

## 金属材料激光微焊接研究进展(特邀)

杜伟哲, 黄旭霆, 郑敏, 肖荣诗, 黄婷\*

北京工业大学材料与制造学部智能光子制造研究中心, 北京 100124

**摘要** 设备器件精密化、微型化是工业发展的重要趋势。在航空航天、动力电池、消费电子、生物医疗等应用领域中, 零部件的日益微型化对微加工工艺提出了更高的要求。金属材料微焊接是微加工领域的重要需求之一, 而激光具有能量密度高、热输入精确可控、焊接变形小等特点, 是金属材料微焊接的重要技术手段。对金属材料激光微焊接技术展开了探讨, 明确了其内涵, 阐明了微尺度效应的影响, 并总结了激光微焊接常见的缺陷及其质量控制方法, 介绍了同种金属材料和异种金属材料激光微焊接的重要应用前景。最后, 指出了金属材料激光微焊接技术存在的问题, 并展望了未来的发展方向。

**关键词** 激光技术; 金属箔材; 激光微焊接; 尺度效应; 工艺参数; 应用

**中图分类号** TG456.7

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231393

## 1 引言

近年来, 设备器件进一步向精密化和微型化方向发展, 微小零件的组装以及器件的封装对连接精度和质量控制的要求越来越高。金属材料的高质量微连接在航空航天、新能源汽车动力电池、生物医疗等领域中具有重要应用<sup>[1-3]</sup>。例如微机电系统(MEMS)器件的特征尺寸为 $1\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ , 通常采用微焊接技术进行封装。动力电池电极箔的厚度仅为 $6\sim 12\ \mu\text{m}$ , 需要对其进行连接, 从而实现电流的导出。此外, 植入式生物医疗设备(如心脏起搏器和除颤器)的零部件组装以及外壳密封都依赖于金属材料的微连接。常见的微连接技术包括电阻微点焊、超声波微焊接、微型钨极氩弧焊(Micro TIG 焊)、电子束微焊接、激光微焊接<sup>[4]</sup>。其中, 激光微焊接具有聚焦光斑尺寸微小、热输入精确可控、焊接速度快、可焊接材料种类多等特点, 是应用最为广泛的金属材料微连接技术。

在 1960 年第一台红宝石激光器问世后, 高能量密度激光束就被应用于焊接领域<sup>[5]</sup>。虽然激光微焊接目前仍未有统一的定义, 但通常是指对微米尺度材料的连接, 而微米尺度材料焊接存在尺度效应, 其传热、熔池流动等物理特性有别于宏观焊接。在激光焊接技术发展早期, 其在电子工业生产中备受青睐, 采用稳定的激光热导焊可以实现微米尺度丝材、箔材的良好焊接。随着激光器的不断发展, 高光束质量和接近衍射极限的光纤激光器等新型激光器的出现进一步提高了激光微焊接的焊接精度和质量<sup>[6-7]</sup>。激光功

率的增加以及光束质量的提升实现了激光微焊接的速度和焊接效率的提升, 从而使激光微焊接技术成为金属材料微连接的重要手段, 其被广泛应用于同种金属以及异种金属的微连接。相较于宏观焊接, 金属材料激光微焊接更易产生焊接缺陷, 通常通过调控工艺参数对焊接过程进行优化以满足应用需求。由于采用超短脉冲激光(脉宽小于 $10\ \text{ps}$ )可以实现对金属材料熔化的精确控制, 且非金属材料对超短脉冲激光的非线性吸收可显著提升激光能量的沉积效率, 因此超短脉冲激光被应用于金属与非金属材料的激光微焊接, 相关综述<sup>[8-9]</sup>已有报道, 不在本文综述范围内。

本文结构如图 1 所示: 首先讨论了激光微焊接的内涵及其特性; 接着介绍了激光微焊接模式、微焊接激光光源、激光微焊接常见缺陷及其控制; 然后综述了金属材料激光微焊接的应用领域; 最后, 对未来金属材料激光微焊接技术的发展方向进行了展望。

## 2 激光微焊接的内涵及特性

## 2.1 激光微焊接的内涵

微焊接是一种重要的微制造技术。传统微制造通常是指加工的特征尺寸范围小于 $1\ \text{mm}$ 的制造技术<sup>[10]</sup>。参考微制造的定义, Naem<sup>[11]</sup>建议将焊缝特征尺寸(熔宽和熔深)小于 $1\ \text{mm}$ 的焊接称为微焊接。但是, 对于激光焊接而言, 由于激光具有高能量密度和高精度的特点, 使用激光焊接可以轻松实现 $1\ \text{mm}$ 的焊缝特征尺寸, 以其作为界限难以明确区分宏观尺度和

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-01-14; 录用日期: 2024-01-15; 网络首发日期: 2024-01-22

基金项目: 北京市教委科技计划重点项目(23JC0003)、国家重点研发计划(2017YFB1104803)

通信作者: \*huangting@bjut.edu.cn

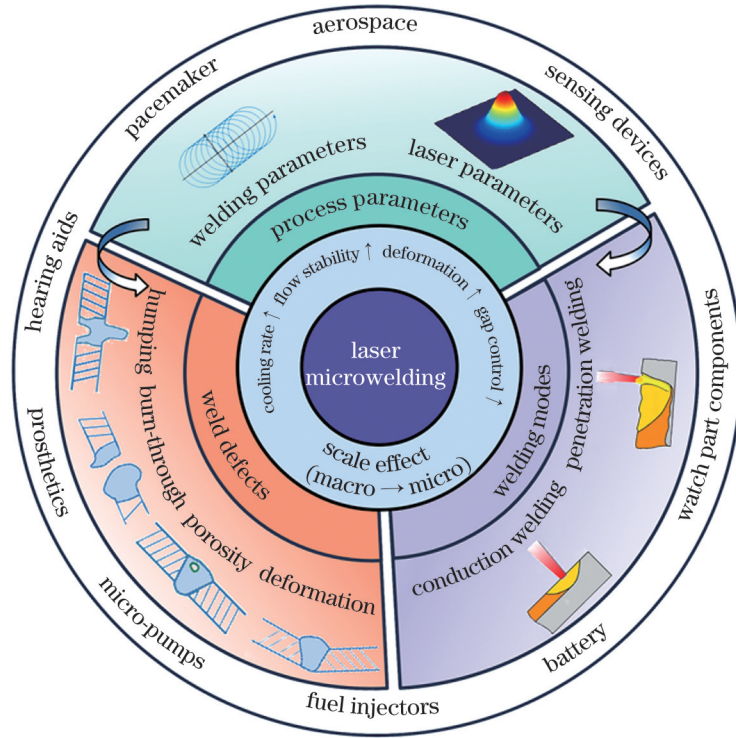


图1 本文的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of this paper

微观尺度激光焊接的差异。因此,一些学者根据研究经验进一步限定激光微焊接的尺度,将激光微焊接定义为被连接材料的厚度小于 $500\ \mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>甚至 $200\ \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>的激光焊接。

国家相关标准对激光微纳加工的定义为“通过激光作用产生微纳米(小于 $100\ \mu\text{m}$ )结构,或制造对象的特征尺寸至少一个维度在微纳尺度的激光加工方法”<sup>[14]</sup>,因此激光微焊接的尺度至少应满足一个特征尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 的要求。这一特征尺寸可以是焊缝的特征尺寸,也可以是被连接材料的特征尺寸。值得注意的是,焊缝和被连接材料的特征尺寸在实际应用中有时并不能同时小于 $100\ \mu\text{m}$ ,满足其一即可认为是激光微焊接。例如,在锂离子电池集流体极耳的激光焊接中,需将超过20~40层的厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 左右的金属箔叠焊在一起,被连接材料的特征尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ ,但焊缝的特征尺寸超过了 $100\ \mu\text{m}$ 。

此外,在微制造领域中,特征尺寸并不局限于加工对象。例如,微铣削和微切割定义的特征尺寸为加工刀具的切削刃直径<sup>[15-16]</sup>。同样,对于激光微焊接,也可以将激光束的聚焦光斑直径作为判断依据。目前,激光微焊接所采用的光斑直径普遍小于 $100\ \mu\text{m}$ <sup>[17-23]</sup>。因此,考虑到微焊接领域的相关研究与实际工业应用中特征尺寸小于 $1\ \text{mm}$ 的说法也较为普遍,本文将聚焦光斑直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 、被连接材料或焊缝特征尺寸小于 $1\ \text{mm}$ 的激光焊接归为激光微焊接的范畴。

综上,严格意义上的激光微焊接是指被连接材料或焊缝至少一个特征尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 的激光焊接。广义上,被连接材料或焊缝至少一个特征尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 的激光焊接及聚焦光斑直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 且被连接材料或焊缝特征尺寸小于 $1\ \text{mm}$ 的激光焊接,都属于激光微焊接的范畴。

## 2.2 激光微焊接特性

当被连接材料的特征尺寸减小到微米尺度时,焊接过程中会产生明显的尺度效应,传热、熔体流动、应力变形以及间隙敏感性将发生显著变化<sup>[24]</sup>。

在传热方面,由于至少有一个特征尺寸为微米尺度,与宏观焊接的三维传热相比,微焊接的传热形式为二维传热甚至为一维传热。Solchenbach等<sup>[25]</sup>根据Rosenthal公式对比了相同工艺参数下激光宏观焊接与激光微焊接的温度场,如图2(a)所示,微焊接工件在 $z$ 方向上的温度梯度比宏观焊接小,导致微焊接产生明显的热积累。在热传导的情况下,微焊接熔池的最高温度也明显更高。另一方面,宏观焊接由于焊接工件厚度较大,通常焊接功率大、焊接速度较低,故宏观激光焊接熔池大。与宏观激光焊接熔池相比,激光微焊接熔池的表面积体积比增大,熔体散热速率增加,从而获得了更大的冷却速率<sup>[13]</sup>。

对于熔体流动,与表面张力相比,微尺度下重力对熔体流动的影响可忽略不计。此外,通常可采用雷诺数( $Re$ )来表征熔体流动状态,即雷诺数与特征尺

寸( $L$ )的平方成正比,即  $Re \sim L^2$ <sup>[24]</sup>。当特征尺寸从宏观尺寸减小到微米尺寸时, $Re$  很难达到层流-湍流的转变值(约  $10^3$ ),因此可推断微焊接过程中熔体的流动更加稳定,更有利于焊接速度的提升。如图 2(b)所示,激光微焊接中熔池流动呈层流,熔池流动稳定。

对于应力变形,焊接工件的应力变形由焊缝相对热影响区的宽度和工件的刚度决定。随着工件厚度的

减小(焊缝相对热影响区的宽度增加<sup>[26]</sup>且工件刚度减小),工件焊接时更易产生应力变形。图 2(c)对比了厚度为  $20\ \mu\text{m}$  的不锈钢箔与厚度为  $100\ \mu\text{m}$  的不锈钢箔焊后的应力变形,结果表明,随着工件厚度的减小,焊接变形显著增加。

激光微焊接对搭接间隙公差的要求很高。由于激光微焊接通常不需要任何填充金属,故间隙的桥接必须通过相邻区域的熔池金属向下填充来实现。当被连

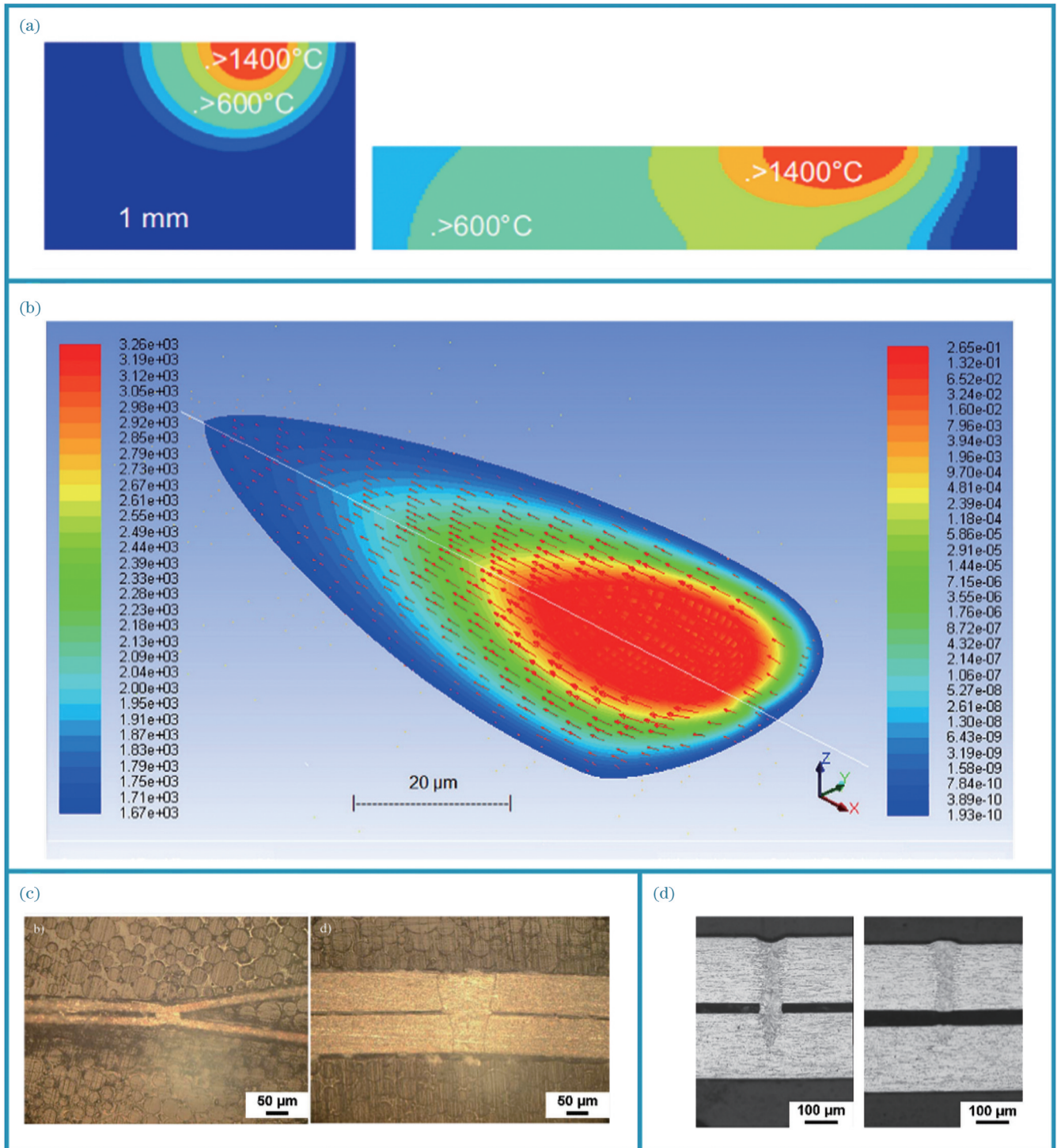


图 2 激光微焊接特性。(a)传热<sup>[25]</sup>;(b)熔池流动<sup>[18]</sup>;(c)变形<sup>[26]</sup>;(d)间隙敏感性<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Characteristics of laser micro-welding. (a) Heat transfer<sup>[25]</sup>; (b) melt pool flow<sup>[18]</sup>; (c) deformation<sup>[26]</sup>; (d) gap sensitivity<sup>[13]</sup>

接材料厚度小于 1 mm 时,通常被连接材料之间的间隙不能超过最薄材料厚度的 10%;对于厚度小于 200  $\mu\text{m}$  的工件,可能需要减少到 5% 或更低,否则会无法形成连接,如图 2(d) 所示。

### 3 激光微焊接模式

激光微焊接的焊接模式与激光宏观焊接的焊接模式类似,分为热导焊和深熔焊,如图 3 所示。在热导焊与深熔焊之间存在不稳定过渡区,部分研究认为激光微焊接的不稳定过渡区的实质是一种焊接模式<sup>[23]</sup>,有研究认为不稳定过渡区的实质为深熔焊<sup>[27]</sup>。在热导焊模式下,激光能量作用于材料表面,能量仅通过热传导传递到材料内部,从而实现材料的熔化焊接<sup>[28]</sup>。由于热导焊材料并不发生汽化,故热导焊过程非常稳定,焊缝可重复性高、表面质量好。但热导焊接的机理为热传导,焊缝的深宽比较小。为了增加熔深,需要通过减小焊接速度来获得更大的热输入,焊接效率较低,且工艺窗口较小。在深熔焊模式下,高功率密度的激光束作用于材料,材料发生汽化,当材料汽化产生的反冲压力与熔化材料的表面张力、静水压力等力相平衡时,在激光作用位置处会产生深熔小孔,激光在深熔小孔中被反射吸收,从而实现材料的熔化焊接<sup>[29]</sup>。深熔焊激光在深熔小孔中被反射吸收,材料对能量的吸收率大大提高,在焊接速度较快且热输入较小的条件下可以形成较大深宽比的焊缝,焊接效率大大提升<sup>[30]</sup>。但是深熔焊接造成材料汽化,也导致了焊接过程的不稳定,在焊接过程中会产生飞溅、气孔等焊接缺陷。

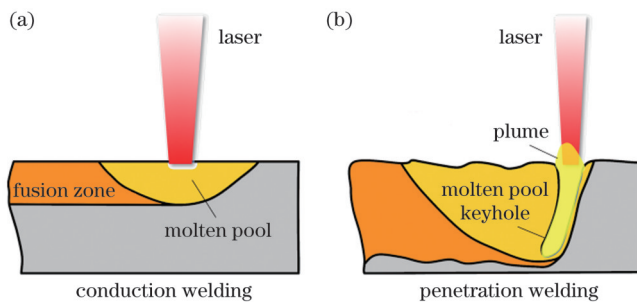


图 3 激光微焊接模式示意图。(a)热导焊;(b)深熔焊

Fig. 3 Schematics of laser micro-welding modes. (a) Heat conduction welding; (b) deep penetration welding

为了研究激光微焊接不稳定过渡区的产生原因,Patschger 等<sup>[23]</sup>在没有气体保护的条件下对金属箔材进行激光微焊接,并利用焊缝表面熔宽的变化来表征焊接模式的改变,如图 4(a) 所示。结果表明,从热导焊模式到不稳定过渡区再到深熔焊模式,熔宽经历了从均匀到不均匀再到均匀分布的变化。研究者认为,激光微焊接不稳定过渡区的焊缝熔宽不稳定,其产生原因与宏观焊接相同,由热导焊接与深熔焊接交替出现导致。Du 等<sup>[31]</sup>对比了施加氩气保

护前后 100  $\mu\text{m}$  厚度不锈钢箔的激光微焊接结果,并结合焊缝表面形貌与焊接羽辉判断焊接模式的变化。在热导焊过程中,材料不会汽化,热导焊与深熔焊的羽辉有明显差异[图 4(b)]。通过观察不稳定过渡焊的背部飞溅和表面稳定的狭长羽辉,结合焊缝熔宽,证明激光微焊接的不稳定过渡焊并不是热导焊与深熔焊的跳变,而是氧化造成深熔焊过程不稳定引起的。

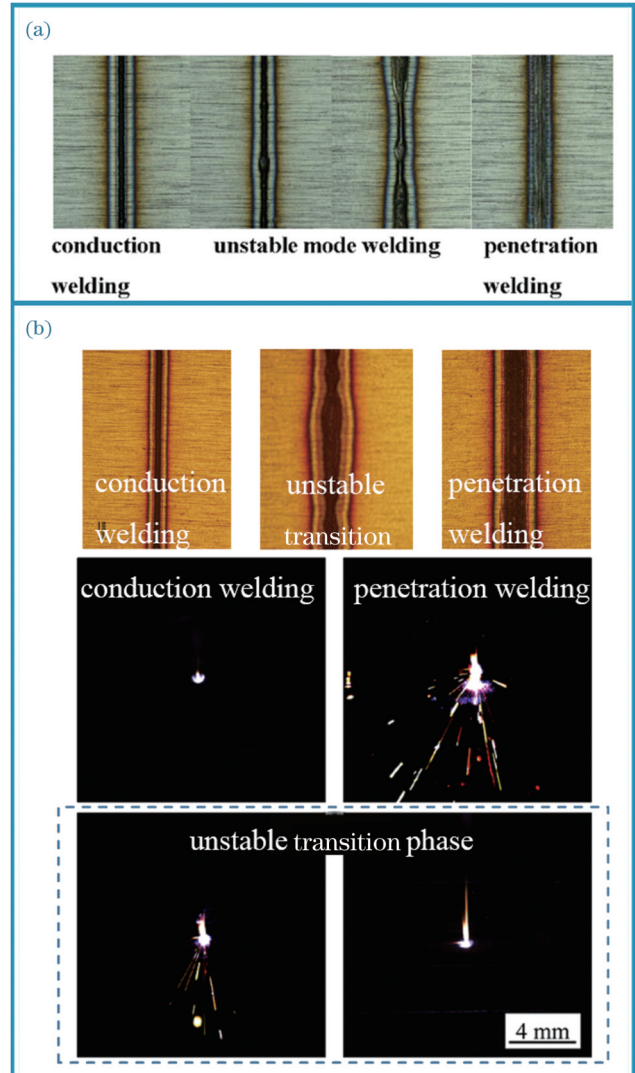


图 4 激光微焊接不稳定过渡区的研究结果。(a)由焊缝宽度判断不稳定过渡区是由热导焊接与深熔焊接交替出现导致的<sup>[23]</sup>;(b)由焊接羽辉结合焊缝宽度证明不稳定过渡区是由深熔焊接过程不稳定导致的<sup>[31]</sup>

Fig. 4 Study results of unstable transition zones in laser micro-welding. (a) Judging from width of weld, unstable transition zone is caused by alternating occurrence of heat conduction welding and deep penetration welding<sup>[23]</sup>; (b) combination of welding plume and weld width proves that unstable transition zone is caused by instability of deep penetration welding<sup>[31]</sup>

此外,Du 等<sup>[31]</sup>还对比研究了 100  $\mu\text{m}$  厚度 304 不锈钢箔在热导焊和深熔焊两种焊接模式下全熔透焊缝的微观组织与性能,发现激光微焊接模式对接头组织性

能有着显著影响。激光能量与材料耦合方式的不同导致两种焊缝有着不同的温度场分布,故在热导焊与深熔焊焊缝内出现了不同大小和类型的铁素体,且分布

规律也不同,如图 5 所示。与深熔焊焊缝相比,热导焊焊缝更高比例的  $\Sigma 3$  重位点阵(CSL)晶界使其具有更好的耐腐蚀性能。

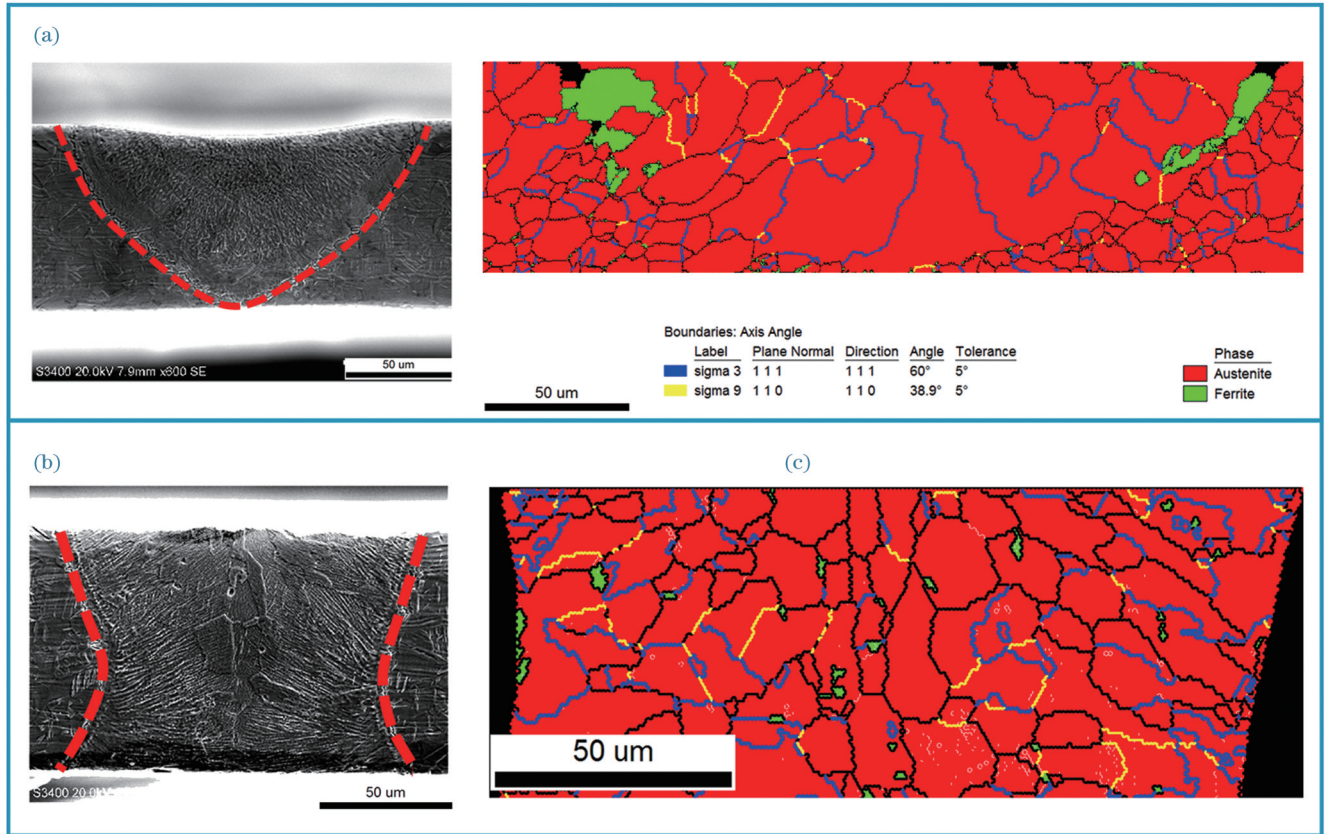


图 5 激光微焊接模式对焊缝微观组织的影响<sup>[31]</sup>。(a)不锈钢热导焊接头的横截面及相组成;(b)不锈钢深熔焊接头的横截面及相组成  
Fig. 5 Effect of laser micro-welding mode on microstructure of weld<sup>[31]</sup>. (a) Cross section and phase composition of heat conduction welding joint of stainless steel; (b) cross section and phase composition of deep penetration welding joint of stainless steel

在热导焊过程中,熔深较浅。为了增加熔深,需要降低焊接速度以获得较大的热输入,这样不仅会导致材料发生变形,还会导致焊接效率降低,工艺窗口减小。深熔焊模式下的激光能量吸收率高,可以在小热输入条件下实现焊接。深熔焊模式下的焊接速度快,生产效率高,同时可以很好地控制变形。深熔焊接可应用于对焊接变形敏感的结构以及复杂构件的焊接生产。然而,深熔焊小孔导致熔体快速流动,从而产生驼峰缺陷,这会限制焊接速度的进一步提升。

#### 4 微焊接激光源

目前常见的应用于激光微焊接的激光器有 Nd:YAG 激光器、半导体激光器、光纤激光器。近年来,蓝光半导体激光器、绿光碟片激光器、环模可调激光器、超短脉冲激光器等新型激光器开始应用于激光微焊接。

Nd:YAG 激光器输出的激光波长为 1064 nm,输出模式分为连续输出和脉冲输出。由于 Nd:YAG 激

光器的光电转换效率低、晶体热效应显著,只在中小功率条件下才能获得高光束质量,实现小聚焦光斑,在早期激光微焊接中得到广泛应用<sup>[32]</sup>。半导体激光器具有占地小、质量轻、寿命长、维护成本低等优点,但是半导体激光器的衍射角大,方向性较差,无法获得极小的聚焦光斑,主要应用于激光热导焊接<sup>[33]</sup>。光纤激光器的体积小,质量轻,可靠性好,维护成本低,电光转化率超过 50%<sup>[34]</sup>,万瓦级光纤激光器的光束质量也能接近 1.0。金属激光微焊接目前普遍采用光纤激光器。

铜等高导电性与高导热性金属对近红外激光(Nd:YAG 激光和光纤激光)的吸收率很低,采用蓝光半导体激光器/绿光碟片激光器等新型短波长激光器可以提高材料对激光的吸收率<sup>[35-38]</sup>。图 6(a)对比了绿光激光与近红外激光焊接铜的焊缝表面形貌,结果显示,采用绿光激光可提升焊接稳定性,飞溅与熔体喷射显著减少。环模可调(ARM)激光器通过输出光纤耦合,可以实现中心高斯光束与周围环形光的同轴输出,其光束能量分布连续可调,与单

模高斯光束相比,中心高斯光束与周围环形光的协同作用能有效提高焊接过程的稳定性,如图 6(b)所示,ARM 激光器同样被用于铝、铜等材料的微焊接<sup>[39]</sup>。

示,ARM 激光器同样被用于铝、铜等材料的微焊接<sup>[39]</sup>。

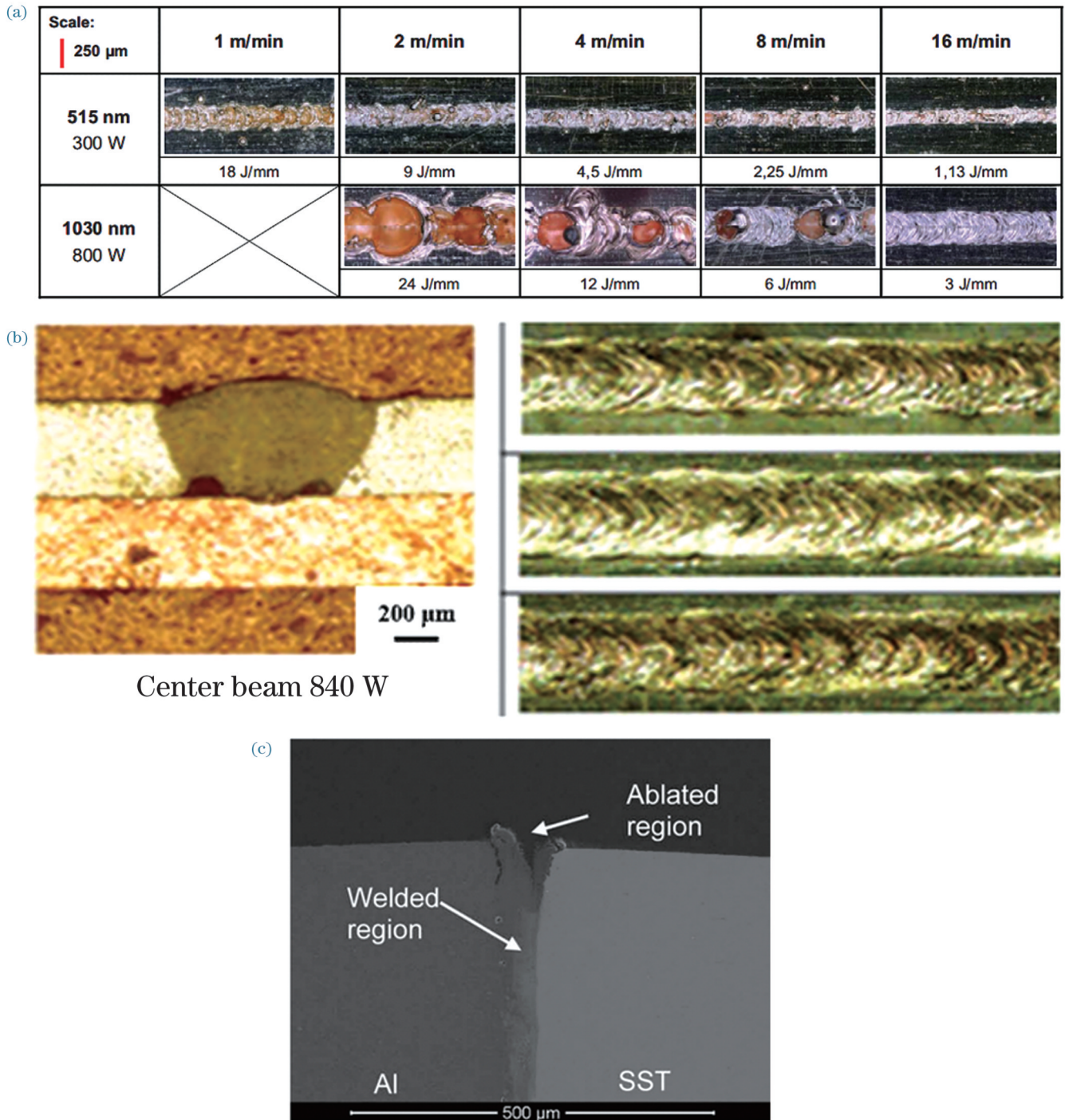


图 6 激光器对微焊接的影响。(a)绿光激光器与近红外光激光器焊接铜的焊缝表面形貌<sup>[37]</sup>; (b)利用环模可调激光器进行铝/铜异种金属搭接焊时焊缝表面及横截面的形貌<sup>[39]</sup>; (c)利用飞秒激光器进行铝/不锈钢对接焊时焊缝表面与横截面的形貌<sup>[40]</sup>  
 Fig. 6 Effects of lasers on laser micro-welding. (a) Surface morphologies of copper welds welded by green laser and near-infrared laser<sup>[37]</sup>; (b) surface and cross-section morphologies of welds in aluminum/copper dissimilar metal lap welding by ARM laser<sup>[39]</sup>; (c) surface and cross-section morphologies of welds in aluminum/stainless steel butt welding by femtosecond laser<sup>[40]</sup>

近年来,由于超短脉冲激光器精确的能量控制,其被用于金属材料的微焊接。Huang 等<sup>[40]</sup>首次采用飞秒激光焊接铝/不锈钢、镁/不锈钢。研究表明,高脉冲重复频率和低脉冲能量可以有效限制脆性金属间化合

物和焊接缺陷的产生,图 6(c)表明,当重复频率为 500 kHz 时焊缝最大熔宽为 80  $\mu\text{m}$ ,提高重复频率可有效减少飞秒激光造成的金属材料烧蚀。表 1 所示为典型微焊接激光源及研究结果。

表 1 典型微焊接光源及研究结果

Table 1 Typical light sources and research results of laser micro-welding

Type	Wavelength / nm	Spot size / $\mu\text{m}$	Pulse width / ms	Pulse frequency / Hz	Welding speed / (mm/s)	Material	Thickness / $\mu\text{m}$
Semiconductor blue laser <sup>[35]</sup>	450	-	-	-	58	Cu	10
Disk laser <sup>[36]</sup>	515	-	1	150	12.5/10.0/5.0	Cu	10
Disk laser <sup>[37]</sup>	515	48.5	-	-	16.7- 266.7	Cu	250
Disk laser <sup>[38]</sup>	515	147	1.8-3.2	139.8-210.3	4-11	Cu	10
ARM laser <sup>[39]</sup>	1070	70/180	-	-	200/500	Al/Cu	400+400
Femtosecond laser <sup>[41]</sup>	800	25	$3.5 \times 10^{-11}$	1000	25/125	Ag/Cu	25+125
Pulsed Nd:YAG <sup>[42]</sup>	1064	200	1.5-305.0	12-20	1.4-5.4	316L stainless steel	100+100
Pulsed Nd:YAG <sup>[43]</sup>	1064	200	4	39	-	316L stainless steel	100+3000
Pulsed Nd:YAG <sup>[44]</sup>	1064	200	1.5-3.5	14-18	3.4	316L stainless steel	100+100
Pulsed fiber laser <sup>[45]</sup>	-	-	-	500	20	316L stainless steel	70
CW fiber laser <sup>[46]</sup>	1090	17.5/35.0	-	-	500-2000	304 stainless steel	50
CW fiber laser <sup>[47]</sup>	1090	35	-	-	1000	304 stainless steel	50/20
CW fiber laser <sup>[48]</sup>	1070	-	-	-	50-300	Cu	300+300
CW fiber laser <sup>[49]</sup>	1070	30	-	-	200-1000	Al/Cu	200+200
CW fiber laser <sup>[50]</sup>	1070	68/175	-	-	150-250	Al/Cu	450+300
CW fiber laser <sup>[51]</sup>	1070	24	-	-	50	Al/Cu	500+500

## 5 激光微焊接缺陷及控制

### 5.1 激光微焊接缺陷

由于微米尺度被连接材料焊接的尺度效应以及深熔焊接模式的特性,相较于宏观焊接,激光微焊接更易产生焊接缺陷。激光微焊常见接缺陷如图 7 所示,主要包括未焊透、烧穿、咬边、变形、飞溅、驼峰、气孔、裂纹等<sup>[52-54]</sup>。

未焊透、烧穿、咬边、变形、飞溅、驼峰等缺陷通常是工艺参数选择不当而导致的。当热输入过小时会产生未焊透缺陷;而当热输入过大时,一方面由于焊后冷却收缩,会发生工件的变形,另一方面在高热输入条件下,熔深可能会超过工件厚度,导致熔池下塌,出现咬边甚至烧穿。通过调控激光功率和焊接速度等工艺参数,可以避免未焊透、烧穿、咬边、变形等焊接缺陷。飞溅常见于深熔焊接模式,深熔小孔内液态金属蒸发产生的反冲压力作用于小孔前壁,深熔小孔的不稳定使得反冲压力的垂直分量驱动小孔前壁凸起熔体向上喷发形成飞溅。一方面可以通过光束振荡增大深熔小孔的开口直径,抑制飞溅的产生。另一方面可以采用短波长激光增加材料对激光的吸收率,控制飞溅的形成。驼峰焊接缺陷一般发生在高速深熔焊接过程中。如图 8(a)所示,驼峰缺陷表现为焊缝表面形状的周期性波动,驼峰缺陷会在焊缝的正面及背面形成,不仅会导致成形不良,还会削弱焊接接

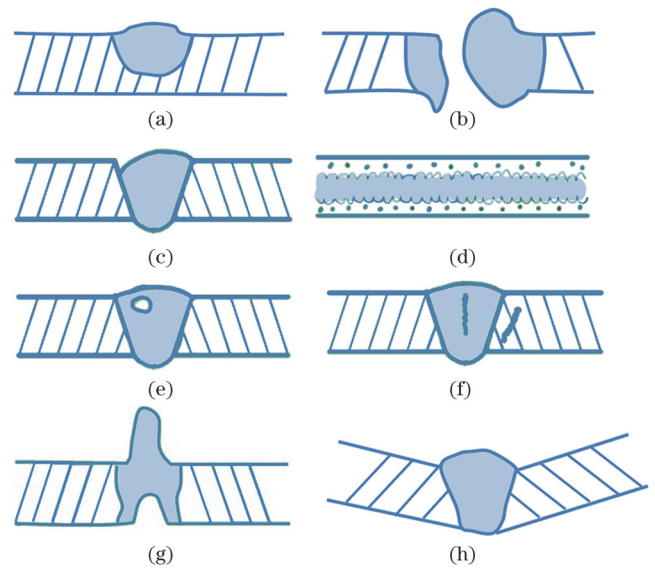


图 7 激光微焊接的典型缺陷。(a)未焊透;(b)烧穿;(c)咬边;(d)飞溅;(e)气孔;(f)裂纹;(g)驼峰;(h)变形  
Fig. 7 Typical defects of laser micro-welding. (a) Incomplete penetration; (b) burn-through; (c) undercut; (d) spatter; (e) pore; (f) crack; (g) humping; (h) deformation

头的力学性能。驼峰缺陷限制了焊接速度的进一步提高,而在工业生产过程中,尤其是更新迭代越来越快的消费电子领域以及市场需求越来越大的电池封装领域,对激光微焊接速度与稳定性提出了更高的要求。通过实验与模拟仿真可知驼峰的形成机理如下:

在高速焊接条件下,主熔流(小孔前壁产生的由小孔底部向后流动的熔流)由小孔前壁底部向后方强烈偏转,靠近母材部分的熔流冷却凝固,流速减慢,中心部分的熔流高速向上偏转,最后瑞利不稳定性造成熔流断裂形成驼峰[图 8(b)]<sup>[55]</sup>。由以上结论可知,快速冷却使得熔体在垂直方向上发生堆积而产生驼峰。因此驼峰出现的临界速度阈值取决于激光功率和聚焦光斑直径,采用大光斑进行焊接可以提高驼峰出现的临界速度阈值<sup>[56]</sup>。同时,由于凝固过程中表面张力的增加,热毛细作用会引起驼峰缺陷的产生,通过气体保护降低液态熔池的表面张力,也可以在一定程度上提高驼峰出现的临界速度阈值<sup>[30]</sup>。提高驼峰出现的临界速度阈值有助于进一步提升焊接效率,控制焊接热输入,对于激光微焊接的应用具有重要意义。

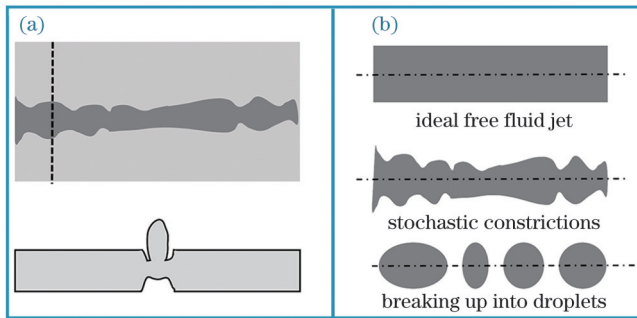


图 8 焊接中的驼峰。(a)驼峰表面及横截面形貌;(b)驼峰形成机制

Fig. 8 Humping in welding. (a) Surface and cross-section morphologies of humping; (b) formation mechanism of humping

由于材料本身的物理特性不同,各类金属材料激光微焊接产生的焊接缺陷类型与机理同样存在明显差异。例如:在铝及铝合金焊接过程中,容易在焊缝和热影响区产生热裂纹,铝合金中镁等合金元素的蒸发也会导致气孔缺陷的产生;铜及铜合金在焊接过程中容易产生熔体喷射与飞溅;在异种金属材料焊接过程中,以铝/铜异种金属的激光微焊接为例,由于铝和铜的热物理参数差异较大,且在焊接过程中容易出现脆性金属间化合物,故会出现气孔、裂纹等冶金缺陷<sup>[57-58]</sup>。在新能源汽车动力电池应用中,铝箔和铜箔接头长期工作在高温环境下,机械振动作用还会导致铝、铜原子相互扩散形成金属间化合物层,金属间化合物层不断加厚,造成接头的冲击韧性下降、电阻升高<sup>[59]</sup>。

## 5.2 焊接工艺对焊接缺陷的影响

焊接工艺的优化是调控焊缝成形、消除焊接缺陷的重要手段。由于焊接材料、焊接结构以及激光器种类的不同,激光微焊接可以调控的工艺参数数量众多。因此,全面理解各参数对激光微焊接过程的影响规律是进一步实现激光微焊接质量控制的基础。以下将从

激光参数和焊接参数两个方面总结工艺参数对焊缝成形以及焊接缺陷的影响规律。其中,激光参数包括激光波长、激光功率与光斑直径、激光脉冲参数,焊接参数包括焊接速度和焊接路径。

### 5.2.1 激光波长

金属对不同波长激光的吸收率不同,这对焊接结果有着显著影响。例如,铜对红外波长激光的吸收率仅为 3%~5%,在焊接过程中需要较大的能量输入,故在焊接过程中容易出现熔体喷射,造成飞溅和焊缝金属缺失等焊接缺陷<sup>[60]</sup>。采用近红外波长激光器实现成形良好的多层铜箔搭接焊的难度很大。随着蓝光半导体激光器/绿光碟片激光器的出现,采用激光微焊接方法实现铜电极箔的焊接成为可能。随着激光波长的减小,铜对激光的吸收率大大提高,在室温下铜对绿光波长激光的吸收率大约是近红外激光的 7 倍,短波长的激光器可以使焊接过程中的飞溅减少,且熔池不稳定性显著降低<sup>[61]</sup>。Grabmann 等<sup>[36]</sup>采用 515 nm 绿光碟片激光器实现了 30 层 10  $\mu\text{m}$  厚的铜箔的焊接,采用正弦调制激光能量获得了较好的焊缝成形。Grabmann 等<sup>[38]</sup>进一步实现了 40 层 10  $\mu\text{m}$  厚的铜箔与 0.3 mm 厚的铜极耳的焊接。如图 9 所示,采用绿光以及蓝光激光器实现了电池重金属箔材的多层叠焊。但是,在绿光多层叠焊过程中,仍然不可避免地产生了气孔缺陷[图 9(a)横截面],而采用蓝光激光器进行多层金属箔材叠焊时未观察到气孔缺陷的产生[图 9(b)横截面]。大功率红外激光产生深熔小孔后,铜对红外激光的吸收率增大,吸收的激光能量显著增加,材料发生了剧烈汽化。相比之下,铜对波长更短的蓝光激光的吸收率更高,小功率蓝光激光深熔焊过程中材料的汽化过程更为稳定,因此采用波长更短的蓝光激光器焊接铜可以显著控制气孔缺陷的产生。

### 5.2.2 激光功率与光斑直径

激光功率的增加以及光斑直径的减小可以使激光的功率密度增加,对焊缝熔深、熔宽以及焊接模式有着显著影响。通过控制激光功率和光斑直径,可以避免未焊透、烧穿、咬边、变形等焊接缺陷的产生。图 10(a)表明:当光斑直径为 34.8  $\mu\text{m}$  时,随着激光功率的增加,焊缝熔深和熔宽呈显著增大的趋势;但当光斑直径为 17.4  $\mu\text{m}$  时,焊缝熔宽随激光功率的增长并不明显。同时,根据焊缝横截面可以判断,在激光功率与光斑直径的比值超过深熔阈值后,焊接模式会由热导焊转变为深熔焊<sup>[62]</sup>。如图 10(b)所示,当激光功率降低到 240 W 时,开始出现未焊透缺陷,随着光斑直径的增加,在相同焊接参数下焊接稳定性下降<sup>[63]</sup>。新型的环模可调激光器可以独立调节同轴中心光与环形光功率的大小,获取不同的激光功率空间分布。Cha 等<sup>[39]</sup>使用中心光斑直径为 70  $\mu\text{m}$  的环模激光进行了铝/铝和铝/铜的搭接焊,发现随着输出功率的增加,焊缝宽度



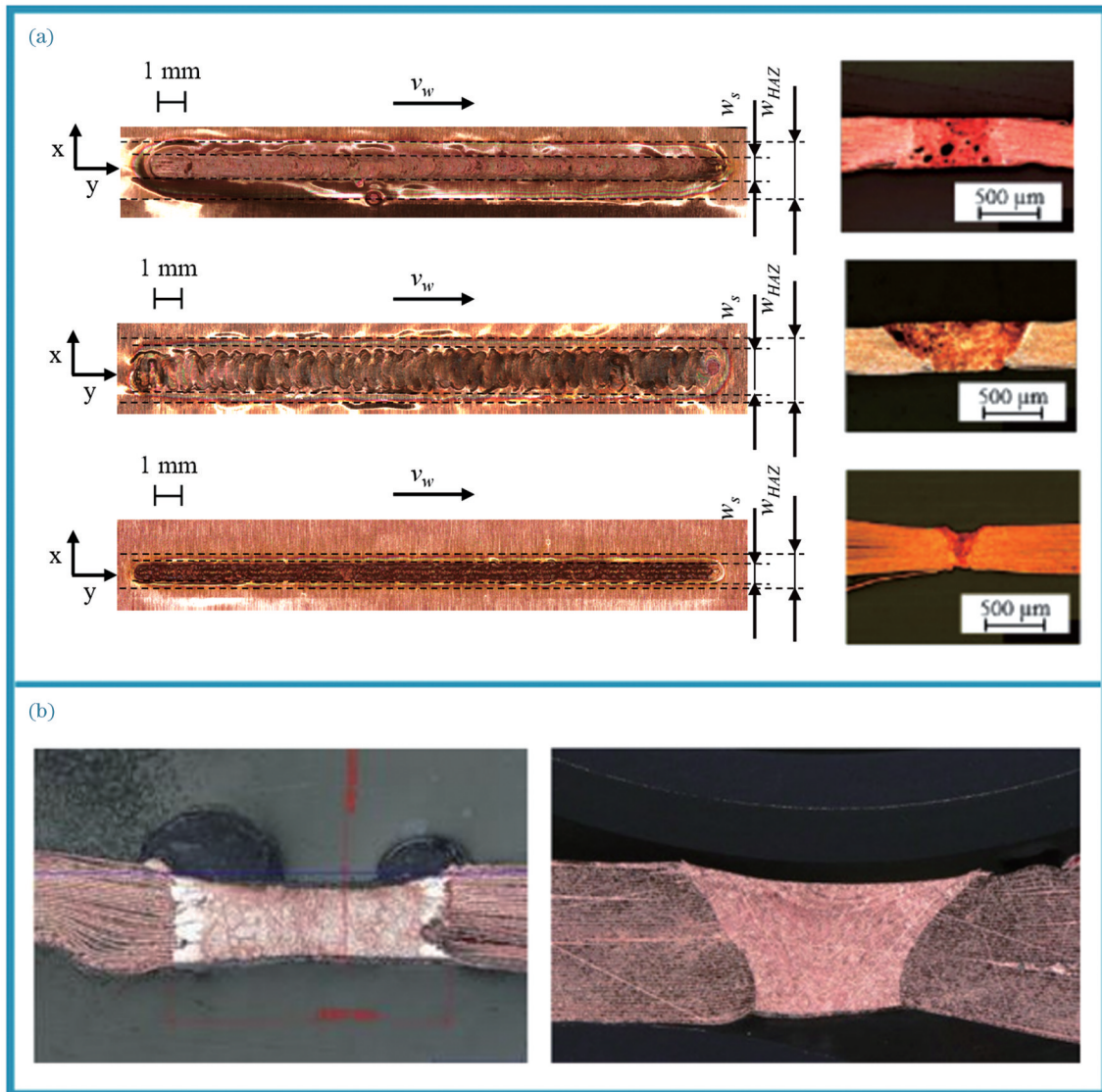


图 9 金属箔材叠加焊接头的表面与横截面。(a)绿光激光焊接铜箔<sup>[36]</sup>;(b)蓝光激光焊接铜箔<sup>[35]</sup>

Fig. 9 Surface morphology and cross-section morphology of laser welded metal foil stacks. (a) Green laser welding of copper foil<sup>[36]</sup>; (b) blue laser welding of copper foil<sup>[35]</sup>

增加,与单光束激光焊接相比,环模激光焊接可以控制熔池表面的凝固行为,显著提高了表面的成形质量。

### 5.2.3 激光脉冲参数

激光脉冲包括脉冲能量、脉冲持续时间、脉冲频率、脉冲形状等参数。通过调控激光脉冲参数可以控制熔池的动态行为,从而控制焊缝成形,抑制焊接缺陷的产生。

在焊缝成形方面,Sheikhbahee等<sup>[42]</sup>采用Nd:YAG脉冲激光开展了100 μm厚的316L不锈钢的搭接焊研究。不锈钢箔焊缝的形状和尺寸取决于脉冲能量,熔深与熔宽随着脉冲能量的增加而增加。Rohde等<sup>[64]</sup>研究发现,通过调整脉冲形状(即加热、焊接和冷却过程中的脉冲分布),可以控制铝合金箔激光微焊接焊缝的深宽比。

在缺陷控制方面,Pakmanesh等<sup>[44]</sup>利用响应面法研究了激光脉冲参数对激光微焊接咬边缺陷的敏感

性。在咬边缺陷模型中,峰值功率的影响最大,占比为64%,其次是脉冲持续时间和脉冲频率,影响占比分别为22%和4%。通过调整工艺参数,可以消除焊缝的表面成形缺陷。熔池的快速凝固会导致熔池内的气体无法逸出,从而在焊缝内部形成气孔缺陷。调控脉冲形状,增加熔池凝固时间,可以使熔池内的气体逸出,从而有效减少气孔缺陷的产生<sup>[62]</sup>。

### 5.2.4 焊接速度

焊接速度决定了光束在焊接区域中的停留时间。首先在焊缝成形方面,在激光功率相同的条件下,焊缝熔深与熔宽会随着焊接速度的增加而减小<sup>[63]</sup>。在焊接缺陷方面,高焊接速度可以减少热输入,避免产生烧穿缺陷,同时可以控制焊接变形。前文提到,在异种金属焊接中,金属间化合物的形成会导致裂纹、接头脆性等问题,而采用微小光斑以极高的速度进行焊接,快速的冷却可以抑制元素的相互扩散,从而有效控制连接界

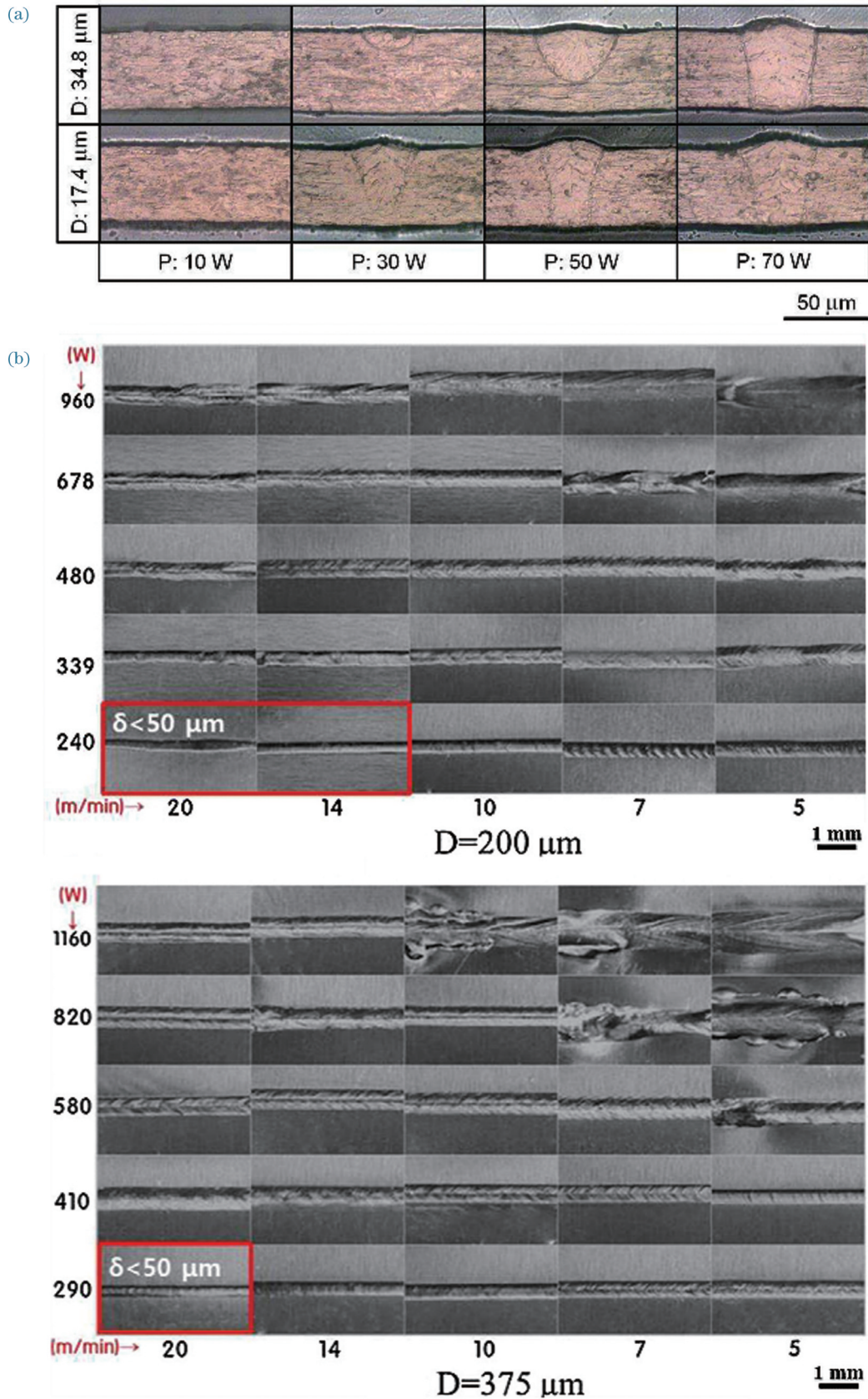


图 10 激光功率与光斑直径对焊缝成形的影响。(a)光斑直径分别为 34.8  $\mu\text{m}$  和 17.4  $\mu\text{m}$  时不同功率下的焊缝横截面形貌<sup>[62]</sup>; (b)光斑直径分别为 200  $\mu\text{m}$  和 375  $\mu\text{m}$  时不同功率/速度条件下的焊缝表面形貌<sup>[63]</sup>

Fig. 10 Effects of laser power and beam diameter on weld formation. (a) Cross-section morphologies of welds at different powers when spot diameters are 34.8  $\mu\text{m}$  and 17.4  $\mu\text{m}$ , respectively<sup>[62]</sup>; (b) surface morphologies of welds at different powers and speeds when spot diameters are 200  $\mu\text{m}$  and 375  $\mu\text{m}$ , respectively<sup>[63]</sup>

面区域金属间化合物的形成,获得力学性能良好的焊缝<sup>[65]</sup>。然而,当焊接速度超过驼峰产生的临界速度阈值时,焊缝就会出现驼峰缺陷,因此需要控制焊接速度,避免驼峰的产生。

### 5.2.5 焊接路径

近年来,各类激光器配合扫描振镜被广泛用于激光微焊接。在扫描振镜系统中,振镜通过摆动使光束偏转,实现焦点在工作空间中的精确移动,具有惯性小、速度快等特点。基于扫描振镜的激光微焊接,通

过计算机编程不仅可以实现高速度高精度的扫描焊接,同时可以实现光束振荡扫描微焊接,将线性运动与独立的振荡运动(圆形、椭圆形、8字形、螺旋线形等运动)相叠加<sup>[66-69]</sup>。Zhu 等<sup>[68]</sup>对铝/铜异种金属振荡扫描微焊接进行了研究,结果表明:在成形方面,如图 11(a)所示,随着振幅的增加,焊缝熔深变浅且界面熔宽增加,随着振荡频率的增加,单圈热输入减小,焊缝熔深减小。如图 11(b)所示,与线性扫描焊接相比,振荡扫描焊接不仅可以增大焊缝连

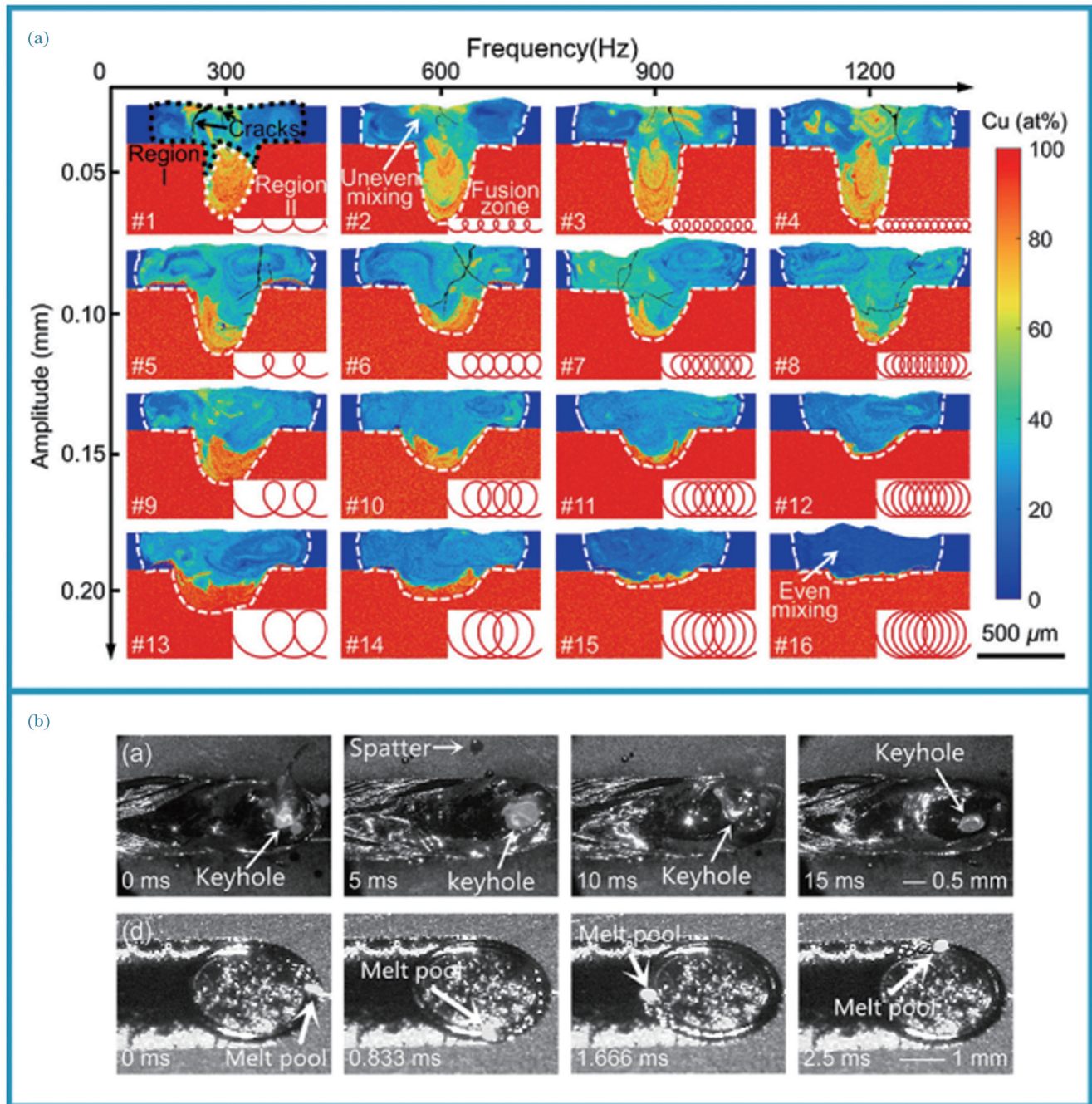


图 11 振荡扫描对焊缝成形及熔池的影响。(a)铝/铜异种金属焊缝横截面的能谱仪(EDS)扫描图<sup>[68]</sup>; (b)高速摄像拍摄的线性扫描焊接与振荡焊接的熔池动态行为<sup>[70]</sup>

Fig. 11 Effects of oscillation scanning on weld formation and molten pool. (a) Scanning images of cross sections of aluminum/copper dissimilar metal welds by energy disperse spectrometer (EDS)<sup>[68]</sup>; (b) dynamic behaviors of molten pools during linear scanning welding and oscillating welding captured by high-speed photography<sup>[70]</sup>

接面积,在振荡扫描过程中还可以增大深熔小孔的开口尺寸,稳定焊接过程,减少飞溅、裂纹及气孔等缺陷<sup>[70]</sup>。

## 6 金属材料激光微焊接的应用

### 6.1 同种金属激光微焊接的应用

图 12(a)~(f)列出了同种金属激光微焊接的常见应用。不锈钢具有良好的塑韧性、较高的强度和较好的可焊性,且耐高温、耐腐蚀。不锈钢箔材被广泛应用于航空航天、汽车、植入式医疗器械等领域<sup>[71]</sup>。在航空航天领域中,不锈钢箔可以作为航天器太阳能电池板的衬底,也是航天喷气发动机叶片的重要组成材料之一,在应用过程中会不可避免地涉及到不锈钢箔构件的连接。在消费电子领域中,不锈钢箔作为柔性屏的衬底材料同样离不开激光微焊接。在新能源汽车领域中,316L 奥氏体不锈钢箔双极板是燃料电池的重要组成部分,焊接过程中不锈钢箔产生的变形会使双极板

产生形状误差,最终导致燃料电池堆的性能下降<sup>[72]</sup>,因此焊接变形是影响双极板性能的重要因素。

铜具有高导电性与高导热性,铜箔根据制造工艺可分为压延铜箔和电解铜箔。铜箔被广泛应用于 5G/6G 通信、电磁屏蔽、航空航天、锂电池、电子产品等领域。在电子电路领域中,利用激光微焊接技术可以将电子元件引脚直接焊接到铜印刷电路板轨道上<sup>[73]</sup>。前文提到,在锂离子电池中已经实现了多层铜箔的叠焊,但多层集流体铜箔与极耳的叠焊仍然存在成形不良、气孔等缺陷,需要进一步解决。

铝和铝合金具有比强度高、耐腐蚀、密度小等特点,在电子电路领域中具有非常广泛的应用。随着新能源汽车以及动力锂离子电池的发展,铝箔作为正极极耳材料被广泛应用于锂离子电池。电池的串联需要使用激光对铝极耳进行焊接。由于铝本身的特性,铝箔叠加的激光微焊接接头可能产生的气孔、热裂纹以及接头软化等问题仍亟待解决。

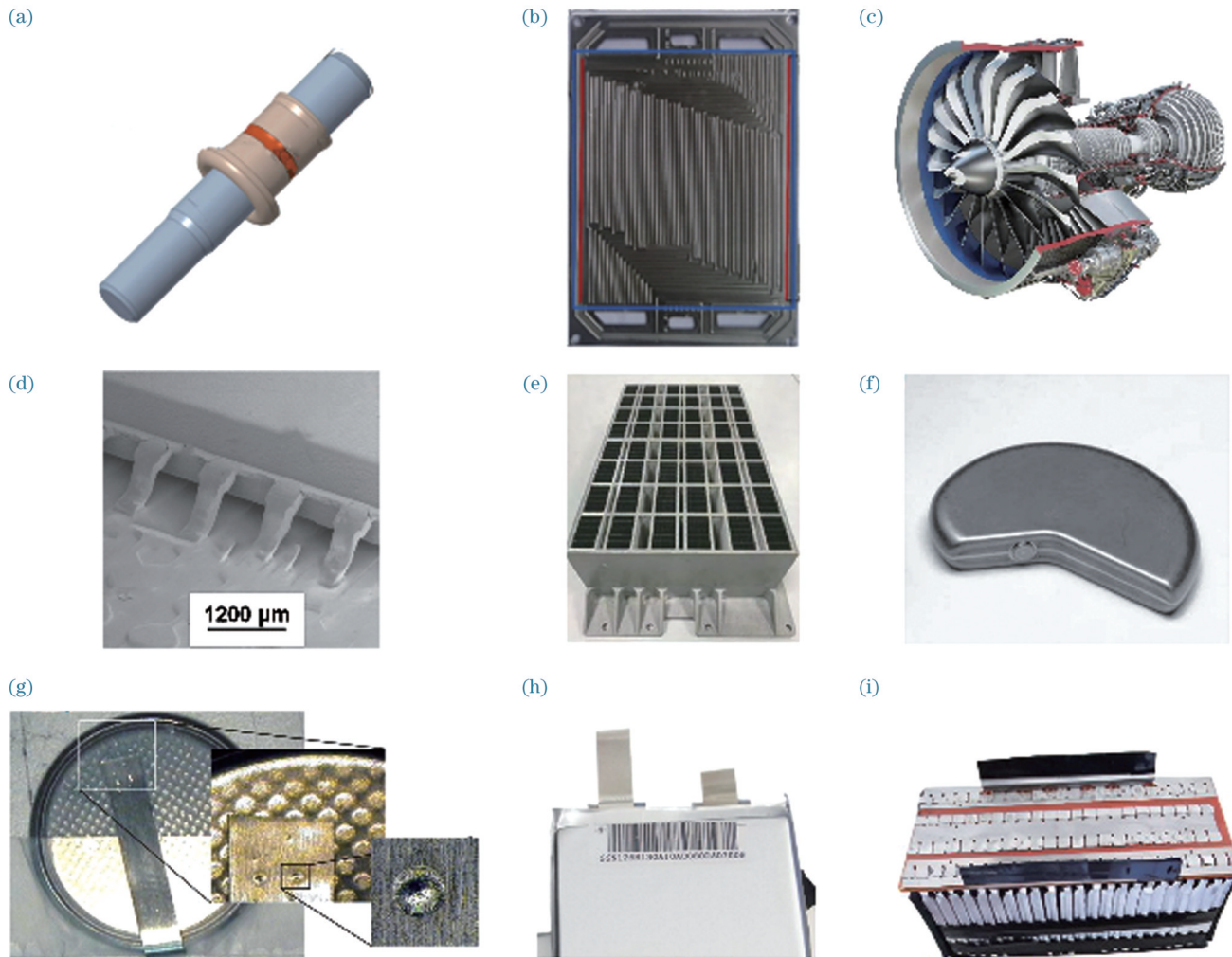


图 12 金属材料激光微焊接的应用。(a)压力传感器<sup>[71]</sup>; (b)燃料电池不锈钢双极板<sup>[72]</sup>; (c)航天发动机不锈钢叶片; (d)电子元件引脚与铜印刷电路板<sup>[73]</sup>; (e)钽卫星准直器<sup>[76]</sup>; (f)心脏起搏器钛外壳<sup>[74]</sup>; (g)~(i)锂离子电池极耳<sup>[79]</sup>

Fig. 12 Application of laser micro-welding of metal materials. (a) Pressure sensor<sup>[71]</sup>; (b) bipolar plate for fuel cells<sup>[72]</sup>; (c) blades for aerospace engines; (d) electronic component pins and copper printed circuit board<sup>[73]</sup>; (e) tantalum satellite collimator<sup>[76]</sup>; (f) cardiac pacemaker<sup>[74]</sup>; (g)~(i) lithium ion battery tabs<sup>[79]</sup>

钛及钛合金具有良好的生物相容性和耐腐蚀性,是一种在医疗器件领域中广泛应用的材料。在植入式医疗器件中,例如心脏起搏器,均采用钛箔作为外壳材料<sup>[74]</sup>,激光微焊接是植入式医疗器件的主要封装技术。

金属钽具有高熔点、耐腐蚀等特点,是航空航天器件的重要材料<sup>[75]</sup>。深空探测是 21 世纪人类进行空间技术创新及太空资源探索与利用的重要途径,准直器是深空探测器的关键部件。我国自主研发的第一颗硬 X 射线调制望远镜卫星(HXMT),其主要科学目标是实现世界最高灵敏度和空间分辨率的硬 X 射线巡天,发现大批超大质量黑洞和其他高能天体,解析宇宙 X 射线背景等,其中高精度的准直器是实现其科学目标的最为重要的部件之一。在我国自主设计的硬 X 射线调制望远镜卫星的中能望远镜中,高精度准直器由铝合金框本体和插装于本体上的若干钽栅格单元组成,其中栅格壁厚为 70  $\mu\text{m}$ ,准直孔尺寸为 1.17 mm $\times$ 4.68 mm,深度为 67 mm。焊接变形与成形不良将大幅降低准直器的指向精度。因此,准直器栅格结构极高的精度要求以及太空的复杂环境对焊点尺寸和性能及焊接变形提出了严格要求<sup>[76-77]</sup>。采用激光微焊接技术对厚度仅为 70  $\mu\text{m}$ 的钽箔栅格结构进行点焊,可以获得成形良好的焊点,同时激光微焊接可以很好地控制焊接变形,确保栅格的尺寸精度。

## 6.2 异种金属激光微焊接的应用

为了发挥各金属材料的优势,在实际应用中常采用异种材料连接构件。例如铝和铜都具有良好的导电性与导热性,但铝的价格远远低于铜,出于降低成本的考虑,在化学反应器、散热器等构件中多采用铝铜的异种焊接。除此以外,在实际应用中,锂离子电池中异种金属材料极耳的串联输出同样涉及到异种金属的连接。图 12(g)~(i)列出了异种金属激光微焊接在锂离子电池中的典型应用。

随着节能减排政策的推动,新能源汽车动力锂离子电池行业迅猛发展。根据纯电动汽车对动力锂离子电池组功率和容量的要求,动力锂离子电池组一般由几百甚至上千个锂离子电池单体组成<sup>[78-80]</sup>。在锂电池的制造组装过程中,电池单体内部的连接和电池单体之间的连接都涉及到异种金属的微焊接。其中包括不锈钢/铜、不锈钢/铝、不锈钢/镍、铝/铜极耳的微焊接。从前文论述可知,异种金属相互扩散形成的金属间化合物是接头性能恶化的主要原因。随着工艺方法的创新以及工艺参数的优化,金属间化合物的含量得到了有效控制。但焊接过程中产生的焊接缺陷、工艺窗口、接头综合性能等仍然需要进一步研究。

## 7 总结与展望

激光微焊接由于尺度效应而具有较复杂的焊接特

性,容易出现焊接缺陷。微米尺度金属材料微焊接的缺陷控制取决于多个方面,对激光波长、激光功率与光斑直径、激光脉冲参数、焊接速度、焊接路径等工艺参数进行调控可以有效优化焊缝成形并控制焊接缺陷。虽然激光微焊接在同种、异种金属材料的连接中得到了广泛应用,但仍然存在一些挑战。

首先是被连接材料方面。在激光微焊接的发展过程中,同种金属以及异种金属的激光微焊接得到了大量研究并获得了大量的研究成果。以铜为例,同种金属激光微焊接被广泛用于电池领域铜箔集流体的焊接,是可能取代超声波焊接、减少电池内部损伤以及消除噪声污染的重要技术手段。但铜对红外激光极低的吸收率一直制约着铜箔激光微焊接质量的提升。近年来出现的以大功率 GaN 半导体蓝光激光器为代表的短波长激光器实现了 20~40 层铜箔的焊接,但关于短波长激光微焊接工艺的研究仍缺少相关报道,因此需要深入研究短波长激光与金属材料的作用机理,从而优化焊接工艺,实现焊接质量的提升。在异种金属激光微焊接中,材料熔化以及元素的相互扩散导致的金属间化合物是降低接头性能的重要因素,需要通过优化工艺进一步控制金属间化合物层的厚度、种类及分布,提升异种金属激光微焊接的焊接质量。除了金属材料之间的激光微焊接外,近年来随着 MEMS 的快速发展,金属与非金属的微焊接需求飞速增长,金属与玻璃、陶瓷、硅片等脆性材料的微焊接对于提升 MEMS 器件封装质量与效率起到重要作用。因此,金属/非金属的激光微焊接是激光微焊接未来发展的重要方向。

其次是工艺技术方面。如何提升生产节拍是制造业关注的重点问题,提高焊接速度对于提升生产节拍有着重要意义。目前高功率、高光束质量以及高稳定性激光器的发展已经非常成熟,为超高速焊接创造了条件。但是当焊接速度超过驼峰出现的临界速度阈值时,深熔焊接模式下熔池内熔体的快速流动以及高冷却速度使得熔体堆积形成焊接驼峰,驼峰缺陷极大地影响了焊缝的成形质量与力学性能,降低了产品的良品率。虽然焊接驼峰的形成机理已有大量的研究,但仅调节光斑直径等工艺参数对于提升临界速度仍然作用有限,需要通过工艺方法的创新和多能场复合,对焊接过程中熔池的流动特性以及凝固过程进行控制,进一步提升驼峰出现的临界速度阈值。其中,声光电磁等能场与激光的复合对微米尺度熔池的影响规律与作用机理等需要深入研究,这对提升生产节拍以及保证高速焊接时产品的良品率至关重要。

最后是激光微焊接装备方面。对于被连接材料尺寸不大于 100  $\mu\text{m}$ 的激光微焊接,由于材料特征尺寸微小且在焊接过程中存在尺度效应,激光微焊接往往对被连接材料的装配精度以及焊接过程的稳定性要求很

高,因此被连接材料的高可靠夹持、焊接位置的高速精确定位、焊接缺陷的实时检测与焊接过程的反馈控制仍然是挑战。近年来,采用机器视觉、光学相干断层扫描等手段对激光微焊接过程进行监测取得了一些研究进展,未来开发智能化的激光微焊接系统对于提升焊接生产效率与焊接质量具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 赵兴科, 邢德胜, 刘大勇. 激光微连接技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 28-34.  
Zhao X K, Xing D S, Liu D Y. Research and application development on laser micro joining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 28-34.
- [2] Kumar N, Masters I, Das A. In-depth evaluation of laser-welded similar and dissimilar material tab-to-busbar electrical interconnects for electric vehicle battery pack[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 78-96.
- [3] Katrakova-Krüger D, Pegoraro L, Salmaso L, et al. Laser welding of nitinol thin foils: mechanical properties and microstructure depending on process parameters[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(3): 998-1009.
- [4] Häusler A, Helm J, Hollatz S, et al. Laserbeam microwelding [M] // Poprawe R, Häfner C, Wester R. Tailored light 2. RWTHedition. Cham: Springer, 2024: 599-615.
- [5] Deepak J R, R P A, Sundar S S. Applications of lasers in industries and laser welding: a review[J/OL]. Materials Today: Proceedings: 1-6[2023-11-09]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532300620X?via%3Dihub>.
- [6] Yoon H S, Bang H S. The effect of wobbling on the welding characteristics in Al/Cu fiber laser welded joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(11): 5343-5352.
- [7] Kumar A, Neogy S, Keskar N, et al. Studies on welding of thin stainless steel sheets with pulsed nanosecond fiber laser in butt joint configuration[J]. Journal of Laser Applications, 2023, 35(4): 042013.
- [8] Xu J Y, Jiang Q, Yang J, et al. A review on ultrafast laser microwelding of transparent materials and transparent material-metals[J]. Metals, 2023, 13(5): 876.
- [9] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. Light, Science & Applications, 2016, 5(8): e16133.
- [10] Jain V K, Sidpara A, Balasubramaniam R, et al. Micromanufacturing: a review: part I[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(9): 973-994.
- [11] Naeem M. Developments in laser microwelding technology[M] // Katayama S. Handbook of laser welding technologies. Amsterdam: Elsevier, 2013: 163-211.
- [12] Zhou Y. Microjoining and nanojoining[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008.
- [13] Vollertsen F, Wagner F, Thomy C. Micro welding for environmental-friendly products[C] // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, November 27-30, 1990, Orlando, Florida, USA. New York: Laser Institute of America, 2007: 308.
- [14] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 特种加工机床术语 第 9 部分: 激光加工机床: GB/T 14896.9—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Non-traditional machines—Terminology: Part 9: Laser processing machines: GB/T 14896.9—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [15] O' Toole L, Kang C W, Fang F Z. Precision micro-milling process: state of the art[J]. Advances in Manufacturing, 2021, 9(2): 173-205.
- [16] Wojciechowski S. Estimation of minimum uncut chip thickness during precision and micro-machining processes of various materials: a critical review[J]. Materials, 2021, 15(1): 59.
- [17] Maina M, Okamoto Y, Inoue R, et al. Influence of surface state in micro-welding of copper by Nd: YAG laser[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2364.
- [18] Song D B, Kim R, Choi K, et al. Effects of beam shape on the microstructures and mechanical properties during thin-foil laser welding[J]. Metals, 2023, 13(5): 916.
- [19] Jamaludin M N, Quazi M M, Aiman M H, et al. Distortion in laser micro welding of stainless steel SS304 foils[J/OL]. Materials Today: Proceedings: 1-6[2023-11-09]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323049593?via%3Dihub>.
- [20] Dong Z S, Pan R, Zhou T S, et al. Microstructure and mechanical property of Ti/Cu ultra-thin foil lapped joints with different weld depths by nanosecond laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108: 88-97.
- [21] Woizeschke P, Vollertsen F. Laser keyhole micro welding of aluminum foils to lap joints even with large gap sizes[J]. CIRP Annals, 2020, 69(1): 237-240.
- [22] Olowinsky A, Spurk C, Helm J, et al. Laser-based joining of electrode stacks for automated large-scale production of Li-ion battery cells[J]. Energy Technology, 2023, 11(5): 2200770.
- [23] Patschger A, Bliedtner J, Bergmann J P. Process-limiting factors and characteristics of laser-based micro welding[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 740-749.
- [24] Wautelet M. Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworlds [J]. European Journal of Physics, 2001, 22(6): 601-611.
- [25] Solchenbach T, Plapper P. Mechanical characteristics of laser braze-welded aluminium-copper connections[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 249-256.
- [26] Patschger A, Bliedtner J, Hild M, et al. Flexible and efficient laser remote welding of ultra-thin metal foils[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(5): 052005.
- [27] 杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. AISI304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102006.  
Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser-micro-welding of AISI304 stainless-steel foil[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102006.
- [28] Xiao X F, Fu Y S, Ye X J, et al. Analysis of heat transfer and melt flow in conduction, transition, and keyhole modes for CW laser welding[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 120: 103996.
- [29] Rai R, Elmer J W, Palmer T A, et al. Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(18): 5753-5766.
- [30] Svenungsson J, Choquet I, Kaplan A F H. Laser welding process—a review of keyhole welding modelling[J]. Physics Procedia, 2015, 78: 182-191.
- [31] Du W Z, Xu J J, Xiao R S, et al. Laser micro-welding of stainless steel foil: welding mode, microstructure and corrosion properties [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161: 109241.
- [32] Karagiannis S, Chryssoulouris G. Nd: YAG laser welding: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5131: 260-264.
- [33] Abe N, Funada Y, Ishide M. Micro-welding of thin foil with direct diode laser[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5063: 287-291.
- [34] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [35] Pelaprat J M, Finuf M, Fritz R, et al. Seeing things in a new light: high power blue lasers for metal processing[J]. Laser Technik Journal, 2018, 15(4): 39-41.
- [36] Grabmann S, Tomcic L, Zaeh M F. Laser beam welding of copper foil stacks using a green high power disk laser[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 582-586.

- [37] Engler S, Ramsayer R, Poprawe R. Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 339-346.
- [38] Grabmann S, Kriegler J, Harst F, et al. Laser welding of current collector foil stacks in battery production—mechanical properties of joints welded with a green high-power disk laser[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(7): 2571-2586.
- [39] Cha J H, Choi H W. Characterization of dissimilar aluminum-copper material joining by controlled dual laser beam[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(3): 1909-1920.
- [40] Huang H, Hu A M, Peng P, et al. Femtosecond laser-induced microwelding of silver and copper[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1211-1217.
- [41] Huang H, Yang L M, Bai S, et al. Femtosecond fiber laser welding of dissimilar metals[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6569-6578.
- [42] Sheikhabaee H, Mirahmadi S J, Pakmanesh M R, et al. Investigating sensitivity to process parameters in pulsed laser micro-welding of stainless steel foils[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107737.
- [43] Ventrella V A, Beretta J R, De Rossi W. Application of pulsed Nd: YAG laser in thin foil microwelding[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2014, 48(1/2/3/4): 194.
- [44] Pakmanesh M R, Shamanian M. Optimization of pulsed laser welding process parameters in order to attain minimum underfill and undercut defects in thin 316L stainless steel foils[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 30-38.
- [45] Xu H, Guo X Y, Lei Y P, et al. Welding deformation of ultra-thin 316 stainless steel plate using pulsed laser welding process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105583.
- [46] Hozorbakhsh A, Hamdi M, Sarhan A A D M, et al. CFD modelling of weld pool formation and solidification in a laser micro-welding process[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, 101: 58-69.
- [47] Matsuoka S, Okamoto Y, Okada A. Influence of weld bead geometry on thermal deformation in laser micro-welding[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 492-497.
- [48] Mehlmann B, Gehlen E, Olowinsky A, et al. Laser micro welding for ribbon bonding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 776-781.
- [49] Lee S J, Choi K D, Lee S J, et al. Welding properties of dissimilar Al-Cu thin plate by a single-mode fiber laser[J]. *Metals*, 2022, 12(11): 1957.
- [50] Dimatteo V, Ascari A, Liverani E, et al. Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107495.
- [51] Fortunato A, Ascari A. Laser welding of thin copper and aluminum sheets: feasibility and challenges in continuous-wave welding of dissimilar metals[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 6(2): 136-157.
- [52] Patschger A, Bliedner J. Constraints and optimization of the laser microwelding process of thin metal foils[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022408.
- [53] Velázquez de la Hoz J L, Cheng K. Development of an intelligent quality management system for micro laser welding: an innovative framework and its implementation perspectives[J]. *Machines*, 2021, 9(11): 252.
- [54] Seiler M, Patschger A, Tianis L, et al. Experimental determination of influencing factors on the humping phenomenon during laser micro welding of thin metal sheets[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022413.
- [55] Otto A, Patschger A, Seiler M. Numerical and experimental investigations of humping phenomena in laser micro welding[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 1415-1423.
- [56] Seiler M, Patschger A, Bliedner J. Investigations of welding instabilities and weld seam formation during laser microwelding of ultrathin metal sheets[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022417.
- [57] Schmidt P A, Schmitz P, Zaeh M F. Laser beam welding of electrical contacts for the application in stationary energy storage devices[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022423.
- [58] Ali S, Shin J. In-depth characterization of laser-welded aluminum-and-copper dissimilar joint for electric vehicle battery connections [J]. *Materials*, 2022, 15(21): 7463.
- [59] Solchenbach T, Plapper P, Greger M, et al. Thermal and electrical aging of laser braze-welded aluminum-copper interconnects[J]. *Translational Materials Research*, 2014, 1(1): 015001.
- [60] Haubold M, Ganser A, Eder T, et al. Laser welding of copper using a high power disc laser at green wavelength[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 446-449.
- [61] Zhang X D, Miyagi M, Okamoto S. Fundamental study on welding properties of 515 nm green laser[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 14-18, 2018, San Diego, California, USA. New York: Laser Institute of America, 2014: 458-462.
- [62] Ismail M I S, Okamoto Y, Okada A, et al. Experimental investigation on micro-welding of thin stainless steel sheet by fiber laser[J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2011, 4(3): 314-320.
- [63] Kim J, Kim S, Kim K, et al. Effect of beam size in laser welding of ultra-thin stainless steel foils[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 125-134.
- [64] Rohde M, Markert C, Pflöging W. Laser micro-welding of aluminum alloys: experimental studies and numerical modeling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 50(1): 207-215.
- [65] Lee S J, Nakamura H, Kawahito Y, et al. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(2): 111-118.
- [66] Mathivanan K, Plapper P. Laser welding of dissimilar copper and aluminum sheets by shaping the laser pulses[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 36: 154-162.
- [67] Dimatteo V, Ascari A, Fortunato A. Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al): process optimization and characterization[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 158-165.
- [68] Zhu B H, Zhen L, Xia H B, et al. Effect of the scanning path on the nanosecond pulse laser welded Al/Cu lapped joint[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106945.
- [69] Li Q G, Zhu B H, Li H Y, et al. Effect of spiral scan distance on the nanosecond-pulsed-laser lap joint of Al/Cu[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108896.
- [70] Huang W K, Cai W, Rinker T J, et al. Effects of laser oscillation on metal mixing, microstructure, and mechanical property of aluminum-copper welds[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 188: 104020.
- [71] Kenda M, Klobčar D, Nagode A, et al. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105579.
- [72] Yi P Y, Du X Y, Kan Y Y, et al. Modeling and experimental study of laser welding distortion of thin metallic bipolar plates for PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(14): 4850-4860.
- [73] Otte F, Stute U, Ostendorf A. Microwelding of electronic components with 532 nm laser radiation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6458: 645804.
- [74] Ely K J, Hall P, Zhou Y. Microwelding methods in medical components and devices[M]//Zhou Y, Breyen M D. Joining and assembly of medical materials and devices. Amsterdam: Elsevier,

- 2013: 47-78, 79e.
- [75] 曹学蕾, 姜维春, 张万昌, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星中能望远镜设计与验证[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 127-133.  
Cao X L, Jiang W C, Zhang W C, et al. Design and verification of medium energy telescope onboard HXMT satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(5): 127-133.
- [76] 黄婷, 杜伟哲, 苏坤, 等. 深空探测卫星准直器跨尺度栅格结构的激光精密微焊接技术与装备[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002402.  
Huang T, Du W Z, Su K, et al. Laser microwelding technology and equipment for cross-scale collimator grid of deep-space exploration satellite[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002402.
- [77] 季良, 杨武雄, 肖荣诗. 金属钨箔十字交叉激光微点焊工艺研究[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 601-605.  
Ji L, Yang W X, Xiao R S. Study on laser micro welding of crossed tantalum foils[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 601-605.
- [78] Zwicker M F R, Moghadam M, Zhang W, et al. Automotive battery pack manufacturing—a review of battery to tab joining[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100017.
- [79] Lee S S, Kim T H, Hu S J, et al. Joining technologies for automotive lithium-ion battery manufacturing: a review[C]// Proceedings of ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, October 12-15, 2010, Erie, Pennsylvania, USA. New York: ASME Press, 2011: 541-549.
- [80] Das A, Li D Z, Williams D, et al. Joining technologies for automotive battery systems manufacturing[J]. World Electric Vehicle Journal, 2018, 9(2): 22.

## Research Progress in Laser Micro-welding of Metal Materials (Invited)

Du Weizhe, Huang Xuting, Zheng Min, Xiao Rongshi, Huang Ting\*

*Intelligent Photon Manufacturing Research Center, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

### Abstract

**Significance** In recent years, notable progress has been made in the development of equipment components aimed at precision and miniaturization. These miniature components typically exhibit complex geometries. They are composed of diverse materials. Further miniaturization of these components has led to an increased demand for precision welding. Consequently, the assembly of small parts and the packaging of devices require increasingly high levels of connection accuracy and quality control. High-quality micro-welding technologies for metallic materials have important applications in aerospace, power batteries, biomedicine, and other fields. For instance, micro electro mechanical systems (MEMS), characterized by feature sizes ranging from 1  $\mu\text{m}$  to 1 mm, are commonly packaged using micro-welding technology. Moreover, power battery electrode foils, with thicknesses as low as 6–12  $\mu\text{m}$ , require precise connections for current export. Furthermore, the assembly of components and metal shell sealing in implantable biomedical devices rely heavily on micro-welding technology.

Common micro-welding techniques include resistance micro spot welding, ultrasonic micro-welding, micro tungsten inert gas (TIG) welding, and laser micro-welding. Compared with conventional micro-welding methods, laser micro-welding offers several advantages, including a small focusing spot size, precise heat input control capability, high welding speed, and compatibility with various weldable materials.

**Progress** This study investigates the laser micro-welding technology of metal materials, providing a comprehensive analysis of its significance, microscale effects, welding modes, laser selection, and defect and quality control measures. It is difficult to reach a consensus on a precise definition of laser micro-welding. The connotations of laser micro-welding are comprehensively summarized based on previously reported studies. Strictly speaking, laser micro-welding pertains to a laser welding process where at least one feature size of the connected material or weld is less than 100  $\mu\text{m}$ . Laser micro-welding involves two welding modes: conduction and penetration welding. In laser micro-welding, oxidation promotes fluctuations in the penetration-welding process, resulting in a transient phase. Subsequently, the influence of microscale effects is introduced. When workpiece dimensions are reduced to the micron scale, typical microscale effects occur. The physical characteristics observed during laser micro-welding, such as heat transfer and molten pool flow, differ from those observed during macro-welding (Fig. 2). Based on microscale effects, the defects and quality control measures in laser micro-welding are summarized according to the process parameters. Welding defects such as lack of penetration, burn-through, spatter, humping, porosity, and cracking can occur during the laser micro-welding process, and optimization of the welding process parameters is an important means of controlling weld formation and welding defects. These parameters include the laser wavelength, laser power, spot diameter of the laser, pulse laser parameters, welding speed, and scanning path.

Furthermore, the applications of laser micro-welding to both similar and dissimilar metal materials are reviewed. Laser micro-welding is used to join precision components in the electronics, automotive, aerospace, and medical industries (Fig. 12). Notable applications include pressure sensors, bipolar plates for fuel cells, aerospace engine blades, electronic component pins, copper-printed circuit boards, satellite collimator components, cardiac pacemakers, and lithium-ion battery tabs.

Finally, the challenges and future development directions of laser micro-welding technology for metallic materials are summarized, including the welding mechanism of metal and non-metallic materials, new process technology, and laser micro-welding systems.



**Conclusions and Prospects** The characteristics of laser micro-welding are complex owing to microscale effects. Although laser micro-welding has been widely used for connecting metal materials, some challenges remain. First, there is a burgeoning demand for the joining of dissimilar materials, including the micro-welding of dissimilar metals and metal/non-metallic materials. Dissimilar materials with different physical properties pose significant challenges in welding. Second, increasing the welding speed is important for improving the production rate. However, humping occurs at high welding speeds. To address this, process innovation and the recombination of multiple energy fields are required to further increase the critical speed of humping by controlling the flow characteristics of the molten pool and the solidification process during micro-welding. This is essential for improving the production rates and ensuring the product yield in high-speed welding. Finally, the development of intelligent laser micro-welding systems is a key future trend. The use of an intelligent laser micro-welding system has the potential to improve weld quality and welding efficiency.

**Key words** laser technique; metal foil; laser micro welding; scale effect; process parameters; application