

不锈钢厚板万瓦级 CO₂ 激光焊接

张 松 赵旭东 吴世凯 陈 铠 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 采用 20 kW CO₂ 激光器对不锈钢厚板进行了焊接实验研究。发现激光束焦点位置在高功率输出时存在漂移,为简便地描述焊接位置,以聚焦镜中心与材料表面的距离 h 作为焊接位置的表征,研究了不同 h 时的焊缝成形及熔深变化情况。此外,万瓦级激光焊接对聚焦系统更加敏感,在聚焦镜焦距 $f=300$ mm 时不同焊接位置处的焊缝成形差别小,且熔深浅,深宽比小;在 $f=200$ mm 时不同焊接位置处焊缝成形变化明显。采用 $f=200$ mm 聚焦系统,在 $h=208$ mm、激光功率 $P=18$ kW、焊速 $v=2$ m/min 时对 12 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 实现了对接单道焊透,焊缝成形良好。结果表明:通过优化工艺参数,在不开坡口和未填充材料的情况下,采用 20 kW CO₂ 激光器可以实现 12 mm 不锈钢厚板的对接焊,焊缝成形良好、深宽比大、热影响区小,得到了较为理想的焊接接头。

关键词 激光技术; 激光焊接; 焦点漂移; 20 kW CO₂ 激光器; 1Cr18Ni9Ti; 对接接头

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

10 kW Class CO₂ Laser Welding of Thick Stainless Steel Plates

Zhang Song Zhao Xudong Wu Shikai Chen Kai Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Laser welding of thick stainless steel with 20 kW CO₂ laser was studied. The focal point shifts at high output power. For describing welding position the distance h between the center of focusing mirror and surface of test piece was used as the welding position reference, and the seam formation and welding depth were also studied. Besides, high power laser welding was more sensitive to the focal system. The seam formation gave little differences at different welding positions when the focal length f was 300 mm while it was not the case when the $f=200$ mm. A good bead was got with one pass welding when $f=200$ mm, $h=208$ mm, laser power was 18 kW, and welding velocity was 2 m/min. The results illustrated that through optimizing welding parameters, without groove and filling materials, 12 mm thick stainless steel plate was butt welded with 20 kW laser and the seam formation was well.

Key words laser technique; laser welding; focus shift; 20 kW CO₂ laser; 1Cr18Ni9Ti; butt joint

1 引 言

激光焊接具有能量集中、焊缝深宽比大、热输入量低,以及工艺柔性高等优点在工业领域得到了广泛的应用^[1~3]。在高功率激光加工领域,Nd:YAG 激光器以材料对其吸收率高和靠光纤传输柔性好等优点而有所应用^[4,5],但由于其工作物质为晶体,容易受热变形,单棒输出功率低,因此输出总功率目前均在万瓦以下,单道焊接熔深有限。CO₂ 激光器工作物质为气体,输出功率高,光束质量好,输出稳定性好,目前在大熔深的激光焊接中仍占主要地

位^[6,7]。本文采用 20 kW 射频激励快速轴流 CO₂ 激光器对不锈钢厚板进行了焊接实验研究,在不开坡口和未填充材料的情况下完成了 12 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 的单道对接焊,得到了较为理想的焊接接头。

2 实验装置及方法

采用 Rofin-Sinar 公司生产的 20 kW 射频激励快速轴流 CO₂ 激光器,光束聚焦特征参量值为 $K_f=22.5$ mm·mrad,射频激励,可连续或脉冲输

作者简介: 张 松(1981—),男,河北人,硕士研究生,主要从事大功率激光材料加工方面的研究。

E-mail: zzzs1205@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 陈 铠(1950—),男,北京人,教授,硕士生导师,主要从事大功率激光加工技术方面的研究。

E-mail: chenkb@bjut.edu.cn

出。德国五轴联动数控激光加工机床,激光焊接头可以产生沿 Z 轴方向的直线运动和绕 B 轴的旋转运动,激光器输出的原始激光束经镜组扩束、传输、聚焦后作用于工件,完成焊接。试板尺寸 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,实验前用丙酮除去油脂。采用平板扫描和对接焊方式。实验时试板水平放置,激光束经抛物面铜镜聚焦后垂直作用在试板上,过程中激光头不动,试板移动。采用双层喷嘴来控制焊接过程中的等离子体和保护熔池,保护气为氦气,内层流速为 18 L/min 、外层流速为 20 L/min 。焊接完成后将试样沿垂直焊缝方向切割,经抛光、侵蚀后,用光学显微镜测量焊缝成形,并观察宏观气孔。焊接示意图见图1。

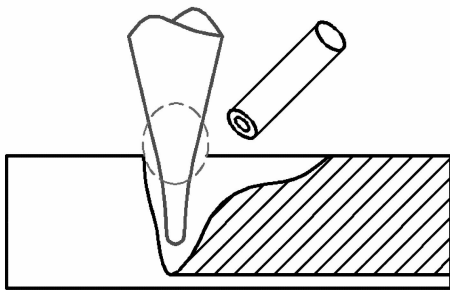


图1 激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high power laser welding

3 实验结果及分析

3.1 万瓦级激光束的特点及对焊接的影响

万瓦级激光器除输出功率高,直接测量困难外,在高功率输出时存在焦点漂移现象,如图2所示。随激光器输出功率的增大,聚焦焦点的位置沿光束传输方向发生漂移,这可能与激光器本身光学器件的热效应以及传输光路中的热透镜效应有关。鉴于

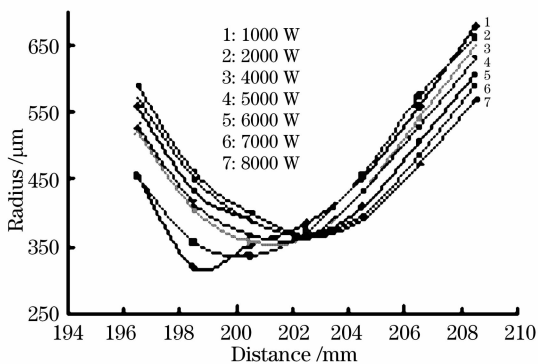


图2 高功率激光束的焦点漂移(抛物面铜镜聚焦,
 $f=200\text{ mm}$)

Fig. 2 Focus shifting in high power output
(parabolic bronze mirror, $f=200\text{ mm}$)

高功率时,焦点位置难以直接测量,同时存在焦点漂移。为更加简便地表述高功率时的焊接位置,如图3所示,采用以聚焦镜中心与工件表面的距离 h 表征焊接位置,提高了采用不同功率焊接时对比的普适性,并研究了不同 h 时的焊缝成形情况。

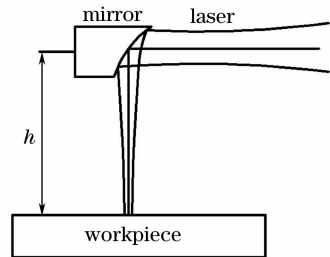


图3 焊接位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding position

另外,采用万瓦级激光功率焊接时,能量输入大,光致等离子体更容易扩展而形成对激光束强烈地吸收和散射,致使到达材料表面的功率密度降低,造成焊接过程波动甚至中断。为此,采用双层保护喷嘴控制等离子体,此时保护气流态较单层喷嘴得到改善。

3.2 万瓦级激光焊接对聚焦系统的敏感性

聚焦系统决定了作用于材料表面的聚焦光斑的形态,为探讨不同聚焦系统对焊接的影响规律,分别采用焦距 f 为 200 mm 和 300 mm 的铜抛物面聚焦镜进行焊接实验研究。图4为 300 mm 和 200 mm 聚焦镜时不同焊接位置处的焊缝截面图(图中 P 为激光功率, V 为焊速, V_{He} 为氦气流速)。

由图4可以看出,采用 300 mm 聚焦镜时,在不同的焊接位置处焊缝成形差别小,熔深浅,深宽比小;而采用 200 mm 聚焦镜时,不同焊接位置处的焊缝成形差别很大,在恰当位置处焊缝熔深大,深宽比大。这种现象可由高斯光束的聚焦规律得到解释。

高斯光束的聚焦公式

$$d_f = \frac{2K_f f}{D}, \quad (1)$$

式中 d_f 为聚焦光斑直径, K_f 为激光束的聚焦特征参量值,对于给定的激光束 K_f 为确定值; D 为聚焦镜处光束直径,对于给定的光束传输系统, D 为确定值; f 为聚焦镜焦距。

由(1)式看出,对于给定的原始激光束和传输系统,不同聚焦系统对应的聚焦光斑不同,焦距越小,聚焦光斑也越小。在给定功率的情况下,不同的聚焦系统决定了材料表面所能达到的功率密度最大值。当聚焦系统焦距较大时,对应的光斑半径较大,

此时提高激光器的输出功率时,作用于材料表面的功率密度没有显著提高,只是增加了有效的光斑半径,此时焊缝熔深有所增加,但焊缝熔宽对应增大,深宽比变化不明显,始终不能得到深而窄的焊缝,不利于实现厚板的焊接。而采用短焦距聚焦系统时,对应的光斑直径更小,能量更加集中,功率密度提高,焊接时大部分能量能够被焊接时的深熔小孔吸

收,从而熔深显著增大。同时,由于大部分能量用来增大熔深,熔宽进一步减小,使得焊缝的深宽比显著增加。因此,对于高功率大熔深的激光焊接,尽量采用短焦距的聚焦系统。同时,焦距越小,接头头与工件间的距离相应减小,安装其他焊接辅助装置时容易受到空间的限制,距离太小还会使焊接过程中产生的飞溅反冲污染聚焦镜,因此焦距不宜太小。

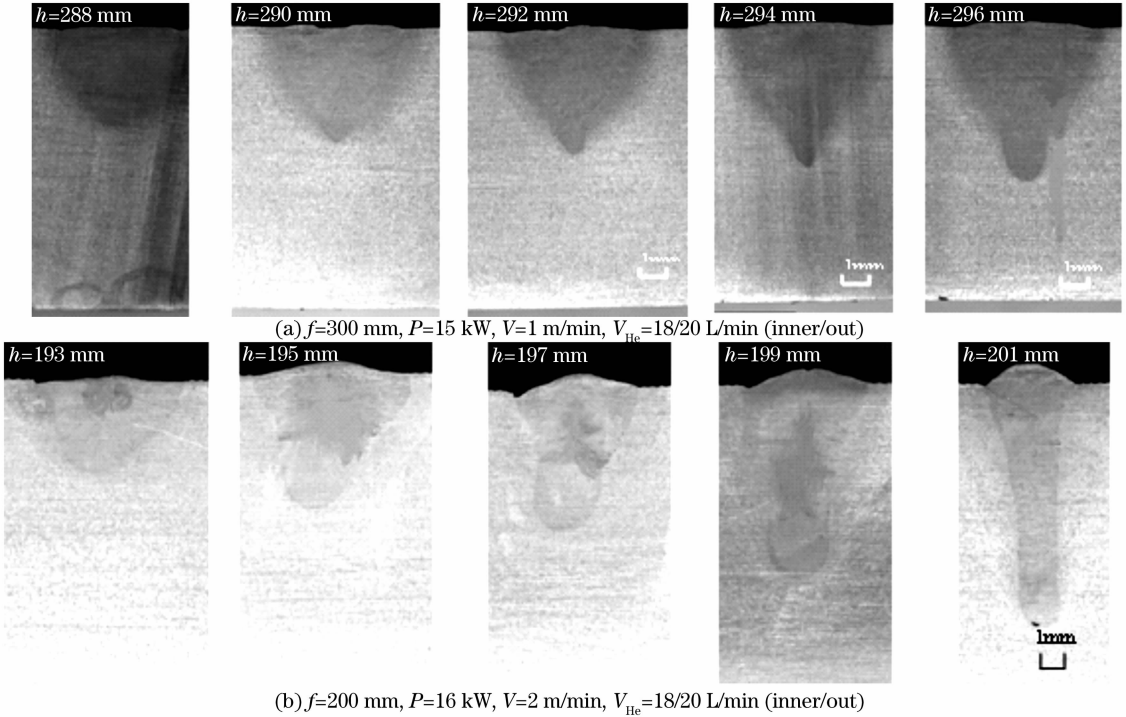


图 4 不同焊接位置对应的焊缝截面图

Fig. 4 Cross section at different welding positions

同时,高功率焊接对聚焦系统的敏感性问题也可以从公式中得出。对于给定的聚焦系统,聚焦光斑大小与表征光束质量的聚焦特征参量值 K_f 有关,光束质量越好, K_f 越小,因此对聚焦系统的敏感性越小;反之, K_f 较大时,对聚焦系统敏感性增强。目前的千瓦级激光束光束质量好, K_f 小,因此对聚焦系统不敏感,焊接时不易察觉;而万瓦级高功率激光束光束质量较差, K_f 较大,对聚焦系统敏感性较大,且对焊接过程影响很大。因此,万瓦级高功率激光焊接对聚焦系统的敏感性问题应引起足够重视。

3.3 12 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 不锈钢焊接实例

在对前述实验分析的基础上,针对 12 mm 厚 1Cr18Ni9Ti 不锈钢厚板进行焊接实验。在不开坡口和填充材料并且单道焊透的情况下,着重讨论了在低功率、低速度和高功率、高速度时的焊接情况,焊缝截面如图 5、图 6 所示。

由图可以看出,高功率、高速度更能产生深宽比

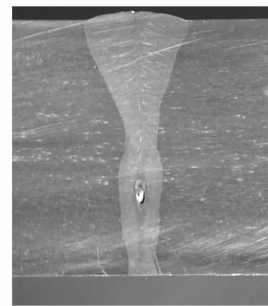


图 5 低功率、低速度时的焊缝截面

Fig. 5 Cross section with low speed and low power ($f=200$ mm, $P=12.5$ kW, $V=1$ m/min, $h=197$ mm)

大的焊缝,同时焊缝成形良好,热影响区小。这主要是因为,在高速度、高功率时,能量更加集中,短时间集中的高能量更容易通过深熔小孔深入到材料内部,产生深宽比大的焊缝。同时,因为焊接速度高,焊缝热影响区小。在低速度、低功率时能量的输入在时间上不够集中,部分能量很快被材料的辐射和

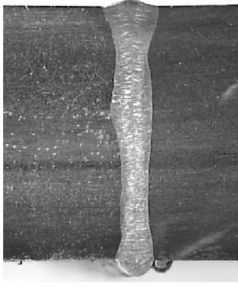


图 6 高功率、高速度时的焊缝截面

Fig. 6 Cross section with high speed and high power

($f=200$ mm, $P=18$ kW, $V=2.2$ m/min, $h=208$ mm)

热传导损失掉,焊缝截面呈上宽下窄的形状,焊缝热输入量大,对接头的性能不利。因此,在厚板焊接时,高功率、高速度更能产生深宽比大,成形良好的焊缝。

4 结 论

实验表明:1)在不开坡口和填充材料的情况下,通过优化参量,万瓦级高功率激光束可以实现对12 mm厚不锈钢板的单道穿透焊接,且焊缝深宽比大,成形好;2)万瓦级高功率激光束存在焦点漂移,采用了以聚焦镜中心与材料表面的距离 h 作为焊接位置依据的方法,使焊接位置的表述更加科学、简便;3)高功率激光焊接对聚焦系统更加敏感,只有

采用恰当的聚焦系统才能获得好的焊接结果;4)不同的能量输入方式对焊接的影响不同,高功率、高速度更能产生深宽比大,成形良好的焊缝。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
杨洗陈,王 雨,应朝龙 等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870
- 2 Dong Honggang, Gao Hongming, Wu Lin *et al.*. Technology characteristics of stain less steel plasma arc-gas tungsten arc double-sided arc welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(3): 21~24
董红刚,高洪明,吴 林 等. 不锈钢 PA-GTA 双面弧焊工艺特点分析[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(3): 21~24
- 3 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys[M]. Beijing: The Press of Defense Industry, 2002. 1~4
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1~4
- 4 Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 463~466
王海林,黄维玲,周卓尤 等. 8 mm 厚不锈钢板的 Nd:YAG 激光焊接[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 463~466
- 5 T. Ishide, S. Tsubota, M. Nayama *et al.*. 10 kW class YAG laser application for heavy components[C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 543~550
- 6 J. C. Goussain, A. Becker, A. Chehaibou. Heavy sections welding with very high power laser beams: the challenge[C]. *SPIE*, 1997, **3097**: 118~128
- 7 K. Minamida. High power laser applications in nippon steel corporation[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 402~410