

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0298-04

# 激光深熔焊小孔型气孔的产生及其防治

张晓红, 陈武柱, 单际国, 张旭东

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

**摘要** 小孔型气孔的产生是未穿透激光深熔焊的一个严重问题, 它是由剧烈的小孔扰动所导致的, 与传统冶金型气孔( $H_2$  或  $CO$  气孔等)的产生机制不同, 采用传统冶金型气孔抑制措施无法有效消除该类气孔的产生。针对 3~5 mm 薄板的  $CO_2$  激光深熔焊接, 研究了脉冲调制对气孔的抑制效果及其机制。实验发现, 脉冲频率低于 50 Hz 时, 焊缝气孔随着频率的增加不断减少; 当脉冲频率处于 50~150 Hz 的范围内, 基本上可以消除小孔型气孔的产生。通过检测激光焊接过程中等离子体光辐射信号的波动可以反映小孔的稳定性, 结果证明, 合适频率下的脉冲调制激光焊接, 由于有稳定小孔的作用, 从而抑制了小孔型气孔的产生。

**关键词** 激光技术; 激光深熔焊; 小孔型气孔; 脉冲调制; 等离子体

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## Formation and Prevention of Keyhole-Induced Porosity in Deep Penetration Laser Welding

ZHANG Xiao-hong, CHEN Wu-zhu, SHAN Ji-guo, ZHANG Xu-dong

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Keyhole-induced Porosity formation is a severe problem in partial penetration laser welding. Different from the mechanism of traditionally metallurgical pores (e. g.  $H_2$ ,  $CO$  pores), the porosity is mainly caused by instability of capillary keyhole and traditional methods employed to prevent metallurgical pores are ineffective in suppressing keyhole-induced porosity. for partial penetration laser welding of 3~5 mm sheet plates the method and mechanism of porosity prevention by pulse modulation was investigated. The experimental results reveal that pulse modulated laser welding can effectively suppress keyhole-induced porosity formation. The variation of porosity ratio as pulse frequency has regularity, that is, the porosity ratio decreases with increasing pulse frequency under 50 Hz, and remains in low level when pulse frequency lies in a wide range of 50~150 Hz. In addition, the optical signal of plasma was detected in pulse modulated laser welding to explain the mechanism of porosity prevention. The results reveal that the porosity ratio varies well with the standard deviation value of plasma signal, which indicates that the mechanism of porosity suppression lies on the fact that the pulse modulated laser welding under adequate frequency can make keyhole stable.

**Key words** laser technique; deep penetration laser welding; keyhole-induced porosity; pulse modulation; plasma

## 1 引言

气孔的产生是未穿透激光深熔焊的一个严重问题, 已经引起了国内外学者的普遍关注和研究。激光深熔焊气孔与传统冶金型气孔存在本质的不同。传统冶金型气孔是由于熔池液态金属在凝固过程中气体溶解度突然下降或者熔池冶金反应产生的不溶气体所致, 气体成分主要是  $H_2$ ,  $N_2$  和  $CO$  等<sup>[1]</sup>。而

激光深熔焊气孔的产生与小孔的特有性质有关。国外有关学者<sup>[2~5]</sup>采用 X 射线透视成像设备, 在线观察到了激光深熔焊接时小孔的动态行为, 揭示出激光深熔焊气孔是由剧烈的小孔扰动将保护气体卷入熔池所导致的, 气体的主要成分是惰性保护气体, 如 Ar 或 He 气。

由于激光深熔焊气孔是由小孔不稳定所导致的,

**作者简介:** 张晓红(1983—), 女, 江西丰城人, 主要从事激光加工技术研究。E-mail: zhangxiaohong04@mails.tsinghua.edu.cn

**导师简介:** 陈武柱(1939—), 男, 广西人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工及其过程检测与控制方面的研究。

E-mail: cwz-dme@mail.tsinghua.edu.cn

称之为小孔型气孔。该类气孔采用传统冶金型气孔的抑制办法都无法有效地减小焊缝气孔倾向<sup>[6]</sup>。脉冲调制激光可通过抑制小孔的扰动行为<sup>[7]</sup>，从根本上防止焊缝气孔的产生。目前主要研究了深厚钢板(如 20 mm)特大功率(如 20 kW)激光深熔焊小孔型气孔倾向及抑制方法，证明只有在特定频率下的脉冲调制激光焊接才能起到减少气孔的作用<sup>[8,9]</sup>。但对于 5 mm 以下薄板激光深熔焊气孔问题却鲜有报道，该条件下气孔的防治措施研究较少。

工程实际证明，薄板激光深熔焊在未穿透焊接的情况下同样存在严重的小孔型气孔倾向，尤其在航空航天领域，对焊缝气孔要求甚为严格。本文针对这一问题，研究了脉冲调制激光焊接 3~5 mm 薄板对焊缝气孔的影响规律。

## 2 实验方法

实验采用美国 PRC 公司生产的 3000 W 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器，激光光束模式为 TEM<sub>00+01</sub>，聚焦元件为焦距 127 mm 的 ZnSe 透镜。由于现有激光器无法得到连续的脉冲频率，利用机械调制斩波机构，通过调节电机转速，使斩波叶片在电机带动下按预定频率阻挡激光光束，从而获得频率能够连续变化的脉冲激光。脉冲调制激光焊接装置如图 1 所示。

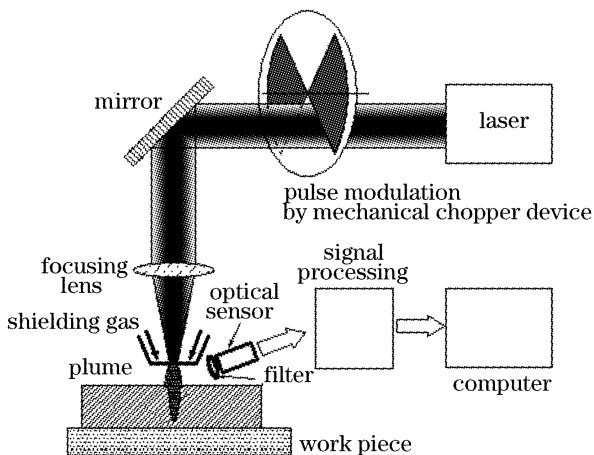


图 1 脉冲调制激光焊接装置示意图

Fig. 1 Set up of pulse modulated laser welding

焊接时轴向、环向通以 Ar 保护气体，气流量分别为 400 L/h, 1000 L/h, 激光光束聚焦于工件表面。实验材料有 3 mm 和 4.5 mm 低碳钢以及 5 mm 不锈钢。

为检测焊接过程中工件上等离子体光辐射信号，选用了蓝紫光敏感的硅光电池作为传感器，其光谱响应范围为 350~830 nm，峰值波长为 (550 ± 20) nm。在硅光电池前端安装中心波长为 441.6

nm 的窄带干涉滤光片排除杂光干扰，以提高信噪比。信号经前置处理后，通过 A/D 转换采集到计算机进行数据分析和处理，采样频率为 100 kHz。

焊后用 X 射线对焊缝进行无损探伤，为对各个试件焊缝气孔缺陷进行定量评估，定义焊缝气孔率  $p_r$  为气孔直径总和  $L_p$  与焊缝长度  $L_w$  的百分比，即

$$p_r = \frac{L_p}{L_w} \times 100\%.$$

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 激光深熔焊小孔型气孔的产生

在激光功率 1200 W, 焊接速度 7 mm/s 的焊接条件下，连续激光焊接 3 mm 不锈钢，焊缝中有大量的气孔产生，如图 2 所示。可以清楚地看到，焊缝中气孔分布密集，且有少量直径约 1 mm 的大气孔产生；从焊缝纵断面来看，气孔绝大部分位于焊缝底部。

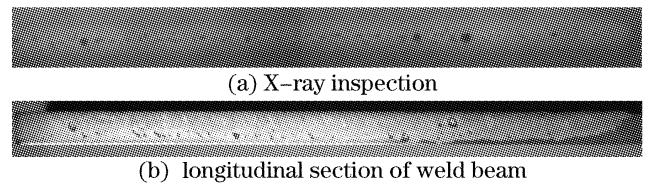


图 2 连续激光焊接气孔倾向

Fig. 2 Porosity formation in continuous laser welding

图 3 为激光深熔焊小孔型气孔与传统熔焊氢气孔光学显微镜形貌照片，对比图 3(a) 和图 3(b) 可以看到，激光深熔焊气孔形状极不规则，与传统熔焊气孔的规则圆形明显不同。

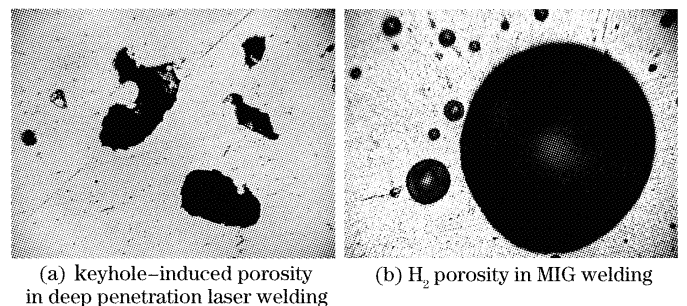


图 3 焊缝气孔的光学显微镜照片 (×200)

Fig. 3 Pictures of porosity morphology

从气孔的形貌及分布特征可以看到，激光深熔焊气孔与传统熔焊气孔存在根本的不同。现有研究结果亦表明，激光焊接过程中，小孔处于一种不稳定的振动状态，其深度和形状不断改变，气泡间歇地从小孔底部产生。由于激光焊接冷却速度极快，气泡在上浮过程被凝固金属前沿俘获从而形成气孔<sup>[2]</sup>。

### 3.2 脉冲调制激光焊接对小孔型气孔的抑制

激光深熔焊小孔型气孔主要是由小孔扰动所

致,改变小孔行为,使小孔趋于稳定是抑制小孔型气孔倾向的根本所在。

固定激光功率 1200 W,分别对 3 mm,4.5 mm 厚低碳钢和 5 mm 厚不锈钢进行脉冲调制激光焊接,研究不同板厚和材料焊接时气孔率随频率的变化规律,如图 4(a)所示。针对 4.5 mm 厚低碳钢,研究不同激光功率(1200 W,1800 W 和 2400 W)焊接气孔率随频率的变化规律,如图 4(b)所示。

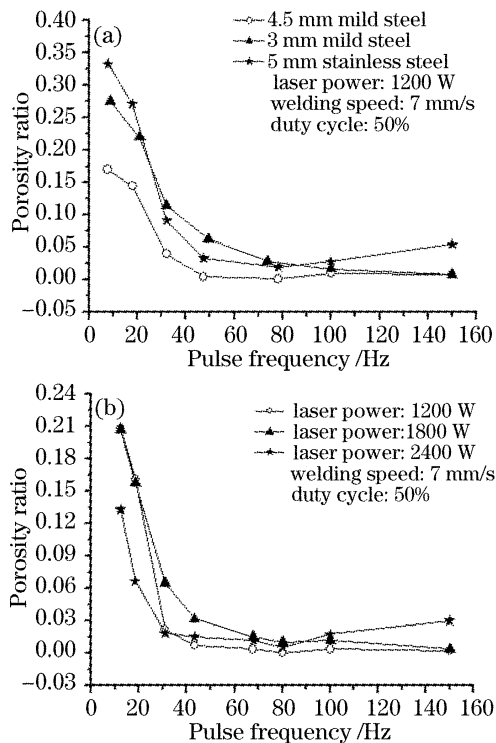


图 4 脉冲频率对焊缝气孔率的影响。(a)不同材料的气孔率,(b)不同激光功率焊接的气孔率

Fig.4 Influence of pulse frequency on porosity ratio.

(a) Porosity ratio in different materials, (b) porosity ration in different laser power

从图 4 中可以明显地看到,在不同板厚、不同材料以及不同的激光功率条件下,焊缝气孔率随脉冲频率的变化规律是一致的。当脉冲频率低于 50 Hz 时,随着频率的增加,焊缝气孔率不断减小,当脉冲频率大于 50 Hz 时,在 50~150 Hz 相当宽的脉冲频率范围内,气孔率稳定地保持在一较低水平,且明显低于连续激光焊接气孔率。由此可以看出,焊缝气孔率随脉冲频率的变化规律具有一定的普遍性。较优频率下的脉冲调制激光焊接可以非常有效地抑制焊缝气孔倾向。

图 5 是脉冲频率 92 Hz,激光功率 1200 W,焊接速度 7 mm/s,占空比 50%的条件下,脉冲激光焊接 3 mm 不锈钢的焊缝纵断面与 X 射线透视照片。与连续激光焊接(如图 2 所示)相比,可以看到脉冲

调制激光焊接有效地抑制了气孔的产生。

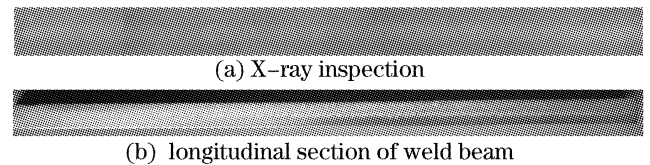


图 5 脉冲调制激光焊接对气孔的抑制效果

Fig.5 Porosity suppression by pulse modulation

### 3.3 小孔型气孔与小孔稳定性关系的实验与分析

激光焊接等离子体是激光深熔焊接的特有信号之一,它是在深熔小孔形成的同时,熔融金属的气化电离而产生的,可以反映小孔的稳定状态。通过检测激光焊接等离子体信号,研究小孔型气孔与小孔稳定性的关系,从而揭示脉冲调制激光焊接对小孔型气孔抑制作用的机制。

图 6 所示的是脉冲频率分别为 12 Hz,80 Hz 时等离子体光辐射时域信号。由图可见,高频率调制激光脉冲期间等离子体光辐射信号的波动比低频率时小得多。为了定量衡量等离子体的波动情况,将其进行标准方差处理

$$s = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x'(n) - \bar{x}']^2 \right\}^{1/2},$$

该方差  $s$  即表征某脉冲频率下等离子体的波动值。

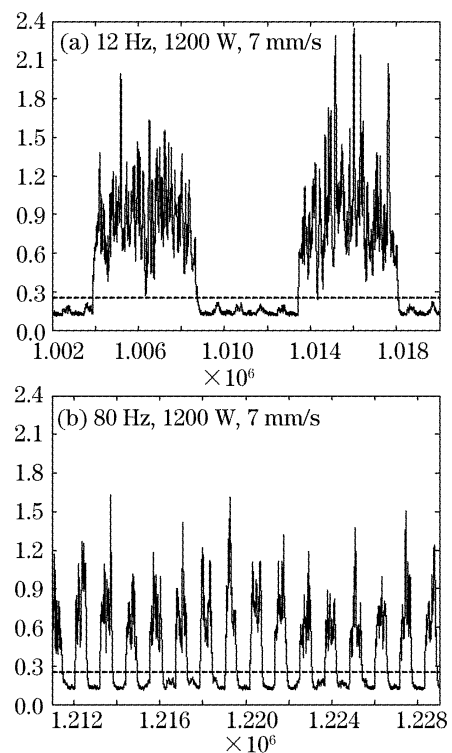


图 6 等离子体光信号时域图

Fig.6 Plasma signal in time domain

图 7 所示的是激光功率 1200 W,焊接速度 7 mm/s,占空比 50%,不同脉冲频率下焊缝气孔率与等离子体光信号方差的对比。由图可以看出,等

离子体光信号波动与焊缝气孔率随脉冲频率的变化有很好的对应关系。当脉冲频率低于 50 Hz 时, 等离子体的波动大小随着频率的增加不断减小, 同时, 焊缝气孔率也持续下降; 当脉冲频率高于 50 Hz 时, 等离子体波动稳定在较低水平, 此时焊缝气孔率也达到最低。

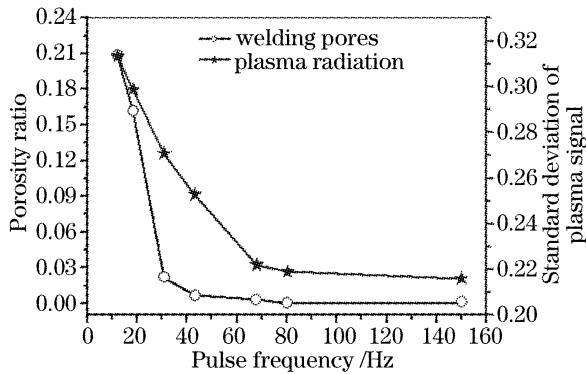


图 7 等离子体波动与焊缝气孔率随脉冲频率的变化

Fig. 7 Influence of pulse frequency on plasma fluctuation and porosity ratio

等离子体波动减小, 表明小孔扰动程度降低, 小孔型气孔倾向减小。合适的脉冲频率下, 脉冲调制激光焊接正是由于改变了小孔的扰动行为, 使小孔趋于稳定, 从而有效地抑制了小孔型气孔的产生。

## 4 结 论

较优频率下脉冲调制激光焊接可以有效地抑制小孔型气孔的产生。实验研究发现, 对不同条件下的薄板激光焊接, 焊缝气孔倾向随脉冲频率的变化呈现出一个普遍性的规律, 即当脉冲频率低于 50 Hz 时, 焊缝气孔随着频率的增加不断减少, 当脉

冲频率处于 50~150 Hz 相当宽的范围时, 基本上可以消除气孔的产生。等离子体波动与焊缝气孔率随脉冲频率的变化规律一致。等离子体波动越小, 说明小孔扰动程度越低, 焊缝气孔倾向越小。由此表明, 合适频率的脉冲调制使小孔趋于稳定, 从而有效地抑制了小孔型气孔的产生。

## 参 考 文 献

- 1 Welding Education and Research Group in Tianjin University. Principle and Technology of Metal Fusion Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1980
- 2 天津大学焊接教研室. 金属熔焊原理及工艺(上册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980
- 3 Akira Matsunawa, Naoki Seto, Jong-Do Kim *et al.*. Observation of keyhole and molten pool behavior in high power laser welding [J]. *Trans. JWRI*, 2001, **30**(1): 13~27
- 4 Seiji Katayama, Naoki Seto, Masami Mizutani *et al.*. Formation mechanism of porosity in high power YAG laser welding [C]. *ICALEO*, '2000.
- 5 Akira Matsunawa, Naoki Seto, Jong-Do kim *et al.*. Dynamics of keyhole and molten pool in high power CO<sub>2</sub> laser welding [C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 34~45
- 6 Akira Matsunawa, Seiji Katayama. Understanding physical mechanisms in laser welding for construction of mathematical model [J]. *Welding in the World*, 2002, **46**(24~25): 27~38
- 7 Zhang Xudong, Chen Wuzhu, Ashida Eiji *et al.*. Nd:YAG laser welding of 12 mm low-carbon steel plate with CO<sub>2</sub> shielding gas [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2002, **23**(6): 51~54
- 8 张旭东, 陈武柱, 芦田荣次等. CO<sub>2</sub> 气体保护的激光焊接 12 mm 厚低碳钢板 [J]. *焊接学报*, 2002, **23**(6): 51~54
- 9 W. W. Duley. Laser Welding [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999. 90~94
- 10 Susumu Tsukamoto, Goro Arakane, Hiroshi Honda *et al.*. Formation mechanism and prevention of weld defects in full penetration laser welding of thick steel plates [C]. *ICALEO '2004*
- 11 Susumu Tsukamoto, Isao Kawaguchi, Goro Arakane *et al.*. Suppression of porosity using pulse modulation of laser power in 20 kW CO<sub>2</sub> laser welding [C]. *ICALEO '2001*