

电子铜箔和液晶聚合物的激光复合焊接

刘昊^{1,2}, 杨海峰^{1,2*}, 贺海东³, 贾乐¹, 高强¹¹中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116;²中国矿业大学矿山机电设备江苏重点实验室, 江苏 徐州 221116;³苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215031

摘要 随着高速高频通信技术的发展,电子铜箔表面平坦度对高频信号传输损耗的影响更加凸显,已成为制约高速高频通信技术发展的重要因素。本研究团队在目前技术发展的基础上,提出了一种铜箔与聚合物直接结合的方法。该方法主要分为三步:通过激光压平实现铜箔表面平坦化;通过激光压印在压平铜箔表面制造出规则的阵列纳米结构;通过激光焊接实现压平压印铜箔与液晶聚合物(LCP)的直接结合。试验发现,通过激光压平可以将40.6 nm的铜箔表面粗糙度降低到7.8 nm,表面粗糙度降低了80.8%。通过激光压印在压平铜箔表面压印出的规则阵列纳米结构,为铜箔与聚合物的直接结合奠定了基础。采用激光将表面压平压印的铜箔与LCP焊接在一起,对其进行拉伸测试后发现铜箔被拉断。这说明铜箔与LCP的焊接结合强度较高,所提方法在降低电流传输损耗方面具有潜在的应用价值。

关键词 激光技术;激光压平;激光压印;激光焊接;结合性能;异种材料

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202011

1 引言

铜箔以其优异的导电性、导热性和延展性被广泛应用于印制电路板中^[1-2]。液晶聚合物(LCP)具有比传统聚缘聚合物更突出的电性能^[3],被大量应用于挠性印制电路板中,尤其是无胶两层挠性覆铜板^[4-5]。随着电子和信息技术的飞速发展,电子产品的功能日益强大,信号传输频率越来越高,传统印制电路板的制造方法已无法满足高速高频通信技术的发展要求。

目前的挠性覆铜板主要分为两类:三层挠性覆铜板(3L-FCCL)和两层挠性覆铜板(2F-FCCL)。3L-FCCL发展得较成熟,但是其在制造过程中加入了胶黏剂作为连接层,使得其应用范围受到了极大限制。2L-FCCL主要采用涂布法、层压法和溅镀法制造^[6],普遍存在着制造工艺复杂、生产成本高等缺

点^[7-8]。激光具有环境友好、操作简单、可实现高效率加工等优点,激光加工技术在诸多领域已取得了较大突破。激光冲击压印技术可以在金属表面制造复杂结构,并且通过辅助加温可以显著提高成形件的成形深度、成形精度和成形稳定性^[9]。激光冲击压平可以加工高性能无轮廓铜箔,这对于高频信号的传输和印制电路板的加工具有极大的促进作用^[10]。激光焊接钛和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的成功为异种材料的激光焊接技术提供了指导^[11-12]。激光透射焊接实现了聚乳酸和铝薄膜的直接连接,为食品包装产业带来了曙光^[13]。有学者对铜箔和聚合物进行了焊接研究,并取得了一定突破。但是,目前在铜箔和聚合物的激光焊接方面,关于超薄铜箔和先进功能聚合物LCP的研究还很匮乏,现有的基于挠性覆铜板制备技术的研究还停留在较厚铜箔的连接上,而且基于相应的粗化工艺在

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-07-08; 录用日期: 2021-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51905534, 51805343)、江苏省自然科学基金(BK20180844)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: *yh002@163.com

0.1 mm 厚铜箔表面实现的表面粗糙度高达几百纳米^[14],即使通过优化工艺在 0.02 mm 厚铜箔表面进行粗化,表面粗糙度也接近 100 nm^[15]。利用上述技术无法对更薄铜箔(如 0.01 mm)进行处理,这显然不符合当下超薄集成电子产品的发展趋势。

本研究团队将激光压平技术、激光压印技术和激光焊接技术集成,以降低趋肤效应的影响。首先对铜箔表面进行压平,然后利用纳米模具在压平退火铜箔表面加工纳米结构,最后通过激光焊接将压平退火压印铜箔与 LCP 焊接在一起。焊接完成后,利用微拉伸试验测试不同条件下处理的铜箔与 LCP 的结合强度,并通过原子力显微镜(AFM)、光

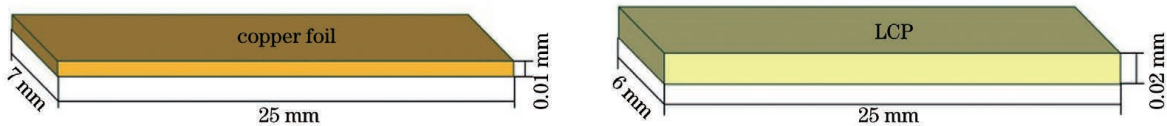


图 1 试验用铜箔与 LCP 的形状与尺寸

Fig. 1 Shape and size of experimental copper foil and liquid crystal polymer (LCP)

2.2 试验方法

本文采用多种方法相结合的方式实现铜箔与 LCP 的直接结合。主要按以下步骤进行:

1) 利用脉冲激光器(Hercules-1000-TH)冲击铜箔表面,通过优化工艺参数,在保证铜箔完整的情况下实现铜箔表面的平坦化。通过此步骤可以大大降低铜箔表面的粗糙度,顺应当下高频高速信号传输低损耗的要求。

2) 将表面处理(压平)后的铜箔在 450 °C 下进行真空退火处理,退火时间为 2 h,以去除压平铜箔内部的残余应力,为后期压印作准备。

3) 利用相同的脉冲激光器将压平退火后的铜箔进行激光冲击压印试验,在压平表面制造出规则的阵列纳米结构。

4) 采用光纤耦合半导体连续激光器(HWL-R1500W)将表面带有纳米结构的铜箔与预先处理的 LCP 进行焊接,实现铜箔与 LCP 的直接结合。

为验证铜箔与 LCP 连接的可靠性,通过微拉伸测试平台对焊后样品进行微拉伸测试。

2.2.1 铜箔的压平处理

铜箔的激光压平处理装置主要包括以下几个部件:脉冲激光器系统[如图 2(a)所示]、试验用 4 mm 厚超白玻璃、定制夹具。试验前先用无水乙醇轻轻擦拭铝箔和铜箔表面,以去除表面污渍;然后将擦拭后的铝箔和铜箔样品在自然条件下风干,风干后的样品按图 2(b)所示放置。装置下方 4 mm 厚超白

学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)等观察样品的表面形貌,以揭示压平、压印及焊接机制。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验中所使用的材料为商用 T2 紫铜箔和日本可乐丽公司生产的 LCP。为避免焊接过程中激光直接作用到 LCP 上导致其烧蚀,将两者分别进行裁剪,裁剪后的尺寸分别为 25 mm×7 mm×0.01 mm 和 25 mm×6 mm×0.02 mm,如图 1 所示。试验前均使用无水乙醇轻轻擦拭样品表面,以去除样品表面的污渍,擦拭后的样品风干后再进行后续试验。

玻璃作为垫板,在垫板上按顺序依次放置 10 μm 厚铜箔和 80 μm 厚铝箔。铝箔在试验过程中作为吸收层(烧蚀层),其上方选用 4 mm 厚超白玻璃作为约束层。整个装置用定制夹具装夹在一起。为了提高加工效率,只在铜箔一侧 6 mm×7 mm 区域进行压平加工。试验过程中的脉冲激光按图 2(c)所示路径移动,光斑直径为 1 mm。通过改变光斑搭接率 d_1 和 d_2 ($d_1 = d_2$) 以及激光脉冲能量优化激光冲击压平工艺。

该过程的试验原理如下:脉冲激光束透过上方约束层作用到吸收层(铝箔)上,铝箔吸收激光能量后爆炸,产生等离子体,等离子体冲击波在上方约束层的作用下迅速向下传播,当冲击波压力作用到铜箔上时,铜箔与下方垫板在夹紧力的作用下相互挤压。在这个过程中,铜箔表面被压平。约束层可以起到限制等离子体冲击波向上传播的作用,使能量的利用率提高。烧蚀层在试验过程中主要有两方面作用:与脉冲激光作用后爆炸,产生等离子体;避免激光直接作用到铜箔表面而破坏铜箔表面。

2.2.2 铜箔的激光压印处理

为了减小压平处理后铜箔内部的残余应力,提高压印质量,在压印处理前将压平铜箔进行真空退火处理,升温速率为 10 °C/min,退火温度为 450 °C,退火时间为 2 h,然后随炉冷却至室温。

压印试验装置主要包括以下几个部件:脉冲激光器系统[如图 2(a)所示]、作为约束层的 4 mm

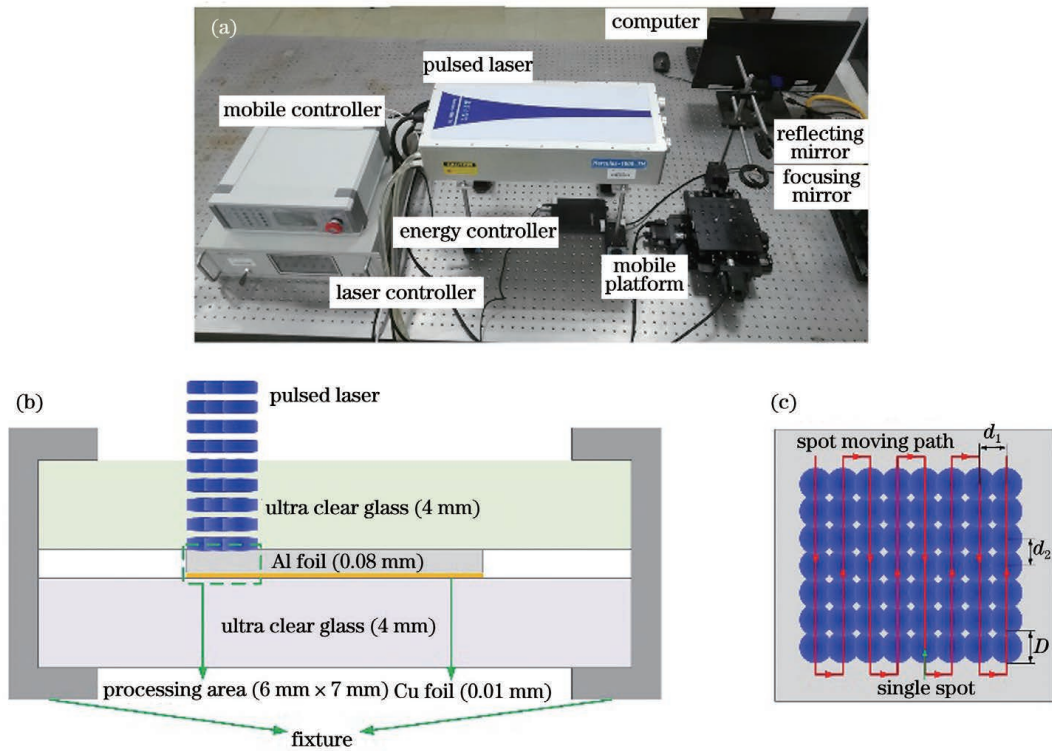


图 2 铜箔的激光压平处理。(a)脉冲激光器系统;(b)激光压平示意图;(c)压平过程中的激光移动路径
Fig. 2 Laser flattening of copper foil. (a) Pulsed laser system; (b) schematic of laser flattening; (c) laser spot moving path in laser flattening process

厚超白玻璃、作为吸收层的 0.01 mm 厚铝箔、经过压平处理的铜箔、1 mm 厚硅模具、4 mm 厚超白玻璃(底板)和夹具等。硅模具(硅片)表面任意一点 P 处的表面纳米结构如图 3(b) 所示,纳

米结构为标准的圆柱体,圆孔直径 600 nm,孔深 1000 nm,周期 1200 nm(水平和竖直)。图 3(b) 给出了硅模具表面的正视图以及沿圆孔直径的剖视图。

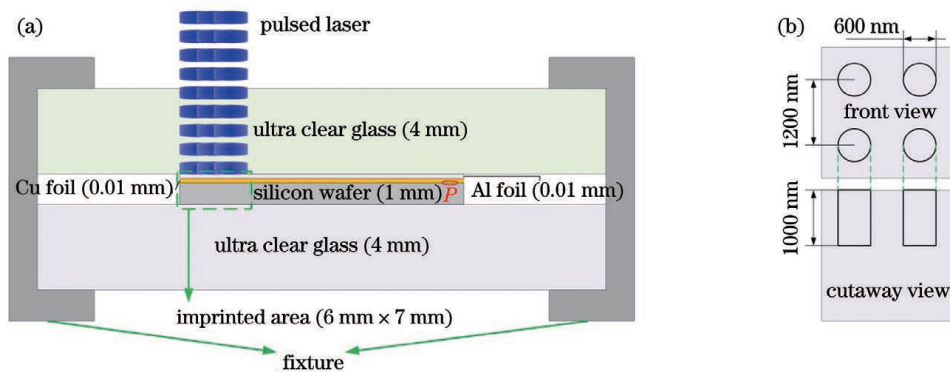


图 3 铜箔的激光压印处理。(a)激光压印示意图;(b)硅模具表面的纳米结构

Fig. 3 Laser imprinting of copper foil. (a) Schematic of laser imprinting; (b) nano-structure of silicon mold surface

激光冲击压印过程(原理)如下:脉冲激光透过上方约束层作用到烧蚀层上,烧蚀层吸收激光能量后爆炸,产生等离子体冲击波,等离子体冲击波在上方约束层的限制下向下传播到铜箔表面,当冲击波压力超过铜箔的动态屈服强度时,铜箔表面沿着微结构深度发生变形,表面复形出纳米结构^[16]。脉冲激光在压印过程中的移动路径与铜箔的压平过程相

同,如图 2(c)所示。由于脉冲激光能量沿光斑中心呈高斯分布,为了增强压印效果,提高加工效率,选择 50% 光斑搭接率进行压印试验。

2.2.3 铜箔和聚合物的激光焊接

激光焊接试验示意图如图 4 所示。该试验装置主要包括以下几个部件:连续激光器系统[如图 4(a)所示]、约束层(3 mm 厚石英玻璃)、压印铜

箔、LCP、垫块(尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm 的石英玻璃)、底板(3 mm 厚石英玻璃)和夹具等。高能激光直接作用到 LCP 表面会产生烧蚀,因此采用

金属侧激光照射焊接的方式。焊接前保证上方铜箔全覆盖下方搭接部分的 LCP,并且激光移动路径包含整个铜箔表面,如图 4(b)、(c)所示。

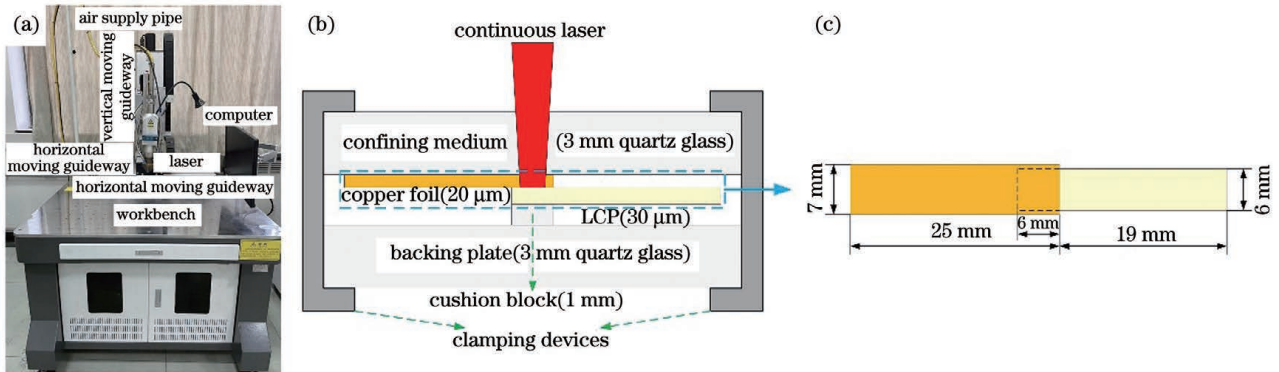


图 4 铜箔和 LCP 的激光焊接。(a)连续激光器系统;(b)激光焊接示意图;(c)焊接样品尺寸示意图

Fig. 4 Laser welding of copper foil and LCP. (a) Continuous laser system; (b) schematic of laser welding; (c) schematic of welding sample size

激光焊接试验微观过程:连续激光经过约束层作用到铜箔表面,经过处理的铜箔表面吸收部分激光能量后迅速升温,具有极好导热性的铜箔迅速将热量向四周传导,当与铜箔下表面接触的 LCP 的温度达到其熔化温度时,LCP 开始熔化流动,并在夹紧力的作用下流入铜箔表面的微孔隙,冷却凝固后完成焊接。

3 结果与讨论

3.1 铜箔的压平处理结果

在压平试验中,通过改变激光能量和光斑搭接率来探究最佳的工艺参数。压平试验工艺参数如表 1 所示。

表 1 压平工艺参数

Table 1 Flattening process parameters

No.	Laser pulse energy / J	Overlap ratio / %
1	0.30	50
2	0.35	50
3	0.40	50
4	0.35	40
5	0.35	60

采用原子力显微镜观察样品的表面形貌,同时记录表面粗糙度值 S_a ,结果如图 5 所示。图 6(a)显示了光斑搭接率为 50% 时压平铜箔表面粗糙度随脉冲激光能量的变化,图 6(b)为未经任何处理的原始铜箔的表面粗糙度,图 6(c)给出了脉冲激光能量为 0.35 J 时,压平铜箔表面粗糙度随激光光斑搭接

率的变化。从图 5~6 可以看出:与原始铜箔的表面粗糙度相比,压平铜箔的表面粗糙度均明显降低;当脉冲激光能量为 0.35 J、激光光斑搭接率为 50% 时,铜箔表面的压平效果最佳,与原始铜箔的表面粗糙度(40.6 nm)相比,该条件下铜箔的表面粗糙度降低到了 7.8 nm,降低了 80.8%。由图 5(a)~(c)及图 6(a)可以看出,当光斑搭接率为 50% 时,压平铜箔的表面粗糙度值在 0.3~0.4 J 的激光能量范围内呈现出先降低后增大的趋势。这是因为激光光斑搭接率固定不变时,小激光能量在冲击过程中产生的冲击波压力不足,冲击不彻底,压平效果不佳,铜箔表面粗糙度较大,压平效果较差;当激光能量较大时,在冲击过程中激光能量产生的冲击波压力超过了下方超白玻璃的破坏极限,超白玻璃在冲击过程中发生破裂,出现明显的裂纹;随着试验的进行,铜箔与破裂的玻璃相互挤压,铜箔在冲击之后也发生破裂,出现明显的裂纹。铜箔表面裂纹的出现增大了压平铜箔的表面粗糙度,铜箔的强度也大大降低,在实际使用中无法承受较大的力,也就无法应用于两层挠性覆铜板中。因此,综合考虑各种因素,认为采用 0.35 J 激光能量的压平效果最佳,既能得到表面较平整的压平铜箔,又不会对铜箔产生破坏。由图 5(b)、(d)、(e)和图 6(c)可以看出:当固定脉冲激光能量为 0.35 J 不变,在 40%~60% 范围内改变激光光斑搭接率时,压平铜箔表面粗糙度也呈现出先降低后增大的变化规律;当光斑搭接率为 50% 时,压平效果最佳。这是因为光斑搭接率为 40% 时,相邻光斑的中心间距增大,

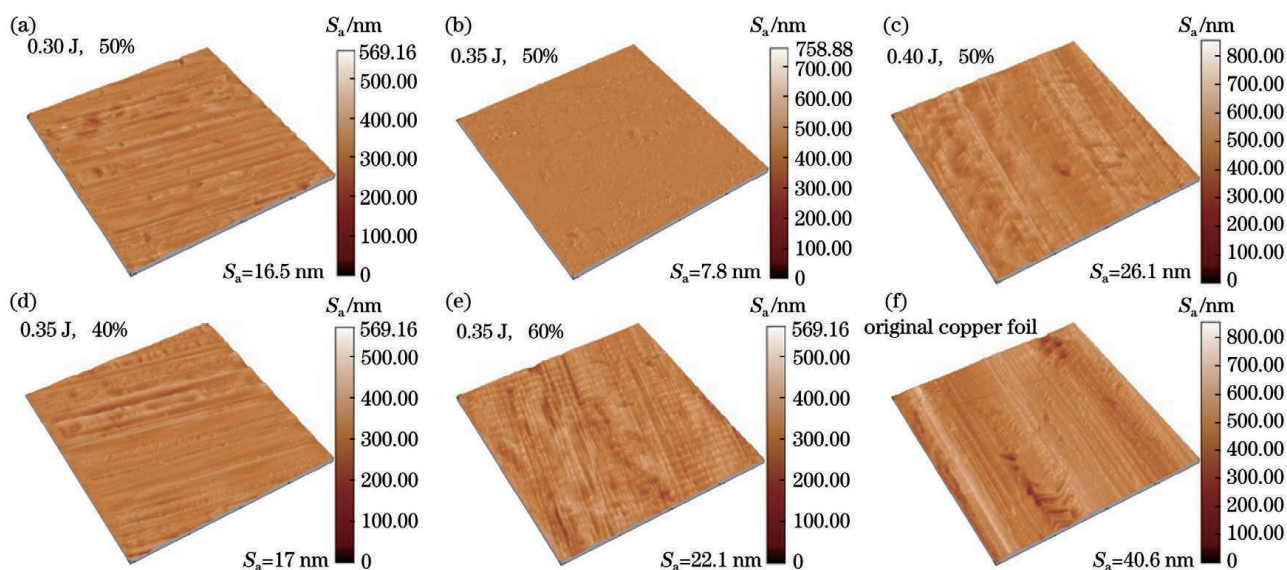


图 5 压平铜箔的 AFM 表面形貌

Fig. 5 Surface images of flattened copper foil taken by atomic force microscope

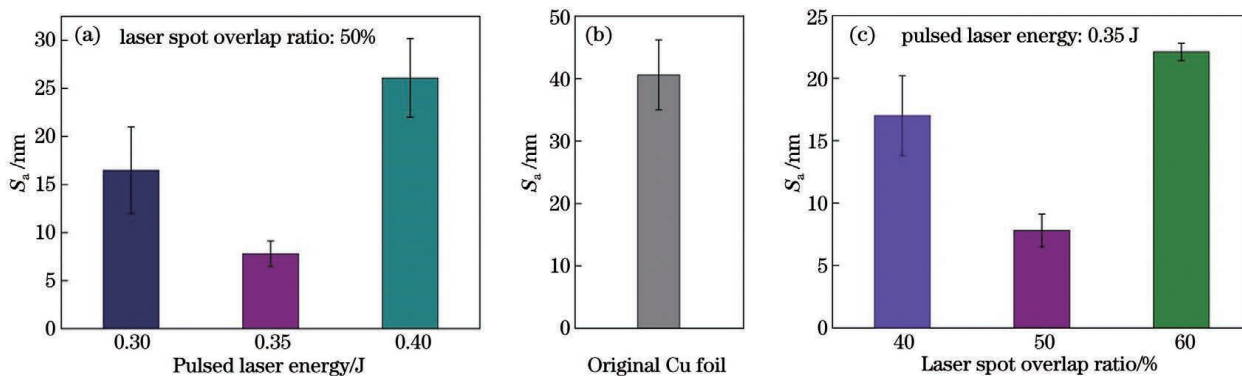


图 6 铜箔的表面粗糙度。(a) 搭接率为 50% 时,不同脉冲能量下压平铜箔的表面粗糙度;(b) 原始铜箔的表面粗糙度;(c) 脉冲能量为 0.35 J 时,不同搭接率下压平铜箔的表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughness of copper foil. (a) Surface roughness of copper foil flattened under different pulsed energies and 50% overlap ratio; (b) surface roughness of original copper foil; (c) surface roughness of copper foil flattened under different overlap ratios and pulsed energy of 0.35 J

铜箔局部表面冲击不完全,因此铜箔的表面粗糙度较大;而当光斑搭接率为 60% 时,相邻光斑的中心间距减小,铜箔局部表面受到多次冲击,冲击程度加剧,多次冲击导致铜箔回弹严重,在此情况下的铜箔和超白玻璃表面产生了明显的裂纹,因此铜箔的表面粗糙度增大。综上所述,选用 0.35 J 脉冲激光能量和 50% 激光光斑搭接率可以得到最佳的压平效果。

图 7(a)~(c) 分别显示了原始铜箔、过渡区、压平铜箔表面的 SEM 形貌。原始铜箔表面具有清晰可见的轧痕和凸起,这是导致其表面粗糙度较大的主要原因。由图 7(b) 可以看出,原始区域和压平区域之间的过渡区(压平界面)清晰可见,压平效果明显。由图 7(c) 可以看出原始铜箔表面的轧痕和凸

起在激光冲击之后消失不见,这是冲击波压力诱发的铜箔与超白玻璃表面相互挤压的结果。为了可视化试验结果并保证测试过程的一致性,选用 20 μm 厚铜箔进行压平试验,将局部压平的铜箔镶嵌在环氧树脂内,经打磨、抛光后,在光学显微镜下观察其截面形貌并进行相应的测量,结果如图 8 所示。原始区平均厚度约为 23.69 nm,压平区厚度约为 21.60 nm,样品减薄率约为 8.82%。同时,从图 8 中还可以看出,铜箔压平后,表面凸起和瑕疵基本消失不见,压平效果较好。

图 9 显示了在光学显微镜下观察到的底板和压平铜箔的表面形貌。在大激光能量和高搭接率下出现的破裂的超白玻璃和存在明显裂纹的压平铜箔表面,揭示了铜箔表面粗糙度变化的机理。

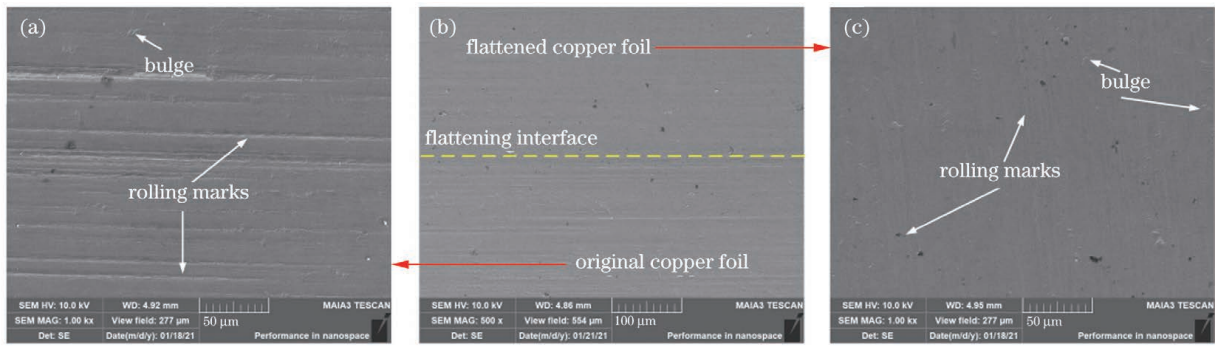


图 7 铜箔表面的 SEM 形貌。(a)原始铜箔;(b)过渡区;(c)压平铜箔

Fig. 7 Surface images of copper foil taken by scanning electron microscope. (a) Original copper foil; (b) transition area; (c) flattened copper foil

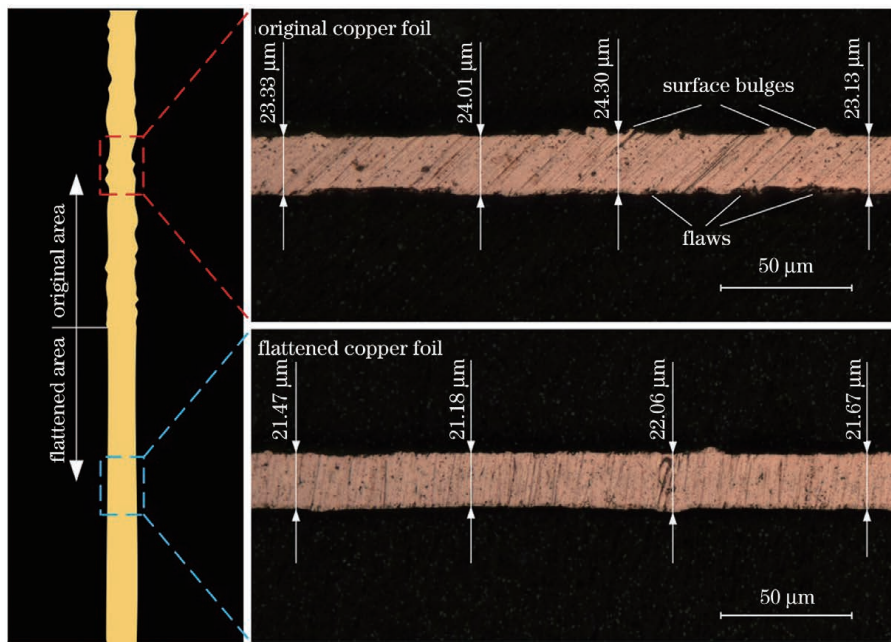


图 8 压平铜箔的截面形貌

Fig. 8 Cross-section morphology of flattened copper foil

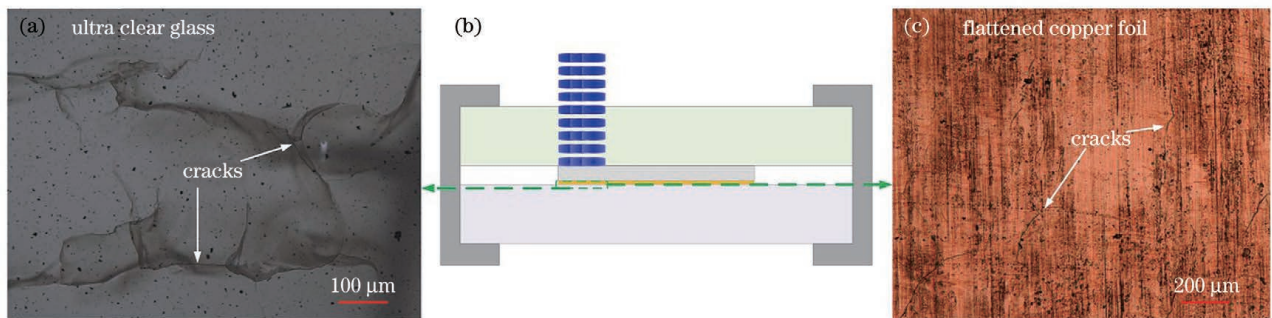


图 9 样品表面的光学形貌。(a)超白玻璃表面的光学形貌;(b)压平示意图;(c)压平铜箔表面的光学形貌

Fig. 9 Optical surface morphologies of samples. (a) Optical morphology of ultra clear glass surface; (b) schematic of flattening; (c) optical morphology of flattened copper foil surface

3.2 铜箔的压印处理结果

经过激光冲击的铜箔内部晶粒细化^[17],残余应力加剧,铜箔因得到强化而变硬^[18-19]。为了揭示激

光冲击压印机制,提升压印效果,将压平处理后的铜箔在 450 °C 的真空条件下退火 2 h,然后选择脉冲激光能量为 0.1 J、激光光斑搭接率为 50% 的铜箔进

行压印试验。

图 10 显示了压平铜箔和原始铜箔退火前后表面粗糙度的测量结果,可以发现,压平铜箔和原始铜箔在退火之后的表面粗糙度均大于退火前的表面粗糙度。结合图 11 所示的压平铜箔和原始铜箔退火前后的扫描电镜表面形貌可以推断,铜箔退火之后表面粗糙度的增加是铜箔表面的微结构受热膨胀放

大所致。

从图 10 中还可以看出,原始铜箔的表面粗糙度在退火之后的增长幅度较大,增大了约 53.9%,压平铜箔退火之后的表面粗糙度与退火前相比约增大了 20.6%,增大幅度远小于原始铜箔。这是因为压平铜箔表面较平整,没有明显的缺陷,而且铜箔在冲压之后得到了强化。

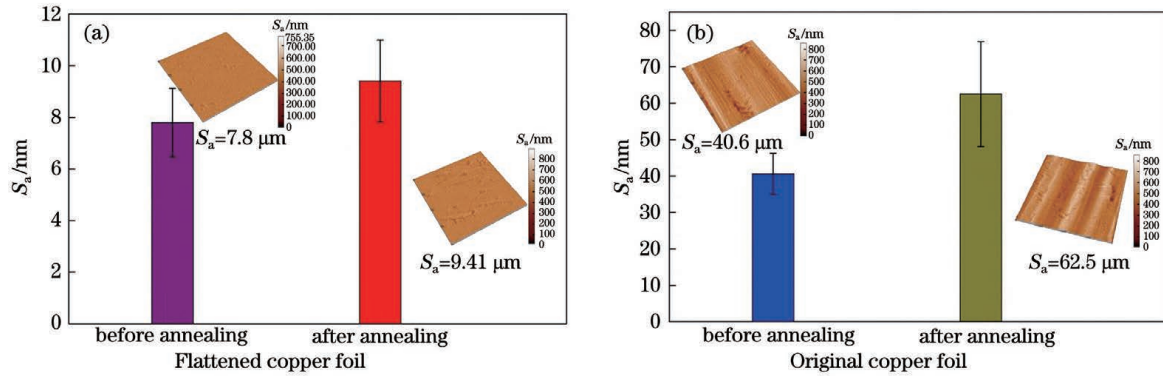


图 10 铜箔退火前后的表面粗糙度对比。(a)压平铜箔退火前后的表面粗糙度对比;(b)原始铜箔退火前后的表面粗糙度对比

Fig. 10 Surface roughness comparison of copper foil before and after annealing. (a) Comparison of surface roughness of flattened copper foil before and after annealing; (b) comparison of surface roughness of original copper foil before and after annealing

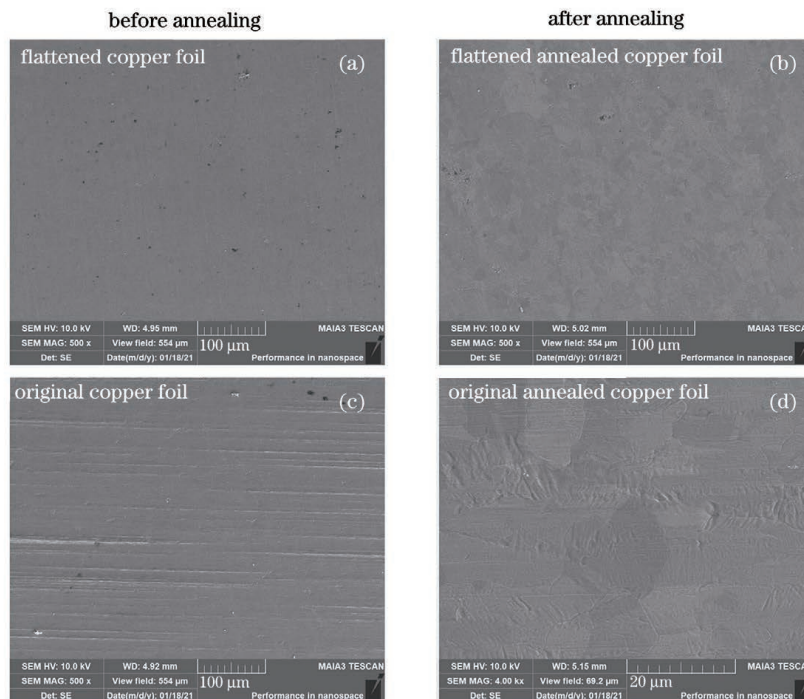


图 11 铜箔退火前后的 SEM 表面形貌。(a)(b)压平铜箔;(c)(d)原始铜箔

Fig. 11 SEM surface morphologies of copper foil before and after annealing. (a) (b) Flattened copper foil; (c) (d) original copper foil

对硅模具进行表面形貌观察,观察结果如图 12 所示。图 12(a)是 1000 倍放大倍数下硅模具的光

学显微镜照片,左下角是利用原子力显微镜观察到的硅模具的表面形貌图。图 12(b)~(d)为不同放

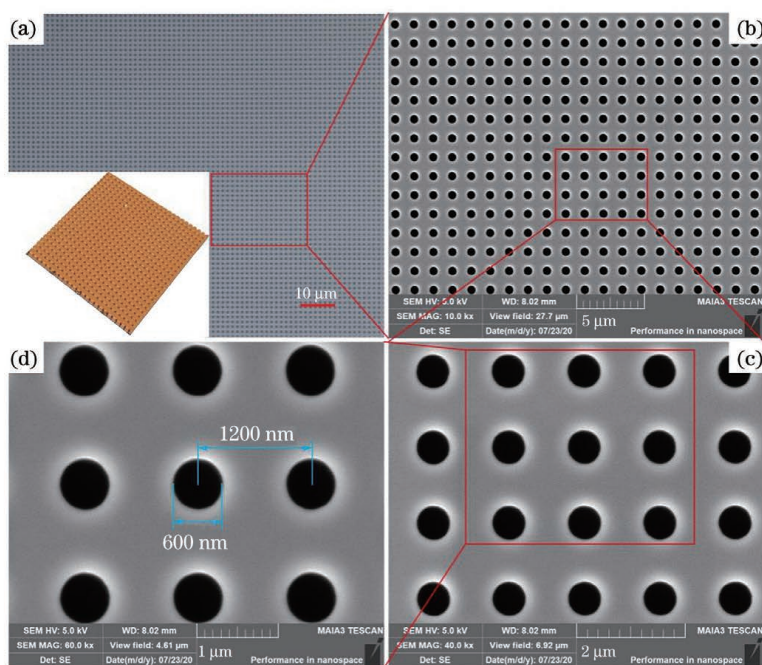


图 12 不同放大倍数下纳米模具的表面形貌

Fig. 12 Surface morphologies of nanomold under different magnifications

大倍数下硅模具表面的扫描电子显微镜照片,可以看到硅模具表面的纳米结构为规则的圆孔,圆孔直径为 600 nm,相邻两圆孔的中心间距为 1200 nm,圆孔规则地排布在硅片上。后续将在此模具上对压平退火处理的铜箔进行压印试验。

图 13 为压平退火铜箔在压印之后的不同放大倍数下的扫描电镜形貌。从图 13(d)中可以清晰地

观察到压印之后得到的铜箔表面微结构的横截面区别于硅模具,其微结构不是规则的圆形,而是近圆形结构。测量后可知近圆形结构的直径均在 500 nm 以上,较大的约为 582.9 nm,接近 600 nm 的极限尺寸,说明压印效果较好。压印得到的纳米结构的直径无法达到或逼近硅模具上的圆孔尺寸(600 nm),这是因为在压印过程中铜箔与硅模具紧密接触,激

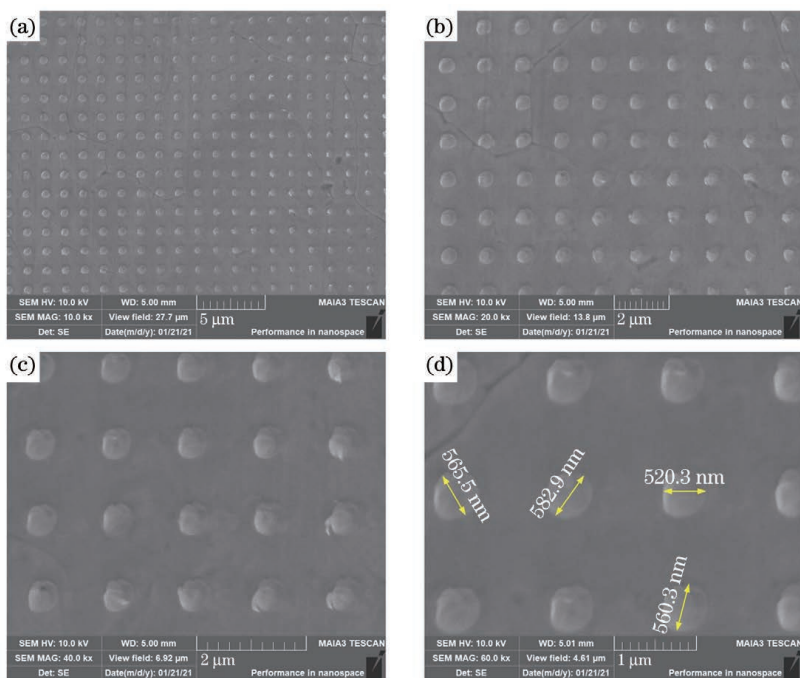


图 13 不同放大倍数下压印铜箔的表面形貌

Fig. 13 Surface morphologies of imprinted copper foil under different magnifications

光冲击波压力诱发的铜箔变形受到了硅模具内部圆柱形孔内空气的阻碍,同时铜箔变形还会与圆柱形孔产生摩擦,进一步阻碍铜箔变形。总之,在 0.1 J 脉冲激光能量、50% 光斑搭接率下对压平退火铜箔进行压印试验可以较好地复制出纳米模具的表面结构,在压印铜箔表面得到较为均匀的纳米结构。

3.3 铜箔与 LCP 的焊接结果

对铜箔进行压平、退火和压印处理后,铜箔表面

得到了规则的阵列纳米结构,为铜箔与聚合物的焊接奠定了基础。然后,采用连续激光对压印铜箔和 LCP 进行焊接处理,焊接工艺参数如下:激光功率 300 W,激光移动速度 300 mm/min,离焦量 10 mm,搭接面积 36 mm²。焊接结束后,对焊件进行微拉伸试验,测试焊件的连接性能,并对铜箔与 LCP 的结合机制进行分析。拉伸试验台如图 14(a) 所示。

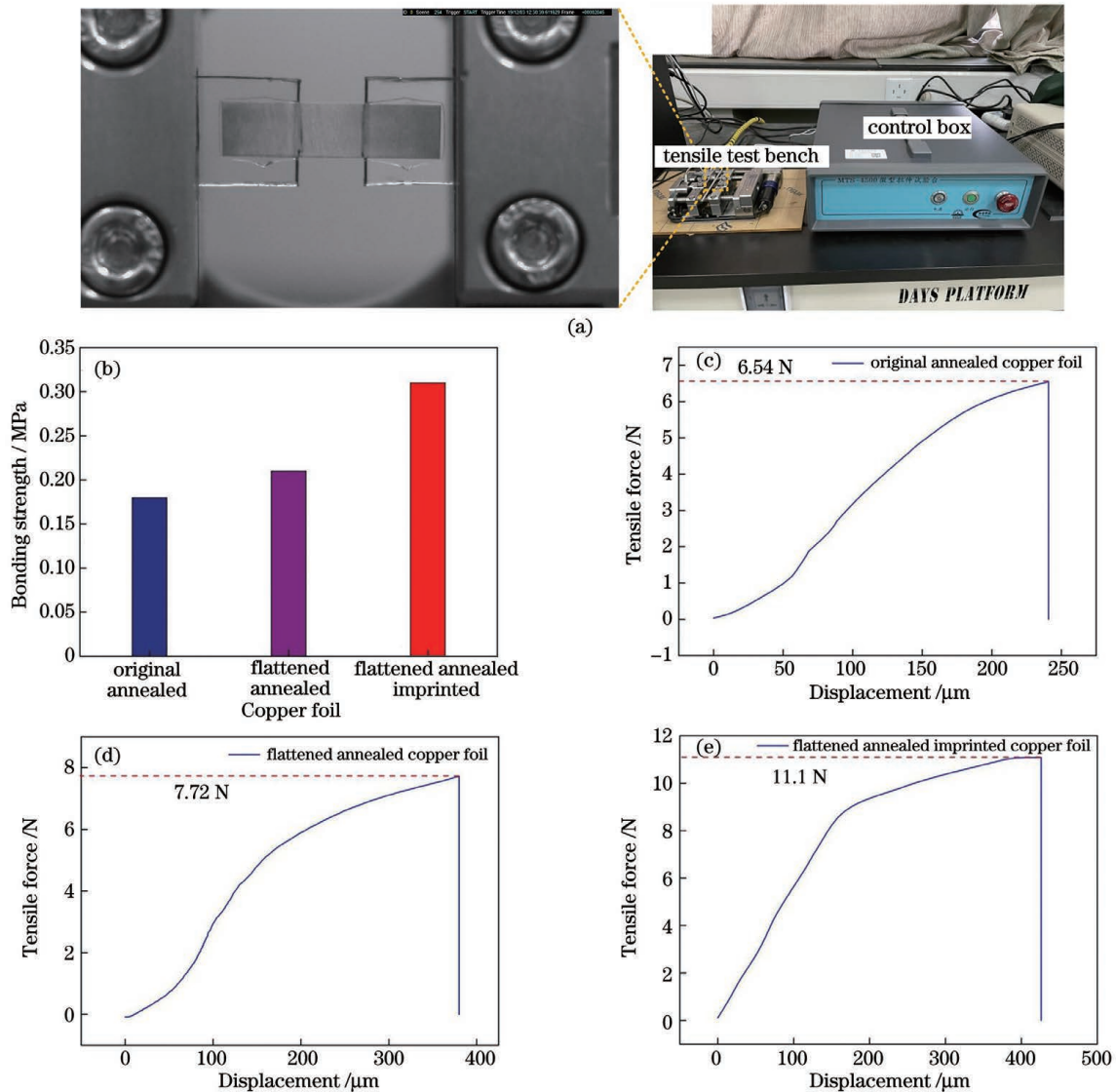


图 14 不同条件下铜箔和 LCP 的结合强度。(a) 拉伸试验台系统;(b) 铜箔与 LCP 的焊接结合强度;(c) 原始退火铜箔与 LCP 焊接之后的拉伸曲线;(d) 压平退火铜箔与 LCP 焊接之后的拉伸曲线;(e) 压平退火压印铜箔与 LCP 焊接之后的拉伸曲线

Fig. 14 Bonding strength between copper foil and LCP under different treatment conditions. (a) Tensile test bench system; (b) bonding strength between copper foil and LCP; (c) tensile curve of original annealed copper foil welded with LCP; (d) tensile curve of flattened annealed copper foil welded with LCP; (e) tensile curve of flattened annealed imprinted copper foil welded with LCP

图 14(b) 对比了不同条件下得到的铜箔与 LCP 的焊接结合强度。可以看出,压印后的铜箔与 LCP

的焊接结合强度最大,约为 0.31 MPa,相比原始退火铜箔与 LCP 的结合强度提高了 72.2%,比压平

退火铜箔与 LCP 的结合强度提高了 47.6%。原始退火铜箔、压平退火铜箔与 LCP 的焊接结合强度相差不大,压平退火铜箔与 LCP 的结合强度在实测中稍大于原始退火铜箔与 LCP 的结合强度。结合强度的计算公式为

$$P_b = F_t / S_1, \quad (1)$$

式中: F_t 为拉伸力; S_1 为搭接区域的面积。可见,当搭接区域面积 S_1 一定时,结合强度与拉伸力呈正比关系。图 14(c)~(e) 分别是三种条件下处理的铜箔与 LCP 焊接之后的拉伸曲线图,从中可以看出,随着拉伸力(结合强度)增大,焊接样品的总位移也在增大,这是铜箔的伸长、LCP 的伸长、铜箔和 LCP 结合界面的脱黏共同作用的结果。结合强度越大,结合界面越不容易脱黏,拉伸力越大,铜箔和 LCP 的伸长量越大,总的位移量也就越大。

为分析铜箔与 LCP 在几种条件下的焊接结合强度的变化,揭示铜箔与 LCP 焊接结合强度变化的机制,本研究团队采用原子力显微镜对原始铜箔表面、原始退火铜箔表面以及压平退火铜箔反面(在焊

接过程中与激光直接接触的一面)的表面粗糙度进行了测试,测试结果如图 15 所示。由前述试验可知,压平退火铜箔的表面粗糙度约为 9.41 nm,远小于原始退火铜箔的表面粗糙度 62.5 nm。较大的铜箔表面粗糙度可以得到更大的焊接结合强度,但是在实际测试中,压平退火铜箔与 LCP 的焊接结合强度与原始退火铜箔相当,甚至稍大于原始退火铜箔。主要原因如下:吸收层铝箔(在压平过程中与铜箔上表面直接接触的一面)的表面粗糙度为 111 nm,表面较粗糙,如图 15(a)内插图所示。在压平过程中,原始铜箔与吸收层(铝箔)相接触的表面(压平的反面)在压平过程中复制了铝箔表面的微结构,导致压平后的反面变得粗糙,如图 15(b)所示,在相同的能量下对激光的反射减少,吸收增多,激光能量的利用率提高。因此,即使压平铜箔表面很平整,仍然有较大的结合强度。压平退火压印后的铜箔表面有规则排布的阵列纳米结构,该结构在焊接过程中能与 LCP 表面形成强的机械铆接效应,因此焊接结合强度最大。

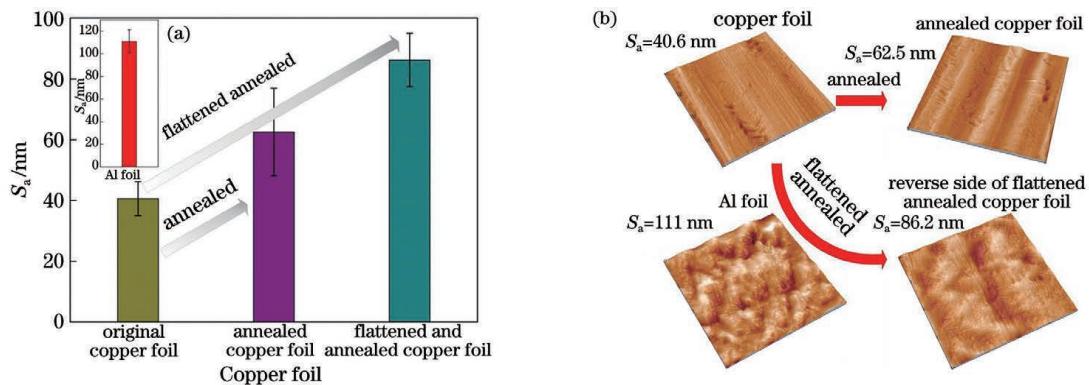


图 15 不同处理条件下铜箔表面粗糙度的变化规律。(a)不同铜箔的表面粗糙度值;(b)不同铜箔的 AFM 表面形貌
Fig. 15 Variations of copper foil surface roughness under different treatment conditions. (a) Surface roughness values of different copper foils; (b) AFM surface images of different copper foils

4 结 论

本研究团队采用激光压平、激光压印和激光焊接技术相结合的方法将铜箔与 LCP 直接结合在一起,铜箔与 LCP 焊接后的结合强度达到了 0.31 MPa,在拉伸过程中铜箔被拉断,说明铜箔与 LCP 的焊接结合强度较高。本文得到的主要结论如下:

1) 利用激光压平的方法实现了 0.01 mm 厚原始铜箔的表面平坦化,激光压平后,原始铜箔被压平表面的表面粗糙度从 40.6 nm 降低到 7.8 nm,降低了 80.8%,压平效果显著。

2) 为提高压印效果,首先将压平处理的铜箔在真空条件下退火,再将退火处理的铜箔进行压印处理(采用孔径为 600 nm、周期为 1200 nm 的硅模具进行压印试验),在压平退火铜箔表面压印出规则的阵列纳米结构,为激光焊接铜箔与 LCP 奠定基础。

3) 采用一定的激光参数可以将压平、退火、压印的铜箔与 LCP 直接焊接在一起,得到的铜箔与 LCP 的焊接结合强度较高(相比原始退火铜箔提高了 72.2%);铜箔在拉伸过程中被拉断。

参 考 文 献

- [1] Zhao H L, Chen W B, Wu M W, et al. Influence of low oxygen content on the recrystallization behavior

- of rolled copper foil[J]. *Oxidation of Metals*, 2018, 90(1/2): 203-215.
- [2] Noh B I, Yoon J W, Jung S B. Effect of laminating parameters on the adhesion property of flexible copper clad laminate with adhesive layer[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(1): 30-35.
- [3] Kim S H, Na S W, Lee N E, et al. Effect of surface roughness on the adhesion properties of Cu/Cr films on polyimide substrate treated by inductively coupled oxygen plasma [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(7): 2072-2079.
- [4] Zhou M S, Zhang W L, Ding D Y, et al. The effect of pretreatment on adhesive strength of Cu-plated liquid crystal polymer (LCP) [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(7): 2643-2647.
- [5] Miyauchi K, Watanabe H, Yuasa M. A study of adhesive improvement of a Cr-Ni alloy layer on a liquid crystal polymer (LCP) surface[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 94: 73-78.
- [6] Xue L L, liang Q, Lu Y X. Electroless copper plating on 1, 2-ethylenediamine grafted poly (ethyleneterephthalate) for the fabrication of flexible copper clad laminate [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, 24 (7): 2211-2217.
- [7] Bang S H, Kim K K, Jung H Y, et al. Application of NiMoNb adhesion layer on plasma-treated polyimide substrate for flexible electronic devices[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 558: 405-410.
- [8] Ahn W Y, Jang J S. Peel strength of sputtered FCCL (flexible copper clad laminate) using Ar : O₂ mixed gas preprocessing and a Ni-Cr seed layer[J]. *Electronic Materials Letters*, 2014, 10(4): 845-850.
- [9] Yang H F, Xiong F, Liu K, et al. Research on temperature-assisted laser shock imprinting and forming stability[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114: 95-103.
- [10] Yang H F, Xiong F, Wang Y, et al. Manufacturing profile-free copper foil using laser shock flattening [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 152: 103542.
- [11] Chan C W, Smith G C. Fibre laser joining of highly dissimilar materials: commercially pure Ti and PET hybrid joint for medical device applications [J]. *Materials & Design*, 2016, 103: 278-292.
- [12] Guo Z H, Yao R H, Hu Y J. Microstructure and mechanical behavior of medical NiTi alloy by laser micro-welding[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(9): 10, 11-14.
郭志宏, 姚润华, 胡永金. 医用 NiTi 合金在激光微连接下的微观组织和力学行为 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49(9): 10, 11-14.
- [13] Pagano N, Campana G, Fiorini M, et al. Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films for applications in the food-packaging industry [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 80-84.
- [14] Jia L, Yang H F, Wang Y S, et al. Research on temperature-assisted laser transmission welding of copper foil and polyethylene terephthalate[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 677-690.
- [15] Jia L, Yang H F, Wang Y S, et al. Direct bonding of copper foil and liquid crystal polymer by laser etching and welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 139: 106509.
- [16] Zhu S Y. Physical basis of plasma [M]. Beijing: Science Press, 1983.
朱士尧. 等离子体物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [17] Gao H, Hu Y, Xuan Y, et al. Large-scale nanoshaping of ultrasmooth 3D crystalline metallic structures [J]. *Science*, 2014, 346 (6215): 1352-1356.
- [18] Guo Y B, Caslaru R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti-6Al-4V surfaces [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211 (4): 729-736.
- [19] Gao H, Cheng G J. Laser-induced high-strain-rate superplastic 3-D microforming of metallic thin films [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2): 273-281.

Laser Hybrid Welding of Electronic Copper Foil and Liquid Crystal Polymer

Liu Hao^{1,2}, Yang Haifeng^{1,2*}, He Haidong³, Jia Le¹, Gao Qiang¹

¹ School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

² Jiangsu Key Laboratory of Mine Mechanical and Electrical Equipment, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

³ College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215031, China

Abstract

Objective With the advancement of high-speed and high-frequency communication technology, current loss has become a major impediment to technological advancement. The skin effect causes current loss. That is, when high-frequency and high-speed signals are transmitted, the current tends to be transmitted on the material surface, and the smoothness of the material surface directly affects the current transmission performance. The greater the surface roughness, the greater is the current loss. It has become a major impediment to the advancement of high-speed and high-frequency communication technology. Because of its excellent properties, such as electrical conductivity and ductility, copper foil currently has a better overall effect compared with other materials. Copper foil is the primary transmission material in circuit transmission (circuit board), and liquid crystal polymer (LCP) is the insulating substrate in two-layer flexible copper clad laminates. To address the aforementioned issues, we propose in this study, based on the current technological advancements, a method of combining various technologies to directly combine copper foil and polymer. The direct bonding of copper foil and polymer achieved using this method has high bonding strength.

Methods First, the copper foil surface treated using pulsed laser is used to achieve maximum flatness while maintaining the integrity of the copper foil via optimizing the process parameters. In contrast to coarsening the copper foil surface, this step greatly reduces the roughness of the copper foil surface, meeting the requirements of low loss of high-frequency and high-speed signal transmission. To prepare for later imprinting of nanostructures on the surface of copper foil, the flattened copper foil is annealed at 450 °C for 2 h in vacuum environment to remove residual stress inside the flattened copper foil. The flattened copper foil is imprinted with a pulsed laser, and the regular array nanostructure is built on top of it. Finally, the copper foil with a nanostructure on its surface is welded with pretreated LCP using a fiber-coupled semiconductor continuous laser, resulting in the direct combination of copper foil and LCP.

Results and Discussions When the pulsed laser energy is 0.35 J and laser spot overlap ratio is 50%, laser flattening can reduce the surface roughness of copper foil from 40.6 to 7.8 nm, a reduction of 80.8%. When the overlap ratio is 50%, the surface roughness value of the flattened copper foil first decreases, and then increases in the laser energy range of 0.3–0.4 J, because when the laser overlap ratio is constant, the shock wave pressure generated by the small laser energy during the impact process is insufficient, resulting in an incomplete impact, poor flattening effect, and large surface roughness of the copper foil (Fig. 6). After annealing, the surface roughness of the original copper foil substantially increases, by approximately 53.9%. The surface roughness of the flattened copper foil after annealing is increased by 20.6% than that of the flattened copper foil before annealing. This is because the flattened copper foil's surface is smooth, no evident defect amplification is seen, and the flattened copper foil is strengthened (Fig. 10). The regular array nanostructures imprinted using laser imprinting on the surface of flattened copper foil laid the groundwork for the direct combination of copper foil and polymer. The cross-section microstructure of the copper foil surface obtained after imprinting is not circular, in contrast to the silicon mold. The diameter of the near circular structure exceeds 500 nm, while the diameter of the larger structure is approximately 582.9 nm, which is close to the limit size of 600 nm, indicating that the imprint effect is good (Fig. 13). When the surface flattened imprinted copper foil is welded to LCP, the bonding strength of the copper foil and LCP is increased to approximately 0.31 MPa, which is 72.2% greater than the bonding strength of the original annealed copper foil and LCP (Fig. 14). This has the potential to considerably reduce current transmission losses.

Conclusions This study combines laser flattening, laser imprinting, and laser welding technologies, which have the potential to reduce the impact of the skin effect. Firstly, the surface of copper foil is flattened, the effect of flattening parameters on the flattening effect is investigated, and the flattening mechanism is revealed. Then, the nanostructure is then created using the nanomold on the surface of the flattened annealed copper foil. Finally, laser welding is used to connect the flattened and annealed imprinted copper foil and LCP. Microtension experiments are used to test the bonding strength of the copper foil and LCP treated under various conditions. The sample's surface morphologies are examined using an atomic force microscope, optical microscope, and a scanning electron microscope, and the mechanisms of flattening, imprinting, and welding are discovered.

Key words laser technique; laser flattening; laser imprinting; laser welding; bonding properties; dissimilar materials