DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2010.22.017

碳纤维复合材料高速开槽铣削试验研究 *

Experimental Study on High-Speed Groove-Milling of CFRP

北京航空制造工程研究所　康永峰 王文理 王晓丽

[摘要] 针对碳纤维复合材料加工常用的开槽切削进行了高速铣削试验，对切削力进行了检测并在此基础上进行了经验公式回归分析，分析了转速、进给速度、切深对切削力的影响及正反螺旋对切削棱边毛刺的影响。

关键词：碳纤维复合材料　高速铣削　切削力

[ABSTRACT] Based on the experiment on high-speed groove-milling of carbon fibre reinforced plastics(CFRP),the exponential formula of milling force is obtained through regression analysis method.The regulation of the milling force influenced by the spindle speed,feed rate and cutting depth is obtained.And the regulation of burrs influenced by the negative and positive helix direction of cutting tool is also analyzed.

Keywords: Carbon fibre reinforced plastic　High-speed milling　Milling force

碳纤维增强复合材料（CFRP）是以碳或者石墨纤维为增强体的树脂基复合材料，具有比强度高、比刚度大、可设计性强及良好的抗疲劳损伤性能和耐腐蚀性能等优点。

复合材料在大型民机机体结构上的大量应用已经是现代大型民机的显著特点之一，在复合材料用量占机体结构重量的百分比方面，从空客 A380 的 22%（另有 GLARE 材料占 3%）到波音 787 的 50%，再到在研的空客 A350XWB 的 52%，这标志着复合材料已成为现代大型民机首要结构材料，结束了以铝合金为主的机体结构选材时代。如图 1 所示为大型客机上的复合材料的应用情况。

文献 [1–3] 随着碳纤维复合材料在飞机上应用的数量及种类的不断攀升，紧随带来的一次成型后高精度，高效率二次加工也越来越多。而 CFRP 是由质软而粘性大的基体和强度高、硬度大的纤维混合而成的二相或多相结构，其力学性能呈各向异性，机械加工条件比较恶劣，同时因其切削加工极易引起毛刺、分层等失效形式，是典型的难加工材料，因此需要深入研究碳纤维复合材料数控加工相关技术。本课题针对碳纤维复合材料构件加工常用的开槽切削进行了高速铣削力的检测与分析，针对切削参数对切削力的影响及正反螺旋对切削毛刺的影响进行了分析。

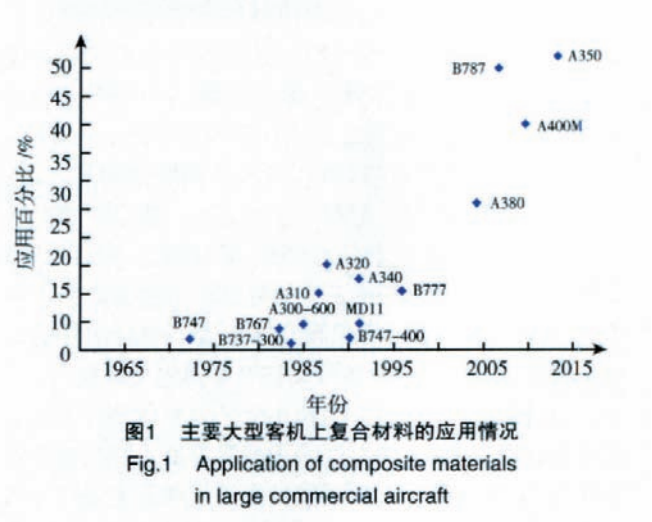

图1　主要大型客机上复合材料的应用情况

Fig.1　Application of composite materials in large commercial aircraft

1　试验方案

1.1　试验条件

试验材料采用板状多向铺层方式树脂基碳纤维增强复合材料，根据切削经验选取了五坐标高速铣床作为试验机床，其性能如表 1 所示。

根据碳纤维复合材料切削特性及切削经验，本试

表 1　试验机床参数

主要技术性能指标		
参数名称		参数
主轴	最大功率 /kW	44
	最大转速 /（r·min^{-1}）	24000
	最大扭矩 /（N·m）	62.7
进给速度	$X\ Y\ Z$ /（mm·min^{-1}）	0~20000
	$B\ C$ /（deg·min^{-1}）	0~3600

* 国家高技术研究发展计划（863 计划）项目（2009AA044304）资助。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

验刀具采用了 SECO 公司一款直径 ϕ 为 6mm 的刀具，该刀具为金刚石涂层硬质合金刀具，本身具有人字形正反 2 种螺旋，其结构如图 2 所示。

图 2　试验用刀具

Fig.2　Experimental tool

1.2　试验系统构建

本试验采用的是 kistler 测力仪，如图 3 所示。用与测力仪相匹配的 kistler 电荷放大器放大测力仪输出的信号。测力仪测定的力信号转化为电信号，并由电荷放大器放大之后由数据采集卡读取并存入计算机，测力系统原理如图 4 所示。

图 3　试验用设备

Fig.3　Experimental instruments

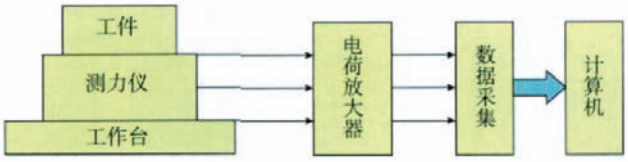

图 4　测力系统原理图

Fig.4　Principle of force measurement system

试验中选取测力仪的 Y 向为进给方向，X 向为进给切向。

1.3　试验方案

根据金属切削原理，在刀尖几何参数确定的情况下，切削力与切削参数之间存在着一定的指数关系。其通用形式为：

$$F = k_f v^{a_1} A_p^{a_2} A_e^{a_3} f^{a_4} \ ,$$

式中：F 为切削力、v 为现行铣削速度、A_p 为铣削深度、A_e 为切削宽度、f 为进给速度，k_f、a_1、a_2、a_3、a_4 为待求系数。

单因素切削试验法切削试验量非常大而且精度较低，而正交试验能够大大减少试验次数，从而降低试验成本，而且不会降低试验可信度。本试验以转速 (N)、切削深度 (A_p)、进给速度 (f) 为主要影响因素，采用 3 因素 3 水平正交设计，因素水平表如表 2 所示，切削方式采用碳纤维复合材料加工常用的开槽切削，如图 5 所示。通过对采集到的铣削力信号进行多元线性回归，针对该刀具建立其铣削力数学模型，分析该刀具的铣削力与各切削用量的关系。

表 2　试验参数正交表

转速 N/（r·min^{-1}）	切深 A_p/mm	进给速度 f/（m·min^{-1}）
10615	2	850
14860	2	1100
6370	2	500
10615	4	1100
14860	4	500
6370	4	850
10615	6	500
14860	6	850
6370	6	1100

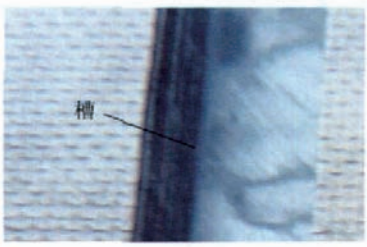

图 5　切削试验方式—开槽

Fig.5　Groove-milling experiment

2　试验结果与分析

根据拟定的试验方案进行了正交试验，试验结果见表 3。

2.1　切削力回归分析

对表 3 中数据进行多元回归，得到其经验公式如下：

$$F_x = 29.798 N^{-0.117} A_p^{0.687} f^{0.155} \ ,$$

$$F_y = 113.234 N^{-0.426} A_p^{0.616} f^{0.588} \ .$$

其回归统计见表 4，通过该表可以发现 Y 向即进给方向切削力回归性较好，表明 Y 向切削力与切削参数之间的关系密切；而 X 向即进给切向回归性较差，其主要原因在于开槽切削过程中进给切向两边均有切削刃参与切削，相互抵消了一部分切削力，X 向切削力

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　试验结果

转速 N/（r·min^{-1}）	切深 A_p/mm	进给速度 f/mm	F_x	F_y
10615	2	850	39.7339	155.5616
14860	2	1100	53.2684	183.9274
6370	2	500	51.1993	151.8898
10615	4	1100	59.1064	385.1042
14860	4	500	71.3531	187.2792
6370	4	850	71.2952	376.2411
10615	6	500	77.0966	262.7258
14860	6	850	108.4716	249.6254
6370	6	1100	134.7443	454.2629

表 4　回归统计

统计项	F_x	F_y
R^2	0.792	0.907
修正 R^2	0.667	0.851
标准误差	0.219	0.159
观测值	9	9

随转速 N 进给速度 f 变化的变化不是很明显，从回归方程中也可以看出，X 向切削力的变化主要依赖于切深的变化。

对回归进行方差检验如表 5 所示，可以看出 F_x 经验公式回归显著性水平 P=0.037<0.05，回归效果较为显著；F_y 经验公式回归显著性水平 P=0.005<0.01，回归效果非常显著。经验公式回归具有实际意义，可以用于切削力预测。

为了更好地验证经验公式的正确性，进行了预测值确认，如表 6 所示。

2.2　切削参数对切削力的影响

根据回归得出的经验公式，对该刀具的铣削力与各切削用量的关系进行更直观的分析。

（1）转速对切削力的影响。

图 6 为切深 A_p=6mm，进给速度 f =500mm/min 时切削力与转速的关系曲线。从图中可以看出，切削力随着转速的增加而减小。进给方向切削力 F_y 受转速影响较大；而进给切向切削力 F_x 在开槽切削中受转速的影响较小。

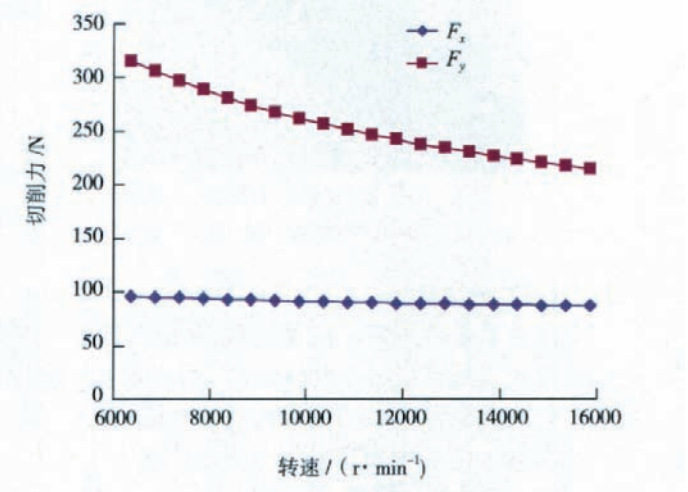

图6　切削力与转速的关系曲线

Fig.6　Relationship curve between milling force and spindle speed

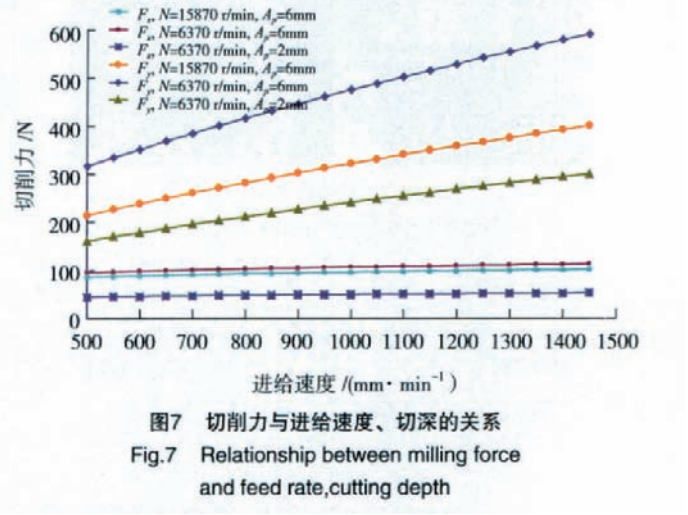

图7　切削力与进给速度、切深的关系

Fig.7　Relationship between milling force and feed rate,cutting depth

表 5　方差分析

	F_x					F_y				
统计项	df	SS	MS	F	显著性水平	df	SS	MS	F	显著性水平
回归分析	3	0.912	0.304	6.345	0.037	3	1.236	0.412	16.2	0.005
残差	5	0.24	0.048			5	0.127	0.025		
总计	8	1.151				8	1.363			

表 6　预测值确认

转速 N/（r·min^{-1}）	切深 A_p/mm	进给速度 f/mm	实测 F_x/N	实测 F_y/N	计算 F_x/N	计算 F_y/N
10615	6	850	102.0787	314.4756	98.4621	347.3569

（2）进给速度与切深对切削力的影响。

如图 7 所示为转速 N=6370r/min 时切削力与进给速度、切深的关系曲线。从图中可以看出切削力总体随着进给速度的增加而变大，随着切深的增加而变大。进给方向切削力 F_y 受进给速度的影响较大，进给

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

切向切削力 F_x 受进给速度的影响较小。

另外，从图中可以发现，切深对切削力的影响最大。对于 F_x，受转速和进给速度的影响极小，其变化主要来源于切深的变化。对于 F_y，不仅切削力随着切深的增加而增加，同时当转速相同，切深 A_p=6mm 时切削力与进给速度关系曲线要比切深 A_p=2mm 时切削力与进给速度关系曲线更陡峭，也就是说切深的加大加大了切削力对进给速度的敏感性，进一步证明切深是影响切削力的主要因素。

2.3 刀具螺旋方向对棱边毛刺的影响

通过观察试验件发现刀具螺旋方向对表面毛刺有极大的影响。从图 8 可以看出，在左螺旋刃未加入切削时，切槽上棱边产生了大量毛刺，而当左螺旋刃加入切削时，切削出的槽上表棱边未产生毛刺，加工表面质量良好。其原因在于铣刀右螺旋刃切削时，铣刀对槽上棱边产生的力是向上的，从而导致了材料最表层纤维未能完全切断而产生毛刺；当左螺旋刃切削时，对槽上棱边产生的力是向下的力，能够完全切断表层纤维，如图 9 所示。因此推荐在碳纤维复合材料铣削时，零件上表面以左螺旋刃切削，下表面以右螺旋刃切削。

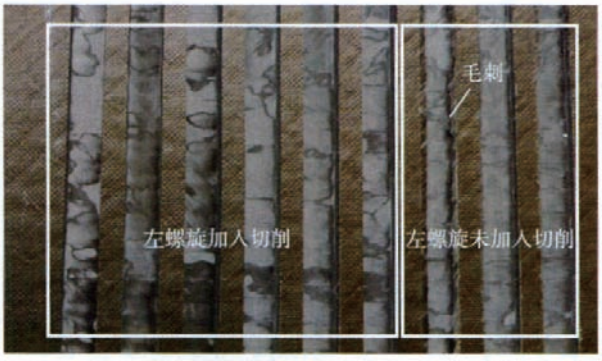

图 8 刀具不同螺旋方向切削刃切削毛刺对比

Fig.8 Comparison of burrs generated by different helix direction of cutting tool

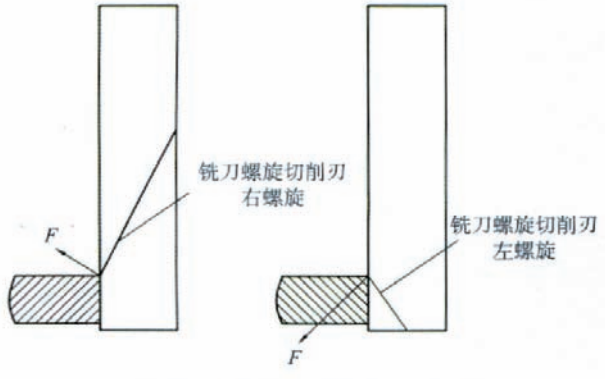

图 9 不同螺旋方向切削刃切削时工件受力图

Fig.9 Force on workpiece generated by different helix direction of cutting tool

3 结论

通过切削试验及回归分析，得出了该刀具切削碳纤维复合材料的经验公式：

$F_x=29.798N^{-0.117}A_e^{0.687}f^{0.155}$，

$F_y=113.234N^{-0.426}A_e^{0.616}f^{0.588}$。

经验公式回归效果显著，可以作为该刀具进行碳纤维复合材料开槽加工的切削力预测公式。

经过对数据进行研究及分析，得到以下 5 点结论：

（1）开槽铣削过程中铣削力随着切削参数的变化呈规律性变化，且以切深影响最大。

（2）铣削力随着转速的增加而减小，但进给切向铣削力受转速变化影响极小。

（3）铣削力随着进给速度的增加而增加，但进给切向铣削力受进给速度变化影响极小。

（4）铣削力随着切深的增加而增加。切深的增加会提高切削力对进给速度的灵敏性。

（5）铣削碳纤维复合材料时，工件上表面位置适用左螺旋加工，下表面位置适用右螺旋加工。

参 考 文 献

[1] 黄领才，刘秀芝．现代大飞机复合材料应用与制造技术浅析．航空制造技术，2008(10):46–48.

[2] 杨乃宾，梁伟．大型民机机体结构用复合材料分析．航空制造技术，2009(5):68–70.

[3] 陈绍杰．浅谈空客 A380 的复合材料应用．高科技纤维与应用，2008, 4(33):1–3,24.

（责编 小城）

（上接第 58 页）

参 考 文 献

[1] 张慧萍．数控切削加工工艺参数及刀具运动轨迹的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学工学，2003.

[2] 张立涛．基于神经网络的金属车削参数智能优化系统的研究与开发 [D]. 太原：太原理工大学，2008.

[3] 蔡安江，席洪波，郭师虹．电火花线切割加工参数智能自选系统研究．模具工业，2008,34(3):69-72.

[4] 孟令锋，罗红波，邹云，等．基于 RGA 的铣削加工切削参数智能优化．工具技术，2006,40(5):39-41.

[5] 赵小明．中间公差加工法的工艺研究．太原重型机械学院学报，2004(6):158-160.

[6] Chmad A W,Bo-suk Y,Han T. Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors.Expert Systems with Applications, 2007(32):299-312.

[7] 朱喜林，吴博达，武星星，等．BP 网络在优化机械加工参数中的应用．计算机集成制造系统，2004(6):1139-1143.

（责编 良辰）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net