

激光相变热处理对 TC4 电子束焊缝残余应力的影响

鲁金忠¹, 张永康¹, 孔德军¹, 任旭东¹, 邹世坤², 王西昌²

(1. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

[摘要] 利用 CO₂ 激光相变热处理技术对 TC4 钛合金电子束焊缝进行了处理, 研究了激光功率、光斑直径、辅助气体等激光工艺参数对电子束焊缝残余应力分布的影响。实验结果表明, 激光相变热处理改善了焊缝残余应力的分布, 使焊缝表面残余应力由拉应力转变为压应力, 其压应力值随着激光功率的增加而增大, 随着激光光斑直径的减小而增加; 辅助气体为 O₂ 时残余压应力值比辅助气体为 N₂ 大 30~40 MPa, 激光相变热处理显著提高了 TC4 钛合金电子束焊缝的残余压应力及其使用寿命。

[关键词] 激光相变热处理; TC4 钛合金; 电子束焊缝; 残余应力

[中图分类号] TN249; TG456.3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 05-0072-05

1 引言

钛合金具有强度高、高低温性能好、耐腐蚀等许多优点, 在航空航天工业中广泛应用, 因此钛合金焊接件结构在使用过程中的安全可靠越来越引起人们的关注, 其中由焊接产生的残余应力是影响构件强度和寿命的主要因素之一^[1]。激光相变热处理技术以高能量 ($10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$) 的激光束快速相变热处理金属工件, 使被照射的金属或合金表面温度以极快的速度升高到相变点而低于熔化温度。当激光束离开被照射部位时, 由于热传导的作用, 冷态的基体使其迅速冷却而自淬火, 可以有效地提高金属材料或零件的表面硬度、耐磨性、耐蚀性以及强度和高温特性^[2,3]。

近年来激光相变热处理改变表面金属性能的研究工作已开始向铝合金焊接件拓展^[4~6], 但对航空工业中广泛应用的 TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 结构焊接件的研究较少^[7], 对激光相变热处理后的 TC4 钛合金焊缝残余应力和表面显微硬度等机械性能的研究尚未见报道。课题研究采用 CO₂ 激光相

变热处理工艺对 TC4 钛合金电子束焊缝进行了处理, 并用 X-350A 型 X 射线应力仪测试了激光相变热处理后的焊缝残余应力分布, 分析了激光功率、光斑直径、辅助气体等参数对电子束焊缝残余应力的影响, 这对于提高 TC4 钛合金电子束焊缝的使用寿命具有十分重要的现实意义。

2 实验方法

2.1 试样准备

焊缝试样材料为 TC4 钛合金, 厚度 14 mm, 其化学成分的质量分数为: Al (6.27~6.32), V (4.15~4.19), Fe (0.18~0.20), N₂ (0.012~0.014), H₂ (0.004 1), O₂ (0.18~0.19), Ti (余量)。电子束焊缝采用北京航空制造工程研究所研制的 ZD150 高压电子束焊机完成, 其电子束焊接工艺参数为: 加速电压 140 kV, 电子束流 19 mA, 聚焦电流 339 mA, 焊接速度 300 mm/min。焊缝表面用 86-1 型黑色涂料作为 CO₂ 激光吸收层。

测试前磨平试件焊接后的焊缝凸出和凹进部位, 并用 XF-1 电解抛光机进行抛光, 抛光液为

[收稿日期] 2006-03-04; 修回日期 2006-05-12

[基金项目] “八六三” 高新技术研究发展计划资助项目 (2002AA336030, 2002AA421120)、国家自然科学基金资助项目 (50275068)、国防航空基金资助项目 (02H52053)

[作者简介] 鲁金忠 (1975-), 男, 湖北鄂州市人, 江苏大学机械工程学院讲师, 博士研究生

NaCl 饱和溶液，抛光深度为 150~200 μm。在同一条焊缝横轴上依次轮截取 9 个测试点，间距为 1 mm，其中焊缝 5 个点、热影响区 2 个点、基体 2 个点。用 X 射线检测上述各点的表面残余应力，对焊缝及热影响区进行激光相变热处理后，再分别测出各点的残余应力。

2.2 实验装置及参数选择

激光相变热处理在 2.5 kW 快速轴流 CO₂ 多功能激光装置（见图 1）上进行，工艺参数为：激光功率 0.5~2.5 kW，进给速度 1 000 mm/min，偏焦量 3 mm，辅助气体速率 20~30 ml/min。

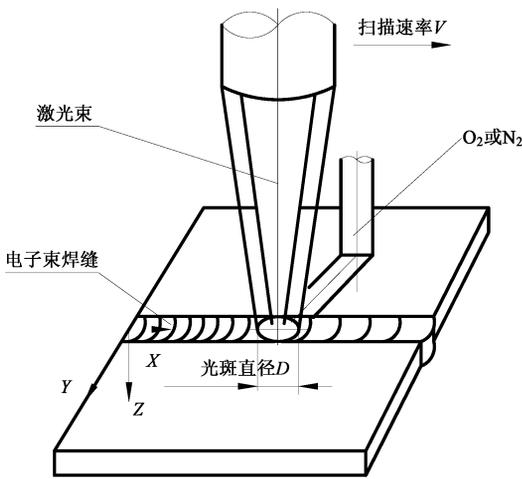


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of experimental setup

利用 X-350A 型 X 射线应力仪对焊缝试样进行 X 射线衍射分析，其管电压为 22 kV，管电流 6 mA，铬靶 K_α 特征辐射，准直管直径 φ2 mm，阶梯相变热处理步进角 0.1°，时间常数 1 s，扫描起始角及终止角分别为 164°和 147°，侧倾角 Ψ 分别取 0°，15°，25°和 45°。对于铬靶 K_α 特征辐射，TC4 为“422”晶面，X 射线吸收系数取 $\mu_4 = 2.5 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ 。

3 实验结果及分析

3.1 X 射线法应力测定原理

当 X 射线射入金属点阵后，将发生衍射现象，其衍射角 θ 同晶面间距 d 成布拉格关系。当应力引起晶面间距 d 发生变化后，衍射角 θ 亦发生变化。X 射线应力仪可准确地测定出衍射角 θ 的变化量，选定若干 Ψ 角测定所对应的衍射角 2θ ，即可根据弹性力学方程计算出应力大小。X-350A 型 X 射线应力分析仪由计算机控制自动完成测量，并输出

最终应力测试结果及相关的参数。该应力仪的允许测量误差为 ±20 MPa，测试中可自动打印残余应力结果及误差。当测量误差超过 25 MPa，进行复测。

3.2 辅助气体

选用激光功率为 1 600 W，光斑直径为 φ2 mm，辅助气体分别为 O₂，N₂ 时，用 X-350A 型 X 射线应力仪测定电子束焊缝区及热影响区（距焊缝中心 ±3 mm）的焊接残余应力分布，如图 2 所示。

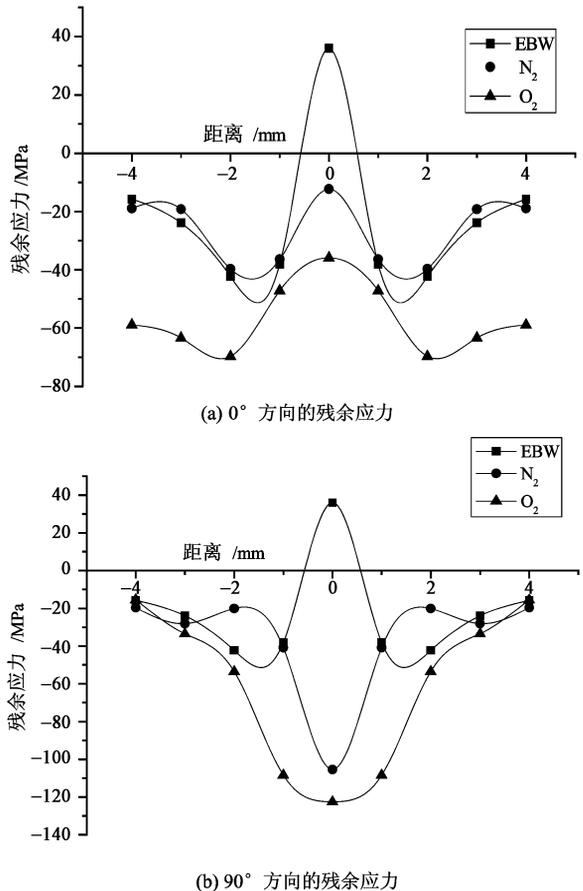


图 2 辅助气体分别为 O₂，N₂ 时激光相变热处理电子束焊缝后表面残余应力分布

Fig.2 Surface residual stress distribution of EBW when assistant gas is O₂ or N₂ by CO₂ laser phase transformation treatment

从图 2 可以看出，在焊缝区存在着高值拉应力，其应力分布基本对称于焊缝中心，焊缝宽度约为 1 mm，热影响为距离焊缝中心 2~3 mm 的两条带形。焊接残余应力分布有明显的规律性，主要分布在焊缝两侧 4 mm 以内，热影响区残余应力比焊缝区的残余应力小，在距离焊缝中心约 1 mm 处残余应力发生突变。

当辅助气体为 O₂，功率恒定时，激光光斑直径越小，残余应力的变化越明显；当激光光斑直径不变，功率恒定时，辅助气体为 O₂ 时残余应力的改变比辅助气体为 N₂ 时更为明显。这是由于合金电子束焊缝经激光相变热处理后，电子束焊缝激光处理区域发生较严重的塑性变形以及由形变诱发的马氏体相变而产生较高的残余压应力。当辅助气体为 O₂ 时，O₂ 起到助燃作用，温度升高很快，从而使焊缝区的激光相变热处理更为迅速和明显。

3.3 激光功率

当激光光斑直径为 φ2 mm，辅助气体为 O₂，功率为 1 000 W, 1 600 W, 2 200 W 时，焊缝及热影响区残余应力分布如图 3 所示。

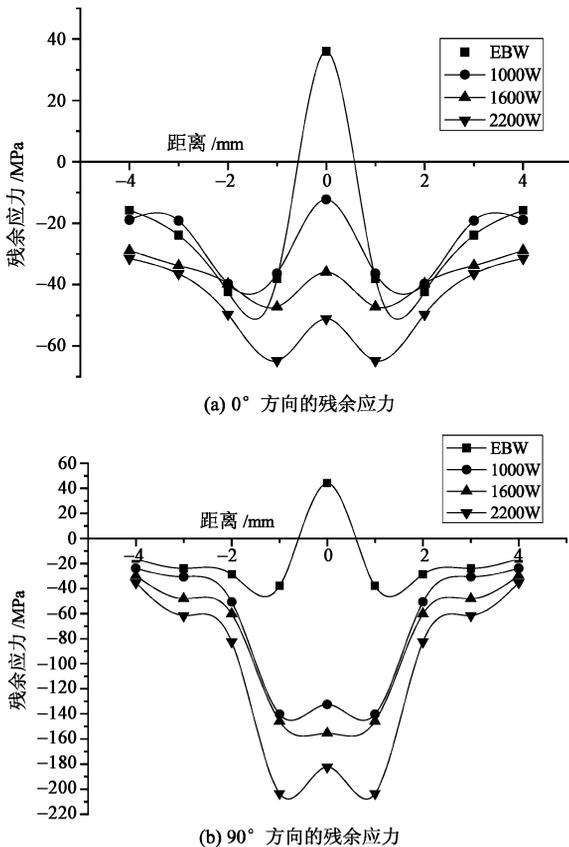


图 3 激光功率改变时电子束焊缝表面残余应力分布

Fig.3 Surface residual stress distribution of EBW when laser power changes

TC4 钛合金电子束焊缝经激光相变热处理后，残余应力发生了明显的变化。在实验中选用辅助气体为 O₂、光斑直径为 φ2 mm，激光功率 < 1 600 W 时的残余应力基本不发生变化；当功率 ≥ 1 600 W

时，焊缝表面的残余应力有明显的变化，随着功率的增加，残余应力的变化更加明显。

3.4 激光光斑直径

激光功率为 1 600 W, 辅助气体为 O₂，光斑直径为 φ1 mm, φ2 mm, φ3 mm 时，焊缝及热影响区的残余应力发生明显的变化，其分布如图 4 所示。

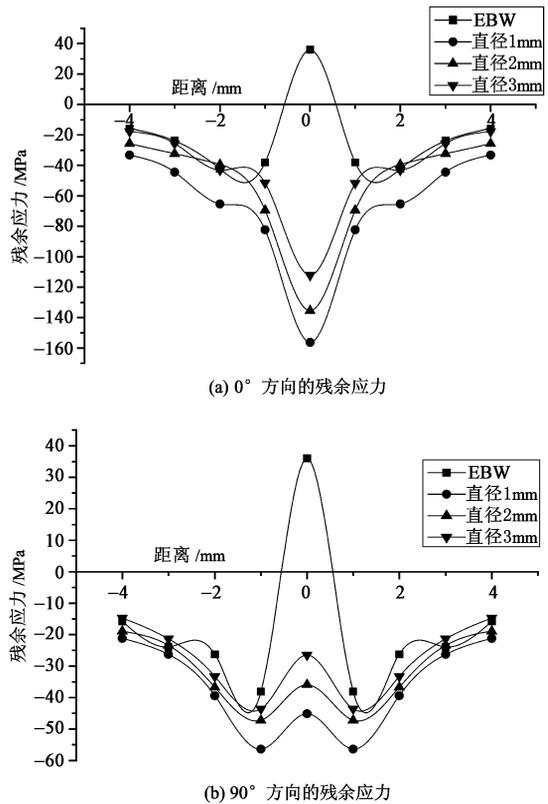


图 4 激光光斑直径改变时电子束焊缝表面残余应力分布

Fig.4 Surface residual stress distribution of EBW when laser spot diameter changes

由图 4 可知，焊缝表面的残余应力随着激光光斑直径的增大而减少，其原因是由于激光光斑直径的增大引起激光功率密度减少，导致了残余应力减少。焊缝区的残余应力大幅度下降，有效地消除了焊后产生的残余应力。从测试结果看，焊缝区的残余压应力明显大于热影响及母材处的残余应力，这有利于提高电子束焊缝的使用寿命。

3.5 分析与讨论

残余应力产生的原因大致上可分为两类：装配过程中各个部件尺寸不协调产生的残余应力；材料内部产生各区域之间自平衡的残余应力。焊接中产生的残余应力属于后一类，主要原因是焊缝区的不同

均匀加热和变形, 焊接时焊接热源相对于工件移动, 工作过程对工件进行局部的不均匀加热和冷却, 在材料内某些部分存在温度梯度。在焊接加热过程中不均匀的温度场使材料热膨胀受阻, 从而在焊缝区及热影响区形成了局部的塑性变形区; 在工件冷却过程中, 受压缩的塑性变形区材料收缩受阻, 因此由加热和冷却的温度梯度产生了焊接热应力, 这是焊接残余应力起主导作用的部分。

激光相变热处理时材料表面形成了相变硬化层, 焊接残余应力在大多数情况下是通过相变应力和热应力来计算的。激光加热时材料表面形成温度场, 在热循环中产生的热应力为^[8]

$$\sigma_1 = \frac{0.55 E \alpha_L A \left[\frac{P}{D_b v} \right]}{(1-v) \rho_c \left[z + 0.54 \left[\frac{\alpha D_b}{v} \right]^{\frac{1}{z}} \right]} - \sigma_1^A \quad (1)$$

式中 α_L 为材料线膨胀系数; A 为试样对激光能量的吸收率; ρ_c 为材料热容; z 为距表面距离。

相变残余应力为^[8]

$$\sigma_2 = \frac{fE}{3(1-v)} \left[\frac{v_M^0}{v_A^0} - 1 \right] \quad (2)$$

式中 f 为马氏体体积分数; v_M^0 , v_A^0 分别为马氏体和奥氏体的比容。

淬硬层残余应力为热应力与相变残余应力叠加, 即

$$\begin{aligned} \sigma = \sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{0.55 E \alpha_L A \left[\frac{P}{D_b v} \right]}{(1-v) \rho_c \left[z + 0.54 \left[\frac{\alpha D_b}{v} \right]^{\frac{1}{z}} \right]} - \\ &\sigma_1^A - \frac{fE}{3(1-v)} \left[\frac{v_M^0}{v_A^0} - 1 \right] \approx \frac{E \alpha_L A \left[\frac{P}{D_b v} \right]}{(1-v) \rho_c \left[\frac{\alpha D_b}{v} \right]^{\frac{1}{z}}} - \\ &\sigma_1^A - \frac{fE}{3(1-v)} \left[\frac{v_M^0}{v_A^0} - 1 \right] \quad (3) \end{aligned}$$

激光相变热处理后的残余应力测试结果表现为压应力, 由式 (3) 得 $\sigma < 0$, 即 $\sigma_1 < \sigma_2$ 。这说明相变热处理过程中相变产生的残余应力对相变层残余应力的贡献最大, 这是由于 TC4 电子束焊缝相变层的材料成分在激剧冷却过程中由奥氏体转变为马氏体, 引起了材料体积变化, 其结果表现为相变层产生了残余压应力。

4 结论

激光相变热处理 TC4 钛合金焊缝的实验表明,

电子束焊缝的残余应力得到了显著的改善, 主要结论如下:

1) 激光相变热处理后的 TC4 钛合金焊缝残余应力均表现为压应力, 这有利于提高焊缝的综合机械性能。

2) 表面残余压应力随激光功率的增加而逐渐增大, 随激光光斑直径增加而减小, 可通过激光工艺参数精确地控制 TC4 电子束焊缝的残余应力的分布。

3) 残余应力与辅助气体类型有关, 辅助气体为 O_2 时残余应力比气体为 N_2 的大 30~40 MPa。

4) 激光相变热处理后的 TC4 电子束焊缝区在 $\Psi=0^\circ$ 和 90° 方向上残余应力值变化趋势一致, 表面激光相变热处理后材料组织结构较均匀, 这有利于提高 TC4 焊缝的使用寿命。

参考文献

- [1] Mei Z, Morris J W, Shine M C. Superplastic creep of eutectic lead solder joints [J]. Journal of Electronic Packaging, 1991, 113 (6): 109~114
- [2] Grivas D, Murty K L, Morris J W. Deformation of Pb-Sn alloys at relatively high strain rates [J]. Acta Metallurgica, 1979, 27 (5): 731~737
- [3] Chen Furong. Finite element calculation of residual stresses on electron beam welded BT20 plates [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25 (1): 61~64
- [4] Sagaro R, Ceballos J S, Mascarell J, et al. Tribological behaviour of line hard ening of steel U13A with Nd: YAG laser [J]. Revista de Metalurgia (Madrid), 1999, 35 (3): 166~172
- [5] Yang Q, Li J H, Pei X D, et al. Structure and properties of laser quenched 4Cr13 steel [J]. Chinese Journal of laser, 1993, B2 (5): 475~480
- [6] Kikin P Yu, Medvedev A A, Pchelintsev A I, et al. Effect of pulsed laser quenching on the mechanical properties of structural steels in high-rate deformation [J]. Physics and Chemistry of Materials Treatment, 1990, 24 (6): 582~583
- [7] Hua Yinqun. Study on the experiment of laser quenched+shocked processing ductile iron QT800-2 [J]. China Journal of Laser, 2003, 30(7): 655~658
- [8] 刘宁, 赵兴中, 邓宗钢, 等. 钢和铸铁相变硬化层的残余应力研究[J]. 机械工程学报, 1994, 30 (4): 108~114

Effects on Residual Stress of Electron Beam Welding of TC4 Alloy by Laser Phase Transformation Treatment

Lu Jinzhong¹, Zhang Yongkang¹, Kong Dejun¹, Ren Xudong¹, Zou Shikun², Wang Xichang²
(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;
2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[Abstract] The electron beam welding (EBW) of TC4 titanium alloy was processed by CO₂ laser phase transformation treatment, and the effects of assistant gas, laser power and spot diameter, etc., on residual stresses in EBW of TC4 alloy by CO₂ laser phase transformation treatment were investigated. The results show that residual stresses in EBW of TC4 titanium alloy by CO₂ laser phase transformation treatment are obviously improved, which makes the surface residual stress change into compressive stress from tensile stress. Its compressive residual stress increases with laser power, and decreases with spot diameter increases. Compared to N₂, residual compressive stresses in EBW are bigger by 30~40 MPa than that when assistant gas is O₂. Compressive residual stress of the line has been increased by laser phase transformation treatment, which improves service life of electron beam welding of TC4 alloy.

[Key words] laser phase transformation treatment; TC4 titanium alloy; electron beam welding (EBW); residual stress

(上接第 32 页)

自校正模糊控制器的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(22): 1905~1907

assisted injection molding control systems [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2006, 29: 296~307

[5] Lin Baifu, Lian Rueyjing. Intelligent control of gas-

Study on Fuzzy Neural Network Control of Gas-injection Pressure in Gas-assisted Injection Molding

Ou Changjin

(The MOE Key Laboratory of Mechanical manufacture and Automation,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

[Abstract] In this study, an effective control method and strategy based on fuzzy neural network has been developed for gas injection pressure accurate control in gas-assisted injection. A fuzzy neural network controller with five layers and its control algorithm are established. The learning ability of neural network is used to optimize the rules of the fuzzy logic so as to improve the adaptability of system. The simulation of the system capability and three segmental injected pressure control are carried out under the environment of MATLAB and the results show that this theoretic model is feasible, and the control system has good characteristics and control action.

[Key words] gas-assisted injection molding; fuzzy neural network; gas-injection pressure control