

TC4 钛合金惯性摩擦焊接过程的数值模拟

李 淮¹ 李慎华¹ 贾成阁¹ 毕海峰² 关英俊¹

(1 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012)

(2 长春数控机床有限公司, 长春 130033)

文 摘 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了 TC4 钛合金的惯性摩擦焊 (IFW) 焊接过程的二维轴对称模型, 通过确立 Johnson-Cook 损伤模型以及 ALE 技术对 TC4 钛合金的惯性摩擦焊焊接过程进行了热力耦合分析, 发现 TC4 惯性摩擦焊在 0.2 s 内温度升高到 200~300 °C, 0.5 s 左右温度升高到 1 100~1 200 °C 之后温度升高趋于平缓, 到达峰值后温度缓慢下降, 焊接完成。轴向缩短量在 0.6 s 内非常小, 温度达 1 100~1 200 °C (0.6~1.2 s) 轴向缩短量增长十分快并基本达到峰值, 1.2~1.4 s 由于粘结作用温度不再升高轴向缩短量增加缓慢, 1.4 s 后焊接基本完成轴向缩短量不再增加。初始阶段轴向应力基本没有变化, 随着温度升高 (0.2~0.5 s) 压应力在中心区域增大, 0.5~1.2 s 内边缘形成拉应力, 中心区域应力集中愈发明显, 1.2 s 后拉应力明显增加。而径向应力随着温度的升高中心应力明显高于外侧并使金属向两侧流动。这就可以得出飞边形成主要是因为高温、轴向应力以及径向应力共同复杂作用而形成的结果。模拟结果基本与实际相符, 对提高惯性摩擦焊接质量提供了重要的参考作用。

关键词 TC4, 惯性摩擦焊, 数值模拟, Johnson-Cook 损伤模型, ALE 技术

中图分类号: TG453⁺.9

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.006

Numerical Simulation of Inertial Friction Welding of TC4 Titanium

LI Wei¹ LI Shenhua¹ JIA Chengge¹ BI Haifeng² GUAN Yingjun¹

(1 School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012)

(2 Changchun CNC Machine Tool Co., Ltd, Changchun 130033)

Abstract Based on ABAQUS finite element analysis software, a two-dimensional axisymmetric model of TC4 titanium alloy inertial friction welding (IFW) process was established. The thermal coupling analysis of TC4 titanium alloy by inertial friction welding was carried out by establishing Johnson-Cook damage model and ALE technique. It was found that TC4 inertial friction welding increased to about 200 °C to 300 °C in 0.2 s, up to 1 100 to 1 200 °C in 0.5 s and then reached to a flatten. After reaching the peak, the temperature dropped slowly and the welding were completed. The axial shortening is very small within 0.6 s, and it increases very fast and reaches a peak substantially at temperatures of 1 100 to 1 200 °C (0.6 to 1.2 s), from 1.2 to 1.4 s axial shortening increases slowly due to cementation. The temperature no longer increases after 1.4 s, and the welding is completed and the axial shortening is no longer increased. The initial stage of axial stress basically unchanged, with increasing temperature (0.2 to 0.5 s) compressive stress increases in the central region. The stress concentration in the center is more obvious, after 1.2 s tensile stress increases significantly. The radial stress increases with temperature, center stress was significantly higher than the outside and the metal flow to both sides. This leads to the result that the flash formation is mainly due to the complicated effect of high temperature, axial stress and radial stress. The simulation results are basically consistent with the actual results, which can provide an important reference for improving the welding quality of inertial friction welding.

Key words TC4, IFW, Numerical simulation, Johnson-Cook damage model, ALE technology

0 引言

TC4 钛合金是典型的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金, 由于其

收稿日期: 2017-09-25

第一作者简介: 李淮, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事惯性摩擦焊方面的研究工作。E-mail: 937414560@qq.com

通信作者: 关英俊, 1978 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为机械结构力学分析及优化设计。E-mail: gjy5460@sohu.com

具有较高的比强度,在航空工业以及其他工业领域有广泛的用途^[1]。采用传统焊接方法焊接 TC4 钛合金时,由于气体等杂质的污染极易引起焊接接头脆化,并且极易产生焊缝缺陷,惯性摩擦焊可以很好的避免上述问题。惯性摩擦焊焊接过程时间短,瞬时产热高且消耗能量少,并且摩擦焊焊接质量非常好,所受的影响参数少,便于控制。基于以上特点,这种优质技术已经广泛应用于汽车、航空航天、能源等领域。摩擦焊的实质即是摩擦生热的一个过程。与其他焊接不同,摩擦焊的热源是通过动能转化而来的内能。在摩擦焊的过程中,摩擦破坏了金属表面的氧化膜,摩擦生热降低了金属的强度,但提高了它的塑性。摩擦表面金属的塑性变形与流动,防止了金属的氧化,促进了焊接金属原子的互相扩散,形成了牢固的焊接接头。所以摩擦焊的焊接质量非常高。

研究工作者们对惯性摩擦焊的温度场、应力场、轴向缩短量、接头性能以及飞边成型进行了大量研究外,也对惯性摩擦焊的数值模拟进行了研究。王锴等^[2]用 ANSYS 模拟创建了 GH4169 惯性摩擦焊二维轴对称模型,这一模型将三维问题简化为二维问题提高了处理效率;王月等^[3]通过研究 FGH96 的轴向界面力的演变规律,诠释了摩擦区域的应力变化;卜文德等^[4]通过建立 IN718 的三维有限元模型对惯性摩擦焊的温度场的变化做了一定的研究。

惯性摩擦焊焊接过程短,并且生热与顶锻压力非

常大,工件所受的应力场以及温度场十分复杂,工件的物理性能以及力学性能随温度的变化较为复杂,因此惯性摩擦焊的理论研究就变得比较困难。

随着有限元数值模拟技术的发展,为研究复杂的热力耦合场带了来新的思路。本文基于 ABAQUS 软件的显式模块(Explicit)在计算中考虑材料的力学性能、热物理性、Johnson-Cook 损伤模型以及 ALE 技术来研究惯性摩擦焊的焊接过程。

1 有限元模型的建立

1.1 几何模型

工件采用直径为 10 mm,长为 40 mm 的 TC4 钛合金棒材如图 1 所示。在惯性摩擦焊焊接过程中,塑性变形主要集中于两工件的接触部分,故接触部分的网格应当划分较密以提高计算精度,减少网格畸变。由于弹性变形过程非常短,因此为了简化模型可忽略不计。除接触部分以外变形量很小因此可以近似看成刚体,网格的划分也不用非常精细。工件的焊接区域采用的是 CAX4RT 四结点热耦合轴对称四边形单元,这种单元可以很好地进行热力耦合,并且可以非常准确的模拟变形结果。其余部分采用的是 CAX3T 三结点热力耦合轴对称三角形单元,这种单元可以进热传导与力传导,但对于变形控制就非常差并且精度不高。由于这部分没有塑性变形故这种单元也可以满足需求。

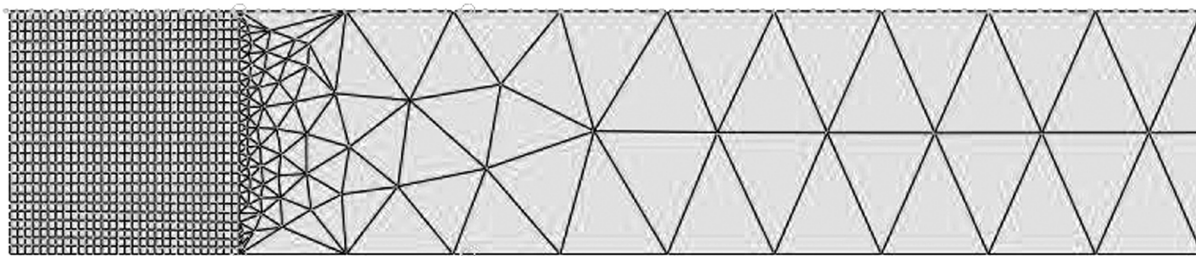


图 1 焊件的网格划分

Fig.1 The mesh of weldment

1.2 材料属性及工艺参数

材料模型为 TC4 钛合金,计算中给定的热物性参数包括密度、比热容、Johnson-Cook 损伤模型参数、弹性模量、泊松比、热传导率、线胀系数、不同温度应变下的屈服应力等。

焊接工艺参数为:转速 $n = 1\ 450\ \text{r/min}$,顶锻压力 350 MPa,转动惯量 $4.4\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$

1.3 边界条件

旋转工件通过飞轮带动同轴一起转动,另一工件轴向施加顶锻压力,焊接面的设置为面面接触。设置单元属性为有一定程度上的沙漏控制,所以能在一定范围内控制过度的扭曲变形。预定义温度场为 20

℃。由于摩擦焊的热源比较特殊,它的主要来源是通过摩擦生热,由动能转化为内能以提供热源,接触面(焊接面)处的热源可以由以下公式来定义^[5]。

$$dP/dS = 2\pi\mu pn \quad (1)$$

式中, P 为摩擦产热功率, S 为截面积, r 为截面半径, p 为顶锻压力, n 为转速。

1.4 Johnson-Cook 损伤模型

Johnson-Cook 损伤模型具有材料参数物理意义明确,并且相对简单易于实验数据拟合,通用性强等^[6]很多优点,尤其在热-粘塑性等的问题中进行数值计算具有很好的适用性。

Johnson-Cook 损伤模型是经验型本构方程,Von

Mises 等效应力是等效塑性应变、应变率和温度的函数^[7]：

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中， σ_{eq} 为等效应力， ε_{eq} 为等效应变， $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲化等效应变率，式中， $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率； $T^{*m} = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲化温度， T_r 为参考温度， T_m 为材料熔点， T 为当前温度； A, B, n, c, m 为实验所得^[8]。根据文献[9]可得具体参数如表 1 所示。

表 1 J-C 模型参数

Tab.1 J-C model parameters

A/MPa	B/MPa	n	C	M
1077	845	0.58	0.025	0.7538

1.5 ALE 网格优化

Arbitrary Lagrange-Euler 算法简称 ALE，通常大变形材料采用拉格朗日型有限元网格并非总是可行的^[10]，常常会导致迭代步大量增加，模型计算时间变长并且网格畸变严重。ALE 方法的采用可以很好的解决这些问题。

ALE 的简要算法流程为：(1) 通过开始阶段的一个或几个拉格朗日时步计算，使网格随材料的变化而产生变形，随后对内部单元进行重新划分并且保留了之前变形后的边界条件，这样使网格的拓扑关系保持不变，称为平滑阶段；(2) 将变形网格中的单元变量（密度、能量、应力张量等）和节点速度矢量输运到重分后的通过上述流程单元就完成了对各种变量的输运，并且不会影响计算精度，克服了大变形中拉格朗日型网格畸变的问题。

1.6 摩擦焊中的摩擦行为

摩擦焊的摩擦行为是一个较为复杂的过程，可以将其近似的看作是一个由两种摩擦行为分阶段组合而成的摩擦行为^[11]。

1.6.1 库伦摩擦模型

在摩擦焊接过程的初始阶段，即摩擦扭矩还未达到峰值扭矩的阶段，这个阶段非常短暂，此时由于焊接面温度较低还未产生塑性变形，因此主要以干摩擦为主，摩擦类型主要是焊件周边的氧化摩擦与焊接面的黏着摩擦。因此可以看作库伦摩擦模型，此时摩擦应力计算公式如下：

$$\tau_c = -\mu\sigma_n \frac{v_s}{|v_s|} \quad (3)$$

式中，“-”代表摩擦应力与工件相对运动速度相反， τ_c 为初始阶段摩擦应力， σ_n 为正应力， v_s 为工件相对速度， μ 为摩擦因数。其中摩擦因数可以由下方经验公式^[12]所得

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

$$\mu = f_0 P^a T^b \exp(cV) \quad (4)$$

式中， P 为摩擦压力， T 为温度， V 为工件相对转速， f_0, a, b, c 是通过试验获得的常数。

1.6.2 剪切摩擦模型

在接头温度升高达到屈服变形时的阶段可以采用剪切摩擦模型来描述，摩擦应力为：

$$\tau_s = -mk \frac{v_s}{|v_s|} \quad (5)$$

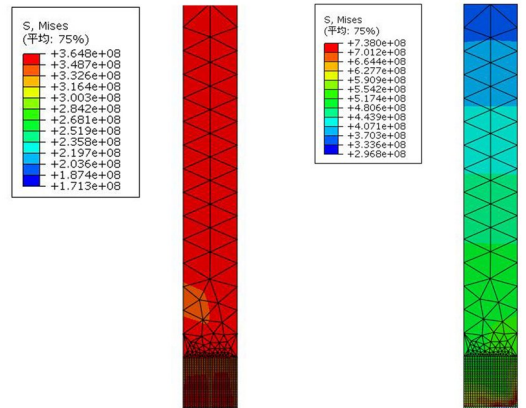
式中， τ_s 为摩擦应力， k 为剪切屈服强度， m 为剪切摩擦因子取值范围为 0~1， k 与屈服强度 σ_s 的关系为：

$$k = 0.557\sigma_s \quad (6)$$

此时焊接面温度非常高，已经形成高温塑性层。由于高温，摩擦副发生黏着现象，又因为焊接高温区域较窄，所以摩擦发生在塑性区域内，即整个塑性金属层都发生了相对剪切运动。这个时候可近似地认为焊接面上的剪切应力与高温塑性层中的材料的屈服强度相等^[13-15]，因此取 $m=1$ 。

1.7 力的加载方式

在 ABAQUS 中热力耦合非线性问题需要使用 Explicit 模块分析。但该模块在加载顶锻压力的时候传导性非常差，甚至出现了加载不上力的情况，并且计算时间非常久，这样就大大降低了模拟结果的准确性与效率。与此同时 ABAQUS 中的 Standard 模块对力的加载以及传递有非常好的效果，因此可以建立两个相同模型，先通过 Standard 模块加载顶锻压力，然后通过预定义场，将加载好的顶锻压力导入另一个模型中，这样就可以很好的解决力的加载问题。如图 2 所示，在都加载 350 MPa 的顶锻压力的时候，Standard 计算的结果非常均匀，并且几乎没有应力改变，而 Explicit 求解出的应力结果出现了应力集中现象，与实际情况不符并且应力最大处可以达到 738 MPa，这样就产生了很大的误差。



(a) Standard 模块 (b) Explicit 模块

图 2 两种不同模块下应力分布图

Fig.2 The stress distribution under two kinds of different modules

2 模拟结果及分析

2.1 焊接过程及温度场分析

2.1.1 初始摩擦阶段

从两个工件接触的原点起,到温度显著增加为止(0~0.2 s)。摩擦开始,由于工件焊接面不平,以及存在氧化膜、锈、油、灰尘和吸附着的一些气体,使得摩擦因数很小,随着摩擦进行,摩擦压力不断增加,温度也慢慢增加,最后摩擦焊接表面温度升高到 200~300 °C(图 3)

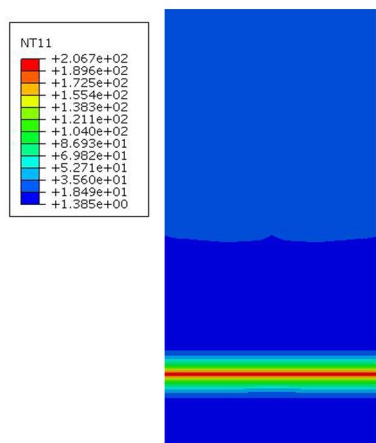


图 3 初始摩擦阶段温度分布图

Fig.3 Initial stage of friction temperature distribution

2.1.2 不稳定摩擦阶段

温度变化率显著增大开始一直到温度最大值为止(0.2~0.5 s),摩擦焊的基本原理主要作用在这个阶段与下个阶段。在这个阶段中摩擦焊表面的温度由 200~300 °C 提高到了 1 100~1 200 °C(图 4)。这是摩擦焊的一个主要阶段,这个时候接头的塑性变形增大,并以飞边的形式出现。

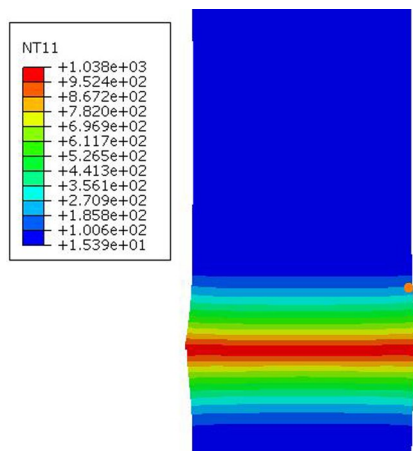


图 4 不稳定摩擦阶段温度分布图

Fig.4 The temperature of unstable friction stage

2.1.3 稳定摩擦阶段

从最高温度起到温度变化处于一个较为稳定的阶段为止(0.5~1.2 s)。此时各个焊接工艺参数变化趋于稳定,只有摩擦变形量不断增大,飞边增大,接头的热影响区增宽(图 5),这个阶段也是摩擦焊的一个

主要阶段。

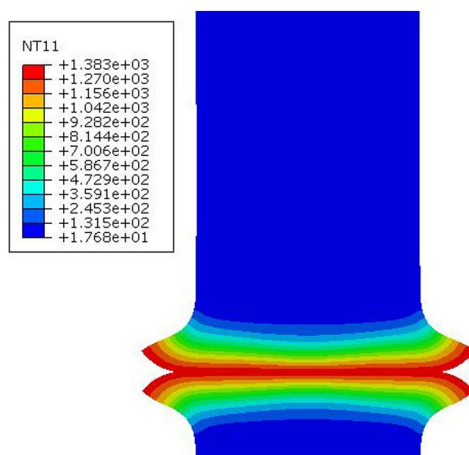


图 5 稳定摩擦阶段温度分布图

Fig.5 The temperature of stable friction stage

2.1.4 顶锻维持阶段

从飞轮减速较为稳定时一直到接头冷却至规定温度下为止(1.2~1.8 s),这个阶段必须保证足够大的顶锻压力,这个阶段是保证焊接质量的关键。由于 TC4 的热导率小,所以温度分布集中在摩擦面附近,沿轴向传播的速度慢。这样就使高温粘塑性金属层非常窄,即实际焊接过程中焊缝区较窄,不易产生焊接变形。

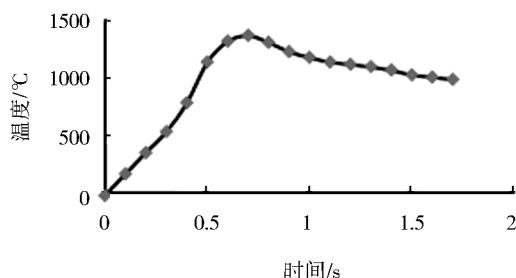


图 6 惯性摩擦焊整个过程温度变化趋势

Fig.6 Trend of IFW temperature change in whole process

2.2 轴向缩短量与应力场分析

2.2.1 轴向缩短量

从图 7 可以看出在初始的 0~0.6 s 内变形量非常小,几乎可以忽略不计。

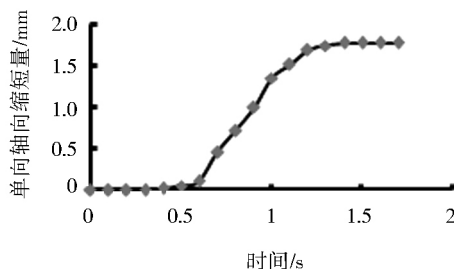


图 7 单向轴向缩短量变化趋势

Fig.7 The quantity change trend of one-way axial shortening

在 0.6~1.2 s 这个时间段内塑性变形量达到最
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

大。在 1.2~1.4 s 轴向缩短量增加变小。1.4 s 之后轴向缩短量不再增加保持稳定。

2.2.2 应力场分析

为了方便解释飞边的成形问题, 所以将问题简化为分析沿径向与轴向的应力变化。在轴向应力中“+”为拉应力“-”为压应力; 在径向应力中正负号不同则代表方向相反。

(1) 轴向应力分析

如图 8 初始摩擦阶段(0.2 s 左右)焊接接头主要承受沿轴向的压应力, 由于此时温度不高, 焊接面没有形成塑性变形层, 因此应力分布相对而言比较均

匀。但在摩擦面附近有应力集中区域尤其是中心区域, 这样就使摩擦面中心的温度升高得较快。随着温度的升高(0.2~0.5 s), 摩擦面的屈服强度逐渐降低, 这样使摩擦面附近率先发生屈服, 压应力向中心区域集中, 因此此时压应力在中心区域增大。进入稳定摩擦阶段(0.5~1.2 s)后飞边开始形成, 在边缘处形成拉应力, 而中心区域的应力集中现象愈发明显。在进入顶锻维持阶段后(1.2 s 左右)飞边的拉应力已经十分明显了, 由于飞边根部为压应力, 这样就使飞边不断壮大, 在拉应力的持续作用下开始出现弯曲现象, 这就是飞边成型的主要原因。

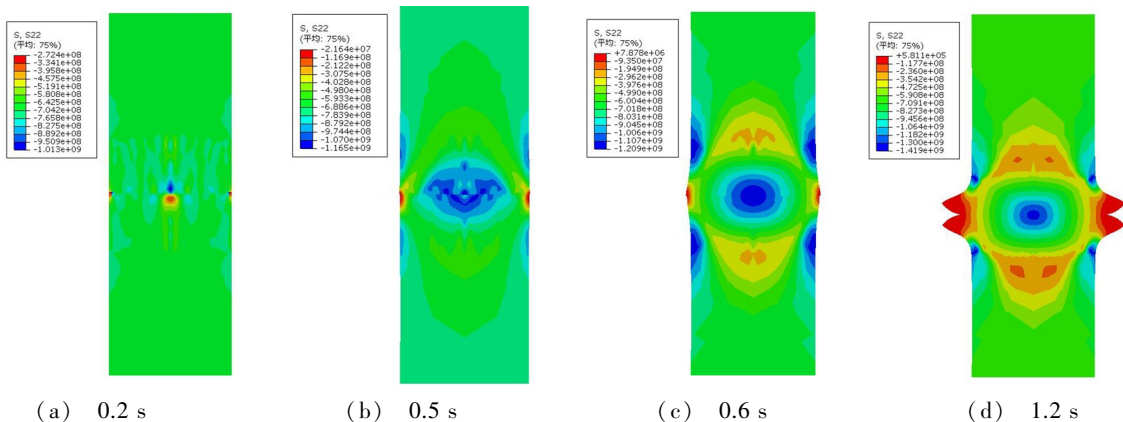


图 8 轴向应力变化图

Fig.8 The axial stress variation

(2) 径向应力分析

如图 9 在摩擦焊的初始阶段径向应力首先出现在摩擦面附近, 并且应力集中出现后工件内外侧径向应力方向相反。当温度升高, 焊接面附近的屈服强度降低, 进入稳定摩擦阶段后, 温度升高使材料发生屈

服, 随即金属塑性状态飞边开始形成。由于内外两侧径向应力方向相反, 并且外侧径向应力小于内侧, 此时在塑性变形区域金属开始向两侧流动, 这样就使飞边不断长大, 通过径向拉力从而形成飞边的最终形状。

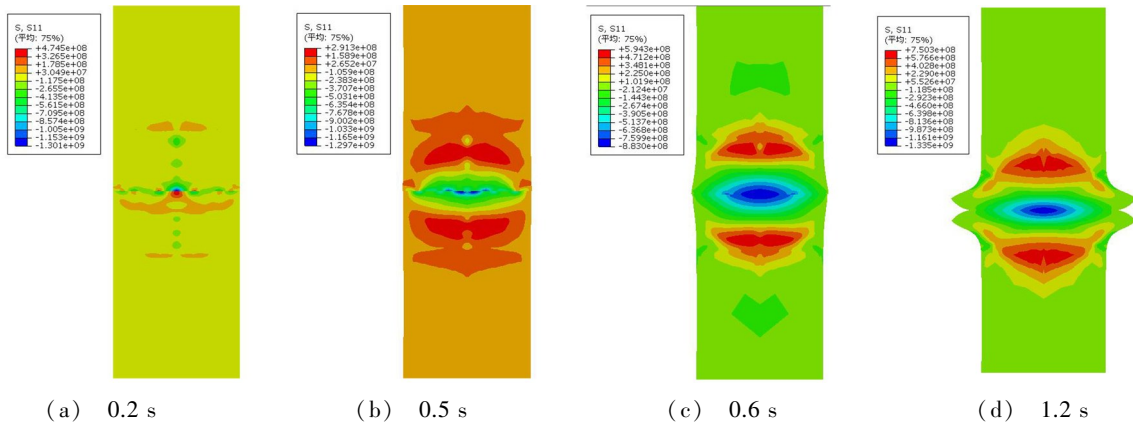


图 9 径向应力变化图

Fig.9 Radial stress variation

3 实验验证分析

采用 TC4 钛合金作为研究对象, 试验中试件尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 选取一个轴向端为焊接面, 实宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

验设备为长春第二机床厂提供的摩擦焊机 25A, 通过红外线测温法测出 2 s 内焊件的温度变化。实验采用的工艺参数: 转速为 1 450 r/min; 顶锻压力为 350

MPa;转动惯量为 $4.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。图 10 为实测飞边温度平均值的曲线。测得单侧轴向缩短量为 1.847 mm , 而模拟的单侧轴向缩短量 1.876 mm 。经对比, 模拟结果中单侧轴向缩短量与实际结果相比误差较小, 基本与实际情况吻合。

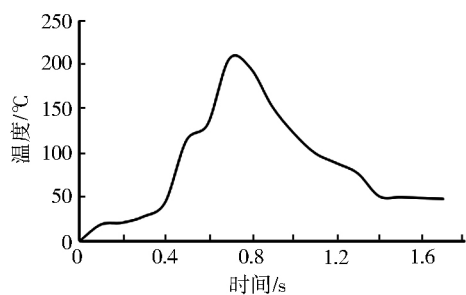


图 10 实测飞边温度曲线

Fig.10 Comparison of simulated temperature with measured temperature

实验测得焊件的抗拉强度为 797.2 MPa (母材为 910.9 MPa), 为母材强度的 87.5% , 表明焊接接头质量良好。

4 结论

(1) 通过 ABAQUS/Standard 模块计算顶锻压力的结果并导入 ABAQUS/Explicit 模块中计算, 通过建立 Johnson-Cook 损伤模型以及使用 ALE 技术控制单元变形质量模拟 TC4 钛合金在惯性摩擦焊的焊接过程, 基本与实际相同。

(2) 通过对温度变化和时间的关系将焊接过程大致分为了四个阶段。初始摩擦阶段 ($0 \sim 0.2 \text{ s}$) 摩擦刚开始, 温度上升至 $200 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$; 不稳定摩擦阶段 ($0.2 \sim 0.5 \text{ s}$) 温度由 $200 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高到了 $1\ 100 \sim 1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 此时塑性变形增大飞边开始出现; 稳定摩擦阶段 ($0.5 \sim 1.2 \text{ s}$) 温度保持不变, 飞边以及摩擦变形量增大; 顶锻维持阶段 ($1.2 \sim 1.8 \text{ s}$) 此时摩擦停止温度下降至规定温度下。

(3) 在焊接过程中焊件的温度分布梯度很大, 这种特殊的热力耦合场将使焊件的显微组织与性能产生特殊的变化。整个焊接过程都处在一种高温、高应力与高应变的状态, 轴向缩短量在 0.6 s 内非常小, $0.6 \sim 1.2 \text{ s}$ 时轴向缩短量增长十分快并基本达到峰值, $1.2 \sim 1.4 \text{ s}$ 由于粘结作用温度不再升高轴向缩短量增加缓慢, 1.4 s 后焊接基本完成轴向缩短量不再增加。初始阶段轴向应力基本没有变化, 随着温度升高 ($0.2 \sim 0.5 \text{ s}$) 压应力在中心区域增大, $0.5 \sim 1.2 \text{ s}$ 内

边缘形成拉应力, 中心区域应力集中愈发明显, 1.2 s 后拉应力明显增加。而径向应力随着温度的升高中心应力明显高于外侧并使金属向两侧流动。飞边的成形正是高温、轴向应力以及径向应力共同复杂作用形成的结果。

(4) 经试验对比模拟结果基本与实际情况相吻合。

参考文献

- [1] 孟卫如, 牛锐峰, 王士元, 等. TC4 钛合金惯性摩擦焊接头温度场分析[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 111-115
- [2] 王锴, 刘金和, 郭德伦, 等. GH4169 高温合金惯性摩擦焊的有限元模拟[J]. 焊接, 2006, 35(23): 84-90
- [3] 王月, 姬书得, 金延野, 等. 惯性摩擦焊过程轴向界面作用力的演变规律[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 175-180
- [4] 卜文德, 刘合金, 贾中振. Inconel 718 合金惯性摩擦焊温度场三维有限元数值模拟[J]. 焊接, 2009(4): 39-43
- [5] 张立文, 齐少安, 刘承东. GH4169 高温合金惯性摩擦焊接温度场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2002(增刊), 38 学报, 2004, 25(4): 111-115
- [6] 李建光, 施琪, 曹结东. Johnson-Cook 本构方程的参数标定[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(2): 164-167
- [7] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数确定[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 153-172
- [8] 鲁世红, 何宁. TC4 钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 32(1): 5-9
- [9] 杨扬, 曾毅, 汪冰峰. 基于 Johnson-Cook 模型的 TC16 钛合金动态本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 505-510
- [10] 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削震动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 33-38
- [11] 张全忠, 张立文, 张新国. GH4169 合金摩擦焊接过程的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007
- [12] DUFFIN F D. Friction welding of mild steel: the effect of varying the value of deceleration[J]. Metal Construction and British Welding, 1973(4): 125-132
- [13] 杜随更, 段立宇, 吴诗婷, 等. 摩擦焊接过程中能量转换与相对角速度分布的研究[J]. 西北工业大学学报, 1993, 11(增刊): 23-28
- [14] 杜随更, 贺运佳, 俞新荣. LY12-T2 摩擦焊接头中次生摩擦面形成机制研究[J]. 西北工业大学学报, 1993, 11(增刊): 62-68
- [15] AVIZUR B, WU R, TALBERT S. Criterion for the prevention of core fracture during extrusion of biternal rods[J]. J. Eng. Ind., 1982, 104(3): 293-30