

2A14-T6铝合金搅拌摩擦焊温度场及黏流层数值模拟分析*

马 核¹, 田志杰², 熊林玉², 颜 旭¹, 曹学敏¹, 张彦华¹

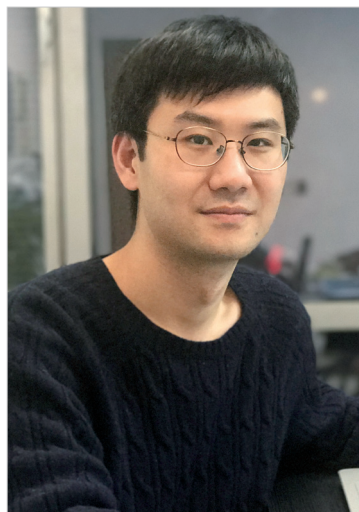
(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

[摘要] 针对 2A14 铝合金搅拌摩擦焊过程, 基于 CEL 数值模拟方法, 采用 Pressure Independ Multiyield Material 模型, 进行了不同搅拌头旋转速度与焊接速度条件下温度场有限元模拟分析。根据温度场分布分析了不同工艺条件下搅拌头前端黏流层厚度变化规律。依据搅拌摩擦焊过程中流变层工艺要求与黏流层模拟厚度, 预测了不同工艺条件下的焊接质量, 进而提出了 2A14 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数控制准则。

关键词: 搅拌摩擦焊; 温度场; Pressure Independ Multiyield Material 模型; 黏流层; 数值模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.055



马 核

博士研究生, 研究方向为焊接结构完整性、搅拌摩擦焊。

搅拌摩擦焊技术(friction stir welding, FSW)作为一种先进的固相连接技术, 为铝合金焊接提供了优选的解决方案。焊接温度场是搅拌摩擦焊的重点研究方向, 一般来说, 搅拌头旋转速度与焊接速度是研究焊接温度场重要的工艺参数, 其比值直接表征了焊接热输入量的大小, 即线能量密度^[1-2]。研究表明, 稳定焊接过程中, 搅拌头周围材料在高温作用下而软化呈现黏流态, 随搅拌头流动至搅拌头后方, 在中低温区域, 材料软化现象不显著, 固体性质明显^[3]。搅拌摩擦焊焊缝成形优劣的根本在于搅拌头前端被软化的黏塑性材料是否能充分填充搅拌头行走后产生的空腔。因此, 利用数值模拟焊接温度场方法对搅拌头前方黏流态物质状态与尺寸进行分析, 对研究搅拌摩擦接头质量有重要意义。

目前, 用于搅拌摩擦焊温度场的模拟方法大致分为计算固体力学与

计算流体力学两类, Al-Badour 等^[4]、Aziz 等^[5]基于固体力学方法建立了搅拌摩擦焊温度场, 但模型中材料属性为固体, 对焊接过程中材料黏塑性流动描述有所欠缺。王鑫^[6]、Kim 等^[7]基于流体力学方法建立了搅拌摩擦焊温度场, 模型中材料属性为流体, 材料黏塑性流动表征充分, 但对焊缝周围固态材料描述有所欠缺。为更加充分地模拟搅拌摩擦焊温度场, 本文基于固体力学计算方法, 采用流体状态方程补充描述固体本构模型的方法对 2A14 铝合金搅拌摩擦焊过程的温度场进行数值模拟, 通过不同线能量密度条件下温度场确定的黏流态物质范围, 分析了搅拌头转速与焊接速度对接头质量的影响, 为优化焊接工艺参数提供参考。

搅拌摩擦焊物理模型

搅拌摩擦焊过程可分为: 搅拌头下压阶段、搅拌头驻留阶段、稳定

* 基金项目: 国防基础科研资助项目(JCKY2014203A001); 民用航天预研资助项目(科工一司[2014]618号)。

焊接阶段和焊接完成阶段。在焊接前两个阶段,搅拌头摩擦被焊材料产热,搅拌头周围薄层材料被高温软化成为黏流状态,黏流态物质在搅拌头旋转作用下发生塑性变形,在塑性变形的同时进行变形产热,进一步增加搅拌头周围的产热量,当摩擦产热与塑性变形产热进入稳态后,焊接进入稳定状态,搅拌头周围薄层黏流态材料达到稳定厚度。在稳定焊接阶段,搅拌头转移其前端黏流态物质填充搅拌头行走后在后方产生的空腔,形成焊缝^[3]。如图1所示,搅拌头前端黏流态物质区域称为黏流层,搅拌头每旋转一周,搅拌头前端随搅拌头转移的材料层称为流变层。黏流层区域可通过焊接温度场确定,不同的温度使材料处于不同的状态。研究表明,对于2A14铝合金,500℃至接近材料固相线温度间为热塑性状态,流变抗力小于20MPa,此温度区间材料构成热塑性区。固相线温度附近材料流变抗力为0.01~1MPa^[8-11],可认为2A14铝合金在540℃附近达到黏流状态,此温度以上的材料区域构成黏流层区。流变层范围与搅拌头旋转速度及焊接速度有关,为工艺性要求。搅拌头前端流变层厚度计算公式为:

$$\delta = \frac{v}{n} \quad (1)$$

式中, δ 为搅拌头前端流变层厚度, v 为焊接速度, n 为搅拌头旋转速度。为了实现优质的焊接,搅拌头每旋转

1周所转移的材料应全部为黏流态材料,黏流态材料流变抗力极小,塑性流动能力强,被搅拌头转移时能充分填充搅拌头后方空腔,形成良好焊缝。

在实际焊接过程中,由搅拌摩擦焊温度场决定的黏流层与热塑性区也随搅拌头移动而移动,热源产热与热传导决定了黏流层与热塑性区域的范围,焊接速度决定了搅拌头前端与两区域的相对位置。当焊接速度过快,热传导速率不变时,搅拌头前端黏流层与热塑性区域将减小,当焊接速度高于黏流态物质热传导速率时,搅拌头会穿透粘流层与热塑性区接触发生干摩擦行为,导致随搅拌头转移材料塑性流动能力不充分,易产生缺陷或降低接头质量。当搅拌头转速过低时,摩擦与塑性变形产热不足,也将导致搅拌头前端黏流层与热塑性区域减小。因此,搅拌头转速与焊接速度的匹配会直接影响焊接接头质量。

综上所述,优质的搅拌摩擦焊在焊接过程中,搅拌头前端黏流层最小厚度应大于流变层厚度。搅拌摩擦焊流变层厚度 δ 仅与搅拌头转速和焊接速度有关,与材料性质无关。而实际搅拌摩擦焊过程中黏流层为温度场所建立,焊接温度场与搅拌头转速、焊接速度、材料热力性能等因素有关。因此为了研究搅拌摩擦焊黏流层范围,需要对焊接温度场进行分

析。采用解析法求解搅拌摩擦焊温度分布较难,而应用数值模拟方法求解这类问题比较适合。

搅拌摩擦焊数值模拟模型

Abaqus有限元分析软件在求解非线性问题方面功能强大,适用于热力学与动力学中复杂的耦合关系。因此,本文采用Abaqus软件对搅拌摩擦焊温度场进行数值模拟分析。

1 三维模型

为兼顾计算速度与重点研究区域,仅选取搅拌头与附近区域进行三维建模仿真。如图2所示,搅拌头空间位置固定,旋转方向为顺时针,通过材料移动模拟焊接行进过程。模型中设置材料进出界面,进出速度(移动速度)为焊接速度。两侧面为材料滑动面,材料被限制在这一区域内流动。

被焊板件模型尺寸为50mm×50mm×6mm,为观察搅拌针底部热力行为,在下方补充材料层厚度为0.5mm,同时为研究搅拌摩擦焊接过程中被焊工件上表面变化规律,增加1层空材料层,厚度为1.5mm,焊接方向如图3所示,AS为前进侧,RS

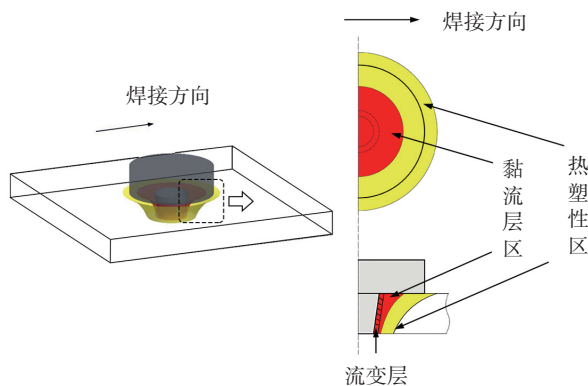


图1 搅拌头周围材料状态示意图

Fig.1 Schematic diagram of material state around rotating tool

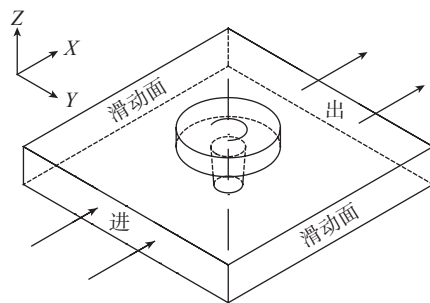


图2 模型边界条件示意图

Fig.2 Schematic diagram of boundary condition in model

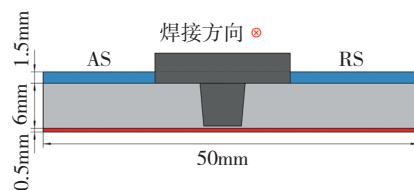


图3 三维模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of 3D model

为后退侧。实际生产中,搅拌头材料为热作模具钢,搅拌针为三平面,根部直径为 6mm,头部直径为 5mm,长度为 5.7mm,轴肩直径为 18mm,内凹角为 2° , 螺纹为左旋,间距 1mm,为简化模拟,搅拌针采用光滑平面代替,轴肩内凹角取 0,轴肩限定高度为 2mm,尺寸如图 4 所示。

2 热源模型

搅拌摩擦焊热源由摩擦产热与材料塑性变形产热两部分组成。摩擦生热采用库伦模型:

$$q = \mu f v_{\text{线}} \quad (2)$$

式中, q 为热流密度, μ 为摩擦系数, f 为接触应力, $v_{\text{线}}$ 为线速度。本次模拟中摩擦系数取 0.5。搅拌摩擦焊中塑性变形产热主要发生在流变层,塑性变形产热可表示为:

$$r_p = \eta \sigma \dot{\epsilon} \quad (3)$$

式中, r_p 表示热流; η 表示塑性功转换为热量的系数,取 $\eta=1$; σ 表示应力, $\dot{\epsilon}$ 表示应变速率^[12]。

2A14 铝合金的热物理性质如图 5 所示。

3 材料本构模型

通过上述分析可知,在稳定焊接过程中,搅拌头附近存在薄层黏流体材料,这一区域外还存在热塑性材料,而其他区域材料呈现弹塑性状态。为充分体现材料的这些状态,采用 Pressure Independ Multiyield Material 模型,该模型中,正应力与切应力独立采用两种本构方程表达。黏流态物质流变抗力极小,变形时类似流体,可采用 Grüneisen 物态方程中压力与形变形式描述。热塑性区

域材料表现出金属热塑性软化状态,在搅拌摩擦焊接过程中切应力起主要作用,可采用 Johnson-cook 模型描述材料流变抗力随温度的变化。焊接过程中的弹性行为通过弹性模量描述。

Grüneisen 状态方程为:

$$P_T(V, T) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} E_T(V, T) \quad (4)$$

或

$$p - p_c = \frac{\gamma}{\gamma - 1} E - E_c \quad (5)$$

在热力学上, Grüneisen 系数 $\gamma = V(\frac{\partial p}{\partial E})_v = V \frac{P_T}{E_T}$, 它表示热压分量与热能分量的某种比例关系。

压缩材料的压力为:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 u (1 + (1 - \frac{v_0}{2})u - \frac{q}{2}u^2)}{(1 - (S_1 - 1)u - S_2 \frac{u^2}{u+1} - S_3 \frac{u^3}{(u+1)^2})^2} + (\gamma_0 + \alpha u) \quad (6)$$

$$u = \frac{1}{\gamma} - 1 \quad (7)$$

γ_0 为常态下的 Grüneisen 系数,可以通过以下方法获得:

$$\gamma_0 = V \frac{\alpha_v B_T}{C_v} = \frac{\alpha_v c^2}{C_v} \times \frac{1}{1 + \alpha_v \gamma T} \quad (8)$$

材料膨胀时压力为:

$$P = \rho_0 C^2 u + (\gamma_0 + \alpha u) E \quad (9)$$

公式(4)~(9)中: P_T 为热压; E_T 为热能; p_c 为冷压; E_c 为冷能; c 为流

体力学声速,即零压下的冲击波速度 c_0 ; B_T 为等温体积模量; E 为内能; P 为压力; α_v 为体膨胀系数; C_v 为定容比热容; C 为 $u_s - u_p$ 曲线的截距, S_1 、 S_2 、 S_3 是 $u_s - u_p$ 曲线斜率的系数; α 是对 γ_0 的一阶体积修正^[14]。Grüneisen 状态方程参数如表 1 所示。

Johnson-cook 材料本构模型描述材料高应变速率下热黏塑性变形行为, Johnson-cook 本构模型为:

$$\sigma = (A + B \epsilon^w) (1 + C_1 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (10)$$

式中,第 1 项描述了材料的应变强化效应,第 2 项反映了流动应力随对数应变速率增加的关系,第 3 项反映了流动应力随温度升高指数降低的关系。 $\dot{\epsilon}_0$ 表示参考应变速率, T_r 表示参考温度, T_m 为材料熔点。 A 、 B 、 w 表征材料应变强化项系数, C_1 表示材料应变速率强化系数, m 表示材料热软化系数, T_r 为环境温度, T_m 为材料固相线温度^[6]。Johnson-cook 本构模型参数如表 2 所示。

搅拌摩擦焊接温度场模拟分析

耦合欧拉-拉格朗日分析 (Coupled Euler-Lagrange), 即 CEL 分

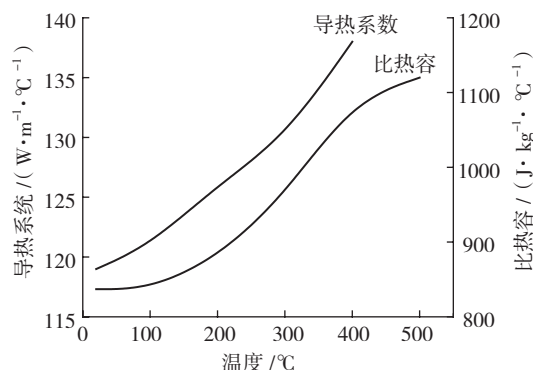


图5 2A14铝合金热物理性质

Fig.5 Thermal physical parameters of 2A14 aluminum alloy

表1 2A14铝合金 $u_s - u_p$ 方程参数

密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切弹性模量 / GPa	c_0 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	S_1	S_2	S_3	γ_0
2840	27	5328	1.338	0	0	2

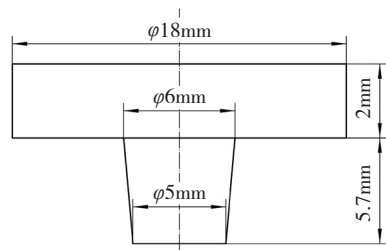


图4 搅拌头尺寸示意图

Fig.4 Schematic of rotating tool size

析方法,是 Abaqus 有限元模拟软件开发的一项用于多物理场强耦合问题的数值模拟技术。CEL 方法综合了欧拉分析和拉格朗日分析的优点,欧拉分析对于处理大变形问题,包括流体动力学非常有效,拉格朗日分析则适用于固体力学模拟^[4-5]。搅拌摩擦焊接过程中的热力行为属于大变形流固耦合过程,因此本次模拟基于 CEL 方法。

1 2A14铝合金搅拌摩擦焊接温度场分布

根据工艺试验确定 2A14 铝合金搅拌摩擦焊优选工艺参数为: 搅拌头旋转速度 $n=600\text{r/min}$, 焊接速度 $v=180\text{mm/min}$ 。优选工艺条件下仿真模型温度场分布如图 6 所示,在稳定焊接阶段,摩擦界面中极个别节点温度出现超过材料固相线现象,达到 549°C 。搅拌头与被焊材料接触界面周围存在一薄层高温区域,该区域材料温度为 540°C 左右,接近固相线,流变抗力极低,材料处于黏流态,构成黏流层。黏流层外侧区域部分材料温度约为 500°C 左右,处于热塑性状态,构成热塑性层。沿搅拌针深度方向截取距离轴肩 0.5mm 处作为表面层(图 6 (a)),观察发现,搅拌头前端高温区域范围大于后端。截取距离轴肩 4.2mm 处作为中间层(图 6 (b)),这一位置搅拌头前端黏流层厚度最薄。截取距离轴肩 5.7mm 处作为底面层,此位置为搅拌针尖部与被焊材料接触面,属于焊根位置,由图 6 (c) 可知,焊根位置最高温度达到 540°C ,处于黏流状态。

图 7 所示为优选参数条件下接头横截面模拟温度场与金相组织对比。观察可知,搅拌摩擦焊接头横截面中的轴肩影响区(SAZ,图 7 (a) 中 I) 与焊核区(NZ,图 7 (a) 中 II) 相连,热力影响区(TMAZ,图 7 (a) 中 III) 毗邻上述两个区域,热影响区(HAZ,图 7 (a) 中 IV) 紧邻热力影响区。仿真模型中,与搅拌头相接触区

域温度较高,并向两侧逐层降低。对比发现,温度梯度分布与金相组织变

化存在相关关系,与搅拌头接触区域温度接近固相线,高温覆盖范围接

表2 2A14铝合金Johnson-cook方程参数

A/MPa	B/MPa	w	m	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	C_1
453	453	0.5948	1.08	543	0	0.013

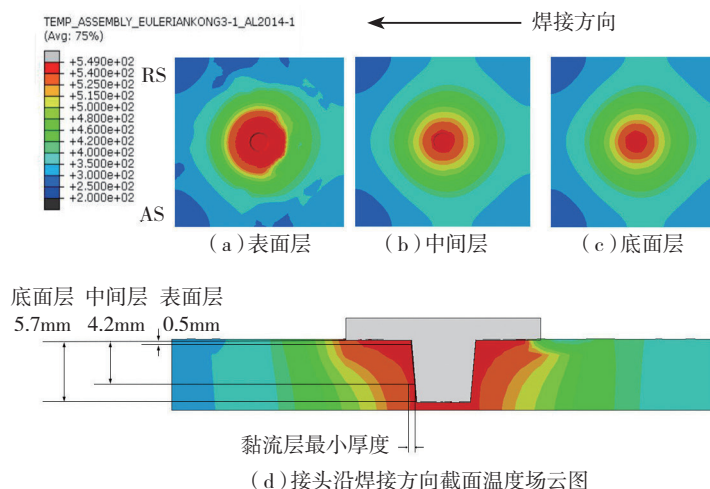
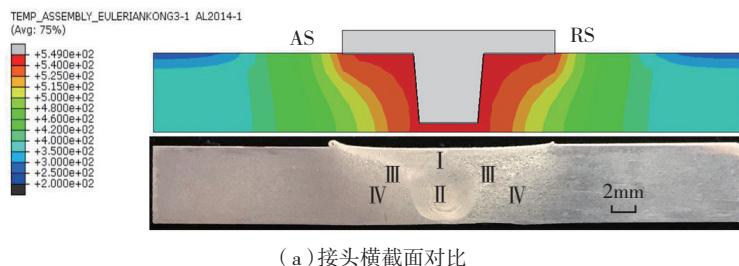
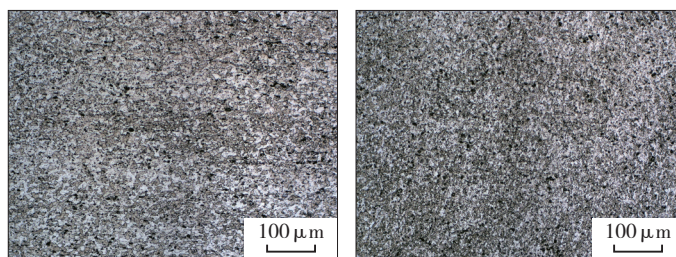


图6 优选工艺参数焊接温度场

Fig.6 Temperature field of FSW joint with optimal parameter

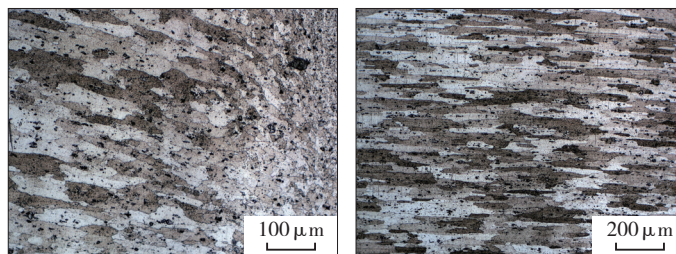


(a) 接头横截面对比



(b) 图 7 (a) 中 I 区域

(c) 图 7 (a) 中 II 区域



(d) 图 7 (a) 中 III 区域

(e) 图 7 (a) 中 IV 区域

图7 温度分布与微观组织

Fig.7 Temperature distribution and microstructures of FSW joint

近SAZ与NZ区域,这一现象是由于固相线附近材料到达黏流状态,受搅拌头搅拌、拽曳作用后晶粒细化,凝固成焊缝时形成SAZ与NZ区。黏流层两侧区域材料温度达到 500°C ,处于热塑性状态,具有一定流变抗力,材料没有发生流动,但晶粒存在拉长、弯曲与长大现象,最终形成TMAZ与HAZ区域。

将2A14铝合金搅拌摩擦焊优选工艺参数带入公式(1),可知焊接所需的流变层厚度 $\delta=0.3\text{mm}$ 。分析模拟温度场可知,在中间层及搅拌针前端黏流层厚度最小,为 0.46mm ,其大于流变层厚度,说明温度场建立合理,能够实现稳定焊接。

2 工艺参数对搅拌摩擦焊接温度场影响

搅拌摩擦焊过程中搅拌头旋转速度与焊接速度直接影响搅拌头前端温度分布,因此分别对不同搅拌头旋转速度与焊接速度条件下焊接进行模拟,工艺参数分组如表3所示。

为研究搅拌头旋转速度对接头质量的影响,选取3组搅拌头转速不同,焊接速度相同的工艺情况进行模拟分析(即A-1、A-2、A-3组)。图8为焊接稳定状态时,沿焊接方向焊缝截面的温度分布,与优选工艺参数搅拌摩擦焊温度场类似,在搅拌头周围存在一薄层区域,材料温度达到 540°C ,构成黏流层。如图9所示,随着搅拌头转速的降低,搅拌头前端黏流层厚度逐渐减小, $n=400\text{r/min}$ 时,搅拌针前端下部黏流层逐渐消失; $n=600\text{r/min}$ 与 $n=800\text{r/min}$ 时,搅拌头前端黏流层厚度大致相似。分析这一现象,可以推断, $n=400\text{r/min}$ 时,线能量较低,高温区域建立范围不够广泛,在稳定焊接时,搅拌头会先于黏流层行走。 $n=600\text{r/min}$ 与 $n=800\text{r/min}$ 时,线能量较大,高温范围足够广泛,搅拌头前端可以形成厚度充分的黏流层,满足流变层厚度需要。

为研究焊接速度对接头质量的

影响,选取3组焊速不同,搅拌头转速相同的工艺情况进行模拟分析(即A-2、A-4、A-5组)。图10为焊接稳定状态时各组仿真模型在沿焊接速度方向焊缝截面的温度分布。如图10、图11所示,各组模型在搅拌头前端均存在一层约 540°C 的黏流层,黏流层厚度随焊接速度增加而减小。搅拌头转速固定的情况下,温度场建立恒定,焊接速度增加会使搅拌头更加逼近黏流层前端边缘,当搅拌头前

端黏流层最小厚度小于流变层厚度时,黏流态材料与热塑性材料同时被搅拌头迁移至搅拌头后方的空腔,由于热塑性材料流动性能不充分,接头质量将会下降。 $v=150\text{mm/min}$ 与 $v=180\text{mm/min}$ 时,搅拌头前端有足够厚度黏流层; $v=220\text{mm/min}$ 时,搅拌头前端黏流层最小厚度低于所需流变层厚度。

上述分析表明,搅拌头每旋转一周,随搅拌头向后方转移的黏流态材

表3 仿真模型工艺参数分组

编号	搅拌头旋转速度 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	流变层厚度 δ/mm
A-1	400	180	0.45
A-2	600	180	0.3
A-3	800	180	0.225
A-4	600	220	0.37
A-5	600	150	0.25

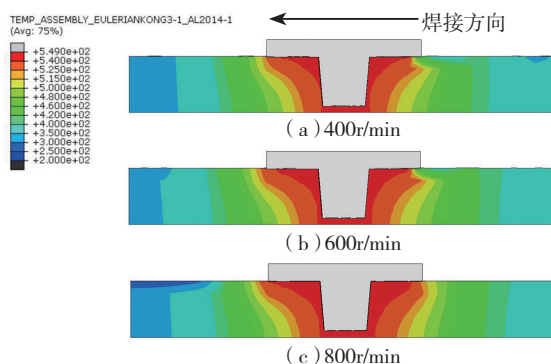


图8 不同旋转速度下接头纵截面温度场分布

Fig.8 Temperature distribution of joint in welding direction at different rotating speeds

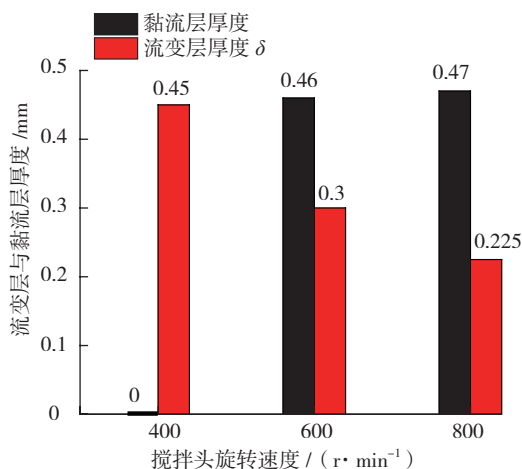


图9 搅拌头转速对流变层与黏流层厚度的影响

Fig.9 Effect of rotating speed on viscous state thickness and flow layer thickness

料应足够填充其行走过的距离,不同搅拌头转速与焊接速度对于搅拌头前端黏流层最小厚度需求不同。如图 12 所示, A-4 组工艺条件下,温度场建立的黏流层厚度小于所需流变

层厚度,不能达到良好的焊接效果。A-1 组工艺条件下,焊接热输入量不足,搅拌头前端未能形成黏流层,焊接质量将进一步下降,上述两组工艺参数未满足要求。而 A-2、A-3、A-5

这 3 组工艺参数可以建立合理的温度场使搅拌头前端的黏流层满足所需流变层厚度要求,能够获得质量良好的焊接接头,这与实际焊接结果一致。

根据 2A14 铝合金搅拌摩擦焊工艺试验结果可知, A-4 组工艺条件下,焊接线能量密度过小,接头质量下降明显,则其流变层厚度可对应为流变层厚度的上限。当搅拌头仅旋转不移动时,搅拌头周围摩擦产热与被焊材料塑性流动产热进入稳态后,可形成稳定的温度场,这一状态下对应的黏流层厚度为黏流层厚度的上限,此状态下黏流层厚度与热源及材料性质关系密切。黏流层与流变层厚度上限分别如图 12 中虚线所示。

结论

(1) 将 Pressure Independent Multiyield Material 模型应用于搅拌摩擦焊接温度场的仿真模拟,引入 Grüneisen 物态方程,弥补了 Johnson-cook 本构方程在类流体描述方面的不足,为描述搅拌摩擦焊接过程中复杂的热力耦合行为提供了一种新方法。

(2) 2A14 铝合金搅拌摩擦焊中搅拌头周围存在接近固相线温度的薄层材料,该温度下薄层材料呈现黏流态,构成黏流层。稳定焊接过程中,搅拌头前端黏流层厚度应大于流变层厚度,才能确保搅拌头旋转一周转移的黏流态材料足够填充搅拌头行走后产生的空腔,进而确保焊接质量。

(3) 搅拌头前端黏流层厚度随搅拌头旋转速度降低而减小,搅拌头旋转速度过低时,热输入量不足,不能形成厚度充分的黏流层,难以实现稳定的焊接。搅拌头前端黏流层厚度

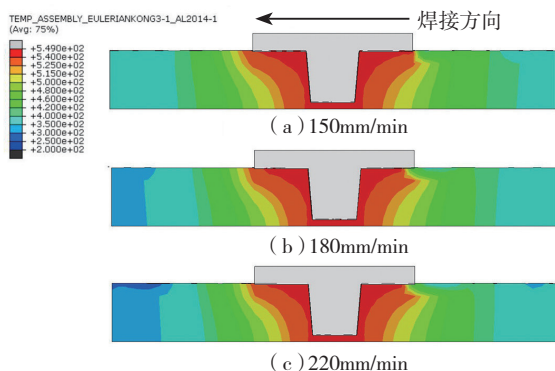


图10 不同焊接速度下接头纵截面温度场分布

Fig.10 Temperature distribution of joint in welding direction at different welding speeds

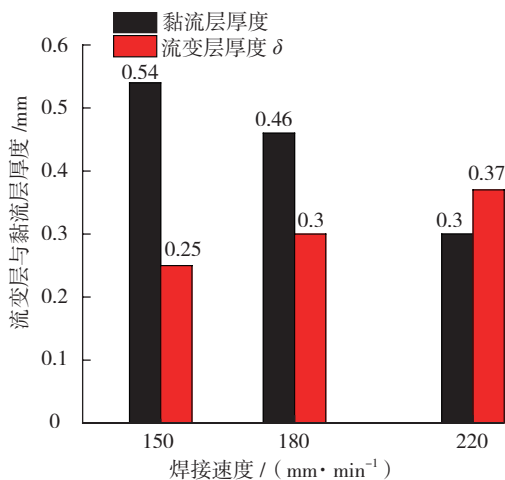


图11 焊接速度对流变层与黏流层厚度的影响

Fig.11 Effect of welding speed on viscous state thickness and flow layer thickness

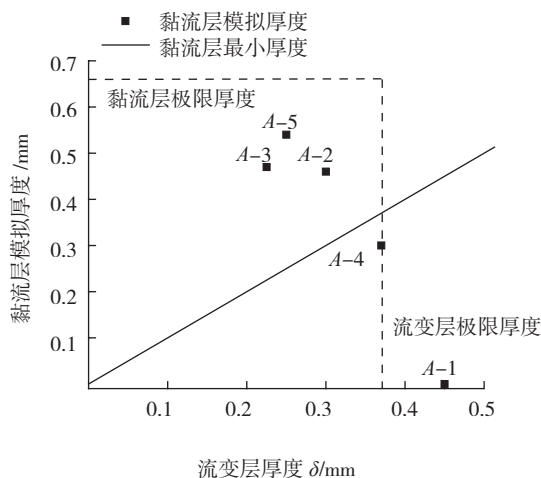


图12 2A14铝合金搅拌摩擦焊黏流层厚度与流变层厚度控制图

Fig.12 Control chart of viscous state layer and flow layer thickness

随焊接速度增加而减小,焊接速度过快时,搅拌头前端黏流层厚度小于所需流变层厚度,使搅拌头前端黏流态材料不能充分填充搅拌头后方空腔。

参考文献

- [1] 赵衍华,林三宝,贺紫秋,等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接过程数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 92-97.
- ZHAO Yanhua, LIN Sanbao, HE Ziqiu, et al. Numerical simulation of 2014 aluminum alloy friction stir welding process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 92-97.
- [2] HUANG Y X, MENG X C, ZHANG Y B, et al. Micro friction stir welding of ultra-thin Al-6061 sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 313-319.
- [3] 张彦华,常金玲,刘雪梅. 搅拌摩擦焊过程的流变学初步分析[C]//第十一次全国焊接会议论文集. 上海, 2005.
- ZHANG Yanhua, CHANG Jinling, LIU Xuemei. Primary study of material flow behavior during FSW[C]//Proceedings of 11th National Welding Conference. Shanghai, 2005.
- [4] AL-BADOUR F, MERAH N, SHUAIB A, et al. Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(8): 1433-1439.
- [5] AZIZ S B, DEWAN M W, HUGGETT D J, et al. Impact of friction stir welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 29(9): 1-15.
- [6] 王鑫. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊实验研究及流动仿真[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- WANG Xin. Experiment research and flow simulation of 7A52 aluminum alloy FSW[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [7] KIM S D, YOON J Y, NA S J. A study on the characteristics of FSW tool shapes based on CFD analysis[J]. Welding in the World, 2017, 61(3): 1-12.
- [8] 郭论文. 2A14 铝合金热压缩变形流变行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- GUO Lunwen. Study of flow behavior of 2A14 aluminum alloy during hot compression deformation[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [9] 邢书明,张励忠,谭建波,等. 半固态流变成形工艺理论—第2部分流变补缩理论[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(4): 215-219.
- XING Shuming, ZHANG Lizhong, TAN Jianbo, et al. Rheological forming theory of semi-solid alloy—Part 2 rheological feeding theory[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(4): 215-219.
- [10] 郭洪民. 半固态铝合金流变成形工艺与理论研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- GUO Hongmin. Investigation on technique and theory of rheological forming for semi-solid aluminum alloys[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [11] 湛利华,钟掘,李晓谦,等. 连续铸轧流变行为的物理模拟及其应力—应变关系的演变[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(12): 1995-2002.
- ZHAN Lihua, ZHONG Jue, LI Xiaoqian, et al. Physical simulation of rheological behavior and stress-strain relation evolution in continuous roll-casting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(12): 1995-2002.
- [12] 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): 57-60.
- DU Yanfeng, BAI Jingbin, TIAN Zhijie, et al. Investigation on three-dimensional real coupling numerical simulation of temperature field of friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 57-60.
- [13] FRASER K A, LYNE S, KISS L I. Numerical simulation of bobbin tool friction stir welding[C]//Proceedings of 10th International Friction Stir Welding Symposium. Beijing, 2014.
- [14] 吴强. 金属材料高压物态方程及 Grüneisen[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- WU Qiang. Studies on equation of state and Grüneisen parameter for metals at high pressures and temperatures[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2004.

通讯作者: 张彦华,教授、博士生导师,研究方向为焊接结构完整性, E-mail: zhangyh@buaa.edu.cn.

Thermal Behavior and Pre-Molten Viscousness Layer Simulation of Friction Stir Welding on 2A14-T6 Aluminum Alloy

MA He¹, TIAN Zhijie², XIONG Linyu², YAN Xu¹, CAO Xuemin¹, ZHANG Yanhua¹

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Basing on the CEL numerical simulation method, adopted by Pressure Independ Multiyield Material model, the welding temperature field for friction stir welding (FSW) process of 2A14 aluminum alloy at different rotating speeds and welding speeds was simulated by finite element method. According to the temperature distributions, the variation rule of pre-molten viscousness layer at the front of the rotating tool was analyzed. Compared the requirement of rheological layer with simulated thickness of pre-molten viscousness layer, joint quality under different welding parameters was predicted. Therefore, the reference of process parameters selection for 2A14 aluminum alloy FSW was proposed.

Keywords: FSW; Temperature field; Pressure Independ Multiyield Material model; Pre-molten viscousness layer; Numerical simulation

(责编 逸飞)