

精密与超精密加工

基于综合评价的 SiC_p/Al 磨削表面质量试验

赵旭^{1,2}, 巩亚东¹, 张伟健¹, 韩冰²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

2. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 针对高体积分数 SiC_p/Al 加工表面缺陷复杂多样, 提出其表面质量综合评价方法, 研究磨削参数对 SiC_p/Al 磨削表面质量的耦合影响规律, 优化加工工艺。**方法** 基于 SiC_p/Al 磨削加工表面缺陷, 提出粗糙度综合指标 SR 为主、表面形貌为辅的表面质量综合评价方法, 采用全因子试验方法分析低、高进给速度工况下主轴转速和磨削深度对表面质量的影响规律。借助 Abaqus 软件揭示 SiC_p/Al 磨削表面形成机理, 解释试验结果。**结果** 小切深 (a_p 为 5 μm 和 20 μm) 时, 粗糙度综合指标 SR 随着主轴转速 n_s 的增加而先递减再增大; 大切深 (a_p 为 40 μm 和 80 μm) 时, SR 随着 n_s 的递增而递减或近似递减。低主轴转速 (n_s 为 2000 r/min 和 4000 r/min) 时, SR 随着磨削深度 a_p 的增加 (a_p 由 5 μm 递增到 80 μm) 而先增大再减小而后又增加; 高主轴转速 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而先增加再低进给量时减小或高进给量时增加。获得最佳磨削表面质量的最优磨削参数是: 进给速度 $v_f=50$ mm/min, 磨削深度 $a_p=5$ μm , 主轴转速 $n_s=6000$ r/min。兼顾磨削效率和表面质量的最优磨削参数是: $v_f=50$ mm/min, $a_p=80$ μm , $n_s=8000$ r/min。**结论** 表面质量综合评价方法的可靠性较高, 主轴转速和磨削深度对表面质量的影响具有耦合性, 减小磨削深度、采用适当主轴转速有助于改善表面质量。

关键词: 高体积分数 SiC_p/Al; 磨削; 表面质量; 粗糙度综合指标; 全因子试验

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0329-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.037

Experiment of Grinding Surface Quality of SiC_p/Al Based on a Synthetical Assessment Method

ZHAO Xu^{1,2}, GONG Ya-dong¹, ZHANG Wei-jian¹, HAN Bing²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a synthetical surface quality assessment method and analyze the influence of process

收稿日期: 2020-10-14; 修订日期: 2020-12-12

Received: 2020-10-14; Revised: 2020-12-12

基金项目: 辽宁科技大学人才项目资助 (601011507-19); 国家自然科学基金 (51775100)

Fund: Supported by the University of Science and Technology Liaoning Talent Project Grants (601011507-19); National Natural Science Foundation of China (51775100)

作者简介: 赵旭 (1982—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为磨削与精密加工。

Biography: ZHAO Xu (1982—), Male, Ph. D. candidate, Assistant professor, Research focus: grinding and precision machining.

通讯作者: 巩亚东 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为磨削与精密加工、数字制造及微尺度加工等。邮箱: gongyd@mail.neu.edu.cn

Corresponding author: GONG Ya-dong (1958—), Male, Doctor, Professor, Doctor supervisor, Research focus: grinding and precision machining, digital manufacturing and micro-scale machining. E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn

引文格式: 赵旭, 巩亚东, 张伟健, 等. 基于综合评价的 SiC_p/Al 磨削表面质量试验[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 329-339.

ZHAO Xu, GONG Ya-dong, ZHANG Wei-jian, et al. Experiment of grinding surface quality of SiC_p/Al based on a synthetical assessment method[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 329-339.

parameters on the surface quality of high volume fraction SiC_p/Al, as well as optimize the grinding process in order to solve severe and complex surface defects of machined SiC_p/Al. Surface defects of machined SiC_p/Al were observed via SEM to present a synthetical assessment method based on primarily the overall surface roughness indicator SR which integrates multiple indicators and secondly surface topography. The full factor experiments were carried out to analyze influence of spindle speed and grinding depth on surface quality at low and high feed rate conditions separately. Abaqus simulation was conducted to reveal formation mechanism of grinded SiC_p/Al surface and then explain the experimental results. During the experiment, at smaller grinding depths (a_p were 5 μm and 20 μm), the overall surface roughness indicator SR progressively decreased first as the spindle speed n_s increased and then increased as n_s increased; at larger grinding depths (a_p were 40 μm and 80 μm), SR progressively or approximately decreased as n_s increased from 2000 r/min to 8000 r/min. Conversely, at lower spindle speeds (n_s were 2000 r/min and 4000 r/min), SR increased first and decreased second and then increased as a_p increased from 5 μm to 80 μm ; at higher spindle speeds (n_s were 6000 r/min and 8000 r/min), SR increased first as a_p increased and then decreased at low feed rate or increased at high feed rate as a_p increased. The optimized grinding parameters for the best grinding surface quality included feed rate of 50 mm/min, grinding depth of 5 μm and spindle speed of 6000 r/min; and the one for both grinding efficiency and surface quality included feed rate of 50 mm/min, grinding depth of 80 μm and spindle speed of 8000 r/min. Therefore, the synthetical assessment method of machined SiC_p/Al surface has high reliability, the influences of spindle speed and grinding depth on the surface quality present coupling nature. Decreasing grinding depth and adopt appropriate spindle speed can improve the surface quality.

KEY WORDS: high volume fraction SiC_p/Al; grinding; surface quality; overall surface roughness indicator; full factor experiment

颗粒增强金属基复合材料 SiC_p/Al 具有高强度-质量比、高耐磨耐腐蚀性、高热导率和低膨胀系数等优异的性能,应用于交通运输、航空航天、先进武器系统、光学精密仪器及电子行业等高技术领域。但是由于坚硬脆性增强颗粒 SiC 和软质塑性基体 Al 在力学属性方面存在显著差异,导致其加工性较差,属于典型的难加工材料,特别是应用于光学结构件、电子封装材料的高体积分数的 SiC_p/Al,阻碍了其广泛应用,因此对此类材料的加工性能开展深入研究具有重要意义^[1-5]。

由于高硬度脆性 SiC 颗粒导致车削、铣削过程中刀具磨削加剧和加工表面缺陷激增,磨削因其独特的优势已经成为可以创成 SiC_p/Al 高质量加工表面的有效加工方法。国内外学者对 SiC_p/Al 复合材料磨削进行了相关的研究,郑伟等^[6]通过仿真研究 SiC_p/Al 复合材料磨削表面缺陷形成机理, SiC 颗粒破碎和剥离基体是表面缺陷形成的主要原因。叶鹏等^[7]通过单颗粒磨削仿真分析了 SiC 颗粒去除方式和表面缺陷成因,并通过单因素和正交试验分析加工参数对表面粗糙度的影响规律。ILIO 等^[8]的研究结果表明,普通磨料砂轮比超硬磨料砂轮具有更好的磨削性能,砂轮切削性能降低的主要原因是砂轮工作表面堵塞,而不是由硬脆 SiC 颗粒引起的磨粒钝化。THIAGARAJAN 等^[9]对 SiC_p/Al 复合材料的外圆磨削性能进行了研究,得出磨削参数和 SiC 颗粒含量对磨削力、表面粗糙度的影响规律。KUMAR 等^[10]对不同类型砂轮开展磨削参数对磨削力和比磨削能影响规律的研究,结果表明随着切削深度和工件进给速度的增加,磨削力递增,

但比磨削能递减。GU^[11]、YIN^[12]和 LU^[13]基于单磨粒建立 SiC_p/Al 磨削或磨孔的磨削力预测模型。DU 等^[14]通过单颗粒划痕仿真揭示加工过程中增强颗粒和铝基体对 SiC_p/Al 复合材料表面成形机制的影响,研究结果表明较小的切削深度或较大切削速度可以产生相对较光滑的加工表面。LI 等^[15]和 YAO 等^[16]针对具有复杂结构和曲面的颗粒增强金属基复合材料结构件精密加工难题,提出一种新的加工方式—铣磨,即将磨具安装到加工中心或铣床上,该加工方法兼具铣削加工路径和磨削特性。相关学者已对颗粒增强金属基复合材料铣磨加工性能开展研究^[17-20]。ZHU 等^[21]和 ZHANG^[22]通过表面轮廓仪和 SEM 观测 SiC_p/Al 磨削表面形貌,根据试验数据建立表面粗糙度预测模型,对表面形貌特征进行了分析。ZHENG 等^[23]研究了 SiC_p/Al 复合材料超声振动辅助磨削的表面粗糙度,结果表明影响表面粗糙度的主要因素是主轴转速,其他依次是振动幅值、切削深度和进给速度。LIANG 等^[24]分析了电镀金刚石砂轮磨削 SiC_p/Al 复合材料的表面形貌,通过三维轮廓平方根偏差、破碎比和分型数来评估表面形貌,试验表面超声振动辅助磨削表面质量优于传统磨削。

目前,国内外学者对 SiC_p/Al 复合材料磨削加工的磨削力、表面形貌以及工艺参数对表面粗糙度的影响规律等方面进行了卓有成效的研究,研究成果普遍认识到 SiC 增强颗粒是影响 SiC_p/Al 复合材料磨削表面质量的重要因素,磨削参数中进给速度越大,则表面质量越差。这些研究的优点在于通过表面形貌分析 SiC_p/Al 复合材料磨削表面缺陷产生的原因,为后续

抑制表面缺陷磨削加工研究奠定基础。然而，目前 SiC_p/Al 复合材料磨削加工表面质量研究多以金属材料的常规表面粗糙度指标进行评价^[25]，其无法真实反映其特殊表面形貌、缺陷等，且磨削工艺参数耦合分析的研究报道较少。本文以 SiC_p/Al 磨削加工表面缺陷为基础，提出基于多指标的粗糙度综合指标为主、表面形貌为辅的表面质量综合评价方法。在此基础上，采用全因子试验方法分析低、高进给速度工况下主轴转速和磨削深度对表面质量的影响规律和交互效应。

1 SiC_p/Al 磨削加工的表面缺陷

理论上，当磨削深度足够小时，少缺陷的加工表面创成是可以实现的^[26]。根据本课题组的前期研究成果^[27]，当磨削深度超过临界值时，低强度 SiC-Al 界

面和 SiC-Al 变形不匹配诱发多种表面缺陷，通过蔡司 Ultra Plus 场发射扫描电镜（ZEISS，耶拿，图林根州，德国）进行表面缺陷观测。例如 SiC-Al 界面脱粘（图 1a 标记 I）、SiC 颗粒突出加工表面（图 1d 标记 VI）和 SiC 颗粒陷入加工表面（图 1d 标记 VII）。SiC 颗粒脆性断裂后，未被排出的碎片引起多种表面缺陷，一些 SiC 碎片由于砂轮磨粒向前推挤作用下在磨削表面留下微小划痕（图 1b 标记 II）；当 SiC 颗粒的一部分被去除，而一部分碎片残留在原位时，则形成了包含残留 SiC 碎片的凹坑（图 1c 标记 III）；当作用于 SiC 颗粒的应力极高时，形成包含粉碎化 SiC 碎片的凌乱表面（图 1c 标记 IV）。较大的磨削深度将导致 SiC-Al 界面脱粘和 Al 基体畸变加剧，导致磨削表面形成近似垂直于磨削方向的横向大裂纹（图 1d 标记 V），其中图 1d 中圆点标记的是 SiC 颗粒。

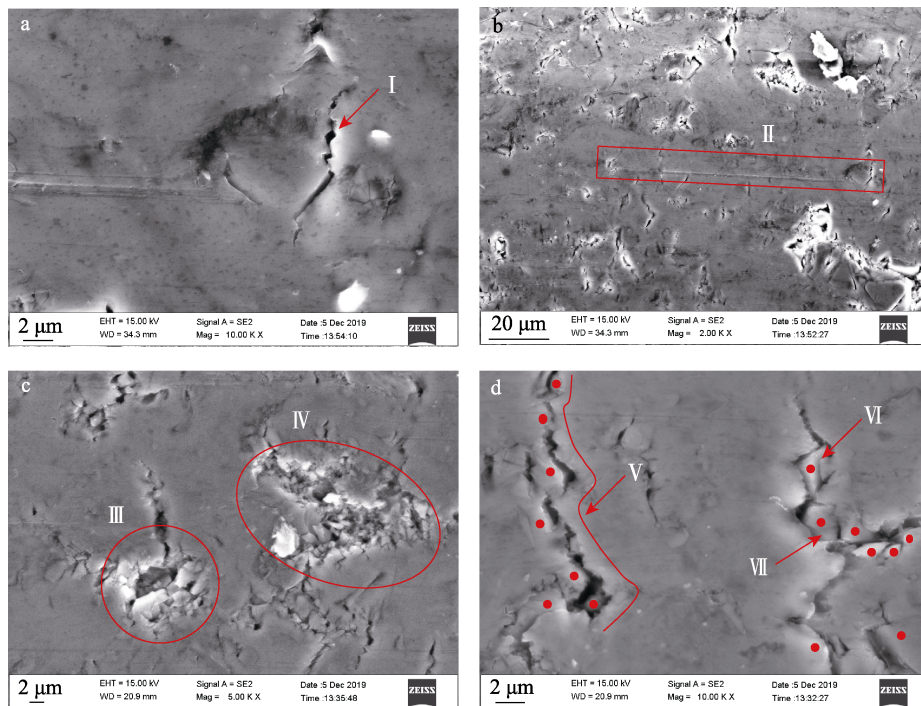


图 1 SiC_p/Al 磨削表面的典型缺陷
Fig.1 Typical defects of SiC_p/Al grinded surface

2 SiC_p/Al 表面质量综合评价方法

由 SiC_p/Al 复合材料磨削加工表面缺陷可知，其加工表面存在随机的、无序的和多尺度的各类缺陷，传统表面粗糙度评价加工表面质量是不完善的^[25]。本文提出基于多指标表面粗糙度（算术平均粗糙度 R_a 、破碎面积比 S_{dr} 、最大峰高 R_p 、最低谷深 R_v 、偏斜度 S_{sk} 、峭度 S_{ku} ）为主、表面形貌为辅的表面质量综合评价方法，建立更为合理的 SiC_p/Al 加工表面质量评价体系。多指标表面粗糙度是定量指标，表面形貌是定性指标。 R_a 是常规表面粗糙度指标， S_{dr} 表征表面破碎率， R_p 表征 SiC 颗粒突出加工表面的最大值，

R_v 表征裂纹、空洞等的最大深度， S_{sk} 表征加工表面轮廓凹凸幅， S_{ku} 表征表面轮廓变化的尖锐度（若 $S_{ku} > 3$ ，说明表面轮廓较尖锐；若 $S_{ku} < 3$ ，说明表面轮廓较平坦）。粗糙度的多指标通过数据 min-max 标准归一化和等权重加和方法转化为粗糙度综合指标 SR，即：

$$SR_i = \sum_{j=1}^6 X_{ij}^* = \sum_{j=1}^6 \frac{X_{ij} - X_{minj}}{X_{maxj} - X_{minj}} \quad (1)$$

式中：SR 为粗糙度综合指标； i 为试验编号； j 为粗糙度单一指标的编号； X^* 为粗糙度单一指标的归一化数据； X 为 R_a 、 S_{dr} 、 R_p 、 R_v 、 S_{sk} 和 S_{ku} 的原始数据； X_{min} 为粗糙度单一指标在 32 个样本中的最小值；

X_{\max} 为粗糙度单一指标在 32 个样本中的最大值。

3 SiC_p/Al 复合材料端面磨削试验

3.1 试验条件

磨削加工试验机床为清华大学深圳研究生院研发的 THU ULTRLSONIC 850 多功能精密加工机床, 冷却液为 Blaser 专用磨削液, 如图 2a 所示。试验磨具采用自制的电镀金刚石砂轮, 刀具外径为 12 mm,

壁厚为 2 mm, 金刚石磨粒的粒度为 D126(120/140), 磨粒的浓度为 100%, 利用磨具的端面对试件实施端面磨削, 如图 2b 所示, 磨具的运动轨迹与铣削加工相同, 该加工方法可以实现具有复杂结构和曲面的结构件精密加工。试验材料是 SiC_p/2024Al 复合材料, SiC 增强颗粒体分比为 62.5%, 颗粒平均尺寸为 40 μm, 如图 2c 所示, 图 3 是其金相图。加工表面粗糙度测量和表面形貌观察通过基恩士 VK-X 3D 激光扫描显微系统实现, 如图 2d 所示。

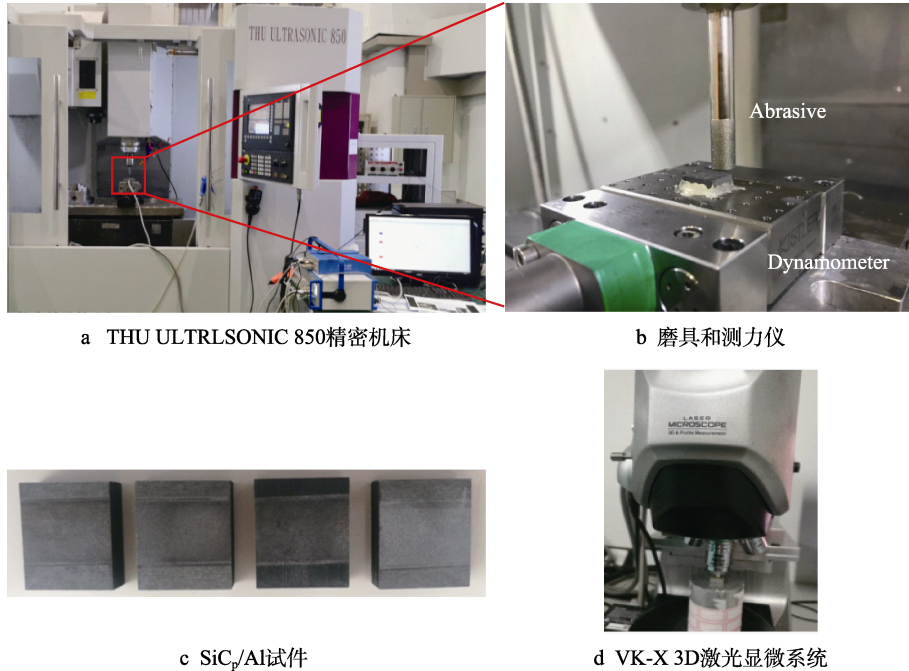


图 2 试验条件

Fig.2 Experimental conditions: (a) THU ULTRLSONIC 850 precision machine tool; (b) abrasive and dynamometer; (c) SiC_p/Al specimens; (d) VK-X 3D laser scan microscope system

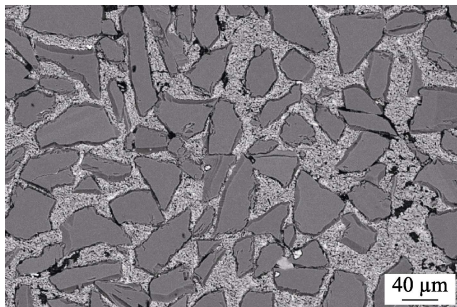


图 3 SiC_p/Al 复合材料的金相图

Fig.3 Metallography of the SiC_p/Al composite

3.2 试验方案

为了反映试验因素的交互耦合作用, 采用全因子试验方法, 试验因素是进给速度 v_f 、磨削深度 a_p 和主轴转速 n_s 。根据相关研究可知, 进给速度递增必然导致加工表面质量降低^[16]。为了减少试验次数, v_f 采用 2 水平 (低、高进给速度), a_p 和 n_s 采用 4 水平, 试验方案如表 1 所示。

表 1 SiC_p/Al 磨削全因子试验方案
Tab.1 Full factorial experiment scheme of SiC_p/Al grinding

No.	$v_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$n_s/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	No.	$v_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	$n_s/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1	50	5	2000	17	100	5	2000
2	50	5	4000	18	100	5	4000
3	50	5	6000	19	100	5	6000
4	50	5	8000	20	100	5	8000
5	50	20	2000	21	100	20	2000
6	50	20	4000	22	100	20	4000
7	50	20	6000	23	100	20	6000
8	50	20	8000	24	100	20	8000
9	50	40	2000	25	100	40	2000
10	50	40	4000	26	100	40	4000
11	50	40	6000	27	100	40	6000
12	50	40	8000	28	100	40	8000
13	50	80	2000	29	100	80	2000
14	50	80	4000	30	100	80	4000
15	50	80	6000	31	100	80	6000
16	50	80	8000	32	100	80	8000

4 结果与讨论

4.1 低进给速度时磨削参数对加工表面质量的影响

绘制低进给速度不同切深时各粗糙度单一指标随主轴转速的变化规律, 如图 4 所示。图 5 是加工表面形貌图, 图编号的含义是: 数值代表试验编号, 字

母 A 表示形貌激光图, 字母 B 表示形貌高度图, 字母 C 是中央区域的放大图, 黑色或蓝色表示高度值低, 红色表示高度值高。图 4 也是全因子试验方差分析的交互作用图, 各指标曲线都存在相交的情况, 说明低进给速度时, 磨削深度 a_p 和主轴转速 n_s 存在显著的交互作用, 因此采用全因子试验方法开展反映磨削参数交互作用的试验研究是必要的。

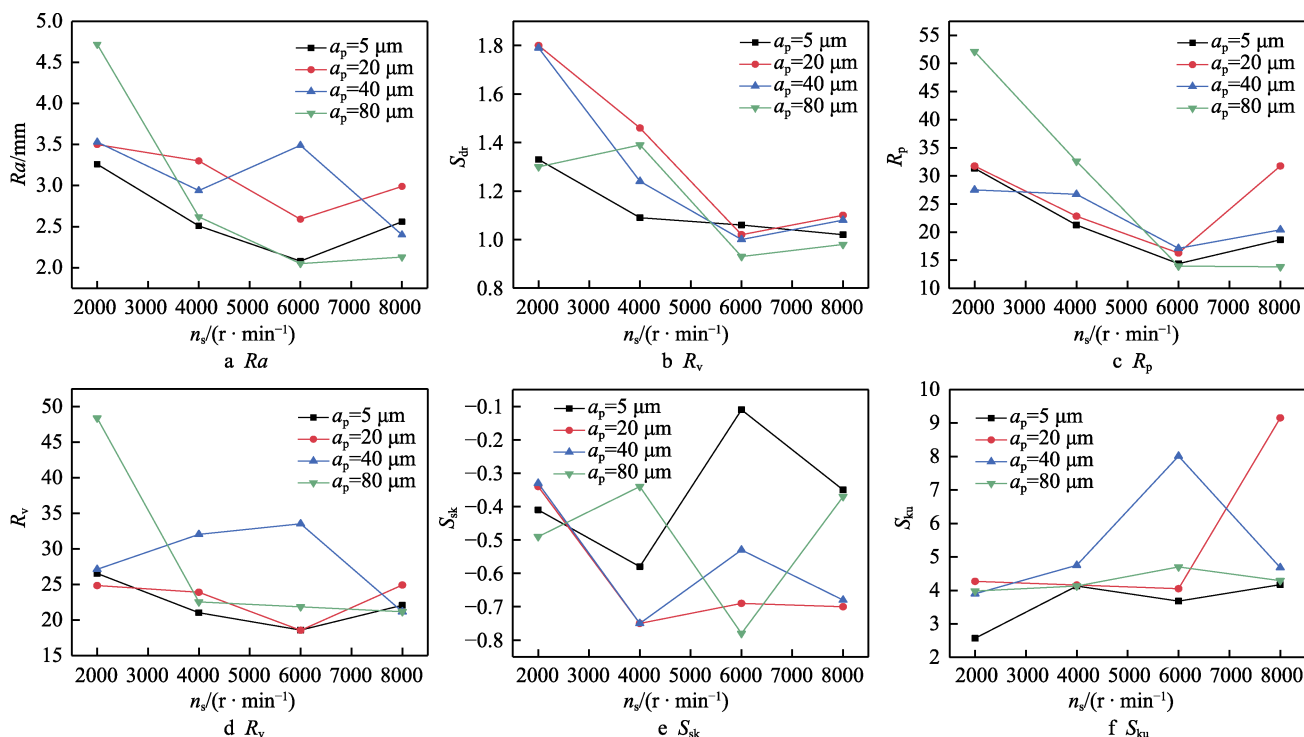


图 4 低进给速度不同切深时主轴转速对表面质量的影响

Fig.4 Influence of spindle speeds on surface qualities at low feed rate and different cut depths

4.1.1 主轴转速 n_s 对加工表面质量的影响

小切深 (a_p 为 $5 \mu m$ 和 $20 \mu m$) 时, 如图 4a—f 所示, 算术平均粗糙度 R_a 、破碎面积比 S_{dr} 、最大峰高 R_p 、最低谷深 R_v 、偏斜度 S_{sk} 、峭度 S_{ku} 均随着主轴转速 n_s 的增加而先递减再增加, 最小值都出现在 n_s 为 $6000 r/min$ 时, 说明 n_s 为 $6000 r/min$ 时可以获得相对较好的表面质量。可由图 5a、b 的表面形貌验证, 图 5a 中试验编号 3 和图 5b 中试验编号 7 对应的 n_s 都是 $6000 r/min$, 是小切深各组中形貌质量最好的。

如图 4a—f 所示, 大切深 (a_p 为 $40 \mu m$ 和 $80 \mu m$) 时, 各指标变化不具有明显的共性规律, 需要综合评价。 a_p 为 $40 \mu m$ 时, R_a 、 S_{dr} 、 R_v 和 S_{ku} 在 n_s 为 $8000 r/min$ 时获得最小值或近似最小值, 而 S_{dr} 、 R_p 和 S_{sk} 在 n_s 为 $6000 r/min$ 时获得最小值, 综合分析初步确定 n_s 为 $6000 r/min$ 时表面质量相对较好, 由图 5c 中试验编号 11 (n_s 为 $6000 r/min$) 相对较好的表面形貌得以确认。 a_p 为 $80 \mu m$ 时, 随着 n_s 的增加, R_a 、 S_{dr} 、 R_p 和 R_v 呈现递减或近似递减趋势, n_s 为 $6000 r/min$ 和 $8000 r/min$ 时, 上述 4 个指标的数值近似相等, 但 n_s

为 $8000 r/min$ 时 S_{sk} 和 S_{ku} 达到最大值, 说明出现大且较深的凹坑, 应尽量避免此类缺陷, 初步判定 n_s 为 $6000 r/min$ 时加工表面质量相对较好。该结论由图 5d 中试验编号 15 (n_s 为 $6000 r/min$) 相对较好的表面形貌得以确认。所以, 低进给速度大切深时, n_s 为 $6000 r/min$ 时可以获得相对较好的加工表面质量。

根据公式 (1) 计算粗糙度综合指标 SR, 分别绘制低进给速度时主轴转速 n_s 和磨削深度 a_p 对 SR 的影响趋势图, 如图 6 所示。需要说明的是, 图 6a 是图 4 中 R_a 、 R_v 、 R_p 、 R_v 、 S_{sk} 和 S_{ku} 数值通过归一化计算而得到的粗糙度综合指标 SR 变化曲线图, 图 6a 呈现的低进给速度不同切深时 n_s 对 SR 的影响规律与上述分析结果一致, 证明 SR 评价 SiC_p/Al 表面质量是可靠的, 所以之后的分析均采用 SR 作为 SiC_p/Al 加工表面质量的评价指标。

4.1.2 低进给速度时磨削深度 a_p 对加工表面质量的影响

低进给速度、不同主轴转速 n_s 时, a_p 对 SR 的影响规律如图 6b 所示。低主轴转速 (n_s 为 $2000 r/min$

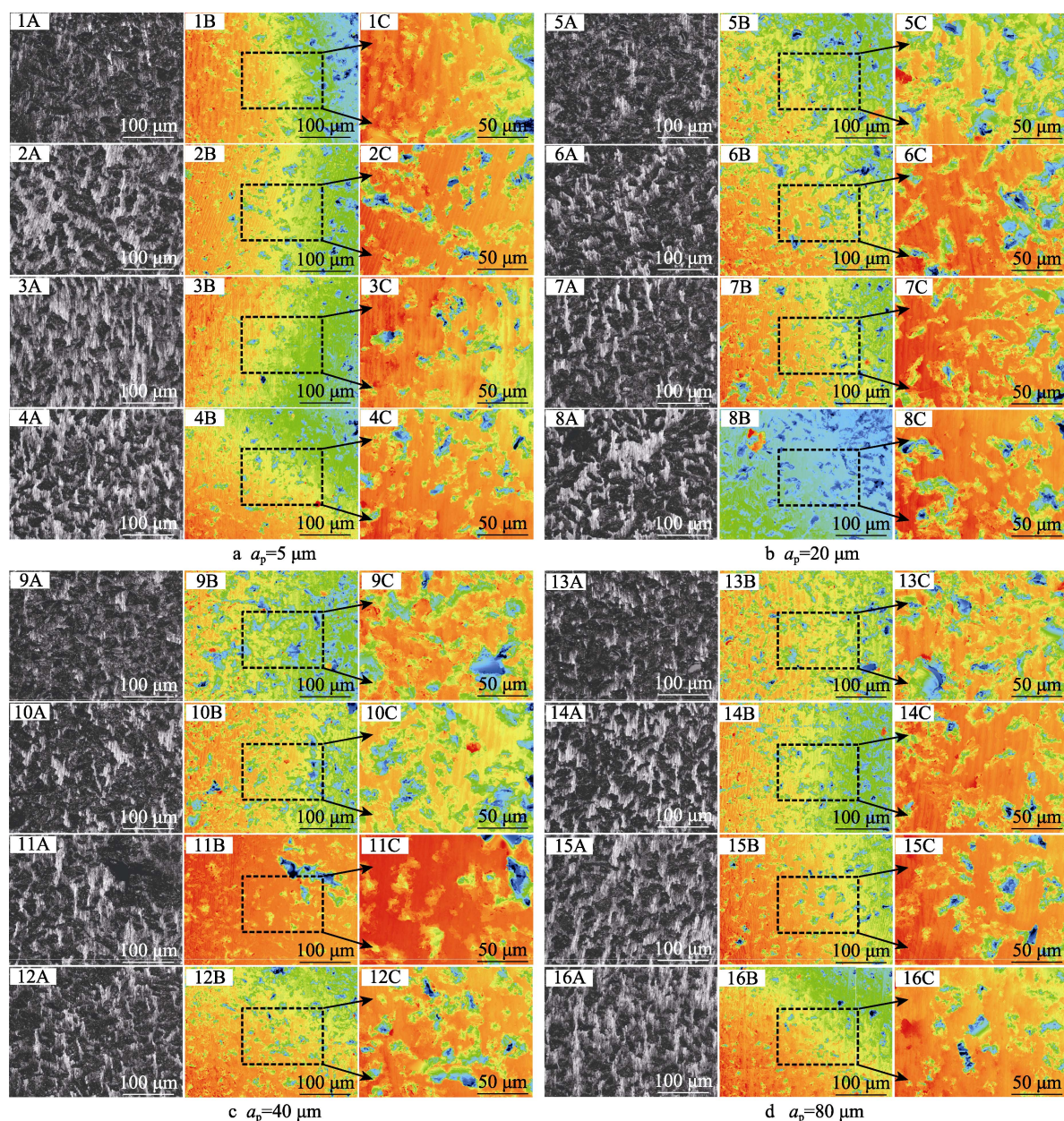


图5 低进给速度下不同切深时主轴转速对表面形貌的影响

Fig.5 Influence of spindle speeds on surface topography at low feed rate and different cut depths

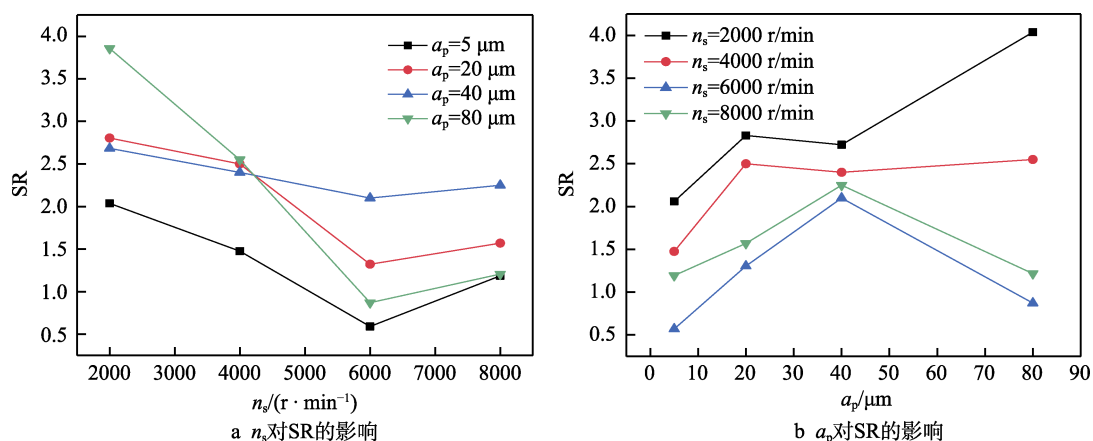


图6 低进给速度时磨削参数对粗糙度综合指标SR的影响

Fig.6 Influence of grinding parameters on the overall indicator SR of surface roughness at low feed rate: (a) influence of n_s on SR; (b) influence of a_p on SR

和 4000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而先增大再减小而后又增大, 相对最小的 SR 出现在 a_p 为 5 μm 时; 高主轴转速 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而先增大再减小, 最小值分别位于 a_p 为 5 μm 和 80 μm 处。总体而言, a_p 为 5 μm 时, 可以获得相对理想的 SR。

如图 6 所示, 低进给速度时, 对应于最小 SR 的磨削参数是 a_p 为 5 μm , n_s 为 6000 r/min, 试验编号是 3。而为了提高磨削效率通常需要较大切深, 可采用如下参数: a_p 为 80 μm , n_s 为 8000 r/min, 试验编号是 16, 其对应于大切深 (a_p 为 40 μm 和 80 μm) 磨削工艺中的最小 SR, 也是低进给速度时所有磨削

工艺中 SR 仅次于最小值。上述结果可由图 5 所示表面形貌得以证实。图 5 中 3A、3B 和 3C 的表面形貌呈现出最均匀的、面积最小的、深度最小的凹坑, 表面高度一致性最好, 总体表面质量是相对最好的, 试验编号是 3; 图 5 中 16A、16B 和 16C 的表面形貌呈现的表面质量次之, 试验编号是 16。

4.2 高进给速度时磨削参数对加工表面质量的影响

高进给速度时, 主轴转速 n_s 和磨削深度 a_p 对 SR 的影响趋势如图 7 所示, 加工表面形貌如图 8 所示, 其图编号含义等与图 5 一致。

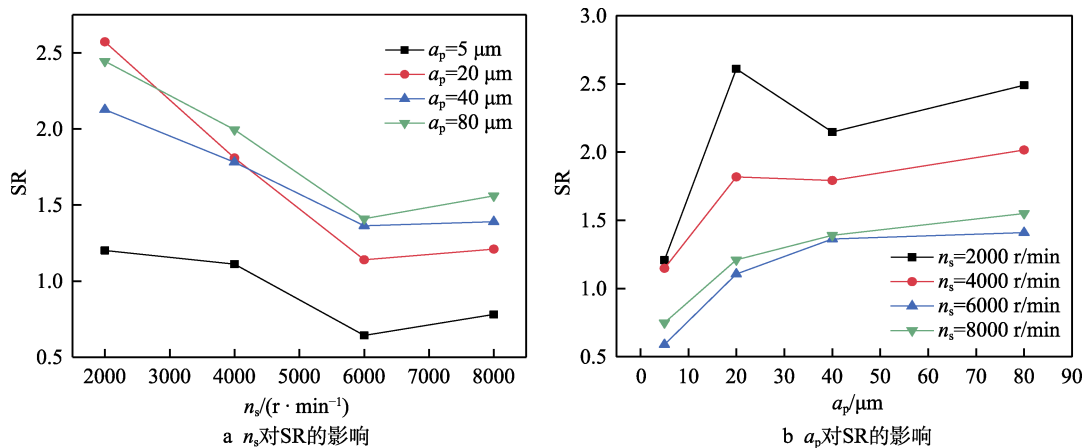


图 7 高进给速度磨削参数对粗糙度综合指标 SR 的影响

Fig.7 Influence of grinding parameters on the overall indicator SR of surface roughness at high feed rate: (a) influence of n_s on SR; (b) influence of a_p on SR

高进给速度时, n_s 对 SR 的影响如图 7a 所示, a_p 分别为 5、20、80 μm 时, SR 随着 n_s 的增加而先递减再增加, 相对最小的 SR 出现在 n_s 为 6000 r/min 时; 磨削深度 a_p 为 40 μm 时, SR 随着 n_s 的增加而递减, 相对最小的 SR 出现在 n_s 为 8000 r/min 时。

a_p 对 SR 的影响如图 7b 所示, 低主轴转速 (n_s 为 2000 r/min 和 4000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而先增大再减小而后又增大, 相对最小的 SR 出现在 a_p 为 5 μm 时; 高主轴转速 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而递增, 最小值都位于 a_p 为 5 μm 处。总体而言, 磨削深度 a_p 为 5 μm 时, 获得相对理想的 SR。

如图 7 所示, 高进给速度时, 对应于最小 SR 的磨削参数是 $a_p = 5$ μm , $n_s = 6000$ r/min, 试验编号是 19; 兼顾磨削效率和表面质量, 可采用如下参数: $a_p = 40$ μm , $n_s = 6000$ r/min, 试验编号是 27, 其对应于大切深 (a_p 为 40 μm 和 80 μm) 磨削工艺中的最小 SR。上述结果可由图 8 所示表面形貌验证。图 8 中 19A、19B 和 19C 的表面形貌总体质量相对最好, 试验编号是 19; 在大切深工艺中, 图 8 中 27A、27B 和 27C 的表面形貌中凹坑凸起的数量相对较少, 凹坑的大小

和深度的均匀度最好, 不存在陡峭的深凹坑。虽然 31A、31B 和 31C 呈现的表面形貌中凹坑凸起数目最少, 但是凹坑的深度和峭度最大, 这类缺陷应尽量避免。综合分析试验编号 27 的表面质量是大切深工艺中相对最好的。

4.3 磨削工艺参数优选

在本论文试验参数范围内, 为了获得最佳表面质量, 低进给速度时最优工艺参数 (试验编号 3) 的粗糙度综合指标 SR 是 0.591, 而高进给速度时最优工艺参数 (试验编号 19) 的 SR 是 0.642, 说明最佳表面质量对应的最优磨削工艺参数是: 进给速度 $v_f = 50$ mm/min, 磨削深度 $a_p = 5$ μm , 主轴转速 $n_s = 6000$ r/min。当兼顾磨削效率和加工表面质量时, 低进给速度时最优工艺参数 (试验编号 16) 的 SR 是 0.870, 高进给速度时最优工艺参数 (试验编号 16) 的 SR 是 1.057, 说明此时的最优磨削工艺参数是: $v_f = 50$ mm/min, $a_p = 80$ μm , $n_s = 8000$ r/min。需要说明的是, 兼顾磨削效率和加工表面质量的其界定是获得较高磨削效率和得到一定的磨削表面质量。

图 9a 所示试验编号 3 的加工表面没有明显的进

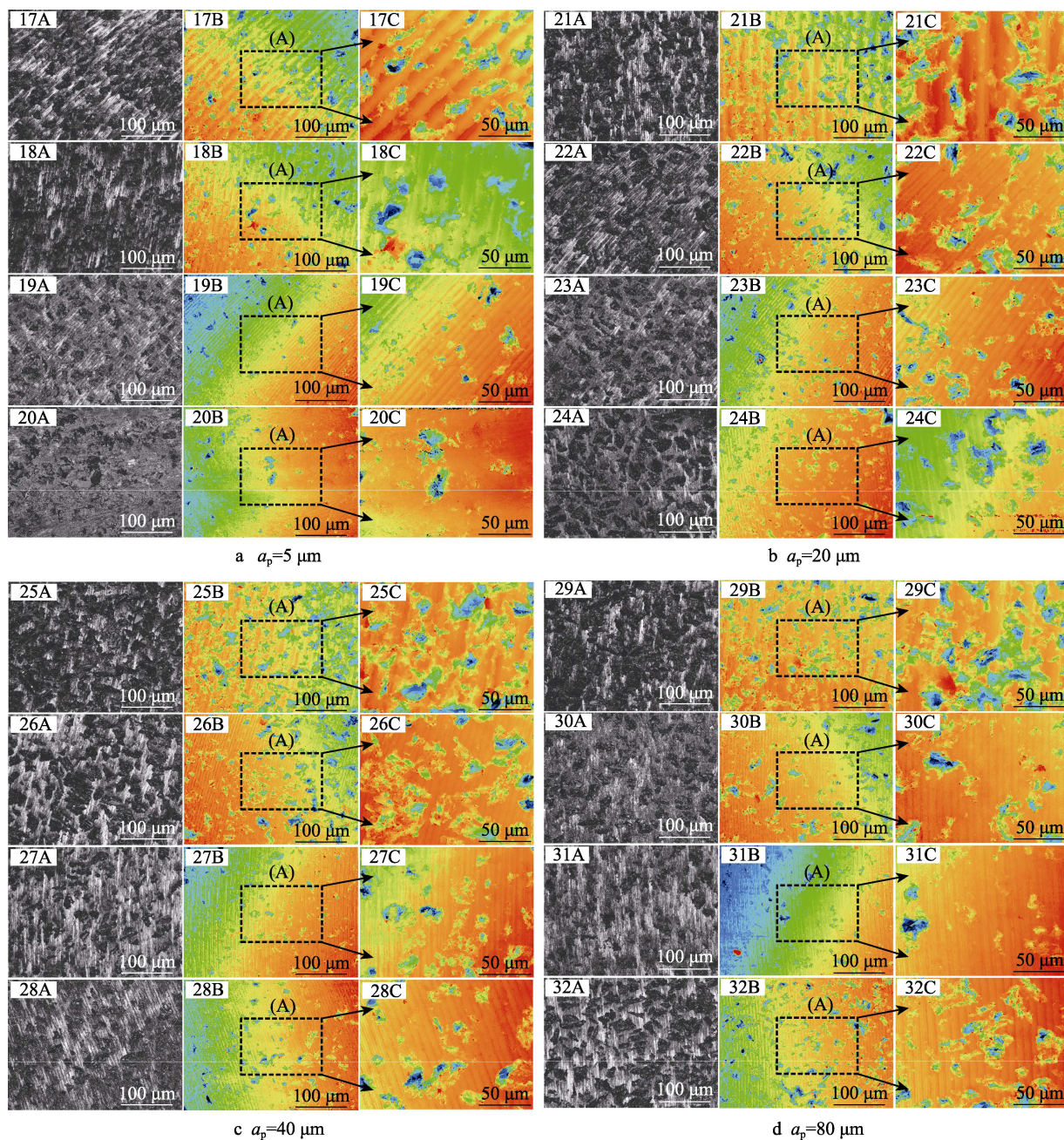


图 8 高进给速度下不同切深时主轴转速对表面形貌的影响

Fig.8 Influence of spindle speeds on surface topography at high feed rate and different cut depths

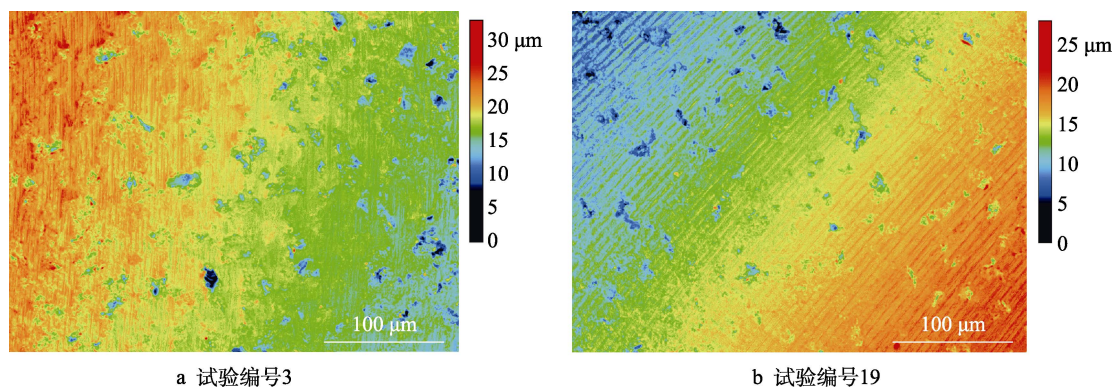


图 9 试验编号 3 和 19 的加工表面形貌

Fig.9 Surface topography of specimens (a) No.3 and (b) No.19

给纹理, 图 9b 所示编号 19 的加工表面呈现出明显的进给纹理, 这是编号 19 的 Ra 和 SR 数值相对更大的主要原因; 同时注意到, 编号 19 的磨削表面由颗粒去除引起的表面凹坑更多且更大, 而标号 3 和 19 的 a_p 和 n_s 分别相同, 说明进给速度越大, 单颗磨粒对应未变形磨屑厚度越大, SiC 颗粒的脆性去除特性更加显著, 磨削表面的缺陷越多, 质量越差。

分析上述两个参数组合是相应评价指标的最优磨削工艺组合的合理性如下所述:

1) 进给速度 v_f 对磨削表面质量的影响分析。很明显, 随着进给速度 v_f 的增加, 未变形磨屑厚度增加, 导致高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料的磨削表面质量降低。

2) 磨削深度 a_p 对磨削表面质量的影响分析。因为本文采用磨具(磨棒)的磨粒粒度为 D126 (120/140), 采用磨棒的端面进行磨削, 当磨削深度 a_p 较小 (a_p 为 5 μm 和 20 μm) 时, 参与有效磨削的磨粒是磨棒端面磨粒, 当磨削深度 a_p 进一步增加 (a_p 为 40 μm 和 80 μm) 时, 磨棒圆柱面上的磨粒逐渐介入磨削, 但 a_p 为 40 μm 时, 参与有效磨削的圆柱面的磨粒数目仍较少, 端面磨粒占主导地位。所以, 随着磨削深度 a_p 由 5 μm 增加到 40 μm , 端面磨粒对应的未变形切屑厚度递增, 磨削表面质量变化的总体趋势是变差。当磨削深度 a_p 由 40 μm 增加大 80 μm 时, 参与有效磨削的圆柱面的磨粒数目已经较多, 如果主轴转速较低 (n_s 为 2000 r/min 和 4000 r/min), 磨削深度 a_p 增加诱发的有利影响(参与有效磨削的圆柱面的磨粒数量增加)小于不利影响(端面磨粒对应的未变形切屑厚度递增), 此时磨削表面质量降低; 如果主轴转速较高 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min), 磨削深度 a_p 增加诱发的有利影响(参与有效磨削的圆柱面的磨粒数量增加)大于不利影响(端面磨粒对应的未变形切屑厚度递增), 此时磨削表面质量提高, 但其表面质量仍小于 a_p 为 5 μm 时的磨削表面质量。

3) 主轴转速 n_s 对磨削表面质量的影响分析。随着主轴转速 n_s 的增加(从 2000 r/min 增加到 6000 r/min), 单位时间内参与磨削的有效磨粒数目增多, 每个磨粒对应的未变形切屑厚度降低, 致使 SiC 增强颗粒的脆性裂纹断裂去除作用减弱和 Al 基体的塑性变形作用减弱, 复合材料中两个组成相的切削性能更加接近, 加工表面质量提高, 而当主轴转速 n_s 从 6000 r/min 增加到 8000 r/min 时, 因为磨具端面磨粒一直与工件接触, 过大的速度和冲击力导致 SiC_p/2024Al 复合材料中 SiC-Al 界面脱粘现象加剧, SiC 增强颗粒的脆性裂纹断裂去除作用增强, 同时 SiC 增强颗粒间的 Al 基体更容易发生严重扭进而失效形成表面缺陷, 继而导致加工表面质量下降, 所以在磨削深度 a_p 较小 (a_p 为 5 μm 和 20 μm) 时, 采用适当的主轴转速 n_s (n_s 为 6000 r/min) 可以获得最佳磨削表

面质量。

综上分析可知, 进给速度 v_f 越大, 磨削表面质量越差; 足够小的进给速度 v_f 和磨削深度 a_p 及适当的主轴转速 n_s (n_s 为 6000 r/min), 有利于获得高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料的最佳磨削表面质量。同时可知, 大磨削深度 a_p (a_p 为 80 μm) 和高主轴转速 n_s (n_s 为 8000 r/min) 有利于更多的磨具圆柱面上的磨粒参与有效磨削, 既可以提高磨削效率, 又可以实现较好地磨削质量。所以, 本文试验参数范围内的优化工艺参数组合: 获得最佳磨削表面质量的最优磨削参数是进给速度 $v_f=50$ mm/min, 磨削深度 $a_p=5$ μm , 主轴转速 $n_s=6000$ r/min; 兼顾磨削效率和表面质量的最优磨削参数是 $v_f=50$ mm/min, $a_p=80$ μm , $n_s=8000$ r/min。

5 SiC_p/Al 磨削表面形成机理

基于 Abaqus 软件的 SiC_p/Al 复合材料磨削表面形成示意图如图 10 所示。第 4 节的试验结果表明: 磨削深度 a_p 在 SiC_p/Al 复合材料的材料去除和表面形成过程中起到至关重要的作用, 随着磨削深度 a_p 的增加 (a_p 由 5 μm 增加到 40 μm), 参与有效磨削的磨粒是磨棒端面磨粒, 磨削表面质量变化的总体趋势是变差, 分析其原因如下。

当 a_p 足够小时, SiC 颗粒是以塑性去除为主, 且其在 Al 基体中的被动移动量很小, 此时 SiC_p/Al 磨削表面质量好, 缺陷少, 如图 10a 所示; 如图 10b 标记 I 所示, 当 a_p 较大时, SiC 颗粒被磨粒推挤的移动量增大, 导致其与 Al 基体内其他 SiC 颗粒发生碰撞, 这种现象对于高体积分数的 SiC_p/Al 复合材料而言更容易发生, 在砂轮磨粒和 SiC 颗粒碰撞的共同作用下, SiC 颗粒以脆性去除为主。与此同时, SiC 颗粒与 Al 基体在硬度和弹性模量等力学性能方面的显著差异, 导致 Al 基体的塑性变形无法匹配 SiC 颗粒的移动和偏转量, 继而导致 SiC 颗粒-Al 基体界面脱粘, 如图 10b 标记 II 所示。而且 SiC 颗粒脆性去除后遗留在原位置的碎片, 由于其复杂的多棱边结构很容易被砂轮磨粒拨动而高出已加工表面, 如图 10b 标记 III 所示。如图 10c 所示, 随着 a_p 进一步增加, SiC-SiC 颗粒碰撞(图 10c 标记 IV)、SiC 颗粒-Al 基体界面脱粘(图 10c 标记 V)和 SiC 颗粒脆性断裂(图 10c 标记 VI)发生的概率和程度进一步加剧, 磨削加工表面缺陷急剧增多, 如更多的残留 SiC 碎片和粉碎化 SiC 碎片的凌乱表面(图 10c 标记 VII)等, 同时 SiC 颗粒-Al 基体界面脱粘进一步扩展并相互交织, 进而在磨削表面形成近似垂直于磨削方向的横向大裂纹(图 10d 标记 VIII)。图 10d 所示的 SiC_p/Al 磨削表面创成仿真呈现的表面缺陷与图 1 所示的 SiC_p/Al 磨削表面的典型缺陷是一致的。

当磨削深度 a_p 由 40 μm 增加到 80 μm 时, 已经

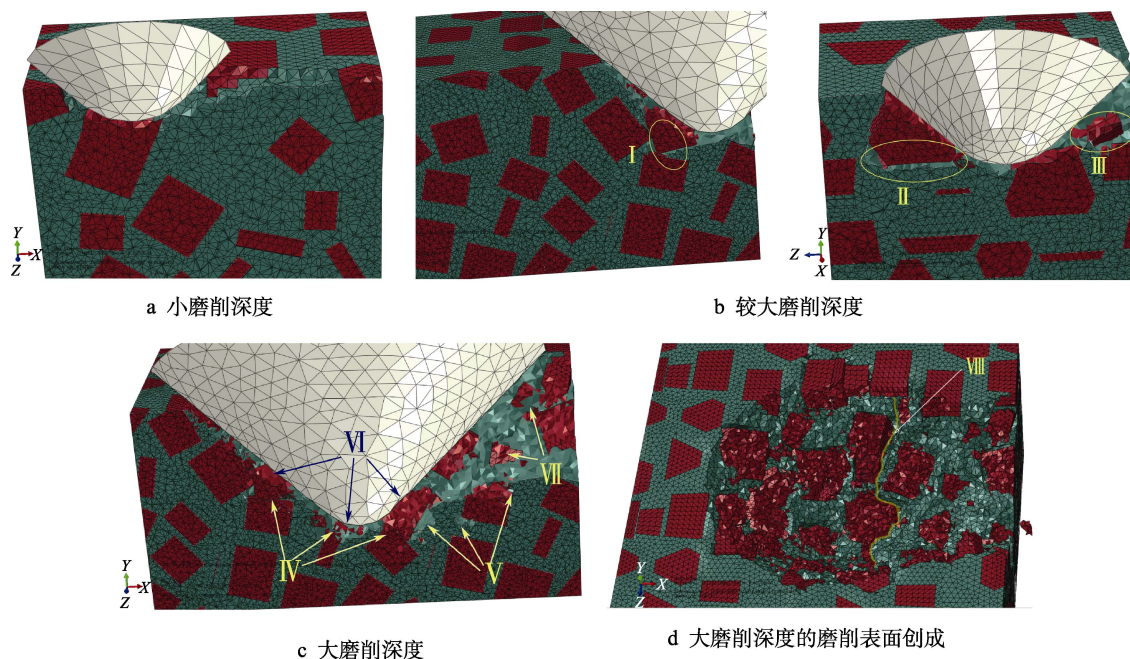
图10 SiC_p/Al磨削表面形成仿真

Fig.10 Forming process simulation of grinded SiC_p/Al surface: (a) enough small grind depth; (b) large grind depth; (c) larger grind depth; (d) final grinded surface at a larger grind depth

有足够多的磨棒圆柱面的磨粒参与有效磨削, 这些磨粒与工件间歇接触, 如果主轴转速 n_s 较高 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min), 则圆柱面的磨粒对应的未变形磨屑厚度很小, 而磨削深度 a_p 对未变形磨屑厚度没有影响, 此时磨削深度 a_p 增加将提高参与有效磨削的圆柱面的磨粒数量, 材料去除量主要由圆柱面的磨粒实现。而对于磨棒端面的磨粒而言, 材料去除量将减少, 相当于其对应的磨削深度减小, 其主要作用是对圆柱面磨粒完成的已加工表面进行精加工, 因此呈现出第 4 节的试验结果, 即在较高主轴转速 n_s 条件下, 如果磨削深度 a_p 由 40 μm 增加到 80 μm , 磨削表面的上述缺陷将有所减少, 表面质量提高, 但其表面质量仍小于 a_p 为 5 μm 时的磨削表面质量。

磨削速度 (主轴转速) n_s 是影响 SiC_p/Al 磨削表面的另一个重要因素。随着 n_s 的增加, 单位时间内参与磨削的磨粒数目增多, 未变形切屑厚度变小, 材料的加工应变率增加, 导致 Al 基体的塑性变形和 SiC 颗粒脆性断裂趋势减弱, 所以表面质量提升。但 n_s 达到某一临界值后, n_s 进一步递增将导致 SiC-SiC 颗粒碰撞、SiC 颗粒-Al 基体界面脱粘等现象加剧, 继而引起磨削表面质量变差。这与本文试验中磨削表面粗糙度综合指标 SR 随 n_s 的变化趋势基本一致, SR 变化趋势转折点即出现在 $n_s=6000$ r/min。

另外, 磨削深度 a_p 和磨削速度 n_s 对 SiC_p/Al 磨削表面形成的影响存在耦合作用。 n_s 较低时, 更大的 a_p 引起 SiC-SiC 颗粒碰撞、SiC 颗粒-Al 基体界面脱粘等现象加剧, 导致磨削表面质量降低; 而高 n_s 时, 虽然更大的 a_p 有引起上述现象的趋势, 但高 n_s 实现的更高的材料加工应变率抵消了更大 a_p 带来的不利因素,

在上述现象发生前工件材料就被磨粒去除, 表面质量可能提高。如图 5b 所示, 这与本文试验中磨削表面粗糙度综合指标 SR 随 a_p ($a_p=40$ μm 和 80 μm) 的变化趋势基本一致。

6 结论

1) 根据 SiC_p/Al 复合材料加工表面缺陷及形成机制, 提出基于表面粗糙度多指标的粗糙度综合指标 SR 为主、表面形貌为辅的表面质量综合评价方法, 试验分析证明该方法是可靠的。

2) 粗糙度综合指标 SR 随着主轴转速 n_s 的增加而先递减再增大。低主轴转速 (n_s 为 2000 r/min 和 4000 r/min) 时, SR 随着磨削深度 a_p 的增加而先增大再减小而后又增大; 高主轴转速 (n_s 为 6000 r/min 和 8000 r/min) 时, SR 随着 a_p 的增加而先增加再低进给量 (a_p 由 5 μm 增加到 40 μm) 时减小或高进给量 (a_p 由 40 μm 增加到 80 μm) 时增加。总体而言, 磨削深度 a_p 为 5 μm 时, 获得相对理想的 SR。

3) 在本文试验参数范围内, 最佳表面质量的磨削参数是进给速度 $v_f=50$ mm/min, 磨削深度 $a_p=5$ μm , 主轴转速 $n_s=6000$ r/min; 兼顾磨削效率和表面质量的最优磨削参数是进给速度 $v_f=50$ mm/min, 磨削深度 $a_p=80$ μm , 主轴转速 $n_s=8000$ r/min。

4) SiC_p/Al 磨削表面形成机理揭示磨削深度 a_p 对磨削表面形貌和质量影响的机理, 以及表面质量随着磨削速度 n_s 变化趋势存在转折临界点的原因。磨削深度和磨削速度对 SiC_p/Al 磨削表面形成的影响具有耦合作用。

参考文献:

- [1] DANDEKAR C R, YUNG C S. Modeling of machining of composite materials: A review[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2012, 57: 102-121.
- [2] REDDY A P, KRISHNA P V, RAO R N. Al/SiC NP and Al/SiC NP/X nanocomposites fabrication and properties: A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part N: Journal of nanomaterials, nanoengineering and nanosystems, 2017, 231(4): 155-172.
- [3] BUSHLYA V, LENRICK F, GUTNICHENKO O, et al. Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride based tools in machining Al-SiC_p metal matrix composite[J]. Wears, 2017, 376/377: 152-164.
- [4] BAINS P S, SIDHU S S, PAYAL H. Fabrication and machining of metal matrix composites: A review[J]. Materials and manufacturing processes, 2016, 31(5): 553-573.
- [5] CHAMBERS A R. The machinability of light alloy MMCs [J]. Composites part A: Applied science and manufacturing, 1996, 27(2): 143-147.
- [6] 郑伟, 刘岭, 张群, 等. SiC_p/Al 复合材料超声磨削表面缺陷形成机理仿真研究[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(6): 793-800.
ZHENG Wei, LIU Ling, ZHANG Qun, et al. Simulation of formation mechanism of machined surface defects in ultrasonic grinding of SiC_p/Al composites[J]. Journal of solid rocket technology, 2019, 42(6): 793-800.
- [7] 叶鹏. 超声振动磨削 SiC_p/Al 复合材料去除机制与加工表面形貌研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
YE Peng. Research on material removal mechanism and surface topography in ultrasonic vibration grinding of SiC_p/Al composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] ILIO A D, PAOLETTI A. A comparison between conventional abrasives and superabrasives in grinding of SiC-aluminium composites[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2000, 40(2): 173-184.
- [9] THIAGARAJAN C, SIVARAMAKRISHNAN R, SOMASUNDARAM S. Experimental evaluation of grinding forces and surface finish in cylindrical grinding of Al/SiC metal matrix composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part B: Journal of engineering manufacture, 2011, 225(9): 1606-1614.
- [10] KUMAR K R, VETTIVEL S. Effect of parameters on grinding forces and energy while grinding Al(A356)/SiC composites[J]. Tribology: Materials, surfaces & interfaces, 2014, 8(4): 235-240.
- [11] GU P, ZHU C, TAO Z, et al. A grinding force prediction model for SiC_p/Al composite based on single-abrasive-grain grinding[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 109: 1563-1582.
- [12] YIN G, GONG Y, LI Y, et al. Modeling and evaluation in grinding of SiC_p/Al composites with single diamond grain [J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 163: 105137.
- [13] LU S, GAO H, BAO Y, et al. A model for force prediction in grinding holes of SiC_p/Al composites[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 160: 1-14.
- [14] DU J, ZHANG H, HE W, et al. Simulation and experimental study on surface formation mechanism in machining of SiC_p/Al composites[J]. Applied composite materials, 2019, 26(1): 29-40.
- [15] LI J, DU J, YAO Y, et al. Experimental study of machinability in mill-grinding of SiC_p/Al composites[J]. Journal of Wuhan University of Technology (material science edition), 2014, 29(6): 1104-1110.
- [16] YAO Y, DU J, LI J, et al. Surface quality analysis in mill-grinding of SiC_p/Al[J]. Advanced materials research, 2011, 299-300: 1060-1063.
- [17] LI J, DU J, YAO Y. A comparison of dry and wet machining of SiC particle-reinforced aluminum metal matrix composites[J]. Advance material research, 2012, 500: 168-173.
- [18] DU J, ZHOU L, LI J, et al. Analysis of chip formation mechanism in mill-grinding of SiC_p/Al composites[J]. Materials and manufacturing processes, 2014, 29(11/12): 1353-1360.
- [19] DU J, LI J, YAO Y, et al. Prediction of cutting forces in mill-grinding SiC_p/Al composites[J]. Materials and manufacturing processes, 2014, 29(3): 314-320.
- [20] LI J, DU J, ZHAO H. Experimental study on the surface roughness with mill-grinding SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Advance material research, 2011, 188: 203-207.
- [21] ZHU C, GU P, WU Y, et al. Surface roughness prediction model of SiC_p/Al Composite in grinding[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 155: 98-109.
- [22] ZHANG Z, YAO P, WANG J, et al. Analytical modeling of surface roughness in precision grinding of particle reinforced metal matrix composites considering nanomechanical response of material[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 157-158: 243-253.
- [23] ZHENG W, ZHOU M, ZHOU L. Influence of process parameters on surface topography in ultrasonic vibration-assisted end grinding of SiC_p/Al composites[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, 91: 2347-2358.
- [24] LIANG G, ZHOU X, ZHAO F. The grinding surface characteristics and evaluation of particle-reinforced aluminum silicon carbide[J]. Science and engineering of composite materials, 2016, 23(6): 671-676.
- [25] 王阳俊. SiC_p/Al 复合材料高速铣削表面质量及刀具磨损研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 58-79.
WANG Yang-jun. Research on surface quality and tool wear of SiC_p/Al composites in high speed milling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 58-79.
- [26] HUANG S, ZHOU L, YU X, et al. Study of the mechanism of ductile-regime grinding of SiC_p/Al composite[J]. International journal of materials research, 2013, 103(10): 1210-1217.
- [27] ZHAO Xu, GONG Ya-dong, CAI Ming, et al. Comparative multiscale investigations of material removal behaviors of SiC_p/5083Al, SiC ceramic and 5083Al alloy by single scratch tests[J]. Materials research express, 2020, 7(10): 106514.