

轻量化铝合金车身连接技术及其评价

崔厚学¹, 刘昌雄¹, 孙志强², 田猛³,

1. 东风汽车集团有限公司科技工程部 湖北武汉 430056

2. 广州瑞松智能科技股份有限公司 广东广州 510760

3. 天津经济技术开发区逸仙科学工业园 天津 301726

摘要: 介绍了轻量化铝合金车身各种连接技术及其初步评价准则, 对推进轻量化车身制造有一定的参考借鉴作用。

关键词: 轻量化; 铝合金车身; 连接技术; 评价

1 序言

得益于经济持续增长和人民生活水平不断提高, 2009~2020年中国汽车产销量连续12年稳居世界第一。但汽车大国远非汽车强国, 加快培育知名汽车品牌和掌控汽车核心技术及零部件供应链是摆在中国汽车产业面前亟待破解的重大课题。目前, “节能和新能源汽车”是实现我国汽车产业升级换代的重要机遇, 车身轻量化是新能源汽车产业发展的一个主要议题, 而铝合金连接技术是轻量化车身工艺的主要瓶颈之一^[1]。

2 铝合金轻量化车身

车身轻量化材料一般有轻合金、高强度金属材料、工程塑料、碳纤维增强复合材料和陶瓷材料等。铝合金车身由于其显著的轻量化效果, 使整车动力性、操控性和燃油经济性都得到较大提升; 其良好的加工工艺性能, 可塑造视觉极优美的车身曲面; 由于其超强的抗腐蚀性能, 故铝合金会在表面形成一层致密的氧化层, 并且与铝基体牢固结合, 从而对车身形成严密保护。

铝合金车身最大的问题, 一方面是铝合金的冶炼和加工成本都比钢更高; 另一方面是加工工艺比较复杂, 特别是对铝合金连接工艺水平和自动化程度要求都远高于传统钢制车身。

据报道, 电动车车重每降低10%, 电耗可降低5.5%, 续航里程相应增加5.5%, 而延长相同里程所需要增加的电池成本却远高于此。如大众e-Golf采

用全铝车身成功减重187kg, 通过优化电池配置后整车成本降低635欧元。特斯拉Model S/X和蔚来ES8也采用全铝车身, 而Model 3则采用成本更低的铝/钢混合材料^[2], 希望取得性能和成本的最佳匹配。

在可预见的未来, 续航里程和成本仍将是衡量纯电动车的重要指标之一, 铝制车身带来的百公斤级减重效果必然是高端电动车十分看重的突出优势。

3 铝合金车身连接技术

铝与传统钢材相比, 在晶体结构和物理属性方面存在较大差异。钢的熔点为1536℃, 而铝仅为660℃; 铝热膨胀系数是钢的2倍, 热导率是钢的4倍, 这些都导致传统焊接工艺难以实现铝合金的可靠连接。目前, 解决新能源汽车轻量化车身连接的主要技术路径有: 冷金属过渡焊、自适应电阻点焊、激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊、冲铆连接、自攻螺钉连接、胶粘连接, 或联合使用几种方法完成轻量化车身连接。

车身轻量化有多种技术路径, 在材料和工艺两个方面, 各公司采取了不同的技术路径。据报道, AUDI A8共采用了14种连接方法; 奇瑞捷豹采用自冲铆接技术完成了3700多个带钉自冲铆接; 上海通用CT6车型使用专利电阻点焊(同心圆电极技术)、自冲铆接、热熔自攻螺钉和胶粘连接联合完成了新型轻量化车身连接。

3.1 电阻点焊

电阻点焊(Resistance Spot Welding, RSW)是

一种传统的焊接工艺方法。现阶段由于车身轻量化要求,需从电源和焊枪入手来解决传统铝焊接电极寿命短、生产效率低的问题。

近年来,依靠伺服电动机驱动的伺服焊枪以及中频逆变直流(MFDC)电阻点焊设备具有电极压力精准、焊接电流平稳及响应快速等特点,正逐渐被推广应用。中频逆变自适应直流电阻焊具有反馈控制响应速度快、输出稳定性好、热效率高、焊接时间短、功率损耗小、节能效果明显及设备体积小等优点。整体而言,该设备功率因素达到95%,节约能量达30%以上,电极寿命提高1倍以上,尤其焊接铝及铝合金等导热性高的金属效果显著,质量更稳定可靠。

上海通用CT6生产线应用通用汽车集团的表面有特殊环状纹路的螺旋状电极铝合金点焊技术,以及伏能士(Fronius)带式电极铝点焊技术,都是实现铝合金车身点焊的有效技术途径。

3.2 弧焊

由于铝熔点低,热导率、电导率都远高于钢,导致焊接变形及焊接应力增加,故需采用低热输入量或高能量密度的焊接工艺,如冷金属过渡焊、激光焊及等离子弧焊技术。由于铝合金吸热后极易产生热应力集中,造成板件变形严重甚至开裂,所以冷金属过渡焊在这方面具有独到的优点。通过引弧-熄弧-再引弧的重复方式减小热量的输入,可有效地避免变形和开裂。为满足高能量密度弧焊对零件装配间隙的要求,激光焊、等离子弧焊、激光-电弧复合焊接技术将来也有一定发展前途。

3.3 自冲铆接

自冲铆接(Self-Piercing Rivet, SPR)属于机械冷连接技术,其独特的连接方式使其可有效地克服铝合金、镁合金、钛合金等轻金属材料导电、导热快,热容小,易氧化,以及难以采用传统的连接方法进行焊接等缺点。其工艺过程主要包括:定位、预压、夹紧、冲孔、扩张及成形(见图1)。



图1 自冲铆接工艺

自冲铆接工艺优点主要有:

1) 连接高效,质量可靠。

2) 可以实现铝/镁、铝/钢、镁/钢、铝合金/镁合金/高强度钢等金属材料和高分子材料/复合材料的同质或异质材料的双层及多层连接。

3) 铆接过程能耗低,无热效应,不破坏涂层。

自冲铆接工艺缺点主要有:

1) 不同材质、厚度及硬度的接头组合需要不同的铆钉、冲头及冲模,冲钳和铆钉成本较高。

2) 铆接点平面凸起 2~3mm,2层板连接后再与第3层板连接时,对进枪的方向有要求。

3) 只能使用C形铆接枪,双侧需要预留进枪空间(无法应用于封闭型腔)。

3.4 无铆钉自冲铆接

无铆钉自冲铆接(Clinching)是利用板件自身的冷变形能力,对板件进行压力加工,使板件产生局部变形而将板件连接在一起的机械连接技术。

与自冲铆接工艺相比,无铆钉自冲铆接具有以下优点:

1) 无需额外铆钉,总成本要明显低于自冲铆钉连接。

2) 连接过程不会对零件表面造成破坏,也不会影响连接点处材料的耐蚀性及强度。

无铆钉自冲铆接工艺的主要缺点:由于无铆钉部分影响了连接强度,该工艺应用主要局限于车门、发动机罩、行李箱盖及轮罩等强度要求相对较低的部件上,其应用范围不如自冲铆接广泛。

3.5 热熔自攻螺钉

热熔自攻螺钉又称流钻螺钉(Flow Drill Screw, FDS)技术,它是利用螺钉高速旋转产生的热量熔化待连接板,并在巨大的轴向压力下,挤压并旋入待连接板,最终在板材与螺钉之间形成螺纹连接,而中心孔处的母材则被挤出,并在下层板的底部形成一个环状套管。流钻螺钉工艺过程如图2所示^[4]。

流钻螺钉工艺主要优点有:

1) 连接强度质量可靠。

2) 由于螺钉无需变形,因此可以用来连接包括超高强钢、铝镁合金及复合材料在内的各种同质或异质材料。

3) 单面进枪,可用于封闭型腔结构、壁厚或封闭腔体等无法使用自冲铆接或无铆钉自冲铆接的装配情况。

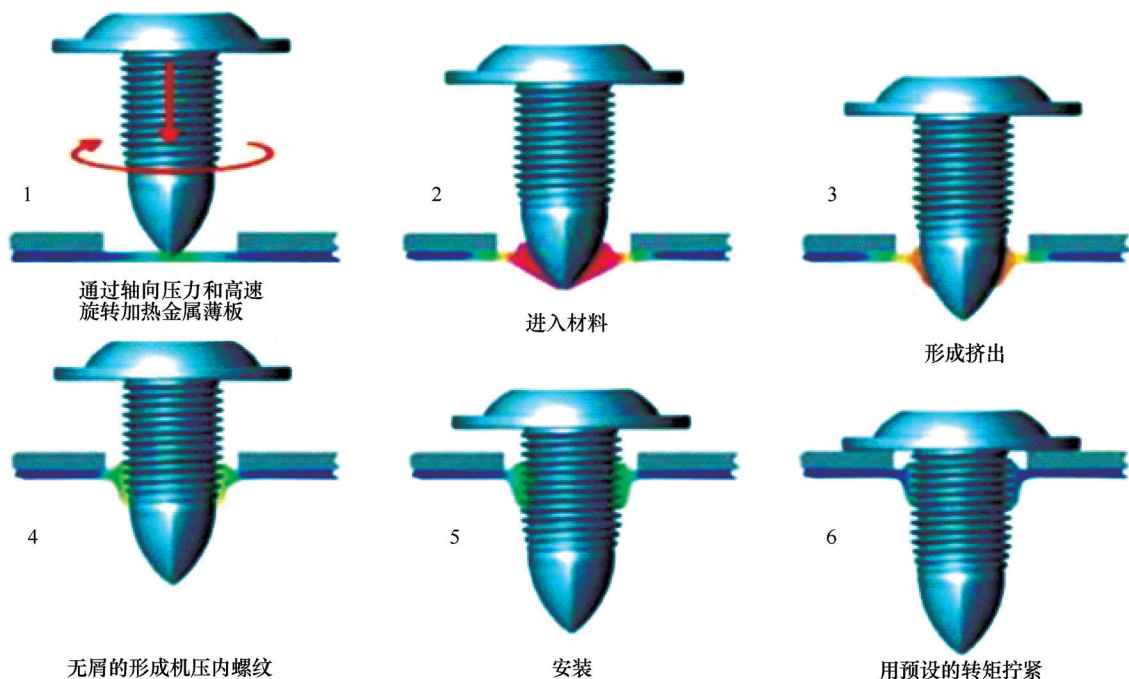


图2 流钻螺钉工艺过程

4) 板件被加热, 板件与螺钉接触好, 连接强度大。

流钻螺钉工艺的主要缺点有:

- 1) 设备系统成本远高于电阻点焊, 铆钉成本高。
- 2) 单面施力, 连接时需要高强度刚性支撑。
- 3) 完成一次操作需5~8s, 时间较长, 影响生产效率。
- 4) 接头正反面均有较大凸起, 对车身的设计与制造可能产生不利影响。另外, 由于下层要钻穿, 所以接头的防腐能力会下降。

3.6 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是一种可用于各种合金板焊接的固态连接技术。与传统熔焊工艺相比, 搅拌摩擦焊无飞溅、无烟尘, 不需要添加焊丝和保护气体, 接头无气孔、裂纹; 与普通摩擦焊相比, 它不受轴类零件的限制, 可焊接直焊缝^[5, 6]。此外, 这种工艺方法还具有接头力学性能好、节能、无污染及焊前准备要求低等一系列优点。由于铝及铝合金熔点低, 所以更适于采用搅拌摩擦焊。

另外, 为满足板材搭接要求, 摩擦塞铆焊是一种适合的连接方式, 其优点主要有:

1) 可连接铝合金 (如6061) 和高强钢 (热成形硼钢22MnB5) 等新型材料。

2) 接头质量可靠。

3) 无需预开孔。

摩擦塞铆焊的缺点主要有:

- 1) 双面连接, 必须双面操作。
- 2) 需要一个额外的连接元件。
- 3) 在需要严格密封的位置 (如海洋环境), 在钉头处需要使用密封胶^[4]。

3.7 胶粘连接

胶粘连接采用面接触方式而非点或线接触, 与点焊及铆接相比, 不易产生应力集中, 连接强度、刚度和疲劳强度等综合性能也相对较高, 而且该连接应用范围较广, 可用于各种钢、轻金属、高分子材料以及其他不同材料的连接^[7]。

新一代结构胶粘剂接头具有高强度、高刚度的特点, 同时在承受冲击载荷时又具有足够的韧性和柔性, 能够满足车身结构的综合性需求, 使整车性能得以全面提升, 特别适合车身轻量化的技术要求。目前, 结构胶粘剂在各大主机厂中的单车用量呈逐渐上升的趋势。

4 铝合金连接评价准则

选择连接工艺方式主要取决于车身材料、结构

设计及设备水平等。综合考虑各种因素，目前国内轻量化车身应用较多的是点焊、无铆钉自冲铆接和自冲铆接连接技术。连接工艺不是孤立存在的，不同的连接工艺可以通过自动工具切换系统来完成转换，以满足行业柔性化的需要。

目前，钢铝混合车身的设计开发、材料成形制造工艺及连接设备等还处于研发应用推广中，需要更多高校、科研机构、汽车厂以及设备供应商之间加强沟通和合作。铝合金车身先进连接技术及其评价见表1。

表1 铝合金车身先进连接技术及其评价

连接方法	高质量	高效率	节约投资	焊前准备	操作便利	节约辅材	备件维护	质量检测	节能	环保	应用前景
电阻点焊	AAA	AAA	AA	AA	AA	AA	AAA	AA	AAA	AAA	AAA
冷金属过渡焊	AA	AA	AAA	AA	AAA	AA	AAA	AAA	AAA	AA	AAA
激光焊	AAA	AA	A	A	AA	AA	AA	AAA	AA	AAA	AAA
等离子弧焊	AAA	AA	AAA	AA	AAA	AA	AAA	AAA	AAA	AA	AAA
无铆钉自冲铆接	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AAA	AA	AA
自冲铆接	AAA	AA	AA	AA	AA	AA	AA	AAA	AAA	AAA	AA
抽心铆接	A	AA	AAA	AA	AAA	AA	AAA	AAA	AAA	AAA	A
流钻螺钉技术	AAA	AA	A	AA	AA	AA	AA	AAA	AAA	AAA	AA
搅拌摩擦点焊	AAA	AA	A	AA	AA	AA	AA	AAA	AAA	AAA	AA
螺接	AA	AA	AAA	AA	AA	AA	AA	AAA	AAA	AAA	A
胶粘连接	AA	AAA	AAA	AAA	AAA	AA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA

注：A表示该方法（项目）推荐程度。

5 结束语

1) 铝合金应用是车身轻量化重要发展方向，铝合金连接是其关键工艺。
2) 由于车身造型特点和设计规范的差异，各种车型采用了不同铝合金连接技术，从技术传承及经济合理性预测，电阻点焊、冷金属过渡焊、高能密度焊接和胶粘连接技术较有发展前途。

参考文献：

[1] 崔厚学.汽车焊接技术的三个关键点[J].AI汽车制造业, 2018 (8) : 36-37.
[2] 中国有色网. 汽车轻量化设计需靠大比例使用铝合金来实现[OL]. (2018-07-17) . <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=394975>.

[3] 李勇, 宋筠毅, 程德富, 等. 汽车车身铝合金连接技术综述[J].汽车工艺师, 2018 (11) : 55-60.
[4] 李小飞, 魏建. 连接技术在汽车制造中的应用[J].汽车工程师, 2018 (3) : 53-55.
[5] 谭锦红, 赵运强, 王春桂, 等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J].金属加工 (热加工), 2020 (1) : 8-12.
[6] 张华, 林三宝, 吴林, 等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J].焊接学报, 2003, 24 (3) : 91-96.
[7] 胡大武, 张桂源, 曹鹏程, 等. 新能源汽车电池包关键连接技术[J].金属加工 (热加工), 2020 (8) : 10-13.

MW 20210301