与传统钢结构车身连接工艺相比，钢铝连接与铝铝连接工艺连接方式更加多样，工艺难度更大。文章针对钢铝与铝铝的连接方式进行对比，提出来连接技术的难易点，随着热连接技术的成熟，应用难点的攻克，热连接技术的使用在逐渐增加，轻量化车身的连接工艺也将更加完善。

铝合金车身连接技术

□ 中国第一汽车集团有限公司 / 崔颖　周林柱　于琪明

2018年4月1日《乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法》正式施行，按照政策，乘用车企既要降低燃油消耗来获取油耗正积分，又必须出售足够数量的新能源汽车来获得相应的新能源积分。传统车按2016年1月1日执行的《乘用车燃料消耗量限值》和《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》规定，我国乘用车平均油耗，将从2015年实现6.9L/100km逐年下降至2020年的5.0L/100km；新能源车的纯电续航里程越高，分值越高。而传统车车身质量占汽车总质量的40%左右，新能源车净增电池重量达到了300kg以上，因此研究车身轻量化技术成为车企当前必不可少的课题。

车身轻量化途径

车身从造型到实物，与轻量化强相关的主要是材料选用、结构设计、加工制造三个维度。

（1）材料选用。以高强度钢、铝合金、镁合金、碳纤维等轻质材料取代传统车身的钢板材料。

（2）结构设计。减少零件数量，以中空、集成等高强度空间结构设计取代传统的加强结构。

（3）加工制造。适应轻量化材料与结构的制造工艺技术，比如热成型、超塑成形等。

从材料性能、技术成熟度、成本控制等维度综合分析，目前最具竞争力和最佳性价比的车身轻量化材料依次是超高强钢、铝合金、镁

合金和碳纤维复合材料。以铝板替代钢板，可实现白车身减重40%～60%，因此钢铝混合车身是兼顾车辆性能、安全、成本和重量四者之间平衡的、实现汽车轻量化的有效途径之一。

钢铝混合车身连接技术现状

所谓钢铝混合车身是与传统钢车身相比，车身部分采用了铝板、铝型材、挤压铝、铸铝等材料。目前典型钢铝混合车身结构有两类，一是车身结构件采用铝合金，代表车型有凯迪拉克CT6、Audi A8、蔚来ES8等；二是门盖等开闭件采用铝合金，代表车型有Audi A6L、讴歌TLX等。但无论哪种产品结构，铝合金材料的广泛应用，对传统车身焊接技术提出了挑战。传统车身电阻点焊工艺工作量占85%～90%，但由于铝合金焊接性比碳钢差，因此目前更多的车企以机械连接工艺取代传统电阻点焊工艺，以适应钢铝混合车身生产需要。

1. 全钢车身与钢铝混合车身主要连接工艺对比

对传统车身而言，低碳钢焊接性能良好，焊接效率高，成本低，电阻点焊具有不可取代的优势。而由于铝合金焊接性能远低于低碳钢，钢铝混合车身的连接工艺主要以机械连接辅以胶粘接，涂胶的作用一方面杜绝钢铝之间的电化学反应，另一方面增加车身强度。全钢车身与钢铝混合车身采用的主要工艺对比如表1所示。

2. 钢铝混合车身连接工艺分析

受车身材料、产品结构及连接工艺可靠性等因素影响，钢铝混合车身所用工艺明显多于全钢车身。

目前主流钢铝混合车身所用连接工艺主要有包括三类：

（1）机械连接。如自冲铆SPR、热熔自攻丝FDS、无铆连接Clinch、高速射钉铆ImpAcT等。

（2）焊接。激光焊、CMT（Cold Metal Transfer）等。

（3）粘接。与机械连接、焊接复合使用。

其中粘接工艺与传统车身基本相同，本文仅讨论机械连接与焊接工艺，钢铝车身主要连接工艺分析见表2。

钢铝混合车身连接技术发展趋势浅析

20世纪80年代末，世界上欧洲、美国、日本等很多汽车生产厂家与铝业公司合作加强了对铝制汽车车身的研究，1995年德国奥迪公司首先开始批量生产铝制车身，把车身用铝的研究推向了高潮，铝合金在整车材料中的使用比例逐年提高。

以Audi A8 为例，从A8-D3的完全依赖铝合金降重到A8-D5铝合金与多种轻质材料共用，Audi A8轻量化车身材料见表3。

仍以Audi 为例，A6L车身的连接工艺如图1所示，Audi A8车身的连接工艺如图2所示。

通过Audi车身材料和连接工艺案例，可以看出，Audi轻量化车身材料趋于在铝合金基础上多种轻质材料混合应用，Audi轻量化连接工

表1 钢车身与钢铝混合车身主要连接工艺对比

连接工艺	全钢车身	钢铝混合车身	备注
电阻点焊	●	—	—
CO_2焊	●	—	—
CMT焊	●	●	—
激光焊	●	●	—
自冲铆SPR	—	●	—
热熔自攻丝FDS	—	●	—
无铆连接Clinch	—	●	—
高速射钉铆ImpAcT	—	●	奔驰技术
铝点焊RSWA	—	●	仅通用/特斯拉量产应用

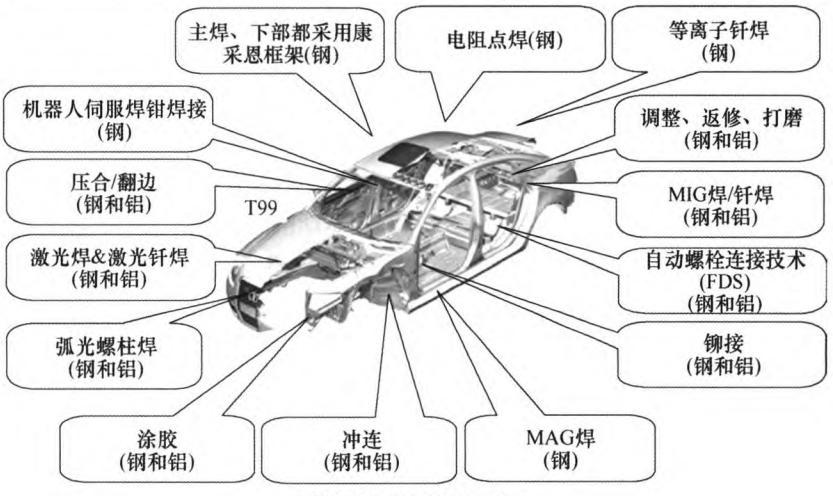


图1 A6L车身的连接工艺

表2 钢铝车身主要连接工艺分析

连接工艺	主要优点	主要缺点
自冲铆 SPR	属于机械连接，工艺连接过程稳定，质量易于控制 可实现铝合金/镁合金/高强度钢/高分子材料/复合材料的同质和异质材料的双层和多层连接 铆接过程低能耗，无热效应，不会破坏涂层 生产现场环境好，环保	不同材质/厚度/硬度的接头组合需要不同的铆钉/冲头/冲模，设备投资大，铆钉较贵，生产成本高 连接点处需保留双侧进枪空间，只能用C型铆枪，铆点凸起约2～3mm 单个铆钉自重0.3～0.8g，大量的铆钉增加车身的重量
热熔自攻丝 FDS	因为铆钉不需要变形，因此可以用来连接包括超高强钢、铝镁合金、复合材料在内的异种材料 单面进枪，可用于封闭型腔结构/壁厚大或封闭腔体 铆钉高速旋转，板件被加热，板件与铆钉接触好，变形小 属于可拆卸连接 生产现场环境好，环保	设备系统成本远高于电阻点焊，铆钉成本高 单面施力，连接时需要高强度刚性支撑 操作时间长，约为5～8s 工艺完成后材料正反面均有较大凸起 单个铆钉自重0.3～0.8g，大量使用会增加车身自重 铆钉尺寸较长，过长的露出部分会对车身的设计与制造产生影响 因为下层要钻穿，接头的防腐能力会下降
无铆连接 Clinch	铆接范围广，可连接的板件有铝件、钢件、非金属 它不需要额外的铆钉，在大规模生产制造中，压力连接的总成本要明显低于SPR连接 在连接形成过程中，板件的防锈镀层或漆层也随之一起塑性变形流动而无撕裂损伤，因此不会影响连接点处材料的抗腐蚀性及强度 铆接过程低能耗，生产现场环境好，环保	连接强度不如SPR连接 在车身结构上的应用领域基本局限于车门、发动机罩、行李仓盖、轮罩等强度要求相对较低的地方
高速射钉铆 ImpAcT	是一种单向连接技术 可以实现异种材料的连接，包括铝合金、高强钢、塑料（作为上层）及碳纤维等。过程不产生过多热量（区别于点焊等），可用于连接SMC等复合材料。 连接速度快，一般为1个/s 设备相对简单，单纯使用气路进行驱动	不防水，需要做额外的放水处理 连接时需要在背面有足够的刚性支撑 连接时将产生较大的噪声（>104dB），需要使用隔音房
激光焊接 Laser	与常规熔化焊相比，激光钎焊具有极高的能量密度、精确控制的局部热输入和加热方位、焊接速度快等优势，早已应用于铝/钢异种金属的连接 连接法兰小，节约材料 可精确调节和控制热输入，热影响区和变形小，可以焊接特殊结构 焊缝成形美观、质量稳定，焊后仅需简单处理	激光聚焦光斑直径细小导致工件焊接装配精度要求高，通常装配间隙、错边量需小于0.1mm或板厚的10% 室温条件下铝合金对激光的反射率高达90%，因而铝合金激光深熔焊接要求激光器具有较高的功率 焊缝快速凝固，可能产生气孔及脆化 成本高
冷金属过渡弧焊 CMT	送丝监控与过程控制统一，变形小，无飞溅过渡 装配间隙要求比激光焊低	成本比激光焊低
铝点焊RSWA	不增重、适应性好、效率高	能耗大、焊点质量不稳定、电极易烧损

表3 Audi A8轻量化车身材料

车型	铝板材	铝型材	铝铸件	热成形钢	镁合金	碳纤维增强塑料	钢
A8-D3	●	●	●	—	—	—	—
A8-D4	●	●	●	●	—	—	—
A8-D5	●	●	●	●	●	●	●

艺最明显的是焊接工艺比重加大，如A8首次采用了铝合金电阻点焊、铝合金激光焊、铝合金MIG焊、摩擦元件焊接工艺。另有资料表明，Audi公司也在研究搅拌摩擦焊。

1. 铝合金电阻点焊

已量产的钢铝车身中，铝合金电阻点焊成功应用案例并不多，只有MRD电极铝点焊、DeltaSpot电阻点焊等。MRD电极铝点焊为通用公司专利技术，DeltaSpot电阻点焊电极带成本太高，都难以推广应用。

因铝合金熔点低、热导率高、表面易氧化等特性，铝合金的焊接质量控制比传统钢车身要难得多，主要表现在：

（1）焊点质量不稳定。飞溅较为严重、焊点表面质量差、熔核尺寸波动大和熔核内部容易产生缺陷等。

（2）电极易烧损。电极表面的铜与铝合金存在强烈的合金化倾向，烧损严重。

因此铝点焊必须采用大电流、短时间、多脉冲、大电极压力，铝点焊对焊机、变压器及焊枪等的要求较高，传统焊机难以稳定输出铝合金电阻点焊所需要的大电流，因此使用受到限制，随着铝合金材

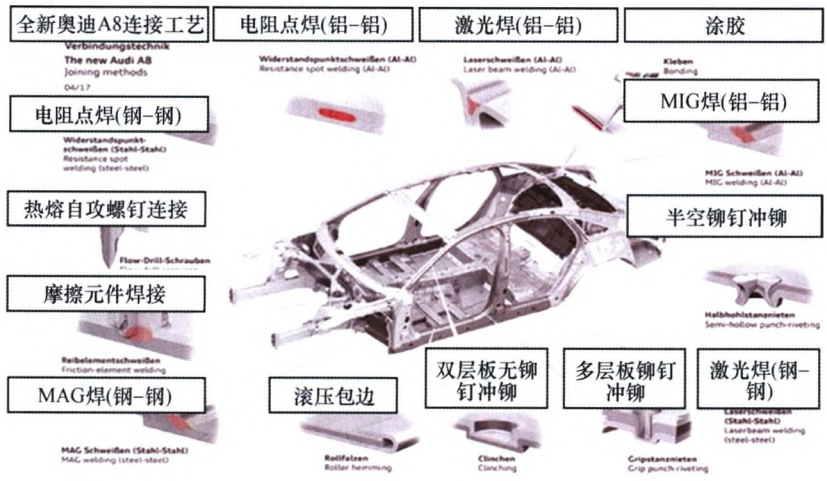


图2 A8车身的连接工艺

料应用比例日益增高，现在有越来越多的设备厂商开始研究铝合金电阻点焊技术，铝自适应控制器、双控制器、大球面电极等技术日益成熟，铝合金电阻点焊具备广泛应用的基本条件。

铝电阻点焊工艺与铆接工艺对产品结构设计要求对比示例见表4。

2017年12月投产的某新能源车铝合金电阻点焊应用已近全车身结构，具体情况见表5。

2. 铝合金激光焊

铝合金激光焊具有如下优势：

（1）热变形小。激光能量密度高，热输入量低，熔化区和热影响区窄。

（2）接头性能良好。冷却速度高，能得到微细焊缝组织。

（3）工作效率高，可实现远距离飞行焊。

但也存在以下缺点：工件之间匹配精度要求高，表面需清洁干净；夹具结构复杂，调试难度大；设备投资高，维护成本高；铝件需要进行表面处理去除氧化层。

3. 铝合金MIG焊

铝合金MIG主要采用冷金属过渡焊CMT方式进行焊接，CMT冷金属过渡技术将送丝与熔滴过程进行数字化协调。当焊机的DSP处理器监测到一个短路信号，就会反馈给送丝机，送丝机做出回应回抽焊丝，从而使得焊丝与熔滴分离，使熔滴在无电流状态下过渡。工作原理如图3所示。

过程为：电弧引燃，向前送丝；熔滴短路，电弧熄灭；焊丝回抽，促使熔滴脱落；向前送丝，焊接过程循环。

冷金属过渡焊设备成本相对低，零件匹配精度要求容易达成，但热输入量相对其他连接方式较高，焊缝缺陷不容易控制，铝件需要进行表面处理去除氧化层。

4. 摩擦元件焊接

是一种利用“元件”的高速旋转穿透上板板料（如铝合金），下层板料（如22MnB5硼钢）处于红热状态，并在压力的作用下，完成“元件”（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。如图4所示。

工作原理如图5所示。

表4 铝电阻点焊工艺与铆接工艺对产品结构设计要求对比示例

产品设计结构	铆接	焊接	备注
搭接形式要求低	同一总成零件搭接组合较多时，铆钉种类、铆模种类、焊钳种类不容易统一，造成工艺复杂和投资增加	能应对不同的搭接形式，减少焊钳种类降低投资	焊接焊钳兼容性更强
搭边要求	零件搭接边要求较大，否则易造成铆点开裂；对铝有时效性要求，铝时效硬化造成铆点开裂	对搭接边要求较小，便于产品设计；对铝时效性无要求。	焊接能够降低法兰以及搭接面的面积需要，便于设计以及整车轻量化
结构要求	铆钳只有C型钳可达性差，材料搭接确定后施工方向确定，无法调整铆接方向或者调整困难	焊钳C形、X形可达性好，可根据实际调试优化施工方向，便于产品设计	焊接焊钳形式更多，能够更好的适应不同的焊接空间

表5 某新能源车铝合金电阻点焊应用

区域	激光焊	铝点焊	CMT	SPR	FDS
前盖	—	4	—	1	—
前门	2	9	1	—	—
后门	2	9	1	—	—
顶盖	—	—	1	—	—
侧围	6	7	—	31	—
地板	—	9	2	56	28
主焊	4	11	4	45	4

过程如下：

（1）预热。转动“元件”加热上层板料。

（2）穿透。在轴向压力的作用下转动元件穿透上层板料。

（3）熔化。转动的“元件”摩擦生热，并在压力的作用下，下层板料（钢板）的上表面处于红热状态。

（4）焊接。“元件”与下层板料焊接，完成上下板料的结合。

具有以下优点：是一种少有的可以直接连接铝合金和高强钢的新工艺；无需预开孔；连接强度高，可相应减少铆钉的数量；可以与结构胶配合使用。

但也存在以下缺点：双面可达，必须双面都能操作；需要一个额外的连接元件；钉头突出，约3mm；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。

5. 搅拌摩擦点焊

搅拌摩擦点焊是在搅拌摩擦焊的基础上新近研究开发的一种创新的焊接技术，其基本原理与缝焊相同。它与搅拌摩擦焊FSW的区别在于，在搅拌摩擦点焊过程中，搅拌头相对工件不做直线运动，焊接完成后仅在固定位置得到一个点焊接头。与传统的电阻点焊、铆接等相比，可实现钢铝异种材料连接，具有接头强度高、质量好、性能稳定、绿色无污染等优点。

搅拌摩擦点焊分为非填充式和填充式两种，钢铝混合车身所用的是填充式，如图6所示。

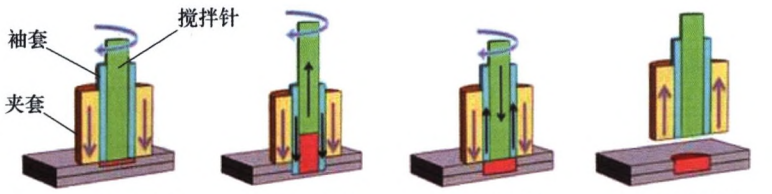
搅拌摩擦焊原理如图7所示。

（1）摩擦生热阶段。搅拌活塞压紧工件，搅拌针和搅拌套贴紧工件表面旋转加热工件，使材料塑化。

（2）下扎阶段。搅拌套旋转压入材料内部，搅拌针旋转上升，材料流向搅拌针区域。

（3）回填阶段。搅拌针旋转下压，搅拌套旋转上升，材料流向搅拌套区域。

（4）撤离阶段。搅拌活塞、搅拌针和搅拌套下表面平齐后，脱



(a) 摩擦生热阶段　(b) 下扎阶段　(c) 回填阶段　(d) 撤离阶段

图3 冷金属过渡焊

图4 摩擦元件焊接

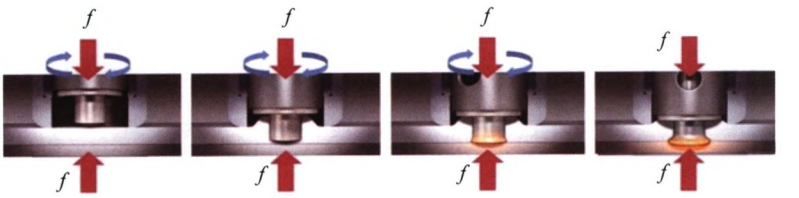
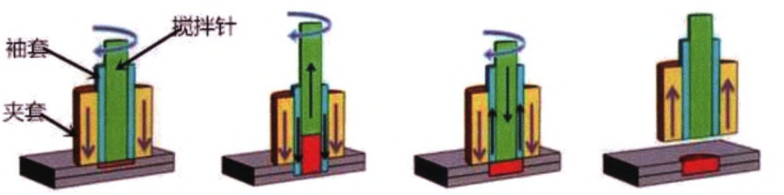


图5 摩擦元件焊接工作原理

图6 搅拌摩擦点焊



(a) 摩擦生热阶段　(b) 下扎阶段　(c) 回填阶段　(d) 撤离阶段

图7 搅拌摩擦焊原理

离工件表面，搭接工件被焊点连接成一体。

铝合金焊接技术随着研究的深入，理论技术的成熟，新工艺设备的开发，许多焊接问题迎刃而解。未来材料连接技术的发展方向如下：对传统技术的优化以及新技术的开发，降低连接成本，改善焊接的连接性能；降低能源的消耗，开发高效节能的铝焊接技术；开发标准化、模块化、通用化的连接设备。

结语

近期有专家提出以焊代铆的观点，铝焊接适应性和对铝合金时效性不敏感的优势确实明显，越来越多的车企都在尝试以部分焊接工艺代替部分机械连接工艺。如果说钢铝混合轻量化车身的发展趋势是多轻质材料混合应用，那么钢铝混合车身连接技术的发展趋势则为由机械连接独大到机械连接和铝焊接共同发展。AUTO1950

崔颖：中国第一汽车集团有限公司发展制造部工艺技术处高级主任，焊装高级工程师，汽车焊装工艺与技术领域高级专家，曾负责一汽解放卡车全系列车型车身/车架焊装工艺规划与工艺管理工作及负责集团自主体系焊装工艺管理工作。目前负责红旗系列车型焊装工艺规划、工艺管理及新技术推广工作。一汽制造技术学会焊接分会秘书长。

（上接第21页）

北京航空航天大学教授徐向阳先生

动机更好的实现匹配。但是传统CVT有三个相对的弱点：一是机械摩擦化、摩擦传动化、效率低；二是转矩容量相对低；三是摩擦传动。”北京航空航天大学教授徐向阳先生在致辞中说。VIT的活齿无级传动技术突破了这三个问题，由摩擦传动变成了啮合传动，从而使它的效率得到很大提高，使得VIT活齿无级啮合CVT能够在整个工程领域应用得到大范围的推广。

但他同时对活齿无级变速器的产业化提出了一些建议：

第一，无级变速作为一个全新的原理，还需要做一些最基础的理论分析和研究，比如它的效率到底可以达到多少？这个可以计算出来，因为这个效率值决定产品最终能达到的效率，决定最终的应用前景。

第二，目前VIT介绍了一系列的产品，展示了技术的可能性，但这只是一种可能性。作为一个初创公司，还要系统地分析这项技术最适合应用的场景到底是什么，然后在这个场景下，去集中精力研发适合这个场景的产品。从其他的产品产业化过程来看，一项技术或产品一旦在某一个应用中得到突破，后续其他场景的应用就会变得相对比较容易。

第三，要在三年内实现产业化并不是一件简单的事，需要花大量的资金投入和人员投入。建议VIT尽快把研发队伍壮大，吸引各方面人才，专注到某一个具体场景应用的产品去实现突破，因为活齿无级变速器产品涉及的领域很多，涉及到多学科、多领域的交叉，所以需要各方面的人才。

结语

VIT把10年的研究成果向行业进行发布，不仅是对技术的自信，同时也是对未来技术和应用前景的企盼。在其发展过程中也将遇到诸多的难题，包括技术的攻关、融资的压力还有市场的认可等，这些需要政府、行业协会和上下游各类合作伙伴共同的支持和帮助。未来，VIT将与业内更多企业一起共同推进中国汽车产业无级变速时代的到来。AUTO1950