

铍环激光束钎焊过程的数值模拟 *

董 平 陈裕泽 邹觉生 李盛和

(中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

摘 要 采用 MARC 软件对铍环激光束钎焊过程的温度场和应力场进行了有限元分析. 温度场分析得到与铍环实际激光束钎焊基本一致的焊缝形状. 应力场分析表明, 焊接后轴向应力和环向应力在焊缝中心的钎料上为压应力, 在铍环外表面热影响区和内表面均为拉应力, 径向应力为压应力, 焊接残余应力主要分布在离焊缝 2 mm 的范围内, 焊接后铍环内外表面发生径向收缩. 将有限元分析得到的铍环外表面的轴向残余应力结果与实测结果进行了比较, 二者所反映的应力变化趋势基本一致.

关键词 铍环, 激光束钎焊, 温度场, 应力场, 有限元分析

中图法分类号 TG407

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)08-0881-04

NUMERICAL SIMULATION ON LASER BEAM BRAZE WELDING OF BERYLLIUM RING

DONG Ping, CHEN Yuze, ZOU Juesheng, LI Shenghe

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

Correspondent: DONG Ping, assistant professor, Tel: (0816)3623424, E-mail: ptung@x263.net

Supported by The Key Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (No.1999Z0304)

Manuscript received 2001-12-18, in revised form 2002-03-29

ABSTRACT MARC software was used to simulate the temperature and stress fields of laser beam braze welding process of beryllium ring. The weld line profile obtained from the temperature field simulation is much like the actual profile. After laser welding, both the axial and tangential stresses are compressible state at the braze, while tensile stress state locates at the heat affected zone (HAZ) and inner surface of beryllium ring, the radial stress is compressible state. The welding residual stress mainly locates within 2 mm from the weld line. Radial shrinkage occurred at the inner surface and outer surface of beryllium ring. The axial residual stress from the calculation of finite element method was compared with the experiment value and the stress trend is identical.

KEY WORDS beryllium ring, laser braze welding, temperature field, stress field, FEM

激光束焊接是一种高能束的焊接方法. 在激光束焊接的过程中, 激光束能量沉积在焊缝表面, 使焊缝表面的温度迅速升高到沸点, 焊缝金属发生汽化. 随着焊接过程的进行, 汽化金属在焊缝处形成细长的“小孔”, 激光束能量可以直接沉积到小孔内部, 形成高能束焊接特有的“小孔效应”^[1]. 与其它焊接方法相比, 激光束焊接具有较高的能量密度和相对低的总输入能量, 可以减小焊缝和热影响区范围, 降低焊件焊接后的残余应力和变形^[2]. 尽管如此, 由于焊缝及附近经历了一个非常高温的热循环过程, 在焊缝及其附近仍然会产生较大的焊接残余应力.

为确定激光束焊接残余应力的大小和分布, 优化激光

束焊接工艺, 许多学者对此做了大量研究工作^[3-5]. Schrank^[4]采用 ABAQUS 有限元分析软件对一个不锈钢圆片激光束塞焊过程分别进行二维轴对称和三维分析, 并与实测温度和变形进行了比较, 进一步研究了预载荷对激光束焊接变形的影响, 提出了一种控制焊接变形的有效方法. Carmignani 等^[5]采用 ABAQUS 有限元分析软件, 对钢板激光束对接焊接过程进行三维分析, 得到了钢板激光束焊接后的残余应力和变形分布. 铍是一种高比强度的金属材料, 具有较好的热物理性能、力学性能和核性能, 在核能、航空航天等领域得到较为广泛的应用. 但铍的延性较差, 焊接残余应力很容易引起铍环发生焊接变形, 甚至产生宏观开裂. 为了尽可能降低铍环激光束焊接后的残余应力和变形, 优化铍环的激光束焊接工艺, 本文采用 MARC 有限元分析软件对铍环激光束钎焊过程进行数值模拟, 并将有限元分析得到的焊接残余应力结果与实测结果进行了对比.

* 中国工程物理研究院重大基金资助项目 1999Z0304

收到初稿日期: 2001-12-18, 收到修改稿日期: 2002-03-29

作者简介: 董 平, 男, 1970 年生, 助理研究员, 博士生

1 实验

1.1 焊接试样和工艺

图 1 为铍环 (直径为 30 mm, 长为 60 mm) 焊件的结构示意图. 铍环通过自嵌接接口对焊而成, 激光束焊接前将其固定在专用夹具上, 夹具对铍环作用了一定大小的分布压力. 为了改善铍环的焊接性能, 焊接时在焊缝处添加铝硅钎料. 激光束焊接以氩气为保护气体, 焊接线能量为 100.0 J/mm, 束斑直径为 0.52 mm, 焊接时采用直径 8 mm 的喷气嘴向焊缝吹氩气以吹散焊缝表面形成的等离子体, 气体流量为 28 L/min, 焊接初始温度为 20 °C.

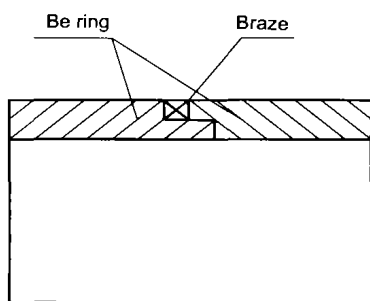


图 1 铍环焊件结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of Be ring

1.2 焊接残余应力的测试

采用美国 AST 公司生产的 X2001 二维应力分析仪测试铍环焊件外表面的残余应力. 实验测定了铍环外表面的残余应力. 测试条件如下: Fe 靶, 直径为 3 mm 光阑, Ni 粉校准, 测 Be (103) 面, 衍射角 $2\theta=142.3^\circ$, 多曝光模式, 侧倾角 ψ 分别取 0° , 24.09° , 35.26° , 45° , -24.09° , -35.26° 和 -45° , 曝光时间为 2 s, 靶电压为 30 kV, 靶电流为 6.0 mA, 校准距离 D 为 49.69 mm.

2 有限元模型

图 2 为铍环激光束焊接有限元单元网格划分图, 采用轴对称四节点等参单元进行有限元分析. 由于焊缝及附近具有较高的焊接温度和温度梯度, 在越靠近焊缝的地方, 单元网格划分越密, 远离焊缝的地方, 单元网格逐渐稀疏. 模型共划分为 1071 个节点, 936 个单元, 焊缝附近单元网格的最小尺寸为 $0.1 \text{ mm} \times 0.022 \text{ mm}$.

采用热-力耦合的有限元分析方法, 焊接热传导分析和热应力分析交替进行求解, 考虑材料热物理性能 (比热容 C_v , 导热系数 λ) 和力学性能 (弹性模量 E , Poisson

比 ν , 屈服强度 σ_s 和线膨胀系数 α) 随温度的变化, 当焊接温度高于熔点后, 由于熔池快速熔化和凝固, 熔池内流体流动的时间非常短暂, 有限元分析不考虑熔池内的流体流动, 将熔化后材料的弹性模量和屈服强度取为较小值, 分别为 5 GPa 和 5 MPa.

为了得到激光束焊接时长钉状的焊接熔化区, 将激光束沉积到焊缝的热量分为表面分布热流和集中体热流两部分. 其中, 前者占 40%, 后者占 60%, 它们与焊接时间的乘积等于总的线能量. 假定激光束沉积到焊缝表面的分布热流为 Gauss 分布^[6], 激光束光斑的有效加热半径为 0.6 mm, 集中体热流作用在焊缝中心的单元上, 材料对激光束的吸收系数为 0.3. 铍环外表面为对流边界条件, 为了考虑焊缝表面的焊接气流, 焊缝两侧 4 mm 范围内作用一较大的对流散热系数, 而其余部位的对流散热系数取得较小. 将铍环一端定义为固支约束, 另一端沿轴向 z 作用 $p=1 \text{ MPa}$ 的分布压力, 以模拟夹具对铍环端部的压力. 考虑焊接时焊接接口下部的接触现象, 利用 MARC 软件强大的接触分析功能, 将接口下部两侧分别定义为可变形接触体, 以获得接触热传导对焊接热传导分析和热应力分析的影响. 根据激光束焊接过程温度变化的剧烈程度, 将焊接过程划分为 3 种不同工况, 每一工况采用固定时间步长, 最小时间步长为 0.005 s, 以保证有限元分析的求解过程能够较好收敛.

3 结果和讨论

3.1 焊接温度场

铍环焊缝外表面、焊根和内表面温度随时间的变化示于图 3. 从图可知, 铍环焊接过程中外表面的最高温度为 278 °C, 焊根最高温度为 1218 °C, 高于铝硅钎料的熔化温度, 但低于铍材熔点; 焊缝内表面最高温度为 378 °C.

高温时铍环焊缝附近的温度场分布示于图 4. 可知焊缝附近的温度变化非常剧烈, 当焊缝中心温度为 2735 °C 时, 离焊缝 0.8 mm 处的温度仅为 520 °C. 由于分析时在焊缝中心添加了集中热流, 焊缝处的等温线不再是通常表面分布热流求解得到的半圆形, 而是成细长针状, 这与激光束焊接的深穿透焊接特征相似. 因此, 将激光束沉积在铍环焊缝外表面的能量分解为表面分布热流和焊缝中心集中热流进行铍环激光束钎焊过程的有限元分析是恰当的, 基本上反映了激光束焊接温度场的特征. 这一方法同样适用于其它激光束焊接过程的数值模拟. 考虑到铍以及铝硅钎料的熔点, 可知焊缝的表面宽度和焊深分别约为 1.0 和



图 2 有限元单元网格划分
Fig.2 The elements figure for FEM

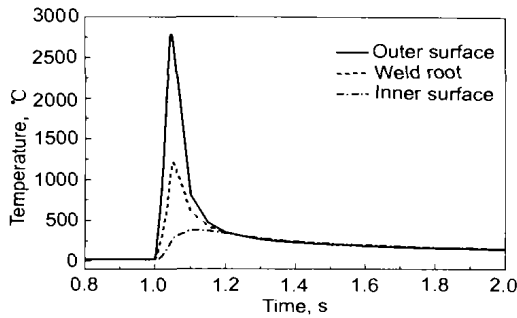


图3 铍环焊缝内外表面及焊根温度随时间的变化
Fig.3 The curves of predicted temperature vs time

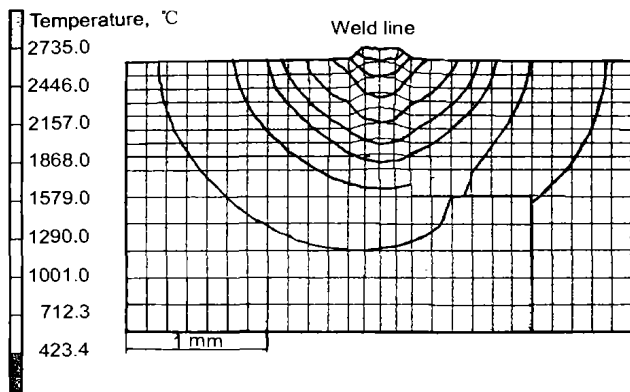


图4 铍环焊缝及附近的温度场分布
Fig.4 Temperature fields near weld line of Be ring

1.1 mm, 这与实际金相分析得到的焊缝表面宽度和焊深基本一致。

3.2 焊接应力场

3.2.1 内外表面的焊接残余应力 铍环焊缝附近内外表面残余应力沿轴向分布示于图5。图中横坐标以铍环左端面为起点, 30 mm处表示焊缝的位置, σ_z 、 σ_r 和 σ_t 分别为轴向应力、径向应力和环向应力。可见由于铍环左右两部分止口形状不同, 焊缝两侧的残余应力并不呈对称分布。在外表面上(图5a), 焊缝中心为铝硅钎料, 在激光束焊接冷却过程中, 其收缩受到周围基体铍的影响, 最终的残余应力为压应力状态, 具体的压应力产生过程相当复杂; 在焊缝热影响区域(HAZ), 轴向应力 σ_z 和环向应力 σ_t 均为较大拉应力, 这与其它焊接方法的残余应力分布状态类似^[7,8], 大的拉应力主要分布在离焊缝2 mm范围内。在内表面上(图5b), 焊缝及附近的轴向应力 σ_z 和环向应力 σ_t 均为拉应力。为使铍环内残余应力在轴向上满足自平衡条件, 在离焊缝2 mm以外的铍环内外表面上, 轴向应力 σ_z 变为较小压应力(约为50 MPa)。

在焊缝内外表面上, 径向应力 σ_r 均为压应力, 最大值达到-100 MPa, 在离焊缝2 mm以外的区域, $\sigma_r=0$ 。与其它两个应力分量相比, 焊缝处的径向应力虽小但应力

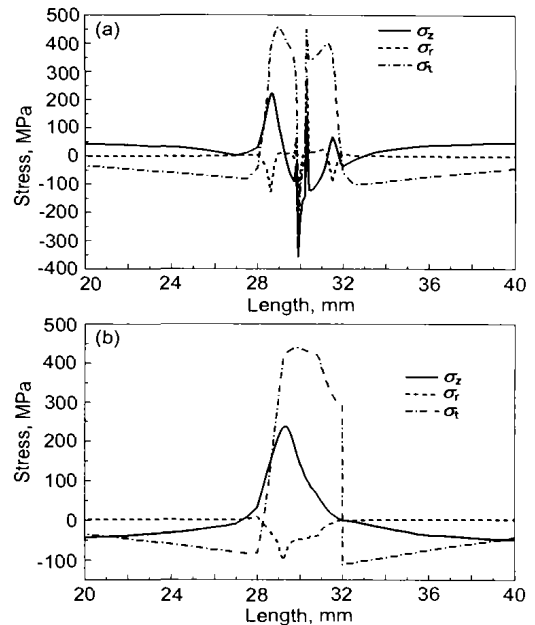


图5 铍环内外表面的残余应力分布
Fig.5 Residual stress distributions for Be ring at outer surface (a) and inner surface (b)

状态与其它两个应力分量完全相反, 从而使焊缝残余应力处于复杂的三维应力状态, 很容易使铍环焊接后发生宏观开裂, 当铍环壳壁增厚后, 径向应力还会继续增大, 铍环焊接开裂的可能性会更大。

3.2.2 沿深度的应力分布 铍环激光束焊接后沿深度的残余应力分布示于图6。其中图6a为焊缝处的应力分量和等效应力沿深度的分布, 图6b为离焊缝不同距离处环向应力分量 σ_t 沿深度的分布。由图6a可知, 焊缝处靠近外表面区域的残余应力较小, 这主要是由于焊接时焊缝添加了铝硅钎料, 钎料的屈服强度远低于铍的屈服强度, 焊缝根部的残余应力较大, 因为焊缝根部已逐渐由钎料过渡到母材铍上。在焊缝外表面的各应力分量均为压应力, 激光束焊接后焊缝材料处于复杂的三维应力状态, 应力梯度较大。由图6b可知, 不同截面内残余应力的大小和分布不同, 越靠近焊缝截面应力梯度越大; 远离焊缝, 则应力梯度逐渐减小。应力梯度主要存在于离焊缝2 mm的范围内, 远离这一范围铍环内外表面的焊接残余应力较小, 且内外表面的应力值基本相同, 这主要是由于需要平衡焊缝的巨大残余应力而产生的。

3.3 内外表面的变形

铍环激光束焊接后内外表面的径向收缩示于图7。可知除焊缝附近外, 铍环内外表面的径向收缩基本相同。在焊缝处, 铍环外表面的径向收缩达到了最大值(大约为-0.035 mm)。沿轴向上, 铍环各点径向收缩大小各不相同, 焊缝外表面径向收缩的波动较大。

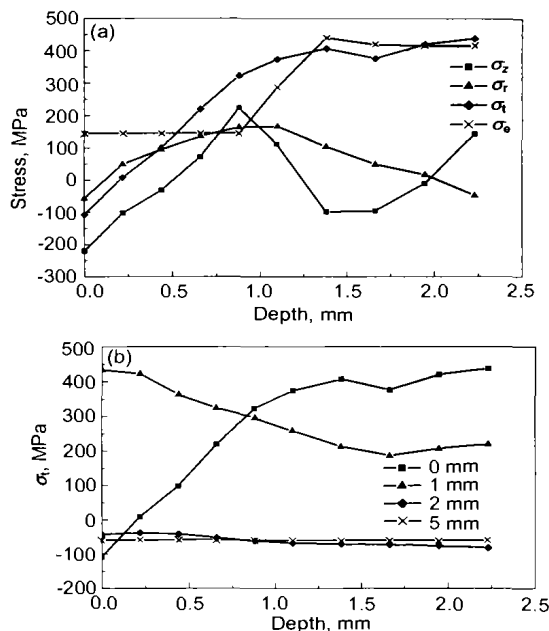


图 6 铍环沿深度的残余应力分布

Fig.6 Residual stress distributions along depth of beryllium ring at the weld line (a) and different distances from weld line (b)

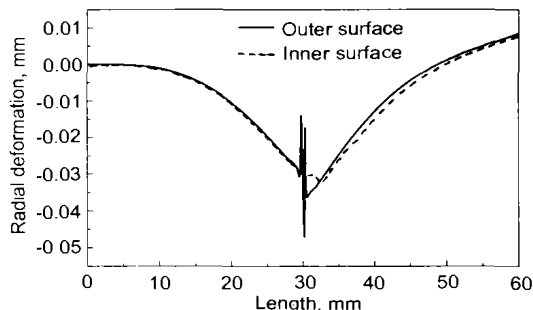


图 7 铍环内外表面的残余变形

Fig.7 Residual deformation at inner and outer surfaces

3.4 实验验证

采用 X2001 应力分析仪测试了铍环外表面焊缝附近的轴向残余应力 σ_z , 图 8 即为实测值和有限元计算值的比较. 从图可见, 二者所反映的应力变化趋势基本一致, 但残余应力大小并不完全相等. 除了 X 射线应力测试存在一定实验误差外, 入射 X 射线在铍环外表面上存在一定照射范围和穿透深度, X 射线应力测试得到的应力值是铍材表层一定体积内应力的加权平均值, 而有限元分析得到的是一个理想“点”的残余应力, 二者是很难完全一致的.

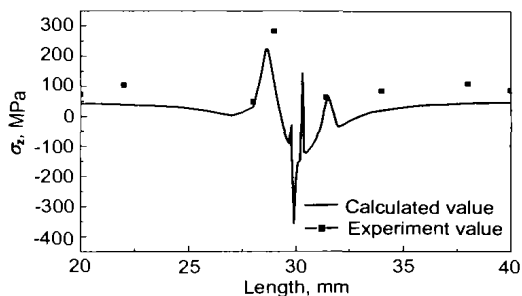


图 8 铍环外表面轴向应力 σ_z 实测值和有限元计算值
Fig.8 Calculated and measured σ_z at outer surface

4 结论

(1) 采用表面分布热流与焊缝集中热流相结合的方法进行铍环激光束钎焊过程的有限元分析, 可以得到与实际激光束焊接基本一致的焊缝形状.

(2) 铍环激光束钎焊后, 在焊缝中心铝硅钎料上, 轴向应力和环向应力分量均为压应力; 在铍环焊缝外表面的热影响区域和内表面上, 轴向应力和环向应力分量均为拉应力; 内外表面的径向应力均为压应力, 从而使铍环焊缝处于复杂的三维应力状态; 铍环激光束焊接残余应力主要分布在离焊缝 2 mm 的区域内.

(3) 铍环激光束焊接后, 内外表面将发生径向收缩, 焊缝处的径向收缩最大, 约为 -0.035 mm.

(4) 采用 X2001 应力分析仪测试铍环激光束焊接后外表面的残余应力, 得到的应力变化趋势与有限元分析值基本一致.

徐芳和管卫军同志参加了部分实验工作, 在此表示感谢.

参考文献

- [1] Liao J H. *Laser Technol*, 1997; 21: 164 (廖健宏. 激光技术. 1997; 21: 164)
- [2] Radaj D, translated by Xiong D J et al. *Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Beijing: Machinery Industry Press, 1997: 47 (Radaj D 著, 熊第京等译. 焊接热效应——温度场、残余应力、变形. 北京: 机械工业出版社, 1997: 47)
- [3] Gianoulakis B E, Burchett S N. *DE 95006314*, 1995
- [4] Schrank M. *DE 91016454*, 1991
- [5] Carmignani C, Mares R, Toselli G. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 1999; 179: 197
- [6] Zhao H, Debroy T. *Metall Mater Trans*, 2001; 32B: 163
- [7] Lindgren L E, Karlsson L. *Int J Numer Methods Engrg*, 1988; 25: 635
- [8] Tekriwal P, Mazumder P. *J Engrg Mater Technol*, 1991; 113: 336