

振动时效中残余应力与固有频率的相互作用*

胡永会, 吴运新

中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083

摘要:利用振动时效技术,从残余应力对固有频率的影响及激振频率对振动时效效果的影响两方面,研究高强铝合金板在振动时效过程中残余应力与固有频率之间的相互作用.结果表明,残余应力场的分布状态直接影响到板的固有频率,振动时效中残余应力的消减或均匀化重分布也随着各阶固有频率的变化而变化,且高阶相对于低阶固有频率受影响的程度更大;激振频率或振型直接影响材料微塑性变形,从而决定了振动时效的效果.

关键词:振动时效技术;残余应力;固有频率;激振频率;铝合金板

中图分类号: TG146.2; O326

文献标识码: A

通常构件的固有频率由其形状、尺寸及材料确定,但理论与实验研究表明^[1-3],构件内残余应力的存在对构件的固有频率、阻尼等参数将产生影响.1991年原机械部颁发的振动时效工艺参数选择及技术要求中明确规定,当振幅频率曲线出现振后的峰值点比振前左移时,即可判定为达到了振动时效的效果^[4].由此可见,振动时效过程中构件固有频率将发生变化.

工程应用中通常选择构件的一阶或二阶固有频率进行振动时效.关于激振频率更精确的选择,众多研究者看法略有不同^[5-8],但整体上大家一致认为振动时效不仅使残余应力趋于均匀化,还使残余应力场经重新分布后趋于均匀化.所以,激振频率应为与残余应力分布模态相同或相近的系统固有振动模态对应的固有频率.

研究振动时效中残余应力与固有频率的相互作用,将有利于残余应力的评估和判断,以及振动时效工艺的制定等.本文采用试验模态分析等方法对构件进行对比实验,根据固有频率的变化确定构件是否有必要进行振动时效,如何合理选择激振频率及判断振动时效效果等.同时,也为建立残余应力变化与固有频率变化二者之间的定量关系提供一个可行思路.

1 试验条件

1.1 试样制备

试验用材为2A12和7075高强铝合金轧制板,两种铝合金的弹性模量 E 、泊松比 μ 和密度 ρ 相近,分别为69.3 GPa, 0.3和2800 kg/m³.

热处理工序:从室温开始每小时升高100℃,保温10 min,当固溶温度达到480℃后保温2 h,然后采用水浴方式淬火.

1.2 试验仪器

用加拿大Proto公司生产的iXRD型便携式X射线衍射仪测试残余应力,采用同倾固定 ψ 法,测试参数为:辐射线CoK α ,管电压与电流分别为20 kV和4 mA,衍射晶面为(331),高斯拟合(Gaussian)定峰,准直管尺寸2 mm×5 mm,弹性常数 $1/2S_2$ 为 18.5606×10^{-6} ,在每一测量位置 ϕ 角有3°的摆动.

振动时效试验设备为南宁市神华振动时效技术研究所生产的神华SHX2108型全自动彩屏振动时效仪,其由彩屏控制器、激振器、测振器、胶垫、夹具和电缆线构成,具有全自动、手动及定时定速的

收稿日期:2011-01-04

* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目973项目(2005CB623708;2010CB731703)

作者简介:胡永会(1985-),男,江苏徐州人,硕士研究生.

半自动三种运行方式. 模态实验分析系统采用的是比利时LMS国际公司生产的LMS Test Lab24ch型24通道模态分析仪,配有加速度传感器(333B30)和模态力锤(086C01). 坐标测量仪器选用美国Brwon & Sharpe公司生产的GLOBAL STATUS575型三坐标测量机,该机长度测量的最大允许误差MPEE=2.5+4L/1000 μm,最大允许探测误差MPEP=2.5 μm.

2 残余应力对固有频率的影响

2.1 弹性支撑四边自由矩形薄板的固有频率

试验用材为2A12高强铝合金轧制板,其主要成分为 $w(\text{Cu})=4\%$, $w(\text{Mg})=1.6\%$, $w(\text{Mn})=0.5\%$, $w(\text{Zn})=0.3\%$,单个杂质含量小于0.05%,杂质含量合

计小于0.10%,余量为Al. 试验所用矩形铝板尺寸为1000 mm×500 mm×20 mm,由2000 mm×1000 mm×20 mm轧制矩形板平均分成四等份锯切得来,四块板分别标记为P1,P2,P3和P4. 其中P1和P2板锯切后不经任何处理,为原始轧制状态,板表面与内部残余应力水平较低;而P3和P4板经水浴淬火.

振动时效系统平台如图1所示. 由于激振器重达20 kg,与试样铝板相比质量较大,且铝板尺寸较小,固有频率比较高,所以在安置支承座时,需要考虑的不是受激振工件的振型,而是考虑整体振动时效系统在振动时的平衡. 由于激振器及其夹具体积紧凑,材料刚性和密度很大,且安装位置远离系统共振点. 因此认为,在振动过程中除铝板外各配件不发生频率改变.

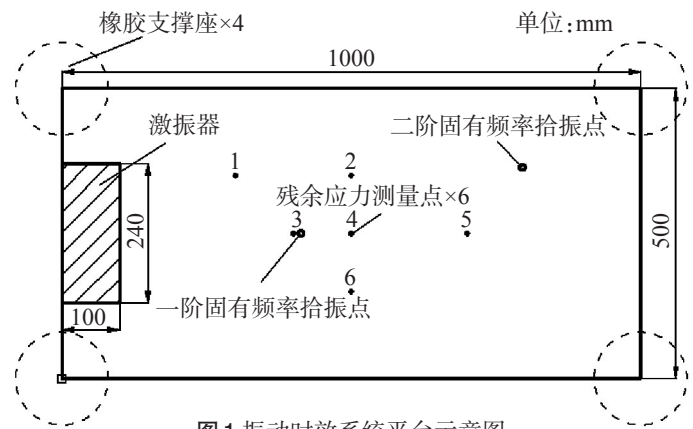


图1 振动时效系统平台示意图
Fig.1 Schematic diagram of the VSR system platform

将激振器的偏心角调整至30°,振动时效控制系统分别设置在一阶、二阶固有频率附近进行振动时效,时效时间均设为25 min,振动时效仪的自动跟踪扫频功能可保证系统一直在固有频率附近激振. 不

同应力状态下铝板固有频率激振前后结果列于表1,激振前后铝板残余应力结果列于表2.

由表1和表2可知,当矩形板的长度、宽度、厚度及密度不变时,可认为只有残余应力场的分布状

表1 铝板固有频率激振前后对比结果

Table 1 Comparison results of aluminum plate natural frequency before and after VSR

频率/ Hz	阶次	未经淬火		淬火		平均变化
		P1	P2	P3	P4	
振前频率 $f_{\text{振前}}$	一阶	75.51	76.85	78.37	80.43	3.22
	二阶	123.3	122.8	127.2	130.7	5.9
振后频率 $f_{\text{振后}}$	一阶	76.17	76.69	77.52	79.61	2.14
	二阶	123.2	122.0	124.4	127.8	3.8
频率变化	一阶	-0.66	0.16	0.85	0.82	2.17
$\Delta f=f_{\text{振前}}-f_{\text{振后}}$	二阶	0.1	0.8	2.8	2.9	2.4

表2 铝板残余应力激振前后对比结果

Table 2 Comparison results of aluminum plate residual stress before and after VSR

序号	激振前残余应力/ MPa		一阶激振后				二阶激振后			
			残余应力/MPa		残余应力变化量 /MPa		残余应力/MPa		残余应力变化量 /MPa	
	P1板	P3板	P1板	P3板	P1板	P3板	P1板	P3板	P1板	P3板
1	-33.1	-123.6	-34.2	-129.2	1.1	5.6	-31.7	-121.1	-2.5	-8.1
2	-49.3	-136.2	-47.5	-127.7	-1.8	-8.5	-49.1	-129.3	1.6	1.6
3	-53.2	-173.1	-53.6	-158.4	0.4	-14.7	-52.1	-155.2	-1.1	-3.2
4	-27.8	-150.6	-30.1	-144.3	2.3	-6.3	-29.8	-136.6	-0.3	-7.7
5	-58.4	-117.8	-58.8	-131.7	0.4	13.9	-56.2	-127.8	-2.6	-3.9
6	-38.7	-128.3	-38.5	-126.4	-0.2	-1.9	-37.6	-120.9	-1.1	-5.5

态对板的固有频率有影响,且表现出以下特性:有淬火残余应力场的铝板,其一阶、二阶固有频率均增大,且二阶固有频率的变化量大于一阶;激振后,淬火铝板一阶、二阶固有频率均下降,且二阶固有频率的变化量大于一阶;振动时效后,铝板淬火残余应力场得到一定程度的消减与均化,相应的固有频率有所下降。

2.2 一端固定薄板的固有频率

试验用材为7075铝合金,其主要成分为 $w(\text{Cu})=1.6\%$, $w(\text{Mg})=2.5\%$, $w(\text{Cr})=0.23\%$, $w(\text{Zn})=5.6\%$,余量为Al。使用线切割机沿尺寸为 $220\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 铝合金板的厚度方向进行切割,然后对所得薄板进行表面铣削,淬火后得到铝合金薄板试样(图2),用X射线法测得该试样淬火后表面残余应力水平为 -120 MPa 。

运用大型商用有限元分析软件Abaqus,建立一端全约束矩形薄铝板的固有频率数值计算模型,忽略沿纸面上下振动以及扭转的模式,而仅研究沿

Z方向的弹性弯曲模式。加速度信号采集和力冲击信号施加位置如图3所示,薄板前四阶固有频率及振型如图4所示,试样固有频率、振型及有限元数值计算结果列于表3。

由表3可知,试验结果与2.1节中得出的结论类似。整体而言,淬火残余应力增加了试样的固有频率,且随着固有频率阶次增加,频率改变值呈迅速非线性增加。由于受构件尺寸与淬火应力水平的限制,残余应力对试样低阶固有频率的影响很小,而工程应用中,大多构件工作频率皆处于一阶或二阶固有频率范围内,残余应力对构件固有频率的影响很难引起操作者和研究者的注意。

在2.1节试验中直接测得的是整个振动系统的固有频率值,铝板的固有频率及其变化包含在整个系统的固有频率及其变化中,试验假设其他辅件的刚度比铝板大许多,从而认为系统固有频率的改变主要受铝板的固有频率值的变化影响。由于本节有限元数值解和试验得出的试样固有频率或频率的变化值均为绝对值,因此试验结果更具有代表性。

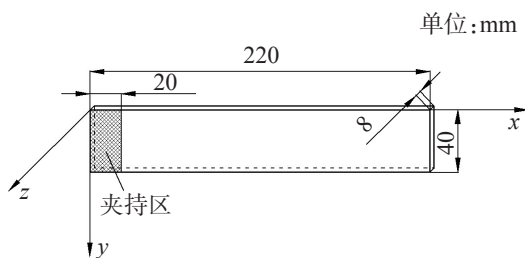


图2 一端固定矩形薄铝板示意图

Fig.2 Schematic diagram of aluminum alloy rectangular thin plate fixed at one end

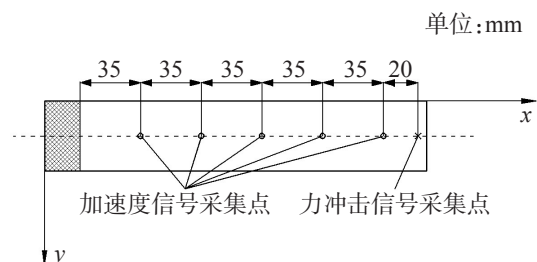


图3 模态分析实验测试点布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of measuring points in mode analysis experiment

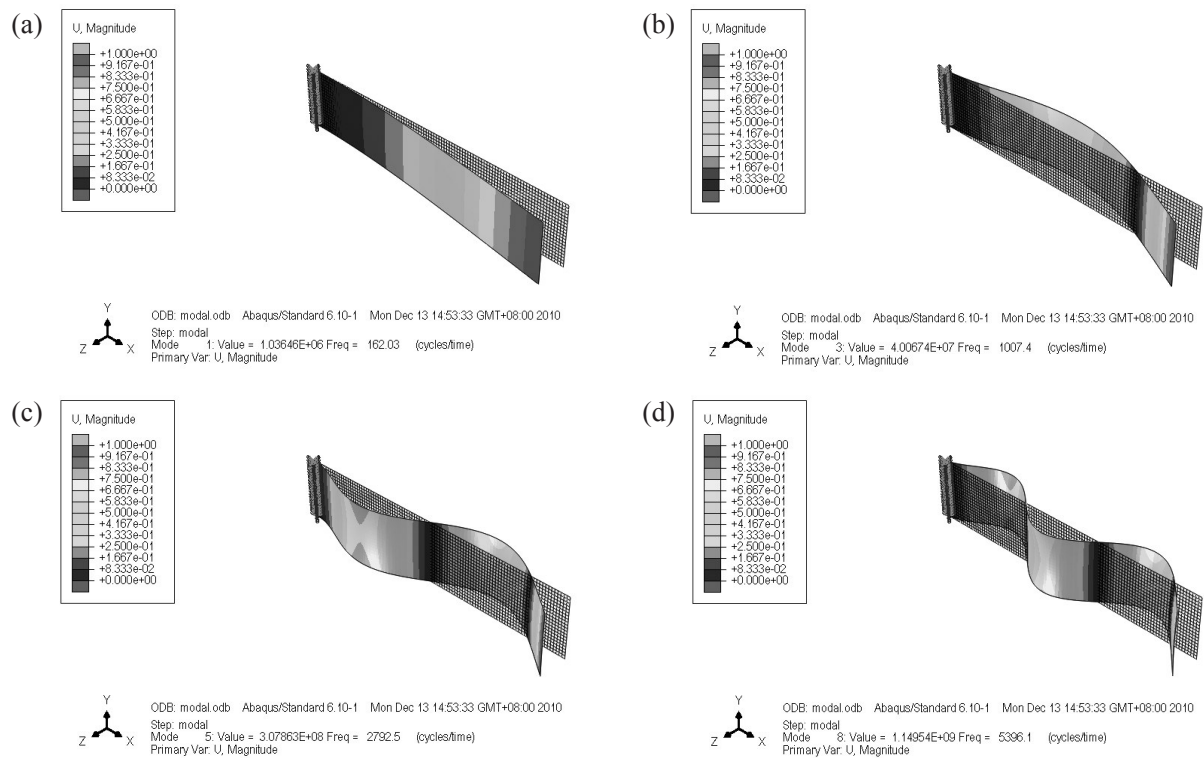


图4 一端固定矩形薄板Z方向前四阶固有频率及振型

(a)第一阶;(b)第二阶;(c)第三阶;(d)第四阶

Fig.4 Natural frequencies and mode shapes of the rectangular thin plate fixed on one end along Z direction

(a)order No.1;(b)order No.2;(c)order No.3;(d)order No.4.

表3 一端固定淬火薄铝板固有频率变化的结果

Table 3 Natural frequency variations of the quenched plates fixed at one end

项目	一阶频率/ Hz	二阶频率/ Hz	三阶频率/ Hz	四阶频率/ Hz
试样 1	159	998	2796	5430
试样 2	160	1017	2818	5461
试样 3	161	1016	2821	5473
试样 4	158	1009	2784	5392
平均值	159.5	1011	2804.8	5439
有限元数值解	162	1007	2793	5396
频率改变值	-2.5	4	11.8	43

3 激振频率对振动时效效果的影响

振动动力学已表明^[5]:低频振动下以弯曲振动为主,拉、压应力占主导,剪切应力很小,受频率与振型的影响,尤其对于结构复杂的构件,残余应力的消减与均匀化效果将难以保证;高频振动下振动模态主要是扭转振型,附加动应力以剪切应力为

主,剪切应力将成为微塑性变形的作用力,应力集中区的正应力与残余应力之和难以超越屈服极限而使材料屈服。

试样为2.1节中的淬火板,其中1板在淬火之后进行振动时效处理,而2板为淬火状态未经振动时效处理。轧向的表面残余应力测量点的分布如图5所示,图6为搭建振动时效系统平台的示意图,设置振动时效控制系统在一阶固有频率(约为82 Hz)下

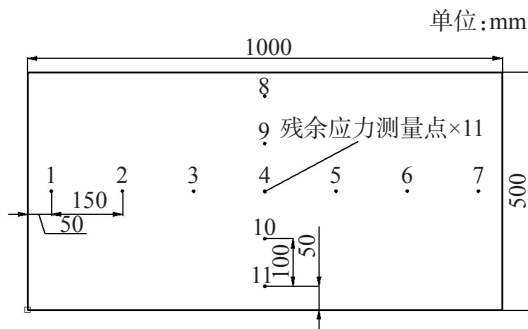


图5 铝板表面残余应力测量点分布

Fig.5 Distribution of the surface residual stress measuring points

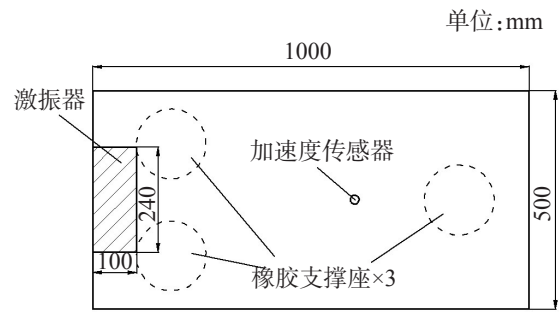


图6 振动时效系统平台示意图

Fig.6 Schematic diagram of the VSR system platform

进行振动时效,时效时间设为30 min,铝板表面残余应力测试的结果列于表4.

由表4可知:振动时效后淬火铝合金板表面残

余应力有所变化,但应力平均值并没有明显改变,只下降4.4%,然而各测量点残余应力的样本标准差却下降了近30%,这表明振动时效对残余应力重分

表4 铝板表面轧向残余应力测试结果

Table 4 Surface residual stress measurements along rolling direction of the aluminum alloy plate

项目	1板			2板残余应力/MPa
	振前残余应力/MPa	振后残余应力/MPa	变化率/%	
1	-112.3	-111.4	0.8	-164.7
2	-144	-140.8	2.2	-193.9
3	-197.1	-171.3	13.1	-192.1
4	-93.5	-123.2	-31.8	-59.8
5	-172.7	-153.4	11.2	-186.9
6	-51.2	-82.6	-61.3	-126.6
7	-137.2	-94.5	31.1	-172.3
8	-159	-158	0.6	-81.8
9	-112.8	-89.3	20.8	-101.4
10	-136.5	-126.7	7.2	-178.7
11	-123.1	-125.8	-2.2	-155.7
平均值	-130.9	-125.2	4.4	-146.7
标准差	39.56	27.77	-29.8	44.93

布后的均匀化有一定的效果;振动时效发挥效果的区域是有选择性的,应力改变(增加或下降)明显的位置皆处于系统的一阶共振峰附近,说明振动时效消减或均匀化残余应力的效果受振型的影响.

限于三坐标测量机的测量条件,仅能沿铝板纵向测量至700 mm处.图7为表面坐标测量点分布图,图8为1板和2板的表面三坐标测量数据经处理后的面变形量.

从图8可见:1板表面的变形量非常均匀,大多

控制在0.01 mm内;而2板表面的变形量起伏较大,尤其在边缘部分,变形量接近0.05 mm.这表明,良好的振动时效工艺可极大地提高铝板尺寸的稳定性.激振频率及其振型直接影响微塑性变形,以及构件中产生的动应力的大小及分布和微塑性变形的区域,从而决定了残余应力的消减和均匀化程度,即振动时效的效果.1板尺寸稳定效果最佳的区域处于振动时效的共振区,即振型决定了振动时效后残余应力重新分布及均匀化.

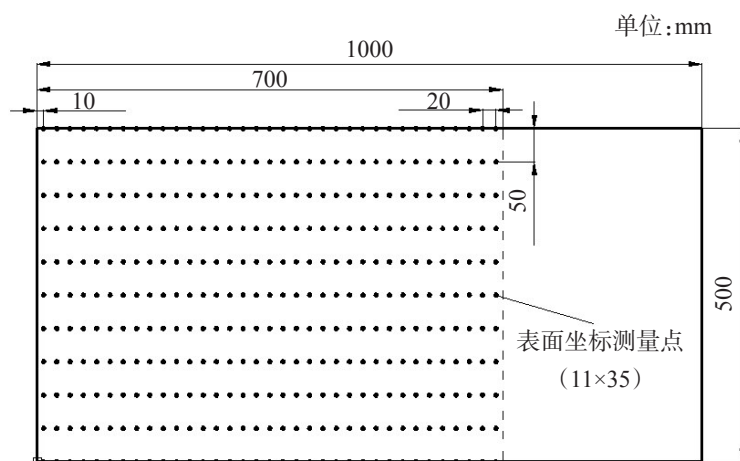


图7 铝板表面坐标测量点分布

Fig.7 Distribution of the surface coordinate measuring points

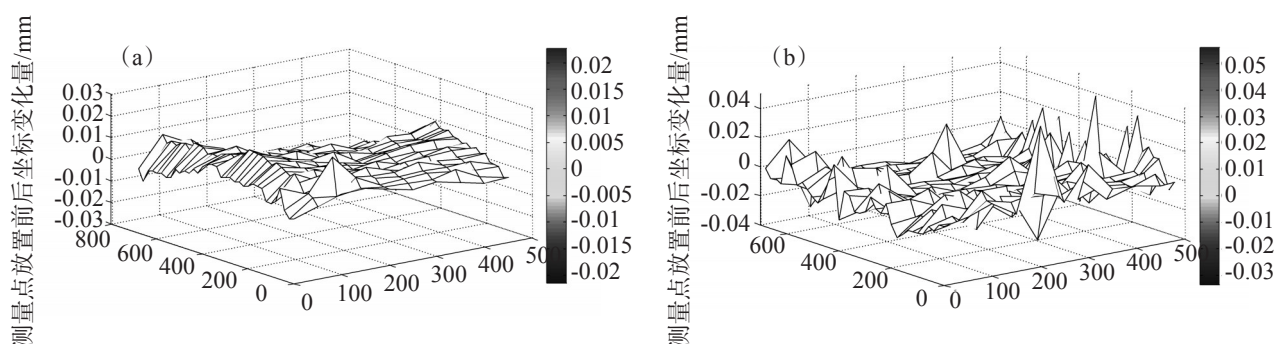


图8 铝板表面坐标的面变形量

(a)1板;(b)2板

Fig.8 Variations of aluminum alloy plate surface deformation

(a)plate No.1;(b)plate No.2

振动时效一般应用于存在较大残余应力的构件,在振动过程中应力集中区将发生微观塑性变形,此时晶体内发生不可逆的位错运动,故内阻尼较大,在振动方程中增加了粘性阻尼项,随着振动时效过程中粘性阻尼比减少,加速度共振峰前移并且增高,半高宽变窄,由此可判断振动时效达到了效果^[9]。

4 结 论

(1)残余应力对固有频率的影响客观存在且是可测的,受残余应力场的影响,淬火铝合金板的固有频率相对于轧制板有所增大,且随着频率阶数的增加,频率的受影响程度或变化值也将增大。

(2)振动时效中铝板淬火残余应力场得到一定程度的消减与均化,相应的固有频率有所下降,且振型决定了振动时效后残余应力重新分布及均匀

化。残余应力变化与固有频率变化二者之间存在着一定的联系,研究残余应力与固有频率的相互作用对理论推导与工程实践都将有很大的参考价值和指导意义。

参考文献:

- [1] 高永毅,苏志霄,焦群英,等. 残余应力对构件固有频率影响的讨论[J]. 机械强度,2002,24(2): 289-292.
- [2] 高永毅,刘德顺. 利用试验模态分析进行残余应力评估的研究[J]. 振动与冲击,2005,24(5): 111-114.
- [3] 李文威,董学武,王东强,等. 铸铁构件固有频率与其残余应力关系的研究[J]. 中原工学院学报,2007,18(2): 7-10.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T5926-1991 振动时效工艺参数选择及技术要求[S]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [5] 高葛,张锁怀. 对振动时效三个主要参数的探讨[J]. 现代制造工程,2004(5): 58-60.

- [6] 聂福全,石敏. 振动时效工艺的研究[J]. 山东交通学院学报, 2002, 10(3): 25-28.
- [7] 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.
- [8] 查利权,汪凤泉,戎心熙. 确定振动时效参数的应力振型函数法[J]. 振动、测试与诊断, 1990(4): 12-16.
- [9] 张策. 机床噪声—原理及控制[M]. 天津: 天津科技出版社, 1984.

Interaction between residual stress and natural frequency in VSR

HU Yonghui, WU Yunxin

College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: By applying VSR (Vibratory Stress Relief) technology, the influence of residual stress on natural frequency as well as the influence of exciting frequency on the effect of VSR were studied to analyze the interaction of high strength aluminum alloy plate between residual stress and natural frequency in VSR process. The results show that the plate natural frequency is directly influenced by the residual stress distribution characteristics. The natural frequency in each order would change followed by residual stress relaxation or homogenization caused by stress re-distribution during VSR. Moreover, the higher the rank number is, the larger the influence of residual stress on frequency or variation is. On the other hand, micro-plastic deformation mechanism of the material is directly determined by exciting frequency or mode shape, thereby affecting the effect of VSR.

Key words: VSR; residual stress; natural frequency; exciting frequency; aluminum alloy plate