TRANSACTIONS OF THE CH NA WELD NG INSTITUTION

电塑性摩擦焊接过程的动态再结晶数值模拟

李庆华, 李付国, 傅 莉

(西北工业大学 材料学院,西安 710072)

摘 要: 摩擦焊过程中界面的塑性变形是摩擦焊的核心、文中以宇航工程常用的构件 材料 LY12合金为研究对象,建立了电场条件下棒状试件摩擦焊的热力耦合塑性成形有 限元分析模型,获得了焊接过程中焊接界面处材料的温度场、应变场、应力场、电场强度 等物理参量场,并应用 Yada模型建立了 LY12合金摩擦焊接过程显微组织的演化模型, 计算了摩擦焊接过程动态再结晶区的分布及再结晶区晶粒的尺寸,并分析研究了上述 场变量对电场条件下连续驱动摩擦焊成形工艺及成形件质量的影响。

关键词:摩擦焊;热力耦合;动态再结晶;电场

中图分类号: TG 457 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)04-01-04

李庆华

0 序 言

摩擦焊技术是一种优质、精密、高效、节能的固态焊接技术,在航空、航天等高技术领域具有广阔的应用前景。摩擦焊接过程是一个涉及温度、力学和冶金的复杂过程,焊接过程中界面的塑性变形是摩擦焊的核心,界面的塑性变形区的状态直接影响焊接过程和焊接质量。由于金属热变形达到一定程度后会出现多机制软化现象,动态再结晶等机制会使材料内部的微观组织发生变化,从而影响材料的力学性能。开展摩擦焊接过程材料温度场、应力场、应变场等物理参量场的变化规律以及内部微观组织的演化规律的研究,对优化焊接工艺和焊接力学参数与变形参数、提高焊接质量等均有重要的意义。

在摩擦焊接条件下,焊缝金属塑性变形是一个 物理非线性和几何非线性过程,材料的变形过程伴 随着能量形式的转化和温度的改变,对于这样复杂 的问题,数值模拟时需要进行温度场与变形场的耦 合计算。由于铝合金的自身特点,它在字航工程的 构件上被大量采用,但铝合金的焊接工艺性差。电 塑性理论认为,电场对金属材料内部晶体的空位、位 错和晶界等有显著影响,可增强位错可动性,使变形 金属的显微组织重新排列。近年来的研究表明,脉 冲电流或电磁场的作用能使合金塑性提高 2~3倍, 超塑性变形提高一倍以上^[13]。如果把金属在电塑 性状态下具有低的流动应力、高的塑性变形能力以 及高的原子扩散能力等特点应用于摩擦焊接过程,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50005017)

就有可能同时满足对摩擦结合面温度与变形程度的 要求,从而改善难变形材料及异质材料的摩擦焊接 问题。文中以 LY 12 合金为研究对象,应用热力耦 合的有限元数值模拟方法和 Yada模型,通过与电场 的耦合,对电场条件下 LY 12 合金棒件的连续驱动 摩擦焊接过程进行了计算与分析,获得了焊接件热 力影响区的瞬态温度场、应变场和电场强度等场参 量以及动态再结晶区和再结晶晶粒尺寸的分布与变 化规律。

摩擦焊接过程中的能量模型及边界 条件

摩擦焊接过程是依靠摩擦面摩擦生热,再顶锻成形的塑性加工过程,摩擦表面为材料变形的对称面,有限元计算时在该面上施加热流密度,并定义材料流动以摩擦表面为对称面^[34]。摩擦焊接过程的 摩擦压力为 p_t 摩擦系数为m,主轴转速为n,摩擦 热效率为 η 。取摩擦面上一圆环进行分析,内径 R_i 到外径 R_0 的圆环范围内由摩擦而产生的热流密度 为^[5]

$$q = \frac{4}{3} m p_{\rm f} \, n \eta \, \frac{(R_0^3 - R_i^3)}{(R_0^2 - R_i^2)} \pi, \tag{1}$$

式中:摩擦系数 m 随温度变化 (由摩擦表面状态和 有关资料回归获得)。

进行传热分析时,与温度有关的边界条件如下。 在温度已知的边界 $\Gamma_{\rm T}$ 上: $T = \overline{T}$; (2) 在热流已知的边界 $\Gamma_{\rm q}$ 上: $\overline{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial c}$. (3)

收稿日期: 2004-05-13

摩擦焊接过程中的热流边界条件包括以下几种 情况。

(1)摩擦面上的热流边界条件:
$$q_f = \beta_f |\tau_f| |\nu_r$$
, (4)

式中: q_f 为摩擦功转化成的热流密度; β_f 为热分配系数,通常取 $\beta_f = 0$. 5, τ_f 为摩擦焊接时摩擦界面间的摩擦应力; ν_r 为摩擦界面的相对滑动速度。

(2)对流换热边界条件:

$$q = h(T_{\rm s} - T_{\infty}), \qquad (5)$$

式中: h 为对流换热系数; T_s为工件表面温度; T_∞为外界环境介质温度。

(3)热辐射边界条件:

$$q = \sigma \varepsilon (T_{s}^{4} - T_{\infty}^{4}), \qquad (6)$$

式中: σ为 Stefan-Boltzm ann 常数; ε为表面发射率。

2 热力耦合的有限元模型及动态再结 晶模型

材料在变形过程中的温度变化会引起材料物理 性能的变化,从而导致材料力学性能的改变,材料力 学性能的改变又会影响到材料的变形过程。同样, 材料的变形过程在很大程度上影响了材料的温度分 布。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。

塑性变形过程中温度场作用于变形体时,变形体受热膨胀而发生热变形,对各向同性材料的热应 变表述为

$$\varepsilon_{Tij} = \begin{cases} \alpha \Delta T(i=j), \\ 0(i\neq j), \end{cases} (i \ j=x, \ y, \ z), \qquad (7)$$

式中: ϵ_{T_j} 为热应变分量; α 为线性膨胀系数; ΔT 为温度变化量, 其中 $\Delta T = T - T_r$, T_r 为参考温度。

金属塑性变形过程中考虑变形场作用时,在热 传导分析中塑性应变能转化的热能为

$$\omega_{\rm p} = \alpha_{\rm p} \, \sigma \, \tilde{\epsilon}, \qquad (8)$$

式中: α_p 为塑性应变能转化成的热源密度; α_p 为热转化效率,通常取 $\alpha_p=0.9 \sim 0.95$ σ 为等效应力; ϵ 为等效塑性应变速率。

试样为 \$430 mm 的 LY 12CZ 合金棒件,采用连 续驱动摩擦焊接方法。焊接参数为:主轴转速 1450 r/s 摩擦压力 89 96M Pa,焊接时间 4 s 顶锻压力 141.37M Pa 顶锻和保压时间 6 s 外加电压 $U_1 = 0$ V, $U_2 = 2\ 000$ V, $U_3 = 4\ 000$ V。电场施加装置原理见 图 1,在环带状电极和试件间施加电压。试验结果 表明仅进行摩擦过程而未顶锻的焊接试件的飞边上 有较多裂纹。进行摩擦且顶锻保压的试件,飞边上 除有较多裂纹外,总有大的开裂,深入试件较深。由 于 LY 12合金的导热性好、塑性较差,摩擦焊接时极 易在飞边上生成裂纹和开裂。

应用 M SC 公司的有限元软件 M arc 进行摩擦焊 接过程的数值模拟计算,考虑到焊件在焊接过程中 焊缝两侧的变形情况相同,因此仅对一侧试件的变 形过程进行计算。由于棒件是轴对称的,分析时采 用二维轴对称热力耦合分析方法,以试件的轴线为 对称轴建立一半模型。模型为长 25 mm、宽 15 mm 的矩形,将其划分为边长 0 5 mm × 0 5 mm 的 1500 个矩形有限元单元,计算过程中采用网格自动重划, 以减少变形过大时网格畸变带来的误差。



图 1 电场施加装置原理图 Fig 1 Schematic diag nam of friction webling under electric field

Yada模型^[6]是 20世纪 80年代,由 Yada等人 建立的一种关于再结晶过程和晶粒尺寸及其分布的 数学模型。最初仅用于低碳钢材料,后来由于其适 用性的不断拓广,逐渐发展为金属材料再结晶过程 分析和晶粒演变计算的一种比较通用的形式,广泛 应用于金属材料热加工成形中再结晶过程的数值模 拟和试验研究中。

根据 Yada模型基本公式^[6] 来计算动态再结晶 区的分布及再结晶晶粒的尺寸,由试验测得无电场 时的再结晶激活能 $Q_0 = 16~8$ kJ mol 外加 2 000 V 电压时再结晶激活能 $Q_{2000} = 16~6$ kJ mol 棒材的 初始组织为加工态的纤维组织,进行计算时取其初 始晶粒为 40 μ m。由 LY 12 合金的超塑拉伸真实应 力应变试验数据回归得到的 LY 12 合金摩擦焊接时 动态再结晶临界应变曲线见图 2 公式为

$$\varepsilon_{\text{grow th}} = 0.086.075 e^{2.015.386.69 \text{ II}}$$
. (9)

由试验数据表 1回归得到无电场和外加 2000 V电压时 LY12合金摩擦焊接时动态再结晶晶粒尺 寸分别为:

$$g_1 = 2.887.1 \times 10^{12} \times \varepsilon^{0.373.3} \times e^{10.553.4}$$
. (10)

$$g_2 = 3 \ 4163 \times 10^9 \times \varepsilon^{0.35355} \times e^{8.0481}$$
 (11)

表 1 动态再结晶晶粒直径及温度与应变速率

Table 1 Dynamic recrystallization grain diameter temperature and strain rate

| 温度 | | 应变速率 | | 晶粒直径 | |
|---------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|------------------|------------------------|
| ТК | | $v /(10^3 \text{ s}^{-1})$ | | $d \ \mu { m m}$ | |
| $U_1 = 0 V U$ | / ₂ =2 000 | $VU_1 = 0VU$ | $U_2 = 2\ 000 \mathrm{V}$ | $U_1 = 0$ V | $U_2 = 2000\mathrm{V}$ |
| 777 | 776 | 0.97 | 0.80 | 3 52 | 3 85 |
| 762 | 764 | 2. 22 | 1. 40 | 1 61 | 2 08 |
| 780 | 778 | 2.99 | 2.54 | 2 48 | 2 76 |
| 763 | 762 | 3. 94 | 3. 34 | 1 33 | 1 56 |
| 781 | 780 | 4.89 | 4. 30 | 2 12 | 2 35 |
| 804 | 805 | 6.36 | 5. 61 | 3 69 | 3 89 |
| 831 | 832 | 9.99 | 8.93 | 6 45 | 6 42 |





3 有限元数值模拟结果及分析

有限元计算时摩擦面上不同半径的节点所施加 的热流密度由式(1)计算所得。在边界上施加压力 载荷进行计算时,极易使材料因变形程度过大,而使 计算不收敛,程序终止计算,改用位移载荷,通过调 整外载荷施加在边界上的移动速度,可以满足试验 条件下的数值模拟。

模拟结果(图 3)显示随着时间的推移焊接界面 处材料的应变逐渐增大,且中心处的应变大于外侧 的。这是由于中心处的材料向外迁移的结果,直到 顶锻过程中材料停止变形时应变达到最大。材料停 止变形后的保压状态不是研究的重点,没有继续计 算。外加 2000V 电压时计算所得的轴向压力、应力 场、应变场及温度场与无电场基本相同,没有明显差 异。

外加电场时,由于焊接过程中飞边的逐渐形成, 飞边尖点处的电场强度最大,焊件其它部位的电场 强度变化不大。计算结果(图 4)表明外加 2 000 V、 4 000 V 电压时,计算所得稳态情况下飞边尖点处的 电场强度的变化规律相同,变形程度越大飞边尖点 处电场强度也越大。计算结果表明变形到一定程度 时,飞边尖点处电场强度将大于空气的介电强度,发 生击穿空气放电的现象。试验也表明变形程度大 时,电极与试件间有放电现象产生。



图 3 焊接过程中焊接界面上 r=0.5.13 mm 处的等效应变

Fig. 3 Equivalent strain of welding interface at r=0.5.13 mm



Fig. 4 Steady electric field intensity of top point of fash

图 5.图 6为焊接 4 6 s时试件的变形程度和动态再结晶区的分布及再结晶晶粒尺寸(均值)。由模拟结果可以看出, LY 12合金在摩擦焊接过程中动态再结晶区仅发生在焊缝附近 0 3~0 5 mm 宽的范围内,且动态再结晶区的晶粒明显细化,紧邻的热影响区有部分区域晶粒长大。电场作用时,动态再结晶的激活能稍低一些(由试验测定),但动态再结晶区及再结晶晶粒尺寸与无电场时没有显著的差异。由于摩擦焊接的过程很快,电场对摩擦焊接界面材料的微观影响有待进一步深入研究。

由于采用的是二维轴对称有限元模型,无法考 虑焊接过程中材料的径向裂纹和开裂,导致顶锻变 形时有限元模拟结果与实际变形情况有较大差别。 轴向压力是摩擦焊接的关键参数之一,过大的轴向 压力极易导致飞边裂纹的生成,并最终演化为开裂, 采用变压力的摩擦焊接工艺,是否可以减少焊缝中的缺陷,此方面的研究工作有待进一步深入。





Fig 5 Deformation and dynamic recrystallization area grain size without electric field at *t*= 4.6 s



- 图 6 外加 2000 V 电压且 t=4 6 s时变形程度和动态再结晶区的分布及晶粒尺寸
- Fig 6 Deformation and dynamic recrystallization area grain size with 2 000 volt at *t*=4.6 s
- 4 结 论

(1)针对 LY12合金棒件的连续驱动摩擦焊接 过程,应用 MSC公司的有限元软件 Marc建立了其 成形过程的热力耦合轴对称二维有限元模型,并对 有、无电场条件下的摩擦焊接过程进行了计算,获得 了焊接过程焊缝附近材料的温度场、应力场、应变 场、电场强度等物理参量场。

(2) 电场对于焊接过程中界面材料的温度、应

力、应变的影响不明显,与无外加电场情况基本相同。焊接界面处材料的应变在焊接过程中逐渐增大,直到顶锻过程中材料停止变形时刻应变达到最大值。焊接过程中由于中心处的材料向外迁移,导致中心处材料的应变大干外侧材料的应变。

(3) 电场作用时, LY 12合金动态再结晶的激活 能低于无外加电场情况, 动态再结晶区及再结晶晶 粒尺寸与无电场时没有显著的不同。模拟结果表 明, LY 12合金在摩擦焊接过程中动态再结晶区仅发 生在焊缝附近 0 3~0.5 mm宽的范围内, 动态再结 晶区的晶粒明显细化, 与试验结果相吻合。

(4)外加不同电压时,计算所得稳态情况下飞 边尖点处的电场强度的变化规律相同,变形程度越 大飞边尖点处电场强度也越大。计算结果表明变形 到一定程度时,飞边尖点处电场强度将大于空气的 介电强度,发生击穿空气放电的现象。试验也表明 变形程度大时,电极与试件间有放电现象产生。

参考文献:

- CaoW D LuX P SprecherA F, et al Superplatic deformation behaviour of alum inum a lloy in an electric field[J]. MaterSciEng A, 1990 A129 157-166.
- [2] Conrad H. Sprecher A. F. Cao W. D. et al. Electroplasticity the effect of electricity on the mechanical properties of metals [J]. JOM, 1990 42(9): 28-33
- [3] Sluzalec A. Thermal effects in friction welding [J]. Int J. Mech Sci, 1990 2(6): 467-478.
- [4] Rich T, Roberts R. Therm al analysis for basic friction welding
 [J]. Metal Construction 1971 3(3): 93-98.
- [5] LiFuguo Nie Lei LiQinghua et al Microstructure sinulation and prediction of № 718 superalby in intertial friction welding
 [J]. Transactions of the China Welding Institution 2002 23
 (1): 30-33.
 李付国,聂 蕾,李庆华,等. GH 4169合金惯性摩擦焊接过

字竹酉, 灵 雷, 字仄平, 寺. Gh 4109台 玉顶性摩擦焊接过 程组织计算与预测[J]. 焊接学报, 2002 23(1): 30-33.

[6] Yada H. Proceedings of international symposium accelerated cooling of rolled steel[A]. Conference of Metallurgists[C], Per gam on Press Canada 1987.

作者简介: 李庆华, 男, 1970年 9月出生, 讲师, 在职博士研究生。 主要从事材料成形与控制技术等方面的教学与科研工作, 发表学术 论文 10余篇。

Email qinghual@nwpu.edu cn

MAIN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Numerical sinulation of dynamic recrystallization of friction welding under electric field LIQ ing hua LIFur guo FU Li(College of Materials Science and Engineering Northwestern Polytechnical University Xi an 710072 China). p14

Abstract The plastic deformation of we kling interface material is the essence of friction welding. This paper studied the continuous driving friction welding of LY12 alloy that is often used as aerospace structure material. The plastic deformation on a rod sample of coupled thermalme chanical analysis model under the electric field based on finite element method was established. Some physical parameter fields about the welding interface material such as temperature field, strain field and electric field were calculated A Yada grain size model was used to predict dynamic recrystallization and grain size growth of the friction welding process. The welding process and the welding quality affected by these physical parameter fields was also analyzed.

Keywords friction welding coupled the mathematical behavior ior dynamic recrystallization; electric field

Structure characteristics and evolution a twedge bonding interface

LI Jun hui HAN Lei TAN Jian ping ZHONG Jue (College of Me chanical Electronical Engineering Central South University Changsha 410083, China). p5.8

Abstract A series of experiments was carried out on structure characteristics and evolution at the bond interface. Bond lift off character istics were studied by using scanning electron m icroscope with energy dispersive spectroscope Power characteristics of piezoelectric transducer were analyzed by the driving electric signalmeasured. Results show that the pattern of partially bonded material at the N-iAl interface of ultrasonic wedge bonds exposed by peeling underdeveloped bonds sin ulates a ridged torus with an unbonded central and external region rubbed along pulse di rection Bonding strength is located between the severely ridged torus and the non-adhering central and external area of the bond For the same vari ables ridge peak and transforming ultrasonic energy of firstwedge bond ing are greater than that of second wedge bonding. For other variables constant with increasing load the total area of bond pattern increases in size and minor axis of torus extends major axis with increasing time the ridged periphery spreads a whole torus and the ridged location of the bonded region moves closer to the bond center the sliding trace and the ridge like of the bond pattern strength en when more power applied.

Keywords electronics packaging wedge bonding structure; ut trasonic Huan¹, LIU Q iong¹, YANG Li jun¹, GUO Sh eng¹, WANG Q ing guo², YE Chang jun², TAN Peng² (1 Tian jin University Tian jin 300072 China 2 Huayou Steel Tube Limited Liability Company Qingxian 062650 Hebei China). p9-12

Abstract A in ing at the characteristic of pulse submerged are welding process with change wire feed system the sinuloting model was developed by the software of MATLAB /SMULNK which consists of the main circuit simulation model are load system sinulation model and are changing system sinulation model. The experimental waveform is consist entwith the sinulating result which validates the correctness of them odel and lies the foundation of application of pulse submerged are welding process

Keywords changewire feed adjusting system; pulse submerged are welding SMULNK; dynamic simulation

M easuring of Young's modulus of coatings by high velocity arc spraying XU Lian-yong¹, JNG Hong yang¹, HUO Li xing¹, ZHANG Yu feng¹, MA Chong² (1. School of M aterial Science & Engi neering Tian jin University Tian jin 30072 China 2 Tian jin Electrical Science Research Institute Tian jin 30072 China). p13 15 20

Abstract An effective three point bending test based on compound beam theory is introduced. The Young's moduli of FcCrAl coatt ings and NCr coatings by high velocity arc spraying aremeasured through three point bending test. The results show Young's modulus of coatings are much less than that of corresponding spraying wire. The analysis indicates that the lower Young's modulus is induced by inherent characters of coatings. The flaws such as pores in the coatings result in that the actual bulk of coating is less than macroscopical bulk of coating. The reason that Young's modulus of FcC Al coatings is less than that of NiCr coatings is that the porosity and metal particle size of FcCrAl coatings are larger than those of NCr coatings.

Key words high velocity arc spraying coating; Young's modulus compound beam; three point bending porosity

Themal residual stresses near in terface brazing alum inia matrix composite to metal QU Shi yao ZOU Zeng da WANG Xin hong HE Li qin(Shandong University Jinan 25006h, China). p16-20

Abstract The chemical reaction of the composite with the brazing alloy takes place and the reaction layer composed of TiO TiC and so one forms on the composite surface when $SC_w A l_2O_3$ composite is brazed to metals using Ag Cur Ti brazing filler alloy. The thermal residual stress ses near the composite /reaction layer interface were calculated by finite element method. The results have shown that the residual stresses near