

表面质量控制及检测

基于支持向量机的铝基碳化硅磨削表面质量预测

朱传敏, 顾鹏, 刘丁豪, 吴尹悦

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: **目的** 针对传统粗糙度指标评价具有凹坑缺陷的铝基碳化硅磨削表面质量的局限性, 提出基于三维形貌的改进表面粗糙度评价指标及其预测模型。**方法** 基于磨削表面三维形貌构建等高线图, 获取等高线轮廓间面积占比与轮廓高度的关系曲线, 提出表面三维形貌体积相对于采样区域面积的算术平均偏差和凹坑最大偏离高度评价指标, 用于表征包含凹坑缺陷的磨削表面质量。基于支持向量机建立和优化三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度的预测模型, 并分析磨削工艺参数对评价指标的影响规律。**结果** 三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度评价指标包含凹坑缺陷等更多表面特征, 评价指标预测值与实验值误差在 5%以内, 且随着砂轮转速的增大而减小, 随着进给速度与磨削深度的增大而增大。**结论** 采用三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度评价包含凹坑缺陷的磨削表面质量是合理的, 评价指标测量和确定方法是可行和有效的。基于支持向量机的评价指标预测方法具有正确性, 为铝基碳化硅磨削表面质量评价和使用性能研究打下了基础。

关键词: 铝基碳化硅; 磨削加工; 表面三维形貌; 凹坑缺陷; 算术平均偏差; 支持向量机

中图分类号: V261.2+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0240-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.033

Surface Quality Prediction of SiC_p/Al Composite in Grinding Based on Support Vector Machine

ZHU Chuan-min, GU Peng, LIU Ding-hao, WU Yin-yue

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

ABSTRACT: The work aims to propose the modified surface roughness evaluation indexes based on topography and the prediction model since the traditional surface roughness indexes have limitations on the evaluation of cavity defect in the grinding process of SiC_p/Al composite. The contour map was constructed based on surface topography to obtain the relationship curve between the projection area of adjacent contour and contour height. The average deviation of whole topography to the sampling area and the maximum deviation height index of cavity defect were proposed to characterize grinding surface quality including cavity defect. Based on Support Vector Machine (SVM), the two prediction models of average deviation of topography and the maximum deviation height of cavity were proposed and optimized and the influence of laws of grinding parameters on evaluation index was analyzed. The evaluation indexes of the average deviation of whole topography and the maximum deviation height of cavity defect included more surface features. The errors between the predicted and experimental results were both

收稿日期: 2018-10-15; 修订日期: 2018-12-23

Received: 2018-10-15; Revised: 2018-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51875413)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875413)

作者简介: 朱传敏 (1969—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密加工与智能装备技术。邮箱: 01065@tongji.edu.cn

Biography: ZHU Chuan-min (1969—), Male, Doctor, Associated professor, Doctoral supervisor, Research focus: precision engineering and intelligent equipment technology. E-mail: 01065@tongji.edu.cn

within 5% and decreased with the increase of wheel speed, and increased with the increase of feed speed and grinding depth. It is reasonable to use the arithmetic average deviation of topography and the maximum deviation height of cavity to evaluate the grinding surface quality including pit defects, and the measurement and determination method of evaluation index is feasible and effective. The prediction method of evaluation index based on support vector machine is correct, which lays a foundation for the evaluation of grinding surface quality of aluminum-based silicon carbide and the study of application performance.

KEY WORDS: aluminum-based silicon carbide; grinding process; surface topography; cavity defect; average deviation; support vector machine

铝基碳化硅具有高弹性模量、低热膨胀系数等特点,已成为替代微晶玻璃、石英玻璃等重要材料,广泛应用于航空航天领域。磨削加工过程中,表面易产生凹坑缺陷,传统的算术平均偏差粗糙度评价指标是指在一个取样长度内测量曲线上点的纵坐标绝对值的算术平均值^[1]。采用算术平均偏差评价均质材料的加工表面是合理有效的,但对于具有凹坑缺陷的铝基碳化硅磨削表面,无法较好地表达缺陷特征。因此利用算术平均偏差评价铝基碳化硅磨削表面质量具有一定的局限性,本文研究基于采样区域三维形貌的算术平均偏差粗糙度和凹坑最大偏离高度评价指标及预测模型,对于合理评价铝基碳化硅磨削表面质量和磨削工艺参数优化应用具有重要的意义。

国内外学者对磨削加工表面质量及预测进行了相关研究。Mao C 等人^[2]发现磨削深度对磨削力的影响最大, CBN 颗粒的拔出与脆性断裂是导致三维表面粗糙度增大的主要原因。Zhang L 等人^[3]研究了 C/SiC 复合材料纤维方向对磨削表面质量的影响,发现脆性断裂是主要去除方式,基体断裂、纤维损伤以及基体与纤维脱粘是表面损伤的主要形式。Liu C 等人^[4]利用仿真和实验方法研究了纤维增强型钛合金磨削加工去除机理,研究了进给速度、切削深度等因素对碳化钛破碎的影响。Liu Q 等人^[5]研究了不同纤维方向 C_f/C-SiC 复合材料的磨削性能及材料去除机理,发现磨削去除方式依次为界面脱粘、纤维断裂和基体断裂。刘杰等人^[6]对 2S-C/SiC 复合材料磨削表面形貌和亚表面损伤进行了观察,提出高速深磨的去除机制以脆性断裂为主。Choudhary A 等人^[7]讨论了润滑性的改善对脆性材料磨削表面亚表面损伤的影响机理。Liu W 等人^[8]研究了 Si₃N₄ 磨削工艺参数对表面质量的影响,发现磨粒号和砂轮转速越高,表面粗糙度与损伤层越小,进给速度和磨削深度越大,表面粗糙度与损伤层越大。Zheng W 等人^[9]研究了超声辅助磨削工艺参数对铝基碳化硅磨削表面三维形貌的影响,研究表明影响因素最大的是主轴转速,其次是振动幅值、磨削深度和进给速度。郑雷等人^[10]发现纤维复合材料的磨削加工表面由纤维断口表面和树脂涂附表面组成,并存在三种特征鲜明的纤维断裂区。修世超等人^[11]分析了磨削加工塑性隆起对轮廓最大谷底高度的影响,提出了磨削表面粗糙度的塑性影响

系数及理论修正公式,提高了磨削表面粗糙度的计算精度。Lipiński D 等人^[12]采用神经网络算法预测合金钢的磨削加工表面粗糙度,实验与预测结果较为一致,但需要大量的学习样本。Liu Y 等人^[13]考虑磨粒形状与砂轮修锐等因素,结合磨粒运动方程,建立了磨削加工表面粗糙度预测模型,实验与预测偏差为 7%~11%。Zhang J 等人^[14]研究了超声振动磨削石英玻璃表面粗糙度,结合概率思想及磨粒运动轨迹方程,提出了石英玻璃超声振动磨削表面粗糙度预测模型,预测效果良好。

国内外文献表明,有关颗粒增强型复合材料磨削加工表面质量的研究较少,尤其面向高体积分数的铝基碳化硅磨削表面缺陷的表征方法尚未见到报道。因此,开展高体积分数的铝基碳化硅表面质量表征和评价研究具有重要意义。本文以颗粒增强型复合材料铝基碳化硅为研究对象,基于磨削表面三维形貌获得其等高线图,构建了等高线轮廓间面积占比与轮廓高度的关系曲线,提出了以采样区域三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度表征铝基碳化硅磨削表面质量新方法。基于支持向量机建立了三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度的预测模型,采用遗传算法对预测模型参数进行优化,预测不同工艺参数的三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度,并研究磨削工艺参数对三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度的影响规律。

1 实验设计与实施

磨削实验材料为碳化硅颗粒含量(体积分数)为 70%的铝基碳化硅(SiC_p/Al),铝合金基体材料为 AA356.2,制造工艺为压力铸造,样件尺寸为 30 mm×30 mm×20 mm,其相关性能参数如表 1 所示。电镀金刚石砂轮的直径为 300 mm,厚度为 30 mm,砂轮粒度为 120 目。

磨削实验在斯来福临数控平面磨床(SCHLEIFRING K-P36COMPACT,德国)上进行,样件磨削完成后利用电子扫描放大镜 SEM(Hitachi, S-3400N,日本)观察铝基碳化硅磨削表面微观形貌,利用表面轮廓仪(Bruker, ContourGT-X3,德国)进行磨削表面三维形貌测量。

表 1 铝基碳化硅材料性能参数
Tab.1 Properties of SiC_p/Al composite

SiC particle content/%	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal expansion coefficient/(mm ² ·s ⁻¹)	Density/(g·cm ⁻³)	Heat capacity/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	Elastic modulus/GPa
70	226.4	90.105	2.97	0.846	190

2 铝基碳化硅磨削表面微观形貌

图 1a 为铝基碳化硅磨削表面 SEM 微观形貌, 可以发现, 该工况下磨削表面材料呈现塑性与脆性状态。图 1b 为铝基碳化硅磨削表面放大 2000 倍的微观形貌, 可以发现, 表面铝合金发生塑性变形与撕裂,

而碳化硅颗粒具有破碎和断裂等特征。通过观察和分析不同磨削工艺参数加工的样件表面形貌, 发现当砂轮转速较小、进给速度与磨削深度较大时, 碳化硅颗粒容易脱离铝合金表面, 进而铝合金表面产生凹坑缺陷。传统的表征表面粗糙度方法很难准确地表征包含凹坑缺陷的磨削表面质量, 因此, 需要研究一种表征包含凹坑缺陷的磨削表面质量的新方法。

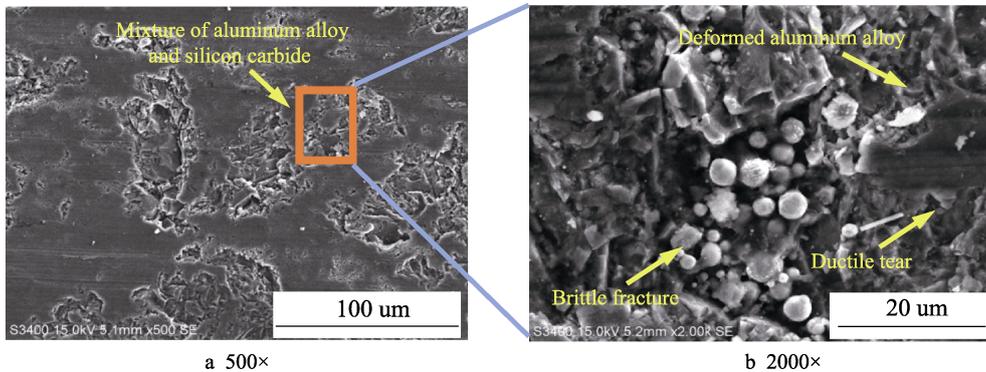


图 1 铝基碳化硅磨削表面微观形貌
Fig.1 Micro-topography of SiC_p/Al composites grinding surface

3 铝基碳化硅表面形貌表征方法

3.1 表面三维形貌及其等高线图

图 2 为某表面的三维形貌, 图 3 为其等高线图。在三维形貌图中, 最高点为 P_T , 最低点为 P_B 。设表面三维形貌高度为 h , 用等间距截面在高度方向将表面三维形貌分为 n 部分, 则共有 $n+1$ 个截面, 相邻两截面之间的距离 $h_\Delta = h/n$, $n+1$ 个截面上的轮廓构成了

曲面的等高线图。设表面三维形貌中最低点 P_B 的高度为 0, P_B 点对应的截面定义为第 0 层截面, 第 0 层截面高度 $h_0=0$, 第 1 层截面高度 $h_1=h/n$, 则第 i 层截面高度为 $h_i=i \times h_\Delta$, 定义截面轮廓高度集合 $H=\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, 每一个截面对应一个截面轮廓, 此为构成等高线图的等高线轮廓, 定义等高线轮廓集合 $Q=\{q(h_1), q(h_2), \dots, q(h_n)\}$ 。

3.2 封闭等高线轮廓区域的面积

从图 3 可以看出, 等高线轮廓分为凸等高线轮廓

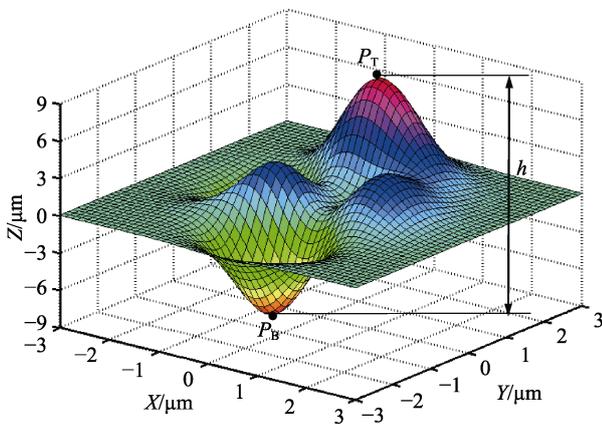


图 2 表面三维形貌图
Fig.2 Surface topography

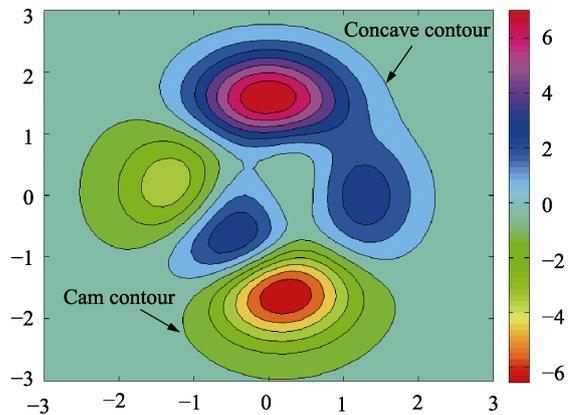


图 3 表面等高线图
Fig.3 Contour map

和凹等高线轮廓,对于凸等高线轮廓封闭区域面积可直接计算,对于凹等高线轮廓封闭区域面积需要先将凹等高线轮廓分割为多个凸轮廓再求解^[15]。以图 4 所示的轮廓 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7V_8V_9V_{10}V_{11}V_{12}V_{13}$ 为例说明判断某封闭轮廓是否为凹轮廓的过程,依次计算相邻向量的叉积,并判断向量叉积是否小于 0,若小于 0,则该封闭轮廓为凹轮廓。计算图 4 中相邻向量叉积,结果发现:

$$\mathbf{E}_7 \times \mathbf{E}_8 < 0 \quad (1)$$

$V_7V_8V_9$ 附近出现凹轮廓,需要在此处将凹轮廓分割为凸轮廓。分割的方法为延长向量 \mathbf{E}_7 交 \mathbf{E}_{11} 于 V_{14} 点,按照这个分割原则,将图 4 的封闭凹轮廓 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7V_8V_9V_{10}V_{11}V_{12}V_{13}V_1$ 划分为 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7V_{14}V_{12}V_{13}V_1$ 和 $V_8V_9V_{10}V_{11}V_{14}V_8$ 两个凸轮廓。

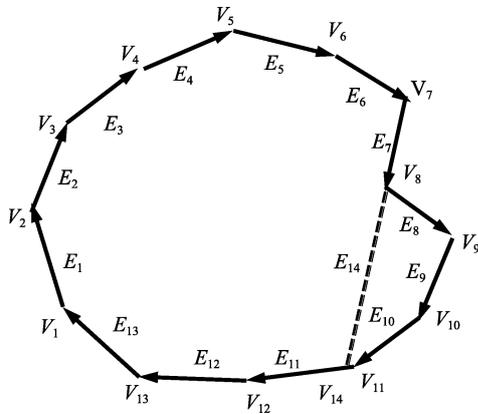


图 4 凹边形内部分割示意图
Fig.4 Diagram of concave inner division

利用图 5 所示方法进行封闭凸轮廓区域面积的求解,图中 $A、B、C、D$ 为封闭凸轮廓的四个极限点, A 为封闭区域最左点, B 为封闭区域最右点, x_0 为点 A 在 x 轴上投影, x_n 为点 B 在 x 轴上投影,点 A 和点 B 将封闭轮廓分为上下两部分轮廓,定义轮廓 ACB 为上半部分轮廓,定义轮廓 ADB 为下半部分轮廓,则封闭区域面积 S_f 可以近似表示为:

$$S_f = \sum_{j=1}^n (x_{j+1} - x_j)(y_{j+1} + y_j) / 2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) / 2 \quad (2)$$

其中, (x_i, y_i) 为下半部分轮廓 ADB 中任意一点, (x_j, y_j) 为上半部分轮廓 ACB 中任意一点。

对于等高线图某局部区域,相邻等高线轮廓 h_i 与轮廓 h_{i-1} 之间面积可以表示为:

$$S_{R,j} = |S_{h_i} - S_{h_{i-1}}| \quad (3)$$

设某个完整的等高线图中相邻等高线轮廓 h_i 与轮廓 h_{i-1} 间区域共有 m 个,定义对应于此等高线轮廓高度 h_i 的全部等高线相邻轮廓面积为 S_{R_i} , 其计算公式为:

$$S_{R_i} = \sum_{j=1}^m S_{R_{i,j}} \quad (4)$$

则等高线轮廓间面积 S_R 集合为:

$$S_R = \{S_{R_1}, S_{R_2}, \dots, S_{R_n}\} \quad (5)$$

等高线轮廓间面积总和 A 为:

$$A = \sum_{i=1}^n S_{R_i} \quad (6)$$

定义等高线高度 h_i 对应的等高线轮廓间面积 S_{R_i} 与等高线轮廓间面积总和 A 之间的比率 η_{h_i} , 简称为等高线轮廓间面积占比 η_{h_i} , 其计算公式为:

$$\eta_{h_i} = S_{R_i} / A \quad (7)$$

等高线轮廓间面积占比 η_{h_i} 的集合 U 为:

$$U = U\{\eta_{h_1}, \eta_{h_2}, \eta_{h_3}, \dots, \eta_{h_n}\} \quad (8)$$

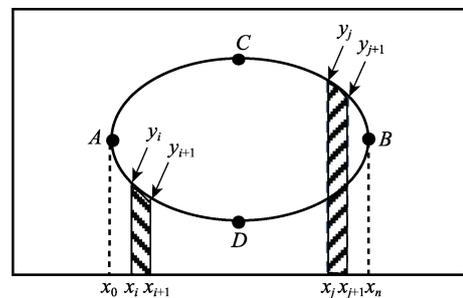


图 5 封闭区域面积示意图
Fig.5 Diagram of enclosed area

3.3 等高线轮廓间面积占比与轮廓高度之间的关系曲线

图 6 为 $v_s=25 \text{ m/s}$ 、 $v_w=2 \text{ mm/min}$ 、 $a_p=10 \mu\text{m}$ 时的铝基碳化硅磨削表面三维形貌,图 7 为等高线图,图 8 为等高线轮廓间面积占比与轮廓高度的关系曲线。其中, P_A 为曲线最高点,定义此点为参考点,所对应的平面为表面粗糙度基准面。可以发现,等高线轮廓间面积占比与轮廓高度的关系曲线左侧出现冗长,这是由于碳化硅颗粒脱离铝合金基体表面造成凹坑缺陷。

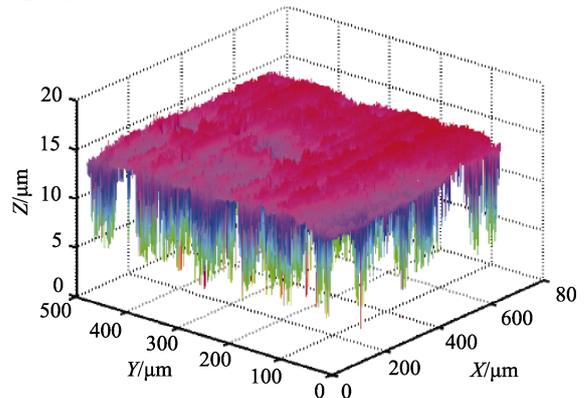


图 6 磨削表面三维形貌图
Fig.6 Surface topography in grinding

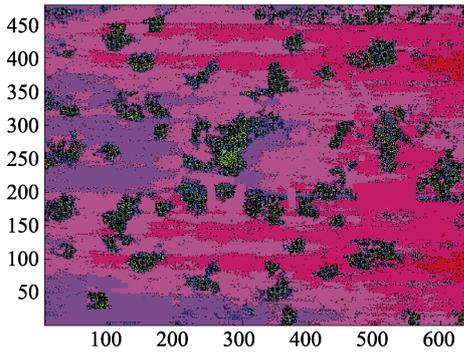


图7 磨削表面等高线图
Fig.7 Contour of grinding surface

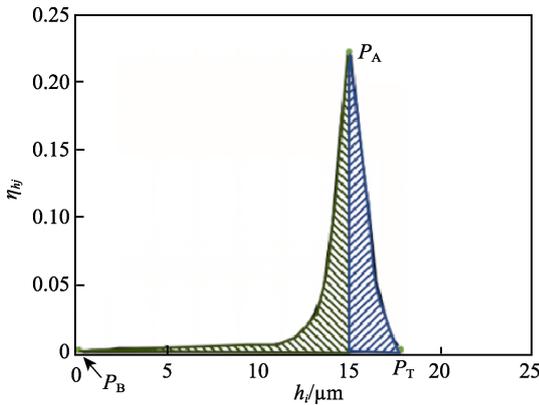


图8 等高线轮廓间面积占比与轮廓高度曲线
Fig.8 Area ratio between contours and contour height

3.4 三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度

3.4.1 三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度定义

参考 GB/T 1031—2009 产品几何技术规范(GPS) 中的算术平均偏差 Ra , 结合铝基碳化硅磨削表面三维形貌特点, 提出了以三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 表征磨削表面粗糙程度。三维

形貌算术平均偏差 Ra_s 定义为基于基准面的形貌体积与取样面积的比值, 凹坑最大偏离高度 Rz_c 定义为三维形貌中凹坑距离基准面最大的偏离距离。取表面三维形貌中过 P_A 点的水平面为基准面, 整个基准面可以分成 $m \times n$ 个小正方形, 设每个小正方面积为 dS 。设第 i, j 个小正方形对应的表面三维形貌到基准面的平均距离为 Δ_{ij} , 则磨削表面三维形貌相对于基准面的体积 V 可表示为:

$$V = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta_{ij} dS \tag{9}$$

基准面的面积 A 为:

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n dS = m \times n \times dS \tag{10}$$

三维形貌算术平均偏差 Ra_s 可以表示为:

$$Ra_s = V / A = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta_{ij} dS \right) / (m \times n) \tag{11}$$

凹坑最大偏离高度 Rz_c 可以表示为:

$$Rz_c = h(P_A) \tag{12}$$

3.4.2 三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度分析

设计单因素铝基碳化硅磨削实验, 研究砂轮转速 v_s 、进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 对三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 的影响规律。图 9a、图 10a 分别为磨削深度 $a_p=6 \mu\text{m}$ 时, 三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 与砂轮转速 v_s 和进给速度 v_w 的关系; 图 9b、图 10b 分别为砂轮转速 $v_s=25 \text{ m/s}$ 时, 三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 与进给速度 v_w 和磨削深度 a_p 的关系; 图 9c、图 10c 分别为进给速度 $v_w=2 \text{ m/min}$ 时, 三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 与砂轮转速 v_s 和磨削深度 a_p 的关系; 可以发现, 铝基碳化硅磨削三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度随着砂轮转速的增加而降低, 随着进给速度与磨削深度的增大而增大。

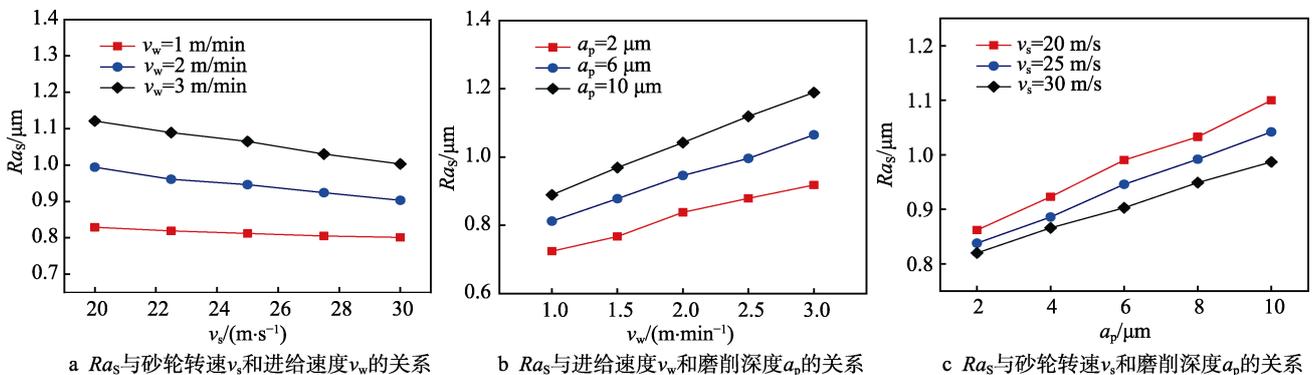


图9 三维形貌算术平均偏差 Ra_s 与工艺参数的关系

Fig.9 Relationship between arithmetic mean deviation of the grinding surface and grinding parameters: a) Relationship between Ra_s and v_s, v_w , b) Relationship between Ra_s and v_w, a_p , c) Relationship between Ra_s and v_s, a_p

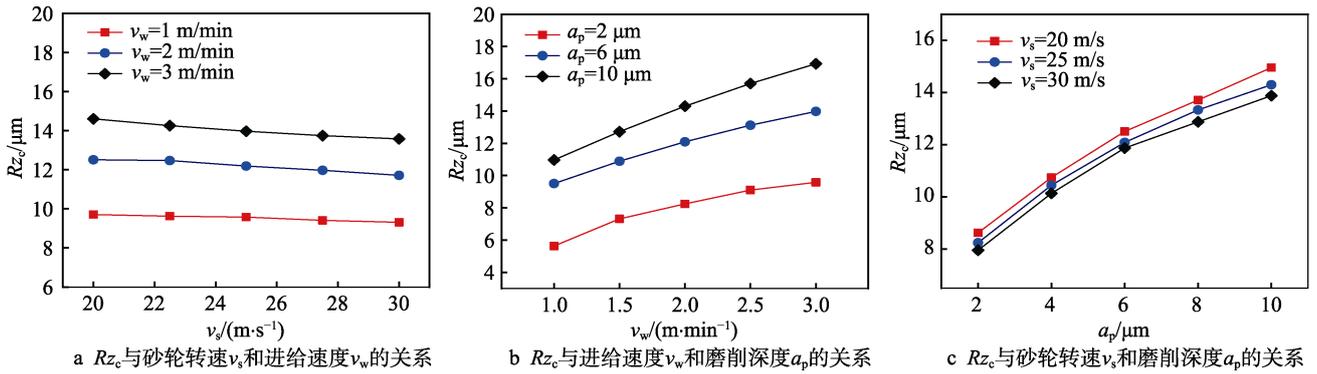


图 10 凹坑最大偏离高度 Rz_c 与工艺参数的关系

Fig.10 Relationship between the maximum deviation height of cavity defect and grinding parameters:

a) Relationship between Rz_c and v_s, v_w , (b) Relationship between Rz_c and v_w, a_p , (c) Relationship between Rz_c and v_s, a_p

4 基于支持向量机的三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度预测模型

4.1 表面三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度实验结果

根据多因素实验设计要求，开展 27 组铝基碳化硅磨削实验，利用表面轮廓仪进行磨削表面三维形貌测量，表 2 为 27 组表面三维形貌算术平均偏差。

4.2 基于支持向量机的三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度预测模型

支持向量机是基于统计学习的思想，通过构造最优超平面，达到对未知样本的分类误差最小。根据结

构风险最小化原则，SVM 通过构造最优超平面，在固定学习经验风险的条件下最小化 VC 置信度^[16-17]。

铝基碳化硅磨削实验中的每组实验参数 $x_i \in R^n$ 构成样本数据 $\{x(i), Ra_i\}_{i=1}^n$ ，则预测模型为：

$$y(x) = y_{Ra}(x) = w^T \varphi(x) + b \tag{13}$$

其中， w^T 为向量， $\varphi(x)$ 为向量 x 经过非线性映射得到的高维空间向量， $y(x)$ 表示一个超平面，偏差 b 可通过下式求得：

$$\min R(y) = \min \left(\|w\|^2 + \mu \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n L(y_i, y_{Ra}) \right) \tag{14}$$

其中， $L(y_i, y_{Ra})$ 是损失函数， μ 是惩罚系数，主要用于控制训练误差和模型复杂性之间的平衡。为了保证基于支持向量机的预测模型的精度，引入一个很小的正数 ε ，得：

$$|y_i - y(x)| = |Ra_i - y_{Ra}(x)| \leq \varepsilon \tag{15}$$

表 2 表面三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度实验结果

Tab.2 Experimental results for mean deviation of surface topography and the maximum deviation height of cavity defect

No.	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_w/(m \cdot min^{-1})$	$a_p/\mu m$	$Ra_s/\mu m$	$Rz_c/\mu m$	No.	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_w/(m \cdot min^{-1})$	$a_p/\mu m$	$Ra_s/\mu m$	$Rz_c/\mu m$
1	20	1	2	0.712	6.568	15	25	2	10	1.042	14.801
2	20	1	6	0.829	9.708	16	25	3	2	0.918	9.579
3	20	1	10	0.937	11.408	17	25	3	6	1.065	13.975
4	20	2	2	0.842	8.623	18	25	3	10	1.189	16.931
5	20	2	6	0.994	12.511	19	30	1	2	0.739	5.632
6	20	2	10	1.111	14.959	20	30	1	6	0.801	9.543
7	20	3	2	0.948	9.972	21	30	1	10	0.863	10.763
8	20	3	6	1.121	14.608	22	30	2	2	0.820	8.508
9	20	3	10	1.279	17.804	23	30	2	6	0.903	11.876
10	25	1	2	0.724	6.036	24	30	2	10	0.987	13.884
11	25	1	6	0.812	9.505	25	30	3	2	0.885	9.427
12	25	1	10	0.889	10.965	26	30	3	6	1.003	13.583
13	25	2	2	0.838	8.445	27	30	3	10	1.113	16.299
14	25	2	6	0.946	12.093						

对于超平面而言，最优即分割间隙最大，引入松弛变量 ξ 与 ξ^* ，以保证最优问题有解，最优解的计算过程如式 (16) 所示：

$$\min R(\mathbf{w}, b) = \min \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \frac{1}{2} \mu \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right) \quad (16)$$

$$s.t. \quad \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i$$

$$y_i - \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) - b \leq \varepsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式 (14) — (16) 构成二次规划问题，引入拉格朗日算子，对应的拉格朗日函数为：

$$L = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \frac{1}{2} \mu \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^n \lambda_i (\varepsilon + \xi_i - \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) - b + y_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + b - y_i) \quad (17)$$

其中， λ_i 与 λ_i^* 为拉格朗日乘数，运用 KKT 条件，式 (17) 转化为对偶优化问题：

$$\min \quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_i - \lambda_i^*) (\lambda_j - \lambda_j^*) k(x_i, x_j) + \varepsilon \sum_{i=1}^n (\lambda_i + \lambda_i^*) - \sum_{i=1}^n y_i (\lambda_i - \lambda_i^*) \quad (18)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_i^*) = 0$$

$$0 \leq \lambda_i, \lambda_i^* \leq \mu$$

根据 Mercer 条件：

$$k(x_i, x_j) = \boldsymbol{\varphi}^T(x_i) \cdot \boldsymbol{\varphi}(x_j) \quad (19)$$

其中， $k(x_i, x_j)$ 为核函数，由于铝基碳化硅磨削加工具有显著的非线性，径向基核函数处理复杂非线性回归更有优势。因此，本文预测模型中，选择径向基函数。 g 为核函数宽度，高斯核函数的表达式为：

$$k(x_i, x_j) = \exp(-g \|x_i - x_j\|^2) \quad (20)$$

综上所述，采用相同的方法进行铝基碳化硅磨削表面三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度预测，预测模型分别为：

$$y_{Ra}(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_{1i} - \lambda_{1i}^*) k_1(x_i, x_j) + b_1 \quad (21)$$

$$y_{Rz}(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_{2i} - \lambda_{2i}^*) k_2(x_i, x_j) + b_2 \quad (22)$$

4.3 基于支持向量机预测模型算法流程

采用遗传算法优化核函数宽度 g 、惩罚因子 μ 、敏感系数 ε ，其初始值随机选择，最大代数设为 200，采用预测值与实验值之间的平均平方误差作为适应度值，适应度函数 $E(f)$ 可以表示为：

$$E(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{Ra}(x))^2 \quad (23)$$

图 11 为基于支持向量机的 GA-SVM 预测模型算法流程，主要步骤如下：

- (1) 将铝基碳化硅磨削实验参数进行归一化处理，并带入模型中进行训练。
- (2) 针对核函数宽度 g 、惩罚因子 μ 、敏感系数 ε ，随机生成染色体序列。
- (3) 计算个体适应度均方差数值。
- (4) 当循环次数未达到最大迭代次数时，对种群进行选择、交叉、变异操作生成新一代种群，继续进行 SVM 模型训练。
- (5) 不断迭代重复步骤 (3) 和 (4)，直到达到最大进化代数，得到最优 g 、 μ 、 ε 。

经过迭代计算，三维形貌算术平均偏差预测模型中最优参数为 $g_1 = 0.386$ 、 $\mu_1 = 199.97$ 、 $\varepsilon_1 = 0.01$ ，凹坑最大偏离深度预测模型中最优参数为 $g_2 = 0.026$ 、 $\mu_2 = 49.79$ 、 $\varepsilon_2 = 0.011$ ，分别将最优参数带入 SVM 模型，得到 SVM 预测机，并对测试组数据进行偏差预测。

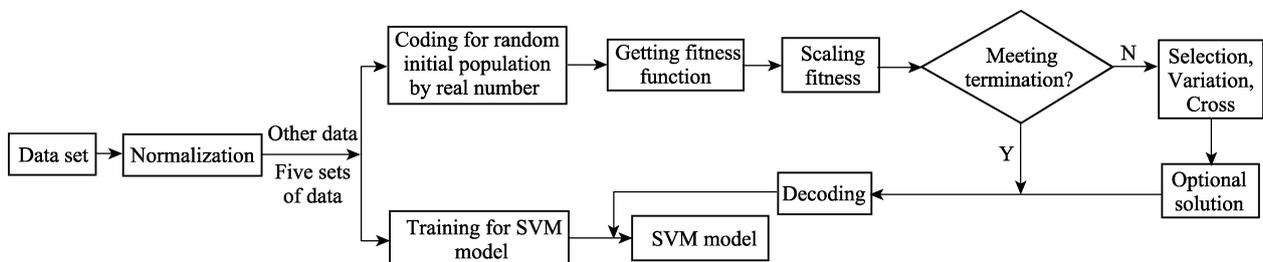


图 11 支持向量机寻优过程示意图
Fig.11 Process of supporting vector machine optimization

4.4 三维形貌算术平均偏差与凹坑最大偏离高度预测模型验证

针对基于支持向量机三维形貌算术平均偏差与

凹坑最大偏离高度预测结果，开展铝基碳化硅磨削验证实验，验证实验参数如表 3 所示。图 12 为铝基碳化硅磨削表面粗糙度预测值与实验值对比图，可以发现，铝基碳化硅磨削三维形貌算术平均偏差实验和凹

表 3 预测模型验证实验参数及结果
Tab.3 Verification parameters and results of predicted model

No.	$v_s/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$v_w/$ ($m \cdot min^{-1}$)	$a_p/\mu m$	No.	$v_s/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$v_w/$ ($m \cdot min^{-1}$)	$a_p/\mu m$
1	20	3	8	5	22.5	1	8
2	20	1.5	4	6	22.5	1	2
3	17.5	2.5	8	7	25	2	4
4	17.5	1.5	4	8	25	2	8

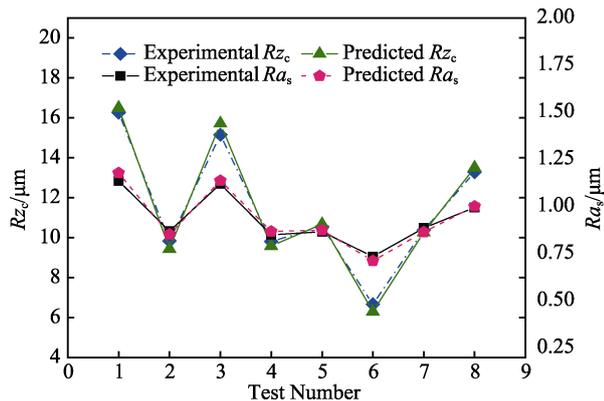


图 12 预测与实验结果比较图

Fig.12 Comparison of the predicted and experimental results

坑最大偏离高度与预测结果的相对误差在 5%以内,验证了基于向量机的铝基碳化硅磨削三维形貌算术平均偏差实验和凹坑最大偏离高度预测模型的准确性。

5 结论

1) 观察了铝基碳化硅磨削表面微观形貌,发现碳化硅颗粒部分脱粘并产生凹坑缺陷,针对传统算术平均偏差 Ra 评价方法的局限性,对算术平均偏差评价指标 Ra 进行了改进和补充,提出了三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 用于表征铝基碳化硅磨削表面质量。

2) 基于磨削表面三维形貌建立了等高线图,构建了等高线轮廓间面积占比与轮廓高度的关系曲线,给出了三维形貌算术平均偏差 Ra_s 和凹坑最大偏离高度 Rz_c 评价指标的确定方法,此方法可有效地获得包含凹坑缺陷的铝基碳化硅磨削表面质量评价指标。

3) 实验与预测结果误差在 5%以内,验证了基于支持向量机的铝基碳化硅磨削表面三维形貌算术平均偏差和凹坑最大偏离高度预测模型的正确性。

参考文献:

[1] GB/T 131—2009, 产品几何技术规范(GPS)技术产品文件中表面结构的表示法[S].
GB/T 131—2009, Representation of surface structure in

the product geometry specification (GPS) technology product file[S].

- [2] MAO C, LIANG C, ZHANG Y, et al. Grinding characteristics of CBN-WC-10Co composites[J]. Ceramics international, 2017, 43: 16539-16547.
- [3] ZHANG L, REN C, JI C, et al. Effect of fiber orientations on surface grinding process of unidirectional C/SiC composites[J]. Applied surface science, 2016, 366: 424-431.
- [4] LIU C, DING W, YU T, et al. Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites[J]. Precision engineering, 2018, 51: 68-77.
- [5] LIU Q, HUANG G, FANG C, et al. Experimental investigations on grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C_p/C-SiC composites based on reinforced fiber orientations[J]. Ceramics international, 2017, 43: 15266-15274.
- [6] 刘杰, 李海滨, 张小彦, 等. 2D-C/SiC 高速深磨磨削特性及去除机制[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 113-118.
LIU Jie, LI Hai-bin, ZHANG Xiao-yan, et al. Investigation of grinding characteristics and removal mechanisms of 2D-C/SiC in high speed deep grinding[J]. Acta materialiae compositae sinica, 2012, 29(4): 113-118.
- [7] CHOUDHARY A, NASKAR A, PAUL S, et al. Effect of minimum quantity lubrication on surface integrity in high-speed grinding of sintered alumina using single layer diamond grinding wheel[J]. Ceramics international, 2018, 44(14): 17013-17021.
- [8] LIU W, DENG Z, SHANG Y, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding[J]. Ceramics international, 2017, 43: 1571-1577.
- [9] 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 advanced manufacturing technology, 2017, 91: 2347-2358.
- [10] 郑雷, 袁军堂, 汪振华. 纤维增强复合材料磨削钻孔的表面微观研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(12): 1492-1496.
ZHENG Lei, YUAN Jun-tang, WANG Zhen-hua. Microscopic study of ground surfaces of drilled holes in fiber reinforced plastics [J]. Acta armamentarii, 2008, 29(12): 1492-1496.
- [11] 修世超, 李长河, 蔡光起. 磨削加工表面粗糙度理论模型修正方法[J]. 东北大学学报, 2005(8): 770-773.
XIU Shi-chao, LI Chang-he, CAI Guang-qi. Modification for theoretical model of ground surface roughness[J]. Journal of Northeastern University, 2005(8): 770-773.
- [12] LIPINSKI D, BALASZ B, RYPINA Ł. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generalisation[J]. International journal advanced manufacturing technology, 2018, 94: 1335-1347.

- [13] YU H, WANG J, LU Y. Simulation of grinding surface roughness using the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern[J]. International journal advanced manufacturing technology, 2016, 84: 861-871.
- [14] ZHANG J, WANG L, TIAN F, et al. Modeling study on surface roughness of ultrasonic-assisted micro end grinding of silica glass[J]. International journal advanced manufacturing technology, 2016, 86: 407-408.
- [15] 朱传敏, 唐珺, 许田贵. 凹多边形凸分解算法在快速原型中的应用[J]. 现代制造工程, 2010(2): 53-56.
ZHU Chuan-min, TANG Jun, XU Tian-gui. The application of concave polygon convex decomposition algorithm to rapid prototyping[J]. Modern manufacturing engineering, 2010, 2: 53-56.
- [16] 谢楠, 周俊峰, 郑蓓蓉. 考虑能耗的多传感器融合加工表面粗糙度预测方法[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 240-249.
XIE Nan, ZHOU Jun-feng, ZHENG Bei-rong. An approach for surface roughness prediction in machining based on multi-sensor fusion considering energy consumption[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 240-249.
- [17] 余剑武, 胡其丰, 文丞, 等. 基于支持向量机的电火花加工 8418 钢表面粗糙度预测模型[J]. 中国机械工程, 2018(4): 771-774.
YU Jian-wu, HU Qi-feng, WEN Zheng, et al. Prediction model of surface roughness of 8418 steel by EDM based on SVM[J]. China mechanical engineering, 2018(4): 771-774.