摩擦堆焊过程中耗材热力过程数值模拟

刘雪梅 张彦华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 采用刚粘塑性材料模型,借助有限元软件对摩擦堆焊过程耗材三维温度场与变形场进行了耦合计算,分析了耗材的温度变化及变形情况,讨论了影响温度变化的因素,并用热电偶测量了耗材的温度变化情况. 模拟结果显示,耗材摩擦界面处温度的升高先急后缓,待系统进入准稳态,摩擦界面上温度也基本恒定,耗材端部存在一定温度梯度. 耗材端部摩擦界面处最先进入热塑性状态并发生变形. 模拟结果与试验结果吻合良好,再现了摩擦堆焊过程中耗材的温度变化及变形. 模拟结果可为摩擦堆焊机理研究及确定关键工艺参数提供理论指导.

关 键 词: 耗材; 摩擦堆焊; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TG 402

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)01-0083-05

Numerical simulation of consumable-rod's thermal-mechanical behavior in friction surfacing

Liu Xuemei Zhang Yanhua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: By finite element method and rigid-viscoplastic model, the coupling of 3-D temperature field and deformation field of consumable-rod during friction surfacing process was simulated. Temperature change and deformation of consumable-rod were analyzed. The factors influencing temperatures were discussed. Temperature change of consumable-rod was measured by thermocouple. It was showed in the simulation results that the temperature increase rate at friction interface was higher at first, then became lower. Once the friction system became quasi-steady, the temperature here would be stable approximately. Special temperature gradient was found at consumable-rod's bottom end. The friction interface firstly became viscoplastic and then deformed. The largest effective strain existed near the center of the bottom of the circle. The simulation results are consistent with experiments, reappearing temperature change and deformation of consumable-rod during friction surfacing. The results can be helpful in the study of process mechanism and supplying the theoretical guide to choose key technical parameters in engineering practice.

Key words: consumable-rod; friction surfacing; temperature field; numerical simulation

1 摩擦堆焊工艺

摩擦堆焊是一种先进的表面技术,其工艺原理如图 1 所示. 图中 $\boldsymbol{F}$ 为堆焊压力,n 为耗材转速,$\boldsymbol{v}$ 为横向移动速度. 消耗材料(即耗材)相对于母材高速旋转,在一定的轴向压力下与静止的母材接触并发生摩擦,摩擦一定时间后,在接触面上产生粘塑性变形金属层[1,2]. 由于耗材与母材的体积不同,导热性不同,冷却速度不同,摩擦界面两侧的导热性能不同,最终使得摩擦界面两侧的温度梯度产生显著的差异. 母材一侧的温度梯度远比耗材一侧大得多,从而使耗材金属过渡到母材上,当母材相对于耗材移动时,就会形成连续堆

收稿日期: 2004-11-12

作者简介: 刘雪梅(1976-), 女, 山东烟台人, 博士生, xuemei_19@163.com.

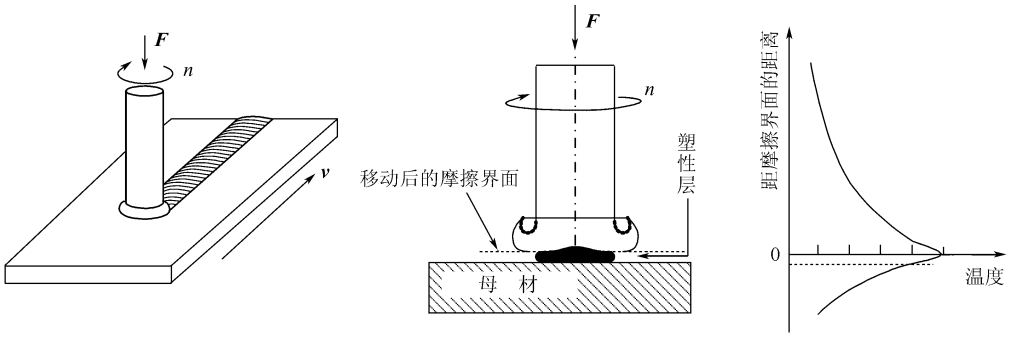


图 1 摩擦堆焊示意图

焊层[3,4]. 整个堆焊过程复杂的热力行为对堆焊层的顺利形成及堆焊层质量的影响至关重要. 耗材端部区温度梯度的建立及热塑性层的形成与材料的热物理性能、工艺参数、传热条件等因素有关,通过工艺试验确定各因素之间的组合过于繁琐,应用数值模拟方法对耗材热力过程进行预测对工艺方案的确定非常重要. 本文基于刚粘塑性材料的热力耦合计算模型,利用有限元软件分析了摩擦堆焊过程耗材的温度、应变分布及其变化情况,分析结果可为研究堆焊过程机理和优化堆焊工艺提供依据.

2 耗材热力过程分析模型

2.1 耗材热力过程

摩擦堆焊过程可认为由 2 个连续的阶段组成,即摩擦预热阶段和稳态堆焊阶段. 摩擦预热阶段,耗材端部与母材发生剧烈摩擦,耗材体积小,导热性差,摩擦热使其端部产生热量聚集,温度逐渐升高并进入热塑性状态. 此时,摩擦界面的产热机制也开始发生变化:耗材的塑性变形功上升至主导地位,而摩擦热退居次要地位. 预热阶段结束时,系统基本进入准稳定状态. 随后,母材开始平动,系统进入稳态堆焊阶段. 耗材与连续送进的母材表面形成“摩擦-加热-过渡-碾压”的动平衡状态. 随着堆焊过程的进行,过渡的金属便在母材表面形成一层厚度均匀的堆焊层[5]. 进入稳态堆焊后,系统基本稳定,所以模拟的重点就在前期,即摩擦预热阶段.

摩擦堆焊过程中,耗材端部金属的塑性变形是一个高度非线性问题,只能采用数值解法[6]. 摩擦堆焊过程中,在与母材的接触表面上由于摩擦的存在而产生大量热量,热量同时向耗材和母材 2 个方向以不同的速度传递,而且接触表面的面积还在不断变化;自由表面与外界环境也在进行热量交换;同时,耗材内部所消耗的塑性变形功绝大部分转变为热,引起耗材温度升高,这种温度变化与耗材内部的变形分布有关. 上述因素的同时作用增加了精确求解温度场的难度,用解析方法相当困难,数值解法尤其是有限元法较为有效. 模拟时,必须对温度场和变形场进行耦合计算,这也是摩擦焊领域数值模拟的发展方向.

2.2 基本原理及方程

1) 几何定义

根据耗材的几何特征,应用柱坐标(图 2)描述耗材几何及有关热力参数. 耗材端部区温度沿 Z 轴的变化率(即温度梯度)是耗材过渡形成稳定堆焊的关键.

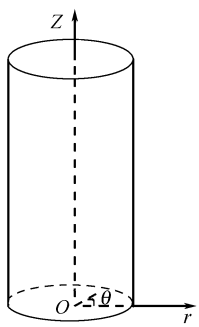


图 2 几何模型

2) 材料模型

耗材视为刚-粘塑性体,其流动应力同时是应变、应变速率和温度的函数:

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \tag{1}$$

其中,$\bar{\sigma}$ 为流动应力;$\bar{\varepsilon}$ 为应变;$\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为应变速度;T 为温度.

其它参数不变的情况下,工件温度升高,同样应变所需的应力减少;变形速度提高,同样应变所需的应力增加.

对于刚粘塑性边值问题,在满足变形几何方程式、体积不可压缩条件式和边界位移速度条件式的一切容许速度场中,其真实解使泛函

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\bar{\varepsilon}} \mathrm{d}V - \int_{S_p} p_i \delta v_i \mathrm{d}S \tag{2}$$

取驻值. 其中,V,S_p 分别是变形体的体积和给定应力边界条件的表面积;v_i,p_i 分别为速度和外力.

3) 热传导方程

热力耦合条件下,温度场分析是一个有内热源的不稳定导热问题,模型采用三维、非稳态、变物性的热传导微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{q} \tag{3}$$

其中,T 是节点温度;ρ 和 c 分别是材料的密度和比热;k 是材料的导热系数;$\dot{q}$ 为内热源率,即塑性变形能内热源率,可以表示为

$$\dot{q} = \beta \bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}} \tag{4}$$

其中,β 代表塑性功转变为热能的比例系数,习惯上称之为塑性变形热排出率,这里取为 90%.

4) 初始条件和边界条件

初始时刻,耗材温度为室温 20℃

$$T(r,\theta,t=0) = T_0(r,\theta) = 20 \tag{5}$$

耗材与母材(下模板)的摩擦界面为产热面,其余与周围环境接触面均定义为绝热面,热辐射为 0.

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = q(r) \tag{6}$$

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=L} = 0 \tag{7}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R} = 0 \tag{8}$$

其中 $q(r)$ 是耗材与母材接触面上摩擦产生的热流密度:

$$q(r) = 2\pi\omega r^2 \mu(T) p \mathrm{d}r \tag{9}$$

其中 $\mu(T)$ 为耗材与母材接触面上的摩擦系数,它是温度的函数,常温下较小,随温度升高增大,600 ~700℃左右最大,1 200 ~1 300℃左右又变小. 待进入稳态堆焊阶段之后,底面温度基本恒定,μ 也维持在一个较稳定数值上.

由耗材和母材组成的摩擦系统,在进行系统的温度场模拟时,界面存在热量分配问题,根据文献[7],流入耗材的热流为

$$q_c = \eta_1 q(r) \tag{10}$$

其中

$$\eta_1 = \frac{\sqrt{\lambda_1/\rho_1 c_1}}{\sqrt{\lambda_1/\rho_1 c_1} + \sqrt{\lambda_2/\rho_2 c_2}}$$

其中,λ_1,λ_2 分别表示耗材与母材的导热系数;ρ_1,ρ_2 分别表示耗材与母材的密度;c_1,c_2 分别表示耗材与母材的比热.

为简化计算,假设除摩擦系数、流动应力外,其它物理参数保持为常量,不随温度变化.

3　有限元模拟

3.1　有限元模型

耗材摩擦堆焊过程中产生的摩擦热由 2 部分组成:①耗材旋转产生的摩擦热量;②母材与耗材的相对平动产生的摩擦热量. 由于平动速度(v< 5 mm/s)很小,相对于高速旋转产生的摩擦热量而言,可以忽略不计. 模拟中只考虑耗材的旋转而不考虑相对平动. 耗材材质为 1Cr18Ni9Ti,母材为 20 钢. 焊接压力取为 5 000 N,耗材转速 1 445 r/min,利用有限元软件进行耗材温度场与变形场的耦合计算. 耗材半径 r 取为 10 mm,高度 L 取为50 mm. 网格划分下密上疏,端部是变形发生的主要区域,而且温度变化剧烈,所以网格密度较大.

3.2　变形与传热的耦合计算

在变形过程分析中,温度场通过改变材料的本构关系以及热应变来实现和传热过程的耦合. 在传热过程分析中,变形场通过改变传热空间、边界条件和能量转化来实现和变形过程的耦合[8]. 先求解初始温度场下的速度场增量,并计算出影响温度场计算的变形场量如变形功率等,再预测下一步的温度场,修正材料力学性质和热物理参数,重新计算速度场. 如此反复迭代计算直至速度场收敛.

4　模拟与试验结果及分析

4.1　温度场结果及分析

图 3 为耗材形状随时间变化的模拟结果,图 4 为实际摩擦堆焊过程.

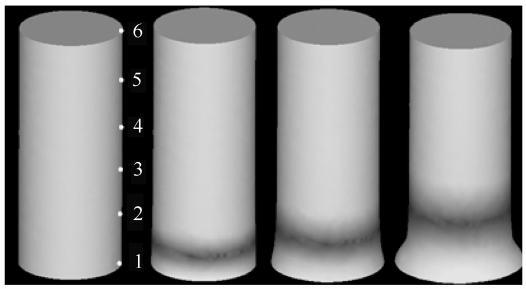


图 3　耗材形状变化模拟结果以及温度点标识

图 5 是耗材上 6 个特定点的温度随时间变化的模拟结果(温度点标识见图 3).

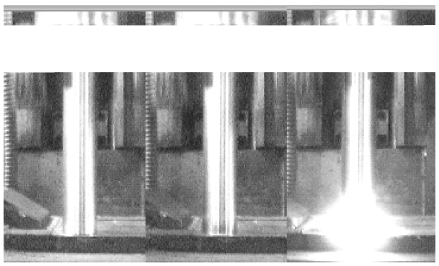


图 4 实际耗材摩擦堆焊过程

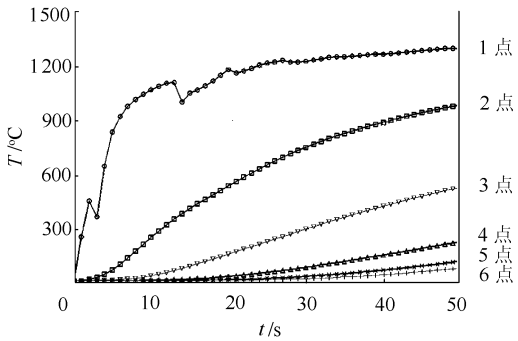


图 5 耗材上 6 个温度标识点的温度随时间变化图

由以上的温度场模拟结果可见：

1）耗材上点的温度随时间增加而升高，摩擦端面处温度最高，距端面愈远，温度愈低；

2）底面边缘点温度上升趋势是先急后缓. 开始由底面摩擦产热，温度上升较快，待底面温度达到一定程度时，产热机制发生滑动摩擦产热-粘着摩擦产热-塑性变形产热转变时，引起转矩下降，产热功率降低，使得温度上升速率变缓[9]. 约 30 多秒之后温度只有非常小的变化，此时系统消耗热量与产热基本平衡，进入稳态堆焊阶段. 这正对应着摩擦预热时间. 试验表明，对于焊接压力 5 000 N、耗材转速 1 445 r/min 工艺参数匹配，摩擦预热时间约为 35 s；

3）底面边缘点的温度并非一直上升，中间出现了拐点，这与摩擦扭矩随时间变化的规律以及摩擦表面上粘塑性金属的流动有关.

利用热电偶来测量耗材的温度分布. 由于塑性变形，摩擦界面上的点，即图 3 中的点 1 用热电偶难以准确测定其温度变化. 耗材上共设 5 个测量点，位于轴向边缘，测量点间隔 10 mm，与图 3 和图 5 中的点 2 ~ 点 6 一一对应.

图 6、图 7 分别是不同时刻耗材边缘点温度实际测量值与模拟值的对比. 可见，对于大多数的数据点，测量值比模拟值偏高，其原因是由于实际测量温度时，热电偶与耗材接触测量，耗材高速旋转，对热电偶有摩擦作用，所以会使测量值偏大. 此外，由于计算中假设比热、导热系数等热物理参数均为常数，而实际中，它们也是温度的函数，这也是造成测量值与实际值之间存在差异的原因.

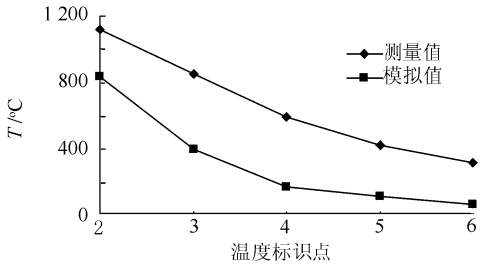


图 6 35 s 时温度测量值与模拟值对比图

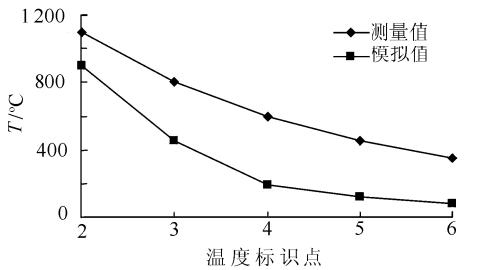


图 7 40 s 时温度测量值与模拟值对比图

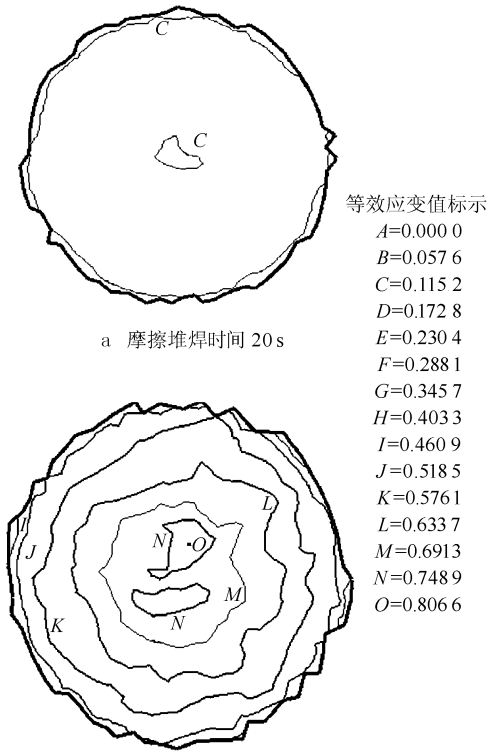
虽然模拟结果与测量结果存在一定差距，但是温度变化的趋势是一致的，从耗材底部到顶部存在一定的温度梯度，这一梯度是热量在摩擦界面附近聚积的结果，从而使得摩擦界面处的耗材材料最先进入热塑性状态，在外力作用下发生变形，另一部分形成飞边，一部分向底面过渡形成堆焊层.

结果表明，模拟结果具有较高的参考价值，是进一步研究耗材摩擦堆焊机理的基础. 实际中，可以利用模拟确定不同的工艺参数组合得到的温度变化以及温度梯度，确定摩擦预热时间，从而最终确定最佳的工艺参数.

4.2 耗材端部变形结果及分析

在焊接过程的初期（10 s），主要依靠底面摩擦产热，底面温度最先升高，热量同时向耗材上部传导. 但由于温度还较低，耗材端部大部分点还未进入热塑性状态，所以变形很小. 随着底面温度的继续升高，摩擦界面处材料逐渐进入热塑性状态，开始变形，流动应力随温度升高而不断减小，耗材底面与母材之间的摩擦系数随温度的升高先是增加，而后又有所减小[5]，摩擦热减小；同时，由于塑性变形所做的功绝大多数转变为热，随着变形的不断增加，塑性变形热逐渐替代摩擦热成为主要的产热方式（50 s）. 中间即为由摩擦产热向塑

性变形产热的过渡阶段. 图 8 是不同时刻等效应变在最底面处分布图. 随着时间的延长,等效应变逐渐增加,变形首先从耗材端部摩擦界面处发生,底面外缘半径增加,随后向上微翘,成为飞边. 待进入稳态堆焊阶段后,底面的等效应变仍为最大. 而且,随着半径的减小,等效应变也有变大的趋势,最大等效应变出现在底面圆心附近,这一现象也与摩擦堆焊工艺试验结果相符.



a　摩擦堆焊时间 20 s

b　摩擦堆焊时间 40 s

图 8　不同时刻耗材底面等效应变分布图

5　结　论

1) 本文对摩擦堆焊工艺中耗材热力过程进行三维有限元数值分析,真实地再现了耗材温度场和变形场的分布形态;

2) 模拟结果显示,耗材摩擦界面处温度的升高先急后缓,待系统进入准稳态,摩擦界面上温度也基本恒定,耗材端部存在一定温度梯度. 耗材模拟温度值与试验实际测量值吻合良好;

3) 耗材端部摩擦界面处最先进入热塑性状态并发生变形,最大等效应变出现在端面圆心附近.

参考文献 (**References**)

[1] Fukakusa K. Real rotational contact plane in friction welding of different diameter material and dissimilar materials: fundamental study of friction welding [J]. Welding International, 1997, 11 (6): 425 ~ 431

[2] Hasegawa M, Ieda T. Effects of friction welding conditions on initial joining phenomena [J]. Welding International, 1999, 13 (9): 701 ~ 711

[3] Nicholas E D, Thomas W M. Metal deposition by friction welding [J]. Welding Journal, 1986, 8: 17 ~ 27

[4] Shinoda T. Deposition of hard surfacing layer by friction surfacing [J]. Welding International, 1996, 10(4): 288 ~ 294

[5] 姚君山. 耗材摩擦焊工艺物理过程研究[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2001
Yao Junshan. A study on the physical process of consumable-rod friction welding [D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001 (in Chinese)

[6] 傅　莉,杜随更. 摩擦焊接过程数值模拟技术研究进展[J]. 焊接学报,2001,22(5):87 ~ 92
Fu Li, Du Suigeng. Advance of research on the numerical simulation of friction welding process [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2001, 22(5): 87 ~ 92 (in Chinese)

[7] Allcock, Andy. Surface technology joins weld research [J]. Machinery and Production Engineering, 1992, 150 (1): 24 ~ 26

[8] 李付国,聂　蕾,李庆华,等. GH4169 合金惯性摩擦焊接过程组织计算与预测[J]. 焊接学报,2002,1:30 ~ 33
Li Fuguo, Nie Lei, Li Qinghua, *et al*. Microstructure simulation and prediction of IN-718 super alloy in inertial friction welding [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 1: 30 ~ 33 (in Chinese)

[9] 杜随更,傅　莉,刘小文. 摩擦焊接过程的热力耦合有限元分析[J]. 机械工程学报,2002,38(6):77 ~ 82
Du Suigeng, Fu Li, Liu Xiaowen. Fea coupled with thermo-mechanical effect on friction welding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(6): 77 ~ 82 (in Chinese)