

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2020.02.003

钛合金零件钻削过程仿真与试验研究

谈志晶* 林 森

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要:

钛合金被广泛用于航空工业中,譬如民用飞机吊挂滑轨等典型结构的制造。钛合金作为难加工材料,通常使用钻削的方法进行加工,不同的钻削参数对应不同的钻削温度和钻削力,而钻削温度和钻削力对加工精度影响较大。为使加工参数和加工精度得到很好地匹配,借助 Deform 3D 有限元仿真软件建立了钛合金热应力耦合有限元模型,通过软件仿真研究钛合金滑轨在加工过程中的钻削力以及钻削温度。首先,对钻头和钛合金试件进行网格划分。其次,建立材料本构模型和切屑分离标准,使用仿真软件得到加工过程的钻削力和钻削温度。最后,采用试验方法获取钻削温度和钻削力,与仿真结果进行对比。结果表明:仿真结果与试验较为吻合,仿真能输出有效的钻削力和钻削温度。

关键词: 钛合金; 钻削; 有限元仿真; 本构模型; 分离标准

中图分类号: TG52

文献标识码: A



0 引言

由于钛合金材料的比强度高、耐腐蚀能力强、热强度大,因此被广泛地应用于航空工业等民用领域。钻削是航空工业加工中应用广泛的加工过程之一,其导热系数低、比强度高、加工温度高^[1]。

对于仿真模型的成形, Galloway 创立了锥模法^[2], 康德纯等提出了麻花钻的数学模型^[3]。Sakurai 等对钛合金的钻削加工做了研究^[4]。Cantero 等对干式钻削钛合金做了研究^[5]。美国密歇根大学的 Matthew Bono 和 Jun Ni 用铂丝埋入工件的方法, 测量钻头主切削刃温度, 并用 ABAQUS 软件对工件热流分布做了研究^[6]。浙江大学的黄志刚等用 ABAQUS 软件建立了金属切削加工的热力耦合模型^[7]。

本文拟建立热应力耦合有限元模型来预测钛合金在不同加工速度下的钻削力和钻削温度, 并使用标准麻花钻^[8]进行钻削试验来验证模型的准

确性。

1 有限元模型

1.1 网格划分—钻头与试件

使用作图软件绘制钻头与试件模型, 并保存为 STL 格式, 将其导入仿真软件 Deform 3D^[9]。假设钻头为刚体, 即加工过程中不产生变形。采用四面体单元网格模拟钻头模型, 网格数量约为 16 000 个, 由于钻头主切削刃对仿真结果的精度影响较大, 为得到较为精准的仿真结果, 对该界面处的网格进行加密, 如图 1 所示。

由于试件表面为加工面, 直接影响仿真结果, 因此其网格划分相对复杂。由于试件加工过程中会变形, 假设试件为塑性体。网格单元上的温度、应力以及应变在试件加工垂直面上的变化梯度较大。为了能较为精准地模拟变化梯度, 需要更多的网格捕捉变化梯度, 因此相较于钻头的网格, 试件使用了 60 000 个网格, 如图 2 所示。

* 通信作者。 E-mail: tanzhijing@comac.cc

引用格式: 谈志晶, 林森. 钛合金零件钻削过程仿真与试验研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(2):11-15. TAN Z J, LIN S. Simulation and experimental study on drilling process of titanium alloy parts[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(2):11-15(in Chinese).

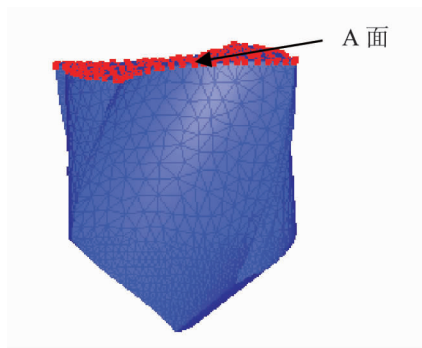


图 1 钻头的网格划分

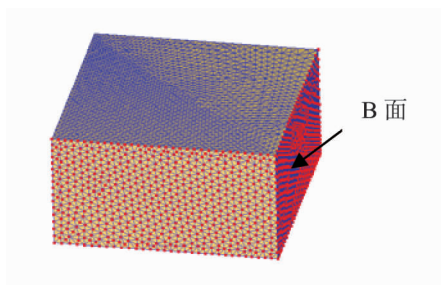


图 2 试件的网格划分

1.2 材料本构模型

在 Deform 3D 系统定义材料。工件选钛合金材料,其材料本构模型如下:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为流动应力, 见图 3; $\bar{\varepsilon}$ 为应变; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为应变率; T 为温度。

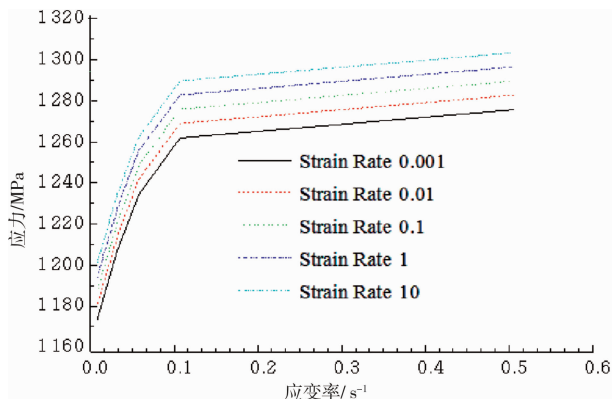


图 3 钛合金的流动应力曲线

1.3 边界条件设定

工件固定, 钻头相对工件做旋转运动。根据实际钻削参数, 输入进给速率和转速。

边界条件分为几何边界条件和热边界条件。钻头和工件接触属于几何边界条件, 采用剪切摩擦, 取

摩擦系数为 0.67。工件 B 面固定 x 、 y 和 z 方向。钻头的热边界为 A 面, 工件的热边界为 B 面。

在仿真控制对话框中设置分析类型、分析步和迭代算法等参数。本文进行变形和热传导分析。分析步根据工件最小网格和钻削深度来定义, 一般每一分析步位移应为工件最小网格的 1/3。分析热力耦合用 Sparse 算法和 Newton-Raphson 迭带法, 计算精度较高。

1.4 切屑分离准则

零件切屑过程中的分离标准主要有两种: 几何准则和物理准则。几何准则主要通过变形体的几何尺寸的变化来判断分离与否; 而物理准则主要是基于制定的一些物理量的值是否达到了临界值而建立的, 主要有基于等效塑性应变准则、基于应变能量密度准则、断裂应力准则等^[10]。钛合金在钻削过程中, 钻头将试件材料剪切分离, 因此, 在使用 Deform 3D 仿真过程中, 采用了 Normalized Cockcroft & Latham 分离准则^[11], 如式(2)所示。当超过临界破坏值 C_i 时, 则认为材料从本体中分离出来。

$$C_i = \int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_m / \sigma_e) d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

式中, C_i 为单轴拉伸的临界破坏值; ε_f 为破坏时的应变; $\bar{\varepsilon}$ 为有效应变; σ_m 为最大应力; σ_e 为等效应力。

2 钻削试验

本试验在 Z5125A 立式钻床上进行, 刀具为标准高速钢麻花钻, 试件材料为钛合金, 钻削参数见表 1。加工过程中的温度通过图 4 的电路进行采集。电路由标准热电偶、电路放大器和数据采集卡三部分组成, 其中热电偶采用电焊的方式焊接在试件底部。

表 1 钻削试验参数表

试件厚度 h/mm	钻头直径 d/mm	进给速率 f/mm · r ⁻¹	切削速度 vc/m · min ⁻¹
12	6.8	0.112	10.7
12	6.8	0.112	12.8
12	6.8	0.112	17.0

图 5 为试验采集的数据图, 试验参数如下: 钻头直径 6.8 mm, 钻头进给速率 0.112 mm/r, 钻头切削速度 10.7 m/min。

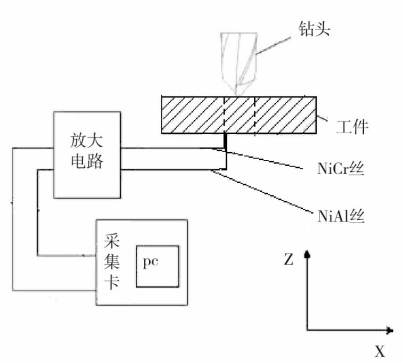


图4 温度测量原理图

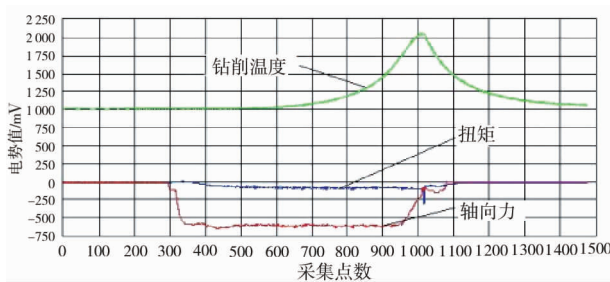


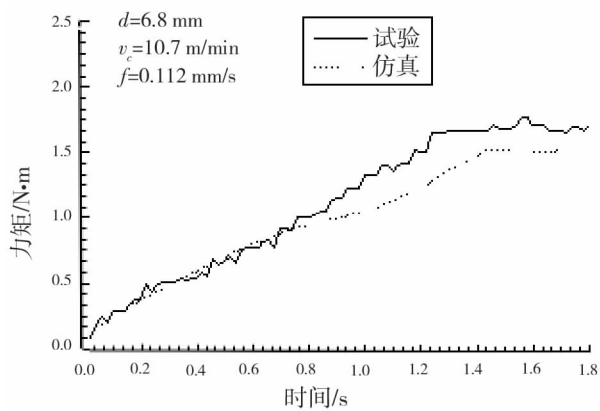
图5 试验采集数据

3 结果分析与讨论

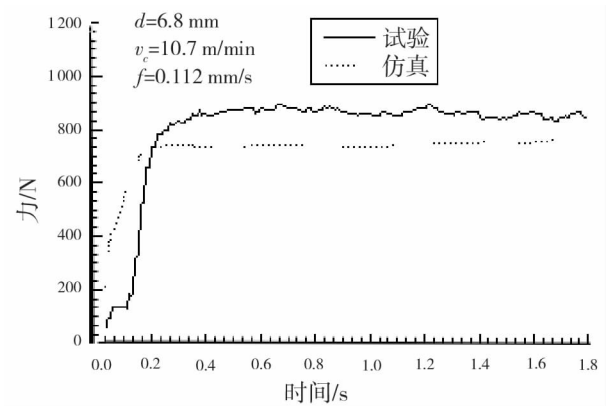
3.1 钻削力

图6和图7分别给出了10.7 m/min和17.0 m/min速度下的钻削力仿真与试验结果。

仿真与试验的扭矩误差分别为-8.3%和10.9%;轴向力误差分别为-12.15%和-12.77%;仿真是建立在理论模型的基础上的,它的精度取决于仿真参数和材料参数的准确性。仿真结果和试验结果较为吻合,在可接受误差范围内,故钻削仿真是有研究意义的。

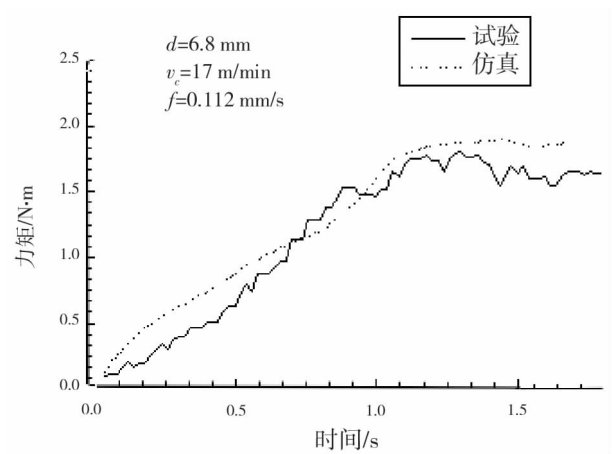


a) 扭矩

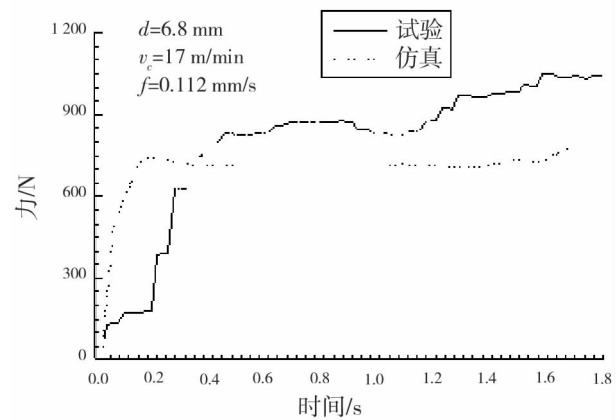


b) 轴向力

图6 10.7 m/min时的钻削力



a) 扭矩



b) 轴向力

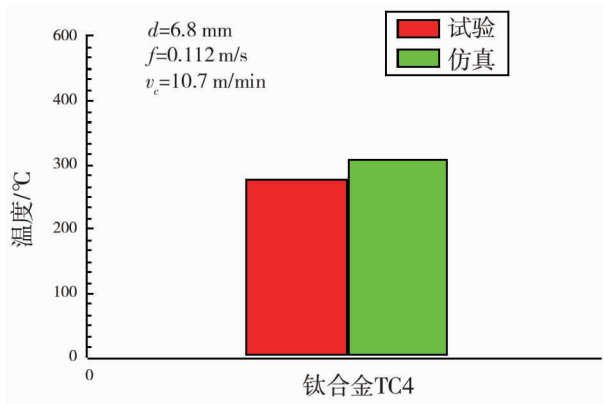
图7 17.0 m/min时的钻削力

3.2 钻削温度

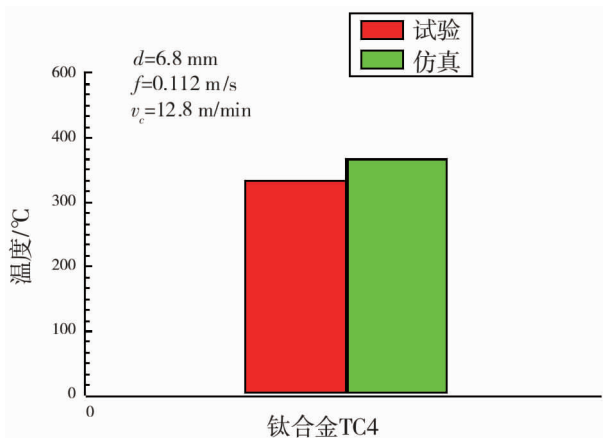
图8给出了10.7 m/min和17.0 m/min速度下的钻削温度。钻削温度仿真的误差分别为9.87%

和 14.7%。

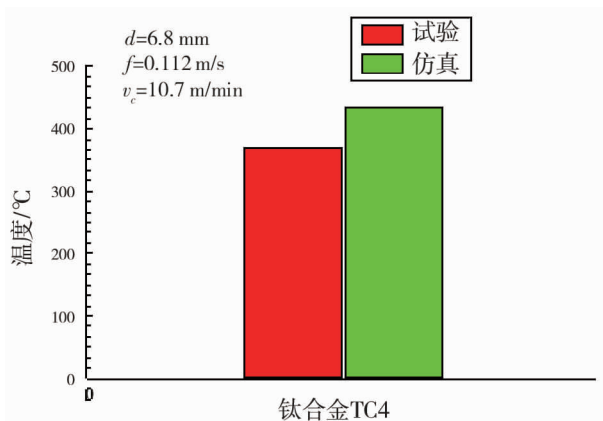
钛合金钻削温度随进给量的增大而升高。其产生的原因是进给量越大,单位时间的切除量越大,生成的热量越多,故综合看钻削温度随进给量的增大而升高。



a) 10.7 m/min



b) 12.8 m/min



c) 17.0 m/min

图 8 钻削温度

4 结论

1) 建立了热应力耦合有限元模型来预测钛合金钻削力和钻削温度。扭矩,轴向力以及温度的钻削过程曲线与仿真钻削过程曲线较为吻合,误差在可接受范围内,可用于预测钛合金钻削各种参数对钻削过程的影响。

2) 仿真研究可以弥补试验存在的一些不足,用于评估制造过程参数对滑轨制造精度的影响。

参考文献:

- [1] 吴健. 典型难加工材料钻削相关技术的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] GALLOWAY D F. Some experiments on the influence of various factors on drill performance[J]. Transactions of the ASME, 1957, 79:191-231.
- [3] 康德纯, ARMAREGO E J A. 麻花钻直线刃圆锥面刃磨法的数学建模[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(3):290-295.
- [4] SAKURAI K, ADACHI K, KAMEKAWA T, et al. Intermittently decelerated feed drilling of Ti-6Al-4V alloy, Keikinzoku[J]. Jpn. Inst. Light Met, 1996, 46: 138-143.
- [5] CANTERO J L, TARDIO M M, CANTELI J A, et al. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45:1246-1255.
- [6] BONO M, NI J. A Method for Measuring the Temperature Distribution Along the Cutting Edges of a Drill[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124:921-923.
- [7] 黄志刚, 柯映林, 王立涛. 金属切削加工的热力耦合模型及有限元模拟研究[J]. 航空学报, 2004, 25(3): 317-320.
- [8] 量具刀具汇编组. 量具刀具国家标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [9] 胡建军, 李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [10] 方刚, 曾攀. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 394-404.
- [11] COCKCROFT M G and LATHAM D J. Ductility and the workability of metals[J]. Journal of the Institute of Metals, 1968, 96:33-39.

作者简介

谈志晶 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机短舱吊挂结构设计。E-mail: tanzhijing@comac.cc

林 森 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机短

舱吊挂结构设计。E-mail: linsen@comac.cc

Simulation and experimental study on drilling process of titanium alloy parts

TAN Zhijing * LIN Sen

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Titanium alloy is widely used in aviation industry, such as the pylon track of typical structures for civil aircraft. Titanium alloy as a difficult materials, is usually processed by drilling. Different drilling parameters correspond to different drilling temperature and drilling force, while drilling temperature and drilling force have great influence on machining precision. In order to match the drilling parameters with machining precision well, the software named Deform 3D was used to establish a finite element model of titanium alloy thermal stress coupling, and simulate the drilling force and drilling temperature during the machining process. Firstly, the drilling bits and titanium alloy samples were meshed. Secondly, the constitutive model and breakaway criterion of titanium alloy material were established, and the drilling force and temperature were obtained by simulation software. Finally, the drilling temperature and drilling force were obtained by test, and compared with the simulation results. The results show that the simulation results are in good agreement with the experiment, the error is within 15%, and the simulation can provide effective drilling force and drilling temperature.

Keywords: titanium alloy; drilling process; finite element simulation; constitutive model; breakaway criterion

* Corresponding author. E-mail: tanzhijing@comac.cc