

基于最小加工表面裂纹的TiAl合金铣削参数优化

李 锋¹ 赵东平¹ 王 博¹ 杜崇辉²

(1 西安航空学院, 西安 710089)

(2 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

文 摘 TiAl合金以其优异的性能被广泛应用于航空、航天制造领域,但由于TiAl合金自身的物理、化学特性,导致其切削性能较差,加工过程中容易出现工件表面烧伤、表面微裂纹等问题。为了研究TiAl合金铣削加工过程中切削工艺参数对加工表面裂纹的影响规律,设计了TiAl合金切削参数与加工表面裂纹之间的正交试验。结果表明:切削速度对TiAl合金铣削表面裂纹的影响最大,其次是切削深度和切削宽度,每齿进给量对表面裂纹的影响最小。基于遗传算法,以表面裂纹长度为目标函数,优化得到的最优参数组合为: $a_e=0.2\text{ mm}$ 、 $a_p=0.2003\text{ mm/z}$ 、 $f_z=0.02001\text{ mm/z}$ 、 $v_c=20.0004\text{ m/min}$ 。采用优化后的参数铣削TiAl合金,发现工件表面的实际加工裂纹长度和经过算法优化的裂纹长度相差较小,该优化方法可行性较高,误差较小。

关键词 TiAl合金,表面裂纹,遗传算法,切削参数

中图分类号: TG147

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.004

Optimization of Milling Parameters of TiAl Alloy Based on the Minimum Machined Surface Cracks

LI Feng¹ ZHAO Dongping¹ WANG Bo¹ DU Chonghui²

(1 Xi'an Aviation College, Xi'an 710089)

(2 Xi'an Aero Engine(Group) LTD., Xi'an 710021)

Abstract TiAl alloys were widely used in aviation, aerospace and other manufacturing fields because of their excellent properties. However, due to the physical and chemical characteristics of TiAl alloys, their cutting performance was poor, and surface cracks, burns and so on issues were easy to occur in processing. In order to study the effect of cutting parameters on surface cracks in the milling of TiAl alloy, the orthogonal experiment of TiAl alloy cutting parameters and machined surface cracks was designed. The results show that the cutting speed has the greatest influence on the surface crack of TiAl alloy milling, followed by the cutting depth and cutting width, and the feed per tooth has the least effect on the surface crack. According to genetic algorithm, taking the surface crack length as the objective function, the optimal combination of parameters are: $a_e=0.2\text{ mm}$, $a_p=0.2003\text{ mm/z}$, $f_z=0.02001\text{ mm/z}$, $v_c=20.0004\text{ m/min}$. It is found that the error between the actual machining crack length and the optimized crack length is very small, which used the milling parameters optimized by GA. The optimal method is feasible and has low error.

Key words TiAl alloy, Surface crack, Genetic algorithm, Cutting parameters

0 引言

TiAl合金是一种新兴的高温合金材料,具有高熔点、高比强度、高比模量、抗高温蠕变等诸多优点,已成为航空、航天制造领域的一种备选材料,未来将可能全面取代钛基高温合金和镍基高温合金,成为

使用最多的新型高温合金材料^[1]。然而,TiAl合金自身却具有较低的延展性、断裂韧性及较小的热传导系数,导致其切削性能较差,机械加工过程中容易出现表面裂纹、表面烧伤等缺陷,这些加工中的表面缺陷又会影响零件的工作可靠性^[1-2]。因此,研究TiAl

收稿日期:2019-03-25

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2019JM-435)

第一作者简介:李锋,1982年出生,副教授,主要研究方向为航空难加工材料高速、高效切削技术。E-mail:li-feng1982@163.com

合金切削过程中的表面质量问题具有重要的研究意义与实用价值。

国内外学者对TiAl合金切削加工中的表面质量问题进行了大量的研究。Priarone P. C. 等^[3]分析了三种不同润滑条件对 γ -TiAl合金铣削时的刀具磨损和加工表面质量的影响。结果发现:最小量润滑条件下的刀具磨损率最小,其次是干切削,最后是切削液润滑。随着每齿进给量的增加,TiAl合金铣削加工表面硬化程度增加,适当增加切削速度能够加剧表面硬化程度,但当切削速度过高时,表面硬度值出现轻微的下降。另外还发现,干切削条件下的表面粗糙度最小;KOLAHDOUZ等^[4]对比分析了干切削和最小量润滑条件下,切削参数对 γ -TiAl合金铣削表面粗糙度的影响规律。结果发现,在最小量润滑条件下,较小的切削深度和较高的切削速度能够加工出表面裂纹较少的工件。国内,南京航空航天大学的马晓迪等^[5]对Ti₂AlNb合金进行了铣削试验,结果发现:铣刀的损伤形式包括刀具磨损、涂层剥落和刀尖崩刃,Nb元素的增塑性反而恶化了切削条件,Ti₂AlNb合金铣削表面应力表现为压应力,表面粗糙度随刀具后刀面的磨损和每齿进给量的增加而增加,随切削速度的增加而降低;兰州理工大学的曹睿等^[6]研究了TiAl合金的断裂机理,通过SEM观察了拉伸试件的断口形貌,发现TiAl合金在很小的拉伸载荷下就能产生微裂纹,导致拉伸性能变差而远低于压缩性能。西安石油大学的陈鑫等^[7]研究了 γ -TiAl的深孔钻削技术,通过测量三种不同刀具钻削 γ -TiAl合金过程中的钻削力、刀具磨损及表面质量,确定了钻削 γ -TiAl合金较为理想的刀片材料为YG8。

上述的研究中,针对不同类型TiAl合金的加工表面质量进行了较多的研究,然而分析切削参数对加工表面裂纹影响的研究却很少。本文主要通过试验的方法,分析了切削参数对TiAl合金铣削加工表面裂纹的影响规律,并应用数学算法,以表面裂纹长度为目标对切削参数进行了优化,可以为改善TiAl合金铣削加工表面质量、优选切削工艺参数提供切实可行的思路与方法。

1 实验

1.1 实验条件

试件采用方形块 γ -TiAl合金,几何尺寸为:178 mm×71 mm×17 mm;机床选用乔福机械VMC850三坐标立式数控铣床,最大转速8 000 r/min,功率22 kW;刀具选用TiAlN涂层硬质合金平底铣刀,牌号K40T,直径10 mm,4刃;顺铣;无冷却液。表面裂纹的测量

采用直读法^[8],直读法就是使用显微镜对工件的表面裂纹进行观测,同时计算裂纹长度。要对试件的表面裂纹进行直观分析,首先需要从试件表面上取下观测区域,然后将观测区域镶嵌成金相试样进行观测,显微镜采用C130真实色共聚焦显微镜。金相试样的制作包括:取样、磨光、抛光、腐蚀等四个阶段。首先采用线切割的方法在加工表面取下一个试样,用于分析表面裂纹的长度,试样尺寸为22 mm×9 mm×4 mm。为了消除线切割产生的损伤,对试样进行了磨光,磨光的过程分为粗磨和精磨两个阶段。磨光之后再行抛光,抛光之后再行腐蚀,试验中使用的腐蚀剂为酸性水溶液。

1.2 实验方案

采用正交试验方案,具体的因素、水平及试验方案如表1所示。

为了排除刀具磨损对试验结果的影响,把试件分为16个加工区域,每个加工区域分别使用一组切削参数进行铣削加工,每组切削参数使用一把刀具,共计16把,切削参数是根据实际加工经验和所查文献进行选取的。

表1 试验方案及结果

Tab. 1 Test scheme and results

序号	切削速度 $v_c/m \cdot \min^{-1}$	每齿进给量 $f_z/mm \cdot z^{-1}$	切削深度 a_p/mm	切削宽度 a_e/mm	裂纹长度 $l/\mu m$
1	20	0.02	0.2	0.2	85.85
2	20	0.04	0.4	0.4	94.72
3	20	0.06	0.6	0.6	114.25
4	20	0.08	0.8	0.8	176.74
5	35	0.02	0.4	0.6	116.86
6	35	0.04	0.2	0.8	92.67
7	35	0.06	0.8	0.2	154.77
8	35	0.08	0.6	0.4	133.56
9	50	0.02	0.6	0.8	198.97
10	50	0.04	0.8	0.6	204.76
11	50	0.06	0.2	0.4	81.18
12	50	0.08	0.4	0.2	165.56
13	65	0.02	0.8	0.4	187.17
14	65	0.04	0.6	0.2	180.05
15	65	0.06	0.4	0.8	239.68
16	65	0.08	0.2	0.6	239.68

图1是其中一组参数下的铣削加工表面图像,从图中可以看出,试件加工表面出现了很多微小裂纹,而且裂纹形状不规则。采用直读法观测表面裂纹并计算裂纹长度时,选取裂纹上距离最大的两点间的

距离作为表面裂纹的长度。由于每幅图片中的裂纹尺寸变化较大,较小尺寸的裂纹相比较大尺寸的裂纹对试件的疲劳寿命影响不大。因此,试验中只测量每幅图片中尺寸最大的裂纹长度。每组工艺参数下的加工表面分别采集20张表面裂纹图像,计算20幅裂纹图像中最大裂纹的平均值作为对应参数下表面裂纹的长度。

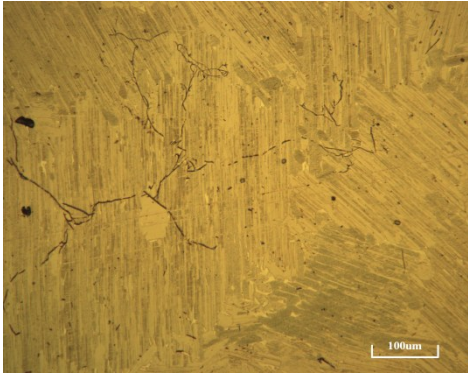


图1 工件表面微观图像

Fig. 1 Microstructure of workpiece surface

2 结果分析

从表1中的试验结果可以看出,在试验参数范围内, γ -TiAl合金铣削加工表面均出现了显微裂纹,表面裂纹长度分布在81.18~239.68 μm 。

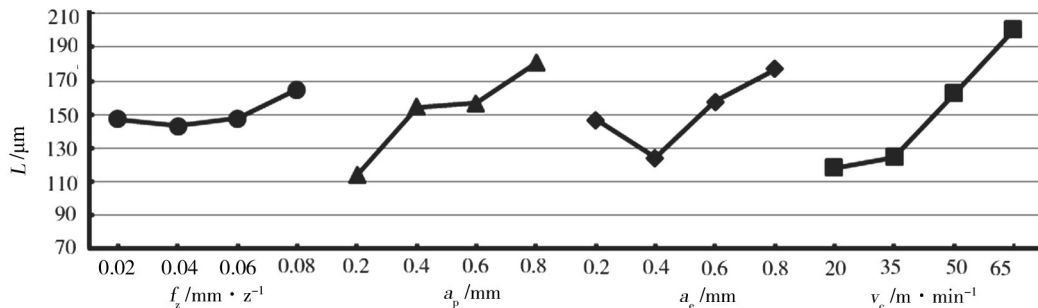


图2 铣削表面裂纹长度随切削参数的变化曲线

Fig. 2 Curves of milling surface crack length with cutting parameters

从图2可以看出,表面裂纹长度随每齿进给量的增大先减小后增大。当每齿进给量从0.02增加到0.04 mm/z时,表面裂纹长度从147.21减小到143.05 μm ,当每齿进给量从0.04增加到0.08 mm/z时,表面裂纹长度从143.05增大到167.74 μm ,从总体上看,每齿进给量的变化对表面裂纹的影响较小,这是因为每齿进给量的增加虽然能够引起切削力的上升,增加了裂纹产生的可能性,但在切削力增加的同时切削温度也有所上升,进而改善了TiAl合金的室温脆性,抑制了表面裂纹的产生;从图2可以看出,表面裂纹长度随切削深度的增大而增大。当切削深度从0.2增加到0.4 mm时,

2.1 切削参数对TiAl合金铣削加工表面裂纹的影响

2.1.1 极差分析

为了分析4个切削参数对TiAl合金铣削表面裂纹的影响主次关系,利用极差分析法对试验结果进行分析处理,如表2所示。可以看出,切削速度的极差值最大,说明切削速度对TiAl合金铣削加工表面裂纹长度的影响最大,其次是切削深度和切削宽度,每齿进给量对表面裂纹长度的影响较小。

表2 极差分析

Tab. 2 Analysis of the range

因素	$v_c / \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	$f_z / \text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$	a_p / mm	a_e / mm
水平1	117.89	147.21	113.70	146.56
水平2	124.47	143.05	154.21	124.16
水平3	162.62	147.47	156.71	157.74
水平4	200.50	167.74	180.86	177.02
极差	82.61	24.69	67.16	52.86

2.1.2 切削参数对表面裂纹的影响

为了研究TiAl合金铣削表面裂纹长度随切削参数的变化规律,根据表2中的极差分析结果,绘制出表面裂纹长度随切削参数的变化曲线,如图2所示。

表面裂纹长度从113.70显著增加到154.21 μm ,变化较快,切削深度的变化对表面裂纹长度的影响较敏感。当切削深度从0.4增加到0.8 mm时,表面裂纹长度从154.21增加到180.86 μm ,变化较慢,切削深度的变化对表面裂纹长度的影响较小,这是因为切削深度增加时,TiAl合金铣削力变大,工件表面容易产生裂纹,但在切削深度增加的过程中,TiAl合金铣削温度也有所上升,只是铣削温度所起到的抑制表面裂纹产生的作用弱于切削力引起的开裂作用;从图2可以看出,表面裂纹长度随切削宽度的增大先减小后增大。当切削宽度从0.2增加到0.4 mm时,表面裂纹长度从145.6减

小到 124.16 μm , 变化较慢, 切削宽度的变化对表面裂纹长度的影响较小。当切削宽度从 0.4 增加到 0.8 mm 时, 表面裂纹长度从 124.16 增加到 177.02 μm , 变化较快, 切削宽度的变化对表面裂纹长度的影响较敏感; 从图 2 可以看出, 表面裂纹长度随切削速度的增大整体上呈增大趋势。当切削速度从 20 增大到 35 m/min 时, 表面裂纹长度从 117.89 增大到 124.47 μm , 增加速度平缓。但当切削速度从 35 增加到 65 m/min 时, 裂纹长度从 124.47 增大到 200.50 μm , 增加速度明显, 切削速度的变化对表面裂纹长度的影响较敏感。

2.2 建立基于试验的经验公式

建立 TiAl 合金铣削参数与加工表面裂纹之间的数学关系, 有助于更好地分析它们之间的联系。基于上述的正交试验结果, 采用 SPSS 软件, 运用多元线性回归分析^[9]的方法, 建立了 TiAl 合金铣削加工表面裂纹长度与切削参数之间的经验公式, 回归方程如公式(1)所示, 经验公式如公式 2 所示:

$$y = 1.728 + 0.460x_1 + 0.095x_2 + 0.363x_3 + 0.130x_4 \quad (1)$$

$$L = 53.456v_c^{0.460} f_z^{0.095} a_p^{0.363} a_e^{0.130} \quad (2)$$

式中, $\lg L = y$, $\lg C = 1.728$, $\lg v_c = x_1$, $\lg f_z = x_2$, $\lg a_p = x_3$, $\lg a_e = x_4$ 。

为了检验回归方程与试验数据的拟合程度, 需对回归方程进行显著性检验, 采用了 F 值检验法。 F 值检验法规定: m 为试验因素数, n 为试验次数, 给定的显著性水平为 0.05。若回归方程的 $F < F_{0.05}(m, n-m-1)$, 则没有明显的线性关系, 回归方程可信度低; 若 $F_{0.05}(m, n-m-1) < F < F_{0.01}(m, n-m-1)$, 则称有显著的线性关系, 回归方程可信度较高; 若 $F > F_{0.01}(m, n-m-1)$, 则称有十分显著的关系, 回归方程可信度高。本文中的试验因素 $m=4$, 试验次数 $n=16$, 通过查询 F 值分布表可得 $F_{0.05}(4, 11)=3.36$, $F_{0.01}(4, 11)=5.67$ 。通过 SPSS 软件计算得到回归过程: $F=7.567$, 大于 $F_{0.01}(4, 11)$, 回归方程十分显著, 与实际情况拟合较好。

3 基于遗传算法的切削参数优化

3.1 遗传算法

遗传算法^[10](GA)是以自然选择和遗传理论为基础, 将生物进化过程中适者生存规则与群内染色体的随机信息交换机制相结合的高效全局寻优搜索算法。

应用 GA 算法解决问题的过程是一个典型的迭代过程, 基本流程如图 3 所示。

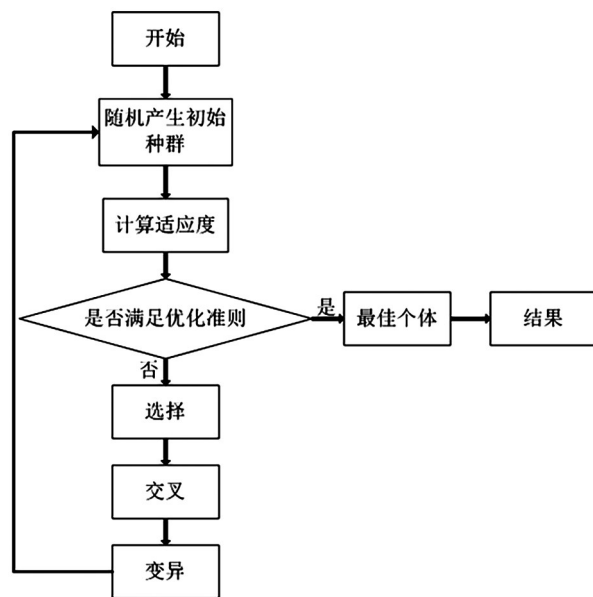


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

3.2 基于遗传算法的切削参数优化

实际加工中, 为了提高加工效率, 降低生产成本, 或者为了提高工件的加工质量, 需要对切削参数进行优化。本文为了提高 TiAl 合金铣削加工表面质量, 以加工表面裂纹长度为目标函数, 对切削参数进行了优化。目标函数定义为 F :

$$F = \min [L(v_c, f_z, a_p, a_e)] \quad (3)$$

式中, 待优化的目标函数为表面裂纹长度 $L(v_c, f_z, a_p, a_e)$, 它是以切削参数 v_c, f_z, a_p, a_e 作为变量的函数, 数学模型已在 2.2 中建立, 优化约束条件为: $20 \text{ m/min} < v_c < 65 \text{ m/min}$, $0.02 \text{ mm/z} < f_z < 0.08 \text{ mm/z}$, $0.2 \text{ mm} < a_p < 0.8 \text{ mm}$, $0.2 \text{ mm} < a_e < 0.8 \text{ mm}$ 。

基于遗传算法, 在 Matlab2014a 环境中编写了优化程序, 经过大量测试, 遗传算法的主要参数选定

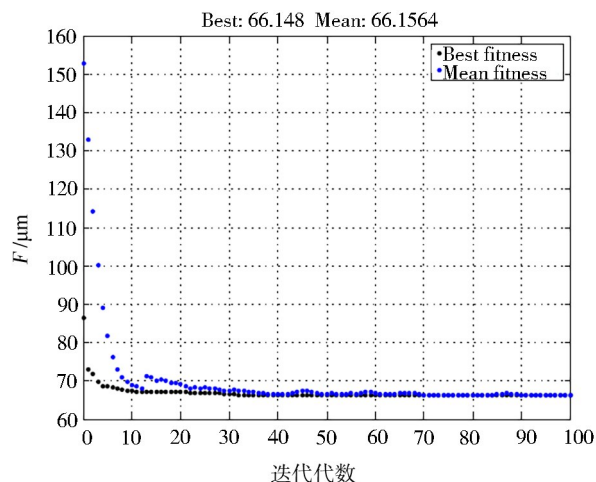


图 4 优化适应度曲线

Fig. 4 Optimization of the fitness curve

为:初始种群规模 Population Size=200,最大进化代数 Max Generations=100,交叉概率 $P_c=0.2$,变异概率 $P_m=0.1$,优化适应度曲线如图4所示,优化得到的最优参数组合为: $a_e=0.2\text{ mm}$, $a_p=0.2003\text{ mm}$, $f_z=0.02001\text{ mm/z}$, $v_c=20.0004\text{ m/min}$,此时的表面裂纹长度 $L=66.1497\text{ }\mu\text{m}$ 。

经过实验验证,采用优化后的参数铣削 TiAl 合金,工件表面的裂纹长度为 $76.24\text{ }\mu\text{m}$,说明该优化方法可行性较高,误差较小。

4 结论

(1)切削速度对 TiAl 合金铣削加工表面裂纹长度的影响最大,其次是切削深度和切削宽度,每齿进给量对表面裂纹长度的影响较小。

(2)表面裂纹长度随切削速度的增大整体上呈增大趋势,随每齿进给量的增大先减小后增大,随切削深度的增大而增大,随切削宽度的增大先减小后增大。

(3)基于遗传算法,以表面裂纹长度为目标函数,优化得到的最优参数组合为: $a_e=0.2\text{ mm}$, $a_p=0.2003\text{ mm}$, $f_z=0.02001\text{ mm/z}$, $v_c=20.0004\text{ m/min}$,此时的表面裂纹长度为 $66.1497\text{ }\mu\text{m}$ 。采用优化后的参数铣削 TiAl 合金,工件表面的裂纹长度较小,该优化方法可行性较高,误差较小。

参考文献

[1] APPEL H F, PAUL J D H, OEHRING M. Gamma titanium aluminide alloys: science and technology [M]. Wiley-VCH, 2011.

[2] 刘娣,张利军,米磊,等. TiAl 合金的制备及应用现状 [J]. 钛工业进展, 2014(4):11-15.

LIU Di, ZHANG Lijun, MI Lei, et al. Preparation and application status of TiAl alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2014(4):11-15.

[3] PRIARONE P C, RIZZUTI S, ROTELLA G, et al. Tool wear and surface quality in milling of a gamma-TiAl intermetallic [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1):25-33.

[4] KOLAHDOUZ S, AREZOO B, HADI M. Surface integrity in high-speed milling of gamma titanium aluminide under MQL cutting conditions [C]. Thermal Power Plants (CTPP), 2014 5th Conference on. IEEE, 2015:62-69.

[5] 马晓迪. Ti2AlNb 金属间化合物铣削加工性研究 [D]. 南京航空航天大学, 2014.

MA Xiaodi. Study on milling of intermetallic Ti2AlNb alloy [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[6] 曹睿. γ -TiAl 基合金的损伤及断裂行为研究 [D]. 兰州理工大学, 2006.

CAO Rui. Study on damage and fracture behavior of γ -TiAl based alloys [D]. Lanzhou University of Technology, 2006.

[7] 陈鑫. 高温金属材料 (γ -TiAl) 深孔钻削技术研究 [D]. 西安石油大学, 2011.

CHEN Xin. A study of refractory metal (γ -titanium) deep-hole drilling technology [D]. Xi'an Shiyou University, 2011.

[8] 张利娟,张亚军,高灵清. 表面裂纹长度的测量方法 [J]. 材料开发与应用, 2009, 24(5):75-79.

ZHANG Lijuan, ZHANG YaJun, GAO Lingqing. Review on measurement methods of surface crack length [J]. Development and Application of Materials, 2009, 24(5):75-79.

[9] 闵亚能. 实验设计应用指南 [M]. 北京:机械工业出版社, 2011.

MIN Yaneng. Guide to application of experimental design [M]. Beijing:China Machine Press, 2011.

[10] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用及软件实现 [M]. 西安交通大学出版社, 2002.

WANG Xiaoping, CAO Liming. Theory, application and software implementation of genetic algorithm [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 2002.