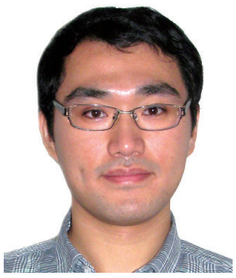


汽车前纵梁钢板激光填丝熔焊质量控制

宋宏伟

【摘要】本文以汽车前纵梁钢板激光填丝熔焊为例，根据实际生产经验，介绍影响钢板激光填丝熔焊质量的因素，以及对生产过程中产生的缺陷原因进行分析，并采取相应控制措施。

关键词：汽车前纵梁；钢板；激光填丝熔焊；质量控制

1. 概述

激光焊接技术在汽车工业中已经得到了广泛的应用，特别是白车身零部件的焊接以及分总成和总成的装配连接方面。在碰撞事故中，前纵梁担负主要吸能作用，通过压溃和弯曲变形，担负总碰撞能量的60%左右。

在北京奔驰，新车型的前纵梁应用激光填丝熔焊技术。一方面，通过添加焊丝，可以降低装配要求，减少焊前的机加工程序；另一方面，可以通过添加焊丝来调节焊缝冶金成分，满足前纵梁的强度要求，提高车身刚度。在焊接过程中，采用高功率使焊丝与母材同时熔化形成熔池，采用搭接方式焊接时下板法兰边缘只需4mm，就可以在保证强度的同时，降低车身重量。

钢板的激光填丝熔焊在对中厚板件进行焊接时，由于功率密度大、焊接速度快、精度要求高及镀锌层性质等原因，所以容易出现质量缺陷，严重时会造成停产的后果。下面以北京奔驰某款车型前纵梁焊接为例，介绍钢板激光填丝熔焊工艺选择、质量影响因素及控制措施。

2. 焊接设备及材料

根据被焊零件的尺寸及焊缝设计，选取KUKA六轴联动工业机器人。激光源采用TRUMPF公司额定功率6kW的Nd：YAG固体激光器，采用光纤传输。激光加工镜组为SCANSONIC公司ALO3自适应逻辑镜头，可以通过伸缩轴及侧摆轴，根据实际生产工件的形状进行随动，同时内部准直镜也根据*Z*向伸缩及时变位，以保证实际射入工件表面的光斑尺寸不变，当零件尺寸出现小范围波动时保持质量和生产稳定，也使得机器人轨迹示教和调整更加简单。

母材所用钢板为低碳镀锌钢板，材质CR340LA，上下板分别为板厚1.6mm和2.5mm，采用搭接形式焊接。焊丝为G3Si1，ϕ1mm。

3. 激光填丝熔焊控制因素

相较于其他焊接技术而言，激光焊接对于各因素控制更为精确而复杂。任何因素的超范围偏差都可能导致焊接失效的发生。根据设计和生产的实际经验，镀锌钢板的激光填丝熔焊控制因素可以分为三部分：焊接参数的设定、焊接轨迹的示教、执行机构的校准。

（1）焊接参数的设定　激光填丝熔焊的主焊接参数包括焊接功率、光斑尺寸、焊接速度及送丝速度，辅助焊接参数包括焊接下压力（TA）、侧向力（SA）及侧吹气刀流量。

第一，激光功率铁基材料对于不同波长的激光吸收率是不同的。目前对于通快1030nm波长的激光而言，吸收率为30%左右。根据焊接工艺评定，如需要达到下板至少0.4mm熔深，通过与其他参数匹配后，焊接功率需保持在5000~ 6000W。

第二，光斑尺寸。影响着焊

接能量密度，对于高斯分布光源，能量集中在光斑中心区域。激光填丝熔焊需要足够的熔深，同时避免镀锌层在烧损时会出现大量飞溅，故光斑直径应选取在1.0~1.5mm。

第三，焊接速度与送丝速度应与激光功率和光斑尺寸相匹配。焊接速度决定单位面积能量输入，而送丝速度决定焊缝尺寸。本例中焊接速度每秒0035-0.lm，送丝速度每分钟4~6 m。

第四，辅助焊接参数下压力、侧向力的意义在于保持焊丝与光斑始终位于焊缝中心位置，维持正常焊接过程，避免由于零件尺寸差异、表面污染物等干扰因素导致焊接缺陷。侧吹气刀流量用于将焊接飞溅和等离子体横向吹出焊接区域，避免能量损失及烧损一级保护镜片。过小流量会减少保护效果，流量过大还会因伯努利效应使污染物上吸加速镜片烧损。经生产实践，6Ba的气量可以起到最好的效果。

（2）焊接轨迹的示教　目前广泛采用的激光填丝焊加工镜组为ALO3自适应逻辑镜头，其原理如图1所示。其特点是可以根据实际焊接工件状态实时调整*Z*向及*Y*向位置，以保证工件表面光斑尺寸的稳定性。因此，应用此镜组时轨迹示教相对简单，应确保TCP点运行速度的稳定，并与焊缝中心对中。在编程中，除非出现超出跟踪系统容裕量的尺寸变化，应尽量避免使用圆弧等角度变化较大的指令。

（3）执行机构的校准　由于激光焊接设备光源和送丝机构并不在同一个子系统中，为保证焊接质量，对执行机构的校准非常重要。在WELDEYE焊接过程监控系统中，应保证送丝机构焊丝伸出位置位于激光光斑的中心，同时送丝嘴可见，如图2所示。焊丝与光斑位置发生偏差，焊丝偏向上板或下板方向，导致焊缝在单板上成形，造成焊缝偏移等严重缺陷。

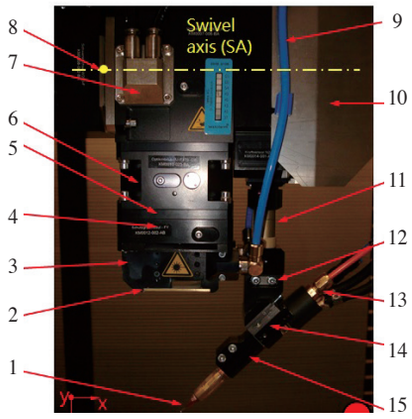


图1　ALO3 结构及焊缝跟踪系统

1.送丝嘴（干伸长6mm） 2.气刀孔 3.气刀 4.保护镜片抽屉 5.二次硬保护镜片 6.聚焦透镜 7.冷却单元 8.SA旋转点 9.气刀气管 10.传感器臂保护罩 11.传感器臂位置刻度线 12.X向调节支架 13.送丝架连接点 14.Y向调节支架 15.送丝架支架

4. 过程质量问题

（1）粘丝问题　粘丝指生产过程中焊丝偏离预设轨迹焊接到板件非预设焊缝位置或夹具上的情况。粘丝问题的产生原因和对应解决方案主要有以下几种。

第一，送丝问题。送丝机构出现因送丝管接头损坏而造成送丝控制与机器人移动不同步，焊丝偏离预设轨迹，形成粘丝。图3a为生产过程中出现粘丝缺陷。“焊接眼”监控表明，在焊接过程中送丝速度不恒定，呈逐渐下降趋势，激光功率停止时送丝速度依然存在。进一步检查送丝系统，发现送丝管接头折断（见图4b），导致特定位置处送丝管折弯角度过大造成窝丝，在机器人驶离焊缝时送丝无法及时停止，过多的送丝偏离到上板与夹具处，引发粘丝问题。更换送丝管后，此问题得到解决。

第二，零件变形导致零件未正确定位到夹具中，焊接位置在零件上发生偏移，焊接到单板或夹具上。通过对造成零件变形的积放式输送板进行优化，解决了此问题。

第三，送丝机构旋转轴力平衡被破坏。送丝机构旋转轴力平衡，是用于追踪焊丝*Y*向（垂直于焊缝方向）定位的力。设备日常维护时，如气管捆绑过紧，导致在特定位置给旋转轴一个很大

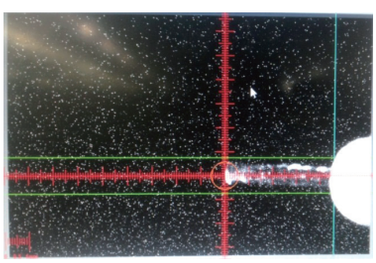
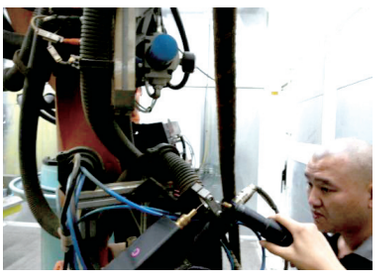


图2　WELDEYE系统对中图像

（a）粘丝现象



（b）折断的丝管

图3　送丝管接头损坏导致粘丝问题

的侧向力，破坏送丝机构旋转轴力平衡，也会出现因焊丝偏移而焊接到夹具上的情况。为此，在调试机器人轨迹时，需要对完整的激光聚焦系统运行轨迹进行试验，确保在完整焊接过程中线缆和气管无过度张紧的状态，保证送丝机构旋转轴力平衡处于正常状态。

（2）焊接飞溅问题　生产线投产初期，焊接飞溅较多，造成焊接质量缺陷和激光聚焦系统二级保护镜片消耗量过大的问题。

具体的解决方案如下：

第一，优化光斑尺寸。试验表明，当光斑直径减小到1.5 mm，镀锌层烧损量变小，飞溅减少。同时，激光功率密度增加，焊缝熔深增大，焊接质量得到提升。

第二，改进透光隔板。原透光隔板中光圈形状如图4a所示，光圈尺寸较大，对下方飞溅阻挡能力弱。位于二级保护镜片下方的透光隔板，直径为24mm，且在上方有两个ϕ10mm的“鼠孔”用来透过weldeye监控录像的照明光。通过对污染镜片的分析，飞溅物在镜片的中心位置很少，主要集中通过透光孔边缘和鼠孔位置反射到镜片上。

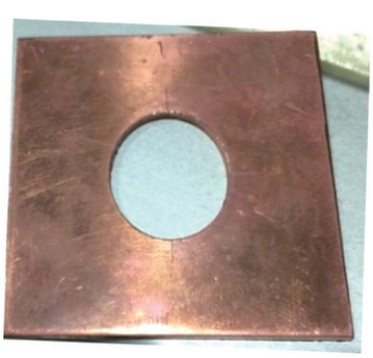
由于在透光隔板的下边还有侧向的气刀将飞溅吹出，所以在飞溅物射入时会受到侧向吹力的作用。这也解释了飞溅物位于镜片边缘的原因。实际生产中LA的变化小于-50（即工作面光斑直径小于2mm）。根据此型号ALO3的激光性质，在此区间全域激光斑点$\phi\leqslant$10mm。根据飞溅分布于镜片周围5mm左右的区域，制作出直径18mm的透光板，如图4b所示。在保证透光能力的基础上，减小光圈尺寸，增强对飞溅的阻挡作用。

第三，优化设备维护方案。定期清理维护通风设备，改善激光房内烟尘大的问题。定期更换送丝内衬管，每天清洁气刀和丝嘴，除去浮尘和焊渣；每天检查、清洁、保养激光聚焦系统，并在无法稳定工作时更换。

（3）产品质量问题　第一，焊缝背部凹陷。焊缝背部凹陷（见图5）的潜在原因和对策如下：①激光功率过高，导致焊接热输入量过大，焊缝背部因过烧而产生凹陷。解决方案为通过试验确定最优激光功率。②焊丝与光斑位置偏差，导致焊丝偏移，预设焊缝位置因焊丝填充不足而造成焊缝背部过烧，产生凹陷。解决方案为重新调试光斑轨迹或焊丝尖端轨迹，确保焊丝与光斑位置始终保持重合。③板材间隙过大，焊丝熔化优先填充到板材间隙，造成对应位置焊丝填充不足产生凹陷。解决方案为通过板材单件尺寸优化降低板材间隙，或通过增加送丝量加大熔敷金属厚度以吸收能量，减少母材熔化。

第二，焊缝气孔、表面孔洞。焊缝气孔、表面孔洞（见图6）的潜在原因和对策主要有：①气孔。板材间隙过小（小于0.15 mm），导致板材表面蒸发的锌蒸汽无法排出形成气孔。解决方案为减少夹具夹紧力，增加夹具夹紧间隙，调整上、下板材间隙至最佳（0.15~0.2mm），为锌蒸气的排出创造条件。②表面孔洞。焊丝与光斑位置偏差，焊丝偏移位置过度烧损，造成焊缝孔洞。通过调整焊丝与光斑位置

（a）原隔板



（b）改进隔板

图4　通过改变透光隔板降低飞溅

图5　焊缝背部凹陷

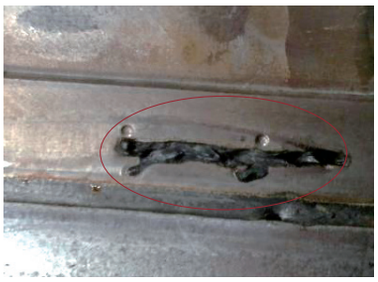


图6　焊缝气孔

图7　焊缝偏移

对中度，可以避免表面孔洞的产生。另外，激光功率密度过高，导致焊缝过度烧损形成孔洞，解决方案是优化激光功率密度。

第三，单边焊。单边焊缺陷（见图7） 的潜在原因和对策主要有：①焊丝与光斑位置发生偏差，焊丝偏向上板或下板方向，导致焊缝在单板上成形，造成焊缝偏移缺陷。解决方案为优化送丝轨迹。②送丝机构旋转轴力平衡被破坏，导致旋转轴发生角度偏差，光斑和送丝位置同步发生偏差。解决方案为优化线缆布线，避免机器人运行时因线缆张紧破坏送丝机构旋转轴力平衡。③光斑过小，功率密度过高，光斑因仅能对中到单板而形成焊缝偏移。解决方案为优化光斑尺寸。

第四，焊缝熔深不足。焊缝熔深不足直接影响着焊接强度，缺陷横截面如图8所示。合格的焊缝熔深应大于0.4mm。造成熔深不足的潜在原因和对策主要有：①外观可见的焊缝表面凹陷、气孔、焊缝偏移都会造成焊缝熔深不足。解决方案为参照上述方案对相关缺陷进行改进。②光斑尺寸过大或激光聚焦系统保护镜片污染、开裂，致使激光功率密度不足，造成焊缝熔深过浅。解决方案为优化光斑尺寸或清洁、更换激光聚焦系统保护镜片。③在圆弧过渡位置，当角度变化过大时机器人末端运动会出现减速，此时送丝速度和功率的匹配不当很容易造成熔深不足。

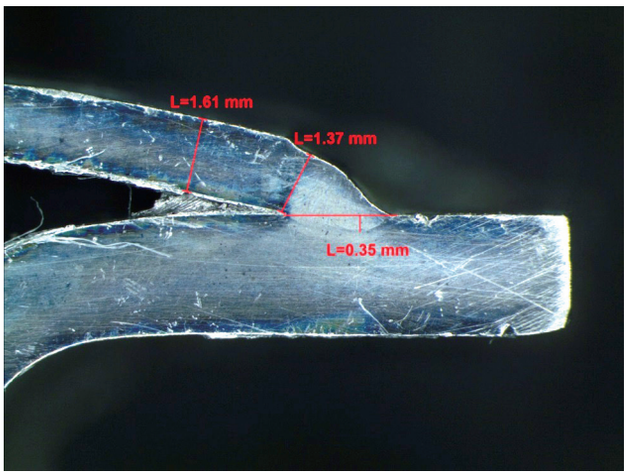


图8　焊缝熔深不足

5. 结语

（1）通过对送丝机构、定位夹具、零件变形、机器人轨迹及线缆捆绑方案设计等进行控制和优化，可有效解决焊接粘丝问题。

（2）通过优化光斑尺寸，改进透光隔板形式，优化维护保养方案，可有效控制焊接飞溅问题。

（3）通过优化激光参数（功率、光斑位置/尺寸）、送丝系统（焊丝尖端位置、送丝量）、夹具系统（夹紧力、夹紧间隙）、板材间隙等变量，可有效解决焊缝背部凹陷、气孔、表面孔洞及单边焊等问题。

参考文献：

[1]杜汉斌,胡伦骥,胡席远.激光填丝焊技术[J]. 航空制造技术, 2002（11）： 60.

[2]封小松.镀锌钢板激光填丝钎焊工艺与热过程数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学, 2007： 12.

[3] Scansonic MI GmbH, Laser-Processing Optical System ALO3 User’s Manual.

作者简介：宋宏伟，北京奔驰汽车有限公司。

MW 20170407