

35Cr2Ni4MoA 高强钢摩擦焊接头热力耦合有限元分析

朱 海¹, 郭艳玲¹, 张姗姗²

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 山推工程机械股份有限公司, 济宁 272073)

摘 要: 采用热力耦合有限元分析方法, 由焊件材料的性能参数及焊接工艺参数建立了二维轴对称粘塑性热力耦合有限元模型, 对 35Cr2Ni4MoA 材料环形工件的连续驱动摩擦焊过程进行了模拟, 得到并分析了温度场、应力应变场以及轴向缩短量的变化规律。测量了实际焊件的轴向缩短量和飞边形状, 并与计算结果进行了对比, 结果表明, 利用该模型得到的摩擦焊接头飞边形状和轴向缩短量的计算结果和试验结果吻合较好。建立的有限元模型有助于制定合理的焊接工艺参数。

关键词: 有限元分析; 热力耦合; 轴向缩短量

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)04-0081-04



朱 海

0 序 言

摩擦焊接作为一种优质、高效、节能和环保的连接技术已被广泛应用于各个工程领域。要获得高质量的焊接接头, 必须制定合理的焊接工艺参数, 而摩擦焊过程是包含热、力等因素相互作用的复杂过程, 目前获得一套成熟的工艺参数通常是通过调整不同的工艺参数组合进行大量的试验, 显然这种方法具有很大的盲目性, 投资大, 耗时长, 尤其对于价格昂贵的航空材料。随着计算机技术与有限元理论的发展, 基于有限元方法的数值模拟技术已成为科学研究的重要手段。建立材料摩擦焊数值模拟模型, 采用数值模拟的方法对摩擦焊接头的温度场、应力应变场、塑性流动场进行研究, 以计算机数值模拟的方法代替大量的工艺试验, 可大幅度降低研发成本, 提高研发效率, 降低研究的风险和盲目性, 对提高焊接质量、优化工艺参数具有重要的指导意义^[1]。

文中以航空材料 35Cr2Ni4MoA 为研究对象, 对连续驱动摩擦焊接头的热力耦合过程进行了数值模拟。计算所采用材料模型为 Johnson-Cook (JC) 弹(粘)塑性模型, 不同的摩擦焊阶段采用了不同的摩擦模型, 并同时考虑材料热物性随温度的变化, 获得了连续驱动摩擦焊接头在焊接过程中的温度场和应力、应变场, 对实际焊件的轴向缩短量和飞边形状进行了测量, 并与模拟计算结果进行了比较。

1 摩擦焊数值模拟模型的建立

连续驱动摩擦焊接中, 摩擦热会影响材料内部的应力场分布, 而材料变形的过程中又会产生热效应, 使材料的温度场分布改变, 所以建立数学模型时需要考虑热-应力之间的耦合作用以及温度对材料力学性能的影响^[2]。

根据连续驱动摩擦焊接过程的特点, 基于有限元软件 ABAQUS 建立了 35Cr2Ni4MoA 轴对称二维热力耦合连续驱动摩擦焊有限元数值模型。

1.1 摩擦模型

在摩擦力及摩擦热的计算过程中, 摩擦面附近高温区材料的屈服强度受温度的影响而变化, 不同阶段分别采用了库伦摩擦模型和剪切摩擦模型^[3]。

(1) 在摩擦初始阶段的摩擦行为采用库伦摩擦模型来描述, 即

$$\tau_c = -f\sigma_n \frac{v_s}{|v_s|} \quad (1)$$

式中: τ_c 为摩擦应力; σ_n 为应力; v_s 为相对速度; f 为摩擦系数。

摩擦系数由以下经验公式来计算^[3]:

$$f = f_0 p^{-0.233} (T - 273)^{0.417} \exp(-0.739v) \quad (2)$$

式中: p 、 v 、 T 分别为摩擦压力、工件线速度和摩擦面温度; f_0 、 a 、 b 、 c 为通过试验获得的常数。

(2) 随着摩擦焊接过程的进行, 摩擦面附近高温区材料的屈服强度由于温度的升高而降低, 此时摩擦应力采用剪切摩擦模型来计算, 即

$$\tau_f = -mk \frac{v_s}{|v_s|} \quad (3)$$

式中: τ_f 为用剪切模型计算得到的摩擦应力; k 为材料的剪切屈服强度; m 为剪切摩擦因子, 此处 $m = 1$; k 与材料的屈服强度的关系为 $k = 0.557R_{eL}$.

1.2 材料性能参数

文中采用的材料是 35Cr2Ni4MoA, 尺寸为内径 22 mm, 外径为 46 mm 的环形工件。

连续驱动摩擦焊接过程中, 温度变化非常剧烈, 故模拟计算中所使用的热物性参数均考虑了温度的影响。采用的材料热物理性能参数有导热率、比热容、密度、泊松比、弹性模量、流变应力等。由文献[4]得出材料的部分性能参数。温度对密度的影响很小, 此处取密度为定值, 即 $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$; 材料的导热率基本上不随温度变化, 所以导热率取 $\lambda = 31.5 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$; 材料的泊松比较为稳定, 取 $\mu = 0.28$; 而比热容、弹性模量、流变应力等参数受温度的影响较大, 可从材料手册查得。对于材料手册未给出的高温范围内的材料参数由三次外推的方法得到。

1.3 有限元网格模型

焊接工件关于其中心线对称, 进行有限元分析时, 以工件中心线为对称轴建立 1/2 轴对称模型 (图 1)。由于焊件摩擦面附近受热和力的作用比较剧烈, 因此对这一区域的网格进行局部细化。由于摩擦面附近区域金属会产生较大的塑性变形, 有限元网格会产生畸变, 因此在模拟过程中需要对模型进行多次网格重划分。

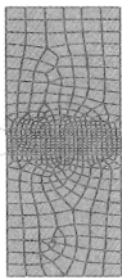


图 1 有限元网格模型

Fig. 1 Model of FE network

1.4 接触设置

接触主要发生在焊接面上, 焊接飞边与工件也可能发生接触, 因此, 共定义了四对接触, 第一组定义了接触面的相互作用, 上面是主面, 下面是从面。第二组接触把主从面设置颠倒过来, 使接触面上节点得到同等的接触压力。第三对与第四对接触分别为焊接面两侧可能产生飞边部分与工件外表面的

接触。

1.5 边界条件与载荷

有限元数值模拟时采用的连续驱动摩擦焊的工艺参数如表 1 所示。

表 1 连续驱动摩擦焊接工艺参数

Table 1 Continuous-driven friction welding technology

	压力 p/MPa	焊接时间 t/s	旋转频率 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
一级	35	5	900
二级	80	6	900
三级	130	6	900

下面工件的底边被完全固定其 $V_{x,y} = 0$, 上面的工件只施加绕轴旋转的角速度为 $\frac{\partial V}{\partial Z} \Big|_{\Omega} = W(t)$, 在旋转工件的上表面施加轴向压力, 分别为一级摩擦压力、二级摩擦压力和顶锻压力。轴向压力由幅值线定义为: $\bar{F}_i \Big|_{\Gamma_1} = \bar{F}(t)$ 。

焊接时间比较短, 因此在计算过程中忽略与空气的对流与辐射作用为:

$$K(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Gamma_1} = 0 \quad (4)$$

焊接开始工件温度均匀, 工件的初始温度 T_0 为室温 20°C , 温度初始条件表达为: $T|_{t=0} = T_0$ 。

2 计算结果及分析

2.1 温度场空间分布

图 2 给出不同时刻的温度场分布云图。由于上下工件对称, 只显示下面工件。 $t = 2 \text{ s}$ 时, 摩擦面最高温度为 730°C 左右, 摩擦面的温度梯度比较大, 外侧温度比内侧温度高, 这是因为摩擦面外侧的线速度相对较大, 摩擦产生的热量比较多。随焊接过程的进行, 由于热传导的作用, 热量不断向温度相对低的内侧和轴向传递, 同时内侧压应力升高, 摩擦产热量增加, 因此高温区在摩擦面上逐渐变均匀而且沿轴向不断增厚 (图 2b)。在此过程中摩擦面外侧的温升速度已经明显减慢, 这是由于温度梯度大, 热传导损失增加, 同时摩擦作用会随温度的升高而变弱, 摩擦热量输入降低。 $t = 9 \text{ s}$ 时, 摩擦面附近形成了具有一定厚度的高温金属层, 靠近摩擦面的区域进入塑性状态而发生塑性变形, 产生了初步的飞边。进入二级摩擦压力阶段后, 焊接接头处的最高温度基本保持在 1260°C 左右, 摩擦和塑性变形产生的热量约等于热传导损失和挤出的飞边带走的能量总和, 所以其最高温度基本保持不变。

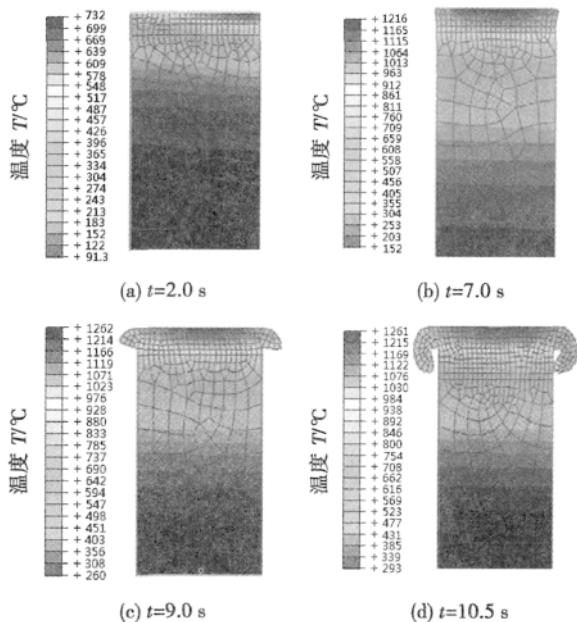


图2 不同时刻焊接接头温度场的分布云图

Fig. 2 Distribution of welding joint temperature field at different time

2.2 温度随时间变化

图3为工件最高温度随时间的变化历程。在一级摩擦压力作用下工件温度不断升高, $t = 5$ s时达到1100℃, 二级摩擦压力加载时出现瞬时高温, 这是因为摩擦扭矩突然升高所引起的。二级摩擦压力加载稳定后, 温度基本稳定在1260℃左右, 因为在摩擦界面附近区域基本形成了能量的动态平衡。 $t = 11$ s时进入顶锻保压阶段, 主轴停止转动, 工件摩擦生热速率为零, 工件的最高温度开始下降。

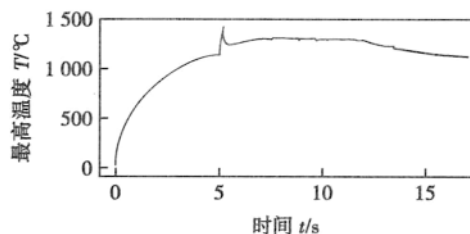


图3 焊接过程中最高温度随时间变化曲线

Fig. 3 Change of highest temperature in welding process with time

2.3 轴向应力分布

图4显示了不同时刻轴向应力的分布云图。在焊接的初始阶段, 工件都受到轴向压应力的作用, 工件边缘的两侧应力比较小。随着焊接的进行, 材料的屈服强度随温度的升高降低, 由于摩擦面外侧的温度高于内侧, 因而外侧轴向应力小于内侧。 $t = 9$ s

时边缘处轴向应力出现了正值, 即变成了拉应力, 摩擦面两边缘在拉应力的作用下开始向后卷曲, 形成初步的飞边, 并且飞边逐渐增大。

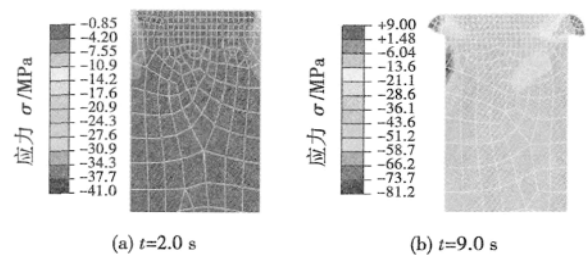


图4 焊接过程不同时刻轴向应力分布云图

Fig. 4 Distribution of axial stress at different time during welding process

2.4 径向应力分布

图5给出了不同时刻摩擦焊接头的径向应力分布云图。焊接的初始阶段, 在摩擦面附近内外侧首先出现径向应力集中区, 而且是拉应力区和压应力区相邻。随着焊接过程的进行, 两侧的拉应力区不断向内部和轴向扩展, 融合为一个大的拉应力区。在摩擦面附近出现两个紧邻的拉应力区和压应力区, 拉应力区与压应力区的分界处也是变形区与非变形区交界的区域, 这种分布状态一直到焊接结束。

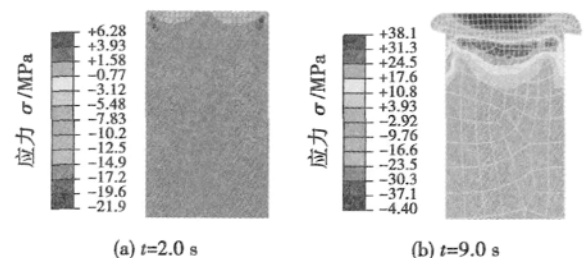


图5 不同时刻焊接接头径向压应力分布云图

Fig. 5 Distribution of radial compressive stress of welding joint at different time

2.5 轴向缩短量随时间的变化

图6是轴向缩短量的变化曲线。一级摩擦压力阶段, 温度和压力都比较低, 没有产生塑性变形, 轴向缩短量没有明显变化。进入二级摩擦压力阶段后, 摩擦压力和温度升高, 轴向缩短量开始产生。随后轴向缩短量开始逐步增加, 顶锻阶段, 主轴停止转动, 顶锻压力大, 轴向缩短速度增加, 曲线斜率变大。顶锻保压后期轴向缩短量不再增加。

2.6 计算结果的试验验证

轴向缩短量是焊接质量的一个重要指标。接头

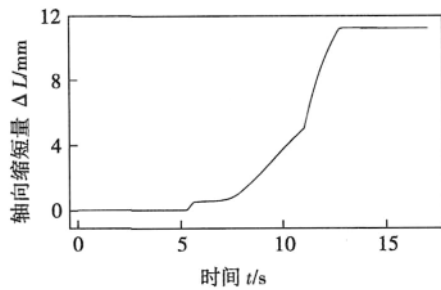
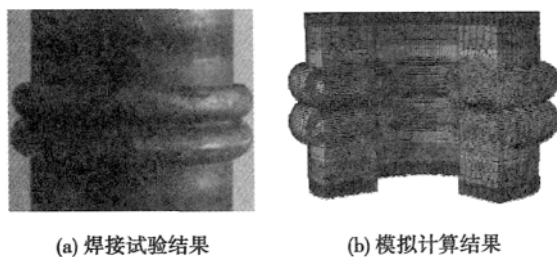


图 6 焊接过程中轴向缩短量随时间变化曲线

Fig. 6 Change of the axial shortening in welding process with time

形状和轴向缩短量的大小是由焊接过程中的温度场和应力应变场决定的。反之,模拟计算的轴向缩短量和接头形状与实际是否吻合,也反映出所建立的摩擦焊数值模拟模型以及所得到的温度场、应力应变场结果是否准确。用 MC-60 摩擦焊机进行了连续驱动摩擦焊接试验,工件的材料、尺寸和焊接参数与数值模拟计算时采用的相同。焊接完成后对摩擦焊接头变形情况与数值模拟结果做了对比分析。

图 7 为焊接接头形状和飞边对比。图 7a 为通过试验得到的焊后接头,图 7b 为通过有限元建模计算得到的最终接头,通过对比可以看出,两种方式得到接头形状基本一致。分别测量了焊后工件的最终径向增加量和轴向缩短量,并与计算结果进行了比较见表 2,可见,两种结果吻合较好,所建立的连续



(a) 焊接试验结果

(b) 模拟计算结果

图 7 焊接接头形状和飞边对比

Fig. 7 The comparison of Welding joint shape and flash shape

表 2 试验和计算结果比较

Table 2 The comparison of result between experiment and calculation

项目	径向增加量 $\Delta\phi/\text{mm}$	轴向缩短量 $\Delta L/\text{mm}$
试验结果	7.52	11.22
计算结果	7.88	11.77
相对误差	4.8%	4.9%

驱动摩擦焊热力耦合模型能较准确的反映连续驱动摩擦焊的实际焊接过程。

3 结 论

(1) 初始阶段,摩擦面的温度梯度比较大,外侧温度比内侧温度高,摩擦面内侧温度升高较慢。稳定摩擦阶段,温度梯度明显减小,摩擦面附近形成了具有一定厚度的高温金属层,焊接接头处的最高温度基本保持在 $1\ 260\ ^\circ\text{C}$ 左右不变。

(2) 初始阶段,整个工件都受到轴向压应力的作用,靠近工件边缘的两侧应力比较小。稳定摩擦阶段摩擦面边缘处出现了拉应力,使摩擦面两边缘开始向后卷曲,形成初步的飞边,并且飞边随着焊接过程的进行逐渐增大。

(3) 摩擦面靠近工件内外侧首先出现相邻的径向拉应力区和压应力区。拉应力区不断向工件内部和轴向扩展最后融合为一个大的拉应力区。两个紧邻的拉应力区和压应力区的分界处是变形区与非变形区交界的区域,这种状态一直持续到焊接结束。

(4) 轴向缩短量、径向增加量的试验结果与数值模拟结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 张全忠. 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.
- [2] 朱大喜, 张立文, 祝文卉, 等. GH4169 惯性摩擦焊接过程动态再结晶组织演化的数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 172-176.
Zhu Daxi, Zhang Liwen, Zhu Wenhui, et al. Numerical simulation of microstructure evolution for dynamic recrystallization of GH4169 during inertia friction welding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 172-176.
- [3] 杜随更, 段立宇, 吴诗淳, 等. 摩擦焊接初始阶段的摩擦机制及摩擦系数[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(4): 703-706.
Du Suigeng, Duan Liyu, Wu Shichun, et al. The frictional mechanism and coefficient during the initial stage of the frictional welding[J]. Mechanical Science and Technology, 1997, 16(4): 703-706.
- [4] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册(第二版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

作者简介: 朱海, 男, 1967 年出生, 博士研究生, 教授, 硕士生导师。现主要从事摩擦焊工艺与过程控制, 金属材料强韧性方面的科研与教学工作。Email: zhuhai6060@163.com.

titudes. A 4f optical system transferred the grating fringes on calibration panel to the output plane, on which a white screen was placed to receive the output image and grating fringes captured by a CCD. The phase value at each point on pixel plane was obtained by digital image processing, and then the relationship between phase value and welding pool altitude was determined. The distribution of welding pool surface height was acquired through the longitudinal calibration of measuring system and subsequent welding experiments.

Key words: welding pool; surface altitude; 4f system; longitudinal calibration

Properties of aluminum foam joints during contact reactive brazing processes

CHEN Nannan, FENG Yi, CHEN Jie, LI Bin, CHEN Fanyan (School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China). pp 77–80

Abstract: Under different brazing time, pure aluminum foams were welded by contact reactive brazing in vacuum environment with multilayer filler metals. The macrostructure and microstructure characteristics and bending strength of the joints were investigated. The specimen, brazed at 570 °C for 15 min, failed through the base metal, while the others fractured through the brazed seam. The bending strength of joints firstly ascended to a peak point and then decreased with the increase of brazing time. The bending strength of joint brazed for 15 min reached the highest, stronger than that of the aluminum foam substrate.

Key words: aluminum foam; contact reactive brazing; microstructure; mechanical property

Finite element analysis of thermal-mechanical coupled model for friction welded joint of 35Cr2Ni4MoA high-strength steel

ZHU Hai¹, GUO Yanling¹, ZHANG Shanshan² (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Shantui Construction Machinery Co., Ltd, Jining 272073, China). pp 81–84

Abstract: A two-dimensional axisymmetric viscoplastic thermal-mechanical coupling finite element model was established with welding parameters and thermal-physical properties of materials to numerically simulate the continuous driven friction welding of ring-shaped 35Cr2Ni4MoA high-strength steel workpieces. The changes of temperature field, stress-strain field and axial shortening were analyzed, and the amount of axial shortening and flash shape during welding were measured and compared with the calculated results. The results show that the simulated flash shape and axial shortening in the welded joint agreed well with the experimental ones. The developed finite element model will be beneficial to formulate proper friction welding procedures.

Key words: friction welding; finite element analysis; thermo-mechanical coupling; axial shortening

Forming characteristics, microstructure and properties of magnesium alloy during TIG welding under magnetic field

SU Yunhai^{1,2}, JIANG Huanwen¹, QIN Hao¹, LIU Zhengjun^{1,2} (1. School of Materials Science and Engineering,

Advanced Welding Technology and Automatic Key Laboratory of Liaoning Province, Shenyang 110178, China; 2. Liaoning Julong Financial Equipment Co., Ltd, National Engineering Center, Anshan 114041, China). pp 85–88, 100

Abstract: Tungsten inert gas (TIG) welding of AZ31 magnesium alloy sheets under AC longitudinal magnetic field was conducted. After welding, the forming factor, tensile strength and hardness of the resultant joints under different welding parameters were tested, and the microstructure was examined, to investigate the effects of magnetic field on the forming characteristics, microstructure and mechanical properties of the joints. The results show that the AC longitudinal magnetic field changed the moving form of the welding arc and welding pool to control the heat dissipation and crystallization in the welding pool, increase the forming factor of the weld, refine the weld grains and improve the mechanical properties of the joint. When magnetic field current I_m was 2 A, magnetic field frequency f was 20 Hz, the mechanical properties of the welded joint were optimized with tensile strength σ_b equal to 231 MPa, elongation percentage δ 11.5%, ratio of shrinkage φ 14.8%, hardness 76.2 HV and forming factor 4.06.

Key words: longitudinal magnetic field; magnesium alloy; gas tungsten arc welding; microstructure and mechanical property

Microstructure of transient liquid phase bonded FGH97 superalloy joint

PAN Lin, XING Li, LIU Fencheng, YANG Chenggang (National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China). pp 89–92

Abstract: Transient liquid phase (TLP) bonding of FGH97 superalloy was conducted with BNi82CrSiB interlayer at 1150 °C for different holding time, and the microstructure of the resultant joint was examined. The results reveal that, when the holding time increased, the width of bonded region broadened, and the amount of γ solid solution in isothermally solidified zone gradually increased, but the amount of dendritic $\gamma/\text{Ni}_2\text{B}$ eutectic, γ/γ' eutectic, Ni_3Si , M_{23}B_6 and Cr_2B phases in non-isothermally solidified zone gradually decreased and finally vanished, consequently, the microstructure with compacted γ solid solution formed. Acicular, granular and vermiculate M3B2 phases, enriching in Cr, W, Co and Mo, precipitated in the diffusion zone, of which width increased with increasing of holding time. It was found that the interdiffusion between molten interlayer and base metal occurred during TLP bonding and thus resulted in the local melting of base metal and massive precipitating of borides in DAZ.

Key words: FGH97 superalloy; transient liquid phase bonding; microstructure

Effect of welding residual stress on fatigue life of Invar steel welded joint

ZHAO Dongsheng¹, WU Guoqiang², LIU Yujun¹, LIU Wen¹, JI Zhuoshang¹ (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian