



复合材料· 上海科学技术与应用

——第二届上海复合材料学术会议论文集

孙宝忠 主编

东华大学出版社

复合材料· 上海科学技术与应用

——第二届上海复合材料学术会议论文集

孙宝忠 主编

東華大學出版社

·上海·

图书在版编目(CIP)数据

复合材料·上海科学技术与应用:第二届上海复合材料学术会议论文集/孙宝忠主编. —上海:东华大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5669-1225-1

I. ①复… II. ①孙… III. ①复合材料-学术会议-文集 IV. ①TB33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 132668 号

责任编辑:张 静

封面设计:魏依东

出 版: 东华大学出版社(上海市延安西路 1882 号,200051)

本 社 网 址: <http://www.dhupress.net>

天 猫 旗 舰 店: <http://dhdx.tmall.com>

营 销 中 心: 021-62193056 62373056 62379558

印 刷: 当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 11.25

字 数: 286 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5669-1225-1

定 价: 79.00 元

大会组织结构(按姓氏汉语拼音为序):

大会名誉主席:孙晋良(院士)

大会主席:俞建勇(院士)

大会执行主席:沈卫国

大会副主席:陈磊 李爱军 刘卫平 余木火 张荻 郑安呐 仲政

大会秘书长:孙宝忠

大会副秘书长:陈萍 杨洋

大会学术委员会:

主任:姜丽萍

副主任:陈磊 李爱军 刘卫平 余木火 汪海 郑安呐 张荻 仲政

委员:陈磊 陈瑞斌 陈士信 戴瑛 董建东 董绍明 冯锦璋 冯奇
顾海麟 郭卫红 何大海 侯一斌 胡福增 胡寿丰 胡仲杰 黄发荣
黄翔宇 姜丽萍 居建国 李爱军 李智慧 李建岗 林晓 刘昌胜
刘卫平 刘坐镇 陆明炯 陆企亭 莫凡 钱建华 邱孜学 任慕苏
沈利新 孙宝忠 孙达 谭松培 汪海 王浩伟 王强华 王士维
王永珍 王志强 吴向阳 谢丹 徐哲军 姚其胜 叶周军 俞建勇
余木火 虞红 俞麒峰 袁国青 苑玲 张荻 张锦南 张良年
张王根 张勇 郑安呐 仲政 周民 朱永茂

大会组织委员会:

主任:刘卫平

副主任:孙宝忠 刘坐镇

委员:陈萍 杨洋

大会秘书组:

组长:陈萍

副组长:杨洋 谢中亚 韩哲宇 黄朝阳

成员:孙泽玉 姚艳波 何勇 见雪珍 潘利剑 张佳锦 袁协尧 裴剑青

前 言

为搭建上海复合材料领域沟通平台,交流该领域内具有创新性的学术论文和创新成果,把握复合材料发展的最新动向,进一步加大复合材料的研究深度和应用广度,以推动上海复合材料领域的学科提升、技术创新与产业发展,上海市复合材料学会、上海复合材料产业技术创新战略联盟和上海市民用航空复合材料结构制造工程技术研究中心联合主办了第二届上海复合材料学术会议,于2016年12月16日在上海召开,会议主题为“复合材料·上海科学技术与应用”。本届会议由上海飞机制造有限公司和东华大学民用航空复合材料协同创新中心联合承办。

为了开好本届会议,会前主办和承办单位组织了有关论文的征集工作,在上海各高校、复合材料企业、上海市复合材料学会各分会等单位的广大科技工作者和在读研究生的大力支持下,共征集33篇论文,经专家评审委员会评审,论文集收录其中的22篇论文。在本届会议上公开的论文反映了上海复合材料科技工作者在复合材料领域孜孜不倦地探索研究所取得的科研成果。

期望通过论文集的出版,为上海复合材料的研究和发展提供参考,并能促进上海复合材料的发展。

在这里请允许我代表上海市复合材料学会向论文作者及参与论文评阅、编辑的全体同志表示崇高的敬意和衷心的感谢!向东华大学民用航空复合材料协同创新中心为论文集的出版提供资助表示感谢!

由于征文、投稿、审稿、编校等工作环节的时间比较紧张且衔接上存在一些问题和困难,故本论文集的出版尚有不少不尽如人意之处,诚望论文作者和广大读者予以谅解。

孙宝忠

2017年3月

目 录

碳纤维复合材料表面铣削加工性能研究·····	龚佑宏	韩 舒	晏冬秀	刘卫平(1)		
无铆钉连接技术的研究进展·····	程一聊	莫 凡	彭亚南	毛才文(14)		
自动铺丝技术及其在飞机复合材料构件制造中的应用·····	闫 超			陈 萍(24)		
常规和 Z-pin 复合材料加筋板面内剪切屈曲破坏过程分析·····	邹海浩			戴 璜(30)		
高温老化对三维角联锁复合材料低速冲击性能的影响 ·····	王明玲	曹 森	王海楼	孙宝忠(36)		
端氨基聚醚改性环氧树脂应用于环氧胶膜性能研究·····	欧 涛			刘龙江(44)		
MERICAN 3767/T800 碳纤维预浸料研究 ·····	钱建华	黄 锐	付建辉	陈建辉	刘坐镇(49)	
P2352W-19 预浸料与可剥布匹配性研究·····	陈璐圆	顾灵聪	王 旭		陈 萍(57)	
MERICAN 3768 液体成型高性能环氧树脂研究 ·····	钱建华	付建辉	黄 锐	陈建辉	陈见仁	刘坐镇(64)
压痕 SMA 丝智能复合材料梁的变形性能研究·····	白艳洁					袁国青(75)
开孔玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料拉伸性能研究 ·····	董玉莹	怀栖铭	阳玉球			张志远(81)
某型歼击机复合材料边条翼的优化设计研究·····	陈 祺	袁国青				朱 珊(91)
界面层厚度对 2D-C/SiC 复合材料组分力学性能的影响·····						郭洪宝(98)
深冷处理对碳纤维/环氧树脂复合材料的性能影响 ·····	高 扬	范王玺子	姜鸿洋	王研岩		许福军(109)
热处理对碳纤维织物增强聚醚醚酮(CFF/PEEK)复合材料力学性能的影响 ·····	曹 硕	张 铠	张 照	朱 姝		余木火(117)
碳纳米管/聚二甲基硅氧烷弹性复合材料的力学和电学性能 ·····	谢 惺	李雅倩	周梦婕			许福军(123)
玻璃纤维/热塑性复合材料机械连接接头尺寸设计研究 ·····	王永利	侯宗婧	阳玉球			(131)
一种碳化硅陶瓷基复合材料的弯曲强度分析·····	伍海辉					郭洪宝(138)
炭黑对高密度聚乙烯膜材料光氧老化性能的影响·····	张 敏	杨旭东				胡吉永(144)
基于三维机织间隔复合材料的微带天线的仿真、制备和性能研究 ·····	张 昆	朱鸿飞	许齐耘	周梦婕	王义斌	许福军(152)
苎麻增强聚丙烯复合材料的界面改性和理论建模·····	杜永灿	孙宝忠				章 倩(159)
复合材料 VARI 工艺试验教学探索·····	张 匆	董国华				袁国青(170)

碳纤维复合材料表面铣削加工性能研究

龚佑宏 韩舒 晏冬秀 刘卫平

(上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

摘要: 由于复合材料结构零件的外形精度很难控制,目前飞机制造商采用在复合材料结构表面设计铺覆一定厚度复合材料作为牺牲层,用于后续表面铣削加工,以更好地控制复合材料零件外形精度,满足飞机高的装配精度要求。本文以一种常用牺牲层复合材料-碳纤维单向带复合材料结构为研究对象,采用正交试验方法对其进行表面铣削加工试验,从表面粗糙度、切削力等方面分析切削速度 V 、每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 等工艺参数对碳纤维复合材料表面铣削性能的影响规律,获得了最佳工艺参数组合。在此基础上,进行刀具耐用度试验,分析刀具磨损规律,并获得刀具最大寿命。

关键词: 碳纤维复合材料; 表面铣削; 切口质量; 切削力; 刀具磨损

Experimental study on surface milling performance of CFRP

Gong Youhong, Han Shu, Yan Dongxiu, Liu Weiping

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: As the shape precision of composite structure is difficult to control by normal manufacture, the aircraft manufacturer used in surface composite structure design of overlay thickness of composite material as a sacrificial layer for subsequent surface milling, to control the shape of composite parts with better accuracy, and meet the requirements of high precision aircraft assembly. In this paper, a common sacrificial layer composite carbon fiber unidirectional tape composite structure was chosen as the research object, and the orthogonal method was used to carry out surface milling test. From the surface roughness, cutting force and other aspects, the effects of cutting speed, feed per tooth and axial depth of cut and other processing parameters on the surface milling performance of CFRP were discussed, and the best combination of processing parameters was obtained. On this basis, the tool durability test was carried out, the wear rule of the tool was analyzed, and the maximum tool life was obtained.

Keywords: CFRP; surface milling; cutting quality; cutting force; tool wearing

引言

复合材料具备优异的力学性能和可设计性,以及远超金属的抗疲劳性能,在飞机结构设

作者简介: 龚佑宏,男,工程师,主要研究方向为树脂基复合材料加工技术

通信作者: 刘卫平, E-mail: liuweiping@comac.cc

计及制造中的应用越来越广泛。然而,由于其结构外形公差难以控制,给零件制造及装配工艺带来了巨大挑战。为了满足飞机高的装配精度要求,零件制造的外形精度要求越来越高,而复合材料零件外形主要靠铺覆固化而成,不同于金属零件外形通过机械加工方式完成,故其外形精度较难控制,尤其是飞机的大型复合材料零件,如机翼梁和壁板等。为了保证大型复合材料零件之间的装配精度,国外飞机制造商如 GKN 等通过在复合材料梁结构表面铺覆一定厚度的复合材料作为牺牲层并用于后续表面铣削加工的方法,来达到控制零件外形精度的目的。这种通过加工牺牲层进行装配补偿的方式具有可操作性强、对零件强度影响小、控制精度高等优点,现已成熟应用在空客 A350 等型号的飞机中。目前国内在这方面的相关研究还甚少,只有中国商飞和中航沈飞民机在复合材料梁牺牲层设计及计算方法方面进行了初步探索^[1],而在复合材料铣削工艺方面的研究主要集中于侧向铣削工艺^[2-5],对表面铣削工艺的研究尚少。

作为牺牲层材料的复合材料结构,常用的有碳纤维单向带结构、碳纤维织物结构及玻璃纤维织物结构三种。因复合材料梁等主承力结构件本体基本都采用碳纤维单向带结构,故采用碳纤维单向带结构作为牺牲层,其对本体结构的变形影响较其他两种牺牲层结构要小。本文以碳纤维单向带结构为研究对象,采用正交试验方法对其进行表面铣削工艺试验,从表面粗糙度、切削力等方面分析切削速度 V 、每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 等工艺参数对碳纤维复合材料表面铣削性能的影响规律,获得了最佳工艺参数组合,并在此基础上进行刀具耐用度试验,分析了刀具磨损规律,获得了刀具最大寿命,为复合材料牺牲层的应用提供了基础。

1 试验材料及刀具

本次试验设备为 DMG HSC 20 Linear 超声辅助五轴加工中心,如图 1(a)所示,该设备最大转速为 24 000 r/min,最大进给速度为 5 m/min。试验用刀具为金刚石涂层硬质合金铣刀,直径 10 mm,底刃为 6 齿,如图 1(b)所示。试验件装卡如图 1(c)所示。试验材料由中模高强碳纤维增韧环氧树脂预浸料铺贴制备而成,铺层方向为[(45/0/-45/90)₆]_s,厚度约 9 mm。



图 1 试验设备和铣刀结构

Fig. 1 Experiment equipment and the structure of tools: (a) experiment equipment; (b) experiment tool; (c) sample installed

2 试验方法及试验结果

2.1 正交试验方案的制订

为研究切削速度 V 、每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 对碳纤维单向带复合材料表面铣削性能的影响,本文采用正交试验方法,选取切削速度 V 、每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 三个变量作为因素,每个因素选取三个水平,制订的因素水平表见表 1。

表 1 正交试验因素水平表
Tab. 1 Parameters and levels of orthogonal array

水平	因素 A	因素 B	因素 C
	切削速度 V / (m/min)	每齿进给量 f_z / (mm/z)	轴向切深 a_p / mm
1	300	0.015	0.1
2	400	0.030	0.2
3	500	0.045	0.3

2.2 正交试验及结果

本文选用三因素三水平型表 $L_9(3^3)$ 进行表头设计以安排试验。表面铣削加工径向切深 a_e 恒定为 8 mm,采用顺铣方式走 5 刀,最终形成宽 40 mm 的矩形面作为加工表面。试验过程中,采用 Kistler 9272 测力仪对铣削力进行测量和记录。铣削完成后,采用 Hitachi S3400 扫描电镜对刀具的磨损情况和已加工试验件切口质量进行检测,采用 Mahr M1 粗糙度测量仪检测已加工复合材料切口的粗糙度 Ra 。正交试验数据及结果见表 2。

表 2 正交试验数据及结果
Tab. 2 Data and result of orthogonal array

序号	A	B	C	平均切削力 F/N			表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
	切削速度 $V/(m/min)$	每齿进给量 $f_z/(mm/z)$	轴向切深 a_p/mm	F_x	F_y	F_z	
1	500	0.045	0.3	14.66	-15.76	29.86	1.183
2	400	0.045	0.2	7.06	-9.47	19	1.123
3	300	0.045	0.1	4.21	-2.93	9.96	1.052
4	500	0.030	0.1	3.79	-2.04	7.64	1.022
5	400	0.030	0.3	14.25	-10.73	22.8	1.072
6	300	0.030	0.2	5.18	-9.42	16.91	1.037
7	500	0.015	0.2	5.14	-4.14	11.23	0.867
8	400	0.015	0.1	3.37	-1.94	6.55	0.831
9	300	0.015	0.3	10.64	-10.09	19.51	1.137

2.3 刀具耐用度试验

采用一支新刀具,按工艺参数($V=500$ m/min, $f_z=0.045$ mm/z, $a_p=0.3$ mm)对碳

纤维单向带结构进行表面铣削加工,连续加工 50 min。加工 20 min 后,每隔 10 min 记录切削力 F ,并同时检测刀具磨损量 V_b 和已加工表面粗糙度 Ra 。试验数据见表 3。

表 3 刀具耐用度试验数据

Tab. 3 Experimental data of tool's incorruptibility

切削时间 t/min	切削距离 L/mm	平均切削力 F/N			表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
		F_x	F_y	F_z	
0	0	14.66	-15.74	29.86	1.183
20	85.6	16.34	-18.77	36.41	1.189
30	128.9	16.89	-20.46	38.78	1.276
40	171.8	18.43	-20.40	39.26	1.460
50	214.8	20.77	-21.33	42.33	1.526

3 结果分析与讨论

3.1 切削参数对加工表面质量影响分析

通过目视观察加工表面,发现所有的加工表面均不同程度地出现了白色斑块或白色边界,如图 2 所示。采用扫描电镜观察确认该白色斑块或边界是未被切除的树脂基体,如图 3 所示。经分析,白色边界的产生主要在不同纤维层的过渡处。由于复合材料试验件制造时同一层出现在不同的深度,当刀具切削时,层间的树脂就出现在相邻层纤维的过渡处,形成了可见的白色边界。白色斑块的产生主要是层间的树脂基体未去除,在刀具进给时受到刀具副后刀面的挤压作用黏附于纤维表面而成。

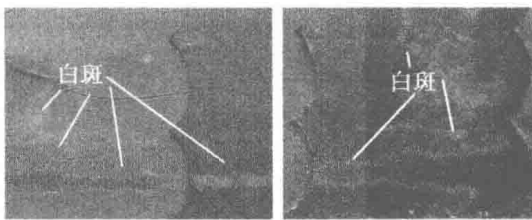


图 2 加工表面白斑

Fig. 2 White spot of the machined surface

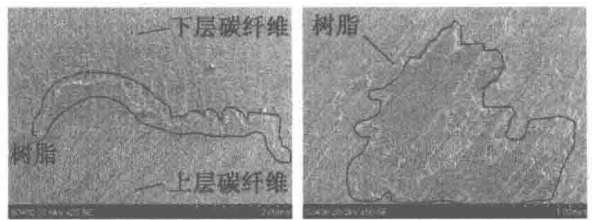


图 3 加工表面白斑电镜图

Fig. 3 Electron microscopic figuration of machined surface

另外,通过对加工表面的观察,发现当每齿进给量 f_z 较大时加工表面会出现较多的毛刺,而且毛刺大多集中在铣削加工路径的右侧,即顺铣一侧,如图 4 所示。经分析,认为这是由于在切削过程中进给量较大,切削刃尚未将表层纤维切断就已离开切削区域而造成的。

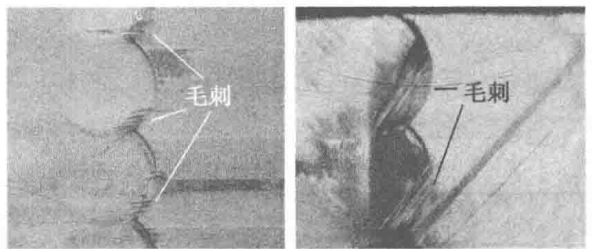


图 4 加工表面毛刺

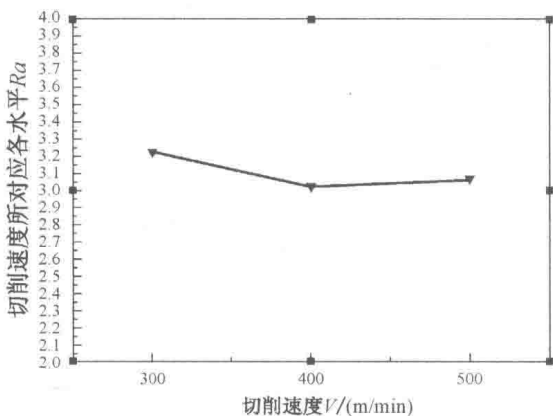
Fig. 4 Burr of machined surface

通过对表面粗糙度的极差分析,按极差 R 由大到小的顺序选取各因素的重要性,其顺序为 $B > C > A$, 见表 4, 即每齿进给量 f_z 对碳纤维复合材料加工表面粗糙度的影响最大、轴向切深 a_p 次之、切削速度 V 最小。

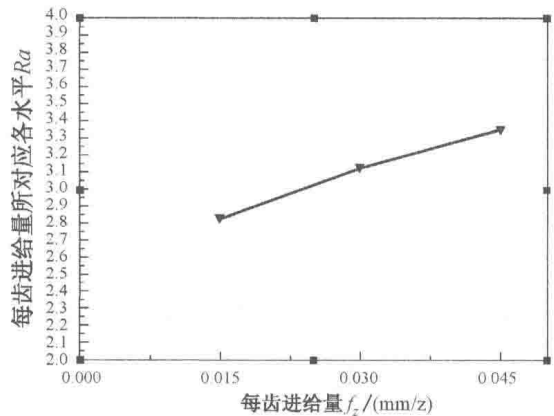
表 4 表面粗糙度极差分析表
Tab. 4 Range analysis table of R_a

项目	A 切削速度 V	B 每齿进给量 f_z	C 轴向切深 a_p
T_1	3.226	2.835	2.905
T_2	3.026	3.131	3.027
T_3	3.072	3.358	3.392
R	0.200	0.523	0.487
主次顺序		$B > C > A$	

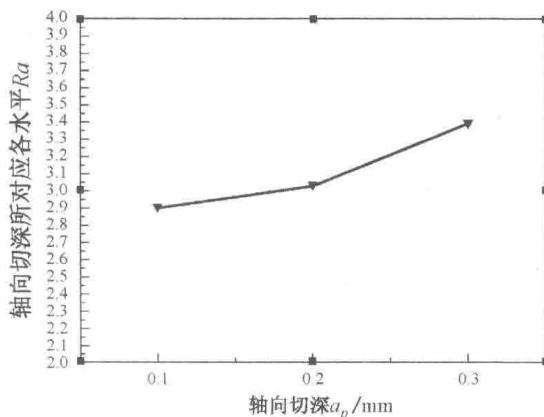
根据表 4 中 $T_1 \sim T_3$ 的数据,可进一步画出 A、B、C 这三个因素对碳纤维复合材料表面粗糙度的影响趋势图(图 5)。



(a) 切削速度 V 单因素趋势图



(b) 每齿进给量 f_z 单因素趋势图



(c) 轴向切深 a_p 单因素趋势图

图 5 表面粗糙度各因素趋势图

Fig. 5 Trends of parameters and levels of R_a : (a) trend of cutting speed and R_a ; (b) trend of feed per tooth and R_a ; (c) trend of axial depth of cut and R_a

从图 5 可以看出,表面粗糙度 Ra 随着每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 的增加而增大,而切削速度 V 的变化对表面粗糙度的影响并不明显。

为了能够精确地估计各因素对试验结果影响的重要程度,对表面粗糙度进行方差分析显得更加重要。表 5 为表面粗糙度方差分析表,通过分析 F 值可发现,每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 的 F 值远大于切削速度 V 所对应的 F 值。这再次说明轴向切深 a_p 和每齿进给量 f_z 是影响表面粗糙度的主要因素,切削速度 V 不是影响表面粗糙度的主要因素。

表 5 表面粗糙度 Ra 方差分析表
Tab. 5 Variance analysis table of Ra

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	F_{α}		显著性
					95%	99%	
切削速度 V	0.007 3	2	0.003 7	0.634 6	6.944 3	18	不显著
每齿进给量 f_z	0.045 9	2	0.022 9	3.978 1	6.944 3	18	不显著
轴向切深 a_p	0.042 8	2	0.021 4	3.714 0	6.944 3	18	不显著
空列	0.015 7	2	0.007 9	1.365 4	6.944 3	18	—
误差	0.023 1	4	0.005 8	—	—	—	—
总和	0.111 7	8	—	—	—	—	—

每齿进给量 f_z 作为影响表面粗糙度的一个主要因素,经分析认为随着每齿进给量 f_z 的增大,每齿切除的纤维数量增多,同时破碎的树脂基体与断裂的纤维未来得及去除,受到刀具后刀面作用而黏附于加工表面,对表面粗糙度有不利影响。

轴向切深 a_p 作为影响表面粗糙度的另一个主要因素,经分析认为随着轴向切深 a_p 的增大,切削力相应增大,这时工件产生的震动也增大,这会导致表面粗糙度增大。

在满足加工表面质量的要求下,以最佳表面质量为目标,基于之前对表面粗糙度的极差分析和方差分析,可以确定每齿进给量 $f_z=0.015 \text{ mm/z}$,轴向切深 $a_p=0.1 \text{ mm}$ 。尽管从极差分析结果来看,最优的切削速度 $V=400 \text{ m/min}$,但是从方差分析结果来看,切削速度 V 对表面粗糙度的影响很小,且不具有很强的规律性,因此可以确定切削速度 $V=500 \text{ m/min}$ 。

为了能够更好地表征表面粗糙度 Ra 随工艺参数的变化规律,可根据试验数据进行多元线性回归拟合,建立式(1)所示的多元回归方程:

$$Ra = 100.6V^{-0.12} f_z^{0.16} a_p^{0.14} \tag{1}$$

3.2 切削参数对切削力影响分析

根据表 3 对表面铣削加工过程中的切削力进行分析,表 6 至表 8 为三向切削力的方差分析表,图 6 至图 8 为三向切削力的单因素趋势图。

表 6 切削力 F_x 方差分析表
 Tab. 6 Variance analysis table of F_x

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	F_α		显著性
					95%	99%	
切削速度 V	3.942 7	2	1.971 3	4.692 1	19	99	不显著
每齿进给量 f_z	7.764 2	2	3.882 1	9.239 9	19	99	不显著
轴向切深 a_p	146.860 2	2	73.430 1	174.773 4	19	99	高度显著
空列	0.840 3	2	0.420 1	1.000 0	19	99	—
误差	0.840 3	2	0.420 1	—	—	—	—
总和	159.407 3	8	—	—	—	—	—

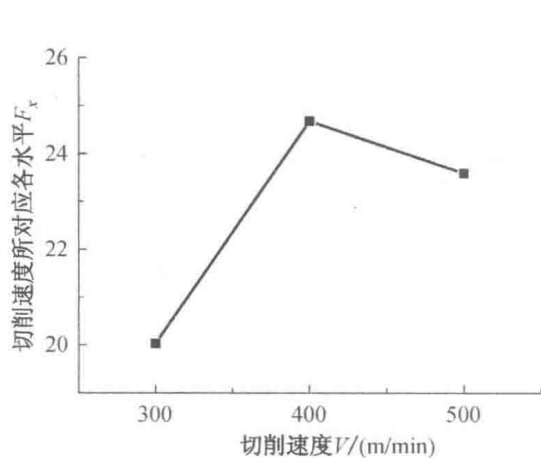
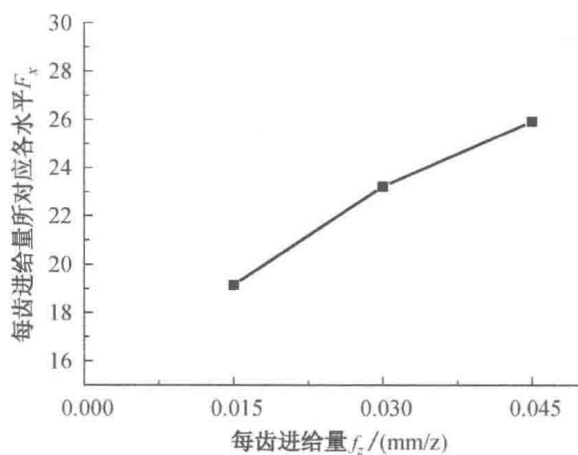
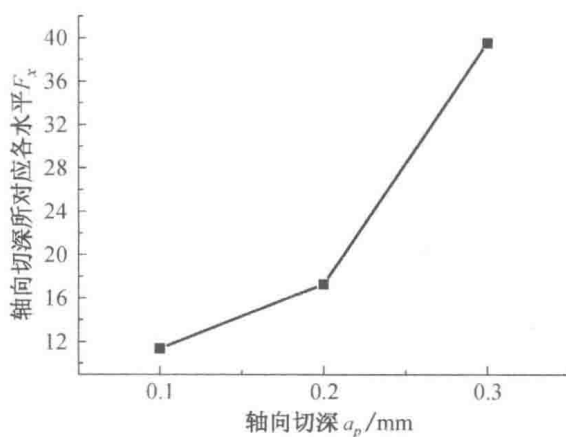
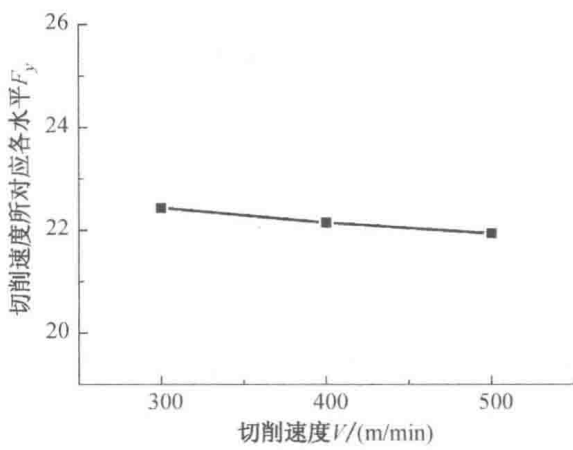
(a) 切削速度 V 单因素趋势图(b) 每齿进给量 f_z 单因素趋势图(c) 轴向切深 a_p 单因素趋势图图 6 切削力 F_x 各因素趋势图

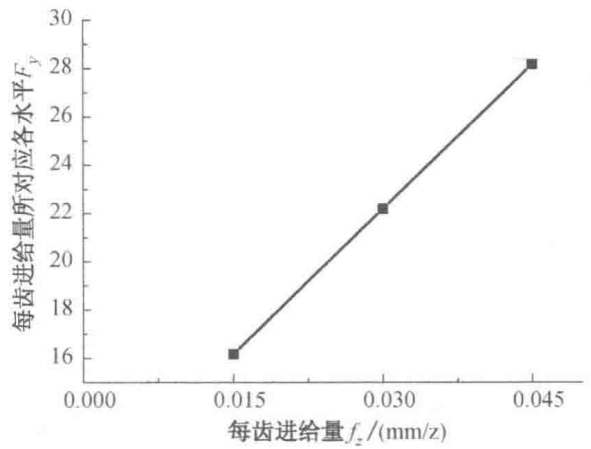
Fig. 6 Trends of parameters and levels of F_x : (a) trend of cutting speed and F_x ; (b) trend of feed per tooth and F_x ; (c) trend of axial depth of cut and F_x

表 7 切削力 F_y 方差分析表
Tab. 7 Variance analysis table of F_y

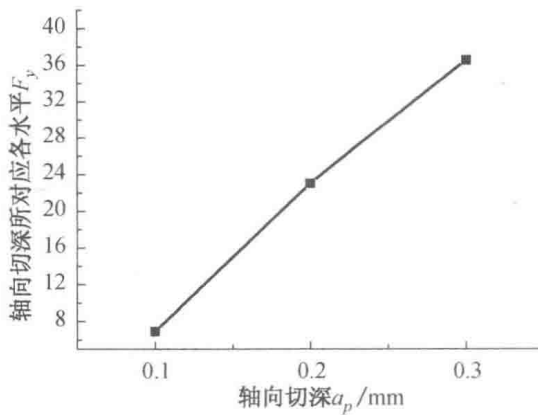
方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	F_{α}		显著性
					95%	99%	
切削速度 V	0.042	2	0.021 0	0.003 3	5.143 3	10.924 8	不显著
每齿进给量 f_z	23.960 3	2	11.980 1	1.861 5	5.143 3	10.924 8	不显著
轴向切深 a_p	147.181 2	2	73.590 6	11.434 6	5.143 3	10.924 8	高度显著
空列	14.612 3	2	7.306 1	1.135 2	5.143 3	10.924 8	—
误差	38.614 6	6	6.435 8	—	—	—	—
总和	185.795 8	8	—	—	—	—	—



(a) 切削速度 V 单因素趋势图



(b) 每齿进给量 f_z 单因素趋势图



(c) 轴向切深 a_p 单因素趋势图

图 7 切削力 F_y 各因素趋势图

Fig. 7 Trends of parameters and levels of F_y : (a) trend of cutting speed and F_y ; (b) trend of feed per tooth and F_y ; (c) trend of axial depth of cut and F_y

表 8 切削力 F_z 方差分析表
 Tab. 8 Variance analysis table of F_z

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	F_{α}		显著性
					95%	99%	
切削速度 V	1.060 9	2	0.530 4	0.125 1	6.944 3	18	不显著
每齿进给量 f_z	77.367 3	2	38.683 6	9.121 6	6.944 3	18	显著
轴向切深 a_p	384.551 3	2	192.275 6	45.338 8	6.944 3	18	高度显著
空列	15.902 6	2	7.951 3	1.874 9	6.944 3	18	—
误差	16.963 5	4	4.240 9	—	—	—	—
总和	478.882 0	8	—	—	—	—	—

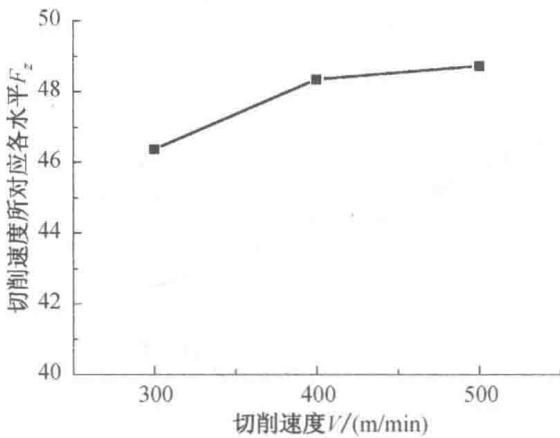
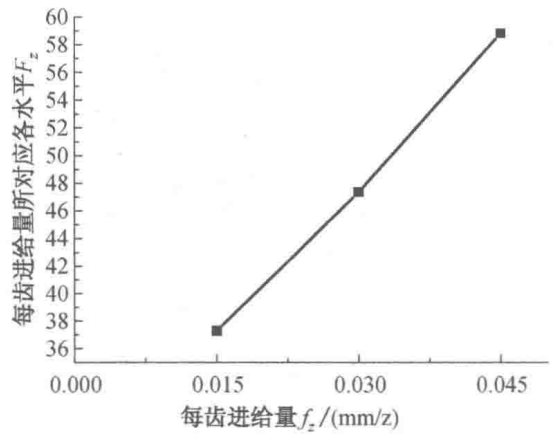
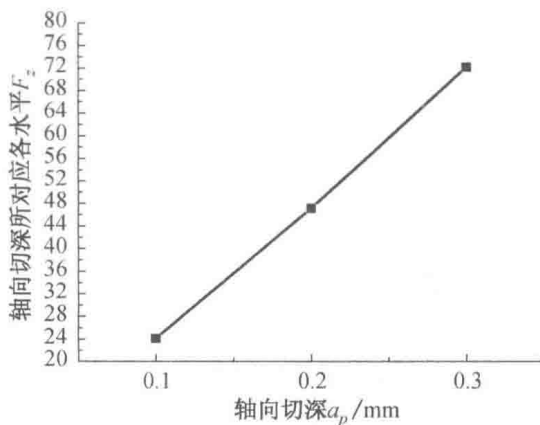
(a) 切削速度 V 单因素趋势图(b) 每齿进给量 f_z 单因素趋势图(c) 轴向切深 a_p 单因素趋势图图 8 切削力 F_z 各因素趋势图

Fig. 8 Trends of parameters and levels of F_z : (a) trend of cutting speed and F_z ; (b) trend of feed per tooth and F_z ; (c) trend of axial depth of cut and F_z .

不难发现,对于主切削力 F_x 和进给力 F_y ,轴向切深 a_p 都是影响其大小的高度显著因

素,同时这两个方向的分力均随着轴向切深 a_p 和每齿进给量 f_z 的增大而增大,然而它们随着切削速度 V 的变化并没有这一规律。这与之前关于表面粗糙度的分析是一致的。随着每齿进给量 f_z 和轴向切深 a_p 的增大,参与切削的纤维数量必然增大,进而导致切削力的增大。观察轴向力 F_z 可以发现,轴向切深 a_p 是影响其大小的高度显著因素,每齿进给量 f_z 是影响其大小的显著因素,然而切削速度 V 不是影响其大小的显著因素。分析认为轴向力 F_z 增大的主要原因在于破碎的树脂基体和纤维受到刀具后刀面挤压的反作用力及材料加工表面的回弹作用力。因此,采用较小的轴向切深 a_p 和积极的排屑措施,将显著减小切削力和提高表面质量。

分别建立三向切削力的多元线性回归方程:

$$F_x = 101.6V^{0.15} f_z^{0.25} a_p^{1.07} \quad (2)$$

$$F_y = 103.9V^{-0.48} f_z^{0.50} a_p^{1.53} \quad (3)$$

$$F_z = 102.9V^{-0.16} f_z^{0.41} a_p^{0.99} \quad (4)$$

如上式所示,三向切削力中,轴向切深 a_p 均是影响切削力的主要因素,切削力均随着轴向切深 a_p 的增加而增大。

3.3 刀具耐用度分析

根据表 3 可以绘出切削力随切削时间的变化趋势图,如图 9 所示。可知三向切削力随着切削时间的增加而增大,这是由于刀具磨损后其与加工表面的摩擦力增大所导致的。其中,侧向切削力(F_x 和 F_y)的增大不明显,而轴向切削力(F_z)的增大较明显,这是由于该试验刀具 45° 的主偏角使得刀具受到的水平切削力部分转变为轴向力所导致的。

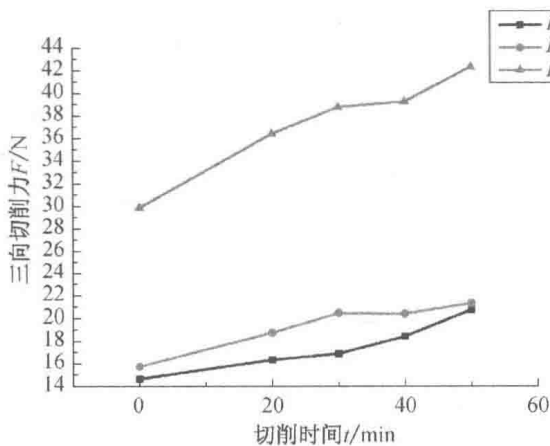


图 9 切削力随切削时间变化趋势图

Fig. 9 Effect of cutting force from the cutting time

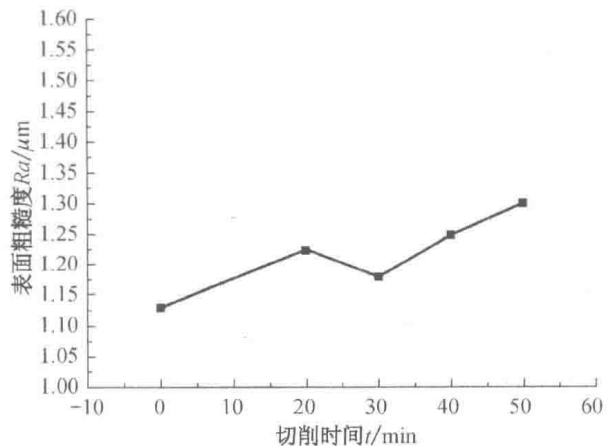


图 10 表面粗糙度随切削时间变化趋势图

Fig. 10 Effect of Ra from the cutting time

图 10 为表面粗糙度随切削时间的变化趋势图。对比发现尽管切削力随着切削时间的增加而增大,但是表面粗糙度却几乎没有变化。分析认为由于轴向切深 a_p 仅为 0.3 mm,几乎不存在任何排屑等障碍,破碎的纤维和基体能够很快被去除。同时,刀具后刀面被磨钝,扩大了刀具与加工表面的接触面积,使得原本尖锐的刀尖易在加工表面形成波纹都转变为对加工表面的修整作用,因此,尽管切削力有不同程度的增大,但是加工表面质量基本较好。

图 11 为刀具耐用度试验过程中刀具后刀面磨损图片。可见在 20 min 之前,后刀面的金刚石涂层已被磨光,硬质合金基体受到碳纤维的摩擦作用,形成均匀的光亮带。在 20~40 min 之间,由于碳纤维的持续摩擦作用,金刚石涂层不断后移,光亮磨损带不断增大。当达到

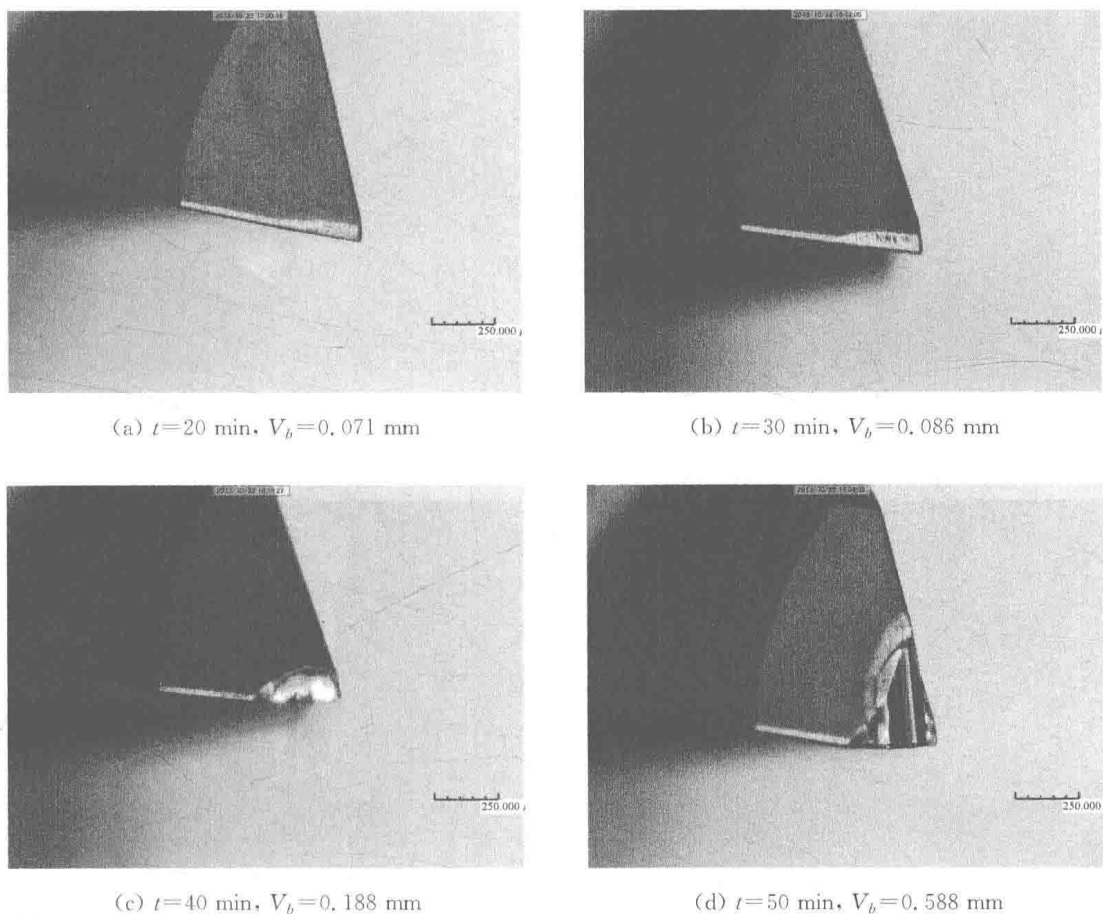


图 11 刀具后刀面磨损过程图片

Fig. 11 The wearing process of V_b

40 min 时,其中一个刃口出现了较大的涂层剥落,这说明在碳纤维的持续作用下,涂层与硬质合金之间的结合被破坏,导致涂层剥落。当切削时间达到 50 min 时,刃口均发生了较严重的涂层大面积剥落,同时露出的硬质合金基体受到碳纤维的摩擦,在其表面形成一道较深的凹槽。此时,刀具已经出现严重破损,后刀面磨损量已经达到 0.6 mm。

图 12 为刀具后刀面磨损量随切削时间变化趋势图。可见刀具在 40 min 左右发生涂层剥落,在 50 min 左右(材料去除体积为 $85\ 920\ \text{mm}^3$)涂层全部剥落,出现急剧磨损。

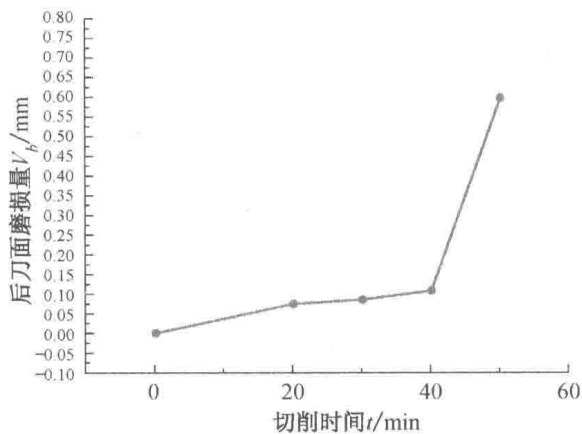


图 12 刀具后刀面磨损量随切削时间变化趋势图

Fig. 12 Effect of flank wearing from the cutting time