

文章编号: 1001-3806(2007)04-0419-04

脉冲 CO₂ 激光焊接 30CrMnSiA 气孔控制及机理分析

张晓红¹, 张旭东¹, 陈武柱^{1*}, 雷华东²

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究激光深熔焊气孔的产生规律及抑制气孔的措施, 采用脉冲 CO₂ 激光焊接的方法, 得到了未焊透时焊缝气孔率和脉冲参数的关系。结果表明, 在脉冲频率低于 50Hz 时, 焊缝气孔随着脉冲频率的增加显著减少, 当频率在 50Hz~200Hz 范围时, 可以稳定地抑制焊缝气孔的产生。适当提高占空比有利于减少气孔数量。

关键词: 激光技术; 激光焊接; 气孔; 脉冲; 频率; 小孔不稳定性

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A

Prevention and mechanical analysis of porosity formation in pulsed CO₂ laser welding of 30CrMnSiA

ZHANG Xiaohong¹, ZHANG Xudong¹, CHEN Wuzhu^{1*}, LEI Hua-dong²

(1. Department of Mechanical Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics Mianyang 621900, China)

Abstract Porosity formation in high power laser welding which is related to the characteristics of high power laser welding is an important problem of welding quality. The pulsed CO₂ laser welding was employed to prevent porosity in partial penetration. The experimental results reveal that the porosity ratio decrease with increasing pulse frequency when the pulse frequency is below 50Hz and is nearly kept constant in the range of 50Hz~200Hz. Moderate increase of the duty ratio is benefit to the reduction of porosity.

Key words laser technique; laser welding; porosity; pulse frequency; instability of capillary keyhole

引 言

30CrMnSiA 作为一种中碳调质钢, 具有优良的综合性能, 常用于火箭发动机壳体及飞机起落架等重要构件^[1]。然而由于这种材料碳含量与合金元素较多, 淬硬倾向大, 在调制状态下焊接容易出现焊接裂纹和热影响区软化等问题。采用高能量密度的激光焊接方法有利于缩小热影响区宽度, 获得细晶组织焊缝, 不会出现常见的焊接裂纹和明显的热影响区性能变化^[2]。

然而焊缝气孔缺陷却是激光深熔焊接的一个极为棘手的问题。激光焊接气孔的产生与激光深熔焊接的特有性质有关。日本学者 MATSUNAWA 和 TSUKAMOTO^[3,4]等采用特制的 X 射线透视成像, 在线观察到了激光深熔焊接时小孔和熔池的动态行为, 揭示出激光焊接气孔是由剧烈的小孔扰动将保护气体卷入熔池所导致的, 同时, 气孔内气体成分分析表明, 气孔内

90% 以上是惰性保护气体^[5]。脉冲调制是解决激光焊接气孔问题的主要方法之一。现有的研究认为, 在一定的焊接热输入条件下, 只有在一个非常窄的较低频率 (如 15Hz~20Hz) 范围内, 脉冲激光焊接才能有效地抑制焊缝气孔的产生^[6,7]。但最佳脉冲频率随材料、熔深状况和焊接条件等变化较大, 不同学者所得出的最佳频率相差较大。

笔者研究了脉冲 CO₂ 激光焊接对焊缝气孔的控制规律, 并从理论上分析了脉冲焊接抑制焊缝气孔的机理所在。研究结果表明, 在一定的焊接热输入下 (激光峰值功率 P 和焊接速度 v 不变), 焊缝气孔随着脉冲频率的升高显著减少, 在一个较宽的频率范围内均能稳定地抑制焊缝气孔的产生; 然而, 若脉冲频率太高, 焊缝表面成形质量下降。采用较大的占空比有利于提高气孔的抑制效果。

1 实验条件和方法

实验中使用 Rofin-Sinar 公司生产的 2000SM 型快速轴流 CO₂ 激光器, 激光额定功率 2kW, 光束模式为 TEM₀₁ 模, 脉冲频率 0Hz~1kHz, 光束聚焦采用抛物面

作者简介: 张晓红 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为激光加工技术。

* 通讯联系人。E-mail: owzdne@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-06-02; 收到修改稿日期: 2006-08-29

铜镜反射聚焦系统, 焦距为 175mm。采用 45°侧吹紫铜喷嘴焊接保护气体系统, 保护气体为 He 气, 气流大小为 551.2kPa。

实验采用的焊接试件结构如图 1a 所示。焊接时

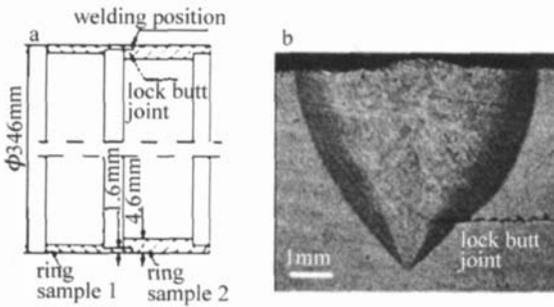


Fig 1 Schematic structure of specimen and photo of cross section of weld ($f=80\text{Hz}$, $P=1.3\text{KW}$; $v=0.4\text{m/min}$, $R=50\%$)

将试环 1 与试环 2 组装对接, 形成带有止口的对接焊缝, 焊后要求熔深必须不小于 1.5mm。典型的焊缝形貌横断面如图 1b 所示, 焊接规范为脉冲频率 $f=30\text{Hz}$, 激光功率 $P=1.3\text{KW}$, 焊接速度 $v=0.4\text{m/min}$, 占空比 $R=50\%$ 。可以看出, 尽管接头形式为对接, 且对接部分均以焊透, 但由于止口的存在, 激光焊接小孔实际是未贯穿的。根据目前的研究结果, 激光焊接小孔是否贯穿对焊缝气孔有极大影响, 小孔贯穿可以大大减少焊缝气孔率^[8]。因此, 为了在小孔未贯穿条件下减少焊缝气孔, 作者进行了脉冲激光焊实验。

焊接试件材料为调质处理后的 30CrMnSiA, 成分如表 1 所示。另外, 试环 1 与试环 2 表面分别进行了发黑与镀锌处理。

Table 1 Chemical composition of steel 30CrMnSiA %

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
0.28~0.35	0.8~1.1	0.9~1.2	0.8~1.1	≤0.3	≤0.03	≤0.03

焊后采用 XXQ-2505 型射线机对对接焊缝进行 X 射线无损探伤, 观察焊缝中的气孔及其分布情况。为对各个试件焊后 X 射线探伤气孔缺陷进行定量评估, 特定义气孔率 p_r 为气孔面积 A_p 与焊缝上表面面积 A_w

$$\text{的百分比, 即: } p_r = \frac{A_p}{A_w} \times 100\%。$$

2 实验结果与分析

2.1 脉冲频率对焊缝气孔的影响

图 2 所示为脉冲频率对焊缝气孔率的影响曲线。其中 0Hz 是激光功率 1.6kW、焊接速度 1.2m/min 的连续 CO₂ 激光焊接。脉冲 CO₂ 激光焊接规范为激光峰值功率 1.3kW, 焊接速度 0.4m/min, 占空比 50%。此时, 连续焊接与脉冲焊接都能满足熔深大于或等于止口厚度, 如图 3 所示焊缝熔深照片。与连续激光焊

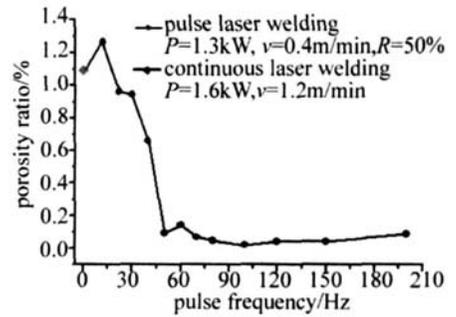


Fig 2 Influence of pulse frequency on porosity ratio

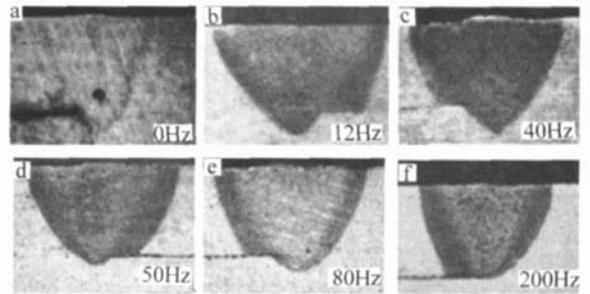


Fig 3 The photos of weld depth

接相比, 较高频率下的脉冲焊接可以显著减小焊缝气孔率。在脉冲频率低于 50Hz 时, 随着脉冲频率的增加, 焊缝气孔倾向大大减小; 当频率在 50Hz~200Hz 较宽的范围内, 焊缝气孔率都处于较低的水平。这说明, 在一个较宽的脉冲频率范围内, 脉冲激光焊接都可以稳定地抑制气孔的产生。

图 4 是连续 CO₂ 激光焊接与频率分别为 12Hz 和 80Hz 时脉冲 CO₂ 激光焊接的 X 射线透视照片, 可以

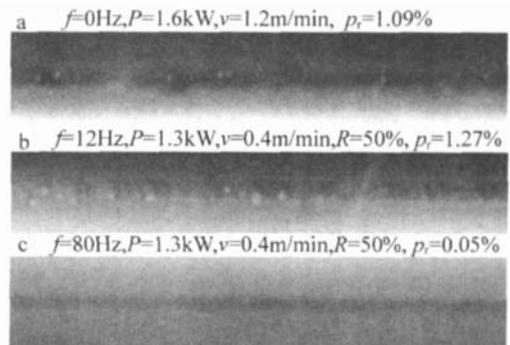


Fig 4 X-ray transmission images of weld bead

看到, 若脉冲频率选择不当 (太低), 脉冲焊接气孔倾向比连续焊接更为严重。脉冲频率 12Hz 时, 焊缝气孔数量多, 并间歇地分布有聚集性气孔; 当脉冲频率为 80Hz 时, 基本上可以完全消除焊缝气孔的产生。

以上实验结果表明, 相同的激光功率和焊接速度下, 选用高于 50Hz 的脉冲频率可以稳定地消除焊缝气孔的产生, 同时满足熔深要求。值得一提的是, 脉冲频率不宜太高, 否则焊缝表面成形质量下降。如图 5 所示, 当频率 50Hz 时, 焊缝呈非常致密的鳞片状, 成形质量好。而当脉冲频率上升至 200Hz, 表面连续地分

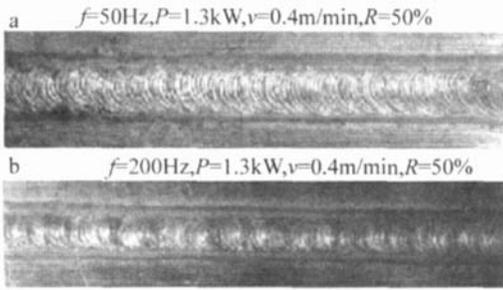


Fig 5 Influence of pulse frequency on appearance of weld

布有许多高低起伏的小鼓包和小凹坑, 表面成形较差。

2.2 占空比对焊缝气孔的影响

图 6 所示为脉冲频率 30Hz, 焊接速度 0.4m/min 的条件下, 占空比对焊缝气孔率的影响。实验中为保证焊接线能量和焊缝熔深不发生明显波动, 改变占空比的同时, 激光峰值功率也随之变化。由图 6 可见, 30% 占空比 (峰值功率 2kW) 的焊缝气孔倾向远远大

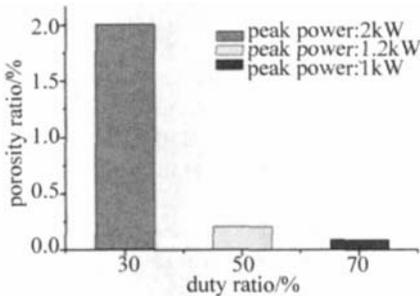


Fig 6 Influence of duty ratio on porosity

于 50% (峰值功率 1.2kW) 与 70% (峰值功率 1kW) 占空比的焊缝气孔; 占空比为 70% 时, 焊缝气孔数量最少, 气孔率仅为 0.09%。

图 7 为不同占空比下焊缝纵向 X 射线透视照片。

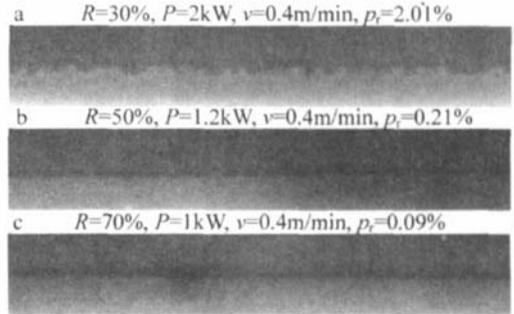


Fig 7 Influence of duty ratio on porosity

从中明显看到, 采用 30% 的占空比, 气孔缺陷非常严重, 焊缝气孔大且分布密集; 当占空比为 50% 或 70% 时, 气孔倾向显著减小, 获得优质焊缝。

2.3 脉冲 CO₂ 激光焊接控制焊缝气孔的机理分析

从上述实验结果可以看出, 当频率高于某一个阈值时 (如 50Hz), 脉冲 CO₂ 激光焊接可以稳定地控制焊缝气孔的产生, 同时选用合适的占空比, 有利于提高焊缝气孔抑制效果。然而当频率过高时 (如 200Hz), 焊缝表面成形质量下降。

图 8 所示的是一个脉冲周期内小孔的动态行为及气孔的产生过程, 从中可以较好地解释脉冲焊接有效

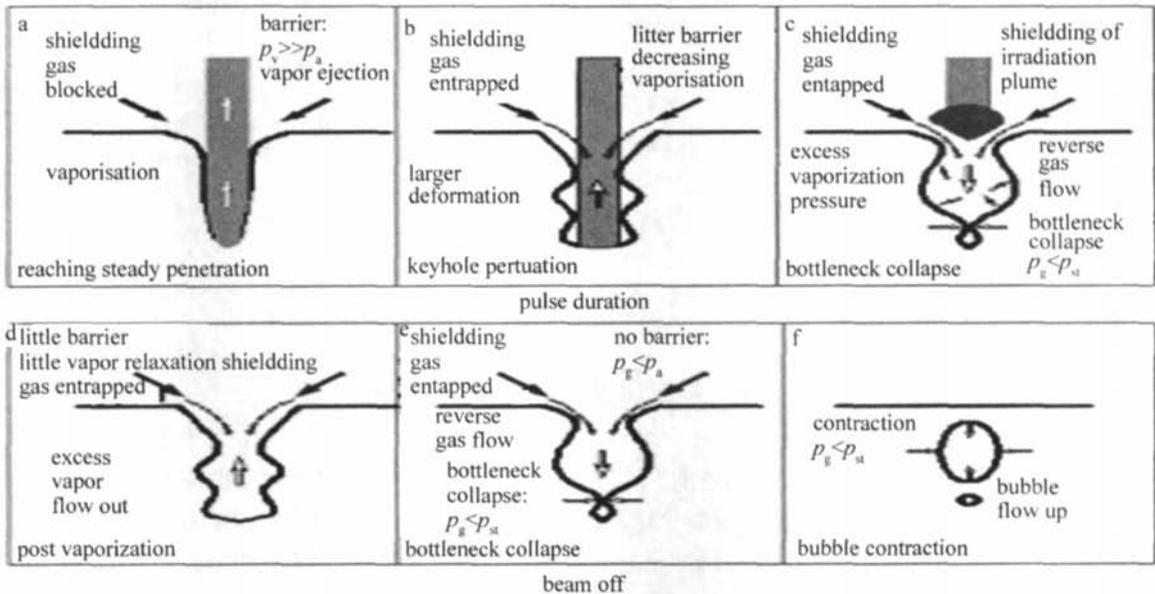


Fig 8 Porosity fomation process during pulse laser weling

控制焊缝气孔倾向及频率太高成形质量下降的原因。当激光功率密度超过金属汽化的阈值时, 高能激光作用于工件表面形成深熔小孔, 并伴随着剧烈的金属喷发, 金属气化产生的蒸气压 p_v 远大于外界大气压 p_a , 形成一个阻碍保护气体进入小孔的氛围, 见图 8a。若

此时断开激光的作用, 可以形成完全消除气孔的产生; 当小孔深度达到最大极限时, 由于孔壁对激光的菲涅耳吸收, 小孔吸收的过多的激光能量在底部优先产生径向膨胀, 小孔收缩变形扰动产生。同时孔壁与入射激光分离, 金属蒸气向外喷发的蒸气压减小, 可能导致

保护气体进入小孔, 见图 8b。若脉冲作用时间较长, 由于等离子体对激光的屏蔽, 小孔内部气体压力骤减, 形成逆向气流, 保护气体进入小孔。在小孔的瓶颈处, 若表面张力产生的压力 p_{st} 大于小孔内部气体压力 p_g , 在该处导致小孔坍塌, 形成气泡, 见图 8c。关闭激光后, 小孔内部残余的金属喷发维持小孔张开, 见图 8d。若激光断开时间太长 (如低频), 小孔内部气压迅速下降, 若小于表面张力产生的附加压力, 在瓶颈处产生坍塌形成气泡, 见图 8e。气泡内部的部分金属蒸气冷凝重结晶, 气泡收缩。由于激光焊接冷却速度极快, 气泡上浮过程中被凝固金属俘获产生气孔, 见图 8f。

不同脉冲频率下, 小孔的历态行为不同。连续激光焊接过程见图 8a 图 8b 图 8c。脉冲频率很低时 (如 1Hz), 激光峰值作用时间长, 气孔产生过程见图 8a 图 8b 图 8c 图 8e 图 8f。因此, 过低频率的脉冲激光焊接气孔倾向比连续激光焊接更为严重。随着频率的增加, 激光峰值时间缩短, 小孔扰动程度减弱, 气孔倾向减小。当频率高于 50Hz 时, 小孔行为见图 8a 图 8b 图 8d 或图 8a 图 8d, 此过程不会产生小孔瓶颈处坍塌, 因而达到较好地抑制气孔的效果。

3 结 论

(1) 脉冲激光焊接可以很好地抑制气孔的产生。在脉冲频率低于 50Hz 时, 随着脉冲频率的增加, 焊缝气孔倾向显著减小, 当频率在 50Hz ~ 200Hz 范围内, 焊缝气孔率几乎没有变化。

(2) 当脉冲频率一定时, 适当提高占空比有利于减少焊缝气孔数量。占空比为 50% 和 70% 的焊缝气孔率低于占空比为 30% 的焊缝气孔率。

(3) 在有效控制焊缝气孔的脉冲频率范围内, 若脉冲频率太高, 焊缝表面成形质量下降, 因而不宜选用过高频率。

(4) 理论分析了焊缝气孔的产生机理, 即小孔的收缩变形产生的扰动将保护气体卷入小孔, 若在小孔瓶颈处产生坍塌, 便形成气泡, 残留焊缝形成气孔。在此基础上较好地解释了气孔率随频率的变化规律。

参 考 文 献

- [1] Chinese Mechanical Engineering Society. Welding manual material welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1992: 184 (in Chinese).
- [2] LEIH D, XU B, YIN J. Study on the weldability of the quenched and tempered 30CrMnSiA with laser beam welding [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 225~228 (in Chinese).
- [3] MATSUNAWA A, SETO N, JONG D K *et al*. Dynamics of keyhole and molten pool in high power CO₂ laser welding [J]. Proc SPIE, 2000, 3888: 34~45.
- [4] TSUKAMOTO S, KAWAGUCHI I, ARAKANE G *et al*. Keyhole behavior in high power laser welding [J]. Proc SPIE, 2002, 4831: 251~256.
- [5] MATSUNAWA A, KATAYAMA S. Understanding physical mechanisms in laser welding for construction of mathematical model [J]. Welding in the World, 2002, 46: 27~38.
- [6] TSUKAMOTO S, KAWAGUCHI I, ARAKANE G *et al*. Suppression of porosity using pulsed modulation of laser power in 20kW CO₂ laser welding [A]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics [C]. Orlando Florida: Laser Institute of America, 2001, section C: 1702.
- [7] KAWAGUCHI I, TSUKAMOTO S, HONDA H *et al*. Power modulation in deep penetration laser welding—optimization of frequency and waveform to prevent the porosity [A]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics [C]. Orlando Florida: Laser Institute of America, 2003, section A: 1006.
- [8] CHEN L, HU L, J GONG Sh L *et al*. Research on CO₂ laser welding procedure of Ti-3Al-1Nb intermetallic compound [J]. Welding & Joining, 2004, 12: 10~13 (in Chinese).

美国研究热容激光器对物质破坏机理

美国利弗莫尔实验室 (LLNL) 在军方的资助下, 目前正在研究脉冲固体激光对物质破坏机理。采用板条热容固体激光器, 进行了激光与钢、铝和碳复合材料等靶材相互作用的初步实验。在这些试验中, 激光器的输出能量为 80J 脉冲, 激光脉冲宽度 300μs ~ 400μs, 脉冲重复频率 10Hz, 靶材上的激光峰值功率密度接近 $2 \times 10^7 / \text{cm}^2$ 。在实验中, 用大约 13 个激光脉冲打穿了 2.3mm 厚的钢板。

LLNL 的科研人员从理论上研究了激光对物质破坏的最佳激光脉冲波形、穿孔深度与入射激光脉冲宽度的关系等问题, 开发出模拟激光对物质破坏过程的计算模型。在模型中, 通过计算重复频率脉冲激光形成的温度分布, 得出结论: 在重复频率脉冲激光作用下, 由于热量不断积累在靶材上, 激光对物质破坏的效果得到提高。