半导体激光钎焊汽车板工艺研究

□ 华工法利莱 / 沈义

文章研究半导体激光器的特性及激光加工应用，进一步的研究了通快公司Tru Diode系统激光器的特性，并通过Tru Diode4006激光器进行激光钎焊工艺试验，研究ALO3激光头不同参数下实际光斑大小，同时研究不同焊接速度、不同热丝电流、不同装配间隙下的焊缝成型规律。

半导体激光器也称为半导体激光二极管，或简称激光二极管。由于半导体材料本身物质结构的特异性以及半导体材料中电子运动规律的特殊性，使半导体激光器的工作特性有其特殊性。

半导体激光器是成熟较早、进展较快的一类激光器，由于它的波长范围宽，制作简单、成本低、易于大量生产，并且由于体积小、质量轻、寿命长（一般可达数十万乃至百万小时以上），因此，品种发展快，应用范围广。

半导体激光器在汽车工业焊主要用于精密点焊、热传导焊接及管道的轴向焊接。

大功率半导体激光器是一类用途非常广泛的光电子器件，输出功率可以高达百瓦、千瓦，甚至准连续输出功率达万瓦以上，而且这些器件的能量转换效率可高达50%以上。其优点是：热量输入低，零件的扭曲变形小；可进行高速焊接，焊缝光滑美观；非常适合工业焊接的不同需要，它将逐渐取代传统的焊接方法。

Tru Diode激光器特性

目前大功率的半导体激光器，通快公司的Tru Diode激光器系列性能优异，较常用的有Tru Diode3006/4006/5006/6006。

（1）电光转化效率高。Tru Diode激光器为半导体激光器可达40%以上，光纤激光器转化效率可达30%。

（2）体积小。减少光光转化的环节，紧凑的模块设计，节省空间。同时模块化结构使任何部件均可现场快速维修和更换；占地面积小于1m^3（0.75X0.87X1.325 m^3），光纤激光器2m^3（1 490 X 1 480 X 810 m^3），CO_2可达4～5 m^3。

（3）水冷要求低。提高电光转化效率，损耗的热量小，对水冷的要求降低；21～22℃对应水压力1～2bar（1bar=10^{5}Pa），为防止堵塞或测量误差，建议用1.5bar。建议水压力最大不超过6bar，水温20～23.5℃，水箱容量27L，6kW半导体激光器水冷机功率16kW（5kW光纤激光器对应冷水机功率为20kW），去离子水导电率小于10μs/cm。

（4）光束质量好。光纤激光器BPP达到5mm·mrad，Tru Diode6006可到50mm·mrad，能够用于深熔焊，非常适用于激光熔敷和钎焊。

图1 半导体激光器Tru Diode4006与光纤激光器IPG YLS-4000

光束模式平底模，波长范围938～1 000nm，光纤激光器为高斯模，波长范围1 070～1 080nm。

激光钎焊汽车板对激光器的要求

激光钎焊应用于汽车行业，技术已经相当成熟，目前神龙汽车、通用汽车主要应用光纤激光器，大众汽车主要应半导体激光器。激光器是激光钎焊系统的核心部件，对应用于激光钎焊的激光器选型，主要需要考虑以下几点：

（1）光斑直径大，光丝直径比2：1。激光钎焊基本要求，光斑直径至少为丝直径的2倍，在激光熔化钎料的同时，照射在钎料以外的激光将母材加热，并与熔化的钎焊共同蓄热，增加钎焊在母材表面铺展的流动性；

（2）光波长短。光波长越短，减小反射，越有利于材料对光的吸收。目前应用前景较好的光纤激光器光波长为1 070nm，Tru Diode半导体激光器波长为1 030nm。光波长在1 000nm左右非常适合激光钎焊；

（3）光束质量好。光束质量好，光束的发散角越小，激光越集中，功率密度越高，对加工越有利。对光束质量要求，从切割、焊接、钎焊、熔敷依次降低。激光钎焊通常要求光束质量在40～300mm·mrad之内；

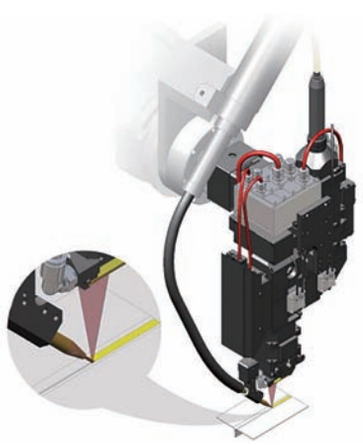


图2 激光钎焊光丝直径比要求模型图

（4）能量足，功率密度高，满足生产节拍要求。能量足，功率密度高，才能满足汽车厂对生产节拍无限追求的需要。功率密度通常要达到10^4～10^5W/cm^2，达到1min内完成一辆车顶盖激光钎焊的节拍要求，需要配置4～6kW激光器；

（5）光路柔性化程序高。光路柔性好，使得光路的传输路径简单，省去光路中间对中环节，减少空间等介质的传输，有利于激光器减少功率损耗，通常激光钎焊要求采用光纤传输。

（6）免维护或少维护。对于汽车厂而言，时间就是生命，减少每一分钟对人员的需求，都可以无形的创造价值。激光器无须经常更换工作物质，也不需频繁更换备件，这是必要的门槛。目前主流的光纤和半导体激光器，共同特性都是免维护。

Tru Diode激光器汽车顶盖激光钎焊应用

配置的系统包括：Tru Diode4006半导体激光器（LLK-D型光纤，芯径0.6μm）、ScanSonic ALO$_3$激光头、机器人、Fronius焊机（带热丝功能）。

焊缝结构型式为单边折边配直板，形成凹槽形焊缝，焊丝尖端与光配合，同时作为焊缝的机械跟踪部分。

采用Scansonic ALO$_3$激光头进行激光钎焊，研究半导体激光器对卷边对接焊缝结构装配间隙值对焊缝成型的影响规律。所用材料为镀锌板，厚度为0.65mm，尺寸为200mm×40mm，试片装配尺寸如图3所示。

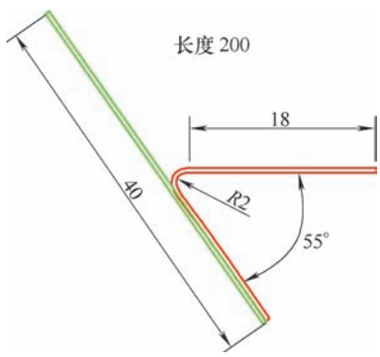


图3 试片装配尺寸

关于焊缝金属成型要求，如图4所示，a为焊缝金属与母材搭接处对应的最小熔深。针对汽车厂目前大多顶盖尺寸为0.7mm，对应a值大于0.5mm。

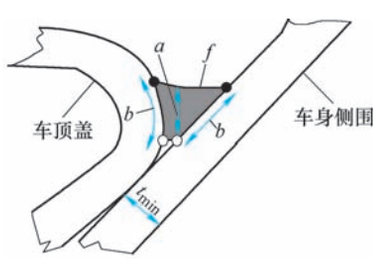


图4 车顶焊缝结构的焊缝成型要求

要求：$a \geqslant 0.7t_{min}$，且$b \geqslant t_{min}$要求，板厚为0.65mm，则$a \geqslant 0.5$mm

1. 设计实验，比较不同设置的光斑大小

激光加工时，光斑越大，相应功率密度越小，光斑越小，功率密度越大。光斑越大，加热母材的能量越高，焊丝熔化后铺展越好，需要的功率也相应大；光斑越小，加热焊丝的能量越集中，需求的功率越小，但飞溅会增加。通常会选

择2：1为激光加工的临界值，针对ALO_3激光头，软件设置参数与光斑大小对应有一条曲线图（见图5），通过设置功率500W，出光时间0.2s，观察并记录在焦点位置时材料表面光斑痕迹，从而测量出实际光斑大小值（见表1）。

光纤激光器光束能量分布为高斯模式，中心能量高，外围能量依次递减。半导体激光器光束模式为平顶光，能量分布均匀。从实验结果可以看出，随着LA_Auto设置值的增加，光斑大小逐渐增大，但明显比给定的曲线图中光斑大小要小。且光斑越小，光束能量密度越集中，采用同功率时，对光斑的板材的加热作用就越明显。从光束作用效果看，当能量密度过高时，会出现重熔区、镀锌层烧损区、镀锌层热影响区，以及无热作用效果区。随着光斑大小变化，功率密度不同，应该以重熔区、镀锌层烧损区以及部分镀锌层热影响区为光斑直径测量值。参数设置150时，其对应光斑直径约为2.9mm，此时光束能量密度不足以清除镀锌层；参数设置100时，其对应光斑直径约为2.18mm，此时光作用板材出现重熔区，以此可知此种镀锌板不被破坏的功率密度范围为（1.51～2.68）$\times 10^3 W/cm^2$范围，在此功率密度范围内测量光斑直径将更加精准。根据测量结果，最佳的光斑直径范围的参数设置值为180～250。

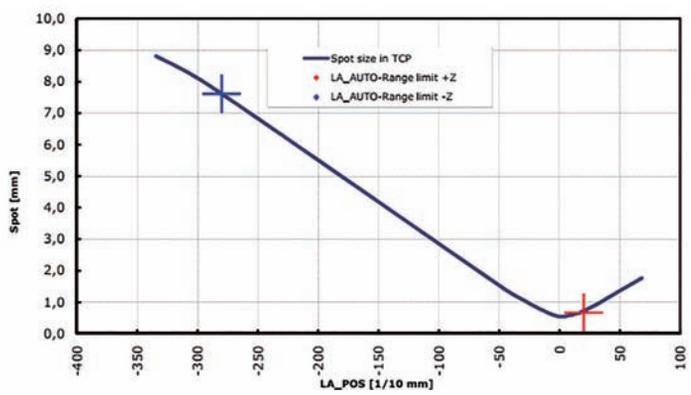
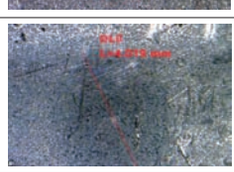


图5 ALO_3激光头LA_Auto设置值对应的光斑直径曲线

表1 实际测量LA_Auto值对应的光斑值大小

LA_AUTO值	D_2对应的光斑值/mm	测量值D_1/mm	500w，0.2s光斑图
0	0.6	0.73	
50	1.5	1.41	
100	2.8	2.18	
150	4.0	2.9	
200	5.3	3.52	
250	6.5	4.02	

2. 研究不同电流值时焊缝成型规律

在3 400W、50mm/s焊速、3.4m/min送丝、光斑D为3.52mm稳定参数下，只改变电流I大小，电流0～150A变化，研究热丝电流变化对焊缝成型效果的影响。实验过程如下：

（1）热丝电流为0A时，焊缝熔宽较宽，非常不均匀，表面凸凹不平。表明金属未受过多的热量变色，焊缝金属非常明亮。

（2）热丝电流为50A时，焊缝依然较宽，表面成型不均匀，有少量不平整，但较电流0A时成型稳定

性好。

（3）热丝电流为100A时，焊缝均匀光整，缝宽也适中。

（4）热丝电流为150A时，焊缝均匀光整，缝宽也适中，热丝热量较高，焊缝与母材搭接处，明显出现镀锌层烧损而发黑的黑边，且焊缝也出现了微量凹陷。

实验表明，无论是否通热丝电流，稳定的参数下，都可以有稳定的焊缝成型。无热丝电流，焊缝整体流动性较差，被激光熔化的焊丝整体铺展在母材的表面，表现出较宽的熔宽。随着热丝电流的增加，熔化的焊缝金属流动性增加，逐渐流动到更底层的母材，表现出焊缝熔宽变窄，焊缝出现上表面下凹的弧线型。随着热丝电流的进一步增加，焊接过程中的飞溅明显增大，焊缝与母材搭接处出现镀锌层被烧损而发黑的黑边，而且焊缝下凹程序增加。理想的焊接参数，需要在控制飞溅量的同时，表面无明显下凹，合适的电流范围为80～120A。

3. 研究不同焊接速度下匹配最佳工艺参数的焊缝成型及力学特性

实际造车时，速度与节拍是工位优先考虑的因素。目前大多汽车厂家激光钎焊的速度多集中在50～60mm/s，将研究范围扩展到50～80mm/s。

研究的基础参数为：LA_Auto值200，对应光斑直径为3.52mm。研究焊速*V*在 50mm/s、60mm/s、70mm/s及80mm/s功耗尽量低的状态下，匹配的最佳工艺参数焊缝的熔宽熔深、宽深比及拉伸状况。

（1）50mm/s匹配参数为功率3 400*w*、送丝速度3.4m/min、100A热丝电流。焊接效果如图6所示。

（2）60mm/s匹配参数为功率3 400*w*、送丝速度3.6m/min、100A热丝电流。焊接效果如图7所示。

（3）70mm/s匹配参数为功率3 600*w*、送丝速度4m/min、120A热丝电流。焊接效果如图8所示。

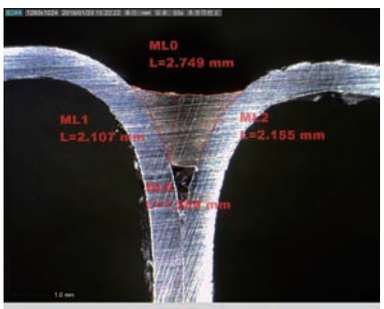
（4）80mm/s匹配参数为功率4 000*w*、送丝速度4.6m/min、150A热丝电流。焊接效果如图9所示。

通过不同焊接速度下匹配不同的焊接参数，得出的焊缝成型，整体表现平整，熔深都大于1mm，远远大于焊接标准的要求。

可以看出，随着焊接速度的增加，焊缝的熔宽逐渐减小，单位面积下熔化的焊丝的量将减小，从而有利于减小焊丝的消耗，即焊接速度越快，单位长度下所消耗的焊丝量减少。

但增加焊接速度，对系统其他

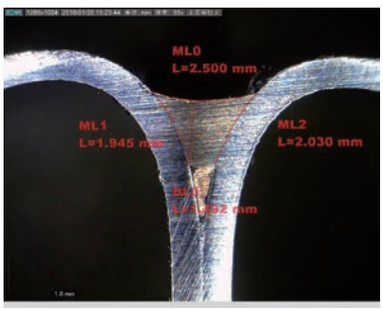
（a）50mm/s焊缝成型形貌



（b）50mm/s焊缝断面金相

图6 50mm/s焊接效果

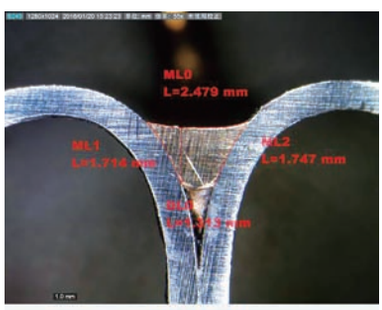
（a）60mm/s形貌图



（b）60mm/s焊缝断面金相图

图7 60mm/s焊接效果

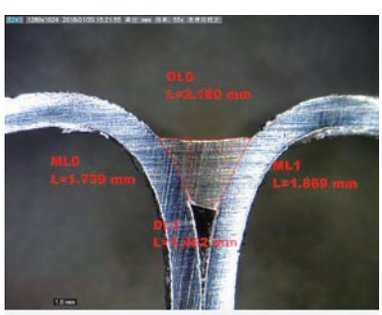
（a）70mm/s焊缝成型形貌图



（b）70mm/s焊缝断面金相图

图8 70mm/s焊接效果

（a）80mm/s焊缝成型形貌图



（b）80mm/s焊缝断面金相图

图9 80mm/s焊接效果

表2 不同焊接速度下焊缝尺寸及拉伸数据表

焊接效率 /mm·s^{-1}	功率 *w*	送丝速度 /m·min^{-1}	热丝电流 A	熔宽 /mm	熔深 mm	宽深比	线载荷 /N·mm^{-1}
50	3 400	3.4	100	2.75	1.6	1.72	266.9
60	3 400	3.6	100	2.5	1.49	1.68	239.5
70	3 600	4	120	2.48	1.31	1.89	238.2
80	4 000	4.6	150	2.18	1.46	1.49	239.8

质量要求也相应有所增加，具体如下：车身质量，主要指顶盖与侧围表面尺寸公差符合要求（车身尺寸越长，越难控制）；车身左右重定位精度，控制在±1mm内。装配间隙，顶盖压块，压紧时保证顶盖与侧围装配间隙小于0.3mm，且表面无压痕；压块长度减小，有利于压块与顶盖的贴合。送丝稳定性，送丝速度与焊接速度约为1:1，焊接速度越快，送丝速度稳定性要求越高，对管线摩擦阻力控制越严格，建议用桶丝，配Powerline管。送丝量越大，更换丝盘就更加频繁，对节拍的影响就越大，建议用桶丝，Powerline最长15m。除尘效果，焊接速度越快，功率越大，飞溅越大，烟尘量也会增加，对工位除尘要求更高。

4. 研究稳定参数下的装配间隙对焊缝成型的影响规律

研究激光参数：3 400W、50mm/s焊速、3.4m/min送丝速度、光斑D为3.52mm及热丝电流I为100A的稳定参数下，使焊缝间隙在0～1.2mm渐变。

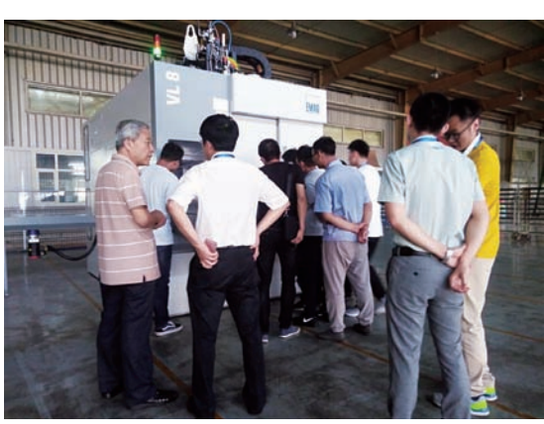
由实验结果可知，在0～1.2mm的间隙时，焊缝未出现漏焊，但随着间隙的增大，焊缝表现出明显的下陷，同时在1.2mm间隙处，在焊缝与母材搭接处出现明显的镀锌层烧损。

整体尺寸看，间隙值在0.5mm以下时，焊缝成型基本无变化。在0.5～1.2mm区间，随着间隙值增大，焊缝下陷程度越来越大。建议的焊缝装配间隙应在0.5mm以内。

AUTO1950

埃马克新能源电动汽车主题日系列活动长春站收官

2018年7月19-8月9日，埃马克以长春为据点，针对黑龙江、吉林、辽宁三省的用户，携手刀具、CNC、软件、工业润滑等业内领先的合作伙伴将联合举办“职业教育&培训解决方案”“新能源电动汽车电机轴”“汽车刹车盘”和“差速器壳体”四场电动汽车主题日系列活动。活动自开始以来成功吸引了该地区核心企业的积极参与，主题演讲辅以关键件加工演示，使得现场的交流互动气氛热烈非常。

埃马克在汽车零部件加工方面拥有高效完备的解决方案，在大批量的盘类、轴类等回转体零件生产上更是有着无可匹敌的实力。面对新能源汽车的高速发展，埃马克同样顺应时势、抓住机遇，依托自身核心技术优势，为电动汽车零部件的制造陆续推出了成熟的技术解决方案，其实力在混合动力双门超级跑车BMWi8中对换挡套管、差速器、转子等关键零件的加工解决方案中得到了完美体现。在本次主题日活动中，埃马克特别挑选了具有代表性的汽车零部件——“汽车刹车盘”“差速器壳体”“新能源电动汽车电机轴”分别作为其中三场活动的主题，与合作伙伴一起，全面解析当前关键件加工的高效解决方案，让到场嘉宾都直呼生动详尽，受益匪浅。

埃马克中国北方区销售经理佟富永先生表示：“与掌握前沿动态同样重要的是，让机床发挥其最大潜能。此次，埃马克首次尝试性地以‘培训’为主题与客户进行交流。埃马克学院已经成立多年，拥有一批经验极其丰富的专家提供专业的技术指导，包括维修培训、操作培训、编程培训、安装培训等。我们想为客户在人才技术水平提升方面做得更多。”