

振动时效在铝合金薄壁件加工过程中的应用

梁岩里, 谢 飞, 左 彬, 田姜斌

(航天五院北京卫星制造厂, 北京 100086)

[摘要] 介绍了振动时效法消除残余应力的机理,通过进行振动前后残余应力测试,验证了振动时效在铝合金薄壁件加工中的有效性,通过进行振动时效在薄壁件加工过程中的工艺,运用试验,得出振动时效在薄壁件加工中的应用方案。

关键词: 薄壁件; 振动时效; 残余应力

Application of the VSR in Machining Process of Aluminum Alloy Thin-Walled Parts

LIANG Yanli, XIE Fei, ZUO Bin, TIAN Jiangbin

(Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

[ABSTRACT] The mechanism of vibration stress relief(VSR) is introduced, and the residual stress in thin-walled parts before and after VSR is measured, which validated the effectiveness of VSR in machining process of aluminum alloy thin-walled parts. The relieving stress scheme of VSR used in thin-walled parts machining was drawn with processing experiment that VSR is used in the processing of thin-walled parts.

Keywords: Thin-walled parts; VSR; Residual stress

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.085

高强度铝合金精密薄壁支架类零件由于比强度高、相对重量较轻等优点,广泛应用于卫星和飞船等航天器结构机构中。由于该类零件材料加工应力大,容易产生加工变形,加工精度难以保证。零件在加工过程中需进行消除应力处理,以减小加工变形。薄壁支架在以往的工作中,通常采用多工序间多次进行热时效消除应力的方式。由于多次热时效后材料性能将发生改变,影响零件使用。而零件进行热时效次数少,则应力去除效果不理想,不能彻底消除零件的残余应力或使应力分布均匀化,无法满足加工精度要求。

振动时效法消除残余应力与传统的热时效和自然时效^[1-2]相比,具有节省能源、效率高、适应性强、使用方便等特点,并且能进行多次时效。本文选取航天器典型薄壁件(图1)作为研究对象,对振动时效消除残余应力的机理,在铝合金薄壁件加工中的应用效果及工艺运用进行研究,获得振动时效在薄壁件加工中的应用方案。

1 振动时效机理

振动时效(VSR)消除残余应力使工件获得尺寸稳定性的机理可以从宏观和微观两方面解释:宏观上,当 $\sigma_{动} + \sigma_{残} \geq \sigma_s$ 时($\sigma_{动}$ 为激励器施加给工件的周期性动

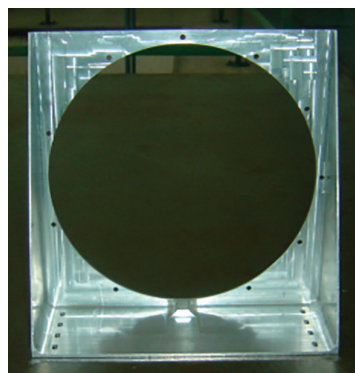


图1 典型薄壁件

Fig.1 Typical thin-walled parts

应力, $\sigma_{残}$ 为残余应力, σ_s 为材料屈服强度极限),工件会产生少量的塑性变形,使残余应力峰值下降,原来不稳定的残余应力得到松弛和均匀化。同时由于包辛格效应,经一定时间循环后,工件材料的当量屈服强度由原来的 σ_s 上升,直到与所受的应力相等,工件内部不再产生新的塑性变形,此时塑性变形变成弹性变形,工件的弹性性能得到强化,从而使工件的几何尺寸趋于稳定。微观上,因金属具有将机械能转变成热能的性质,即使在 $\sigma_{动} + \sigma_{残} \leq \sigma_s$ 时,也会产生微观的塑性变形。其机

理为：由振动输入的活化能使位错移动，在位错塞积群的前沿引起应力集中而产生塑性变形；同时，迁移的位错切割位错群，以致使位错钉扎，材料基体得到强化，使松弛刚度增大，工件获得尺寸稳定性^[3]。

2 振动时效在薄壁件加工中的去应力效果及工艺应用试验

本文选用的薄壁支架材料为 2A14 T4，零件外形尺寸为 280mm × 280mm × 100mm，壁厚为 3mm，其精度要求为底面平面度不大于 0.08mm，底面与侧面垂直度不大于 0.15mm。该支架在加工过程中，由于壁薄，刚性弱，材料应力大，加工精度要求高，加工变形造成不合格率达到 85% 以上。本文通过进行振动前后零件残余应力测量，从数值上分析振动时效的效果，并进行振动时效工序应用试验分析，获得振动时效在薄壁件加工过程中的应用方案。

2.1 振动时效去应力效果分析试验

振动前后残余应力的测量被作为评定时效工艺效果的主要手段。残余应力的测量方法主要分为无损测量法和有损测量法。无损测量法中常用的 X 射线仅能测量深度为微米级，易受表层加工影响，准确度不高的零件。故本试验采用常用的有损测量法——盲孔法(图 2)进行残余应力测量。

为了减小切削加工残余应力重组及装夹应力影响，采用图 1 薄壁件下料后的坯料进行振动前后数值测量(图 3)。试验中选取 2 块材料，分别取 4 个点进行了应力测试，测试结果如表 1 所示。

从试验结果可以得出，毛坯件振动后残余应力值小

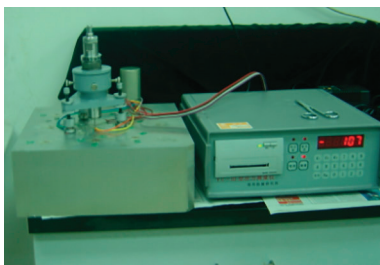


图2 盲孔法测量残余应力

Fig.2 Measuring residual stresses by blind-hole method



图3 坯料振动时效

Fig.3 VSR of the Billets

表1 振动时效前后残余应力对照表

测量点	$\sigma_{\text{振前}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{振后}}/\text{MPa}$	消除率/%	
1 号件	1	-129.5	-62.7	51.5
	2	-163.1	-85.1	47.8
	3	-117.1	-54.5	53.4
	4	-118.2	-61.1	48.3
2 号件	1	-130.0	-68.7	47.2
	2	-119.9	-70.4	41.3
	3	-137.4	-73.1	46.8
	4	-106.9	-59.01	44.8

于振动前残余应力值，且应力分布更加均匀，残余应力消除率达到 40% 以上。由此可见，振动时效在薄壁件加工过程中消除或均化残余应力的效果明显。

2.2 振动时效工艺应用试验

通过进行振动前后零件残余应力对比试验，得出振动时效去应力效果非常明显。下面进行振动时效在薄壁件加工过程中的工艺应用试验，取若干零件，按不同工艺流程加工，通过测量不同工艺流程下加工的零件精度，得到振动时效在薄壁件加工过程中应用方案。

试验分别选取了 10 件零件，每两件按以下不同的工艺流程进行加工。

- (1) 下料—粗加工—精加工；
- (2) 下料—振动—粗加工—振动—精加工；
- (3) 下料—振动—粗加工—热时效—精加工；
- (4) 下料—热时效—粗加工—热时效—精加工；
- (5) 下料—热时效—粗加工—振动—精加工；

其中，热时效去应力方案为：采用冷热循环法，使工件在 $-60^{\circ}\text{C} \sim +115^{\circ}\text{C}$ 之间冷热循环处理 3 次。振动时效工艺过程如图 4 所示。为了分析结果的准确性，工件加工过程中，使用同一设备、同一参数、同一工人进行操作，热时效参数、振动时效参数均统一。粗加工后，零件单边预留 1mm 余量。

按 1~5 条工艺流程加工零件后，进行底面平面度、底面与侧面垂直度测量，测量结果见表 2。编号为 1、2 号的零件工艺流程为 1，编号为 3、4 号的零件工艺流程

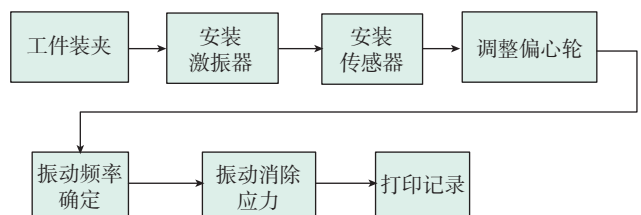


图4 振动时效工艺过程

Fig.4 VSR processing

表2 零件形位公差测量数据表

零件编号	底面平面度 /mm	底面与侧面垂直度 /mm
1	0.22	0.36
2	0.24	0.33
3	0.12	0.22
4	0.11	0.18
5	0.06	0.12
6	0.06	0.14
7	0.12	0.2
8	0.15	0.22
9	0.15	0.25
10	0.1	0.18

为2,以此类推。

从表2中可以看出,工艺路线3(下料—振动—粗加工—热时效—精加工)加工的编号为5、6的零件加工精度最高(底面平面度为0.06mm,底面与侧面垂直度为0.12~0.14mm),尺寸满足要求(底面平面度不大于0.08mm,底面与侧面垂直度不大于0.15mm)。由此可见,在薄壁零件加工过程中,下料后进行振动时效,后进行热时效,其消除应力方案确保零件变形最小,其效果好于多次进行振动时效。

在坯料状态下,零件自身的残余应力处于零件成型生产过程中的最大值,此时进行振动时效,可最大程度地进行均化后重组,而热时效方式无法进行整体内部的残余应力均化和减小。而零件粗加工后使得去除量大,自身大部分残余应力已释放,加工过程中施加的应力、装夹应力是其变形的主因,他们均可直接通过热时效的方式去除。

通过上述试验得出,振动时效在薄壁支架类零件加工过程中的应用方案为:振动时效直接应用于零件粗加工之前,即在零件下料后的毛坯状态下进行,其余工序间无需进行二次振动,可用热时效方式去应力。

3 结束语

通过振动时效的机理分析、振动时效前后的数值测量,表明振动时效工艺对减少和均匀化薄壁支架类零件的残余应力有良好效果。同时进行振动时效在薄壁件加工过程中的工艺应用试验,满足了薄壁支架尺寸加工要求,零件加工精度得到了提高,并得出了振动时效的应用方案。

(1)振动时效在薄壁件加工中效果明显。薄壁件残余应力降低40%以上,并且峰值应力降低,应力分布

得到了均化;

(2)振动时效在薄壁支架类零件加工过程中的应用方案为:单次使用,直接应用于零件毛坯状态。薄壁支架可采用以下流程消除残余应力、减小变形:下料—振动时效—粗加工—热时效—精加工。

参考文献

- [1] 朱世根,刘峰,顾伟生,等. 振动时效的应用[J]. 焊接技术, 2002,31(6):25-27.
ZHU Shigen, LIU Feng, GU Weisheng, et al. Application of vibration aging[J]. Welding Technology, 2002, 31(6):25-27.
- [2] 楚建营,陈立功,倪纯珍. 振动时效效果评定的几种方法比较[J]. 焊接学报, 2003, 24(1):57-60.
CHU Jianying, CHEN Ligong, NI Chunzhen. Several methods for evaluation of vibration aging effect comparison[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1):57-60.
- [3] 王炜. 振动时效的理论分析及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2004(1):41-43.
WANG Wei. Theoretical analysis and application of vibration aging[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2004(1):41-43.
- [4] 王之康. 真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京:原子能出版社, 2000.
WANG Zhikang. Vacuum electron beam welding equipment and technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000.
- [5] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王光中,译. 北京:国防工业出版社, 1998.
SURESH S. The fatigue of materials[M]. Wang Guangzhong translate. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [6] ISHIHARA Sotomi, NAN Zhenyu, GOSHIMA Takahito. Effect of microstructure on fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. Mater. Sci. Eng., A, 2007, 468-470: 214-222.
- [7] XU D K, LIU L, XU Y B, et al. The fatigue crack propagation behavior of the forged Mg-Zn-Y-Zr alloy[J]. J. Alloys Compd, 2007, 431: 107-111.
- [8] KEIRO T, MASAKI N, YOSHIHIKO U. Fatigue crack propagation and fracture mechanisms of wrought magnesium alloys in different environments[J]. Int. J. Fatigue, 2009, 31: 1137-1143.
- [9] NAN Z Y, ISHIHARA S, MCEVILY A J, et al. On the sharp bend of the s-n curve and the crack propagation behavior of extruded magnesium alloy[J]. Scripta Mater., 2007, 56: 649-652.
- [10] ZHANG H X, YAN Z F, WANG W X, et al. As-extruded AZ31B magnesium alloy fatigue crack propagation behavior[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2011, 26: 1114-1120.
- [11] VENKATESWARAN P, GANESH S R S, PATHAK S D, et al. Fatigue crack growth behaviour of a die-cast magnesium alloy AZ91D[J]. Materials Letters, 2004, 58: 2525-2529.

(责编 大漠)