

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.005

CFRP/钛合金叠层钻削中的温度场计算研究^{*}

杨 帆,王福吉^{*},贾振元

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:针对碳纤维复合材料(CFRP)与钛合金构成的叠层钻削中温度尚未准确预测的问题,以传热学基本原理为指导,建立了叠层钻削温度场模型,对钻削温度进行了理论计算;利用有限元方法,通过确定定解条件、区域离散化等步骤编写了计算机程序,使模型可解;进行了叠层钻削实验,通过预埋的极细热电偶获得了钻削过程中界面处特定点的温度,通过测力仪获得了切削力及扭矩等数据;再将测量数据以及加工参数代入模型中,利用其中一点的温度获得了热量传递到工件的效率,将其代回模型中进行了温度场求解,并将其他点处的测量温度与求解结果进行了对比。研究结果表明:计算得到的温度与测量温度值偏差较小,变化趋势相似,精确度较高,可以用来进行叠层钻削过程的温度场预测。

关键词:复合材料/钛合金;叠层钻孔;温度场;有限元

中图分类号:TH16;TG52;TB332

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)12-1261-05

Temperature field calculation of CFRP/Ti alloy laminated drilling

YANG Fan, WANG Fu-ji, JIA Zhen-yuan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problems that the temperature prediction in CFRP/Ti lamination drilling process is not accurately predicted, based on the basic principle of heat transfer, a drilling temperature model was established, the drilling temperature was calculated theoretically. Using the finite element method, after determining definite conditions, the discretization of the region and many other steps, a computer program was written to make the model solvable. The laminated drilling experiment was carried out, in which the temperature at specific points at the interface was obtained through embedded thermocouples, and the cutting force and torque were obtained through the dynamometer. The measured values and processing parameters were substituted into the model, and the heat transfer efficiency was obtained by using the temperature at one point. Then, the efficiency was substituted back into the model and the solution result was compared with the temperature of other points measured in the experiment. The results indicate that the calculated temperature has a small deviation from the measured temperature value, the change trend is similar, and the accuracy is high. The model can be used to predict the temperature field of laminate drilling process.

Key words: CFRP/Ti alloy; composite drilling; temperature field; finite element

0 引 言

碳纤维增强复合材料具有轻质、高强等诸多优点,被广泛用作先进飞机的梁、蒙皮等大型结构件材料。在复合材料和金属连接处,常常需要通过钻孔后采用

铆接、螺接等方式进行连接,因此,形成了很多复材/金属构成的叠层结构。为保证连接精度和加工效率,这些叠层结构的制孔通常采用一体化的方式。叠层钻削过程中,由于空间封闭、加工厚度较大,造成温度累积,并难以散失,钻削温度会比常规复合材料钻削高很多,

收稿日期:2019-04-30

基金项目:国家自然科学基金辽宁省联合基金资助项目(U1508207);国家自然科学基金资助项目(51575082)

作者简介:杨帆(1995-),女,蒙古族,辽宁阜新人,硕士研究生,主要从事 CFRP/钛合金叠层钻削方面的研究。E-mail: 201261813@mail.dlut.edu.cn

通信联系人:王福吉,男,教授,博士生导师。E-mail: wfjsll@dlut.edu.cn

特别是当金属为钛合金时,一体化制孔过程中温度会急剧上升。

温度过高会对复合材料,尤其是界面部位造成不良影响^[1-2]。RAMULU 等^[3]较早发现钛合金热导率低使钻孔区域产生的高温会导致界面处径向损伤和刀具磨损,观测到了复材烧伤现象。BEN Wang 等^[4]通过比较钻削 CFRP/钛叠层和螺旋铣孔的复材形貌,认为钻削中的高温导致了复材的热降解,进而造成孔质量变差。由此可见,钻削过程中的高温确实会对复合材料部分造成严重的损伤,而为了能更好地减小损伤,需要准确掌握钻削过程中的温度情况,因此,对叠层钻削过程中的温度场进行合理预测有重要意义。

关于温度场模拟方面,一些学者开展了部分研究。鲍永杰等^[5]利用有限差分方法得到了单独钻削复合材料时的温度场模型;MONTROYA M 等^[6]通过建立数值模拟得到了钻削 CFRP/Al 叠层时的温度场分布,并通过测量孔壁 4 mm 处点的温度,对此加以了验证;刘亚军等^[7]对钛合金/CFRP 叠层构件螺旋铣孔过程中的温度分布进行了研究。这些都为 CFRP/钛合金叠层钻削中温度场的计算提供了参考。目前,关于复合材料及钛合金构成的叠层的钻削温度场研究还很少,因此,针对叠层钻孔过程中的温度预测十分必要。

本文将以传热学原理为基础,对叠层钻削过程进行分析,建立 CFRP/钛合金钻削温度场模型,利用有限差分方法进行求解,并通过测量叠层钻削中界面温度验证模型的正确性,为叠层钻削温度控制提供参考。

1 叠层钻削温度场模型建立

1.1 参数化及条件假设

本文拟采用 TC4 钛合金和复合材料单向板进行钻削温度场建模,而建模之前,需要根据不同位置处的材料,赋予不同的热物理参数^[8]。

两种材料的各项热物性基本参数如表 1 所示。

表 1 材料热物参数表

材料	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 $c/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 $k/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
钛合金	4 450	678	$K = 6.7$
碳纤维复			$K_x = 4.6$
合材料	1 500	465	$K_y = K_z = 0.42$

假设材料各项基本参数不随温度变化而变化。除材料内部传热外,还存在复合材料与钛合金之间的传热过程,其导热系数 K_z' 取为复合材料在 z 方向导热系数与钛合金导热系数的平均值,即 $K' = (K + K_z)/2$ 。

钻削过程中涉及到和外界环境对流的作用,本文

取空气中的自然对流系数取为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,环境温度为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,即 288.15 K 。

钻孔所产生的能量大部分以热能的形式传递给试件、刀具、切屑,以及周围环境^[9],将刀具与工件材料接触处看做热源。由于传热模型中存在两种材料,每一步计算中,需准确判断各个离散点处于何种状态。为简化计算,将热源简化为随时间向下进给的圆形热源。假设总消耗的能量中有 η 传递给试件,则平均热流密度可表示为:

$$q = \frac{\eta(M\omega + F_z v_f)}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1)$$

式中: M — 扭矩; ω — 角速度; F_z — 轴向力; v_f — 线速度; η — 产热传递到工件的效率; d — 刀具直径。

1.2 导热微分方程和定解条件

1.2.1 导热微分方程建立

三维直角坐标系的建立如图 1 所示。

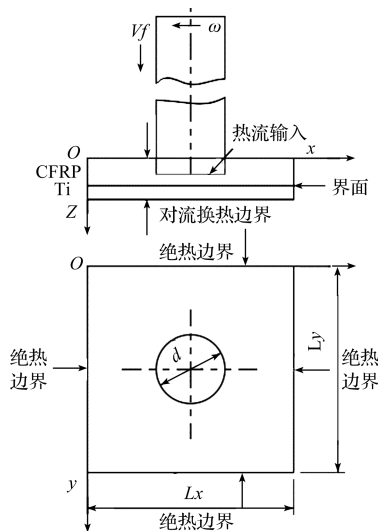


图 1 三维直角坐标系的建立

图 1 中,模型的上下表面为对流换热表面(钻头作用区域除外),前后左右 4 面因为受热源影响较小,为绝热表面。

根据传热学规律,可建立基本导热方程:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: k_x, k_y, k_z — 材料沿 x, y, z 方向的传热系数; ρ — 材料的密度和比热容; t — 时间; T — 某一时刻任一点的温度,是关于 t, x, y, z 的函数; $Q(x, y, z)$ — 宏观热源项,在有热源输入位置取为 $q(x, y, z)$,其他位置为 0。

1.2.2 定解条件

为确保导热微分方程有唯一确定解,需要对边界

条件进行确定。

绝热表面的边界条件可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = 0, X; \frac{\partial T}{\partial y} = 0, y = 0, Y \quad (3)$$

对流换热过程表达式为:

$$k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = h \cdot T, z = 0, Z_1 + Z_2 \quad (4)$$

热源输入部分表达式为:

$$q(x, y, z) = \frac{\eta(M\omega + F_z v_f)}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}, x^2 + y^2 \leq \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (5)$$

(1) 钻削初始条件。钻削开始前,工件内任意点温度都与环境温度相同,即 $T_{i,j,k}^0 = T_0$ 。

(2) 钻削去除机制。对于模拟的钻削过程,需要及时将热源经过部分的材料去除,将热源经过处节点温度改为 0,同时,靠近该类节点的类型,由内部节点改为对流换热节点。

1.3 导热微分方程求解

1.3.1 区域离散化处理

在直角坐标系中,对整个试件进行网格划分,网格在 x, y, z 方向上的步长分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 。 N_x, N_y, N_z 分别为 3 个方向上的网格步数,则 $N_x = X/\Delta x, N_y = Y/\Delta y, N_z = (Z_1 + Z_2)/\Delta z, t = (Z_1 + Z_2)/V_f, N_t = t/\Delta t$ 。其中: X, Y, Z_1, Z_2 — 为工件的长、宽、高; V_f — 刀具向下进给速度; Δt — 时间步长; N_t — 时间步数。

节点选取情况如图 2 所示。

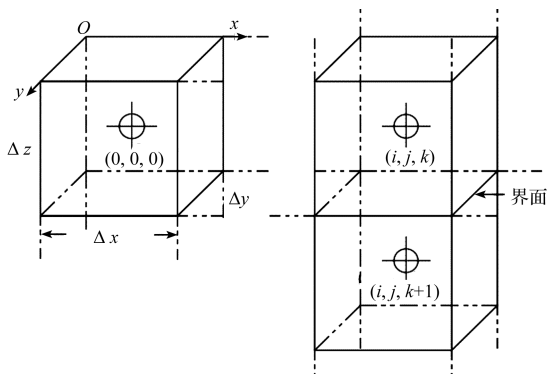


图 2 节点选取情况说明

本研究用 i, j, k 分别表示 x, y, z 方向的节点代号, $T_{i,j,k}$ 代表以每一个节点为中心的单元体的温度。由于叠层钻削中存在材料界面,按照节点代表以其为中心的单元体的划分准则,同一单元体必须是由同种材料构成,节点选取从 $\Delta x/2, \Delta y/2, \Delta z/2$ 处开始选取。

界面处某点温度由上下两节点温度平均值得到,即:

$$T = (T_{i,j,k} + T_{i,j,k+1})/2 \quad (6)$$

1.3.2 代数方程建立及稳定性条件

本文采用热平衡法^[10]建立节点离散方程。以材料内部节点为例,在一段时间内,流入其内部的所有热量的和等于这段时间内能量的增量(以流入节点方向为正),即:

$$k_x \Delta y \Delta z \Delta t \frac{T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta x} + k_x \Delta y \Delta z \Delta t \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta x} + k_y \Delta x \Delta z \Delta t \frac{T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta y} + k_y \Delta x \Delta z \Delta t \frac{T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta y} + k_z \Delta x \Delta y \Delta t \frac{T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta z} + k_z \Delta x \Delta y \Delta t \frac{T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta z} + \rho c \Delta x \Delta y \Delta z (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) \quad (7)$$

经整理,可得:

$$\frac{k_x \Delta t}{\rho c \Delta x^2} (T_{i-1,j,k}^n + T_{i+1,j,k}^n) + \frac{k_y \Delta t}{\rho c \Delta y^2} (T_{i,j-1,k}^n + T_{i,j+1,k}^n) + \frac{k_z \Delta t}{\rho c \Delta z^2} (T_{i,j,k-1}^n + T_{i,j,k+1}^n) + \left(1 - 2 \frac{k_x \Delta t}{\rho c \Delta x^2} - 2 \frac{k_y \Delta t}{\rho c \Delta y^2} - 2 \frac{k_z \Delta t}{\rho c \Delta z^2}\right) T_{i,j,k}^n = T_{i,j,k}^{n+1} \quad (8)$$

同理,可得到其他节点类型的迭代方程。有热源输入的节点,在方程中将热流密度值 $q(x, y, z)$ 代入;有对流换热的节点,将 $q = h(T_0 - T)$ 代入即可;绝热节点的温度值由相邻的内部节点温度决定。根据每一时刻迭代方程,即可求出下一时刻各个节点的温度值,从而能够计算出随时间变化的叠层钻削区内温度情况。

由于非稳态导热问题引起的显示差分格式,为避免出现不合理的震荡的解,对于所有节点前面的公式, T_n 前的系数必须大于或等于 0,以式(8)为例,即:

$$1 - 2 \frac{k_x \Delta t}{\rho c \Delta x^2} - 2 \frac{k_y \Delta t}{\rho c \Delta y^2} - 2 \frac{k_z \Delta t}{\rho c \Delta z^2} \geq 0 \quad (9)$$

本文以各类节点温度的显示差分格式为基础,编写 C++ 程序,求解叠层钻削温度场。将轴向力、扭矩、角速度及线速度代入求得的热源值 q_1, q_2 , 作为输入条件,给出符合稳定性要求的 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ 后即可求解。

取 $\Delta x = 0.5 \text{ mm}, \Delta y = 0.5 \text{ mm}, \Delta z = 0.1 \text{ mm}, \Delta t = 0.002 \text{ s}$, 经验算,其值满足稳定性条件。

2 叠层钻削实验及温度结果

2.1 实验方案

本文在光洋五轴数控机床上进行钻孔实验,采用 Kistler 9257B 测力仪测量切削力信号,并通过后续的电荷载大器和 A/D 采集系统,将切削力信号传输至计算机。实验采用热电偶测量界面处特定点的温度,并

将测量信号输入到拓普瑞测温设备,并保存,用来验证传热模型。

试验件为 30 mm×30 mm×4 mm 复材,与 30 mm×30 mm×2 mm 钛合金叠层材料,刀具采用 10 mm 普通涂层麻花钻;复合材料中,碳纤维型号为 T800,树脂基体型号为 X850,钛合金选用 TC4 钛合金。

笔者采用变参数加工,复材加工采用转速 3 000 r/min,进给转速 25 mm/min;钛合金加工采用转速 500 r/min,进给转速 25 mm/min。在横刃接触到钛合金时,改变转速参数。

为测量界面处温度值,又不破坏板件,本文提出新的测量方法,即利用激光在复合材料表面加工出浅槽,用于铺放热电偶,将极细热电偶测量端置入进行测温,结合工件和刀具的几何尺寸,设计具体测量点位置,如图 3 所示。

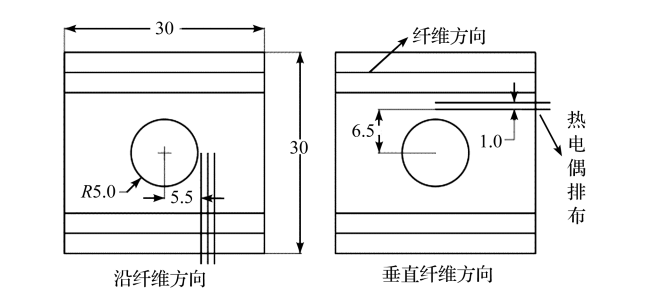


图 3 热电偶线排布示意图

图 3 中,沿纤维方向选取 3 个测量点,分别距离孔中心 5.5 mm、6.5 mm、7.5 mm;垂直于纤维方向选取 2 个测量点,分别距离孔中心 6.5 mm、7.5 mm。

2.2 温度测量结果及计算结果

根据温度测量结果,沿纤维方向距孔中心 0.5/1.5/2.5 处,最大温度分别为 130.7℃、115.2℃、98.5℃;垂直纤维方向距孔中心 1.5/2.5 处,最大温度分别为 100.2℃、92.5℃。

由于碳纤维传热能力强于树脂,在平行于纤维方向温度传播最快,垂直于纤维方向温度传播得最慢。

笔者取实验测得的切削力和扭矩数据平稳段的平均值,再将三次钻削过程中的平均值,作为 M 、 F_z 的取值,计算结果如表 2 所示。

表 2 扭矩和轴向力计算结果

材料	扭矩/(N·M)	轴向力/N
CFRP	1.055	36.08
Ti	15.95	565.4

根据实验,测得沿纤维方向的最高点温度为 130.7℃,将其通过模型求解,可得到效率 $\eta=13\%$,再代入热源计算式,可分别得到 q_1 、 q_2 。

再将热源值代入模型,可以得到场内任意时刻的温度变化情况。

将界面处特定节点处温度值输出与实验结果进行对比,如图 4 所示。

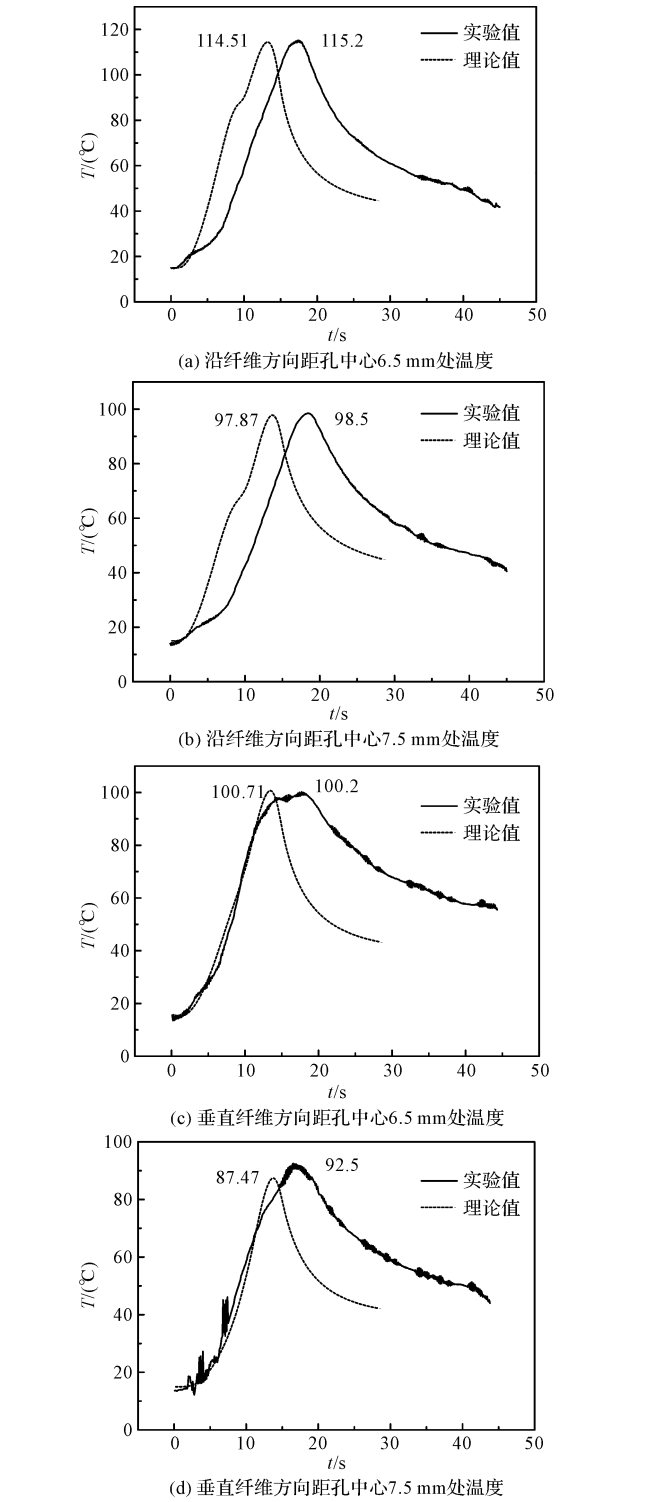


图 4 计算结果与实验值对比

3 计算值与实验值对比分析

由图 4 可得:通过计算最大值点的温度,理论值与

实验值的误差均在6%以内,数值计算结果在距离孔中心较近位置处更为精确,距离稍远处误差偏大。

实验中,温度最大值点均在钻削温升开始后20 s左右,与钻削完成时间基本吻合,即钻削到钛合金时仍会有较多热量传递到界面处,在叠层钻削中钛合金钻削对界面处温度影响非常大。

与实验结果相比,计算值取得极大值的时间通常比实际提前4 s~5 s。实际钻削过程中刀具不断向下进给,每一时刻都有外界热量施加在工件材料上,导致温度上升。而传导模型中利用有限元方法将切削过程进行了分段处理,刀具每隔时间向下进给一段距离,并且仅在每次到达的位置处有热量传入工件,相当于把每段时间内的热量输入都提前到该时间段的初始阶段,即刀具每段位移所在的位置处。而效率取值是以保证最大温度值为标准,因此,在最大温度一定的前提下,整体温升过程提前,取得最大值的时间也会提前。

经实验验证,通过叠层钻削温度模型得到的界面温度与实验测得的温度高度吻合,具有较高的可信度。该结果适用于其他板厚与加工参数叠层的钻削当中。

4 结束语

基于传热学原理,本文建立了CFRP/钛合金叠层的钻削模型,通过确定边界条件、细化节点类型后使模型可求解,同时进行了叠层钻孔实验,测量了过程力和扭矩并利用热电偶测量界面处温度,最后对模型进行了求解和验证,得到以下结论:

(1)CFRP/钛合金叠层钻削中,钻削到钛合金部分时界面温度继续升高,钛合金钻削阶段产热对界面温度影响不可忽略;

(2)钻削CFRP单向板及钛合金叠层时,由于碳纤维的传热能力比树脂强,在相同距离处与纤维平行方向温度比垂直纤维方向高;

(3)经验证,叠层钻削温度场模型具有较高的准

确度,可适用于其他参数的叠层钻削当中,可为叠层钻削的温度控制提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] VITALII K, JOZEF Z, SVETLANA R, et al. The effect of cutting temperature on hole quality when drilling CFRP/metal stack[J]. Вісник НТУУ ХП, 2015, 4(1113):138-141.
- [2] 温泉. C/E 复合材料制孔损伤形成机理与评价方法研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2012.
- [3] RAMULU M, BRANSON T, KIM D. A study on the drilling of composite and titanium stacks[J]. Composite Structures, 2001,54(1):67-77.
- [4] BEN W, HANG G, BO C, et al. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014,228(7):698-706.
- [5] 鲍永杰,高航,梁延德,等. 碳纤维/环氧树脂复合材料钻削温度场建模与试验[J]. 兵工学报,2013,34(7):846-852.
- [6] MONTOYA M, CALAMAZ M, GEHIN D, et al. Numerical simulation of workpiece thermal field in drilling CFRP/aluminum alloy[J]. Key Engineering Materials, 2014(611-612):1226-1235.
- [7] 刘亚军,李皓,李士鹏,等. 钛合金/CFRP 叠层构件螺旋铣孔界面切削热研究[J]. 机械科学与技术,2019,38(9):1406-1413.
- [8] 陈海宾,苗思忠,张洋凯,等. 不同压力下前混合磨料射流切割 CFRP 的试验研究[J]. 流体机械,2018,46(3):13-16.
- [9] GUOPING Z, YONGJIE B, HANG G. Research on the drilling temperature field model of the unidirectional carbon fiber epoxy composites[J]. Advanced Materials Research, 2012(565):478-483.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,1982.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

杨帆,王福吉,贾振元. CFRP/钛合金叠层钻削中的温度场计算研究[J]. 机电工程,2019,36(12):1261-1265.

YANG Fan, WANG Fu-ji, JIA Zhen-yuan. Temperature field calculation of CFRP/Ti alloy laminated drilling[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(12):1261-1265.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>