

电磁复合场驱动激光减材直接成型 V 型槽形貌研究

王梁^{1,2,3}, 谢颂伟^{1,2,3}, 范思远^{1,2,3}, 王亚星^{1,2,3}, 葛鸿浩^{1,2,3}, 胡勇^{1,2,3}, 董刚^{1,2,3}, 姚建华^{1,2,3*}¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;³高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023

摘要 研究了电磁复合场对激光减材加工 V 型槽形貌的影响。在激光减材过程中同时施加稳态电场与稳态磁场, 以获得定向洛伦兹力, 从而驱动熔池排溢; 通过实验研究了激光参数以及电磁场参数对 V 型槽形貌的影响规律。实验结果显示: 在电磁复合场环境下通过改变激光参数得到了角度范围为 34.82°~65.20°、深度范围为 1719~5667 μm 的 V 型槽; 角度随着激光功率的增加和扫描速度的降低而减小, 深度随着激光功率的增加和扫描速度的降低而增大; 当激光功率为 1800 W 时, 随着磁感应强度从 0 mT 增大至 1200 mT, V 型槽底部的重熔层厚度从 764 μm 下降至 42 μm; 材料去除效率主要受激光功率的影响, 并随着激光功率的增加而增大。加工出的目标 V 型槽的角度公差等级为精密(f), 深度线性公差等级为中等(m), 表面粗糙度 R_a 值为 22.4 μm。稳态磁场与稳态电场所提供的向上的洛伦兹力克服重力及表面张力驱动熔池向上流动, 熔体以多次飞溅的形式脱离基体, 实现一次直接成型 V 型槽。

关键词 激光技术; 激光减材成型; 电磁复合场; V 型槽形貌; 定向洛伦兹力

中图分类号 TG111.4; TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221032

1 引言

V 型槽通常采用铣削、刨削等方式加工得到。在铣削、刨削等减材加工过程中, 间歇切削条件下的刀具承受着交替热力作用, 易发生刀具材料剥落现象, 导致刀具磨损、钝化, 影响加工效率及加工质量^[1]。激光减材加工以高功率激光束为热源实现材料的非接触加工, 具有无刀具磨损、加工效率高、成型灵活等特点, 在激光打孔、激光切割、激光烧蚀等领域已实现批量应用^[2]。目前常用的激光减材加工技术在去除材料过程中存在着一些局限, 如: 激光打孔、激光烧蚀技术所使用的激光器一般为脉冲激光器, 加工的孔径尺寸为微米级别^[3-4], 加工量大时加工效率会大幅降低; 激光切割技术多用于对板材进行切割, 因而对板材的厚度有一定要求^[5]; V 型槽的激光烧蚀加工则需要通过脉冲激光逐层烧蚀实现, 加工效率较低^[6-7]。现有的激光减材加工工艺难以一次成型出毫米级深度的 V 型槽, 鉴于此, 本课题组提出利用外部电磁场辅助激光减材加工的工艺, 该工艺不仅具有较高的加工效率, 还可以保证一定的加工精度。

电磁场辅助加工已被广泛应用于激光焊接、激光熔覆等领域, 其通过控制熔池内部传热和传质的演变实现对组织、缺陷、元素的调控, 从而改善加工区域的

性能^[8-13]。研究人员在电磁场辅助激光减材加工方面进行了大量探索。Ho 等^[14]利用电磁场辅助对高反材料进行了激光钻孔, 结果表明, 在洛伦兹力作用下, 羽状粒子可以从激光束中心向上提起并向侧壁循环, 激光诱导等离子体羽流的膨胀增大了侧壁材料的去除率。Lu 等^[15]在电场和磁场环境中分别用纳秒和毫秒激光器进行了激光打孔实验, 结果发现: 纳秒激光减材通过电场、磁场辅助加工出的孔更深, 而且飞溅更少, 重熔层更薄; 利用毫秒激光器加工宏观通孔时, 随着加工环境由无磁场向旋转磁场转变, 加工出的孔入口直径逐渐减小, 且气孔、飞溅及微裂纹逐渐出现。Hu 等^[16]利用电磁复合场驱动熔池, 通过激光减材加工出了不同尺寸的沟槽, 并建立了 BP 神经网络计算模型。目前, 国内外学者在电磁场辅助激光加工方面的研究主要集中在激光焊接、激光熔覆等领域, 而在激光减材加工方面的研究较少, 而且相关研究主要集中在激光打孔领域。所查资料显示, 利用电磁场驱动熔池得到的沟槽形状不规则, 针对这一现状, 本课题组施加了平行于基板的尾吹(以进一步促进熔池向上排溢), 同时通过改变激光工艺参数, 实现了 V 型槽角度的调控。本文分析了激光参数与电磁场参数对 V 型槽形貌的影响, 同时对 V 型槽的成型机制进行了讨论。

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-09-17; 录用日期: 2022-10-19; 网络首发日期: 2022-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52035014)、浙江省公益技术应用研究项目(LGG20E050019)

通信作者: *laser@zjut.edu.cn

2 实验材料及方法

基体采用 316 L 奥氏体不锈钢,其尺寸为 200 mm×20 mm×10 mm,在基体两端加工直径为 10 mm 的穿孔。激光器选用半导体激光器,型号为 LDF 400-2000,光斑直径为 4 mm,激光器的最大输出功率为 2000 W。实验中采用的激光加工参数、辅助能场参数如表 1 所示。采用电磁复合场辅助激光加工的方法驱动熔池定向流动,借助气嘴尾吹去除基体上表面的熔融金属材料,实验原理如图 1 所示。在基体两侧安装电磁铁,使待加工基体区域处于稳态的磁场环境中。基体打孔处与直流电源的正负极通过螺栓连接,使待加工基体区域在激光辐射后的熔池内部形成电场,熔池在电磁复合场环境下产生定向洛伦兹力,进一步驱动熔池向上排溢。在激光辐射基体产生的熔池的尾部施加尾吹,尾吹产生的气流方向与基体表面平行,用于使流动于基体表面的金属熔体与基体脱离。所形成的飞溅熔滴通过收集装置收集,提高了实验的安全性。通过改变磁感应强度的方式调节洛伦兹力的大小,并利用高斯计测量基体待加工区域的磁感应强度值,以便进行校准。在实验前先采用 240 目砂纸打磨基体,然后用无水乙醇清洗基体表面。

表 1 激光减材制造工艺参数

Table 1 Process parameters of laser material reduction manufacturing

Parameter	Value
Laser power P/W	1200-2000
Scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	6-10
Current density $j/(A \cdot mm^{-2})$	5
Magnetic flux density B/mT	0-1200
Gas pressure p/MPa	0.8

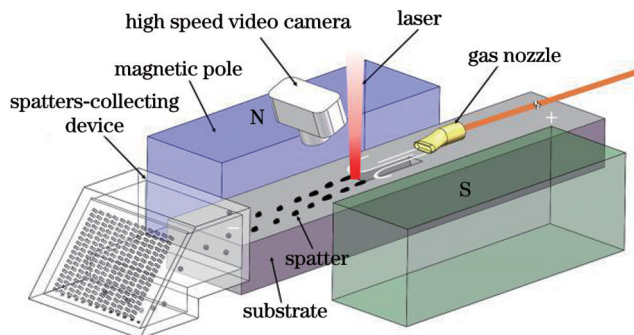


图 1 电磁复合场驱动激光减材直接成型 V 型槽示意图

Fig. 1 Schematic of direct molding V-groove by laser material reduction driven by electromagnetic composite field

实验结束后,采用 VHX-5000 型超景深三维显微镜拍摄试样的三维形貌。将试样沿垂直于扫描方向切开,使用镶样机制成金相试样,用盐酸氯化铁水溶液腐蚀金相试样 10 s,然后采用 Axio Imager2 型 Zeiss 光学显微镜分析试样的横截面形貌。使用线切割机将试样的壁面切下,采用 VK-X 1000 型形状测量激光显微镜拍摄槽面,计算加工区域的粗糙度。根据探索的实验工艺参数,加工目标角度和深度的 V 型槽,并根据国家标准 GB/T 1804—2000《一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差》^[17]评估 V 型槽的精度,同时按照国家标准 GB/T 1031—2009《产品几何技术规范(GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》^[18]中的方法测量粗糙度值。

3 实验结果与分析

3.1 电磁复合场驱动加工 V 型槽的形貌

在激光功率为 1800 W、激光扫描速度为 6 mm/s 的条件下,有无电磁复合场时激光减材试样的三维轮廓形貌如图 2 所示。从距离激光扫描起点位置 5 mm 处开始截取试样,截取长度为 10 mm。由试样的三维轮廓可以看出:1)无电磁复合场辅助时,减材区域的三维轮廓形貌不规则,而在 $j=5 A/mm^2$ 和 $B=1200 mT$ 的电磁复合场环境下,激光减材区域的槽面形状近似呈“V”形,且壁面无明显起伏;2)从减材区域的深度来看,两组实验的沟槽最大深度分别为 2.58 mm 和 4.96 mm,施加电磁复合场后,沟槽最大深度值增加了 92.25%;3)两组实验的材料去除体积分别为 32.15 mm³ 和 97.76 mm³,施加电磁复合场后,材料去除体积增加了 204.1%。这是因为施加电磁复合场后,熔池受到洛伦兹力的驱动,向垂直于扫描路径两侧流动形成“凸起”,此时尾吹气体受到“凸起”阻挡,而“凸起”受到气体压力向激光扫描路径方向运动,直至脱离基体。相较于无洛伦兹力驱动的实验组,熔池受到气体压力作用产生的“凸起”有限,因此去除材料的体积及沟槽最大深度较小。

为进一步研究 V 型槽底部及上端的轮廓形貌,提取底部轮廓起伏及上端形貌特征进行分析。图 3 是在激光功率为 1800 W、激光扫描速度为 6 mm/s、磁感应强度为 1200 mT 条件下得到的试样上端的形貌。从图中可以看出:起点位置的上槽宽度较小,结束点位置的宽度较为均匀,但底部轮廓有较大变化。远离起点约 3677 μm 后,上槽宽基本不再发生变化。对 V 型槽上端的形貌特征进行提取,结果发现边缘不呈“直线”状,而是呈“锯齿”状。V 型槽的形成过程大致可分为 3 个阶段,即起始阶段、稳定阶段、结束阶段。在起始阶段(长度约为 5197 μm)结束后,V 型槽底部起伏开始变得平缓,进入稳定阶段;在激光器结束出光后,约有长度为 3571 μm 的结束阶段。这主要是由于:1)在激光作用的起始阶段时,基体在激光的辐射下开始升温,

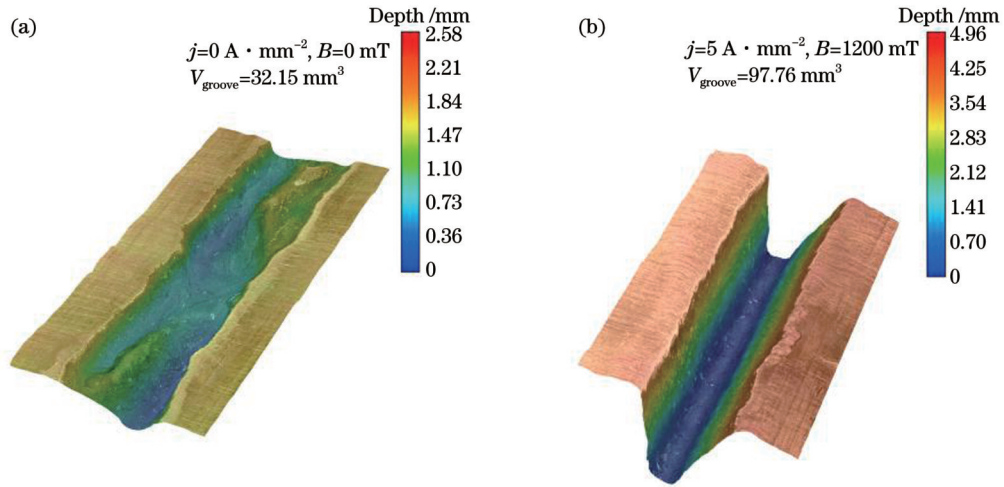


图 2 V 型槽的三维形貌。(a) $j=0 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=0 \text{ mT}$; (b) $j=5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=1200 \text{ mT}$
 Fig. 2 Three-dimensional shape of V-groove. (a) $j=0 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=0 \text{ mT}$; (b) $j=5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=1200 \text{ mT}$

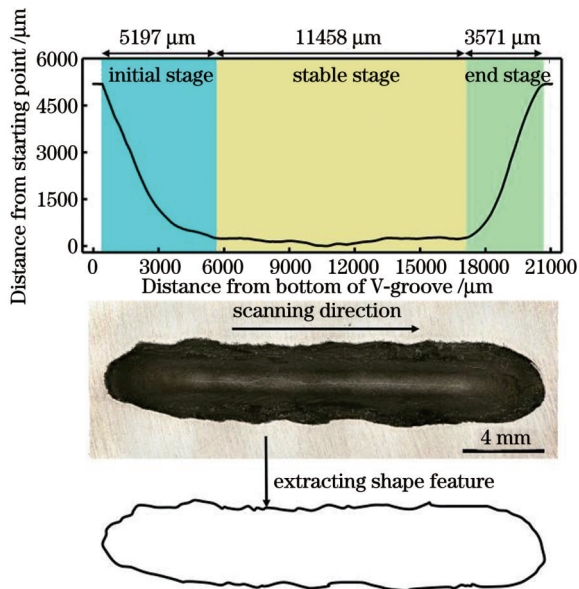


图 3 V 型槽上端形貌及底部轮廓

Fig. 3 Shape of upper end and contour line of bottom of V-groove

但是基体沿 V 型槽深度方向的熔化需要一定的时间,在基体逐渐熔化的同时激光束会按照设定的扫描路径移动,所以在起始位置 V 型槽出现了由浅至深变化的现象,并且上槽宽的尺寸由窄到宽变化。随着激光束的不断辐射,基体对能量的吸收与热传导达到稳态, V 型槽的深度达到一个定值并保持稳定;同理,在减材区域末端, V 型槽的深度沿着扫描方向出现从深到浅的现象,但 V 槽上端的宽度不再发生明显变化。2) 在激光扫描过程中,熔池受到洛伦兹力作用开始从槽内向两边扩散并在槽上端形成凸起液滴,液滴的热量在 V 型槽上端向边缘传输,导致上端基体沿垂直于扫描路径方向发生不同程度的重熔,进而在洛伦兹力作用下部分脱离基体形成“凹坑”,出现边缘处的“锯齿”状形貌。

为研究电磁复合场环境下激光减材试样的形貌及重熔层质量,将有无电磁复合场下的激光减材试样横截面进行对比分析。图 4 是激光功率为 1600 W、激光扫描速度为 6 mm/s 时,有无电磁复合场环境下激光减材试样的横截面金相图。从图中可以得到:1) 在无电磁复合场环境下激光减材加工出的沟槽底部及槽面不规则,沟槽底部的重熔层较厚,平均厚度约为 1085 μm; 2) 在电磁复合场环境下激光减材加工出的沟槽槽面轮廓近似呈“V”形,沟槽底部呈现较为规则的圆弧状,且底部重熔层厚度较为均匀,平均厚度约为 58 μm,较无电磁复合场环境下降低了 94.65%,且横截面轮廓更为规则。这主要是因为无电磁复合场环境下,沟槽的成型主要是熔池受到尾吹气体压力的作用将

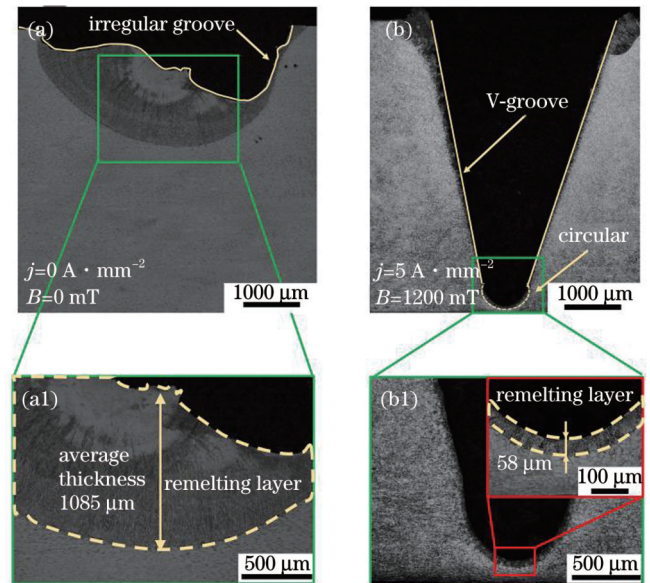


图 4 V 型槽横截面金相图。(a) $j=0 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=0 \text{ mT}$; (b) $j=5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=1200 \text{ mT}$

Fig. 4 Metallographic diagrams of cross section of V-groove. (a) $j=0 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=0 \text{ mT}$; (b) $j=5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$, $B=1200 \text{ mT}$

部分熔池熔体吹离基体,形成不规则槽,且重熔层较厚;而在电磁复合场环境下,熔池受到定向洛伦兹力的驱动,加速了熔池熔体向上排溢,只有少量熔体黏附于槽面,进一步促进了基体对激光束能量的吸收,熔体生成的体积增加,加工沟槽的深度进一步增加;基体不同位置的传热不同,深度方向从上至下所生成的熔池宽度逐渐减小,最终成型的 V 型槽在底部金属熔池表面张力的作用下呈现出较为规则的圆弧形。

3.2 工艺参数对 V 型槽形貌的影响

图 5 为施加 $j=5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的电场,且激光功率为 1800 W、扫描速度为 6 mm/s 时,不同磁感应强度下得到的 V 型槽的形貌。本文从 5 个方面对 V 型槽的形貌进行表征,分别为:1) V 型槽上部的宽度,以 W 表示;2) V 型槽的粗糙度,以壁面平均高度起伏 S_a 表征;3) V 型槽的深度,以底部到顶部的高度 H 表示;4) V 型槽的角度,以两壁面之间的夹角 A 表示;5) V 型槽底部的圆弧半径,以 R 表示。沟槽上部宽度 W 随着磁场环境的施加略有变化:当 $B=0 \text{ mT}$ 时,上槽宽约为 2644 μm ;施加电磁场后,上槽宽在 400、800、1200 mT 环境下分别为 2703、2691、2816 μm 。由于在 $B=0 \text{ T}$ 环境下所加工的槽深度较浅,且槽深和壁面粗糙度都不均匀,壁面粗糙度无参考意义。在 400、800、1200 mT 环境下加工的 V 型槽的壁面粗糙度 S_a 分别为 23.34、22.61、22.04 μm ,无明显变化。在 0、400、800、1200 mT 环境下加工的 V 型

槽的深度分别为 1224、2596、3017、3423 μm ,随着磁感应强度增加,V 型槽底部到顶部的距离逐渐增加。在 0 T 环境下加工出的 V 型槽的形状不规则,无法以角度表征其形貌;在 400、800、1200 mT 环境下加工出的 V 型槽两壁面之间的夹角分别为 39.53°、38.68°、37.72°,V 型槽两壁面之间的夹角随着磁感应强度的增加而降低。在 0 T 环境下加工出的 V 型槽的底部形貌不是规则的圆弧,无法以半径表征其形貌;在 400、800、1200 mT 环境下加工出的 V 型槽的底部呈现为较规则的圆弧形,且半径分别为 658、375、305 μm ,底部圆弧半径随着磁感应强度的增加而逐渐减小。在不同磁感应强度下加工出的 V 型槽的形貌不同,这主要是因为:1) 在电磁复合场环境下熔池受到向上的洛伦兹力,加速了熔池熔体的溢出,V 型槽的深度 H 较无磁场环境下更大;2) 在同一激光功率及扫描速度下,V 型槽两侧壁面在加工过程中对激光的吸收基本不变,因此 V 型槽角度随磁感应强度变化不明显;3) 磁感应强度的增强加速了 V 型槽底部熔体的溢出,熔池底部基体的熔化加速,V 型槽深度 H 随着磁感应强度的增加而变大;4) V 型槽的角度基本未变化,但深度在逐渐增加,所以 V 型槽底部圆弧半径随着磁感应强度的增加而变小;5) 熔体溢出至上端时所聚“凸起”的体积不同,导致熔体向基体上端两侧的传热不同,部分基体的熔化程度不同,因此 V 型槽的上端宽度 W 在 2700 μm 左右浮动。

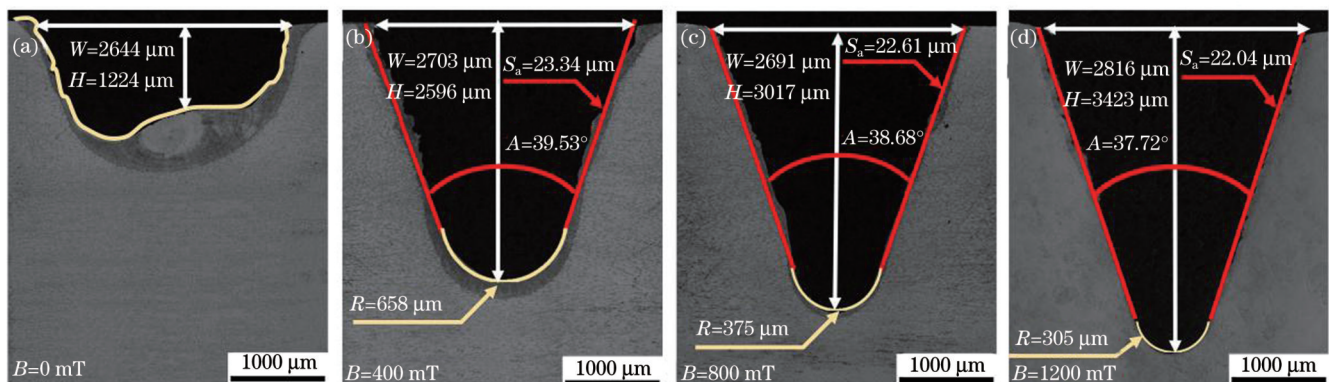


图 5 磁感应强度对 V 型槽形貌的影响。(a) $B=0 \text{ mT}$; (b) $B=400 \text{ mT}$; (c) $B=800 \text{ mT}$; (d) $B=1200 \text{ mT}$

Fig. 5 Effect of magnetic field intensity on V-groove morphology. (a) $B=0 \text{ mT}$; (b) $B=400 \text{ mT}$; (c) $B=800 \text{ mT}$; (d) $B=1200 \text{ mT}$

为进一步研究磁感应强度对 V 型槽底部重熔层厚度的影响,对图 5 所示底部重熔层厚度进行统计,结果如图 6 所示。在无电磁复合场环境下加工的 V 型槽的重熔层平均厚度为 764 μm ,而且重熔层厚度不均匀;当磁感应强度仅为 400 mT 时,底部重熔层的厚度减薄至 268 μm ,较无电磁复合场环境时减薄了 64.92%,重熔层厚度较为均匀;当磁感应强度达到 1200 mT 时,结合图 5(d) 可以发现,在低倍横截面形貌下很难看出重熔层,此时重熔层的厚度仅为 42 μm ,较无电磁复合场环境时减薄了 94.50%。通过上述分析并结合

图 5 可知:当磁感应强度从 400 mT 增大至 1200 mT 时,V 型槽底部重熔层厚度明显减小,且较无磁感应强度下的厚度更为均匀;当磁感应强度为 1200 mT 时,V 型槽底部重熔层厚度仅为无磁感应强度时的 5.50%,对基体的损伤较小。这是因为随着电磁复合场的引入,洛伦兹力开始驱动熔池向上排溢,随着磁感应强度增加,洛伦兹力增大,进一步加速熔池的排溢,因此黏着于 V 型槽底部的重熔层的厚度逐渐减小。

为研究激光热输入量对 V 型槽的影响,在激光功率为 2000 W 的条件下改变激光扫描速度,分析了加工

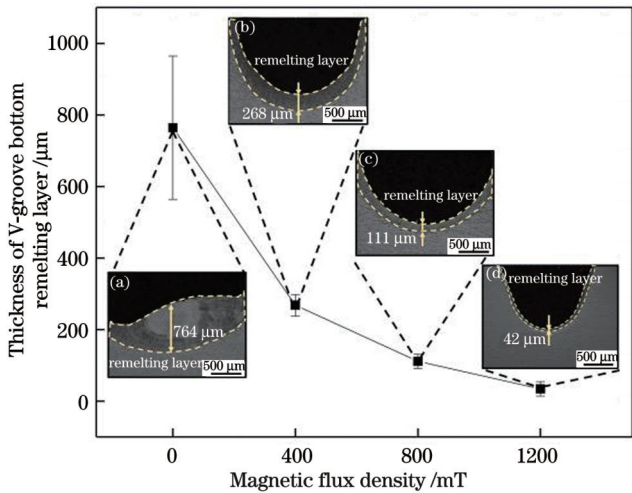


图 6 磁感应强度对 V 型槽底部重熔层厚度的影响。(a) $B=0$ mT; (b) $B=400$ mT; (c) $B=800$ mT; (d) $B=1200$ mT
Fig. 6 Influence of magnetic field intensity on thickness of V-groove bottom remelting layer. (a) $B=0$ mT; (b) $B=400$ mT; (c) $B=800$ mT; (d) $B=1200$ mT

区域横截面角度、深度及上槽宽的变化,如图 7 所示。随着扫描速度增加,基体在单位时间内对激光热输入量的吸收减少,V 型槽深度减小。上槽宽度随着扫描速度的增加而减小,但减小量较小。这是因为激光功率较高,基体在激光辐射下快速形成熔池,熔池的尺寸接近光斑直径,上槽宽度不会发生较大变化。随着扫描速度增大,基体对激光能量的吸收减少,导致受热熔化区域减少,V 型槽的深度明显减小。因此,随着激光扫描速度的改变,V 型槽深度有较大变化,而上槽宽度基本不变。综上分析可知,随着扫描速度降低,V 型槽的上槽宽度无显著变化而深度明显降低,因此 V 型槽角度随扫描速度的降低而增大。至此,通过实验初步验证了所提方法能够加工出角度可控的 V 型槽。

为研究激光参数对 V 型槽形貌的影响,在电流密度为 5 A/mm^2 、磁感应强度为 1200 mT 的条件下,通过

改变激光参数进行了 V 型槽加工实验,分析了 V 型槽角度、深度和上槽宽的变化,结果如图 8 所示。在不同扫描速度和激光功率下加工 V 型槽,并取图 3 稳定区域中的 V 型槽的 10 个横截面轮廓,对其角度进行测量并取平均值,测量结果如图 8(a) 所示。在激光功率为 1200 W 的条件下,当扫描速度分别为 $6, 8, 10 \text{ mm/s}$ 时,V 型槽的角度变化不明显;在不同的激光参数条件下,施加电磁复合场辅助激光减材加工 V 型槽,V 型槽的角度变化范围为 $34.82^\circ \sim 65.20^\circ$ 。图 8(b) 是在不同扫描速度、激光功率条件下加工出的 V 型槽的深度值。由图 8(b) 可以得到:在同一激光功率下,随着扫描速度降低,V 型槽的深度逐渐增加;在同一扫描速度下,随着激光功率升高,V 型槽的深度逐渐增加;在不同的激光参数条件下,施加电磁复合场辅助激光减材加工 V 型槽,可得到深度在 $1719 \sim 5667 \mu\text{m}$ 范围内变化的 V 型槽。图 8(c) 是 V 型槽上端宽度随扫描速度、激光功率的变化。分析图 8(c) 可以看出,上槽宽随着激光功率的增大及扫描速度的降低而增加,但增加率随着激光功率的增加或扫描速度的降低而逐渐减小,且上槽宽均小于光斑直径 4 mm 。这主要是因为:1) 激光功率为 1200 W 时,能量较低,V 型槽侧壁吸收的激光能量不足以熔化更多的基体,导致 V 型槽角度变化不明显;随着激光功率增加和扫描速度减小,侧壁对激光能量的吸收增加,因此 V 型槽的坡度不断增加,角度呈减小的趋势。2) 基体在激光束辐射下熔化,熔池处于电磁复合场环境中,在定向洛伦兹力的驱动下不断溢出并脱离基体,形成的 V 型槽内壁继续受激光的辐射发生熔化并溢出基体;随着激光功率升高和扫描速度降低,热输入量不断增加,基体深度方向的熔化体积增大,导致槽深不断增加。3) 随着激光功率增加及扫描速度降低,基体表面的局部热输入增加,基体熔化产生的熔体增加,熔体在定向洛伦兹力的作用下向上排溢至基体表面,使得基体表面的局部热输入增加,进而基体表面的熔化区域增加,熔化区域的熔体

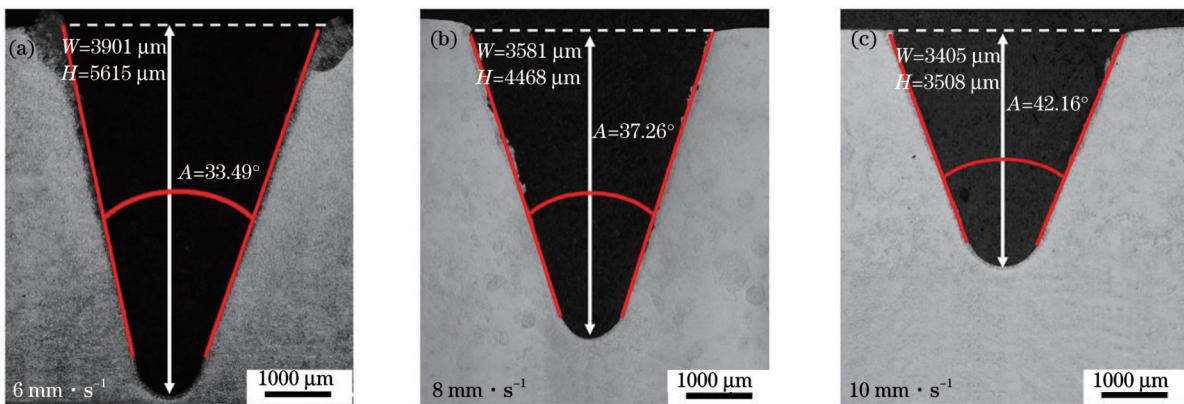


图 7 不同扫描速度下减材区域的横截面金相图。(a) 6 mm/s ; (b) 8 mm/s ; (c) 10 mm/s

Fig. 7 Cross-section metallographic diagrams of material reduction area at different scanning speeds. (a) 6 mm/s ; (b) 8 mm/s ; (c) 10 mm/s

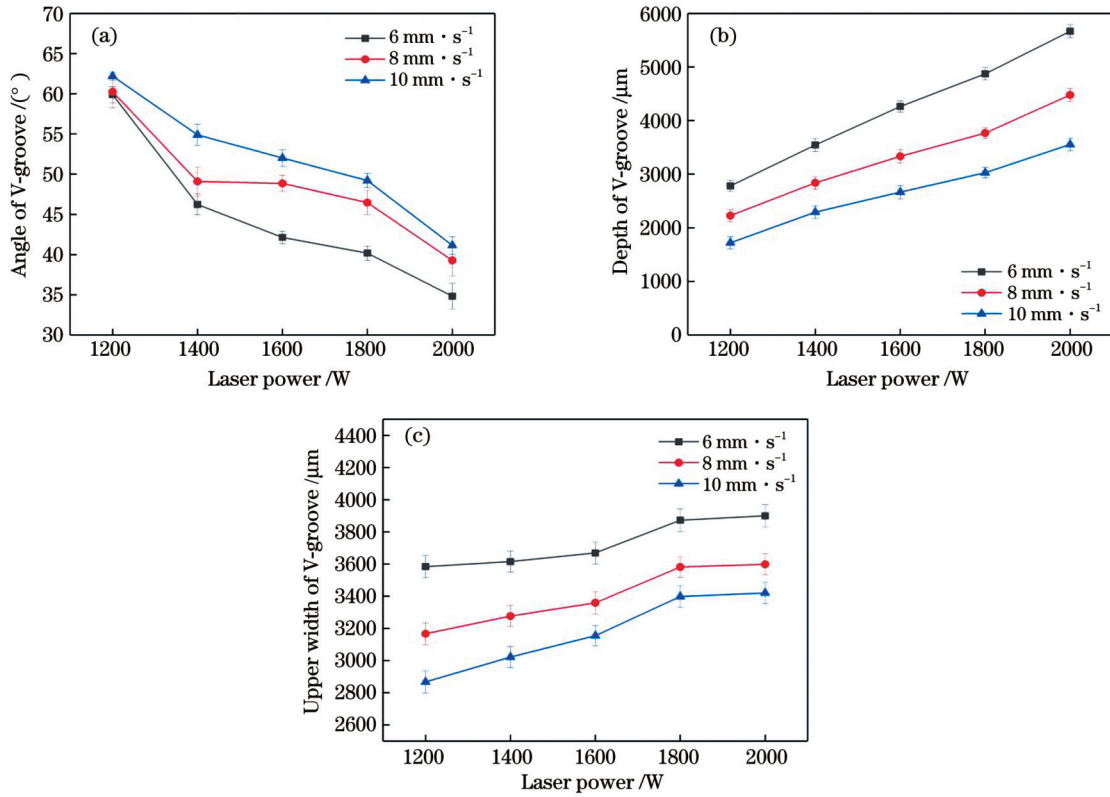


图8 激光功率及扫描速度对V型槽形貌的影响。(a)对角度的影响;(b)对深度的影响;(c)对上槽宽的影响

Fig. 8 Influence of laser power and scanning speed on V-groove morphology. (a) Effect on angle; (b) effect on depth; (c) effect on upper width of V-groove

在洛伦兹力作用下溢出,最终导致V型槽上端宽度随着激光功率增加及扫描速度降低而增加。激光光斑尺寸限制了热输入的范围,当热输入达到一定值后,随着热输入的小幅度增加,基体对能量的吸收与耗散逐渐趋于平衡,上槽宽增加率随着激光功率的增加而逐渐减小。虽然上槽宽随着激光热输入的增加而增大,但洛伦兹力导致熔体不断排溢,熔体对上端基体的热输入降低,使得上端熔化区域减小,因此,上槽宽小于光斑直径4 mm。

3.3 电磁复合场驱动下的激光减材加工V型槽的效率及精度分析

为定量表示激光减材工艺的材料去除效率,将材料去除效率定义为

$$\eta = \frac{V_{\text{Groove}}}{L/S_{\text{laser}}}, \quad (1)$$

式中: η 为材料去除效率; V_{Groove} 为材料去除体积; S_{laser} 为激光扫描速度; L 为减材区域的长度。

本文中的 L 取10 mm,所选区域均来自图3中的稳定区。图9是在电流密度为5 A/mm²、磁感应强度为1200 mT的条件下,不同扫描速度和激光功率下加工V型槽的材料去除效率。由图9可得:1)在相同的扫描速度下,材料去除效率随着激光功率的增加而增大;2)在相同的激光功率下,材料去除效率基本不随扫描速度的改变而改变;3)在不同的激光参数下施加电磁复合场辅助激光减材加工V型槽,当激光功率为2000 W

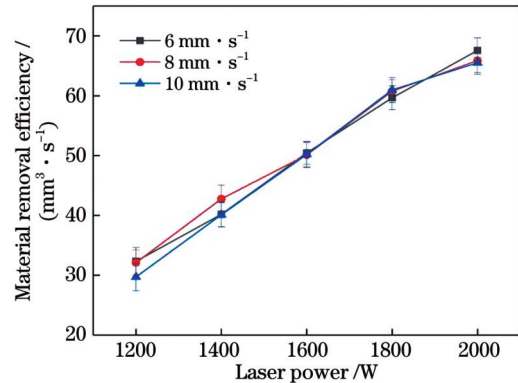


图9 不同激光功率及扫描速度下的材料去除效率

Fig. 9 Material removal efficiency under different laser powers and scanning speeds

时材料去除效率最高,约为67.58 mm³/s,较1200 W条件下提高了108.97%。材料的去除体积与基体经激光辐射熔化的面积相关,虽然减材区域的长度在单位时间内随着扫描速度的增加而变长,但由图8(b)可知V型槽的深度会变小,因此材料的去除体积基本不变。

为验证所提加工方法能加工出形貌可控的V型槽且加工出的V型槽具有一定的加工精度,本文以加工目标角度为40°和深度为3500 mm的V型槽为例,对预设V型槽进行高效率加工,加工长度为20 mm,取中间10 mm区域进行加工精度计算。结合图8(a)和图8(b)

所示结果确定加工 V 型槽的实验参数如下:激光功率 2000 W, 激光扫描速度 9 mm/s, 磁感应强度 1200 mT, 电流密度 5 A/mm²。对加工区域的实际角度、深度及粗糙度进行测量和计算, 计算结果如图 10 所示。实际加工出的 V 型槽的角度上极限偏差为 +0.33°, 下极限偏差为 -0.49°; 实际加工出的 V 型槽的深度上

极限偏差为 +56 μm, 下极限偏差为 -64 μm。根据 GB/T 1804—2000 标准, 得出角度公差等级为精密(f), 深度线性公差等级为中等(m)。按照 GB/T 1031—2009 标准, 测得表面粗糙度 R_a 为 22.4 μm。可见, 该方法不仅可以加工一定角度和深度的 V 型槽, 还可以保证一定的加工精度。

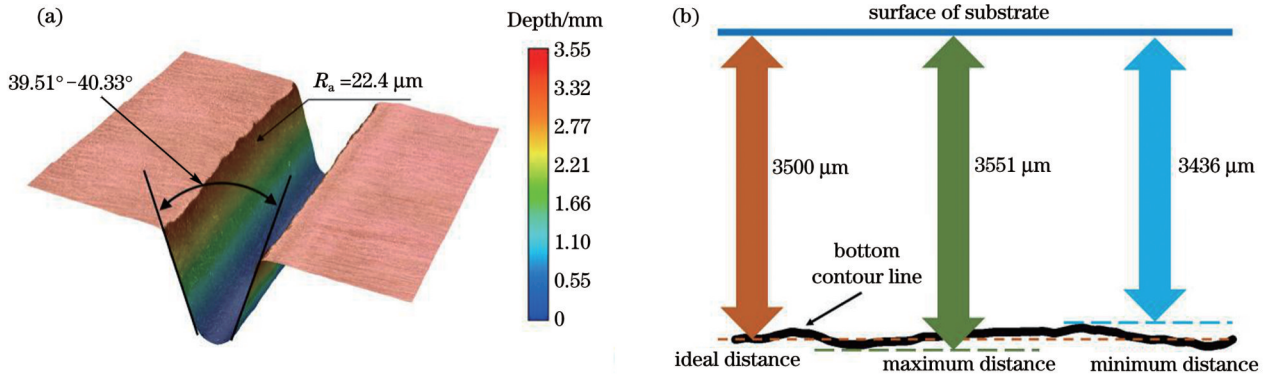


图 10 V 型槽的加工精度。(a) 角度及粗糙度; (b) V 型槽底部到表面的高度

Fig. 10 Machining accuracy of V-groove. (a) Angle and roughness; (b) height of V-groove from bottom to surface

3.4 电磁复合场驱动下 V 型槽的激光减材加工机制

为进一步揭示电磁复合场驱动下 V 型槽的激光减材加工机制, 分别拍摄了有无电磁复合场两种环境下激光减材加工时熔池的流动行为。

在激光功率为 1800 W、扫描速度为 6 mm/s 的条件下, 借助高速相机拍摄了无电磁复合场环境下的熔池流动行为, 如图 11 所示。可以看出: 在 $t_0 + 30$ ms 时, 基体表面在激光的辐射下发生熔化, 形成直径约为 1.64 mm 的熔池; 在 $t_0 + 45$ ms 时, 由于施加于基体表面的尾吹, 熔池受到气嘴释放的气体压力的作用, 具有向右运动的趋势; 随着时间推移, 在 $t_0 + 90$ ms 时熔池

运动剧烈, 到 $t_0 + 105$ ms 时形成第一次飞溅, 到 $t_0 + 120$ ms 时飞溅结束; 在 $t_0 + 135$ ms 时, 开始孕育第二次飞溅, 此时熔池尺寸较图 11(c) 增加了 0.92 mm, 熔池抖动加剧; 在 $t_0 + 150$ ms 时形成第二次飞溅, 第二次飞溅在 $t_0 + 165$ ms 时结束; 在 $t_0 + 180$ ms ~ $t_0 + 210$ ms 时间段内, 孕育第三次飞溅并且熔池持续抖动。从上述分析可以得出: 第一次飞溅的形成时间较长, 经历了 120 ms, 且完成两次飞溅共经历了 165 ms。飞溅的形成受尾吹的气压作用, 但气压作用于基体表面就会对基体熔池的影响较小, 从而导致熔池上表面基本与基体表面平行。

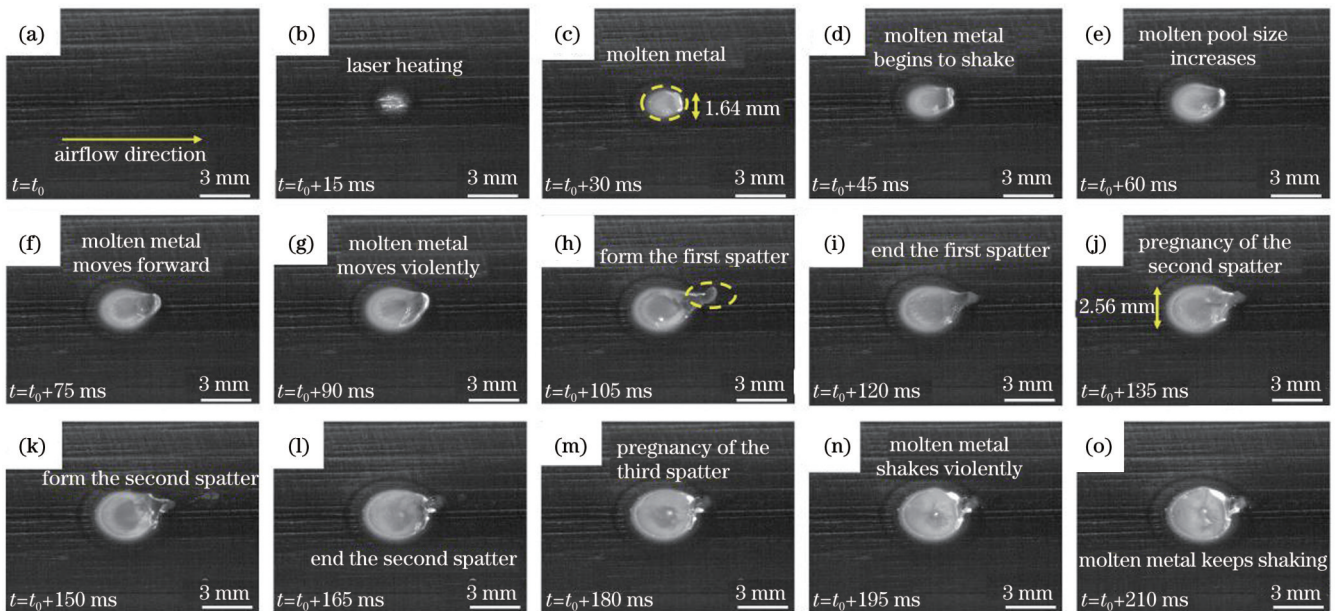


图 11 无电磁复合场驱动下的激光减材过程

Fig. 11 Laser material reduction process without electromagnetic composite field

为研究电磁复合场环境下激光减材加工 V 型槽过程中熔池的流动行为,利用高速相机拍摄了 V 型槽成型过程起始阶段的熔池流动状态。图 12 是在激光功率为 1800 W、扫描速度为 6 mm/s 条件下拍摄的电磁复合场环境下的熔池溢出过程。通过与图 11 进行对比可以发现:在 t_0+30 ms 时,电磁复合场环境下的熔池受向上洛伦兹力的驱动明显向右运动;在 t_0+45 ms 时熔池向前抖动;在第一次飞溅形成前夕,将要飞溅的液滴从右端溢出而使熔池出现小凹坑;在 t_0+60 ms~ t_0+135 ms 时间段内,熔池尺寸进一步增加,具有凹坑特

征的熔池在洛伦兹力的驱动下沿着凹坑的上下边缘聚积,形成多次飞溅;在 t_0+150 ms 时,凹坑深度增加,飞溅持续孕育;在 t_0+165 ms~ t_0+195 ms 时间段内,飞溅在凹坑的上下边缘形成,且有连续流状飞溅形成,熔体溢出效率明显增加;在 t_0+210 ms 时,飞溅持续生成,且形成明显的沟槽。由上述分析可知:在电磁复合场驱动下的激光减材过程中,洛伦兹力驱动熔池熔体排溢,较单施加尾吹气压时激光减材的材料去除效率明显增加。电磁复合场辅助激光减材加工 V 型槽的过程为:熔池边缘形成凸起,中心形成明显的凹坑,最后形成沟槽。

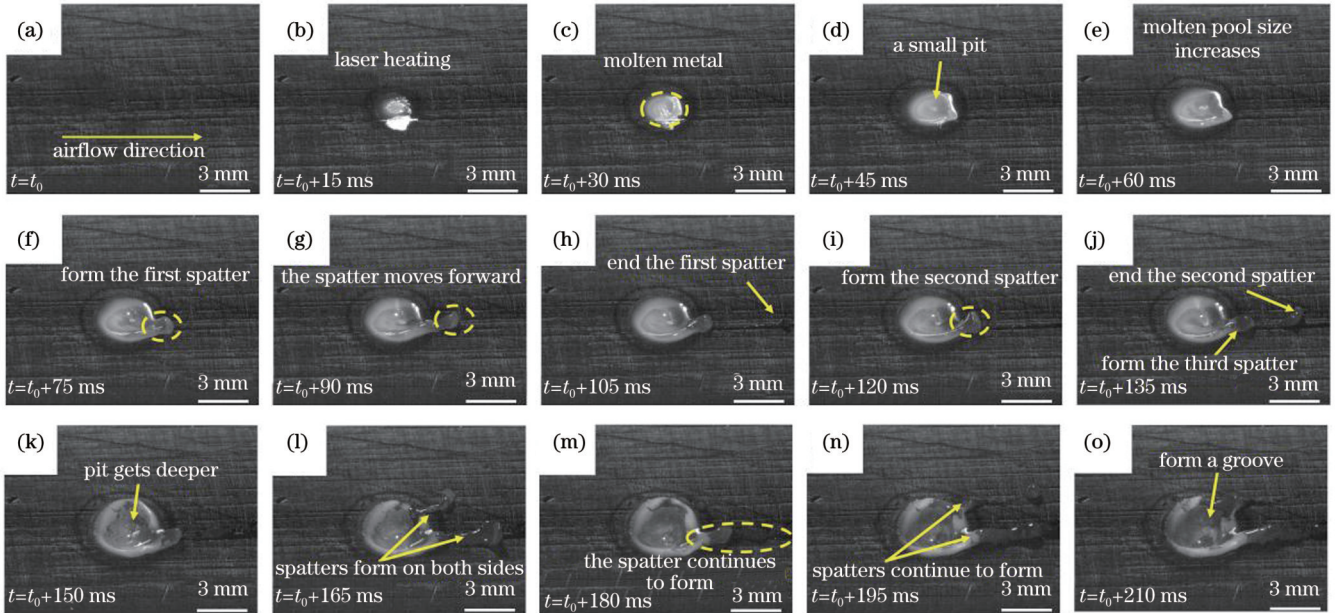


图 12 电磁复合场驱动下的激光减材过程

Fig. 12 Laser material reduction process driven by electromagnetic composite field

为进一步揭示定向洛伦兹力驱动熔池流动进行激光减材的加工机制,对 V 型槽的激光减材加工机制进行分析。图 13 为电磁复合场驱动下的激光减材加工机制示意图。图 13(a)为熔池受力分析图,熔池中的金属熔体受到重力 F_G 、表面张力 F_S 、电磁复合场产生

的克服表面张力和重力驱动熔池金属熔体向上溢出的洛伦兹力 F_L 的作用。图 13(b)为 V 型槽形成过程示意图,大致可以分为 4 个过程,分别为:1) 基体在激光的辐射下受热熔化形成熔池;2) 熔池在定向洛伦兹力 F_L 作用下克服重力 F_G 、表面张力 F_S ,进一步驱动金属熔

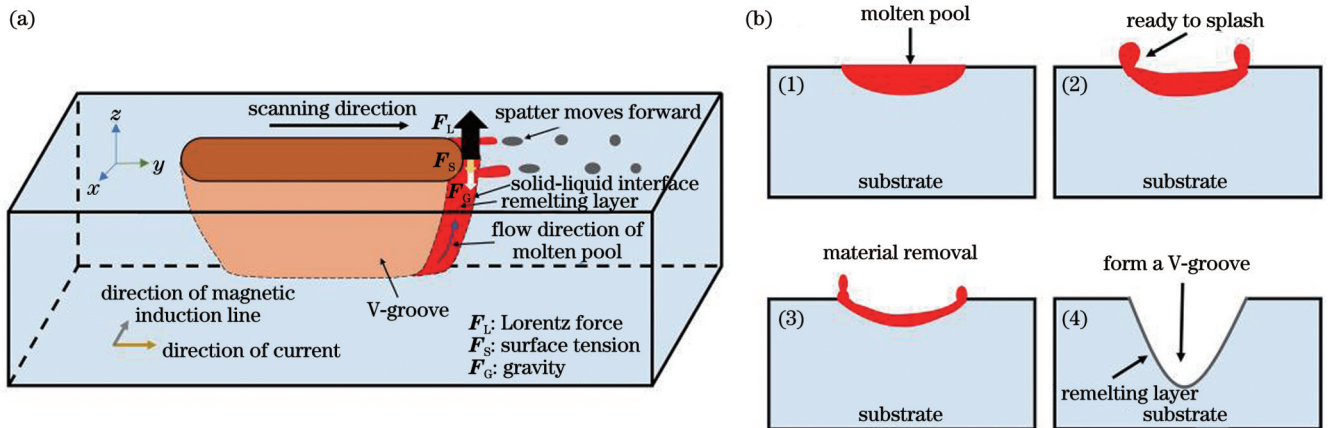


图 13 电磁复合场驱动激光减材机制示意图。(a)熔池受力分析;(b)V 型槽的形成过程

Fig. 13 Schematics of laser material reduction mechanism driven by electromagnetic composite field. (a) Schematic for force analysis of molten pool; (b) V-groove forming process

体向上流动,金属液滴具备飞溅形成的条件;3)随着熔池体积增加,飞溅液滴陆续形成,沟槽轮廓形成;4)随着激光热源的移动,沟槽的深度达到阈值后不再发生明显变化,V型槽轮廓形成。

F_s 为液体边界所受竖直方向上的表面张力之和;洛伦兹力的产生是由于外部磁场与内部感应电流、外加电流的共同作用,其具体表达式为

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad (3)$$

式中: \mathbf{j} 为电流密度矢量; σ 为基体电导率; \mathbf{U} 为流体速度矢量; \mathbf{E} 为外加电场强度; \mathbf{B} 为外加磁感应强度; \mathbf{F}_L 为熔池流体所受洛伦兹力。由式(3)可以看出,电流密度主要由两部分构成,分别是外加电场产生的电流以及流体与稳态磁场作用产生的感应电流。感应电流相较于外加电场产生的电流较小,故其产生的洛伦兹力可以忽略。因此,式(2)所示的洛伦兹力的表达式可以简化为

$$\mathbf{F}_L = \sigma \mathbf{E} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

由上述分析可知,洛伦兹力 \mathbf{F}_L 的方向与表面张力 \mathbf{F}_s 、重力 \mathbf{F}_G 的方向相反,又因为洛伦兹力在竖直方向上的值大于表面张力 \mathbf{F}_s 与重力 \mathbf{F}_G 之和,因此熔池中的金属熔体受到方向向上的合力作用。随着磁感应强度增加,洛伦兹力的值变大,熔池流体排溢速度加快,残留在V型槽侧壁上的重熔层体积减小,从而获得较小的重熔层厚度;而较小厚度的重熔层又进一步促进了基体对激光能量的吸收,导致V型槽的深度随着磁感应强度的增加而增大。通过控制激光工艺参数可以使基体对激光能量的吸收不同,而通过电磁复合场产生的洛伦兹力的驱动可以得到不同尺寸的V型槽。因此,施加电磁复合场不仅可以增加材料的去除效率,还可以得到较为标准、尺寸不同的V型槽,为V型槽的加工提供了一种不同于刨削、铣削等传统机加工的新方法。

4 结 论

在电磁复合场辅助激光减材加工V型槽过程中,利用洛伦兹力驱动熔池加速排溢的方法,获得了角度为 $34.82^\circ \sim 65.20^\circ$ 、深度为 $1719 \sim 5667 \mu\text{m}$ 的V型槽。V型槽的角度会随着扫描速度的降低和激光功率的增大而变小,深度会随着扫描速度的降低和激光功率的增大而变大。材料的去除效率主要与激光功率相关,且随着激光功率的增加而增大,当激光功率为 2000 W 时达到最大,约为 $67.58 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

研究表明,随着磁感应强度增大,熔池内部的洛伦兹力增加,V型槽底部的重熔层厚度逐渐降低, 1200 mT 磁感应强度下的重熔层厚度为 $42 \mu\text{m}$,较 400 mT 磁感应强度下的降低了约 84.33% 。随着磁感应强度增

加,V型槽的深度逐渐增大,在 1200 mT 磁感应强度下V型槽的深度为 3423 mm ,较 400 mT 磁感应强度下的增加约 31.86% 。

高速相机观察结果表明,电磁复合场条件下进行激光减材时,在 $t_0 + 45 \text{ ms}$ 后,由于洛伦兹力驱动熔池向上流动,熔池中心形成了明显的凹坑,飞溅陆续形成并在尾吹作用下向前运动,熔体材料与基体脱离,并在 $t_0 + 150 \text{ ms}$ 时呈现沟槽形貌。在 $t_0 + 180 \text{ ms}$ 后,基体对激光的吸收率由于沟槽的形成而增大,开始有连续流状飞溅形成,熔体溢出效率进一步增加,并在 $t_0 + 210 \text{ ms}$ 时形成明显的沟槽。

参 考 文 献

- [1] García-Nieto P J, García-Gonzalo E, Vilán J A V, et al. A new predictive model based on the PSO-optimized support vector machine approach for predicting the milling tool wear from milling runs experimental data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1): 769-780.
- [2] 胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008. Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.
- [3] 李涛, 夏凯波, 任乃飞, 等. 基于改进型控制变量法的脉冲激光打孔研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 191403. Li T, Xia K B, Ren N F, et al. Study on pulse laser drilling based on improved parameter control method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 191403.
- [4] 李明雨, 叶继飞, 于程浩, 等. 纳秒脉宽激光烧蚀典型金属推进性能实验研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(S2): 24-30. Li M Y, Ye J F, Yu C H, et al. Experimental study on propulsive performance of typical metal ablated by nanosecond pulse width laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(S2): 24-30.
- [5] 柳召, 陈建刚, 舒林森, 等. 基于望小特性不锈钢304板材激光切割工艺优化[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 7-13. Liu Z, Chen J G, Shu L S, et al. Optimization of laser cutting process for 304 stainless steel plate based on small property[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 38(1): 7-13.
- [6] Lickschat P, Metzner D, Weißmantel S. Fundamental investigations of ultrashort pulsed laser ablation on stainless steel and cemented tungsten carbide[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(3/4): 1167-1175.
- [7] Lickschat P, Metzner D, Weißmantel S. Burst mode ablation of stainless steel with tunable ultrashort laser pulses[J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(2): 022005.
- [8] Bian Q F, Tang X L, Dai R K, et al. Evolution phenomena and surface shrink of the melt pool in an additive manufacturing process under magnetic field[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 123: 760-775.
- [9] Chen R, Jiang P, Shao X Y, et al. Effect of magnetic field on crystallographic orientation for stainless steel 316L laser-MIG hybrid welds and its strengthening mechanism on fatigue resistance [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112: 308-317.
- [10] Fritzsche A, Hilgenberg K, Teichmann F, et al. Improved degassing in laser beam welding of aluminum die casting by an electromagnetic field[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 253: 51-56.
- [11] 王梁, 夏洪超, 胡勇, 等. 电磁复合场对V型窄槽激光再制造区孔隙缺陷的抑制作用[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602003.

- Wang L, Xia H C, Hu Y, et al. Porosity defects suppression in narrow V-groove laser remanufacturing zone through electromagnetic composite field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602003.
- [12] Qi K, Yang Y, Sun R, et al. Effect of magnetic field on crack control of Co-based alloy laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107129.
- [13] Wang L, Yao J H, Hu Y, et al. Influence of electric-magnetic compound field on the WC particles distribution in laser melt injection[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 315: 32-43.
- [14] Ho C C, Tseng G R, Chang Y J, et al. Magnetic assisted laser percussion drilling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 479/480: 299-303.
- [15] Lu Y, Sun G F, Wen D P, et al. Effects of applying electric and magnetic fields on laser drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9): 2293-2300.
- [16] Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Presenting electromagnetic field-assisted laser groove forming[J]. Lasers in Engineering, 2021, 50 (1/2/3): 143-158.
- [17] 国家质量技术监督局. 一般公差: 未注公差的线性 and 角度尺寸的公差: GB/T 1804—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000. The Quality and Technology Supervision Bureau of the People's Republic of China. General tolerances: tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications: GB/T 1804—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. 产品几何技术规范(GPS): 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值: GB/T 1031—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Geometrical Product Specifications (GPS): surface texture profile method surface roughness parameters and their values: GB/T 1031—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

V-Groove Morphology of Laser Directly Subtractive Forming by Electromagnetic Composite Field

Wang Liang^{1,2,3}, Xie Songwei^{1,2,3}, Fan Siyuan^{1,2,3}, Wang Yaxing^{1,2,3}, Ge Honghao^{1,2,3},
Hu Yong^{1,2,3}, Dong Gang^{1,2,3}, Yao Jianhua^{1,2,3*}

¹*Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

²*College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;*

³*Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment Co-Sponsored by Ministry and Province, Hangzhou 310023, Zhejiang, China*

Abstract

Objective Although milling and planing are used in traditional machining of V-grooves, tool wear and passivation affect the machining efficiency and quality. Laser subtractive forming technology exhibits the characteristics of no tool wear, high processing efficiency, and flexible forming, and uses a high-power laser beam as a heat source to realize non-contact processing. Nevertheless, there are some limitations in traditional laser subtractive forming technology. For example, laser drilling and laser ablation technologies generally use a pulsed laser, whose aperture size is of a micron level. As a result, the processing efficiency is considerably reduced when the processing amount is large. Furthermore, it is difficult for traditional laser subtractive forming technology to process millimeter-deep V-grooves at one time. In this paper, a new method of laser subtractive forming of V-grooves is proposed. The Lorentz force is generated inside the molten pool by applying an electromagnetic composite field to drive the melt discharge and achieve the purpose of V-groove machining. Based on a certain machining accuracy, this method can process V-grooves with different angles and depths. Moreover, this method can avoid the problem of tool wear in traditional machining, and its material removal efficiency is much higher compared to traditional laser material removal technology. Therefore, this technology is expected to become a new high-efficiency and high-quality material subtractive forming method.

Methods 316L stainless steel is employed as the substrate in the present study. First, a 2 kW semiconductor laser is used to irradiate the surface of the substrate, and the Lorentz force formed by the steady electric and magnetic fields drives the melt to overflow upwards. Simultaneously, a gas nozzle is applied at the tail of the molten pool to separate the metal melt from the substrate. The spatters are collected by a device to ensure that the V-groove forming is safe for operation environment. Second, the three-dimensional profile of the V-groove is captured by VHX-5000 three-dimensional microscope and the groove's wall surface is analyzed by VK-X 1000 shape-measuring instrument to calculate the roughness of processed area. Furthermore, the influence of the magnetic induction intensity on the thickness of the remelting layer in the processed area is analyzed. The influence of laser parameters and electromagnetic field parameters on the morphology of the V-groove is evaluated. Finally, the flow behavior of the molten pool is observed using a high-speed camera, and the mechanism of the Lorentz force in the machining of the V-groove is discussed.

Results and Discussions A high-quality and efficient V-groove processing method is established through comparative experiments (Fig. 2), which verifies the feasibility of the new laser subtractive forming technology. Owing to the increase in the Lorentz force, the melt is accelerated to overflow upward, resulting in an increase in the depth of the V-groove and decrease in the remelted layer thickness (Fig. 5, Fig. 6). Owing to the change in the heat input, a V-groove with an angle of 34.82–65.20° and depth of 1719–5667 μm is prepared (Fig. 8). It is found that the material removal efficiency increases with an increase in the laser power, and the

material removal efficiency is $67.58 \text{ mm}^3/\text{s}$ at a laser power of 2000 W (Fig. 9). The target V-groove is processed, and according to the national standard, the angle tolerance level is precision f and the depth linear tolerance level is medium m (Fig. 10). The videos captured by the high-speed camera show that the applied Lorentz force causes the melt to overflow (Fig. 12), and the material removal efficiency is significantly increased.

Conclusions In V-groove forming with electromagnetic composite field, the Lorentz force drives the melt to flow upward under different laser heat inputs, a V-groove with an angle of 34.82° – 65.20° and a depth of 1719–5667 μm is obtained on the basis of ensuring a certain machining accuracy. The increase in the Lorentz force further promotes the overflow of the molten pool, and the metal melt adhering to the side wall is reduced; the thickness of the remelting layer at the bottom of the V-groove is 42 μm . Based on the video captured by the high-speed camera, the material removal efficiency is found to increase significantly when the electromagnetic composite field is applied, and the center forms obvious pits and grooves. Moreover, the material removal efficiency is mainly related to the laser power and reaches $67.58 \text{ mm}^3/\text{s}$ at laser power of 2000 W. A molten pool is formed by irradiating the substrate with a laser heat source. When an electromagnetic compound field is applied, the Lorentz force causes the melt to overcome the surface tension and gravity, flow upward, and eventually escape from the substrate with multiple spatters, completing the processing of the V-groove in the area to be processed.

Key words laser technique; laser subtractive forming; electromagnetic composite field; V-groove morphology; directional Lorentz forces