

GH99 高温合金环形和 C 形激光焊接对比研究

刘春艳¹ 马 瑞¹ 檀财旺² 郭 伟² 李俐群^{2,*}

¹ 北京动力机械研究所, 北京 100074
² 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 发动机火焰筒主要材料为 GH99 高温合金,其传统焊接方法为电阻点焊。为提高焊接效率,减少机加工序以及焊接缺陷,对比研究了两种激光焊接方式(环形和 C 形焊),从焊缝成形、微观组织、力学性能等方面揭示激光焊接替代电阻焊的可行性。此外,利用有限元方式,对接头局部和整体构件的焊后应力分布及变形情况进行分析。结果表明,两种焊接方式均能获得良好的焊缝成形,接头性能较原有的电阻焊接头分别高出 15.4% 和 22.1%。有限元计算结果显示 C 形焊后局部和整体的应力及变形较小。

关键词 激光技术; 激光焊接; 高温合金; 有限元; 残余应力

中图分类号 TG457.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0803002

Comparison of Ring-Form and C-Form Laser Welding for GH99 Superalloy

Liu Chunyan¹ Ma Rui¹ Tan Caiwang² Guo Wei² Li Liqun²

¹ Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China
² State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The material used in flame tube in an engine is mainly GH99 superalloy. The traditional welding method is resistance spot welding (RSW). In order to improve welding efficiency, reduce machining procedure and weld defect, comparative study of ring-form and C-form laser welding is carried out. The feasibility of laser welding replacing RSW is revealed from weld appearance, microstructure and mechanical properties. In addition, the residual stress and deformation of local and whole component after welding is analyzed by using finite element method (FEM). The results indicate that good appearances are obtained both using ring-form and C-form welding methods, and their tensile-shear strengths are 15.4% and 22.1% higher than that of RSW, respectively. FEM calculation results show that C-form welding can lead to smaller residual stress and deformation compared to ring-form.

Key words laser technology; laser welding; superalloy; finite element; residual stress

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

镍基高温合金广泛应用于航空工业。目前航空发动机上所应用的镍基合金已占到整体材料的 60%,如燃烧室、涡轮盘和叶片、导向器叶片和机匣、扩散器和加力燃烧室等均采用镍基合金材料。其中很多构件需采用焊接结构,但高温合金焊接过程中

容易出现缩孔、裂纹等缺陷。因此,开发适合镍基高温合金,尤其是针对复杂构件的焊接技术具有重要的意义^[1-3]。

发动机上的火焰筒主要材料为 GH99 高温合金,目前采用电阻点焊(RSW)的方式进行连接。主要问题是热输入不易控制,焊缝内部容易产生缺陷;该构

收稿日期: 2014-01-06; 收到修改稿日期: 2014-03-11

作者简介: 刘春艳(1976—),女,工程师,主要从事钣金工程应用与激光加工技术应用等方面的研究。

E-mail: laimr2002@sina.cn

通信联系人。E-mail: liliqun@hit.edu.cn

件属于薄壁构件,整个圆筒需多次焊接,变形较大;构件需要特别加工使得电极方便地抵达焊接部位。

激光焊接具有速度快、精度高、热输入小、工件变形小等优点,目前越来越广泛地应用于航空航天、汽车等工业^[4-11]。激光的可达性较好,可以减少电阻点焊时位置与结构上的限制。此外,激光焊的高精度、高柔性特点使其在实际生产,特别是航空工业的应用中能够取代传统的电阻点焊和铆接等工艺^[12-14]。激光环形焊缝、C形焊缝近年来成为一个新的研究热点^[15],这两种焊缝形式可以通过增加焊缝长度获得较大的焊缝总面积,在提高生产效率的

表 1 GH99 高温合金化学组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH99 superalloy (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	W	Mo	Co	Al	Ti
≤0.08	17.0~20.0	Bal.	5.00~7.00	3.50~4.50	5~8	1.70~2.40	1.00~1.50
Fe	Mn	Si	S	P	B	Ce	Mg
≤2.0	≤0.40	≤0.50	≤0.015	≤0.015	≤0.005	≤0.02	≤0.01

图 1 为某型号火焰筒整体模型,圆筒之间由 24 个 π 形状支撑件组合而成(每侧 12 个)。构件的焊点主要由 π 形支撑件和内筒的 I、II 处以及和外筒的 III 处构成。原先采用电阻点焊时,为了方便电极接触 π 形件和外筒,特意在内筒上加工了孔洞,无形中增加了机加工序,比较费时。

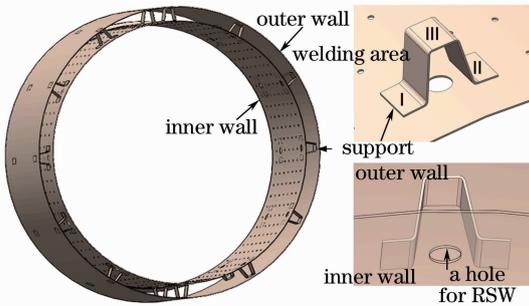


图 1 火焰筒整体模型及焊点分布

Fig. 1 Flame tube model and welding area distribution

为了探究高温合金环形和 C 形激光焊接特性,选择平板进行试验,试件尺寸为 40 mm × 20 mm × 1 mm,接头形式为搭接。试件焊前用丙酮清洗表面,去除表面的杂质及油污。试验所使用的激光器为 IPG 公司生产的 YLS-10000 型光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,波长为 1.07 μ m,焦距为 200 mm,光斑直径为 0.2 mm。

搭接接头的力学性能与焊缝长度密切相关。焊缝长度的选择原则是保证焊后各焊缝形式在搭接面上的连接面积基本相当。原有的电阻点焊熔核直径约为 5 mm,据此推算其搭接位置处焊缝的熔合面积约为 20 mm²。激光焊接试验中,在保证焊缝成形

同时保证了力学性能。

为此,本文开展了激光环形和 C 形焊接的对比研究,通过成形、组织、力学性能等方面揭示两种焊接方法的差异。在此基础上,利用有限元计算方法对焊点局部和整体构件的焊后残余应力及焊接变形进行预测。

2 试验材料及方法

试验采用的材料为 GH99 镍基高温合金,主要成分如表 1 所示。

良好的情况下,调整工艺参数使熔宽尽可能大,当激光功率为 1.2 kW、焊接速度为 1.8 m/min 时,搭接位置处熔宽约为 1 mm。因此,环形焊缝、C 形焊缝的焊缝总长度均设计为约 20 mm,计算其焊点尺寸如图 2 所示。

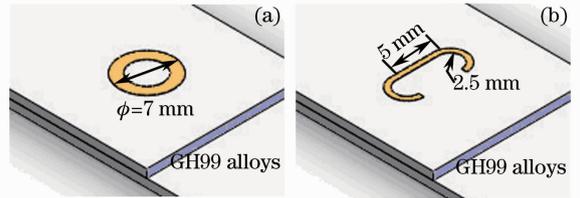


图 2 (a) 环形和 (b) C 形激光焊接示意图

Fig. 2 Schematic of (a) ring-weld and (b) C-weld

焊后采用金相显微镜观察高温合金接头的宏观成形、组织形貌。采用 INSTRON-5569 电子万能材料试验机进行拉剪试验,拉伸速率为 1.5 mm/min,试验温度为 18 $^{\circ}$ C,可获得剪切载荷 F ,作为判断接头力学性能的依据。

在焊缝的外观形貌和接头力学性能均满足要求后,采用有限元的方法对焊接过程中整体组合构件的温度场和应力应变场进行计算,研究两种方法焊接后整体构件的残余应力和变形情况,以便更好地指导焊接工艺。

3 有限元模型建立

3.1 网格划分

按照距离焊缝位置的远近以及网格粗细程度的划分准则对每个区域进行网格划分。焊缝区和远离

焊缝区选择映射网格划分方法,因为映射网格对包含的单元形状有限制,划分得到的网格具有规则的几何形状,利于载荷的施加和收敛控制^[16-17]。焊缝区域网格尺寸约为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,远离焊缝区域网格尺寸适当增大,二者之间的过渡区

采用自由网格划分方法,生成过渡网格。为保证有限元网格的连续性和相邻域之间的网格相互匹配,在分块模型中相邻节点必须重合处理。圆筒件的整体和局部网格划分结果如图 3 所示。

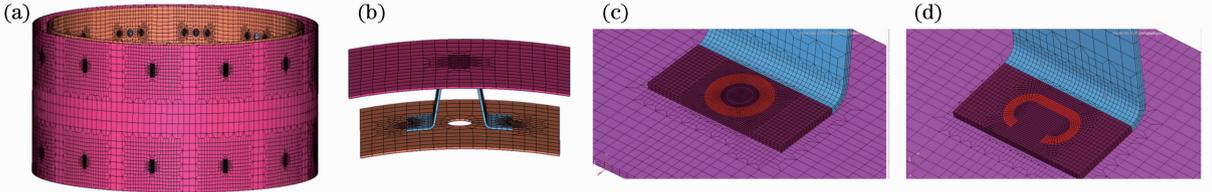


图 3 组合构件网格划分。(a) 圆筒件整体; (b) 圆筒件局部; (c) 环形焊缝; (d) C 形焊缝

Fig. 3 Mesh scheme of component. (a) Whole cylinder; (b) local cylinder; (c) ring weld; (d) C weld

3.2 热源模型

目前国内外使用较多的激光热源模型为高斯状分布的旋转体热源在表面加一个面热源。沿体热源深度方向,体热源中心热流密度由最高到热源底部减至零。而实际焊接中,匙孔底部以下的熔池部位是依靠热传导产生,并没有直接的能量输入,因此这些热源模型在热流的分布上表现得不确切。从激光焊接的实际机理出发,基于以上激光热源模型原理并加以调整,使热源的热流密度主要集中于匙孔周围,这样就得到了与实际熔池形貌相似度很高的激光热源模型。激光热源模型采用一个高斯状分布的面热源下面加上一个高斯旋转体热源,如图 4 所示。

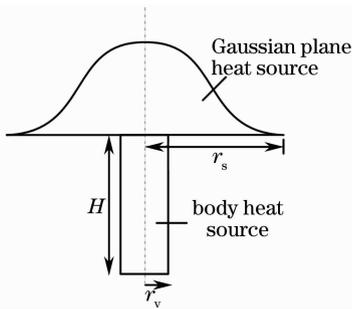


图 4 激光热源模型示意图

Fig. 4 Schematic of laser heat source model

面热源热流分布公式为

$$q_s(x, y) = \frac{\alpha Q_s}{\pi r_s^2} \exp\left[-\frac{\alpha(x^2 + y^2)}{r_s^2}\right], \quad (1)$$

式中 α 为热流集中系数, Q_s 为面热源功率, r_s 为面热源有效作用半径。

体热源热流分布公式为

$$q_v(x, y) = \frac{6Q_v(H - \beta h)}{\pi r_v^2(2 - \beta)} \exp\left[-\frac{3(x^2 + y^2)}{r_v^2}\right], \quad (2)$$

式中 β 为衰减系数, Q_v 为体热源功率, r_v 为体热源有效作用半径, H 为体热源有效作用深度, h 为热源任意截面的高度。

激光热源的总功率为

$$Q_\eta = Q_s + Q_v, \quad (3)$$

式中 η 为热源有效吸收系数。激光热源的施加需通过有限元计算软件的二次开发编写子程序来实现。

3.3 材料的物理参数和边界条件

材料的主要物理性能参数包括杨氏模量、导热系数、热膨胀系数、比热容、屈服强度等。采用的材料参数主要参考相关文献中提供的文献和试验数据,对于高温物理性能参数,针对已有的材料参数和模拟经验进行相关的外延,最终得到的 GH99 相关热物理参数如图 5 所示。

定义环境温度和工件的初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。焊接过程中,热量散失主要包括工件表面与周围环境辐射和对流,其中主要是以辐射损失为主,温度越高辐射作用越强,一般大于 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域,辐射损失超过对流散热损失,低温情况下以对流为主。为方便计算考虑,将辐射和对流系数转化为总的换热系数进行模拟计算,则边界换热而损失的热能可表示为

$$Q_s = \beta(T - T_0), \quad (4)$$

$$\beta = \beta_c + \beta_r, \quad (5)$$

式中 T 为焊件表面温度 ($^\circ\text{C}$), T_0 为周围介质温度 ($^\circ\text{C}$), β 为表面换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), β_c 为对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), β_r 为辐射换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)。

除换热边界条件外,需要定义装卡条件、接头焊接顺序等。按照实际工况,其他边界条件的定义如图 6 所示。

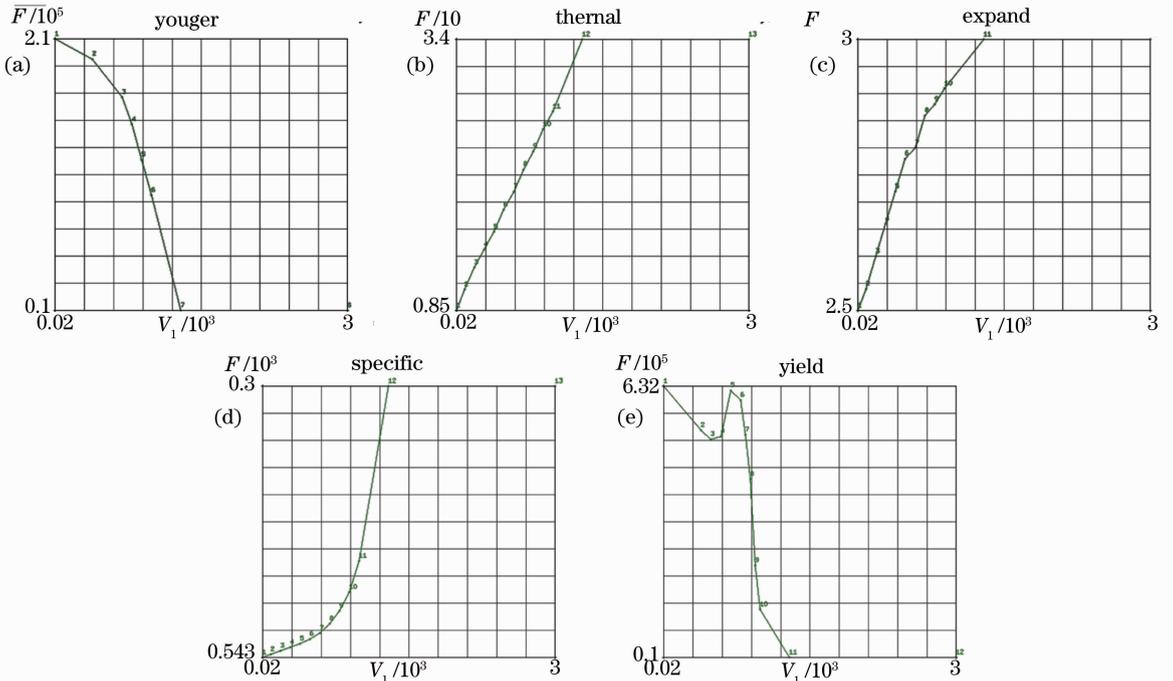


图 5 材料物理参数。(a) 杨氏模量；(b) 导热系数；(c) 热膨胀系数；(d) 比热容；(e) 屈服强度
 Fig. 5 Physical parameters. (a) Young modulus; (b) thermal conductivity; (c) thermal expansion; (d) specific heat; (e) yield strength

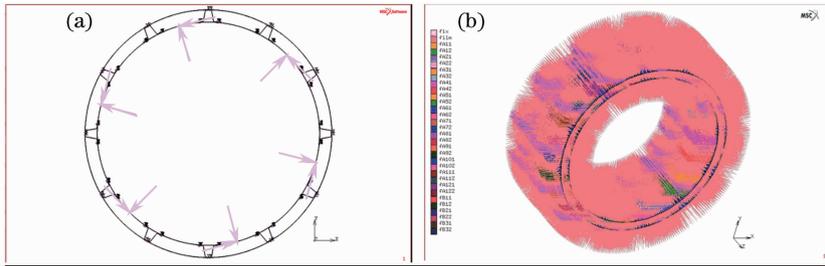


图 6 (a)装夹条件和(b)边界条件
 Fig. 6 (a) Clamp condition and (b) boundary condition

4 结果与讨论

4.1 焊后形貌

图 7 为激光环形和 C 形焊接后的典型表面及截面形貌。所采用的优化工艺参数为激光功率为 1.2 kW,焊接速度为 0.8 m/min,激光束离焦距为 +1 mm。具体的优化过程及缺陷抑制此处不过多阐述。由图 7 可知,利用此参数无论是采用激光环形或 C 形焊接 GH99 高温合金均可获得较好的焊缝成形。从截面上看,也未发现焊接高温合金时容易产生气孔、裂纹等焊接缺陷^[3]。当采用较小焊接能量进行焊接时,可有效避免热裂纹产生。

4.2 组织形貌

图 8 为激光环形和 C 形焊接后的组织形貌。可以看到,在激光焊接快速加热冷却条件下,焊缝中

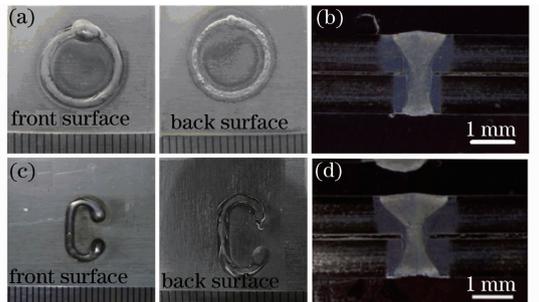


图 7 环形和 C 形激光焊缝典型表面及截面形貌。(a) 环形焊缝表面；(b) 环形截面；(c) C 形焊缝表面；(d) C 形截面

Fig. 7 Typical surfaces and cross sections of ring-weld and C-weld. (a) Surfaces of ring-weld; (b) cross section of ring-weld; (c) surfaces of C-weld; (d) cross section of C-weld

主要为柱状晶，其生长主要沿着散热最快的方向进行。两者之间并无明显差别，焊接热影响区未出现晶间液化现象，说明激光焊接时热输入适中。搭接

结合面边缘处最易出现裂纹的地方^[12]也未发现裂纹，如图 8(c)和(d)所示。无缺陷的接头组织也为接头性能提供了有力的保证。

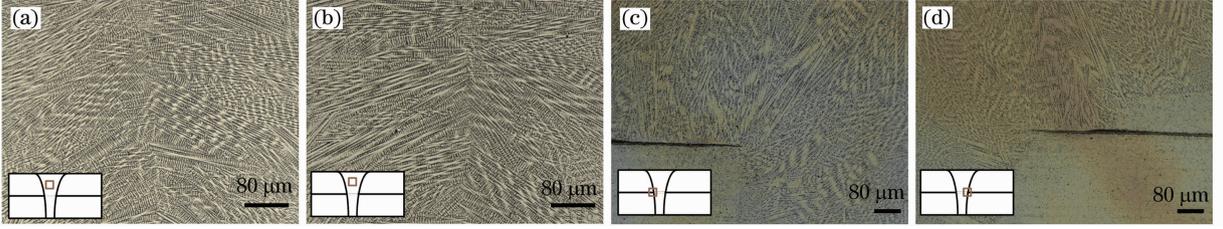


图 8 环形和 C 形激光焊接后的组织形貌。(a) 环形焊缝；(b) C 形焊缝；(c) 环形搭接处组织；(d) C 形搭接处组织

Fig. 8 Microstructure morphologies of ring-weld and C-weld. (a) Ring-weld seam; (b) C-weld seam; (c) microstructure in faying surface of ring-weld; (d) microstructure in faying surface of C-weld

4.3 力学性能

对两者的接头进行拉剪测试，其结果如图 9 所示。在优化的工艺参数下，环形和 C 形接头载荷分别比原有电阻焊接头载荷 (10.4 kN) 高 15.4% 和 22.1%，这表明在力学性能方面利用激光焊接来代替原有的电阻焊是可行的。根据《HB6737-93 高温合金电阻点缝焊质量检验》标准，项目中 1 mm 厚度 GH99 合金的焊点最小抗剪力要求为 6495N，可以达到该标准要求。对 C 形焊缝的长度作适当调整(整体长度达到 31 mm)，研究了不同参数下的接头载荷，其结果如表 2 所示。结果发现，激光焊接接头具有较好的工艺适应性，其载荷均超过 15 kN。主要存在两种断裂

方式：低于 15.5 kN 时，接头均从搭接结合面开裂；高于 15.5 kN 时，接头从焊缝中撕裂。

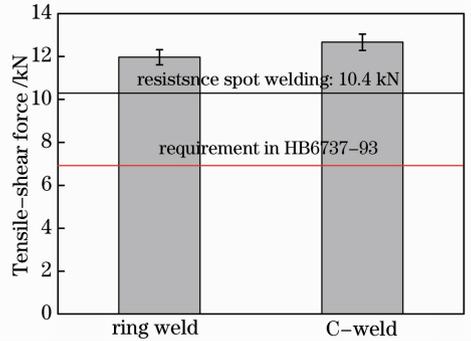


图 9 环形和 C 形激光焊缝拉剪载荷

Fig. 9 Tensile-shear force of ring-weld and C-weld

表 2 不同参数下的 C 形焊缝力学测试结果

Table 2 Mechanical test results of C-weld under various parameters

No.	Laser power/kW	Welding speed /(m/min)	Force/kN	Fracture location
1	1.5	0.9	16.1	Weld
2	1.5	1.2	16.0	Weld
3	1.5	1.5	15.8	Weld
4	1.5	1.8	15.4	Faying surface
5	1.5	2.1	15.3	Faying surface
6	0.9	1.8	13.9	Faying surface
7	1.2	1.8	16.2	Weld
8	1.8	1.8	15.8	Weld

以上结果表明，环形和 C 形焊接只是路径有所不同，在外观形貌、微观组织、性能等方面差异不大，均能满足使用要求。其较大差别可能在于焊后残余应力及薄板变形等方面。同时，由于薄壁结构上有 24 个 π 形焊接支撑件，会使整体结构发生很大的变形。因此，有必要对两者的焊后应力进行分析，为变形的控制提供理论指导。

4.4 有限元模型试验验证

对所建立的有限元模型进行可靠性评价，目前

普遍采用熔合线形貌比对的方法进行验证。该方法认为若模拟所得焊缝形貌与试验结果吻合良好，即表示所建立的数学模型可靠。图 10 为环形和 C 形激光焊缝截面形貌计算结果与试验结果对比。环形焊缝的激光焊接工艺参数为激光功率为 1.5 kW，焊接速度为 1.2 m/min。C 形焊缝的激光焊接工艺参数为激光功率为 1.2 kW，焊接速度为 1.8 m/min。从熔池截面图可以看出，激光将上下板熔透，上板熔宽大于下板，计算结果与试验结果基本吻合，验证了

所建立的数学模型的合理性与准确性。

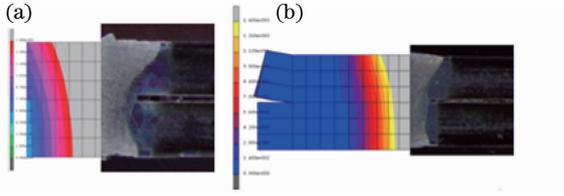


图 10 环形和 C 形激光焊缝截面形貌计算结果与试验结果对比。(a) 环形焊接；(b) C 形焊接

Fig. 10 Comparison between calculated and experimental results of weld cross sections. (a) Ring-weld; (b) C-weld

4.5 残余应力分布与变形

图 11 为单个环形和 C 形激光焊后的残余应力

分布情况。从图 11 中可以看出焊点 I 或 II 处焊后等效残余应力分布区域较大,整个板上绝大部分区域都产生屈服。这是由于此处的尺寸较小(10 mm×22 mm),焊缝尺寸所占面积较大造成的。焊点 I 或 II 的四周和 C 形焊缝的缺口处的残余应力较低。III 处的高应力区域较 I、II 处要大一些,这是因为 III 处的尺寸较大,焊缝周围材料拘束度较大。III 处屈服区域呈哑铃状,即沿着 C 形焊缝长度方向两侧的屈服区域大,宽度方向屈服区域小。两种焊接模式的应力分布情况类似,但对比图 11(b)和(d)可知,环形焊缝的残余应力较 C 形焊缝要高。

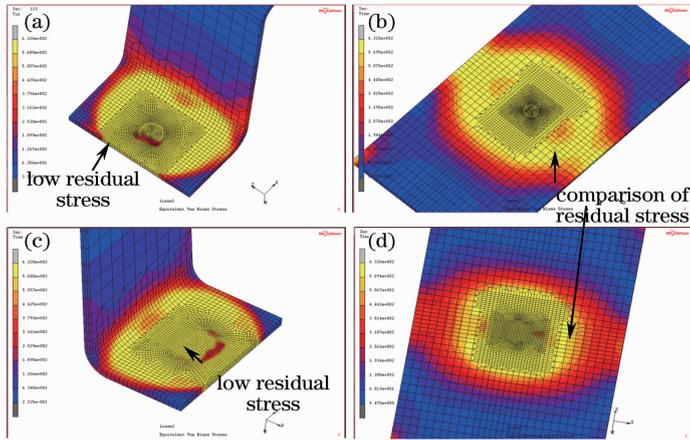


图 11 环形和 C 形激光焊后的残余应力分布。(a) 环形焊点 I 或 II 处；(b) 环形 III 处；(c) C 形焊点 I 或 II 处；(d) C 形 III 处

Fig. 11 Residual stress distribution after ring-form and C-form laser welding. (a) Spot I or II in ring-weld; (b) spot III in ring-weld; (c) spot I or II in C-weld; (d) spot III in C-weld

图 12 为单个环形和 C 形激光焊接后的局部变

形情况。从变形结果可以看出两者在焊点 I 或 II 处

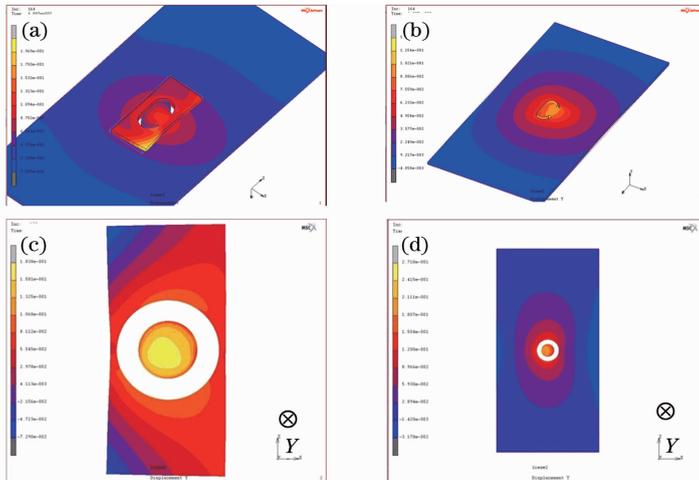


图 12 环形和 C 形激光焊接后的局部变形情况。(a) 环形焊点 I 或 II 处；(b) 环形 III 处；(c) C 形焊点 I 或 II 处；(d) C 形 III 处

Fig. 12 Local deformation distribution after ring-form and C-form laser welding. (a) Spot I or II in ring-weld; (b) spot III in ring-weld; (c) spot I or II in C-weld; (d) spot III in C-weld

的板宽度方向均发生收缩变形,收缩量较长度方向大。焊点 I 或 II 处位于环形焊缝中心位置发生翘曲变形。位于 C 形焊缝一侧的两个边角发生翘曲变形,止焊一侧边角的变形大于起焊一侧。焊点 III 处主要是垂直于板平面的变形,由于焊缝的收缩,环形焊缝圈内的材料和 C 形焊缝圈内的材料发生如图示 Y 轴正方向的变形。

经过一圈 24 个 π 形支撑件逐点焊接后整体构件的应力分布如图 13 所示。从图 13 中也可看出,

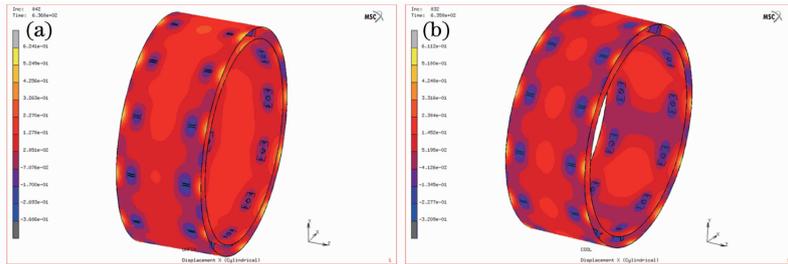


图 13 (a)环形和(b)C形激光焊接后的整体构件应力分布

Fig. 13 Residual stress of the whole component after laser welding of (a) ring-form and (b) C-form

5 结 论

1) 采用激光环形和 C 形焊接对 GH99 高温合金进行搭接焊,均能获得较好无缺陷的接头,工艺的适应性较好。环形和 C 形接头载荷分别比原有的电阻焊接头载荷高 15.4% 和 22.1%。接头断裂方式主要为搭接结合面开裂(低于 15.5 kN)和焊缝撕裂(高于 15.5 kN)。

2) 构件上的焊点等效残余应力分布区域较大,与外筒连接的焊点(III)高应力区域较与内筒连接的焊点(I 或 II)要大一些。焊点 I 或 II 处的板宽度方向均发生收缩变形,焊点 III 处主要是垂直于板平面的变形。

3) 采用环形焊接方法时,焊后的应力分布较广,焊点周围应力普遍较大;而采用 C 形焊接时,焊点周围的应力值有所降低,内筒的应力较为分散。C 形焊缝件的屈服区域小于环形焊缝件。

参 考 文 献

- Guo Jianting. The current situation of application and development of superalloys in the fields of energy industry[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(5): 513-527.
郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J]. *金属学报*, 2010, 46(5): 513-527.
- Wang Huiyang, An Yunqi, Li Chengyu, *et al.*. Research progress of Ni-based superalloys[J]. *Materials Review*, 2011, 25(18): 482-486.
王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 25(18): 482-486.

采用环形焊接方法时,焊后的应力分布较广,焊点周围应力普遍较大;采用 C 形焊接时,焊点周围的应力值有所降低,内筒的应力较为分散。从以上两种形状焊缝构件的焊接模拟结果来看,C 形焊缝件的屈服区域要小于环形焊缝件。分析认为,这是由于环形焊缝件的激光总能量输入、焊接线能量都比 C 形焊缝件大,此外环形焊缝为闭合曲线,不利于应力的释放,而 C 形焊缝不闭合,应力在一定程度上可以释放,所以 C 形焊缝较环形焊缝要好。

- Xiong Jianguang, Hu Qianwu, Wu Fengshun, *et al.*. Microstructure characteristics and weld cracking formation in nickel superalloy laser welded joints[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(5): 309-312.
熊建钢, 胡乾午, 吴丰顺, 等. 镍基高温合金激光焊接接头组织及裂纹形成原因[J]. *应用激光*, 2001, 21(5): 309-312.
- Xiong Jianguang, Wang Liqun, Hu Qiang, *et al.*. Study on laser welding of superalloy GH140 [J]. *Electric Welding Machine*, 2001, 31(11): 7-9.
熊建钢, 王力群, 胡强, 等. 高温合金 GH140 的激光焊接[J]. *电焊机*, 2001, 31(11): 7-9.
- Li Liqun, Guo Wei, Tan Caiwang. Welding characteristics of AZ31B magnesium alloy/stainless steel dissimilar alloys by dual beam laser welding-brazing process[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403002.
李俐群, 郭伟, 檀财旺. AZ31B 镁合金/不锈钢异种合金双光束激光熔钎焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403002.
- Tao Wang, Li Liqun, Wang Yasong, *et al.*. Study on welding process and microstructure of laser welding high volume fraction SiCp/2024Al matrix composite with Ti-6Al-4V filler[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103009.
陶汪, 李俐群, 王亚松, 等. 高体积分数 SiCp/2024Al 基复合材料添加 Ti-6Al-4V 中间层激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0103009.
- Liu Xiubo, Yu Gang, Pang Ming, *et al.*. Laser welding of superalloy K418 to 42CrMo steel[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 444-448.
刘秀波, 虞钢, 庞铭, 等. K418 高温合金和 42CrMo 合金钢的激光焊接[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 444-448.
- Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong, *et al.*. Weld joint forming of thin hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603014.
马广义, 吴东江, 王占宏, 等. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝形成的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603014.
- M F Chiang, C Chen. Induction-assisted laser welding of IN-738 nickel-base superalloy [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 114(1): 415-419.

- 10 Yang Zhibin, Tao Wang, Liu Shen, *et al.*. Study on the characteristics of double-sided laser beam welding for T-joints[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503007.
杨志斌, 陶汪, 刘申, 等. T型接头双侧激光同步焊接特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503007.
- 11 Chen Xi, Yao Gang, Huang Rui, *et al.*. Laser welding of TC4 titanium with aluminum insert[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603006.
陈曦, 姚刚, 黄锐, 等. TC4钛合金加入铝夹层的激光焊接[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603006.
- 12 Feng Weiqi, Zhang Yunfeng, Tao Wang, *et al.*. Dissimilar metals combination of superalloy/stainless steel in T-shape by laser penetration welding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003003.
冯威琦, 张云丰, 陶汪, 等. 高温合金/不锈钢异种材料T型接头激光穿透焊工艺研究[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003003.
- 13 Gong Weihuai, Chen Yuhua, Lü Zhen, *et al.*. Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603008.
龚伟怀, 陈玉华, 吕榛, 等. 0.2 mm厚GH4169薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603008.
- 14 S Daneshpour, S Riekehr, M Koçak, *et al.*. Mechanical and fatigue behavior of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(1): 20-25.
- 15 M J Torkamany, J Sabbaghzadeh, M J Hamed. Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels[J]. Materials and Design, 2012, 34: 666-672.
- 16 Li Haixin, Lin Tiesong, He Peng, *et al.*. Numerical simulation of residual stress in diffusion bonded TiAl/Ti/GH99 alloy joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 38-42.
李海新, 林铁松, 何鹏, 等. TiAl/Ti/GH99扩散连接接头应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 38-42.
- 17 P Martinson, S Daneshpour, M Koçak, *et al.*. Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets[J]. Materials and Design, 2009, 30: 3351-3359.

栏目编辑:张浩佳