

振动时效技术的应用和发展

北京翔博科技有限责任公司技术总监 胡晓东

金属工件在铸造、锻压、焊接和切削加工和使用过程中,由于受热冷、机械变形作用,在工件内部产生残余应力,致使工件处于不平稳状态,降低工件的尺寸稳定性和机械物理性能,使工件在服役过程中产生应力变形和失效,尺寸精度得不到保证。为了消除残余应力,过去通常采用热时效和自然时效。自然时效周期太长,占地面积大,不适应大批量生产;热时效使用费高,且占地面积大,辅助设备多,耗能高,炉温控制难度高,工件易氧化,增加清理工作量,且易因受热不均致裂,并在冷却过程中产生新的应力,此外,热时效处理劳动条件差,污染环境,机械化自动化水平也不高。振动时效显著节能、降低成本、缩短周期。与热时效相比振动时效节约时效成本 90%以上,节能 95%以上,节约投资 90%以上,自然时效周期要半年或两年,热时效需 1-2 天,而振动时效通常仅需半小时,最长不超过 1 小时。设备轻便易携,工艺简单,适应性强,自动化程度高,不受工件大小、重量、地点限制。

振动时效适应现代工业社会对能源和环保的要求。它在某些方面已有取代传统热时效的趋势,成为一种革命性的高新技术。已引起机械制造业的极大关注和兴趣。近二、三十年来在世界范围内得到更为广泛的应用。

一、振动时效概述

1. 振动时效原理

振动消除应力简称 VSR (Vibratory Stress Relief),它是利用一受控振动能量对金属工件进行处理,达到消除工件残余应力的目的。

国内外大量的应用实例证明,振动时效对稳定零件的尺寸精度具有良好的作用。然而,对于振动时效稳定尺寸精度的机理,迄今为止尚无系统的、满意的解释。

从宏观角度分析,振动时效使零件产生塑性变形,降低和均化残余应力并提高材料的抗变形能力,无疑是导致零件尺寸精度稳定的基本原因。从分析残余应力松弛和零件变形中可知,残余应力的存在及其不稳定性造成了应力松弛和再分布,使零件发生塑性变形。故通常采用热时效方法以消除和降低残余应力,特别是危险的峰值应力。振动时效同样可以降低残余应力。零件在振动处理后残余应力通常可降低 20-30%,有时可达 50-60%,同时也可使峰值应力降低,使应力分布均化。

除残余应力值外,决定零件尺寸稳定性的另一重要因素是松弛刚性,或零件抗变形能力。有时虽然零件具有较大的残余应力,但因其抗变形能力强,而不致造成大的变形。在这一方面,振动时效同样表现出明显的作用。由振动时效的加载试验结果可知,振动时效件的抗变形能力不仅高于未经时效的零件,也高于经热时效处理的零件。通过振动而使材料得到强化,使零件的尺寸精度达到稳定。

从微观方面分析,振动时效可视为一种以循环载荷的形式施加于零件上的一种附加应力。众所周知,工程上采用的材料都不是理想的弹性体,其内部存在着不同类型的微观缺陷,铸铁中更是存在着大量形状各异的切割金属机体的石墨。故而无论是钢、铸铁或其他金属,其中的微观缺陷附近都存在着不同程度的应力集中。当受到振动时,施加于零件上的交变应力与零件中的残余应力叠加。当应力叠加的结果达到一定的数值后,在应力集中最严重的部位就会超过材料的屈服极限而发生塑性变形。这塑性变形降低了该处残余应力峰值,并强化了金属基体。而后,振动又在另一些应力集中较严重的部位上产生同样作用,直至振动附加应力与残余应力叠加的代数和不能引起任何部位的塑性变形为止,此时,振动便不再产生消除和均化残余应力及强化金属的作用。

振动时效工艺处理现场图



控制器：控制激振器产生所需振动能量、频率的设备。

激振器：刚性连接在工件上，产生激振力，带动工件产生振动的设备，由电机与偏心轮组成。

传感器：获取工件受振能量信息的设备。

2，振动时效对材料性能的影响

在生产实践中发现，振动时效不仅可以消除工件的残余应力，振动时效后工件的强度指标也有很大提高。这就启发我们，对工件进行振动处理，从而使材料得到强化。

振动强化就是使工件受外部循环载荷进行受迫振动，激振力来自激振器的偏心部分。这是一个多自由度、有阻尼系统的受迫振动问题。为了便于分析，我们将系统简化为单自由度、有阻尼系统的受迫振动来进行分析，其力学模型见图 1 所示。

其动力学方程为：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(\omega) \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

$$F(\omega) = me\omega^2 \quad (2)$$

可见激振力的大小随偏心距 e 和转速 ω^2 的增大而增大。因此在实际应用中，通过调整激振器的偏心和转速可以对金属材料工件施加交变动应力，而金属材料在交变动应力的作用下会产生位错运动。

交变动应力从零增大至峰值时，随着外加动应力的增大，金属材料位错被激发，不断释放出新位错，并在障碍物前塞积。不断增大的位错塞积群应力场使其邻近晶粒的位错有发生移动的趋势。原有应力场较大地方的塞积首先得以开通，其应力集中得以释放。

交变动应力从最大值下降至零的过程中，位错塞积群的平衡状态破坏，大量的位错会由于移动过程中与其它位错交割，位错密度因此而大大增加。随着外加动应力的交变，上述过程不断重复，内应力峰值下降的同时位错不断得到增殖，而位错密度的不断增加有利于材料疲劳强度的提高。

疲劳破坏分三阶段：裂纹萌生、裂纹扩散和瞬时断裂。金属材料的疲劳寿命主要由裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命两部分组成。

裂纹萌生总是先在应力最高、强度最弱的部位形成，振动处理后由于高内应力得以降低，

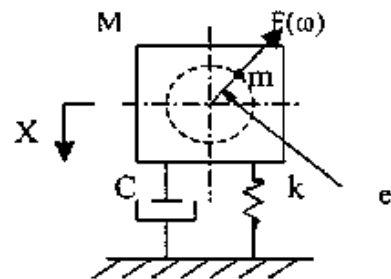


图 1 振动系统力学模型

分布均化,减少了应力集中的影响;同时位错密度增加使滑移带滑移更加困难,从而使裂纹萌生寿命增加。而材料的位错组态变化和位错密度增加,使得滑移运动阻力增大,裂纹扩展所需能量增大,使裂纹扩展寿命增加,从而提高了材料的疲劳强度,使材料性能得到强化。

3, 振动时效特点

在机械制造,航空,化工器械,动力机械等行业中,用钢,铸铁,有色金属等材料制造的各类零件成功地采用了振动时效。振动时效之所以得到各方面的普遍重视,是由于它具有如下特点:

- 投资少.与热时效相比,它无需庞大的时效炉,可节省占地面积与昂贵的设备投资.现代工业中的大型铸件与焊接件,如采用热时效消除应力则需建造大型时效炉,不仅造价昂贵,利用率低,而且炉内温度很难均匀,消除应力效果很差.采用振动时效可以完全避免这些问题.

因此,目前对长达几米至几十米的桥梁,船舶,化工器械的大型焊接件和重达几吨至几十吨的超重型铸件,较多地采用了振动时效.

- 生产周期短.自然时效需经几个月的长期放置,热时效亦需经数十小时的周期方能完成,而振动时效一般只需振动数十分钟即可完成.而且,振动时效不受场地限制,可减少工件在时效前后的往返运输.如将振动设备安置在机械加工生产线上,不仅使生产安排更紧凑,而且可以消除加工过程中产生的应力.

- 使用方便.振动设备体积小,重量轻,便于携带.由于振动处理不受场地限制,振动装置又可携至现场,所以这种工艺与热时效相比,使用简便,适应性较强.

- 节约能源,降低成本.在工件的共振频率下进行时效处理,耗能极小.实践证明,功率为 0.25 至 1 马力的机械式激振器可振动 150 吨以下的工件,故粗略计算其能源消耗仅为热时效的 3~5%,成本仅为热时效的 8~10%.

- 其他.振动时效操作简便,易于实现机械化自动化.可避免金属零件在热时效过程中产生的翘曲变形,氧化,脱碳及硬度降低等缺陷,是目前唯一能进行二次时效的方法.

二、振动时效的起源:

振动时效起源于二战以后的欧美国家,在上世纪五十年代前后,随着现代科学技术的发展,振动理论、测试技术和激振设备都得到迅速的发展。从而发现,在工件的共振频率下进行振动,可以缩短振动处理时间,消除应力和稳定精度的效果更好,能源消耗也最少。同时,出现了相应的振动设备。这种新型的振动时效工艺和设备的出现,立即受到各国的高度重视,迅速应用于生产实践中。

由于这种工艺日趋成熟,振动和控制设备日臻完善,振动时效已为十多个工业发达国家广泛采用。美国某应力消除公司拥有 350 台振动时效设备,进行过 5000 多项振动时效处理。英国和西德对飞机装配架的焊接梁和框架普遍采用了振动时效。苏联金属切削机床实验科学研究院将振动时效工艺推荐给各机床厂,某些重型机床厂的大件和基础零件全部采用了振动时效。

在能源紧缺、生态环境越来越恶化的形势下,高效节能减少环境污染的 VSR 工艺,近二、三十年来在国外得到迅速发展。现在美、英、德、法、俄、加、比、罗、日等国均已不同程度的应用于航空、海洋、钻探、矿山、机床、纺织、造纸、石油运输等各种轻重工业的铸、锻、焊件以及有色金属工件中。美国、德国、法国、英国都有世界知名的 VSR 设备制造商。

三、振动时效在中国的应用历史:

振动时效(VSR)七十年代被引进我国。七四年北京机床研究所正式将 VSR 工艺列为研究课题,开始进行机床铸铁件应用 VSR 工艺及设备的研究工作,经过几年的研究,确定

了 VSR 的基本工艺方法,肯定了 VSR 效果。随着研究的进行和深入,在“六、五”期间 VSR 又被列为中国 38 项重点攻关任务分子项“提高机床铸件质量的研究”内容之中,由北京机床研究所负责进行 VSR 工艺实用性研究。按期完成研究任务,“六、五”总鉴定,VSR 工艺研究达到了世界先进水平。“七、五”北京机床研究所又承担国家重点课题“消化吸收重大项目一条龙数控机床焊接构件振动时效工艺研究”。“七、五”后我国 VSR 工艺成熟、完备。VSR 设备也达到世界先进水平,基本满足 VSR 工艺要求,“八、五”VSR 被国家科委、机电部、国务院生产办列为“八、五”六大重点推广技术之一。1999 年国家经贸委又将其列入全国重点推广项目;99 年 7 月中国机械工程学会又成立了消除应力技术委员会,我国就有了专门研究应力与变形的国家级学术组织;2000 年国家经贸委又将新一代 VSR 设备列为国家级重点技术创新项目;2001 年国家经贸委立项支持标准制修订工作,同年 8 月中国机械工业联合会发布文件,正式将振动消除应力技术纳入机床制造标准,接着将把振动消除应力技术制修订到铸、锻、焊基础件以及各制造业制造标准。2003 年全国科协大会选定振动时效做为大会宣读论文。这一切为振动消除应力技术的发展和应用起到了极大的推动作用。

VSR 在中国从无到有,现在已有几千台 VSR 设备在我国的机床、模具、锻压、铸造、木工、航空、航天、冶金、矿山、铁道、造船、纺织、核电站等行业运行。

但因为传统的振动时效还存在着诸多的问题,始终没有被大多数企业纳入正式的工艺流程,在国内外机械制造领域仍普遍采用热时效处理方式。

四、传统振动时效应用上存在的问题:

振动时效技术虽然在高效、节能、环保等方面有着非常明显的优势,但传统的振动时效技术也就是亚共振技术也确实存在着几十年未能解决的技术难题,无法纳入正式的工艺生产流程,也始终没有受到广泛企业的认可,得到大规模的应用。

1、亚共振时效方式:由低转速扫描到电机额定转速,寻找共振峰,在亚共振区确定主、附振频率及扫频范围。在亚共振频率进行几十分钟的振动处理。

2、亚共振技术存在的问题:

(1)对支撑点、激振点、拾振点及方向有严格要求,需要不断的扫频、调整位置。所以设备操作必须是受过专业培训的人员操作,一般的工人即使受过培训也很难掌握这项技术;工件在单件生产时调整相当繁琐,拾振器、支撑点很难调到最佳状态,一种工件就需要制订一种工艺;人为地确定需处理共振峰,这对操作者的经验要求也比较高;

(2)因为是通过扫频的方式寻找共振峰,而电机的转速是有限的,当工件共振频率超出激振器的频率范围时,通过扫描就无法找到工件共振频率,因而无法对工件进行有效的振动处理。国家数据统计亚共振技术可处理的工件在机械制造业覆盖面仅为 23%。

(3)有效振型较少,振动时效的应力消除不稳定,应力的消除不能得到最佳的结果;

(4)噪声过大也是难以推广的主要原因。

五、频谱谐波技术在振动时效领域的应用:

在振动时效技术的继续提高上。各国的研究者,把如何提高激振器的转速,以期解决高刚性材料的找频问题,把如何合理的制定各种工件的振动工艺方案作为了主要研究和突破方向。但似乎进入了一个技术瓶颈,电机转速的提高面临着诸多的技术难题,新材料、新设备的不断出现,也使工艺方案的制定变得纷繁复杂。同时,也没有解决振动时,需要电机在高转速运行所产生的噪音大;工作电流高,电机发热的问题。振动时效在 20 世纪的后二三十年进入了一个发展缓慢的阶段,但随着电子设备的快速发展,在控制器方面逐渐从简单的人工控制,到单片机,再到电脑控制,使设备控制,使用监控越来越方便快捷,但关键性的问

题覆盖面低、噪音大、振型少、应力消除效果不好、工艺方案人工干预较多、制定复杂的问题没有得到实质性的解决。振动时效在企业的应用也进入了一个低潮期。原先购置的设备，或者闲置，或者只能在实验室里做为实验研究课题用机。高污染、高能耗的热时效炉继续被沿用下来。振动时效留给企业的似乎只有阴影。

在 21 世纪初一种新的振动时效技术在中国出现了，她摒弃了原有振动时效技术攻关方向，独辟蹊径，从另外一个全新的角度，去诠释振动时效的价值。突破了原有的技术瓶颈，迎来了振动时效应用的一个全新时代。

因为其独有找频方式与处理频率，被称为频谱谐波技术。频谱谐波技术不再沿用原有的扫频方式，而是通过傅立叶方法对工件进行频谱分析找出工件的几十种谐波频率，在这几十种谐波频率中优选出对消除工件残余应力效果最佳的五种不同振型的谐波频率进行时效处理，达到多维消除应力提高尺寸精度稳定性的目的。

频谱谐波方式不论工件大小、频率刚性高低、材料特性均能找出五种不同振型的谐波峰。不受激振器的转速范围限制，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已达到 100%。处理的转速全部在 6000RPM 以下，也解决了亚共振设备噪音大的问题。

两种技术功能对比表

类别	频谱谐波技术	亚共振技术
方式	频谱	亚共振
频率寻找方式	频谱分析	扫描
频率寻找时间	50 秒	5-12 分（1000 ~ 10000rpm）
是否振前扫描	否	是
是否振后扫描	否	是
有效振型	五种振型	少或没有
工艺制定方式	自动	人工
激振点、支撑点、传感器位置	无特殊要求	有严格要求
噪音	极小	大
高刚性、高固有频率工件	均可处理	不能
满足工件技术要求	极高	较低
覆盖面	100%	23%
适合	结构复杂工件、高刚性高固有频率亚共振不能处理的工件，精度和安全性要求高的工件	结构简单、刚性低、固有频率低、精度要求低的工件

这种新技术的专利发明人是北京翔博科技有限责任公司，他们生产的采用频谱谐波技术的“领航者消除应力专家系统”已经率先在中国航空、航天、兵器等高精尖行业得到了充分应用，解决了这些行业多年困扰的问题，被纳入了正式的工艺定型方案。但因为这类产品价格偏高，再加上原有振动时效在很多企业产生的阴影，在广大的民用机械制造企业还没有得到广泛的接纳。但新技术的出现解决了几十年的技术难题，使振动时效取代热时效逐渐成为现实。

领航者消除应力专家系统部分应用客户的效果表

厂家	工件	“领航者”使用前后
北京卫星制造厂	1、铝合金横梁 长×宽×高=200×12×14cm 2、铝板 长×宽×高=30×15×0.8cm 3、铝合金垂盆(脸盆形状) 高=1.5m D=1.5m 壁厚=24mm	1、前:精加工后两端翘,误差8mm左右,工艺要求2mm;后:完全解决。 2、前:热时效精加工后变形1.5mm,工艺要求1mm;后:变形仅0.7mm。 3、前:垂直误差大,达0.8mm,工艺要求0.05mm;后:完全符合要求。
内蒙古一机集团	座圈和车体	前:座圈产生较大变形,影响加工精度;后:车体后桥精加工变形量减少60%,合格率94%,座圈圆度达100%,完全代替原来回火工序。
航天国营风华机器厂	镁合金铸件	前:原热时效精加工后变形3mm;后:精加工后变形为0.23mm。
北京航空材料工艺研究院	高强度铝合金端盖、挡板	前:原热时效机加工后的合格率40-50%,后:批量处理超过5万件,机加工后合格率达95%以上。
北人股份	印刷机主要工件	前:原热时效费用185.9万元/年。 后:振动时效费用82.5万元/年
天津三达铸造有限公司	机床床身	前:原热时效费用200多万元/年 后:采用振动时效后费用大大降低,粗略计算耗电的费用全年只有几千元。

六、振动时效应用的未来:

1、取代热时效是发展趋势:人类进入工业社会以来,先后出现了三次意义深远的伟大变革,这三次工业革命分别以十八世纪蒸汽机的发明、十九世纪初发电机的发明和二十世纪中叶电子计算机的发明为重要标志。这三次变革推动了社会生产力的迅速发展,影响和改变了人们的生活方式。但也严重破坏了人类生存的环境,使我们生存的地球变得千疮百孔,越来越严重的问题,使人们在改变生活的同时,不得不面对越来越严峻的环境问题。资源是不可再生的,破坏的环境是很难逆转的。节约能源,减少排放已经成为各国政府的重点工作。

在中国同样被做为了各级政府部门的工作重点,“十一五”计划对节能减排提出了明确的目标。党中央、国务院对发展循环经济、资源节约和环境保护工作提出了明确的方针政策。胡锦涛总书记在党的十七大报告中明确指出开发和推广节约、替代、循环利用和治理污染的先进适用技术,发展清洁能源和可再生能源,保护土地和水资源,建设科学合理的能源资源利用体系,提高能源资源利用效率。发展环保产业。加大节能环保投入,重点加强水、大气、土壤等污染防治,改善城乡人居环境。温家宝总理在全国节能减排电视电话会议上也做出要组织实施节能减排科技专项行动,组建一批国家工程实验室和国家重点实验室,攻克一批节能减排关键和共性技术。积极推动以企业为主体、产学研相结合的节能减排技术创新与成果转化体系建设,增强企业自主创新能力。在电力、钢铁和有色冶炼等重点行业,推广一批潜力大、应用面广的重大节能减排技术。制定政策措施,鼓励和支持企业进行节能减排的技术改造,采用节能环保新设备、新工艺、新技术的重要指示。

在机械制造行业,一些明显高能耗、高污染的工艺手段,会受到很大的限制。振动时效与热时效相比有着其不可比拟的节能减排优势,而且在其他方面也有部分优于热时效。

热时效振动时效对比

时效方式 类别	热时效炉(15吨)	振动时效(频谱谐波设备一套)
制造购买费用	需要建造时效炉,时间周期长	设备轻便。不需要长时间建设
时效周期	12小时	1小时
能源消耗	高(以烧煤、烧气、电为主) 开炉一次(约12小时),费用为3000-5000元人民币,	低(一小时一度电左右,粗略计算其能源消耗仅为热时效的0.2%,成本仅为热时效的8-10%。)
占地面积	占地面积大,需要固定的场地,无法挪动。	占地面积小,无需固定的场地,使用方便,可任意挪动,并且对电源要求不高(普通交流220V电源即可)。

时效工件体积	对体积较大或较长工件无法进炉时效处理（一般能容纳超过五米长工件的时效炉就很少，太长就根本没法进炉时效）	对工件体积大小无特殊要求，均能通过更换激振器型号进行时效处理。
处理效果	1、炉门、炉里、炉中的温度有差，不同位置的工件处理效果不稳定	1、工件整体振动，多振型解决工件不同残余应力集中部位的消除问题。
改变工件材料组织特性	1、对结构复杂工件，会产生改变材料组织特性的问题 2、铝合金等新型材料，因为改变组织特性的温度较低，不能采用热时效	不会改变材料组织特性，对铝合金、钛合金都能进行应力消除处理。
环境污染	非常严重	无（是以施加机械能的方式消除残余应力，所以无环境污染）
其他效益	提高生产效率，节能减排方面的经济效益、社会效益无法估量。	

新的频谱谐波技术在振动时效领域的应用，使振动时效取代热时效已经成为可能，而且是必然发展方向。相信在 2009 年或许 2008 年就会迎来一个振动时效普及年。

2、为企业提供持续增长的能力是发展的未来：

生产企业需要根据市场需求的不断变化，调整自己生产的产品，才能更有效的参与市场的竞争。目前新技术、新材料的应用日新月异，为企业带来了更多的发展机遇。可企业也不得不面临新的问题：新技术、新材料的应用，现有的生产设备，工艺处理设备能不能满足新生产的要求？按照原有的设备提供商的服务方式，答案是否定的。设备提供商只能提供对已购买设备有限年限的保修服务，只能部分解决企业目前的问题，而对企业新的需求，需要通过不断购买新的设备、新的工艺方案设计来解决的。可以说，每一次生产的调整，企业都面临着技术攻关，设备改造等必不可少的过程。随之而来的就是高昂的费用，改造的痛苦，原有设备的闲置，资金的浪费，以及可能存在的失败风险。

所以说，企业更需要获得的是一个不断增长的解决问题的能力，这比获得一套最先进的设备更有意义。设备提供商也需要考虑如何为企业服务，往帮助企业提高能力的方面去转变。

早在 1968 年美国经济学家富克斯就在他后来成为经典名著的《服务经济》一书中指出：“我们现在处在‘服务经济’之中……，其中一半以上的就业人口不再从事食品、服装、住房、汽车和其它有形产品的生产”。

富克斯的这一“革命宣言”于 20 世纪 70 年代得到发展并出现了“后工业社会”的理论。1973 年美国社会学家丹尼尔·贝尔发表了《后工业化社会的来临》一书，详细分析了后工业社会的重要特征后指出：“如果工业以商品来定义社会质量的话，后工业社会就是以服务来定义社会质量”。这里指的服务既包括传统的服务业范围内的服务活动，也包括制造业的售前、售中和售后的服务活动。

据统计，一般来说发达国家的服务业占其总体经济活动至少 65 个百分点——是我国现行比重的两倍。可见在今后一个时期内，出现在中国的服务业的缺口，将是一个巨大的机遇。与此同时，发展了几百年的以产品为中心的制造业也正在向服务方向扩展延伸。所提供的服务从纯物质形态的制造业产品，正在向包括纯物质形态的制造业产品在内、但也包括越来越多的非物质形态的服务高级化方向发展。这是历史的巨大进步，也是制造业的巨大发展和进步。从世界制造业发展规律看，服务比重的提高是制造业走向高级化的主要标志，而高技术的应用为制造业服务内容的扩展和水平的提高开拓了广阔的天地。从全球范围看，发达国家的现代工业已经发展到了制造/服务的阶段，而且服务是制造业今后重要的发展方向，世界一流厂商约有 40%—50% 的产值由服务构成。

综上所述，为企业提供服务，不仅仅是企业的需要，也是设备提供商再发展的需要，很多国际化大企业已经再进行或者完成了这方面的转变。回到我们的主题，时效处理工艺作为机械制造中的一个重要环节，在今后的发展中，振动时效取代热时效是必然之路，而优秀的设备提供商，在新技术的背景依托下，为企业提供优质的服务，为企业持续解决残余应力问题的能力才是根本发展之道，才是彻底改变目前这种落后的处理手段的最终发展目标。