

频谱谐波时效在风电球磨铸铁件中的应用研究

王忠益

(重庆齿轮箱有限责任公司,重庆 402263)

摘要:介绍了频谱谐波时效技术在去应力处理效果和保持尺寸精度稳定性方面的作用,对风电球墨铸铁材料工件(样件)处理后,经对残余应力和工艺变形量测定表明,此技术可以替代以消除应力为目的的热时效工艺,达到防止工件变形、开裂、提高工件尺寸精度和尺寸稳定性的目的。

关键词:残余应力;频谱谐波;多振型;尺寸精度;磁应力检测

中图分类号:TG 164 **文献标志码:**B

Application Research of Harmonic Frequency Spectrum Vibratory Stress Relief on WT Nodular Cast Iron

WANG Zhongyi

(Chongqing Gearbox Co., Ltd, Chongqing 402263, China)

Abstract: Introduce the effect of harmonic frequency spectrum VSR to reduce stress effect and dimension stability improving, after doing some research on the WT nodular cast iron, based on the measurement of residual stress and dimension stability, we can come to the conclusion that harmonic frequency spectrum VSR can replace annealing, avoid cracking & distortion and improve dimension stability.

Key words: Residual stress, Harmonic frequency spectrum vibratory stress relief, Multi-dimension frequency, Dimensional stability, Magnetic memory test

金属工件在成形和加工过程中,一般通过自然时效、热时效或振动时效来消除残余应力。自然时效周期长,无法适应批量生产;热时效能耗高而且污染环境;振动时效虽然效率高,节约成本 95%,但噪音大、振型少、应力消除效果不稳定,且工艺方案复杂,因此造成了振动时效始终没有被大多数企业纳入正式的工艺流程,只能作为热时效辅助手段。

进入 21 世纪后,随着电子信息技术的发展,基于振动时效基本原理的频谱谐波时效技术在国内的许多行业得到了推广应用。本文介绍了频谱时效的技术原理和作用机理,通过在风电球磨铸铁件上应用研究和数据分析表明,该技术可以取代以消除应力为目的热时效。

1 频谱谐波时效技术原理

该技术是在原有振动时效技术上的提高和突破,通过傅立叶分析,不需扫描,在 100 Hz 内寻找低次谐波,然后用合适的能量在多个谐波频率振动,引起高次谐波累积振动产生多方向动应力,与多维分布的残余应力叠加,造成塑性屈服,从而降低峰值残余应力,同时使残余应力分布均化。该技术对不同工件大小、频率刚性高低、材料特性均能找出 5 种不同振型的谐波峰,不受激振器转速范围限制,对激振点和拾振点无特殊要求,能够处理亚共振无法处理的高刚性高固有频率工件,能够满足对尺寸精度要

求高的工件,振动噪音低,在机械行业的覆盖面可达 100%。

2 频谱谐波时效机理的研究

2.1 残余应力的产生和消除方法

金属工件在铸造、锻造、焊接和切削加工及使用过程中,由于受热冷、机械变形作用,其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用力,称为内力;单位面积上的内力称为应力。在外力撤销后,存在于物体内部的应力,称为内应力,而内应力的累积或局部应力急剧增大会产生应力集中,也就是残余应力。从微观角度讲,残余应力是由于金属晶体内内部的位错纠集和其他缺陷及晶界非均衡分布而造成的。

通过以上分析,对金属工件如施加机械振动,且施加的动应力大于金属材料变形屈服极限,则金属晶体内晶格之间产生滑移,应力得到松弛和重新分布,这样可以调节应力、使峰值应力降低、整个应力均化,达到稳定工件尺寸精度,防止应力集中区域裂纹萌芽的作用。

2.2 频谱谐波时效机理

2.2.1 宏观机理

频谱谐波时效技术有 5 种以上的有效振型,通过多维振动消除应力,使得工件内部不同部位残余应力得到充分释放,工件整体内应力得到均化,抗变

形能力大幅度提高。

残余应力在金属工件内部呈多维分布,如果振动动应力方向与残余应力的方向叠加,则残余应力消除最充分。表 1 为某零件振动方向对残余应力松弛百分比的影响。

表 1 某零件振动方向对残余应力松弛的影响

振动时间/min	沿振动方向对残余应力松弛百分数(%)					
	垂直向		水平向		横向 Z	
	Y	X	Y+X	Z	Y+X+Z	平面
15	14.5	6.0	1.2	17.0	14.5	12.0
30	16.0	10.0	3.6	22.0	19.0	19.0
60	22.0	19.0	12.0	27.0	24.0	25.0
180	30.0	26.5	23.0	34.0	32.0	33.0
240	32.0	28.5	24.0	35.0	33.0	35.0

注:表中振动参数:Y 向振幅 3 mm,频率 22 Hz;X 向振幅 1 mm,频率 55 Hz

分析表 1 数据可知:

1) 在垂直方向振动 15 min 所消除掉的残余应力,在水平方向或轴向振动时,就需要花费 2 倍或 4 倍的振动;

2) 采用双向振动(平面)或 3 向(体积)振动比单向振动能较多降低残余应力。

因此,对于残余应力分布复杂的工件,应采用 3 个或 3 个以上不同振动型态的频率进行时效处理。

对于频谱谐波时效技术,可以采用比较直观的“砂型法”来分析其振动型态。其方法如下:在平放的零件上撒砂粒,在振动状态下,零件振动各部位上的砂粒产生运动并逐渐移动、集中到节线(振幅最小处)附近,显示出节线位置和形状。图 1~图 3 为在 3 种不同振动频率处理过程中,砂粒停止移动后的形状图(振动频率节线)。

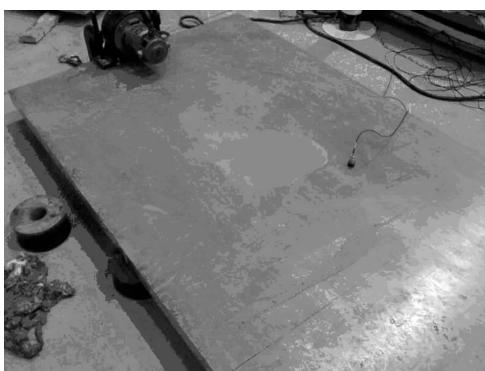


图 1 第 1 种振动频率:棒锤形和钟鼓形

通过图 1~图 3 可以看出,不同谐波振动频率下,零件平面上砂粒显示的形状和节线位置完全不一样。

因此,频谱谐波时效技术其 5 种以上振动型态可以与多方向上的残余应力进行叠加,充分消除工件内部不同部位残余应力的分布,使得工件内应力



图 2 第 2 种振动频率:2 条曲线和钟鼓形

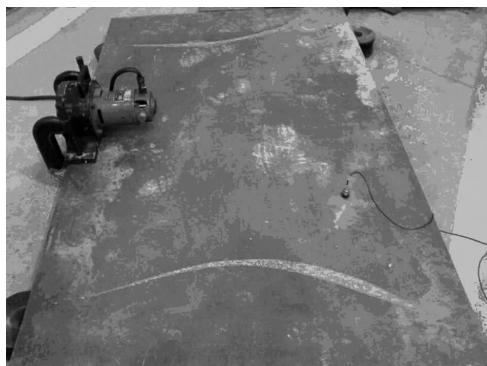


图 3 第 3 种振动频率:2 条曲线

得到很好的均化,大幅度提高工件抗变形能力。

2.2.2 微观机理

频谱谐波时效技术起源于振动时效,其基本原理是在 100 Hz 内寻找低次谐波,然后用合适的能量在多个谐波频率振动,引起高次谐波累积振动产生多方向动应力,与多维分布的残余应力叠加,造成塑性屈服,从而降低峰值残余应力,对于振动过程的机理,国内外已经进行了大量的研究工作,取得以下的共识。

振动就是对金属构件施加周期性的作用力(动应力 $\sigma_{\text{动}}$)。在振动过程中,施加到金属构件各部分的动应力 $\sigma_{\text{动}}$ 与内部残余应力 $\sigma_{\text{残}}$ 叠加,当叠加幅值大于金属构件的屈服极限 σ_s ,即 $\sigma_{\text{动}} + \sigma_{\text{残}} \geq \sigma_s$ 时,这些点晶格滑移,产生微小的塑性变形,达到释放残余应力的目的。

从金属物理学上看,振动时效的过程,实质上是金属材料内部晶体位错运动、增殖、塞积和缠结的过程。由于金属材料存在位错,所以在构件内部产生的交变动应力与内部的残余应力相互叠加,在应力较高的区域,就可产生位错滑移,出现微小塑性变形。位错滑移是单向进行线性累积的,当微应变累积到一个宏观量,金属组织内残余应力较大处的位错塞积得以交替开通,局部较大残余应力得以释放,构件宏观内应力随之松弛,使残余应力的峰值下降,改变了构件原有的应力场,最终使构件的残余应力

降低并重新分布,使较低的应力达到平衡。位错塞积后造成位错移动受阻,从而强化了基体,提高了构件抗变形能力,使构件的尺寸精度趋于稳定。

3 频谱谐波时效技术在风球磨铸铁零件上的应用研究

3.1 研究目的

通过对热时效和振动时效2种工艺在应力消除和保持尺寸精度稳定性两方面进行试验验证,确定“频谱谐波”振动时效去应力工艺在风球墨铸铁件领域是否能取代以消除应力为目的热时效工艺。

3.2 试验内容、加工过程及检测周期

试验工件为风电用风机FL1500A的箱体(材料为QT400-18)和行星架(材料为QT700-2A),试验工件加工过程为1.5个月。加工完成后进行第1次精度检测,放置15 d后进行第2次精度检测,工件形状及检测尺寸如图4~图6所示。

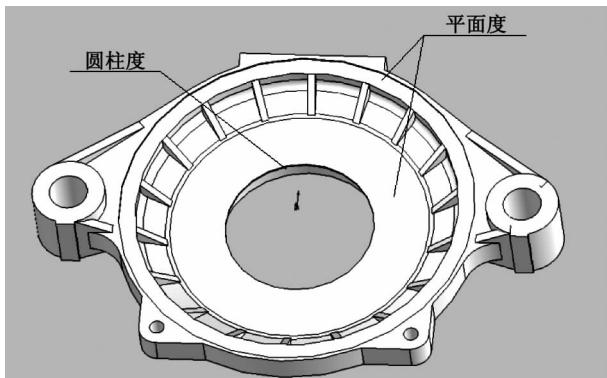


图4 前箱体

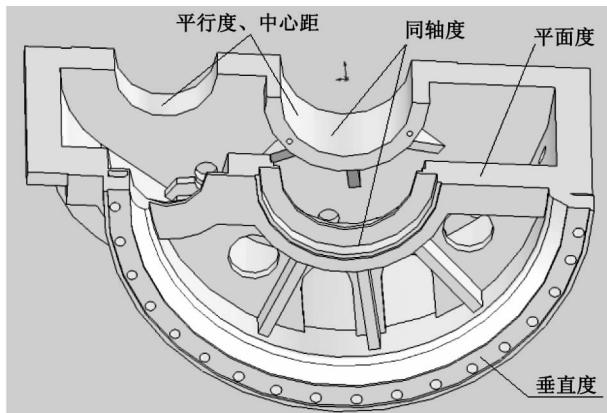


图5 后箱体

3.3 振动时效和热时效试验件精加工后尺寸稳定性比较

振动时效和热时效试验工件精加工后间隔15 d,2次检测尺寸变化的项目为中心距、平行度、同轴度、垂直度、圆度、圆柱度和平面度。

检测结果统计分析如下:

1) 频谱谐波时效共检测了105个项目数据,数

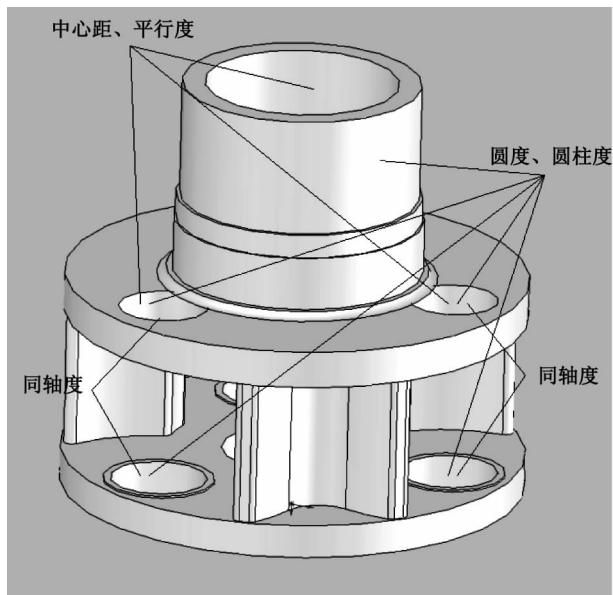


图6 行星架

据变化用 Δ 表示,其中 $\Delta \leq 0.010$ 的有70个,占66.67%; $0.010 < \Delta \leq 0.030$ 的有23个,占21.9%; $0.030 < \Delta \leq 0.050$ 的有9个,占8.57%; $0.05 < \Delta \leq 0.060$ 的有3个,占2.86%;

2) 热时效共检测了99个项目数据,其中数据变化 $\Delta \leq 0.010$ 的有65个,占66.66%; $0.010 < \Delta \leq 0.030$ 的有22个,占22.22%; $0.030 < \Delta \leq 0.050$ 的有9个,占9.09%; $0.05 < \Delta \leq 0.064$ 的有3个,占3.03%。

从上述对比情况来看,2种工艺对保证球墨铸铁件精加工后尺寸精度的稳定性效果相差极小,最大的相差0.52%;最小的相差0.01%;因此可以认为是相同的。

3.4 球墨铸铁试验件热时效和振动时效后应力消除和应力均布情况比较

试验工件为风机FL1500齿轮箱箱体和行星架。

应力检测设备采用俄罗斯TSC-1M-4型金属磁记忆应力检测仪进行应力检测。金属磁记忆方法的基本原理是金属在残余应力集中区域中产生漏磁场现象,而漏磁场的变化反映导磁率张量,这一张量相当于金属在载荷作用下形成的变形或应力张量。通过该设备对试验工件振动前后漏磁场分布的检测,判断工件内部残余应力分布情况,从而直观地观察振动时效前后应力消除和均化效果。

齿轮箱体和行星架时效前后检测结果如图7~图10所示,图中“Lx,mm”轴表示测试工件轨迹长度,单位为mm;H,A/m轴表示磁场强度,单位为A/m;channels轴表示所测试的通道数。

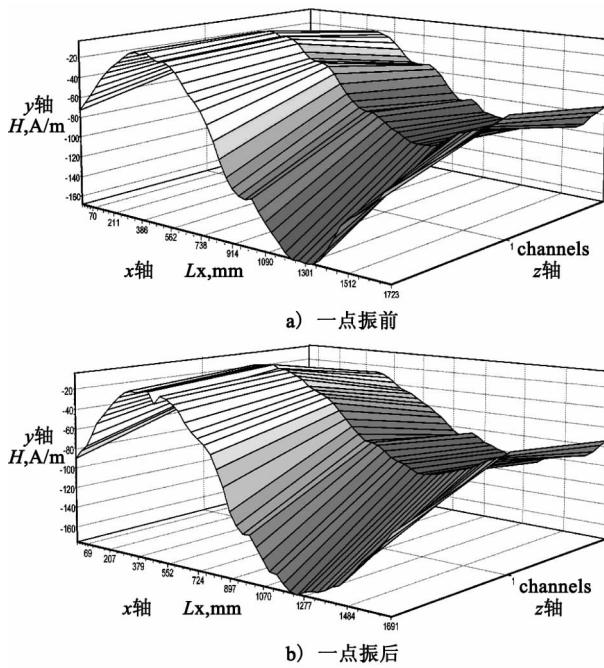


图 7 行星架经频谱谐波时效处理后磁应力三维分布效果图

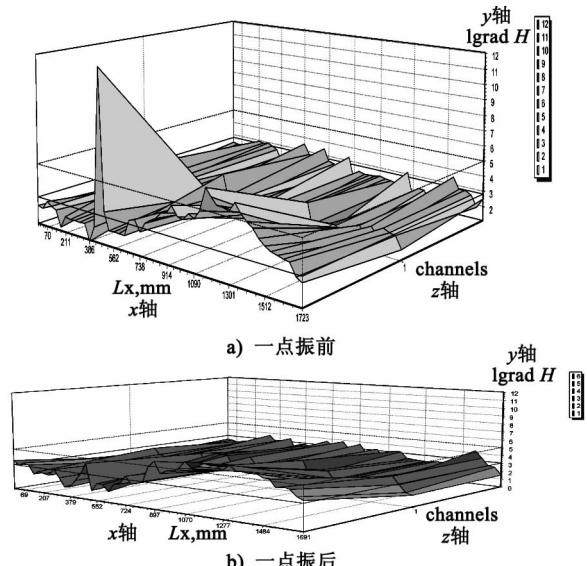


图 8 行星架经频谱谐波时效处理后梯度值三维效果图

由图 7~图 10 可以看出,从整体来说,在时效处理前磁应力及梯度值曲线分布不均,局部有应力集中现象,时效处理后磁应力分布及梯度值峰值明显下降。检测的 3 套箱体、6 件行星架磁应力梯度值峰值平均下降最低为 41%,最高为 59%,证明了频谱谐波时效处理后工件的残余应力下降、均化效果显著,起到了应力均化和消除的良好效果;热时效处理的行星架和箱体,通过检测出的梯度值变化结果与振动时效工件在同一状态下的梯度值相比,变化率很小,可视为效果基本相同。

4 结语

根据对球墨铸铁材料试验件频谱谐波时效前

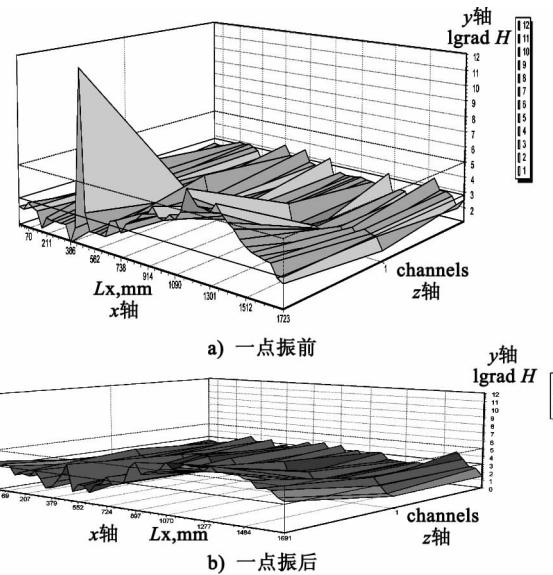


图 9 箱体经频谱谐波时效处理后磁应力三维分布效果图

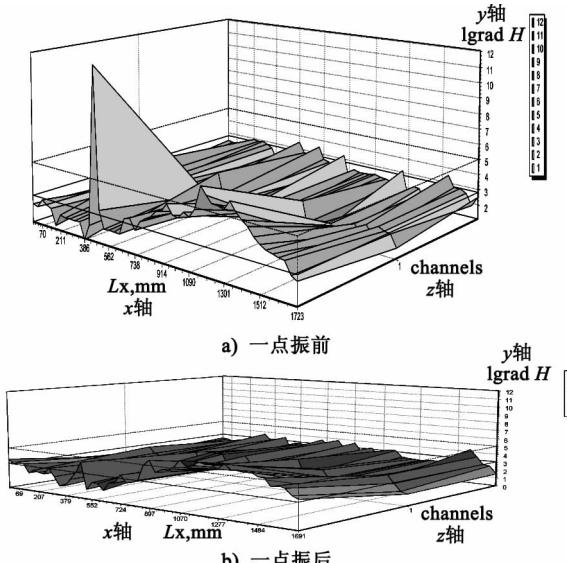


图 10 箱体经频谱谐波时效处理后梯度值三维分布效果图
后、热时效前后的应力分布和应力变化的检测对比
和精加工后精度稳定性检测对比,频谱谐波时效和
热时效的效果基本一致,没有明显的区别。

而频谱谐波时效技术与热时效相比,时效成本仅占热时效的 10%,节能达到 95%以上,按此计算每年可为公司节约大量生产成本,具有良好的社会效益和经济效益。

因此,频谱谐波时效技术是一种“节能、降耗、无污染、缩短时效时间、无须占地建炉”的绿色制造技术,对球墨铸铁件而言完全可以取代过去的热时效工艺,值得大力推广应用。

~~~~~  
作者简介:王忠益(1956-),男,工程师,主要从事振动时效方面的应用研究。

收稿日期:2010 年 5 月 15 日

责任编辑 王亚昆