

振动时效法在薄壁铸件上的应用

宁海青^{1,2}, 赵祖德^{1,2}, 黄树海^{1,2}, 康凤^{1,2}, 胡传凯^{1,2}

- (1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;
2. 国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心, 重庆 400039)

摘要:介绍了振动时效法消除残余应力的机理以及在薄壁铸件上的应用。通过对振动时效工艺参数, 包括激振点、支撑点、激振频率、激振力和激振时间等的分析, 优化出了薄壁铸件的振动时效工艺。振动时效后薄壁铸件残余应力降低35%以上, 应力分布得到了均化, 同时与热时效相比, 节约工艺成本70%以上, 大大地缩短了处理时间。

关键词:薄壁铸件; 振动时效; 残余应力; 微塑性变形

中图分类号: TG21+3 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2010)01-0052-05

Application of the Vibration-ageing in Thin-walled Casting

NING Hai-qing^{1,2}, ZHAO Zu-de^{1,2}, HUANG Shu-hai^{1,2}, KANG Feng^{1,2}, HU Chuan-kai^{1,2}

- (1. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;
2. National Defence Research and Application Center of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract: The mechanism of vibration stress relief (VSR) and its application in the thin-walled casting were introduced. VSR process parameters including vibration excitation point, support point, excitation frequency, excitation force, excitation time and so on, were analyzed to optimize the process of vibration-ageing. After VSR the residual stress reduced above 35%. The stress distribution became more homogeneous. Compared with the heat aging, VSR saved the process cost above 70% and reduced the process time.

Key words: thin-walled casting; vibration-ageing; residual stress; micro plastic deformation

振动时效(VSR)作为一种消除铸件和焊接件残余应力的工艺,与传统的时效和自然时效相比,具有处理时间短、消耗能量低、工艺成本小和适用大构件的消除应力处理等特点^[1],越来越受到人们的关注。近年来在国内外都得到迅速发展和广泛应用。

1 振动时效机理

振动时效是“锤击松弛法”的发展^[2],可用木锤、橡皮锤、紫铜锤等敲击零件的合适部位,激起零

件共振。“锤击松弛法”是给工件一个冲击力,引起零件的响应,零件以自己的固有频率和迅速衰减的振幅作减幅运动。敲击后的最初振幅越大,在零件内引起的“振动力”也越大。这一振动力多次反复作用,当它与残余应力迭加,在应力集中超过材料的屈服极限 σ_s 时,引起局部的塑性变形,松弛了应力,使应力峰值降低。受到“锤击松弛法”的启迪,人们用一激振力,激起零件的响应,并在大振幅下持续振动一段时间,使工件内的“大振动力”与残余应力迭加,在应力集中处引起塑性变形而松弛应力,于是产

收稿日期: 2009-12-14

作者简介: 宁海青(1984-),男,湖南隆回人,工程师,主要研究方向为材料成形。

生了振动时效技术,工艺原理如图1所示。

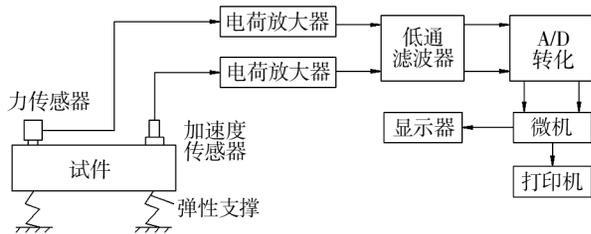


图1 振动时效的工艺原理

Fig. 1 The principle of vibration-ageing

从微观上分析^[3],金属材料中都存在缺陷,如空穴、位错、亚晶界等,而其中位错对残余应力的影响很大。工件在成形过程中,因其形状和内部组织结构的诸多变化等众多因素导致晶格畸变而产生内部残余应力。当工件受到振动时,其受到循环载荷的作用,在工件上产生一个附加的交变应力,施加于工件上的交变应力与工件中的残余应力相叠加。

当应力的叠加结果小于材料的屈服极限值时,即 $\sigma_{残} + \sigma_{振} < \sigma_s$,空穴、位错等缺陷原来的平衡被打破,产生移动,使部分缺陷在移动中被对冲掉,同时一些缺陷在移动中相互缠绕,使得应力叠加值不断累加;当应力的叠加结果达到材料的屈服极限时,即 $\sigma_{残} + \sigma_{振} = \sigma_s$,此时金属基体处于塑性变形的临界状态;当应力叠加值一旦超过材料的屈服极限时,即 $\sigma_{残} + \sigma_{振} > \sigma_s$,金属基体产生塑性变形,残余应力 $\sigma_{残}$ 得到释放,释放后变为 $\sigma'_{残}$,同时产生强基体效应。随着振动的持续, $\sigma_{振}$ 继续产生并与 $\sigma'_{残}$ 叠加重新超过材料的屈服极限,即 $\sigma'_{残} + \sigma_{振} > \sigma_s$,而使金属基体再次产生塑性变形,残余应力 $\sigma'_{残}$ 进一步得到释放。如此循环往返,直至振动应力 $\sigma_{振}$ 的累加值趋于稳定,最终的残余应力 $\sigma''_{残}$ 与振动应力 $\sigma_{振}$ 达到平衡,即 $\sigma''_{残} + \sigma_{振} = \sigma_s$,由此可得 $\sigma''_{残} < \sigma'_{残} < \sigma_{残}$,此时停止振动, $\sigma_{振} = 0$,工作中的残余应力为 $\sigma''_{残}$,从而达到消除应力的目的^[4]。

从宏观上分析^[5],振动时效是在激振设备周期性外力——激振力的作用下,使零件产生共振。共振过程中激振力在零件中产生的交变应力与零件内残余应力相叠加,产生局部屈服效应,改变了工件原来的应力场,使零件内部残余应力降低或重新分布,从而达到增强抗外载荷变形能力和稳定尺寸的目的^[2-6]。

工件在振动处理后残余应力通常可降低20%~30%,有时可达60%以上,同时也使峰值应力降低,使应力分布均化^[7]。经振动时效的工件的抗变形能力不仅高于未经时效的工件,而且高于经热时效处理的工件,通过振动也使材料得到强化,使工件的尺寸精度达到稳定^[7-9]。

2 振动时效的工艺参数

振动时效的工艺主要是对零件支撑、激振器安装工艺过程的控制,以及激振频率、激振力、激振时间等工艺参数的优化。

2.1 零件支撑和激振器安装

对于薄壁铸件,可根据分析、判断出的振型,在节点处放置弹性支撑,以避免零件和支撑物在振动时因相互撞击而消耗能量和产生噪音,一般支撑物采用橡胶垫,如图2所示。支撑点可为2点、3点或

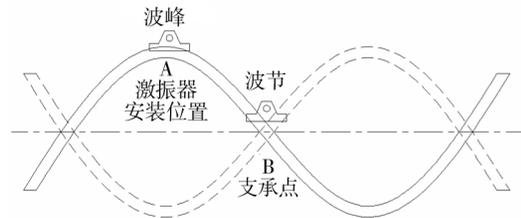


图2 安装示意

Fig. 2 Schematic diagram of fixing

4点,在保持零件静、动态平稳的前提下,支撑的数目越少越好,这样不仅能有效地降低噪音,而且可以优化振动处理的参数,增加振动的有效性^[10]。

激振器一般安装在零件振动的波峰附近,这样激振器可用最小能量激发零件产生较大振动,如图2所示,激振器安装在零件的A处就是这种情况。反之,若激振器安装在零件的B处,不仅不易激发起零件的振动,即使振动起来,耗能也多。

常见梁型零件在一阶弯曲振动时,激振器安装在零件的中部或一端。零件在初试激振时,通过调整支撑点位置,采用手感、撒砂子或仪表指示的方法粗略寻找波峰,然后再调整并确定激振器的安装位置。

2.2 振频率的确定

理论上,振动时效对频率的选择没有严格的要求,只要被处理零件的固有频率在激振器的频率范围内就行。而实际上在所有各种频率的加载形式中,只有在零件的固有频率下进行共振,才最经济最简便,因此,零件应尽可能在固有频率下进行共振。零件在振动时效时是一个振动体,它与其支撑装置组成振动系统,具有多个自由度,因此会有多个固有频率^[11]。

2.3 激振力的确定

振动时效是简谐激励下的受迫振动,振动时效激振装置对零件施加的是一个不对称的循环激应力,零件承受不对称循环应力,零件内部存在交变应力。对于机械式激振装置,激振力就是偏心质量旋转产生的离心力 $F = me\omega^2 \sin(\omega t)$, 激振力的大小通过调节偏心距 e 获得,同时还与振型、频率等有关。只有当激振频率和振型为零件的某个固有频率和振型时,发生共振,才可以获得较大振幅,相应地,应力也较大。零件内部残余应力是一个自相平衡的过程,在以拉应力为主的部位,应力 $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) + \sigma_m$, 平均残余应力 σ_m 为拉应力,平均应力振幅为 $\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_m$, 如图3所示。

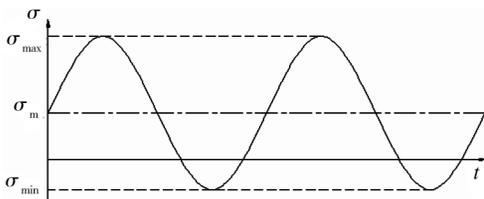


图3 激振引起不对称循环应力

Fig. 3 Anisomerous recurrent stress made by vibration

为保证振动时效工作的安全性,不使零件产生损伤,激振力的选择应满足公式(1)的要求^[12-13]:

$$\sigma_a \leq \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right) \sigma_{-1} \quad (1)$$

式中: σ_a 为平均应力振幅; σ_m 为平均残余应力; σ_s 为屈服强度; σ_{-1} 为对称应力条件下的疲劳极限。

2.4 振动时间的确定

根据被振金属构件的结构、材质、质量等来确定

激振时间,在生产中,振动时效的时间常以零件的质量确定,见表1。

表1 零件质量和振动时间的关系

Table 1 The relation between weight of part and the time of vibration

零件质量/kg	0227	227907	9074536
振动时间/min	1015	1520	2030

3 典型件的振动时效

3.1 试验过程

薄壁铝合金铸件——尾舱是某种产品上的重要零件,其体积大,加工精度要求较高,在试制时,切削加工变形造成的不合格品率在80%以上。为了消除材料中的残余应力,稳定材料组织,也进行了人工时效即热处理时效,但效果不很理想,而且成本较高。其切削加工变形是影响该产品质量和生产进度的关键技术问题。

薄壁铸件为“天圆地方”型零件,尺寸:大端为方形,小端为圆形,高度 $h > 1100$ mm,壁厚最薄处仅为3 mm。在保持零件静、动态平稳的前提下,支撑的数目越少越好,选取3个支撑点,支撑点置于零件的侧壁,支撑位置选在振动的节点(线)处,支撑物采用橡胶垫,如图4所示。铸件在“地方”部位采用

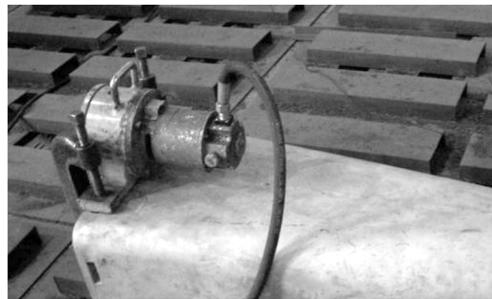


图4 安装过程

Fig. 4 The process of fixing

左右2点支撑,在“天圆”部位采用1个支撑点,中间没有支撑。

铸件材料为ZL59合金,其抗拉强度 σ_b 为340~350 MPa,延伸率为4%~5%,屈服强度 σ_s 约为270 MPa,平均残余应力 σ_m 约为80 MPa,应力比为-1时的疲劳极限 σ_{-1} 约为70 MPa,代入公式(1)计算,得 $\sigma_a \leq 49$ MPa,即 $\sigma_a \leq 4.9$ kg/mm²,因此加载系数应

满足 $k \leq 0.61$ (加载系数 $k = \text{峰值动应力} / \text{平均残余应力}$)。由于铸件壁厚较薄, 试验时选用加载系数 $k = 0.45$, 即动应力为 3.6 kg/mm^2 , 以保证铸件振动时效的安全性和有效性。

试验中, 振动前进行零档扫频(如图5所示),



图5 频谱分析

Fig. 5 Frequency analysis

确定零件的固有频率, 振动过程中自动优化选取5个以上振动频率(如图6所示), 实现对工件的多维消除残余应力。

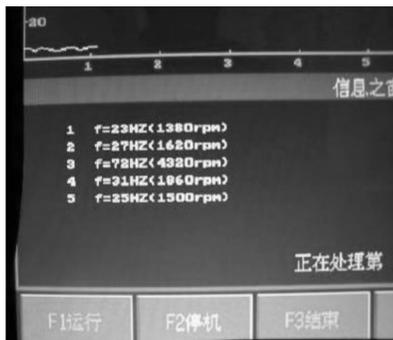


图6 频谱优选

Fig. 6 Frequency optimizing

振动时间的确定: 尾舱铸件质量为 35 kg 左右, 为薄壁大型铸件, 根据表1数据确定平均每个频率下振动时间为 8 min 。具体时间安排是: 第1个频率下振动时间为 10 min , 第5个频率下振动时间为 6 min , 中间频率下振动时间为 8 min , 总共时间为 40 min 。当第5个频率分析结束后, 试验完成。

3.2 试验结果

零件振动时效后的 $a-t$ (加速度-时间) 曲线有5条, 这里只选取振动中间第3个频率和振动结束第5个频率时的 $a-t$ 曲线, 如图7-8所示。可以发现, 第3个频率时的 $a-t$ 曲线上后下降, 呈波浪形变

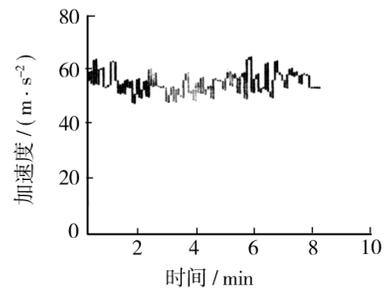


图7 第3个频率 $a-t$ 曲线

Fig. 7 The third frequency of $a-t$ curve

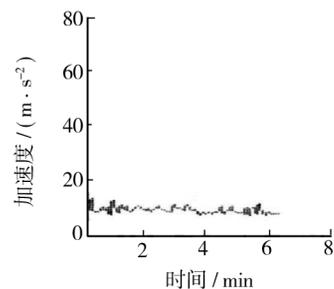


图8 第5个频率 $a-t$ 曲线

Fig. 8 The fifth frequency of $a-t$ curve

化, 说明振动时效对残余应力消除效果有效; 第5个频率时的 $a-t$ 曲线变化平缓, 说明振动时效后薄壁铸件内部残余应力已基本消除, 零件内部残余应力均化程度高。

3.3 残余应力测试

为验证振动时效消除残余应力的作用效果, 采用X射线衍射分析法^[14]对零件在振动前后分别进行了残余应力检测, 测试结果见表2。

表2 残余应力测试结果

Table 2 The result of residual stress

序号	残余应力/MPa		应力降低幅度/%
	振动时效前	振动时效后	
1	-81.8	-50.4	38.4
2	-75.6	-48.6	35.7
3	-84.1	-51.7	38.5

从表2中可以看出, 零件在振动时效后, 残余应力降低了35%以上, 同时也使峰值应力降低, 应力分布均化, 说明振动时效工艺对薄壁铸件的残余应力的消除是可靠的。

4 结语

振动时效工艺对减少和均匀化薄壁铸件的残余应力效果良好,这是由于在振动时效过程中,零件承受周期性的附加应力作用,在应力集中处当激振附加应力和零件内部残余应力叠加后,率先达到或超过材料的屈服极限,发生局部微塑性变形,继而在整体上发生较大的塑性变形。峰值应力处产生的塑性变形大,而其他部位相对较小,经过多次交变应力作用,由于微/宏观塑性变形导致了零件中残余应力的降低和均匀化。

1) 在振动时效后,薄壁铸件残余应力降低35%以上,并且峰值应力降低,应力分布得到了均化;

2) 与热时效相比,节约工艺成本70%以上,并且大大地缩短了处理时间。

参考文献:

- [1] 张勇. 二十一世纪高效节能环保高新技术——振动消除应力技术[J]. 中国机械工程, 2002, 13(19): 1640-1642.
- [2] 房德馨. 金属的残余应力与振动处理技术[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 20-100.
- [3] 许旻, 李庆本. 振动时效的振动力学分析[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 79-82.
- [4] 宋天民, 张国福, 尹成江. 振动时效机理的研究[J]. 吉林大学自然科学学报, 1995(1): 53-56.
- [5] 贺艺, 许艺萍. 振动时效机理及其在消除应力方面的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2009, 19(1): 39-41.
- [6] 张建军, 段辉. 振动时效机理及效果的评定[J]. 中国铸造装备与技术, 2005(4): 44-46.
- [7] MUNSI A S M Y, WADDELL A J, WALKER C A. The Effect of Vibratory Stress on the Welding Microstructure and Residual Stress Distribution[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215(12): 99-111.
- [8] 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.
- [9] WALKER C A, WADDELL A J, JOHNSTON D J. Vibratory Stress Relief - an Investigation of the Underlying Processes[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 1995, 209(1): 51-58.
- [10] 胡庆丰, 顾伟生, 吴贺龙, 等. 金属工件的振动时效技术[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 28(4): 294-296.
- [11] 耿鑫明. 振动时效及其应用[J]. 能源研究与应用, 2002(1): 45-46.
- [12] 徐秀娟, 高葛. 基于疲劳极限的振动时效激振力的选择[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(4): 294-296.
- [13] 沈华龙, 吴运新, 熊卫民. 振动时效应用于铝合金时动应力的选择[J]. 材料工程, 2009(4): 18-22.
- [14] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 30-44.
- [3] NAKAMURA K, NAKAGAWA T, AMINO H. Various Application of Hydraulic Counter Pressure Deep Drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 160-167.
- [4] 刘晓晶. 5A06铝合金板材可控径向加压充液拉深过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] LIU Xiao-jing, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian. Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Material Science and Technology, 2008, 24(3): 395-399.
- [6] GROCHE P, HUBER R, SCHMOECHERL D, et al. Hydromechanical Deep Drawing of Aluminium-Alloys at Elevated Temperatures[J]. Annuals of the CIRP. 2002, 51(11): 215-218.
- [7] GROCHE P, METZ C. Investigation of Active-elastic Blank Holder Systems for High-Pressure Forming of Metal Sheets[C]. Proc of 1st ICNFT, Harbin, China, 2004: 447-452.

(上接第45页)