

焊接 T 型刀在飞机耳片槽加工中的应用研究

田海东^{1,2,3}, 国凯^{1,2,3}, 孙杰^{1,2,3}, 李维亮⁴

¹山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室; ²山东大学机械工程学院;

³山东大学航空构件制造技术及装备研究中心; ⁴成都飞机工业(集团)有限责任公司

摘要: 飞机耳片槽作为飞机接头类零件中的重要零件,在实际加工中经常出现变形现象。工艺参数对耳片变形及表面质量有重要影响。设计正交切削试验,对表面粗糙度、振动加速度幅值和表面残余应力进行极差分析,得出了铣削参数对上述三种指标的影响规律。试验刀具采用焊接 T 型刀,工件材料选用 7050-T7451 铝合金。研究表明,当主轴转速为 125r/min、每齿进给量为 0.02mm、轴向切深为 0.1mm、径向切宽为 20mm 时,工件表面质量较好;获得了铣削参数对 X 方向和 Y 方向振动加速度因素的主次顺序;加工表面的残余应力均为残余压应力,进给方向的表面残余应力大于垂直于进给方向的表面残余应力。

关键词: T 型刀;表面粗糙度;振动;残余应力

中图分类号: TG714;TG506;TH161 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.008

Application of Welding T-knife in Aircraft Ear Slot Processing

Tian Haidong, Guo Kai, Sun Jie, Li Weiliang

Abstract: Aircraft ear groove is an important part of aircraft joints. In actual processing, deformation often occurs. The process parameters have an important impact on the deformation and surface quality of the ear. The welding T-knife commonly used in the engineering environment is used as the test tool, and the test material, i. e. the workpiece material, is aluminum alloy 7050-T7451. Orthogonal cutting experiments are designed to analyze the range of surface roughness, vibration acceleration amplitude and surface residual stress, and the influence of milling parameters on the above three indicators is obtained. The results show that when the cutting parameters are spindle speed 125r/min, feed per tooth 0.02mm, axial cutting depth 0.1mm and radial cutting width 20mm, the surface quality of the workpiece is better; the primary and secondary order of the milling parameters to the X and Y direction vibration acceleration factors is obtained; the residual stress of the machined surface is residual compressive stress, and the surface residual stress of the feed direction is greater than that of the vertical feed direction.

Keywords: T-knife; surface roughness; vibration; residual stress

1 引言

航空结构零件具有外廓尺寸大、结构复杂和重量轻的特点,在多个对接部位或活动面处需要精度要求较高的多面体接头类零件进行连接装配。典型的接头类零件包括主起落架支撑接头、扰流板铰链接头以及机翼与机身的对接接头等,一般采用 7000 系列模锻或自由锻铝合金材料,其零件尺寸高度大且槽腔深度大,空间孔要求较高的精度和位置度。因此,加工变形控制、深槽腔转角表面质量控制和空间精度孔的加工成为此类零件加工的难题,对于自由锻毛料的零件来说,需考虑材料去除率等影响因素^[1]。变形和尺寸精度等问题严重阻碍了接头类零件的加工,制约了航空工业的发展。因此,对接头

类零件的加工变形控制进行研究具有重要的实际意义。

随着航空航天领域的不断发展,对铝合金工件加工质量的要求也越来越高。残余应力对铝合金工件加工后的变形有着持续影响,因此,残余应力的控制在加工中起关键作用。一般来说,不同的加工参数会影响工件的变形和残余应力的产生。许多学者在铝合金工件变形和残余应力的测量及控制方面做了大量研究。周长安等^[2]采用基于 ABAQUS 有限元软件的 Load Case 功能对柔度函数进行了优化,提高了裂纹柔度法测试铝合金厚板初始残余应力的效率和精度;黄晓明等^[3]基于生死单元技术建立了隔框件加工变形预测有限元模型,结合应力-工件刚度演变特点对隔框工件加工过程变形进行了预测分析;康小明等^[4,5]从工艺参数角度出发研究了航空整体结构件加工变形规律,提出了抑制工件变形的一些工艺措施;罗宇^[6]通过有限元仿真得到薄壁

基金项目: 飞机接头类零件深窄耳片槽加工工艺方法研究(司产品(18)(1)(B12)(0014))

收稿日期: 2019 年 3 月

件加工最合理夹具布局,同时研究了不同切削参数对加工变形的影响规律。

飞机耳片槽结构一般槽深较大(>60mm),底部为圆弧结构。若采用立铣刀加工,刀具长径比较大,刚性差,容易造成颤振。加工效率低且加工表面质量差,容易发生断刀现象^[7],因此T型铣刀常作为耳片槽加工中的主要刀具。有学者对飞机耳片槽的加工开展了大量研究,李先健等^[8]设计了一种钛合金接头槽口铣削装置,并采用了去应力式常规加工方法完成槽口的加工;邓宗白等^[9]用Delphi程序设计构造了专家系统的知识库及推理机制,从不同方面对飞机连接耳片进行疲劳损伤容限的评估;李维娜^[10]阐述了耳片设计准则,给出了剪切—挤压破坏时极限载荷的计算公式,为耳片设计提供了参考。

目前针对T型刀在飞机耳片槽加工中的应用进行研究较少,对于该刀具在耳片槽加工中的工艺方案、加工参数、表面质量以及残余应力等方面缺乏系统的研究。本文通过正交试验,分析了T型刀加工飞机耳片槽时加工参数对耳片槽加工质量的影响,优化出最佳的加工参数,为飞机耳片槽的实际生产加工提供一定的理论依据,为解决接头类零件的加工难题提供参考。

2 试验方法

2.1 试验材料与设备

试验材料选用德国Aleris公司的7050-T7451预拉伸毛坯件,在五轴立式加工中心FZL-59蓝宝石上进行试验。刀具选用焊接T型刀,刀盘直径为250mm,厚度为6mm,刀尖圆角半径为3mm,刀杆直径为40mm,刀杆长度为170mm,齿数为18。工件加工面为平面,铣削方式为顺铣,采用切削液润滑。

采用Wyko NT9300白光干涉仪来测量加工后的表面形貌和粗糙度值,试验值取3个测量点的平均值。采用PCB-356A15振动测试系统记录切削过程中主轴的振动信号。采用芬兰Stresstechoy公司Xstress3000残余应力测试仪测试工件表面残余应力,在每一个加工表面上每隔约10mm选一个测量点,取4个测量点的平均值作为该加工表面的残余应力。

2.2 试验参数

在飞机耳片槽的精加工中,加工参数对耳片变形和表面粗糙度值影响很大,对于不同材料、不同精度要求的工件,需要通过大量的试切试验才能确定最佳的加工参数。为了减少试验次数,试验采用4

因素3水平的正交试验方法,按照精加工的要求,并参考实际加工中所用的参数范围来设置因素水平。切削参数水平如表1所示。

表1 试验参数水平

试验参数	转速 n (r/min)	每齿进给量 f_z (mm)	轴向切深 a_p (mm)	径向切深 a_e (mm)	
水平	1	100	0.02	0.1	20
	2	125	0.025	0.3	30
	3	150	0.03	0.5	60

3 试验结果与分析

3.1 表面粗糙度结果分析

各组参数下工件表面的粗糙度值测试结果见表2。根据表2的粗糙度测试结果,得到表3的正交试验的极差分析表。

表2 表面粗糙度测试结果

试验编号	n (r/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)	R_a (μ m)
1	100	0.020	0.1	20	0.815
2	100	0.025	0.3	30	1.232
3	100	0.030	0.5	60	1.693
4	125	0.020	0.3	60	1.360
5	125	0.025	0.5	20	1.179
6	125	0.030	0.1	30	1.174
7	150	0.020	0.5	30	1.188
8	150	0.025	0.1	60	1.219
9	150	0.030	0.3	20	1.413

表3 极差分析

因素	n	f_z	a_p	a_e
均值 t_1	1.247	1.121	1.069	1.136
均值 t_2	1.238	1.210	1.335	1.198
均值 t_3	1.273	1.427	1.353	1.424
极差 R	0.035	0.306	0.284	0.288

从表3可以看出,在极差分析中,极差 R 越大的因素对指标影响程度越大,从而可以直观地判断各指标影响因素的权重大小。加工参数对表面粗糙度的影响权重顺序为 $f_z > a_e > a_p > n$ 。在极差分析中根据 t 值的大小,可判断各因素的最优组合。粗糙度值越小表面质量越好,因此 t 值越小越好,则加工表面质量最好的最优水平组合为A2B1C1D1,即最优参数组合为主轴转速125r/min,每齿进给量为0.02mm,轴向切削深度为0.1mm,径向切削宽度为20mm。

根据表2的粗糙度测试结果得到如图1所示的正交试验的极差分析图。由图可见,随着主轴转速 n 的增加,表面粗糙度基本保持不变的趋势,其原因可能是转速变化范围太小,表面粗糙度对该变化不敏感;每齿进给量 f_z 和径向切削宽度 a_e 增大时表面粗糙度呈现增大的趋势,且每齿进给量对表面粗糙

度值的影响最显著;轴向切削深度 a_p 由 0.1mm 增加到 0.3mm 时,表面粗糙度值增大,而轴向切削深度 a_p 由 0.3mm 增加到 0.5mm 时,表面粗糙度值基本保持不变。

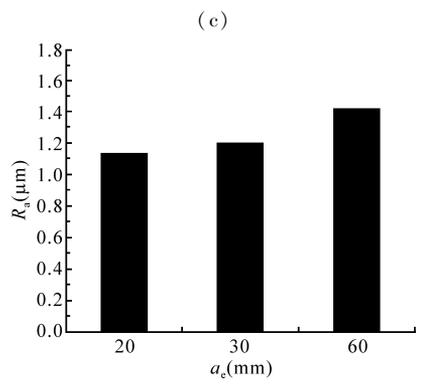
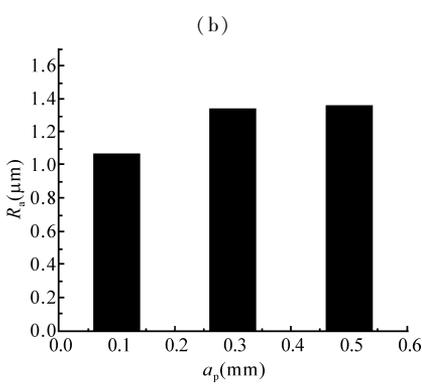
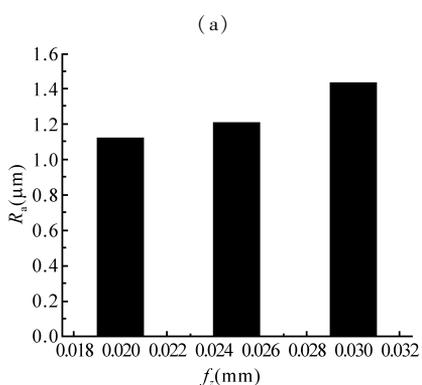
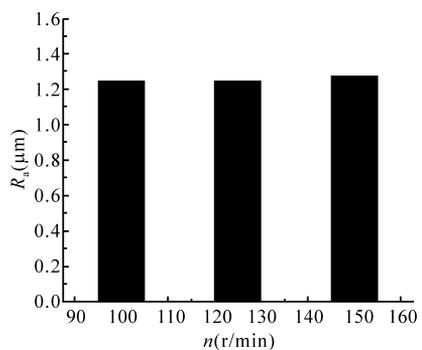


图1 加工参数对表面粗糙度影响趋势

3.2 振动信号分析

T型刀在加工时的主轴振动加速度幅值测试结

果如表4所示。三个方向的主轴振动加速度幅值作为三个指标,对每个指标进行极差分析,分析结果如表5所示。通过各因素极差值对比分析可知,影响Y方向振动加速度因素的主次顺序为 $a_p > f_z > a_e > n$;影响X方向和Z方向振动加速度因素的主次顺序为 $a_p > a_e > n > f_z$ 。

表4 振动加速度幅值

试验编号	n (r/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)	a_x (m/s^2)	a_y (m/s^2)	a_z (m/s^2)
1	100	0.02	0.1	20	0.009	0.012	0.012
2	100	0.025	0.3	30	0.023	0.046	0.025
3	100	0.03	0.5	60	0.069	0.138	0.064
4	125	0.02	0.3	60	0.065	0.073	0.057
5	125	0.025	0.5	20	0.064	0.083	0.059
6	125	0.03	0.1	30	0.032	0.061	0.029
7	150	0.02	0.5	30	0.045	0.073	0.049
8	150	0.025	0.1	60	0.031	0.036	0.036
9	150	0.03	0.3	20	0.048	0.094	0.043

表5 振动加速度幅值极差分析

因素	n (r/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)
a_x 极差	0.02	0.011	0.035	0.022
a_y 极差	0.007	0.045	0.062	0.026
a_z 极差	0.014	0.006	0.031	0.019

依据极差分析计算过程中的指标均值绘制因素与指标关系图,如图2所示。可以看出,Y方向的振动幅值大于X方向和Z方向的振动幅值,且三者均随着每齿进给量和轴向切削深度的增大呈上升趋势,而对于主轴转速和径向切深,三个方向振动幅值却没有表现出显著的规律性;X、Y和Z方向的振动加速度幅值在整体上变化趋势一致。

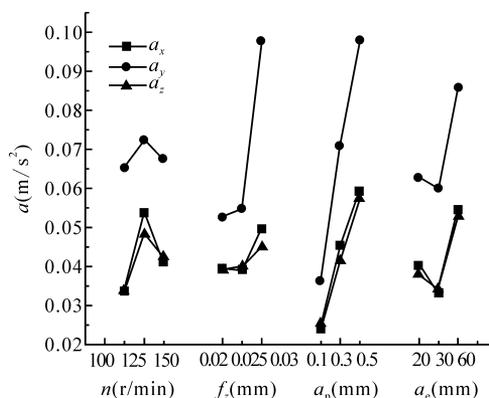


图2 加工参数对振动加速度影响趋势

3.3 表面残余应力分析

采用X射线衍射方法测试工件表面的残余应力,测试参数与文献[11]中的参数一致,X方向(进给方向)和Y方向(垂直于进给方向)的表面残余应

力结果如表6所示。

表6 表面残余应力测试结果

试验编号	n (r/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
1	100	0.02	0.1	20	-69.675	-30.525
2	100	0.025	0.3	30	-75.800	-36.250
3	100	0.03	0.5	60	-56.550	-21.100
4	125	0.02	0.3	60	-53.975	-11.100
5	125	0.025	0.5	20	-31.350	-23.900
6	125	0.03	0.1	30	-47.625	-22.275
7	150	0.02	0.5	30	-53.350	-23.000
8	150	0.025	0.1	60	-33.350	-27.770
9	150	0.03	0.3	20	-38.325	-32.100

由表6可知,加工表面的残余应力均为残余压应力,且进给方向的表面残余应力要大于垂直于进给方向的表面残余应力,残余应力数值为 $-10 \sim -80$ MPa。对表面残余应力结果进行极差分析,分析结果见表7。

表7 表面残余应力值极差分析

因素	n (r/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)
σ_x 极差	25.66	12.17	8.95	18.51
σ_y 极差	10.2	7.77	4.19	4.58

由表7可知,各加工参数影响进给方向表面残余应力的主次顺序为 $n > a_e > f_z > a_p$,影响垂直于进给方向表面残余应力的主次顺序为 $n > f_z > a_e > a_p$ 。根据极差分析结果做出加工参数对表面残余应力影响的极差变化图(见图3)。

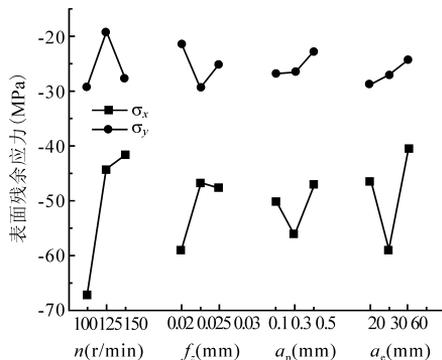


图3 加工参数对表面残余应力影响变化趋势

由图3可知,随着主轴转速的增加,进给方向的表面残余压应力呈现减小趋势;当每齿进给量从 0.02 mm增加到 0.025 mm时,进给方向残余压应力减小,但当每齿进给量从 0.025 mm增加到 0.03 mm时,进给方向表面残余应力基本保持不变;进给方向的表面残余压应力随着轴向切削深度和径向切削深度的增加出现波动。但是垂直于进给方向的残余压应力随着轴向切削深度和径向切削深度的增加呈现

减小趋势;随着主轴转速和每齿进给量的增加产生波动。

4 结语

本文利用焊接T型刀设计了耳片槽的正交切削试验,并对工件加工表面粗糙度、振动加速度幅值和加工表面残余应力等试验结果进行了极差分析,得出以下结论:

(1)以最佳表面粗糙度为目标,最优切削参数组合为主轴转速 125 r/min,每齿进给量为 0.02 mm,轴向切削深度为 0.1 mm,径向切削宽度为 20 mm。

(2)铣削参数对振动加速度幅值的影响:对Y方向振动加速度因素的主次顺序为 $a_p > f_z > a_e > n$,对X方向和Z方向振动加速度因素的主次顺序为 $a_p > a_e > n > f_z$;Y方向振动加速度幅值均大于X、Z方向。

(3)工件加工表面残余应力均为残余压应力,且进给方向的表面残余应力要大于垂直于进给方向的表面残余应力;随着主轴转速的增加,进给方向的表面残余压应力呈现减小趋势,垂直于进给方向的残余压应力随着轴向切深和径向切深增加呈减小趋势。

参考文献

- [1]王俊斌. 数控加工技术在大飞机研制生产中的应用[J]. 航空制造技术, 2008(5): 44-46.
- [2]周长安,孙杰,李卫东,等. 航空铝合金7050-T7451毛坏初始残余应力测试[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(8): 1251-1254.
- [3]黄晓明,孙杰,李剑峰. 基于刚度与应力演变机制的航空整体结构件加工变形预测理论建模[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 201-208.
- [4]康小明,孙杰,苏财茂,等. 飞机整体结构件加工变形产生和对策[J]. 中国机械工程, 2004, 15(13): 1140-1143.
- [5]康小明. 大型整体结构件加工变形问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [6]罗宇. 大型薄壁件加工变形预测及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7]雷光林. 飞机接头类零件多组耳片槽加工工艺方法研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(8): 70-72, 95.
- [8]李先健,李维亮,江波,等. 飞机钛合金接头零件耳片槽加工方法研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(10): 31-33.
- [9]邓宗白,周克印,吴永端. 飞机连接耳片故障诊断疲劳损伤评估专家系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2003(1): 44-47.

压制压强对 WC-8% Ni 硬质合金性能的影响

李亚军^{1,3}, 栾道成¹, 袁宏辉², 孙文文¹, 王正云¹, 邓天鑫¹, 李缘¹, 任阳¹, 左城铭¹

¹西华大学; ²成都工具研究所有限公司;

³中国石油集团济柴动力有限公司成都压缩机分公司

摘要: 采用不同的压制压强 160MPa、240MPa、320MPa、400MPa 压制 WC-8% Ni 硬质合金 B 型试样, 在真空烧结炉中进行 1480℃ × 60min 烧结。通过排水法实验、硬度实验、弯曲试验、金相显微镜等分析方法, 研究了压制压强对 WC-8% Ni 硬质合金的相对密度、孔隙度、线收缩系数、硬度和抗弯强度的影响。结果表明, 随着压制压强的增加, 相对密度逐渐增加, 线收缩系数逐步减小, 硬度和抗弯强度先增加而后减少。在压制压强 320MPa 时, WC-8% Ni 硬质合金的性能达到最佳值。

关键词: 压制压强; WC-8% Ni 硬质合金; 相对密度; 硬度; 抗弯强度

中图分类号: TG306; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.009

Effects of Compacting Pressure on Properties of WC-8% Ni Cemented Carbides

Li Yajun, Luan Daocheng, Yuan Honghui, Sun Wenwen, Wang Zhengyun,

Deng Tianxin, Li Yuan, Ren Yang, Zuo Chengming

Abstract: B-type specimens of WC-8% Ni cemented carbides are pressed under different pressures of 160MPa, 240MPa, 320MPa and 400MPa, and sintered in a vacuum sintering furnace at 1480℃ for 60 minutes. The effects of compacting pressure on relative density, porosity, linear shrinkage coefficient, hardness and traverse strength of WC-8% Ni cemented carbides are researched drainage test, hardness test, bending test and metallographic microscope. The results show that with the increase of compacting pressure, the relative density increases gradually, the linear shrinkage coefficient decreases gradually, and the hardness and traverse strength first increase and then decrease. The best performance of WC-8% Ni cemented carbide when the compacting pressure is 320MPa.

Keywords: compacting pressure; WC-8% Ni cemented carbides; relative density; hardness; traverse strength

1 引言

硬质合金采用粉末冶金工艺制造, 通过将一种或几种难熔金属碳化物(碳化钨、碳化钛等)和金属粘结剂烧结而成。硬质合金具有高硬度、高强度和

高耐磨性等特性, 广泛用于制造刀具、钻具、模具及耐磨零部件等^[1]。作为硬质合金粘接金属的 Co 是一种稀缺且价格高昂的资源, 同时 WC-Co 硬质合金在耐腐蚀和抗氧化性能方面较差, 因而人们开始研究寻求其它金属代替 Co 作为硬质合金的粘结金属^[2]。

Ni 与 Co 属于过渡族元素, 在物理和化学性能方面相近, Ni 具有良好的耐腐蚀和抗氧化性能。就价格和分布来说, Ni 价格低于 Co、分布范围广、储量更多, 因此研究 WC-Ni 系硬质合金具有重要的价

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04003003-006); 四川省粉末冶金工程技术中心资助项目(SC-FMYJ2018-01); 西华大学创新基金资助项目(Ycjj2018069, Ycjj2018070)
收稿日期: 2019年3月

[10] 李维娜. 民用飞机耳片接头结构设计[J]. 科技视界, 2017(6): 330.

[11] 黄晓明. 铝合金航空整体结构件加工变形机理与预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

第一作者: 田海东, 硕士研究生, 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东大学机械工程学院, 山东大学航空构件制造技术及装备研究中心, 250061 济南市

First Author: Tian Haidong, Postgraduate, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Research Center for Aeronautical Com-

ponent Manufacturing Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China

通信作者: 国凯, 助理研究员, 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东大学机械工程学院, 山东大学航空构件制造技术及装备研究中心, 250061 济南市

Corresponding Author: Guo Kai, Research Assistant, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Research Center for Aeronautical Component Manufacturing Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China