

# 6061-T6铝合金弧形槽超声冲击处理残余应力场研究

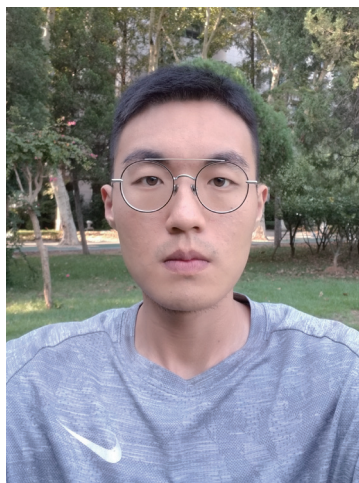
胡神阳, 耿其东, 缪兴华, 汪 炜

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 研究经超声冲击处理后 6061-T6 铝合金试件弧形槽表层残余应力场的形成与应力分布特点。借助有限元分析软件, 模拟弧形槽经超声冲击处理后残余应力场分布, 同时进行正交工艺试验, 对比仿真结果, 探究不同工艺参数对冲击后弧形槽底面残余应力值的影响规律。结果表明, 超声冲击处理在弧形槽底面形成了厚度约为 0.35mm 的残余压应力层, 残余应力沿深度方向先增大后减小, 最大残余应力值可达约 -362.5MPa。工艺试验与相同条件下有限元模拟得到的各工艺参数对槽底表面残余应力值的影响趋势基本一致, 弧形槽底面残余应力值随工具振幅的增大而增大, 随加工间隙的增加有小幅减小, 而工件移动速度的改变则对应力值几乎没有影响。

**关键词:** 超声冲击; 弧形槽; 有限元模拟; 残余应力; 铝合金

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.063



胡神阳

硕士研究生, 主要从事超声加工方面的研究。

超声冲击处理(Ultrasonic Impact Treatment, UIT)是一种近年来快速发展的金属材料表面强化技术。其以大功率的超声电源作为能量供给, 经由换能器将高频电信号转

化为换能器端面的超声频机械振动, 再通过变幅杆的聚能和振幅放大作用后, 驱动装置前端冲击头高速撞击金属材料表面, 使材料表层产生塑性变形, 并形成残余压应力<sup>[1-2]</sup>。相较于喷丸、滚压、激光冲击等其他强化技术, 超声冲击处理具有执行机构轻便、操作简单、噪声小、效率高、成本低且节约能耗等优势, 但也存在一些不足, 适用的加工对象及所能处理的工件区域范围比较有限, 且超声冲击处理的能量输出不太稳定, 经处理后的工件表面一般会比较粗糙, 不当的操作可能会产生表面微裂纹。在对试件使用性能的改善方面, 冲击处理在材料表层会形成一层致密的塑性变形层, 可以细化晶粒、均化表层组织结构以及消除金属表层存在的一些显微组织缺陷, 同时冲击产生的残余压应力层可以显著提高试件的硬度和强度, 有效抑制表面疲劳裂纹的

萌生, 从而提高试件的抗疲劳性能, 延长使用寿命。

目前, 超声冲击处理技术主要用于焊接接头疲劳性能的改善与材料表面改性处理, 国内外学者和单位做了许多这方面的研究。装甲兵工程学院的李占明等<sup>[3]</sup>的研究证实超声冲击处理可以显著提高 2A12 铝合金焊接接头的疲劳强度, 并引入了有益的残余压应力。日本的 Shimanuki 等<sup>[4]</sup>研究了 UIT 对焊接接头在不同应力比下疲劳寿命的影响。刘超<sup>[5]</sup>运用超声冲击处理对不锈钢材料进行了表面强化处理研究。Hairullin 等<sup>[6]</sup>研究了 CP-Ti 经超声冲击处理后组织结构与性能的改变, 结果表明, 冲击处理使材料表层形成孪晶组织, 并使表层显微硬度得到增加。在对金属材料强化的数值模拟方面, 超声喷丸加工的相关研究较多<sup>[7-10]</sup>, 但目前对超声冲击处理过程进行数值

模拟,尤其是以凹槽这样的非平面结构为处理对象的研究则鲜有报道。

本文借助有限元分析软件 ABAQUS 对 6061-T6 铝合金试件弧形槽内壁经超声冲击处理后的残余应力分布情况进行了有限元仿真,并构建了试验平台,对试件进行超声冲击处理试验,运用 X 射线应力测定仪对工件弧形槽底表面残余应力值进行测定。对比仿真结果与试验结果,研究了不同工艺参数对残余应力的影响。

### 弧形槽超声冲击处理原理

铝合金试件弧形槽超声冲击处理原理如图 1 所示。工作台与机床坐标轴相固定,试件被安装于工作台上,其上弧形槽与工具头前端球面的半径尺寸相同。实际冲击处理过程中,在超声电源的驱动下,经由振动系统的传导,前端冲击工具头以振幅  $A$  对弧形槽内壁进行纵向高频冲击,工具头与槽底部留有一定的加工间隙  $\delta$ ,以免系统负载过大,对装置造成破坏,同时设定机床起终坐标,试件在坐标轴带动下以一定速度  $v_x$  沿缺口轴向往复移动,实现冲击强化对槽内壁的覆盖。

### 超声冲击处理有限元分析

#### 1 有限元模型建立

实际超声冲击处理时,弧形槽底面某一具体位置在冲击后所呈现出的应力应变状态应是该位置及其相邻一定区域内冲击效果共同作用与叠加的结果,但考虑到直接模拟叠加物理过程的复杂性,并参考其他研究者对超声冲击处理过程进行模拟的方法,对模型进行简化,以单个工具头冲击试件的过程进行模拟为例,同时为相同条件下的试验提供所需的参照。本文利用 ABAQUS 软件建立超声冲击处理弧形槽的有限元模型,如图 2 所示。在确保分析结果准确性的前提下,为了提高计算效率,截

取实际试件中的一部分作为工件模型,同时整个模型建立为 1/2 模型。冲击工具头高 15mm,直径为 3mm,下面的试件厚度为 3mm,其上的弧形槽深 1mm,半径为 1.5mm。整个模型的网格化分采用了两种单元类型,其中,试件弧形槽表层附近的加密区域单元类型为八节点线性减缩积分单元 C3D8R。

#### 2 材料模型

超声冲击处理过程实质上是冲击工具头与工件表面高频次、短时间的接触与碰撞,涉及瞬态动力学分析,是一个高度非线性问题。冲击过程中,6061-T6 铝合金工件表层材料产生剧烈的高应变速率的弹塑性变形,因此本文中的模拟采用 Johnson-Cook 本构模型,材料的屈服极限表达为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left( 1 - T^{*m} \right)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为材料模型常数;  $A$  为初始屈服应力;  $B$  和  $n$  分别为材料应变硬化模量和硬化指数;  $C$  为材料应变率强化参数;  $m$  为温度软化效应参数;  $\varepsilon$  为等效塑性应变;  $\dot{\varepsilon}^*$  为无量纲化等效塑性应变率;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$  为无量纲化温度,其中,  $T_r$  为参考温度;  $T_m$  为材料的熔点温度;  $T$  为试验温度<sup>[11-12]</sup>。由于试验在室温下进行,材料的热软化效应可以不做考虑,只需确定  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  4 个本构参数。材料具体的力学性能参数如表 1 所示。

试验中,冲击工具头材料采用表面经热处理强化后的 45# 钢,其强度和硬度远大于试件铝合金材料,在分析过程中可设置为刚体。

#### 3 冲击模拟条件设定

冲击过程模拟采用显式动力学分析,工具头与弧形槽内表面之间的

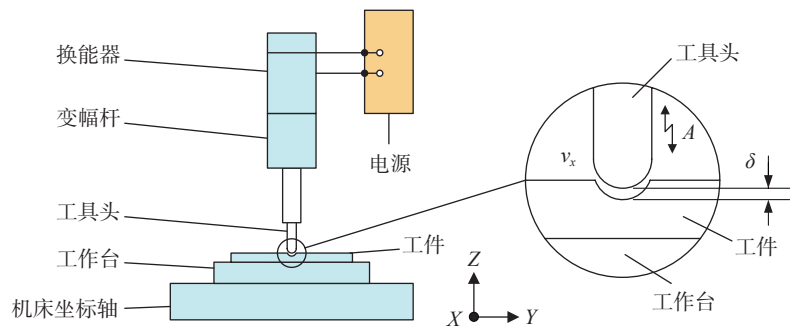


图1 试验原理图

Fig.1 Test schematic diagram

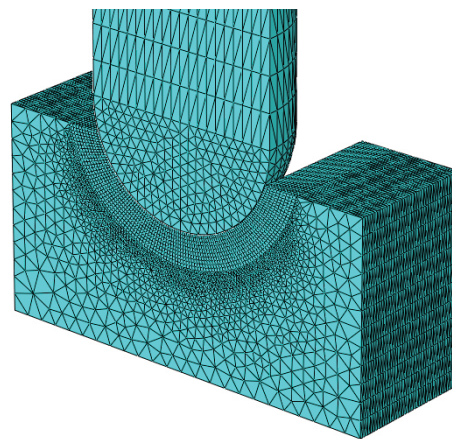


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

接触定义为面面接触,接触属性中两者之间的法向和切向行为均采用罚函数方法来控制。根据实际超声冲击强化时的工艺参数,以图2所示模型位置为初始位置,对冲击工具头施加一个垂直方向频率为28kHz,振幅为12 $\mu\text{m}$ 的周期位移载荷,加工间隙设定为2 $\mu\text{m}$ ,工件相对工具的移动速度设定为1mm/s。

#### 4 有限元分析结果

图3为试件弧形槽内表面经超声冲击处理后的应力分布云图,只截取了图2中所示下半部的弧形槽工件部分,且为了更好地展示表层材料内部的应力变化,沿弧形槽轴向做了截面处理。从图3中可以看到,弧形槽内表面表层区域在冲击后产生残余压应力,且在槽底附近区域效果最为显著,同时残余应力沿深度方向呈现出先增大后逐渐减小的状态,随着深度的进一步增加,最后转变为拉应力。

试件沿图3中截面深度方向的残余应力分布如图4所示,深度以变形后弧形槽底面为基准。从图中可以清楚看到,材料表面在经超声冲击强化后的残余应力值约为-222.9MPa,随着深度增加应力值不断增大,在距离表面约0.1mm处达到最大,最大残余应力值约为-362.5MPa,之后应力值开始逐渐减小直至转变为残余拉应力,整个压应力层深度可以达到约0.35mm,应力状态改变后,拉应力先是小幅增加而后缓慢减小最后趋于零。

根据Johnson的接触力学理论,可以将冲击过程分为弹性变形、弹塑性变形以及塑性变形过程,且由理论可知超声冲击平面材料过程中产生的形变凹坑受到的内应力与工件材料的弹性模量、泊松比、屈服强度以及凹坑的半径有关,且直接影响着冲击后表层材料内部的应力应变,冲击效果的不断增加会使冲击影响层逐渐向材料内部推进,使应力场的分布

深度和最大残余应力的分布深度有一定增加,但对最大残余压应力值的影响会较小,最大残余压应力值主要与材料屈服强度有关。

### 超声冲击处理试验

#### 1 试验设备

试验所采用工具头直径为3mm,之所以设计的比较细小,是由于试验所用的超声电源本身功率有限,同时在变幅杆大端半径尺寸一定的条件下,前端工具头的半径尺寸越小,变幅杆的放大系数越大,对换能器端面振幅的放大效果越好,也可以有一个更好的聚能作用,加之考虑到

加工方面的因素,工具头最终选择了3mm的直径尺寸。

工件为厚度3mm,宽度15mm的6061-T6铝合金平板试件,平板一侧中心位置沿宽度方向开有弧形槽。试验所用机床为经自行改造后用于超声精密加工的数控机床。试验前,首先将工件弧形槽沿机床X方向固定,但紧固装置上的螺钉轻微拧紧即可,以便后续调整,之后,通过机床触摸屏调节冲击工具头的坐标位置,调整至工具头基本位于弧形槽正上方,然后将水平坐标清零,并将Z轴移动速度调至尽量小,缓慢使工具头逐渐下降,与此同时对试件的水平位置进

表1 6061-T6铝合金力学性能参数

Table 1 Mechanical properties parameters of 6061-T6 aluminum alloy

| 弹性模量 /GPa | 密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 泊松比  | A/MPa | B/MPa | n    | C     |
|-----------|---|------|-------|-------|------|-------|
| 71        | 2800                                    | 0.33 | 285   | 483   | 0.11 | 0.013 |

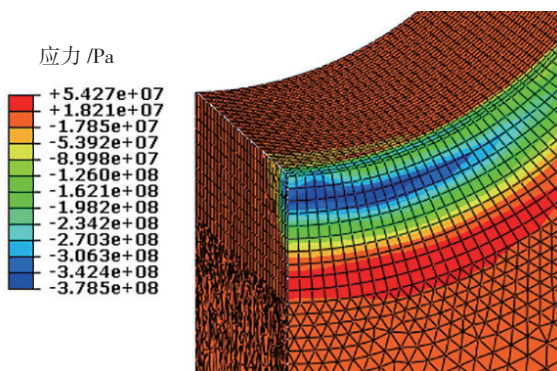


图3 等效应力分布云图

Fig.3 Equivalent stress distribution cloud map

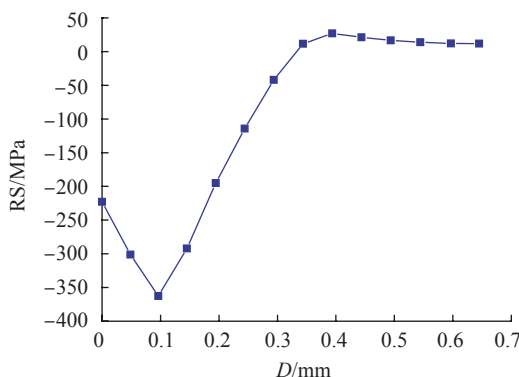


图4 深度方向残余应力分布

Fig.4 Residual stress distribution in depth direction

行微调,直到工具前端球面与弧形槽内表面基本贴合(留有一定间隙),并能够使工具头在弧形槽内较为顺畅地往复移动后,最终固定工件,由于工具头与弧形槽的半径尺寸相同,以此来保证工具头与槽的位置精度。同时将加工间隙为零的位置定为竖直方向坐标零点,机床坐标本身可以调节的最小值为1 $\mu\text{m}$ ,坐标值的变化也可以在触摸屏上准确显示出来,以保证加工时的间隙精度。

试验时,工件相对工具的往复移动速度可以通过机床触摸屏直接进行设定。试验所用电源为自主开发的28kHz可编程超声恒流电源,可以通过更改电源内置程序中电流的大小,来改变工具头前端的输出振幅,同时,也可以更改程序中临界阻抗值的大小,来控制实际冲击强化时振动系统的负载状态,从而实现对加工间隙的调整。试验相关设备如图5所示。试验后,运用X射线应力测定仪测量工件弧形槽底表面残余应力。

## 2 试验方案与结果分析

试验方案采用3因素、3水平的正交试验,具体工艺参数设定及相应测量结果与同等工艺条件下的有限元模拟结果如表2所示。

冲击工具头的振动由超声电源驱动,因此,电源的输出功率决定着工具振幅的大小。本试验中所采用的是恒流超声电源,可以通过调节电源内置程序中电流的大小来改变电源输出功率,前期借助激光测振仪对系统振动性能测试的结果显示,电流的数值与工具头振幅的大小呈近似的线性正相关关系,振幅最大可以达到接近17 $\mu\text{m}$ ,基于工具振幅越大,加工效果越好的假设,选取了12 $\mu\text{m}$ 、14 $\mu\text{m}$ 、16 $\mu\text{m}$ 这3个水平的振幅作为试验工艺参数。加工间隙的选择主要依据的是前期试加工对参数的调整,间隙过小,会导致振动系统负载过大,从而使电源报错停止运行,

而间隙过大,则难以保证较明显的加工效果,因此选取了2 $\mu\text{m}$ 、4 $\mu\text{m}$ 、6 $\mu\text{m}$ 这3个适中的间隙值。

表3对表2的最后两列数据进行分析,得出按正交试验原则计算的测量值与模拟值对应各参数指标取不同水平的均值。观察表3中均值 $K$ 的结果可以看到,试验与模拟均在振幅和加工间隙取第一水平,移动速

度取第二水平时得到最大残余应力值。表3中极差 $R$ 的大小则反映出工具头振幅对冲击后表面残余应力值的影响最为显著,加工间隙的影响程度次之,移动速度与应力值的相关性最小。

根据表3中的数据做图6,可以更为直观地看到不同工艺参数与冲击后表面残余应力值的关系。从整



图5 加工系统图  
Fig.5 Machining system

表2 试验方案与结果  
Table 2 Experimental scheme and results

| 编号 | 振幅 $A/\mu\text{m}$ | 加工间隙 $\delta/\mu\text{m}$ | 工件移动速度 $v_x/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 表面残余应力 /MPa |      |
|----|--------------------|---------------------------|--|-------------|------|
|    |                    |                           |  | 模拟值         | 测量值  |
| 1  | 12                 | 2                         | 1  | -222.91     | -234 |
| 2  | 12                 | 4                         | 1.5  | -219.77     | -235 |
| 3  | 12                 | 6                         | 2  | -215.38     | -219 |
| 4  | 14                 | 2                         | 1.5  | -235.79     | -245 |
| 5  | 14                 | 4                         | 2  | -230.03     | -235 |
| 6  | 14                 | 6                         | 1  | -227.34     | -230 |
| 7  | 16                 | 2                         | 2  | -244.60     | -258 |
| 8  | 16                 | 4                         | 1  | -241.24     | -257 |
| 9  | 16                 | 6                         | 1.5  | -237.92     | -255 |

表3 结果数据分析  
Table 3 Result data analysis

| 参数指标 |       | 振幅 $A$  | 加工间隙 $\delta$ | 工件移动速度 $v_x$ |
|------|-------|---------|---------------|--------------|
| 模拟值  | $K_1$ | -219.35 | -234.43       | -230.50      |
|      | $K_2$ | -231.05 | -230.35       | -231.16      |
|      | $K_3$ | -241.25 | -226.88       | -230.00      |
|      | $R$   | 21.9    | 7.55          | 1.16         |
| 测量值  | $K_1$ | -229.3  | -245.7        | -240.3       |
|      | $K_2$ | -236.7  | -242.3        | -245.0       |
|      | $K_3$ | -256.7  | -234.7        | -237.3       |
|      | $R$   | 27.4    | 11            | 7.7          |

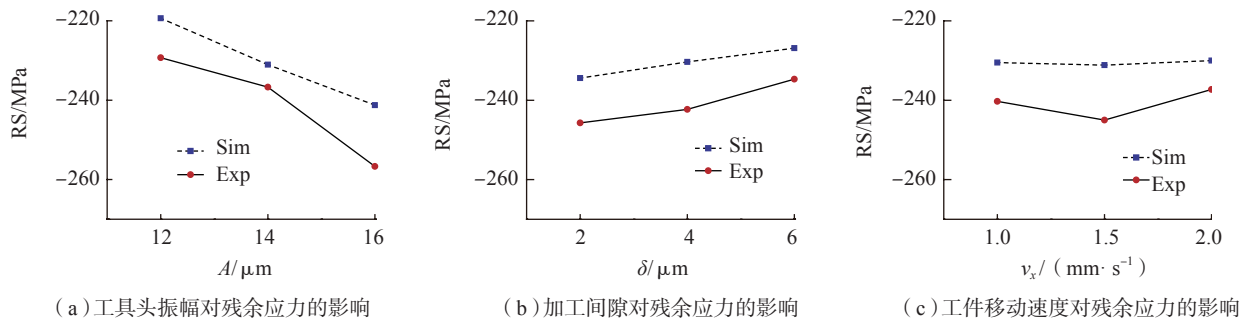


图6 各工艺参数对残余应力的影响  
Fig.6 Effects of various process parameters on residual stress

体上看,试验与模拟不同工艺条件对冲击后残余应力值的影响趋势基本是一致的,试验所测值要略大于模拟值。具体而言,在超声冲击处理后,试件弧形槽底面残余应力值随工具头前端振幅的增加而增大,随加工间隙的增加有小幅减小,而工件相对工具移动速度的改变则对应力值的影响很小。

在超声冲击强化过程中,工具头前端振幅越大,加工间隙越小,工件弧形槽内表面所受到的高频撞击越为剧烈,超声电源经由振动系统产生的机械能也将更多地作用于材料表层,表层金属材料在冲击作用下晶粒不断细化,组织结构变得更为致密,相应地在材料表层区域产生更大的残余应力。而对于移动速度这一试验参数,由于工具振动为超声频次这一特性,工具前端每次与工件的接触时间极短,且在短时间内多次接触,因此,在一定加工时间条件下,工件相对于工具的移动速度的改变对实际冲击强化效果的影响是非常小的,对残余应力值的影响也就微乎其微。

## 结论

(1) 超声冲击处理使 6061-T6 铝合金试件弧形槽表层区域形成了残余压应力层,且以槽底区域最为显著。

(2) 在弧形槽底面,残余应力沿深度方向先增大后减小,最后转变

为残余拉应力。最大残余应力值可达约  $-362.5\text{MPa}$ ,出现在距表面约  $0.1\text{mm}$  处,整个压应力层深度约为  $0.35\text{mm}$ 。

(3) 工艺试验与相同条件下有限元模拟得到的各工艺参数对表面残余应力值的影响趋势基本一致,工具振幅的改变对应力值的影响最为显著。

(4) 超声冲击处理后,试件弧形槽底面残余应力值随工具头前端振幅的增加而增大,随加工间隙的增加有小幅减小,而工件相对工具移动速度的改变则对应力值几乎没有影响。

## 参考文献

- [1] 朱有利,王燕礼,边飞龙,等.金属材料超声表面强化技术的研究与应用进展[J].机械工程学报,2014,50(20):35-45.
- [2] ZHU Youli, WANG Yanli, BIAN Feilong, et al. Progresses on research and application of metal ultrasonic surface enhancement technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 35-45.
- [3] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9-11): 1239-1247.
- [4] 李占明,朱有利,辛毅.超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J].航空材料学报,2011,31(2):28-32.
- [5] LI Zhanming, ZHU Youli, XIN Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy

welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 28-32.

[4] SHIMANUKI H, OKAWA T. Effect of stress ratio on the enhancement of fatigue strength in high performance steel welded joints by ultrasonic impact treatment[J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1): 155-161.

[5] 刘超.超声冲击强化 AISI304 奥氏体不锈钢实验研究[D].大连:大连理工大学,2012.

LIU Chao. Study on strengthening of AISI304 austenite stainless steel by ultrasonic impact treatment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[6] HAIRULLIN R, KOZELSKAYA A, KAZACHENOK M. Effect of ultrasonic impact treatment on microstructure and mechanical properties of commercial purity titanium[J]. Key Engineering Materials, 2016, 685: 330-333.

[7] 郭超亚,鲁世红.铝合金超声喷丸残余应力场[J].中国表面工程,2014,27(2):75-80.

GUO Chaoya, LU Shihong. Residual stress of ultrasonic shot peened aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 75-80.

[8] THIBAUT C, LI J, DANIEL N, et al. Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2080-2090.

[9] 黄舒,周建忠,孙月庆,等.激光喷丸强化 6061-T6 铝合金板料的表面完整性研究[J].应用激光,2007,27(6):450-455.

HUANG Shu, ZHOU Jianzhong, SUN

Yueqing, et al. Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 450-455.

[10] YOSHIKAZU T, MINORU U, KOICHI T. Comparison of nanocrystalline surface layer in steels formed by air blast and ultrasonic shot peening[J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 376-379.

[11] 盈亮,戴明华,胡平,等. 6061-T6 铝合金高温本构模型及温成形数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2015(7): 1815-1821.

YING Liang, DAI Minghua, HU Ping, et al. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015(7): 1815-1821.

[12] 谢灿军,童明波,刘富,等. 7075-

T6 铝合金动态力学试验及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2014(18): 110-114.

XIE Canjun, TONG Mingbo, LIU Fu, et al. Dynamic tests and constitutive model for 7075-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(18): 110-114.

通讯作者: 汪伟, 教授, 研究方向为精密微细特种加工, E-mail: wangwei@nuaa.edu.cn.

## Residual Stress Field of 6061-T6 Aluminum Alloy Arc Groove Induced by Ultrasonic Impact Treatment

HU Shenyang, GENG Qidong, MIAO Xinghua, WANG Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** The work aims to study the formation and stress distribution of the surface residual stress field of the arc groove of 6061-T6 aluminum alloy specimen after ultrasonic impact treatment. By means of finite element analysis software, the residual stress field distribution of the arc groove is simulated by ultrasonic impact treatment, and the effect of different technological parameters on the residual stress value on the bottom surface of the arc groove is investigated by comparing the simulation results with the orthogonal process test. The results show that the ultrasonic impact treatment has formed a residual compressive stress layer with a thickness of about 0.35mm at the bottom of the arc groove, the residual stress first increased and then decreased along the depth direction, and the maximum residual stress value can reach about -362.5MPa. The process test is basically consistent with the influence trend of various process parameters on the residual stress value of the bottom surface of the groove obtained by the finite element simulation under the same condition, the residual stress value at the bottom of the arc groove increases with the increase of tool vibration amplitude, and decreases slightly with the increase of machining gap, while the change of workpiece movement velocity has little effect on the stress value.

**Keywords:** Ultrasonic impact treatment; Arc groove; Finite element simulation; Residual stress; Aluminum alloy

(责编 大漠)

(上接第 62 页)

**[ABSTRACT]** The magnetic grinding processing technology can adaptively grind and process complex free-form surfaces because its processing tool is a flexible magnetic particle brush. In order to improve the processing efficiency of magnetic grinding, introducing ultrasonic vibration and changing the shape of the magnetic pole, the ultrasonic vibration assisted magnetic grinding system is established; the selection of magnetic field source and the basic idea of magnetic pole shape optimization design are discussed; through theoretical analysis and experimental results, introducing ultrasonic vibration excitation can increase the instantaneous grinding pressure of magnetic abrasive particles and improve the material removal rate to achieve synergistic effect. Changing the shape of the magnetic pole can introduce the rate of change of the magnetic field strength and promote the abrasive cutting edge. Self-renewal to improve surface quality. The above comprehensive effects can improve the efficiency of magnetic grinding processing and the grinding quality of the workpiece surface.

**Keywords:** Ultrasonic vibration; Magnetic abrasive finishing; Magnetic pole shape; Optimal design; Finishing pressure; Material removal rate

(责编 大漠)