

锆 4 合金交叉焊点的脉冲激光焊接特性

蔡 创¹ 李瑞丰³ 陶 汪^{1,2} 李俐群¹ 赵辉荣³ 侯 雪³ 闫相和⁴

¹ 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
² 哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001
³ 中核包头核燃料元件股份有限公司, 内蒙古 包头 014035
⁴ 国防科技工业焊接自动化技术研究应用中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 采用脉冲 Nd:YAG 激光对锆 4 合金的十字交叉焊点进行试验研究, 从焊点形貌、焊点成形系数和力学性能方面, 研究了脉冲激光工艺参数对锆 4 合金十字交叉点焊的影响规律。研究表明: 脉冲能量较小时, 激光热量输入不能充分熔化交叉焊点预留凸台, 焊点余高较大, 无法满足实际应用要求。在单位脉冲能量一定的前提下增大峰值功率减小脉冲宽度, 或增大激光脉冲的发射个数均可改善焊点的成形, 减小焊点余高, 得到较大的焊点深宽比。十字交叉焊点的最大拉伸载荷与焊点的深宽比成正比关系。

关键词 激光技术; 锆 4 合金; 脉冲激光; 焊点成形; 拉伸载荷

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0803008

Characteristics of Laser Pulsed Welding at Intersected Points of Zircaloy-4 Alloy

Cai Chuang¹ Li Ruifeng³ Tao Wang^{1,2} Li Liqun¹ Zhao Huirong³
Hou Xue³ Yan Xianghe⁴

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

³ China Nuclear Baotou Nuclear Fuel Elemental Corporation Limited, Baotou, Inner Mongolia 014035, China

⁴ Center of National Defense Science and Technology Industrial Welding Automation Technology Research and Application, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A study on intersected points of Zircaloy-4 alloy is carried out by using pulsed Nd:YAG laser. The effects of laser parameters on the intersected points are analyzed from the appearances, depth-to-width ratio and mechanical properties. The results show that the protrusion of the weld beads can not meet the demand because the convex platform fails to be molten amply with the improper parameters. With the peak power increasing and the pulse width decreasing, or the number of shots increasing when the single pulse energy remains unchanged, the protrusion of the weld beads decreases, and the depth-to-width ratio of the weld beads increases. The maximum tensile loads of the intersected points are proportional to the depth-to-width ratio.

Key words laser technique; Zircaloy-4 alloy; pulse laser; depth-to-width ratio; tensile load

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-20

作者简介: 蔡 创(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事锆合金激光焊接方面的研究。E-mail: caichuang@hit.edu.cn

导师简介: 李俐群(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光加工技术基础与应用等方面的研究。

E-mail: liliquan@hit.edu.cn(中国光学学会会员号: s040111759)

1 引言

锆合金的热中子吸收截面小,导热率高,高温力学性能好,加工性能优异,与核燃料相容性好,尤其对高温水、高温水蒸气也具有良好的抗腐蚀性,因而被广泛用作水冷动力堆的元件包壳材料及堆芯结构材料^[1]。压水反应堆堆芯核燃料组件中保护格架采用锆合金条带开槽后插接结构对核燃料棒起到定位和支撑的作用。为达到良好的支撑作用以及避免对燃料棒的磨损,对插接结构焊点成形的控制成为关键的技术问题。

目前,国内外关于锆合金的高温腐蚀特性研究报道较多^[2-5],而涉及锆合金实际应用中特殊结构的焊接却鲜有报道。Shankar 等^[6-7]对 Zircaloy-4 合金钨极惰性气体保护焊(TIG)和电子束焊接接头的组织和显微硬度进行了研究,结果表明,相对于电子束焊接,TIG 焊由于其冷却速度慢和保护性差,接头组织针状 α 相粗大,吸氢吸氧导致接头的显微硬度值大大增加。锆合金的化学性能活性很强,在受热条件下很容易与周围环境中的氢、氧、氮等气体发生反应,如在 200 °C 左右和氧发生反应,300 °C 时开始吸氢,400 °C 与氮发生反应^[8],因此,宜采用能量集中且保护较好的高能束焊接方法,提高接头的加热和冷却速度。赵异萍^[9]研究了连续激光工艺参数对锆 4 合金试板焊缝成形的影响,指出焊缝的宽度和深度随激光功率的增大而增大,随焊接速度的减小而增大,并得到最佳焊缝成形的入焦量范围。相对于连续激光,脉冲激光热输入量小,定位精度高,更加适用于格架条带(厚度为 0.457 mm)插接结构的焊接。Song 等^[10]采用脉冲 Nd:YAG 激光焊接 Zircaloy-4 合金定位格架,采用改进的焊缝结构减小焊点尺寸,避免了飞溅,提高了格架的压溃强度,通过有限元软件模拟焊缝长度对格架压溃强度的影响规律,并对条带弹簧的形状进行了优化设计,但是作者并未对脉冲激光焊接接头组织以及工艺参数对焊点成形的影响规律做详尽的报道。

本文采用脉冲激光对锆合金核燃料组件保护格架交叉焊点的焊接特性进行研究。从焊点形貌,成形及力学性能方面对锆合金的脉冲激光点焊工艺特性进行了系统的分析,为核燃料组件保护格架的制备提供试验基础。

2 试验材料和方法

焊接设备采用德国 TRUMPF 公司生产的 Nd:YAG 固体脉冲激光器(型号: TruPulse556),主

要参数为最大峰值功率 10 kW,波长 1.06 μm ,最小光斑直径 0.9 mm,光纤直径 600 μm 。焊接过程处于抽真空后充氩的密闭腔室内以防止锆合金焊接过程中的吸氢和吸氧。激光头部位配备同轴 CCD 摄像系统,便于交叉焊点的对中。

试验采用热轧态的锆 4 合金条带,其化学成分如表 1 所示,厚度为 0.457 mm,形状由保护格架组装要求冲压出凹口和凹槽,焊点位置处条带组装局部示意图及焊后外观如图 1 所示。在进行焊接试验前,对条带进行去应力退火,退火设备为真空度高于 10^{-3} Pa 的热处理炉,退火温度为 550 °C,退火时间为 2.5 h,炉冷却至 66 °C 取出。采用超声波对条带进行清洗,以去除表面油污,超声波清洗介质采用丙酮,清洗时间约为 40 min。

表 1 锆 4 合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of Zr-4 alloy
(mass fraction, %)

Sn	Fe	Cr	Zr
1.5	0.2	0.1	Bal.

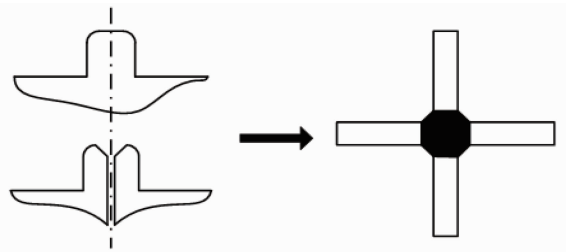


图 1 条带插接局部示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intersected point

焊后将保护格架十字交叉焊点从中心部位沿与开槽条带平行方向切割并用 XQ-2B 型镶嵌机制备试样,将镶好试样用 320、600、800、1000、1500 号水砂纸逐级打磨,然后用粒度为 1.5 μm 的金刚石抛光剂抛光,抛光后的试样在体积比 $V(\text{HNO}_3):V(\text{HF}):V(\text{H}_2\text{O})=45:5:50$ 的腐蚀液中腐蚀约 5 min,待试样表面呈现浅灰色时用大量水冲洗后,再用无水乙醇清洗吹干后即可进行金相观察,观察设备采用日本 OLMPUS 公司生产的 GX-71 型金相显微镜。采用 INSTRON 5500R 型电子万能材料试验机,测试十字交叉焊点(插接结构两端一对焊点)的最大拉伸载荷,设计特殊夹具分别夹持内条带沿与插接方向相反方向进行拉伸,载荷加载速率为 0.2 mm/min。

3 结果与讨论

3.1 交叉焊点成形

实际应用中,为防止定位格架焊点磨损燃料棒,

以及阻碍冷却介质,对焊点的尺寸提出严格的要求:焊点余高不能超过 0.5 mm,下塌不能超过 1.5 mm,熔宽小于 3.3 mm。焊点极限尺寸示意图如图 2 所示。图 3 所示为锆 4 合金十字交叉焊点外观形貌,可以看出,在合适的工艺参数下,条带插接处达到良好的冶金结合,焊点对中性较好无明显偏差,尺寸规则,可满足实际应用的要求。

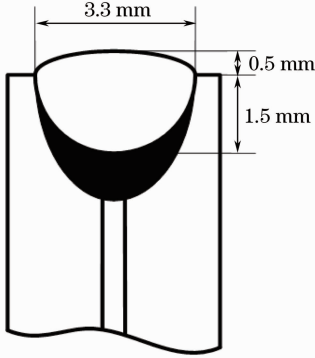


图 2 焊点最大尺寸

Fig. 2 Schematic diagram of the maximum weld size

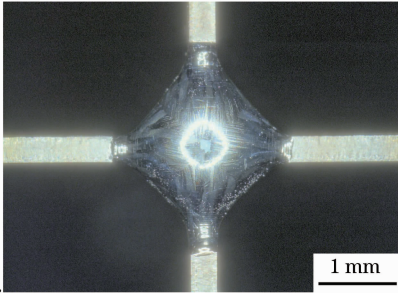


图 3 焊点外观形貌

Fig. 3 Typical appearance of weld bead

3.2 工艺参数对焊点成形的影响

脉冲激光采用方波波形,如图 4 所示。脉冲激

光主要影响参数^[11]有:峰值功率 P_p ,脉冲频率 f ,脉冲宽度 t ,单位脉冲能量 E_p ,脉冲发射个数 N 。其中 E_p 与 P_p 和 t 的关系为

$$E_p = P_p \cdot t. \quad (1)$$

而每个焊点总的热量输入是单位脉冲能量 E_p 与脉冲发射个数 N 的乘积:

$$E = E_p \cdot N. \quad (2)$$

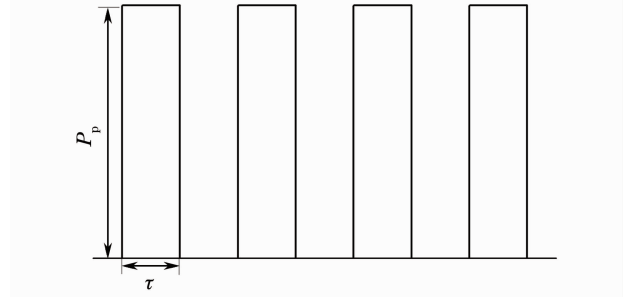


图 4 脉冲激光波形示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pulse laser waveform

3.2.1 峰值功率和脉冲宽度对焊点成形的影响

为研究峰值功率和脉冲宽度对焊点成形的影响,设置了参考参数:峰值功率为 3000 W,脉冲宽度为 9 ms,脉冲频率为 17 Hz,脉冲发射个数为 4 个,单脉冲能量为 27 J,总热输入量为 108 J,得到的焊点成形如图 5(a)所示。在相同单脉冲能量下,增大峰值功率(编号 1#)或脉冲宽度(编号 2#),焊点成形分别如图 5(b)和 5(c)所示。可以看出,增大脉冲宽度后,由于峰值功率的减小,焊点余高大大增大,超过指标要求(小于等于 0.5 mm)。究其原因,虽然脉冲能量保持不变,但是由于峰值功率的减小,激光的穿透能力减弱,从而造成焊点余高增大。对参考参数和图 5 中的两种参数下焊点深宽比进行对比,如表 2 所示。

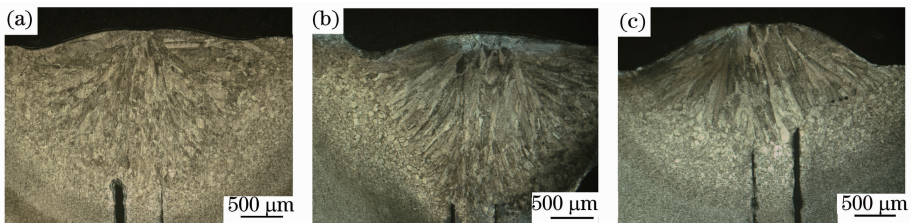


图 5 不同参数下焊点形貌。(a) 参考参数; (b) 增大峰值功率; (c) 增大脉冲宽度

Fig. 5 Appearance of weld beads for different parameters. (a) Reference values; (b) increase the peak power; (c) increase the pulse width

根据表 2 可知,在保证相同单脉冲能量情况下,峰值功率和脉宽的不同匹配方式将会对焊点成形产生不同的影响。在保证相同单脉冲能量的情况下,采用增大峰值功率、减小脉宽的匹配方式,激光能量

更加集中,就可以获得更大的焊点深宽比。相反若减小峰值功率、增大脉宽,光束能量分散产生类似热传导焊的热量传输效果,焊点熔深减小从而导致深宽比减小,焊点成形较差。

表 2 相同单脉冲能量下的焊点深宽比
Table 2 Depth-to-width ratio of weld beads
with the same E_p

	Peak power /W	Pulse width /ms	Depth-to- width ratio
Reference value	3000	9	0.55
1#	4500	6	0.66
2#	2250	12	0.40

3.2.2 脉冲个数对焊点成形的影响

由于脉冲激光焊接是多个单脉冲叠加共同作用的结果,因此有必要研究激光脉冲发射个数对焊点成形的影响。当单脉冲能量为 25.5 J,脉冲发射个数分别为 2 和 5 时,焊点形貌如图 6(a)和(b)所示。可

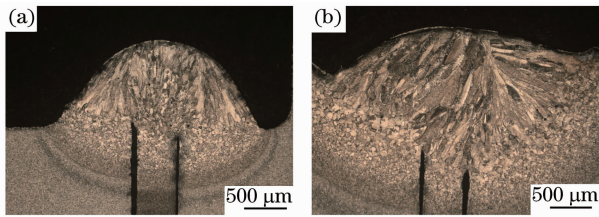


图 6 增大脉冲发射个数焊点形貌。

(a) 脉冲个数为 2; (b) 脉冲个数为 5

Fig. 6 Cross sections of weld bead as the number of shots increases. (a) Two shots; (b) five shots

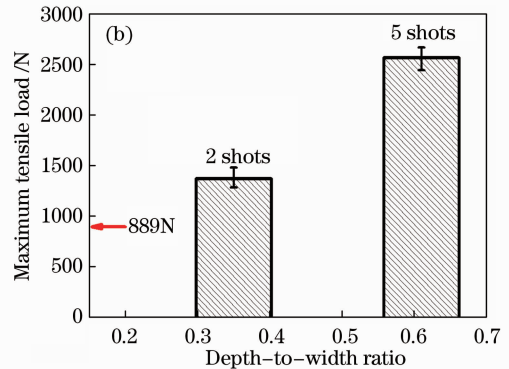
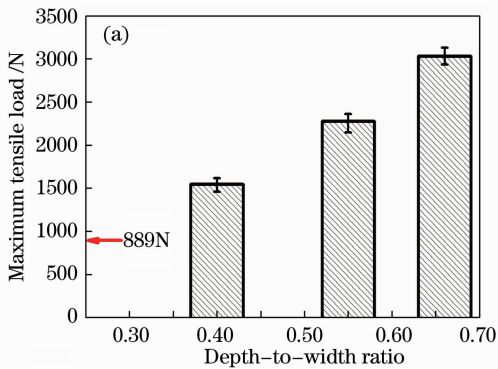


图 7 焊点最大拉伸载荷。(a) 峰值功率和脉冲宽度; (b) 脉冲发射个数

Fig. 7 Maximum tensile load of weld beads. (a) Peak power and pulse width; (b) number of shots

4 结 论

采用脉冲激光成功实现锆 4 合金条带插接结构的点焊。当工艺参数不合适时,焊点的余高无法满足要求,在单位脉冲能量一定的前提下增大峰值功率减小脉冲宽度,或增大激光脉冲的发射个数均可改善焊点的成形。焊点深宽比的增大有助于提高焊点的最大拉伸载荷。

以看出,脉冲个数为 2 时,热输入量较小导致插接结构预留凸台并未完全被熔化,焊点的余高明显大于 0.5 mm,接头未能达到良好的冶金结合。增大脉冲发射个数后,持续的脉冲作用于焊点,焊点成形良好,得到适当的熔深和熔宽,深宽比达到 0.61。

3.3 交叉焊点力学性能

为达到良好的支撑效果,要求插接结构两端一对焊点的最大拉伸载荷不低于 889N。图 7 为峰值功率和脉冲宽度变化时交叉焊点最大拉伸载荷变化情况,可以看出,本文所采用的工艺参数下焊点的最大拉伸载荷均可满足实际应用的要求,十字交叉焊点最大拉伸载荷与焊点成形有密切的关系。在单脉冲能量不变时,增大峰值功率后,焊点深宽比参考参数增大 20%,最大拉伸载荷相应增大 33%,而当增大脉冲宽度后。焊点深宽比参考参数减小 27.3%,最大拉伸载荷减小 32.1%。图 7(b)为脉冲发射个数增大后交叉焊点最大载荷的变化情况,当脉冲个数增大至 5 时,焊点最大拉伸载荷增大 87.3%。观察焊点断面形貌可以发现,断裂均发生在易产生成分偏析的熔合线附近,即柱状晶和等轴晶的交界处,因此可以推断焊点的最大拉伸载荷与接头焊缝组织的关系不大,主要与焊点成形即深宽比有关。

参 考 文 献

- 1 Yang Wendou. Reactor Materials Science[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. 18-20.
杨文斗. 反应堆材料学[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 18-20.
- 2 K N A P Kumar, J A Szpunar, Z He. Microstructural studies and crystallographic orientation of different zones and δ -Hydrides in resistance welded Zircaloy-4 sheets[J]. J Nuclear Materials, 2011, 414(3): 341-351.
- 3 H H Kim, J H Kim, J Y Moon, *et al.*. High-temperature oxidation behavior of Zircaloy-4 and Zirlo in steam ambient[J]. J Materials Science and Technology, 2010, 26(9): 827-832.
- 4 A Yilmazbayhan, E Breval, A T Motta, *et al.*. Transmission electron microscopy examination of oxide layers formed on Zr

- alloys[J]. J Nuclear Materials, 2006, 349(3): 265-281.
- 5 W Qin, C Nam, H L Li, *et al.*. Tetragonal phase stability in ZrO₂ film formed on zirconium alloys and its effects on corrosion resistance[J]. Acta Material, 2007, 55(5): 1695-1701.
- 6 A R Shankar, V R Raju, R M Narayana, *et al.*. Corrosion of Zircaloy-4 and its welds in nitric acid medium[J]. Corrosion Science, 2007, 49(9): 3527-3538.
- 7 S Tonpe, N Saibaba, A R Shankar, *et al.*. Process development for fabrication of Zircaloy-4 dissolver assembly for reprocessing of spent nuclear fuel[J]. Energy Procedia, 2011, 7: 459-467.
- 8 Zhang Xudong, Chen Wuzhu, Chen Jiarui, *et al.*. Laser beam welding of Zircaloy-4 [J]. Applied Laser, 1999, 19(5): 279-284.
张旭东, 陈武柱, 陈加瑞, 等. 锆-4 合金的激光焊接研究[J]. 应用激光, 1999, 19(5): 279-284.
- 9 Zhao Yiping. The influence of laser welding technology parameters on welding seal of Zr-4 alloy[J]. J Taiyuan Heavy Machinery Institute, 1999, 20(3): 224-229.
赵异萍. 激光焊接工艺参数对锆 4 合金焊缝形成的影响[J]. 太原重型机械学院学报, 1999, 20(3): 224-229.
- 10 K N Song, S S Kim, S H Lee, *et al.*. Laser welding unit for intersection line welding of spacer grids inner straps and its application[J]. J Laser Micro/Nanoengineering, 2009, 4(1): 11-17.
- 11 Chen Yanbin. Modern Laser Welding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 71-72.
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 71-72.

栏目编辑: 宋梅梅