

PFMEA在车身顶盖激光机器人焊接中的分析、应用与研究

□ 浙江众泰汽车有限公司湖北大冶公司 / 张正 王钧 程伟

本文就SUV车型在过程规划和设计阶段，对车身顶盖激光焊接结构关系、工艺过程、设备参数、测量方法及激光焊接缺陷进行了综合分析，并就如何预防和克服激光焊接缺陷提出了相应的对策。在实际调试阶段将PFMEA分析结论与方法予以实践与应用，证明PFMEA分析的方法与策略是正确有效的。

汽车车身顶盖与侧围采用激光焊接，不仅外形美观、顶盖与侧围焊接强度优于普通电阻点焊，而且还大大降低了成本（如节省顶盖装饰条）。随着激光焊接技术的日臻成熟，越来越多的汽车车身顶盖采用激光焊接，由于激光焊接对板材材质、覆盖件精度、焊装夹具、机器人运行轨迹、焊缝实时监控、跟踪和调整、模具、检具和激光焊接设备要求极为严苛，一旦在冲压、焊接过程中任何一个环节出现问题，就会出现漏焊、焊穿、缝隙等缺陷，当整车出厂行驶一定里程后就会出现漆层破坏，导致整车漏雨（甚至在新车通过板车长途运输，在板车上不断颠簸，都有可能导致漆层破坏）。

一旦汽车顶部漏雨，FMEA故障模式和失效分析中S（Severity）

严重度达到最高级别10分，这是最终用户——顾客绝对不会容忍的最严重缺陷。

因此我们在规划车身顶盖采用机器人激光焊接的同期，运用FMEA分析方法，侧重于过程分析FMEA（即PFMEA，Process Failure Mode and Effects Analysis，过程失效模式及影响分析），组建了PFMEA分析核心小组。

小组成员包括冲压、模具、检具、传统测量方法、CMM（三坐标测量）、CCD（视觉扫描测量）、激光焊接光源、机器人程序、系统配置及相关外设（外围设备）系统性等专业工艺技术、测量技术人员。

从人、机、料、法、环、测六个方面，对影响激光焊接缺陷的影响因素进行分析，确定导致激光焊

接缺陷形成的要因。

从整个过程分析，有以下几点：

（1）侧围、顶盖单件冲压的公差要求，在控制公差（Tolerance）时，如何保证极差（Range：最大上偏差-最大下偏差）的要求。

（2）激光焊接的侧围和顶盖单件检具和传统电阻点焊检具的差异要求。

（3）顶盖和侧围总成在焊接过程中如何保证侧围和顶盖激光焊接搭接面的形位公差。

（4）从车身骨架合并第一道工序。车身下部与左右侧围、顶盖前后横梁装配焊接时，需要保证侧围总成的相对坐标位置，从而保证激光焊接面的正确位置。

（5）车身骨架与顶盖预拼及定位点焊，如何保证顶盖与车身骨

架，特别是搭接面的相对位置。

(6) 激光焊接工序中，琴键式定位块和侧围定位面，如何保证顶盖与侧围搭接面的间隙控制在0~0.35mm之间。

(7) 在过程控制中，每一道工序和每一单件、分总成件、过程工序件的尺寸、型面位置要求进行准确的测量，确认是否符合要求。因此根据特殊的测量要求，每道工序严格地定义了具体的测量方法和设备。

(8) 激光焊接光源、机器人轨迹、焊缝适时跟踪、焊枪角度、距离、激光强度大小。

因为涉及激光焊接缺陷模式和影响因素太多，所以我们还分别成立了专项的PFMEA小组，如：侧围单件、顶盖单件、侧围总成控制小

组等。

车身顶盖激光焊接缺陷模式

顶盖激光焊接的主要失效模式见附表。

图例中的每一项故障模式，其结果都是顶盖漏水、漏雨，不研究风险顺序数、不考虑发生频度，不涉及不可探测度，仅就严重度（漏水）而言，是必须要控制和解决的质量缺陷。

车身顶盖激光焊接结构分析

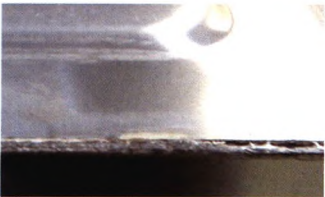
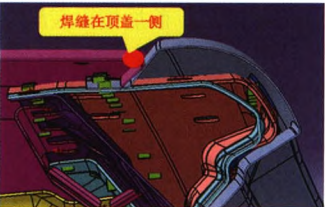
车身顶盖与侧围总成上侧围外板形成贴合面，贴合长度2 200mm。在产品定义阶段和模具制造阶段，包括侧围总成焊接及顶盖焊接各个

阶段，影响贴合缝隙的因素较多。所以，认识和理解激光焊接处结构关系，对如何在过程规划阶段先期控制其关键孔位、型面很重要。

从结构分析来看：侧围与顶盖贴合边处，侧围型面控制是关键，因为外板厚度为0.7mm，侧围单件即便符合公差要求，也满足激光焊接的极差要求，但是其强度和刚性差，在装焊过程中受内板影响很大，所以这就要求侧围焊接的五道工序必须严格控制，当全部焊接完成，形成刚性体后才不会产生新的波浪形变形。

一般侧围型面偏差要求 $T \leq \pm 0.5\text{mm}$ ，顶盖和侧围搭接面的极差 $R \leq \pm 0.1\text{mm}$ ；当二者走上下极限偏差时，如果极差在0.1mm，在焊接过程中还可以通过定位规制

顶盖激光焊接主要失效模式

缺陷类型	缺陷照片	产生原因	解决措施
焊接裂纹		零件及焊丝材质异常	1.分析钣金及焊丝的材质 2.对缺陷进行评审及返修 3.适当激光强度
焊接烧穿		电压过高； 焊接速度、送丝速度过快	1.对缺陷进行评审及返修 2.降低电压 3.选取适当的焊接速度及送丝速度
焊缝未焊满		角度不当； 零件配合间隙大于0.5mm； 焊接参数选择不合适	1.对缺陷进行评审及返修 2.选择适当的角度 3.整改零件配合间隙 4.选择适当的焊接参数
焊接偏移		角度不当； 零件配合间隙不均匀， 间隙小于0.1mm或大于0.35mm； 焊接参数选择不合适	1.对缺陷进行评审及返修 2.选择适当的坡口角度 3.整改零件配合间隙 4.选择适当的焊接参数

予以调整，保证其贴合面偏差 $\leq 0.35\text{mm}$ 。

车身骨架及分总成工艺路线分析

本节结合影响激光焊接质量的重点工序进行分析，所以不包括全工序分析，要保证激光焊接质量，首先侧围单件的贴合位公差要保证，极差要保证，才能通过焊装定位夹具，保证焊接接缝的一致性，才具备保证激光焊接质量的基础。

1. 关键的侧围工序

侧围总成共5道工序，如图1所示。

从侧围总成关键焊接工序来看，影响侧围外板与顶盖搭接面，在过程中容易产生以下问题：外板右串动的趋势，如果不规则，会导致长距离间隙不均匀，这是激光焊接的大忌。分析如图2所示。为了保证激光焊接质量，在侧围总成焊

接工序中，就要进行控制。

2. 关键的合并工序

在左右侧围总成、车身下部总成以及前后横梁合装工序，侧围、车身下部、顶盖工艺过程明确表达了贴合面的要求（见图3）。

各关键工序状态的测量方法选择与应用

从产品结构和工序过程分析，清晰表明：侧围单件、顶盖单件、侧围总成、顶盖总成、车身下部与左右侧围总成以及前后顶横梁等合装、顶盖与MB40合装及顶盖后部电阻点焊点定、顶盖与侧围激光焊接是关键工序。

如何控制关键工序，清楚地知道关键工序的单件及总成件的坐标位置、型面是否正确，满足激光焊接搭接间隙要求，必须通过有效的测量手段进行准确的测量。只有基于准确的测量数据，模具修整、夹

具定位调整、公差和极差控制才能有效和精准地进行，也可以说准确测量是激光焊接控制的关键。

1. 侧围单件和顶盖单件的测量

侧围与顶盖搭接的面：公差 $T \leq \pm 0.5\text{mm}$ ，极差 $R \leq \pm 0.1\text{mm}$ ，现行的检具，通过三位面，通过间隙尺检测其间隙，在进行MSA分析时，其重复性和一致性，因人而异，测量误差很大，基本上在 $\pm 0.2\text{mm}$ 。对于电阻焊接，其测量结果能够满足要求，但是对于激光焊接面，其结果不足以作为判定制件是否合格的依据。

因此在检具规划设计时，要充分考虑检具能否满足检测精度的要求。如图4所示，红色为激光焊接搭接面。基准孔为前中后，前后为主基准孔。

激光焊接搭接面，在设计检具时，该型面检测按 $100 \sim 200\text{mm}$ 间隔配备深度卡尺，卡尺精度为 0.02mm 。所以测量极差 $R \leq \pm 0.1\text{mm}$ 要求的偏差时，完全能够满足测量精度要求。

在检具设计时，如没有考虑到这一点或考虑制造成本，如果有CMM及扫描设备，那么检具也可以按照常规电阻点焊工艺的进行设计和规划。但是在检测，尤其是在模具调试阶段，辅助CMM检测和扫描检测是必不可少的。

以检具为基准进行CMM检测时，根据检具坐标基准，对激光焊接面，每隔 50mm 进行打点检测，记录公差和极差数据，也是完全可行的。

扫描检测：同样也以检具为基准，建立对应坐标系，扫描后将形



侧围总成共计5道工序（本图仅体现和侧围与顶盖贴合面有关工序）

图 1

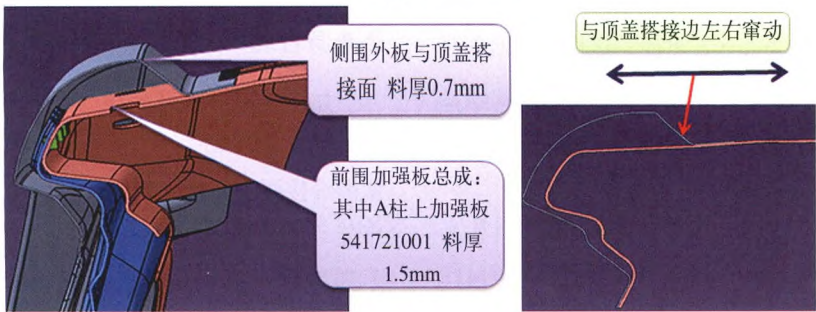


图 2

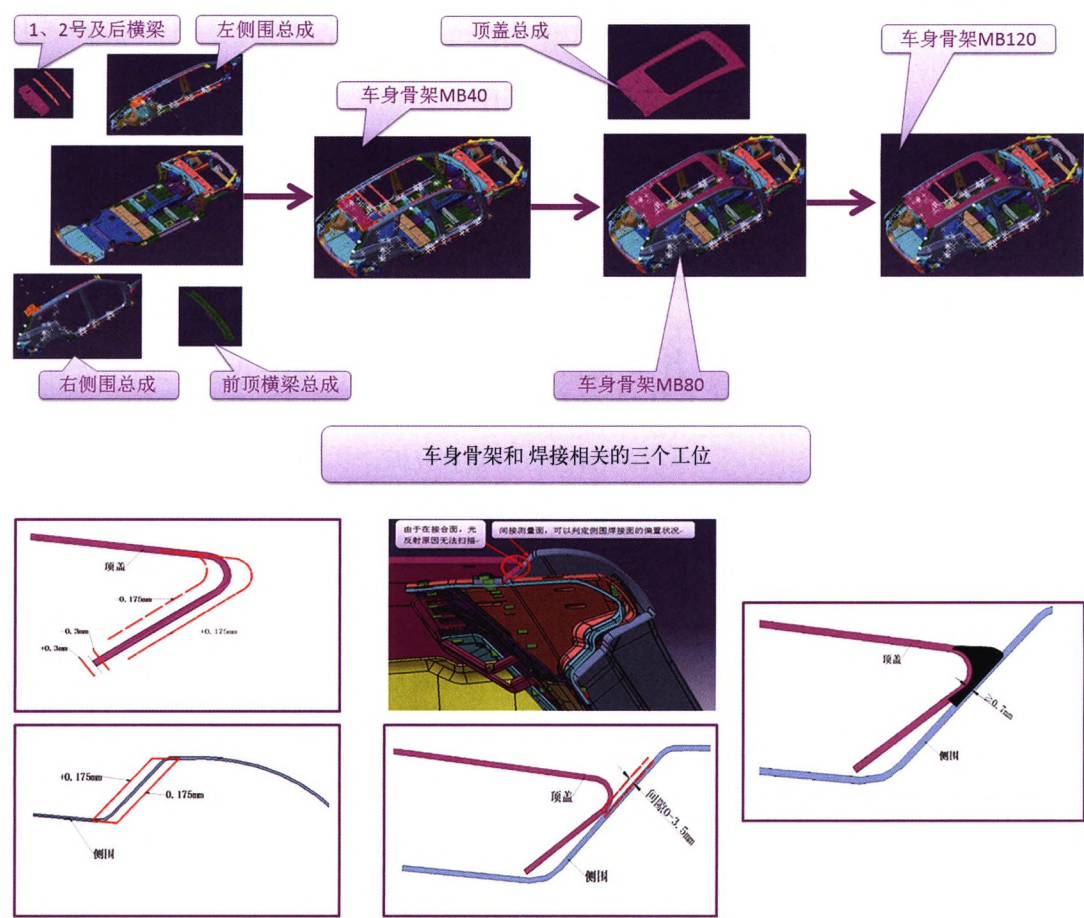


图 3

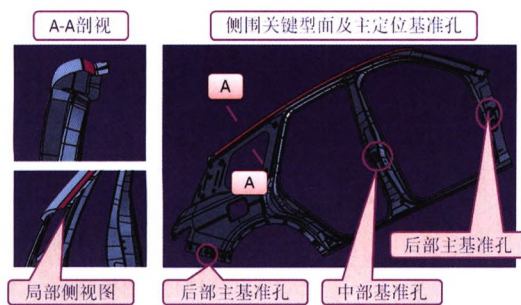


图 4

成的片体与侧围理论数据进行比对，对于超差部分，也可以提取超差的具体数据，来指导模具调试。

顶盖包括顶盖总成检具设计及测量方法与侧围相同，不再赘述。

2. 侧围总成焊接各工序测量

侧围总成从产品结构和工艺过程分析后得知，侧围单件板厚为0.7mm，刚性和强度弱，受内板影

响很大，如果夹具定位有偏差，则侧围的激光焊接面窜动量很大，与顶盖搭接时缝隙 $\geq 0.35\text{mm}$ 或 $1\sim 2\text{mm}$ 都非常可能，这样再与顶盖对接必然会导致偏焊或将侧围及顶盖焊穿，从而导致漏水这样严重的缺陷。

除了对侧围总成规划测量支架，将对侧围总成进行CMM检测外，为了更有效地对侧围总成焊接

各工序进行监控，利用扫描设备，在侧围焊接工序OP10~OP50，以夹具的坐标系基准对主定位孔和激光焊接搭接面进行扫描。根据扫描后得到的三维数据与理论数据比对。能发现侧围焊接搭接面在哪个环节有问题，这样就可明确夹具调整的方向性和夹具调整量（见图5）。

3. MB40工序测量（侧围与下车身合装）

如图6所示：MB40（Main body）主车身40工位，决定了左右侧围焊接面的空间坐标位置，该工序能否保证左右侧围相对于车身下部基准、左右侧围在X方向、Y方向、Z方向的坐标位置，开口距

离，直接决定与顶盖搭接时其位置和间隙大小，是关键工序。

为了判定左右侧围位置是否正确，（给予侧围总成是符合公差要求和极差要求），本道工序可以用便携式CMM进行测量。此时，需要测量两种状态：

（1）当夹具装夹到位，处于夹持和限位状态，将便携式三坐标固定在测量范围内的位置，如果行程不足，也可以采用“蛙跳”方式进行基准过度，“蛙跳”后的测量误差在0.05mm以内，不影响测量精度。

（2）当焊接后，夹具打开，再次用便携式CMM对其进行测量，主要是检测在非夹持状态，车身骨架是否有回弹变形或偏移（因为侧围后部后轮罩与后地板是全型面贴合，所以当夹具打开后，

后部开口都有变大的可能）。

4. MB80：顶盖与MB40车身骨架合装

MB80工序是顶盖预装，在顶盖后部进行电阻焊点定，顶盖的定位相对于车身的坐标位置，所以顶盖定位要准确，当夹具打开后，会有一定的偏移量，但是不会影响最终位置，因为在激光焊房，还有一次定位和顶盖压紧（见图7）。

5. MB80 激光焊接工序的测量

本道工序测量采用两种方法：

（1）采用传统的塞尺测量，塞尺最小厚度为0.05mm。测量范围和精度能够满足测量要求，但是要注意结合扫描数据对测量结果进行综合分析。如果采用三坐标检测和扫描检测，其测量效果不如塞尺直

接和准确。

在调试期间，根据间隙测量结果和对侧围总成数据扫描数据比和分析，在侧围后部1200mm左右，有连续的间隙大于0.9mm，导致激光焊接不完整，侧围侧出现漏焊。

（2）扫描设备进行扫描。可以在焊接之前进行扫描，能够扫描出测量处间隙的大小，但提取数据没有塞尺方便。也可以在焊接之后进行扫描，不仅可以判断贴合状态，还可以检测激光焊缝的细微曲线缺陷。

激光焊接设备及参数的分析

影响激光焊接的因素很多：机、料、法、环、测试激光焊接过程中的重要因素，本节重点就设备影响进行分析。



图 5

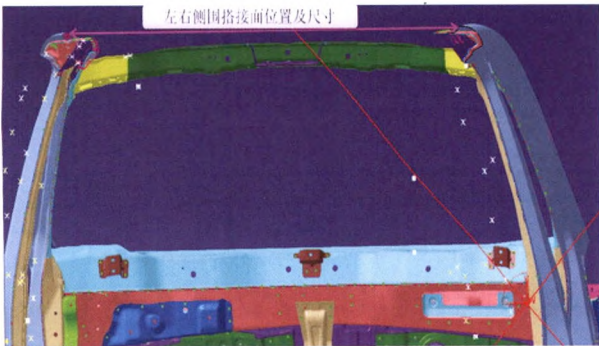


图 6

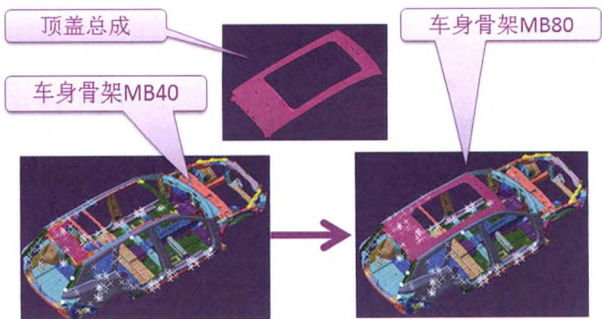


图 7

1. 车身激光焊接系统

激光焊接系统由激光发生器、激光传输光纤、激光焊枪、焊缝跟踪系统、焊丝及送丝机系统、激光焊接机器人、车体总拼夹具和PLC控制系统组成。

2. 激光焊接设备的影响因素

(1) 机器人激光焊接系统及外设。设备构成包括光学自动对焦系统、机械式焊缝自动跟踪系统、双驱动精确送丝系统、自动控制系统、机器人操作和控制系统和车身定位夹具系统。

(2) 常见影响机器人激光焊接质量因素。夹具的定位必须满足焊缝的重复精度在±0.175mm（激光焊接搭接面）；夹具夹紧后的间隙需稳定并<0.35mm。注意没有间隙反而是不好的；送丝速度需要稳定在±0.3m/min，机器人激光焊接轨迹的重复精度0.1mm；光功率精度±300W；焊丝直径优选1.6mm；焊枪选型优选焊缝自动跟踪找正系

统。

(3) 影响激光焊接参数的因素。调整压头压紧状态——控制零件间隙和焊接热变形、机器人轨迹、出光功率、送丝速度、焊接时的光头角度（ α 、 β 、 γ ）和偏置力大小。要特别注意焊接激光枪头的角度，避免枪头直接对准激光光斑，引起光反射从事使激光光栅耦合器损坏。

PFMEA的编制过程及关键点

PMFEA是TS16949质量管理体系中五大工具之一，在过程规划阶段，科学、合理和实用的进行PFMEA分析，可以采取对应的风险防范措施。强化过程检测，将过程中的问题进行精准的测量。在模具、检具和夹具调试过程中及时、准确发现问题，能够进行准确的整改，便于达到预期的质量目标。

前面所述的激光焊接缺陷、车身结构、焊接工艺过程、单件

冲压件控制也是基于PFMEA的严重度（S）、频度（O）、探测度（D）几个方面进行细致分析（备注：RPN, Risk priority number, 风险顺序数RPN=S*O*P；S=Severity严重度；O=Occurrence频度；D=Detection可探测度）。

1. 案例分析

以下介绍两个关键工位的分析方法。

侧围总成OP20（关键工位）PFMEA分析图表如图8所示。

顶盖激光焊接PFMEA分析案例如图9所示。

2. PFMEA的指导意义及动态调整

在规划阶段，详细分析了车身结构的特点、对每一道影响激光焊接的工序进行了分析。且每一道工序如果出现偏差，可能要采取的测量方法都一一对应，所以在激光焊接调试阶段，出现的激光焊接质量

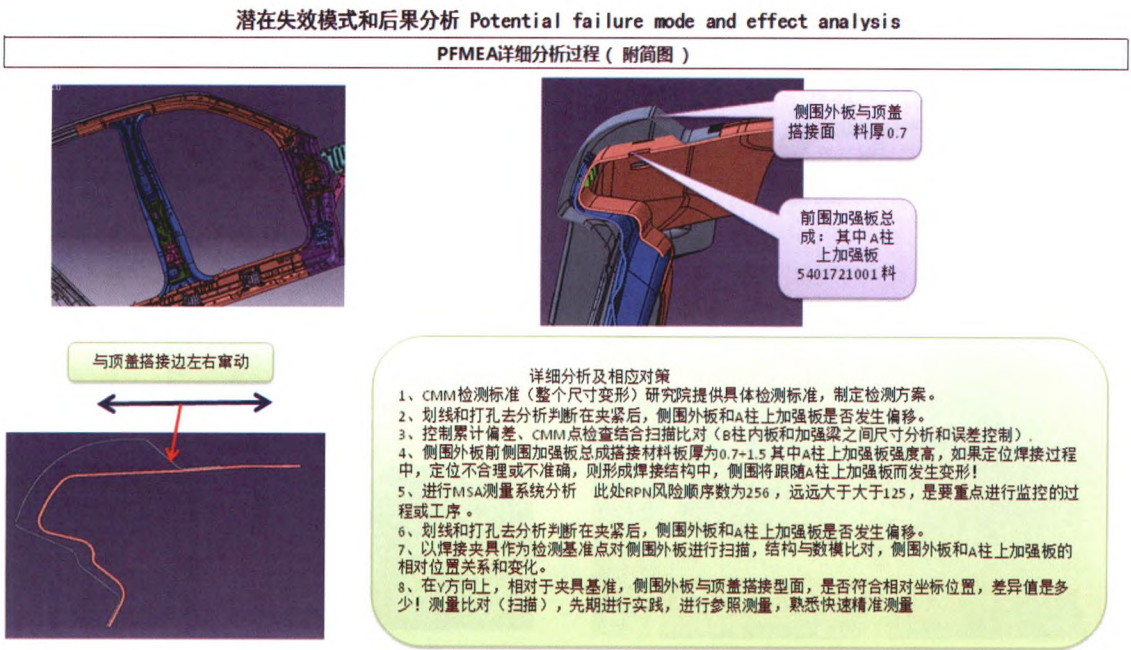


图 8

