

SiCp/Al 复合材料三维表面粗糙度信息提取方法

刘 赛, 周 明, 王阳俊

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨, liusaist@126.com)

摘 要: 为研究 SiCp/Al 复合材料三维表面粗糙度信息的提取方法, 进行高速铣削实验, 并利用 OLS3000 激光共聚焦扫描显微镜对表面微观轮廓进行非接触式测量. 采用最小二乘法、高斯滤波法和扩展高斯滤波法针对已加工表面进行三维粗糙度信息的提取, 并计算三维粗糙度参数, 从受缺陷的影响程度以及稳定性两方面对 3 种方法的信息提取效果进行对比. 结果表明: 高斯滤波法和扩展的高斯滤波法对缺陷的敏感程度较高, 且提取出的信息稳定性不好; 最小二乘法能很好保留缺陷的信息并具有较高的稳定性, 更适合对颗粒增强型铝基复合材料进行三维表面粗糙度信息的提取.

关键词: SiCp/Al 复合材料; 粗糙度; 表面微观轮廓; 高速铣削

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0040-04

Method to extract information of surface roughness in three dimensions of particle reinforced aluminum matrix composites

LIU Sai, ZHOU Ming, WANG Yang-jun

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, liusaist@126.com)

Abstract: To compare the effectiveness of three methods to extract the information of 3d surface roughness of particle reinforced aluminum matrix composites, specimens was high-speed milled, and the surface micro-topography was measured by OLS 3000 microscope. The least squares method, Gaussian filtering method and extensional Gaussian filtering method were adopted to extract the information of 3d surface roughness and 3d roughness parameters were computed. Gaussian filtering and extensional Gaussian filtering method are sensitive to the defect, also the information extracted is unstable. The least squares method is appropriate for this material because of the retention of the defect's information and the high stability.

Key words: particle reinforced aluminum matrix composites; surface roughness; surface micro-topography; high-speed milled

在金属基复合材料^[1]中, 铝基复合材料具有较高的比强度、比模量, 而且还有较低的热膨胀系数, 特别是颗粒增强型铝基复合材料, 由于增强相为颗粒状, 并且均匀的弥散在金属基体之中, 还具有各向同性、微观结构均匀的特点, 而且有很好的可加工性, 具有成本较低的优点, 是当今最主要的发展方向之一^[2]. 然而, 较之金属材料, 铝基复合材料切削性能较差, 表面质量难以控制, 限制了该

材料的进一步应用. 国内外学者对其进行了大量的研究. 赵福令教授等^[3]对 C/C 复合材料工件切削加工后的表面微观形貌评定进行了研究, 采用 TalyScan150 型表面粗糙度测试仪来获取表面三维粗糙度信息, 并未对信息提取的方法进行研究^[3]. Y. Sahina^[4]对 Al₂O₃ 增强 2024 铝合金复合材料的切削进行了研究, 对不同的尺寸、不同的体积分数颗粒增强材料的切削表面粗糙度值进行了比较. 但以上研究依据的依然是二维表面粗糙度评定标准, 颗粒增强型铝基材料在加工时存在着基体和增强相的协同变形, 从而加工后呈现出不同于普通金属的特殊表面微观形貌^[5]; 因此,

收稿日期: 2011-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775057).

作者简介: 刘 赛(1985—), 男, 硕士研究生;

周 明(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

采用二维粗糙度参数评价将会丢失大量的信息,不能对该种材料的表面进行合理的评价.蒋向前教授等^[6]对于三维表面微观形貌的评价进行了研究,但针对的是广泛的材料.

本文针对颗粒增强型铝基复合材料的三维表面微观形貌评价进行了研究,探索适于该类材料的加工表面三维粗糙度信息的提取方法,为该种材料表面微观形貌评价提供基础.

1 实验及数据检测

高速铣削实验选用的机床为:德国 OPS650 型五轴高速铣削加工中心,其最高转速 42 000 r/min.实验材料为:SiCp/Al 复合材料.实验刀具为:金刚石涂层硬质合金直柄立铣刀.各刀具参数:齿数为 2,前角为 2°,后角为 5°,螺旋角为 30°,直径 4.8 mm,刀杆长 30 mm,测量仪器采用 OLS3000 激光扫描共聚焦显微镜检测系统,工件的测量参数为:采样范围 256 μm × 256 μm,采样点数分别为 256 × 256,采样间距 1 μm.

2 表面粗糙度信息提取方法

表面粗糙度信息的提取方法有最小二乘法、高斯滤波法以及扩展的高斯滤波方法、基于小波理论的滤波方法、分形法、样条滤波法^[7],前 3 种方法较成熟,本文将对前 3 种方法做重点分析比较.

2.1 最小二乘拟合方法理论

应用最小二乘法^[8],对给定表面 $z(x,y)$,可用如下多项式进行拟合:

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i a_{(i-j)} x^{i-j} y^j.$$

拟合面与被测表面的偏差平方和为

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^M [z(x_k,y_i) - f(x_k,y_i)]^2. \tag{1}$$

根据最小二乘原理,令 ε^2 最小,即对式(1)两端求导,并令其为零,求解方程即可得到拟合多项式的系数.

若评定表面为平面,拟合多项式可以简化为

$$f(x,y) = ax + by + d.$$

则拟合面与被测表面的偏差平方和

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^M [z(x_k,y_i) - f(x_k,y_i)]^2 = \\ &\sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^M [ax_{ik} + by_{ik} + d - z_{ik}]^2 = \min. \end{aligned}$$

分别求导得

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a} = 0; \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial b} = 0; \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial d} = 0.$$

通过解方程组即可求得系数 a,b,d ,则得到基准平面方程

$$f(x,y) = ax + by + d.$$

粗糙度表面 $s(x,y)$ 由原始表面 $z(x,y)$ 与基准表面 $f(x,y)$ 求得

$$s(x,y) = z(x,y) - f(x,y).$$

2.2 高斯滤波理论

二维表面粗糙度评定的国际标准^[9]的高斯滤波器最有可能成为三维表面粗糙度评定的国际标准^[10].高斯滤波方法^[11]的原理是将原始测量轮廓数据通过一个二维低通滤波器,得到高斯基准面 $s_1(x,y)$,滤波器冲击响应函数为 $g(x,y)$,它的 Fourier 变换为 $G(\lambda_x,\lambda_y)$ 则

$$\begin{aligned} g(x,y) &= \frac{1}{a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{a \lambda_{cx}} \right)^2 - \pi \left(\frac{y}{a \lambda_{cy}} \right)^2 \right], \\ G(\lambda_x,\lambda_y) &= \exp \left[-\pi \left(\frac{a \lambda_{cx}}{\lambda_x} \right)^2 - \pi \left(\frac{a \lambda_{cy}}{\lambda_y} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

则三维表面粗糙度高斯评定基准面 $s_1(x,y)$ 由下式给出:

$$\begin{cases} s_1(x,y) = z(x,y) \cdot g(x,y), \\ S_1(\lambda_x,\lambda_y) = Z(\lambda_x,\lambda_y) \cdot G(\lambda_x,\lambda_y). \end{cases}$$

将公式离散化.定义 $z_{i,j}$ 为三维离散采样数据, $s_{1,i,j}$ 为高斯评定基准面.

$$s_{1,i,j} = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n z_{i-k,j-l} g_{k,l} \Delta x \Delta y.$$

式中: $i = m, \cdots, L_x - m; j = n, \cdots, L_y - n;$

$$g_{k,l} = \frac{1}{a^2 \lambda_{cx} \lambda_{cy}} \exp \left[-\pi \left(\frac{k \Delta x}{a \lambda_{cx}} \right)^2 - \pi \left(\frac{l \Delta y}{a \lambda_{cy}} \right)^2 \right].$$

L_x, L_y 分别为 x,y 方向数据采样点数.

经过以上处理,获得三维表面粗糙度高斯评定基准面 $s_1(x,y)$,定义 $z(x,y)$ 为三维表面测量轮廓,假设

$$z(x,y) = s_1(x,y) + s_2(x,y).$$

选取适当的截止频率时, $s_1(x,y)$ 可表示包含三维表面测量轮廓形状和波度轮廓,即三维表面粗糙度评定的基准面, $s_2(x,y)$ 为三维表面粗糙度轮廓,即

$$s_2(x,y) = z(x,y) - s_1(x,y).$$

2.3 扩展高斯滤波法

传统的高斯函数由于加权平均而引起边界畸变,即存在着无法克服的边界效应问题^[12].消除边界效应对滤波结果的影响的方法是在数据的 x 和 y 方向的边界处各舍去一半截止波长的数据,在原始采样数据多时这样做是可行的,当原始数据量很有限时,存在经过高斯滤波后所保留的信息是否足够的问题.

为了解决采样数据利用不充分问题,本文在传统高斯滤波方法的基础上采用边界沿拓的方法,将两端边界点的数据适当加长,克服边界信息丢失严重的问题,即采用添零加长的方法,将原始测量信号在两端边界的数据延拓,由于是三维表面,所以需要在测量区域外围分别在 x 、 y 坐标方向上添加相应数目的数据点.

3 表面粗糙度信息提取方法比较与选择

将 SiCp/Al 复合材料高速铣削实验获得的实验数据,利用 Matlab 软件编制 3 种粗糙度信息提取方法和三维粗糙度参数^[13]的计算程序,进行数

据处理,对比拟合出的基准面和获得的粗糙度表面和计算出的三维表面粗糙度参数,从表面缺陷的影响和稳定性两方面,评价这 3 种方法的优劣,从而选择出更适合于 SiCp/Al 复合材料的方法.

3.1 表面缺陷的影响

利用高速铣削获得的已加工表面的数据中的一组,运行编制的 Matlab 程序,得到原始表面、最小二乘基准面和粗糙度表面如图 1 所示,对于同一表面,在数据的边界处各舍去一半截止波长的数据,高斯滤波结果如图 2,没有在边界上舍去数据,而是采用添零扩展的方法高斯滤波结果如图 3.

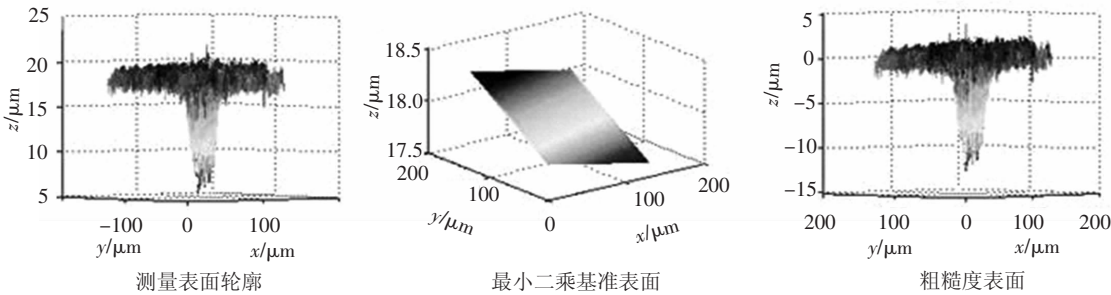


图 1 原始测量表面轮廓、最小二乘基准面和粗糙度表面

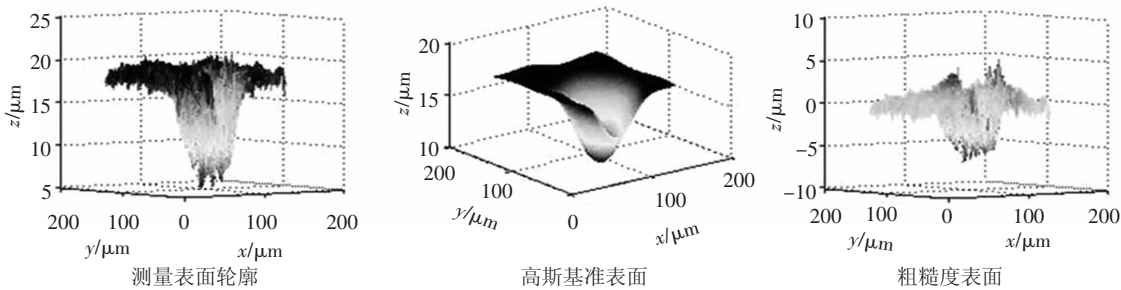


图 2 边界上舍去一半数据时测量表面轮廓、高斯基准面和粗糙度表面

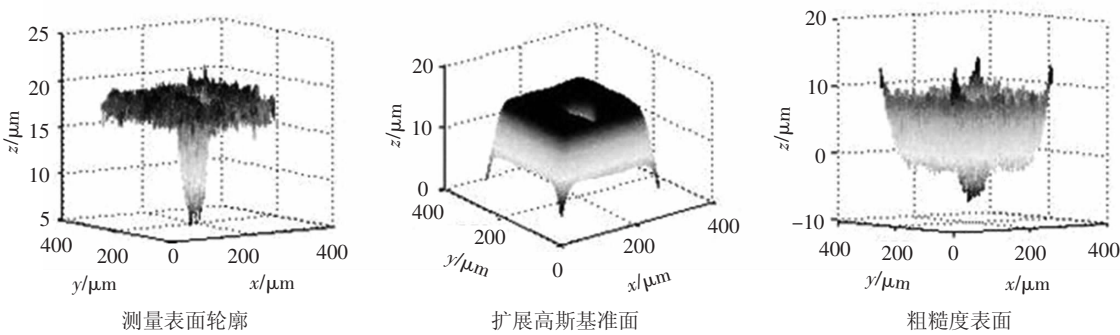


图 3 采用添零扩展的方法时测量表面轮廓、扩展高斯基准面和粗糙度表面

从图 2 和图 3 可以看出高斯基准面在缺陷处发生了畸变,在缺陷处高斯基准面被拉低,导致粗糙度表面提取后,丧失了原始表面的特征,从而导致表面微观形貌的评价不准确.对于扩展的高斯滤波后的表面,可以看出在边界处有明显的失真.然而,从图 1 中可以看出,最小二乘多项式拟合方法保留了缺陷的信息,能够反映原始表面的真实

特征.所以在缺陷较多,特别是存在较大缺陷的情况,必须采用最小二乘拟合方法进行三维粗表面粗糙度信息的提取.

3.2 稳定性讨论

以三维粗糙度参数作为衡量标准,即应用以上 3 种方法提取的表面粗糙度信息进行三维粗糙度参数的计算.对于同一表面采用 128×128 和

256 × 256 两种采样间隔,计算结果如表 1、2.

表 1 最小二乘基准三维粗糙度参数

采样间隔	S_q	S_z	S_{ku}	S_{ds}	S_{tr}	S_{al}	S_{dq}	S_{sc}	S_{dr}	S_{sk}
128	1.959 2	14.972	2.284 7	0.023 1	0.389 7	140	0.472 9	-0.005 2	0.097 3	-3.220 2
256	1.954 8	15.606	2.384 3	0.063 1	0.385 4	139	0.651 5	-0.014 2	0.171 9	-3.222 0

表 2 高斯基准三维粗糙度参数

采样间隔	S_q	S_z	S_{ku}	S_{ds}	S_{tr}	S_{al}	S_{dq}	S_{sc}	S_{dr}	S_{sk}
128	0.830 2	7.908 0	4.668 7	0.016 4	0.650 6	230	0.384 5	-0.003 9	0.066 8	-3.005 0
256	3.372 4	20.088 0	4.883 8	0.053 8	0.463 7	340	0.677 7	-0.013 7	0.183 6	-2.001 1

对比表 1、2 可以看出,对于 SiCp/Al 复合材料,在同一加工区域上,利用 128 × 128 和 256 × 256 两种采样间隔提取的信息进行表面三维粗糙度参数的计算,对于最小二乘法,计算出的参数值相差不大,但对于高斯滤波法,差距甚大,如 S_q 、 S_z 、 S_{sc} 、 S_{dr} 都相差三倍左右,所以对于三维表面粗糙度信息的提取,最小二乘方法明显比高斯方法稳定.

4 结 论

1) 高斯滤波基准面在缺陷处发生了畸变,导致粗糙度表面丧失了原始表面的特征. 对缺陷较多的表面,利用此种方法提取的粗度信息,将对三维粗糙度参数的计算结果产生很大影响,从而不能对工件的表面微观形貌做出合理的评价.

2) 利用边界加零的方法对传统的高斯滤波方法进行了边界延拓,解决了采集的信息不能被充分利用的问题,但在边界上仍旧存在着很严重的失真.

3) 从对缺陷的敏感程度和稳定性两方面看,最小二乘方法具有能够保留缺陷信息,准确反映原始表面真实特征的优势,更适合对颗粒增强型铝基复合材料加工表面微观形貌进行三维粗糙度信息的提取.

参考文献:

[1] KWAK J S, KIM Y S. Mechanical properties and grinding performance on aluminum-based metal matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3):596-600.

[2] 王宇鑫,张瑜,严鹏飞,等. 铝基复合材料的研究[J]. 上海有色金属, 2010,31(4): 194-198.

[3] 艾传智,杨东军,赵福令,等. C/C 复合材料切削表面粗糙度的测量评定与影响因素研究[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(6): 31-34.

[4] SAHINA Y, KOKB M, CELIKE H. Tool wear and sur-

face roughness of Al203 Particle-reinforced aluinium alloy composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128: 280-291.

[5] SURESH N, REDDY K, KWANG-SUP S, *et al.* Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008,201(1/2/3): 547-579.

[6] 崔长彩,蒋向前,李小改,等. ISO543622 的表面形貌评定基准[J]. 光学精密工程, 2009,17(5): 1063-1070.

[7] ZHANG Hao, YUAN Yibao, PIAO Weiyong. A universal spline filter for surface metrology[J]. Measurement, 2010, 43(10):1575-1582.

[8] DONG W P, MAINSAH E, STOUT K J. Reference planes for the assessment of surface roughness in three dimensions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(2): 263-271.

[9] International Organization for Standardization. Metrological characterization of phase correct filters and transmission bands for use incontact (stylus) instruments[S]. Geneva:[s. n.], 1993.

[10] 马利民,蒋向前,王金星,等. 新一代产品几何技术规范(GPS)标准体系研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(1): 12-15.

[11] BRINKMANN S, BODSCHWINNA H. Accessing roughness in three dimensions using Gaussian regression filtering[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001,41(13/14): 2153-2161.

[12] DOBRZANSK P, PAWLUS P. Digital filtering of surface topography: part I. separation of one-process surface roughness and waviness by Gaussian convolution, Gaussian regression and spline filters[J]. Precision Engineering, 2011,34(3):647-650.

[13] LEACH R K. Fundamental principles of engineering nanometrology [M]. [S. l.]: Elsevier Inc, 2010: 235-251.

(编辑 杨 波)