

刀具齿数对 7050 铝合金薄壁筋铣削残余应力的影响

翁小飞¹, 杨吟飞¹, 傅勇², 兰惠², 黄志平¹, 李亮¹

¹南京航空航天大学; ²江西洪都航空工业集团有限责任公司

摘要: 在相同刃口参数和切削参数条件下,采用整体硬质合金螺旋立铣刀进行 7050 铝合金薄壁筋高速铣削试验,并通过 X 射线衍射法测量在不同刀具齿数和刃口跳动下的表面残余应力。结果表明:两齿刀具切削产生拉应力,三齿刀具切削产生压应力;刃口跳动量小的刀具所产生切削残余应力值波动小;提高切削线速度将增大应力值并使其向拉应力方向偏移。

关键词: 薄壁筋;表面残余应力;高速铣削;刀具齿数

中图分类号: TG54;TG115.22;TH161

文献标志码: A

Influence of Tooth Number on Residual Stress of Thin-ribbed 7050 Aluminum Alloy Part

Weng Xiaofei, Yang Yinfei, Fu Yong, Lan Hui, Huang Zhiping, Li Liang

Abstract: Through employing the same edge parameter and cutting condition, the experiments on the high-speed milling of thin-ribbed 7050 aluminum alloy parts with different end mill diameters and tooth numbers are carried out. The surface residual stress is measured by X-ray diffraction method. The results show that tensile residual stress is produced with a two-tooth tool while the compressive stress is produced with a three-tooth tool. The stress fluctuation is smaller with a smaller tool edge run out. With the increase of the cutting speed, the residual stress will be increased and the residual stress tends to shift toward the tensile stress.

Keywords: thin-ribbed part; surface residual stress; high-speed milling; tooth number

1 引言

为满足现代飞机的高速、高机动性要求,飞机广泛采用轻量化的铝合金整体薄壁构件,如整体梁框、整体壁板等。但薄壁筋在切削残余应力作用下极易

产生变形,而切削残余应力影响零件的尺寸稳定性、疲劳强度、机械磨损性能和应力腐蚀性能。影响表面残余应力的因素众多,包括工件材料、切削参数、刀具参数等。现有研究表明:切削残余应力的产生与热应力引起的塑性变形以及机械应力引起的塑性变形有关;热应力塑性变形效应会使得表面产生拉应力,而机械应力塑性变形效应会产生压应力;表层下残余应力值大于表面残余应力值,在低速切削时

基金项目: 国家自然科学基金(51405226);江苏省自然科学基金青年科学基金(SBK2014043631)
收稿日期: 2017年5月

- [7] 李晓舟,于化东,许金凯,等. 微切削加工中切削力的理论与试验[J]. 光学精密工程,2009,17(5):1086-1092.
- [8] 刘婷,徐宗伟,曹克雄,等. 微铣削切削力特性及表面质量的研究[J]. 纳米技术与精密工程,2015,13(4):258-263.
- [9] 曹自洋,何宁,李亮,等. 微细铣削切削力正交试验研究[J]. 工具技术,2010,44(10):11-14.
- [10] 程凯,霍德鸿,等. 微切削技术与基础[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [11] Li H Z, Liu K, Li X P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling[J]. Mater Process Technol,2001,113(1-3):378-384.
- [12] E J A Armarego, R H Brown. The machining of metals[M]. New York:Prentice Hall,1969.
- [13] L Zhou, F Y Peng, R Yan, et al. Analytical modeling and experimental validation of micro endmilling cutting forces

- considering edge radius and material strengthening[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture,2015,97:29-41.
- [14] D J Waldorf, R E Devor, S G Kapoor. A slipline field for ploughing during orthogonal cutting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering,1998,120:693-699.
- [15] Herbert S Eberhard A, 何宁. 高速加工理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [16] 张文生,张飞虎,董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. 光学精密工程,2003,11(2):139-143.
- [17] 丁悦,王焱,刘畅,等. 钛合金切削力和表面粗糙度试验研究[J]. 航空制造技术,2016(6):88-95.
- 第一作者:张金峰,讲师,山东科技大学,266590 青岛市
First Author: Zhang Jinfeng, Lecturer, Shandong University Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

加工表面形成残余拉应力,当提高切削速度时,加工表面形成残余压应力;刀具前角在一定变化范围内,随着前角的增加,工件表面产生的残余拉应力的值先增大后减小,残余应力也随着切削刃钝圆半径增大而减小,但残余应力层的厚度增大。

目前,国内外的相关研究主要集中在切削参数、切削温度、工件材料、刀具参数等对表面残余应力的影响,尤其是刀具前角和刀尖半径等刀具参数对切削残余应力的影响。而针对铣刀刀具齿数对残余应力的影响研究较少,这使得生产中选择刀具齿数缺乏依据。为此,本文开展了高速铣削铝合金薄壁筋的高速铣削试验,研究刀具齿数对残余应力的影响和规律。

2 铣削试验

2.1 试验工件及刀具

工件材料为 7050 - T7451 铝合金,其力学性能见表 1。毛坯尺寸为 150mm × 50mm × 8mm,通过 Walter - AL30 系列整体硬质合金螺旋立铣刀加工成 150mm × 30mm × 2mm 的薄壁筋。试验刀具包括 $\phi 12 - Z2$ 、 $\phi 12 - Z3$ 、 $\phi 16 - Z2$ 、 $\phi 16 - Z3$ ($Z2$ 和 $Z3$ 分别代表 2 齿和 3 齿)各一把,其几何参数见表 2。

表 1 7050 - T7451 铝合金的力学性能

弹性模量 (MPa)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	硬度 (HRB)
70000	470	525	10	135

表 2 刀具主要几何参数

直径 (mm)	齿数 (个)	前角 (°)	后角 (°)	螺旋角 (°)	刀尖圆弧半径 (mm)
12,16	2,3	10	12	30	1

2.2 试验设备及切削用量

在 DMG - DMF18017 型高速五轴加工中心进行铣削试验,机床最高转速 18000r/min,最高进给 15000mm/min。

铣削加工中,各刀具的每齿进给量和转速相同,因此三齿刀具的进给速度为两齿刀具的 1.5 倍, $\phi 16$ 刀具的线速度为 $\phi 12$ 刀具的 1.33 倍,具体切削用量见表 3。

表 3 试验切削参数

齿数 (个)	主轴转速 (r/min)	切削进给量 (mm/min)	切宽 a_e (mm)	切深 a_p (mm)
2	17000	8000	2	2
3	17000	12000	2	2

2.3 残余应力测量

采用 $\mu - X360$ 型 X 射线残余应力测量仪测量

表面残余应力。测试方法为侧倾固定 ψ 角及利用震荡单元回摆法。铝合金材料应力的测量误差在 $\pm 10\text{MPa}$ 以内。

如图 1 所示,试验设置的 6 个测量点位于薄壁筋的中间区域。在水平方向上,测量点 1 和测量点 6 分别距试样两端 35mm,两点间距为 15mm。在垂直方向上,测量点位于第 8 条刀具轨迹的中间区域。由此选取的测量点可以有效避开试件两端进退刀颤振区和刀轨重叠区。所有试样均在加工后 4 小时内完成应力测量以减少表面高水平残余应力松弛带来的影响。

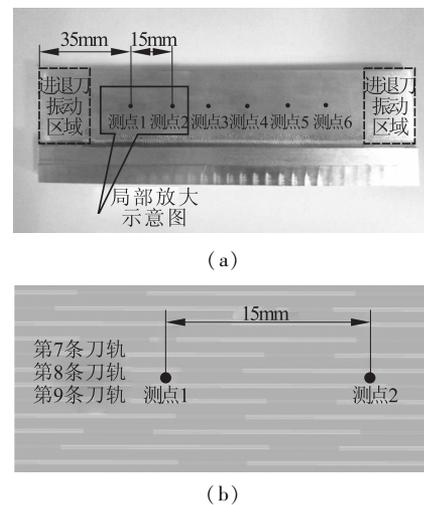


图 1 试件残余应力测量

3 结果分析

3.1 残余应力水平分析

采用不同直径、不同齿数的立铣刀加工后,铝合金薄壁筋的表面残余应力测量结果见表 4。

表 4 铝合金薄壁筋的表面残余应力 (MPa)

测量点编号	D12Z2	D12Z3	D16Z2	D16Z3
1	103	-282	229	-51
2	74	-255	213	-155
3	41	-229	209	-144
4	-20	-247	196	-156
5	19	-199	220	-108
6	-73	-219	191	-18
均值	24.0	-238.5	209.7	-105.3

由表 4 可知,工件表面残余应力值分布在 $\pm 250\text{MPa}$ 之间。刀具直径相同时,两齿刀具总体上产生了残余拉应力,而三齿刀具产生了压应力。这是因为齿数的增多使得刀具对材料的机械挤压作用加强,切削后表层材料的塑性变形牵制了里层材料弹性变形的恢复,在表层造成压应力,里层造成拉应力。刀具齿数相同时, $\phi 16\text{mm}$ 刀具所产生的残余应

力值高于 $\phi 12\text{mm}$ 刀具,这是因为转速相同时大直径刀具的线速度高,刀刃在零件表面机械作用时间相对减少,从而提高了应力值。

3.2 残余应力波动分析

表5给出了各试样应力波动的方差值。4把刀具所产生的残余应力波动情况各不相同,并且波动范围均超过了仪器测量误差值。其中D12Z2刀具所产生的应力波动最大,D16Z2所产生的应力波动最小。表6给出了各刀具在主轴上的刃口跳动数据。与各刀具的应力方差比较后发现,刀具直径相同时,刃口跳动值与方差值存在正相关关系。跳动越小,方差也越小,应力越均匀,反之亦然。因此,刃口圆跳动量也是影响工件表面残余应力均匀程度的因素之一。

表5 表面残余应力方差

D12Z2	D12Z3	D16Z2	D16Z3
63.9	29.2	14.3	58.5

表6 刀具刃口圆跳动量 (mm)

D12Z2	D12Z3	D16Z2	D16Z3
0.043	0.039	0.057	0.076

4 结语

通过对7050-T7451铝合金薄壁筋的铣削试验,获得了切削参数以及刀具齿数、刃口跳动等因素对表面残余应力的影响规律。主要结论如下:

(1)同直径的2齿和3齿刀具在加工时总体上分别产生残余拉应力和压应力;刀具直径不同时,直径越大应力数值越大,并有向拉应力方向靠拢的趋势;

(2)刀具刃口的圆跳动量影响了铣削残余应力的波动程度,在刀具直径相同时,刃口跳动越小,所产生的应力波动越小。

(3)选用高精度大直径多刃螺旋铣刀进行薄壁筋加工,不仅可以提高加工效率,而且可在零件表面形成较低幅值的均匀压应力,有利于提高零件疲劳

寿命。

参考文献

- [1] 王晓燕. 铝合金薄壁件铣削变形模型及其残余应力的研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
 - [2] 唐倩倩,赵先锋,王东东,等. 铣削用量对铝合金已加工表面残余应力的影响[J]. 现代机械,2016(1):1-4.
 - [3] Saurabh Agrawal, Suhas S Joshi. Analytical modeling of residual stresses in orthogonal machining of AISI4340 steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(1): 167-179.
 - [4] Behnam Davoodi, Ahmadreza Hosseini Tazehkandi. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 68(1):234-242.
 - [5] 覃孟扬. 基于预应力切削的加工表面残余应力控制研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
 - [6] 张玉玲. 冷压工艺对7050铝合金锻件淬火残余应力的影响研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
 - [7] 魏慧. 2A14铝合金薄壁件高速铣削参数优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
 - [8] 王明杰. 航空铝合金零件铣削三维残余应力模型研究[D]. 焦作:河南理工大学,2014.
 - [9] Jiwang Yan, Hongwei Zhao, Tsunemoto Kuriyagawa. Effects of tool edge radius on ductile machining of silicon: an investigation by FEM [J]. Semiconductor Science and Technology, 2009, 24(7):1-11.
 - [10] 常艳艳,孙涛,李增强. 金刚石刀具几何参数对已加工表面残余应力的影响[J]. 工具技术,2015,49(9):33-36.
- 第一作者:翁小飞,硕士研究生,南京航空航天大学机电学院,210016南京市
- First Author: Weng Xiaofei, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China