

利用 YAG 激光去除线缆屏蔽材料

陈添禹, 王明娣, 杨桂林, 刘凯, 施克明

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 在利用 CO₂ 激光器去除绝缘层的基础上, 采用 YAG 激光器去除线缆屏蔽层材料, 建立了 YAG 激光剥离金属材料的理论模型。利用 ANSYS 软件对激光剥离材料过程进行数值模拟分析, 确定了实验所需参数。通过 YAG 激光对 RG113 线缆屏蔽层进行了剥离实验, 得到了激光功率、扫描速度、脉宽及离焦量对切口宽度和深度及表面质量的影响规律。通过正交实验的极差分析, 研究了各工艺参数对切口宽度和深度的影响。结果表明, 激光功率对绝缘层切口宽度、切口深度及金属屏蔽层切口深度的影响最强, 而激光扫描速度对金属屏蔽层切口宽度的影响最大。

关键词 激光技术; 激光剥线; 屏蔽层去除; 数值模拟; 正交实验

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1214002

Removal of Cable Shield Material by YAG Laser

Chen Tianyu, Wang Mingdi, Yang Guilin, Liu Kai, Shi Keming

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Based on the removal of insulating layers by CO₂ lasers, the shielding layer material of cables is removed by YAG lasers, and the theoretical model of YAG laser peeling of metallic materials is established. The process of laser peeling of materials is simulated and analyzed by ANSYS software, and the experimental parameters are determined. With the experiment of YAG laser peeling of the shielding layers of RG113 cables, the influence rules of laser power, scanning speed, pulse width and defocusing distance on the incision width, the incision depth and the surface quality are obtained. With the range analysis of the orthogonal tests, the influences of different process parameters on the incision width and depth are studied. The results show that the laser power has the greatest impact on the incision width, the incision depth of insulating layers and the incision depth of the metallic shielding layer, while the laser scanning speed has the greatest impact on the incision width of the metallic shielding layer.

Key words laser technique; laser wire-stripping; removal of shielding layer; numerical simulation; orthogonal test

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

目前, 所有控制系统及电子通讯设备的有效连接几乎都离不开线缆。大多数线缆由多层异质材料构成, 包括绝缘外层、金属屏蔽层及金属线芯等。在高精电子和航空航天产品中, 电线多为皮薄的多股细线, 直径最小可小于 0.5 mm。传统的线缆剥离方式^[1-3] 不管在精度上还是效率上都存在很大的局限性^[4], 已经不能满足绝缘和屏蔽介质逐层、高效、无损剥离的要求。

近年来发展起来的激光剥线技术具有非接触加工的优点^[5], 不会使线芯产生变形, 且加工速度快, 热影响区域小, 无污染^[6-7]。Snelling 等^[8-9] 先后对 SMF-28 光纤的绝缘层保护套和涂覆层进行了激光剥离研究, 研究了激光能量密度、脉冲数对其熔蚀程度的影响; 冯博等^[10] 利用 CO₂ 激光器剥除光纤涂覆层, 计算并验证

收稿日期: 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51675360)、江苏省自然科学基金(BK20151194)、江苏省精密与微细制造技术开放基金、宁波市产业技术创新重大科技专项(2015B11036)

作者简介: 陈添禹(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: 1097289690@qq.com

导师简介: 王明娣(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn(通信联系人)

了剥除参数;Campanelli 等^[11-12]利用 Nd:YAG 激光器进行了综合的铣削优化实验,通过改变扫描的路径、速度、重复频率,分析了能量密度对铣削深度、材料去除率的影响以及重复度对粗糙度的影响。

虽然激光剥线技术已经有了一定的研究基础,但该技术的精度和效率都很低,且大部分研究都集中于利用激光去除线缆绝缘层,而对于利用激光去除线缆中金属屏蔽层的实验研究鲜有报道。本文对 RG113 线缆的金属屏蔽层进行了剥离实验,得到了功率、扫描速度、脉宽及离焦量对金属屏蔽层激光剥离处的切口宽度、切口深度及表面质量的影响规律。通过正交实验的极差分析,探究了各工艺参数对切口宽度、切口深度的影响。此外,通过综合平衡法对激光加工参数进行了优化。该研究结果对激光剥线技术精度的控制、效率的提升和参数的优化均具有一定的参考价值。

2 建模分析

当 RG113 线缆的金属表面被 YAG 激光束照射时,材料表面吸收光束能量达到熔化温度后,材料开始熔化并形成固-液相界面。由于金属材料的热传导作用,界面位置向内部区域推进,使得材料切口处被熔化,进而加深切口深度。材料变成熔融状态后继续吸收光束能量,材料内部压力增大,迫使处于熔融状态的材料向外喷射。因此,在激光束的作用下,金属材料的去除方式一般以蒸汽和熔融这两种形式为主^[13-14]。其激光剥离模型如图 1 所示。

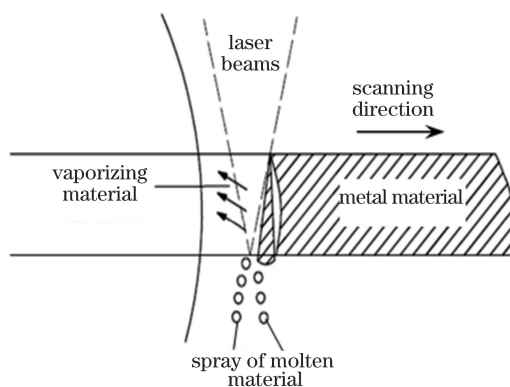


图 1 激光剥离金属材料的模型

Fig. 1 Model of laser peeling of metallic materials

考虑到金属材料在激光剥离过程中存在热损失,而金属材料的热传导是造成激光去除过程中热损失的主要原因,在热传导过程中还伴随着热辐射以及热对流,但其造成的热损失很小,可以忽略不计^[15]。因此,工件上某点经过时间 t 后的温度^[16-17]为

$$T(y, t) = \frac{q}{vh(4\pi c \rho t)^{1/2}} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{4at}\right)\right], \quad (1)$$

式中 q 为热源的有效功率, a 为被加工材料的热扩散率, v 为激光束扫描速度, y 为被加工点与热源轴线间的垂直距离, h 为离焦量, c 为比热容, ρ 为切口处金属材料的密度。

影响 YAG 激光去除金属材料的参数很多,内部因素如比热容、材料密度等在加工过程中变化较小,可当作常数,而外部因素如激光功率、激光束扫描速度、离焦量等在加工过程中会直接影响激光剥离金属材料的加工效果。

3 模拟分析

考虑线缆结构的对称性,选其 1/4 部分进行建模,最里层金属线芯半径为 0.4 mm、长度为 5 mm,中间金属屏蔽层厚度为 0.12 mm、长度为 5 mm,最外面为绝缘层,并对模型进行网格划分。设定热源为面热源,光强呈高斯分布;空气初始温度设置为 20 °C;在剥离过程中,金属屏蔽层表面与周围环境存在热对流;设定激光热源沿固定方向匀速移动直至剥离完成。选择功率为 20 W、脉宽为 2.0 ms、离焦量为 0 mm、光斑直径为 0.02 mm 的激光进行模拟分析,加工过程中温度场的分布如图 2 所示。

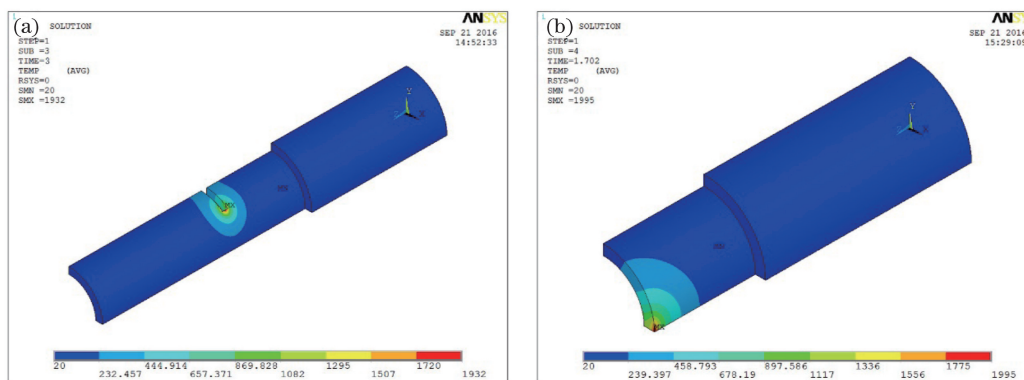


图 2 屏蔽层上温度场云图。(a)处于准稳态的温度场;(b)温度场纵向分布

Fig. 2 Cloud pictures of temperature field in shielding layer. (a) Temperature field in quasi-steady state; (b) longitudinal distribution of temperature field

由图 2 可得,激光束照射到金属材料上某处时,该处温度急剧升高,熔池温度以扫描路径为中心呈对称分布,且中心处温度最高。当温度场进入准稳态时,如图 2(a)所示,最高温度达 1932 °C,超过材料的熔点温度(1084 °C),故熔池中心处的金属材料可以被完全去除。在该参数下,温度场纵向最低温度可达约 1117 °C,如图 2(b)所示,故可以将屏蔽层剥离。

4 实验分析

先进行单因素实验,探究不同工艺参数对金属屏蔽层的切口宽度和深度的影响规律,从而确定各工艺参数较优的范围以便进行正交实验。根据以往实验经验与仿真结果,激光功率取 10~20 W,扫描速度取 1~10 mm·s⁻¹,频率取 10~90 kHz,离焦量取 -2~2 mm,工艺参数及实验结果如表 1。

表 1 屏蔽层激光剥离工艺参数及实验结果

Table 1 Process parameters and test results for laser peeling of shielding layers

Serial number	Power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Frequency /kHz	Defocusing distance /mm	Kerf width / (10 ⁻² mm)	Kerf depth /mm
1	12	5	30	0	0.207	0.019
2	14	5	30	0	0.361	0.079
3	16	5	30	0	0.482	0.120
4	18	5	30	0	0.516	0.120
5	20	5	30	0	0.826	0.120
6	16	1	30	0	0.861	0.120
7	16	3	30	0	0.723	0.120
8	16	7	30	0	0.431	0.090
9	16	9	30	0	0.258	0.062
10	16	5	10	0	0.327	0.099
11	16	5	20	0	0.448	0.120
12	16	5	40	0	0.561	0.120
13	16	5	50	0	0.534	0.109
14	16	5	30	-2	0.172	0.040
15	16	5	30	-1	0.334	0.087
16	16	5	30	1	0.429	0.051
17	16	5	30	2	0.086	0.006

4.1 实验分析

4.1.1 激光功率对屏蔽层剥离质量的影响

当扫描速度为 5 mm·s⁻¹、频率为 30 kHz、离焦量为 0 mm 时,在不同激光功率下,金属屏蔽层激光剥离

处切口的宽度和深度变化曲线如图 3 所示。可以看出,金属屏蔽层激光剥离处切口的宽度随激光功率的增大而增大,这是因为激光输出功率越大,辐照在屏蔽层表面的单脉冲能量越大,所以材料表面被激光剥离的切口宽度越大。当功率超过 18 W 时,剥离宽度增大趋势加快,由于激光能量较大,材料主要以气化的形式消除,在切口处不易出现熔融物重凝,且切口表面也较光滑。

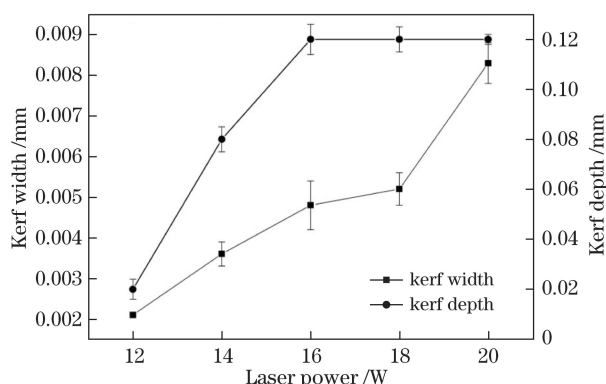


图 3 激光功率对屏蔽层剥离质量的影响

Fig. 3 Influence of laser power on peeling quality of shielding layer

金属屏蔽层激光剥离处切口的深度随着激光功率的增大而增大,当激光功率达到 16 W 时,屏蔽层被完全切透。由于金属线芯对 YAG 激光的吸收率较大,继续增大功率会损坏金属线芯上的保护套甚至金属线芯,综合考虑激光剥离处的切口宽度及深度,激光功率取 15~19 W 进行后续正交实验。

4.1.2 激光扫描速度对屏蔽层剥离质量的影响

当激光功率为 16 W、频率为 30 kHz、离焦量为 0 mm 时,在不同激光扫描速度下,金属屏蔽层激光剥离处切口的宽度和深度变化曲线如图 4 所示。可以看出,当激光扫描速度小于 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,切口深度均为 0.1 mm,这表示在该扫描速度范围内,屏蔽层均能被激光切透,但扫描速度不能过小,否则会对金属线芯造成损伤。随着扫描速度的增加,切口深度逐渐减小,这是因为激光束与材料的作用时间不断变短,热影响区不断变小,故切口处的材料能被消除的部分也就越来越少。综合考虑剥离处的切口宽度及深度,扫描速度取 $4 \sim 6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行后续正交实验。

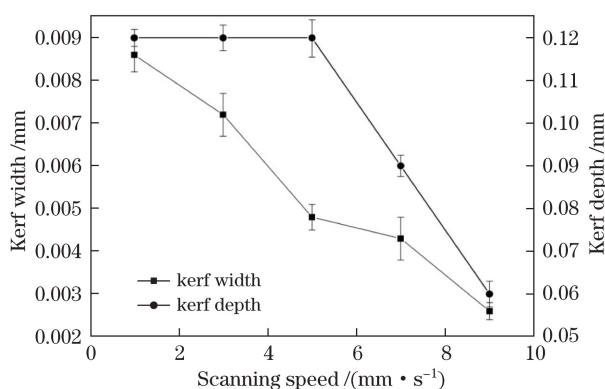


图 4 激光扫描速度对屏蔽层剥离质量的影响

Fig. 4 Influence of laser scanning speed on peeling quality of shielding layer

4.1.3 激光频率对屏蔽层剥离质量的影响

当激光功率为 16 W、扫描速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、离焦量为 0 mm 时,在不同激光频率下,金属屏蔽层激光剥离处切口的宽度和深度变化曲线如图 5 所示。可以看出,激光剥离的宽度随激光频率的增大先增大后减少,这是因为激光频率越高,单脉冲与材料的作用时间就越短,当频率达到一定值时,激光脉冲与材料的作用开始起主导作用,导致材料所能吸收的能量密度变小,材料能熔融的区域变小。激光剥离的深度随着激光频率的增大而增大直到屏蔽层被切透。当激光频率为 10 kHz 时,激光的峰值功率不够大,故脉冲能量不大,不足以使激光束照射区域的大部分材料被消除。但随着激光频率的增大,脉冲能量增大,材料被剥离的深度变

大。但激光频率越高,单脉冲与材料作用的时间也就越短,金属屏蔽层材料所能吸收的激光能量开始减小,故剥离的深度不是随着激光频率的增大而无限增大的。综合考虑激光剥离处的切口宽度及深度,激光频率取 20~40 kHz 进行后续正交实验。

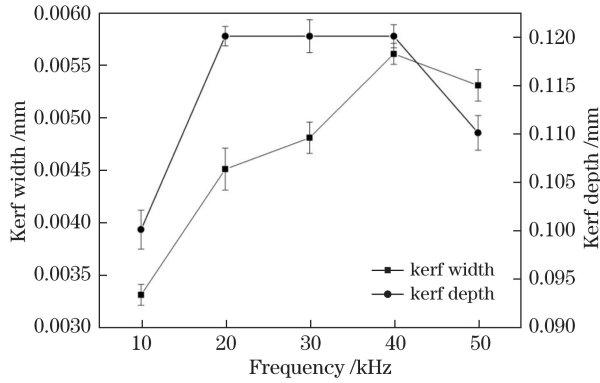


图 5 激光频率对屏蔽层剥离质量的影响

Fig. 5 Influence of laser frequency on peeling quality of shielding layer

4.1.4 离焦量对屏蔽层剥离质量的影响

当激光功率为 16 W、扫描速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、频率为 30 kHz 时,在不同离焦量下,金属屏蔽层激光剥离处切口的宽度和深度变化曲线如图 6 所示。虽然实验构件是圆柱形,但其整体高度为 1.1 mm,其中屏蔽层的厚度为 0.12 mm,相对于变化范围为 $-2 \sim 2 \text{ mm}$ 的离焦量而言,可以忽略屏蔽层表面的高度变化,将圆弧面简化为平面。由图 6 可知,激光剥离处切口的宽度随着离焦量的增大先增大后减小。当离焦量为 -2 mm 时,激光焦点在构件前面,屏蔽层单位面积所获得的平均能量较小,材料温度能达到熔沸点的区域较小,故剥离的宽度较小;当离焦量在 $-1 \sim 0 \text{ mm}$ 范围时,焦点位置在构件内部,屏蔽层单位面积所获得的平均能量较大,更多的材料熔融或气化,故切口宽度较大;当离焦量为 0 mm 时,屏蔽层单位面积所获得的平均能量达到最大,更多区域的材料被去除。但随着离焦量继续增大,焦点位置处于滞后位置,屏蔽层单位面积所获得的平均能量又开始减小,材料温度能达到熔沸点的区域减小,故剥离处的切口宽度逐渐减小。综上分析可知,激光剥离处切口的深度随着离焦量的增大先增大后减小,原因是在离焦量从 -2 mm 增加至 0 mm 的过程中,屏蔽层表面获得激光的平均能量密度逐渐变大,故剥离的深度逐渐增大;而随着离焦量进一步从 0 mm 增大到 2 mm ,辐照在屏蔽层表面的能量密度逐渐减小,故剥离的深度逐渐减小。综合考虑激光剥离处的切口宽度及深度,离焦量取 $-0.5 \sim 0.5 \text{ mm}$ 进行后续正交实验。

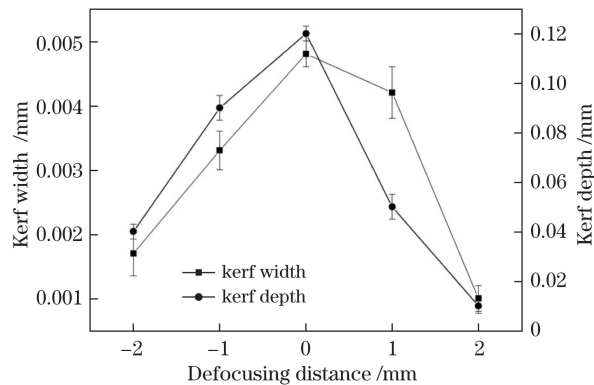


图 6 离焦量对屏蔽层剥离质量的影响

Fig. 6 Influence of defocusing distance on peeling quality of shielding layer

4.2 正交实验优化

4.2.1 因素水平选择

YAG 激光剥离金属屏蔽层工艺参数有平均功率、扫描速度、频率和离焦量,分别用 A、B、C、D 表示,各个因素均取 3 个水平,根据上述的单因素实验结果,正交实验中各剥离工艺参数的因素水平见表 2。

表 2 因素水平表
Table 2 Factor level table

Level	Factor			
	A /W	B /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	C /kHz	D /mm
1	15	4	20	-0.5
2	17	5	30	0
3	19	6	40	0.5

4.2.2 正交实验研究

选择正交表 $L_9(3^4)$ 来安排正交实验, 即需进行 9 次实验, 分别以激光剥离处的切口宽度和深度作为优化指标, 实验要素安排及结果见表 3, 极差分析结果见表 4 和表 5, 其中 k 表示切口宽度, s 表示切口深度, 下角标 1、2、3 分别表示 level 1、level 2、level 3, R 表示极差值。

表 3 正交实验要素安排及结果
Table 3 Arrangement of orthogonal test elements and results

Serial number	Element				Result	
	A /W	B /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	C /kHz	D /mm	Kerf width /(10^{-2} mm)	Kerf depth /mm
1	15	4	20	-0.5	0.686	0.096
2	15	5	30	0	0.549	0.120
3	15	6	40	0.5	0.481	0.104
4	17	4	30	0.5	0.658	0.112
5	17	5	40	-0.5	0.562	0.120
6	17	6	20	0	0.439	0.120
7	19	4	40	0	0.713	0.120
8	19	5	20	0.5	0.699	0.120
9	19	6	30	-0.5	0.672	0.120

表 4 切口宽度的极差分析结果
Table 4 Range analysis results of kerf widths

Factor	Kerf width			R /(10^{-2} mm)
	k_1 /(10^{-2} mm)	k_2 /(10^{-2} mm)	k_3 /(10^{-2} mm)	
A	0.572	0.553	0.695	0.142
B	0.686	0.603	0.531	0.155
C	0.608	0.626	0.585	0.041
D	0.640	0.567	0.613	0.073

表 5 切口深度的极差分析结果
Table 5 Range analysis results of kerf depths

Factor	Kerf depth			R /mm
	s_1 /mm	s_2 /mm	s_3 /mm	
A	0.107	0.117	0.120	0.013
B	0.109	0.120	0.115	0.011
C	0.112	0.117	0.115	0.005
D	0.112	0.120	0.112	0.008

金属屏蔽层激光剥离的两个指标即切口宽度和切口深度, 随因素的变化情况各异, 两者不能同时达到最优, 因此在矛盾的规律中寻求最佳的平衡, 即在保证屏蔽层被切透的前提下切口越窄越好。根据表 4 和表 5 的极差分析结果, 分别分析激光参数对剥离处切口宽度及深度的影响大小。对比切口宽度这一指标下各因

素的极差值 R , 可以得到这 4 个因素对切口宽度的影响由强到弱顺序依次为 B 、 A 、 D 、 C , 即激光扫描速度的影响最大, 频率的影响最小, 在本组数据中, 选择切口宽度最小为最优, 即产生最优切口宽度的条件为 $A2B3C3D2$ 。对比切口深度这一指标下各因素的极差值 R , 可以得到这 4 个因素对剥离处切口深度的影响由强到弱顺序依次为 A 、 B 、 D 、 C , 即平均功率的影响最大, 频率的影响最小。因为要保证屏蔽层被切透, 故在本组数据中, 选择切口深度最大为最优, 即产生最优切口深度的条件为 $A3B2C2D2$ 。

采用综合平衡法选择两指标的最优组合^[18-19]:

1) A : 因素 A 是影响屏蔽层剥离处切口深度最重要的参数, 是影响切口宽度的次要因素。当因素 A 取第三水平时, 屏蔽层基本上被切透, 故因素 A 取第三水平;

2) B : 因素 B 是影响切口深度的次要因素, 对切口宽度的影响排在第一位, 取 $B3$ 时的切口宽度值比取 $B2$ 时的减小了 12%, 而剥离的切口深度减小了 4%, 可以看出其对剥离的切口宽度的影响较大, 故因素 B 取第三水平;

3) C : 因素 C 对激光剥离处的切口宽度和深度的影响均为最小, 而取 $C3$ 时的切口宽度值比取 $C2$ 时的仅减小了 6%, 切口深度也仅减小了 2%, 两者均可忽略不计, 相对而言, 因素 C 对切口宽度的影响要大于对切口深度的影响, 故因素 C 取第三水平;

4) D : 当取 $D2$ 时, 剥离处的切口宽度及深度均达到最优, 因此因素 D 取第二水平。

综上所述, 两指标的最优参数组合为 $A3B3C3D2$, 即平均功率取 19 W, 激光扫描速度取 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 频率取 40 kHz, 离焦量取 0 mm。用优化后的激光参数对屏蔽层进行剥离, 结果如图 7(a) 所示, 可以看出, 屏蔽层已被完全切透, 且切缝表面光滑, 如图 7(b) 所示, 测出剥离宽度约为 $0.523 \times 10^{-2} \text{ mm}$, 达到了比较好的剥离效果。

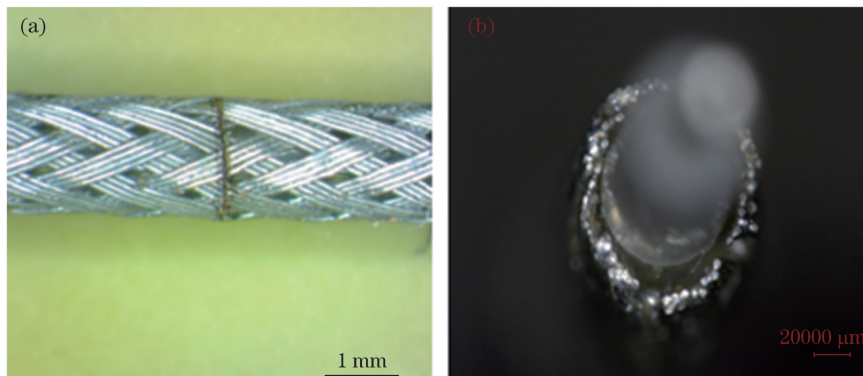


图 7 优化激光参数后屏蔽层被剥离的(a)效果图和(b)切缝表面

Fig. 7 (a) Effect picture and (b) kerf surface of laser peeling of shielding layers after laser parameter optimization

5 结 论

从激光剥离多层异质连接线缆三维去除模型的建立、数值模拟分析及实验研究三个方面, 对连接线缆的剥离进行了研究。结果表明, 在屏蔽层剥离实验中, 以切口宽度为评价指标时, 激光扫描速度的影响最大; 以切口深度为评价指标时, 激光功率的影响最大。最后通过综合平衡法获得了较优的剥离参数。

使用 YAG 激光去除线缆屏蔽层, 并结合 CO_2 激光去除绝缘层, 可大大提高剥线效率, 这种多波长激光复合剥离方法对其他类型线缆激光剥离参数的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Duke D, Kanda Y, Tobita K, *et al.* Stripping and splicing polyimide-coated fibers[C]. SPIE, 2011, 77535: 77535V.
- [2] Zhou Keyuan, Kang Penggui, Cai Junlu. Design and implementation of multi core cable automatic wire stripping machine[J]. Journal of Qingdao Technical College, 2015, 28(2): 74-76.
周克媛, 康鹏桂, 蔡君路. 多芯电线电缆全自动剥线机设计与实现[J]. 青岛职业技术学院学报, 2015, 28(2): 74-76.
- [3] Tarpey A J, Kukureka S N, Jurkschat K. Mechanical reliability of stripped and recoated polyimide fibers for optical

- fiber sensors[C]. SPIE, 2002, 4639: 141-151.
- [4] Austin W. Laser wire stripping: Lasers are a clean-cut alternative to mechanical blades[J]. *Assembly*, 2014, 57: 4.
- [5] Niu Huiting. Research on aviation electrical conductor and cable technology[J]. *Industry*, 2016, 11(5): 00205.
钮惠亭. 关于航空电气导线及电缆技术研究[J]. *工业*, 2016, 11(5): 00205.
- [6] Wang Dawei, Gao Xifeng. Study on kerf roughness differences between line and arc analysis and elimination of laser precision cutting[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303005.
王大伟, 高席丰. 激光精密切割圆弧和直线粗糙度差异分析与消除[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0303005.
- [7] Meijera J, Du K, Gillner A, *et al.* Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 531-550.
- [8] Snelling H V, Walton C D, Whitehead D J. Polymer jacket stripping of optical fibers by laser irradiation[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79: 937-940.
- [9] Peng Renxiang, Zhou Ciming. Experimental research on removing optical fiber coatings with laser[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 36(1): 36-38.
彭仁翔, 周次明. 激光去除光纤涂敷层的实验研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(1): 36-38.
- [10] Feng Bo. Study of stripping optical fiber coating using CO₂ laser[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
冯博. CO₂激光剥除光纤涂覆层研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [11] Campanelli S L, Casalino G, Contuzzi N. Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 52: 48-56.
- [12] Campanelli S L, Casalino G, Ludovico A, *et al.* An artificial neural network approach for the control of the laser milling process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9/10/11/12): 1777-1784.
- [13] Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203003.
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203003.
- [14] Hong Lei, Wu Gang. Fundamentals of laser manufacturing technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
洪蕾, 吴钢. 激光制造技术基础[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [15] Lim C K. Numerical modeling of reactive gas assisted laser cutting of metals[J]. *Mechanical Engineering*, 1995: 123-131.
- [16] Zhang Yongkang. Laser processing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
张永康. 激光加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] Yue T M, Lau W S. Pulsed Nd:YAG laser cutting of Al/Li/SiC metal matrix composites[J]. *Materials & Manufacturing Process*, 1996, 11(1): 17-29.
- [18] Wang Jing. Electric parameters optimization and the affected layer research in Cr₁₂MoV WEDM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
王静. Cr₁₂MoV 线切割电参数优化及变质层研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [19] Zhang Chenglin. Reseach on magnesium alloy metal sheet forming under crank press[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
张承霖. 曲柄压力机上镁合金板料成形研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.