

铝合金激光扫描焊接非熔穿目标影响因素的研究

魏玲, 宋宏伟, 石阳

北京奔驰汽车有限公司车身一工厂 北京 100176

摘要: 对激光扫描焊接技术非熔穿焊缝质量目标影响因素展开研究。首先通过对现有在线监控系统的探测度进行研究, 确认监控系统对焊接特性的检查有效性。根据DOE试验设计, 探究焊接工艺及工况与气孔及熔深的相关性。在保证焊缝成形的前提下, 分析气孔的形成机理, 并解释各抑制技术对气孔的抑制机理。确定抑制气孔的技术途径和具体措施, 并控制焊接熔深, 使焊缝质量满足标准要求, 且将缺陷率控制到最低。

关键词: 激光扫描焊接; 质量检测; 熔穿; 气孔; 能量; 间隙

Study on factors influencing the quality objectives of laser scanning welding without melting through

WEI Ling, SONG Hongwei, SHI Yang

Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Manufacture, MRA1 Body Shop, Beijing 100176, China

Abstract: In this paper, the influencing factors of non-melt-through weld quality target mark of laser scanning welding technology are studied. The authors first study the detectability of the existing online monitoring system to confirm the effectiveness of the monitoring system for checking the welding characteristics. According to the DOE experimental design, the correlation of welding process and working conditions on porosity and penetration was explored. Under the premise of ensuring the formation of the weld, the formation mechanism of pores is analyzed, and the suppression mechanism of pores by various suppression technologies is explained. Determine the technical approach and specific measures to suppress porosity, and control the welding penetration so that the weld quality meets the standard requirements and the defect rate is controlled to a minimum.

Keywords: laser scanning welding; quality monitor system; melting through; pore; energy; gap

1 序言

激光技术与原子能、半导体和计算机并称20世纪的四大发明。自1960年6月第一台激光器诞生后, 经过数十年的研究和发展, 因其非接触、噪声小、污染小等特点, 目前已经成为工业生产中一种普遍的技术, 广泛应用在医疗设备、制造业、能源、信息通信等多个领域。特别是汽车制造中, 在白车身分总成及合并方面广泛使用。据历史数据统计, 截止到2000年, 美国汽车公司有超过50%的焊点替换成激光焊接技术。重要的原因是减少约2/3的模具开

发和约70%的工装成本, 同时优化一半的生产周期和20%的白车身重量。

在众多的激光焊接形式中, 激光扫描焊接因其快速、精确的特性而在大批量生产的白车身生产线中应用更为广泛^[1]。激光扫描焊是在可编程的聚焦镜组控制下, 由非接触的方式进行的不填丝自熔焊。铝合金的激光扫描焊接由于其高韧性、强耐腐蚀性、输入热量小、不易变形及易加工等特性而在白车身的外覆盖件和内外板连接方面采用的越来越多。除非无法完全实现激光焊接或高成本因素, 非

填丝的铝合金激光扫描焊接成为最佳选择。

由于铝材在加工过程中工艺控制窗口较窄,且容易出现气孔、咬边、未焊透及裂纹等质量缺陷,因此很多人对其展开研究。ICE 等对6061铝材使用4000W激光器进行焊接,探索焊接速度和气孔相应关系。王磊等通过光纤激光器,对7A52铝合金板焊接并分析焊缝硬度受到微量元素损失的影响^[2]。

在全新平台的车型设计中,后备箱内板与加强板的连接采用铝合金激光扫描焊接的形式完成。由于在覆盖区域,多数的位置均处于外观可视的位置,虽然一部分焊缝要求焊根不可见,但同时要求至少有5mm以上熔核尺寸,这就对焊接工艺提出了非常高的要求。接缝长度为10mm,因为焊接开始和最后2mm时是非常不稳定的,无法获得稳定的熔核,所以即使10mm的焊缝也最大可能存在6mm的熔核,而现在这些特殊焊缝需要5mm的熔核,而且不能看到焊根。由于零件形状匹配和根据数据库进行夹紧设计,焊缝长度不能再扩大。这实际上比普通焊缝要困难得多。

首先通过对现有在线监控系统的探测度进行研究,确认监控系统对焊接特性的检查有效性。根据DOE试验设计,探究焊接工艺及工况对气孔及熔深的相关性。在保证焊缝成型的前提下,分析气孔的形成机理,并解释各抑制技术对气孔的抑制机理。确定抑制气孔的技术途径和具体措施,并控制焊接熔深,使焊缝质量满足标准要求,且将缺陷率控制到最低。

2 焊接及检测设备

本次研究所用设备均符合戴姆勒的设备标准。光源使用通快公司额定功率为6kW、最小光纤直径为0.2mm的碟形激光器。激光扫描焊接所用激光头为IPFO智能可编程聚焦镜组。该镜组可进行自动循迹和轨迹调整,确保焊接位置的准确。同时其可通过准直镜及反光镜的自动调整来实现在三维空间快速焊接复杂的图样。焊接机器人采用KUKA公司的KRC4-六轴型号,配合HEMA公司所产VISAL高速质量监控系统。VISAL可以通过焊接背部照片中的图像灰度变化识别出是否存在击穿/未焊透等缺陷。焊接及检测设备如图1所示。焊接检测采用背部熔穿灰度检测方法,为便于分析相关性,增加此特性焊

缝的正面检测程序。

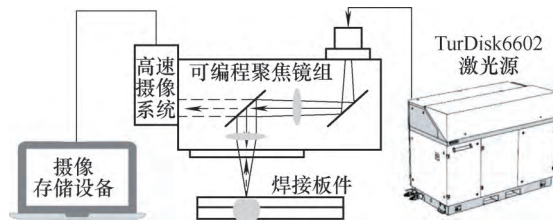


图1 焊接及检测设备示意

被焊材料为1.25~2mm厚AL5-STD铝合金。AL5-STD是一种用于结构应用的自然硬锻镁铝合金,其具有优良的成形特性,适用于在车辆运行100h期间服务温度不超过80℃的车辆区域。此种铝合金的成分见表1。在对焊接缺陷进行相关性研究时,根据中心参数做相应工艺试验。焊接过程包括主焊、正面抚平、背面抚平。在检测方法上,在正面抚平后、背面抚平前进行拍照,并进行质量检测。

表1 AL5-STD铝合金化学成分 (质量分数) (%)

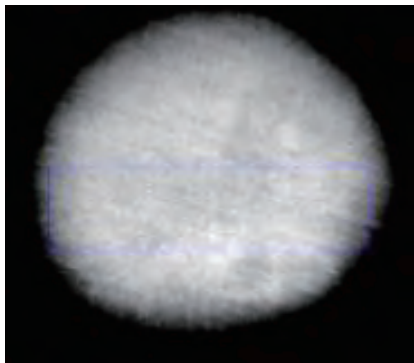
Si	Fe	Cu	Mn	Mg
≤0.20	≤0.35	≤0.15	0.20~0.50	4.0~5.0

3 检测工艺探测度研究

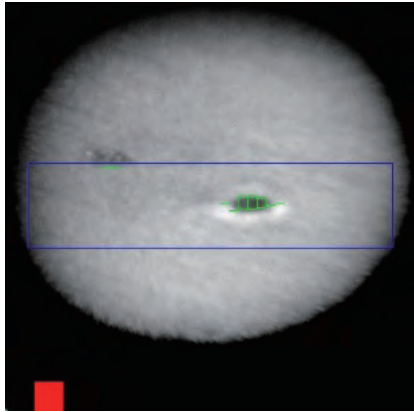
基于视觉的图像质量测量跟踪系统是目前使用范围最广、可靠性最高的激光焊缝检测手段。最初的焊缝检测由红外热成像拍照表征熔核质量,或者通过拍照识别焊缝长度、宽度等外观信息。但对于复杂型面的焊缝,单向拍照无法完整描述焊缝质量,故发展出了基于红外激光三角测量原理的焊缝质量监控系统。在高级品牌的车型生产中,已广泛应用光学视觉跟踪系统进行焊缝质量检测^[3]。

对于5系铝合金的激光扫描焊质量检测,由于过程中铝合金高反光会掩盖掉实际熔池的红外信号,无法参照钢件Robscan的检测方法。实际生产中采用背部熔透的灰度测量方法,对焊缝的连接效果进行检测。但对于非熔透要求的焊缝,其检测目标为背部不能出现熔透导致的灰度变化,故需要区分熔透的焊缝背部与非熔透时母材灰度的差异,以判断能否100%监控熔穿的情况发生。同时,焊接过程的稳定性,以及焊缝内部是否形成熔核,单纯依靠外部视觉监控无法完整识别,本次研究通过正面焊后监控的方法寻找可能识别过程不稳定性的方案。

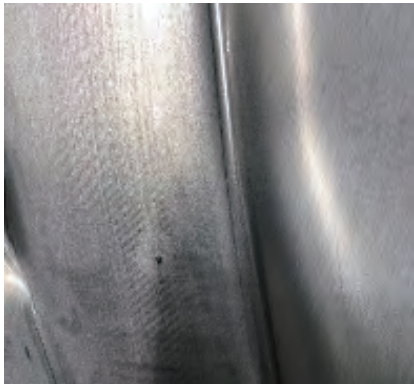
在实际工作中，非熔透型焊缝最常出现的质量问题为背部熔穿，以及焊缝连接不足。本身两种质量目标是互相制约的，当连接强度足够时，熔穿的概率增加；当保证背部不熔穿时，连接强度的稳定性会受到影响。在测量过程中，采用背部灰度检测识别背部熔穿的发生，如图2所示。当熔穿情况发生时，背部灰度出现突变，经过识别计算后报警并将缺陷件导出。



a) 焊缝背部未熔穿



b) 焊缝背部熔穿



c) 背部熔穿状态

图2 背部熔透检测状态

为研究背部熔透识别的有效性，需进行重复试验，焊接过程参数见表2，试验后对焊缝背部中

心灰度进行统计和对比。板厚选择1.5+1.25mm及2.0+1.25mm匹配关系，由厚板向薄板焊接，与实际焊接工况保持一致。

表2 焊接过程参数

激光功率 /kW	激光波长 /nm	光斑直径 /mm	焊接速度 / (m/s)	焊接距离 /mm
0~6	1030	0.6	122	18

对100个相同参数及工况的样件进行灰度测量，如图3所示。未击穿焊缝最小灰度值分布在138~176之间，击穿焊缝分布范围在98~140之间，发现在138~140最小灰度值下存在击穿缺陷与未熔透正常焊缝重叠区域。即在击穿程度较轻的情况下，监控系统无法准确识别出缺陷，在不产生误报的前提下识别率为50%。可以确认在当前探测条件下无法通过自动识别的方式完整识别出击穿缺陷。在实际探测过程中，当击穿面积 $<1\text{mm}^2$ 且灰度值高于138时，系统会识别击穿部位为噪点。

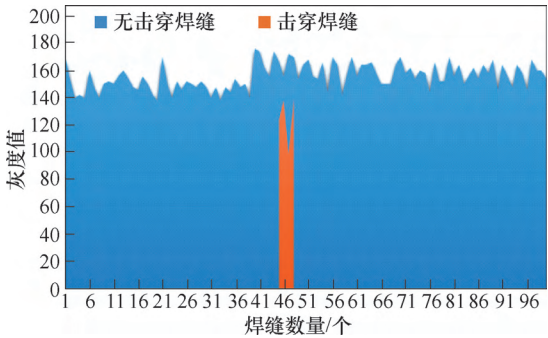


图3 焊缝最小灰度分布

4 能量对熔深及气孔的影响

影响熔深的关键参数在于焊接能量及焊接角度。焊缝形貌受焊接角度的影响很大。在平焊时，焊缝表面不光滑、粗晶，焊缝一旦熔透，会产生严重的下塌缺陷，且在下塌处极易形成应力集中，造成焊缝力学性能下降；在横焊时，下塌缺陷得到了解决，然而在焊缝正面存在中线偏移、不对称，在焊缝背面有严重的飞溅、咬边、不连续缺陷；在立焊时，焊缝正面光滑、连续、对称，然而立向上焊背面焊缝内凹缺陷十分严重，造成有效承载面积减少；立向下焊时的焊缝成形较为理想^[4]。故试验中采用垂直下焊的方式进行焊接。设计专用试焊平台（见图4），可以控制焊接方向、焊接角度及板间隙。



图4 激光焊接专用试焊平台

4.1 能量对焊接熔深的影响

对不同功率和熔深的相关性进行测量研究,将测量结果绘制成关系曲线,如图5所示。其中熔穿线为背部出现击穿的分界线,熔合线为出现可评估熔核的分界线。

材料焊接试验结果显示,在板件匹配良好,间隙为0mm的工况下,对于1.5+1.25mm板厚匹配焊接,能量工艺窗口为4~4.3kW,2.0+1.25mm板厚匹配的能量窗口为4.5~4.8kW,可调整能量为300W。但当采用4.25kW功率进行重复性焊接试验时,1.5+1.25mm板厚匹配焊缝出现大量气孔,如图6所示。由于气孔会显著影响实际熔核长度,因此需进一步分析能量与气孔产生的相关性。

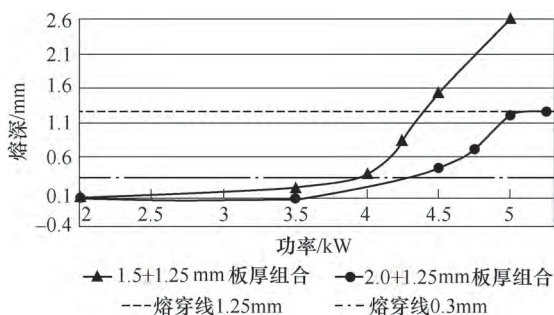


图5 不同板厚功率与熔深关系

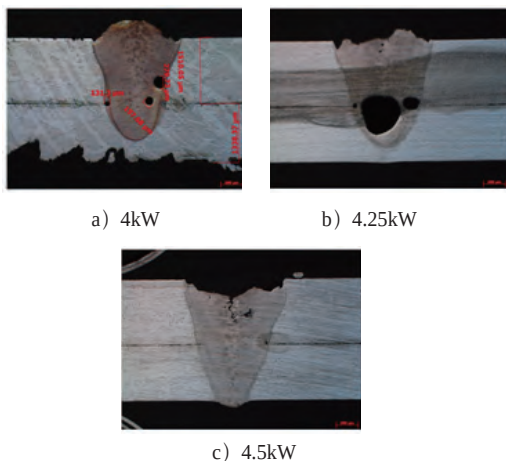


图6 间隙为0mm工况下不同功率截面状态

4.2 能量对气孔的影响

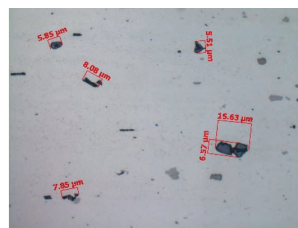
激光深熔焊具有激光能量利用率高、焊接过程相对稳定、焊接效率高等特点,故广泛应用在铝合金的快速焊接中。但由于当前所用铝合金A15含有较多Mg、Fe等杂质,其在铝件中的分布并不均匀。加之该型号铝合金表面存在ZrCr涂层及氧化层,而实际生产中铝件不经过清洗,不同部位的氧化层厚度不一样,故导致挤压后显微组织不均匀,如图7所示。在实际生产中,低熔点成分的蒸发会产生大量气体,如果无法及时排除,会导致内部气孔的产生。

为实现对焊缝内部气孔的精确测量及分析,试验中对试焊后的焊缝进行截面切割形成试样。利用Zeiss光学显微镜对焊缝截面进行拍摄并对显微结构中的缺陷进行测量。依据最大连通域的原则,只测量显著性最高的气孔,即气孔直径 $>0.3\text{mm}$,忽略小气孔或结构间隙。每组试验重复进行3次,测量结果取其平均值。

对焊缝中的气孔直径进行测量,并绘制0mm间隙下不同板厚热输入与气孔直径关系曲线,如图8所示。在焊接过程中,受重力影响,熔池被拉长,表面张力差及热浮力差增加,导致流体力随之增加。小孔受液态金属的影响在径向方向被拉长,使得有更多激光入射到小孔内时在方向上金属蒸气压力足够平衡表面张力和流体动压力。由于小孔被径向拉长,小孔底部的曲率半径增加,小孔的平衡状态易被打破,卷入保护气体形成气泡^[5]。气泡在熔池中随着液态金属一起流动。



a) 多孔结构



b) 微观偏析状态

图7 A15系铝合金显微组织形貌

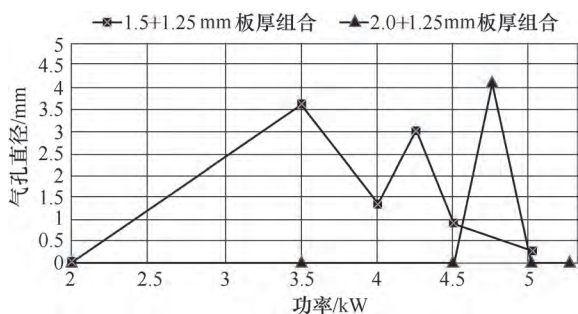


图8 间隙为0mm不同板厚热输入与气孔直径关系

当功率较低时，由于焊接过程中的气体产生较少，且位于材料的浅表位置，可以顺利从焊缝表面逃逸，故很少会残留在凝固的焊缝中。此种情况焊接功率不高于4kW，但产生的熔深不足，容易出现开焊或连接长度不足的问题。当焊接功率高于4kW时，由于两板间产生大量气体，激光焊接的凝固时间很短，且板间无气体逃逸的空间，所以会有残留的气体存在于焊缝中央区域，造成大量的气孔。而当功率进一步增加，当焊接功率高于5kW后，由于背部已经熔穿，气体因熔池搅动从下侧喷出，凝固后残存的气孔会急剧减少，所以焊缝内部质量会更加稳定，但是此情况不符合背部焊根不可见的质量标准。

综上所述，在间隙为0mm的情况下，无法在不熔穿的情况下获得稳定的无气孔焊缝，没有合适的工艺窗口。通过工艺试验，增加光斑直径，由于引入更多的熔化材料，气体的产生反而会增多，加剧了问题的严重度。在实际生产中，为保证连接强度，会刻意增加焊接功率，从而导致有15%的焊缝存在击穿的可能性，进而需要增加线下的人工检查及返修工位，这造成了人员和时间的浪费。

4.3 间隙设置对气孔的影响

为避免气孔对非熔透型焊缝熔核长度的影响，基于气孔产生的原理，对板间隙与熔深及气孔的关系进行研究。将板间隙预制0.2~0.5mm后用不同功率进行焊接，绘制出不同板间隙下功率与熔深、功率与气孔的关系曲线，如图9、图10所示。当间隙达到0.2mm时，焊接熔深会在3.5~4.5kW内维持1mm左右且不熔穿，同时在4.3kW以下保持气孔直径不超过0.5mm。由于母材中的气体可以在板间隙中排除，不至于残留在焊缝中，故无论熔穿或连接长度不足的可能性均会降低。当间隙超过0.3mm时，气

孔会进一步降低，但同时焊接熔深工艺窗口会同时收窄。而间隙增加到0.5mm时会出现明显的上表面塌陷，会导致实际连接宽度不足，进而影响焊接强度，如图11所示。

而在增加板间隙的过程中，表面塌陷会随之产生，按照前期拉力测试的结果，当塌陷深于0.4mm时，会对焊缝强度造成影响。当间隙为0mm时，由于气体需要从表面排出，所以会导致表面出现缺料情况，进而出现表面塌陷加重的现象。而当间隙控制在0.1~0.3mm时，可以满足质量指标要求。当间隙>0.4mm后，会出现较严重的表面塌陷，影响焊缝外观及强度。

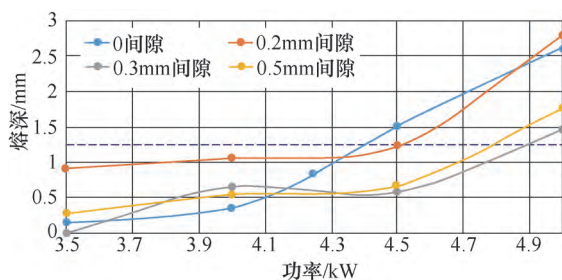


图9 板厚1.5+1.25mm组合不同间隙下能量与熔深关系

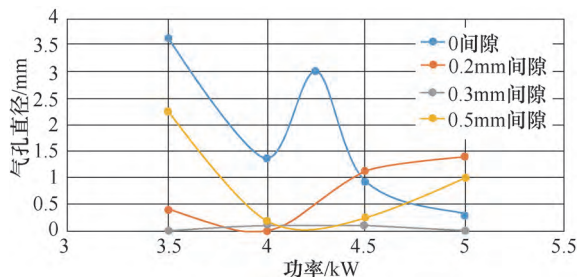


图10 板厚1.5+1.25mm组合不同间隙下能量与气孔直径关系

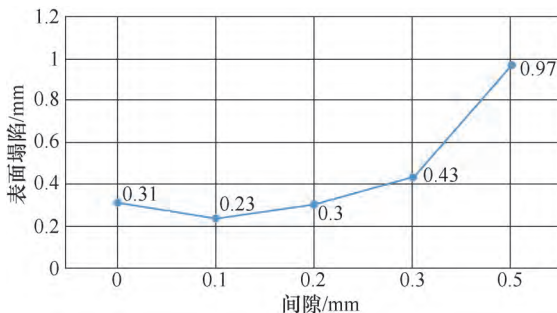


图11 4kW功率下不同间隙与表面塌陷关系

连接熔宽、气孔直径与实际板间隙及功率的等值线图分别如图12、图13所示。由图12、图13可知，经过工艺试验得到理想的焊接工艺为：对于1.5+1.25mm板件组合，在0.2mm间隙支撑条件下，

4.2kW功率配合122mm/s的焊接速度可以获得稳定的焊接熔深，并大幅度减少击穿情况的产生。将相关工艺应用于实际焊接过程中，剔试结果及生产过程中的外观合格率均明显得到提升，如图14所示。后续项目中，对于非熔透型激光扫描焊缝，应用相关过程控制，会在前期明显提高焊接质量。在生产过程中，控制板间隙是后续研究的重点问题。通过激光预打点可以获得稳定的凸台高度，同时保证焊接质量的稳定。但对于铝合金的预制凸台高度及特性需要后续进一步研究。

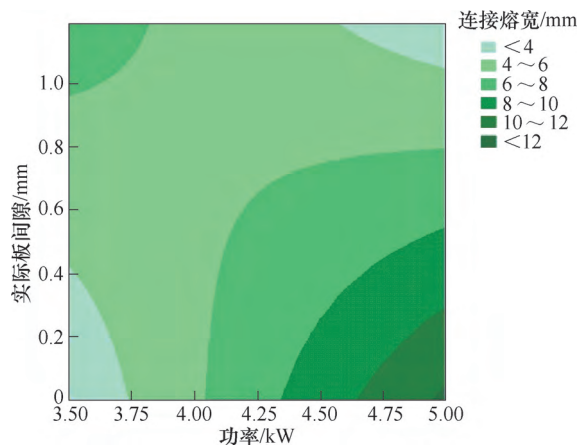


图12 连接熔宽与实际板间隙及功率的等值线图

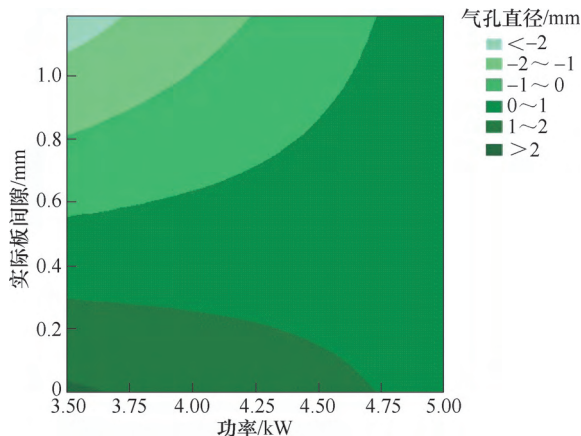


图13 气孔直径与实际板间隙及功率的等值线图

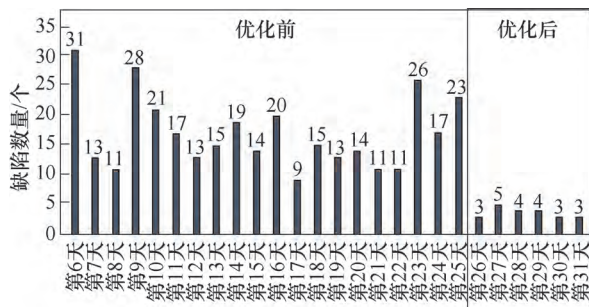


图14 工艺优化后每500辆车缺陷数

5 结束语

1) 研究背部熔透识别的有效性，进行重复试验后，对焊缝背部中心灰度进行统计和对比。发现监控系统无法准确识别出缺陷，在不产生误报的前提下识别率为50%。可以确认在当前探测条件下无法通过自动识别的方式来完整地识别出击穿缺陷。

2) 间隙为0mm的情况下，无法在不熔穿的情况下获得稳定的无气孔焊缝，其过窄的工艺窗口易受到工况的影响导致连接不足或击穿。通过工艺试验，增加光斑直径，由于引入更多的熔化材料，气体的产生反而会增多，加剧了问题的严重度。

3) 基于气孔产生的原理，对板间隙与熔深及气孔的关系进行研究。经过工艺试验，得到理想的焊接工艺为：对于1.5+1.25mm板件组合，在0.2mm间隙支撑条件下，4.2kW功率配合122mm/s的焊接速度可以获得稳定的焊接熔深，并大幅度减少击穿情况的产生。

参考文献：

- [1] 王祖建. 车身激光焊接夹具设计与入射角对焊接质量影响的研究[D]. 长沙：湖南大学，2010.
- [2] 王磊，许雪宗，王克鸿，等. 中厚板7A52铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报，2020，41（10）：28-31.
- [3] MATSUNAWA A, SETO N, KIN J D, et al. Dynamics of keyhole and molten pool in high power CO₂ laser welding: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering[C]. Osaka, 2000: 34-45.
- [4] 何文佩. 激光焊接5A90铝锂合金气孔抑制方法研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2016.
- [5] 黄尊月，罗震，姚杞，等. 薄板激光焊接热变形的检测研究[J]. 焊接学报，2015，36（7）：51-54.

MW 20240309