

碳/碳复合材料机械加工残余应力 实验研究与规律分析

王新永 方 胜 陈旭辉

(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

文 摘 采用适宜于测试复合材料的残余应力测试方法——钻孔法,通过二次通用旋转组合设计实验,采用电镀金刚石刀具铣磨加工碳/碳复合材料,选取切削深度、切削宽度、切削速率、进给量四个因素进行实验。实验结果分析表明,回归得到基于二次多项式的数学模型,进一步分析了残余应力随各加工参数的变化规律,整体寻优得到了残余应力的极值。研究表明,铣磨加工碳/碳复合材料,残余应力皆为压应力。伴随着切削速率的增长,残余应力存在渐进值。本次实验中,残余应力趋于-16 MPa 稳定。伴随着切削宽度、切削深度、进给量的增大,机械加工残余应力表现为先增大后减小(压应力即残余应力的绝对值先减小后增大)。本次实验中,各加工参数的变化分界点分别为:切削宽度 $a_w=6$ mm;切削深度 $a_p=0.5$ mm;进给量 $f=200$ mm/min。

关键词 残余应力,铣磨加工,碳/碳复合材料

Experimental and Theoretical Investigation on Residual Stress in Machining of C/C Composites

Wang Xinyong Fang Sheng Chen Xuhui

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of
Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The residual stress caused by machining directly related to machining deformation and machining damage. Being limited to measuring technique of machining residual stress and characteristics of composite, there are seldom paper about machining residual stress on composites. In this paper, hole-drilling method that is suitable for measuring the machining residual stress of composites has been adopted. C/C composites are machined by means of milling-grinding. The cutting tool is grinding head that is electroplating emery on, by means of quadratic general rotary unitized design. Four factors including cutting speed, cutting width, cutting depth and feed are selected for this experiment. The regression mathematical model based on quadratic polynomial is obtained through the analysis of experimental results. The variation of machining residual stress along with the change of processing parameters is analyzed. The extreme value is obtained by searching optimization. It shows that machining residual stress is all compressive stress. Along with the increase of the cutting speed, residual stress tends to an asymptotic values that is -16MPa in this experiment. Along with the increase of the cutting width, cutting depth and feed, residual stress first increased and then decreased. The demarcation of parameters are cutting width: $a_w=6$ mm; cutting depth: $a_p=0.5$ mm; feed: $f=200$ mm/min.

Key words Residual stress, Milling-grinding, C/C composites

0 引言

零件中的残余应力往往处于一种很不稳定的相

对平衡状态,在外界因素的影响下很容易失去原有状态,使残余应力重新分布,导致零件产生相应的变形,从而破坏原有的加工精度。加工残余应力是机械加工中大尺寸部件加工变形的主要影响因素^[1]。对于硬脆性材料,残余应力决定了裂纹、缺陷等损伤^[2-9]。

碳/碳复合材料以其优异的比强度、比模量、耐烧蚀性能成为航空航天领域中关键部件(如火箭尾喷管、喉衬等)的首选材料,特别是在结构上满足力学性能要求时,已逐步应用于大尺寸结构部件。但复合材料成型制备后,实际应用中仍然需要机械加工以达到尺寸精度与表面质量要求^[10]。

伴随着碳/碳复合材料应用的日益广泛,大尺寸部件逐渐增多,加工变形问题成为加工控制中的难题;碳/碳复合材料属于硬脆性材料,在机械加工中易出现裂纹、缺陷等损伤,此类加工缺陷将降低材料性能。

限于复合材料的特殊性、加工残余应力的分布规律相对复杂、残余应力测试的不稳定性,复合材料加工残余应力的研究在加工领域内研究极少。

本文采用适宜于测试复合材料的残余应力测试方法——钻孔法,采用二次旋转方法设计实验,对实验结果分析,拟合残余应力的数学模型,进一步验证模型的可靠性。分析残余应力与各加工参数的相互

关系,为解决碳/碳复合材料加工缺陷以及大尺寸部件的加工变形问题提供依据。

1 实验

1.1 材料

试件材料为碳/碳复合材料。每一组加工参数对应的试件形状为 20 mm×20 mm×15 mm 的方块,实验前首先对试件进行尺寸标准化处理,然后通过时效去除已有残余应力。

1.2 实验条件

实验在立式加工中心上进行,刀具为非标定制的 Φ10 mm 电镀金刚砂刀具,基体为 45# 钢调质,60 目金刚砂;干切削。

1.3 测量方法及设备

根据各种残余应力的测试原理以及复合材料的材料特性,选取钻孔法测量加工残余应力。钻孔法的测量精度高,操作简单方便,应用广泛^[11-15]。

采用 3 个应变片组成的应变花,将其粘贴在预测工件的表面,在应变花中心钻一小孔,使局部应力释放。应变片感受应变变化,通过弹性力学公式可得到在孔深范围内的主应力。

采用西格玛公司的 ASM7.0 准动态应力、应变监测仪及 RSD1 打孔机。残余应力测量结果取最大主残余应力,测量中各参数设置见表 1。

表 1 打孔法测量参数设置表

Tab. 1 Parameter setting in hole-drilling method

弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	释放系数 A	释放系数 B	应变花夹角 /(°)	孔心片心距 /mm	孔半径 /mm	应变片 灵敏度
41	0.29	-0.058	-0.164	45	2.5	0.75	2.08

2 实验设计及结果分析

2.1 方法设计

通过前期试验研究发现,复合材料加工残余应力与各加工参数的相互关系相对复杂,呈非线性;且各参数之间存在交互作用影响。因此实验设计时,需要具有旋转性以消除寻找最佳工艺过程中的误差干扰,从而避免实验之前不能预先知道最佳工艺条件在因素空间的哪一个方向上。

二次通用旋转组合设计就是使试验测试点距试验中心点距离相等的球面上,各点回归方程预测的方差相等。在旋转设计中,预测值的方差仅与试验点到试验中心点的距离有关,而与方向无关。距离越远,方差越大。二次通用旋转组合设计一方面基本保留了回归正交设计的优点,即试验次数少,计算简便,部分地清除了回归系数间的相关性,即牺牲部分的正交性而获得旋转性;另一方面,有助于克服回归正交设计宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

计中二次回归预测值的方差依赖于试验点在因子空间中位置的缺点。为尽量减少实验次数而又能得到精确度较高的实验结果,本实验采用二次通用旋转组合设计实验方法研究切削速率、切削宽度、切削深度、进给量与残余应力之间的关系,以建立以残余应力为目标函数的数学模型,以便能为碳/碳复合材料加工残余应力的分析与控制提供依据。

依据实际生产经验,合理确定各加工参数的零水平以及变化区间,具体见表 2。

表 2 各因素零水平及变化区间表

Tab. 2 Zero horizontal and change block of various factors

因素	切削速率 /mm·min ⁻¹	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	进给量 /mm·min ⁻¹
零水平	800	6	0.5	200
变化区间	300	2.5	0.2	80

2.2 实验结果

依据最优化设计及统计原理,确定各次实验参数 性变换,构建实验结构矩阵。实验设计编码矩阵及测 的分布以及实验次数,将各因素转化为规范变量的线 试结果见表 3。

表 3 实验设计编码矩阵及实验结果

Tab. 3 Encoding matrix and experimental results

序号	设计编码矩阵				切削转速 /r·min ⁻¹	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	进给量 /mm·min ⁻¹	残余应力 /MPa
	切削速率	切削宽度	切削深度	进给量					
1	1	1	1	1	1094	8.39	0.695	278.3	-64.4106
2	1	1	1	-1	1091	8.47	0.698	118.8	-64.5573
3	1	1	-1	1	1078	8.31	0.292	272.48	-55.6555
4	1	1	-1	-1	1066	8.25	0.292	116.9	-56.5519
5	1	-1	1	1	1100	3.50	0.700	280.0	-59.499
6	1	-1	1	-1	1137	3.61	0.723	123.4	-58.2879
7	1	-1	-1	1	1091	3.45	0.295	278.0	-52.2394
8	1	-1	-1	-1	1105	3.49	0.302	120.4	-49.1962
9	-1	1	1	1	494	8.42	0.693	276.64	-87.6168
10	-1	1	1	-1	505	8.53	0.703	121.0	-88.2569
11	-1	1	-1	1	490	8.27	0.295	274.9	-79.7056
12	-1	1	-1	-1	495	8.35	0.296	118.4	-80.0928
13	-1	-1	1	1	497	3.48	0.697	278.0	-82.0884
14	-1	-1	1	-1	498	3.47	0.693	118.5	-80.3786
15	-1	-1	-1	1	490	3.43	0.294	274.7	-75.2327
16	-1	-1	-1	-1	485	3.40	0.292	116.4	-77.167
17	-1.98	0	0	0	200	5.99	0.498	198.3	-65.5291
19	2.04	0	0	0	1447	6.16	0.517	205.1	-20.7424
19	0	-1.98	0	0	794	0.99	0.497	196.9	-69.8135
20	0	2.01	0	0	805	11.00	0.499	200.8	-84.5299
21	0	0	-1.96	0	793	5.94	0.099	197.1	-69.886
22	0	0	2.01	0	807	6.04	0.903	201.0	-85.2331
22	0	0	0	-1.96	785	5.89	0.487	39.1	-82.212
24	0	0	0	1.96	791	5.94	0.495	356.9	-84.0034
25	0	0	0	0	797	5.98	0.498	199.2	-24.2344
26	0	0	0	0	790	5.94	0.498	198.9	-24.4355
26	0	0	0	0	781	5.84	0.490	196.2	-24.58
27	0	0	0	0	775	5.79	0.486	194.8	-24.7492
29	0	0	0	0	800	5.98	0.499	199.5	-24.1597
31	0	0	0	0	825	6.20	0.516	206.8	-24.225
31	0	0	0	0	788	5.95	0.495	198.5	-24.5221

2.3 回归模型建立

根据二次回归分析原理,对4个变量的二次数学模型的构造为:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^4 b_j x_j + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^4 b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

按照式(1)对实验矩阵及结果采用二次多项式模型进行二次回归分析,建立残余应力为响应,切削转速、切削宽度、切削深度与进给量为变量的二次数学模型。

$$\sigma = 24.42 + \begin{bmatrix} 11.655 \\ -3.008 \\ -3.748 \\ -0.231 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} n \\ a_w \\ a_p \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.545 \\ -13.054 \\ -13.151 \\ -14.538 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} n^2 \\ a_w^2 \\ a_p^2 \\ f^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.072 \\ -0.436 \\ -0.279 \\ -0.401 \\ 0.381 \\ -0.144 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} na_w \\ na_p \\ nf \\ a_w a_p \\ a_w f \\ a_p f \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, σ 主残余应力; n 转速(刀具直径 $\Phi 10$ mm); a_w 切削宽度; a_p 切削深度; f 进给量。

对数学模型进行失拟性及系数显著程度进行检验,方差分析见表4。

表4 数学模型方差分析表
Tab.4 Variance analysis on mathematical model

变异来源	平方和	自由度	均方	偏相关	比值 F	p 值
n	3214.1865	1	3223.8913	0.9867	2637.2101	0.0001
a_w	218.0295	1	219.9894	-0.9687	179.9292	0.0001
a_p	333.6684	1	332.7703	-0.9530	272.6477	0.0001
f	1.2632	1	1.2721	-0.2451	1.0380	0.3195
n^2	582.7000	1	587.6685	-0.9733	478.6605	0.0001
a_w^2	4794.7272	1	4770.8624	-0.9820	3911.6001	0.0001
a_p^2	4805.9760	1	4813.5629	-0.9640	3931.6118	0.0001
f^2	5991.3123	1	6005.0055	-0.9920	4892.7279	0.0001
na_w	0.0829	1	0.0825	-0.0649	0.0675	0.8006
na_p	3.0083	1	3.0104	-0.3620	2.4623	0.1337
nf	1.2114	1	1.2175	-0.2392	0.9857	0.3193
$a_w a_p$	2.5902	1	2.5914	-0.3433	2.1075	0.1674
$a_w f$	2.3025	1	2.2968	0.3219	1.8815	0.1845
$a_p f$	0.3377	1	0.3366	-0.1309	0.2756	0.6151
回归	16760.6149	14	1198.1178	$F_2 = 989.40659$		0.0001
剩余	19.4117	16	1.2150			
失拟	19.1900	10	1.9147	$F_1 = 40.64788$		0.0001
误差	0.2793	6	0.0464			
总和	16437.0255	29				

分析方差表,通过 p 值确定显著水平,绝大部分系数 $p < 0.01$,极显著;各个参数二次效应极显著;当

某一因子水平上的响应依赖于其他因子的水平时,即表示存在交互作用。对各个参数的交互作用进行分

析,分析结果见图1。

交互作用图基于所有水平组合的数据,图中显示数据点散乱程度较大,只有少部分数据点可以拟合出趋势线。且各个趋势线间几乎不存在平行关系,则表示存在明显的交互作用。

方差分析中偏向关 $F_2 \gg F_1$,可见二次多项式回归数学模型与实际拟合的较好,可以用来预报。

设置剔除回归方程的不显著系数的显著水平为 0.1,剔除不显著项后,简化后的回归方程:

$$\sigma = 24.42 + \begin{bmatrix} 11.655 \\ -3.008 \\ -3.748 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} n \\ a_w \\ a_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.545 \\ -13.054 \\ -13.151 \\ -14.538 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} n^2 \\ a_w^2 \\ a_p^2 \\ f^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过二次多项式回归数学模型预测碳/碳复合材料加工残余应力,进而与实验测量值对比分析,分析结果见图2。可见,数据序列的变化趋势完全相同,表明拟合方法适宜,回归数学模型可信。

进一步对拟合值与测量值做残差分析,具体分析结果见图3。

残差分布符合典型的正态分布规律,正态对称基线在零值附近。残差波动性较小,约为 0.008 ~ 0.004,且在实验设计的回转中心的若干组实验数据的残差几乎为零,说明拟合值与测量值吻合程度极高,回归模型精度满足要求。

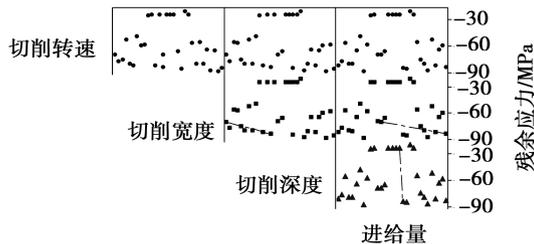


图1 各参数交互作用分析图

Fig.1 Interaction of various parameters

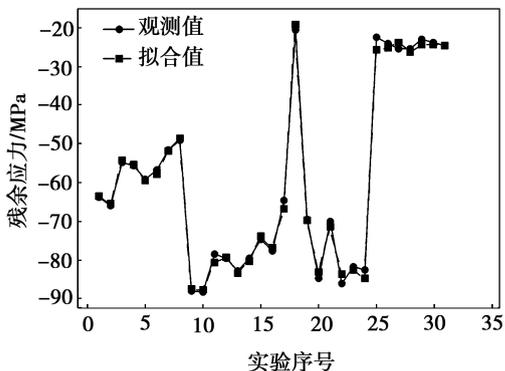
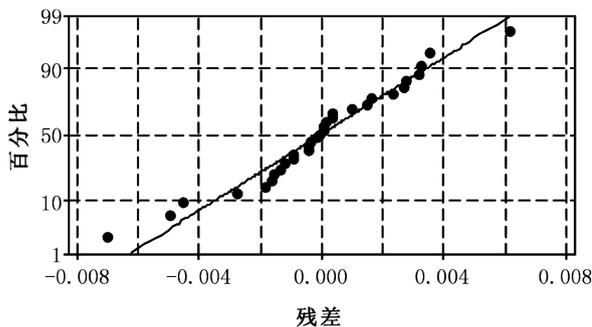
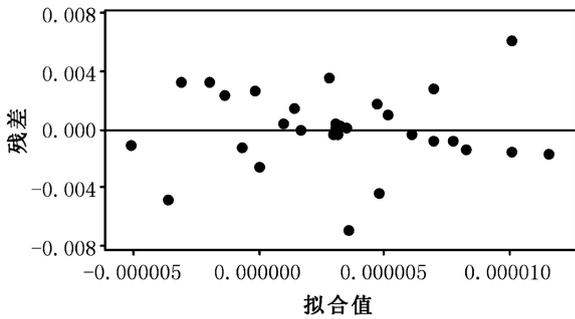


图2 观测值—拟合值对比分析图

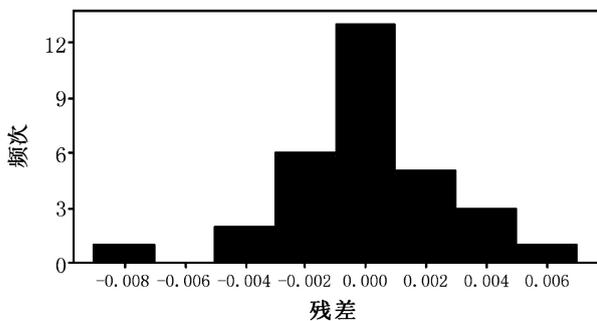
Fig.2 Comparative analysis between measured value and fitted value



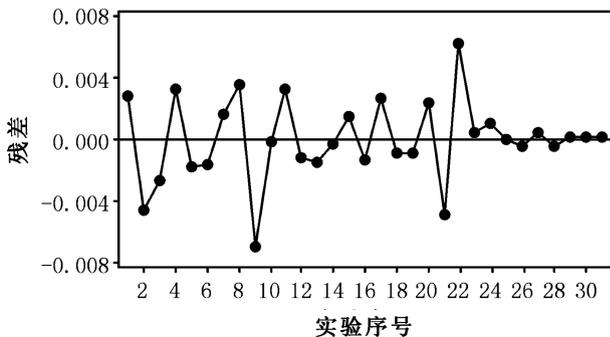
(a) 正态频率



(b) 对比拟合值



(c) 概率分布直方图



(d) 对比实验顺序

图3 回归拟合残差分析

Fig.3 Residual analysis of regression fitting

2.4 实验规律分析

2.4.1 主效应分析

由于设计中各因素均经过无量纲线性编码处理,偏回归系数已经标准化,其绝对值大小可直接反映变量对考核指标的影响程度。通过式(2)可判断,4个因素对碳/碳复合材料机械加工残余应力的影响大小顺序为: $n > a_w > a_p > f$,即本实验条件下,决定其加工残

余应力的各因素主效应作用顺序为切削速率>切削宽度>进给量,其中后三者均为负效应,而切削速率的影响为正效应。

2.4.2 单因素分析

某一参数变化下碳/碳复合材料机械加工残余应力的变化如图4所示。

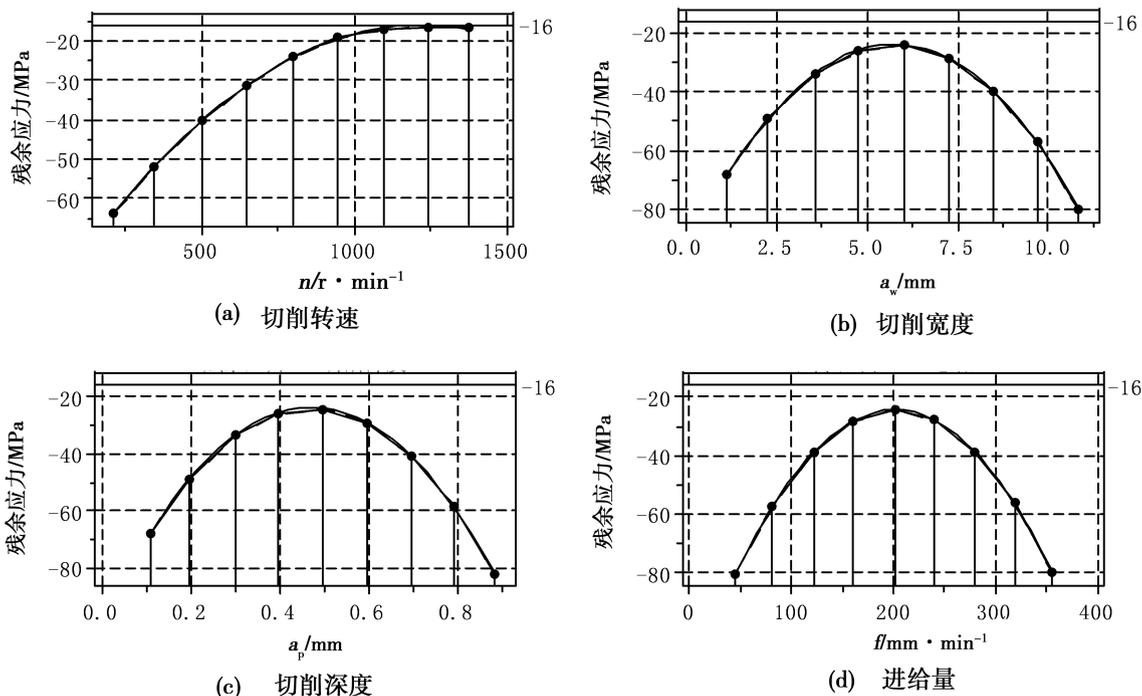


图4 残余应力与各加工参数的关系

Fig. 4 Relationship between residual stress and processing parameters

根据图4可分析出,用电镀金刚砂铣磨碳/碳复合材料时,无论切削参数如何变化,在本次实验的条件下,残余应力皆为负值即为压应力。以类似硬脆性材料-工程陶瓷做对比,压应力的存在对于保持材料的力学性能有利^[16-17]。当切削转速增大时,残余应力逐渐增大,即压应力逐渐减小。并且伴随着切削速率的增大,当 $n > 1200 \text{ r/min}$ (线速率 $v = 377 \text{ m/min}$)时,残余应力增大的趋势逐渐缓慢,存在一个渐进值,通过数值处理,可以分析出残余应力逐渐逼近-16 MPa。

伴随着切削宽度、切削深度、进给量的增大,机械加工残余应力表现为先增大后减小。

各加工参数的变化分界点分别为:切削宽度 $a_w = 6 \text{ mm}$;切削深度 $a_p = 0.5 \text{ mm}$;进给量 $f = 200 \text{ mm/min}$ 。

2.4.3 交互作用分析

分别选取四个参数中的两个参数进行两两交互分析,未选取的参数取零水平固定值。各交互作用如

图5~图10所示。

分析切削速率分别与切削宽度、切削深度及进给量的交互作用,可以发现由于单因素分析中伴随着切削速率的增加,残余应力存在一个渐进值,所以相应曲面中有最大值趋近,最大值趋向,反映到等值线中残余应力最大值的区域存在与实验条件内切削速率的最高值。并且整个响应曲面与等高线图以 $a_w = 6 \text{ mm}$ 、 $a_p = 0.5 \text{ mm}$ 、 $f = 200 \text{ mm/min}$ 为分界呈现近似对称。

分析切削宽度、切削深度及进给量的两两交互作用,可以发现由于单因素分析中伴随着切削宽度、切削深度及进给量的增加,残余应力存在一个极值,所以相应曲面中的最大值出现在大约中心的位置,反映到等值线中残余应力的分布近似为以参数 $a_w = 6 \text{ mm}$ 、 $a_p = 0.5 \text{ mm}$ 、 $f = 200 \text{ mm/min}$ 为中心的同心圆,越靠近中心残余应力值越大(压应力越小),远离中心残余应力值逐渐减小(压应力值逐渐增大)。

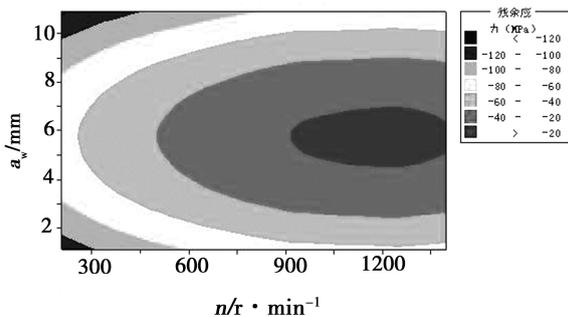
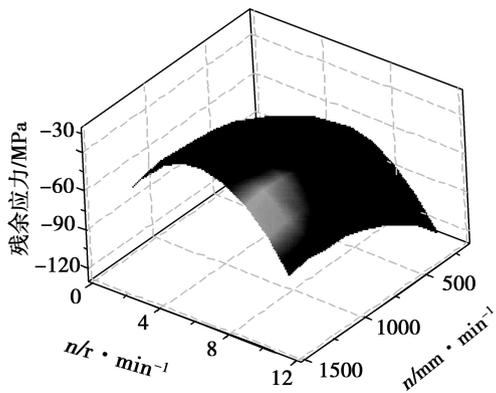


图5 残余应力响应曲面与等值线图(切削速率—切削宽度)

Fig. 5 Respond surface and isolines of residual stress (cutting speed—cutting width)

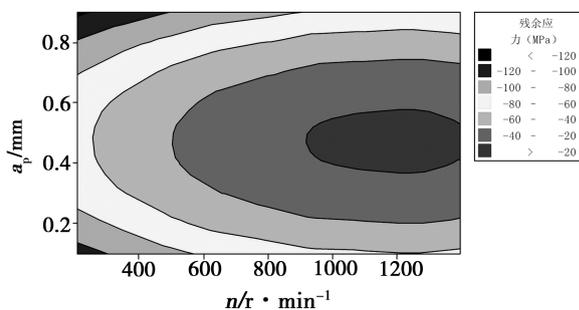
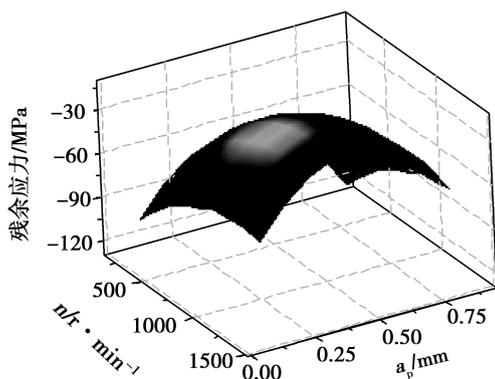


图6 残余应力响应曲面与等值线图(切削速率—切削深度)

Fig. 6 Respond surface and isolines of residual stress (cutting speed—cutting depth)

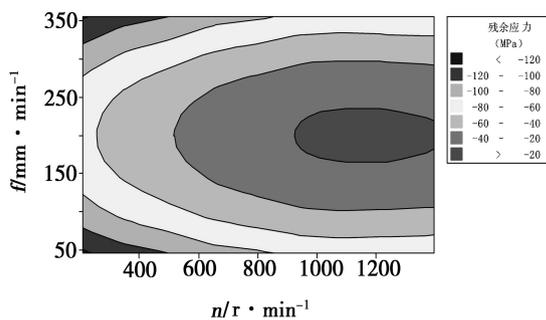
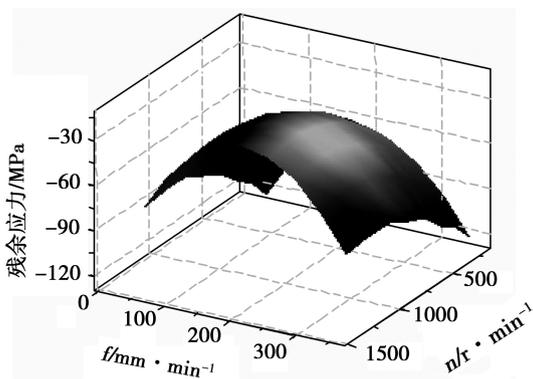


图7 残余应力响应曲面与等值线图(切削速率—进给量)

Fig. 7 Respond surface and isolines of residual stress (cutting speed—feed)

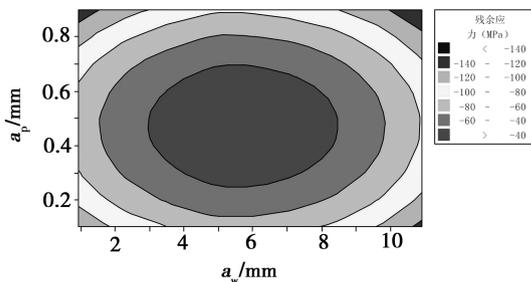
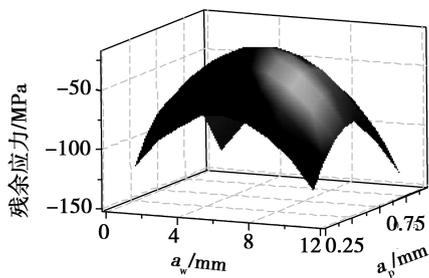


图8 残余应力响应曲面与等值线图(切削宽度—切削深度)

Fig. 8 Respond surface and isolines of residual stress (cutting width—cutting depth)

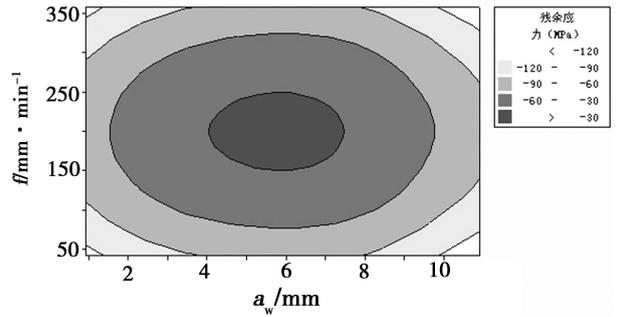
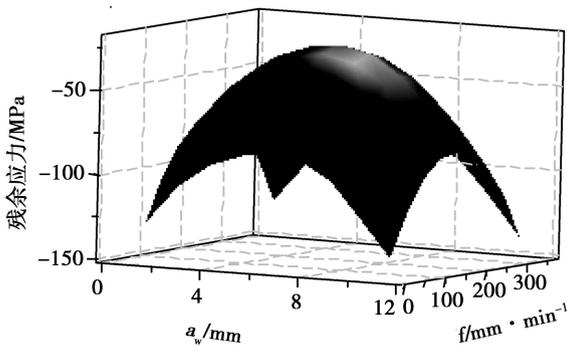


图9 残余应力响应曲面与等值线图(切削宽度—进给量)

Fig. 9 Respond surface and isolines of residual stress (cutting width—feed)

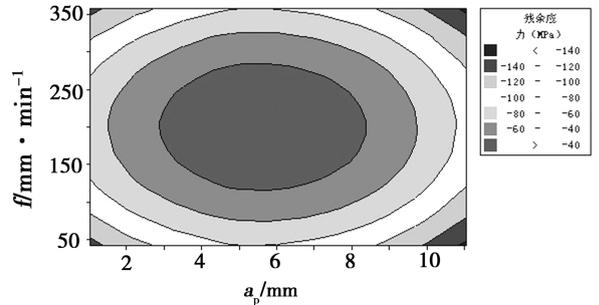
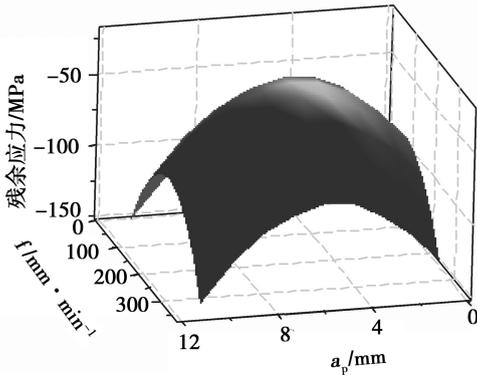


图10 残余应力响应曲面与等值线图(切削深度—进给量)

Fig. 10 Respond surface and isolines of residual stress (cutting depth—feed)

2.4.4 整体寻优分析

依据二次多项式回归数学模型,采用单纯形法对包络实验条件下所有参数范围进行整体寻优,计算得到残余应力整体最大值,即压应力最小值,见表5。

表5 残余应力单纯形法整体寻优(压应力最小值)

Tab. 5 Searching optimization by simplex method for residual stress

$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	a_p/mm	a_w/mm	$f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	σ_{\min}/MPa
1095.68	0.5	6	200	-15.9838

参考类似的硬脆性材料—工程陶瓷残余应力对材料及部件力学性能的影响研究,压应力的存在对于保持材料的力学性能有利^[17]。所以,获取此参数范围内的残余应力极值,对于加工参数优化,控制残余应力的大小种类,并进一步改善大尺寸薄壁类零部件的加工变形以及降低机械加工对材料性能的损伤具有重要的价值。

3 机理简析

分析加工参数对加工残余应力的影响规律以及宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第4期

其成因。

当 $a_p < 0.5 \text{ mm}$ 或 $a_w < 6 \text{ mm}$ 时,残余应力呈增量关系;当 $a_p > 0.5 \text{ mm}$ 或 $a_w > 6 \text{ mm}$ 时,残余压应力开始下降。因为切削深度、切削宽度较小时,磨粒刃口较锋利且不易磨损,试件表面在磨粒刃口的作用下迅速发生微脆性断裂从而去除表面,因此残余应力的增长取决于刀具微观接触,随着切削深度与切削宽度的增加,磨刃与试件材料磨损加剧,使比磨削能增大,切削温度迅速升高,从而使残余应力向拉伸方向发展,即残余压应力数值呈下降趋势。当切削宽度与切削深度增大到某一临界值后(如本实验条件下, $a_w = 6 \text{ mm}$; $a_p = 0.5 \text{ mm}$),切削温度趋于稳定值,残余应力拉伸效应不增加,整体残余应力向压应力增长,表现为残余应力减小。

实验结果中, f 也存在对应的残余应力极大值。分析原因,由于在工件进给速率较小时,磨粒与试件的摩擦使热应力的影响占主导地位,从而残余应力向着拉伸方向发展,即残余应力数值呈增大趋势。当 f 增大到某一数值数值时(如本实验条件下 $f = 200 \text{ mm/min}$)磨粒刃挤压效应取决定作用,残余压应力

增长,残余应力增大。

残余应力随切削速率的提高而提高,研究发现 $n > 1$ 200 r/min (线速率 $v = 377$ m/min) 时变化趋缓。分析原因,随着 v 提高,单颗金刚石磨粒的平均未变形切屑厚度减小,磨削温度下降,挤压效应占主导地位。同时,单位时间内参与切削的磨粒数增加,热脉冲次数增加,使磨削热效应与挤压效应并存,故残余应力会趋于某一稳定值。

4 结论

本文通过采用电镀金刚石刀具铣磨加工碳/碳复合材料,通过二次通用旋转组合设计实验,获得各加工参数下的残余应力,回归得到基于二次多项式的数学模型,进一步分析了残余应力随各加工参数的变化规律,整体寻优得到了残余应力的极值,总结结论如下:

(1) 较系统地分析了碳/碳复合材料的机械加工残余应力,采用二次通用旋转组合设计并进一步回归得到显著性极高的二次多项式的数学模型;

(2) 铣磨加工碳/碳复合材料,残余应力皆为压应力;

(3) 伴随着切削速率的增长,残余应力存在渐进值。本次实验中,残余应力趋于 -16 MPa 稳定;

(4) 伴随着切削宽度、切削深度、进给量的增大,机械加工残余应力表现为先增大后减小(压应力即残余应力的绝对值先减小后增大)。本次实验中,各加工参数的变化分界点分别为:切削宽度 $a_w = 6$ mm; 切削深度 $a_p = 0.5$ mm; 进给量 $f = 200$ mm/min。

参考文献

[1] Ralan M, Ramakrishna S, Prakash J R S, et al. Machinability study of carbon fiber reinforced composite [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89/90: 292-297

[2] 田欣利, 林彬. 陶瓷磨削表面残余应力对零件强度的影响研究 [J]. 机械科学与技术, 2002(1): 114-115

[3] 田欣利, 于爱兵. 陶瓷磨削残余应力对表面性能的影响 [J]. 机械科学与技术, 2002(7): 615-616

[4] Dea K, et al. Application of fracture mechanics in micro-cutting of engineering ceramics [J]. Annals of the CIRP, 32(1): 81-86

[5] Johnson walls D, et al. Residual stresses in machined ceramic surface [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1989, 69(1): 44-47

[6] Kirchner H P. Residual stresses in hot-pressed Si_3N_4 grooved by single-point grinding [J]. Am. Ceram. Soc., 1982, 65(1): 55-60

[7] Fuller E R. Theory of fatigue for brittle flaws originating from residual stress concentrations [J]. Am. Ceram. Soc., 1983, 66(5): 314-319

[8] Marshall D B. Flaw characteristics in dynamic fatigue: the influence of residual contact stresses [J]. Am. Ceram. Soc., 1980, 63(10): 532-536

[9] 于思远, 林彬. 工程陶瓷超精密磨削表面质量的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002(5): 12-16

[10] Sreejith P S, Krisnamurthy R, Malhotra S K, et al. Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104: 53-58

[11] Bert C W, Thompson G L. A method for measuring planar residual stresses in rectangularly orthotropic materials [J]. J Compos Mater, 1968, 2(2): 244-253

[12] Prasad C B, Prabhakaran R, Tompkins S. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites-Part I: Theoretical considerations [J]. Compos Struct, 1987, 8(2): 105-118

[13] Prasad C B, Prabhakaran R, Tompkins S. Determination of calibration constants for the hole-drilling residual stress measurement technique applied to orthotropic composites-Part II: Experimental evaluations [J]. Compos. Struct., 1987, 8(3): 165-172

[14] Schajer G S, Yang L. Residual stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method [J]. Exp. Mech., 1994, 34(4): 324-333

[15] Sicot O, Gong XL, Cherouat A, Lu J. Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method [J]. J Compos. Mater., 2003, 37(9): 831-844

[16] 郭正. 宇航复合材料 [M]. 北京: 宇航出版社, 1999: 70

[17] 刘伟香. 工程陶瓷磨削表面残余应力与磨削条件及零件性能的关系研究 [J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2006, 19(3): 64-67

(编辑 任涛)