

白车身电阻点焊飞溅原因及控制浅析

刘杰, 石增超, 梁波

赛力斯汽车有限公司 重庆 402247

摘要: 在汽车白车身制造生产过程中, 电阻点焊是板件连接的主要焊接工艺。但电阻点焊焊接过程中焊渣飞溅对白车身焊接质量影响较大, 还会导致设备故障等问题, 进而增加返修成本并降低生产效率。因此, 对降低电阻点焊白车身的飞溅成因分析与控制方法展开研究。通过对点焊飞溅的长期研究, 总结了飞溅产生原理及失效模式, 结合工厂实际生产情况统计, 提出了切实可行的控制方法及标准, 实际验证也有效降低了飞溅的发生概率, 提高了白车身焊接品质。

关键词: 电阻点焊; 飞溅; 控制要素

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.05.012

目前国内外白车身焊接技术仍广泛采用电阻点焊工艺, 在很长一段时间内, 仍将是主流焊接方式。电阻点焊工艺, 因其经济可靠性, 成为汽车焊接最常见的金属板材连接工艺。但在实际生产中, 因为诸多因素的影响, 焊接时会产生金属熔液飞溅现象。这些飞溅不仅会导致焊点强度的降低, 其衍生物焊渣及金属毛刺更是对车辆防腐性能、整车线束安全、外观漆面质量等造成不必要的安全隐患^[1], 工厂需要耗费额外的人力、物力、财力进行检查和返工。焊接飞溅率是衡量工厂车间质量水平的重要指标之一, 也是所有从业者一直致力于对飞溅有效控制甚至是杜绝飞溅研究的重点方向。本文将工厂实际运行情况与理论研究相结合, 分析总结了焊接飞溅发生的原理和控制飞溅发生的标准措施、方法等。

飞溅的原理及定义

飞溅是电阻点焊过程中融化的金属熔液从熔核中剧烈地向外喷射产生大量火花的现象, 由于两电极尖端之间融化的金属缺少限制而导致。严重的飞溅可能由于喷射出过量的金属熔液而在熔核中或表面形成孔洞, 导致接头力学性能下降, 通过以往的拉剪力试验得到的数据可知, 在焊接条件相同的情况下, 出现飞溅后的焊点拉剪力相比正常焊点拉剪力下降约30%^[2]。钣金表面出现焊渣、毛刺是电阻点焊最常见的一种焊接缺陷。

1. 电阻点焊原理

电阻点焊是电阻焊接时, 待连接部件中间的焊接区域被电阻产生的热量和同时施加的电极力加热到可

熔化状态。在电极力的作用下，工件在熔化物凝固时被互相连接在一起。在这过程中核状物所产生的熔核连接被称为点焊，如图1所示。

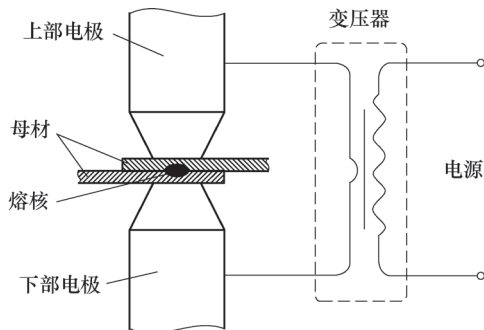


图1 电阻点焊原理示意

电阻点焊每焊接一个焊点为一个循环，常规的点焊过程可分为四个阶段：预压、通电加热、维持及休止。焊接过程中，随着时间的增加，电极压力、电流各阶段示意如图2所示^[3]。

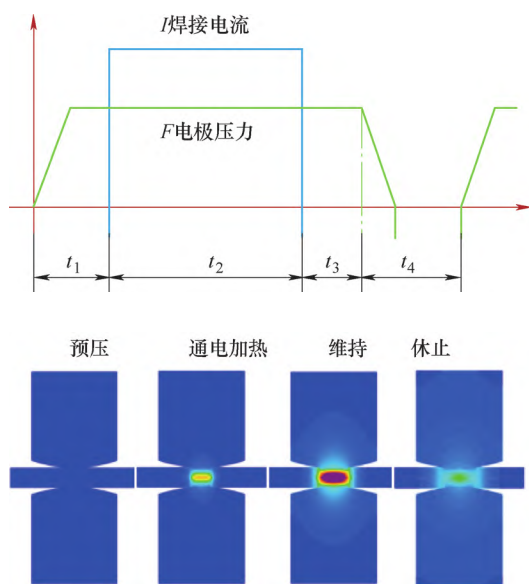


图2 点焊过程各阶段示意

2. 飞溅发生类型及阶段

在通电加热阶段，在液态熔核周围存在一圈高温固态金属，在电极压力的作用下产生塑性变形和强烈的再结晶，形成包裹着液态熔核的高温塑性金属环，如图3所示。随着加热过程持续，融化金属增多，由于金属受热膨胀，融化区压力逐步增大。熔核区域及塑性环逐步向外扩展，当加热过程过于剧烈时，熔核区的扩展速度大于塑性环扩展速度，塑性环被逐步融

化，最终液态金属在电极压力及自身膨胀力的作用下冲破塑性环的束缚发生飞溅。根据飞溅位置的表现形式，可分为工件间内飞溅和工件与电极接触面外飞溅，如图4所示^[4, 5]。

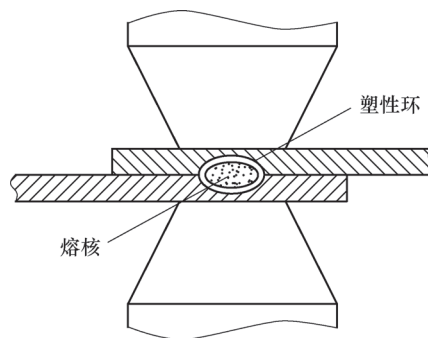


图3 熔核示意

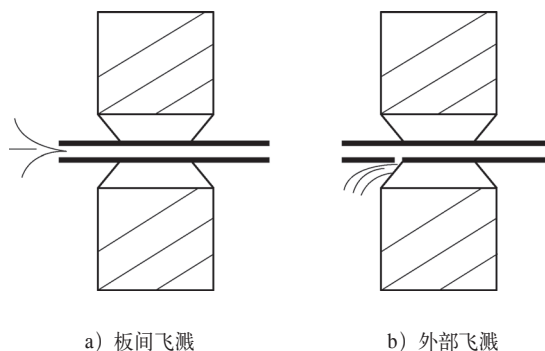


图4 焊点飞溅分类

综上，飞溅在通电加热阶段熔核形成过程中产生，为液态金属在电极压力及自身膨胀力的作用下冲破了塑性环的束缚过程现象。

飞溅发生理论分析及影响要素

液态金属冲破塑性环的束缚原因如下：

- 1) 熔核生产速度过快，突破塑性环的束缚。
- 2) 塑性环约束力不足。

熔核产生的核心为热输入过程，热输入大，则熔核生成速度快。由热量计算公式 $Q=I^2Rt$ 可以得出产生的热量 Q 与焊接电流 I 、两电极间电阻 R 、焊接时间 t 三者呈正比关系，两电极间动态电阻 R 受板材本身与工艺过程因素影响，电流 I 与焊接时间 t 由焊接参数设定，故本研究从动态电阻及焊接参数两个维度开展分析^[6]。

1. 电阻 R 的影响

点焊电阻 R 的计算公式为

$$R=2R_w+R_c+2R_{cw} \quad (1)$$

式中 R_w ——两板材本身电阻；

R_c ——板材间接触电阻；

R_{cw} ——电极与板材间接触电阻。

1) 电极与板材间的接触电阻 R_{cw} 对于点焊过程熔核的形成影响很小。

2) 板材的电阻 R_w 指电流流经两电极直径所限定的金属圆柱体内的电阻，该电阻与板材厚度、材料的电阻率成正比，与电极与板材间接触面直径的平方成反比。

板材电阻计算公式为

$$R_w=\rho L/S \quad (2)$$

式中 ρ ——电阻率；

L ——制件厚度；

S ——电极头与制件接触面积（其中制件电阻率和制件厚度在产品的设计开发调试过程已固定）。

因此，当电极接触端面 S 降低造成电流密度（ $j=I/S$ ）增加，导致 R_w 增大，使电阻热 Q 值增大。

3) 任何两平面接触时，从微观看都只能在个别凸出点上发生接触，电流须沿这些接触点通过，因此构成接触电阻 R_c ，板材和电极表面有高电阻率的氧化物或脏物层，也构成接触电阻。接触电阻大小与电极压力、材料性质及表面状态有关。

综上，电极与板材接触面积为影响动态电阻主要原因。实际焊接过程中，电极与板材间接触面面积减小，导致接触电阻 R 增大，热输入 Q 增加，液态金属突破塑性环产生飞溅，通过现场总结可知影响接触面积的因素共6项：焊接角度超差、上下电极帽对中度超差、电极帽修模轨迹不合格、焊点位置不合理、焊接轨迹不合理以及钣金间隙超差。

2. 焊接参数 I 、 t 分析

在飞溅调试优化过程中，在上述工艺过程因素排除后，仍存在飞溅情况。通过现场焊接试验数据，统计分析得出：电流和熔核直径、飞溅呈增强相关，通电时间和熔核直径、飞溅呈正相关，如图5和图6所示。

综上可以得出，当通电电流/通电时间设置超出合格区参数时，热输入 Q 值超过合格标准，焊接过程将产

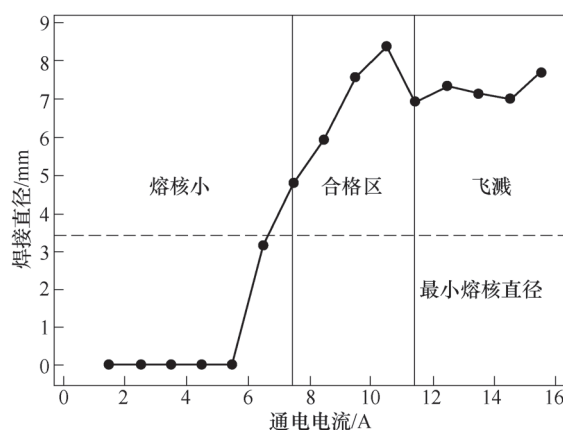


图5 熔核直径、电流与飞溅相关性

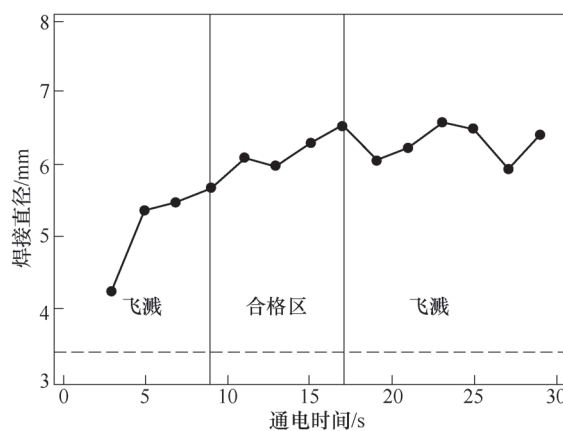


图6 熔核直径、通电时间与飞溅相关性

生飞溅。飞溅的核心为电流大小 I 和通电时间 t 的匹配。

3. 现场典型飞溅问题失效库

虽有各种各样的潜在失效模式，如图7所示，但实际生产中往往是过程影响因素较多，不考虑参数设置不合理原因，对某车型记录数据进行统计，其中电极帽垂直度超差原因占约60%，电极帽贴合度差原因占30%，其他如搭接间隙大等原因合计占10%，如图8所示。因此实际生产中设备原因导致的焊接轨迹偏差为导致焊接飞溅最主要原因。当设备垂直度、对中度、贴合度等外部条件均满足标准的情况下仍存在飞溅的时候，需要再从焊接参数角度进行优化。

飞溅控制要素及标准

根据失效树图及缺陷问题库案例，归纳整理了焊接飞溅过程控制要素及点检标准。

1) 第一类，焊钳状态控制。需要对焊钳电极杆垂直度（ $<5^\circ$ 以内）、电极帽对中度（ $<0.5\text{mm}$ ）、

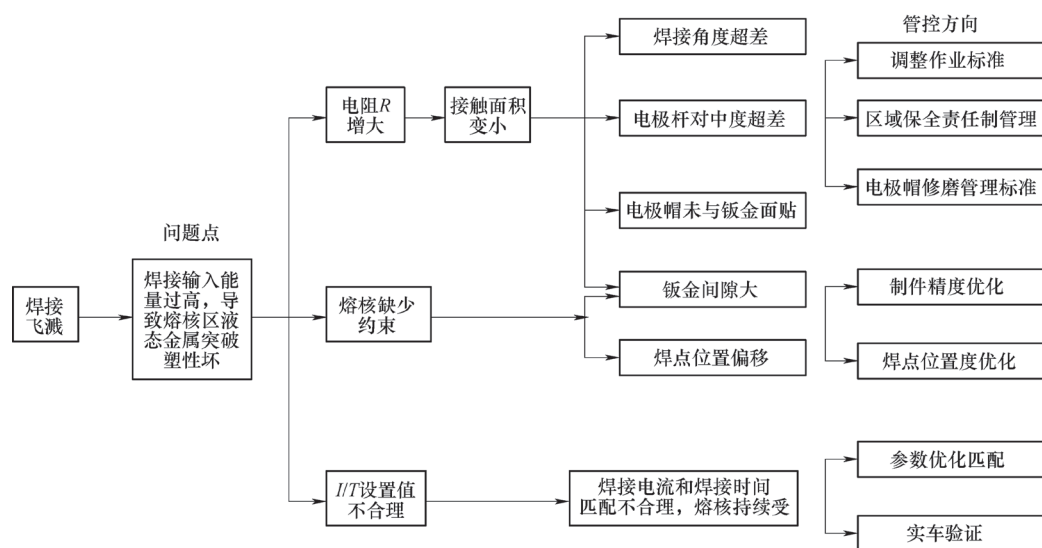


图7 焊点飞溅失效树

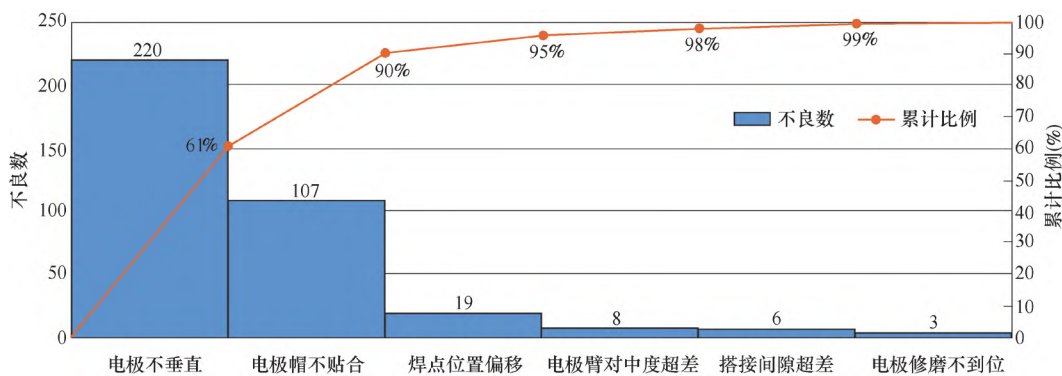


图8 飞溅原因排列

焊钳压力状态、焊钳电极冷却状态进行控制点检，需要检查气压表、水流量表等。当焊钳与制件平面焊接角度不垂直时，会使得钣金通电截面上的电阻值不均匀，生产热量分布不均匀，焊核位置也会发生偏移，最终导致塑性环不能较好地包裹熔液而产生飞溅^[7]。

2) 第二类，电极帽质量控制。需要对电极帽端面修磨轨迹或修磨后电极帽表面质量进行确认控制，包括表面清洁度、修磨端面平整度、端面直径（6~8mm）等。不能使用焊接端面有缺口、凹坑，氧化皮及端面直径不合格等的电极帽，如图9所示。



图9 缺陷电极帽示意图

3) 第三类，焊点及焊接边相关控制要求。焊接过程需要对焊点位置、静臂贴件状态、焊钳与制件干涉状态进行控制，做到焊点位置分布合理，静臂保持贴合制件，焊钳无分流。比如当焊点位置处于制件止口边缘或R角处时，由于焊核位置靠近边缘，无法形成完整的塑性环对液态熔液进行有效包裹，此时则易发生

飞溅。因此对其位置进行要求：焊点边缘至工件板边的距离 L 不小于焊点直径的 $1/2$ ，如图10所示。

4) 第四类，板材状态控制。根据板材间是否有间隙（间隙 $<1\text{mm}$ ）、是否有镀层、是否有涂胶层等，需要在常规参数下额外增加焊接加压力、预热、脉冲频次等，例如带镀层钣件的焊接电流比不带镀层的要

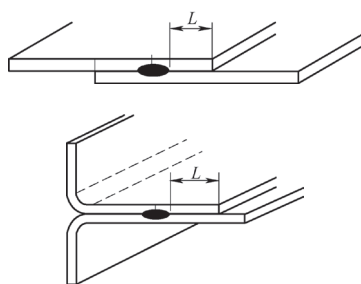


图10 焊点离边沿的距离要求

大，两者之间的差异最大在30%左右，同时焊钳电极压力需增加20%左右，预压时间需增加10%左右。为了降低镀锌板焊接飞溅的产生，可采取预热以及预压的方式，对表面的镀层进行提前破坏。当钣金表面或钣金之间存在涂胶层时，接触电阻明显变大，此时可采用斜坡焊接的功能，先使用大电流破坏胶层，后用小电流焊接，用减少热量产生的方式减少焊接飞溅现象的出现^[8]。

5) 第五类，焊接参数控制。影响焊接质量的参数主要有通电时间、通电电流、焊接加压力。焊接参数对塑性环的影响主要是热量产生的快慢，当熔核的生成速度大于塑性环的扩展速度时，塑性环就无法对熔核产生有效的包裹，从而发生熔核飞溅。因此，工厂车间需要定期对参数进行测量校准，要求电流、压力按照工艺要求进行定期标定及核对，做到电流、压力参数波动满足控制计划要求，与受控参数表一致。

采用大的电流、短的焊接时间的参数称为硬规范；采用小的电流、长的焊接时间的参数称为软规范。通常工厂车间为了生产效率较多采用硬规范。硬规范应用情况下，热量增加迅速，熔核生成速度快，易产生飞溅现象。软规范情况下，热量增长较缓慢，塑性环生长温和，飞溅相对容易控制，但易造成焊点压痕深、表面品质差、电极磨损快等问题，工厂企业需要根据情况适当调整软、硬规范应用场景^[9]。

结语

焊接飞溅作为影响白车身连接强度和外观的重要质量问题，必须进行控制和优化。通过分析，确定了塑性环不完整或者破裂是导致白车身点焊产生飞溅的主要原因，进而从影响塑性环和熔液金属生长的因素、条件揭示了相互间的关系，重点分析了接触电阻及焊接参数对点焊飞溅的影响，通过试验，得到的主

要结论如下。

1) 焊接飞溅主要发生在通电加热阶段，飞溅主要是因为液态金属在电极压力及自身膨胀力的作用下冲破了塑性环的束缚过程现象。

2) 电极与钣金接触面积为影响动态电阻主要原因，也是造成最终生成热量 Q 值不合理的主要因素。

3) 实际生产过程中飞溅产生主要是由电极帽不垂直与电极帽不对中引起，比例约占90%。

4) 相同条件下，焊接电流对热量生成及飞溅影响最大，通电时间次之。通过制定合理的规范参数，可以有效缓解或消除过程中的焊接飞溅。

同时，本文制定了飞溅控制要素及点检标准，对飞溅现象的改善和控制、对设备的合理化使用、对提高焊接效率及以对工厂车间质量提升都有积极的促进作用^[10]。

参考文献：

- [1] 王德昌, 李卫元. 汽车焊装自动点焊飞溅问题分析及优化[J]. 汽车工艺师, 2024 (8) : 10-15.
- [2] 王雨, 黄桂超, 袁佳, 等. 电阻点焊焊接缺陷分析及其预防措施[J]. 焊接技术, 2023, 52 (5) : 174-177.
- [3] 杨闯, 赵洲洋, 吕锋, 等. 白车身试制点焊工艺及焊钳选型研究[J]. 汽车实用技术, 2019 (3) : 183-186.
- [4] 包晔, 朱振友. 镀锌钢板白车身的点焊飞溅问题[J]. 焊接, 2005 (7) : 27-29.
- [5] 郎波. AZ31B 镁合金电阻点焊研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [6] 菅旭. 22MnB5 高强度钢电阻点焊工艺及接头力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 熊明钊, 唐晓雪, 云雷. 汽车行业焊接专业电阻点焊降飞溅浅析[J]. 汽车工艺与材料, 2023 (2) : 36-42.
- [8] 董波, 郭东栋, 邹尚博, 等. 基于电阻点焊过程与形貌的飞溅成因分析及控制方法[J]. 焊接, 2024 (8) : 69-74, 80.
- [9] 于洪宝. 车身制造中电阻点焊飞溅产生的原因及控制方法[J]. 天津科技, 2023, 50 (7) : 14-18.
- [10] 施连青. 接触电阻对点焊飞溅的影响及对策分析[J]. 汽车知识, 2024, 24 (5) : 39-41. **AUTO1950**