

极薄钛板的激光钎焊

姜光强 吴爱萍 任家烈

(清华大学机械工程系 北京 100084)

提要 研制了适用于激光钎焊钛薄板的锡基钎料,并在氩气保护下进行了激光钎焊钛薄板角接缝试验,研究了工艺参数,包括钎料类型及其尺寸、激光输出功率、扫描速度和扫描宽度等对钎焊接头形成的影响。

关键词 钛,激光钎焊,锡基钎料

1 引 言

钛及其合金由于重量轻、强度高、耐热性好和抗腐蚀性能高等优点,近年来在各工业部门中的应用日益广泛。但钛及其合金强烈的氧化倾向及其在加热过程中猛烈吸氢、吸氮等特性,使得钛及其合金的钎焊存在一定难度。而且,钛与很多金属容易形成脆性化合物,也使选择钎焊钛用的钎料存在一定困难^[1]。

激光钎焊是利用激光束所产生的热能对薄壁精密零件实行局部加热和钎焊从而使金属连接起来的一种工艺方法,近年来得到广泛的应用研究。目前最主要的是应用于微连接,大量的应用于电子工业中的点焊^[2~7]。有关激光钎焊的影响因素,钛及其合金激光钎焊的结合行为,以及激光钎焊的快速加热凝固特性对组织性能的影响等方面的研究具有重要的理论和现实意义^[8]。

本文以超级超导对撞机中电磁量能器晶体支撑结构的组焊为背景,研究适用的钎料和合适的激光钎焊工艺。为尽可能减小钛薄壁蜂窝结构的焊接变形和防止采用大功率激光钎焊工艺参数发生烧穿等缺陷,本文研制了低熔点锡基钎料,并在氩气保护下进行钛薄板角接缝的激光钎焊试验,研究了激光钎焊工艺参数对钎焊结果的影响规律。

2 试验方法与材料

钎料是在氩气保护下用电弧熔炼方法制备的。试验用材料为厚 0.125mm 的工业纯钛(TA2)片。试验前钛薄片经机械去膜,丙酮去油,乙醇去水并吹干。按照国家标准(GB11364-89)在真空钎焊炉中进行钎焊工艺性能试验以比较和筛选钎料。激光钎焊试验在 PRC-3000 型激光器上进行,所用激光束模式为低阶模。钎焊接头根据组焊要求设计为角接头,并设计了船型夹具(如图 1),在氩气保护下进行激光钎焊可满足保护要求。激光钎焊时所用的氩气纯度为

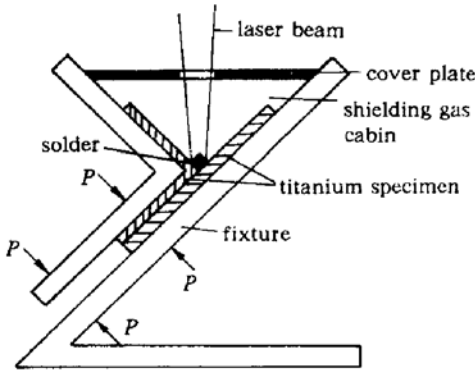


图 1 激光钎焊装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser soldering

99.99%。用扫描电镜(CSM950型)进行接头的显微组织和能谱成分分析。

3 试验结果与分析

3.1 钎料的研制

根据电磁量能器晶体结构的应用要求,钎料应具有以下特点:(1)不含或少含重金属(如Cd,Pd等);(2)钎焊温度不能太高,并对激光有较高的吸收率;(3)应有良好的润湿性和快速铺展能力,但熔蚀倾向要小;(4)钎料应易于加工成型,便于装配。对于目前钎焊钛用银基、钛基、钛锆基、铝基、镉基、锌基和锡铅基等钎料,由于各自的特点^[9],均无法满足上述钎料选择的条件,不适用于激光钎焊钛薄板。因此,必须开发新型的钎料。

由于激光钎焊的影响因素很多,为了排除激光钎焊时工艺不稳定因素或其他因素的影响,准确反应出钎料自身的钎焊性能,先在真空钎焊炉中进行钎焊工艺试验,然后选择合适的钎料在氩气保护下进行激光钎焊试验。经过一系列的钎料润湿性试验、填缝性能试验、接头强度试验,研制出了几种可用于激光钎焊钛薄板的SnCu和SnAg基钎料,本文从中选择了SnCuTi₂Zn₅和SnAgTi₂Zn₅两种钎料进行激光钎焊的进一步试验。

3.2 激光钎焊工艺对钎焊结果的影响

3.2.1 钎料类型与尺寸对激光钎焊工艺的要求

钎料类型与尺寸在很大程度上决定了钎焊接头所需的热输入量,因此当钎料尺寸变化时,激光钎焊的其他工艺参数(输出功率 P ,扫描速度 V ,扫描宽度 B 等)也作相应的调整,才能获得结合良好的接头。表1和表2分别是不同尺寸的SnCuTi₂Zn₅和SnAgTi₂Zn₅钎料获得良好结合时激光输出功率 P 和扫描速度 V 及相应的线能量 I 的数值,其中所选用的扫描宽度 B 均为2.0mm。由表1,2可见,钎料尺寸越大,获得良好结合时所选用的激光钎焊热输入也越大,或是采用较大功率,或是采用较慢的扫描速度,或是既增大功率又降低扫描速度。其原因就在于熔化单位长度的大尺寸钎料比小尺寸钎料所需的热输入量要多。

表 1 不同尺寸的SnCuTi₂Zn₅获得良好结合时的激光钎焊工艺参数 P 和 V 及相应的线能量 I Table 1 Suitable values of laser power, scan rate and relevant energy input with SnCuTi₂Zn₅ solder of different dimensions

Dimensions of solder section/mm ²	Parameters of laser soldering ($P/W \times V/m/min/I/J/m$)	
1.2×1.2	100×0.35 / 17143	
1.0×1.0	90×0.35 / 15429	100×0.40 / 15000
0.8×0.8	85×0.35 / 13714	100×0.45 / 13333
0.6×0.6	70×0.35 / 12000	100×0.50 / 12000

从表1和表2还可以发现,对于相同尺寸的同种钎料,虽然获得良好结合时所选用的激光输出功率和扫描速度的值可以存在较大的差异,但线能量 I 这一参数却是一个基本恒定的值,这给激光钎焊工艺参数的选择优化提供了基本的依据;对应比较表1和表2还发现,同尺寸的锡基钎料,因其中合金元素的差别,获得良好结合时所需的热输入相差较大,SnAgTi₂Zn₅钎料

所需的热输入比 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 大得多, 造成这一差异的主要原因是 SnAg 基钎料对激光的反射率比 SnCu 基高。因此, 在选择激光钎焊工艺参数时, 不仅要考虑钎料的熔点高低, 还要考虑其对激光的反射性能。

表 2 不同尺寸的 $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ 获得良好结合时的激光钎焊工艺参数 P 和 V 及相应的线能量 I

Table 2 Suitable values of laser power, scan rate and relevant energy input with $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ solder of different dimensions

Dimensions of solder section/mm ²	Parameters of laser soldering ($P/W \times V/\text{m}/\text{min}/I/\text{J}/\text{m}$)	
1.2×1.2	170×0.20 / 51000	130×0.15 / 52000
1.0×1.0	150×0.20 / 45000	130×0.17 / 45882
0.8×0.8	130×0.20 / 39000	
0.6×0.6	110×0.20 / 33000	130×0.25 / 31200

3.2.2 扫描宽度对钎缝成形的影响

扫描宽度 B 也是激光钎焊过程中的一个重要参数。表 3 和表 4 分别是截面尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 和 $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ 钎料在不同激光钎焊工艺参数时的钎缝成形情况。润湿角 $\theta \leq 60^\circ$ 时表示为 \bigcirc , 润湿角 $60^\circ < \theta < 135^\circ$ 时表示为 $\bigcirc + \times$, 润湿角 $\theta \geq 135^\circ$ 时表示为 \times 。

表 3 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 在不同工艺参数时的钎缝成形情况

Table 3 Laser soldering seam shape of $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ under different parameters

$P/W \times V/\text{m}/\text{min}$		100×0.15	100×0.35	100×0.40	100×0.45	100×0.50
scanning	2.0	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	$\bigcirc + \times$
width	1.5	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	$\bigcirc + \times$
B	1.0	\bigcirc	$\bigcirc + \times$	\times	\times	\times
/mm	0.8	\bigcirc	\times	\times	\times	\times

表 4 $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ 在不同工艺参数时的钎缝成形情况

Table 4 Laser soldering seam shape of $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ under different parameters

$P/W \times V/\text{m}/\text{min}$		130×0.10	130×0.15	130×0.17	130×0.20	130×0.25
scanning	2.0	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
width	1.5	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	$\bigcirc + \times$
B	1.0	\bigcirc	$\bigcirc + \times$	\times	\times	\times
/mm	0.8	\bigcirc	\times	\times	\times	\times

从结果中可以看出: 在激光输出功率和扫描速度相同的条件下, 激光扫描宽度 B 对钎料的铺展和润湿有较大的影响, 尤其是在扫描速度相对较快的情况下, 影响更为显著。如对于截面积为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 钎料, 在 $P \times V$ 为 $100 \text{ W} \times 0.35 \text{ m}/\text{min}$ 时, 当 B 为 2.0 mm 和 1.5 mm 时润湿良好; 当 $B = 1.0 \text{ mm}$ 时, 润湿较差, 钎料不能良好铺展; 而当 $B = 0.8 \text{ mm}$ 时, 基本不润湿。图 2 是不同扫描宽度下钎缝的成形情况。分析原因认为: 激光钎焊与其他常规钎焊方法一样, 不仅钎料要熔化, 钎焊处母材也需加热到一定温度时才有可能使钎料铺展并润湿母材。由于激光钎焊的快速加热冷却的特点, 当扫描宽度 B 较小时, 激光束不能同时对钎料和钛薄板进行加热, 而且在未产生接合前钎料与被钎焊钛板间的热传导较慢, 不能通

过热传导使钎料和钛片同时达到产生润湿的温度条件,因此不能产生良好的润湿。而当扫描宽度 B 足够大时,激光束可以同时钎料及钎焊区的钛板加热,使钎料和钛片同时达到较高温度而产生润湿。另外,当扫描宽度 B 为 0.8 mm 时,如果继续降低扫描速度也有产生良好润湿的可能,但此时由于热输入过大,接头易产生较大的变形甚至发生烧穿现象。

3.2.3 激光输出功率对接头组织和性能的影响

图 3 为 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 和 $\text{SnAgTi}_2\text{Zn}_5$ 钎料在其他工艺参数不变时,激光钎焊接头剪切强度随输出功率的变化曲线。图 4 (a), (b), (c) 分别是 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 钎料在不同激光输出功率时钎焊接头界面及钎缝的组织形貌。对应分析图 3 和图 4 可以发现,当激光输出功率增大时,沿界面向钎

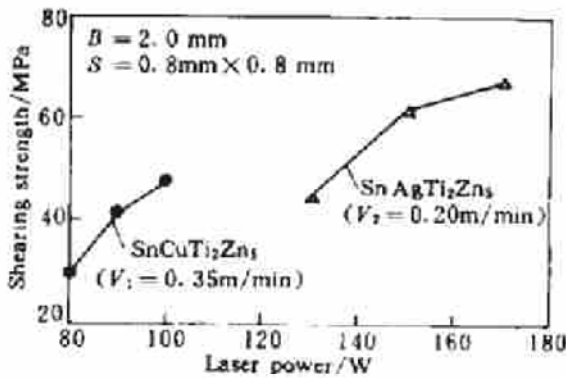


图 3 激光输出功率对接头剪切强度的影响
Fig. 3 Effect of laser power on joints' shearing strength

缝中生长的针状组织含量增加且发达程度提高,与之对应的是接头剪切强度的提高。因此可以认为,接头剪切强度与接头中形成的针状组织的含量及发达程度有关。能谱成分分析结果发现,针状组织的成分与金属间化合物 Ti_6Sn_5 接近, X 射线衍射分析表明断口表面存在 Ti_6Sn_5 相,因此推测针状组织为 Ti_6Sn_5 ,在锡基钎缝中可以起到一定的强化作用。在钎料中含钛量相同的情况下,如用钎料 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 进行激光钎焊时,增大激光输出功率,提高了接头的线能量,钛的溶蚀倾向增大,进入钎缝中的钛量增加,使生成的 Ti_6Sn_5 相的含量相应增加。另外,当激光输出功率较大时,接头在高温的停留时间较长,有利于针状组织的生成与长大。因此,激光输出功率提高时,不仅使接头中的针状组织含量提高,也使针状组织更发达,针状组织的强化作用使得接头剪切强度提高。

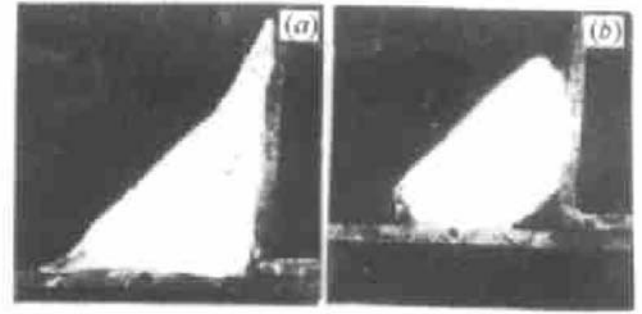


图 2 钎料 $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 在不同扫描宽度时钎缝的成形情况 (30 \times)

Fig. 2 Soldering seam shapes of $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ under different laser beam scan widths (30 \times)

(a) $B = 2.0\text{ mm}$,

(b) $B = 0.8\text{ mm}$ ($P = 100\text{ W}$, $V = 0.35\text{ m/min}$)

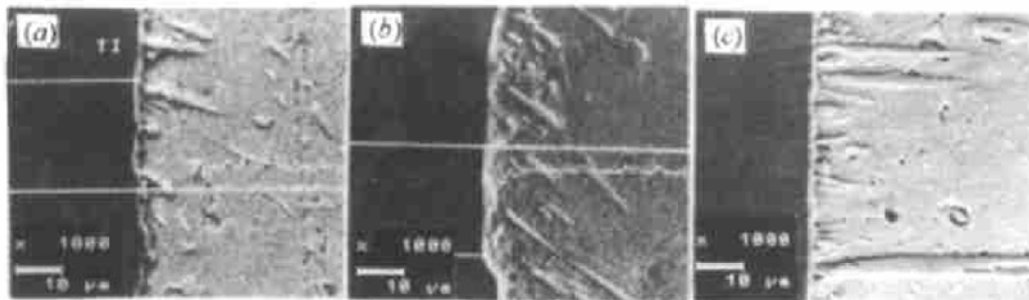


图 4 激光输出功率对接头显微组织的影响 ($\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$ 钎料)

Fig. 4 Effect of laser power on the microstructures of the soldering joints with $\text{SnCuTi}_2\text{Zn}_5$

(a) $80\text{ W} \times 0.35\text{ m/min}$; (b) $90\text{ W} \times 0.35\text{ m/min}$; (c) $100\text{ W} \times 0.35\text{ m/min}$

3.2.4 激光扫描速度对接头组织和性能的影响

扫描速度同样是影响激光钎焊结果的关键因素之一。图 5 所示的结果清楚地表明了扫描速度对钎焊结果的显著影响。从图中可以看到,随着扫描速度的降低,两种钎料激光钎焊接头的剪切强度均逐渐增大。图 6 是 SnCuTi₂Zn₅ 钎料在不同扫描速度时界面及钎缝的组织形貌。对应分析图 5 和图 6 发现,扫描速度降低时,与提高激光输出功率的作用一样,接头的线能量提高,界面与钎缝中针状组织增多,其结果是使剪切强度提高。但当扫描速度太低时,由于接头的温度梯度发生了变化,使 Ti₆Sn₅ 不仅以针状形式析出,还出现了块状的组织形态(如图 6 (c)),虽然组织形态不同,但 Ti₆Sn₅ 的强化作用还是存在的,只是强化作用的大小可能因形态不同而不同。

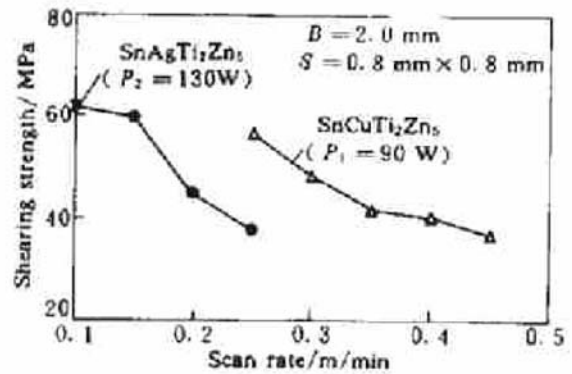


图 5 激光扫描速度对接头剪切强度的影响

Fig. 5 Effect of scan rate on joints' shearing strength

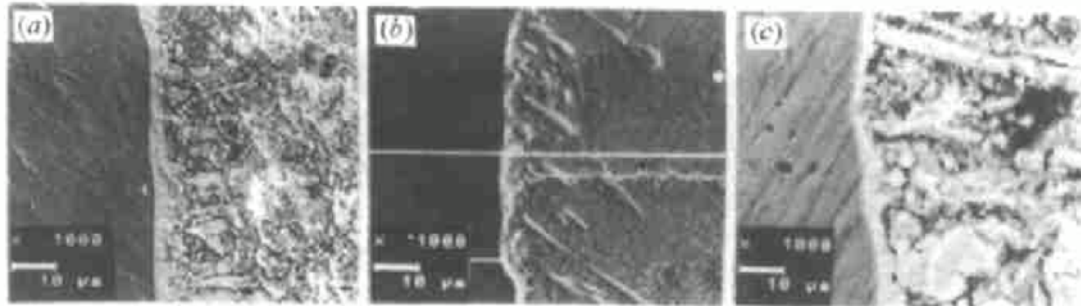


图 6 激光扫描速度对接头显微组织的影响(SnCuTi₂Zn₅ 钎料)

Fig. 6 Effect of scan rate on the microstructures of the soldering joints with SnCuTi₂Zn₅

(a) 90 W × 0.45 m/min; (b) 90 W × 0.35 m/min; (c) 90 W × 0.25 m/min

综上所述,当激光钎焊热输入提高,即激光输出功率增大或扫描速度降低时,接头中的强化相 Ti₆Sn₅ 增多,钎焊接头的强度提高。当扫描速度降低时,Ti₆Sn₅ 不仅以针状形式存在,还可能出现块状形态。

4 结 论

本文所研制的含钛锡基钎料可成功地应用于极薄钛板的激光钎焊。对各种工艺影响的研究结果表明:

(1) 在选择激光钎焊工艺参数时,不仅要考虑钎料的尺寸,还要考虑钎料的类型。同是锡基钎料,虽然它们的熔点相近,但因合金元素不同而引起对激光反射率的不同,SnAg 基钎料的反射率要高于 SnCu 基钎料,因而钎焊时要求有较高的激光热输入;

(2) 在激光钎焊钛薄板时,激光扫描宽度也是影响钎焊质量的重要因素之一,扫描宽度太小时,钎料难以铺展而形成良好的钎焊接头;

(3) 激光钎焊热输入提高时,即激光输出功率增大或扫描速度降低时,接头中的强化相 Ti₆Sn₅ 增多,而使钎焊接头的强度有所提高。

参 考 文 献

- 1 American Welding Society Committee on Brazing and Soldering, Translated by Cao Xiongf. Brazing Manual (Third Edition Revised). Beijing: National Defence Industry Press, 1982. 285~295 (in Chinese)
- 2 C. Lea. Laser soldering production and micro-structural benefits for SMT. *Soldering & Surface Mount Technology*, 1989, (2):13~21
- 3 E. Semerad, L. Musiejovsky, J. Nicolics. Laser beam soldering of surface-mounted devices for high-reliability applications. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(9):5065~5069
- 4 Nakaoka Yasuyuki, Hirota Jitsuho, Machida Kazumichi. Mechanical Properties of Solder Joints in Surface Mounting, Sixth IEEE CHMT Int. Electron. Manuf. Technol. Symp., Piscataway: IEEE Piscataway NJ USA, 1989. 117~120
- 5 Li Xiaoxuan. Applications of Laser Soldering in SMT. Symposium of Micro-joining and Brazing, Wuxi, 1994. 10 (in Chinese)
- 6 American Society for Metals. Metals Handbook (9th Edition Vol. 6). Beijing: Mechanical Industry Press, 1994. 1383~1386 (in Chinese)
- 7 Berkowitz Howard, Walvoord John. Laser Soldering of Fine Pitch SMT Devices. National Electronic Packaging and Production Conference-Proceedings of the Technical Program (West and East) v3 1997. Reed Exhibition Companies, Norwalk, CT, USA, 1997. 1588~1598
- 8 Yang Wange. Process-Structure-property Relationship for Eutectic Tin-silver Solder Joints (Laser soldering), DAI-B 56/11, May 1996. 6338
- 9 Zou Xi. Brazing (2th Edition). Beijing: Mechanical Industry Press, 1989. 131~132 (in Chinese)

Laser Soldering of Thin Titanium Sheets

Jiang Guangqiang Wu Aiping Ren Jialie

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, Sn-based solders have been developed and used in laser soldering of very thin titanium sheets in the atmosphere of argon. The effects of laser soldering parameters, including the types of solders and their dimensions, the laser power, the scanning rate and the diameter of the laser beam etc., on the formation of laser soldering joints have been investigated.

Key words titanium, laser soldering, Sn-based filler metal