

文章编号: 1671-0576(2021)03-0055-06

碳纤维增强复合材料环形构件 内圆车削力测试与拟合

俞玉澄, 李 伟, 蒋海峰, 李国闻, 蔡文仙

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 开展了工艺参数对碳纤维增强复合材料环状结构件的内圆车削力影响研究, 搭建了车削力测量系统, 测试了不同车削工艺参数条件下不同分量方向的车削力。对车削力测试数据进行了正态分布拟合, 避免偶然波动对车削力分析结果的影响; 采用传统指数型数学模型和二次完全回归型数学模型, 分别对不同车削力分量的经验公式进行了拟合, 并对拟合的确定度进行了计算分析。结果表明: 除切向力指数型经验公式的确定系数小于 95% 外, 其他经验公式的确定系数均大于 98%, 其中切向力和径向力的回归型经验公式的确定系数高达 99.7%, 说明基于两种模型的车削力经验公式的拟合度均较好, 且回归型经验公式拟合结果与实际测试结果的符合性略高。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 内圆车削力; 指数型模型; 回归型模型; 经验公式拟合

中图分类号: TJ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.03.010

Testing and Fitting of Internal Turning Force for Carbon Fiber Reinforced Polymer Annular Structure

YU Yu-cheng, LI Wei, JIANG Hai-feng, LI Guo-wen, CAI Wen-xian

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The internal turning force of carbon fiber reinforced polymer annular structure is studied, and a turning force measurement system is established. The turning force components of different directions under different turning parameters are tested. The turning force measurements are fitted with normal distribution which can avoid accidental fluctuations. The traditional exponential mathematical model and the quadratic regression mathematical model are used to fit the empirical formula of turning force components of different directions. The determination coefficients of the fitted empirical formula are calculated and analyzed. The results show that except the determination coefficient of the empirical formula of depth-cutting resistant force fitted by traditional exponential mathematical model is less than 95%, other determination coefficients of different empirical

formulas are more than 98%. Especially, the determination coefficients of the empirical formula of main-cutting force and depth-cutting-resistant force fitted by quadratic regression mathematical model reach 99.7%. The fitting degrees of the turning force empirical formula based on the two models are good, and the fitting data of regression empirical formula is slightly more consistent with the measured data.

Key words: carbon fiber reinforced polymer; internal turning force; exponential model; regression model; fitted empirical formula

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)是一种由低密度、耐腐蚀树脂基体相和高强度、高模量碳纤维增强相复合制成的先进结构材料,兼具基体相和增强相的优点,具有高比强度、低密度、耐腐蚀、抗疲劳、可设计等特点^[1-3]。因其优异的力学综合性能,CFRP已被广泛应用于航空、航天、交通、风电等领域^[4-6]。

自20世纪60年代开始,以美国为代表的西方国家就开展了高性能CFRP在飞机机身结构中的应用研究,并在21世纪初取得了跨越式的发展。如波音B787和空客A350XWB两型飞机的复合材料使用比率均达到了50%以上^[7]。CFRP在国外先进大型飞机主承力结构件上的广泛应用,标志着大型飞机正式进入复合材料时代,而复合材料使用比例也已成为衡量飞机先进性的重要指标之一。国内在CFRP应用方面的研究起步稍晚,虽然经过了几十年的探索和研究,取得了一定的进展,但是与世界先进水平仍有较大差距。目前,复合材料在各种国产飞机上的使用率大多低于20%,远落后于国际先进水平。究其原因,一方面是国产高性能碳纤维原丝和树脂材料性能不足,另一方面则是国内复合材料制造水平偏低。由于在复合材料构件结构成型、二次加工、异种连接等方面的技术不成熟,使得国产CFRP在结构综合性能、加工精度控制、加工损伤控制、长期可靠连接等方面均与国外存在较大差距,限制了其在航空、航天等高性能需求领域的应用。

CFRP作为典型的双相材料,其特性由碳纤维增强相和树脂基体相共同决定。由于两相的性能差距较大,且CFRP宏观上具有硬度高、导热

性差、各向异性等特点,使得材料去除机理十分复杂,可加工性较差。加工中易造成基体开裂、纤维分层、纤维断裂等缺陷,引起材料损伤,降低材料性能,缩短材料寿命^[8]。

目前,国内在CFRP切削力领域的研究主要集中在铣削、钻削方面^[9-10]。在圆筒车削领域的研究主要集中在工艺方法与加工结果的关系上,即车削工艺参数、超声辅助方法对车削结果的影响^[11-12]。而在较大尺寸CFRP环形结构件的内圆车削力的测试等方面缺少相关研究。

本文搭建了内圆车削力测试系统,在不同工艺参数条件下,对CFRP环形结构件的内圆加工车削力进行测试与分析,基于传统指数型模型和二次完全回归模型对不同分量方向车削力的经验公式进行拟合研究,并对拟合的确定系数进行计算分析。

1 试验系统与方法

1.1 试验件材料与规格

试验件由碳纤维布T300缠绕后,采用环氧树脂,由树脂传递模塑法制得。试验件尺寸为 $\Phi 300\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,壁厚为12 mm,纤维体积分数为40%。

1.2 车削力测试系统

使用硬质合金钢车刀采用干式车削法进行车削试验,车削力测试系统基于车床7QW6110C和三向切削力传感器Kistler 9129AA搭建,系统框图如图1所示。车削加工时,车削力测试系统可以通过电荷放大器Kistler 5080A、数据采集卡Kistler 5697A1及工控机等对车刀受力数据进行实时采集、处理与存储。

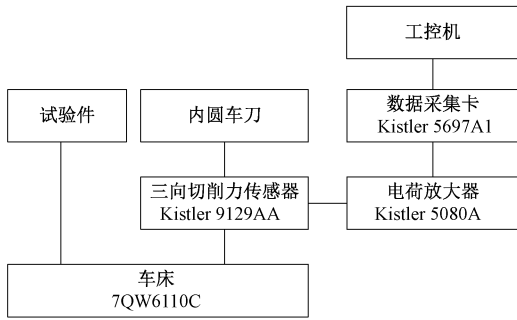


图 1 车削力测试系统框图

1.3 车削力测试方法

(1) 试验参数选择

参考金属切削理论,车削力一般与车削速度 v 、切削深度 a_p 和进给速度 f 三个因素有关。考虑到碳纤维环状构件在车削加工前一般需要粘接精密陶瓷构件,为保证精密陶瓷构件的安全性和加工效率的可接受性,车削速度一般固定在 36 r/min,即 33.93 m/min。基于生产实践,结合测试试验需要,设计车削力测试试验参数,如表 1 所示。

表 1 车削力测试试验参数表

序号	车削速度 $v/(m \cdot \min^{-1})$	切削深度 a_p/mm	进给速度 $f/(mm \cdot r^{-1})$
1	33.93	3.0	0.45
2	33.93	3.0	0.30
3	33.93	3.0	0.20
4	33.93	1.5	0.45
5	33.93	1.5	0.30
6	33.93	1.5	0.20
7	33.93	0.5	0.45
8	33.93	0.5	0.30
9	33.93	0.5	0.20

(2) 表征值确定

依次对不同车削参数条件下的车削力进行测试。考虑到碳纤维复合材料与传统金属材料的车削过程存在较大差异,复合材料复杂的多相结构使得车削力测量数据存在波动,导致均值、极值等传统参数难以对其车削力进行合理的表征。因此,需要对碳纤维复合材料的车削力测量数据进行统计处理与分布规律分析,以确定合适的车削力表征值。

(3) 经验公式拟合

基于上述测试数据和确定的车削力表征值,

分别采用指数型切削理论模型和二次完全回归模型,对碳纤维复合材料车削力经验公式进行拟合,并通过确定度对拟合的经验公式进行分析和评价。

2 试验结果与讨论

2.1 车削力测试结果

车削力测试结果存在一定的波动且基本呈正态分布。为避免偶然波动对车削力分析结果的影响,首先对车削力测试数据进行正态分布拟合,计算出其统计均值 $\hat{\mu}$ 与方差 $\hat{\sigma}$,然后将 $\hat{\mu} + 3.89\hat{\sigma}$ 作为上限典型值(此时,车削力大于典型值的概率为 0.05%)代替实际最大值进行分析。

采用上述数据处理方法计算不同车削参数条件下各分量方向的车削力,具体见表 2。

表 2 各分量方向的车削力测试结果

序号	切削深度 a_p/mm	进给速度 $f/(mm \cdot r^{-1})$	切向力 F_c/N	轴向力 F_t/N	径向力 F_p/N
1	3.0	0.45	671.93	332.77	348.07
2	3.0	0.30	485.83	302.23	281.20
3	3.0	0.20	410.53	259.53	259.17
4	1.5	0.45	377.87	284.63	241.27
5	1.5	0.30	320.33	247.20	216.13
6	1.5	0.20	265.03	212.87	204.07
7	0.5	0.45	149.53	229.90	113.80
8	0.5	0.30	124.93	194.00	82.03
9	0.5	0.20	105.07	183.27	74.80

各分量方向的车削力与切削深度、进给速度的关系如图 2 所示。

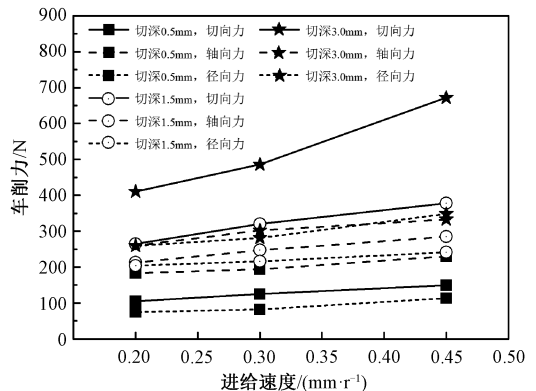


图 2 不同参数下的各分量方向车削力

2.2 车削力经验公式拟合

(1) 指数型切削理论模型

根据切削理论,目前最常用的车削力数学模型为指数型经验模型

$$F = C a_p^x f^y v^z \quad (1)$$

式中: F 为车削力,包括切向力 F_c 、轴向力 F_f 和径向力 F_p 等三个方向上的分量; C 为加工材料系数; x, y, z 分别为车削深度、进给速度和车削速度对车削力的影响系数。由于本文设计的试验参数中不涉及车削速度的变化,因此式(1)可简化为

$$F = C_v a_p^x f^y \quad (2)$$

式中: $C_v = C v^z$ 。 C_v, x, y 需要基于测得的数据,借助多元线性回归数值处理方法进行拟合计算后确定。

将式(2)等号两侧取对数,可得

$$\lg F = \lg C_v + x \lg a_p + y \lg f \quad (3)$$

将表 2 中的试验参数与测试数据代入式(3),得到切向力 F_c 、轴向力 F_f 和径向力 F_p 对应的超定线性方程组。基于超定线性方程组求解基于最小二乘原理和多元线性回归原理的经验公式,对车削力各方向分力对应的系数 C_v, x, y 进行拟合,最终求得碳纤维增强环氧树脂材料在车削速度为 33.93 m/min 时的车削力指数型经验公式

$$\begin{cases} F_c = 59.353 + 129.244 a_p - 284.450 f + 24.044 a_p^2 + 378.182 f^2 + 358.141 a_p f \\ F_f = 89.908 + 44.723 a_p + 357.330 f - 5.019 a_p^2 - 246.844 f^2 + 35.176 a_p f \\ F_p = 28.835 + 167.010 a_p - 279.797 f - 31.937 a_p^2 + 549.333 f^2 + 87.718 a_p f \end{cases} \quad (7)$$

2.3 车削力经验公式的确定度分析

采用指数型经验公式和二次完全回归型经验公式,对表 1 中车削参数对应的车削力进行拟合计算,结果如图 3~图 5 所示。

可以看出,在目前的车削工艺参数范围内,采用二次完全回归型经验公式的车削力拟合值与实际测试值的符合性更好;采用指数型经验公式的切向力和轴向力拟合值与实际测试值的符合性相对较好,径向力的拟合值与实际测试值的符合性相对较差。为了进一步确定经验公式的拟合精度,计算经验公式拟合的确定系数 R^2 ,如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,对于车削力的全部分量,回归型经验公式的确定系数均大于指数型经验公式的确定系数。除径向力指数型经验公式的确定

$$\begin{cases} F_c = 399.33 a_p^{0.7914} f^{0.4934} \\ F_f = 338.04 a_p^{0.2131} f^{0.3148} \\ F_p = 230.26 a_p^{0.6827} f^{0.3625} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 二次完全回归模型

采用二次完全回归方程对切削力经验公式进行拟合。二次完全回归方程数学模型为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, i < j}^2 \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5)$$

式中: β_0 为常数项; β_i 为因素 x_i 的线性效应系数; β_{ii} 为因素 x_i 的二次效应系数; β_{ij} 为因素 x_i 和因素 x_j 的交互效应系数; ϵ 为模型的误差项。

将 $y = F, x_1 = a_p, x_2 = f$ 代入式(5)中,构建三元二次完全回归数学模型

$$F = \beta_0 + \beta_1 a_p + \beta_2 f + \beta_{11} a_p^2 + \beta_{22} f^2 + \beta_{12} a_p f + \epsilon \quad (6)$$

将表 2 中的试验参数与测试数据代入式(6),得到切向力 F_c 、轴向力 F_f 和径向力 F_p 对应的超定线性方程组。对车削力各向分量对应的效应系数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{12}$ 进行拟合,最终求得碳纤维增强环氧树脂材料内圆车削力二次完全回归型经验公式

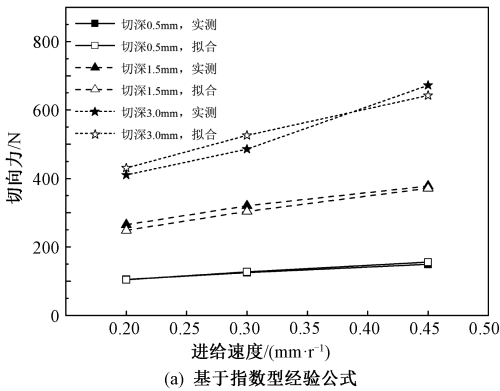
系数小于 95% 外,其余确定系数均大于 98%,其中切向力和径向力的回归型经验公式的确定系数更是高达 99.7%,说明两种车削力经验公式的拟合度均较好。

表 3 车削力经验公式拟合的确定系数

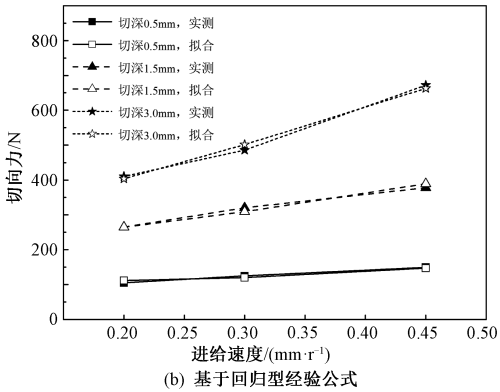
车削力	确定系数	
	指数型经验公式	回归型经验公式
切向力 F_c	0.987 4	0.997 4
轴向力 F_f	0.984 5	0.989 3
径向力 F_p	0.949 8	0.997 0

3 结论

针对碳纤维环状构件内圆车削,当车削速度

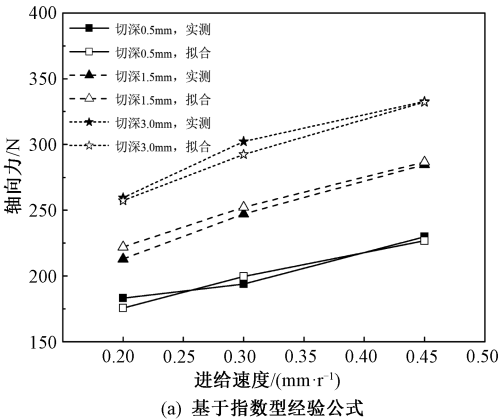


(a) 基于指数型经验公式

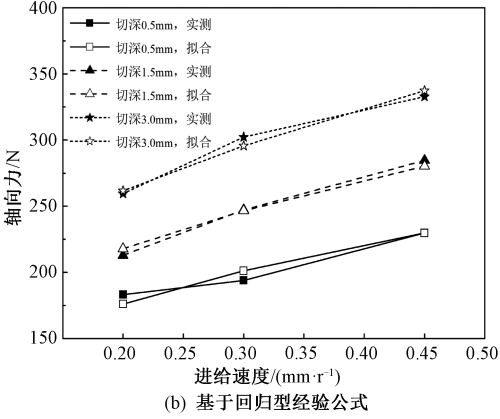


(b) 基于回归型经验公式

图3 切向力的测试与拟合结果

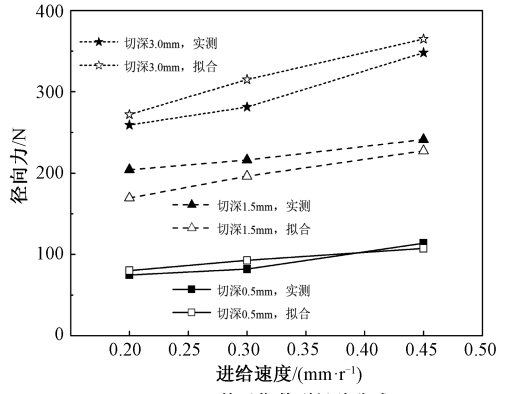


(a) 基于指数型经验公式

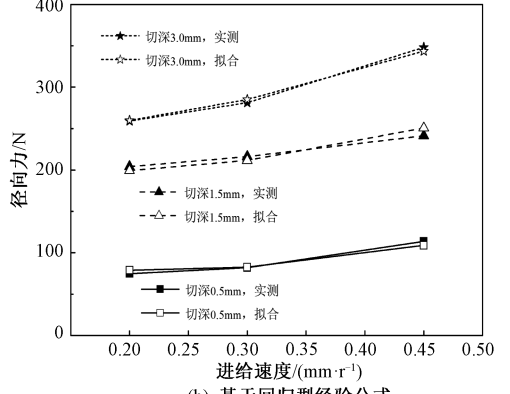


(b) 基于回归型经验公式

图4 轴向力的测试与拟合结果



(a) 基于指数型经验公式



(b) 基于回归型经验公式

图5 径向力的测试与拟合结果

v 为 33.93 m/min 时,在切削深度 a_p 为(0.5~3.0) mm、进给速度 f 为(0.20~0.45) mm/r 的工艺参数范围内,对不同的车削力分量进行了测试与经验公式拟合,并对拟合的经验公式进行了确定度分析。分析结果表明,指数型和回归型两种经验公式的拟合度均较好,其中回归型经验公式拟合结果与实际测试结果的符合性要略高于指数型经验公式。

参考文献

[1] 益小苏,杜善义,张立同,等. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-3.
 [2] CHE D M, SAXENA I, HAN P D, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(3): 034001.
 [3] DANDEKAR C R, SHIN Y C. Modeling of machining of composite materials: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 57: 102-121.

- [4] MARSH G. Composites get in deep with new-generation engine[J]. Reinforced Plastics, 2006, 50(11): 26-29.
- [5] 李春晓. 碳纤维及其复合材料在汽车领域的应用[J]. 新材料产业, 2019(1): 5-7.
- [6] 宋秋香, 贾智源, 高克强. 风电叶片用国产碳纤维预浸料工艺性能和力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(2): 40-46.
- [7] HALE J. Boeing 787 from the ground up[J]. Aero, 2006, 24(4): 17-23.
- [8] QI Z C, ZHANG K F, CHENG H, et al. Microscopic mechanism based force prediction in orthogonal cutting of unidirectional CFRP[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 1209-1219.
- [9] 国坤, 王永国, 孙长余. PCD 钻头钻削碳纤维增强复合材料的切削力研究[J]. 机械制造, 2014, 52(9): 53-55.
- [10] 苏飞, 孙富建. 碳纤维增强复合材料铣削过程中切削力系数的建模[J]. 装备制造技术, 2017(8): 198-201.
- [11] 赵红连. 碳纤维薄壁圆筒车削加工工艺研究[J]. 机械与电子, 2015(5): 20-23.
- [12] 路冬, 蔡力钢, 程强, 等. 碳纤维增强复合材料超声振动辅助车削有限元仿真[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 110-114, 122.

(上接第 54 页)

验结果表明, 峰值个数回归模型的预测中值与真实回波峰值个数相同, 峰值幅度与位置预测的平方相关系数都达到 0.9 以上。为了得到精度更高、支持预测状态范围更广的目标交会回波峰值参数支持向量回归模型, 需要进一步增加训练数据数量规模和弹目交会状态空间的覆盖范围。

参考文献

- [1] 梁子长, 王晓冰, 魏飞鸣, 等. 近场电磁散射特点及其对建模要求[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 141-148.
- [2] YU C L, KIPP R, ANDERSH D J, et al. Near-field electromagnetic modeling and analysis[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997: 1168-1171.
- [3] JENG S K. Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(4): 551-558.
- [4] 彭建东. 全尺寸近场目标特性及弹目交会仿真试验系统[J]. 制导与引信, 1996, 17(4): 26-31, 53.
- [5] 梁子长, 顾俊. IPO 方法计算角反射器和腔体的近场 RCS[J]. 制导与引信, 2005, 26(1): 55-60.
- [6] 金桂玉, 张京国, 高宠, 等. 高速小目标近场动态 RCS 计算[J]. 航空兵器, 2013(6): 30-34.
- [7] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-237.
- [8] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 121-145.

欢迎订阅《制导与引信》期刊