

# 大型工件振动时效应用及残余应力测试

陈得民

(北京必创科技股份有限公司 北京 100085)

**摘要:**金属构件在加工过程中都会产生残余应力,残余应力过大将对构件产生严重的危害,如使构件的强度降低,降低工件疲劳极限,造成应力腐蚀和脆性断裂,残余应力的松弛,使构件产生变形,影响了构件的尺寸精度。降低和消除构件的残余应力,十分重要。残余应力消除有很多种技术,其中振动时效操作简单,效果良好。同时,残余应力测试有多种技术,其中盲孔法测试破坏性小、适用性强,数据检测精度较高,试验过程及操作较为简单。本文对残余应力的形成原因、消除技术及测试技术做了详细论述,并给出一种振动时效及残余应力测试实例。本文的论述对相关工程技术人员具有重要的参考价值。

**关键词:**振动时效 残余应力 盲孔法 应变传感器 加速度传感器 电阻应变花

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2014.05.006

## 1 残余应力<sup>[1-4]</sup>

残余应力是指在没有对物体施加外力时,物体内部存在的为保持自相平衡的应力。它是固有应力或内应力的一种。各种机械加工过程中(如铸造、切削、焊接、热处理、装配等)都会产生不同程度残余应力。

### 1.1 残余应力产生的原因

残余应力主要由以下几种原因产生。

#### (1) 机械加工引起的残余应力

金属构件在加工中最易产生残余应力。当施加外力时,物体的一部分出现塑性变形,卸载后,塑性变形部分,限制了与其相邻部分变形的恢复,因而出现了残余应力。这种由局部塑性变形引起的残余应力,在很多加工工艺中均会出现,如锻压、切削、冷拔、冷弯等等。而且这种残余应力往往是很大的。

#### (2) 温度不均匀引起的残余应力

这种残余应力的产生主要有以下两种原因:第一是由于温度不均匀造成局部热塑性变形,金属材料在高温下其性能将发生很大的变化,如屈服极限、弹性模量等都随温度的升高而下降,如果构件上温度场的温度阶梯较大,则屈服极限和弹性模量的分布也是不均匀的,因此在高温下出现的热塑性也是不均匀的。第二是由于相变引起的体积膨胀不均匀造成局部塑性变形,金属的组织发生相变时,会出现体积的突然膨胀,如果这

种膨胀是均匀的,则如同构件均匀热膨胀一样,没有约束的情况下不产生应力,但是由于构件的组织成分不均匀,温度分布不均匀等等原因,造成构件各部分相变时间不同,体积膨胀不均匀,因此使各部分间出现互相约束而产生了残余应力。

#### (3) 构件尺寸公差引起的残余应力

在焊接、铆接、螺钉连接时往往有公差配合问题。如船体分段对接时必须将对接钢板拉到一起,这些由外力拉到一起而组合的结构,当外力去除后,整个系统就出现了残余应力。这种应力一般来说属于结构应力,大多数情况下处于弹性状态。

总之,残余应力的产生是由于构件某一部分的变形恢复受到约束而造成。局部不均匀的塑性变形的出现,是产生残余应力的普遍原因。构件上残余应力的分布状态是由各种原因产生的残余应力的综合值来决定的,因此它的分布规律是随机的,给测量和研究带来较大的困难。

### 1.2 残余应力的影响

金属构件(铸件、焊接件、锻件),在加工过程中,产生残余应力,高者在屈服极限附近。构件中的残余应力大多数表现出很大的危害作用;如使构件的强度降低、降低工件疲劳极限、造成应力腐蚀和脆性断裂,由于残余应力的松弛,使构件产生变形,影响了构件的尺寸精度。因此降低和消除构件的残余应力,就显得十分必要。

## 2 振动时效<sup>[5-7]</sup>

振动时效技术又称“振动消除应力法”，国外简称“VSR”技术。它的实施过程是通过振动时效装置的控制系統控制激振器的转数和偏心作用在工件上产生离心力，使工件发生共振（谐振），让工件需时效部位产生一定幅度、一定周期的交变运动，并吸收能量，经过一定时间的振动引起工件微小塑性变形及晶粒内部位错逐渐滑移，并重新缠绕钉扎使得残余应力被消除和均化，防止工件变形和开裂，从而达到提高工件尺寸精度稳定性，增强工件的抗变形能力和提高疲劳寿命。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，使零件发生永久塑性变形。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（30~80）%，同时也使峰值应力降低，使应力分布均匀化。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动应力，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基体的石墨。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。当应力叠加的结果到一定的数值时，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。这种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。实践证明振动时效替代热时效后可节约能源90%以上，提高抗变形能力30%以上，尺寸稳定性提高30%以上，疲劳寿命提高20%以上。处理

时效通常只需15~45分钟，不分场地，不受工件尺寸、形状、重量等限制，可处理几公斤至几百吨的工件。便携工件不需运输可就地处理，可插在任何工序之间进行处理。采用振动时效可提高工效几十倍，它具有减少环境污染、缩短生产周期、改善劳动条件、工艺简便等优点，是一项投资少、见效快、综合效益显著的工艺。振动时效适应于碳素结构钢、低合金钢、不锈钢、铸铁、有色金属（铜、铝、锌及其合金）等铸件、锻件和焊接件及其机加工件。

本实验中，采用某公司振动时效装置，作用于测试工件上，其基本结构图如图1所示，起振波形如图2所示，通过FFT分析可知（见图3），共振频率约107.91Hz，幅值约2.446g。

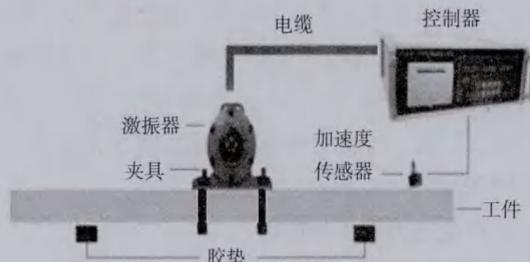


图1 振动时效

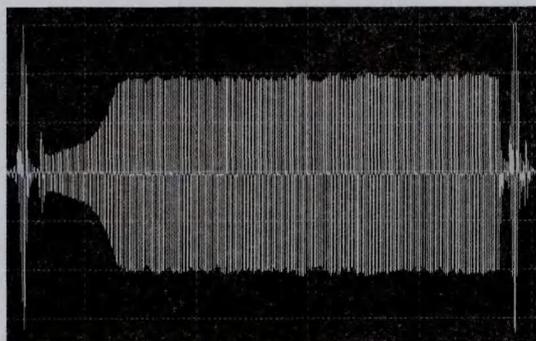


图2 振动时效时域波形

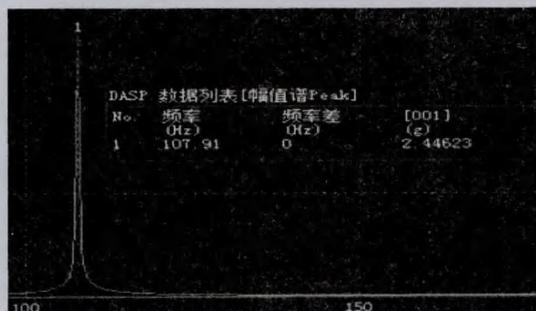


图3 振动时效FFT分析

### 3 残余应力测试<sup>[8-11]</sup>

在本文中的残余应力测试中,使用北京必创SG404无线电阻应变仪,钻孔仪为某公司H6859小型台钻。应变片是由陕西汉中第五二一厂生产的型号为BE120-2CA-A的三轴电阻应变花(见图4),其电阻值为 $(120.1 \pm 0.25)\%$ ,灵敏系数为 $(2.20 \pm 1)\%$ 。试验中采用了直径为1.5mm的钻头。打孔过程如图5所示。

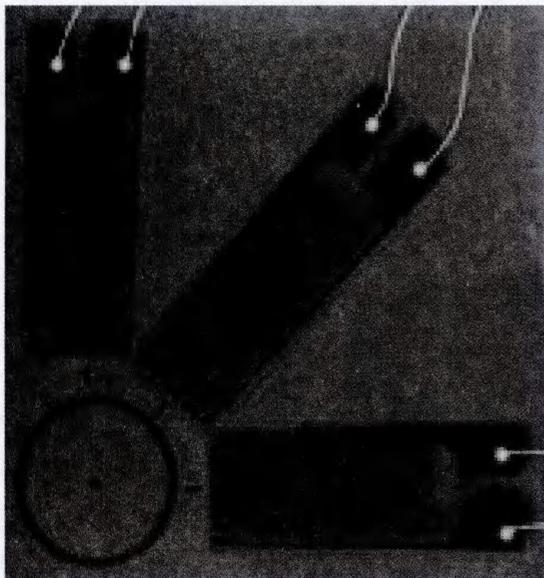


图4 电阻应变花

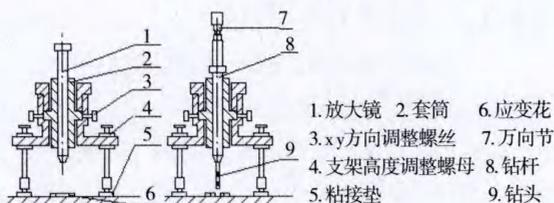


图5 打孔钻

测量过程如下:

(1) 在测试工件上确定6个应力测试点。

(2) 每个测试点分开贴两个应变片,分两组检测,振前测试第一组测试点中的一个应变片,振后测试第二组(如图6)。

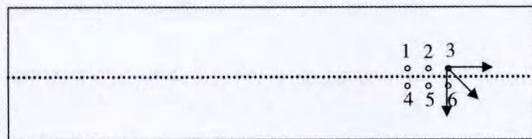


图6 应变片布置

(3) 粘贴接线端子(每点三个方向),将测试先焊于接线端子上 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ (每个角度有两根测试线)。

(4) 接数据线:

$0^\circ$  接在第一通道上的S1+、AGND;

$45^\circ$  接在第二通道上的S2+、AGND;

$90^\circ$  接在第三通道上的S3+、AGND;

补偿线接在第四通道的S4+、AGND。

(5) 设置采集软件相关参数,开始采集数据,并将应变传感器清零。

(6) 用直径为1.5mm的钻头在应变片中心处打出1.5mm的盲孔。打孔时应尽量对准应变片中心。

(7) 依次记录每个孔的振前应变值。

(8) 起振,对被测工件进行振动时效处理。

(9) 处理完毕,再对各点的第二组应变片进行打孔检测数值。

(10) 记录振后应变值。

(11) 全部实验数据与测量结果均应列表表示,按公式计算残余应力的大小和方向;并对测量结果进行误差分析。

最终分析结果如表1。

表1 残余应力测试结果

参数 测点	$\sigma_{\max}$ (MPa)		
	处理前 Before	处理后 After	处理后应力 相对降低%
测点Point1	15.5	4.0	74.2
测点Point2	9.9	3.7	62.6
测点Point3	18.5	2.5	86.5
测点Point4	17.5	3.2	81.7
测点Point5	11.8	4.2	64.4
测点Point6	16.5	2.7	83.6

( $\sigma_{\max}$  (MPa) 最大主应力)

检测结论:振动时效前后测点最大主应力值的降低幅度值(相对处理前)为62.6%~86.5%,平均值为75.5%。通过对工件振动时效处理,振后每个测点应力消除均在30%以上,所测测点振前和振后应力降低率为45%以上;按照标准JB/T10375-2002要求,振前和振后的应力降低率

大于30%，说明消除焊接残余应力的效果良好。

#### 4 结束语

金属工件（铸件、锻件、焊接件）在冷热加工过程中都会产生残余应力，残余应力值高者（单位为Pa）在屈服极限附近构件中的残余应力大多数表现出很大的有害作用；如降低构件的实际强度、降低疲劳极限，造成应力腐蚀和脆性断裂，由于残余应力的松弛，使零件产生变形，大大的影响了构件的尺寸精度。因此降低和消除工件的残余应力就十分必要了，特别是在航空航天、船舶、铁路及工矿生产等应用的，由残余应力引起的疲劳失效更不容忽视。

目前的针对残余应力的不同处理方法有：自然时效方法和人工时效方法（包括热处理时效、敲击时效、振动时效、超声冲击时效）。相比，振动时效操作简单，成本低廉，且效果良好。通过本文实际测试，再次证明振动时效效果良好。

目前国际上关于残余应力的测量方法多种多样，就机械方法中有盲孔法、切割法、套环法，其次还有针对一定对象的环芯法。切割法和套环

法测量残余应力具有较大的破坏性，本文使用的盲孔法，试验破坏性小、适用性强，数据检测精度性较高，试验过程及操作较为简单。

#### 参考文献

- [1] 陆向明. 金属结构残余内应力[J]. 航天工艺, 1998(01).
- [2] 蒋刚, 谭明华, 王伟明等. 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压, 2007(06).
- [3] 陈会丽, 钟毅, 王华昆. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金, 2005(03).
- [4] 王庆光. 残余应力检测技术及其应用[J]. 重型机械科技, 2002(04).
- [5] 蒋刚, 何闻, 郑建毅. 高频振动时效的机理与实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009(07).
- [6] 王超. 振动时效机理、多点振动时效方法的研究及实现[D]. 兰州交通大学, 2013(06).
- [7] 饶德林, 朱政强, 葛景国. 振动时效消除拼焊不锈钢板的残余应力[J]. 振动与冲击, 2005(02).
- [8] 王娜. 中厚板焊接残余应力测试的盲孔法研究[D]. 大连理工大学, 2007(05).
- [9] 周勇, 王洪铎, 石凯. 浅谈盲孔法测焊接残余应力电阻应变片粘贴技术[J]. 高校实验室工作研究, 2008(04).
- [10] JB/T5926-2005. 振动时效效果评定方法[S].
- [11] JB/T10375-2002. 焊接构件振动时效工艺参数选择及技术要求[S].

（上接第21页）

#### 4.2 当前注意事项

在标准未出来之前，日前在预应力锚固系统设计与施工中建议注意以下事项：

（1）建议由经验较丰富的专业人员进行设计，安全系数不应小于2.5。

（2）根据工程情况，选用最合适的预应力锚固系统。

（3）当防腐要求较高时，建议钢绞线优先采用环氧喷涂钢绞线或无粘结钢绞线。

（4）锚固系统不应拆分采购，最大程度避免出现配套问题。

（5）施工时采用专业施工人员，按有关施工细则执行，保证施工质量。

#### 5 展望锚碇预应力锚固系统的发展

（1）预应力锚固系统将得到进一步应用；

（2）预应力锚固系统将有统一的设计标准

或规范，确保系统更安全可靠；

（3）预应力锚固系统的防腐性能更可靠，将沿着可监测、可更换的方向发展；

（4）施工方法趋于规范、简单、方便；

（5）新型锚固系统的出现，将具有更优的性价比。

#### 参考文献

- [1] 陈晓军. 大跨径悬索桥锚碇锚固系统的比较[J]. 交通世界, 2012年第15期
- [2] 李海, 鲜亮, 姚志安. 国内大跨径悬索桥锚碇锚固系统比较研究[J]. 公路工程, 2011.2
- [3] 中国公路学会桥梁和结构工程分会. 面向创新的中国现代桥梁[M]. 人民交通出版社, 2009. 4
- [4] 朱玉, 廖朝华等. 大跨径悬索桥隧道锚设计及结构性性能评价[J]. 桥梁建设, 2005(2)
- [5] 赵干明, 张东福等. 弯束可换式锚碇锚固系统在湖南矮寨桥的应用[J]. 预应力技术, 2010(5)
- [6] 徐国平, 刘明虎等. 悬索桥锚碇可更换无粘结预应力锚固系统试验研究[J]. 桥梁建设, 2006(06)