

等离子体激光复合直接成形的弧柱形态 与成形特性*

张海鸥^① 钱应平^{①③} 王桂兰^① 郑启光^②

(① 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074; ② 华中科技大学激光技术与工程研究院, 武汉 430074; ③ 湖北工业大学机械工程学院, 武汉 430068)

摘要 提出了等离子激光复合直接熔积制造金属零件技术, 研究了高温合金直接成形过程中激光与等离子弧柱和成形特性的关系. 利用高速摄像机 CCD 拍摄了复合激光前后的等离子弧形态图像, 通过图像处理提取弧柱轮廓, 从而实验研究分析了激光的平均功率、脉冲宽度、脉冲频率、复合角度等对等离子弧形态与高温合金成形特性的影响规律, 得到了激光对等离子弧形态有重要影响且可提高直接成形精度的结果.

关键词 等离子激光复合 直接成形 等离子弧 成形特性 高温合金

航空航天技术的发展, 对高温材料零部件的高温性能要求越来越高. 为了满足不断提高的性能要求, 一方面要开发温度更高的先进材料, 如采用超高温合金或熔点更高的高温材料, 另一方面要开发先进的高温材料成形工艺. 传统的铸造高温合金成形工艺目前已发展成为定向凝固和单晶成形, 并向弥散强化和纤维强化方向发展. 然而铸造工艺复杂, 气孔、偏析等固有缺陷难以避免, 致使成品率低, 制造周期长, 成本高, 已难以满足新型结构和高性能材料高温零部件快速、低成本、高质量开发的要求, 因此急需开发先进的高温材料成形加工技术. 20 世纪 80 年代后期诞生的快速原型 RP 技术给新型高温材料零件的快速开发提供了新的思路. 目前, 快速金属零件(rapid metal manufacturing)制造已成为 RP 技术研究的前沿^[1~5], 出现了多种直接快速制造金属零件的方法, 其中可获得密度高的零件的主要有激光近终成形技术(laser engineering net-shaping, LENS)、电子束沉积技术、等离子熔积法(PDM)等^[6,7]. LENS 技术是采用大功率激光逐层将送到基板上的金属粉末熔化, 并快速凝固最终形成工件. 其成形件的致密度大大高于

收稿日期: 2004-12-01; 接受日期: 2005-11-23

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50474053, 50475134)

SLS方法,且力学性能达到一般铸件的水平.但因热应力过大,成形件易开裂.此外存在表面精度不高,难以达到满密度,设备投资大等问题.电子束沉积法采用功率可达 4 kW的电子束熔化粉末材料,根据计算机模型施加电磁场,控制电子束的运动,逐层扫描直至整个零件成形完成,孔隙率低于 0.5%.然而其工艺条件要求严格,需在真空中进行,致使成形尺寸受限制,设备造价昂贵.等离子熔积直接成形是采用焊接方法中高度压缩、集束性好的等离子束熔化同步供给的金属粉末,在基板上逐层堆积形成金属原型或零件的技术,具有使用材料范围广,成形效率高,可获得满密度,设备成本远低于LENS和电子束方法等特点^[8,9],但该技术采用微弧熔积精度要求高的薄壁零件时尚存在成形能量不足,弧柱稳定性和集束性不高等问题.为此,本文在单纯等离子熔积直接成形研究工作基础上提出了等离子激光复合直接制造金属零件技术.利用上述等离子熔积技术的特点,并且采用集束性更好的激光为辅助能源,以实现高温材料的直接高质量成形.通过实验研究在激光与等离子复合条件下,激光的平均功率、脉冲宽度、重复频率和复合角度对等离子弧形态及其成形特性的影响规律,并在实际熔积成形中加以验证.

1 等离子激光复合直接成形技术原理

等离子激光复合直接成形技术原理如图 1 所示.通过概念设计,得到所需形状、大小、功能的概念模型,然后利用造型软件设计出 CAD 模型.根据零件的形状和尺寸精度要求,对 CAD 模型进行切片处理,转换为 STL 格式的文件.根据每层的形状特点进行路径规划,生成 CNC 控制代码以控制数控机床的运动.在等离子弧的一侧通过调整传输与聚焦光路使激光聚焦于等离子弧所形成的熔池里.送粉机构的运动、等离子气流量、保护气流量、送粉气流量、等离子弧的电流、电压等参数在熔积成形控制系统的控制下按照预先的规划进行熔积成形.高温合金粉末被送到等离子激光复合的熔池里熔化并急凝固形成致密的金属层,接着进行下一层熔积,如此反复,直至整个三维零件成形结束.

2 实验条件与方法

2.1 试验材料

实验材料为镍—铬—钴基高温合金粉末,在 800℃以下具有较高的屈服强度和蠕变强度,应变时效裂纹倾向性小,热疲劳性能好等特点.其主要成分如表 1 所示.

表 1 高温合金粉末的成分

元素	C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	Fe	Si	Mn	W	O	N	Ni
含量/(质量分数)	0.047	20.04	19.87	6.09	0.51	2.21	0.052	0.07	< 0.005	0.038	0.002	0.0027	剩余

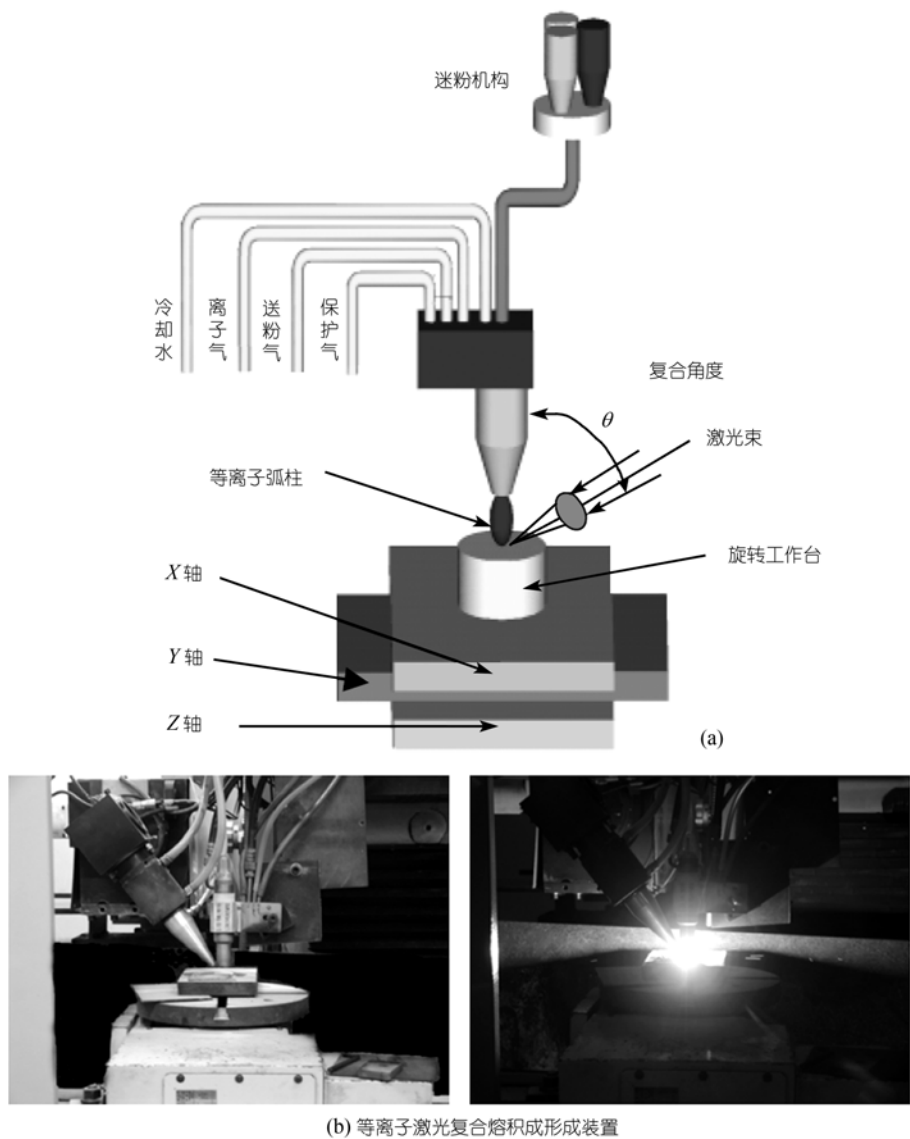


图 1 等离子激光复合直接成形技术原理

2.2 试验条件

实验过程中等离子熔积成形工艺参数保持不变. 离子气、保护气、送粉气为氩气, 压力比为 1:1:1, 转弧电流: 80~200 A, 进给速度: 200 mm/min, 送粉量: 25 g/min. 采用脉冲式 YAG 固体激光器, 激光聚焦后的光斑直径约为 1.5 mm, 激光工艺参数设计值如表 2.

表 2 激光工艺参数变化值

激光参数	试样序号																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
平均功率/W	无	4	39	91	160	254	无	初始值 254				无	初始值 254						
脉冲宽度/ms	激				1.0			激	1	2	4	6	8	激					1.0
重复频率/Hz	光				55			光	55				光	1	10	30	50	70	99

2.3 试验方法及装置

为了研究激光的工艺参数对等离子弧形态的影响规律，将激光束与等离子束复合，复合角度为 θ ，使激光聚焦于等离子熔积成形时的熔池里，保持等离子熔积参数不变，改变激光的平均功率、脉冲宽度、重复频率和复合角度，采用高速摄像仪 CCD 拍摄复合激光前后的弧形态图像，通过对获取的等离子弧图像进行处理，得到清晰的图像轮廓。利用得到的图像轮廓信息，测量弧柱中间直径，分析激光工艺参数对等离子弧形态的影响规律。弧柱直径是从等离子喷枪口往下取相同距离处的断面直径。

实验采用等离子激光复合设备，具有五轴数控功能如图 1(b)，激光平均功率范围 4~280 W，激光的传输和聚焦在光路系统上可以实现自由调节。

3 试验结果、分析与讨论

3.1 激光对等离子弧柱形态特性的影响

3.1.1 激光平均功率的影响

图 2(a)为不同激光平均功率条件下的等离子弧形态图像，图 2(b)为采用 Gauss-Laplace 算子进行处理后提取的等离子弧轮廓。等离子弧柱直径与平均功率的关系如图 3 所示。从图中可以看出，随着激光平均功率的增大，等离子弧变

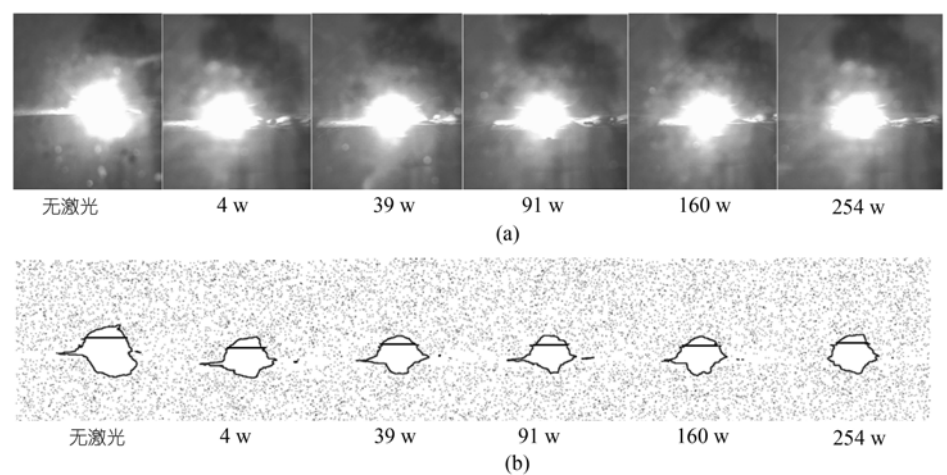


图 2 不同激光平均功率条件下的等离子弧形态
(a) 等离子弧原始图像, (b) 处理后的等离子弧轮廓。激光的重复频率: 55 Hz, 激光的脉冲宽度: 1.0 ms

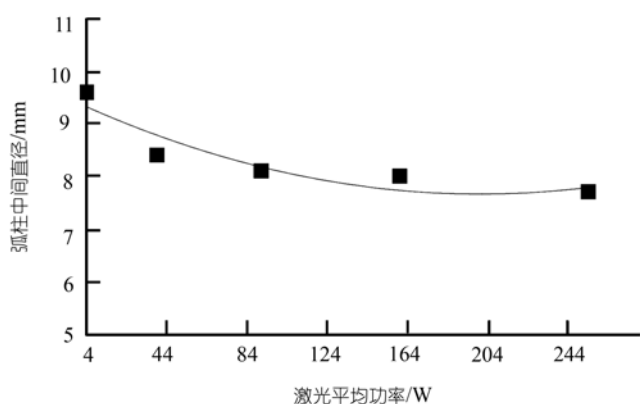


图 3 激光平均功率对等离子弧柱直径的影响

小,说明激光对等离子弧柱有压缩效应.这是由于激光平均功率的增加,使等离子弧吸收的能量增大,电离度提高,磁压缩效果增强,从而导致了等离子弧柱直径变小^[10,11].

3.1.2 激光脉冲宽度的影响

图 4 为不同脉冲宽度条件下等离子弧形态以及采用与前相同的算子进行处理后提取的等离子弧轮廓.等离子弧柱直径与脉冲宽度的关系如图 5 所示.由图可知,随着激光脉冲宽度的增大,弧柱直径减小,表明等离子弧的压缩程度随着脉冲宽度的增加而增加.这是因为脉冲宽度的增加,使得单个脉冲能量增加,而平均功率等于单个脉冲的能量乘以重复频率,因此平均功率增加,等离子弧吸收的能量增加,导致等离子弧进一步压缩,弧柱直径减小.

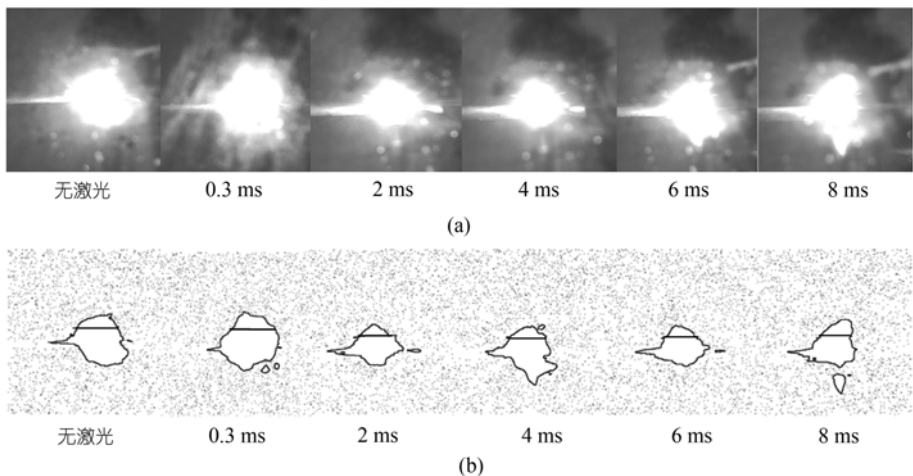


图 4 不同激光脉冲宽度条件下的等离子弧形态
(a) 等离子弧原始图像, (b) 处理后的等离子弧轮廓. 激光的重复频率: 55 Hz

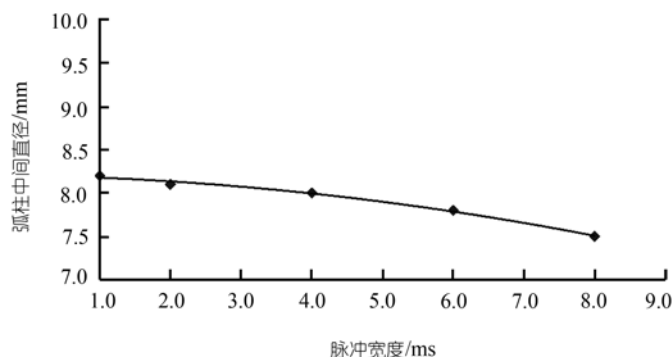


图 5 激光脉冲宽度对等离子弧柱直径的影响

3.1.3 激光重复频率的影响

图 6 为不同激光重复频率条件下的等离子弧形态以及采用与前相同的算子进行处理后提取的等离子弧轮廓。等离子弧柱直径与重复频率的关系如图 7 所示。由图可知,随着激光重复频率的增加,弧柱直径减小,但重复频率增加到某一阈值(约 50 Hz)后,弧柱直径开始呈增加趋势。这说明激光频率的增加将使等离子弧压缩,但压缩程度逐渐减少,当超过一定值后弧柱反而开始略有膨胀。这是因为激光的平均功率 $P=f \times E$ (f : 激光的重复频率, E : 单个脉冲的能量), 激光的脉冲频率是通过调节泵浦电流的频率实现的。在调节过程中, 泵浦电流的脉冲宽度和电流值保持不变, 因此单个脉冲的能量保持不变。随着频率的增加, 激光的平均功率增加, 等离子体通过逆韧致吸收机制吸收光子的能量增加, 导致等离子弧电离度提高(相应的电导率也提高), 磁收缩效应增强, 弧柱得到压缩, 弧柱直径减小; 另一方面激光与物质相互作用时诱导产生的等离子体有一个产生、膨胀和消失的

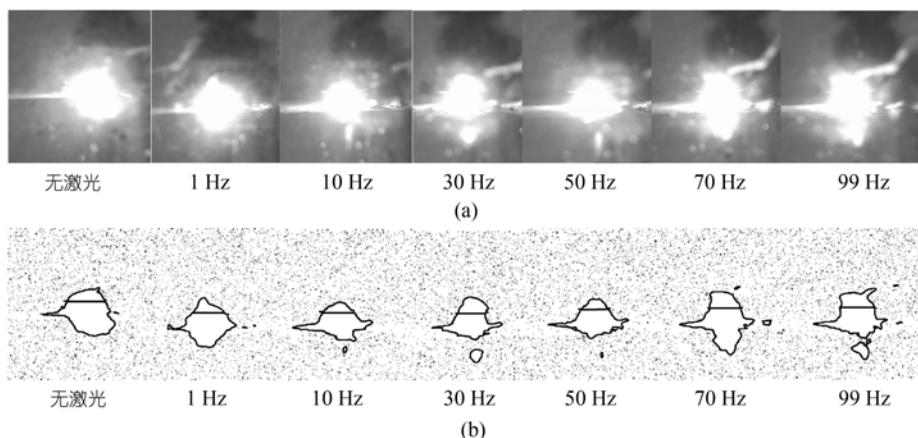


图 6 不同激光重复频率条件下的等离子弧形态
(a) 等离子弧原始图像, (b) 处理后的等离子弧轮廓。激光的脉冲宽度: 1.0 ms

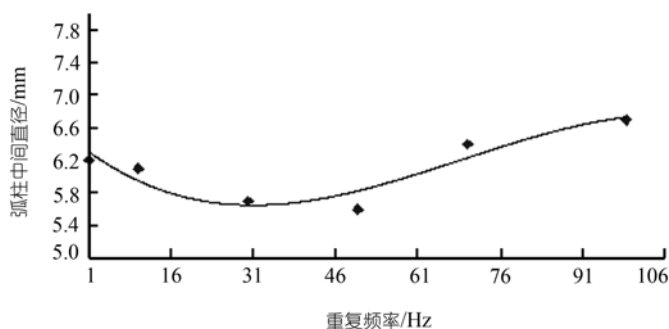


图 7 激光重复频率对等离子弧柱直径的影响

过程. 在电弧等离子体不变的情况下, 采用单脉冲和较低的重复频率脉冲激光作用时, 激光诱导所产生的等离子体主要与脉冲激光作用的持续时间(脉宽)和脉冲峰值功率有关, 而脉冲宽度和峰值功率是不变的. 这时脉冲激光重复频率(低重复率)对激光诱导产生的等离子体影响不明显, 电弧等离子体的磁压缩效应起主要作用, 弧柱直径减小. 随着激光重复频率进一步提高, 每一个脉冲激光之间的间隔相应减少, 激光脉冲间隔的减少会直接影响到热扩散过程, 随着激光沉积在激光作用区能量的轻微增多, 温度梯度增大, 热转移和热扩散加强, 降低了激光诱导产生的等离子体的温度和密度, 从而降低了等离子体向外膨胀的速度. 此时, 磁收缩效应进一步加强, 弧柱直径继续减小. 当脉冲激光重复频率提高到一定阈值后再进一步提高时, 电弧等离子体的电离度将达到一个极值, 电子密度和温度达到阈值, 不再随着重复频率的增加而增加. 同时, 每个激光脉冲之间的间隔更小, 激光平均功率加大, 使激光沉积在激光作用区的能量聚集更多. 此时, 脉冲激光作用区的温度会越高, 导致激光诱导产生的等离子体区的逆韧致吸收增加, 电离度增大, 从而使激光诱导等离子体区温度升高, 密度增大. 此时, 激光诱导等离子体向外膨胀的速度急剧增大(即韧致辐射损失增大), 在抵消电弧等离子体的磁收缩效应后使得等离子体的直径增大.

3.1.4 激光复合角度的影响

为了研究激光复合角度对等离子弧柱形态的影响, 复合角度 θ 分别取 35° , 57° , 70° 和 80° , 激光的重复频率为 55 Hz, 平均功率 254 W. 在不同角度下熔积试样并测量试样的宽度, 求得平均值如表 3. 为便于绘图, 用试样号代表不同的复合角度, 焊道宽度与复合角度的对应关系如图 8 所示. 从图中可以看出激光的复合效应使熔积层宽度变小, 试样宽度随激光束与等离子束夹角 θ 的增加而增加. 这主要是因为复合角度较小时, 激光束与等离子束接近平行, 激光在等离子体中的传播的时间较长, 等离子体对激光能量的吸收更充分, 因此等离子弧柱压缩程度加大, 导致弧柱直径变小, 在相同的工艺参数条件下熔积层的宽度变小. 而随

表 3 不同复合角度下的焊道宽度平均值

试样号	1	2	3	4
角度	35°	57°	70°	80°
焊道平均宽度/mm	4.29	4.33	4.43	5.02

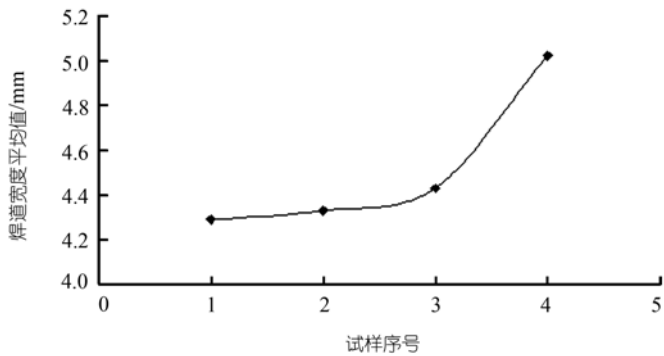


图 8 激光重复频率 55 Hz 时不同角度下的试样宽度曲线

着夹角的增大，上述激光复合效应逐渐减弱，等离子弧柱压缩程度减小，相同条件下的熔积层宽度自然会变大。

3.2 激光对成形特性的影响

为了研究激光对等离子弧的压缩效应对实际熔积成形特性的影响，采用激光等离子复合弧与单纯等离子弧分别熔积成形单层和多层试样，以探讨其对成形特性的影响规律。图 9 为单层成形试样，其中 1, 9, 11~15 号为单纯等离子弧熔积成形的试样，其余为复合成形的试样。图 10 为复合成形试样，图 10(a)为复合高能束成形试样，图 10(b)为单纯等离子弧成形试样。由图 9 和 10 可以看出，复合

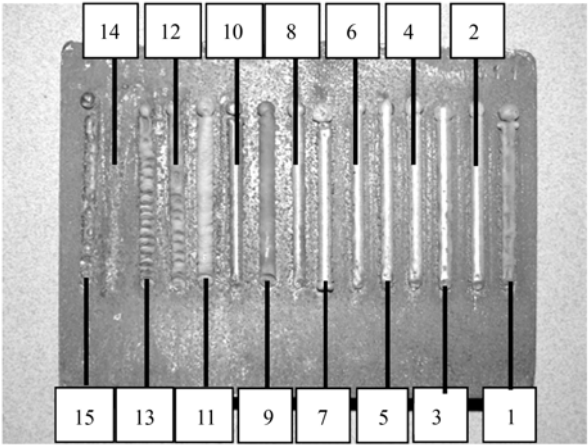


图 9 高能束复合成形试样与单纯等离子束成形试样的对比

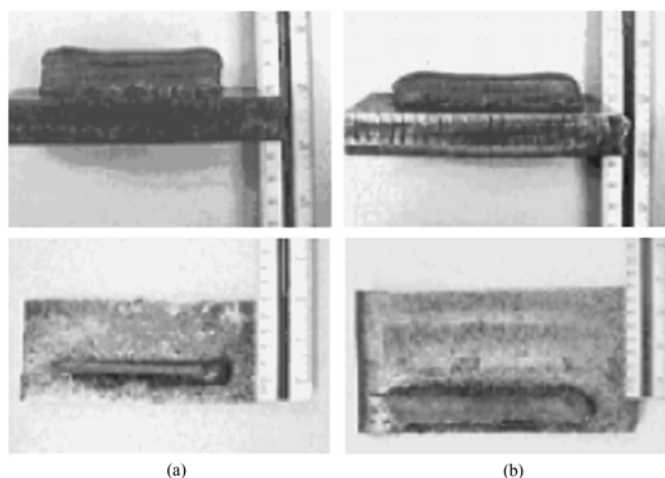


图 10 复合高能束成形与单纯等离子成形试样的高度及宽度对比
(a) 复合高能束成形试样, (b) 单纯等离子束成形试样. 均为 20 层成形

高能束成形试样的宽度比单纯等离子弧成形试样的小, 且多层成形时宽度减小部分转移致高度方向上, 累积导致高度增加. 此外, 复合成形试样表面平坦, 金属光泽明显. 这说明激光对等离子弧的压缩效应也使成形件宽度方向上得到压缩, 从而改善熔积成形精度, 同时也使表面精度得到改善.

4 结论

(i) 激光与等离子复合将产生压缩等离子弧的效应, 该压缩效应与激光的平均功率、脉冲宽度、脉冲频率以及与等离子弧的复合角度有关, 对等离子弧形态有重要影响.

(ii) 随着激光平均功率、脉冲宽度的增大以及复合角度的减小, 等离子弧柱的压缩程度随之增大; 激光重复频率的增加使压缩等离子弧效应减小, 当重复频率超过 50 Hz 时弧柱开始反向膨胀, 这种效应与等离子体的逆韧致吸收效应和电离程度有关.

(iii) 激光与等离子复合的单层和多层成形件宽度比单纯等离子弧成形的小, 高度增加.

参 考 文 献

- 1 徐 健, 颜永年, 卢 伟, 等. 快速成型技术的发展方向. 航空制造技术, 2002, (11): 25—27
- 2 Zhang H O, Wang G L, Luo Y H. Rapid hard tooling plasma spraying for injection molding and sheet metal forming. Thin Solid Films, 2001, 390: 7—11[DOI]
- 3 Allahverdi M, Danforth S, Jafari M. Processing of advanced electro ceramic components by fused deposition technique. J Euro Ceram Soc, 2001, 21: 1485—1490[DOI]
- 4 Junghoon Hur, Kunwoo, Lee Zhu-hu. Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition.

- Computer-Aided Design, 2002, 34: 741—754[DOI]
- 5 张海鸥. 快速模具制造技术的现状及其发展趋势. 模具技术, 2000, (6): 84—89
 - 6 Muller H, Sladojevic J. Rapid tooling approaches for small lot production of sheet-metal parts. Journal of Mat Processing Tech, 2001, 115: 97—103[DOI]
 - 7 王华明. 金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光快速成形技术研究进展. 航空学报, 2002, 23(5): 473—478
 - 8 白培康, 史育红, 程 军, 等. 三维成型焊接快速制造技术. 焊接技术, 1998, (6): 39—40
 - 9 Zhang H O, Xu J P, Wang G L. Fundamental study on plasma deposition manufacturing. Surf & Coat Tech, 2003, 171(1-3): 112—118[DOI]
 - 10 陈彦宾, 陈 杰, 李俐群, 等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征. 焊接学报, 2003, 24 (1): 55—56, 60
 - 11 陈彦宾, 李俐群, 陈凤东. 激光维持燃烧波对激光——TIG 复合热源的影响. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 695—697