

基于紫铜填充中间层的黄铜激光焊接气孔控制

陈梅峰¹, 周广涛^{1,2,3*}, 吴世凯², 刘方¹, 张华¹

¹ 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

² 北京工业大学北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;

³ 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 采用中间过渡层的新方法研究了黄铜焊接气孔的控制, 对比分析了以紫铜为中间层的黄铜激光焊接和常规激光焊接获得的焊缝的气孔率, 结果表明: 在中间层条件下, 焊缝表面和内部的气孔率均大幅降低; 随着焊接速率增大, 气孔率逐渐减小, 当焊接速率为 2.2 mm/s 时, 气孔率几乎为零; 当焊接参数相同时, 中间层条件下的焊缝气孔率仅为常规激光焊接的 1/3, 焊接接头的力学性能优于常规激光焊接。在焊缝成形良好的前提下, 验证了采用紫铜为中间层的焊接方法控制黄铜激光焊接气孔缺陷的有效性。

关键词 激光技术; 激光焊接; 紫铜中间层; 黄铜; 焊接气孔

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302011

Controlling of Laser Welding Porosities of Brass Based on Filled Intermediate Layer of Copper

Chen Meifeng¹, Zhou Guangtao^{1,2,3*}, Wu Shikai², Liu Fang¹, Zhang Hua¹

¹ College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 362021, China;

² Beijing Engineering Researching Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

³ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The control of brass welding porosity is studied by adopting a new method of the intermediate transition layer. The weld porosities of brass laser welding under the copper intermediate layer condition and brass general butt laser welding are contrasted and analyzed. The research results reveal that the porosities of weld surface and weld interior are greatly reduced under the condition of the intermediate layer. As the welding speed increases, the porosity decreases gradually. The porosity is almost zero when the welding speed is 2.2 mm/s. When the welding parameters are the same, the porosity of the weld under the intermediate layer condition is barely one third of that in the normal butt laser welding of brass sheet. The mechanical properties of welded joint obtained at the intermediate layer condition is superior to that of welded joint obtained at normal butt laser welding. Under the premise of good weld formation, the effectiveness of the new method of the copper intermediate layer to control the porosity defects of brass laser welding is verified.

Key words laser technique; laser welding; copper intermediate layer; brass; welding porosity

OCIS codes 140.3460; 140.3295; 160.3900; 140.3390

1 引 言

黄铜凭借其优良的导热性、导电性和耐腐蚀性能而成为工业领域中重要部件的优选材料, 经常用

于法兰、散热器和蒸汽管等焊接结构件^[1-2]。由于锌的沸点低于铜的熔点, 所以在焊接过程中, 黄铜中锌的气化先于铜的熔化, 这一现象会导致锌剧烈蒸发, 随着熔池的凝固, 来不及逸出的锌蒸气被包埋在焊

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-11-20; 录用日期: 2018-12-13

基金项目: 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-16-M11)、北京市激光应用技术工程技术研究中心开放课题(BG0046-2018-07)、华侨大学研究生科研创新基金资助项目

* E-mail: zhouguangtao@hqu.edu.cn

缝中,形成气孔^[3-5]。焊缝中存在的气孔不但会削弱焊缝的有效工作截面积,还会产生应力集中,存在诱发脆性断裂的可能,甚至会对疲劳强度和动载强度产生不利影响,使焊缝金属的韧性和强度明显降低^[6]。气孔缺陷在很大程度上限制了黄铜在高新技术和民用领域中的应用,成为该材料进一步实用化的阻碍。

目前,关于锌气孔的研究多集中于锌-钢的焊接方面,而对黄铜焊接气孔的研究则鲜有报道^[7-8]。对于其他金属材料与锌合金的激光焊接,国内外主要通过双光束激光焊接和添加元素等方法来减少锌蒸发引起的焊接气孔。张婧等^[9]认为,采用双光束激光焊接能减缓熔池凝固过程,有利于锌蒸气的排出,减小气孔生成的倾向,但这种方法的加工成本较高,而且会出现焊接接头下陷程度大等现象。单际国等^[10]在激光焊接过程中添加了异种元素,这些元素能与锌发生化学反应,从而减少了气孔。但这种方法会增加焊缝的氧化,可能会使焊缝的力学性能有所降低,难以与母材匹配^[11]。可见,上述这些方法都不能有效解决气孔问题。

本文针对目前激光焊接黄铜焊缝中存在的气孔缺陷,将紫铜应用于黄铜的激光焊接中,提出了以紫铜作为中间层的黄铜薄板的对接激光焊,研究了在紫铜作为在中间层的条件下,焊缝气孔率的变化规律及气孔产生的机理,为控制与防治激光焊接黄铜时的气孔缺陷提供了理论参考和实验依据。

2 实验方法与原理

2.1 实验材料

实验材料为 H62 黄铜和 T2 紫铜。基体黄铜试样的规格为 100 mm×50 mm×1.5 mm,中间层紫铜试样的规格为 100 mm×0.3 mm×1.5 mm。两种金属的化学成分如表 1 所示。采用脉冲 Nd:YAG 激光器进行焊接实验,焊接过程中的激光功率

表 1 H62 黄铜和 T2 紫铜的化学成分

Table 1 Chemical composition of H62 brass and T2 copper

Element	Mass fraction of element in H62 brass	Element	Mass fraction of element in T2 copper
Cu	<63.500	Cu	>99.900
Fb	0.080	Fe	0.010
Fe	0.150	Ca	0.018
Sb	0.005	Zn	0.005
P	0.010	Si	0.003
Others	<36.250	Others	<0.070

为 3.5 kW,焊接速率为 1.0~2.2 mm/s,激光光斑直径为 2 mm。为防止高温氧化,采用氩气作为保护气,保护气流量为 20 L/min。

2.2 基于中间层的激光焊接模型与原理

在紫铜作为中间层条件下的黄铜激光焊接模型如图 1 所示。采用单因素法,选择紫铜为中间过渡层,改变焊接速率,有目的地调整焊接线能量,进行多组对比实验。焊前采用化学和机械方法去除试样表面的氧化膜,在焊接过程中采用高速摄像机记录蒸气团的动态行为。分别针对黄铜进行以紫铜作为中间层的激光焊接和常规激光焊接,焊接完成后,在获得的焊缝表面和内部取样,采用体式显微镜和扫描电镜观察两种焊缝表面以及内部的气孔率。

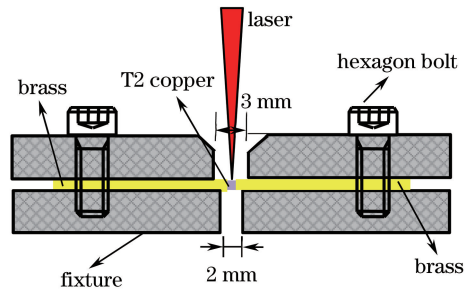


图 1 焊接模型

Fig. 1 Welding model

焊接是个局部快速加热到高温并随后冷却的过程,随着热源的移动,整个焊件的温度随时间和空间急剧变化^[12-13]。激光光斑内部各处的热流输入分布不均匀,可以近似用高斯函数来表示激光焊接过程中光斑内部的热流输入,其数学方程为

$$q(r) = q_m \exp\left(-3 \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中: $q(r)$ 为距离光斑中心 r 处的热流密度; R 为光斑半径; q_m 为光斑中心热流密度的最大值, $q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q$,其中 Q 为激光功率。以紫铜作为中间层的激光焊接理论模型如图 2 所示,分别建立高斯热源的空间坐标系 $OXYq$ 以及焊缝横截面的热流分布坐标系 OYq ,其中 d 为中间层 T2 紫铜的宽度。

由(1)式可知,光斑中心区域的热流密度最高,越往外能量越小,从光斑中心到光斑边缘,热流密度由 q_m 降到了 $q(r)$ ^[14]。对黄铜薄板进行常规激光焊接时,焊缝中心处的锌达到了其沸点而大量蒸发,而且焊缝边缘处的部分锌也开始蒸发,形成气孔;对于以紫铜为中间层的激光焊接,中间层的宽度取决于温度场的分布,当中间层的宽度 $d = 2r$ 时,紫铜

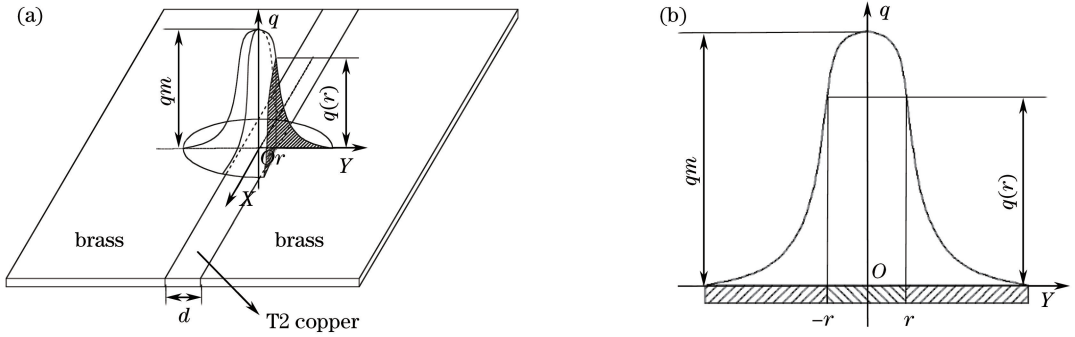


图 2 原理示意图。(a)以紫铜作为中间层的激光焊接示意图;(b)焊缝横截面上的 q 分布

Fig. 2 Principle schematics. (a) Schematic of brass sheet welding with intermediate layer of copper; (b) q distribution at weld cross-section

就完全位于光斑中心而受热熔化,锌溶入紫铜中形成固溶体。黄铜母材位于光斑边缘,边缘处的热流密度低,锌熔化但不蒸发,待到充分融合之后,锌就均匀地分布在固溶体中,从而达到了稀释效果。在温度场的重新分布下,过度蒸发的锌量下降,从而降低了气孔率。

3 实验结果与分析

3.1 气孔率分析

3.1.1 焊缝表面的气孔率分析

不同焊接速率下获得的焊缝的表面形貌如图 3、4 所示,可知:随着焊接速率增大,焊接气孔逐渐

减少,当焊接速率为 2.2 mm/s 时,气孔数量最少。焊缝表面的气孔主要集中分布在焊缝中心,焊缝两侧的气孔较少,尺寸较小,这是因为激光能量主要集中在焊缝中心,该处锌蒸发现象最为剧烈。在常规激光焊接条件下,虽然焊接速率的提高能较好地改善表面气孔缺陷,但是并不能完全消除气孔,这是因为在黄铜薄板的对接激光焊过程中,总有锌受热蒸发,来不及逸出的锌便冷却凝固,在焊缝表面形成气孔。而在以紫铜作为中间层的激光焊接条件下,当焊接速率达到 2.2 mm/s 时,焊缝表面几乎没有焊接气孔产生,这是因为紫铜中的铜对母材中的锌起到了稀释作用,使得锌蒸气的蒸发量很小。

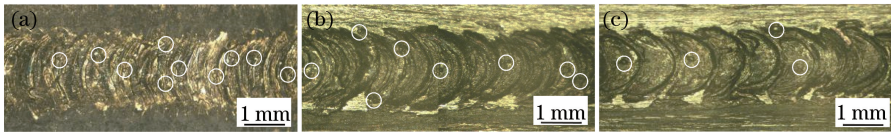


图 3 常规激光焊接获得的焊缝表面的气孔分布。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 3 Porosity distribution in weld surface obtained with normal laser welding. (a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

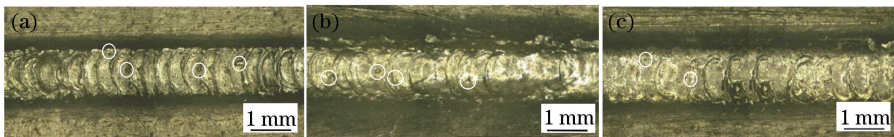


图 4 以紫铜为中间层条件下的激光焊接获得的焊缝表面的气孔分布。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 4 Porosity distribution in weld surface obtained with laser welding under copper intermediate layer condition. (a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

3.1.2 焊缝内部的气孔率分析

焊接气孔也同样存在于焊缝内部,不同焊接条件下获得的焊缝内部的气孔分布如图 5、6 所示,可以看出:焊缝内部的气孔率随着焊接速率的升高而降低,当焊接速率达到 2.2 mm/s 时,气孔现象得到明显改善。在常规激光焊条件下,虽然焊缝内部的

气孔随着焊接速率的提高而得到改善,但仍存在明显的气孔。伴随着激光焊接过程中温度的急剧升高和降低,母材中的锌以蒸气的形式逸出,一部分来不及逸出的锌于熔池凝固过程中在焊缝中形成气孔,逸出的锌蒸气也会受到激光焊机激光束装置的阻碍而难以及时蒸发,从而压入熔池中,加剧了气孔的形成。

焊缝内部的气孔多为椭圆形,呈现出明显的拉长。通过以紫铜为中间层条件的激光焊接获得的焊缝,其内部的气孔主要分布在焊缝内部靠近上表面的区域,这是焊缝中的锌蒸气在熔池凝固过程中上浮造成的。

在锌蒸气上浮过程中,由于气孔数量很少,几乎不会发生聚集、合并现象,所以气孔形状多为圆形或椭圆形。当焊接速率达到一定程度时,几乎没有明显的气孔缺陷,焊缝内部的气孔得到明显改善。

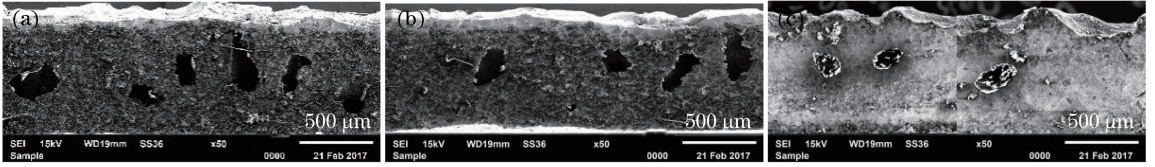


图 5 常规激光焊接获得的焊缝内部的气孔分布。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 5 Porosity distribution in weld interior obtained with normal laser welding. (a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

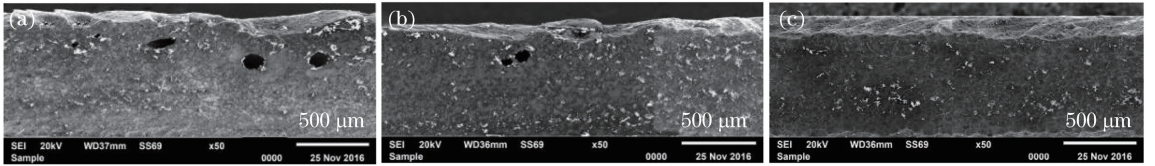


图 6 以紫铜为中间层的激光焊接获得的焊缝内部的气孔分布。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 6 Porosity distribution in weld interior obtained with laser welding under copper intermediate layer condition.

(a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

3.1.3 两种焊接条件下气孔率的对比分析

由图 7 所示的焊缝气孔分布曲线可知:采用以紫铜作为中间层的激光焊接方案时,无论是焊缝表面还是焊缝内部,气孔率都随着焊接速率的增

大而减小,当焊接速率为 2.2 mm/s 时,焊缝表面及内部的气孔率分别为 1.8% 和 1.4%,是常规激光焊接的 1/3,焊缝表面及内部几乎没有焊接气孔产生。

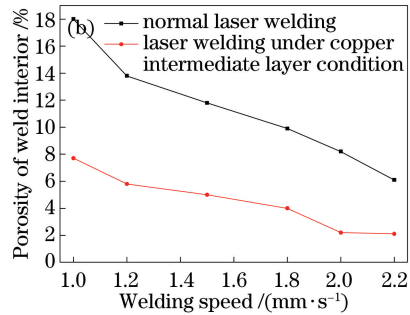
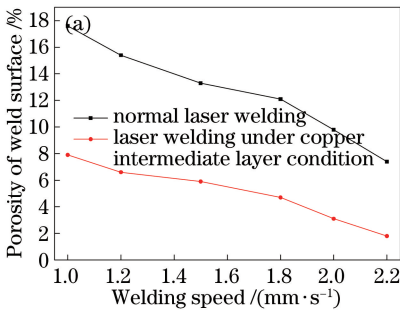


图 7 焊缝气孔率分布曲线。(a) 表面;(b) 内部

Fig. 7 Distribution curves of weld porosity. (a) Surface; (b) interior

3.2 蒸气团的动态行为

采用高速摄像机记录两种焊接方案在不同焊接速率(其他焊接参数相同)下蒸气团的动态行为,如图 8、9 所示。

由图 8、9 可知,在稳定的激光焊接过程中的相同时刻,焊接速率是唯一的变量,焊接速率不同,蒸气团的行为也存在差异。对于常规激光焊接,随着焊接速率加快,蒸气团的尺寸逐渐减小,但逸出的锌蒸气仍然能够到达激光束通道装置。说明黄铜在常规激光焊接过程中,随着焊接速率加快,锌蒸气的蒸

发并不能完全消除。对比以紫铜为中间层的激光焊接条件下的蒸气团可知,蒸气的逸出角度和蒸气团尺寸有所减小,当焊接速率为 1.0 mm/s 时,蒸气团的逸出不受激光束通道装置的阻碍,当焊接速率增加到 2.2 mm/s 时,蒸气团的形状尺寸明显减小,仅为 1.0 mm/s 时蒸气团轮廓的 1/3。激光焊接的加热和冷却过程都非常迅速,在以紫铜为中间层的焊接条件下,逸出的锌与中间层材料中的铜形成固溶体,致使锌的蒸发量减小,焊缝中气孔的形成倾向也会降低。

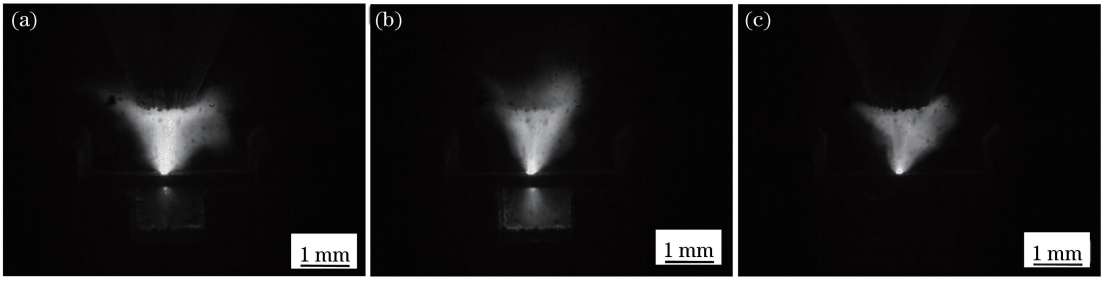


图 8 常规激光焊接时蒸气团的动态行为($t=15\text{ s}$)。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 8 Dynamic behavior of steam for normal laser welding ($t=15\text{ s}$). (a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

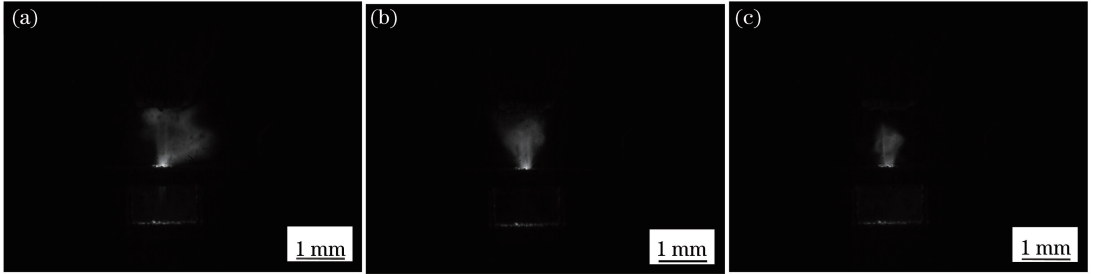


图 9 以紫铜为中间层的激光焊接时蒸气团的动态行为 ($t=15\text{ s}$)。(a) 1.0 mm/s;(b) 1.2 mm/s;(c) 2.2 mm/s

Fig. 9 Dynamic behavior of steam for laser welding under copper intermediate layer condition ($t=15\text{ s}$).

(a) 1.0 mm/s; (b) 1.2 mm/s; (c) 2.2 mm/s

3.3 力学性能分析

3.3.1 焊接接头的显微硬度

对以紫铜为中间层的激光焊缝及其热影响区的显微组织进行观察,结果如图 10 所示,可以看出,焊缝及其热影响区的显微组织依然为 $\alpha+\beta$ 两相组织,说明了在以紫铜为中间层下获得的焊缝的显微组织与母材组织相比基本上没有发生变化。焊缝区的晶粒相较于热影响区细小很多,这是由于在激光焊接过程中,焊缝凝固结晶,熔合区的晶粒垂直于熔合线,朝最快散热方向开始结晶,呈柱状,晶粒向焊缝中心生长,变得越来越细小,而热影响区的晶粒则会发生粗化现象。

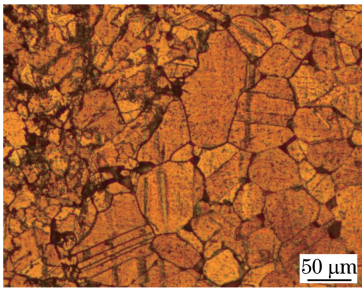


图 10 焊缝及热影响区的显微组织

Fig. 10 Microstructure of weld and heat affected zone

同时,对焊缝及其附近区域进行显微硬度测试,结果如图 11 所示。黄铜的硬度约为 125 HV,紫铜

的硬度约为 75 HV。由图 11 可见,焊接接头的显微硬度从焊缝中心向母材方向呈先低后高的趋势,以紫铜为中间层的激光焊接获得的焊缝中心的显微硬度约为 113 HV。由于紫铜的硬度较低,从而使得以紫铜为中间层下的激光焊接获得的焊缝的显微硬度略小于常规焊接获得的焊缝的硬度(117 HV)。对于焊接接头整体而言,母材的硬度最高。由于紫铜与黄铜母材的性能差异较小,所以中间层材料并没有对焊缝的硬度产生明显影响。

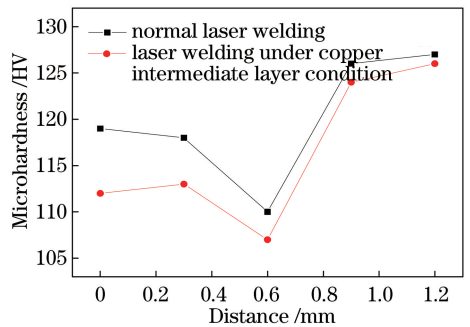


图 11 焊缝显微硬度的分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of weld microhardness

3.3.2 拉伸断裂分析

观察如图 12(a)、(b)所示的试样的断裂位置可以发现,试件均在焊缝处断裂,由此可见,母材的抗拉强度高于焊缝。H62 黄铜母材的抗拉强度通常

为 200~300 MPa, 结合表 2 可以看出, 两种焊接条件下获得的焊缝的抗拉强度均有不同程度的降低, 造成这一现象的原因之一是焊接过程中焊缝中产生了大量的焊接气孔。以紫铜为中间层的激光焊接获得的焊接接头的平均抗拉强度为 157 MPa, 常规激光焊接获得的焊接接头的平均抗拉强度为 140 MPa, 接头强度分别为母材的 78.5% 和 70.0%。可见, 与常规激光焊接相比, 采用以紫铜为中间层的激光焊接获得的焊接接头的抗拉强度没有明显降低, 甚至略优。

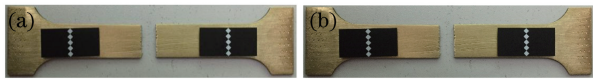


图 12 拉伸断裂分析。(a) 常规激光焊接试件;
(b) 以紫铜为中间层的激光焊接试件

Fig. 12 Tensile fracture analysis. (a) Tensile specimen for normal laser welding; (b) tensile specimen for laser welding under copper intermediate layer condition

表 2 拉伸实验结果

Table 2 Tensile test results

Sample	Tensile strength /MPa	
	Normal laser welding	Laser welding under copper intermediate layer condition
1	135	163
2	143	149
3	142	159
Average	140	157

4 结 论

黄铜的常规激光焊接焊缝中易出现大量的焊接气孔, 以紫铜作为中间过渡层进行焊接取得了良好的效果, 焊缝表面和内部的气孔率大幅降低, 焊缝成形良好。随着焊接速率增大, 气孔率明显下降, 当焊接速率为 2.2 mm/s 时, 气孔率几乎为零。以紫铜为中间层的焊接接头的硬度从低到高的区域是热影响区、焊缝区、母材。拉伸断裂实验结果表明, 以紫铜为中间层的激光焊接接头的抗拉强度可达 157 MPa, 为母材的 78.5%。焊接速率是影响黄铜激光焊接过程锌蒸气团动态行为的关键因素, 随着焊接速率增大, 蒸气团的尺寸明显减小, 使得锌的蒸发量明显下降, 从而降低了焊缝的气孔率。该实验可为黄铜在散热器的应用方面提供技术参考。

参 考 文 献

[1] Duan H F, Luo K Y, Lu J Z. Friction and wear

properties of H62 brass subjected to laser shock peening [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (10): 1014002.

段海峰, 罗开玉, 鲁金忠. 激光冲击强化 H62 黄铜摩擦磨损性能研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1014002.

[2] Zhou L, Li Z Y, Song X G, *et al.* Influence of laser offset on laser welding-brazing of Al/brass dissimilar alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 717: 78-92.

[3] Qi X Y, Zhang W, Yu S W, *et al.* Microstructure and mechanical property of laser weld of C18000 copper alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071405.

祁小勇, 张威, 余世文, 等. C18000 铜合金激光焊缝组织和力学性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071405.

[4] Zhang C, Gao M, Wang D Z, *et al.* Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 217-222.

[5] Yu J, Cho S M. Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 350-357.

[6] Yang Y H, Lei Z L, Li B W, *et al.* Analysis of porosity characteristics of D406A ultrahigh strength steel after laser-TIG hybrid weld with filler metal [J]. Transactions of the China Welding Institution [J]. 2017, 38(12): 114-118.

杨雨禾, 雷正龙, 黎炳蔚, 等. D406A 超高强度钢激光-TIG 复合填丝焊接气孔特性分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 114-118.

[7] Zhou X K, Mi G Y, Liu S, *et al.* Laser lap welding of 304 stainless steel/T2 red copper ultra-thin sheets [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (8): 0802006.

周学凯, 米高阳, 刘森, 等. 304 不锈钢/T2 紫铜超薄板激光搭接焊 [J]. 中国激光, 2017, 44 (8): 0802006.

[8] Dong P, Chen K H, Xiao R S. Mechanical properties of aluminum-copper joint by laser penetration brazing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (6): 0603009.

董鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头力学性能 [J]. 中国激光, 2011, 38 (6): 0603009.

[9] Zhang J, Shan J G, Wen P, *et al.* Effects of welding parameters on weld porosity during CO₂ laser welding of die-cast magnesium alloys [J]. Transactions of the

- China Welding Institution, 2011, 32(5): 17-20, 24.
张婧, 单际国, 温鹏, 等. 焊接工艺对压铸镁合金 CO₂激光焊缝气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 17-20, 24.
- [10] Shan J G, Zhang J, Zheng S Q, *et al.* Experimental study on pores in laser welding of magnesium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S3): 234-239.
单际国, 张婧, 郑世卿, 等. 镁合金激光焊接气孔问题的实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S3): 234-239.
- [11] Yu D Y, Wang X Y. Temperature field simulation of single layer carbon fiber reinforced plastics in parallel laser cutting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041401.
于冬洋, 王续跃. 激光同向切割单层碳纤维复合材料的温度场模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041401.
- [12] Dong Y, Wang D, Wei Z, *et al.* Numerical simulation and experimental study of temperature evolution of Si-APD irradiated by long-pulse laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514005.
董渊, 王頔, 魏智, 等. 长脉冲激光辐照 Si-APD 温度演化过程的数值模拟与实验研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514005.
- [13] Ma G L, Li L Q, Chen Y B. Comparative study of molten pool behavior and weld formation characteristic in single/dual beam laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202002.
马国龙, 李俐群, 陈彦宾. 单/双光束激光焊接熔池行为及焊缝成形特性比较[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202002.
- [14] Peng J, Hu S M, Wang X X, *et al.* Effect of filler metal on three-dimensional transient behavior of keyholes and molten pools in laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102003.
彭进, 胡素梦, 王星星, 等. 填充对激光焊接匙孔与熔池三维瞬态行为的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102003.