DOI: 10.3901/JME.2020.24.088

NiTi形状记忆合金超声波焊接温度场 数值计算与分析^{*}

王帅¹ 敖三三¹ 何思贤¹ 李春节¹ 王玉欣¹ 曾志² 罗震¹

(1. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300350;

2. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 221116)

摘要: NiTi 形状记忆合金因具有优异的超弹性、形状记忆效应而被广泛应用。超声波焊接作为一种固相连接技术, 在 NiTi 合金薄片材料的连接方面具有一定的优势, 由于超声波焊接方法具有瞬时性且焊接过程十分复杂, 所以难以通过试验观察的手段来研究其连接机理。针对 NiTi 形状记忆合金超声波焊接过程中温度难以监测的问题, 采用 ANSYS 有限元分析软件建立 NiTi 合金的超声波焊接二维有限元分析模型, 探究了超声波振幅对焊接温度场分布的影响规律, 搭建热电偶测温平台采集焊接试验过程的温度数据对模型进行验证, 结合数值模拟结果, 分析了 NiTi 合金超声波焊接的连接机理。结果表明, 焊接温度场与振幅呈正相关, 在固定焊接条件下, 振幅每增加 5 μm , 焊接最高温度约提高 45 $^{\circ}\text{C}$ 。经试验测定, 模拟结果与试验数据吻合较好, 最高温度仅相差 4 $^{\circ}\text{C}$, 误差不超过最高温度的 3%。将试验结果与模拟结果相结合, NiTi 合金的超声波过程中铝没有熔化, 接头为固相连接。

关键词: NiTi; 形状记忆合金; 超声波焊接; 有限元分析

中图分类号: TG453

Numerical Calculation and Analysis of Temperature Distribution during Ultrasonic Welding Process for NiTi Shape Memory Alloy

WANG Shuai¹ AO Sansan¹ HE Sixian¹ LI Chunjie¹ WANG Yuxin¹
ZENG Zhi² LUO Zhen¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 221116)

Abstract: NiTi shape memory alloy is widely used for its excellent superelasticity and shape memory effect. As a solid phase bonding technology, it has certain advantages in the bonding of NiTi shape memory alloy flakes. It is difficult to study the mechanism of ultrasonic welding by means of experimental observation because of its instantaneous and complicated welding process. Aiming at the problem that the temperature is difficult to monitor in the ultrasonic welding process, a two-dimensional finite element analysis model of NiTi shape memory alloy ultrasonic welding is established by ANSYS, the influence of ultrasonic amplitude on the distribution of welding temperature field is investigated. The thermocouple temperature measuring platform is built to collect the temperature data of welding test process, and the validity of the finite element analysis model is verified. Based on the numerical simulation results, the connection mechanism of NiTi alloy ultrasonic welding is analyzed. The results show that the welding temperature field is positively correlated with the amplitude. The maximum welding temperature increases by about 45 $^{\circ}\text{C}$ for every 5 μm increase in amplitude

^{*} 国家重点研发计划(2018YFB1107900)、国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合(U1933129)、天津市自然科学基金(18JCQNJC04100)和天津市自然科学基金重点(19JCZDJC39000)资助项目。20200213 收到初稿, 20200827 收到修改稿

under the fixed welding condition. The test results show that the simulation results are in good agreement with the test data. The maximum temperature differs only by 4 °C, and the error does not exceed 3% of the maximum temperature. Combining the test results with the simulation results, the NiTi alloy does not melt during the ultrasonic process, and the joint is a solid phase connection.

Key words: NiTi; shape memory alloy; ultrasonic welding; finite element analysis

0 前言

智能材料是可以根据外部环境和内部条件的变化,进行自适应调整,使结构处于最佳状态。而形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)因为其优异的力学性能、独特的物理性质成为智能材料的常用元件之一^[1]。NiTi 合金是目前最具应用前景的形状记忆合金,具有单程或双程形状记忆效应以及超弹性和生物相容性^[2]。NiTi 形状记忆合金常用于制造智能驱动部件和人体植入医疗器械,由 NiTi 合金制造的元件在生物医学、汽车、航空等众多工业领域也得到了越来越广泛的应用^[3]。

NiTi 合金虽然有着优越且独特的材料特性,但是仍存在着加工参数敏感性高、加工性差等缺点,极易导致接头间金属间化合物的生成^[4]。近年来,多种焊接技术如电阻点焊、TIG 焊、爆炸焊、与激光焊等被用于 NiTi 形状记忆合金的连接。然而使用传统的熔焊方法进行焊接时,接头易生成 Ti₂Ni、TiNi₃ 等脆性金属间化合物,易增大接头的脆性。同时由于焊接过程中发生冶金反应容易产生气孔、裂纹等焊接缺陷;焊接热循环导致的组织、结构变化,也会破坏母材有序的点阵结构,导致 NiTi 合金的形状记忆效应和超弹性下降^[5]。超声波焊接^[6]作为一种固相连接的方法,可以避免因熔焊而产生的脆性相与气孔等缺陷。

焊接过程中温度的变化对焊接机理的研究具有重要作用,但超声波焊接周期短,焊接过程极为复杂,难以监测。可以采用数值模拟与试验相结合进行分析。VRIES^[7]提出了焊接过程中摩擦产热和塑性变形产热的计算公式,将摩擦产热与塑性产热加载在模型中,简化了超声波焊接的产热过程,避免了高频振动摩擦的模拟分析,但忽略了超声软化等问题。CHEN 等^[8]在模拟铝和铜超声波焊接温度场分布的研究当中,使用 Johnson-Cook 塑性模型来模拟焊接过程在金属高应变率变形过程,认为塑性产热的热量占总热量的四分之一。LI 等^[9]在考虑了上下界面产热与材料软化等因素下,建立了 Cu/Al 超声波焊接模型,探究了焊接过程中的温度升高、材料变形与金属间化合物的生成,成功预测了 IMC 层的厚度。CHEN 等^[10]将热电偶放置在距离焊接区域

中心 0.5 mm 处的位置,认为热电偶在被破坏前仍记录下最高温度点,并用热像测温仪验证热电偶测温结果。结果表明,热像仪测温结果与热电偶吻合,并认为焊接中心温度比边缘至少高出 100 °C。

本文使用 ANSYS 建立了以铝为中间层的 NiTi 形状记忆合金超声波焊接过程的二维热-力耦合有限元模型,模拟了超声波焊接过程中 NiTi 合金的温度场分布,分析了工艺参数对温度场的影响,搭建热电偶测温平台,采集温度数据并验证模型的有效性。

1 有限元模拟

1.1 热-力结构场耦合模型

由于在焊接过程中 NiTi 合金会在高温和应力的作用下会产生较大的相变、应变突变,这给计算收敛造成很大的困难,本文将采取热-力间接耦合的方式进行计算。采用式(2)、式(3)分别计算焊接过程中的摩擦产热和塑性变形产热的热通量^[11]

$$v = 4f\xi \quad (1)$$

$$q_f = \eta \cdot \frac{P}{A_f} = \frac{4\mu\eta f\xi F_N}{A_f} \quad (2)$$

$$q_p = 4f\xi \sqrt{\left(\frac{Y_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{F_N}{2A_D}\right)^2} \quad (3)$$

式中, v 为焊头的平均振动摩擦速度, m/s; f 为焊头振动的频率, 单位为 Hz; ξ 为振幅; μ 为摩擦因数; F_N 为焊接静压力, N; P 为界面摩擦生热功率, W; q_f 为摩擦产生的热流量, W; q_p 为焊接过程中材料发生塑性变形产生的热流量, W; A_f 为焊接界面摩擦区域的面积, m²; η 为摩擦热耗散比例; Y_T 为材料的屈服应力, MPa; A_D 为塑性变形区的面积, m²。

有限元分析软件 ANSYS 中内置了两种基于 AURICCHIO 等^[12]提出的形状记忆合金本构方程建立起来的形状记忆合金材料模型,其中一种用于模拟等温条件下的超弹性行为,另一种用于模拟形状记忆效应。其中的形状记忆效应材料模型是基于应力诱导固相转变原理建立的三维热力学模型,在经典不可逆热力学框架下,该模型能够在三维应力状态下再现与形状记忆材料有关的所有主要特征。因

此, 本文将采用 ANSYS 中的形状记忆效应材料模型, 来模拟焊接过程中 NiTi 合金的相变过程。通过母材拉伸试验来确定 NiTi 合金材料本构模型中所需的参数, 如表 1 所示。

表 1 ANSYS SMA 材料模型参数

常量	参数	取值
C_1	相变过程中与材料硬化有关的材料参数 h/MPa	500
C_2	无应力状态下奥氏体存在的最低温度 $T_0/^\circ\text{C}$	-30.19
C_3	弹性极限 R/MPa	140
C_4	材料参数 β	5.6
C_5	最大相变应变 $\bar{\epsilon}_l$	0.1
C_6	马氏体弹性模量 E_m/GPa	21
C_7	与拉压载荷有关的参数 m	0

表中, $C_1 \sim C_7$ 为 ANSYS 提供的相关常量, 用来确定 NiTi 合金的材料模型参数。以上参数的取值通过母材的拉伸试验数据和查阅相关文献获得。将整个焊接过程离散成四个小区间, 首先对模型加载热流进行温度场的计算和分析, 得到温度场分布结果后, 在温度场的模型上进行结构场分析计算, 再在变形模型上再次进行温度场计算中, 依次进行多次迭代^[13]。得到整个焊接过程中的温度场和变形的变化情况。

1.2 建立有限元模型

使用有限元分析软件 ANSYS 建立 NiTi 合金超声波焊接二维几何模型, 如图 1 所示。焊接模型中采取三层板材堆叠的形式^[14]。以铝箔为中间层, 其上下两层均为 NiTi 合金。几何模型中 NiTi 合金板材的宽度为 20 mm, 厚度为 0.5 mm, 铝箔的宽度为 20 mm, 厚度为 0.1 mm。采用的焊头和砧座的端面

图 1 NiTi 合金超声波焊接几何模型示意图

花纹尺寸如图 1 所示, 焊头采取齿宽为 1.00 mm, 齿深为 0.50 mm 的花纹, 砧座采取齿宽为 1.50 mm, 齿深为 0.75 mm 的花纹。

对于温度场分析, 文中选用八节点二维热力耦合单元 PLANE223 进行网格划分。网格划分情况如图 2 所示, 网格划分后得到的有限元模型共有 3 782 个单元, 8 491 个节点。

图 2 超声波焊接模型网格划分

中间焊接区域网格划分较为细密^[15], 在焊接区域两侧网格尺寸随距离焊接区域的距离增大而逐渐增大; 超声波焊接的焊头和砧座采用自由网格划分, 网格形状为三角形。焊头和砧座与工件接触的齿尖部分应力集中严重, 因此对该部分的网格进行了进一步的细化, 以提高计算精度, 同时也更有利于计算收敛, 而远离齿尖和焊接区域的部分由于焊接区域温度分布影响较小, 因此网格划分较为稀疏, 以减少计算量, 提高计算效率。

1.3 接触设置

该模型建立四组接触对, 分别为焊头齿尖与上层 NiTi 合金板的点面接触、上层 NiTi 合金板与中间层铝箔的面面接触、中间层铝箔和下层 NiTi 合金板的面面接触, 以及砧座齿尖和下层 NiTi 合金板的点面接触, 在平面与齿尖的接触当中选择平面为目标面, 齿尖为接触面。面面接触中选择位于上方的面为目标面, 下方的为接触面。目标面接触单元选择 TARGET169, 接触面接触单元选择 CONTA175。

在接触面中, 由于温度的变化, 材料的热导率、膨胀系数与弹性模量等力学性能都会发生改变, 将这些物理量简化为温度的函数施加在有限元模型中, 部分如图 3 所示。形状记忆合金在高温、无应力下的相为奥氏体相, 低温、无应力下的相为马氏体相。低温下的马氏体弹性模量取 21 GPa, 高温下的 NiTi 合金奥氏体状态下的弹性模量取 68 GPa。

(a) 铝的力学性能参数

(b) NiTi 合金的热膨胀系数

(c) NiTi 合金的热导率

图 3 主要力学性能随温度变化图

1.4 加载设置

选用八节点二维热力耦合单元 PLANE223 与二维结构单元的间接耦合方法, 其中超声波焊接模拟加载条件如表 2 所示, 表中边界条件加载的具体位置如图 4 所示。所设置的焊接参数为: 振幅 55 μm , 焊接压力 0.4 MPa, 能量为 1 000 J, 焊接时间为 651 ms。

表 2 超声波焊接模拟加载条件表

项目	载荷条件	边界条件	特殊条件
热场	将 q_f 与 q_p 作为热源加载到铝与上下两层 NiTi 合金板的接触面上, 加载区域宽度分别为 6 mm, 3 mm	工件与空气接触边界施加空气对流冷却系数	—
力场	将 F 作为均布载荷施加于电极上端面	焊头设置为 U_x 的约束, 砧座设置为 U_x 、 U_y 的全约束	在四个接触面上设置相应的接触对

图 4 边界条件设置

2 有限元结果与分析

2.1 温度场

图 5 为不同时刻的焊接温度场分布的有限元分析结果, 可以看到超声波过程中不同时刻的温度分布与变形情况。由图可知, 随着时间的增长, 焊接的最高温度值也增加, 热影响区的高温部分分布在焊极下面的塑性变形区^[14], 越接近边缘温度越低。

如图 5a 所示, 在 162 ms 时, 温度场最高温度为 252 $^{\circ}\text{C}$, 位于焊接区域的中心点, 此时工件整体产生轻微变形, 工件远离焊接区域的两侧微微翘起, 与砧座最边缘的齿尖产生间隙, 脱离接触。焊接区域的温度分布呈近似的椭圆形, 中间区域的高温区向边缘突出。如图 5b 所示, 325 ms 时焊接中心区域的最高温度达到 370 $^{\circ}\text{C}$, 工件变形进一步增大, 工件与砧座最边缘的两个齿脱离接触, 在这两齿对应的上方的工件, 三层板之间也产生间隙, 因此这些区域不会产生摩擦热^[16], 塑性变形也很小, 因塑性变形而产生的热也可以忽略不计。如图 5c 所示, 490 ms 时焊接区域最高温度为 458 $^{\circ}\text{C}$, 达到了铝熔点的 70%。如图 5d 所示, 焊接结束时刻 651 ms 时, 焊接温度达到最高温度 525 $^{\circ}\text{C}$, 此时最高温度已达到铝的熔点的 80% 左右, 铝未熔化, 工件也在焊接过程中热和力的作用下变形达到最大。

在整个焊接过程中, 焊接温度的最高温度始终在焊接区域的中心位置。温度沿水平方向的分布情况: 温度云图中温度分布的形状在中间层铝处呈现凸出的形状, 这是由于铝的导热率比 NiTi 合金大, 温度传递更快, 而且铝材质较 NiTi 软, 铝在焊接过

程中发生比 NiTi 合金更加剧烈的塑性变形,产生更多的热量。温度沿纵向分布情况:齿间对应的工件区域的高温区比齿尖对应的区域大,这是因为工件与砧座和焊头相接触进行热传导的热量传递速度比工件与空气进行对流换热的热量传递速度快,热量损失快,温度也更低。

图 5 不同时刻的焊接温度场分布(°C)

为了研究焊接区域中心位置在整个焊接过程中的温度变化情况,提取了有限元模型中对应区域的 1 573 号节点的温度变化数据,该节点的温度随时间变化的情况如图 6 所示。

图 6 焊接区域中心位置温度变化曲线

焊接区域中心位置的温度在焊接刚开始的 25 ms 内增长迅速,这是因为在焊接初期工件的温度较低,在摩擦产热的作用下,界面温度快速升高。随后温度持续升高,但温度增长率在下降,这是因为随着焊接过程的进行,焊接温度升高,工件不同

部位的温差大,热传导导致的散热增加^[17]。而且下层 NiTi 合金板在焊接区域的高温区面积比上板要大,由此可推测下板与中间层的连接界面更容易生成金属间化合物^[18],使其连接界面更脆更容易断裂。

2.2 振幅对温度场的影响

图 7 为在不同振幅下(45 μm 、50 μm 、60 μm 、65 μm)的 NiTi 合金超声波焊接温度场的分布情况。由图可得随着超声波振幅的提高,温度场的最高温度逐渐升高,高温区不断扩大。如图 7a 所示,当振幅为 45 μm 时,最高温度不超过 450 $^{\circ}\text{C}$,如图 7b 所示,在振幅为 50 μm 时,最高温度不超过 500 $^{\circ}\text{C}$,如图 7c 所示在振幅为 60 μm 时最高温度达到铝的熔点的 93%。但工件整体变形不大,这有可能是由于 NiTi 的硬度和熔点较高,整体刚度较大,在焊接压力不变的情况下,改变振幅仅对温度分布有较大影响,而对变形影响十分有限。同时也可看到下板的高温区比上板大,这可能是由于焊头焊齿较密,导热较快导致的。

此外,随着振幅的提高,可以发现在焊接区域的中心层温度场在 x 方向出现明显突出。这是因为随着温度升高,Al 和 TiNi 记忆合金的热导率增大,但是 NiTi 合金的热导率的增加量远小于 Al 的热导率的增加量。随着振幅的增加,温度升高,两种金属热导率相差更大,这种效应更为显著,出现了如图 7 所示 x 方向的明显突出。

图 7 不同超声波振幅的焊接温度场分布(°C)

不同超声波振幅条件下,焊接区域中心位置的温度随时间变化的曲线如图 8 所示,变化规律基本和振幅为 55 μm 时基本一致,但焊接过程中的温度

变化率和最高温度有所变化。焊接过程中温度增长率和最高温度均随振幅的增大而增大。

图 8 不同振幅的焊接温度变化曲线

根据式(1)可知,在超声波频率不变的条件下,滑动摩擦速度随振幅增大而增大^[19],同时摩擦产热也随滑动摩擦速度的提高而增大。根据式(3)也可知塑性变形产热与超声波振幅成正比。当超声波振幅增大到 65 μm 时,最高焊接温度达到 613.82 °C,接近铝的熔点,极有可能在焊接过程中生成大量的金属间化合物^[20],不利于接头形成良好的连接。且超声波振幅每增加 5 μm,最高焊接温度约增加 45 °C。

3 热电偶温度测试

3.1 试验平台搭建

本文采用 OMEGAL-0044K 型^[21]的 K 型细丝热电偶采集焊接温度,其直径为 0.127 mm,长度为 304.8 mm。利用 AD8495 ARMZ 芯片组成的放大器模块放大热电偶的电压信号,并采用 Ni PCI-4472B 数据采集卡和 DASP V10 智能数据采集和信号分析软件采集经放大器放大后的热电偶电压信号,最后通过电压信号与温度的关系公式计算出对应的焊接温度。热电偶焊接采集系统的原理如图 9 所示。

图 9 焊接温度采集系统示意图

3.2 热电偶测温校准

焊接现场采集到的信号为电压信号,需要通过公式计算将电压信号换算成温度数据^[22]。本文采用

的 AD8495 ARMZ 信号放大模块得到的电压信号与温度关系的理论计算公式如下

$$T = (U - 1.5) / 0.005 \quad (4)$$

式中, T 为温度, °C。 U 为电压, V。但是电压信号与温度的换算公式会随提供给放大器模块的驱动电压的大小和具体的热电偶型号而变化,因此在使用该测温平台采集焊接温度之前必须进行测试和校准。为了校准该温度采集系统采集到的电压信号和温度之间的计算公式,本文记录了热电偶在不同温度下所对应的电压大小,通过线性拟合得到了校准后的电压和温度的计算公式和校准曲线,计算公式如式(5)所示,校准数据如图 10 所示

$$T = (U - 2.5) / 0.005 \quad (5)$$

图 10 热电偶测温公式校准曲线

3.3 试验验证

考虑到模型的对称性和实际安放热电偶的可操作性,在工件上距离焊接中心 6 mm 的位置固定热电偶的节点,采集整个焊接过程和冷却过程工件上该点的温度变化数据,同时在有限元模型上对应的位置提取在整个数值模拟分析过程中相应的节点的温度变化数据,试验和模拟的温度对比数据如图 11 所示。

图 11 温度对比验证

从图 11 结果发现,在整个焊接温度达到最高之前,模拟得到的温度与试验实际测得的数据吻合较好,模拟结果的最高温度为 169.15 °C,实际测得的最大温度为 173.13 °C,模拟结果偏差不大,不超过最大温度的 3%。但是在冷却过程中,还是存在误差,原因主要有以下几点:① 实际冷却过程不是对流换热系数恒定不变的理想状态^[23];② 工件的冷却速度受到不可控的环境因素影响。但是在研究超声波焊温度场变化时,重点在于焊接过程的温度变化和焊接的最高温度范围,因此该有限元分析模型能较好地模拟焊接过程的温度场分布和变化情况。

4 结 论

(1) 建立了二维热-力耦合有限元分析模型,对 NiTi 合金超声波焊接温度场分布进行了模拟,模型与试验数据在升温阶段吻合较好,最高温度仅相差 4 °C,误差不超过最高温度的 3%。

(2) 模拟中焊接最高温度始终处于焊接区域的中心位置,且在中间层铝处呈现凸出的形状。这是因为铝的导热系数比 NiTi 合金大,塑性变形更为剧烈,产生更多热量。

(3) 在本文使用的焊接参数下,焊接过程中中间层铝箔仅发生了剧烈的塑性变形,并没有熔化,接头为固相连接。

(4) 在其他焊接参数不变的情况下,仅改变超声波振幅,超声波振幅每增加 5 μm ,焊接最高温度约提高 45 °C,因此为了防止金属熔化和生成大量的金属间化合物,振幅不应超过 70 μm 。

参 考 文 献

- [1] OLIVEIRA J P, MIRANDA R M, FERNANDES F M B. Welding and joining of NiTi shape memory alloys: A review [J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 412-466.
- [2] JANJ J M, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 1078-1113.
- [3] 张威, 敖三三, 曾志, 等. 添加铜箔中间层的 NiTi 形状记忆合金超声波焊接[J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 64-67.
ZHANG Wei, AO Sansan, ZENG Zhi, et al. Ultrasonic welding of NiTi shape memory alloy with copper foil intermediate layer[J]. *Journal of Welding*, 2019, 40(2): 64-67.
- [4] 王晓南, 汪杰, 陈夏明, 等. NiTi 形状记忆合金激光焊接的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(10): 42-53.
WANG Xiaonan, WANG Jie, CHEN Xiaming, et al. Research progress on laser welding of NiTi shape memory alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(10): 42-53.
- [5] 燕颖. 镍钛合金表面层层组装改性及其生物相容性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
YAN Ying. Study on surface layer assembly modification and biocompatibility of Ni-Ti alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [6] ZHANG Wei, AO Sansan, OLIVEIRA J P, et al. On the metallurgical joining mechanism during ultrasonic spot welding of NiTi using a Cu interlayer[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 178: 414-417.
- [7] VRIES E D. Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding[M]. Ohio: The Ohio State University, 2004.
- [8] CHEN K K, ZHANG Y S. Numerical analysis of temperature distribution during ultrasonic welding process for dissimilar automotive alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(6): 522-531.
- [9] LI Huan, CAO Biao, LIU Jian, et al. Modeling of high-power ultrasonic welding of Cu/Al joint[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1): 833-844.
- [10] CHEN Y C, BAKAVOS D, GHOLINIA A, et al. HAZ development and accelerated post-weld natural ageing[J]. in ultrasonic spot welding aluminium 6111-T4 automotive sheet[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(6-7): 2816-2828.
- [11] 朱政强, 曾纯. 铝合金/钛合金超声波点焊热-机耦合分析[J]. *现代焊接*, 2011(10): 25-28.
ZHU Zhengqiang, ZENG Chun. Thermo-mechanical coupling analysis of ultrasonic spot welding of aluminum alloy / titanium alloy[J]. *Modern Welding*, 2011(10): 25-28.
- [12] AURICCHIO F, PETRINI L. Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, 55(11): 1255-1284.
- [13] ZHAO Dewang, REN Daxin, ZHAO Kunmin, et al. Ultrasonic welding of magnesium-titanium dissimilar metals: A study on thermo-mechanical analyses of

- welding process by experimentation and finite element method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 181-191.
- [14] LI Chunjie, AO Sansan, OLIVEIRA J P, et al. Ultrasonic spot welded NiTi joints using an aluminum interlayer: Microstructure and mechanical behavior[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1201-1210.
- [15] KOMIYAMA K, SASAKI T, WATANABE Y. Effect of tool edge geometry in ultrasonic welding[J]. Mater. Process Technol., 2016, 229: 714-21.
- [16] KIM W, ARGENTO A, GRIMA A, et al. Thermo-mechanical analysis of frictional heating in ultrasonic spot welding of aluminium plates[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(7): 1093-1103.
- [17] AO Sansan, LI Chunjie, ZHANG Zhi, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al/Cu ultrasonic spot welded joints during thermal processing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 307-314.
- [18] 张威, 敖三三, 罗震, 等. 焊接能量对铝镍超声波焊接接头性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(9): 1130-1135.
- ZHANG Wei, AO Sansan, LUO Zhen, et al. Effect of welding energy on the properties of aluminum-nickel ultrasonic welding joints[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(9): 1130-1135.
- [19] ZENG Zhi, CONG Biaoqiang, OLIVEIRA J P, et al. Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 1-10.
- [20] LI Chunjie, AO Sansan, OLIVEIRA J P, et al. Effects of post-weld heat treatment on the phase transformation and mechanical behavior of NiTi ultrasonic spot welded joints with Al interlayer[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142: 1-24.
- [21] NGO T T, JIN Huanghuang, WANG Chichang. The BFGS method for estimating the interface temperature and convection coefficient in ultrasonic welding[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 69: 66-75.
- [22] XU Mengjia, LIU Bosheng, ZHAO Yunqiang, et al. Direct joining of thermoplastic ABS to aluminium alloy 6061-T6 using friction lap welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(5): 391-397.
- [23] AO Sansan, LI Kangbai, LIU Weidong, et al. Electrochemical micromachining of NiTi shape memory alloy with ethylene glycol-NaCl electrolyte containing ethanol[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 223-228.
-
- 作者简介: 王帅, 男, 1997 年出生。主要研究方向为金属材料焊接工艺。
E-mail: wangshuai312@tju.edu.cn
- 敖三三(通信作者), 男, 1984 年出生, 讲师。主要研究方向为 NiTi 智能材料的连接和超精密电解加工。
E-mail: ao33@tju.edu.cn