

碳/碳复合材料与硬铝切削表面三维测量对比研究

艾传智¹ 杨东军¹ 赵福令¹ 杨志翔² 王金明²

(1 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116023)

(2 航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

文 摘 针对各向异性复合材料切削表面粗糙度的测量与评定是国内外急待解决的问题,采用 Talyscan150表面粗糙度测试仪对 C/C复合材料和硬铝(LY12)切削表面粗糙度进行三维非接触测量。通过三维评定参数的对比,研究了 C/C与 LY12的切削表面粗糙度。结果表明:采用二维评定参数评定 C/C的切削表面粗糙度将丢失表面的许多信息,三维评定参数可以更全面、更真实地表达复合材料切削表面粗糙度的特征。C/C切削表面和 LY12切削表面在峰态分布以及表面纹理方面具有较大的差别。与 LY12切削表面相比较,C/C切削表面有更多的深谷,而且表面没有明显的切削进给波纹。 S_q 参数比 S_a 参数能更好地表达复合材料切削时的纤维拔出与纤维露头的特征。

关键词 复合材料,表面粗糙度,三维测量,评定参数

Study on Comparison of 3D Cutting Surface Measurement Between Carbon/Carbon Composite and Duralum in

Ai Chuazhi¹ Yang Dongjun¹ Zhao Fuling¹ Yang Zhixiang² Wang Jiming²

(1 Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

(2 National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials of Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract It is a tough and important job to fulfill measurement and evaluation of surface roughness of anisotropic composite. The three dimension non-contact measurement of surface roughness of Carbon/Carbon (C/C) composite and Duralum in (LY12) by Talyscan150 is presented. Cutting surface roughness of C/C and LY12 is studied through comparison of 3D evaluating parameters. The results indicate that evaluating the cutting surface roughness of C/C by 2D parameters will lose much information, and with 3D evaluating parameters the surface roughness characteristic of C/C can be reflected more comprehensively and authentically. Furthermore, there are many differences in topography height distribution and surface texture between the machined surfaces of C/C and duralum in. There are more valleys in the machined surface of C/C than that of duralum in. Compared with the machined surface of duralum in, there are not obvious feeding textures for C/C. The characteristic of fibers drawn out or coming out of composite can be expressed better by parameter S_q than by parameter S_a .

Key words Composite, Surface roughness, 3D measurement, Evaluating parameter

收稿日期: 2005 - 03 - 25; 修回日期: 2006 - 06 - 05

作者简介: 艾传智, 1982出生, 硕士, 主要从事精密加工与测量方面的研究

1 前言

复合材料以其高的比强度、比模量,高的耐热性,高的耐腐蚀性等越来越受到人们的重视。然而,复合材料一般是非均质的,具有明显的各向异性,这种不同于金属的结构性能必然导致其切削表面形貌特征不同于金属表面^[1~2]。关于复合材料表面粗糙度,华南理工大学的学者从切削加工方面,说明了复合材料表面粗糙度的结构和特点, Y. Sahina, M. Kokb, H. Celik对 Al_2O_3 颗粒增强铝基复合材料和 2024 铝合金在不同刀具、不同颗粒尺寸以及不同颗粒体积分数下粗糙度随车削速度的变化进行了比较分析,韩国的 Sang-Ook An, Eun-Sang Lee 等人研究了刀具材料、刀具形状及切削参数对切削玻璃纤维增强环氧树脂 (GFRP) 的表面粗糙度的影响^[2~4]。这些研究工作对复合材料切削表面粗糙度的评定研究具有重要的指导作用。然而,上述研究工作都是采用评定金属切削表面粗糙度的二维评定标准评定复合材料切削表面粗糙度的大小,这不能全面反映各向异性复合材料的切削表面形貌特征,具有一定的片面性,以至于得出的结论与实际会产生误差。采用复合材料切削表面粗糙度与金属材料切削表面粗糙度的对比结果,研究复合材料切削加工表面粗糙度的特点,这对建立复合材料切削表面粗糙度的评定标准非常有意义。

本文对 C/C 与 LY12 切削表面采用三维非接触测量方法测量了部分表面粗糙度参数,通过对比测量结果,对 C/C 和 LY12 切削表面形貌的特征进行了定量的对比分析,并对 C/C 的切削表面粗糙度的评定方法做了初步的研究。

2 表面粗糙度三维测量实验

C/C 复合材料为三向正交结构,纤维体积分数为 40% ~ 50%,试样尺寸: 20 mm × 20 mm × 10 mm。金属材料为 LY12 (2024),其强度高,该牌号的热挤压型材热处理后,其室温下的拉伸强度可达 392 MPa 以上,有一定的耐热性,可用作 150 以下工作的零件。其中各主要元素质量分数为: Cu 3.52%、Mg 1.28%、Mn 0.52%、Si 0.5%、Zn 0.3%、Ni 0.1%,其余为 Al,试样的尺寸: 20 mm × 20 mm × 10 mm。

表面粗糙度测量仪器是 TalyScan150 型,并采用非接触式测量,原理基于激光三角测量,测试参数如下:采样速度 5 500 $\mu\text{m}/\text{s}$,采样面积 8 mm × 8 mm,宇航材料工艺 2006 年 第 4 期

采样间距 5 μm 。测试完成后,采用软件 TalyMap universal 进行分析计算,可得出二维与三维参数及相应的图片。

3 实验结果

加工后的表面测量后得到的表面三维形貌如图 1 和图 2 所示。

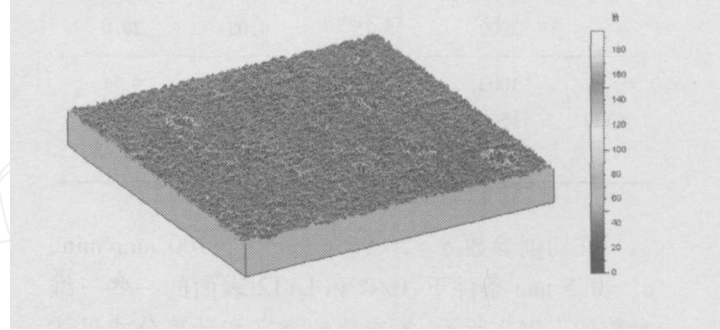


图 1 C/C 表面三维形貌

Fig 1 3D surface topography of C/C

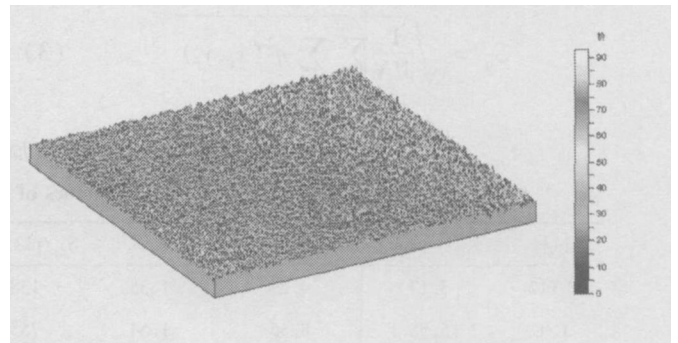


图 2 LY12 表面三维形貌

Fig 2 3D surface topography of LY12

实验测得在不同切削参数下 C/C 和 LY12 的 S_a 和 R_a 值如表 1 所示。 S_a 和 R_a 参数的计算公式见式 (1) 和式 (2)。

表面算术平均偏差

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z_i(x_i, y_j)| \quad (1)$$

轮廓算术平均偏差

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

式中, M 、 N 分别为 x 轴和 y 轴的采样点数; (x_i, y_j) 、 y_i 分别为三维测量和二维测量的采样点纵向 (z 轴)

高度; 相对误差 = $\frac{S_a - R_a}{S_a} \times 100\%$ 。

表 1 C/C和 LY12不同加工参数下的 S_a 和 R_a

Tab 1 S_a and R_a of C/C and LY12 under different machining parameters

试样	$S/r \cdot \text{min}^{-1}$	$S_a/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	相对误差 /%
C/C	1000	5.98	3.65	39.0
	1500	6.7	3.98	40.6
	2000	5.75	4.08	29.0
LY12	1000	2.75	2.48	9.71
	1500	3.71	3.25	12.5
	2000	3.17	2.68	15.4

在切削参数 $S = 2\ 000\ \text{r/min}$, $F = 100\ \text{mm/min}$, $\alpha_p = 0.5\ \text{mm}$ 条件下, C/C和 LY12表面的一些三维参数如下表 2所示,各参数的意义和计算公式见式(1)~式(8)。

表面均方根偏差 S_q

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)} \quad (3)$$

表 2 C/C和 LY12加工表面的部分粗糙度参数

Tab 2 Roughness parameters of machining surface for C/C and LY12

试样	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	S_q/S_a	$S_{ds}/\text{pks} \cdot \text{mm}^{-2}$	S_{sk}	S_{ku}	S_{tr}	S_{al}/mm
LY12	3.17	4.29	1.35	1385.4	-0.33	5.69	0.29	0.01
C/C	5.55	8.55	1.54	755.48	-3.132	33.6	0.7	0.07

从表中可看出 LY12的 S_a 与 R_a 最大相对误差只有 15%而相对误差的平均值只有 12%左右。C/C的相对误差最大达到了 40%,最小也有 29%比 LY12的最大相对误差还大,而且相对误差的平均值也达到了 36%左右。

4 结果分析

从(1)式和(2)式可以看出:采用 S_a 进行评定时在采样区域内测量了较多的点,实验中计算 S_a 参数,数据点数为 $1\ 600 \times 1\ 600$ 个;而 R_a 则只能是取某几条轮廓,或将其转化为二维轮廓包络线后计算, R_a 所测量的点较少,因而 S_a 比 R_a 反映表面微观形貌的信息更全面,更准确。

对于 C/C这类连续纤维增强的复合材料由于

表面峰高密度 S_{ds}

$$S_{ds} = \frac{\text{峰高数目}}{(M-1)(N-1) \cdot x \cdot y} \quad (4)$$

高度分布的倾斜度 S_{sk}

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j) \quad (5)$$

高度分布的陡峭度 S_{ku}

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j) \quad (6)$$

最快衰减自相关长度 S_{al}

$$S_{al} = \min\left(\sqrt{\frac{2}{x} + \frac{2}{y}}, \rho(x, y)\right) \quad (7)$$

表面纹理纵横比 S_{tr}

$$S_{tr} = \frac{S_{al}}{\text{最慢下降自相关长度}} \quad (8)$$

式中: x 、 y 分别为 x 轴和 y 轴的采样间距; x 、 y 分别为表面在任意两个正交方向的自相关长度; $\rho(x, y)$ 为表面的自相关函数。

其各相分布的不连续性使其具有明显的各向异性,经机械加工后会出现纤维断裂、纤维沿长度方向暴露或脱落、纤维头露出、纤维被从基体中拔出、纤维与基体脱粘、分层等现象,所以在已加工表面既有突出的纤维也有失去纤维的凹槽和孔洞^[2]。再者由于本实验所选的 C/C是三相正交结构,沿三个纤维方向的导热性比其他方向导热性好^[7],这样在切削热和切削力的作用下,会出现一些特殊的表面微观形貌特征,而这些又都是分布在表面一些局部信息,通过二维轮廓是不能表达清楚的,而三维参数 S_a 取点于整个区域,更全面地反映了复合材料表面微观形貌的特征,这样二维和三维测量与评定结果会有误差。根据图 1所示的 C/C切削表面形貌分析,如

果用二维参数 R_a 评定,无论是纵向还是横向取轮廓,都会丢失表面的许多信息。而对于 LY12 这样的金属材料,其切削表面的轮廓为均匀的切削进给波纹,表面均匀有规律,提取轮廓时丢失表面的信息较少。如图 2 所示的 LY12 切削表面形貌,采用二维轮廓就可达到对表面很好的近似表征,所以 LY12 切削表面二维评定与三维评定的计算差别不大。因此,选用三维评定参数能更准确、真实地表达出复合材料表面形貌的特征。

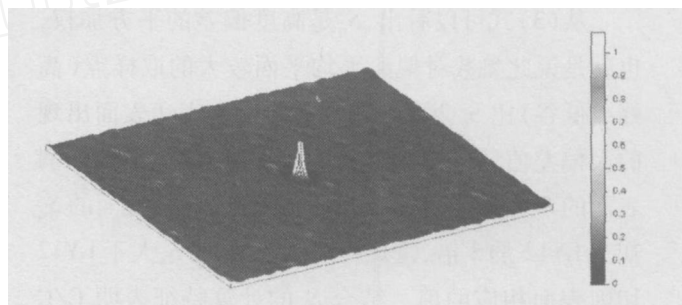
从 (4) 式可以看出: S_{ds} 可表达出表面粗糙度的间距特性,从表 2 数据中看出,LY12 的 S_{ds} 值比 C/C 大得多。结合 S_a ,说明 C/C 表面的高峰大而稀疏,而 LY12 表面高峰小而密集,通过图 1、图 2 两者的粗糙度三维形貌图也可看出,两者具有明显的差别,C/C 表面有很多由于纤维的拔出而留下的孔洞及切断的纤维回复而出现粗大的毛刺,而 LY12 表面更多的是细小的尖峰。

S_{tr} 表达表面纹理特征,当 S_{tr} 大于 0.5 时表明在各方向上具有一致的纹理形貌。相反,如果 S_{tr} 小于 0.3 时,表明表面出现了长顶或凹槽。通常,铣削普通金属材料时, S_{tr} 小于 0.3。从所测的数据上看,LY12 的 S_{tr} 为 0.29,表明 LY12 表面纹理在各方向上并不一致,因为切削塑性金属时切削过程要考虑到材料的塑性变形以及剪切变形,其破坏作用点在切削刃处,其切削表面将是刀具几何形状的复映,切削 LY12 时其表面将存在刀具的切削进给波纹。而 C/C 的 S_{tr} 不仅大于 LY12 而且达到了 0.7,表明本实验加工的 C/C 表面各方向上具有较一致的纹理特征。C/C 这类纤维增强的复合材料切削加工时,根据纤维方向的不同,可能出现剥层、挤压、剪切、拉伸、弯曲等破坏形式,而这些会使纤维的破坏点并不在切削刃处,比如挤压破坏容易出现纤维的露头,其切削破坏作用点在切削平面之上,拉伸、弯曲破坏容易使复合材料表面出现纤维拔出及凹坑,其切削破坏作用点在切削刃之下,这类复合材料的切削加工表面并非完全由刀刃直接切出。本文所选用的 C/C 为三相正交结构,其切削过程将是各种破坏作用的综

宇航材料工艺 2006 年 第 4 期

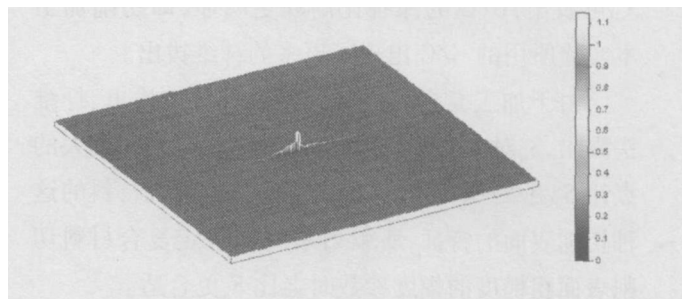
合作用的结果,因此,C/C 切削表面就没有出现切削 LY12 表面具有刀具的切削进给波纹,而更可能表现出一种随机的特点,使其 S_{tr} 大于 0.5。

图 3(a) 是 C/C 切削表面的 AACF——自相关函数图,可以看出 AACF 沿各个方向的下降速度基本一致,也表明 C/C 表面纹理较一致,没有明显的方向性。图 3(b) 则是 LY12 切削表面的 AACF 图,可以看出其沿不同的方向 AACF 下降的速度不一样,沿纹理方向下降速度最小,说明了 LY12 表面纹理在各方向上并不一致。



(a) C/C

($S = 2\ 000\ \text{r/min}$, $F = 100\ \text{mm/m in}$, $a_p = 0.5\ \text{mm}$)



(b) LY12

LY12 ($S = 2\ 000\ \text{r/min}$, $F = 50\ \text{mm/m in}$, $a_p = 0.5\ \text{mm}$)

图 3 C/C 和 LY12 切削表面的自相关函数图

Fig 3 Autocorrelation function of cutting surface of C/C and LY12

S_{at} C/C 仍然大于 LY12 表明:从频率的角度而言,C/C 相对于 LY12,C/C 表面由低频(长波长)决定,LY12 则包含有高频部分,通过 S_{ds} 也可反映这点。

从 S_{sk} 的数据上看:两表面均为负偏态分布,而

且 C/C 的值达到了 -3.132 与高斯分布的值 ($S_{sk} = 0$) 相差较大, 表明 C/C 表面出现了较多的深谷而且峰顶平坦, 圆滑而深谷较尖, 其表面的支撑性能较好。 C/C 的 S_{ku} 达到了 33.6, 远远大于高斯分布的值 ($S_{ku} = 3$) 表明 C/C 的幅度分布非常陡峭, 其轮廓尖锐。而 LY12 的 (S_{sk} 和 S_{ku}) 较接近高斯分布的参数值, 表明 LY12 的高峰和深谷都较平坦。综合 S_{sk} 和 S_{ku} 可看出, C/C 表面与 LY12 表面相比差别在于 C/C 切削表面出现了更多的深谷, 而且深谷尖而狭窄。

从 (3) 式可以看出, S_q 是高度偏差的平方加权, 也就是说此参数对偏离平均平面较大的取样点 (高峰或低谷) 比 S_a 会更敏感, 采用 S_q/S_a 表达表面出现的大偏差值情况。从表 2 的数据可看出, C/C 切削表面的 S_a 为 LY12 的 1.75 倍, 而 C/C 切削表面的 S_q 却为 LY12 的 2 倍, C/C 切削表面的 S_q/S_a 大于 LY12 切削表面相应的值。结合 S_q 的计算特征表明 C/C 的高峰或深谷或两者都较明显, 原因仍然是加工时出现了较多的纤维被拔出或纤维头露出。再结合 S_{sk} 可看出, C/C 的深谷比高峰更明显, 即切削加工本实验所用的 C/C 出现了更多的纤维拔出。

由于加工复合材料时经常出现纤维拔出、纤维头露出, S_q 对高峰或低谷这种偏离平均平面较大的点比 S_a 更敏感, 即 S_q 比 S_a 更能反映出复合材料的这种切削表面的特征, 所以当采用 S_q 评定复合材料切削表面粗糙度的幅度参数时会比 S_a 更合适。

5 结论

(1) C/C 切削表面粗糙度的三维参数 S_a 与二维参数 R_a 相差较大, 而 LY12 则相差较小, 对复合材料采用二维轮廓来表达表面粗糙度时, 将丢失表面的很多信息, 选用三维评定参数能更全面、更真实表达复合材料的表面形貌。

(2) 通过 S_a 、 S_q 、 S_{sk} 、 S_{ku} 、 S_{tr} 、 S_{al} 等参数表达出 $C/$

C 与 LY12 的切削表面粗糙度差别, 本实验切削的 C/C 表面与 LY12 表面相比, 表面纹理在各方向上一致, 表面具有较多的深谷, 而且深谷尖而狭窄, 并且包含有大波长部分等。

(3) 在切削纤维增强的复合材料过程中由于经常出现纤维的露头与拔出现象, 而 S_q 对高峰和深谷更敏感, 所以对于复合材料切削表面粗糙度评定的幅度参数选择, S_q 比 S_a 会更合适。

复合材料的切削表面形貌不同于普通金属材料, 金属切削表面粗糙度的评定标准已不能完全适用, 需要建立一种新的评定方法, 以满足复合材料日益广泛应用的需要。

参考资料

- 1 胡宝刚, 杨志翔, 杨哲. 复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势. 宇航材料工艺, 2000; 30(5): 24~27
- 2 全燕鸣, 曾志新, 叶邦彦. 复合材料的切削加工表面质量. 中国机械工程, 2002; 13(21): 10~11
- 3 Sang-Ook An, Eun-Sang Lee, Sang-Lai Noh. A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries. Journal of Materials Processing Technology, 1997; 68: 60~67
- 4 Sahina Y, Kokb M, Celik H. Tool wear and surface roughness of Al_2O_3 particle-reinforced aluminium alloy composites. Journal of Materials Processing Technology, 2002; 128: 280~291
- 5 Stout K J. Development of method for the characterization of roughness in three dimensions. British: Penton press, 2000: 221~242
- 6 毛起广. 表面粗糙度的评定和测量. 北京: 机械工业出版社, 1991: 27~37
- 7 邹林华, 黄白云, 黄启忠等. C/C 复合材料的导热系数. 中国有色金属学报, 1997; 7(4): 132~135

(编辑 任涛)