

# 振动时效对结构件材料表面完整性的影响<sup>\*</sup>

高自成, 余田, 廖凯, 闵淑辉, 李立君, 汤小红

(中南林业科技大学机电工程学院 长沙, 410004)

**摘要** 为揭示平台式振动时效对结构件材料表面完整性性能——表面残余应力、硬度及微观组织的影响,以 7075 铝合金薄壁件为研究对象,运用 ANSYS 构建平台式振动时效(vibration stress relief, 简称 VSR)有限元模型,通过模态分析获得最佳激振频率和试样装夹位置。在此基础上,将 3 个薄壁框架件置于平台不同位置进行 VSR 处理,得到其试样表面应力的松弛效果。结果表明:亚共振频率为 112 Hz 时,在激振源的中间位置和最大振幅位置处试样应力释放效果最好,其应力释放率最大为 27%;电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, 简称 EBSD)电镜观察发现,时效后表面组织晶粒存在明显取向区变化,晶粒成长带来能量的变迁以及位错的增殖,再结晶晶粒的增多提升了表面性能,使得材料表面硬度得到 10%~17%的强化。研究表明,平台式振动时效能够改变和优化材料表面完整性。

**关键词** 振动时效; 结构件; 应力松弛; 电子背散射衍射; 表面完整性

**中图分类号** TH113.1; V216.2<sup>+</sup>1; TB123

## 引言

现代机械制造业的发展使得零件逐步小型化、精密化,对小型零件尺寸稳定性要求越来越高<sup>[1]</sup>。7075 高强度铝合金薄壁框架件具有比强度高、相对重量轻等特点,满足了现代航空追求轻量化和整体化的需求,但由于其本身材料特性、结构特点以及生产加工过程中带来的残余应力,使得其形状具有不稳定性<sup>[2-3]</sup>。振动时效(VSR)在松弛残余应力方面具有高效、节能、环保及适应性强等优点,在机械零配件生产及加工过程中逐步取代以往的时效方式,优化零件力学性能<sup>[4-6]</sup>。振动时效处理焊接件应力集中区域效果极好<sup>[7-10]</sup>,但由于小型结构件质量小,固有频率高,传统的振动方法效率低,甚至会破坏构件尺寸。因此,可采用振动平台集中处理法,即将多个结构件装夹在振动平台上,利用平台低频共振时产生的激振能传递到构件表面,在不破坏零件形状的基础上实现残余应力释放。

目前,振动时效研究集中在焊接件或大型结构件。Walker 等<sup>[11]</sup>对冷轧钢的 VSR 处理建立了数学模型,并且实验证明 VSR 降低残余应力峰值达到了 40%,进而提出了应力释放过程是一种微观的位

错运动。国内外学者<sup>[12-14]</sup>也都从位错角度对振动时效的机理进行分析,笔者拟结合位错理论从材料的晶粒形貌角度探讨应力释放原理。现在对于铝合金材料的振动时效研究也有一些成果,Wang 等<sup>[15]</sup>发现 AA6061 铝合金板材在悬臂梁式振动时效下不同位置的应力松弛效果不同,对铝合金厚板进行 VSR 后发现板内应力得到均化<sup>[16]</sup>,板形较之前更加稳定。李亚非等<sup>[17]</sup>实验证明了 70A4 铝合金锻件在 VSR 处理后最高的应力释放率接近于热时效,并指出采用振动平台对中小型工件进行振动时效处理时,应力去除效果与工件的装夹位置有关。此外,很多学者也开始引入计算机仿真软件对 VSR 进行数值模拟和实验参考,例如 Chen 等<sup>[18]</sup>采用 ANSYS 对石英挠性加速器计的焊接过程进行热分析后发现,振动可以降低残余焊接应力,而且共振频率下的效果更好。蔡敢为等<sup>[19]</sup>对内燃机曲轴进行数值分析,结果表明,在激振频率范围内曲轴达到共振进而消减残余应力。笔者基于 7075 铝合金薄壁框架件的振动时效实验,结合 X 射线(X-ray diffraction, 简称 XRD)应力测试技术、EBSD 和硬度测试,探究振动平台对结构件材料表面完整性——表面应力、硬度和微观组织的影响。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51475483);湖南省重点研发计划资助项目(2018NK2065,2019NK2022)  
收稿日期:2020-03-22;修回日期:2020-04-20

## 1 实验

### 1.1 材料与试样

实验采用 7075-T651 铝合金厚板,经四轴加工中心制成 3 块尺寸为 500 mm×108 mm×60 mm 的一口型薄壁件,底部厚度为 6 mm,壁厚为 2 mm。铣削加工后对试样进行喷丸处理,强化表面应力的同时使得应力分布均匀,后期数据对比更加鲜明。喷丸设备为 ST-1960 空气喷丸机,根据航空零件喷丸强化标准,磨料选用粒度直径为 0.3 mm 的钢丸颗粒,以 0.3 MPa 的喷射强度喷 3 块薄壁件,垂直试样喷射距离为 50 mm,喷口直径为 5 mm,表面覆盖率为 100%<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 振前分析

平台式振动时效是指平台在激振器的持续激励下与装夹结构件一起达到共振,产生激振能施加在构件表面,同时避免对构件产生损伤。实验所用振动平台为 HT250,尺寸为 1 800 mm×800 mm×70 mm,质量约为 1 000 kg,对称 4 支点高强度弹簧支撑,支座弹簧刚度为  $6 \times 10^6$  N/mm,支撑处对称布局为 1 500 mm×500 mm。

利用 ANSYS 软件对 HT250 实验平台进行支撑约束状态下模态分析。平台和弹簧分别采用 SOLID185 单元和 COMBIN14 单元,材料属性如下: $\rho=7\ 000$  kg/m<sup>3</sup>;  $E=150$  GPa; $\nu=0.3$ 。通过 Mesh 模块对模型进行高精度六面体划分,单元格尺寸为 30 mm,节点总数为 7 196 个,单元数为 5 128 个。

数值模态分析求解器采用 Block Lanczos,得到平台的固有频率与振型之间的关系,如表 1 所示。其第 7 阶振型明显比其他频率达到了更大振幅,同

表 1 模态分析结果

Tab. 1 Modal analysis results

振型阶次	固有频率/Hz	振型描述
1	0	绕 y 轴摆动
2	$0.224 \times 10^{-3}$	绕 y 轴摆动
3	$0.278 \times 10^{-3}$	z 方向摆动
4	27.858	z 方向平移
5	28.879	绕 x 轴摆动
6	41.063	绕 y 轴摆动
7	110.020	谐波一弯振动
8	144.640	轴向扭曲振动
9	287.580	谐波二弯振动

时采用了现场实验聚沙法验证了散布在平台上的细砂在此激振频率下聚集到零振幅位置,可判断激振频率约为 110 Hz,平台可实现预定的亚共振。图 1 为第 7 阶振型图。

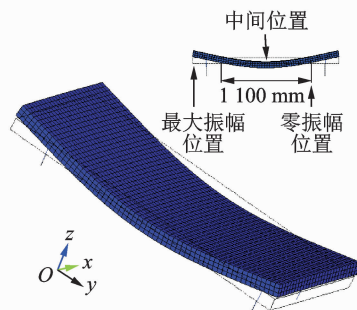


图 1 平台第 7 阶模态振型图

Fig. 1 7th modal shape of platform

由图 1 可以看出,平台关于中间位置两边对称,考虑到激振力分布效果,可选择将激振器安装于平台中间位置。分别将 3 个试样框架件装夹于图 1 所示的中间位置、零振幅位置和最大振幅位置(分别命名为 1, 2, 3 号件),如图 2 所示。试样均以宽度方向中线对称,分别观察其时效效果。

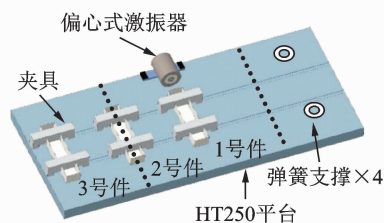


图 2 VSR 实验

Fig. 2 VSR experiment

### 1.3 振动方式

实验按照模态分析找到对应中间、零振幅和最大振幅位置,为防止实验中试样表面遭到破坏影响数据采集,用软布包裹后再用夹具固定框架件,安装方式见图 2。激振设备为 HK2000K1 型全自动振动时效仪,偏心转子式激振器置于平台中部。根据前期工作结果和振动时效工艺标准<sup>[22-23]</sup>,选择激振时间为 20 min。激振后仪器自动扫频,寻找到平台亚共振区 112 Hz 进行激振。

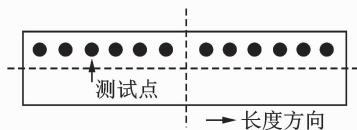
### 1.4 试样测试

为了得到振动时效的应力释放情况,对框架件实验前后进行 X 射线衍射应力测试<sup>[24]</sup>,其精度为  $\pm 20$  MPa。靶材为 Cr- $\alpha$  靶, X 射线的波长为

$2.291 \times 10^{-10}$  m,管电压为 20 kV,管电流为 4 mA,衍射晶面为  $156^\circ$ ,采用高斯函数法定峰,准直管尺寸为 2 mm。X 射线弹性常数为  $S_2/2 (18.56 \times 10^{-6})$ , $\psi$  取 14 个角度。双探测器衍射角扫描速度为  $2^\circ/\text{min}$ ,步长为  $0.01^\circ$ ,测得 7075 铝合金 (311)晶面衍射角  $2\theta$  随  $\psi$  角变化时的变化值,测试现场如图 3(a)所示。由仿真模态振型可知,宽度方向上分布的激振能是相同的,所以测试点沿长度方向上取一侧即可,沿试样长度方向布置 12 个测试点,分布如图 3(b)所示。



(a) 应力测试  
(a) Stress test



(b) 试样测试点分布  
(b) Layout of test position on sample

图 3 XRD 应力测试  
Fig. 3 XRD stress test

电镜分析采用配备 EBSD 探头的 EVO MA10 扫描电子显微镜,研究铝合金的晶粒形貌变化。试样由线切割截取,表面经过粗磨、细磨和机械抛光。试样在测试前进行电解抛光,抛光溶液用 10% 高氯酸和 90% 无水乙醇制成,电压为 18 V,抛光时间为  $20 \text{ s}^{[25]}$ 。使用 HV-5 型维式硬度计对 VSR 实验前后铝合金薄壁框架件的表面进行硬度测试。

## 2 表面完整性分析

### 2.1 表面应力释放

当材料的残余应力  $\sigma_r$  和动应力  $\sigma_d$  叠加之和大于屈服极限  $\sigma_s$ ,才能使该处应力消减,即

$$\sigma_r + \sigma_d > \sigma_s$$

材料在表面的屈服应力极限  $\sigma_s$  相对基体内要低很多,这为平台式振动时效释放表面应力提供了可

能。VSR 前,薄壁件经过 100% 表面喷丸覆盖,以保证其表面应力分布均匀性较好,其应力强度为  $-340 \pm 10 \text{ MPa}$ 。试样 VSR 后,将 XRD 应力测试的结果以云图描述,如图 4 所示。结果显示,每个框架件应力释放都存在着不均匀的现象。

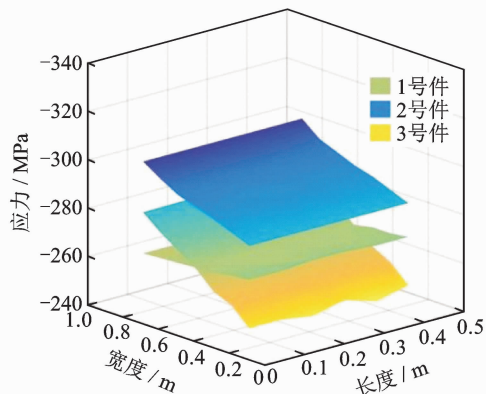


图 4 VSR 后应力松弛情况

Fig. 4 Stress relaxation after VSR

实验后 1 号件的应力释放达到最大,从  $-340 \text{ MPa}$  降至  $-248 \text{ MPa}$ ,应力释放率为 17%~27%;3 号件应力释放效果次之,且表面应力分布更加均匀,时效后应力值处于  $262 \sim 270 \text{ MPa}$  之内,释放率约为 22%;2 号件应力释放效果最小,最大处释放到  $-282 \text{ MPa}$ ,释放率为 11%~17%。

模态分析显示在 112 Hz 的激振频率下,振动平台达到了共振,并呈正弦波式振形,结合 VSR 时效和 XRD 应力分布特点可得以下结论:①激振能量可以有效地作用到试样上,满足了小试样获得大动能的需要;②构件表面在时效交变应力作用下达到了微观屈服,促成表面应力释放;③平台谐波振型表明了动应力分布的不均匀性,应力释放效果与时效位置、激振能分布有关。实验结果表明,处于振幅较大位置的 1 号件和 3 号件应力释放效果明显优于零振幅位置的 2 号件,但零振幅位置时效后表面应力释放更加均匀,工程应用中可根据需要选择时效位置。

### 2.2 微观分析

宏观上材料残余应力和振动时效交变应力叠加超过了屈服极限,产生了塑性变形,释放了残余应力。塑性变形表明材料表面组织也会存在微观形变,运用位错理论可知其主要因素是晶界处位错塞积缠结导致。为更深入地研究晶粒内部的变化,取母材以及时效后试样的表面中心区域进行 EBSD 分析。

图 5 为母材和时效后材料的取向成像图(反极图),不仅包含晶界和亚晶界信息,也反映了晶粒取向变化,其中不同颜色代表着不同的晶粒取向。晶体形貌上可以看出母材的平均晶粒尺寸较小,细小的扁平状晶粒均匀分布并且无明显择优取向。在细长晶粒的内部,有许多亚晶粒边界。对比经过振动时效的晶体形貌,发现晶粒有着显著的成长趋势,并且晶粒内部的衬度发生变化。大量的颜色渐变区出现,表明晶粒取向发生了变化,已完成塑性滑移,进而大角度晶界( $>10^\circ$ )的组分增加。从小角度晶界( $2\sim 10^\circ$ )向大角度晶界的转变过程,也就是能量释放的过程,同时伴随着新的形核增加。

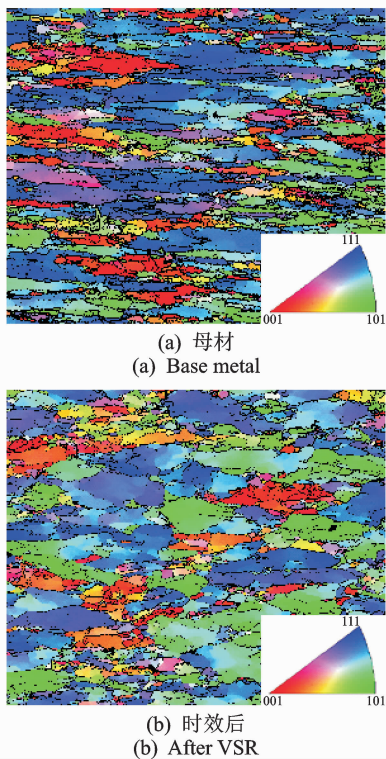


图 5 取向成像图  
Fig. 5 Inverse pole figure

振动时效过程中的交变应力能量累积到足够多时,晶粒内部就开始滑移变形,初步形成了内部取向的渐变区。随着变形量的进一步增大,晶粒内部滑移变形将带动整个晶粒沿着拉伸方向产生塑性变形,晶粒的变形也将带来晶界上位错的增殖和堵塞。塑性变形到一定程度,将触发整个晶粒发生形变以适应外界的宏观应力作用,由此导致晶粒被拉伸长大,晶界上塞积增多。当晶粒成长释放的能量以及位错上复杂的应力场交互作用超过了材料的屈服强度时,材料形成屈服并通过晶粒一个个传递开,达到了整体上的表面应力释放。

对时效前后的再结晶晶粒、亚结晶晶粒和变形晶粒进行量化分析,统计其百分含量,数据显示如图 6 所示。对比母材,经过时效后的材料表面再结晶体积从 9.5% 上升到 18.7%,完成了部分晶粒的动态再结晶。再结晶晶粒的增多使得组织更加均匀,力学性能也会得到强化。形变程度小,意味着再结晶形核的场所少,形核率低,由于晶界不迁移,晶粒中必然存在较高的位错密度。再结晶晶粒的增多以及高密度的位错在宏观上带来了材料变形抗力的增加。

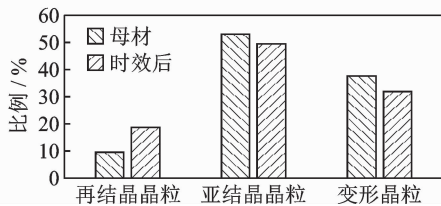


图 6 再结晶体积比统计图  
Fig. 6 Volume fraction of DRX

### 2.3 表面硬化

材料硬化效果加强,分别取初始材料以及 1, 2, 3 号件同位置表层  $80\ \mu\text{m}$  处  $5\text{cm}\times 5\text{cm}$  区域,通过维氏硬度法进行显微硬度测试,图 7 为其硬度云图。图 7 显示了时效前后不同位置处材料表面硬度的变化情况:材料时效前表面中心区域硬度约为 168HV;1, 2, 3 号件分别时效后中心区域硬度提高到约为 197, 182 和 185 HV;中间位置的 1# 试样时效后硬度提高效果最好,提升率为 17.3% 左右;零振幅位置和最大振幅位置时效效果大致相同,提升率为 10% 左右。

由上述的组织变化可以看出,振动时效对表面组织的改性有积极影响,促使晶粒变形,使表面材料得以硬化。从振动时效的作用效果和工业应用实践来看,在振动能量不变的情况下,时效时间并不会对这种微观变化产生持续影响,这是因为当材料硬化达到一定程度后,表面材料变形抗力会导致时效效果不再发挥作用,这也是时效时间一般控制在 15~30min 以内的主要原因。另外,时效所带来的晶粒变形是表面应力释放的根本原因,变形改变了晶粒间力作用的强度和效果。振动使结构件表面应力得到释放,释放的程度取决于试样的时效位置。因为位置和振动的能量有关,这表明通过改变试样在平台上的时效位置,能够对结构件优化表面性能起到了积极作用。

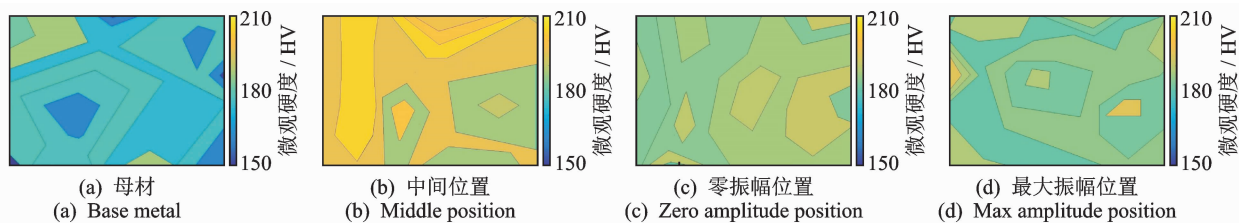


图7 时效前后试样 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 区域表面二维显微硬度分布

Fig.7 2D plot of microhardness of sample in  $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$  surface area surface before and after VSR

### 3 结论

1) 平台式 VSR 方法不仅对焊接件,对结构件这类全域性表面应力分布不均或表面应力强度高 的情形都能够发挥积极作用。实验证明,通过平台式 振动时效可释放构件表面残余应力,最大释放率可 达 29%。

2) 材料表面屈服强度偏低,客观上满足了 VSR 对材料进行屈服削减应力的要求,微观分析证明了 VSR 能够改变材料表面晶粒的内部取向,强化组织 性能,材料表面硬化可达 17%,一定程度上对稳定 构件变形有积极作用。

3) 平台式 VSR 能够对结构件表面完整性形成 有效改变,可通过调整时效位置和动应力强度实现 材料表面性能参数的优化。

### 参 考 文 献

- [1] 申运锋,赵妍,杨生国,等. 2124 铝合金曲边薄壁结构 加工变形仿真分析[J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 191-197.  
SHEN Yunfeng, ZHAO Yan, YANG Shengguo, et al. Simulation analysis of machining deformation of 2124 aluminum curved thin-walled structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(2):191-197. (in Chinese)
- [2] ARSHPREET S, ANUPAM A. Investigation of surface residual stress distribution in deformation machining process for aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 195-202.
- [3] 王民,刘宇男,孙国智,等. 初始残余应力和切削残余应力对薄壁件加工变形的影响[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(7):55-61.  
WANG Min, LIU Yunnan, SUN Guozhi, et al. Influence of initial residual stress and cutting stress on machining deformation of thin-walled parts[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(7):55-61. (in Chinese)
- [4] 张清东,曾杰伟,罗晓明,等. 高强度钢板残余应力振动 时效消减技术试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (1):86-92.  
ZHANG Qingdong, ZENG Jiewei, LUO Xiaoming, et al. Experimental study on residual stress reduction for the high-strength steel based on vibration stress relief [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 86-92. (in Chinese)
- [5] 刘晓丹,陶兴华,韩振强. 振动时效工艺在消除膨胀 波纹管残余应力中的应用[J]. 振动与冲击, 2015, 34 (4): 171-174.  
LIU Xiaodan, TAO Xinghua, HAN Zhenqiang. Application of vibratory stress relief in relaxation of residual stress for expandable corrugated liners[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (4): 171-174. (in Chinese)
- [6] 曹慧. 管类环焊缝热时效和振动时效去除焊接应力对比研究[J]. 航天制造技术, 2014, 10(5):31-34.  
CAO Hui. Contrast research of heat ageing and platform VSR ageing removing welding stress for pipe girth weld[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, 10(5): 31-34. (in Chinese)
- [7] SAMARDŽIĆ I, VUHERER T, MARIĆ D, et al. Influence of vibrations on residual stresses distribution in welded joints[J]. Metalurgija, 2015, 54(3): 527-530.
- [8] SHIGERU A, KATSUMI K, SHIGEOMI K, et al. Probabilistic evaluation of a method for reduction of residual stress in welded structure using vibration[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 33: 1087-1092.
- [9] 狄欧,陈新旭. 振动时效对焊接件残余应力及接头力学性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(19): 194-197.  
DI Ou, CHEN Xinxu. Research on effects to residual stress and mechanical properties of joints by vibratory stress relief [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(19): 194-197. (in Chinese)
- [10] RU L P, JOHAN M, PAJAZIT A, et al. Influence of vibration and heat treatment on residual stress of a machined 12% Cr-steel [J]. Advanced Materials Research, 2014, 996: 609-614.

- [11] WALKER C A, WADDELL A J, JOHNSTON D J. Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, 1995, 209(15): 51-58
- [12] 杨君宝. 基于位错理论的振动消应力的机理研究[J]. 机械研究与应用, 2007(2): 62-64.  
YANG Junbao. Research on mechanism of vibration time effect based on dislocation theory[J]. Mechanical Research and Application, 2007(2): 62-64. (in Chinese)
- [13] 崔高健, 刘明显, 杨安, 等. 基于位错理论的超声波消除焊接残余应力的研究[J]. 机械, 2013, 40(3): 49-51, 73.  
CUI Gaojian, LIU Mingxian, YANG An, et al. Mechanism research of ultrasonic eliminate aluminum alloy welding residual stress based on dislocation theory[J]. Machinery, 2013, 40(3): 49-51, 73. (in Chinese)
- [14] 顾邦平, 胡雄, 徐冠华, 等. 基于位错密度演化的高频振动时效微观机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 2477-2482.  
GU Bangping, HU Xiong, XU Guanhua, et al. Micro-cosmic mechanism of high-frequency vibratory stress relief based on dislocation density evolution [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(8): 2477-2482. (in Chinese)
- [15] WANG J S, HSIEH C C, LIN C M, et al. The effect of residual stress relaxation by the vibratory stress relief technique on the textures of grains in AA 6061 aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 605: 98-107.
- [16] 廖凯, 吴运新, 郭俊康. 振动时效在铝合金厚板应力消减中的局限与应用[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 70-73.  
LIAO Kai, WU Yunxin, GUO Junkang. Application of VSR technique in stress reduction of aluminum alloy thick plate and its limitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 70-73. (in Chinese)
- [17] 李亚非, 狄欧. 振动时效去除铝合金锻件残余应力效果的研究[J]. 热处理工艺, 2015, 44(24): 222-225.  
LI Yafei, DI Ou. Research on effects of vibration aging on removal of residual stress in aluminum alloy forgings[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(24): 222-225. (in Chinese)
- [18] CHEN Y, LIU B, KANG R. Study of vibratory stress relief effect of quartz flexible accelerometer with FEA method[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(2): 784-793.
- [19] 蔡敢为, 黄院星, 李岩舟. 内燃机曲轴振动时效工艺分析与装置设计[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S1): 97-101.  
CAI Ganwei, HUANG Yuanxing, LI Yanzhou. Crankshaft vibratory stress relief process analysis and device design[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(S1): 97-101. (in Chinese)
- [20] HB/Z 26—2011 航空零件喷丸强化工艺[S].
- [21] 陈家伟, 廖凯, 李立君, 等. 铝合金喷丸工艺参数-表面特征值的函数关系与应用[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 212-220.  
CHEN Jiawei, LIAO Kai, LI Lijun, et al. Function relationship between shot peening parameters and surface characteristic of Al-based alloy and application [J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 212-220. (in Chinese)
- [22] JB/T5926—2005 振动时效效果评定方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [23] 廖凯, 熊冠华, 朱家豪, 等. 振动时效对 7075 铝合金薄壁构件应力松弛的影响与分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 265-270.  
LIAO Kai, XIONG Guanhua, ZHU Jiahao, et al. Effect and study of vibratory stress relief on stress relaxation of 7075 Al alloy thin-walled component [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 265-270. (in Chinese)
- [24] REYES C R, FIGUEROA I A, BRAHAM C, et al. Residual stress distribution of a 6061-T6 aluminum alloy under shear deformation[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 670: 227-232.
- [25] 崔桂彬, 鞠新华, 任丹丹, 等. 基于 EBSD 的 IF 钢在变形过程中织构的演化过程研究[J]. 电子显微学报, 2013, 32(3): 224-230.  
CUI Guibin, JU Xinhua, REN Dandan, et al. Study of texture evolution during deformation base on electron back-scatter diffraction for IF steel[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2013, 32(3): 224-230. (in Chinese)



**第一作者简介:**高自成,男,1968年7月生,博士、副教授。主要研究方向为现代林业装备及机械振动。曾发表《悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验》(《农业工程学报》2019年第21期)等论文。

E-mail: gzc1968@126.com

**通信作者简介:**廖凯,男,1977年3月生,博士、教授。主要研究方向为机械振动分析及农业机械设计。

E-mail: liaokai102@csuft.edu.cn