

浅谈白车身顶盖激光钎焊产品工艺设计及焊接缺陷调试方法

余友松 王勇 邢家坤 程成 叶垒 张瑾

(东风本田汽车有限公司, 武汉 430056)

摘要:结合白车身顶盖激光钎焊在东风本田汽车有限公司的工业化实际应用,探讨了顶盖激光钎焊产品工艺设计及焊接缺陷调试方法,重点介绍了顶盖激光钎焊产品结构、零部件尺寸精度控制、顶盖激光钎焊生产线工艺规划和平面布置、焊接缺陷调试方法,以及激光钎焊人工检查及返修工艺。通过全面地介绍顶盖激光钎焊产品工艺设计和缺陷调试方法,为后续新车型顶盖激光钎焊产品设计和工艺规划提供技术参考。

关键词:激光钎焊 产品结构 尺寸精度控制 工艺规划 缺陷调试

中图分类号:U466

文献标识码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20220298

Discussion on the Product Process Design and Welding Defects Debugging Method of Laser Brazing for BIW Roof

Yu Yousong, Wang Yong, Xing Jiakun, Cheng Cheng, Ye Lei, Zhang Jin

(Dongfeng Honda Automobile Co., Ltd., Wuhan 430056)

Abstract: This paper discussed the product process design and welding defects debugging method of the laser brazing for the roof of Body In White (BIW) based on the industrial practice and application of the laser brazing of the BIW roof in Dongfeng Honda Automobile Co., Ltd., and focused on product structural design of the laser brazing of roof, component dimension accuracy control, production line process planning and plane layout of roof laser brazing, welding defects debugging method, manual inspection and repair process. By comprehensive introduction of process design and defect debugging method of laser brazing for BIW roof, the paper provided technical reference of laser brazing product design and process planning for subsequent new vehicle roof.

Key words: Laser brazing, Product structural design, Dimensional accuracy control, Process planning, Defect debugging

1 前言

传统点焊工艺在白车身顶盖焊接技术中已不能满足顾客对汽车外观品质需求^[1],而顶盖激光钎焊具有焊缝美观、速度快、热影响区小、强度高、成本低、密封效果好的优点,因此汽车企业在白车身制造中,积极引进和采用顶盖激光钎焊技术来适应市场需求,汽车制造业领域这种需求为激光

焊技术应用提供的广阔的发展前景^[2-5]。目前顶盖激光钎焊产品工艺设计研究已日趋成熟,顶盖搭接结构设计^[6]、截面尺寸设计对顶盖激光钎焊质量至关重要^[7],另外激光焊接工艺参数设置也很重要,激光功率、激光头偏转角设置、出光和出丝延迟设置、送丝速度以及机器人焊接速度和焊接轨迹都会影响到激光焊缝质量^[8]。顶盖激光焊接系统设计、设备选型和工装夹具设计已有成熟应用

作者简介:余友松(1986—),男,工程师,学士学位,研究方向为汽车白车身焊装工艺规划,以及焊装新技术导入新工艺研究。

参考文献引用格式:

余友松,王勇,邢家坤,等.浅谈白车身顶盖激光钎焊产品工艺设计及焊接缺陷调试方法[J].汽车工艺与材料,2023(7):22-30.

YU Y S, WANG Y, XING J K, et al. Discussion on the Product Process Design and Welding Defects Debugging Method of Laser Brazing for BIW Roof[J]. Automobile Technology & Material, 2023(7): 22-30.

方案^[9],激光焊缝缺陷定义和识别,对激光焊接后品质确认和人工返修提供了依据,而对焊缝缺陷的原因分析也为激光焊接缺陷的改善提供了方法^[10]。

东风本田汽车有限公司在英斯派、十一代思域车型上引入白车身顶盖激光钎焊工艺,本文结合英斯派、十一代思域项目顶盖激光钎焊工业化实例,详细介绍了顶盖激光钎焊产品结构设计、焊装工艺方案设计、焊缝尺寸监控、焊接缺陷调试方法、自动打磨返修和自动检查外观。

2 白车身顶盖激光钎焊介绍

激光钎焊(图1)是利用激光光束作为热源,聚焦后的光束照射在填充的焊丝表面,焊丝在光束能量持续加热下熔化形成高温液态金属,液态金属浸润到被焊零件连接处,在适当的外部条件下,使之与工件形成良好的结合,工件间的连接是通过钎料熔融金属实现,母材本身不能被激光严重熔蚀损伤。

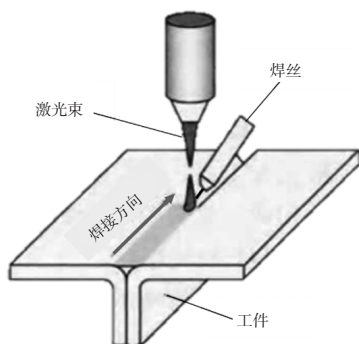


图1 激光钎焊

顶盖激光钎焊应用对汽车整车外观品质提升和成本消减有很大贡献(图2),侧围与顶棚搭接连续一体化,颜色统一化,使整车外观更美观;整车采用顶盖激光焊技术后,可消减装饰条及涂胶密封工序,整车成本可减少约90元/辆,大大节省成本。

3 顶盖激光钎焊产品结构设计

顶盖激光钎焊产品结构设计与传统点焊设计完全不同,所以在进行顶盖激光焊产品设计和工艺审查时,需要注意以下几点。

本章节主要罗列了一些产品设计和工艺审查

要点:顶盖与侧围产品结构设计形式选择、顶盖与侧围搭接形式、顶盖外板翻边止口、顶盖与侧围装配后的间隙、起弧和收弧特殊位置止口设计等。

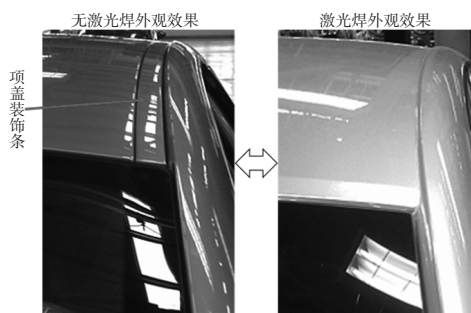


图2 顶盖外观对比

a. 顶盖与侧围产品结构设计形式选择:白车身顶盖与侧围常见结构形式有:搭接式、角接式、直角卷边对接、卷边对接(图3),根据实际经验推荐采用卷边对接。

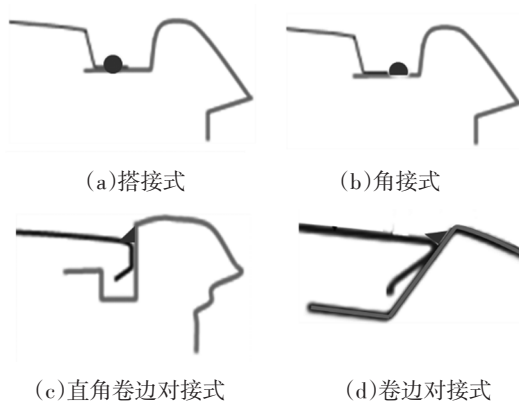


图3 顶盖与侧围结构形式

b. 顶盖与侧围对接设计,宜采用卷边对接形式,有利于激光焊缝装配间隙的精度控制(图4)。

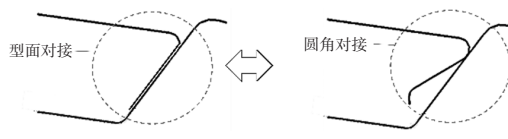


图4 顶盖与侧围对接结构对比

c. 创建翻边止口结构来增加顶盖刚性(图5)。

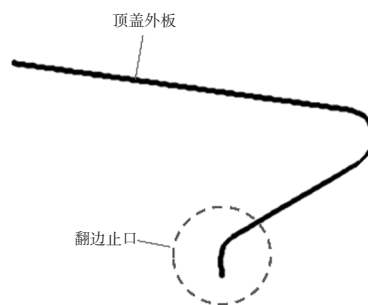


图5 顶盖翻边止口刚性

增加顶盖刚性目的是避免以下几点问题:

顶盖在自身的重力作用下变形,尤其对于长而平的顶盖;

冲压出来后变形;

人工操作时变形;

因物流引起的变形;

工装夹具定位压紧时造成的变形。

d. 顶盖与侧围装配后,顶盖翻边止口与侧围Y向和Z向要求如下:

顶盖翻边止口与侧围激光焊搭接面夹角12°区域不能发生干涉(图6);

顶盖翻边止口与侧围Z向止口间隙≥3 mm(图6)。

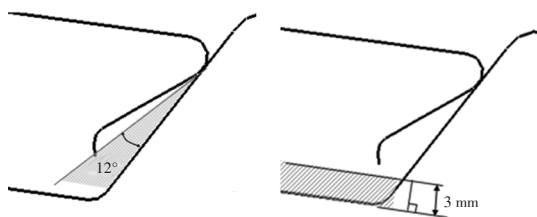


图6 顶盖翻边止口干涉性

e. 顶盖激光焊起弧和收弧位置,顶盖边缘与侧围Z向止口间隙≥2.5 mm,保证顶盖Z向浮动(图7)。

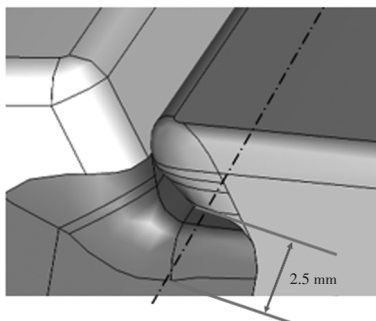


图7 顶盖起止位置

f. 侧围激光焊搭接面要保持光顺,禁止有过渡型面或台阶面(图8)。

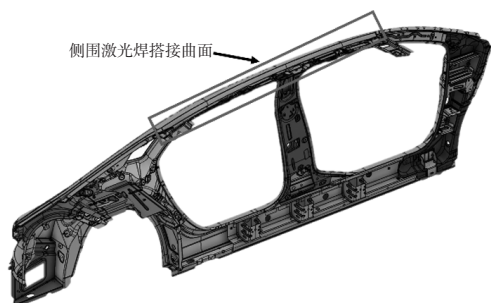


图8 侧围激光焊接面

4 顶盖激光钎焊工艺流程

顶盖激光钎焊工艺分2部分,第1部分成形工艺:车身合拼成形→顶盖预成形→顶盖激光钎焊(图9);第2部分返修检查工艺:焊缝自动打磨→焊缝质量自动检查→激光焊缝人工检查及返修,其中焊缝自动打磨、焊缝自动检查为可选工艺,不强制要求。

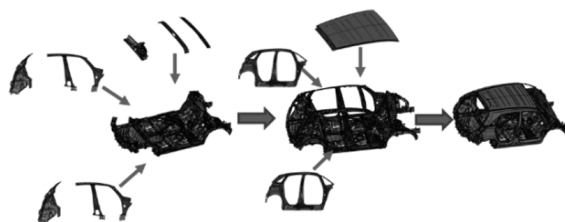


图9 顶盖激光钎焊工艺分块

5 顶盖激光钎焊工艺规划

顶盖激光钎焊生产线规划有以下几个工程:顶盖预成形、顶盖激光焊、焊缝自动打磨、焊缝品质自动检查、人工检查及返修5个工位,其中焊缝自动打磨、焊缝自动检查属于可选工位,是顶盖激光钎焊品质提升辅助工艺。本文详细介绍了顶盖激光焊接线体各工位设备类型、数量,为后续激光焊线体规划或改造提供参考。

东风本田汽车有限公司英斯派车型顶盖激光焊线体规划4个自动化工位和1个人工在线检查/返修工位(图10)。

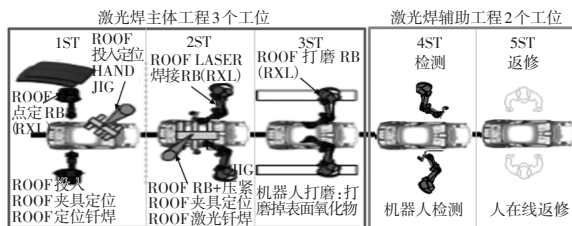


图10 顶盖激光钎焊线体工位布置

第1个工位(1ST):顶盖预成形采用1台搬运机器人和2台点焊机器人以及车身下部定位夹具组成,主要作用是将顶盖与车身进行预定位,打点位置见图11,顶盖前部和后部分别打2/2个定位焊点,确定顶盖与车身X向和Y向位置。

顶盖成型夹具及定位设计如图12所示。

第2个工位(2ST):顶盖激光焊接采用1台工装机器人和2台激光焊机器人以及车身定位工装,顶

盖在1ST进行预点定后,由输送台车传至2ST激光焊工位,首先工装机器人对顶盖进行压紧,然后由21A/B激光焊机器人对顶盖进行激光焊接(图13)。

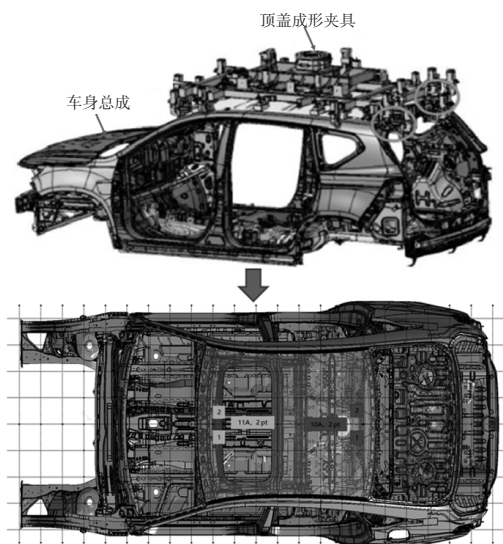


图11 顶盖成形工位打点图

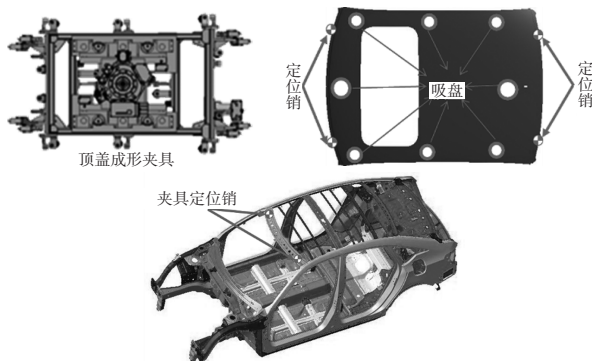


图12 顶盖成形夹具及定位设计

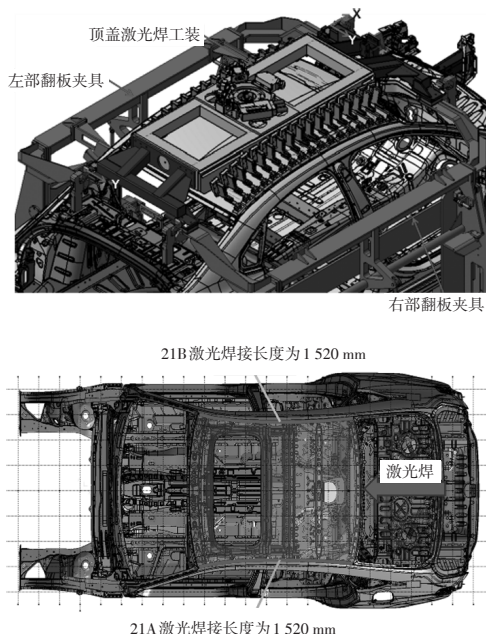


图13 顶盖激光焊工装及打点

本工位还需要建激光安全防护房,它的作用是为激光焊接提供密闭的空间,保护人员不受激光辐射的伤害(图14)。



图14 激光安全防护房

激光安全防护房由钢结构主体和铝型材扣板组成;激光安全防护房防护的激光波长范围为900~1080nm;配备排烟系统,应保证激光房内20~25次/h的排放次数。激光房内装有监控器(含液晶监视器和摄像头)。内部光照强度要求不小于400lx。激光房安装完毕后必须由国家认证的第三方机构出具安全合格证。

第3个工位(3ST):激光焊缝自动打磨由32A/B机器人分别抓取1套打磨设备对激光焊缝进行打磨,保证激光焊缝表面质量(图15)。主要设备有自动打磨头、自动更换打磨片设备,打磨轨迹长度为1520mm,每道激光焊缝打磨2次,自动打磨片厚度选用3.5mm(激光焊缝理论宽度为(2±0.5)mm)。另外该站位还配有除尘设备和封闭作业间。

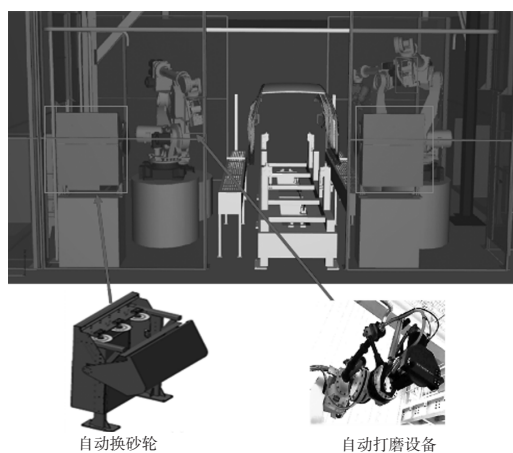


图15 焊缝自动打磨设备

激光焊缝打磨前后质量对比如图16所示。

打磨后焊缝表面粗糙度要求如下:

整条激光焊缝平均粗糙度 $R_a \leq 1.0 \mu\text{m}$,每50mm测量1个点;

整条激光焊缝 C 级缺陷 R_a (粗糙度 $> 1.6 \mu\text{m}$) 所占百分比不超过 10%。

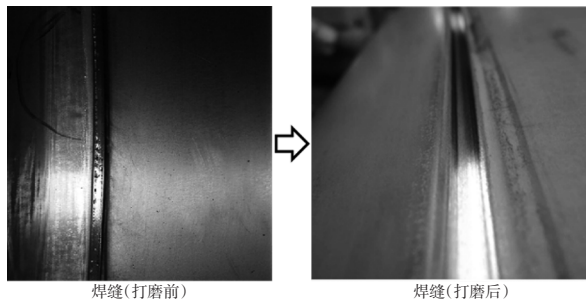


图 16 焊缝打磨质量对比

第 4 个工位 (4ST): 激光焊缝品质自动检查由 2 台机器人携带 2 套焊缝品质检测设备, 包含 3D 激光相机、激光检测分析控制系统, 记录并反馈激光焊缝品质缺陷 (图 17)。

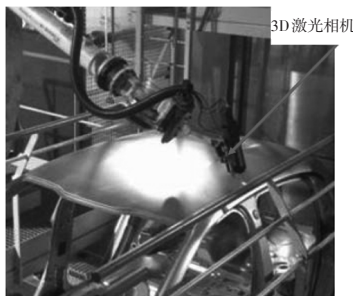


图 17 焊缝品质自动检查设备

第 5 个工位 (5ST): 激光焊缝人工检查返修工位, 由 2 名操作工分别负责左右焊缝质量检查和返修, 使用的设备有打磨盘、打磨针、TIG 焊机, 以及 A、B 胶枪 (图 18)。

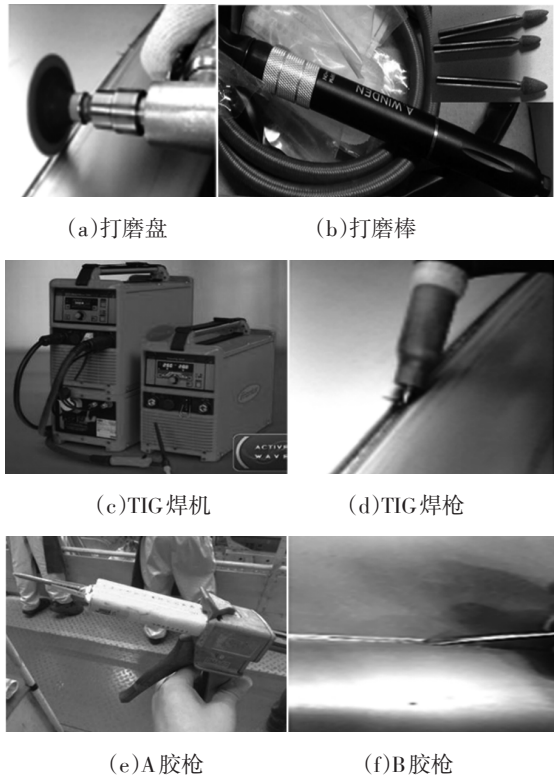


图 18 焊缝人工返修设备

6 顶盖激光钎焊主要工艺参数设置

顶盖激光钎焊主要工艺参数有: 激光功率、机器人焊接速度、送丝速度、激光头偏转力 SA/TA、激光出光延时、送丝延时等, 具体参数的设置以满足焊接质量和生产节拍的实际需求。

6.1 激光焊接设备工艺参数。

激光焊接设备工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光焊接工艺参数

设备	激光器		SA		焊接头		TA		送丝机					
参数类型	功率/W	开始时间/ms	停止时间/ms	发射位置	力量值偏置力补偿	监视	限位	监视	抱闸	速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	电流/A	开始时间/ms	结束时间/ms	
1	2 300	0	0	是	1	0	是	是	是	否	4 100	120	0	0
2	1 800	0	120	否	0	0	是	否	是	否	500	120	0	0

SA 为控制激光头绕车身坐标系 X 轴方向旋转偏执力 (图 19), 参数设置为“0”时, 激光头焊接时被抱死, 此时对白车身激光焊缝位置精度要求很高, 不允许白车身激光焊缝 Y 向超过 1.5 mm 波动, 一般仅在起弧点和收弧点位置使用, 正常焊接轨迹该参数设置为“1”, 此时焊丝进入激光焊缝焊接过程中, 即便车身 Y 向尺寸有波动, 激光头可以横向摆动, 引导光头正常焊接。当激光焊缝

Y 向偏差过大, SA 轴偏出了设定的 SA_range 范围时, 激光焊自动焊接系统会立即停止机器人工作。

TA 为控制激光头垂直补偿面 (即汽车坐标系 Z 轴方向), 如图 19 所示, 运动范围是 $\pm 5 \text{ mm}$, 设置方法同 SA 参数一样。

激光功率、出丝速度则按照填丝量、焊接速度等条件不同, 根据实际焊接效果调整参数值。

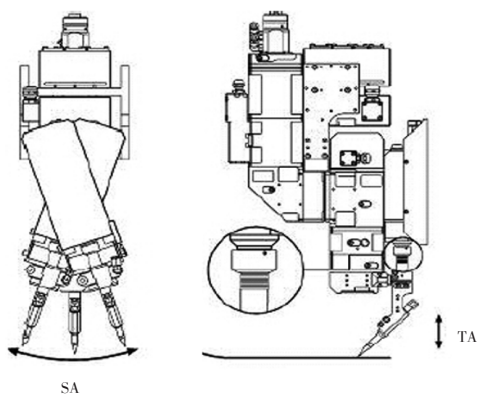


图19 激光头

激光出光延时、送丝延时一般用在改善起弧、收弧位置焊接缺陷,例如:起弧时延迟送丝、收弧时延迟收光,可避免焊瘤缺陷;起弧延迟出光、收弧延迟收丝,可避免烧穿缺陷。

6.2 机器人轨迹示教

激光焊3D仿真模拟时,机器人焊接轨迹要按照一定的角度来模拟(α 、 β 、 σ);除起收弧特殊位置外,其它正常焊接轨迹中, α 角要保持一致的角度, β 角和 σ 角要保持均匀、单向的变化幅度(表2)。

激光钎焊轨迹示教点的布置,原则为50 mm点距间隔。

表2 激机器人轨迹工艺卡

点号	类型	精度	机器人加速调整比率/%	速度/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\alpha(R_i)$ / $^\circ$	$\beta(R_i)$ / $^\circ$	$\sigma(R_i)$ / $^\circ$
P5	L	CNT100	90	70	-7	10	1
P6	L	CNT100	90	70	-2	2	4
P7	L	CNT100	90	70	-2	0	2

激光头与焊缝角度要求,推荐激光头与X向 α 角为 5° ,Z向 β 角为 45° ,根据实际焊接效果可微调角度值(图20)。

7 顶盖激光钎焊尺寸精度设计及控制方法

顶盖激光钎焊对白车身零件冲压件和焊装总成件均有精度要求,其中冲压零件包括顶盖外板、侧围外板,焊装总成件包括侧围总成、白车身总

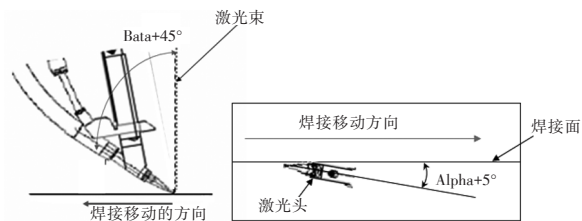


图20 激光头与焊缝角度

7.1 顶盖激光钎焊对冲压零件精度要求

7.1.1 顶盖外板尺寸精度

整条焊缝搭接线轮廓度要求为0.5 mm;每100 mm内0.25 mm。

测量点距离要求:在顶盖首尾100 mm内,每20 mm取一测量点,其他顶盖位置每50 mm取一个测量点(图21)。

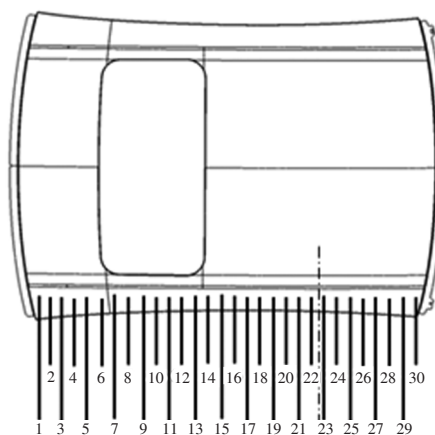


图21 顶盖外板精度测量

7.1.2 侧围外板尺寸精度

整条焊缝搭接线轮廓度为0.5 mm;每100 mm内0.25 mm。

测量点距离要求:在侧围首尾100 mm内,每20 mm取一测量点,其他侧围位置每50 mm取一个测量点(与顶盖外板测量点一一对应),如图22所示。

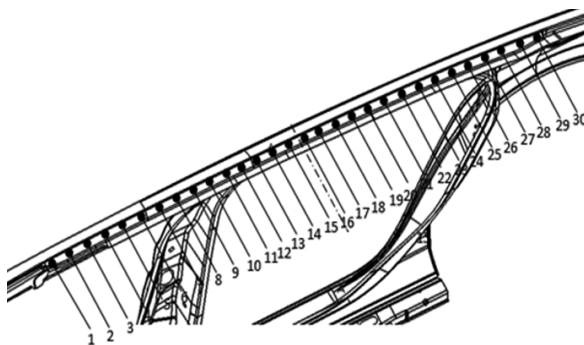


图22 侧围外板精度测量

7.1.3 焊装白车身总成(图23)

- a. 车身Y向开度: ± 1.0 mm;
- b. 车身Y向位置度: ± 1.5 mm;
- c. 顶盖X向位置度: ± 1.0 mm(顶盖前沿和后沿各取2个检测点);
- d. 顶盖Z向位置度: ± 2.0 mm(顶盖4个角各区1个检测点)。

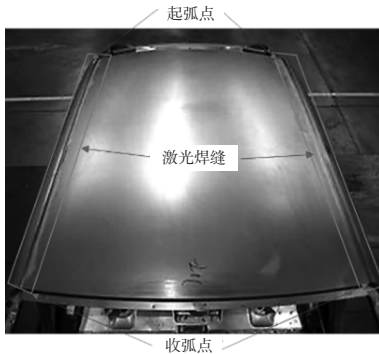


图23 白车身顶盖激光焊接尺寸精度

7.2 顶盖激光钎焊白车身装配间隙要求

激光焊缝标准间隙要求小于0.3 mm,且均匀过渡,前期白车身试制阶段需要对激光焊缝间隙进行监控和测量,测量左右两侧激光焊缝1至17位置焊缝间隙和焊缝质量并记录(图24)。

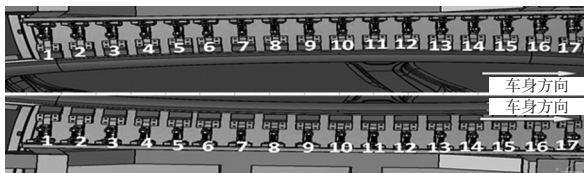


图24 激光焊缝间隙测量

8 顶盖激光钎焊缺陷及调试

8.1 合格的激光焊缝定义

焊缝呈下凹趋势,没有鼓起;焊缝表面平整光滑(图25)。



图25 合格激光焊缝

8.1.1 顶盖激光钎焊人工检查标准一(图26)

- a. 外观区域1(长450 mm,顶盖前部和后部): 焊缝呈下凹趋势,没有鼓起,焊缝平整光滑;

- b. 外观区域2:允许焊缝高度不均,但不能有明显凸起或下凹。

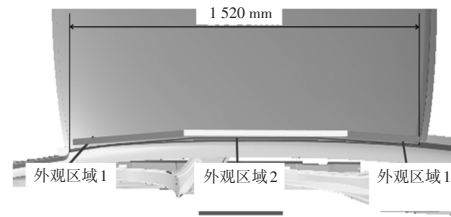


图26 激光焊缝外观分区

8.1.2 顶盖激光钎焊宏观金相分析标准二

宏观金相分析(图27)要求如下: $EdL > 0.5$ mm; $Lc > 2$ mm; $Li > 0.5$ mm; $Lf > 0.5$ mm。

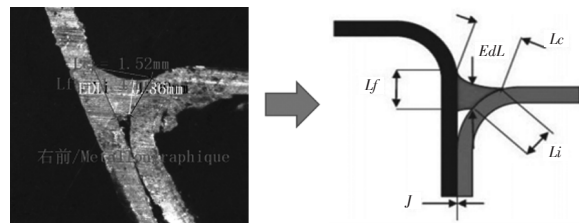


图27 激光焊缝金相分析

8.2 顶盖激光钎焊缺陷

顶盖激光钎焊常见主要缺陷有:焊缝偏移、凹陷、断焊、焊瘤、表面不光滑、局部宽度突变、气孔、过烧、烧穿、飞溅、未熔合、缺料(表3)。

8.3 常见激光钎焊缺陷的调试方法

焊缝偏离缺陷及调试方法如表4所示。

焊缝表面不光滑(高低不平)缺陷及调试方法如表5所示。

气孔缺陷及调试方法如表6所示。

凹陷缺陷及调试方法如表7所示。

起弧/收弧位置常见缺陷:烧穿、缺料、焊瘤及调试方法如表8所示。

断焊缺陷及调试方法如表9所示。

9 结束语

顶盖激光钎焊作为一种白车身连接技术,有着传统点焊工艺无法比拟的优势,它为薄板连接提供了新的解决思路。不仅大大提升了车辆外观品质,增强了车身连接强度,降低了车身质量,也节约了设备投资成本。随着近年激光焊接工艺和设备日益成熟,越来越多的整车厂开始使用激光焊接技术,未来激光焊接技术必然得到更加广泛地应用和研究。

表3 激光钎焊缺陷分类

缺陷类型	1.焊缝偏移	2.凹陷	3.断焊	4.焊瘤
描述	焊缝完全偏移到上部钢板或下部钢板	局部焊缝不平滑,明显低于两侧焊缝平面	局部或者长条焊缝中断缺失	焊缝上可见局部材料堆积
缺陷图片				
缺陷类型	5.表面不光滑	6.局部宽度突变	7.气孔	8.过烧
描述	焊缝外观的多样性:如隆起,波浪状,鼓包,线状瑕疵等	焊缝表面的局部宽度与整个长度不匹	焊缝上可以看见一个或多个缩孔	由于热量属于过多,导致焊缝连接处钢板表面塌陷
缺陷图片				
缺陷类型	9.烧穿	10.飞溅	11.未熔合	12.缺料
描述	母材熔化,形成孔洞	在焊缝周围钢板上会有飞溅熔化金属颗粒	焊缝上有未融化残留钎丝	一般在起弧位置,焊缝缺少钎料,填充不足
缺陷图片				

表4 焊缝偏离调试

焊缝偏离	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
激光头	<p>a.偏执力设置不合理:检查偏执力值,根据实际焊偏方向,更改偏执力值;</p> <p>b.平衡力需要重新校准:用Basis-HMI软件连接,按照标准步骤进行校准;</p> <p>c.防护镜片需要更换:镜片中心有密集污点、烧损都需要更换;</p> <p>d.光斑与焊丝位置不对中。打开光头红光,观察光斑与焊丝、焊缝相对位置,光斑在焊丝和焊缝中心,光斑又能照在顶盖和侧围零件。或者通过显示器观察光与焊丝相对位置,焊丝末端需要在十字叉中心处)</p> <p>e.焊接头上连接传感器与顶部控制器的电缆线束是否呈自由状态。空走轨迹,观察行走过程中该电缆是否被其他线缆压迫或牵扯;</p>
尺寸精度	<p>a.白车身尺寸发生变化,顶盖跨距变大,Y向超差,光头焊接过程中是沿着焊缝随动,此时应该优化车身尺寸;</p> <p>b.顶盖与侧围焊缝间隙超差,此时从车身尺寸、零件精度分析原因,临时措施可以增加顶盖激光焊压力、减小压头与零件贴合间隙;适当增加送丝量,可以增加送丝机出丝速度或者降低机器人速度;</p> <p>送丝速度过慢,送丝不畅或者速度值设置过低。</p>
工艺参数	<p>检查方法:</p> <p>观察送丝机上小电机电流,是否偏大,偏大表示送丝阻力较大。或者观察工艺柜上显示的实际送丝速度是否超差。定时定速出丝3次,测量焊丝长度,与理论偏差对比是否过大,超过3%就表示送丝阻力较大。</p> <p>解决措施:</p> <p>检查送丝管路送丝管路至送丝机最前端690 mm的送丝管是否需要更换;</p> <p>送丝机的导丝轮的压紧力是否需要重新标定;</p> <p>焊丝表面质量—是否有划痕、锈蚀等问题;</p>
导丝嘴	检查送丝嘴是否有烧损和变形,定期更换(300~1 000台换一次)

表5 焊缝表面不光滑调试

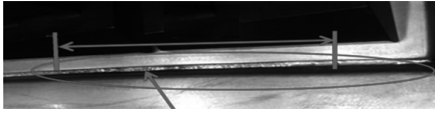
焊缝表面不光滑	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
激光头	(1) 光头保护镜片中心有密集污点, 造成透光率有波动, 定期更换; (2) 焊丝与光斑不对中。优化机器人轨迹和姿态, 调整激光头位置和角度。打开光头红光, 观察光斑与焊丝、焊缝相对位置, 光斑在焊丝和焊缝中心。或者通过显示器观察光与焊丝相对位置, 焊丝末端需要在十字叉中心处。
尺寸精度	侧围外板零件问题。例如: 侧围外板激光焊搭接线±2 mm 高度方向零件表面轮廓度超差, 或有模具造成的拉延线, 或是焊接飞溅
导丝嘴	检查送丝嘴是否有烧损和变形, 定期更换
激光源	激光功率不足。启动服务 A, 检查激光功率。必要时适当增加激光功率

表6 气孔调试

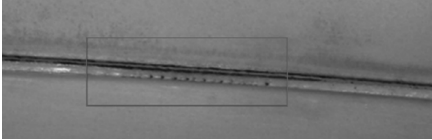
气孔	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
工件	检查工件清洁度: 多余的锌、外来物质(油、水、胶、飞溅焊渣等)。激光焊上件区域要求用无纺布清洁零件
气流	气流影响: 检查激光头上压缩空气、夹具上的压缩空气是否漏气

表7 凹陷调试

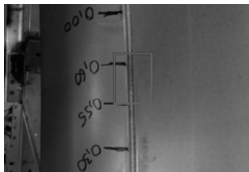
凹陷	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
尺寸精度	焊缝间隙过大, 间隙大于 0.3 mm, 或者间隙过渡不均匀。从零件精度、车身尺寸波动、工装压头贴合同隙和压紧力分析优化焊缝间隙
工艺参数	激光功率设置过大, 适当降低功率; 送丝速度过低。检查送丝速度设定值和实际值是否有偏差, 如有必要, 需要更正或校准送丝速度; 机器人运动速度不均匀, 速度太快, 以及机器人姿态变化较大位置, 均可能导致焊缝塌陷。

表8 起弧/收弧位置常见缺陷调试

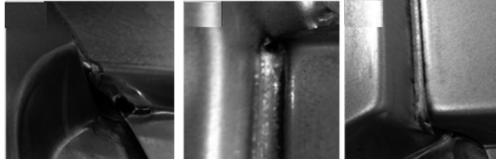
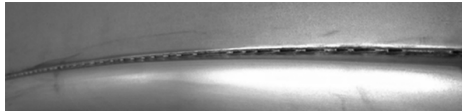
起弧/收弧位置常见缺陷: 烧穿、缺料、焊瘤	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
尺寸精度	零件起弧/收弧位置 X 向白车身尺寸发生波动, 优化车身尺寸稳定性和白车身精度;
工艺参数	a. 机器人焊接轨迹起弧/收弧点位置偏差。空走轨迹, 如有偏差, 须对轨迹进行调整; b. 激光出光延时、焊丝送丝延时设置是否合理: 起弧焊瘤可延迟送丝; 起弧缺料可以取消送丝延迟, 收弧缺料可以延迟送丝; 起弧烧穿可以延迟出光, 或者降低起弧激光功率; 粘丝一般出现在收弧位置, 可以延迟关光。

表9 焊缝断焊调试

断焊	
缺陷类型	
检查项目	调试内容
设备参数	如果工艺柜报警“激光源错误”和“激光程序号丢失”, 则连接 lasernet 到激光器, 看故障记录, 并下载 events 发给激光设备供应商, 协助分析设备问题。 如果工艺柜报警“没有护套线”或者“焊丝堵塞”。观察实际送丝速度, 核实焊丝出丝长度偏差是否超过 10%。如有, 检查送丝管路, 或者送丝速度传感器故障。

参考文献:

- [1] 飞田英明, 柴田洋一, 铃木幹治, 等. 汽车车身点焊技术的现状和未来[J]. 世界汽车, 1986(4): 9-12.
- [2] 杨旭乐, 魏庆丰, 王艳, 等. 汽车零部件的激光焊接技术[J]. 现代零部件, 2002(5): 24-25.
- [3] RUDIGER K. 高效的激光焊接[J]. 现代制造, 2006(11): 50-52.
- [4] 王晶, 王俊恒, 林久, 等. 激光焊接技术的发展及研究现状[J]. 东方电器评论, 2013, 27(108): 21-26.
- [5] 张旭东, 陈武柱. 激光焊接技术进展及其在汽车制造中的应用[J]. 世界汽车, 2003(7): 53-56.

(下转第 36 页)

- [11] 韦增文. 浅谈商用车常用螺栓结构及防松能力提升方法[J]. 汽车技术, 2016(5): 39-40.
- [12] DRAVID S, TRIPHATI K, CHOUKSEY M. Experimental study of loosening behavior of plain shank bolted joint under dynamic loading[J]. International Journal of Structural Integrity, 2015, 6(1):26-39.
- [13] DRAVID S, TRIPHATI K, CHOUKSEY M. Role of washers in controlling loosening of full threaded bolted joints [C]//2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, 2014(14): 543-552.
- [14] PINELLI JP, SUBRAMANIAN CS, TABORA J. Experimental study of breakaway highway sign connections[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(1):17-20.
- [15] BHATTACHARYA A, SEN A, DAS S. An investigation on the anti-loosening characteristics of threaded fasteners under vibratory conditions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010(45): 1215-1225.
- [16] 景秀并. 双螺母防松振动性能分析与研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [17] SAWA T, ISHIMURA M, NAGAO T. A loosening mechanism of bolted joints under repeated transverse displacements[C]//Pressure Vessels & Piping Conference, 2012 (78398): 333-341.
- [18] TAKEMASU T, MIYAHARA H. Development of thread rolled anti-loosening bolts based on the double thread mechanism and a performance evaluation[J]. JSME International Journal Series a Solid Mechanics and Material Engineering, 2005, 48(4):305-310.
- [19] SHINBUTSUA T, AMANO S, TAKEMASUB T, et al. Thread rolling and performance evaluations of a new anti-loosening double thread bolt combining a single thread and multiple threads[C]//International Conference on the Technology of Plasticity, 2017, 207, 603-608.
- [20] SASE N, NISHIOKA K, KOGA S. An anti-loosening screw-fastener innovation and its evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 77(1-3):209-215.
- [21] ZHANG X, XIE J, HOU G. Development of anti-loosening nuts using shape memory alloys[J]. Materials Science Forum, 2000, 327-328:35-38.
- [22] NODA N A, XIAO Y, KUHARA M, et al. Optimum design of thin walled tube on the mechanical performance of super lock nut[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. 2008, 2(6): 780-791.

A
&M

(上接第30页)

- [6] 张欣. 浅谈顶盖激光焊接技术[J]. 汽车制造业, 2017 (21): 57-61.
- [7] 蒋伟光, 熊志明. 浅议激光焊接在汽车顶盖的应用[J]. 汽车技术, 2016(12): 58-59.
- [8] 虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-268.
- [9] 宋扬, 李银宗. 轿车白车身顶盖激光钎焊的应用研究[J]. 金属加工(热加工), 2015(4): 29-32.
- [10] 冯振坡, 国莉. 轿车顶盖激光钎焊焊缝缺陷原因分析[J]. 汽车工艺与材料, 2014(10): 45-48.

A
&M