

文章编号: 0258-7025(2006)08-1122-05

# K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接

庞 铭, 虞 钢, 刘 兆, 郑彩云, 王立新, 宁伟健

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 实验研究了连续波 Nd:YAG 激光焊接速度、侧吹保护气流量和离焦量等参量对激光穿透焊接 K418 和 42CrMo 焊缝成形的影响。结果表明, K418 与 42CrMo 激光穿透焊接有 X 形和 T 形两种典型的焊缝形貌, 且焊缝形貌是不对称的。随着焊接速度的提高, 焊接线能量降低, 焊缝尺寸变小, 且焊缝上部尺寸变化比下部尺寸变化慢, 焊缝形貌由 X 形过渡到 T 形。当离焦量在瑞利长度范围内时, 焊缝正面宽度变化很小; 当离焦量超出瑞利长度范围时, 在足够高的激光功率密度下, 焊缝正面宽度快速增加。在激光功率为 3 kW, 侧吹保护气角度为 35° 条件下, 通过优化焊接速度、侧吹保护气流量和离焦量等参量可以得到最佳焊缝质量。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 穿透焊; 焊缝

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A

## Dissimilar Metal of K418 and 42CrMo Full Penetration Laser Welding

PANG Ming, YU Gang, LIU Zhao,

ZHENG Cai-yun, WANG Li-xin, NING Wei-jian

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** The influences of laser welding velocity, flow rate of side-blow shielding gas, defocusing distance and other parameters on the full penetration laser weld seam of K418 and 42CrMo were experimentally investigated using continuous wave Nd:YAG laser. Results show that the asymmetric cross-sections of weld seams exhibit X shape or T shape. With increasing welding velocity, the linear heat input and dimension of weld seam decrease, and the shape of it changes from X shape to T shape. Meanwhile, the rate of change in dimension of weld bottom region is larger than that of weld top region. The change of the top surface width of the weld seam is small under the condition that defocusing distance changes within the range of Rayleigh length; the top surface widths of the weld seam increase quickly under the condition that defocusing distance changes out of the range of Rayleigh length with enough density of laser power. The high-quality of weld seam with constant 3 kW laser power and 35° angle of side-blow shielding gas can be obtained by optimizing welding velocity, flow rate of shielding gas, defocusing distance and other parameters.

**Key words** laser technique; laser welding; full penetration welding; weld seam

## 1 引言

涡轮增压器转子是发动机的核心部件, 其质量对发动机的寿命有很大的影响。涡轮增压器转子通常是由铸态的 K418 涡轮盘和调质状态下的 42CrMo 涡轮轴焊接而成, 二者的热物理性能、高温力学性能差异很大, 属于典型的异种金属焊接<sup>[1]</sup>。目前对 K418 与 42CrMo 焊接的主要方法是电子束

焊接和摩擦焊接。但电子束焊接需要真空室和产生 X 射线, 摩擦焊接接头常会发生低应力破坏和表面缺陷<sup>[2]</sup>。

激光焊接具有功率密度大、效率高、工件热变形小、容易实现自动化等优点, 且不需要真空室和产生 X 射线, 特别适合焊接特殊难焊的同种或异种金属<sup>[3]</sup>。激光穿透焊接是激光深熔焊接的一种特殊形

**收稿日期:** 2005-11-24; **收到修改稿日期:** 2006-02-15

**作者简介:** 庞 铭 (1980—), 男, 四川达县人, 中国科学院力学研究所博士研究生, 主要从事激光焊接的实验和数值模拟研究。E-mail: mingpang1980@126.com

**导师简介:** 虞 钢 (1958—), 男, 辽宁沈阳人, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 目前研究方向为激光与材料相互作用和智能制造系统集成化领域及其应用。E-mail: gyu@imech.ac.cn

式,具有单面焊,双面成形的特点。现有文献对激光焊缝成形研究主要针对同种材料非穿透焊接<sup>[4,5]</sup>,对激光穿透焊接异种金属的焊缝成形研究较少。本文研究了在激光功率为3 kW时,焊接速度(焊接线能量)、侧吹保护气流量和离焦量对 K418 与 42CrMo 激光穿透焊缝成形的影响规律。

## 2 实验材料和方法

### 2.1 实验材料

材料为镍基铸造高温合金 K418 和合金调质钢 42CrMo,厚度 3.5 mm。其化学成分见表 1 和表 2 (单位为质量分数( $w$ ))。

表 1 K418 的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of K418 ( $w$ )

C	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Zr	B
0.08~0.16	11.5~13.5	3.8~4.8	1.8~2.5	5.5~6.4	0.5~1.0	0.06~0.15	0.008~0.020
Mn	Si	P	S	Fe	Pb	Bi	Ni
≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.010	≤1.0	≤0.001	≤0.0001	Bal.

表 2 42CrMo 的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of 42CrMo ( $w$ )

C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S	Fe
0.38~0.45	0.90~1.20	0.15~0.25	0.50~0.80	0.20~0.40	≤0.040	≤0.040	Bal.

### 2.2 实验方法

实验设备采用了 Nd:YAG 固体激光器,额定输出功率为3 kW,光束模式为多模。聚焦镜头焦距 200 mm,激光从焦点半径  $W_0$  到光斑半径变为  $\sqrt{2}W_0$  的距离  $Z_R$  为 1.6 mm(瑞利长度),激光在瑞利长度范围内近似平行,如图 1 所示<sup>[6]</sup>。侧吹保护气体为

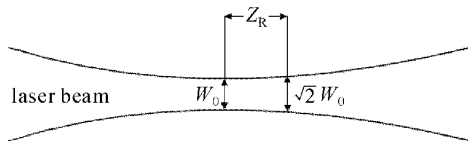


图 1 瑞利长度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Rayleigh length

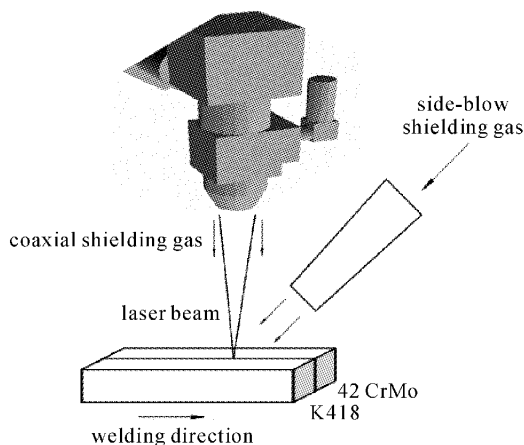


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

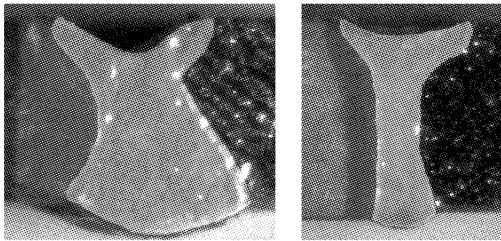
高纯度的 Ar 气,侧吹保护气角度  $35^\circ$ ,侧吹保护气吹气方向和焊接方向相反<sup>[7]</sup>,实验装置如图 2 所示。K418 和 42CrMo 采用对接,连续激光焊接,中间不留间隙,焊前用丙酮对试样清洗。激光焊接对工作台的精度要求很高,实验中通过千分表调整工作台的水平和垂直精度,使其误差范围在 0.04 mm 内。将焊好的接头制成金相试样,利用金相显微镜观察焊缝形貌并测量其各部分尺寸。

## 3 结果和分析

### 3.1 激光焊缝形貌

激光焊接分为热传导焊和深熔焊。激光热传导焊时,金属材料表面吸收激光能量后通过热传导把工件熔化,其焊缝形貌为半圆形。激光深熔焊时,金属材料表面吸收激光能量后被迅速气化,气化的金属蒸气产生一个反作用力作用于熔化的金属,使其向下凹陷,在激光光斑下产生一个小凹坑,当光束在凹坑底部继续加热时,所产生的金属蒸气一方面压迫坑底的液态金属使凹坑进一步加深;另一方面,向坑外飞出的蒸气将熔化的金属挤向熔池四周。此过程继续下去,便在液态金属中形成一个细长的孔洞(keyhole),当光束能量所产生的金属蒸气的反冲压力与液态金属的表面张力和重力平衡后,凹坑不再继续加深,形成一个深度稳定的孔并进行焊接。当激光功率密度很大时,所产生的孔洞将贯穿整个板

厚,形成穿透焊<sup>[8,9]</sup>。根据实验观察到 K418 与 42CrMo 激光穿透焊有 X 形和 T 形两种焊缝形貌,且焊缝形貌是不对称的。在焊缝下部的不对称度比焊缝上部大,这说明在焊缝下部的熔化金属的流动和传热的不均匀性比焊缝上部大<sup>[10]</sup>,如图 3 所示。在焊缝左侧是靠近 42CrMo 侧,右侧是靠近 K418 侧。定义激光功率为  $P$ ,焊接速度为  $v$ ,侧吹保护气流量为  $U_f$ ,离焦量为  $\Delta Z$ ,激光焊缝正面宽度为  $W_u$ ,焊缝背面宽度为  $W_b$ ,焊缝中间平直部分宽度为  $W_m$ ,靠近 42CrMo 侧的上下弧形高度分别为  $H_{u1}$ ,  $H_{b1}$ ,靠近 K418 上下侧的弧形垂直高度分别为  $H_{u2}$ ,  $H_{b2}$ ,如图 4 所示。



(a)  $P=3\text{ kW}, v=15\text{ mm/s}, \Delta Z=0, U_f=5\text{ L/min}$  (b)  $P=3\text{ kW}, v=35\text{ mm/s}, \Delta Z=2\text{ mm}, U_f=15\text{ L/min}$

图 3 K418 与 42CrMo 激光穿透焊焊缝截面形貌  
Fig. 3 Cross section of K418 and 42CrMo laser full penetration weld seam

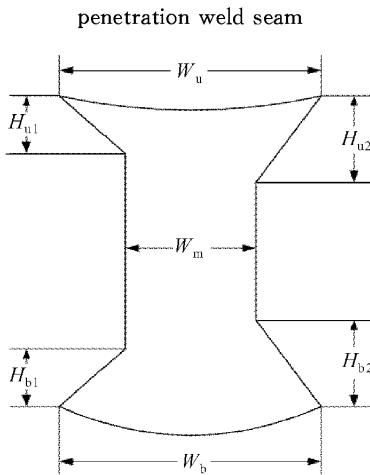


图 4 焊缝各区域尺寸示意图

Fig. 4 Schematic of cross section region dimension of weld seam

### 3.2 焊接速度的影响

由图 5 可以看出,在焊接速度较低时,焊缝背面宽度比正面宽度宽,随着焊接速度的增加,焊缝尺寸变小,且焊缝下部尺寸变化比焊缝上部尺寸变化快,焊缝形貌由 X 形过渡到 T 形。这是由于激光穿透焊接中的金属蒸气和等离子体气体沿孔洞的上下面

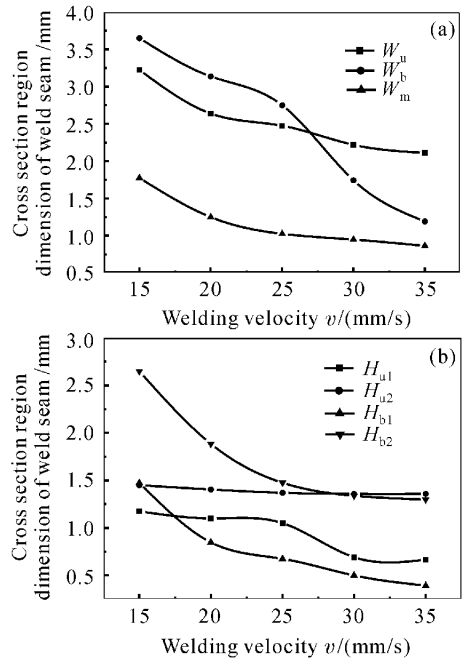


图 5 焊接速度和焊缝尺寸的关系

Fig. 5 Influence of laser welding velocity on cross section region dimension of weld seam ( $P=3\text{ kW}, \Delta Z=0, U_f=15\text{ L/min}$ )

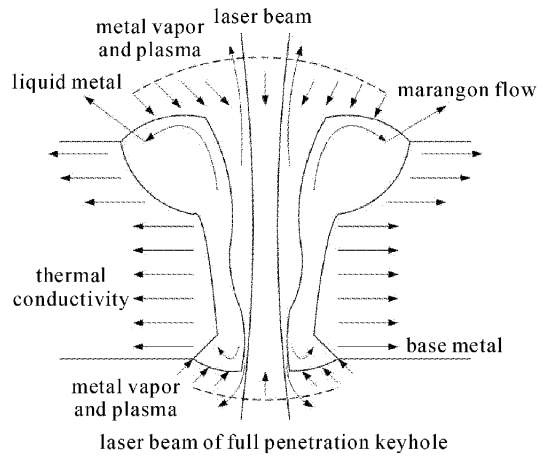


图 6 激光穿透焊接热源作用模式和熔池流动特点

Fig. 6 Thermal effect of heat sources and fluid flow in welding pool for laser full penetration welding

喷出,喷出来的等离子体相当于一个热源作用于焊缝的正面和背面,孔洞壁的液态金属靠热传导熔化周围的金属,穿过孔洞的激光对焊缝背面的等离子体云和金属蒸气有加热作用,如图 6 所示<sup>[11]</sup>。随着焊接速度的增加,激光熔化和气化的金属量减少,从孔洞喷出的金属蒸气和等离子体密度减少,孔洞中的液态金属对周围金属热传导的时间也减少,激光与焊缝正面和背面的金属蒸气和等离子体作用时间

也缩短,所以焊缝尺寸随速度的增加而减少。由于同轴和侧吹保护气及激光源在焊缝正面的综合影响,导致焊缝下部尺寸变化比焊缝上部尺寸变化快。观察焊缝表面,当速度为15 mm/s,焊缝出现严重塌陷,随着速度的增加,塌陷程度减小。

### 3.3 侧吹保护气流量的影响

激光焊接侧吹保护气体主要是吹散焊缝表面的等离子气体,减少等离子体对激光的吸收、散射和折射。由图 7(a)可以看出,焊缝正面和背面宽度随侧吹保护气流量的增加先升高,再降低,再升高,焊缝中间平直部分宽度随侧吹保护气流量的增加先降低再增加。焊缝正面宽度的变化是由于随侧吹保护气流量的增加,侧吹保护气体使焊缝正面的熔池有扩大的趋势,焊缝正面减少的等离子体使焊缝正面的熔池有减少的趋势的综合作用<sup>[12]</sup>,焊缝中间平直部分宽度的变化是由于侧吹保护气流量对焊缝的冷却和侧吹保护气体把一部分等离子体气体压入孔洞的综合作用。焊缝背面宽度的变化主要受沿孔洞中流下的液体金属和向下喷出的等离子体和金属蒸气的综合影响。由图 7(b)可以看出,侧吹保护气体对焊缝靠近 K418 侧上部尺寸影响比下部尺寸影响大;侧吹保护气体对焊缝靠近 42CrMo 侧下部尺寸的影响比上部尺寸的影响大。观察焊缝的表面,

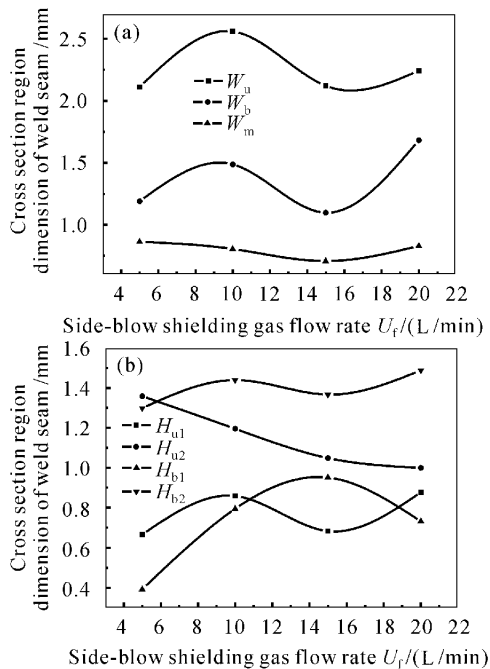


图 7 侧吹保护气流量和焊缝尺寸的关系

Fig. 7 Influence of side-blow shielding gas flow rate on cross section region dimension of weld seam  
( $P=3\text{ kW}$ ,  $v=35\text{ mm/s}$ ,  $\Delta Z=0$ )

侧吹保护气体流量为5 L/min,10 L/min,20 L/min时,焊缝正面有凹坑;侧吹保护气体流量为15 L/min时,焊缝正面微凸。

### 3.4 离焦量的影响

作用于工件表面的功率密度除了和激光束的焦距功率密度有关外,还取决于工件表面和焦平面的相对位置,定义焦平面在工件表面之上为正离焦,当焦平面在工件表面以下时为负离焦。不同的离焦量激光作用于焊接试样内部的功率密度不一样。从图 8(a)可以看出,离焦量从-3 mm变到-2 mm,焊缝正面宽度快速变小;离焦量在-2 mm到1 mm范围内,焊缝正面宽度变化不大;离焦量从1 mm变到2 mm,焊缝正面宽度快速增加;离焦量在-3 mm到2 mm范围内,焊缝背面宽度和焊缝中间平直部分的宽度变化不大。从图 8(b)可以看出,离焦量在-3 mm到2 mm的范围内,离焦量变化对焊缝下部尺寸的影响比对焊缝上部尺寸的影响大。焊缝正面宽度变化并不是关于焦点对称,主要是因为焊接过程中,激光焦点在热透镜效应、等离子体二次聚焦等效应的影响下向下偏移了0.5 mm左右<sup>[13]</sup>。观察焊缝表面,在离焦量为0时,焊缝正面微凸;在离焦量为1 mm时,焊缝正面较平;在离焦量为-3 mm,-2 mm,-1 mm和2 mm时,焊缝正面有凹坑;当离焦量为1 mm时,焊缝背面质量最好。

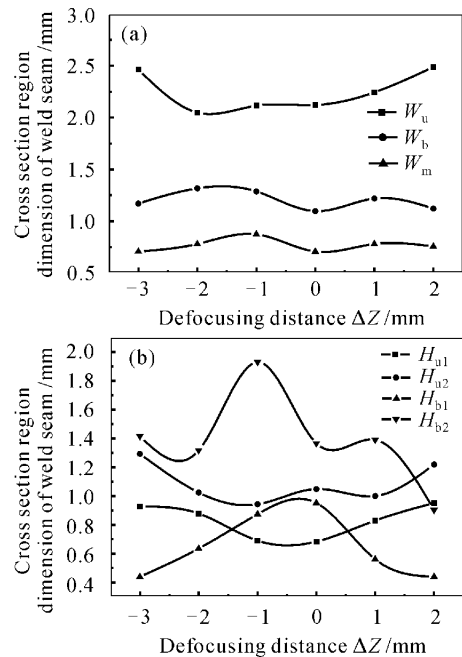


图 8 离焦量和焊缝尺寸的关系

Fig. 8 Influence of defocusing distance on cross section region dimension of weld seam  
( $P=3\text{ kW}$ ,  $v=35\text{ mm/s}$ ,  $U_f=15\text{ L/min}$ )

## 4 结 论

K418 与 42CrMo 激光穿透焊的焊缝形貌有 X 形和 T 形两种。由于 K418 和 42CrMo 熔点和传热性能及金属的流动性能差异很大,导致焊缝截面不对称。在保证能焊透的条件下,适当提高焊接速度可以改善焊缝质量。通过调节侧吹保护气流量可以优化焊缝成形。厚度为 3.5 mm 的 K418 与 42CrMo 异种金属 Nd:YAG 激光焊接在功率为 3 kW,逆吹侧吹保护气角度为 35° 条件下的最佳焊接参数为:焊接速度 35 mm/s,侧吹气流量 15 L/min,正离焦 1 mm。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Lee. Inertia friction welding of a gas turbine rotor [J]. *Welding Review International*, 1992, **11**(4):189~192
- 2 Du Suigeng, Fu Li, Cao Ying *et al.*. On strengthening the friction welding joint between K418 turbo disk and 42CrMo shaft [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2004, **22**(1):112~115  
杜随更,傅莉,曹莹等. K418 涡轮盘和 42CrMo 轴摩擦焊接头的强化[J]. *西北工业大学学报*, 2004, **22**(1):112~115
- 3 Z. Sun, J. C. Ion. Review laser welding of dissimilar metal combinations [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, **30**:4205~4214
- 4 Hu Qiang, Xiong Jiangang, Wang Liqun *et al.*. Laser welding of stainless steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2002, **32**(6):23~25  
胡强,熊建钢,王力群等. 不锈钢的激光焊接[J]. *电焊机*, 2002, **32**(6):23~25
- 5 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):179~184  
王家淳,王希哲,惠松晓. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):179~184
- 6 Lü Baida. *Laser Optics-Laser Beam Propagation and Beam Quality Control* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 63~64  
吕百达. 激光光学-激光束的传播变换和光束质量控制[M]. 成都:四川大学出版社,1992. 63~64
- 7 Xiong Jiangang, Hu Xiyuan, Chen Zutao *et al.*. Study on laser welding of cast-base superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(12):1107~1111  
熊建钢,胡席远,陈祖涛等. 激光焊接铸造镍基高温合金工艺研究[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(12):1107~1111
- 8 Shen Huitang. *Welding Technique and Means* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. 271~273  
沈惠塘. 焊接技术与高招[M]. 北京:机械工业出版社,2003. 271~273
- 9 Yu Gang, Yu Heji. *Integrated Laser Intelligent Manufacturing* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001. 124~125  
虞钢,虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2001. 124~125
- 10 Abel-Monem, Ei -Batahgy. Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels [J]. *Materials Letters*, 1997, **32**(2,3):155~163
- 11 Yao Wei, Gong Shuili, Chen Li. Weld shaping for laser fully penetration welding titanium alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(5):74~77  
姚伟,巩水利,陈俐. 钛合金激光穿透焊的焊缝成型(II) [J]. *焊接学报*, 2004, **25**(5):74~77
- 12 Hu Changkui, Chen Peifeng, Liang Jun. The technic study of laser welding thick plates [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(5):268~270  
胡昌奎,陈培锋,梁军. 激光焊接厚钢板的工艺研究[J]. *应用激光*, 2003, **23**(5):268~270
- 13 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):557~561  
秦国梁,林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):557~561