

文章编号: 1000-582X(2012)01-011-07

大功率条件下蜂窝状冷凝板激光焊接变形的控制

罗 键^{1a,2}, 张海伟^{1a}, 刘德佳^{1a}, 吴治娟^{1b}, 尹登科³

- (1. 重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 动力工程学院, 重庆 400044;
2. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
3. 重庆市光学机械研究所, 重庆 400039)

摘 要:以 CO₂ 激光焊接 304 不锈钢蜂窝状冷凝板为研究对象, 针对出现焊接变形问题, 研究了因激光焊接功率不同导致焊缝尺寸不同对蜂窝状冷凝板焊接接头最大承载载荷、焊接残余应力与应变的影响, 采用小孔法测量不同工艺条件下焊接残余应力, 并提出了控制蜂窝状冷凝板焊接变形的控制方法。研究表明: 当焊接功率为 1.4、1.8 kW 时, 两种工艺条件下纵向弯曲挠度和纵向收缩应力比与焊缝截面积之比相同为 1.000 : 1.328; 测量所得焊接残余应力之比为 1.000 : 1.391, 与计算所得值相近。分析发现焊缝最大承载能力与焊缝截面积有一定的关系, 并提出了该新型函数关系表达式。提出了内外循环式焊接顺序, 此方法能减少焊接变形的发生, 又几乎不影响焊接生产效率, 极大提高了蜂窝状冷凝板的生产质量。

关键词:激光焊接; 残余应力; 焊接变形; 焊缝尺寸; 承载能力

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

The welding deformation control of the cellular ice-maker plate in high-power CO₂ laser welding condition

LUO Jian^{1a,2}, ZHANG Hai-wei^{1a}, LIU De-jia^{1a}, WU Zhi-juan^{1b}, YIN Deng-ke³

- (1a. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission;
1b. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China;
3. Chongqing Institute of Optics and Mechanics, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: The welding residual stress and strain of cellular ice-maker plate are considered during 304 stainless steel laser welding process. The different welding powers lead to different sizes of laser welding seam. The influence of different welding seam sizes on the maximum bearing load and deformation of cellular ice-plate is studied in laser welding with a new analysis method. And some deformation controlling methods and a new welding procedure for cellular ice-maker plate are proposed. It is showed when the welding power is 1.4 kW and 1.8 kW, the ratio of longitudinal bending deflection is about 1.000 : 1.328, which is equal to the ratio of longitudinal shrinkage stress respectively, and then the measured value of

收稿日期: 2011-08-20

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20070611030); 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA3026); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0607); 机械传动国家重点实验室自主课题; 现代焊接生产技术国家重点实验室开放课题重点项目; 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT 0763); 2010 年日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)国际合作项目(0312003); 重庆大学大型仪器设备开放基金资助项目(2010121545)

作者简介: 罗键(1971-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事特种焊接技术的研究, (E-mail)luojian_cn_2005@163.com.

residual stress ratio is about 1.000 : 1.391, which is similar to the calculated value. The research shows that the maximum bearing load has a certain relationship with the welding seam geometry, and the new function equation between the maximum bearing load and welding seam geometry is submit during 304 stainless steel laser welding process. The cycle welding sequence of inside and outside is proposed, which not only can reduce the occurrence of the welding deformation, but also do not affect the welding efficiency, so the quality of the cellular ice-maker plate is increased greatly.

Key words: laser welding; residual stress; welding deformation; welding seam size; bearing load

蜂窝状冷凝板采用长 1.2~1.8 m, 宽 0.5~1.2 m 的两块厚为 1~3 mm 的 304 不锈钢板通过激光焊接几百个蜂窝状圆环焊道, 再经高压气体胀形, 使之成为表面凹凸相间具有酒窝状波纹起伏的中空流道蜂窝状冷凝板, 冷媒在中空流道中流动, 对冷凝板周围环境进行冷却^[1-3]。由于蜂窝状冷凝板上的焊道多、分布密, 在激光焊过程中容易产生较大的焊接残余应力, 导致蜂窝状冷凝板在焊接加工或冲压胀形过程中容易产生变形和翘曲。因此研究焊接残余应力及其变形控制对蜂窝状冷凝板生产过程具有重要意义。而关于焊缝尺寸对接头最大承载载荷影响的研究有利于胀形过程中压力的控制, 并为焊接变形控制方法的选择提供依据。

激光焊接具有高精度、高质量、高效率等特点, 常应用于汽车工业、电子工业、生物医学、航空航天工业、造船工业、制造业等领域, 具有广阔的发展前景^[4-7]。304 不锈钢具有耐蚀性好、导热性好、无磁性等优点, 具有较高的塑性和韧性, 广泛应用于常压容器及生物工程、化学工程等领域^[8-10]。由于奥氏体不锈钢线膨胀系数大、导热系数小, 特别是薄板焊接时, 在焊接过程中容易产生热收缩而发生焊接变形难以保证焊接质量^[11-12], 因此开展激光焊接 304 不锈钢薄板焊接残余应力与焊接变形控制一直是研究的热点。Okamoto 等^[13]采用气体激光与脉冲 Nd: YAG 激光复合的微型激光束扫描焊接不锈钢薄板, 发现被焊工件几乎不发生变形。温鹏等^[14]通过利用 CCD 观察记录 0.8、1.5 mm 两种厚度的不锈钢板焊接过程中动态变形行为, 分析了发生失稳的机理, 并采用冷却水来控制焊接失稳变形。Hsieh 等^[15]从热-机械角度分析了脉冲激光成型时的瞬态变形过程。Turski 等^[16]研究了不锈钢表面机械处理时残余应力与显微组织的关系。Suarez 等^[17]采用 FEM 和同步加速器辐射衍射研究了激光焊接盖板内部产生的残余应力。

笔者以蜂窝状冷凝板为研究对象, 针对在较大激光焊接功率条件下蜂窝状冷凝板发生较大的焊接变形, 分析了焊缝尺寸与接头最大承载载荷的关系

以提供胀形过程中压力的控制, 对焊接变形控制方法的选择提供依据。分析焊缝尺寸对被焊工件焊接残余应力与应变影响, 预测两种工艺条件下纵向弯曲挠度和纵向收缩应力比。采用小孔法测得两种工艺条件下的焊接残余应力, 并分析其影响因素, 最后提出了控制蜂窝状冷凝板焊接变形的办法。

1 试验材料与方法

以蜂窝状冷凝板为研究对象, 材料为 304 不锈钢薄板, 长为 1 800 mm, 宽为 1 200 mm, 厚度为 1.0 mm, 其化学成分和力学性能如表 1、2 所示。

表 1 304 不锈钢化学成分 %

$\omega(\text{C})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Ni})$	$\omega(\text{Si})$	$\omega(\text{Mn})$	$\omega(\text{P})$	$\omega(\text{S})$
≤ 0.070	17.0~ 19.0	8.0~ 11.0	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.030

表 2 304 不锈钢力学性能

拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	维氏硬度
≥ 520	≥ 205	≥ 40	≤ 200

蜂窝状冷凝板是采用激光焊先在薄板四周进行密封环形焊接, 然后在薄板上按一定的分布规律焊接几百个蜂窝状圆环, 蜂窝状圆环直径为 10.0 mm, 再高压气体冲压胀形成蜂窝状冷凝板, 如图 1 所示。

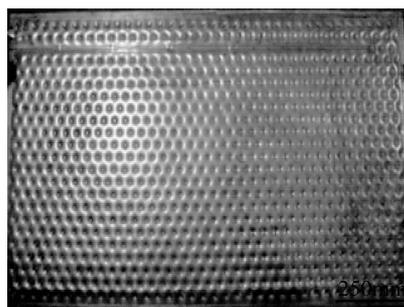


图 1 蜂窝状冷凝板实物图

采用德国 ROFIN-SINAR 公司生产的 CD030 CO₂ 激光器,输出功率选用 1.4、1.8 kW 为对比功率,波长为 10.6 μm,最小光斑直径 0.15 mm,离焦量为 -1.5 mm,模式为 TEM00,焊接速度为 2 m/min,保护气体为氩气。焊接件采用夹具夹紧,保证搭接焊面能紧密接触便于焊接。取金相试样研磨、抛光,用王水擦拭腐蚀,拍摄焊缝形貌照片。采用西格玛公司生产的测量残余应力的整套设备,应用小孔法测量蜂窝板中环焊缝的焊接残余应力(因蜂窝板环形焊缝分布密集,焊接残余应力在环焊缝处最大)。对两种工艺条件下接头另取多个拉伸试样,拉伸试样的大小尺寸相同。采用绵阳久远科技股份有限公司生产的微机万能材料试验机对焊缝进行拉伸试验。

2 试验结果与分析

激光焊接焊缝截面尺寸如图 2 所示,蜂窝状冷凝板激光焊接头宏观照片如图 3 所示。图 3(a)中当激光焊接功率为 1.4 kW 时焊缝熔深 H 为 2 mm,熔宽 B 约为 2 mm,束腰高 H_s 为 0.8 mm 左右,束腰宽 B_s 为 0.6 mm 左右。

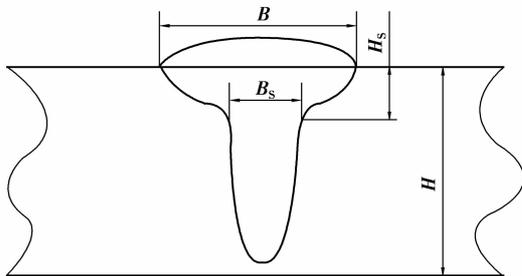
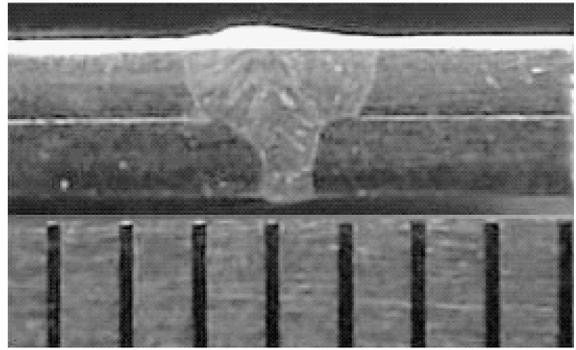


图 2 激光焊接焊缝截面尺寸示意图

而激光焊接功率为 1.8 kW 时如图 3(b)所示,焊缝熔深 H 为 2 mm,熔宽 B 约为 2.5 mm,束腰高 H_s 为 1.0 mm 左右,束腰宽 B_s 为 0.6 mm 左右。



(a) 激光焊接功率为 1.4 kW



(b) 激光焊接功率为 1.8 kW

图 3 接头试样宏观照片

对比两种工艺下所得的焊缝截面形状可以发现:随着激光焊接功率的增加,熔宽、束腰高增加。

2.1 焊缝尺寸对接头承载载荷的影响

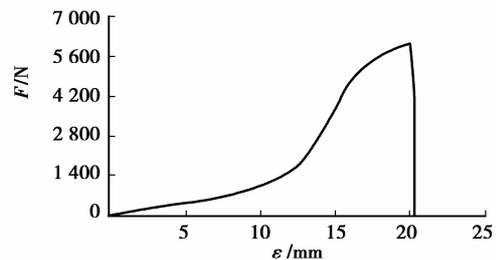
根据激光焊接焊缝截面尺寸示意图图 2,可以把激光焊接接头的焊缝截面面积看成是一个梯形面积与一个三角形面积之和,可以得出激光焊接焊缝截面

$$A_w = \frac{1}{2}(B + B_s) \times H_s + \frac{1}{2}(H - H_s) \times B_s, \quad (1)$$

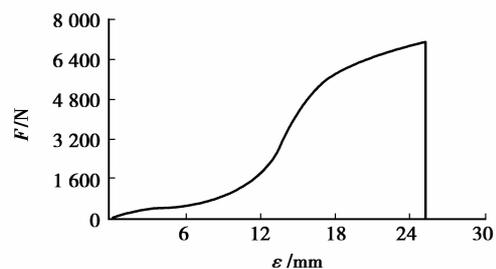
进而推导出

$$A_w = \frac{1}{2}(B \times H_s + H \times B_s). \quad (2)$$

对激光焊接接头进行拉伸试验,其断裂位置焊缝区,在拉伸过程中,裂纹首先从焊缝中心萌生与扩展。根据焊接接头拉伸试验承载载荷与应变曲线图(如图 4 所示)。



(a) 焊接功率为 1.4 kW



(b) 焊接功率为 1.8 kW

图 4 焊接接头拉伸试验

当焊接功率为 1.4 kW 时最大承载载荷 N_1 为 6 200 N; 而当焊接功率为 1.8 kW 时, 最大承载载荷 N_2 约为 72 000 N。两种功率下最大承载载荷 N_1 与 N_2 的比值为 0.82, 根据传统焊缝强度的计算公式^[18]

$$\sigma = \frac{N}{l_w t}, \quad (4)$$

式中: N 为焊缝承载载荷; l_w 为焊缝长度; t 为焊件的厚度; σ 为焊缝承载强度。因此要算出最大承载载荷可得

$$N_{\max} = \sigma_{cr} l_w t, \quad (5)$$

式中 σ_{cr} 为被焊工件材料的屈服强度。

由于在本试验中的研究对象为蜂窝状冷凝板的搭接接头, 而上述公式适合于一些传统的对接和 T 型接头, 因此需要对其公式进行修正。根据对本试验的研究对象蜂窝状冷凝板特定的拉伸强度研究目的, 发现蜂窝状冷凝板的拉伸强度和 T 型接头的轴向拉伸强度也相似, 但是蜂窝状冷凝板的焊道为圆环焊道, 因此把焊缝长度 l_w 改为圆环周长 C_w 。

在本文研究对象中, 所选拉伸试验样品的焊缝圆环周长 C_w 和焊件厚度 t 都是一样的, 而两种焊接功率下所得焊缝的最大承载载荷不同。所以, 认为焊缝最大承载载荷与焊缝截面积成一定的几何关系, 因此, 把焊缝最大承载载荷进行修正为

$$N_{\max} = \sigma_{cr} C_w t + \varphi(A_w), \quad (6)$$

式中: C_w 为焊缝圆环周长; $\varphi(A_w)$ 与焊缝承载面积 A_w 有关。当焊接功率增大时, 熔宽、束腰高增加, 焊缝的有效承载面积增加, 使得焊缝最大承载载荷增加。

2.2 焊缝尺寸对焊接残余应力与应变的影响

在焊接过程中, 局部高温加热和快速冷却使焊缝及靠近焊缝的母材区会产生热应变和压缩塑性应变, 进而产生焊接残余应力。当焊接残余应力和胀形时的冲力叠加起来大于临界失稳应力时, 最终导致胀形后构件产生纵向挠曲变形和角变形等。影响蜂窝状冷凝板焊接残余应力的因素有蜂窝状结构、中间圆环焊缝等。但因本研究发生焊接变形主要是由于焊接热输入或热输入密度分布较大, 导致焊缝及焊缝周围产生纵向收缩和纵向收缩残余应力, 而产生纵向挠曲变形和角变形等。笔者重点研究了因焊接功率不同使得热输入不同而导致纵向收缩和纵向收缩残余应力, 纵向挠曲变形与总的纵向收缩应力 P_L 有关^[19], 即

$$P_L = \sigma_L A_w, \quad (7)$$

式中: σ_L 为纵向收缩应力; A_w 为焊缝截面积。而纵向弯曲挠度 f 的计算公式为

$$f = \frac{P_L b l^2}{8EJ}, \quad (8)$$

式中: b 为纵向焊缝距试板重心距离; l 为焊接试板长度; E 为弹性模量; J 为焊接试板截面惯性矩。

当接头形式、焊板尺寸和材料一定时, σ_L 为常数, 纵向挠曲变形和挠度与总的纵向收缩应力相关, 与焊缝截面积成正比, 即焊缝截面积增大, 纵向挠曲变形也增大。当接头形式、焊板尺寸和材料一定时, 纵向焊缝距试板重心距离 b 、焊接试板长度 l 、弹性模量 E 和焊接试板截面惯性矩都相同, 仅因焊接功率不同而导致焊接截面积尺寸参数不同时, 可以得出纵向弯曲挠度比值为焊接截面积之比

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{P_{L1}}{P_{L2}} = \frac{A_{w1}}{A_{w2}}. \quad (9)$$

所以, 焊接功率为 1.4 kW 与 1.8 kW 的纵向弯曲挠度和纵向收缩应力比约为 0.753。

2.3 焊接残余应力的测量

常用焊接残余应力测试方法, 按原理可分为应力释放法和 X 射线法两种, 本试验采用小孔法测量焊接残余应力, 属于应力释放法。其原理是在应力场中钻一小孔, 应力平衡受到破坏, 在钻孔周围的应力将重新调整, 可测出小孔附近的应变, 根据弹性力学来推算出小孔附近的残余应力值 σ_1 、 σ_2 。

$$\sigma_1 = \frac{E}{4K_1}(\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ}) - \frac{E}{4K_2(\epsilon_{0^\circ})} \cdot \sqrt{\{(\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ})^2 + [2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ})]^2\}}, \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{4K_1}(\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ}) + \frac{E}{4K_2(\epsilon_{0^\circ})} \cdot \sqrt{\{(\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ})^2 + [2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ})]^2\}}, \quad (11)$$

$$\tan\theta = \frac{2\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ}}{\epsilon_{90^\circ} - \epsilon_{0^\circ}}, \quad (12)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为最大、最小主应力; ϵ_0 、 ϵ_{45} 、 ϵ_{90} 分别为该处在 0° 、 45° 、 90° 方向上的释放应变变量; K_1 、 K_2 为 TJ120-1.5- ϕ 1.5 应变花在普通钢材上的释放系数。

$$K_1 = -\frac{1+\mu}{2}\left(\frac{a}{r_m}\right)^2, \quad (13)$$

$$K_2 = -2\left(\frac{a}{r_m}\right)^2 - \frac{3}{2}(1+\mu)\left(\frac{a}{r_m}\right)^4, \quad (14)$$

式中: a 为钻孔半径; r_m 为应变计丝栅中心到孔中心距离; μ 为泊松比; $K_1 = -0.072 5 \pm 10\%$ (2 倍标准差), $K_2 = -0.151 40 \pm 6\%$ (2 倍标准差)。

本试验所采用的小孔法测量残余应力的设备有自带软件,通过分析应变片上的信息,直接输出残余应力的值,测得不同激光焊接功率下残余应力结果(如表 3 所示),其中:校准系数 K_1 为 $-0.072 55$, K_2 为 $-0.151 4$ 。

表 3 小孔法测残余应力数据

不同激光焊接功率 /kW	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	γ (°)
1.8	516.98	336.47	19.72
1.4	371.56	241.69	22.52

从表 3 可知,当焊接功率为 1.8 kW 时,焊接残余应力较大,主应力为 516.98 MPa,而在焊接功率为 1.4 kW 时,焊接残余应力要小得多,主应力为 371.56 MPa。

根据焊接功率在 1.4、1.8 kW 时的焊接残余主应力之比为

$$\frac{\sigma_{1.4 \text{ kW}}}{\sigma_{1.8 \text{ kW}}} = \frac{516.98}{371.56} = 0.718 7 = 1.000 : 1.391, \quad (15)$$

可知焊接功率在 1.4、1.8 kW 时的焊接残余主应力之比与纵向收缩应力比较接近,由于在焊缝焊接残余主应力是由纵向收缩应力和横向收缩应力等多种应力综合所得,而本试验中蜂窝状冷凝板主要发生的是纵向挠曲变形,因此,主应力中纵向收缩应力占大部分。

同时,由于蜂窝状冷凝板试样上焊缝较多,焊缝密度较大,焊接顺序如果设计不合理,将导致焊接残余应力较大。

而在 1.4 kW 下的主应力相对较小,使得在 1.4 kW 下的蜂窝状冷凝板在焊后的高压胀形过程中几乎不产生严重的变形。

但是,根据 2.1 节分析发现:焊接功率减小,焊缝有效承载面积减小,焊缝最大承载能力削弱。因此,不能一味降低焊接功率来减小焊接残余应力和焊接变形。

2.4 焊接变形的控制

在 1.8 kW 焊接功率时发现蜂窝状冷凝板产生了较为严重的焊接变形,如图 5 所示。

由于奥氏体不锈钢导热系数小、线膨胀系数大,在焊接过程中容易因热收缩而产生焊接变形。焊接

残余应力过大,在胀形过程中,当焊接残余应力与胀形冲击力叠加后超过板件自身的临界失稳应力 σ_c 时就容易发生焊接失稳变形^[20-22]。

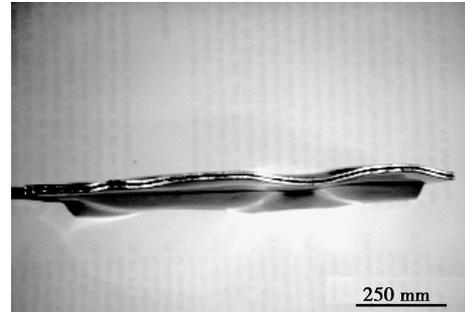


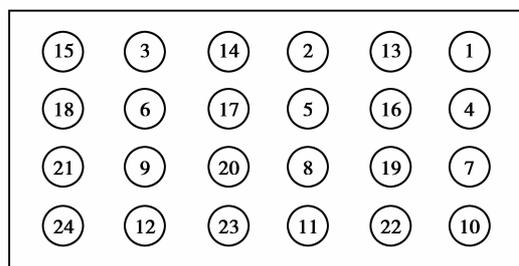
图 5 试样发生变形

由于在本研究对象因设计要求使得焊缝分布密集,焊接热输入大,导致在被焊接件上产生较大的焊接残余应力,在胀形的过程中发生失稳变形,降低了产品质量,影响工件美观,所以控制激光焊接蜂窝状冷凝板焊接变形显得十分必要。

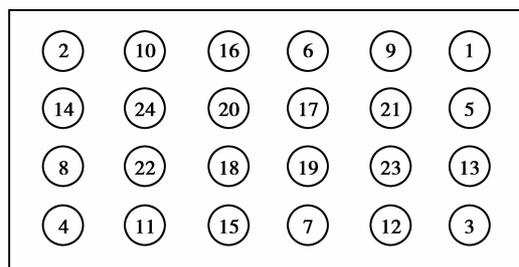
控制焊接变形的方式有很多,如控制焊接功率大小,减少热输入,反变形法、刚性固定法、选择合理的焊接顺序等^[23-25]。通过 2.1 节中分析发现焊接功率减小,焊缝有效承载面积减小,焊缝最大承载荷载减小,必须保证焊缝有足够的承载荷载,因此通过控制焊接功率大小来控制焊接变形是有限的。而由于焊接变形难于预测,使反变形法在本研究对象中难于实施。刚性固定法虽然能减少焊后焊接变形的发生,但是容易产生更大的焊接残余应力,使得在胀形过程中产生更大的焊接变形。而通过焊后热处理等发生来减小焊接残余应力不但会提高成本,且在热处理作用下可能使奥氏体不锈钢组织和性能发生改变而降低产品质量。因此适合于大功率条件下蜂窝状冷凝板激光焊接变形的控制方法就很少。

为此,笔者考虑从调整焊接顺序入手,对焊接顺序进行优化,来减小焊接残余应力,控制焊接变形。为了设计和优化出一个既对生产效率影响不大,又能有效减小焊接残余应力和焊接变形的焊接顺序,笔者充分利用激光焊接系统所配备的数控技术,通过查阅文献,经过多次试验得出采用如图 6(b)所示内外循环式比传统的交换跳跃式焊接顺序(如图 6(a)所示)产生的变形要小,这样既能有效减小焊接变形,使残余应力合理分布,且由于交换跳跃幅度较小,对生产效率的影响不大。试验证明如图 6(b)所示的内外循环式焊接顺序能使激光焊接功率

为 1.8 kW 的大功率条件下所得蜂窝状冷凝板在胀形过程后 85% 的产品不发生焊接变形。



(a)普通焊接顺序



(b)优化后的焊接顺序

图 6 焊接顺序

3 结 论

1) 焊接功率为 1.4 kW 时, 最大承载载荷为 6 200 N; 当焊接功率为 1.8 kW 时, 最大承载载荷约 72 000 N。分析发现焊缝最大承载载荷与焊缝截面积成一定的几何关系, 并把焊缝最大承载载荷公式修正为与焊缝截面积有关的几何函数。

2) 根据研究建立的焊缝截面积尺寸计算公式推导出, 焊接功率为 1.4、1.8 kW 时, 焊缝截面积分别为 1.40、1.86 mm², 根据计算两种激光焊接工艺条件下纵向弯曲挠度和纵向收缩应力比与焊缝截面积之比相同为 1.000 : 1.328。

3) 根据环形焊缝焊接残余应力测试结果表明: 焊接功率为 1.4、1.8 kW 时, 焊缝残余主应力分别为 371.56、516.98 MPa。两者比值为 1.000 : 1.391, 与计算所得纵向收缩应力比 1.000 : 1.328 比较相近, 说明本研究对象焊接残余应力主要由纵向收缩应力组成。

4) 针对本文研究对象蜂窝状冷凝板的焊接技术特点, 笔者提出了一个既对生产效率影响不大, 又能有效减小焊接残余应力和焊接变形的焊接顺序, 即采用内外循环式的焊接顺序。试验证明采用该焊接顺序后, 在 1.8 kW 的大功率条件下, 85% 的蜂窝状冷凝板产品胀形后不发生焊接变形。

参考文献:

- [1] 罗键. 铝合金蜂窝型蒸发板及其加工成型方法: 中国, 200910191024.9[P]. 2010-04-07.
- [2] CARBAJAL G, SOBHAN C B, PETERSON G P, et al. Thermal response of a flat heat pipe sandwich structure to a localized heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(21-22): 4070-4081.
- [3] OZAKI M. Air chiller unit for use in aircraft, has base plate constituting bottom surface of casing for storing refrigeration cycle unit formed of honeycomb panel consists of two panels sandwiching honeycomb core: USA, US2005115265-A1[P]. 2006-06-13.
- [4] KATAYAMA S, KAWAHITO Y. Laser direct joining of metal and plastic [J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(12): 1247-1250.
- [5] 符跃春, 杨智成, 王国华, 等. Al₃Ti 和 TiC/Al₃Ti 激光熔覆涂层的高温氧化和浸泡腐蚀性能[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(7): 63-67.
FU YUE-CHUN, YANG ZHI-CHENG, WANG GUO-HUA, et al. High-temperature oxidation and immersion corrosion properties of Al₃Ti and TiC/Al₃Ti laser cladding coatings[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(7): 63-67.
- [6] SAMANTA S K, MITRA S K, PAL T K. Microstructure and oxidation characteristics of laser and GTAW weldments in austenitic stainless steels [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 908-914.
- [7] HUANG R S, KANG L, MA X. Microstructure and phase composition of a low-power YAG laser-MAG welded stainless steel joint [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 928-935.
- [8] 王维朗, 潘复生, 陈延君, 等. 不锈钢材料砂带磨削试验[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(10): 91-95.
WANG WEI-LANG, PAN FU-SHENG, CHEN YAN-JUN, et al. Investigation on abrasive belt grinding of stainless steel [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 29(10): 91-95.
- [9] CELEN S, KARADENIZ S, OZDEN H. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2008, 39(11): 845-850.
- [10] PENG W W, LING X. Prevention of stress corrosion cracking in welded joint of type 304 stainless steel by laser peening [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 353/358: 1704-1707.
- [11] 李远睿, 王书珍, 史兴华, 等. 81031 钢的合金化原理及

- 热处理工艺试验[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007,30(6): 65-68.
- LI YUAN-RUI, WANG SHU-ZHEN, SHI XING-HU, et al. Investigation into the alloying principle and heat treatment method test of 81031 steel[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(6): 65-68.
- [12] AKBARI MOUSAVI S A A, SUFIZADEH A R. Metallurgical investigations of pulsed Nd: yag laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels [J]. Materials and Design, 2009, 30(8): 3150-3157.
- [13] OKAMOTO Y, GILLNER A, OLOWINSKY A, et al. Fine micro-welding of thin stainless steel sheet by high speed laser scanning [J]. Journal of Laser Micro Nano Engineering, 2008, 3(2): 95-99.
- [14] 温鹏, 张旭东, 陈武柱, 等. 薄板激光焊时失稳变形及其控制[J]. 焊接学报. 2006, 27(9): 99-102.
- WEN PENG, ZHANG XU-DONG, CHEN WU-ZHU, et al. Buckling distortion of laser welded thin plates and its control by dynamic cooling [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(9): 99-102.
- [15] HSIEH H S, LIN J M. Thermal-mechanical analysis on the transient deformation during pulsed laser forming[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(2/3): 191-199.
- [16] TURSKI M, CLITHEROE S, EVANS A D, et al. Engineering the residual stress state and microstructure of stainless steel with mechanical surface treatments[J]. Applied Physics A-Materials Science & Processing, 2010, 99(S3): 549-556.
- [17] SUAREZ A, AMADO J M, TOBAR M J, et al. Study of residual stresses generated inside laser clad plates using FEM and diffraction of synchrotron radiation[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204 (12/13): 1983-1988.
- [18] 卢铁鹰, 魏明钟. 各类焊缝连接的强度计算[J]. 钢结构, 1991(4): 10-16.
- LU TIE-YING, WEN MING-ZHONG. The connects strength calculation of each kind of joint [J]. Steel Construction, 1991(4): 10-16.
- [19] 王长生, 薛小怀, 楼松年, 等. 薄板焊接变形的影响因素及控制[J]. 焊接技术. 2005, 34(4): 66-68.
- WANG CHANG-SHENG, XIE XIAO-HUAI, LOU SONG-NIAN, et al. The influence factors and control of thin steel plate welding deformation [J]. Welding Technology, 2005, 34(4): 66-68.
- [20] MICHALERIS P, DEBICCARI A. Prediction of welding distortion [J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 172-181.
- [21] YILBAS B S, TAHAAL Z Y, HASHMI M S. Effect of WC on the residual stress in the laser treated HVOF coating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(7): 3172-3181.
- [22] ZHOU J Z, HUANG S, JI X, et al. Theoretical study on the bending deformation of metal plate induced by repetitive laser shot peening [J]. Key Engineering Materials, 2008, 375/376: 57-61.
- [23] NIKITIN I, BESEL M. Residual stress relaxation of deep-rolled austenitic steel [J]. Scripta Materialia, 2008, 58(3): 239-242.
- [24] HACINI L, VANLE N, BOCHER P. Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/3): 542-548.
- [25] OLABI A G, CASALINO G, BENYOUNIS K Y, et al. Minimisation of the residual stress in the heat affected zone by means of numerical methods [J]. Materials & Design, 2007, 28(8): 2295-2302.

(编辑 张 苹)