

# 铝合金 A357 车削加工工件表面温度场研究

吴勇文<sup>1</sup>, 盛波<sup>2</sup>, 王伏林<sup>1</sup>, 胡仲勋<sup>1</sup>, 徐舟<sup>2</sup>, 朱朝霞<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002)

**摘要:**针对铝合金车削加工过程中工件表面温度难以准确测量和精准控制的问题,基于有限元软件建立铝合金 A357 的二维切削仿真模型;通过切削仿真分析得出不同切削速度和切深下的工件表面温度场分布规律;设计一种用于车削加工过程中在线测量工件表面温度的实验装置;通过车削实验,得到了切削过程中工件表面温度变化趋势。结果表明:该切削仿真模型可以有效地预测工件表面温度,为进一步分析精加工工件尺寸偏差、提高工件加工表面质量提供参考依据。

**关键词:**铝合金 A357;切削仿真模型;工件表面温度;测温系统;车削加工

**中图分类号:**TH164 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0031-03

## Study of Temperature Field on Workpiece Surface in Turning Process of Aluminum Alloy A357

WU Yongwen<sup>1</sup>, SHENG Bo<sup>2</sup>, WANG Fulin<sup>1</sup>, HU Zhongxun<sup>1</sup>, XU Zhou<sup>2</sup>, ZHU Zhaoxia<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. AECC South Industry Limited Company, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** To overcome the difficulty in precisely measuring and controlling the surface temperature of workpiece during turning process, the orthogonal cutting simulation model of the machining process of aluminum alloy A357 was established based on the finite element software. Through analysis on the cutting simulation model, the distribution law of the workpiece surface temperature field under different cutting speeds and cutting depths is obtained. An experimental setup is designed for online measurement of the workpiece surface temperature during the turning process. The variation trend of the workpiece surface temperature is verified through the turning experiment. The research results show that the cutting model can effectively predict the surface temperature of the workpiece, which can provide a reference for further analysis of workpiece size deviation in finishing process and improve workpiece surface quality.

**Keywords:** aluminum alloy A357; cutting simulation model; workpiece surface temperature; temperature measure system; turning

## 0 引言

铝合金 A357 具有强度高、耐热、耐腐蚀等优良性能,被广泛应用于航空发动机制造领域。切削加工中产生的切削热对工件已加工表面质量、加工精度以及刀具寿命有着非常重要的影响<sup>[1]</sup>。随着切削热量的不断产生,工件受热膨胀产生尺寸误差,将严重影响工件的加工精度。因此,开展铝合金加工中工件表面温度的研究,对于控制工件的尺寸精度、提高工件已加工表面质量有着重要的意义。

目前国内外学者对工件表面温度的研究,主要从数值仿真、有限元分析和实验三个方面进行。张金峰等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法,研究了微铣刀磨损对工件温度的影响。李泽阳等<sup>[3]</sup>基于移动热源法建立了工件焊接加工过程中的温度分析模型。杨洋等<sup>[4]</sup>针对 AISI 1045 工件建立了切削温度仿真模型。由于切削温度场边界条件复杂,单一

的数值仿真和有限元分析无法保证温度模型的准确性,还需进行实验验证。CHEN L 等<sup>[5]</sup>通过热电偶对硬车削淬硬钢的加工表面温度进行实验测量,但其设计的嵌入式热电偶测温装置难以保证车削加工过程中热电偶尖端的准确位置,从而影响已加工表面温度预测的正确性。

现有研究中,针对铝合金工件已加工表面温度的研究较少。因此,有必要对该材料在切削过程中的工件温度场分布规律进行研究。本文针对铝合金 A357 材料,拟利用 ABAQUS 软件建立切削仿真模型,模拟工件表面温度,并通过实验进行验证。

## 1 切削仿真模型的建立

刀具和工件材料对切削仿真结果有着重要的影响。本研究中工件材料为铝合金 A357,选择的刀具材料为 YG8 硬质合金,其材料参数如表 1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 工件及刀具材料参数

材料物理参数	YG8	铝合金 A357
泊松比	0.22	0.33
弹性模量/GPa	610	790
比热容/(J/kg·°C)	200	253
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	14 700	2 680

## 1.1 材料模型

本文采用 Johnson-Cook 本构模型,其表达式如下<sup>[7]</sup>:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为流动应力,MPa; $\varepsilon$  为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$  为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率; $T$  为工件材料在加工过程中的转变温度; $T_r$  为环境温度; $T_m$  为工件熔化温度; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$  分别为材料模型参数,如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

表 2 铝合金 A357 材料的 J-C 本构参数

A/MPa	B/MPa	C	m	n
370.4	1 798.7	0.013	1.528 2	0.733

铝合金 A357 材料的力学性能如表 3 所示<sup>[8]</sup>。

表 3 铝合金 A357 的力学性能

抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈服强度/MPa
341	9	272

## 1.2 切削参数及模型

切削仿真的工件长度 5 mm,高度 3 mm。刀具刀尖圆弧半径为 0.06 mm,刀具前角和后角分别为 10°和 3°,采用干式切削。图 1 为铝合金 A357 正交切削二维仿真模型。在仿真模型参数设置中,刀具与工件接触部分网格局部细化,同时,刀具设置为刚性体。

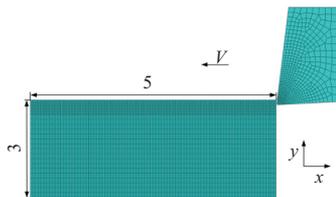


图 1 铝合金 A357 正交切削模型

为研究切削参数对工件表面温度的影响,设定三组切削实验,切削参数如表 4 所示。根据实际的切削环境,初始时刻工件和刀具温度为 20 °C。工件表面温度在后处理模块中进行分析。

表 4 车削参数设置

切削速度 $V$ /(mm/min)	切深 $a_p$ /mm	进给量 $f$ /(mm/r)
180	0.3	0.15
360	0.3	0.15
180	0.6	0.15

## 2 仿真结果分析

改变切削速度和切深,研究不同工况下工件加工表面温度分布情况。在同一组切削参数下,受切削热源的影响,初始切削时,工件表面温度会升高。随着切削热产生和散失达到平衡,工件表面温度趋于稳定。此时,仿真过程每一帧的仿真云图中工件温度分布区域大致相同,工件表面的最高温度值也近似相等。图 2 为不同切削参数条件下工件表面温度的仿真云图。

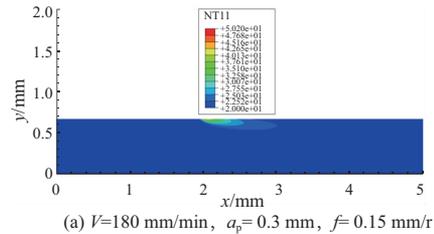
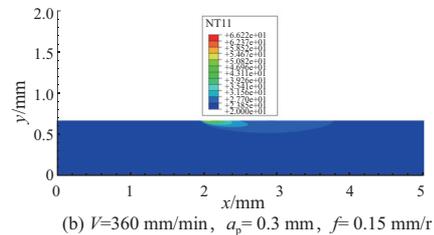
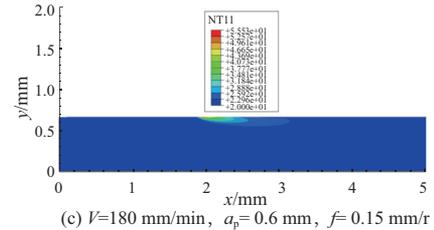
(a)  $V=180$  mm/min,  $a_p=0.3$  mm,  $f=0.15$  mm/r(b)  $V=360$  mm/min,  $a_p=0.3$  mm,  $f=0.15$  mm/r(c)  $V=180$  mm/min,  $a_p=0.6$  mm,  $f=0.15$  mm/r

图 2 不同工况下工件表面温度变化(隐藏刀具)

由图 2 可知,工件表面温度最大值随着切削速度和切深的增大而升高。对比图 2(a)和图 2(b),保持切深  $a_p=0.3$  mm 不变,切削速度从 180 mm/min 增大至 360 mm/min 时,工件表面最高温度从 50.2 °C 升高至 66.2 °C,温升值为 16 °C。切削速度的提高加剧了切屑和刀具前刀面之间的摩擦,产热增加,导致工件表面温度升高。对比图 2(a)和图 2(c),在切削速度不变的情况下,切深从 0.3 mm 增大至 0.6 mm 时,工件表面最高温度由 50.2 °C 升高至 55.5 °C,温度提高 5.3 °C。此时温升主要原因是由于较大的切深增大了工件的剪切变形程度,从而导致产生的热量增加,使得工件已加工表面温度升高。同时,切屑与刀具表面的接触长度增加,改善了散热条件。因此,工件表面温升值较低。同时对图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)可知,切削速度和切深分别增大 1 倍时,工件表层的温度分布云图区域将变大,即工件受切削热的影响区增大,其中切削速度增加 1 倍对工件表面层温升作用更加明显,进而对工件尺寸超差产生较大的影响。

### 3 实验验证

#### 3.1 测温方案设计

为验证切削仿真结果,开展铝合金 A357 正交切削实验。本研究中所使用的试验设备为 CM6140 普通卧式车床;工件材料为直径 23 mm、长度 170 mm 的 A357 铝合金棒料;车削刀具为 YG8 切槽刀;热电偶测温系统主要包括 K 型热电偶、导电滑环、信号转换器和温度数据采集器,如图 3 所示。切削加工中所采用加工参数与切削仿真参数相同。



图 3 热电偶测温系统

采用工件切槽测温法实现工件表面温度测量。测温样件的结构如图 4 所示。图 4 中的铝棒为经过线切割设备切割后的其中一部分。铝棒上有 3 个螺纹孔,切割后的两部分铝棒通过 3 个螺栓连接,进行后续车削测温实验。铝棒一端有直径  $\phi 5$  mm、长度 15 mm 的中心孔,用于 K 型热电偶丝 1、电偶丝 2 的安装。在车削实验过程中,两处热电偶测温点沿工件中心轴线对称布置。用绝缘胶布将热电偶测温点与工件表面相隔离,在不影响传热的同时,实现热电偶测温点绝缘,从而提高温度测量精度。为便于热电偶丝的安装,在工件上设计了一宽度与深度均为 0.5 mm 的凹槽。在贴置热电偶的测温点时,尽可能让测温点距离切削表面的深度与切深  $a_p$  相等,从而保证热电偶测温点在切削过程中测得的温度为工件表面温度。

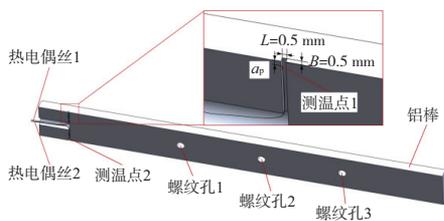


图 4 测温样件结构

图 5 为测温样件装配示意图。在加工过程中,当切深改变时,拆下连接螺母,重新调试热电偶测温点的位置,保证热电偶温度测量的准确性。

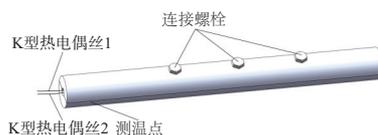


图 5 测温样件示意图

实验中测得环境温度为 20.6℃。在进行每组车削实验之前,让工件温度降至室温,以提高测量结果的准确性。图 6 为正交切削实验平台测量示意图,图 7 为正交车削工件表面测温装置。

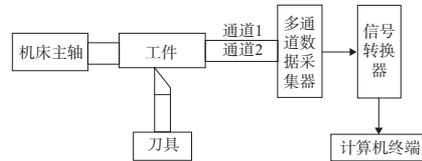


图 6 正交切削实验平台

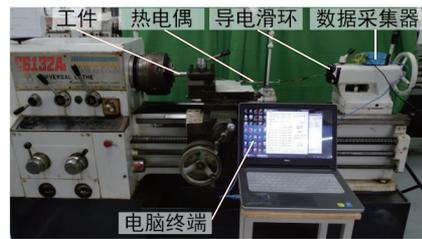


图 7 铝合金 A357 工件表面测温装置

#### 3.2 实验验证

为提高实验结果准确性,对两个测温点同时测量所得的温度数据先进行去噪后取平均值处理。图 8 为不同切削参数下热电偶测温点所测工件表面温度的变化趋势。

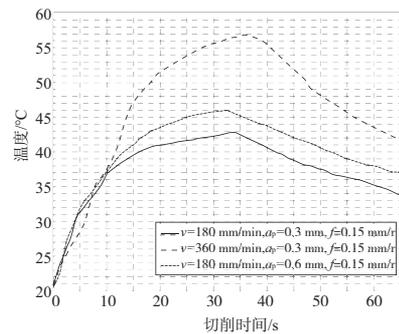


图 8 不同工况下的铝合金 A357 工件表面温度分布

由图 8 可知,随着切削过程的进行,切削热源不断靠近测温点,所测温度不断上升。当切削热源逐渐远离测温点时,所测温度下降。对比温度上升和温度下降的斜率可知,测量点的温升速率大于温降速率。这是由于切削热源的温度较高,当切削热源逐渐靠近测温点时,测温点的温升趋势较快;实验中采用干切削方式,当切削热源远离时,工件主要与外界环境发生热交换,因此温降趋势较为缓慢。

根据车削实验可知,增大切削速度或切深,测温点测得的温度均升高。该现象与仿真所得结论一致。对比不同切削参数下,仿真分析和车削实验所得的工件表面最高温度如表 5 所示。

(下转第 38 页)

## 参考文献:

- [1] 高波,叶文华. 基于约束理论的航空复合材料车间动态调度研究[J]. 中国制造业信息化,2011,40(5):17-22.
- [2] 陈国慧,叶文华. 基于启发式规则的航空复合材料车间生产排程研究[J]. 中国制造业信息化,2012,41(7):9-11,15.
- [3] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等. 动态车间作业调度问题中调度规则算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2016,33(3):648-653.
- [4] PANWALKAR S S, ISKANDER W. A survey of scheduling rules[J]. Operations Research,1977,25(1):45-61.
- [5] SHIUE Y R. Data - mining - based dynamic dispatching rule selection mechanism for shop floor control systems using a support vector machine approach[J]. International Journal of Production Research,2009,47(13):3669-3690.

- [6] 吴启迪,马玉敏,李莉,等. 数据驱动下的半导体生产线动态调度方法[J]. 控制理论与应用,2015,32(9):1233-1239.
- [7] 吴秀丽,孙琳. 智能制造系统基于数据驱动的车间实时调度[J]. 控制与决策,2020,35(3):523-535.
- [8] 贾志欣. 排样问题的研究现状与趋势[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(7):890-897.
- [9] 贾志欣,殷国富,罗阳,等. 矩形件排样的模拟退火算法求解[J]. 四川大学学报(工程科学版),2001,33(5):35-38.
- [10] 马广,刘嘉敏,黄有群,等. 一种有约束矩形排样问题的求解算法[J]. 沈阳工业大学学报,2006,28(4):449-453.
- [11] 黄鹏. 航空复合材料净化车间模具动态调度方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

收稿日期:2021-02-24

(上接第33页)

表5 不同条件下工件表面最高温度对比

实验参数			仿真	实验	相对
$V/(r/min)$	$a_p/mm$	$f/(mm/r)$	值/ $^{\circ}C$	值/ $^{\circ}C$	误差/ $\%$
180	0.3	0.15	50.2	42.8	-14.7
360	0.3	0.15	66.2	57.0	-13.8
180	0.6	0.15	55.5	46.5	-16.2

由表5可知,仿真所得的工件表面最高温度值比实验结果都要高。当 $V$ 为360mm/min, $a_p$ 为0.3mm, $f$ 为0.15mm/r时,所测工件加工表面最高温度可达到57 $^{\circ}C$ ,该温度与仿真所得温度66.2 $^{\circ}C$ 接近。由于实际切削过程中,工件快速旋转等因素引起的风冷作用,改善了工件表面的散热条件。因此,实验所测得工件表面最高温度普遍偏低。实验与仿真结果的相对误差均 $<17\%$ ,仿真模型具有一定的可靠性。

## 4 结语

1)建立了铝合金A357切削仿真模型,得到了不同切削参数下工件表面温度分布情况。根据仿真结果可知,增大切削速度和切深,工件加工表面的最高温度均升高,同时工件受切削热影响的区域增大,进而对工件尺寸超差产生较大的影响。

2)设计制作了一种用于铝合金A357表面温度测量的测温样件。通过车削实验验证了所建立工件温度场的

可靠性。该研究对实际生产中切削参数的合理选取、加工工件尺寸测量的时间评估和冷却条件的改善具有一定参考意义。

## 参考文献:

- [1] 毕运波,方强,董辉跃,等. 航空铝合金高速铣削温度场的三维有限元模拟及试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(7):160-165.
- [2] 张金峰,巩亚东,刘月明,等. 微铣刀磨损对工件温度场影响的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(11):1635-1638.
- [3] 李泽阳,祝宗煌,左立生,等. 6061铝合金盒体的搅拌摩擦封装温度场研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):10-13.
- [4] 杨洋,李金良,周亮. 车削加工AISI 1045工件的切削热建模与仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(5):34-36.
- [5] CHEN L, TAI B L, CHAUDHARI R G, et al. Machined surface temperature in hard turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2017,121:10-21.
- [6] 王洪祥,徐涛,杨嘉. 航空钛合金铣削过程有限元数值模拟[J]. 机械传动,2012,36(2):33-36,49.
- [7] 刘文韬,刘战强. 钛合金Ti-6Al-4V高压冷却车削过程有限元分析[J]. 现代制造工程,2018(10):44-50.
- [8] 舒平生. 基于Abaqus的A357铝合金正交切削加工有限元仿真及其实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(8):43-46,50.

收稿日期:2021-03-04