

汽车焊装自动点焊飞溅问题 分析及优化

王德昌 李卫元

北京福田戴姆勒汽车有限公司 北京 101400

摘要：对汽车白车身点焊飞溅原理进行阐述，之后进一步针对实际生产过程中的具体飞溅现象进行飞溅分析，并给出解决办法及优化标准，对汽车焊装点焊飞溅优化工作，具有一定的参考意义。

关键词：电阻点焊；焊接飞溅；飞溅率；博世焊接系统；UI

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.08.009

电阻点焊工艺，因其经济可靠性，成为汽车焊装车间最常见的金属板材连接工艺。一台汽车白车身，焊点总数量通常在6000左右。但是实际生产中，因为诸多因素的影响，焊接时会产生严重的飞溅现象。焊接飞溅不仅会导致焊点强度的降低，焊点击穿等质量问题，而且飞溅到车身外表面的焊渣，需要人工打磨修整，进而破坏了镀锌层，降低了车身的防腐蚀性，增加了工人劳动强度，降低了生产效率。并且，飞溅产生的毛刺，可能在后续车间对操作工人造成伤害。因此，在保证焊点强度前提下，降低焊接飞溅率，成为焊装工艺质量优化最重要的工作。

电阻点焊原理

电阻点焊，是通过焊枪电极将板材压紧，然后通过电流产生电阻热，进而使电极帽间的板材局部熔化。断电后，继续压紧最终形成可靠的连接。电极之

间各部分电阻相对大小，如图1所示。

图中， R_1 是电极本身电阻； R_2 是电极和板材之间的电阻，该部分电阻是无用电阻，该电阻过大会造成粘帽、飞溅、击穿、压痕深等缺陷，应尽量减小； R_3 是板材本身电阻，电流通过该电阻产生电阻热，生成融核； R_4 是板材间电阻，该电阻是点焊融核形成的开始点。过大易造成飞溅、击穿等缺陷；过小则易造成小焊核、开焊。应适当的进行控制。

飞溅的原理

在焊接时，板材间接触点会产生“塑性环”和“熔核区”。塑性环包裹着熔核区（见图2）一起生长，使处在焊接压力状态下的熔融金属液不会飞溅出去。但当熔核的生长速度大于塑性环，或者熔核直径生长到大于电极帽端面时，塑性环就无法对金属液形成约束，进而产生飞溅。

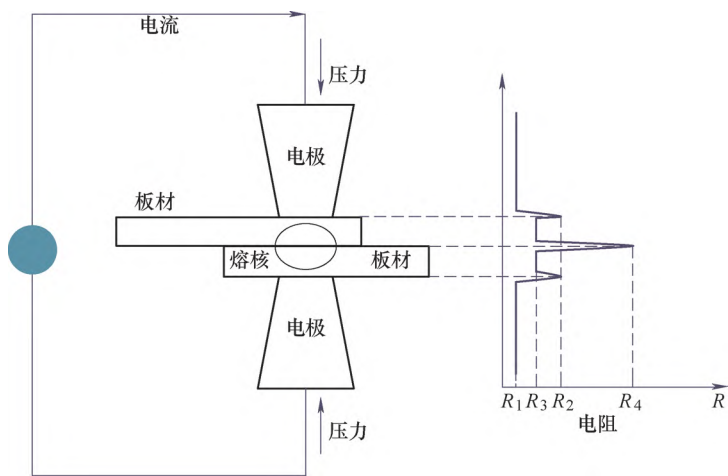


图1 电阻焊电极间电阻示意

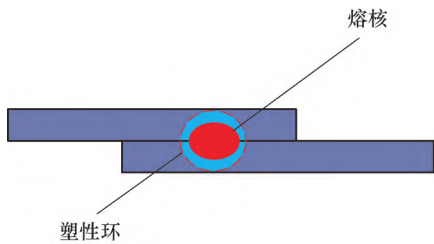


图2 塑性环包裹融核



图3 外表面飞溅图

飞溅的分类

从位置来看，分为外表面飞溅（见图3）和板材间隙飞溅（见图4）；从飞溅时间来看，分为焊接前期飞溅和后期飞溅。

点焊焊接及飞溅过程

为详细描述点焊焊接及飞溅过程，现通过一个现场实际焊接飞溅点的焊接曲线进行说明。如图5所示。

1号点时，焊枪开始通电流焊接，这时电阻、电流和焊接压力瞬间上升，之后板材因为电阻热开始加速塑性变形，板材贴合更紧密，镀锌层开始融合，因此电极帽之间的所有接触电阻会下降，电阻曲线会下降。

2号点时，接触电阻已经到达最小值，之后因为电阻热的不断增加，板材本身的电阻开始上升，电阻曲线开始上升。同时，博世焊接系统检测到实际电阻曲线比参考电阻曲线小，因此，为保证焊接热量不变，UI功能开启电流补偿，实际电流曲线开始高于参考电流曲线。



图4 板材间隙飞溅图

3号点时，融核开始快速生长，电流通过的横截面增大，电阻开始下降，电阻曲线下降。

4号点时，点焊飞溅发生。此时焊枪电极帽之间的部分板材金属被喷出，因此电阻曲线和压力曲线会出现陡降，电流会出现陡升。

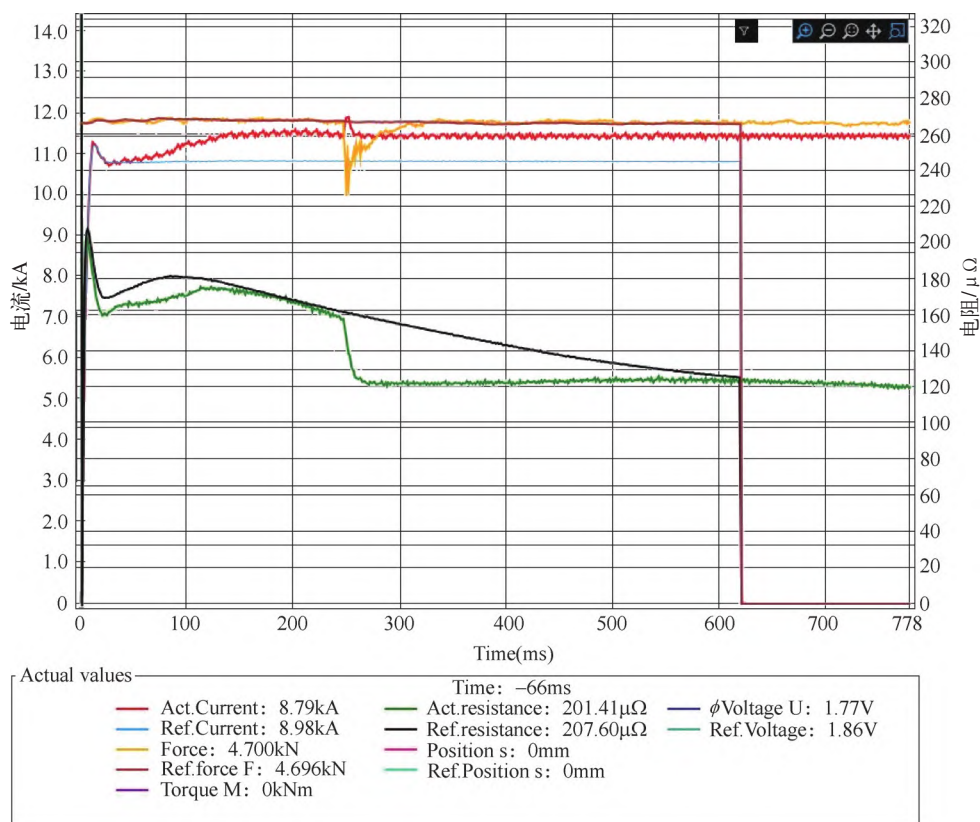


图5 焊接曲线

5号点时，博世焊接系统检测到电阻陡降，例如陡降超过4%，则焊接压力开始补偿，同时UI功能也会降低焊接电流至之前水平，从而防止飞溅过于严重。

6号点时，为了补偿点焊飞溅带来的热量损失，博世焊接系统UI功能会继续补偿焊接热量，焊接电流、压力继续施加，直至焊接总热量满足参考焊接要求。如果焊接时间延长至原来的1倍，总热量仍然不能不合格，则博世焊接系统会报错。

焊接飞溅优化思路

优先对汽车白车身外观面处的焊接飞溅进行优化。由于汽车外观面暴露在外，对其上的焊渣打磨返修，会对白车身板材的镀锌层造成破坏，影响后期车辆防腐性能。

也可以利用博世焊接控制系统的飞溅率统计，对焊接飞溅进行整体优化。图6为从与博世焊接控制柜相连的工艺屏中，导出的焊点飞溅率统计表格。之后应根据焊接飞溅率，从高到低顺序进行优化。在实际具体优化过程中，需要对每个飞溅焊点的飞溅原因进行

分析研究，以获得解决方法。

飞溅的原因及优化方法

1. 电极不对中

焊枪制造尺寸不良、焊接粘枪、焊接时焊枪与焊装夹具或板材存在干涉等，均会导致焊枪上下电极不对中（见图7）的问题。焊接电极对中性不好，如图7所示，会导致焊接时电极与板材的接触面变小，从而使电阻和电流密度增大，引起飞溅。电极不对中时，焊点一般会出现扭曲

因此，上下电极帽对中偏差要求在1mm内。超过1mm则需要人工对焊枪进行校准。设备维修保养部门，可制定电极帽对中检查计划，定期对焊枪进行对中性检查。

2. 电极帽与板材不垂直

电极与板材不垂直，会导致电极与板材的接触面过小，造成电阻和电流密度过大，从而引起飞溅。焊

Spot name	Weldjob	Gun name	No. total	%Expulsion
96021107_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96021107_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	81.6092
96021105_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96021105_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	66.66667
96018154_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96018154_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	43.67816
96007972_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007972_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	49.42529
96007971_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007971_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	71.26437
96007970_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007970_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	80.45977
96007969_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007969_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	75.86207
96007968_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007968_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	31.03448
96007929_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007929_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	19.54023
96007928_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007928_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	47.12644
96007853_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007853_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	19.54023
96007852_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007852_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	28.73563
96007851_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007851_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	48.27586
96007849_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007849_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	87	20.68966
96008014_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96008014_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	40	25
96007974_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007974_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_12	41	75.60976
96007973_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007973_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_12	40	62.5
96007967_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007967_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_12	40	27.5
96007866_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007866_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_11	65	29.23077
96007854_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96007854_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_12	66	39.39394
96008033_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	WJ_96008033_0_6_1_0_0_0_0_1_1_2	Gun_12	89	22.47191

图6 飞溅率统计

点一般会出现扭曲。

一般要求电极与板材垂直度偏差在3° 以内。实际调试过程中，从飞溅侧看，焊枪需要往飞溅的方向调节垂直度，直至焊点外观合格，为正常圆点为止。

3.焊点边缘焊

焊点位于边缘时，塑性环生长不完整，导致塑性环无法完全包裹受压的金属液体，从而引起飞溅。焊点边缘焊（见图8）的原因可能是板材搭接问题、板材切边尺寸问题或是机器人焊接轨迹问题。

实际焊点位置相对于理论位置，偏差需要在5mm内，且焊点中心到板材边缘距离V需要满足： $V \geq 4.38 \sqrt{t_{\min}} + 1.25$ ， $t_{\min}$ 为最小板材厚度。如果因为车身设计原因导致板材与电极帽干涉，造成边缘焊，可以尝试使用焊接软规范，即小电流，大时间，来消除飞溅问题；也可将大直径电极帽更换为小直径电极帽，或对零件进行设变，增加板材搭接边宽度。

4. 电极帽修磨后状态不良

电极帽修磨后，由于电极帽端面直径过小、上下电极贴合不良（见图9）、电极端面不平整或者氧化层修干净，在点焊过程中，电阻和电流密度过大，引起飞溅。此时所成焊点的外观也不平整。

在保证修磨刀片型号正确，修磨刀片没有过大磨损和修磨刀片修磨时没有铜屑堵塞的前提下，通过优化焊枪修磨姿态，调整修磨参数，例如增加修磨转

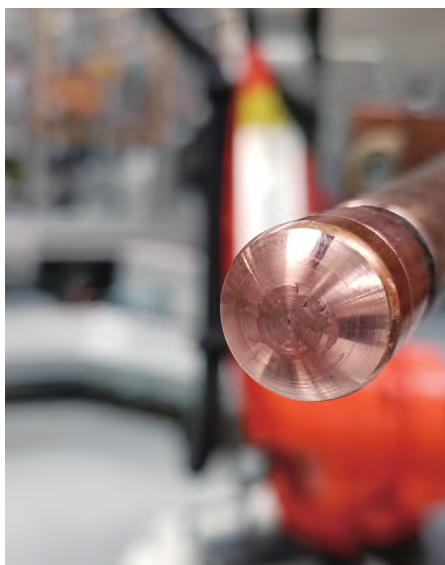


图7 电极不对中



图8 焊点边缘焊

数、减小修磨压力和增加单次修磨时修磨程序次数等来解决修磨后的端面问题。



a)



b)

图9 电极帽修磨后端面不良

5. 板材表面不清洁

板材表面油污严重（见图10），造成电极帽与板材之间的接触电阻增大，局部的接触也使电流密度增大，引起飞溅。

通过控制冲压厂来件油污问题，加强环一生产上件时外观检查和油污清理工作，可有效解决板材油污带来的飞溅问题。

6. 板材匹配间隙问题

板材之间间隙过大，会导致其接触面积变小，电阻和电流密度增大，塑性环过小。因此，融化的金属



图10 板材表面油污

就会通过板材间间隙喷出来。

首先应控制板材来料尺寸公差，并配合着调整夹具夹紧力，使板材间间隙控制在1mm内。同时，也需要合理规划焊接顺序，防止焊接变形导致更严重的飞溅。对于板材间隙过大而静电极对应薄板的情况，可以调整焊接时静电极帽的位置，焊接前减小板材间的贴合间隙。

另外，也可以采用增加预热、多脉冲或软焊接的方法解决飞溅。比如对于热成型钢板或者镀锌板材，可以采用如下顺序的焊接程序减轻飞溅：预压，预热，冷却，第一次焊接脉冲，冷却，第二次焊接脉冲，保压。其中，预热时间一般为50~100ms，预热电流为8~10kA。第一次和第二次焊接脉冲的时间之和，大致等于原来只有一次焊接脉冲程序的时间。冷却时间一般为40~50ms。在冷却期间，熔核大小无变化而塑性环持续增长，有效避免了因熔核增长速度大于塑性环增长速度而产生的飞溅问题。

7. 板材间有胶

为提高车身的防腐、密封和降噪等作用，板材之

间常涂有胶。但焊接时，因为板材间胶的存在，会导致板材间接触电阻增大，造成飞溅。

为减轻飞溅，首先需要增加预压时间，使胶在焊接前尽可能多的挤出焊点外，保证板材间的良好接触。另外，需要设置预热焊接程序，预热时间一般为120ms，预热电流为2~3kA，来击穿胶层。

8. 板材材质

对于高强钢 ($R_e \geq 210 \text{ MPa}$) 和超刚强钢 ($R_e \geq 400 \text{ MPa}$) 板材，由于其表面粗糙，因此接触电阻过大，造成飞溅。

为减轻飞溅，也需要设置预热焊接程序，预热时间一般为120ms，预热电流为2~3kA。

9. 博世控制柜输出电流和压力超差

由于焊接系统设备的老化或故障，焊枪输出电流和压力可能会超过允许偏差范围。一般要求机器人自动焊枪输出电流偏差在3%内，输出压力在5%内。

如果输出值超差，需要利用博世焊接控制软件进行校准。设备维修团队应制定控制计划，每年对焊枪进行至少一次的电流和压力输出值检测。

10. UI曲线不合适

由于焊接工况的变化，在博世焊接软件的UI功能模块中，得到的实际电阻曲线可能和之前采集的参考曲线有较大的差异。这可能会导致博世系统过量的补偿焊接电流和时间，从而造成飞溅。

这种情况需要删除原有电阻曲线，重新采集新的电阻曲线。为得到优质的电阻曲线，应注意以下六点。

1) 采集电阻曲线前，应该首先给电极帽进行修磨，保证电极帽端面的光洁和平整。

2) 应设置合理的修磨频率，防止因为修磨后，焊点的点数过多，造成电极帽端面出现变形或点蚀，引起电极帽和板材间的接触电阻增大，从而影响板材间有效焊接接触电阻采集的准确性。

3) 应该对飞溅电阻曲线进行删除。该类曲线可以通过焊接电阻和焊接压力曲线的突然下降来判别。如果恒流焊接模式下，焊接飞溅严重，则应先解决飞溅

问题，再采集曲线。

4) 采集曲线前，应保证焊点外观和强度符合要求。

5) 在焊接结束时，电阻曲线不是平缓状态，而是持续上升或下降，说明焊核仍在形成中，焊核大小可能不达标，则曲线不能被采集使用。

6) 有效电阻曲线条数至少需要20条。

11. 焊接参数不合理

焊接参数设置不合理，可能导致焊接熔核生长过快或过大，导致塑性环无法将其包裹，从而在焊接压力的作用下飞溅出来。

焊接参数的设定，需要综合考虑板材材质、板材涂层、板材搭配、板材厚度、电极帽端面大小和板材之间有无胶等因素。一般情况来说，通过修改焊接参数的方法来优化飞溅，是最后选择的措施。因为无论是选择软规范、增加预热或是选择增加焊接脉冲次数的方法，都可能会增加总焊接时间，不利于生产节拍的优化，并且之后也需要进行如对焊点质量跟踪验证，重新采集焊接电阻曲线等工作。

结语

点焊飞溅优化是一个需要长期进行的质量改善工作。虽然笔者根据多年工作经验，在本文中详细分析阐述了点焊飞溅的原因和优化思路，但是由于焊接工况的复杂性，在实际焊接飞溅优化过程中，还需要具体问题具体分析。在生产过程中，只要不断利用PDCA循环工作法，点焊飞溅率一定能得到有效降低。

AUTO1950

《汽车工艺师》投稿邮箱:

<http://www.auto1950.com/>



详情请扫二维码