Science*[J], 2018, 232(11): 2044

[37] Wu Q, Xu W X, Zhang L C. *Machining Science and Technology*[J], 2018, 22(4): 638

[38] Xiang D H, Shi Z L, Feng H R *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 105 (7-8): 3477

[39] Zheng Wei(郑 伟), Liu Ling(刘 岭), Zhang Qun(张 群) *et al. Journal of Solid Rocket Technology*(固体火箭技术)[J], 2019, 42(6): 793

[40] Yin G Q, Gong Y D, Li Y W *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2019, 163: 1

[41] Du J G, Zhang H Z, He W B *et al. Applied Composite Materials*[J], 2019, 26(1): 29

[42] Wang T, Xie L J, Wang X B. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 79(5-8): 1185

[43] Ghandehariun A, Kishawy H, Balazinski M. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2016, 107: 235

[44] Wang Y F, Liao W H, Yang K *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 100(5-8): 1393

[45] Zhao X, Gong Y D, Cai M *et al. Materials*[J], 2020, 13 (3):1

[46] Zhou L, Wang Y, Ma Z Y *et al. International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2014, 84: 9

[47] Zhou L, Xiang J F, Yi J *et al. Applied Sciences-Basel*[J], 2019, 9(18): 1

[48] Chang Guorui(常国瑞). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015

[49] Tian Jinghua(田景华). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016

[50] Nan Xiaohui(南晓辉). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015

[51] Hu F, Xie L J, Xiang J F *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 96(9-12): 3719

[52] Zheng W, Zhou M, Zhou L. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 91(5-8): 2347

[53] Zhu C M, Gu P, Liu D H *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 102(9-12): 2807

[54] Sahoo A K, Pradhan S. *Measurement*[J], 2013, 46(9): 3064

[55] Sahoo A K, Pradhan S, Rout A K. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*[J], 2013, 13(1): 27

[56] Wang Jinfeng(王进峰), Fan Xiaoliang(范孝良), Cao Yuwei (曹雨薇) *et al*. *Chinese Journal of Construction Machinery*(中国工程机械学报)[J], 2017, 15(1): 1672

[57] Jiao Keru(焦可如). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016

[58] Huang S T, Zhou L, Chen J *et al. Materials and Manufacturing Processes*[J], 2012, 27(10): 1090

[59] Tosun G, Muratoglu M. *Composites Science and Technology*[J], 2004, 64(10-11): 1413

[60] Tosun G. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2011, 55(5-8): 477

[61] Dong G J, Zhang H J, Zhou M *et al. Materials and Manufacturing Process*[J], 2013, 28(9): 999

[62] Yan Y W, Geng L. *Materials Science and Technology*[J], 2007, 23(3): 374

[63] Sun L Z, Ju J W. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*[J], 2004, 71(6): 774

[64] Tan Z Q, Chen Z Z, Fan G L *et al. Materials & Design*[J], 2016, 90: 845

[65] Ge Yingfei(葛英飞), Xu Jiuhua(徐九华), Fu Yucan(傅玉灿) *et al*. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2012, 36(2): 15

[66] Wu Q, Li L, Shi Z Y *et al*. *Materials Science Forum*[J], 2014, 770: 100

[67] Joshi S S, Ramakrishnan N, Sarathy D *et al. Materials and Manufacturing Processes*[J], 1998, 13(1): 65

[68] Bian R, He N, Li L *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 71(1-4): 411

[69] Han J J, Hao X Q, Li L *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 92(5-8): 1875

[70] Yang Y F, Wu Q, Zhan Z B *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 79(9-12): 1699

[71] Wang T, Xie L J, Wang X B *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 78(9-12):1445

[72] Huang S T, Guo L, He H H *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 97(5-8):2731

[73] Wang Z L, Geng X S, Chi G X *et al*. *Materials & Manufacturing Processes*[J], 2014, 29(5): 532

[74] Seo Y W, Kim D, Ramulu M. *Materials & Manufacturing Processes*[J], 2006, 21(5): 479

[75] Mohal S, Kumar H. *Materials & Manufacturing Processes*[J], 2017, 32(3): 263

[76] Zhang H Z, Kong X J, Yang L J *et al*. *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 642: 330

[77] Kong X Z, Zhang H Z, Yang L J *et al*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 85(1): 365

[78] Srinivas S, Babu N R. *Machining Science & Technology*[J], 2012, 16(3): 337

[79] Mali H S, Manna A. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2012, 61(9): 1263

[80] Feng P F, Liang G Q, Zhang J F. *Ceramics International*[J], 2014, 40(7): 10 817

[81] Zheng W, Wang Y J, Zhou M *et al. Ceramics International*[J], 2018, 44(13): 15 133

[82] Wang M, Zhou M, Dong G J. *Material Research Innovations*[J], 2015, 19(8): 784

[83] Liu C S, Zhao B, Gao G F *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 129(1-3): 196

[84] Wang M, Zheng W, Zhou M *et al. Advances in Mechanical Engineering*[J], 2019, 11(12): 1

[85] Liu Q Y, Wang F, Wu W W *et al. Ceramics International*[J], 2019, 45(3): 4099

[86] Zhou L, Huang S T, Yu X L. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2014, 27(5): 869

[87] Yu X L, Huang S T, Xu L F. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 86(5-8): 1165

[88] Barnes S, Morgan R, Skeen A. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*[J], 2003, 125(4): 378

[89] Kong X Z, Zhang H Z, Yang L J *et al*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 85(1): 365

Research Progress of Low Damage Machining Technology for SiC_p/Al Composites

Bao Yongjie[1], Zhu Xiaochun[2], Lu Shouxiang[2], Zhang Hongzhe[2]

(1. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

(2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: SiC_p/Al composites have excellent properties and are widely used in advanced aerospace equipment. However, due to the great difference in physical and mechanical properties between SiC particles and aluminum alloy, it is easy to be damaged in the process of processing, which seriously affects the accuracy and service performance of SiC_p/Al composite products and restricts engineering application. This research focused on the low damage processing technology of SiC_p/Al composites, analyzed the related research progress from three aspects: the formation mechanism of processing damage, the influencing factors of processing damage, low damage processing tools and low damage processing technology, summarized the current research status and shortcomings of low damage processing technology for SiC_p/Al composites, and put forward the development trend and direction.

Key words： SiC_p/Al composites; low damage processing; research status; machining

Corresponding author: Lu Shouxiang, Ph. D., Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China, E-mail: lushouxiang11@126.com