

薄壁件表面应力松弛均化的时效分析与实验^{*}

余 田¹, 廖 凯¹, 李立君¹, 高自成¹, 朱家豪¹, 龚 海², 钟利萍¹

(1. 中南林业科技大学机电工程学院 长沙, 410004) (2. 中南大学机电工程学院 长沙, 410083)

摘要 为了使 7075 铝合金薄壁件表面喷丸加工应力得到松弛和均化, 运用 ANSYS 建立平台式振动时效有限元模型, 通过振动模态和谐响应分析, 获得最佳激振频率和试样装夹位置。在此基础上, 将薄壁框架件置于平台上进行振动时效处理, 以验证仿真分析结果, 评价其对试样表面应力作用效果。结果表明: 在亚共振频率为 112 Hz 时, 试样在平台零振幅和最大弯曲位置处分别对称布置, 时效后表面均形成应力松弛, 松弛率分别为 29.5% 和 33.3%, 不均匀波动分别为 20.3% 和 20.7%, 而沿振动方向松弛程度不均匀, 说明激振力造成了材料表面组织屈服, 且屈服程度与应力强度有关。提出再时效-位置交叠方法, 使应力松弛不均匀度分别下降到 9.9% 和 15.9%, 应力均化得到改善, 该研究工作为薄壁类零件表面应力均匀化提供了参考。

关键词 铝合金; 薄壁构件; 振动时效; 应力均匀化; 位置交叠

中图分类号 TH113.1; V216.2⁺1; TB123

引 言

振动时效(vibration stress relief, 简称 VSR)是一种通过对工件施以循环载荷, 从而调整残余应力、稳定工件尺寸精度的时效方式, 在不改变材料的组织状态下还可对工件进行多次时效处理。工程上 VSR 对铸铁件和焊接件中应力集中的部分进行应力消减与均化, 效果显著^[1]。随着 7075 高强铝合金薄壁框架件作为结构件在航空器方面广泛应用, 其加工变形调控备受关注^[2-3]。薄壁件除了受自身性质及结构特点影响以外, 还受毛坯初始残余应力和表面加工应力影响, 这些因素相互耦合作用在材料表面产生了复杂应力场^[4], 造成结构件形状不稳定。薄壁件喷丸表面应力一般为压应力, 压应力可有效提高材料疲劳强度, 延长其服役寿命^[5-7]。因此, 可以尝试 VSR 方法对构件表面特征实施影响, 达到松弛和均化应力目的。

国内外学者对 VSR 的相关技术进行了比较详细的研究工作。从微观方面看, 残余应力是材料内部大量的位错导致晶体的晶格产生扭曲和畸变, 从而在一定范围内形成自相平衡的弹性力。在内部可

以通过刺激原子振动来纠正晶格的畸形, 其积累产生的微观塑性变形使应力峰值降低一定幅度, 尺寸稳定性得以提高^[8-10]。文献[11-12]指出残余应力峰值的降低实质上是一种微观尺度的位错运动导致。崔高健等^[13]用超声波冲击来降低铝合金焊接应力, 从位错的角度解释了焊接残余应力消除的机理。从宏观方面看, VSR 下材料的残余应力和动应力之和大于屈服极限而小于疲劳极限时, 表面应力才能消减。张清东等^[14]对高强度钢板进行高频振动后发现应力消减。廖凯等^[15]对铝合金厚板进行 VSR 后对比发现, 厚板表面应力的消减带来板形的更加稳定。文献[16-19]对钢焊接件和悬臂梁结构进行了振动时效, 发现应力消减的效果比较理想。Wozney 等^[20]指出时效后应力的减少是不均匀的, 很多文章予以验证, 但未能提出解决方法。目前, 学者开始引入有限元仿真软件对 VSR 进行数值模拟和实验研究。蔡敢为等^[21]通过对内燃机曲轴进行仿真分析, 发现在激振频率范围内曲轴达到共振从而消减残余应力。Chen 等^[22]采用 ANSYS 对石英挠性加速器计的焊接过程进行热分析和热应力分析, 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。顾邦平等^[23]采用 ANSYS 有限元

^{*} 湖南省重点研发计划资助项目(2018NK2065); 湖南省科技重大专项资助项目(2017NK1010); 国家自然科学基金资助项目(51475483); 湖南省研究生科研创新资助项目(CX2018B451)

收稿日期: 2018-12-23; 修回日期: 2019-04-17

软件,对构件进行数值模态分析,得出了应变振型和残余应力的分布规律。

笔者运用 ANSYS 有限元软件和实验方法,分析铝合金薄壁框架件这类质轻零件应用于平台式振动的时效方法和应力松弛规律,针对应力松弛特征提出均化表面应力的时效方法。

1 振动分析

1.1 建立模型

小型零件振动时效普遍采用平台式激振模式,指的是将零件固定在平台上,将平台和试样视为整体,借助平台本身强大的激振动能,在低频低幅情况下也能给予轻质零件足够的激振能。实验所用的振动平台为 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 6×10^6 N/mm,支撑处对称布局为 1 500 mm×500 mm。平台和弹簧分别采用 Solid185 单元和 Combin14 单元。对平台进行高精度六面体扫掠式划分,单元格尺寸为 30 mm,节点总数为 7 196,单元个数为 124 500。

1.2 模态分析

为了得到结构的固有频率和主要振型,对模型进行弹簧支撑约束下的模态分析。模态提取方法采用分块兰索斯法(block lanczos),得到平台的固有频率与振型之间的关系如表 1 所示。一般而言,低阶振动对结构的动态影响较大,决定了结构的动态特性,故八阶以后不予考虑。频率为 110 Hz 的第 7 阶振型模态为最佳选择,可认定为亚共振区。图 1 为平台的第 7 阶模态振型。

表 1 前九阶模态固有频率与振型

Tab. 1 Description of the first nine modes' natural frequencies and modes

振型阶次	固有频率/Hz	振型描述
1	0	绕 y 轴摆动
2	0.224×10^{-3}	绕 y 轴摆动
3	0.278×10^{-3}	往 z 方向摆动
4	27.858	往 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	287.58	谐波二弯振动

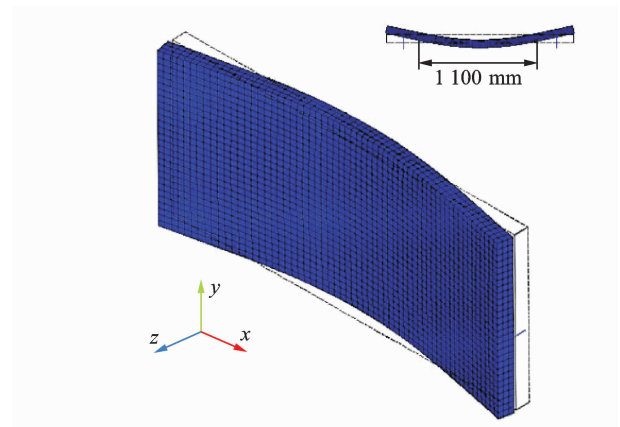


图 1 平台第 7 阶模态振型

Fig. 1 7th modal shape of platform

1.3 谐响应分析

谐响应分析可以确定平台在承受随简谐规律变化的载荷时的稳态响应,得到结构在不同频率下的响应值,预测结构的持续性动力性能。谐响应采用 FULL 法来分析,使用完整的系统矩阵计算谐响应,不考虑主自由度及阵型。由振型图可以看出,在零振幅或者最大挠度处固定试样,其激振效果可能最佳。因此,在平台零振幅和最大挠度位置分别放置 7075T651 铝合金薄壁框架件,沿长度方向对称固定,尺寸为 500 mm×108 mm×60 mm,壁厚和底厚分别为 2 mm 和 6 mm。激振力设置在两个零振幅的中间位置,在模型中选取对应区域设置为刚性区。图 2 为加入铝合金薄板后模型侧面网格图,红色区域为 100 mm×100 mm×70 mm 的刚性区,材料属性如表 2 所示。

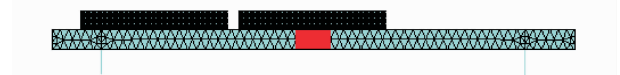


图 2 时效模型侧面图

Fig. 2 Model profile of VSR

平台和薄壁件均采用 Solid185 单元,由于两者体积差异大,为了使仿真结果精确,故薄壁件试样采用六面体扫掠式划分,平台采用四面体自由划分,两者采用体粘接方式,共 25 095 个节点、92 586 个单元,对弹簧底端施加全约束。在模态分析中,第 7 阶模态(110.02 Hz)为最佳激振频率,根据实际激振器转速,取激振频率范围为 0~167 Hz,载荷子步数设为 1。谐响应计算结果中第 33 阶频率为 110.22 Hz,振型与第 7 阶模态一样,达到共振效果,可单独提取框架件,观察表面的受力情况。图 3 为

零振幅和挠度最大位置处薄壁件底部的应力云图。

表 2 材料的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of materials

材料	弹性模量/ 泊松比 GPa	密度/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	δ / %	维氏硬度/ HV	
平台	150	0.3	7.0	0	280
薄壁	71.7	0.33	2.81	8.5	154

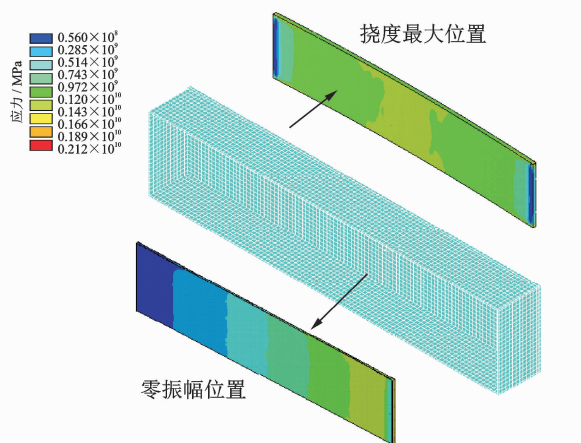


图 3 薄壁件底部应力云图

Fig. 3 Stress contour at the bottom of sample

可见,挠度最大位置的薄壁件两边应力对称,中间区域应力稍大。零振幅位置的薄壁件明显存在不同应力集中区域,沿长度方向上逐步递增。ANSYS 数值显示在 110 Hz 的激振下,挠度最大位置薄壁件从中间到两边呈现着从 86.4 MPa 到 32.1 MPa 递减的应力变化。零振幅位置薄壁件表面沿 x 方向呈现着从 14.3 MPa 到 81.6 MPa 逐步递增的应力变化。从理论上讲,上述两个位置放置的薄壁件都可能存在时效后应力松弛不均匀现象,为此设计了与仿真匹配的实验方案。

2 实验

2.1 材料与试样

实验材料选用 7075T651 高强铝合金厚板,经过四轴加工中心机床铣削后得到两块试样尺寸为 $500 \text{ mm} \times 108 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的一口型薄壁件,底部厚度为 6 mm,壁厚为 2 mm。铣削加工后,对试样表面进行喷丸处理,使表面应力分布均匀,目的是使振动时效后的表面应力变化更加鲜明。喷丸设备为 ST-1960,参照航空零件喷丸强化标准^[24],磨料选用粒度直径为 0.5 mm 的钢丸颗粒,喷射强度为 0.3 MPa,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%。

2.2 振动方式

实验按照模态分析找到对应零振幅位置和挠度最大位置,沿长度方向固定框架件,实验装置如图 4 所示。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 JB/T 5926—2005 振动时效工艺标准^[25]和前期实验结果,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,与仿真模态分析和谐响应分析结果吻合,如图 5 所示,实验时为防止表面遭到破坏,用软布包裹再夹持在振动平台上。

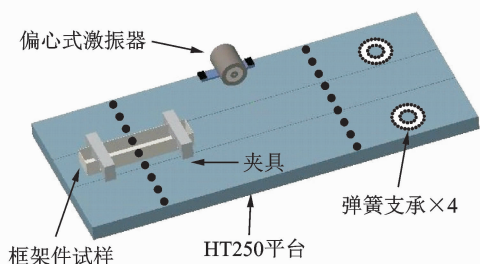
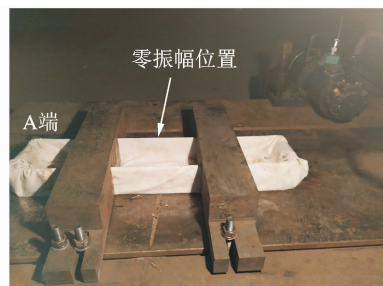


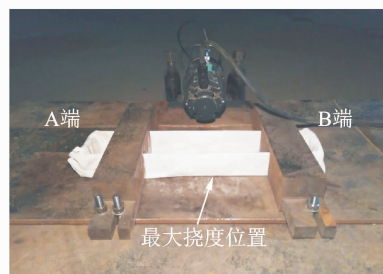
图 4 实验装置图

Fig. 4 Diagram of experimental device



(a) 零振幅位置实验

(a) Zero amplitude position experiment



(b) 挠度最大位置实验

(b) Maximum deflection position experiment

图 5 VSR 实验

Fig. 5 VSR experiment

2.3 应力测试

为了验证谐响应分析中表面应力在时效后存在的均匀,在薄壁件底部上对应区域分别确定 12 个

应力测试点,比较 VSR 前后应力分布情况。谐响应结果显示,同区域上下两侧应力基本呈对称分布,实验中测试点分布在试样一侧即可,测试点横向间隔为 40 mm,如图 6 所示。应力测试前用酒精擦拭试样表面。表面应力测试采用 PROTO iXRD 衍射应力测试仪,精度为 ± 20 MPa,采用同倾法测量,辐射线为 Cr- $k\alpha$,波长为 2.291Å, X 射线管电压为 20 kV,管电流为 4 mA,衍射晶面为 156° ,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 9.28×10^{-6} , ψ 取 14° 。

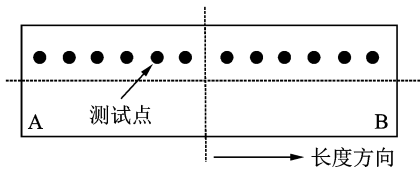


图 6 试样测试点布置

Fig. 6 Layout of test position on sample

3 结果与分析

3.1 应力松弛

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。图 7 为 VSR 后应力松弛情况。VSR 后,应力测试结果显示,零振幅处框架件应力松弛释放程度在 B 端达到最大,从 -183 MPa 下降到 -129 MPa,释放率达到了 29.5%。A 处释放程度最小,从 -183 MPa 减小到 -166 MPa,释放率仅为 9.2%。可见,沿振动方向,试样表面应力松弛不均匀波动达到 20.3%,将实验测得的 12 个数据进行对称化处理,如图 7(a) 所示。

在挠度最大位置处框架件应力松弛有着相似的规律,在中间位置达到最大,从 -183 MPa 下降到 -122 MPa,释放率达到了 33.3%,下降幅度从中间往两端等梯度逐渐降低,A,B 两端释放率均为 13% 左右,松弛不均匀波动达到 20.7%,如图 7(b) 所示。仿真结果显示,VSR 中平台达到了共振并形成交变应力,使平台呈谐波变形,这一特点对实验具有参考意义。

1) 交变应力可以有效作用到试样上,满足了小试样获得大动能的需要,同时,实验结果表明应力在 VSR 下可以被部分释放。一般情况下,材料表面微观屈服极限要低于材料宏观屈服极限,由于表面应力均为压应力,可见这种松弛是激振动应力达到了材料表面的微观屈服极限所致。文献[8-10]讨论了激振对材料组织位错的触发和驱动,使表面形成一定程度的屈服。

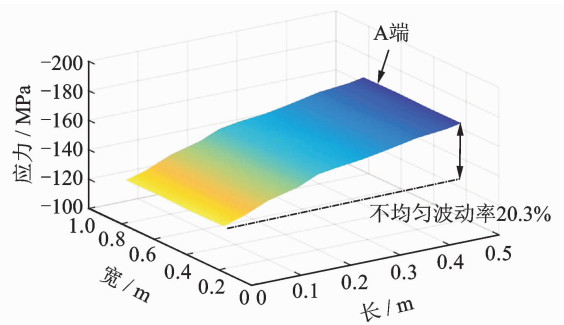
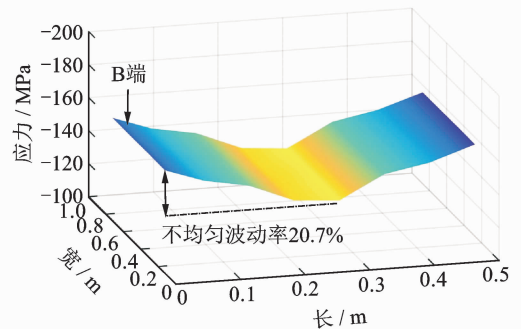
(a) 零振幅位置
(a) Zero amplitude position(b) 挠度最大位置
(b) Maximum deflection position

图 7 VSR 后应力松弛情况

Fig. 7 Stress relaxation after VSR

2) 平台谐波式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。

3) 可针对谐波式振型特点采用再时效-位置交叠方法,变换激振能位置,以协调应力分布的不均匀。例如,以零振幅位置框架件为例,根据其 VSR 后应力分布特征可将试样对调,即 A,B 位置对换,使再时效后各位置叠加的激振能交叠,力图在试样表面达到激振能分布均匀。

3.2 位置交叠时效

对上述试样的 A,B 端位置互换进行 VSR 后,再进行应力测试得到表面应力分布,发现:零振幅位置处试样进行位置交叠时效后,A 端此次释放幅度最大,从 -166 MPa 再次下降到了 -138 MPa,释放率达到 24.5%;B 端在调换位置后下降到 -120 MPa,释放率为 34.4%,表面应力不均匀波动减小到 9.9%,如图 8(a) 所示。对挠度最大位置处试样再时效后发现,A,B 端的应力值分别下降到了 -139 MPa 和 -137 MPa,释放率分别为 24% 和 25.1%,不均匀波动率降为 15.9%,如图 8(b) 所示。

由实验结果可见:

1) 两个位置上试样分别进行再时效,在相同的实验参数下零振幅位置表现出的均匀化效果更为明显,主要是因为该位置处激振能分布的单调性能够

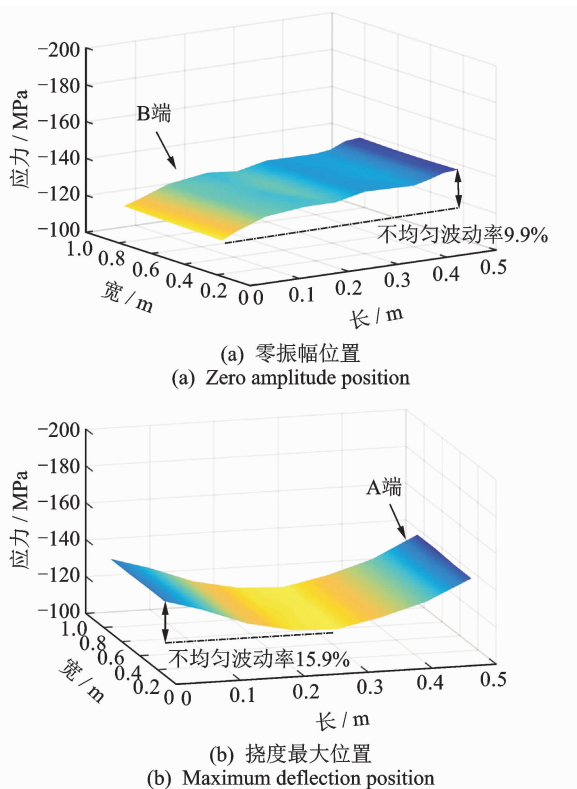


图8 位置交叠时效后应力松弛情况

Fig. 8 Stress relaxation after position overlapping VSR

较好地协调位置交叠的需要。相反在振幅最大位置处,激振能呈“中间大两头小”,由于试样位置 A/B 交叠很难与试样中间位置上的应力平衡,所以均化效果不理想。

2) 应力均化受材料表面组织和初始应力分布不均匀性的影响,要达到理想均化很难,但实验至少证明了位置交叠时效对试样整个表面应力均化具有积极作用。

3) 位置交叠时效法通过交换试样应力松弛差异较大位置,力图使其各个位置所受的激振力趋同,实现能够在降低表面应力的同时均化表面应力。同时,激振交变作为一种冷作变形方式,会导致材料表面出现硬化现象,位置交叠时效对进一步扩大应力松弛贡献不大,李继山等^[26]研究就证明了延长时效时间对进一步应力松弛的影响将显著减小。因此,再时效目的主要在均衡前一次形成的不均匀应力分布。可见,位置交叠时效能改善对表面应力释放均匀效果。

4 结论

1) 薄壁件表面喷丸应力可以在平台式振动时效处理中得到松弛释放,两处试样表面应力分别下降了 29.5% 和 33.3%,仿真与实验分析认为在亚共

振区激振,平台能为薄壁件提供足够的动应力,使材料表面形成屈服而削减应力强度。

2) 应力松弛具有不均匀性,这是平台谐波振型的特点所决定,采用位置交叠时效可以在一定程度上均化应力。实验证明试样位置交叠时效后,不均匀度最大下降到 10%,而最大应力降幅不超过 11.4%,说明再次时效对均化应力有利,而不会对应力有持续削减效果,这符合零件表面压应力需要均匀稳定和大强度的要求。

3) 薄壁件表面喷丸应力为压应力,有利于零件服役要求,VSR 主要目的在于稳定应力状态,均匀化应力分布,而非削减应力强度。因此,工程上可以采用在零振幅处激振,满足振动强度相对较小、应力松弛均较好的要求。

参 考 文 献

- [1] CHIH C H, PENG S W, JIA S W, et al. Evolution of microstructure and residual stress under various vibration modes in 304 stainless steel welds[J]. The Scientific World Journal, 2014, 8:1-9.
- [2] 李名扬,张朋朋,郑骥,等. 振动时效在大型铝合金薄壁环中的应用[J]. 金属热处理, 2015, 40(6):145-148.
- [3] LI Mingyang, ZHANG Pengpeng, ZHENG Ji, et al. Application of vibration stress relief for large thin-walled aluminum ring[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(6):145-148. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 孟祥旗. 振动处理工艺对铸、焊件机械性能影响研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] 付嘉宝. 2124 铝合金薄壁结构件加工变形控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [9] 陈家伟,廖凯,李立君,等. 铝合金喷丸工艺参数一表面特征值的函数关系与应用[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 212-220.
- [10] 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)

- [8] 陈立功,倪纯珍,刘毅萍,等. 不锈钢焊接构件的振动时效与热时效[J]. 金属热处理,1997(8):23-26.
CHEN Ligong, NI Chunzhen, LIU Yiping, et al. VSR and heat treatment of welded stainless steel part [J]. Heat Treatment of Metals, 1997(8):23-26. (in Chinese)
- [9] 刘峰,朱世根,沈剑,等. 振动时效的机理工艺与设备[J]. 现代制造工程,2003(1):66-67.
LIU Feng, ZHU Shigen, SHEN Jian, et al. Mechanism technics and equipment of vibratory stress relief [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(1):66-67. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] DAWSON R, MOFFAT D G. Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1980, 102(2): 169-176.
- [12] WALKER C A, WADDELL A J, JOHNSTON U. Vibratory stress relief-an investigation of the underlying processes[J]. Process Mechanical Engineering, 1995, 20(9):51-58.
- [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] 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)
- [15] 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)
- [16] 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.
- [17] HLAVÁČEK P, BRUMEK J, HORSÁK L. Using of abrasive water jet for measurement of residual stress in railway wheels[J]. Technical Gazette, 2012, 19(2): 387-390.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] WOZENY G P, CRAWMER G R. An investigation of vibrational stress relief in steel [J]. Welding Journal, 1968(9): 411-419.
- [21] 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)
- [22] 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.
- [23] 顾邦平,胡雄,杨振生,等. 基于应变振型的振动时效激励频率的确定方法与实验研究[J]. 振动与冲击,2018,37(11):259-264.
GU Bangping, HU Xiong, YANG Zhensheng, et al. Determination method and tests for VSR exciting frequency based on strain modal shape[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11):259-264. (in Chinese)
- [24] HB/Z 26—2011 航空零件喷丸强化工艺[S]. 北京:国家国防科技工业局,2011.
- [25] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,中国国家标准化管理委员会. JB/T 5926—2005 振动时效效果评定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [26] 李继山,胡万华. 振动时效(VSR)消除焊缝残余应力[J]. 金属热处理,2001(2):30-31,34.
LI Jishan, HU Wanhua. Residual stress relief in welded seam using VSR[J]. Heat Treatment of Metals, 2001(2):30-31, 34. (in Chinese)



第一作者简介:余田,男,1995年12月生,硕士生。主要研究方向为机械振动分析。

E-mail:229826413@qq.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