



汽车车身铝合金连接技术综述

□ 上汽大众汽车有限公司 / 李勇 宋筠毅 程德富 章敏 周宇斌

在未来相当长的时间内，汽车制造业将会面临愈加激烈和复杂的竞争，节能、环保将成为汽车工业发展的主要话题，而白车身轻量化的实现则是解决这一问题的重要途径。研究表明，单台车身质量每减轻10%，其油耗对应可以降低6%~10%，尾气释放减少13%。

汽车轻量化是设计、轻量化材料和先进连接技术的优势集成，而通过大量使用轻质高强材料已经成为车身轻量化最为重要的手段。

铝合金作为实现汽车轻量化的主要材料，具有以下优点：

- (1) 节能减排，有利环保。在满足相同的使用条件时，铝比钢轻60%。
- (2) 提高结构刚性和行驶性能。
- (3) 提高耐腐蚀性。
- (4) 具有较强的吸能性，提高整车碰撞的安全性能。
- (5) 提高资源回收再利用，节约能源。铝合金材料回收比例比

钢材要高得多，回收再生所需能源却比钢材低得多。

由于铝合金的诸多优点，目前世界主要车企在铝合金材料上不断加大使用量。例如，在全新一代奥迪A8中，铝合金的使用比例达到了58%。在国内，蔚来汽车ES8车身用铝高达96.4%，使得车身质量仅为335kg。

然而，铝合金与传统的钢材在晶体结构和物理属性上存在较大差异，例如，钢的熔点为1 536℃，

而铝合金仅为660℃，铝合金的热导率、电导率远远高于钢。这些都导致传统焊接工艺难以实现可靠连接。

本文结合上汽大众铝合金焊接技术的应用情况，并结合国内外主要车企的应用情况，系统介绍铝合金连接工艺。

SPR（自冲铆接）

半空心铆钉自冲铆接（Self-Piercing Rivet简称SPR）通过将铆钉穿透上层的板材，铆钉腿部的中空结构在铆模的作用下，向下层板材材料周围扩张并刺入底层板材，但是不会对下层板材进行冲裁。最后铆钉与上下层板材之间形成机械互锁结构（见图1）。



图1 SPR连接工艺

其工艺过程主要包括：定位、预压、夹紧、冲刺、扩张和成形，如图2所示。

SPR技术优势主要有：

- (1) SPR可以实现异种金属板材的连接，如铝和钢的连接。
- (2) 当进行铝合金板材连接时，SPR的负载强度高于电阻点焊。
- (3) SPR属于冷连接技术，对板材表面要求较低。
- (4) 铝合金板材的表面氧化层及油污都会加大铝点焊电极损耗，需要频繁修磨或更换电极，而自冲铆接只需定期添加铆钉即可，大大节省设备辅料时间。
- (5) SPR过程绿色环保，不产

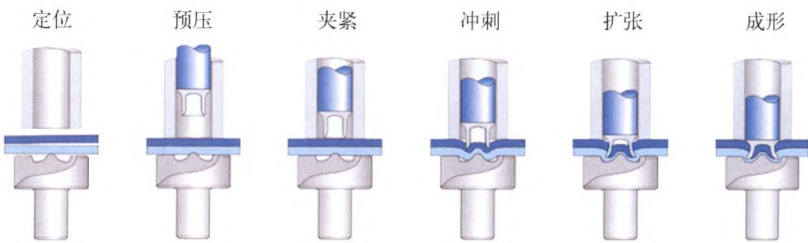


图2 SPR工艺过程

生焊渣、烟尘等有害物质。

SPR工艺缺点主要有：SPR过程要求板材发生塑性变形，所以要求底层板材应必须拥有12%以上的延伸率。SPR铆钉需要穿透上层板材，因此有密封性要求地方需做密封处理。SPR的铆钉属于消耗品，生产成本增加，例如在某车型中铆钉的单价成本为0.13~0.17元。对材料的要求，厚板、硬度低、塑性好的板在下侧。两层板搭接时，底层板厚度占总板厚的1/2以上；三层板搭接时，底层板厚度占总板厚的1/3以上；避免出现相同厚度板材的搭接组合。

目前SPR是铝合金车身上应用最多的连接工艺，数量远远超过铝点焊。例如在Audi A8（D3）上使用数量达2 400点，Audi TT上数量达1 606点，在上汽大众某车型前轮罩的铸铝件和镀锌钢的连接使用SPR工艺，共81点。SPR技术的主要设备供应商包括：德国Böllhoff、英国Henrob、德国Tunkers及德国TOX。

Clinchen（无铆钉铆接）

Clinchen（无铆钉铆接）的工艺过程是，通过一个凸模将被连接件挤压进凹模，在进一步的压力作用下，凸模这一侧的材料被挤压，使凹模内的材料向外流动。结果形成一个既无棱边又无毛刺的连接点（见图3）。

Clinchen的优点是：工艺过程简单且成本低、能耗低、零件无热变形、无额外辅料。缺点是：静态强度和疲劳强度都较低，通常只应用于行李箱盖、发动机罩、翼子板等非承载部位。例如在上汽大众某车型前盖使用数量28点，后盖使用数量为80点，翼子板使用数量为28点。

目前，Clinchen工艺的主要设备供应商有：德国TOX、德国Eckold及美国BTM。

EJOWELD（摩擦塞铆焊）

摩擦塞铆焊EJOWELD是一种利用“钉子”的高速旋转穿透上板

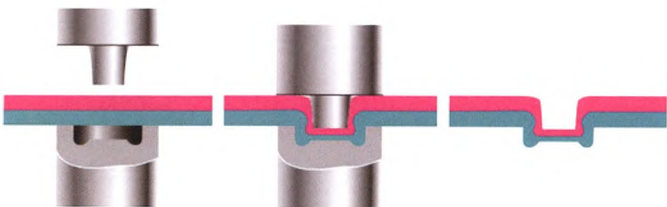


图3 Clinchen工艺原理

板料（如铝合金）并利用钉子和下层板的旋转摩擦生热熔化下层板料（如22MnB5硼钢），并在压力的作用下，完成“钉子”（钢质）与下层板料的焊接，从而形成稳固结合的一种新型连接技术（见图4）。

摩擦塞铆焊特别使用于铝合金和高强钢、超高强钢及热成形零件的连接，例如在Audi A8中，由于外覆盖为铝合金，A、B柱为热成形钢板，由于热成形钢的塑性较差，SPR技术不能使用。在Audi A8中，他们将此工艺称为Friction Element Welding（简称FEW），共使用数量238点。

摩擦塞铆焊的优点是：

(1) 是一种少有的可以直接连接铝合金（如6061）和高强钢（热成形硼钢22MnB5）的新工艺。

(2) 无需预开孔。

摩擦塞铆焊EJOWELD的缺点：双面可达，必须双面都能操作；需要一个额外的连接元件；在需要严格密封的位置（如销售区域为海洋环境），在钉头处需要使用密封胶。

FDS（热融旋转攻丝铆接）

热融旋转攻丝铆接，又称流钻螺钉（Flow Drill Srew，FDS）技术，其原理是利用螺钉的高速旋转产生的热量熔化母材，增加压力打穿母材并在母材上制作螺纹，使两层或多层板料固定在一起。

其工艺过程主要包括：材料加热、热熔穿透、锥孔成形、螺纹成形、螺钉拧入和螺钉紧固共6道工序（见图5）。

FDS连接的优势是：可以连接不同材料；单面连接工艺,特备适用于等管状封闭结构的连接。

FDS连接的缺点是：

(1) 由于下层板被穿透，下层板与FDS 螺钉之间的间隙容易使腐蚀介质进入，使得接头容易出现电化学腐蚀问题。

(2) 铆钉的使用增加整车的重量，同时，铆钉的存在不能影响后道的生产。

(3) FDS螺钉的单价成本高，例如某车型使用的FDS单价成本为0.29元。

(4) 连接点处需要高的刚性支撑。

目前，FDS连接技术现已经在部分高端车型中得到运用。例如在Audi TT中使用数量达到229个，全新一代Audi A8中数量达到885个。

FDS连接技术主要设备供应商有：德国EJOT、德国WEBER、德国STÖGER、美国ARNOLD、美国Semblex及美国ATF。

铝电阻点焊

常见的铝合金点焊形式有：常规铝合金点焊、螺旋状电极铝合金点焊和电极带式铝点焊。

1. 常规铝合金点焊

常规铝合金点焊（见图6）的主要焊钳供应商有加拿大Centerline、法国ARO等公司。铝点焊焊钳在焊钳结构、最大压力、电极帽尺寸上都与传统焊钳都有些差异。

其原因是多方面的，一是因为铝合金的电阻远小于钢，需要4倍于钢的焊接能量；二是因为电极

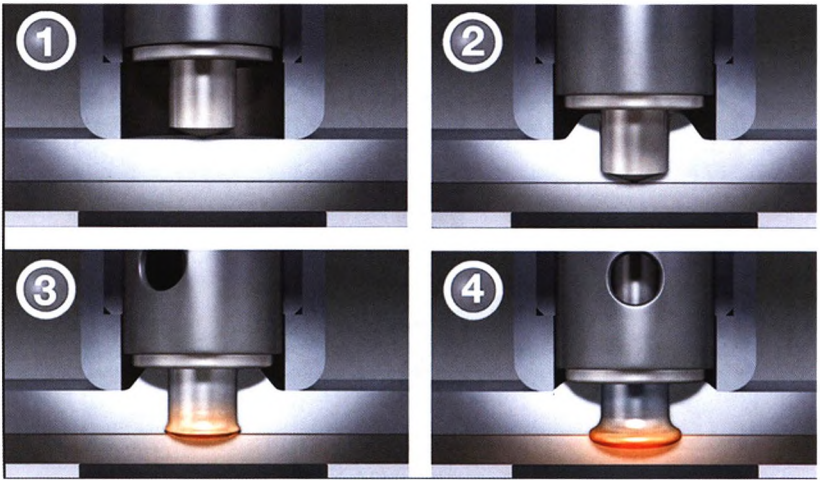


图4 EJOWELD工艺原理



图5 FDS工艺过程

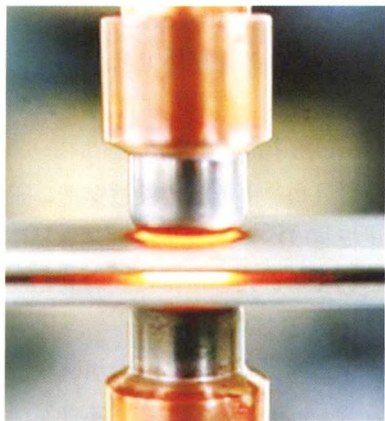


图6 常规铝合金点焊

极易被污染，30个左右的点焊就需要修磨电极，生产的连续性受到影响，三是焊接一致性较差。

一般来说，普通铝电阻点焊需要高压（例如500~700kN）、高电流（例如32~45kA电流）、焊接周波少（2层板5周波，3层板10周波）、电极头会粘连氧化物，必须要提供适当的清洁与维护，相对与钢材焊接，冷却水流量需求至少增加2倍以上，电极端面一般建议在10~16mm。

2. 螺旋状电极铝合金点焊

螺旋状电极铝合金点焊（见图7）为GM专利技术，在凯迪拉克CT6等生产线上有应用。这种电极头表面有特殊的环状纹路（Multi-Ring Domed Electrode），可在铝材表面产生不同的应力区，破碎氧化膜以得到可控制的接触电阻。在铝点焊生产时，还需配备相应的四刀片修磨器修出螺纹，修磨频次为普通碳钢点焊的5倍，约40~50点/次。

3. 电极带式铝点焊

奥地利伏能士（Fronius）公司研发的电极带式铝点焊（Delta

Spot），将传统点焊的电极帽改为电极带，增大焊接电阻，有效提升了焊接过程中的电阻热量，帮助铝合金板材的熔化及焊点的形成。如图8所示。

焊接时电极压住电极带接触工件进行焊接，当一个焊点完成后，电极带自动转到下一个位置，以电极带来保证工艺的稳定性。电极带的使用不仅可用来保护电极，还可以根据不同的材料选用不同电阻性能的电极带，以增加焊缝热量的输入，从而达到增加核心直径目的。上、下电极选用不同的电极带，可

以实现电极两端的热平衡，可应用于厚薄不均的多层板、钢和铝异种材料的连接等。

电极带式铝点焊的优势：

- （1）每个焊点均可达到100%的重复精度，每个焊点都使用全新的有效电极。
- （2）焊接表面无飞溅，尤其是在焊接铝板时，电极带的涂层能够优化与铝材的接触，避免了飞溅及由此造成的部件损坏。
- （3）不需要修模设备，不需要频繁更换修模电极或更换电极帽，生产的连续性可以保证。

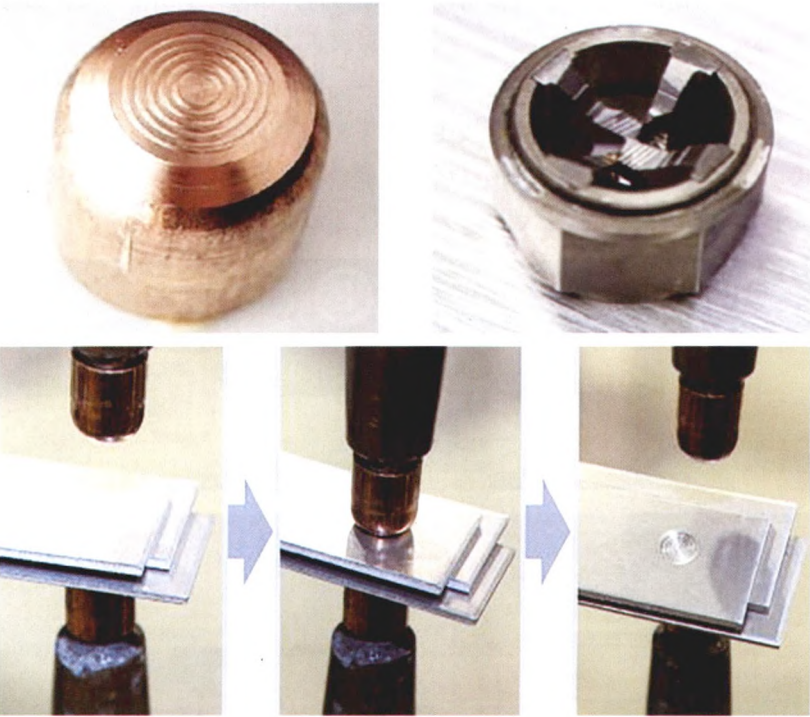


图7 螺旋状电极铝合金点焊

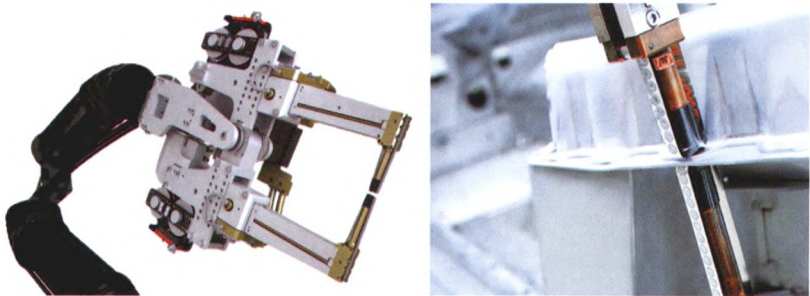


图8 电极带式铝点焊

(4) 节约能源。由电极带增加的电阻可以减少大约50%的电流需求。

CMT（冷金属过渡焊接）

2005年，Fronius公司推出了CMT（Cold Metal Transfer）冷金属过渡技术，该技术在世界上首次实现了钢和铝的连接。它通过焊丝回抽来帮助熔滴过渡，熔滴过渡时电流几乎为零。冷金属过渡焊接与传统焊接工艺比较，零件热变形小。不产生飞溅，焊缝的成型更美观，真正地实现了无飞溅焊接。

2013年，Fronius联合Audi公司开发了CMT Braze+技术，它的核心在于设计了一个极其狭窄的圆锥形新式气体喷嘴，使得保护气体能够压缩电弧，获得更集中的电弧温度。目前该技术以应用于Audi A7的侧围落水槽区域，该焊缝为客户可视区域。传统的连接方式为激光钎焊，但其使用成本较高，而采用CMT Braze+技术获得焊缝质量可以媲美激光钎焊。

激光焊

常用的激光焊接方法主要分为3类：

- (1) 激光焊接，即单纯使用激光作为单一热源进行焊接的方法。目前，在汽车工艺中应用最多的是激光飞行焊接技术。
- (2) 激光填丝焊接，这类焊接方法是在焊接过程中，通过自动送丝装置往金属熔池中添加焊丝，并利用激光束的热能使其熔化。
- (3) 激光复合焊接，顾名思

义，即复合激光束和其他焊接热源，利用两种热源的优势来进行焊接的方法。

1. 激光飞行焊接技术

激光飞行焊接技术(Laser Welding ‘On-the-fly’)或者称为远程激光焊接(Remote Laser Welding, RLW)、激光扫描焊接(Laser Scanner Welding, LSW)，其是在机器人的第六轴上安装一个可编辑聚焦光学头(PFO，常称“振镜”)，仅通过镜片摆动反射，实现激光轨迹运动，而机器人手臂的移动则是辅助作用。

主要优点在于：

- (1) 焊接速度快的同时与工件无接触，可以最大限度地消除每段焊接前不断重复定位造成的非生产性时间的浪费，使得激光束在线时间最大化，生产效率得到大幅度提高。据测算。效率比一般的激光焊接更高，一套系统可取代6~9套普通机器人点焊。
- (2) 激光飞行焊实现了在线时间最大化，有效生产时间占整个工作时间的90%以上。
- (3) 可达性好，焦距一般超过0.5m，可以加工原先激光头被干涉区域。

目前该技术已应用于Audi A8的门框连接，采用通快公司(Trumpf)的Trudisk激光源和Scansonic公司的ALO₃激光头，其接头形式有角接焊缝和搭接焊缝(见图10)。

2. 激光填丝焊

激光焊接过程中对接头装配、



图10 激光飞行焊接技术

拼缝间隙要求很高。激光束照射在焊件上的光斑直径仅有几百微米，一般对于零件间隙最大为0.2mm。采用激光填丝焊的优势之一便是放宽了装配精度，并且由于填丝，焊缝微微突出，成型美观。除了拓宽焊缝加工和装配精度外，激光填丝焊接还可通过调节焊丝成分，可控制焊缝区组织性能，对裂纹等缺陷更容易控制。

目前，激光填丝焊已开始用于铝合金外覆盖件可视区域的焊缝，例如在Audi A8、TT的车顶，Audi Q5、Q7、A6等车型的后盖。焊接过程中使用的焊丝为AlSi或AlMg焊丝，采用氦气作为保护气体(见图11)。

3. 激光复合焊

MIG焊焊缝搭桥能力好，对接头装配要求低；激光焊热输入集中、熔深大、速度快，而激光复合

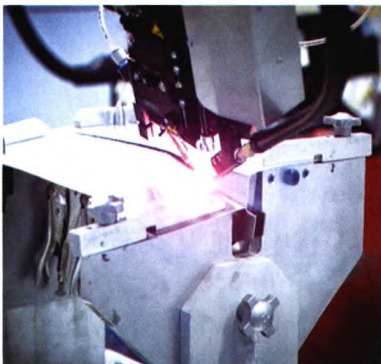


图11 激光填丝焊

焊则兼容两者优点。激光复合焊 (LaserHybrid) 主要指激光与MIG电弧复合焊接。激光和电弧相互作用、取长补短,激光复合焊技术并不是两种焊接方法依次作用,而是两种焊接方法同时作用于焊接区。

激光复合焊的优点:

(1) 降低对工件坡口加工装配和焊缝对中的精度要求, 间隙的搭桥能力很强。

(2) 高效率, 焊接速度最快可达9m/min。相比于MIG焊, 低的热输入可以减小零件变形。

(3) 获得更大的熔深, 从而用较小的激光功率就可以实现厚板的焊接。

(4) 显著增强反射率高的铝及铝合金材料对激光的吸收, 因此能够明显改善这些材料的激光焊接性。

激光复合焊一般应用于高端豪

华车型的铝合金零件中, 以德国大众旗舰车型辉腾 (Phaeton) 的铝制车门为例, 车门的焊缝总长4 980mm, 其中包括48条激光MIG复合焊缝 (总长3 570mm)。激光复合焊同样用于新型奥迪A8汽车的生产。在其侧顶梁上有各种规格和形式的接头采用MIG-激光复合焊工艺, 焊缝共计4.5 m长。

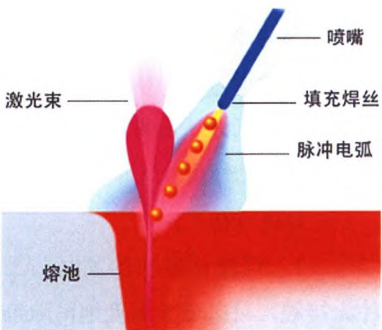


图12 激光复合焊

结语

目前, 能源、环境、安全等已经对汽车轻量化提出了迫切需求, 而铝合金材料由于优良的性能, 已经成为使用最广的轻量化材料。由于铝合金和传统钢材在物理属性等方面存在巨大差异, 传统的点焊技术已不是最佳的连接工艺。目前, 在铝合金常见的连接方式主要包括: SPR (自冲铆接)、Clinchen (无铆钉铆接)、EJOWELD (摩擦塞铆焊)、FDS (热融旋转攻丝铆接); 主要的焊接工艺包括: 铝电阻点焊、CMT (冷金属过渡焊接)、激光焊接。各种焊接与连接工艺都有一定的优势和局限性, 需要综合考虑实际的应用场合、经济性等方面选择最佳的工艺。未来, 随着轻量化材料、轻量化设计的不断发展, 必将会有新的焊接与连接工艺的不断创新发展。

AUTO1950

(上接第54页)

铝合金/ST13钢板材料样片搭接连续焊, 推荐采用药芯焊丝熔钎焊工艺。对于点焊/连接, FSSW接头的抗拉强度高于TOX铆接接头, 而TOX接头的剥离 (正拉) 强度要高一些。对于铝合金/ST13钢板材料样片搭接焊, 推荐采用FSSW或TOX铆接工艺。

(3) 铝/钢组合板材样片搭接接头的疲劳强度比较低。总体来讲, TIG焊和MIG焊接头的疲劳强度高于FSSW接头和TOX铆接接头, 而FSSW接头的疲劳强度与TOX铆接接头相当, 甚至略高。

由于铝合金与钢之间的热物理

化学性能差异巨大, 开发稳定可靠的铝合金与钢之间异种材料连接技术就更加需要我们做出大量的试验进行验证。通过本项目从对汽车用铝合金板焊接工艺试验验证研究出发, 运用多种焊接方法对多种不同材料组合 (铝/钢) 板材样片进行焊接试验, 并进行较为细致的焊接质量、强度分析。对汽车用铝合金板焊接工艺技术做出了初步探索, 在集团公司整车结构轻量化和节能降耗方面做出有益尝试及技术积累; 然而, 异种材料连接技术也在逐年进步, 作为我们汽车人也会通过自身的学习与积累, 掌握、运用好相

关技术, 为自主汽车事业贡献自己的力量。 AUTO1950

郭鑫, 中国第一汽车集团股份有限公司发展制造部、主任、工程师。

