

# 超声冲击对电弧增材制造铝合金应力影响的有限元分析

梁晖<sup>1</sup>, 李攀<sup>1</sup>, 沈鑫<sup>2</sup>, 陈力帆<sup>1</sup>, 戴俊辉<sup>1</sup>, 李东<sup>3</sup>, 杨东青<sup>1,3</sup>

(1. 南京理工大学, 受控电弧智能增材技术工业与信息化部重点实验室, 南京, 210094; 2. 中国兵器工业集团, 晋西工业集团有限责任公司, 太原, 030000; 3. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广州, 510715)

**摘要:** 采用有限元分析方法对附加超声冲击下电弧增材制造 2219 铝合金的过程进行数值模拟, 并研究了其应力场变化以及工件变形情况的变化. 结果表明, 附加超声冲击能使多层多道沉积过程中沉积件边缘处以及基板中靠近沉积件的区域的应力集中程度下降. 多层多道沉积过程中附加超声冲击能有效降低沉积件内部的应力. 在附加超声冲击后道间交界处的应力范围由 156.1 ~ 211.6 MPa 下降至 138.8 ~ 181.9 MPa, 表面平均残余应力下降 22.3%. 附加超声冲击下, 多层多道电弧增材构件最大变形量由 0.61 mm 下降至 0.53 mm, 平均变形量由 0.33 mm 下降至 0.27 mm. 试验实际测量所得的与有限元计算的多层多道沉积件上表面的应力分布规律相近, 证明模拟结果的可靠.

**创新点:** (1) 建立了多层多道电弧增材有限元模型, 并合理地简化超声冲击载荷.  
(2) 利用超声冲击可显著降低电弧增材制造残余应力和变形.

**关键词:** 超声冲击; 2219 铝合金; 电弧增材制造; 有限元分析

**中图分类号:** TG 444      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230304003

## 0 序言

电弧增材制造 (wire and arc additive manufacture, WAAM) 技术以电弧为载能束, 采用逐道逐层的方式直接成形实体金属, 在制造大中型零件方面具有巨大优势<sup>[1-2]</sup>, 并且由于设备成本低、材料利用率高、沉积效率高等特点引起国内外广泛关注. 在实际成形过程中, 由于电弧多次加热致使构件受热不均匀引起较大的热应力<sup>[3]</sup>, 在增材完成后存在较大的残余应力和变形, 严重影响增材质量和成形精度, 除此之外, 较大的残余应力是裂纹扩展、疲劳强度降低的重要因素<sup>[4]</sup>, 减小残余应力是电弧增材制造领域的研究热点. 权国政等人<sup>[5]</sup>就电弧熔丝增材制造残余应力形成机理中介绍残余应力是在消除外力或不均匀的温度场等作用后仍留在材料内部的平衡应力, 绝大多数制造工艺都会产生残余应力. 姚波等人<sup>[6]</sup>在成形过程的热应力变形规律的过

程中, 针对电弧增材制造过程中 3 种典型薄壁结构, 采用特定的基板约束方式, 深入分析了不同基板厚度下结构件的热应力变形规律, 结果发现, 增加基板厚度不仅可以提高刚度, 增加约束, 而且能强化散热, 降低热累积, 对减小成形件最终变形和残余应力非常有利; 对于矩形框构件来说, 基板结构和约束方式对成形件热应力演化行为有较大影响. Ding 等人<sup>[7]</sup>研究发现, 在 WAAM 的热循环过程中所经历的峰值温度决定该点的残余应力, 并建立预测 WAAM 过程中残余应力演变的有限元模型, 为残余应力控制和工艺参数优化提供了依据.

已有研究发现, 在熔敷金属加入超声冲击 (ultrasonic impact, UI) 引起的声流和空化效应能有效细化材料的晶体结构<sup>[8-11]</sup>. 在电弧增材制造过程中施加超声辅助, 不仅会对熔池中传入超声冲击, 还能对沉积层施加高频载荷, 起到消除电弧增材制造过程的残余应力的作用<sup>[12-14]</sup>. Zhou 等人<sup>[15]</sup>对激光金属沉积得到的 304 不锈钢样品进行超声冲击处理, 研究超声冲击对增材构件的塑性变形的影响, 结果表明, 探头的速度、冲击应力和动能大于临界值时, 会发生塑性变形, 残余应力状态从拉应力转变为压应力, 提高了零件的疲劳性能. Yang 等

收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2020M682930); 国家自然科学基金资助项目 (52105367); 江苏省博士后资助计划项目 (2021K591C).

人<sup>[16]</sup>施加超声冲击辅助 WAAM Ti-6Al-4V 合金单墙体, 研究发现, 施加超声辅助后工件的平均抗拉强度得到提升, 残余应力有效减低。

利用超声冲击方法减少电弧增材应力, 建立超声冲击模型, 采取有限元分析的方法, 以获得低应力、小变形的电弧增材工艺, 为工程实际应用中提供性能更加良好的材料和工件。

## 1 电弧增材制造有限元模型

### 1.1 几何模型的建立

以实际试验中所得到的多层多道沉积件为依据, 对有限元分析所用的构件进行建模。由于基板对电弧增材制造过程中的散热和变形有着很大的影响, 因此在多层多道沉积过程的模拟中均将基板包含于模型中。图 1 为电弧增材 2219 铝合金试件。图 1b 为在增材成形时电弧后方 40mm 熔敷金属上施加超声冲击铝合金试件。试验使用直径为 1.2 mm 的 ER2319 铝合金丝材, 在尺寸 400 mm × 300 mm × 10 mm 的 2A12 铝合金板上进行多层多道堆积。电弧增材制造工艺为 CMT + Pulse 模式, 送丝速度为 0.45 m/min, 电弧移动速度为 8.0 m/min, 每一层中沉积道的搭接间距为 4.1 mm。超声冲击工艺参数: 超声功率为 1 kW, 冲击频率为 40 kHz, 冲击振幅为 100 μm。多层多道模型分为 5 层, 每一层为 5 道, 每一道的沉积时间同样为 15 s, 层间等待时间为 10 s。所建立的几何模型如图 2 所示, 沉积件尺寸 140 mm × 40 mm × 20 mm。

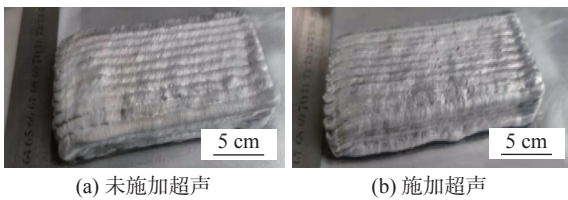


图 1 电弧增材制造 2219 铝合金多层多道沉积件

Fig. 1 2219 aluminum alloy multi-layer multi-pass parts deposited by WAAM. (a) without UI; (b) with UI

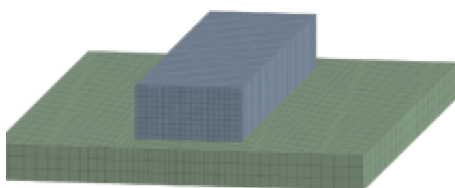


图 2 多层多道沉积件几何模型

Fig. 2 Geometric model of multi-layer multi-pass parts

在进行电弧增材制造有限元模拟时所用的材料热物理性能参数如图 3 所示。

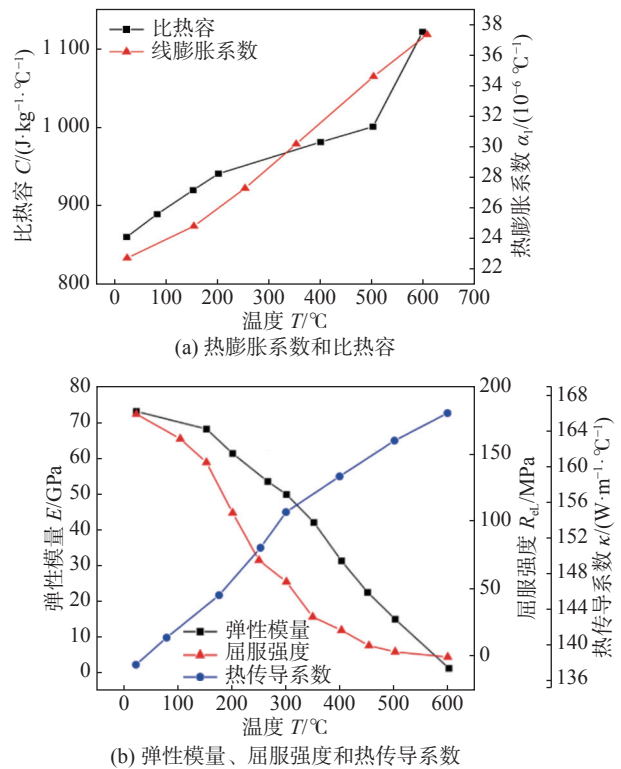


图 3 2219 铝合金热物理性能参数

Fig. 3 Thermophysical properties of 2219 aluminum alloy. (a) coefficient of thermal expansion and specific heat capacity; (b) elastic modulus, yield strength and thermal conductivity

### 1.2 热源模型及边界条件

根据所使用的电弧增材制造方式、基板厚度以及沉积道尺寸, 选择常规双椭球热源模型来进行电弧增材热力耦合计算。

在电弧增材制造过程的初始阶段, 热源还未产生, 将整个工件温度视为与室温相同。即整个模型为均匀分布的 22 °C。由于初始状态的工件内部存在的残余应力较小, 故做简化处理, 将初始状态下模型的应力、应变均设定为 0。

对于边界条件, 需要对工件状态进行分析。在电弧增材制造过程中, 工件外表面一直与空气接触, 不断发生换热, 其中主要以对流换热为主。在有限元分析中, 将工件的外表面设定了一个随温度变化的换热系数, 其具体值如图 4 所示。对工件力学状态进行分析, 在实际电弧增材制造过程中, 为了防止增材制造中产生的应力使工件发生大变形影响沉积件的精度, 会使用 4 个夹具分别对基板的 4 个角进行固定, 限制其变形。因此, 为了模拟这种

夹具的影响,将基板的4个边角均附加上了固定支撑,使其位移为零.同时,在电弧增材制造过程中,基板下底面一直与工作台接触,使下底面位移受到限制.在有限元分析中,同样对下底面施加支撑,使下底面无法发生垂直于底面方向上的位移.

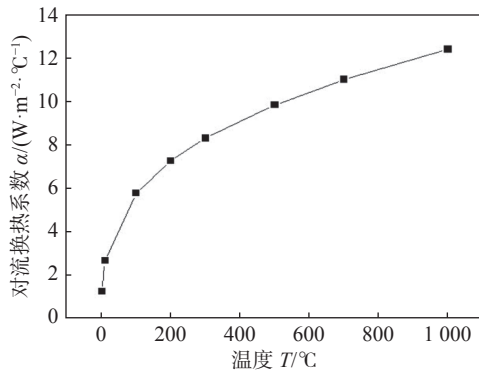


图 4 对流换热系数

Fig. 4 Convective heat transfer coefficient

## 2 超声冲击载荷的简化

由于模型的限制以及简化计算的考虑,将这种高频冲击简化为正弦分布的高频移动载荷.其他学者在研究超声冲击处理对焊接过程残余应力的研究中,往往通过对冲击头施加的运动方程来模拟超声冲击过程<sup>[7-8]</sup>.

$$X(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中:  $t$  为超声冲击时间;  $A$  为超声冲击振幅;  $f$  为超声冲击频率.由此可以得出,超声冲击过程中冲击头对构件产生的压力载荷方程为

$$F(t) = |4(\pi f)^2 mA \sin(2\pi ft)| \quad (2)$$

式中:  $m$  为变幅杆加上冲击头的质量.

将超声冲击产生的压力视为作用于一点,而在实际中冲击载荷的作用范围为整个冲击头的半径范围,并且范围内冲击载荷分布并不均匀.将冲击载荷视为中心点作用力最大,并在三维空间内呈正态分布.由此所得冲击载荷表达式为

$$F(t) = \left| 4(\pi f)^2 mA \sin(2\pi ft) e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{r^2}\right)} \right| \quad (3)$$

式中:  $r$  为超声冲击头半径; 冲击载荷最大值  $F_m = 4(\pi f)^2 mA$ .

## 3 结果与分析

### 3.1 多道多层沉积过程的温度场

附加超声冲击对增材制造过程中的温度分布影响很小.图 5 为无超声冲击多道多层沉积过程中第一层沉积完成时(第 75 s)、第三层沉积至中段时(第 207.5 s)、沉积完成时(第 415 s)、沉积件冷却至 500 s 以及沉积件冷却至 900 s 时的温度场分布情况.从图 5 可以看出,在增材过程中高温区域主要集中在热源中心附近.随着沉积层不断堆积,沉积件中的温度峰值不断提高,虽然有层间冷却,但在多道多层沉积过程中的热积累效应依然严重.当沉积完成冷却至 500 s 时,沉积件与基板之间仍然存在一定的温差,并且沉积件右侧的温度也要略高于左侧温度.当冷却至 900 s 时,沉积件温度基本均匀,整个工件的状态可视为稳定.

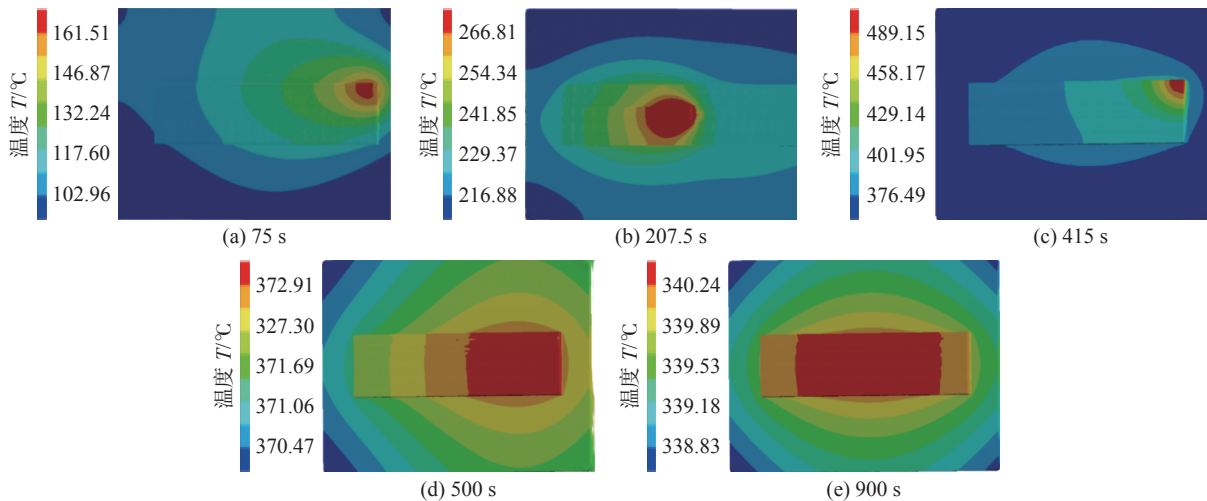


图 5 不同时刻多层多道沉积过程温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of multi-layer multi-pass deposition at different time. (a) 75 s; (b) 207.5 s; (c) 415 s; (d) 500 s; (e) 900 s

### 3.2 多道多层沉积过程的应力演变

图6为未附加超声下和附加超声冲击两种条件下,工件第1层沉积完成时、第3层沉积至中段时、沉积完成时、以及沉积件冷却至900 s时表面的等效应力分布情况。在第1层沉积完成时,多道多层的应力集中区域主要集中在沉积件的边缘位置、基板与沉积件的交界处以及基板的4个边角处。另外,每一道沉积道之间也存在较大的应力集中,这主要是由于降温较快,新的沉积道与旧的沉

积道之间存在较大的温差,变形趋势不一致导致的。在附加超声冲击的情况下,由于冲击载荷带来的应力释放,沉积层之中道间的应力集中现象得到了明显的缓解。附加超声冲击后,道间交界处的应力范围由71.4~162.8 MPa下降至63.9~137.4 MPa,基板边角处的最大应力没有明显变化,沉积件边缘处的最大应力值由209.9 MPa下降至187.4 MPa,基板与沉积件的交界处的最大应力值由203.9 MPa下降至173.5 MPa。

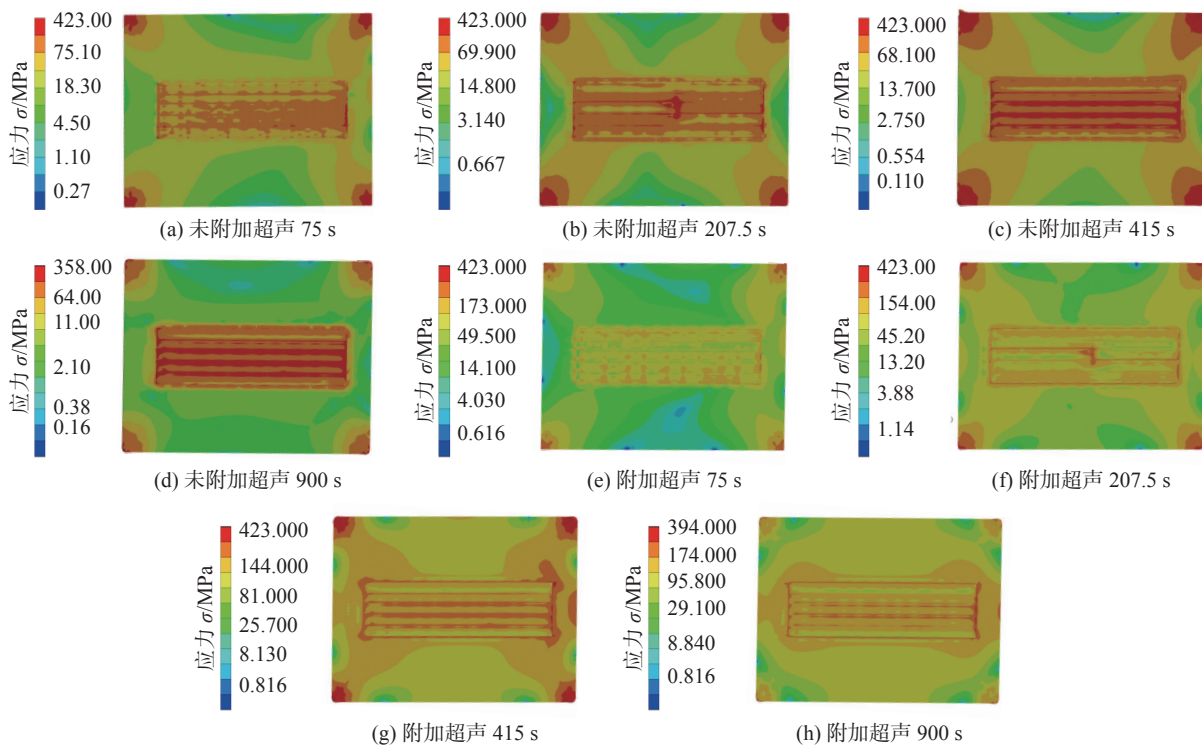


图6 不同时刻多层多道沉积过程等效应力分布

Fig. 6 Equivalent stress distribution of multi-layer multi-pass deposition at different time. (a) without UI 75 s; (b) without UI 207.5 s; (c) without UI 415 s; (d) without UI 900 s; (e) with UI 75 s; (f) with UI 207.5 s; (g) with UI 415 s; (h) with UI 900 s

当沉积进行至第3层中段位置时,上述的应力集中区域依然存在,并且新沉积成形的区域与上一层的沉积层之间存在着很大的应力集中,同时道间的应力集中程度有所加重。在附加超声冲击时,对道间应力集中的缓解作用更加明显,而在基板上同样存在一定应力,但分布更加均匀。在附加超声冲击后第3层第3道沉积道与上一层沉积层交界处的应力范围由210.4~233.2 MPa下降至187.2~209.4 MPa,第3层中道间交界处的应力范围由110.7~185.12 MPa下降至98.5~150.8 MPa。当沉积件成形完成时,由于热积累效应严重并且在多层多道件中沉积道降温速度较单道多层件中更快,

导致最后一层中的道间温差更大,产生的应力集中更为严重。同时由于沉积件与基板间的温差也变得更大,导致基板中靠近沉积件的区域的应力集中范围也变得更大。在附加超声冲击时,道间的应力集中得到了明显的缓解,最后一层表面的应力分布基本均匀。在附加超声冲击后最后一层中道间交界处的应力范围由141.6~217.6 MPa下降至127.3~184.7 MPa。

当冷却至900 s时,由于基板温度变得与沉积件温度基本一致,原本由于基板与沉积件变形趋势不一致导致的基板中靠近沉积件的区域的应力集中基本得到了消除,但沉积件层内道间的应力集中

的程度与范围基本与沉积完成时一致,没有得到缓解.而附加超声冲击的情况下,基板中应力分布较为均匀但仍然存在一定应力.道间的应力集中程度相较于未附加超声冲击时得到了明显的降低.在附加超声冲击后道间交界处的应力范围由 156.1 ~ 211.6 MPa 下降至 138.8 ~ 181.9 MPa. 未加超声冲击和附加超声冲击沉积件表面平均残余应力分别约为 167.6, 130.3 MPa.

### 3.3 基板残余应力与变形

为了进一步研究超声冲击对基板残余应力大小以及变形的影响,分别对两种情况下冷却至 900 s 时基板路径 AB 和路径 CD 上的应力进行了提取研究,选取路径位置示意图如图 7 所示. 应力分布情况如图 8 所示. 将 AB 方向定义为横向, CD 方向定义为纵向.

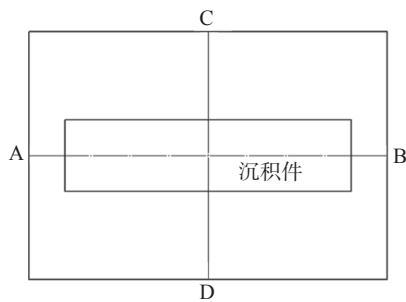


图 7 选取路径位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of selecting path location

路径 AB 上的横向应力分布在未附加超声冲击时与附加超声冲击时有明显的区别. 在未附加超声冲击的情况下,基板上的横向应力为较低的拉应力,在 0 ~ 25 MPa 之间. 而在进入沉积件区域时横向应力值迅速上升,在整个沉积件区域内基本为 100 ~ 150 MPa 的拉应力. 在附加超声冲击时,基板处的横向拉应力要略高于未附加超声冲击时,但在冲击载荷的作用下沉积件区域内未附加超声冲击时的较大的拉应力转变为了较小的压应力. 在未附加超声冲击时,路径 AB 上的纵向应力分布与横向应力分布类似,呈现出两边低中间高的特点. 在基板区域内纵向应力值很小,但在沉积件区域内为较大拉应力. 而在附加超声冲击时,沉积件中的纵向拉应力转变为纵向压应力,并且应力值有所下降. 但在基板上原本较小的应力转变为了较大的拉应力. 附加超声冲击下 AB 路径上沉积件区域内的横向应力由 85.6 ~ 157.8 MPa 范围内的拉应力转变为了 -7.59 ~ -45.8 MPa 的压应力;纵向应力由

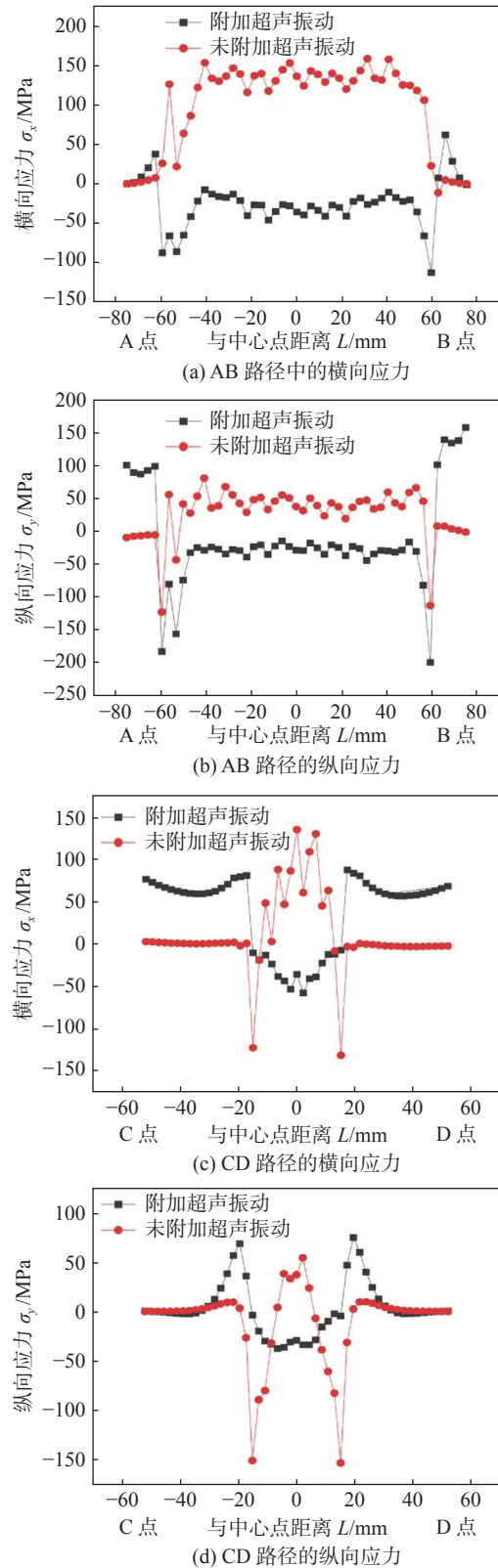


图 8 多层多道不同路径上应力分布情况

Fig. 8 Stress distribution in different paths. (a) transversal stress in AB path; (b) longitudinal stress in AB path; (c) transversal stress in CD path; (d) longitudinal stress in CD path

18.8 ~ 80.4 MPa 范围内的拉应力转变为了 -15.2 ~ -44.7 MPa 的压应力. 未附加超声冲击时 CD 路径

上的横向应力在基板区域内接近于 0,但在基板与沉积件交界处突变为较大的压应力,而在进入沉积件区域内后压应力又转变为由沉积件边缘向中心位置波动上升的拉应力.而在附加超声冲击的情况下,沉积件中由边缘向中心逐渐提高的拉应力转变为了由边缘向中心逐渐提高的压应力,并且应力的值得到了降低.但在基板区域内却出现了较大的拉应力.而对于纵向应力,在未附加超声冲击时的分布特点与横向应力类似,在基板处应力值很低,沉积件区域内两边为较大的压应力,越靠近中心位置压应力逐渐向着拉应力转变.而在附加超声冲击时,基板区域内为较大的纵向拉应力,但在沉积件区域内纵向应力较小,为由两边向中心逐渐提高的压应力.附加超声冲击下 AB 路径上沉积件区域内的横向应力范围由-131.3 ~ 135.4 MPa 转变为了-57.5 ~ -7.1 MPa;纵向应力范围由-153.0 ~ 54.2 MPa 转变为了-37.4 ~ 46.7 MPa. 为了研究附加超声冲击对多层多道增材完成后工件的变形情况的影响,分别提取了未附加超声冲击以及附加超声冲击的情况下冷却至 900 s 时沿路径 AB 以及路径 CD 上的变形量进行了研究.所得到的变形量分布如图 9 所示.在路径 AB 上,变形量的分布呈现中间

低两边高的特点,中心点位置变形量最低, A 点与 B 点为最高的两处.但其分布并非完全的对称分布,由 A 点至中心点的范围内,变形量下降较为均匀没有明显波动.而在 B 点至中心点的范围内变形量呈现明显的波动式下降.而在附加超声冲击时的变形量分布与未附加超声冲击时分布特征类似,但变形量的数值均得到了明显的降低.附加超声冲击下, AB 路径上最大变形量由 0.61 mm 下降至 0.53 mm,平均变形量由 0.33 mm 下降至 0.27 mm.

在路径 CD 上,基板区域内的变形量同样为由两边向中心区域逐渐降低并且与 AB 路径上不同两侧均为没有波动得均匀下降,但在沉积件区域内变形量的分布没有这种特征且分布较为均匀.在附加超声冲击时,两侧基板处的变形量虽然同样为由两边向中心区域逐渐降低,但出现了较大的不对称.基板区域中 C 点侧的变形量要明显高于 D 点侧.在沉积件区域内变形量呈现出中间低两边高的特点,但最低点不处于中心点位置而是中心点偏向 D 点 8 mm 左右的位置.整体上看附加超声冲击能降低 CD 路径上的变形程度.附加超声冲击下, CD 路径上最大变形量由 0.44 mm 下降至 0.38 mm,平均变形量由 0.24 mm 下降至 0.19 mm.

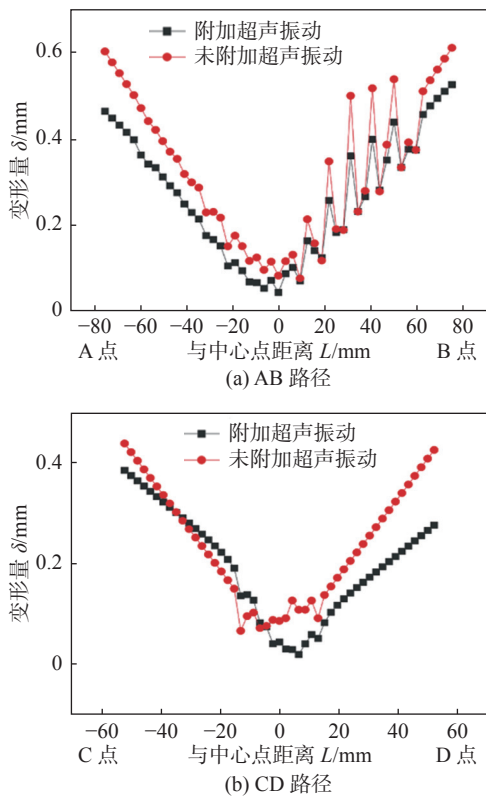


图 9 不同路径上变形量分布

Fig. 9 Deformation distribution in different paths. (a) AB path; (b) CD path

### 3.4 应力测量试验验证

为了进一步研究附加超声冲击对 2219 铝合金电弧增材制造构件残余应力的影响,并验证有限元模拟结果的可靠性.使用盲孔法对电弧增材制造多层多道沉积件的残余应力进行检测.测试位置示意图如图 10 所示.同时,提取了模拟所得的未附加超声冲击时以及附近超声冲击时多层多道沉积件上表面沿路径 EF 的应力分布进行对比研究,所得实测值与模拟值的结果如图 11 所示.



图 10 应力测试位置示意图

Fig. 10 Diagram of stress test location

从模拟结果来看,沉积件上表面的应力分布特点为边缘处应力高,内部应力较小且分布较为均匀,在附加超声冲击后应力值得到了明显下降.通过实测值与模拟值对比可以看出,由于测试误差以及模拟分析的局限性存在,实测值与模拟值不能完

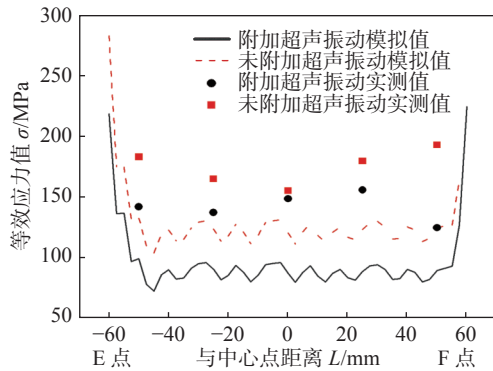


图 11 沉积件表面等效应力分布

Fig. 11 Surface equivalent stress distribution of deposited parts

全吻合,但两者的应力分布规律以及超声冲击引起的应力变化规律相近,证明了模拟结果的可靠性。

## 4 结论

(1) 通过建立多层多道电弧增材有限元模型,简化超声冲击载荷,对多层多道电弧增材沉积件的应力变形进行数值模拟。

(2) 多层多道沉积过程中附加超声冲击能有效降低沉积件内部的应力。在附加超声冲击后道间交界处的应力范围由 156.1 ~ 211.6 MPa 下降至 138.8 ~ 181.9 MPa,表面平均残余应力下降 22.3%。

(3) 附加超声冲击下,多层多道电弧增材构件最大变形量由 0.61 mm 下降至 0.53 mm,平均变形量由 0.33 mm 下降至 0.27 mm。

(4) 试验实际测量所得的与数值模拟所得的多层多道沉积件上表面的应力分布规律以及超声冲击引起的应力变化规律相近,证明模拟结果的可靠。

## 参考文献

[1] Davoud J, Vaneker T, Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts[J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109471.

[2] Evans S, Wang J, Qin J, *et al.* A review of WAAM for steel construction – Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions[J]. *Structures*, 2022, 44: 1506 – 1522.

[3] Ou W, Mukherjee T, Knapp G, *et al.* Fusion zone geometries,

cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1084 – 1094.

- [4] 张纪奎,陈百汇,张向. 电弧增材制造钛合金界面处残余应力及其影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(3): 920 – 926.
- Zhang Jikui, Chen Baihui, Zhang Xiang. Residual stress and its influence at the interface of titanium alloy fabricated by electric arc additive manufacturing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 920 – 926.
- [5] 权国政,杨焜,盛雪,等. 电弧熔丝增材制造残余应力控制方法综述[J]. *塑性工程学报*, 2021, 28(11): 1 – 10.
- Quan Guozheng, Yang Kun, Sheng Xue, *et al.* Review of residual stress control methods for additive manufacturing of arc fuses[J]. *Chinese Journal of Plastic Engineering*, 2021, 28(11): 1 – 10.
- [6] 姚波,马良,陈静,等. 电弧增材制造典型构件热应力变形仿真分析[J]. *机械科学与技术*, 2022, 41(6): 961 – 970.
- Yao Bo, Ma Liang, Chen Jing, *et al.* Simulation analysis of thermal stress deformation of typical components of arc additive manufacturing[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2022, 41(6): 961 – 970.
- [7] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1-4): 227 – 236.
- [8] Yuan T, Kou S, Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool[J]. *Acta Materialia*, 2016, 106: 144 – 154.
- [9] Tian Y, Shen J, Mehnen J, *et al.* Effects of ultrasonic vibration in the CMT process on welded joints of Al alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259: 282 – 291.
- [10] Chen Q, Lin S, Yang C, *et al.* Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39: 403 – 413.
- [11] 贺地求,李剑,李东辉等. 铝合金超声搅拌复合焊接[J]. *焊接学报*, 2011, 32(12): 70 – 72,108.
- He Diqiu, Li Jian, Li Donghui, *et al.* Aluminum alloy ultrasonic stirred composite welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(12): 70 – 72,108.
- [12] Wang J, Yu C, Lu C, *et al.* Research status and future perspectives on ultrasonic arc welding technique[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58: 936 – 954.
- [13] 饶德林,陈立功,倪纯珍等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. *焊接学报*, 2005, 26(4): 48 – 50,64.
- Rao Delin, Chen Ligong, Ni Chunzhen, *et al.* Influence of ultrasonic impact on residual stress of welded structure[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(4): 48 – 50,64.

- mechanical properties of laser additive manufacturing AlSi10Mg alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(9): 1 – 19.
- [14] Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features[J]. Materials Science & Engineering: A, 2006, 428(1-2): 148 – 158.
- [15] Sarpuen I H, Kilikaya M S. Mean grain size determination in marbles by ultrasonic first backwall echo height measurements[J]. NDT & E International, 2006, 39(1): 82 – 86.
- [16] Du H, Turner J A. Ultrasonic attenuation in pearlitic steel[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 882 – 887.
- [17] Li M, Zhou T, Song Y. Material grain size characterization method based on energy attenuation coefficient spectrum and support vector regression[J]. Ultrasonics, 2016, 69: 1 – 10.
- [18] Hirsekorn S, Van Andel P W, Netzelmann U. Ultrasonic methods to detect and evaluated damage in steel[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 1998, 15(6): 373 – 393.
- [19] Tang S H, Wu S, Kobayashi M, *et al.* Effects of texture evolutions and point defects on ultrasonic waves under simple shear and pure shear[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(3-4): 1277 – 1290.
- [20] Pabst W, Uhlířová T, Gregorová E, *et al.* Young's modulus and thermal conductivity of model materials with convex or concave pores—from analytical predictions to numerical results[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(7): 2694 – 2707.
- [21] Kim C, Yin H, Shmatok A, *et al.* Ultrasonic nondestructive evaluation of laser powder bed fusion 316L stainless steel[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101800.
- [22] Tanner L E, Wuttig M. Workshop on first-order displacive phase transformations: Review and recommendations[J]. Materials Science & Engineering: A, 1990, 127(2): 137 – 144.
- [23] Sol T, Hayun S, Noiman D, *et al.* Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 700 – 707.

---

第一作者: 张晨昊, 硕士研究生; 主要从事增材制造铝合金孔隙率超声波无损检测方面研究; Email: zhangchenhao1313@163.com.

通信作者: 苟国庆, 博士, 教授; Email: gouguoqing1001@163.com.

(编辑: 王盈盈)

---

#### [ 上接第 85 页 ]

- [14] Zhou C, Jiang F, Xu D, *et al.* A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 280: 116599.
- [15] Zhou C, Wang J, Guo C, *et al.* Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 197(1): 106334.
- [16] Yang Y, Jin X, Liu C, *et al.* Residual stress, mechanical properties, and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted wire and arc additive manufacturing[J]. Metals, 2018, 8(11): 934 – 934.

---

第一作者: 梁晖, 硕士研究生; 主要研究方向为电弧增材制造工艺; Email: liang111@njust.edu.cn.

通信作者: 杨东青, 博士, 副教授; Email: yangdq@njust.edu.cn.

(编辑: 温宇航)