

高温合金/不锈钢异种材料 T 型接头激光 穿透焊工艺研究

冯威琦 张云丰 陶 汪 李俐群*

(哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对飞行器发动机水冷壁结构,进行了 GH3128/06Cr19Ni10 异种材料 T 型接头激光穿透焊试验,主要研究了焊接参数对焊缝成形和焊接裂纹的影响规律,分析了焊接裂纹形成原因,得到了较合理的焊接工艺区间。结果表明,对于 GH3128/06Cr19Ni10 异种材料 T 型接头激光穿透焊,连续焊比脉冲焊更易实现稳定焊接,获得良好焊缝成形。焊接裂纹是接头主要缺陷裂纹都在高温合金一侧产生,控制激光功率、保证对中可降低裂纹产生概率。焊接接头的另一种缺陷是表面下塌,保证间隙小于 0.2 mm 可抑制下塌缺陷的产生。对由 41 条焊缝组成的模拟件进行了 10 MPa, 5 min 水压测试,每条焊缝都满足要求。

关键词 激光技术;高温合金;不锈钢;激光穿透焊;裂纹

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1003003

Dissimilar Metals Combination of Superalloy/Stainless Steel in T-Shape by Laser Penetration Welding

Feng Weiqi Zhang Yunfeng Tao Wang Li Liqun

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract GH3128 and 06Cr19Ni10 which are mainly used in water wall of flight vehicle engine are joined together by laser penetration welding. The relationships between welding parameters and welding appearance and cracks are mainly researched. The reason of weld cracks is analyzed. A appropriate welding craft is summarized. The following conclusions are obtained. The continuous laser welding is better than pulse laser welding in terms of welding appearance and welding process stability. If the gap between the two metals is too big, the surface of the welding seam will collapse. The GH3128 plate may crack if the laser power is too high, or if the laser beam deviate from the centre. The welded specimen which contains 41 weld seams preform well at the hydrostatic test (10 MPa, 5 min).

Key words laser technique; superalloy; stainless steel; laser penetration welding; crack

OCIS codes 140.3390, 350.3390, 160.3900

1 引 言

GH3128 是我国自主研发的,能够在 950 °C 以下长期工作的一种镍基高温合金,广泛应用于航空发动机燃烧室火焰筒、加力燃烧室壳体、调节片及其他高温零部件^[1]。06Cr19Ni10 是应用最为广泛的一种铬-镍不锈钢,具有良好的耐蚀性、耐热性、低温强度、机械特性和加工性能。

飞行器发动机水冷壁是由 GH3128 高温合金盖板和 06Cr19Ni10 不锈钢基体组成的复合结构,需要采用激光穿透焊方法将盖板与基体上的筋条连接起来。裂纹是高温合金焊接的主要难点,以往研究表明裂纹多是由焊缝或热影响区的晶间液体膜导致^[2-9]。

加拿大曼尼托巴大学的 Idowu 等^[4]对激光焊

收稿日期: 2012-04-23; 收到修改稿日期: 2012-06-25

作者简介: 冯威琦(1984—),男,助理工程师,主要从事金属材料激光焊接工艺方面的研究。

E-mail: zhangyunfeng0529@163.com

* 通信联系人。E-mail: liliquan@hit.edu.cn

接 718plus 高温合金的热影响区裂纹进行了研究, 结果表明热影响区裂纹由晶界液化引起, 但是只有厚度在一定范围内的液化膜才会引起焊接裂纹。Richards 等^[5]研究了 Incoloy 903 高温合金电子束焊接时的热影响区微裂纹的影响因素, 发现对于一个确定的热输入, 减小焊接速度和增大电子束束流可减少热影响区的微裂纹。Osoba 等^[6]研究了定向凝固 Rene 80 高温合金激光焊接热影响区裂纹的抑制方法, 在裂纹边界发现了液化过的 γ' 相和 MC 碳化物, 所以作者认为是 γ' 和 MC 碳化物的组分液化导致了开裂。

本文将研究 GH3128 高温合金/06Cr19Ni10 不锈钢异种材料的激光焊接特性, 并重点关注焊接裂纹的形成规律及其影响因素。

2 试验材料及方法

试验所用两种母材金相组织如图 1 所示。GH3128 高温合金基体组织为奥氏体, 在基体中有少量 M_6C 和 TiN, M_6C 约占合金重量的 0.4%, TiN 约占 0.3%。06Cr19Ni10 不锈钢的组织也为单相奥氏体。

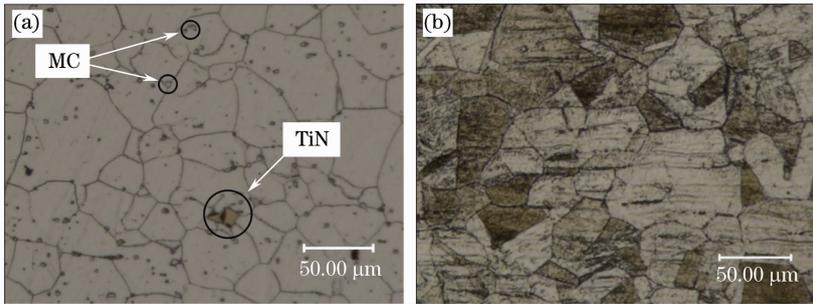


图 1 母材金相组织。(a) GH3128 金相组织;(b) 06Cr19Ni10 金相组织

Fig. 1 Microstructure of base metal. (a) Microstructure of GH3128; (b) microstructure of 06Cr19Ni10

两种材料的化学成分分别如表 1 和表 2 所示, 两种材料 Fe、Ni 含量相差较大, Cr 含量相差较小, 在 GH3128 高温合金中含有多种含量较少的合金元素。

表 1 06Cr19Ni10 化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 06Cr19Ni10 (mass fraction, %)

Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	C	P	S
Bal.	18.00~20.00	8.00~11.00	2.00	1.00	0.10~0.16	0.08	0.045	0.030

表 2 GH3128 化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of GH3128 (mass fraction, %)

Ni	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe	B	Zr	Ce
Bal.	19.0~22.0	7.5~9.0	7.5~9.0	0.4~0.8	0.4~0.8	1.0	0.005	0.04	0.05

水冷壁结构示意图如图 2 所示, 上方为 GH3128 高温合金盖板, 下方为 06Cr19Ni10 不锈钢基体。盖板厚度 0.8 mm, 基体最厚区域 20 mm, 在基体上加工

了许多筋条, 采用激光穿透焊连接盖板与基体上的筋条。要求焊缝表面无飞溅、成形均匀, 结合宽度大于 0.5 mm, 焊后不堵塞流道, 试件水压试验 10 MPa, 保

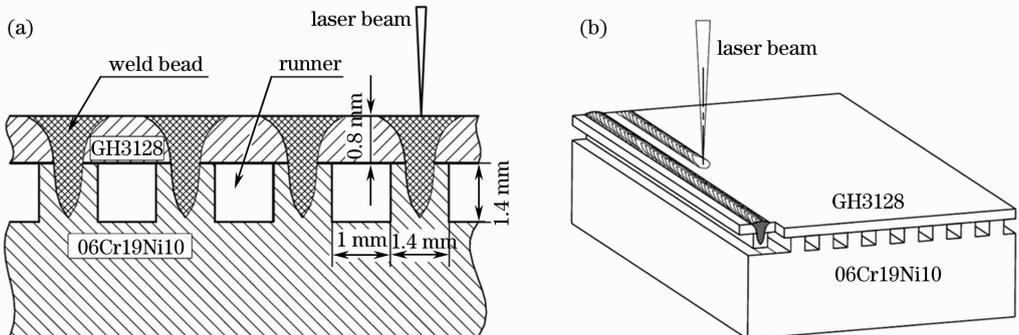


图 2 水冷壁焊接结构。(a) 水冷壁结构断面;(b) 水冷壁结构外观

Fig. 2 Welded structure of water wall. (a) Cross section of water wall; (b) appearance of water wall

持 5 min 无泄漏。针对此结构设计了试验件,如图 3 所示。基体试验件尺寸是 150 mm×150 mm×20 mm,共 41 条筋条,筋条高度 1.4 mm,宽度

1.4 mm,相邻筋条间距 2.4 mm,基体上加工了水压试验进水口;盖板的尺寸为 150 mm×150 mm×0.8 mm。

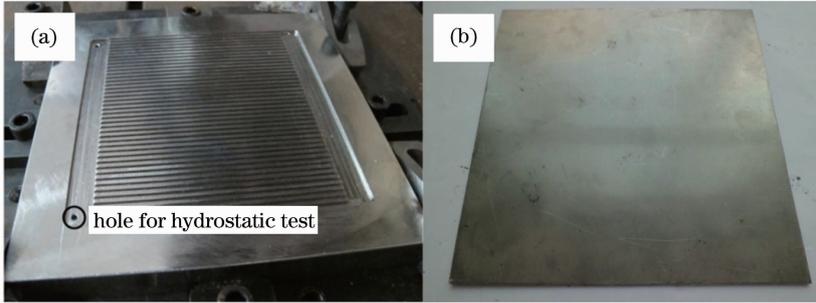


图 3 试验件照片。(a) 06Cr19Ni10 基体;(b) GH3128 盖板

Fig. 3 Specimens for welding. (a) 06Cr19Ni10 base board; (b) GH3128 cover plate

试验所用激光器为 ROFIN 公司的扩散冷却 CO₂ 激光器,激光波长 10.6 μm,最大功率 3 kW,焦距 190 mm,焦斑直径 0.2 mm。焊接前用丙酮清理掉两种材料表面油污,为了避免焊接变形影响两种材料的配合,在正式焊接前,对两种材料进行点固,点固完成后逐个焊缝进行焊接。焊后将焊接接头制样打磨抛光后,先用体积分数为 5% 的草酸水溶液电解腐蚀 5 s,然后利用饱和的 FeCl₃ 盐酸溶液擦拭 5 s。试样制好后,放在显微镜下观察焊缝成形及缺陷情况。

冲激光焊接过程不稳定、存在飞溅现象。两种情况焊缝成形对比如图 4、5 所示,对比表面成形发现,脉冲焊表面有飞溅,连续焊焊缝表面光滑无缺陷,从焊缝表面成形上看,连续焊好于脉冲焊;对比相同线能量的焊缝截面成形发现,脉冲焊降低了导热板的表面熔宽,获得了大深宽比的焊缝,但脉冲焊使结合宽度降低了。综合以上分析,考虑到此结构对表面成形和结合宽度的要求,连续焊更适合该结构的焊接。

3 结果及讨论

3.1 焊接参数对焊缝成形的影响

首先,为了对比连续激光焊接和脉冲激光焊接对焊缝成形的影响^[10],进行了这两种焊接方式的对比试验。焊接时连续激光焊接过程稳定、无飞溅;脉

针对以上结果,着重对连续激光焊的焊缝成形情况进行了分析。图 6 为不同激光功率下,熔深、表面熔宽随焊接速度的变化情况。可以发现,激光功率一定时,熔深、表面熔宽随焊接速度的增加而减小;焊接速度一定时,熔深、表面熔宽随激光功率的减小而减小。从熔深与速度和功率的关系曲线上还可以发现,相同的线能量,高速焊接可获得大熔深。

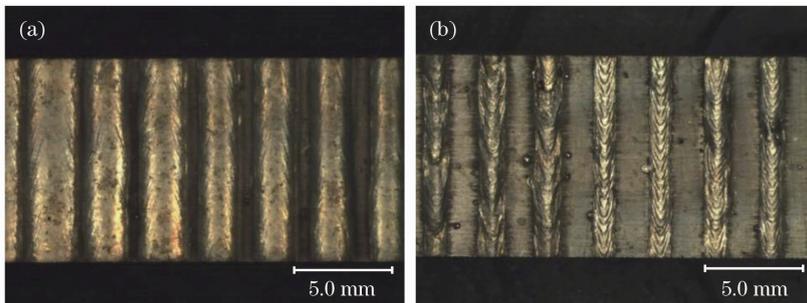


图 4 连续激光焊(a)与脉冲激光焊(b)表面成形

Fig. 4 Weld appearances of (a) continuous laser welding and (b) pulse laser welding

对于 T 型接头穿透焊,影响接头承载能力的主要因素是结合面宽度。激光功率和焊接速度对结合面宽度的影响规律如图 7 所示。可以发现,结合面宽度主要分布在 0.45~0.57 mm 之间,结合面宽度

同样随着焊接速度的增加而减小。根据结构件要求,结合面宽度要大于 0.5 mm,结合面越宽,焊缝承载能力越大,因此,焊接速度不宜过大,以小于 2.0 m/min 为宜,激光功率要大于 1000 W。

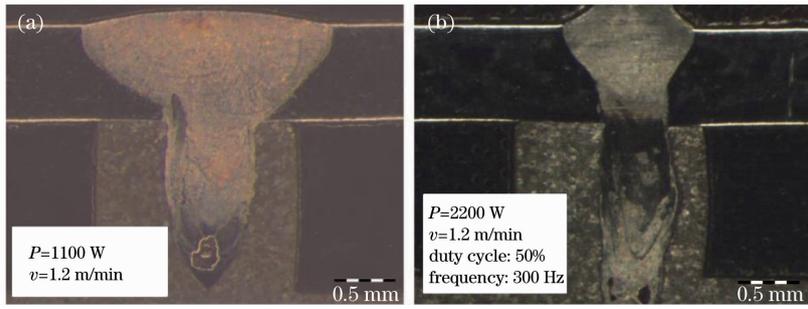


图 5 连续激光焊(a)与脉冲激光焊(b)截面成形

Fig. 5 Cross sections of (a) continuous laser welding and (b) pulse laser welding

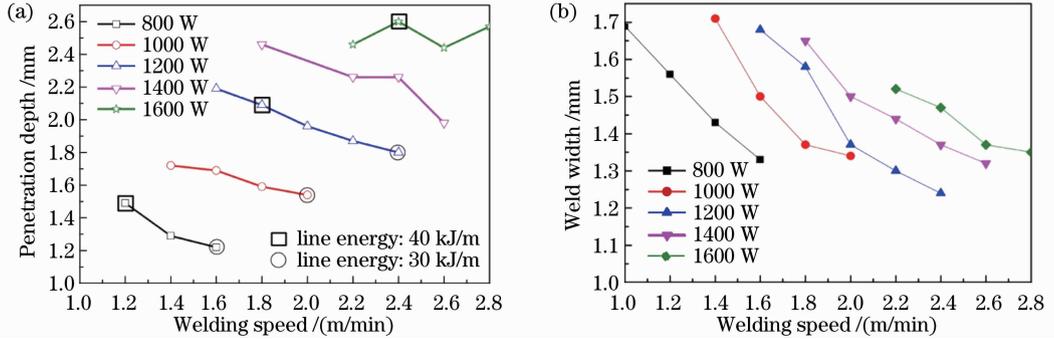


图 6 熔深、熔宽变化规律。(a)熔深与速度的关系；(b)表面熔宽与速度的关系

Fig. 6 Penetration depth and weld width. (a) Relationship between penetration depth and welding speed; (b) relationship between weld width and welding speed

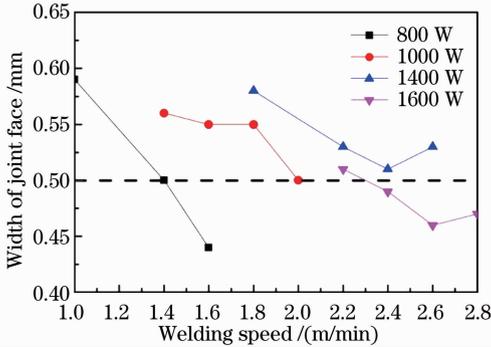


图 7 结合面宽度变化规律

Fig. 7 Relationship between width of joint face and welding speed

3.2 焊接裂纹

对接头截面照片进行分析发现,在部分焊缝中出现了裂纹。所有裂纹都在结合面附近的 GH3128 一侧产生,如图 8 所示,分别为焊缝区裂纹和热影响区裂纹。

为了确定两种裂纹的性质,对裂纹进行了分析。焊缝区裂纹的组织 and 断口照片如图 9 所示。从金相照片上可以看出,裂纹沿晶界开裂,断口具有自由结晶表面的特征,可以断定裂纹在熔池凝固时形成,裂纹为热裂纹中的结晶裂纹。由此可解释裂纹的形成原因,即在凝固后期,固体金属收缩,枝晶间的残余液态金属不足,不能及时填充收缩留下的空间,在拉应力的作用下发生沿晶开裂。

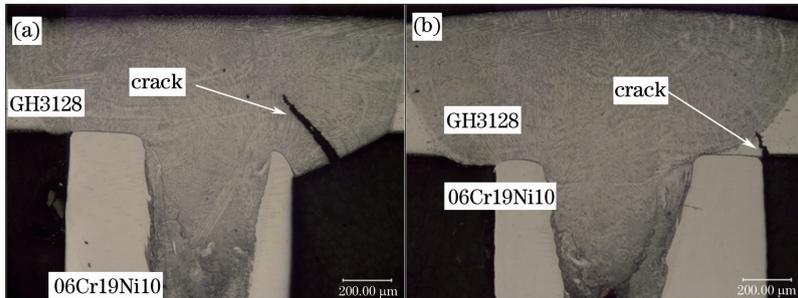


图 8 GH3128 上出现裂纹。(a) 焊缝区裂纹；(b) 热影响区裂纹

Fig. 8 Crack in GH3128 superalloy. (a) Crack in welding seam; (b) crack in heat affected zone

热影响区裂纹的组织 and 断口照片如图 10 所示。从金相照片可以看出裂纹沿晶界开裂,在断口上存在大量液化膜,综合金相和断口分析可以确定,热影响区裂纹也是在高温形成,为焊接热裂纹。在裂纹

附近还发现了晶界液化现象,如图 11 所示。根据这些特征,并参考相关研究^[6,7,9],可以确定裂纹性质为液化裂纹。

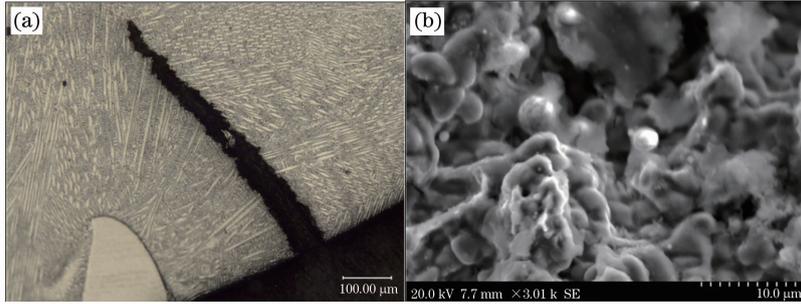


图 9 焊缝上的裂纹。(a) 裂纹金相照片;(b) 裂纹断口照片

Fig. 9 Crack in welding seam. (a) Metallograph of crack; (b) fracture surface of crack

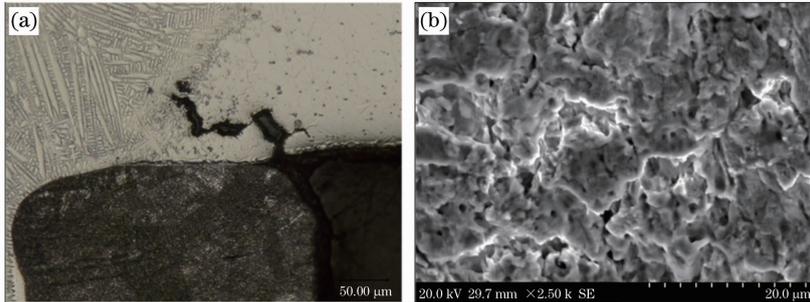


图 10 热影响区的裂纹。(a) 裂纹金相照片;(b) 裂纹断口照片

Fig. 10 Crack in heat affected zone. (a) Metallograph of crack; (b) fracture surface of crack

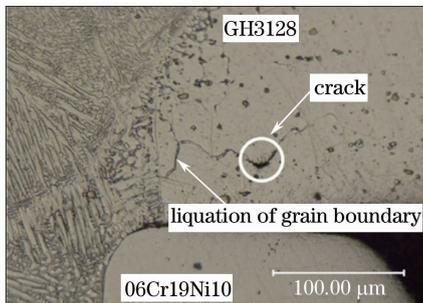


图 11 裂纹处的晶界液化

Fig. 11 Liquation of grain boundary in crack

很多学者在研究高温合金焊接热影响区裂纹

时,都发现了 MC 碳化物引起的晶界组分液化现象^[11~15]。为了确定本文中材料晶界液化的原因,对液化晶界进行了线扫描分析,如图 12 所示。结果显示,在晶界上 C、S、P 元素存在富集,尤其是 C 元素的富集最严重。所以认为晶界液化与 C 元素有关,与其他学者对高温合金晶界液化的研究结果一致。即是晶界液化导致热效应区金属间结合力降低,使其在拉应力的作用下发生了开裂。

对裂纹形成规律进行统计时发现,对中不良的焊缝,裂纹的产生概率会增加。因此需保证焊缝对中精度。

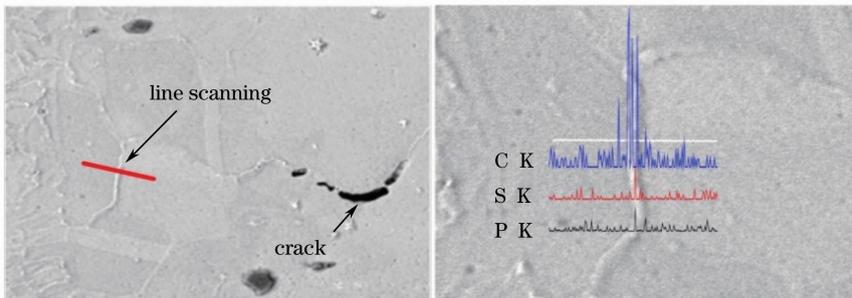


图 12 液化晶界的线扫描结果

Fig. 12 Result of line scanning of liquified grain boundary

当焊缝完全对中时,对焊接激光功率、速度、线能量与裂纹的关系进行了统计,得到图 13 所示的规律。图中斜线表示焊接线能量范围,斜率越大线能量越大。可以发现,相同线能量时大功率高速焊接会使裂纹产生概率增大,因此,应在保证焊缝成形的情况下,尽量使用小功率、低速度进行焊接。若要保证无裂纹产生,激光功率需小于 800 W,然而此时不能满足最小结合宽度的要求,考虑到裂纹可通过补焊来修复,同时尽量降低裂纹的产生概率,最终确定焊接功率在 1000 W 附近。

3.3 表面下塌

如果两种材料配合不好,会使表面下塌,严重的表面下塌会影响接头性能。表面下塌是由材料配合不紧密造成的,为了研究配合间隙的容限,对表面下塌与配合间隙的关系进行了统计。焊接时功率

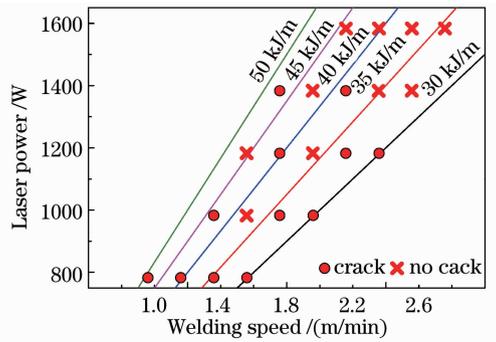


图 13 裂纹的产生规律

Fig. 13 Regulation of cracks

1000 W,速度 2.0 m/min,焊后结果如图 14 所示。当两种材料间隙小于 0.2 mm 时,不会产生明显的表面下塌;而当间隙大于 0.4 mm 时,会产生较明显的下塌缺陷。因此应保证工件加工精度,焊接时加强压紧,以保证两种材料的配合间隙小于 0.2 mm。

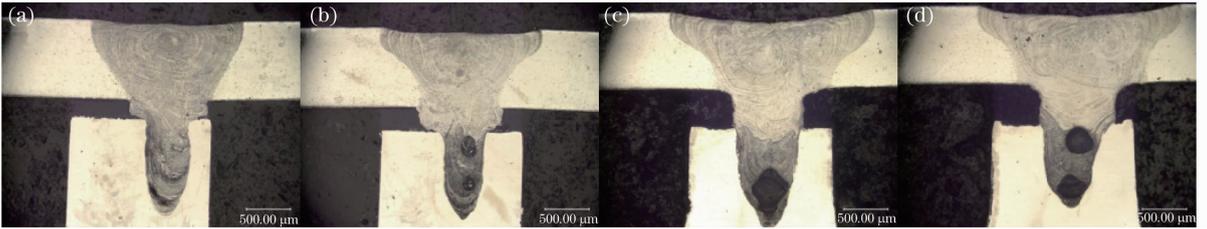


图 14 配合间隙对比。(a)配合间隙为 0.2 mm;(b)配合间隙为 0.23 mm;(c)配合间隙为 0.4 mm;(d)配合间隙为 0.44 mm

Fig. 14 Comparison of gap size. (a) Gap of 0.2 mm; (b) gap of 0.23 mm; (c) gap of 0.4 mm; (d) gap of 0.44 mm

3.4 水压试验

对优化后的工艺条件下焊接的试件进行了水压试验,当水压为 10 MPa 时,试件能够保持 5 min 无泄漏,密封性良好,所以可以确定所得焊缝满足要求。

化的工艺条件下,试件可以保持 10 MPa,5 min 无泄漏,满足实际要求。

4 结 论

1) 进行了 GH3128 高温合金/06Cr19Ni10 不锈钢异种材料 T 型接头激光穿透焊试验,连续激光焊比脉冲激光焊过程稳定,焊缝成形好,更有利于实现稳定控制,获得良好接头形貌;

2) 为了得到结合面尺寸满足要求,没有裂纹和表面下塌的焊缝,对于连续激光焊,焊接速度要小于 2.0 m/min,功率在 1000 W 附近,同时还需保证严格对中,并且配合间隙要小于 0.2 mm;

3) 工艺参数不当,会产生焊缝区裂纹和热影响区液化裂纹,可通过降低焊接速度和激光功率来降低裂纹产生概率;

4) 进行了焊接模拟件水压性能测试,证明在优

参 考 文 献

- 1 Fu Hongzhen, Chen Yuping, Wei Yuhuan *et al.*. Influence of C, W, Mo and Fe on the microstructure and properties of alloy GH128[J]. *CISRI Journal*, 1985, 5(1): 75~82
傅宏镇, 陈玉平, 魏育环 等. 碳、钨、钼和铁对 GH128 合金显微组织和性能的影响[J]. *钢铁研究总院学报*, 1985, 5(1): 75~82
- 2 Zhang Haiquan, Zhao Haiyan, Zhang Yanhua *et al.*. Analysis on the microfissuring behavior in the heat-affected zone of electron-beam welded nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005, (3): 22~25
张海泉, 赵海燕, 张彦华 等. 镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂纹特征分析[J]. *材料工程*, 2005, (3): 22~25
- 3 Xiong Jiangang, Hu Qianwu, Wu Fengshun *et al.*. Microstructure characteristics and weld cracking formation in nickel superalloy laser welded joints[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(5): 309~312
熊建钢, 胡乾午, 吴丰顺 等. 镍基高温合金激光焊接接头组织及裂纹形成原因[J]. *应用激光*, 2001, 21(5): 309~312
- 4 O. A. Idowu, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi. Effect of heat input on heat affected zone cracking in laser welded ATI Allvac 718Plus superalloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 454: 389~397
- 5 N. L. Richards, R. Nakkalil, M. C. Chaturvedi. The influence of electron-beam welding parameters on heat-affected-zone

- microfissuring in INCOLOY 903 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1994, **25**(8): 1733~1745
- 6 L. O. Osoba, R. K. Sidhu, O. A. Ojo. On preventing HAZ cracking in laser welded DS Rene 80 superalloy[J]. *Mater. Sci. Technol.*, 2011, **27**(5): 897~902
- 7 O. A. Ojo, N. L. Richards, M. C. Chaturvedi. Contribution of constitutional liquation of gamma prime precipitate to weld HAZ cracking of cast Inconel 738 superalloy[J]. *Scripta Material*, 2004, **50**(5): 641~646
- 8 Jiang Hua, Tang Haibo, Fang Yanli *et al.*. Microstructure and mechanical properties of rapid solidified ultra-fine columnar grain Ni-base superalloy DZ408 by laser melting deposition manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0203004
姜华, 汤海波, 方艳丽等. 激光熔化沉积 DZ408 镍基高温合金微细柱晶显微组织及性能[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0203004
- 9 O. A. Ojo, Y. L. Wang, M. C. Chaturvedi. Heat affected zone liquation cracking in electron beam welded third generation nickel base superalloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **476**(1-2): 217~223
- 10 Zhong Rutao, Xiong Zheng. Research on continuous/pulse laser cladding superalloy K403[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 852~857
- 钟如涛, 熊征. 连续/脉冲 CO₂ 激光熔覆高温合金 K403[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 852~857
- 11 Gong Weihui, Chen Yuhua, Lü Zhen *et al.*. Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603008
龚伟怀, 陈玉华, 吕榛等. 0.2 mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603008
- 12 R. K. Sidhu, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi. Microstructural analysis of laser-beam-welded directionally solidified INCONEL 738[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, **38**(4): 858~870
- 13 R. K. Sidhu, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi. Microstructural response of directionally solidified Rene 80 superalloy to gas-tungsten arc welding [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, **40**(1): 150~162
- 14 O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi. On the role of liquated γ' precipitates in weld heat affected zone microfissuring of a nickel-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, **403**(1-2): 77~86
- 15 R. K. Sidhu, N. L. Richards, M. C. Chaturvedi. Effect of aluminium concentration in filler alloys on HAZ cracking in TIG welded cast Inconel 738LC superalloy[J]. *Mater. Sci. Technol.*, 2005, **21**(10): 1119~1131

栏目编辑:宋梅梅