

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.016

铝合金-钢搅拌摩擦焊温度场数值研究

苗臣怀, 曹丽杰, 殷凯, 王楠楠

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对以往搅拌摩擦焊数值模拟中采用的热源模型较为简单,不能很好反映出实际焊接过程中温度场的分布,而做试验又需要巨大投入的情况,课题组基于热弹塑性法和改良的热源模型,利用 ABAQUS 软件及其 DFLUX 子程序接口建立了 304 不锈钢和 5052 铝合金搅拌摩擦焊的数值模型,对铝合金-钢异种材料的搅拌摩擦焊过程进行了数值模拟,分析了焊接过程的温度场,同时对偏置量、转速和焊速 3 个焊接参数进行优化,发现在转速取 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,焊速取 $80 \text{ mm}/\text{min}$,偏置量取 2 mm 的情况下,得到的焊接过程瞬态及稳态温度场均处于理想状态。模拟准确地预测了实际焊接过程中的温度变化,且对实际焊接过程中焊接参数的选择具有一定参考意义,减少了为得到合适参数而进行的大量试验的成本。模拟结果能指导和预测实际焊接过程。

关键词:铝-钢异种材料;搅拌摩擦焊;温度场;热弹塑性法;改进热源模型;ABAQUS 软件

中图分类号: TG453.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)06-0082-06

Numerical Simulation of Temperature Field in Aluminum Alloy-Steel Friction Stir Welding

MIAO Chenhuai, CAO Lijie, YIN Kai, WANG Nannan

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The heat source model used in the past numerical simulation of friction stir welding was relatively simple, it cannot well reflect the distribution of temperature field in the actual welding process, and the experiments needs huge investment. Based on thermal elastic-plastic method and improved heat source model, adopted ABAQUS software and DFLUX subroutine interface to establish the numerical model of 304 stainless steel and 5052 aluminium alloy friction stir welding, the process of aluminium alloy friction stir welding of dissimilar materials-steel were simulated and analyzed the temperature field of welding process, the offset at the same time, speed, and three optimized welding parameters, welding speed was found in speed $500 \text{ r}/\text{min}$, welding speed take $80 \text{ mm}/\text{min}$, take 2 mm offset, get the welding process of the transient and steady state temperature field in the ideal state. The simulation is more accurate in predicting the temperature change in the actual welding process, and it has a certain guiding role in the selection of welding parameters in the actual welding process, reducing the waste of a large number of tests to obtain the appropriate parameters. The simulation results can guide and predict the actual welding process.

Keywords: aluminum alloy-steel dissimilar materials; friction stir welding; temperature field; thermal elastic-plastic method; improved heat source model; ABAQUS

铝合金和钢由于具有较大的物理化学性能差异,在使用传统熔化焊焊接时因为热输入难以控制,得到的接头质量往往不高,而搅拌摩擦焊作为一种新型的固相焊接技术在异种材料焊接上有很大优势。铝合

金-钢材料的可靠连接在汽车轻量化、轨道交通和船舶制造等领域都有很大的应用前景^[1]。对于搅拌摩擦焊而言,针对焊接过程中温度场的分布情况的研究十分重要,因为焊接过程中温度变化直接影响了接头区

收稿日期:2019-05-10;修回日期:2019-09-08

第一作者简介:苗臣怀(1996),男,安徽砀山人,硕士研究生,主要研究方向为搅拌摩擦焊的数值模拟。通信作者:曹丽杰(1968),女,黑龙江佳木斯人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为轻合金激光焊接技术、摩擦学行为。E-mail:clj@sues.edu.cn

域的硬度、应力、变形,以及微观组织变化,所以热输入量的合适与否是得到的接头质量好坏的关键。目前对于同种材料或者熔点相差不大的异种材料的搅拌摩擦焊的温度场模拟的研究较多。Nandan 等^[2]对 304 奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接过程中温度场进行了数值模拟,预测的温度-时间曲线与实验结果较为吻合;江旭东等^[3]利用 ANASY 软件对铝-铜异种材料进行了温度场的数值模拟,得到的特征点热循环曲线与试验结果比较一致;刘其鹏等^[4]利用基于修正的线能量的摩擦因数理论对 AA6061-T6 铝合金进行了温度场的数值模拟。但是目前针对铝合金和钢这种熔点相差很大的异种材料的温度场模拟较为少见,因此,课题组对铝合金-钢异种材料的搅拌摩擦焊过程进行数值模拟。

1 数值模型

1.1 热源模型

搅拌摩擦焊的热源模型虽然早已提出,但早期的模型简化了很多影响温度变化的因素,不能很好的反映出真实的焊接情况,随着搅拌摩擦焊数值模拟技术的发展,热源模型也经历了从单纯只考虑轴肩产热,到考虑搅拌针产热,再到考虑塑性变形产热等一系列不断完善的过程。课题组基于 SELVARAJ 等^[5]提出的修正热源模型对 304 不锈钢和 5052 铝合金进行搅拌摩擦焊温度场模拟。

1.1.1 轴肩产热模型

轴肩产热由两部分组成:轴肩摩擦产热和轴肩下压转动时带动的材料塑性变形产热。

轴肩总产热:

$$Q_{sh} = \delta Q_{sh-fr} + (1 - \delta) Q_{sh-pl} \quad (1)$$

式中: Q_{sh} 表示轴肩总产热功率; Q_{sh-fr} 表示轴肩摩擦产热功率; Q_{sh-pl} 表示轴肩变形产热功率; δ 表示变形系数,当温度小于等于临界温度时 $\delta = 1$,大于临界温度时 $\delta = \tau_T / \tau_c$, τ_T 表示当前温度下的剪切应力, τ_c 表示最高温度的剪切应力,这里钢的变形临界温度取 1 000 °C^[5]¹³⁹⁷,铝合金的变形临界温度取 400 °C。

轴肩摩擦产热功率:

$$Q_{sh-fr} = \frac{2}{3} \pi \mu P_n (r_s^3 - r_p^3) \quad (2)$$

式中: μ 表示摩擦因数,钢侧的摩擦因数取 0.46^[6],铝合金侧取 0.3^[7]; $P_n = F_n / \pi r_s^2$, F_n 表示搅拌头下压力, r_s 表示轴肩半径; r_p 表示搅拌针半径。

变形产热功率:

$$Q_{sh-pl} = \frac{2}{3} \pi \tau \omega (r_s^3 - r_p^3) \quad (3)$$

式中: $\tau = \sigma_y / \sqrt{3}$, σ_y 表示与温度相关的屈服应力。 ω 表示角速度, $\omega = 2\pi N / 60$; N 表示搅拌头转速。

轴肩热流密度:

$$q_{sh} = \eta \times \frac{3Q_{sh}r}{2\pi(r_s^3 - r_p^3)}, r_p \leq r \leq r_s \quad (4)$$

式中: q_{sh} 表示轴肩热流密度; η 表示搅拌头所做功传到板材上的效率,这里取 0.75^[8]; r 表示积分点到搅拌针中心的距离。

1.1.2 搅拌针产热模型

搅拌针产热由搅拌针侧面产热和搅拌针底面产热两部分组成,由于搅拌针侧面受到的法向力相对于搅拌针底部而言较小,所以搅拌针侧面仅考虑塑性变形产热。

搅拌针总产热功率:

$$Q_{pin} = Q_{ps} + Q_{pb} \quad (5)$$

搅拌针侧面产热功率:

$$Q_{ps} = (1 - \delta) 2\pi \omega r_p^2 h \quad (6)$$

搅拌针底面总产热功率:

$$Q_{pb} = \delta Q_{pb-fr} + (1 - \delta) Q_{pb-pl} \quad (7)$$

搅拌针底面摩擦产热功率:

$$Q_{pb-fr} = \frac{2}{3} \pi \mu P_n r_p^3 \quad (8)$$

搅拌针底部变形产热功率:

$$Q_{pb-pl} = \frac{2}{3} \pi \tau \omega r_p^3 \quad (9)$$

搅拌针热流密度功率:

$$q_{pin} = \eta \times \frac{Q_{pin}}{\pi [(r_p + 2)^2 - r_p^2] h}, r \leq r_p, 0 < z < h \quad (10)$$

式中: Q_{pin} 表示搅拌针总产热功率; Q_{ps} 表示搅拌针侧面产热功率; Q_{pb} 表示搅拌针底面总产热功率; Q_{pb-fr} 表示搅拌针底面摩擦产热功率; Q_{pb-pl} 表示搅拌针底面变形产热功率; q_{pin} 表示搅拌针热流密度; h 表示搅拌针长度; z 表示积分点距焊缝中心点处的竖直方向的距离。

1.2 有限元模型

1.2.1 网格划分

模拟过程采用 100 mm × 50 mm × 3 mm 的铝合金和钢各 1 块板对接焊的形式,为了兼顾模型计算效率和计算结果的准确性,在离焊缝较远处采用稀疏网格,在模型的焊缝中心处附近进行网格加密,单元类型采用热-力耦合单元 C3D8T,网格划分后共产生 145 600 个单元,165 984 个节点,网格划分如图 1 所示。

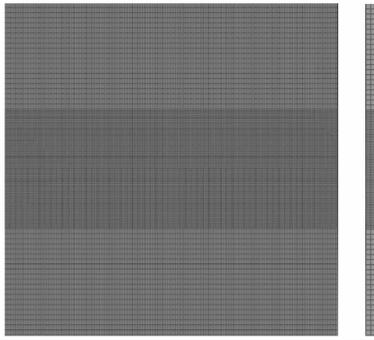


图1 有限元网格划分

Figure 1 Finite element meshing

1.2.2 边界条件

对于轴肩产热,由于两侧板材材料不同,所以轴肩两侧施加不同的移动面热源,搅拌针产热则在焊缝处施加一个移动体热源。由于板材除了底面以外的其他面均与空气直接接触,所以这些面散热方式选择对流换热,换热系数设为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,而底面与垫板接触,散热较快,换热系数设为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,两块板之间则设为绝热面,热边界条件如图2所示。

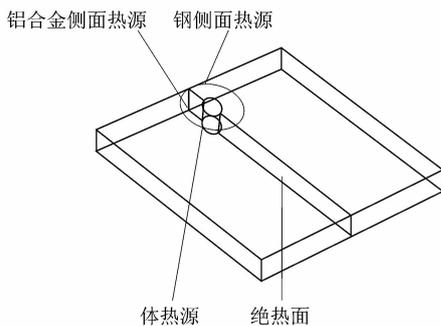


图2 热源载荷和热边界条件

Figure 2 Heat source load and thermal boundary conditions

1.2.3 求解

利用 ABAQUS 软件的 DFLUX 子程序接口把移动热源加载到模型之中,进行瞬态温度场的求解。304 不锈钢和 5052 铝合金热物理参数如表 1 和表 2 所示,搅拌头参数如表 3 所示。

2 模拟结果与分析

2.1 焊接过程温度分布

焊接参数:焊接速度 v 取 $80 \text{ mm}/\text{min}$,搅拌头转速 N 取 $500 \text{ r}/\text{min}$,搅拌头偏置铝侧,偏置量 T_{ff} 取 0.2 mm 。图 3(a)是在焊接预热阶段,焊接时间 $t = 1 \text{ s}$ 时的温度场云图,可以看出,板材两侧温度场呈现为明显不对称,钢侧温度明显高于铝合金侧。图 3(b)所示为

表 1 304 不锈钢热物理参数

Table 1 Thermo physical parameters of 304 stainless steel

温度 T/C	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	屈服应力 σ/MPa
20	7 800	16	500	290
200	7 791	19	540	230
400	7 782	21	560	200
600	7 780	24	590	170
800	7 775	29	600	42
1 000	7 770	30	610	30

表 2 5052 铝合金热物理参数

Table 2 Thermo physical parameters of 5052 aluminum alloy

温度 T/C	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	屈服应力 σ/MPa
20	2 680	119	900	255
100	2 660	121	921	248
200	2 640	126	1 005	150
300	2 620	130	1 047	50
400	2 590	138	1 089	32
500	2 580	145	1 129	10

表 3 搅拌头参数

Table 3 Welding tool parameters

轴肩下压力 F_n/kN	轴肩外径 r_s/mm	搅拌针半径 r_p/mm	搅拌针长度 h/mm
31	5	2.5	3

焊接稳定阶段,焊接时间 $t = 30 \text{ s}$ 时温度场云图,云图显示钢侧最高温度约为 800 C ,而铝合金侧最高温度约为 475 C ,且距离热源中心越远的区域温度梯度越大,铝侧大于钢侧;这是由于热源中心处是热量的来源,热量从中心处向周围温度低的区域传递,且铝合金材料的热传导率远大于不锈钢。还可以看出,轴肩热源后侧温度大于前侧;这是因为随着搅拌头的前移,上一个搅拌头位置的前侧变为下一个搅拌头位置的后侧,热量未来得及完全传递就又产生新的热量,所以导致热量在后侧积累,导致后侧温度较前侧高。图 3(c)所示为稳态焊接时的等温线分布云图,由此可以更直观看出温度梯度的变化以及板材各点间温度关系。图 3(d)所示为焊接结束阶段,焊接时间 $t = 65 \text{ s}$ 时温度场云图,可见,焊接接近结束时最高温度约为 841 C ,高于稳态焊接时的温度。造成这样现象的主要原因:一是因为搅拌头在拔出之前会短暂停留,使得热量积累温度升高;二是因为临近板材末端,热量比起稳态焊

接时较难传递,导致温度较高,所以实际焊接中在焊接结束阶段要控制好搅拌头的拔出时间。

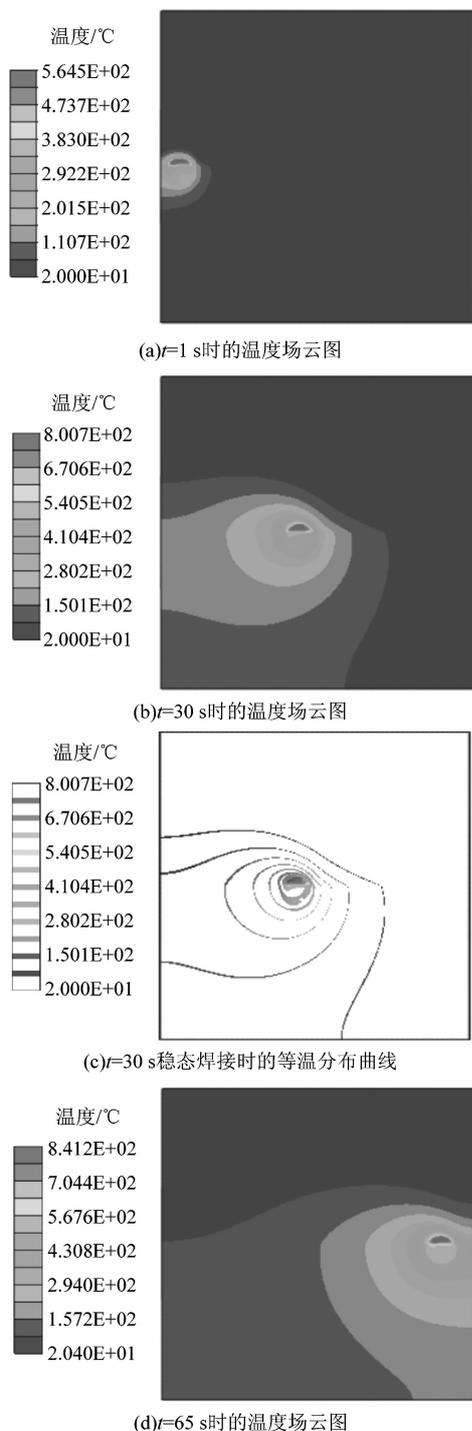


图3 焊接过程温度分布云图
Figure 3 Temperature distribution nephogram of welding process

2.2 焊缝方向的热循环

在焊缝处从焊接起点开始沿焊接方向每隔 20 mm 取一点,共取 4 个点,如图 4 所示。各点温度随焊接时

间变化的热循环曲线如图 5 所示。可以看出,每个点的温度升高和降低都很快,呈现出“陡升陡降”的特点,20 s 左右的时间温度就从最高点降到 100 °C 以下,这是因为大量热量被搅拌头以及与搅拌头接触的垫板带走。由 Al-Fe 二元合金相图可知^[9],Al-Fe 最低相变温度为 770 °C,所以在焊缝中心处不会产生相变。而由特征曲线可以看出,温度在上升阶段时,不是一直单调上升到达最高点,而是在将要到达最大值前,在极短时间内会有温度的降低,之后再到达最高点,曲线呈反 S 型特征,如图 5 局部曲线放大图所示。这是由于轴肩面热源产热区域是圆环形,在轴肩前侧作用产热之后,后侧作用产热之前,没有面热源作用在该点。随后该点在轴肩后侧作用下产热,热量在后侧累积,温度到达最高点,而实际搅拌摩擦焊中,此时该点处于搅拌针与轴肩结合的区域,温度等同于搅拌头内部温度。

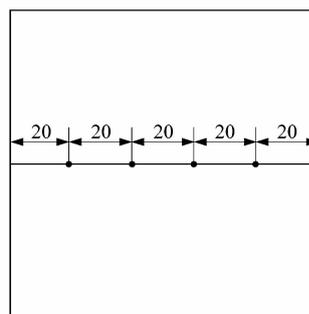


图4 板材特征点

Figure 4 Characteristic points of sheet metal

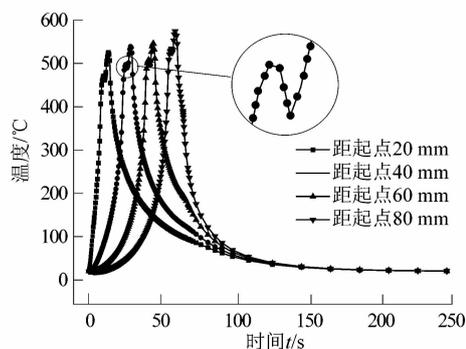


图5 焊缝中心热循环曲线

Figure 5 Heating cycle curves of weld center

2.3 纵向及焊深方向的温度

从垂直于焊缝的中间位置沿板材两侧方向取一路径,得到该路径上最高温度分布如图 6 所示。铝合金侧的温度沿焊缝中心到板材边缘逐渐减小,最高温度是在焊缝中心,约为 540 °C;钢侧的最高温度则不在焊缝处,而是在距焊缝中心约 3 mm 处,温度约为 800 °C。

造成这种现象的主要原因有:①2种材料自身的比热容差异;②搅拌头的偏置。图6中还可以看出,从中心到两侧边缘区域,钢侧温度降低速率大于铝合金侧,这和材料本身的导热系数有关。对于两侧边缘区域而言,铝合金侧温度约为110℃,而钢侧则接近室温,说明在焊接过程中,有部分热量传递到铝合金侧边缘,而几乎没有热量传递到钢侧边缘。板材厚度为3mm,从焊缝中间位置沿焊深方向每隔1mm取一点,各点热循环曲线如图7所示,可以看出,沿焊深方向各点峰值温度逐渐降低,且越靠近底部温降速率越小;曲线的反S型特征也逐渐消失,这是因为沿焊深方向所受轴肩热源的影响减小,而且板材底部和垫板接触,散热较快。

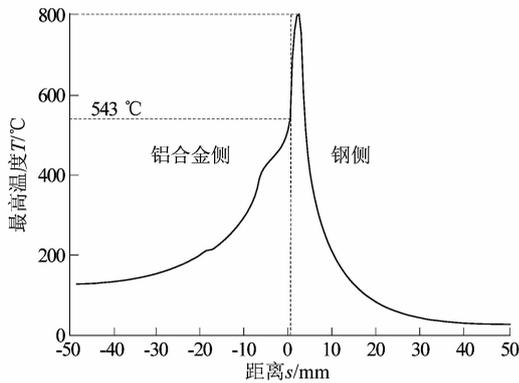


图6 纵向最高温度分布曲线
Figure 6 Longitudinal maximum temperature distribution curve

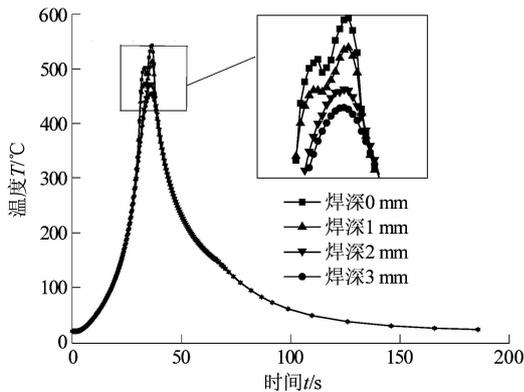
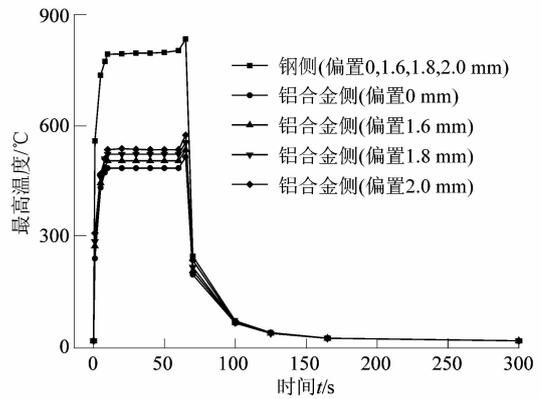


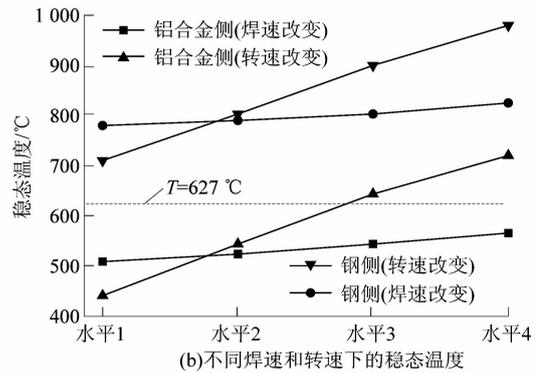
图7 焊深方向温度分布曲线
Figure 7 Temperature distribution curves of welding depth direction

2.4 焊接参数对焊接过程温度的影响

固定搅拌头转速为500 r/min,焊接速度为80 mm/min,改变搅拌头偏置量(偏置铝合金侧),偏置量分别为:0,1.6,1.8,2.0 mm,不同偏置量下,铝合金侧和钢侧最高温度随时间变化的曲线如图8(a)所示,可



(a)不同偏置量下的最高温度



(b)不同焊速和转速下的稳态温度

图8 焊接参数对温度的影响
Figure 8 Effect of welding parameters on temperature

以看出,随着偏置量的增大,铝合金侧最高温度逐渐增大,而钢侧最高温度不变,这是因为随着搅拌头往铝合金侧偏置,轴肩作用在铝合金侧的部分增大,产生热量增加。5052铝合金的熔点约为627℃,偏置量为2.0 mm时铝合金侧稳态焊接的最高温度为543℃,约为5052铝合金熔点的86%。固定焊接速度为80 mm/min,偏置量为2.0 mm,改变搅拌头转速,分别为:300,500,800和1000 r/min;固定搅拌头转速为500 r/min,偏置量为2.0 mm,改变焊接速度,分别为60,80,100和120 mm/min,各因素对应水平如表4所示,得到板材两侧稳态焊接时的温度随参数改变的曲线如图8(b)所示。可以看出,随着焊速的增大,铝合金侧和钢侧的温度变化不大;而增大搅拌头转速,温度则明显升高。这说明焊速对于焊接过程温度变化影响远小于搅拌头转速的改变。搅拌头转速是影响焊接过程温度变化的主要因素,且随转速增大,温度的升高速率会降低。5052铝合金的最低熔点为627℃,如图8(b)中所示,温度627℃以上对应的参数下稳定焊接阶段已经超过熔点,此时已不属于固相焊接,应当舍弃,所以转速取500 r/min较为合适。虽然焊速的改变没有导

致焊接稳态阶段温度增加超过熔点,但是焊速 60 mm/min 时温度接近 600 °C,在焊接结束阶段时温度会有所增加,将超过铝合金熔点,所以焊接速度取 80 mm/min。最终得到 304 不锈钢和 5052 铝合金较为适合的焊接参数:搅拌头转速取 500 r/min,焊速取 80 mm/min,偏置量取 2.0 mm。

表 4 各因素对应水平

Table 4 Corresponding levels of each factor

水平	因素	
	转速 $N/(r \cdot \min^{-1})$	焊速 $v/(mm \cdot \min^{-1})$
1	300	120
2	500	100
3	700	80
4	900	60

3 结论

课题组基于热弹塑性法和改良的热源模型,利用 ABAQUS 软件及其 DFLUX 子程序接口建立了 304 不锈钢和 5052 铝合金搅拌摩擦焊的数值模型,对铝合金-钢异种材料的搅拌摩擦焊过程进行了数值模拟研究:

1) 在偏置量、转速和焊速 3 个焊接参数中,搅拌头转速对于温度变化的影响最为显著,选取合适的参数可以有效提高焊接接头的质量,且在保证质量的前提下可以适当增加焊接速度以提高焊接效率。

2) 对焊缝中心处温度曲线出现的反 S 型特征现象给出了解释,但是否有其他影响因素在内尚不清楚。且对于试验中搅拌头内部温度难以测量,所以真实的

焊缝中心温度曲线有待再进一步的研究确定。

3) 分析焊深方向的温度曲线发现焊缝底部温度较低,实际焊接中有可能会产生未焊透的焊接缺陷。

4) 课题组的模拟建立在改进的产热模型之上,但对于热边界条件的设定仍是较为简化的等效条件,且未考虑辐射换热,有待进一步的研究中考虑这些问题。

参考文献:

- [1] 相倩,吕念春,薛鹏,等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. 机械工程学报,2017,53(20):28.
- [2] NANDAN R, ROY G G, LIENERT T J, et al. Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel [J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2006, 11(5):535-537.
- [3] 江旭东,黄俊,周琦,等. 铝-铜异种材料对接搅拌摩擦焊温度场数值模拟[J]. 焊接学报,2018,39(3):18.
- [4] 刘其鹏,顾乃建,刘泽,等. AA6061-T6 板材搅拌摩擦焊温度场仿真[J]. 大连交通大学学报,2018,39(3):83.
- [5] SELVARAJ M. A temperature dependent slip factor based thermal model for friction stir welding of stainless steel [J]. Sadhana, 2013, 38(6):1395-1399.
- [6] BUFFA G, HUA J, SHIVPURI R, et al. A continuum based fem model for friction stir welding: model development [J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 419(1/2):391.
- [7] 杜岩峰,白景彬,田志杰,等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊温度场的三维实体耦合数值模拟[J]. 焊接学报,2014,35(8):61.
- [8] CHAO Y J, QI X, TANG W. Heat transfer in friction stir welding: experimental and numerical studies [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2003, 125(1):172.
- [9] 郭青蔚. 常用有色金属二元合金相图集 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:8.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

第十二届中国国际国防电子展览会将在北京召开

第十二届中国国际国防电子展览会将于 2020 年 5 月 6 日-8 日在北京中国国际展览中心(静安庄)召开。中国国际国防电子展览会,两年一届,由中央军委装备发展部支持,中国电子科技集团有限公司、中国电子信息产业集团有限公司联合主办,自 1998 年起已成功举办了 11 届,是世界唯一一个国防电子类展览会,是荟聚全球顶尖军工电子企业的行业盛会。

此次展会的参展范围:

1) 电子信息领域:网络设备、光传输设备、通信设备、特种计算机及外部设备、网络信息安全产品与系统、新型显示器件、电子元器件、专用电子设备;北斗导航系统、人工智能、军用雷达、遥感探测、传感、测试、数字仿真等应用技术及软硬件产品。

2) 高端装备:各类航天、航空、船舶、轨道交通、医疗、特种制造等高端技术装备;核心关键配套件(连接器、电源、传感器、线缆等)、检验检测设备、可靠性试验设备等。

3) 电源与能源:军用电源技术及产品;军用高能量密度电池等新型储能装置和产品。

4) 新能源利用技术和产品;各类新型动力发生、转换、分配、管理的技术和产品。

5) 先进材料:各类先进金属材料、复合材料、无机非金属材料、高性能结构材料、航天航空特种材料、电子信息材料、纳米材料、复合材料,以及各类先进材料设计、制备、应用所需的相关技术和产品等。

6) 特种装备:反恐排爆、应急救援装备、后勤装备、特种车辆等。

(李 军)