铜合金成形

光束摆动对 T2 紫铜激光搭接焊缝成形及 力学性能的影响

梁世清,高向东

(广东工业大学 机电工程学院,广州 510006)

摘要:目的 采用激光光束摆动方式改善T2 紫铜激光焊接的焊缝质量,提高T2 紫铜搭接焊接头的力学性能。 方法 对比不同摆动模式下 T2 紫铜搭接焊接头的焊缝成形,测试圆形摆动模式下摆动频率和摆动幅度对接 头横截面形状的影响。采用显微镜观察分析焊缝金相组织,并研究摆动工艺参数对显微硬度、抗剪力的影 响规律,最终得到最佳的工艺参数组合。结果 相对于常规激光焊接和横向、无穷摆动模式,圆形摆动模式 下 T2 紫铜焊缝成形最好。圆形摆动模式下,摆动频率从 100 Hz 增大到 600 Hz 时, 熔深相应减小, 熔宽变 化不大;摆动幅度从0mm 增大到2mm 时,熔深相应减小,熔宽增大。接头断裂形式一般为焊缝边缘断裂, 且接头光束摆动重熔区域等轴晶有所增加。当摆动频率由 100 Hz 增大到 500 Hz 时,结合面熔宽变化不大, 显微硬度相应增大, 接头得到强化, 抗剪力由 2.07 kN 增大至 2.32 kN; 当摆动幅度从 0 mm 增大到 1.2 mm 时,显微硬度有所降低,结合面熔宽由0.332 mm 增大到1.347 mm,抗剪力随之由1.35 kN 增大至2.36 kN。 结论 圆形光束摆动模式下,当 A=1 mm, f≥300 Hz 或 f=300 Hz, 1 mm≤A≤1.5 mm 时,能明显改善 T2 紫 铜表面焊缝质量;激光光束的摆动有利于增大结合面熔宽,从而提高 T2 紫铜搭接焊接头的力学性能。 关键词: T2 紫铜;激光搭接焊;光束摆动;焊缝成形;显微硬度;结合面熔宽;力学性能 **DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.015 中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)04-0131-12

Effects of Beam Oscillation on Weld Formation and Mechanical Properties of T2 Copper Laser Lap

LIANG Shi-qing, GAO Xiang-dong

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the weld quality of T2 copper laser welding and improve the mechanical properties of T2 copper lap welding joint through laser beam oscillation. The weld formation of T2 copper lap welding joint was compared under different oscillating modes. The effects of oscillating frequency and oscillating amplitude on the joint cross section shape

收稿日期: 2022-12-24

Received: 2022-12-24

基金项目:广东省自然科学基金(2314050004977)

Fund: Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (2314050004977)

作者简介:梁世清(1996—),男,硕士生,主要研究方向为激光焊接工艺。

Biography: LIANG Shi-qing (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: laser welding process.

通讯作者:高向东(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为焊接自动化。

Corresponding author: GAO Xiang-dong (1963-), Male, Doctor, Professor, Research focus: welding automation.

引文格式: 梁世清,高向东. 光束摆动对 T2 紫铜激光搭接焊缝成形及力学性能的影响[J]. 精密成形工程,2023,15(4):131-142. LIANG Shi-qing, GAO Xiang-dong. Effects of Beam Oscillation on Weld Formation and Mechanical Properties of T2 Copper Laser Lap[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 131-142.

in circular oscillating mode were tested. The microstructure was observed and analyzed with microscope and the effects of oscillating parameters on microhardness and shear resistance were studied. Finally, the best combination of parameters was obtained. The results showed that compared with conventional laser welding and transverse and infinite oscillating mode, the T2 copper weld in circular oscillating mode had the best formation. In the circular oscillating mode, the oscillating frequency increased from 100 Hz to 600 Hz, and the weld depth decreased correspondingly, while the weld depth changed little. When the oscillating amplitude increased from 0 mm to 2 mm, the weld depth decreased and the weld depth increased. Generally, the fracture form of joint was weld edge fracture and equiaxed grain increased in the beam oscillating remelting area of joint. When the oscillating frequency increased from 100 Hz to 500 Hz, the interface weld depth changed little, the microhardness increased correspondingly, the joint was strengthened and the shear resistance increased from 2.07 kN to 2.32 kN. When the oscillating amplitude increased from 0 mm to 1.2 mm, the microhardness decreased to some extent, the interface weld depth increased from 0.332 mm to 1.347 mm, and the shear resistance increased from 1.35 kN to 2.36 kN. In the circular beam oscillating mode, when A=1 mm, $f \ge 300$ Hz or f=300 Hz, 1 mm $\leqslant A \leqslant 1.5$ mm, the weld quality of T2 copper surface can be significantly improved. The laser beam oscillation is beneficial to increase interface weld depth and improve the mechanical properties of the T2 copper lap welding joint.

KEY WORDS: T2 copper; laser lap welding; beam oscillation; weld formation; microhardness; interface weld depth; mechanical properties

T2 紫铜具有良好的导电性、导热性、耐蚀性和 加工性能,广泛应用于导电导热元器件的制造,例如 电子元件、新能源电池等。目前,国内外焊接紫铜的 方法很多,如电子束焊、电阻点焊、搅拌摩擦焊、超 声波焊、激光焊接等^[1]。其中,激光焊接具有无法比 拟的优越性,激光焊接热影响区小、能量密度集中、 焊接速度快、热应力小、接头质量高、易实现自动 化^[2],在同种材料和异种材料^[3]的焊接方面都有所应 用;而且国内学者对激光焊接过程的质量检测也进行 了广泛的研究和应用^[4-8],所以激光焊接已成为当前 的发展趋势。然而,对紫铜进行激光焊接还存在难点, 紫铜的红外激光吸收率低,所需激光功率高,焊接过 程工艺不稳定。

针对紫铜激光焊接工艺的稳定性问题,研究人员 开发了各种激光焊接方法,Miyagi等^[9]使用高激光功 率和高焊接速度改善了焊缝质量;Hess 等^[10]使用双 激光束提高了铜吸收率,减少了飞溅;Heider 等^[11] 通过激光功率调制显著提高了焊接质量,减少了熔体 飞溅和气孔产生;李志敏等^[12]采用短波长激光束焊接 提高了激光吸收率,减少了焊瘤,提高了接头抗拉强 度。虽然激光焊接铜合金的一些问题已经解决,但飞 溅、高气孔率及工艺稳定性低的部分相关问题仍然存 在,并没有完全解决^[13]。

激光摆动焊接是通过扫描振镜使激光束在工件 表面形成特定轨迹,从而实现焊接的一种技术。近年 来,国内外学者针对铝合金、镁合金和不锈钢等材料 开展了激光摆动焊接工艺特性的相关研究。Wang等^[14] 使用3种摆动方式和常规直线方式进行了AA6061–T6 铝合金对接焊接,通过对焊缝形貌、显微组织、抗拉 强度的分析,指出光束的摆动能改善表面焊缝形貌, 其中圆形摆动工艺稳定性最好,形成等轴晶最多,接 头抗拉强度变化不大,但延展性变好。李翠等^[15]采用 5种摆动方式对不锈钢板进行了叠焊,并对焊缝成形、 气孔及剪切强度的影响规律进行了分析,结果表明, 相比常规激光焊接,摆动焊接接头气孔较少,表面成 形好,剪切强度高。Miyagi等^[16]研究发现,增大摆 动的频率和幅度能稳定熔池,抑制焊缝表面飞溅和气 孔。Franco等^[17]对纯铜摆动焊接的研究表明,激光束 摆动有利于减少表面飞溅和孔洞,且圆形光束摆动产 生的飞溅最小。

综上所述,T2 紫铜常规激光焊接焊缝成形质量 差,而激光摆动焊接方法可以有效改善表面焊缝成形 质量,抑制激光焊接过程中气孔的产生,提高焊接过 程的稳定性。因此,文中研究T2 紫铜激光摆动焊接 中不同轨迹、不同摆动频率及不同摆动幅度对焊缝成 形的影响规律,并对焊缝显微硬度及拉伸性能进行分 析,为激光摆动焊接技术在T2 紫铜搭接焊中的应用 提供一定理论支持和参考。

1 试验

1.1 材料

试验采用 T2 紫铜进行搭接焊,上下板母材尺寸 分别为 40 mm×40 mm×0.5 mm 和 40 mm×40 mm× 0.8 mm,搭接厚度为 1.3 mm, T2 紫铜化学成分如表 1 所示。

1.2 方法

试验采用单模光纤激光器,激光波长为1080 nm, 额定输出功率为2 kW,激光焊接头采用摆动焊接头,

表 1 T2 紫铜主要化学成分 Tab.1 Main chemical compositions of T2 copper

Element	Cu	Bi	Sb	As	Fe	Pb	S
Mass fraction/%	99.9	0.001	0.002	0.002	0.005	0.005	0.005

聚焦焦距 200 mm, 准直焦距 100 mm。如图 1a 所示, 焊接过程采用氩气保护,保护气流量为 15 L/min,焊 接头偏转 10°以防止高反;如图 1b 所示,采用 3 种摆 动方式(圆形、无穷、横向)和常规直线方式对上述 铜板进行搭接焊。焊后对表面焊缝成形质量进行检 查,用线切割机床沿垂直于焊缝方向切割金相试样和 拉伸试样。金相试样依次使用 800[#]和 2000[#]砂纸打磨 表面,然后通过磨抛机进行机械抛光,再使用 FeCl₃ 盐酸水溶液对试样表面进行腐蚀,利用金相显微镜对



图 1 焊接示意图

Fig.1 Welding diagram: a) schematic diagram of laser oscillating welding; b) schematic diagram of laser beam motion path

显微组织进行观察分析。用数显显微维氏硬度计对 接头显微硬度进行测量。用电子万能试验机对搭接 焊试样进行拉伸试验。为保持拉伸载荷平行,在拉 伸试样两端垫上相应厚度的板材,拉伸试样尺寸如 图 2 所示。



Fig.2 Size of tensile specimen

2 结果及分析

2.1 光束摆动方式及摆动参数对表面焊缝 形貌的影响

圆形和横向摆动模式使用以下固定工艺参数:激光 功率P=1400W,焊接速度v=30 mm/s,离焦量 $\Delta f=0$ mm, 保护气流量为 15 L/min。无穷摆动模式使用以下固定 工艺参数:激光功率P=2000W,焊接速度 v=30 mm/s,离焦量 $\Delta f=0$ mm,保护气流量为 15 L/min。 摆动振幅 A 的选取范围为 0.2~2 mm,摆动频率 f 的 选取范围为 100~600 Hz。常规激光焊接使用以下工 艺参数:激光功率 P 为 1 400、2 000 W,焊接速度 v=30 mm/s,离焦量 $\Delta f=0$ mm,保护气流量为 15 L/min。

图 3 为常规激光焊接时的焊缝形貌图,可见焊缝 表面产生了大量气孔和飞溅,焊缝成形质量极差。图 4 为不同摆动频率下圆形摆动焊接的焊缝形貌图。当 摆动频率较低(100 Hz)时,会产生少量飞溅,焊缝 表面呈现激光束圆形旋转模式和重叠(见图 1b),由 于焊接方向和光束旋转方向在上侧是相同的,所以导 致线能量输入不对称,焊缝中心稍微向上偏。随着摆 动频率的增大,焊缝表面成形得到了改善,飞溅大幅 减少,形成致密的鱼鳞纹。图 5 为不同摆动幅度下圆 形摆动焊接的焊缝形貌图,当摆动幅度过小(0.5 mm) 时,会产生飞溅和气孔;当摆动幅度过大(2 mm) 时,焊缝表面鱼鳞纹出现断裂,焊缝中心产生少量凹陷。 当*A*=1 mm *f* 300 Hz 或*f*=300 Hz,1 mm *A* 1.5 mm 时,焊缝成形良好,形成致密的鱼鳞纹。



a P=1 400 W

b *P*=2 000 W

图 3 常规激光焊接对焊缝形貌的影响 Fig.3 Effects of conventional laser welding on weld morphology



图 4 圆形摆动频率对焊缝表面形貌的影响 (A=1 mm) Fig.4 Effects of circularly oscillating frequency on weld morphology (A=1 mm)



图 5 圆形摆动幅度对焊缝表面形貌的影响 (f=300 Hz)

Fig.5 Effects of circularly oscillating amplitude on weld morphology (f=300 Hz)

图 6 为不同摆动频率下无穷摆动焊接的焊缝形 貌图。当摆动频率过小(100 Hz)时,焊缝表面呈现 出激光束无穷摆动模式和重叠形状,当摆动频率过大 (300 Hz)时,焊缝表面成形变差,产生大量表面 孔洞。图 7 为不同摆动幅度下无穷摆动焊接的焊缝形 貌图。当摆动幅度过小(0.2 mm)时,会产生少量 飞溅,且焊缝成形不均匀;当摆动幅度过大(1.5 mm)时,会产生大量表面孔洞,焊缝质量成形较 差。当 *f*=200 Hz、*A*=0.5 mm时,焊缝成形良好,形 成致密的鱼鳞纹。

图 8 为不同摆动频率下横向摆动焊接的焊缝形

貌图。当摆动频率过小(100 Hz)时,表面焊缝呈现出上下两个鱼鳞纹交错的形状。随着横向摆动频率的增大,飞溅减少,表面孔洞减少,但表面成形质量并没有非常大的改善,还是存在一些小凹坑。图9为不同摆动幅度下横向摆动焊接的焊缝形貌图,当 A=1 mm时,表面成形相对较好。除此之外,当摆动幅度过小(0.5 mm)时,会产生大量飞溅和孔洞; 当摆动幅度过大(1.2 mm)时,在焊缝中心出现 一条大的凹槽。当 A=1 mm、f 100 Hz时,焊缝成 形相对良好,但都没有形成致密的鱼鳞纹,表面存 在一些小凹坑。



d *f*=400 Hz

Surface void

=400 Hz,

e *f*=500 Hz

=500 Hz

500 µm

图 6 无穷摆动频率对焊缝表面形貌的影响(A=1 mm)

500 µm

Fig.6 Effects of infinite oscillating frequency on weld morphology (A=1 mm)



图 7 无穷摆动幅度对焊缝表面形貌的影响 (f=200 Hz) Fig.7 Effects of infinite oscillating amplitude on weld morphology (f=200 Hz)



图 9 横向摆动幅度对焊缝表面形貌的影响 (*f*=300 Hz) Fig.9 Effects of transverse oscillating frequency on weld morphology (*f*=300 Hz)

综上所述,T2 铜圆形激光摆动焊接具有最大的 工艺窗口和最好的焊缝成形。因此,选择圆形激光摆 动焊接作为研究对象进一步分析。

2.2 圆形光束摆动参数对焊缝截面形状影响

图 10 为不同摆动频率下圆形摆动焊接的焊缝横 截面形貌,同常规激光焊接焊缝横截面形貌的细长形 相比,摆动焊接的焊缝横截面形貌呈现"U"形。"U" 形两侧轮廓不完全对称,这是因为激光圆形摆动焊接 过程是由直线运动和圆周运动合成的^[18],焊缝左侧的 直线运动方向和光束旋转的方向相同,而右侧是相反 的,导致两边线能量不一样,从而热输入不一样^[17], 最终导致两侧熔深有差异。当摆动频率 f=500、600 Hz 时,焊缝横截面形貌像"W"形,焊缝中间熔深相对 两侧较浅一点,这是因为焊缝中间的激光能量密度比 两侧低^[19],所以出现了两侧熔深比中间大的情况。 图 11 为不同摆动频率下焊缝的熔宽和熔深,随着摆 动频率的增大,熔宽变化不大,熔深慢慢变浅,直至 上板材没有完全焊透。当摆动频率较低时,激光线 能量较大,材料表面发生熔化和汽化,形成了小孔, 此时焊接模式为激光深熔焊。随着频率的增大,圆形 摆动重叠的区域增多,热积累也增多,但材料对激光 是有一定吸收率的,吸收率跟温度有关。频率的增大 导致线速度增大,激光对材料的作用时间更短,传



图 10 圆形摆动频率对焊缝横截面形状的影响(A=1 mm)

Fig.10 Effects of circular oscillating frequency on cross section of weld (A=1 mm)





递的能量更小,温度因此更低,从而影响了吸收率, 不能形成稳定的小孔,随着频率的增大,激光深熔焊 接模式逐渐过渡到热导焊模式^[17-18]。

图 12 为不同摆动幅度下圆形摆动焊接的焊缝横 截面形貌,随着摆动幅度的增大,焊缝横截面形貌由 细长形变为"U"形,最终变为矩形。图 13 为不同 摆动幅度下焊缝的熔宽和熔深,随着摆动幅度的增 大,熔宽逐渐增大,而熔深逐渐减小。保持摆动频率 不变,增大摆动幅度,摆动速度随之增大,最终焊接 速度也会增大,从而导致线能量逐渐减小,最后激光 深熔焊转变为热导焊,熔深也随之变浅^[18]。当摆动幅 度过小(0.5 mm)时,可以发现,焊缝上表面(图



图 12 圆形摆动幅度对焊缝横截面形状的影响 (f=300 Hz) Fig.12 Effects of circular oscillating amplitude on cross section of weld (f=300 Hz)



图 13 圆形摆动幅度对熔宽和熔深的影响(f=300 Hz) Fig.13 Effects of circular oscillating amplitude on weld width and weld depth (f=300 Hz)

12a、b)出现小幅度塌陷,此时激光辐射面较小,激 光能量密度大,具有单激光常规焊接的特点,加上光 束的剧烈搅拌,导致熔池液体流动剧烈,产生大量飞 溅,铜导热性又高,熔池液体还未回流就快速冷却, 从而产生这种下塌缺陷^[20]。

2.3 T2 紫铜搭接焊微观组织分析

对圆形激光摆动焊接的焊缝横截面形貌进行微 观组织分析,图 14 为拉伸后接头磨抛腐蚀的金相图, 紫铜搭接焊接头截面可以分为 3 个不同区域,分别是 熔化区(WFZ) 热影响区(HAZ)和母材(BM)。 其中,熔化区晶粒最大,热影响区晶粒次之,母材晶 粒最小。熔化区内有从熔合线向焊缝中心生长的柱状 晶和在焊缝中心处的等轴晶粒,由于晶粒长度相差太 大,所以细分为长柱状晶区(LCGZ) 短柱状晶区 (SCGZ)、粗等轴晶区(CEGZ)和细等轴晶区 (FEGZ)。与 Zhang 等^[21]研究的常规激光对接焊不 同,本研究焊缝中心并没有出现垂直纵向细长的柱状 晶,且进行拉伸试验时最薄弱的部位并不出现在焊缝 中心处,而是出现在上板材焊缝热影响区和熔化区的 交界处附近。



图 14 焊缝微观组织 Fig.14 Microstructure of weld

图 15 为圆形激光光束摆动轨迹图。图 16 为对应 摆动参数下的焊缝表面,频率较低时,焊缝表面会呈 现如图 15 所示的光束摆动轨迹这种模式的形状。截 面 I 和截面 II 的金相图如图 17b、d 所示,截面 II 的 等轴晶面积占比比截面 I 多,截面 II 区域对应图 15 中截面 II,是紫铜重熔光束搅拌区域。光束的搅拌有 利于冲击熔池周围的糊状区,导致大量破碎枝晶进入 熔池,为等轴晶的形成提供大量形核,且搅拌作用致 使温度梯度发生变化,不利于柱状晶的形成,最终 形成大量等轴晶^[22-23]。所以,根据显微结果可知, 频率较低时,激光束先近似圆形轨迹进行焊接,然 后由于紫铜的高热导性,液态金属快速凝固,柱状 晶沿着焊缝中心生长;到下一次激光束摆动时,又 经过上一次圆形轨迹的一部分,然后重熔搅拌,形 成大量的等轴晶。







- 图 16 圆形摆动焊接表面焊缝 (f=100 Hz, A=1 mm) Fig.16 Surface weld for circular oscillation welding (f=100 Hz, A=1 mm)
- 2.4 圆形摆动工艺参数对接头显微硬度和 力学性能的影响

进行初步拉伸试验时,上层板焊缝边缘处发生断



c 截面Ⅱ表面焊缝

d 截面 II 显微组织



tion I; c) surface weld of section II; d) microstructure of section II

裂,因此对上层铜板中间位置进行显微硬度测试,测 试示意图如图 18 所示。



图 18 显微硬度测试示意图 Fig.18 Schematic diagram of microhardness test

图 19 为不同摆动频率下焊缝接头的显微硬度, 当摆动频率由 100 Hz 增大到 500 Hz 时,显微硬度相 应增大;在 600 Hz 时,显微硬度稍微下降。这是因 为摆动频率增大,等轴晶占比会随之增大,晶粒平均 尺寸下降^[24];而显微硬度和晶粒尺寸呈正相关^[1,25-26], 更多细化的等轴晶会强化组织性能,显微硬度会有所 增大。



图 19 不同摆动频率下焊缝显微硬度变化规律 Fig.19 Variation law of weld microhardness under different oscillating frequencies

图 20 为不同摆动幅度下焊缝接头的显微硬度, 摆动幅度 *A*=1、1.2 mm 时对应的显微硬度最低,其 他摆动幅度对应的显微硬度区别不大。



图 20 不同摆动幅度下焊缝显微硬度变化规律 Fig.20 Variation law of weld microhardness under different oscillating amplitudes

图 21a 为不同圆形摆动频率下的接头抗剪力,当 摆动幅度为1 mm时,随着摆动频率由0 Hz 增大到 500 Hz,抗剪力由 1.35 kN 增大到 2.32 kN,且断裂位 置都是在焊缝边缘(图 22a);摆动频率为600 Hz 时 抗剪力最小,为1.13 kN,断裂位置在板材结合界面 (图 22b)。图 21b 为不同圆形摆动幅度下的接头抗 剪力,当摆动频率为300 Hz 时,随着摆动幅度由0 mm 增大到 1.2 mm,抗剪力由 1.35 kN 增大到 2.36 kN, 此时断裂位置都是在焊缝边缘;摆动幅度为 1.5 mm 时,抗剪力随之降低,断裂位置出现在界面处;摆动 幅度为 2 mm 时,抗剪力为 0,上板材没有焊透。





Fig.21 Effects of circular oscillating process parameters on shear resistance: a) effects of circular oscillating frequency on shear resistance (A=1 mm); b) effects of circular oscillating amplitude on shear resistance (f=300 Hz)





b 结合界面断裂

图 22 圆形摆动焊接断裂位置

Fig.22 Crack position of circular oscillating welding: a) crack on weld edge; b) crack at weld interface

一般而言,搭接焊缝力学性能受焊缝边缘组织和 界面强度影响,而界面强度的影响因素有界面处脆性 金属化合物和板材结合面熔宽^[27],由于 T2 紫铜是纯 铜,铜含量达到 99.9%,焊缝只有一种α相,不具备 产生脆性金属化合物的条件,所以影响其力学性能的 因素有焊缝边缘组织和结合面熔宽。

图 23a 为不同摆动频率下接头的结合面熔宽,结合图 21a 可知,当摆动幅度为 1 mm,摆动频率由 100 Hz 增大到 500 Hz 时,结合面熔宽稍微变小,但

抗剪力反而增大。结合图 19 相关分析可知,随着摆动频率的增大,等轴晶占比增大,焊缝组织得到改善,显微硬度随之增大,而抗拉强度和显微硬度呈线性关系^[28],所以抗剪力随之增大。



图 23 圆形摆动工艺参数对结合面熔宽影响

Fig.23 Effects of circular oscillating process parameters on weld width of joint surface: a) effects of circular oscillating frequency on weld width of joint surface (A=1 mm); b) effects of circular oscillating amplitude on weld width of joint surface (f=300 Hz)

如图 21b 和图 23b 所示,结合面熔宽随摆动参数 的变化规律和抗剪力基本一致;而且图 20 表明,摆 动幅度 A=1、1.2 mm 时焊缝显微硬度最低,接头软 化程度最大,但如图 21b 所示,摆动幅度 A=1、1.2 mm 时对应抗剪力最大。这说明结合面熔宽相差较大时, 接头抗剪力主要受结合面熔宽影响。所以,可以通过 在一定程度上增大摆动频率和摆动幅度来改善焊缝 的组织性能和增大结合面熔宽,从而提高搭焊接接头 的抗剪力。

3 结论

 激光摆动焊接能改善T2 紫铜表面焊缝成形质量,相对无穷和横向摆动模式,圆形激光摆动焊接具 有较高的工艺稳定性和较好的焊缝成形质量,且焊缝 表面易形成致密的鱼鳞纹。

2)圆形激光摆动焊接时,随着摆动频率和摆动 幅度的增大,焊缝熔深减小,激光焊接从深熔焊模式 过渡到热导焊模式。焊缝截面形貌随摆动频率的增大 依次由细长形向"U"形、"W"形转变。熔宽随摆动 幅度的增大而变大,焊缝截面形貌依次由细长形向 "U"形、矩形转变。在一定的摆动工艺参数范围下, 焊缝缺陷随着摆动频率和摆动幅度的增大而减少。

3)光束搅拌区域易形成大量等轴晶,圆形激光 摆动焊接时,随着摆动频率的增大,等轴晶占比增大, 焊缝组织性能改善,显微硬度增大,有利于提高抗剪 力;一定的摆动幅度范围内,随着摆动幅度的增大, 结合面熔宽增大,抗剪力也随之增大。其中,结合面 熔宽是 T2 紫铜摆动搭接焊接最大抗剪力的主要影响 因素,焊缝边缘组织是次要影响因素。

参考文献:

- 周学凯. 金属超薄板光纤激光焊接工艺研究[D]. 武 汉: 华中科技大学, 2017: 2-34.
 ZHOU Xue-kai. Study on Fiber Laser Welding Technology of Ultra-Thin Metal Sheets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 2-34.
- [2] 姜德富,潘洪文.激光摆动焊接头在纯铜连接中的应用[J].金属加工(热加工), 2017(S1): 24-25.
 JIANG De-fu, PAN Hong-wen. Application of Laser Swing Welding Head in Pure Copper Connection[J]. MW Metal Forming, 2017(S1): 24-25.
- [3] HUANG Yi-jie, GAO Xiang-dong, MA Bo, et al. Optimization of Weld Strength for Laser Welding of Steel to PMMA Using Taguchi Design Method[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106726.
- [4] WANG Teng, GAO Xiang-dong, SEIJI K, et al. Study of Dynamic Features of Surface Plasma in High-Power Disk Laser Welding[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(3): 245-251.
- [5] GAO Xiang-dong, SUN Yan, KATAYAMA S. Neural Network of Plume and Spatter for Monitoring High-Power Disk Laser Welding[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014, 1(4): 293-298.
- [6] GAO Xiang-dong, ZHANG Yan-xi. Monitoring of Welding Status by Molten Pool Morphology during High-Power Disk Laser Welding[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 1797-1802.
- [7] FENG Yan-zhu, GAO Xiang-dong, ZHANG Yan-xi, et al. Simulation and Experiment for Dynamics of Laser Welding Keyhole and Molten Pool at Different Penetration Status[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(7): 2301-2312.
- [8] GAO Xiang-dong, MO Ling, YOU De-yong, et al. Tight Butt Joint Weld Detection Based on Optical Flow and Particle Filtering of Magneto-Optical Imaging[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 96:

16-30.

- [9] MIYAGI M, ZHANG Xu-dong. Investigation of Laser Welding Phenomena of Pure Copper by X-Ray Observation System[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(4): 042005.
- [10] HESS A, SCHUSTER R, HEIDER A, et al. Continuous Wave Laser Welding of Copper with Combined Beams at Wavelengths of 1 030 nm and of 515 nm[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 88-94.
- [11] HEIDER A, WEBER R, HERRMANN D, et al. Power Modulation to Stabilize Laser Welding of Copper[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(2): 022003.
- [12] 李志敏,刘志强.近红外光纤激光与蓝光半导体激光 焊接紫铜工艺对比研究[J].精密成形工程,2022, 14(9):142-148.
 LI Zhi-min, LIU Zhi-qiang. Comparative Study on Welding Process of Red Copper with Blue Diode Laser and near Infrared Fiber Laser[J]. Journal of Netshape
- Forming Engineering, 2022, 14(9): 142-148.[13] AUWAL S T, RAMESH S, YUSOF F, et al. A Review on Laser Beam Welding of Copper Alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Tech-
- [14] WANG Lei, GAO Ming, ZHANG Chen, et al. Effect of Beam Oscillating Pattern on Weld Characterization of Laser Welding of AA6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Materials & Design, 2016, 108: 707-717.

nology, 2018, 96(1): 475-490.

2019, 30(11): 1359-1366.

- [15] 李翠,周丹,孟晓明,等.不锈钢板激光光束摆动叠 焊工艺研究[J].中国机械工程,2019,30(11): 1359-1366.
 LI Cui, ZHOU Dan, MENG Xiao-ming, et al. Research on Laser Beam Wobble Lap Welding Processes of Stainless Steel Sheets[J]. China Mechanical Engineering,
- [16] MIYAGI M, ZHANG X, KAWAHITO Y, et al. Surface Void Suppression for Pure Copper by High-Speed Laser Scanner Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 52-59.
- [17] FRANCO D, OLIVEIRA J P, SANTOS T G, et al. Analysis of Copper Sheets Welded by Fiber Laser with Beam Oscillation[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 133: 106563.
- [18] 毛帅. 5052 铝合金光纤激光扫描焊接工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 21-25.
 MAO Shuai. Study on Fiber Laser Scanning Welding of 5052 Aluminum Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2018: 21-25.
- [19] 蒋振国. 基于能量分布调控的中厚板激光焊接质量优 化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 57-60. JIANG Zhen-guo. Research on Quality Optimization of Medium Thick Plate Laser Welding Based on Energy Distribution Regulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 57-60.
- [20] 陈凯. 6061 铝合金薄板搭接激光搅拌焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020: 37-44.

CHEN Kai. Study on the Laser Beam Wobbling Welding Process of 6061 Aluminum Sheet Lap[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020: 37-44.

- [21] ZHANG Lin-jie, ZHANG Gui-feng, NING Jie, et al. Microstructure and Properties of the Laser Butt Welded 1.5-mm Thick T2 Copper Joint Achieved at High Welding Speed[J]. Materials & Design, 2015, 88: 720-736.
- [22] 李尚仁. 中厚板铝合金激光摆动焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020: 44-48.
 LI Shang-ren. Study on Laser Beam Oscillating Welding Technology for Aluminum Alloy Medium Thick Plate[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020: 44-48.
- [23] YUAN Tao, KOU S, LUO Zhen. Grain Refining by Ultrasonic Stirring of the Weld Pool[J]. Acta Materialia, 2016, 106: 144-154.
- [24] 王磊. 高强铝合金振荡扫描激光束-电弧复合焊接工艺与机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018: 103-106.

WANG Lei. Oscillating Laser Beam-Arc Hybrid Weld-

ing of High Strength Aluminum Alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 103-106.

- [25] 赵晓杰. T2 紫铜板材光纤激光焊接及接头性能的研究
 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016: 38-40.
 ZHAO Xiao-jie. Study on Fiber Laser Welding of T2
 Copper and Property of Welded Joint[D]. Jinzhou:
 Liaoning University of Technology, 2016: 38-40.
- [26] HEIDARZADEH A, JABBARI M, ESMAILY M. Prediction of Grain Size and Mechanical Properties in Friction Stir Welded Pure Copper Joints Using a Thermal Model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(9): 1819-1829.
- [27] GAO Ming, WANG He-kang, HAO Kang-da, et al. Evolutions in Microstructure and Mechanical Properties of Laser Lap Welded AZ31 Magnesium Alloy via Beam Oscillation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 92-99.
- [28] KRISHNA S C, GANGWAR N K, JHA A K, et al. On the Prediction of Strength from Hardness for Copper Alloys[J]. Journal of Materials, 2013, 2013: 1-6.