

汽车轻量化车身先进连接技术的应用与发展

韩立军, 郭院波

一汽-大众汽车有限公司 吉林长春 130012

摘要: 高强铝合金和热成形材料是汽车车身现在及未来轻量化发展方向, 通过对大众集团车身铝合金和热成形钢的应用分析, 重点介绍了钢/铝车身的主要焊接技术、焊接特点及其未来的发展方向, 给出了不同材料组合的最优焊接技术方案。这对于汽车轻量化车身的结构设计, 提供了重要的制造技术基础, 促进了车身轻量化发展要求。同时, 对于焊接装备未来的发展方向, 提供了重要的理论指导。

关键词: 车身; 轻量化; 焊接方法; 铝合金; 热成形钢

1 序言

节能、环保和相关法律法规的要求, 决定了汽车车身轻量化发展趋势。铝合金和热成形钢材料是车身轻量化发展的重要组成部分, 两者均可明显地降低车身的重量, 增加车身的强度和刚度, 满足新能源汽车发展的要求^[1-3]。

铝合金具有较低的密度、较好的成形性、较高的屈强比, 尤其对于压铸铝合金, 由于工艺的特殊性, 使材料具有更高的强度和刚度, 故可满足更高的强度和碰撞要求。目前, 铝合金的应用比例越来越高, 如在奥迪A8上的应用比例可以达到80%。

热成形钢是目前车身应用钢板中, 强度级别最高的钢种, 其屈服强度可达1200~1500MPa, 抗拉强度更是高达1500~1800MPa。热成形钢的应用是车身强度与刚度的重要保障, 尤其对于新能源汽车, 对电池的保护极其重要。

奥迪公司在20世纪90年代初, 就已经推出了全铝合金车身, 其目的一方面是轻量化, 另一方面是追求更高的加速性能。但是随着轻量化和碰撞法规的更高要求, 奥迪车身逐渐由全铝车身向铝合金和热成形混合车身的方向发展, 即以铝合金作为主要车身材料, 同时辅以热成形框架增加强度和刚度的设计形式^[4-6]。

2 轻量化车身结构特点

奥迪车身的轻量化发展, 基本代表了汽车行业车身发展的方向。其中的典型代表车型是奥迪A8系

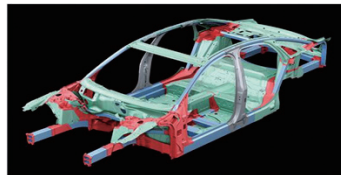
列, 其代表了轻量化发展的基本历程, 同时也间接反映了相关产品和法律法规的发展要求, 也促进了相关车身焊装新技术的发展与应用。奥迪A8车身材料演变过程如图1所示。



a) 第一代车身重量249kg



b) 第二代车身重量215kg



c) 第三代车身重量231kg



d) 第四代车身重量282kg

图1 奥迪A8车身材料演变过程

注: ■代表板材, ■代表型材, ■代表铸件。

奥迪A8车身材料经过近30年的发展，从最初的第一代全铝合金车身，逐步过渡到了铝/钢混合的车身结构，其中铝合金约占70%，热成形钢约占20%，镁合金和其他材料的比例不超过2%，其余为普通高强钢材料。

作为最新一代的奥迪A8车身，增加了热成形钢的比重，这主要是为了增加新能源车更为苛刻的车身强度和刚度要求，从而满足碰撞等产品性能要求。

铝合金主要采用铝合金板材、铝合金型材以及压铸铝合金等。板材主要应用于覆盖件和部分结构件，型材主要应用于门的加强梁和保险杠等部位，

压铸铝合金主要应用于承受更大冲击力的部位，如弹簧腿支架和发动机悬置等。

在铝合金材料的应用过程中，压铸铝合金的应用得到了越来越广泛的关注。由于压铸的特殊工艺、较高的过冷度和成形压力，因此可以得到晶粒更为细小的组织，使其具有更高的力学性能，强度可以达到普通低合金钢的等级。

3 轻量化车身连接技术特点

因为大量铝合金和热成形钢的应用，所以必须解决铝合金和铝/钢异种材料的焊接性问题。奥迪A8车身焊接技术的数据统计见表1。

表1 奥迪A8车身连接技术统计

连接技术		材料	车身结构焊缝长度 (焊点数量) /mm (个)	覆盖件焊缝长度 (焊点数量) /mm (个)	车身焊缝长度 (焊点数量) /mm (个)
热连接	摩擦焊				
	激光钎焊	钢			
	激光焊	传统激光焊	1610		1610
		飞行激光焊	3140		3140
	MIG+激光焊				
	弧焊	MAG	811		811
		MIG/TIG	5892		(5892)
	点焊	传统点焊	钢	(1735)	(1735)
			铝	(20)	(20)
		螺柱焊	钢	(90700)	(90700)
			铝		
		凸焊	钢/钢	(2)	(2)
			钢/标准件	(4)	(4)
		搅拌摩擦点焊			
	凸焊	钢/钢	2		2
		钢/标准件	4		4
	摩擦点焊				
	铆接	中孔铆接/SPR	(2600)		(2600)
		冲铆		376	(376)
	冲铆		94	152	246
	压合		12118	9978	22096
	螺栓连接	螺钉/螺母			
		嵌入螺钉/螺母		(66)	(66)
		FDS		(885)	(885)
	胶接	结构胶接	90700		90700
		支撑胶接	2000	12741	14741
		压合胶接	15400	32098	47498
		密封胶			
	RES		(236)		(236)
	控制冲压铆合		(8)		(8)
	铝合金激光飞行焊			10992	10992

注：车身焊缝长度（焊点数量）为车身结构与覆盖件焊缝长度（焊点数量）之和。其中括号中所对应的数据为焊点数量。

从表1中可以看出, 为了实现铝/钢车身的连接, 奥迪A8几乎采用了目前最为先进的多种连接技术。其中, 部分焊接技术是随着产品升级而由奥迪公司主导开发的, 这一方面不仅满足了自身产品的设计要求, 同时也促进了车身焊接新技术的发展与应用, 像FDS、RES以及CMT brazing等新技术就是为满足大众集团产品的设计要求和新材料的应用而开发的。

奥迪A8车身焊接技术主要以各种激光焊技术、钎接技术、新型弧焊技术和新型点焊技术为主体, 传统点焊技术的地位得到弱化。在新的连接技术中, 激光焊、CMT brazing、RES等新技术的应用就与铝合金和热成形钢的材料物理化学性能存在密切关系, 可以较好地解决铝/钢接头的焊接性问题。

铝合金材料具有较高的热导率和线膨胀系数、较低的电阻率和熔点等物理学特征, 同时铝合金极易在表面形成氧化膜, 造成焊接过程中的氧化物夹杂, 并且铝合金对水或氢具有较强的亲和性, 因此在焊接过程中极易产生气孔和裂纹。铝合金的这些属性, 使得铝合金材料具有较差的焊接性, 难以形成质量较高的接头。与热成形钢相比, 两者的材料性能又差别极大, 这些都会影响铝合金与热成形钢的优质连接。

结合铝合金和热成形钢材料的物理化学性能, 在铝/钢车身的连接技术中, 激光焊技术、铝合金中/高频点焊技术、RES技术等是轻量化车身的主要应用技术, 可以满足车身连接的设计要求。

3.1 铝合金激光焊的技术特点

激光焊具有能量密度高、加热集中、焊接速度快及焊接变形小等特点, 可实现铝合金薄板的快速连接。

按照产品的设计形式和要求, 可以采用不同的激光焊方法进行焊接。如后盖外板上下部的连接, 通常采用激光钎焊的方法进行焊接; 对于门洞边框等区域, 可以采用激光熔焊的焊接方法; 对于诸如门加强梁与门内板的焊接, 可以采用激光+MIG复合焊的方法进行焊接。

激光+MIG复合焊的电弧行为特征原理如图2所示。去掉图2中的MIG焊枪部分, 即为单纯的激光熔焊电弧行为示意图; 控制焊枪的电流范围, 即可构成激光钎焊的示意图。

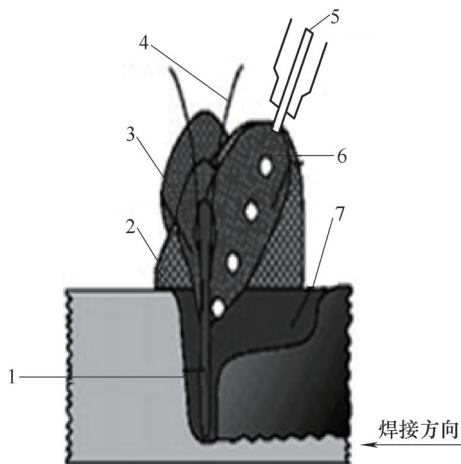


图2 激光+MIG复合焊的电弧行为特征原理

1.蒸气空洞 2.等离子区 3.激光产生的金属蒸气 4.激光束
5.MIG焊枪 6.电弧 7.熔化区

对于铝合金而言, 焊前待焊零件表面的钝化处理是十分必要的。与钢质材料相比, 由于铝合金特殊的材料物理学性能, 其表面对激光的吸收率仅为80%左右, 其余的激光则以反射的形式离开板材表面, 因此必须采用更大功率的激光光源, 才能实现零件的连接, 这也意味着设备成本的增加。因此, 必须采用相应的技术手段, 增加铝合金表面对激光的吸收率。

为提高激光的吸收率, 可以实施如下手段:

第一种方式是增加焊丝的预热电流, 在一定的温度范围内, 激光的吸收率将随着焊丝温度的提高而增加, 这是由铝合金材料的物理属性决定的, 对于铝/钢的激光钎焊, 这一点尤为重要。

第二种方式是改变铝合金表面的材料属性, 增加其对激光的吸收率。可以通过板材表面钝化处理, 增加一层钛的磷酸盐。另外, 也可以在材料的表面增加氧化锆涂层。通过这些手段, 可以明显地提高激光的吸收率。

对于熔敷率要求较高的部件, 采用激光+MIG复合焊接技术, 可以有效地控制焊缝的成形系数。同时利用MIG焊特有的电弧属性, 如阴极雾化作用等, 可以有效清除零件表面的氧化膜, 避免造成焊缝夹杂。

3.2 铝合金弧焊的技术特点

以CMT技术为代表的新型电弧焊接方式, 不仅成功地解决了飞溅问题, 而且可以有效地降低焊接的热输入, 并且电弧具有较高的能量密度, 其能量

密度等级可以达到等离子焊接电弧的水平,即可以达到 $10^3\text{J}/\text{cm}^2$ 。因此,目前CMT brazing有逐步取代等离子钎焊的趋势,在某些结构件区域,也采用该技术取代激光钎焊技术,但焊接速度相对较慢,对于热敏感性要求较高的外表面件,容易产生波浪缺陷,使用时应加以注意。

CMT作为MIG焊的一种特殊形式,仍具有MIG焊的电弧特性,即电弧稳定性好、飞溅较低和桥联性好等诸多优点,适合焊接车身间隙较大的部位。通过合理地控制熔敷率,从而控制焊缝的成形系数,满足产品的设计要求。

另外,MIG焊具有独特的阴极雾化作用,通过这一独特的物理特性,可以在焊接过程中有效清除焊件表面的 Al_2O_3 ,避免造成焊缝的氧化物夹杂。阴极雾化作用的原理可解释为:在电弧空间,铝合金板材接负极,负极负责产生电弧电场中的电子。由于 Al_2O_3 的逸出功较低,在电场的作用下,极易产生逃逸电子,且因电子的逸出,破坏了 Al_2O_3 的结构,使其变得更为疏松,故在电弧吹力的作用下被吹散消逝,从而清除了表面致密坚固且熔点较高的氧化膜,提高了接头焊接性,这是其他焊接方法所无法实现的。

3.3 铝合金点焊的技术特点

对于钢/铝混合车身,点焊仍然是其主要的焊接方法之一。鉴于钢/铝合金特殊的物理化学性能,普通点焊方式难以实现铝/铝或铝/钢的优质焊接,必须采用特殊的控制技术来实现其点焊。

目前,钢/铝焊接难以通过传统点焊的方式实现。对于铝/铝同质材料的点焊,通过近几年的努力,可以实现两者的优质焊接。通过采用中频或高频直流电源,可以明显降低焊接电流;通过双变压器的设计形式,可以获得响应速度更快、稳定性更好和功率因素最佳的电源。电流的降低,可以明显改善焊点的质量,减少热输入,降低焊点周围热影响区的宽度,从而降低热影响区的软化程度,提高接头性能。

另外,铝合金点焊还存在许多特性。如正/负电极间的热不对称现象,这是钢质材料焊接很难出现的,由于焊接电流较大,故点焊过程中的Peltier效应作用明显,结果造成正负极间热的不对称性。以上现象不仅会造成正负极电极帽端面侵蚀程度的不

对称性,也会造成熔核偏移等现象,对接头的性能和成形系数具有重要影响。同时,电极不同的侵蚀程度会造成电极帽的过度修磨,缩短了电极帽的使用寿命,增加了制造成本。

要解决熔核偏移的问题,必须解决热的不平衡性问题。因此,可以采用钢带的形式,借助于钢带,调节正负极间的电阻热分配,综合平衡Peltier效应所带来的影响,但是该方法使用成本相对较高,同时也降低了焊钳的可达性。另外,还可以在现有电源的基础上,通过极性的变化来调节热的不对称性。因此,通过电源极性转换器,调整电流的极性和周波数,可以有效精准地控制电极间热平衡,目前该技术已经得到有效应用。

另外,在焊接不等厚铝板时,使正极靠近厚板,负极靠近薄板,这样可以在一定程度上减弱热不平衡性所带来的影响。

3.4 铝合金RES技术特点

钢/铝异种材料的点状连接,对于屈服强度级别在700MPa以下的钢板,可以采用FDS或SPR等连接方法来完成。对于热成形钢板,其屈服强度已达1200MPa以上,通过上述方法难以实现连接,可以通过RES焊接方法进行连接。

RES(德文缩写为Reibelementschweißen)是德国大众集团参与开发的一种新型连接技术,其借鉴FDS技术和摩擦焊技术的相关原理,可以实现热成形钢和高强铝合金等异种材料的优质连接,目前已成功应用于奥迪A8、Q7、A6L等车型的白车身生产。

RES是一种利用连接单元高速旋转,穿透低硬度板材,然后利用其与高硬度板材的摩擦及塑性变形而形成焊接接头的新型连接技术。在轴向压力与摩擦力的作用下,钢质连接单元尖端与硬质板材之间完成摩擦焊接过程。它可以实现铝合金与热成形板材的优质焊接,具有热输入低、无形变、无余渣残留、无需预加工处理和低排放等特点。RES的焊接技术原理如图3所示。

4 铝/钢车身连接技术的未来发展方向

钢/铝车身是未来新能源车身的发展方向,随着钢/铝材料性能的改进和提高,需要开发更新的焊接方法和改进目前的焊接技术,进一步提高接头的强度和性能,满足更高质量产品的设计要求。

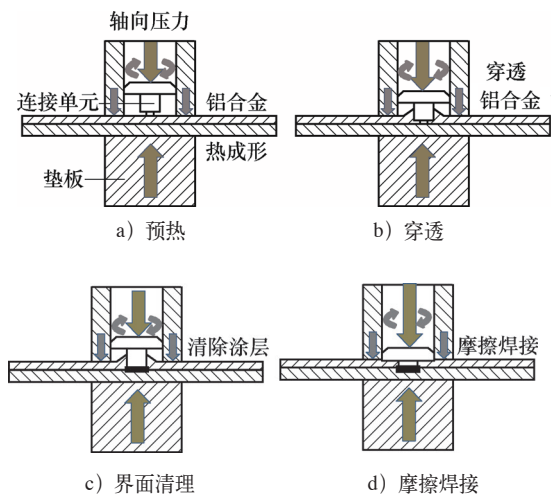


图3 RES焊接技术原理

目前,对于钢/铝车身的连接技术,主要在以下几个方向开展相应的研究。

4.1 三光斑激光焊技术

三光斑激光焊技术原理如图4所示。三光斑的设计思想主要是为了提高焊接质量,避免在焊接过程中因为待焊件表面的油污等杂质或涂层的影响,造成焊缝中气孔的产生。通过光源的合理分配,在前置的两个能量较弱的光斑作用下,这些油污或涂层可以在主光斑焊接之前被加热烧结清除,从而避免了焊缝中气孔等缺陷的产生,提高了焊接质量。

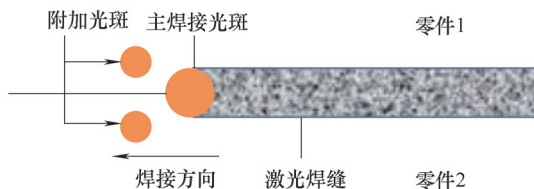
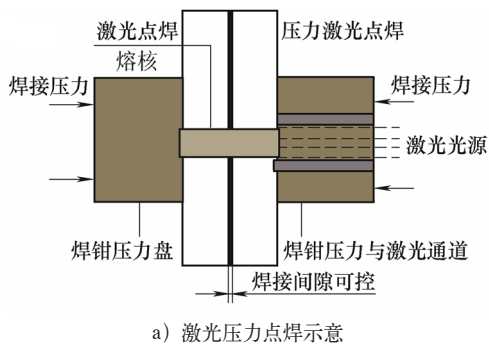
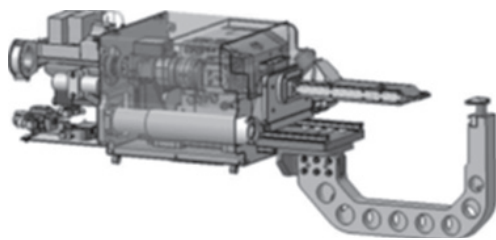


图4 三光斑激光焊技术原理

另外,对于铝合金的激光熔焊,前置光斑可以预热铝合金,从而提高铝合金的吸收率,达到降低激光功率的作用。

4.2 激光点焊技术

激光点焊技术是为提高激光点焊质量而设计的一种新型有压力参与的激光复合焊技术,该项技术原理如图5所示。激光点焊技术既利用了激光能量密度高的优点,又利用了点焊焊接时可以施加压力的特点,实现了激光熔焊过程中的无缝隙或微小缝隙焊接,极大地提高了接头质量和焊点表面成形质量,对于制造高品质车身具有较好的应用前景。



b) 激光压力点焊钳结构

图5 激光点焊技术原理

4.3 元件旋转点焊技术

元件旋转点焊技术是目前正在开发的一种新技术,结合了RES和点焊技术的部分特点。前程与RES相似,即通过轴向压力和旋转,元件穿越铝合金板材;后期采用传统电阻点焊的方式,实现螺钉与热成形板材的焊接。该焊接方法的优点是既可以实现异种材料的连接,也可以部分消除RES后期顶锻压力所造成的焊点变形,适用于对变形要求较高的场合(见图6)。

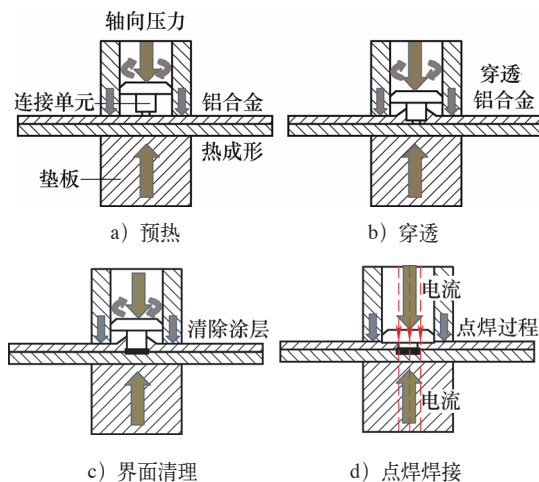


图6 元件旋转点焊技术原理

5 结束语

本文通过对铝合金和热成形钢轻量化车身材料及连接性能进行分析,得出如下结论。

搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用

司福建

无锡威唐新能源科技有限公司 江苏无锡 214115

摘要：作为一种新型的连接技术，搅拌摩擦焊在轻质材料连接上相对于传统的熔化焊有明显的技术优势。随着新能源汽车的发展，轻质材料获得了较多的应用以达到更高的轻量化水平，提升汽车的续航里程。目前，搅拌摩擦焊在新能源汽车三电系统，如电池包下箱体、液冷板、电动机壳体及电控壳体等已有大规模地应用。随着全铝车身的发展，搅拌摩擦点焊有望在车身连接上取得大范围的应用。

关键词：搅拌摩擦焊；搅拌摩擦点焊；新能源汽车；铝合金；车身连接

1 序言

1991年，搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding, FSW）由英国焊接研究所（TWI）发明，属于固相连接技术范畴。搅拌摩擦焊的发明，最初是希望解决在航天领域中应用到的轻质金属材料（铝、镁合金等）连接接头性能弱化的问题。该技术依靠高速旋转的搅拌头与两待焊工件接触产生摩擦热，使接缝处金属产生塑性软化，旋转的搅拌头周围塑性软

化金属受到搅拌挤压，并随搅拌针的旋转沿焊缝前进方向向后退方流动，塑性金属待搅拌针离开冷却后形成焊缝，实现了固相连接（见图1）^[1-3]。因为搅拌摩擦焊针对轻质材料焊接所展现出的独特优势，所以它被誉为“20世纪焊接领域中继激光焊之后的又一项革命性焊接技术”^[4]。

在汽车制造领域，传统燃油汽车车身结构主要应用钢铁材料，轻质材料应用较少，但随着新能源

1) 铝合金和热成形板材的应用，是未来轻量化车身发展的必然趋势，鉴于两种材料特殊的物理化学性能，决定了其连接形式和手段必然不同于传统的车身连接。因此，必须进一步开发以激光焊和RES为代表的新的焊接技术，以适应铝合金以及钢/铝异种材料的连接。

2) 激光焊将成为轻量化车身连接的重要手段，借助于激光焊自身的特点，利用填丝型激光熔焊或激光+MIG复合焊技术，可以成功实现多种接头铝/铝或铝/钢等异种材料的优质连接。

3) 传统点焊已经难以实现铝/铝或铝/钢等异种材料的点焊，采用直流中频或高频点焊以及RES等新型焊接技术可以实现优质点焊连接。

4) 利用铝/钢材料的物理化学性能，在现有激光焊等新技术的基础上，进一步开发符合轻量化车身设计要求的复合型焊接技术，是未来连接技术发展的重要方向。

参考文献：

- [1] 陈宇豪，薛松柏，王博，等.汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J].材料导报，2019，33（S2）：431-440.
- [2] 张琪，叶鹏程，杨中玉，等.汽车轻量化连接技术的应用现状与发展趋势[J].有色金属加工，2019，48（1）：1-9.
- [3] 李光霖，刘新玲.汽车轻量化技术的研究现状综述[J].材料科学与工艺，2020，28（5）：47-61.
- [4] 韩立军.激光焊接技术在一汽大众迈腾车身制造中的应用[J].金属加工（热加工），2008（8）：32-35，40.
- [5] 韩立军.白车身激光熔焊接头设计型式与质量评价标准[J].电焊机，2010，40（5）：45-49.
- [6] 张正林.超高强度钢的中频点焊性能研究[D].长春：吉林大学，2010.

MW 20210310