

激光功率调制对 AZ31 镁合金焊缝熔深和气孔的影响

姜沛佐¹, 董昊¹, 高明月¹, 蔡艳^{1,2*}¹上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;²上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 研究了激光功率正弦调制对 AZ31 镁合金焊缝熔深和工艺气孔的影响。保持激光功率恒定在 1500 W, 将焊接速度从 3.0 m/min 逐步增加到 4.0 m/min, 观察了匙孔周期性开闭行为, 分析了不同反射次数对高反射材料匙孔能量分布的影响规律。在不同焊接速度下采用激光功率正弦调制, 调制幅度为 500 W, 调制频率从 50 Hz 逐步增加至 200 Hz, 统计了焊缝熔深和工艺气孔率的变化趋势。试验结果表明: 对于高反射材料, 激光功率调制效果与匙孔内光束反射次数有关, 反射次数较多的匙孔具有较大深宽比, 匙孔底部累积能量高, 深度变化滞后于激光功率变化, 激光功率调制有助于增加熔深。激光功率正弦调制不利于镁合金匙孔稳定, 50 Hz 低频调制显著增加工艺气孔, 调制频率为 150 Hz 时激光功率正弦调制对匙孔稳定性的影响较小。

关键词 激光技术; 镁合金; 高反射材料; 深熔焊; 功率调制; 匙孔

中图分类号 TG457.14 文献标志码

DOI: 10.3788/CJL221199

1 引言

镁合金具有密度小、比强度高、电导率高和电磁屏蔽效果良好等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车和电子等领域^[1]。激光焊接具有能量密度高、热输入小、易于实现自动化、柔性好等优点^[2], 在镁合金焊接领域具有巨大潜力。但是镁合金具有线膨胀系数大、易氧化、表面张力小等一系列材料特性, 而且对激光的反射率较高, 因此, 镁合金激光焊接头易出现成形不良和气孔等缺陷^[3-4]。其中气孔可以分为工件表面和内部的气体在金属凝固过程中无法及时逸出形成的冶金气孔以及匙孔坍塌形成的工艺气孔^[5]。方栩强^[6]采用光纤激光对 3 mm 厚 AZ31B 镁合金进行自熔焊, 发现焊缝不仅下塌严重, 而且存在大量气孔, 气孔率达到 4.3%。Chen 等^[7]指出匙孔对镁合金焊缝气孔有直接影响, 匙孔深度越大, 稳定性越低, 形成工艺气孔的概率越高。为了深化并稳定镁合金匙孔, 国内外很多研究团队提出了不同的方法。Hao 等^[8]在 2 mm 厚 AZ31 镁合金激光焊接中采用了光束摆动技术, 发现低频 (50 Hz) 和小摆动半径 (<0.5 mm) 有利于改善焊缝成形。张明军等^[9]使用可调环形激光进行焊接, 发现中心激光功率高于环形激光功率时, 施加环形激光有助于增加焊缝上部熔宽。崔沛等^[10]在 AZ31 镁合金激光焊接过程中采用两束辅助激光降低熔池冷却速度, 有助于降低焊缝气孔率。Harooni 等^[11]则在焊接激光前使用辅助激光去除镁合金表面的氢氧化物, 减少了焊缝的氢气孔

数量。近年来, 研究者发现镁合金对激光功率变化较为敏感, 激光功率变化的幅度、频率以及速率都会对镁合金匙孔和熔池产生显著影响^[12-13]。Zhang 等^[14]探索了激光功率调制对 AZ31 镁合金激光焊的影响, 发现当激光平均功率较小时, 正弦调制有助于增加熔深, 但随着激光平均功率的增加, 熔深增加量逐渐减小并最终消失。通过调整激光功率波形来改善匙孔形貌和熔池行为的方法在铜激光焊中受到较多关注^[15-16], 激光功率调制有助于改善高反射材料在激光焊接过程中的稳定性和接头质量^[17], 但是在镁合金激光焊中关于激光功率调制影响的研究鲜有报道, 相关影响机制尚不清楚。

本文针对 AZ31 镁合金激光焊, 研究了激光功率调制对焊缝熔深和气孔的影响。首先采用恒定激光功率和不同焊接速度进行了 4 mm 厚 AZ31 镁合金板材焊接, 分析了不同反射次数对小孔内能量分布和匙孔开闭行为的影响; 在焊接过程中采用不同频率的激光功率正弦调制, 在保持平均功率不变的情况下, 研究激光功率变化对不同深度匙孔的影响趋势, 测量了焊缝熔深和气孔率, 探究了激光功率调制在改善镁合金激光焊质量方面的可行性, 旨在为镁合金高效优质焊接提供新思路。

2 试验装置与方法

试验材料选用 4 mm 厚 AZ31 镁合金板材, 采用电火花线切割加工焊接试样, 试样尺寸为 100 mm × 50 mm。

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-10-12; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

通信作者: *ycal@sjtu.edu.cn

母材化学成分如表 1 所示。焊接前采用砂纸打磨去除 试样表面氧化膜,并用丙酮清洗。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of AZ31 magnesium alloy (mass fraction, %)

Chemical composition	Al	Zn	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Mg
Value	2.9000	0.8370	0.0670	0.0045	0.0050	0.4310	0.0013	Bal.

试验装置如图 1 示,焊接装置包括焊接激光、保护气体和工装夹具,过程观测装置包括高速相机、成像激光和图像处理软件。焊接激光波长为 1080 nm,最大输出功率为 3 kW,光束焦点直径为 0.3 mm,激光工作头沿焊接方向前倾 10° 。高速摄像机拍摄时的俯视角为 35° 。为防止板材变形,焊接前用夹具固定板材两端。焊接过程,采用纯度(体积分数)为 99.9% 的

氩气作为保护气体,气体流量为 20 L/min。成像激光波长为 640 nm,光斑直径为 20 mm,俯视照射熔池表面,成像激光经熔池表面反射后到达高速相机镜头。镜头配置一个中心波长为 640 nm、带宽为 20 nm 的窄带滤光片,用于屏蔽金属蒸气和熔池的光辐射,获得较为清晰的熔池表面图像。高速相机的拍摄帧频为 5000 frame/s。

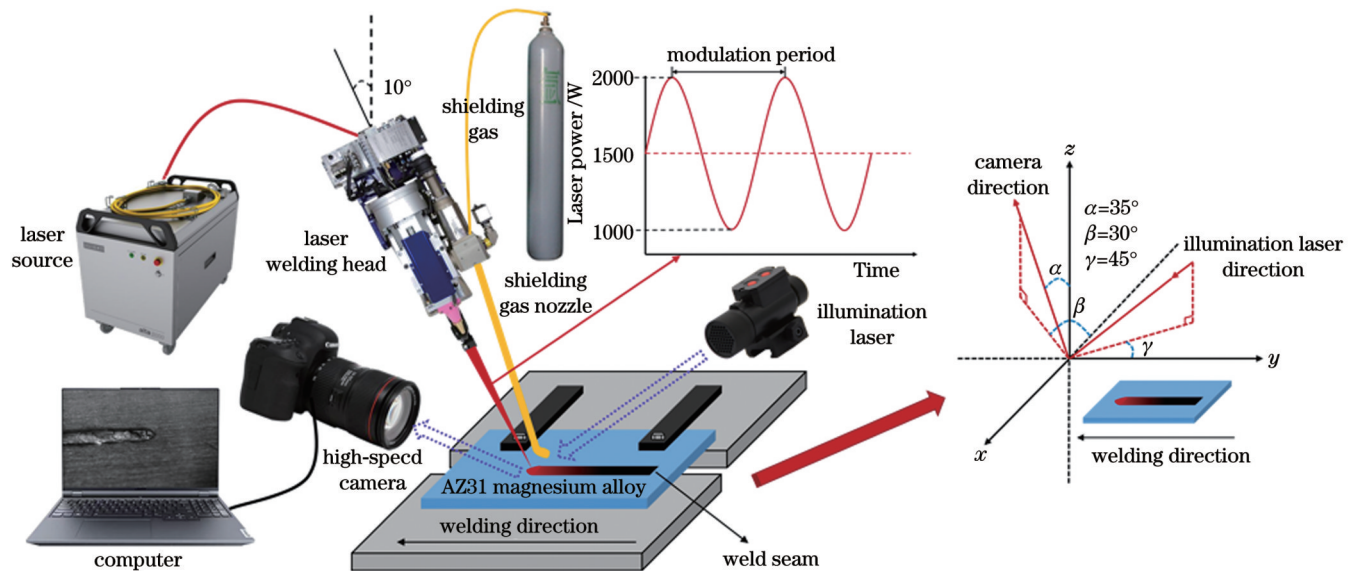


图 1 激光焊接及过程观测系统示意图

Fig. 1 Schematics of laser welding and process observation system

试验中,焊接激光的平均功率恒定为 1500 W。首先,调节焊接速度获得不同匙孔深度的焊缝,焊接速度分别为 3.0、3.2、3.4、3.6、3.8、4.0 m/min。随后,在每个焊接速度下分别进行激光功率正弦调制,对比分析激光功率调制对焊缝熔深和气孔的影响,激光功率正弦调制的峰值为 2000 W,谷值为 1000 W,调制频率分别为 50、100、150、200 Hz。焊接结束后,分别在焊缝的前部、中部和尾部切取焊缝横截面,并对中部试样沿焊缝中心线纵切取纵截面。对焊缝截面进行抛光和腐蚀后,测量熔宽和熔深,取 3 个横截面测量结果的平均值作为焊缝成形表征量。AZ31 镁合金激光自熔焊焊缝中存在两种气孔,其中氢气孔尺寸较小、形状规则、内壁光滑,如图 2(a)所示;匙孔失稳导致的工艺气孔则通常具有不规则形貌,且内壁有金属流动痕迹,如图 2(b)所示。根据孔洞形貌及内部特征,将氢气孔标记为蓝色颗粒,将工艺气孔标记为绿色颗粒,如图 2(d)所示,通常氢气孔在焊缝上部较多,而工艺气孔大多分布在焊缝下部。在焊缝纵截面

上统计氢气孔和工艺气孔的数量及其所占的像素数量,将气孔面积与焊缝面积的比值作为气孔率表征量。

3 分析与讨论

3.1 焊缝成形与气孔

采用不同焊接速度与激光功率调制频率完成焊接试验,焊缝横截面如图 3 所示,从中可以看出,所有焊缝均具有深熔焊特征。当焊接速度较低时,焊缝具有典型的指状特征,深宽比较大。随着焊接速度的增加,焊缝熔深逐步减小,但焊缝熔宽波动非常小。焊接速度不超过 3.6 m/min 时,激光功率调制对焊缝成形的影响并不显著,但是激光功率调制后,焊缝底部轮廓发生变化,出现较为明显的分层特征。当焊接速度超过 3.6 m/min 后,熔深在激光功率调制下逐步减小,调制频率越高,焊缝深宽比越低;此外,焊缝底部出现了分层轮廓,表明熔池凝固过程存在一定程度的波动。

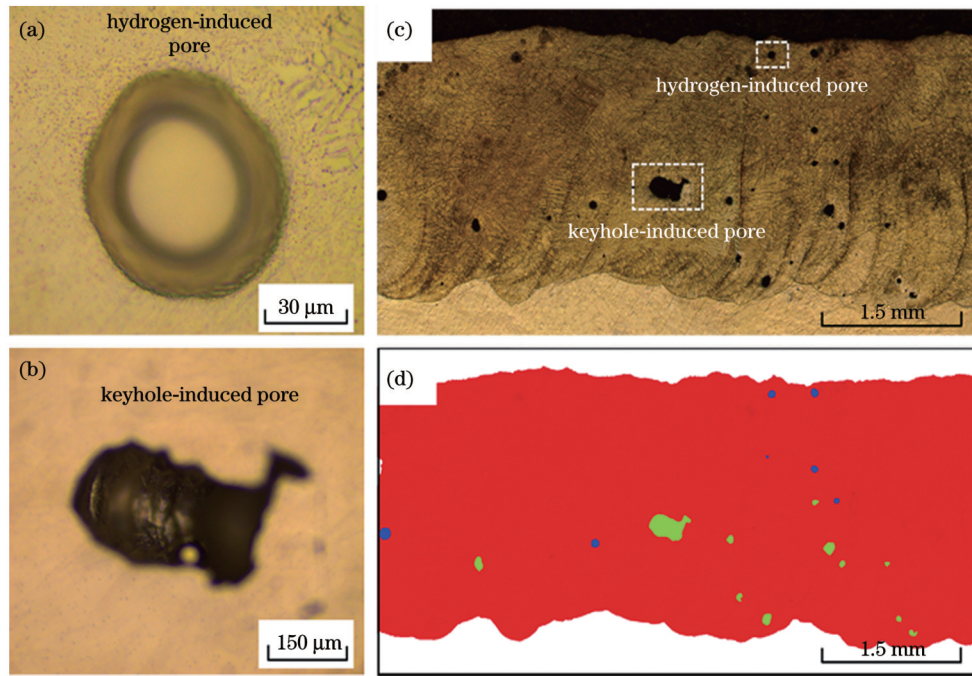


图2 镁合金激光焊气孔。(a)氢气孔;(b)工艺气孔;(c)焊缝纵截面;(d)气孔标记

Fig. 2 Pores inside magnesium alloy welded seam. (a) Hydrogen-induced pore; (b) keyhole-induced pore; (c) longitudinal section of weld; (d) marks of pores

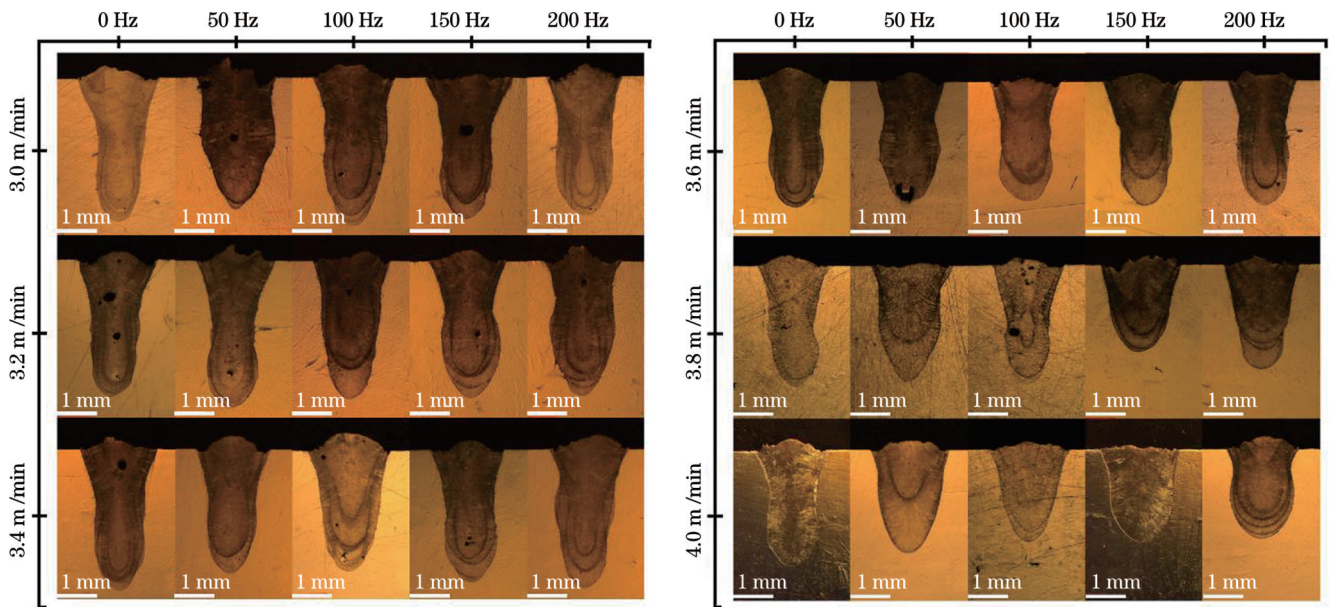


图3 不同焊接速度和激光功率调制频率下的焊缝横截面

Fig. 3 Cross sections of welds under different welding speeds and different modulation frequencies of laser power

在试样中部切取焊缝中心的纵截面,如图4所示,从中可以发现,镁合金激光焊缝易出现气孔缺陷。根据孔洞形貌和内壁特征来分析,AZ31镁合金激光焊缝中氢气孔主要位于焊缝上部,面积占比较低,工艺气孔主要位于焊缝中下部,面积占比较高,相对来说,熔深较浅时工艺气孔数量较少。在焊缝纵截面上,可以发现镁合金焊缝具有较为清晰的凝固轮廓,这与熔池流动密切相关,说明金属与激光的能量交互存在一定的周期性变化。在图4中,测量焊缝轮廓周期性峰值位

置的间距 d (mm),结合焊接速度 v (mm/s),利用公式 $f=v/d$ 可以计算出匙孔深度波动频率,在本文试验条件下,无激光功率调制时,匙孔深度的波动频率在 160 Hz 左右。采用激光功率调制后,凝固轮廓周期发生变化,以 50 Hz 调制频率、4.0 m/min 焊接速度为例,凝固痕迹间隔为 1.3~1.4 mm,对应的间隔时间约为 2 ms,即凝固痕迹的周期约为 50 Hz,与激光功率调制周期相同。观察图4可以发现,焊接速度对凝固痕迹间隔的影响并不显著,但凝固痕迹间隔与调质频率密

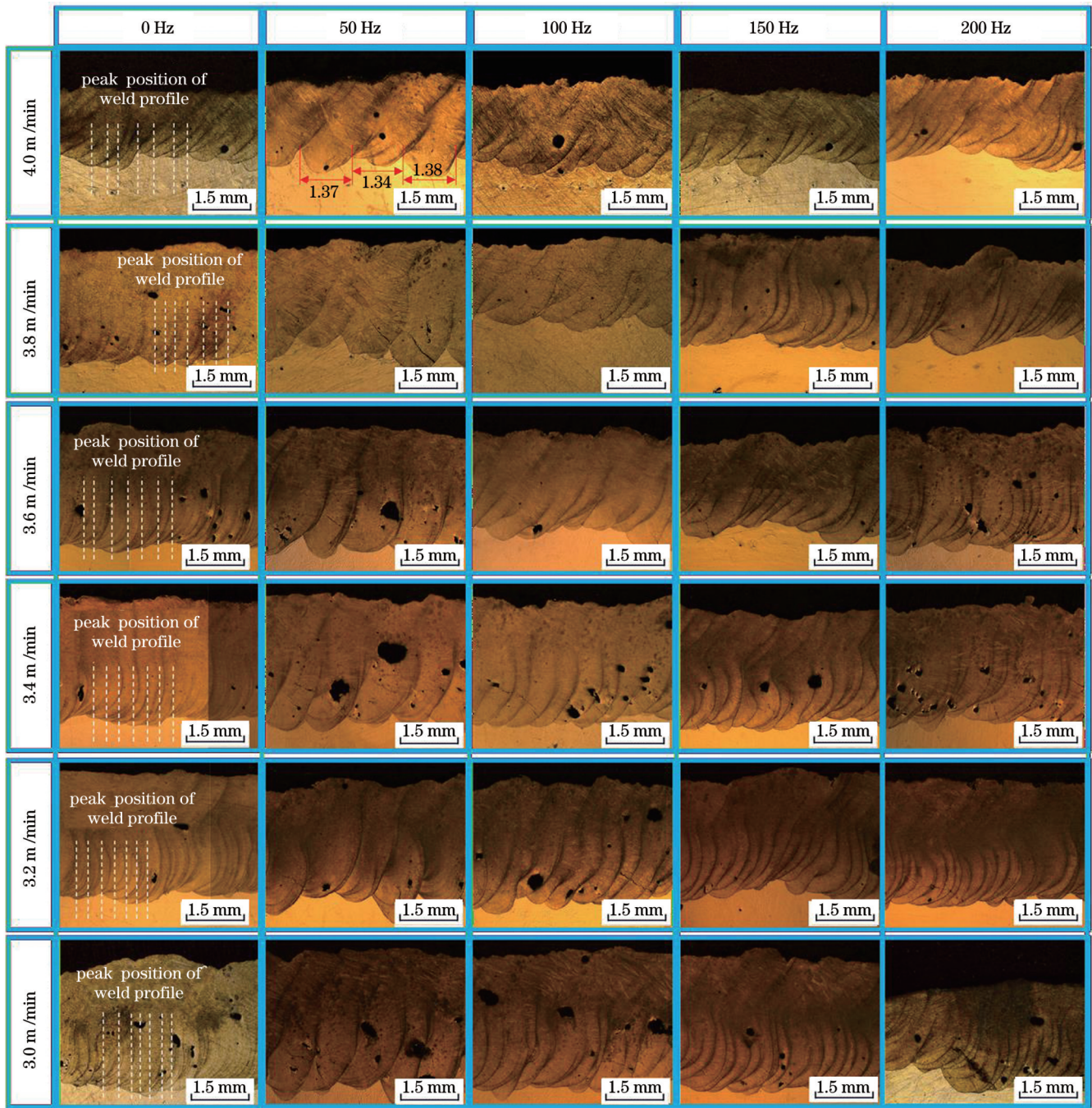


图 4 不同焊接速度和激光功率调制频率下的焊缝中心纵截面

Fig. 4 Longitudinal sections of weld centers under different welding speeds and different modulation frequencies of laser power

切关联,调质频率越高,凝固痕迹间隔越小。当调制频率为 150 Hz 时,凝固痕迹的间隔与恒功率焊缝最为接近。由此可见,激光功率调制在镁合金焊接过程中具有较强的熔池调节能力,因此影响焊缝成形和气孔数量。

3.2 焊缝成形与气孔

在激光深熔焊中,激光与母材的交互过程决定了匙孔具有周期性波动。当匙孔内金属蒸气喷发剧烈时,在熔池表面可以观察到匙孔开口。在本文拍摄模式下,成像激光照射熔池表面后反射,熔池表面的高低起伏造成熔池图片的亮暗差异,匙孔开口处没有液态

金属,成像激光几乎不发生反射,熔池图片上出现黑洞。沿焊接激光入射方向,在激光与熔池表面交汇处进行图像处理,提取黑洞特征,可以对匙孔开口状态进行判别。如图 5 所示,焊接速度较低时,匙孔开口出现的频率较高,基本位于焊接激光入射位置,当匙孔开口关闭时,该位置被液态金属填满,在成像激光照射下具有较高亮度。匙孔开口的周期性出现与能量交互密切相关,对熔池流动和凝固产生影响,镁合金导热快、表面张力小,匙孔波动受到的影响更加显著。焊接速度逐步增加到 4.0 m/min,匙孔开口出现的概率下降,说明在较高焊接速度下,匙孔出现间歇性消失,这是导致

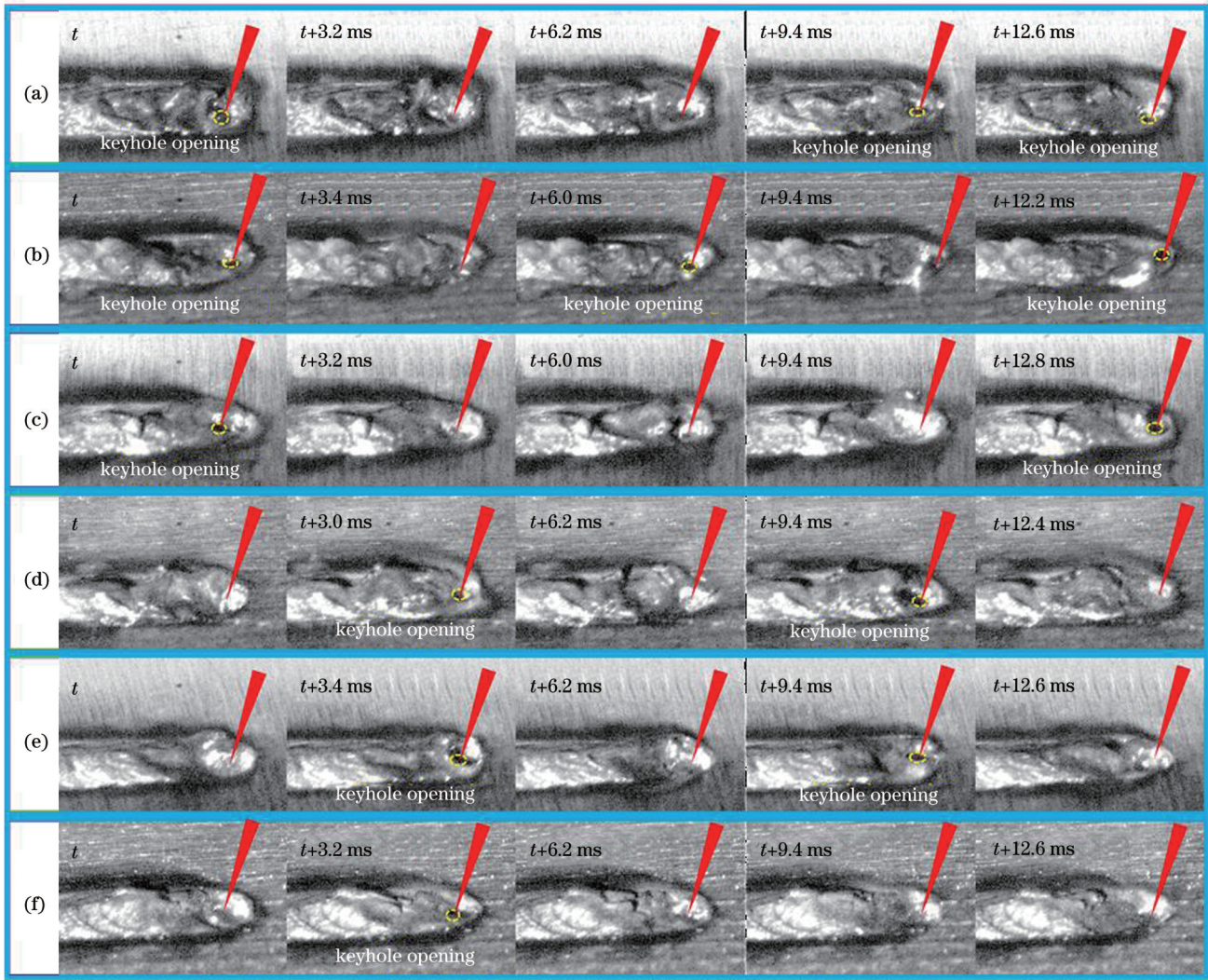


图 5 不同焊接速度下的匙孔开口变化。(a) 3.0 m/min; (b) 3.2 m/min; (c) 3.4 m/min; (d) 3.6 m/min; (e) 3.8 m/min; (f) 4.0 m/min
 Fig. 5 Keyhole opening changes at different welding speeds. (a) 3.0 m/min; (b) 3.2 m/min; (c) 3.4 m/min; (d) 3.6 m/min; (e) 3.8 m/min; (f) 4.0 m/min

焊缝熔深下降的原因之一。镁合金匙孔这种较高频率的开闭变化使匙孔抗干扰能力较弱,采用激光功率调制时应注意避免破坏匙孔的动态平衡,一旦匙孔闭合时间过长,则易形成工艺气孔。

AZ31 镁合金对波长为 $1\ \mu\text{m}$ 的激光吸收率仅有 14.8%^[18],不足碳钢吸收率的 1/2。光束照射在匙孔侧壁上,大部分能量被反射,镁合金对入射激光能量的吸收显著依赖于反射次数。如图 6 所示,激光在钢匙孔内经过 3 次反射,大约有 72% 的能量被母材吸收,而镁合金匙孔需要 8 次反射才能达到近似的吸收比例。镁合金对激光的高反射率使匙孔下部吸收的激光能量显著高于上部。激光束在镁合金匙孔内发生 8 次反射时,匙孔下部吸收的激光能量高于上部吸收能量的 4 倍。激光能量在匙孔下部聚集,这使镁合金匙孔的行为异于钢等光反射率较低的金属。Ning 等^[19]通过高速摄影对正弦调制激光焊接 AZ31 镁合金匙孔进行观察,发现匙孔深度变化相比于激光功率变化存在滞后,当激光功率下降时,匙孔深度在短时间内仍保持不变

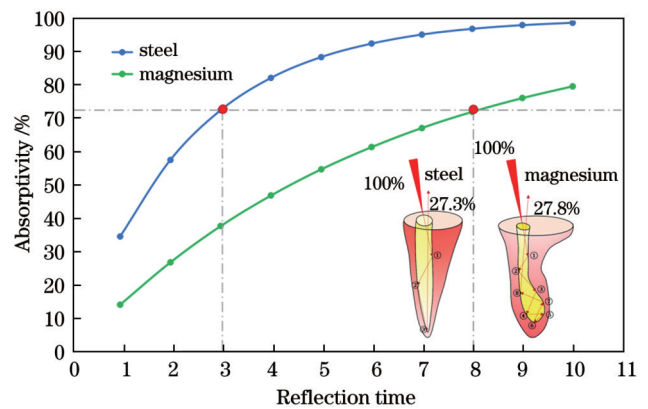


图 6 不同材料反射次数与吸收率的对应关系

Fig. 6 Relationship between reflection time and absorptivity

甚至略有增加。由此可见,不同深度的镁合金匙孔对激光能量变化的敏感程度存在差别,当匙孔深度较小时,激光能量下降易导致匙孔迅速回缩,但深度较大的匙孔由于多次反射在底部聚集了较多能量,匙孔深度变化的惯性较大。

3.3 激光功率调制对熔深的影响

激光功率正弦调制对焊缝熔深的影响如图 7 所示,以激光功率恒定的焊缝为参照,可以发现,激光功率调制对熔深的影响与焊接速度有一定关联。采用激光功率调制时,激光功率存在高于平均功率的正半周和低于平均功率的负半周。从能量角度考虑,匙孔在正半周可能进一步深化,在负半周则可能深度减小。需要注意的是,匙孔自身状态对变化速度存在重要影响。匙孔深度较大时,匙孔内部发生多次反射,匙孔底部的累积能量较高,这类匙孔深度易随着激光功率的增加而变大,但当激光功率下降时则出现一定程度的迟滞,匙孔深度并不会迅速减小。如果激光功率调制频率较高,激光功率下降时间较短,有可能在负半周并

不发生匙孔缩短。例如,当焊接速度为 3.0 m/min 时,激光功率调制有助于增加熔深,虽然增量不大,但不同调制频率下的熔深都有所增加。反之,匙孔深度较小时,匙孔较浅,激光在匙孔内的反射次数较少,匙孔底部金属蒸气温度较低。这样的匙孔在激光功率调制正半周深化缓慢,甚至深度无法增加;但在负半周则具有较强烈的回缩倾向,匙孔深度随着激光功率的下降而迅速减小,激光在匙孔内的反射次数进一步减小,甚至影响匙孔深度在后续正半周的恢复,最终导致焊缝熔深下降。在本文试验条件下,当焊接速度高于 3.4 m/min 后,激光功率调制对焊缝熔深的不利影响较显著,特别是当焊接速度达到 4.0 m/min 时,激光功率调制使焊缝熔深显著降低。

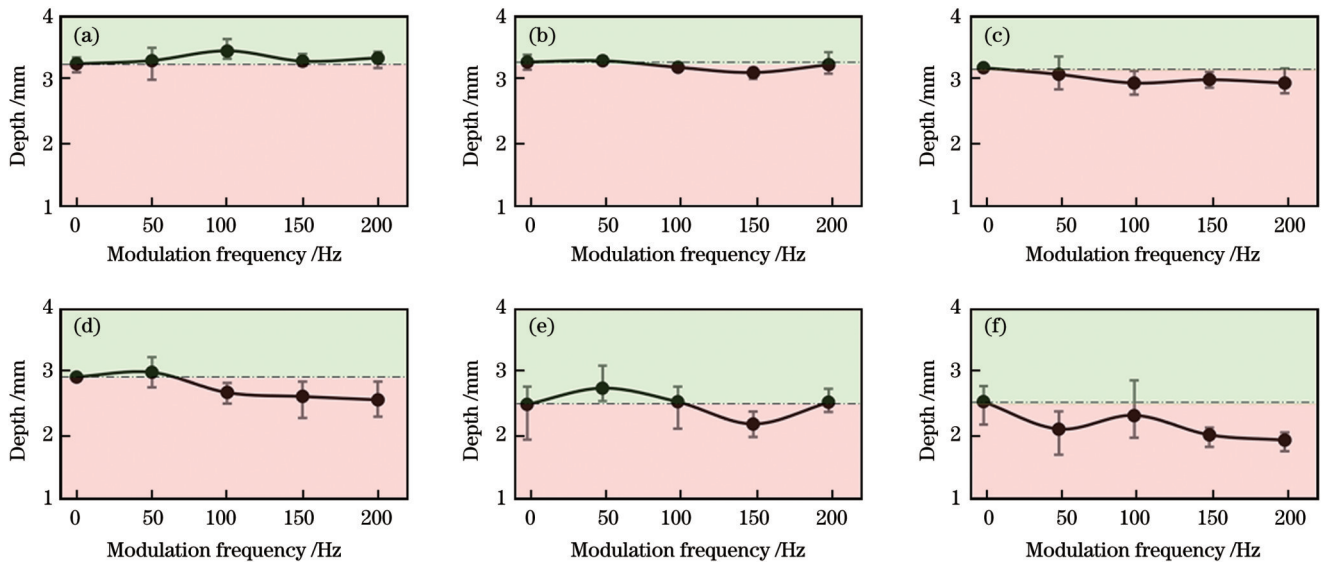


图 7 不同焊接速度下焊缝熔深随激光功率调制频率的变化。(a) 3.0 m/min; (b) 3.2 m/min; (c) 3.4 m/min; (d) 3.6 m/min; (e) 3.8 m/min; (f) 4.0 m/min

Fig. 7 Weld penetration changing with laser power modulation frequency under different welding speeds. (a) 3.0 m/min; (b) 3.2 m/min; (c) 3.4 m/min; (d) 3.6 m/min; (e) 3.8 m/min; (f) 4.0 m/min

如图 8 所示,激光功率调制对熔深的影响与匙孔初始状态和调制频率密切相关。当匙孔底部的聚集能量较低时,滞后效应较弱甚至不存在,激光能量进入负半周后,匙孔深度迅速减小,光束在匙孔内的反射次数随之减少,材料对激光能量的吸收率下降,材料吸收能量的下降幅度超过激光能量下降幅度。在随后的正半周中,需要激光能量持续增加才有可能恢复匙孔深度,如果正半周持续时间较短,金属蒸气反冲力不足以增加匙孔深度,就会造成焊缝熔深下降。由此可见,当匙孔底部滞后效应不显著时,匙孔深度在激光能量负半周快速减小,而在正半周恢复则需要一定能量累积,调制频率越高,正半周提供的累积能量越少,越不利于匙孔深度恢复,从而造成焊缝熔深随调制频率的升高而下降。

3.4 激光功率调制对孔洞的影响

激光功率调制对焊缝工艺气孔率的影响如图 9 所

示,计算了不同焊接速度和调制频率下的气孔率均值,绘制了趋势图。当焊接速度较高时,匙孔深度较小,虽然匙孔深度波动较大,但是工艺气孔的数量并不多,激光功率调制没有造成气孔率明显增加;当焊接速度降低到 3.4 m/min 时,匙孔深度有所增加,但匙孔内光束反射次数仍较少,匙孔底部的累积能量较低,这种临界状态的匙孔对激光功率变化最为敏感,工艺气孔显著增加,特别是采用激光功率调制后,工艺气孔率处于较高水平;随着焊接速度进一步降低,匙孔吸收的激光能量增加,多次反射使匙孔底部能量聚集,对激光功率变化的敏感度下降。从激光功率调制频率角度分析,发现工艺气孔率平均值在 150 Hz 时较低,甚至低于不使用激光功率调制的恒功率焊缝;当激光功率调制频率为 50 Hz 时,焊缝工艺气孔率平均值最高。

激光功率的低频变化严重干扰了匙孔固有波动周期,匙孔稳定性下降,当调制频率与匙孔固有波动频率

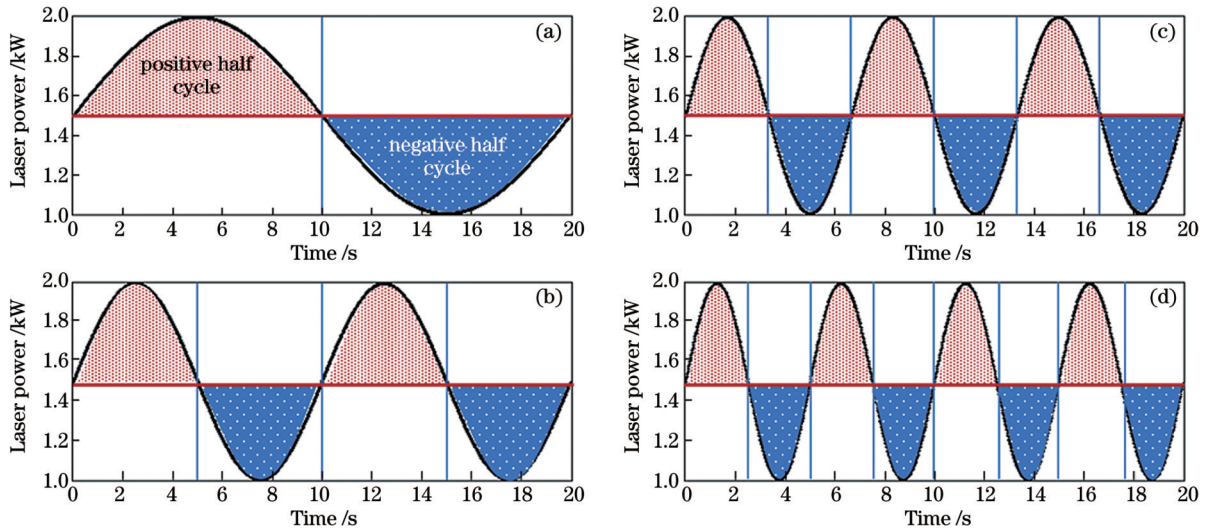


图 8 不同调制频率下的能量变化。(a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz; (d) 200 Hz

Fig. 8 Energy variations caused by different modulation frequencies. (a) 50 Hz; (b) 100 Hz; (c) 150 Hz; (d) 200 Hz

接近时,激光功率调制对匙孔开闭行为的干扰较小。观察熔池高速摄影图像,在焊接过程的前段、中段和后段分别截取 100 张连续图片,即统计窗口时间为 20 ms,逐图标记匙孔开口状态,统计匙孔闭合累计时长。结果显示,当焊接速度为 3.2 m/min、调制频率为 150 Hz 时,在统计窗口内匙孔闭合累计时间比例低于 10%,焊缝纵截面中工艺气孔数量很少;当焊接速度为 3.4 m/min、调制频率为 150 Hz 时,匙孔闭合累计时间比例上升到 20%,焊缝纵截面中工艺气孔数量略有增加;当调制频率降低至 50 Hz 时,匙孔闭合累计时间比例已超过 35%,匙孔发生剧烈回弹、坍塌,从而在焊缝中出现大量工艺气孔,工艺气孔率达到 2.86%,如图 9 所示。由此可见,匙孔闭合频次越高、累计闭合时间占比越大,焊缝中工艺气孔数量越多。激光功率调制对匙孔闭合存在影响,当激光功率调制频率与匙孔自身的变化频率接近时,匙孔闭合时间较短;当匙孔底部能量较低时,匙孔抵抗激光功率变化的能力较弱,功率调制增加了匙孔闭合的累计时长。在镁合金激光深熔焊中,金属蒸气反冲力与液态金属表面张力共同决定匙

孔深度和底部形貌,随着焊接线能量的降低,金属蒸气减少,匙孔底部轮廓收窄、稳定性下降;线能量进一步降低,金属蒸气反冲力不足以维持原有匙孔深度,匙孔发生回缩,液态金属表面张力随之减小,最终在相对较浅的位置维持新的平衡。在本文试验条件下,当焊接速度从 3.0 m/min 增加到 3.4 m/min 时,焊接线能量降低,但焊缝熔深下降比例不到 1%,表明匙孔深度并没有显著降低,金属蒸气量下降造成匙孔底部稳定性减弱,这也是激光功率调制导致工艺气孔显著增加的原因。由此可见,在镁合金激光焊中进行激光功率调试需综合考虑匙孔自身状态和激光功率变化频率。

4 结 论

作为对激光吸收率较低的高反射材料,镁合金对激光能量的吸收依赖光束在匙孔内的反射次数。当反射次数较多时,镁合金匙孔下部吸收的能量显著高于上部。匙孔底部聚集的能量越高,匙孔深度变化的滞后效应越显著。

在激光深熔焊模式下对 AZ31 镁合金进行激光功率正弦调制,具有滞后效应的深匙孔会进一步深化,但深度增加幅度较小;不具备滞后效应的浅匙孔对激光功率变化敏感,随着激光功率的下降而迅速回缩,能量吸收率降低,导致正弦调制正半周时匙孔依然难以恢复深度,焊缝熔深减小且波动加剧。

镁合金匙孔存在周期性的开闭变化,匙孔失稳坍塌是引起镁合金焊缝工艺气孔的主要原因。统计结果显示,激光功率调制对匙孔存在干扰,特别是对于深宽比较大的焊缝,工艺气孔率显著增加。从调制频率来看,50 Hz 低频调制对匙孔固有周期的影响最大,匙孔稳定性最差;调制频率为 150 Hz 时,波动频率与匙孔自身变化频率接近,匙孔稳定性较高,工艺气孔率与恒定功率的焊缝近似。

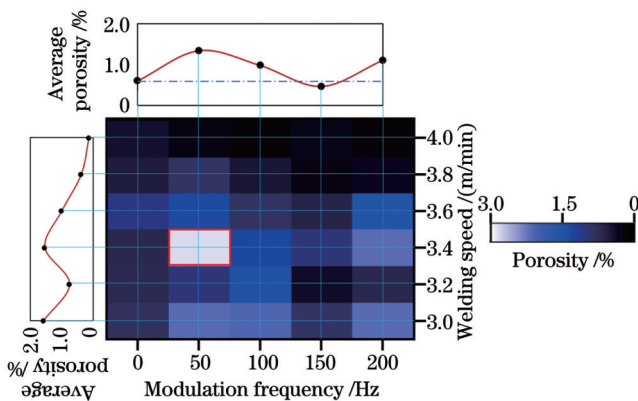


图 9 不同焊接速度和激光功率调制频率下的焊缝工艺气孔率
Fig. 9 Weld process porosities under different welding speeds and laser power modulation frequencies

参 考 文 献

- [1] Yang Y, Xiong X M, Chen J, et al. Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(3): 705-747.
- [2] 王瑜, 舒乐时, 耿韶宁, 等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1202004.
Wang Y, Shu L S, Geng S N, et al. Status and development trend of laser welding technology for automotive body[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1202004.
- [3] Gao M, Wang H K, Hao K D, et al. Evolutions in microstructure and mechanical properties of laser lap welded AZ31 magnesium alloy via beam oscillation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 92-99.
- [4] Wahba M, Mizutani M, Kawahito Y, et al. Keyhole stability in disc laser welding of AZ31B and AZ61A magnesium alloys and weld metal properties[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(7): 559-566.
- [5] 张迪, 赵琳, 刘奥博, 等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1502005.
Zhang D, Zhao L, Liu A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502005.
- [6] 方栩强. AZ31B 镁合金的几种激光焊接特性研究[J]. 电焊机, 2020, 50(2): 58-63.
Fang X Q. Study on several laser welding characteristics of AZ31B magnesium alloy[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(2): 58-63.
- [7] Chen M H, Xu J N, Xin L J, et al. Effect of keyhole characteristics on porosity formation during pulsed laser-GTA hybrid welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 139-145.
- [8] Hao K D, Wang H K, Gao M, et al. Laser welding of AZ31B magnesium alloy with beam oscillation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 3044-3053.
- [9] 张明军, 吴乐峰, 毛聪, 等. AZ31B 镁合金可调环形光纤激光焊接试验研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202002.
Zhang M J, Wu L F, Mao C, et al. Experimental research on AZ31B magnesium alloy welded using fiber laser with adjustable ring spot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202002.
- [10] 崔沛, 任艳霞. 三光束激光焊接 AZ31B 镁合金工艺试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(10): 56-60.
Cui P, Ren Y X. Experimental study on three-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(10): 56-60.
- [11] Harooni M, Ma J J, Carlson B, et al. Two-pass laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 114-122.
- [12] Zhang X B, Cao Z Y. Pulsed Nd: YAG laser spot welding of an AZ31 magnesium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 3053-3063.
- [13] Zhang X B, Cao Z Y. Pulsed Nd: YAG laser spot welding of an AZ31 magnesium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 3053-3063.
- [14] Zhang L J, Zhang X J, Ning J, et al. Modulated fiber laser welding of high reflective AZ31[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1): 721-733.
- [15] Heider A, Stritt P, Hess A, et al. Process stabilization at welding copper by laser power modulation[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 81-87.
- [16] Heider A, Weber R, Herrmann D, et al. Power modulation to stabilize laser welding of copper[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(2): 022003.
- [17] Stritt P, Weber R, Graf T, et al. Laser power modulation at the threshold from heat-conduction to deep-penetration welding[J]. ICALEO, 2010, 2010: 217.
- [18] Cao X, Jahazi M, Immarigeon J P, et al. A review of laser welding techniques for magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 188-204.
- [19] Ning J, Zhang L J, Yin X Q, et al. Mechanism study on the effects of power modulation on energy coupling efficiency in infrared laser welding of highly-reflective materials[J]. Materials & Design, 2019, 178: 107871.

Effects of Laser Power Modulation on Weld Penetration and Pore of AZ31 Magnesium Alloy

Jiang Peizuo¹, Dong Hao¹, Gao Mingyue¹, Cai Yan^{1,2*}

¹*School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

²*Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai 200240, China*

Abstract

Objective AZ31 magnesium alloy is widely used in the aerospace, automotive, and electronic fields because of its low density, high tensile strength, good conductivity, and electromagnetic shielding effect. Laser welding has the advantages of high energy density, small heat input, easy automation, and good flexibility compared to other welding methods. Therefore, laser welding has significant potential in the field of magnesium alloy welding. However, magnesium alloys have a series of material characteristics, such as a high linear expansion coefficient, easy oxidation, low surface tension, and high reflectivity to lasers. Therefore, magnesium alloy welding joints are prone to defects such as poor weld formation and pores. Researchers have proposed methods to solve such defects. However, most of these methods require the adoption of other methods or processes. Recently, sinusoidal modulation laser welding has been proposed for copper laser welding, and researchers utilized this method for magnesium laser welding. In this study, a regression formula between welding parameters and weld depth is developed. However, limited research has been conducted on the effect of sinusoidal laser power modulation in magnesium alloys, and the relevant mechanism is not completely clear. In this study, the influence of sinusoidal laser power modulation on AZ31 magnesium alloy weld penetration and pores is studied to provide new ideas for the efficient and high-quality welding of magnesium alloys.

Methods Sinusoidal modulation laser welding with a wavelength of 1080 nm is utilized for the AZ31 magnesium alloy with a

thickness of 4 mm. The average laser power is 1500 W, and the modulation amplitude is 500 W at different frequencies. The welding speed increases from 3.0 m/min to 4.0 m/min with an interval of 0.2 m/min and the modulation frequency increases from 0 to 200 Hz with an interval of 50 Hz. Pure argon is used as the shielding gas at a flow rate of 20 L/min. During the welding process, the molten pool and keyhole are monitored using the combination of an illumination laser and a high-speed camera. After welding, the cross section and longitudinal sections of the weld are observed to obtain the weld depth, weld seam solidification profile, and porosity.

Results and Discussions With the increase in the welding speed, the weld depth gradually decreases, whereas a slight fluctuation occurs in the weld width (Fig. 3). Under the test conditions used in this study, when there is no laser power modulation, the fluctuation frequency of the keyhole depth is approximately 160 Hz. After sinusoidal modulation laser power welding, the solidification contour period is close to the laser power modulation period (Fig. 4). When the welding speed is lower than 3.4 m/min, laser power modulation helps increase the penetration. However, when the welding speed is higher than 3.4 m/min, the penetration decreases at the power modulation frequency, indicating that less energy is absorbed by the keyhole (Fig. 7). From the perspective of porosity, when the welding speed is high, the number of process pores is not large, and laser power modulation does not cause a significant increase in porosity. When the welding speed is lower than 3.4 m/min, the porosity is significantly increased, particularly after laser power modulation, and the porosity is high. The average porosity is relatively lower under 150 Hz, which is close to the intrinsic fluctuation frequency of the keyhole, and it is highest at 50 Hz (Fig. 9).

Conclusions As a highly reflective material with low laser absorption, the absorption of laser energy by the magnesium alloy depends on the reflection numbers of the beam in the keyhole. When the number of reflections is greater, the energy absorbed by the lower part of the magnesium alloy keyhole is significantly higher than that absorbed by the upper part. The higher the energy gathered at the bottom of the keyhole, the more significant the hysteresis effect of the keyhole depth change. Utilizing sinusoidal modulation laser welding for the AZ31 magnesium alloy in the deep penetration welding mode, the deep keyhole with hysteresis effect will be further deepened, although the depth increase is small. For the keyhole without the hysteresis effect, with the decrease in laser power, the keyhole rapidly shrinks and the energy absorptivity decreases. Therefore, the depth is difficult to recover when the power is in the first half cycle, and the weld penetration decreases and fluctuation increases. The magnesium alloy keyhole exhibits periodic opening and closing changes, and the instability of the keyhole is the main reason for the pore in the magnesium alloy weld. The statistical results show that sinusoidal laser power modulation interferes with the keyhole, particularly for a weld with a high depth width ratio, and the process porosity significantly increases. In terms of the modulation frequency, 50 Hz low-frequency modulation has the highest impact on the intrinsic period of the keyhole, and the stability of the keyhole is the worst. When the modulation frequency is 150 Hz, the fluctuation frequency is close to the intrinsic frequency of the keyhole. The porosity is similar to that of a weld with constant power.

Key words laser technique; magnesium alloy; highly-reflective materials; deep penetration welding; power modulation; keyhole