

# 光斑直径对纯钛薄片激光封孔的影响

黄永德<sup>1,2</sup>, 毛锦荣<sup>1</sup>, 周兴汶<sup>1</sup>, 陈玉华<sup>1</sup>, 何 鹏<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 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:** 采用 Nd:YAG 低功率脉冲激光对 0.4 mm 纯钛薄片的微孔进行封焊, 研究光斑直径对焊缝成形的影响规律, 并分析作用于封接区的激光能量变化。研究表明, 当光斑直径不大于 0.4 mm 时小孔能够完全封接, 封接区有效厚度随着光斑直径的增大呈先增大后减小的趋势, 其最大有效封接厚度约为 352  $\mu\text{m}$ , 封接接头主要由不同形态的  $\alpha$  晶粒组成, 在封接区边缘存在较大的热影响区。另外, 随着光斑直径的增大, 封接区上表面熔化面积基本不变, 但封接模式由匙孔型向热导型转变, 其中热导型模式更适合小孔封接。对作用于封接区的激光能量计算发现, 理论能量值与光斑直径成正比, 而实际金属熔化量与光斑直径成反比, 造成此现象的原因是小孔边缘熔化的金属在重力等力的作用下向小孔内流动, 从而可以吸收更多的激光能量。

**关键词:** 纯钛; 激光封孔; 光斑直径; 焊缝成形; 激光能量

**中图分类号:** TG456.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)08-2429-06

纯钛 (CP-Ti Grade 1) 因具有良好的生物相容性、耐腐蚀性、密度小、戴用舒适等特点, 被广泛应用于植入式医疗器件及整形外科修复体上<sup>[1,2]</sup>。心脏起搏器是典型的植入式医疗器件, 其外壳以及内部电池所用材料为 CP-Ti, 由于其尺寸小, 并且在人体内工作, 因此, 需要对其进行高可靠封装<sup>[3]</sup>。在心脏起搏器中, 电池外壳的封焊技术国内外已掌握, 然而对于电池中电解液注入后微孔的封焊在国内外仍然是个难题。

目前, 对心脏起搏器电池微孔的封焊处理办法是先锡封焊该微孔, 然后再用激光封焊盖片, 对锡封焊口进行保护。锡焊封孔的可靠性不高, 且会造成松香的污染; 另外, 二次封焊会增加电池的体积与重量。为了解决上述问题, 心脏起搏器的主要制造厂商 (Medtronic 公司) 设想, 在电解液注入后, 通过激光直接对该微孔进行封焊。在微孔的激光封焊研究方面, Huang 等人<sup>[4]</sup>采用双脉冲激光对纯钛薄片微孔的封焊进行了初步探索, 发现微孔的封接程度与激光能量密切相关。Pequegant 等人<sup>[5]</sup>研究了电解液对激光封接接头性能影响, 发现在有电解液情况下, 封接微孔需要更大的激光能量, 且电解液会影响焊缝组织结构及接头性能。滕文华等<sup>[6]</sup>通过开展微孔激光封焊技术研究发现, 微孔封焊过程中采用激光正离焦量更加可

靠。陶汪<sup>[7]</sup>通过视觉传感系统观察发现, 点焊过程熔池动态变化是一个先扩展后收缩过程, 且熔池扩展速度决定焊点的形成过程和最终焊点尺寸。通过上述文献不难发现, 微孔的激光封焊技术的研究相对较少, 而且还不成系统, 目前还存在许多基础性问题尚未解决, 例如: 微孔激光封接的接头形成过程及机理、表面张力等作用力在微孔封接中的作用机制, 小孔对激光能量吸收的影响等。

基于以上分析, 本工作着重研究光斑直径对微孔激光封接的影响, 通过观察不同光斑直径下焊缝表面形貌、截面成形及接头性能, 研究光斑直径对封接接头成形的影响规律, 并分析不同光斑直径下作用于试样上的激光能量变化, 从而为心脏起搏器中电池的微孔封焊技术提供理论指导。

## 1 实 验

试验采用直径为 38.20 mm, 厚度为 0.40 mm 的纯钛 (CP-Ti Grade 1) 薄片, 其化学成分 (元素最大含量) 如表 1。CP-Ti 表面光滑且每个材料中打有均匀分布的 16 个直径为 100  $\mu\text{m}$  的小孔, 相邻微孔之间的距离为 5 mm, 结构如图 1 所示。焊前酸洗材料表面去除氧化膜, 再用丙酮清洗材料去除杂质, 焊接过程采用氩气进行保护。

收稿日期: 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51365044); 南昌航空大学研究生创新基金 (YC2015025)

作者简介: 黄永德, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: huangydhm@nchu.edu.cn

表 1 试验用 CP-Ti Grade 1 的化学成分

Table 1 Chemical composition of CP-Ti Grade 1 (ω/%)					
N	C	H	O	Fe	Ti
0.03	0.1	0.015	0.18	0.2	Bal.

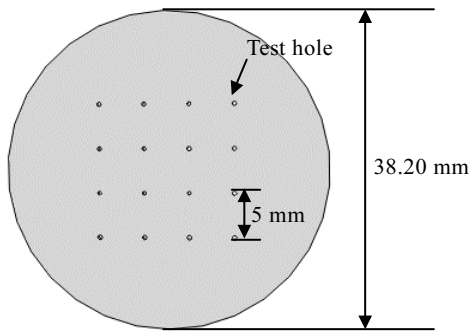


图 1 带有 16 个测试孔的纯钛薄片示意图

Fig.1 Schematic of Ti disc with 16 test holes

试验设备采用 Sisma 公司生产的 SL80 型平均功率为 80 W 的 Nd:YAG 激光系统,激光波长为 1.06 μm,在可控参数中,激光功率百分比  $P$  为平均输出功率的百分比,可调范围为 0%~30%;脉冲宽度  $T$  可调范围为 0.3~9.9 ms;脉冲频率  $F$  可调范围为 0~15 Hz;光斑直径可调范围为 0.2~1.2 mm;封孔时采用表面聚焦。

根据前期试验研究结果,试验过程中采用单脉冲波形,固定平均激光功率百分比为 26% (平均功率为 20.8 W),激光脉冲宽度为 6 ms,不采用激光频率,每个参数封接 3 个小孔试样,试验所用光斑直径如表

2 所示。

焊后以实际封接区的有效厚度评定封孔质量,采用 Nova Nano SEM450 型扫描电镜观察焊后封接区表面形貌,沿焊缝中心分开截取试样并制备金相,采用体积比为 HF:HNO<sub>3</sub>:HCL:H<sub>2</sub>O=1:3:5:10 的腐蚀剂腐蚀焊缝及部分母材,采用 MR5000 倒置金相显微镜观察焊缝横截面形貌和微观组织结构,采用 MATLAB 7.0 对不同光斑直径下的激光功率密度分布进行计算。

## 2 结果及分析

### 2.1 不同光斑直径下封接区表面形貌

图 2 所示为不同光斑直径下的封接区正面成形。从整体可看出封接区表面无氧化,呈银白色,正面微孔被完全密封,但中心有不同程度的下凹。另外,当光斑直径较小时,封接区上表面有明显波浪纹,随着光斑直径的增大,波浪纹逐渐消失。在激光冲击力作用下,熔化的金属以波浪纹向微孔周围扩展,分析可知,光斑直径越小,激光作用在纯钛金属表面的功率密度越集中,从而导致作用在熔化的金属表面的冲击力越大,金属冷却后所形成的波浪纹越明显,而随着光斑直径逐渐增大,作用在焊缝区表面激光冲击力减

表 2 试验工艺参数

Table 2 Process parameters of experiment		
Laser power, $P/W$	Pulse width, $T/ms$	Spot size, $d/mm$
20.8	6	0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

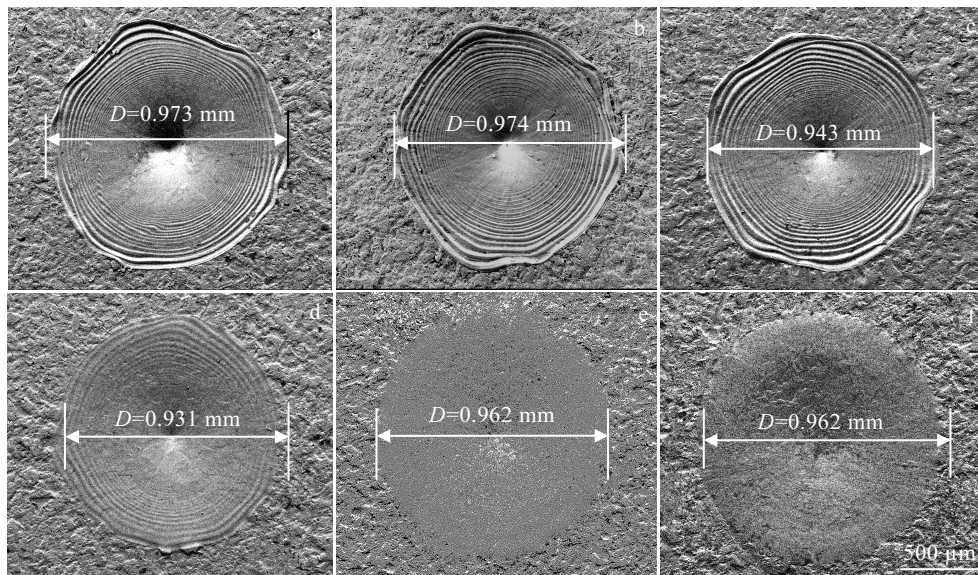


图 2 不同光斑直径下的封接区正面形貌

Fig.2 Overall appearance of weld front surface under different laser spot sizes: (a)  $d=0.2$  mm, (b)  $d=0.3$  mm, (c)  $d=0.4$  mm, (d)  $d=0.6$  mm, (e)  $d=0.8$  mm, and (f)  $d=1.0$  mm

弱，液态金属获得的冲击波能量减小，最后液态金属不以冲击波的形式向周围扩展，波浪纹基本消失。值得注意的是，从图 2 中可看出，在不同的光斑直径条件下，封接区上表面熔化区的直径  $D$  变化不大，都在 0.950 mm 左右，具体原因后文一并分析。

图 3 所示为对应图 2 部分焊缝的背面成形，从图 3 中可看出，当光斑直径在 0.2~0.4 mm 范围内时，微孔下沿被熔化，且熔化区的大小随着光斑直径的增大而减小，当光斑直径为 0.4 mm 时，背面微孔基本被熔化的金属填充。当光斑直径大于 0.6 mm，背面的微孔未被封接。由此说明，在本研究设定的能量输入条件下，若要完全封接微孔，其光斑直径应不大于 0.4 mm。

2.2 不同光斑直径下封接区横截面形貌

图 4 为不同光斑直径的封接区横截面形貌，从图 4a 中可看出，当光斑直径为 0.2 mm 时，微孔被完全封接，但封接区上表面出现匙孔，其封接区有效厚约为 297  $\mu\text{m}$ 。而随着光斑直径增大到 0.3 mm，封接区匙孔效应消失，此时有效封接区厚度约为 352  $\mu\text{m}$ ，如图 4b 所示。图 4c 是光斑直径为 0.4 mm 的封接区截面形貌，微孔基本封接，但下方并未完全填充，其有效厚度约为 0.349 mm。继续增大光斑直径，当光斑直径大于 0.6 mm 时，微孔开始出现未完全封接现象，有效封接区域厚度减小，如图 4d~4f 所示。

结合封孔表面及横截面形貌可看出，不同光斑直径下封接区域的上、下表面都出现不同程度的凹陷现象。分析认为，纯钛在高温下无相变产生，即体积不发生变化，根据质量守恒定律，凹陷的金属用于填充微孔。凹陷现象主要是由熔化金属的表面张力作用导致的。

根据上述结果，随着光斑直径的增大，微孔封接区的厚度先增大后减小，当光斑直径为 0.3 mm 时，封接效果最好，其有效厚度最大，约为 352  $\mu\text{m}$ 。另外，根据

热导型焊接激光功率密度范围为  $10^2\sim 10^3 \text{ W/mm}^2$  [8] 可知，当光斑直径  $\geq 0.3 \text{ mm}$  时，激光功率密度  $q \leq 883.23 \text{ W/mm}^2$ ，此阶段激光封孔模式应为热导型封接；当光斑直径  $\leq 0.2 \text{ mm}$  时，激光功率密度  $q \geq 1987.26 \text{ W/mm}^2$ ，此阶段为匙孔型封接（详细计算见后文）。由此可见，随着光斑直径增大，激光封孔模式由匙孔型向热导型转换，且热导型模式更适合微孔的封接。

2.3 封孔接头的微观组织

纯钛母材为均匀细小的  $\alpha$  晶粒 [9]，而焊缝组织经过高温重熔后与母材有较大的不同，为此，对典型封孔接头各区域的组织进行分析。图 5 是光斑直径为 0.3 mm 的封接接头宏观横截面形貌及各区的显微组织

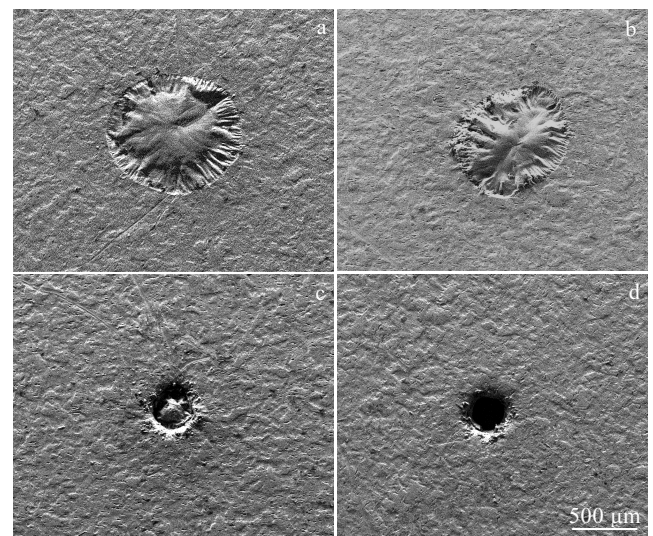


图 3 不同光斑直径下的封接区背面形貌  
Fig.3 Overall appearance of weld rear surface under different laser spot sizes: (a)  $d=0.2 \text{ mm}$ , (b)  $d=0.3 \text{ mm}$ , (c)  $d=0.4 \text{ mm}$ , and (d)  $d=0.6 \text{ mm}$

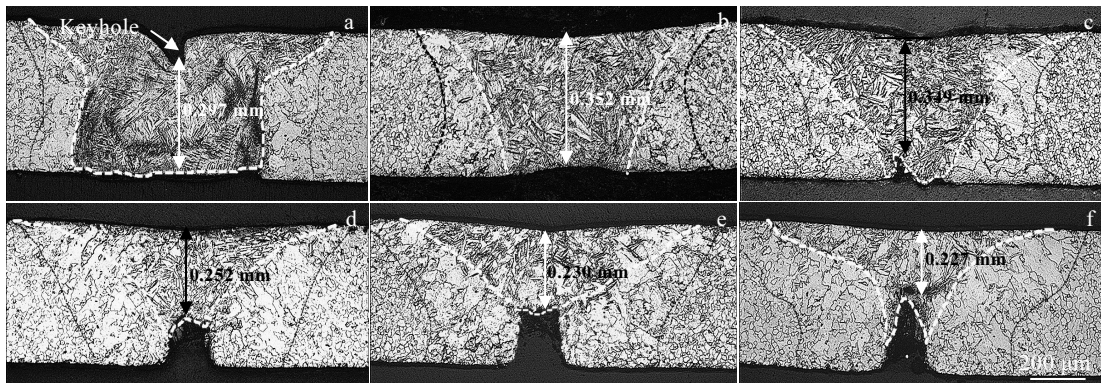


图 4 不同光斑直径下封接区截面形貌

Fig.4 Cross section morphologies of weld under different laser spot sizes: (a)  $d=0.2 \text{ mm}$ , (b)  $d=0.3 \text{ mm}$ , (c)  $d=0.4 \text{ mm}$ , (d)  $d=0.6 \text{ mm}$ , (e)  $d=0.8 \text{ mm}$ , and (f)  $d=1.0 \text{ mm}$

图。从图 5a 可看出，封接区两侧边缘存在较大的热影响区，且呈对称状。图 5b 为焊缝顶部区域组织，从图中可看出，焊缝顶部为分布不同大小的锯齿状  $\alpha$  (标记 S)、柱状  $\alpha$  晶 (标记 C)、针状  $\alpha$  晶粒 (标记 A) 和板条状  $\alpha$  晶粒 (标记 P)，且晶粒向焊缝两边生长。图 5c 为焊缝中心组织，由于焊缝中心高温停留时间长，晶粒长大，而中心两侧过冷度较大，晶粒更加细化。可看出整个焊缝中心紧密无规则分布着大量锯齿状  $\alpha$ 、编织的针状  $\alpha$  晶和板条状  $\alpha$  晶粒。图 5d 为焊缝热影响区组织，可看出焊缝边缘大量针状  $\alpha$  晶约成 45° 角呈柱状生长，而热影响区的  $\alpha$  晶明显长大，形成柱状  $\alpha$  晶，且夹杂部分锯齿状  $\alpha$  晶。图 5e 为母材与热影响区过渡区域显微组织，母材  $\alpha$  晶均匀细小，该区域为大块的柱状  $\alpha$  晶。

### 3 讨论

激光点焊过程中，金属熔化量主要取决于激光对材料的作用，当入射能量一定时，光斑直径越大，因能量分布密度的差异，其熔化区域越小<sup>[10]</sup>。但是，根据前文，不同光斑直径下封接区上表面熔化面积基本相同，这与文献资料所描述的规律不相符，而金属熔化量与光斑直径之间的关系与文献相同。为了分析上述原因，结合试验材料本身有小孔存在这一特殊结构特征，对不同光斑直径下作用在试样上的理论能量进行计算与分析。

Nd:YAG 是一种多模激光，可假设在焦点附近(焦

深范围内)的光束接近于 Gauss 光束。对激光束在焦点附近光斑上的功率密度分布可按 Gauss 分布处理<sup>[11]</sup>，即：

$$q(x,y) = \frac{12P}{\pi d^2} e^{-\frac{12(x^2+y^2)}{d^2}} \quad (-\infty < x,y < +\infty) \quad (1)$$

式中： $d$  为光斑直径(mm)； $P$  为激光功率 (W)； $q(x,y)$  为功率密度 (W/mm<sup>2</sup>)。

对不同光斑直径下的激光功率密度分布进行计算，计算结果如图 6 所示。从图 6 可看出，随着光斑直径增大，激光峰值功率密度显著减小，但激光功率密度分布宽度略有增大。当光斑直径由 0.2 mm 增大到 0.6 mm 时，中心功率密度由 1987.26 W/mm<sup>2</sup> 减小至 220 W/mm<sup>2</sup>。当除去透过直径为 0.1 mm 小孔区域的激光功率作用后，可得不同光斑下作用在纯钛上的理论激光功率： $P_{0.2}=8.16$  W； $P_{0.3}=13.66$  W； $P_{0.4}=16.40$  W； $P_{0.6}=18.80$  W。

另外，考虑光束经过无像差光学系统变化后，以一定的束散角聚焦到材料表面，可能可以作用于小孔内壁。根据激光聚焦前后光束聚焦半角和束腰半径乘积不变，即： $\omega_r \theta_f = K_f = 0.337 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ <sup>[12]</sup>。那么，激光以  $\theta$  角度射入小孔，作用于小孔内壁激光功率为： $P_{\text{内壁}} = P_{\text{小孔}} \sin\theta$ 。可计算出光斑直径为 0.2 mm 时，最大激光聚焦半角只有 0.193°，由此可见，作用于小孔内壁的激光能量可以忽略不计。

通过理论计算发现，不同光斑直径下作用于纯钛的理论上的总激光能量与封接区实际金属熔化量明显相悖。分析认为，激光在封接小孔过程中，中心部分激

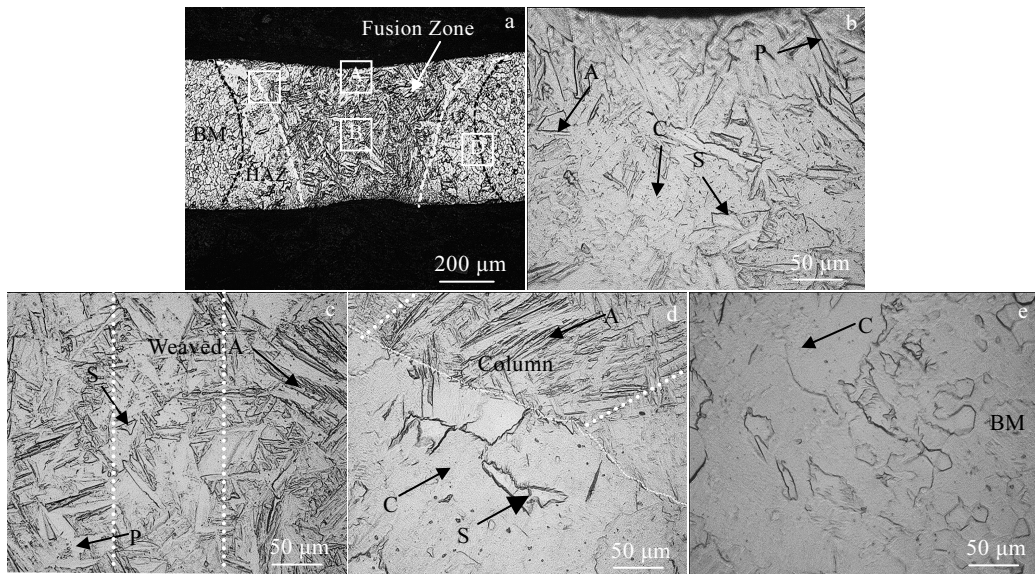


图 5 封接接头显微组织

Fig.5 Microstructures of sealing joint: (a) macro profile of sealing joint, (b) joint top area A, (c) sealing joint centre B, (d) HAZ C, and (e) transition zone D

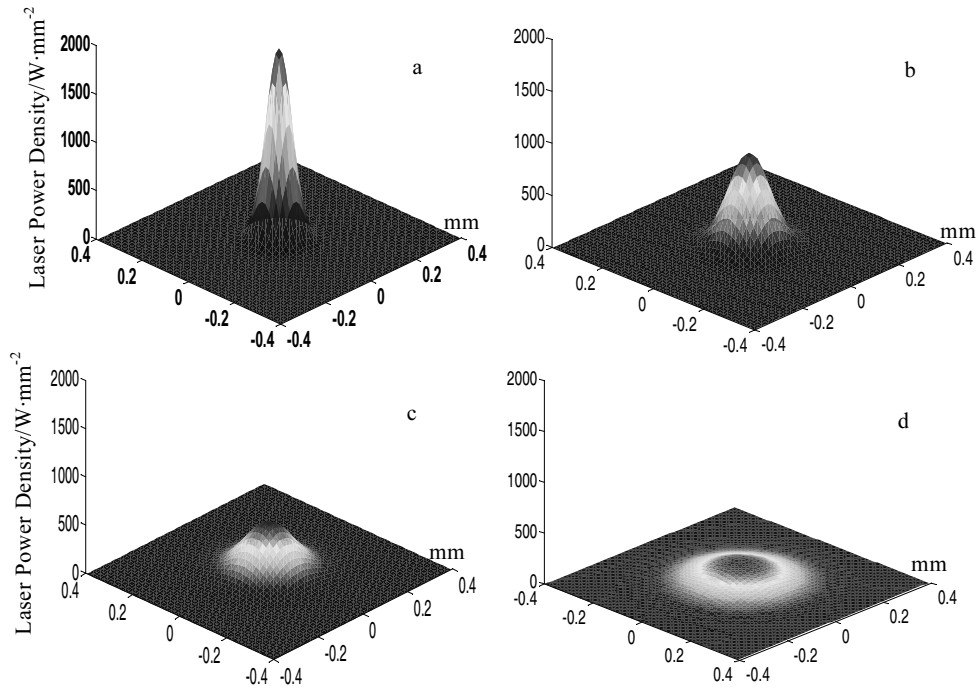


图 6 不同光斑直径下激光功率密度分布

Fig.6 Distribution of laser power density under different laser spot sizes: (a) 0.2 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.4 mm, and (d) 0.6 mm

光可以透过小孔，但是有效作用于试样表面的激光能量，使得小孔边缘金属熔化，而熔化的金属在重力、激光反冲压力、表面张力等力的作用下向小孔内沿流动，形成如图 7b 所示的中间状态。该状态主要用于本研究分析，实际的激光小孔封接动态过程有待后续详细研究。

微孔边缘的熔化金属向内沿流动，势必造成有效吸收激光能量的区域增大，如图 7b 所示。图 7a 为激光功率密度的分布情况，由图 7a 可看出，光斑直径越小，在小孔边缘的激光功率密度越高。所以光斑直径为 0.2 mm 的小孔边缘要最先熔化，熔化金属的量也会越多，造成液态金属以熔化波的形式向纯钛内部扩展，在深度方向上金属熔化量由激光功率密度决定，即激光功率密度越大，向下熔化的金属量越多<sup>[13]</sup>。而封接区表面的最终尺寸主要由熔池扩展速度决定<sup>[14]</sup>，熔池的扩展速度受激光冲击力的影响。分析可知，相对于单纯激光点焊（光斑直径越大，熔化区域越小），小孔的存在可能减少了一部分激光的冲击作用，即减少了液态熔池的扩展动能，并且由激光功率密度分布可知，光斑直径越小，中心区域相对减弱的冲击作用越大，使得熔化波的传播速度减少量越多。即相同时间下，光斑直径越小，熔化波的扩展距离减小量越多，从而可能造成不同光斑直径下的封接区上表面面积基本相同。

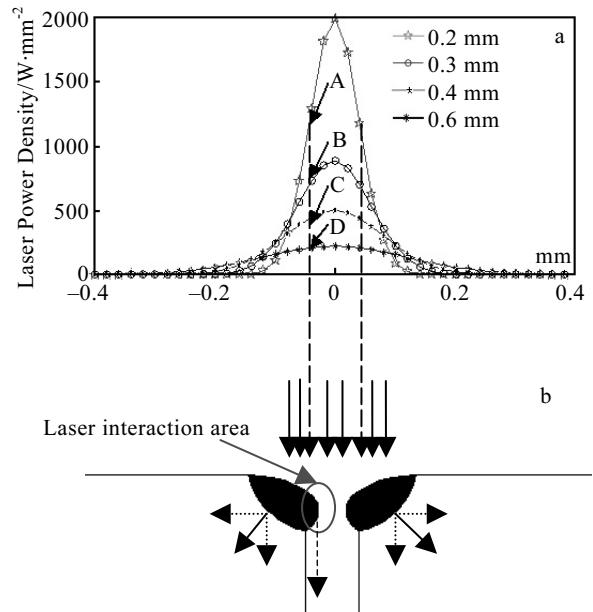


图 7 激光密度分布及激光作用示意图

Fig.7 Distribution of laser power density (a) and schematic diagram of laser action (b)

### 4 结 论

1) 封接区上表面波浪纹的成形及封接区域有效厚度与光斑直径大小密切相关，而封接区上表面面积与

光斑直径关系不大。当光斑直径不大于 0.4 mm 时, 能够完全封接小孔, 其最大有效封接厚度约为 352  $\mu\text{m}$ 。

2) 随着光斑直径增大, 激光封孔模式由匙孔型封接向热导型封接转变, 且热导型模式更适合小孔的封接。封接接头主要由锯齿状  $\alpha$  晶、柱状  $\alpha$  晶、针状  $\alpha$  晶粒和板条状  $\alpha$  晶粒组成, 且接头存在较大的热影响区。

3) 由于小孔存在, 作用于封接区的理论能量值与光斑直径成正比, 但小孔边缘金属熔化后, 液态金属在自身重力等力的作用下向小孔内流动, 使得实际吸收的激光能量增多, 从而导致金属熔化量与光斑直径成反相关。

#### 参考文献 References

- [1] Liu Bing(刘冰), Zhou Qing(周清), Qu Ruifeng(瞿瑞锋) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(4): 959
- [2] Huang Yongde(黄永德), He Peng(何鹏), Lin Tiesong(林铁松) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(10): 2079
- [3] Huang Dequn(黄德群). *China Medical Devices*(中国医疗设备)[J], 2009, 24(8): 73
- [4] Huang Y D, Pequegant A, Khan M I *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 2012, 24(3): 1
- [5] Pequegant A, Huang Y D, Khan M I *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(10): 2012
- [6] Teng Wenhua(滕文华), Liu Shijie(刘世杰), Shen Xianfeng(沈显峰) *et al.* *Applied Laser*(应用激光)[J], 2013: 33(5): 515
- [7] Tao Wang(陶汪). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [8] Huang Shisheng(黄石生). *Welding Science Foundation-Welding Method and Process Control Foundation*(焊接科学基础-焊接方法与过程控制基础)[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 580
- [9] Zhang Jianbin(张建斌), Yu Dongmei(余冬梅). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 247
- [10] Cai C, Li L Q, Tao W *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2016, 25(9): 3783
- [11] Qin Guoliang(秦国梁), Yang Yongbo(杨永波), Lin Yong(林泳) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2002, 23(6): 13
- [12] Wang Jiajin(王家金). *Laser Processing Technology*(激光加工技术)[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992: 335
- [13] Lei Huadong(雷华东), Wang Baorui(王宝瑞), Huang Wenrong(黄文荣) *et al.* *Laser Technology*(激光技术)[J], 2005, 29(1): 28
- [14] Tao Wang(陶汪), Li Liquan(李俐群), Chen Yanbin(陈彦宾) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(11): 300

## Effect of Spot Size on Joint Formation of Laser Hole Sealing of CP-Ti Sheet

Huang Yongde<sup>1,2</sup>, Mao Jinrong<sup>1</sup>, Zhou Xingwen<sup>1</sup>, Chen Yuhua<sup>1</sup>, He Peng<sup>2</sup>

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

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

**Abstract:** Laser seal welding of 0.4 mm thick pure titanium sheet with holes was achieved by Nd:YAG pulse laser. The effect of laser spot size on the weld geometry of the sealed joint was studied. The results show that full seal welded joint can be achieved when the spot size is not larger than 0.4 mm. The effective thickness of sealing area increases at first and then decreases with the increasing of spot size. The maximum effective sealing thickness is about 352  $\mu\text{m}$ . The sealing joint consists of  $\alpha$  grains with different shapes, and there is a large HAZ in the joint. Besides, with the increase of the spot size, the surface melting area of the sealed joint is basically unchanged, but the sealing mode changes from the keyhole to the heat-conduction type, and the heat-conduction model is more suitable for the hole sealing. Further, the calculated laser energy of sealing area shows that there is a positive proportion between the theoretical energy value and laser spot size, but the theoretical analysis does not match with the actual situation. The reason may be that the molten metal beside the hole flows into the hole under the effect of gravity and other forces, which cause the increasing of actual absorption of laser energy.

**Key words:** pure titanium; laser hole sealing; spot size; weld geometry; laser energy

Corresponding author: He Peng, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, E-mail: hepeng@hit.edu.cn