

基于车身轻量化连接技术的发展,本文重点介绍铝点焊工艺规划、质量评价及优化。其中,工艺规划主要包含焊枪选择、电极帽选择和工装要求等。质量评价及优化包含铝点焊检测标准及几种常见质量缺陷处理方法。

□ 安徽江淮集团汽车股份有限公司 吴卫枫 鲁厚国

铝合金电阻点焊技术研究

基于轻量化的诉求,蔚来 ES8 车身铝材的使用率高达 95% 以上,这是全球量产的全铝车身中最高比例的铝材应用量。同时为了确保车身强度刚性,ES8 车身综合使用了 3 系、5 系、6 系和 7 系铝材成分的板材、挤出型材、高精密压铸件以及碳纤维复合材料,针对车身不同部位的强度和外观要求,突破传统钢车身单一材料的焊接工艺,实现了异性异种材料的连接。ES8 车身的连接工艺以结构胶粘接为核心,以 SPR 自冲铆接和 FDS 热熔直钻两种冷连接为主,辅助以铝点焊、激光焊和 CMT 等热连接工艺。

铝点焊工艺规划

1. 铝点焊概念及特点

铝点焊是电阻焊的一种,利用电流通过焊件及附近区域产生的电阻热作为热源将工件局部加热,同时加压使工件形成金属结合的一种方法。由于铝合金材料有导热性好、导电率高、易与铜发生合金反应等特点,电阻点焊在铝合金材料结构件的连接中遇到能耗大、电极易失效、点焊质量不稳定等困难。钢铝性能对比见表 1。

表 1 铝合金与碳钢性能比较

性能	单位	铝合金	碳钢
熔点	°C	480 ~ 640	1 480 ~ 1 540
电导率	10 ⁻⁶ S/m	35	5
导热性 (20°C 时)	W/m · K	230	50
电阻率	μ Ω · C m	5	15
塑性温度范围	°C	90	540
线性热膨胀系数 (20 ~ 100°C)	10 ⁻⁶ /°C	24	13.5
表面氧化物	/	Al ₂ O ₃ (厚)	FeO, Fe ₂ O ₃ (薄)
氧化物熔点	°C	2050	1370, 1565

鉴于铝合金与碳钢性能的差异,铝点焊的主要特点如下:①铝材的电阻率是钢材的 1/3,焊接相同厚度的铝材需要 3 ~ 5 倍的电流,铝合金分流损失比钢材分流严重;②铝合金具有高导热性(是钢材的 4 ~ 5 倍),焊接过程中热损失率较高,铝材焊接需要大电流和短时间;③铝合金焊核形成温度范围窄,铝点焊需要短焊接时间和快速的电流上升时间;④铝合金热膨胀系数高,在脆性温度区间内易产生热裂纹,铝点焊需要大的焊接压力和大的平面电极来控制焊接变形;⑤铝合金易氧化及合金化,氧化层焊接过程中易产生焊点气孔、泡群缺陷,铝点焊中铝、铜易生成合金,电极帽腐蚀快,需要频繁修磨,保持电极清洁,确保点焊质量;⑥连接强度相对低,常与结构胶配合使用;⑦不能连接异种材料,尤其是钢和铝;⑧无法做类似钢点焊的凿检,目视检查为主。根据铝点焊的特点,其主要适合薄板连接,适合有安装匹配需求的零部件,如前后风窗等有外观要求的零部件等。

2. 铝点焊设计要求

铝点焊技术与传统的连接技术相比,在产品阶段对产品结构设计有着特殊的设计要求。首先必须都是铝材与铝材的连接;其次,产品设计结构需要满足铝点焊的加工空间要求,有足够的翻边和空间点焊焊枪进入;再次,搭接总板厚小于 8 mm,大于 8 mm 容易焊核偏小或虚焊;最后,搭接边宽度 ≥ 22 mm,最小 18 mm,板厚比 ≤ 2.5,否则容易发生焊核偏移。因此,做好产品前期的设计检查尤为重要。

3. 铝点焊工艺规划

为了确保铝点焊的焊接质量,需要重点关注设备选型及工装规划工作。具体到设备选型主要包含

焊机选择、焊枪选择、电极帽的选择以及修模器的选择等。工装规划主要关注工装的防磁设计。

铝点焊需要采用大电流大功率中频变压器焊机，可以均衡并改善正负极磨损情况，延长电极寿命并避免焊核偏移。参数设置由三部分组成，预热 + 焊接 + 多脉冲焊接。第一部分预热主要是去除铝材表面杂质油污，保证板材接触良好，为电流上升作基础，电流较小。第二部分焊接要击穿铝材表面的氧化层，电流较大。第三部分多脉冲焊接要求电流更大，形成完整的焊点焊核。

焊枪的选择应考虑可达性和可焊性，对于双面点焊关系到焊钳能否进入零部件。零部件与运动中的焊钳的距离单边 $\geq 5\text{ mm}$ 。在满足可达性的同时要考虑可焊性，优先选择 C 形焊枪。由于铝点焊焊接压力大（图 1），铝焊枪挠度要求比钢焊枪挠度高，对中性误差小于 0.5 mm 。焊枪压力选择与搭接组合相关，板厚越厚电机越大，大的焊接压力需要加强焊枪结构，或使用铍铜电极杆，大电流及大的电磁场力，枪体绝缘要求高。

铝点焊电极帽的选择，铝电阻点焊用铜电极的形状和尺寸与传统点焊不同。铝点焊需要使用大端面电极帽，通用的环形电极帽是目前较有效的设计，适用于薄板、挤压和铸造铝。由于多环圆顶电极头破坏了铝表面的氧化物，因此能够进行更强的焊接。铝合金导热系数高，传热快，焊接时存在很大的软化区域，大直径的焊接电极帽可以覆盖铝合金焊核及其软化区域，从而减少热裂纹和飞溅产生。实验对比来看，



图 1 铝点焊焊枪

小直径球头电极帽焊接产生的裂纹数量多于大直径平头电极帽，产生的裂纹长度也更长。

铝及铝合金电阻点焊的主要问题是电极寿命短。电极帽表面的快速氧化是焊接过程中高压、高温和特别合金化的结果。所以电极帽材质的选择也至关重要。常用的电极帽种类中，铬钴铜制造成本低，通用性好，但高温条件下易软化，造成焊接粘连。氧化铝铜强度高，软化温度高，高温焊接性能好，不易粘连。

铝点焊电流大，焊接时产生强磁场，导致焊枪及夹具定位不稳定（图 2）；产生的涡流导致夹具发热，同时损耗焊枪功率。工装规划要求定位销、压紧块、定位块均采用无磁模具钢，连接板采用不锈钢，L 座采用铸铝，传感器要防磁等。铝点焊磁力受力大小与电流成正比，与距离成反比，根据实际测定，距离超过 80 mm 后，受力减小，对工装影响不明显，因此要求枪体 80 mm 范围内采用无磁材料。

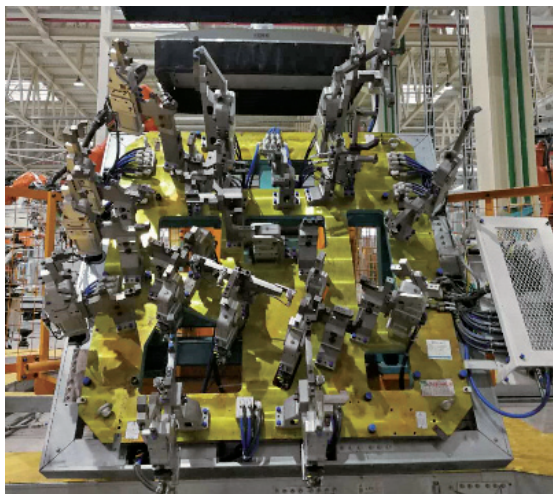


图 2 铝点焊夹具

铝点焊质量评价及优化

1. 铝点焊质量评价标准

焊点质量通过三种方式来描述：物理或者几何特征、强度或性能及焊接时的工艺特性。几何特性包含焊核尺寸、熔透、压痕、裂纹、孔洞、板件间隙和表面状况等。焊接性能包含拉伸—剪切强度、拉伸强度、剥离强度、疲劳强度、冲击强度及抗腐蚀性等。工艺特点包含飞溅、焊接一致性等。铝点焊质量评价主要分为目视检测、超声波检测、金相实验和剥离检测，其中目视检测主要包含焊点数量、焊点变形和焊点裂纹等。

目视检测基本要求如下：

（1）焊点数量：①漏焊点，通过目视检查如实际焊点数量小于设计要求数量则为漏焊；②多焊点，通过目视检查如实际焊点数量大于设计要求数量则为多焊点；③位置偏差，通过目视检查如实际焊点位置超过设计位置的 10 mm 则为位置偏差；④边缘焊，通过目视检查发现实际焊点位置靠近钣金边缘，肉眼可见的钣金边缘变形、凸出。

（2）焊点变形扭曲：目视检

查焊点表面明显不平整，若扭曲超过法向平面 15° 以上，则焊点被定义为扭曲，需调整焊接过程减小或消除扭曲。

(3) 焊点裂纹：目视检查焊点表面及焊点周边母材位置存在可见裂纹（图3），需调整焊接过程消除裂纹。

(4) 表面气孔及焊穿：未借助放大设备可见的焊穿和表面气孔均是不允许的（图4）。

超声波检测是由检查员使用超声波无损探伤设备对焊点进行无损检测，根据设备显示的焊核尺寸与标准焊核直径进行对比，最终由检查员对焊点质量进行综合评判。最薄板厚与最小焊核尺寸要求见表2。两层板焊接，GMT是最薄板厚。三层板焊接有两个最小焊接尺寸要求取决于搭接面的GMT。GMT1是板1和2的最小厚度值，GMT2是板2和3的最小厚度值。GMT用于确定上表最小要求焊接尺

表2 最小焊核尺寸要求（单位：mm）

GMT	最小要求焊核尺寸
0.6 ~ 0.79	3.5
0.8 ~ 0.99	4.0
1.0 ~ 1.29	4.5
1.3 ~ 1.59	5.0
1.6 ~ 1.89	5.5
1.9 ~ 2.29	6.0
2.3 ~ 2.69	6.5
2.7 ~ 3.20	7.0



图3 铝点焊裂纹



图4 铝点焊气孔



图5 铝点焊虚焊、焊核小

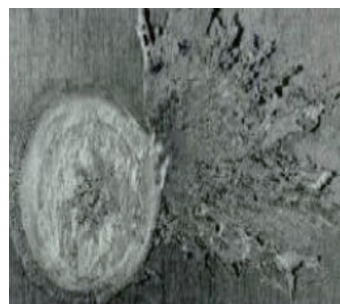


图6 铝点焊飞溅

寸。最小焊核尺寸要求遵循 $D_{min}=4\sqrt{TGMT}$ 。对铝车身结构连接强度起关键作用的是结构胶。为获得更大覆盖率的结构胶，要求在所有连接点处均带结构胶，对于如 SPR/FDS 等冷连接工艺，结构胶对其连接工艺过程及连接质量的影响相对较小，而结构胶与点焊结合，因结构胶是不导电的，对于带胶点焊是非常困难的，尤其是在低温条件下。

通过优化结构胶的配方，改善结构胶的弹性模量，既保证结构胶在 2 mm 大厚度下，胶烘烤后的连接强度依然可达 15 MPa 以上，同时该胶施工后在空气中暴露 24 h，仍不会降低胶的连接强度。通过设计结构胶的配方，改善了胶的流动性，保证在低温条件（ 15°C 以下）、3 mm+3 mm 厚板的带胶铝点焊仍能可靠焊接。

2. 铝点焊质量优化方案

铝点焊常见的焊接缺陷有虚焊、焊核小、焊点骑边、焊点扭曲、气孔、撕裂、裂纹及飞溅等。针对不同的焊接缺陷，对应的解决措施也不同。虚焊、焊核小（图5）主要原因有结构胶延展性、工装绝缘保护及焊接参数设置影响。焊接飞溅（图6）产生的影响因素主要有焊接参数设置、板件搭接状态及结构胶排除情况等。焊

点扭曲、压痕深主要产生原因为焊接姿态、板件搭接状态及电极修模情况。可见影响铝点焊焊接质量的主要因素为结构胶的延展性、流动性，焊接参数设置的合理性、板件搭接状态及工装的绝缘保护等。

针对结构胶的延展性改善措施：通过调整结构胶成分，加热结构胶和零部件，增加结构胶的流动性。在实验条件下，两层板涂胶，在室温 10°C 以上无需加热，通过一定的压力可以保证可焊接性。三层板单面涂胶，对其其中两层板加热到 45°C ，可以保证可焊接性。焊接时夹具与工装分流改善措施是保证焊接区域贴合，工装进行绝缘保护。若焊接参数设计不合理，则要通过试片试验及现场试验合理调整焊接参数。若板件搭接间隙大，则应提高车身精度消除板件搭接间隙。

结束语

随着铝合金材料应用的普及，相应的连接技术也日趋成熟。本文详述了铝点焊的焊机选择、焊枪选择、工装设计及工艺规划内容，并介绍了铝点焊的质量标准、常见质量缺陷及质量优化方案等内容。随着研究的不断深入，铝点焊技术将得到更加广泛的应用。 AI