

● 综述 ●

车用铝合金连接技术的研究进展与应用

陈晓辉, 钟志平, 陆 辛

(机械科学研究总院, 北京 100083)

摘 要: 铝合金是汽车车身轻量化技术应用的主要材料之一。在汽车制造技术发展中, 如何广泛而安全地使用多材质连接技术成为汽车制造的重要发展方向。本文综述了铝合金与铝合金、铝合金与各种高强钢、铝合金与镁合金、铝合金与钛合金以及铝合金与复合材料的连接技术, 并分别阐述了机械连接、焊接以及胶结方式在多材质连接中的技术发展现状, 指出各种连接方式的局限性和优势所在。这能为实际应用和生产需要提供参考。

关键词: 轻量化; 连接; 铆接; 焊接

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.11.002

中图分类号: TG457.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)11-0005-04

Research Progress and Application of Joining Technology of Aluminum Alloy for Automobile

CHEN Xiaohui, ZHONG Zhiping, LU Xin

(China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aluminum alloy is one of the main materials of the application of lightweight technology for automobile body. In the development of automobile manufacturing technology, how to use multi-material connection technology widely and safely becomes an important development direction of automobile manufacturing. The joining technologies of aluminum alloy and aluminum alloy, aluminum alloy and high strength steel, aluminum alloy and magnesium alloy, aluminum alloy and titanium alloy, aluminum alloy and composite material were summarized. Technology development of mechanical connection, welding and bonding method in multi-material connection was elaborated respectively. Limitations and advantages of various connections were pointed out. This can provide the reference for the practical application and the production needs.

Key words: light-weighting; joining; riveting; welding

随着能源紧缺和环境污染日益严重, 作为全球制造业支柱产业的汽车产业, 面临着节能减排的压力。铝合金以轻质高强的特点, 逐步从航天领域进入到汽车行业。以奥迪、宝马、捷豹为首的汽车制造厂家率先研究并开发铝合金汽车, 甚至是全铝汽车。目前, 国内大部分汽车制造厂家只是部分的应用铝合金材料以实现汽车的轻量化。在部件连接方面, 不仅存在铝合金的同材连接, 也存在大量铝合金与高强钢、铝合金与其它轻质金属材料以及铝合金与复合材料的异材连接。在汽车制造过程中, 各部件的连接, 一般分为机械连接、焊接和粘接工艺。如何使得连接技术适用范围广泛且安全可靠, 成为汽车制造过程中的重要发展方向。目前, 选择哪种连接

技术取决于整车性能的标准和制造工艺的要求所决定。本文将就车用铝合金连接技术的研究展开综述分析, 并对其应用情况进行相应的介绍, 以期对汽车轻量化进程中连接技术的发展有所推介和促进。

1 铝合金的同材连接

在汽车车身结构设计中, 由于铝合金可在碰撞过程中比钢材多吸收一半的能量, 且不需要特别的防锈处理, 原则上, 铝合金之间的连接方式可选择胶结, 也可选择焊接或机械连接。

铝合金胶结接头的强度不仅在于胶结物的特性, 还在于胶结过程中铝合金表面状态, 表面经过等离子处理后的铝合金连接强度可以提升 10%左右^[1]。铝合金 AA5052 与 AA6061 的搅拌摩擦焊在搅拌 710 r/min 且焊接走速为 20~28 mm/min 时, 可以得到较好的连接接头^[2]。2013 年, 天津大学的 Shen Zhikang 等人开发了 AA7075-T6 铝合金的摩擦复焊技术, 发现由于焊接区材料流动会形成异于基体的组织状

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 科技重大专项 (2014ZX04002-071)

作者简介: 陈晓辉 (1975-), 女, 辽宁辽阳人, 博士, 主要研究方向: 铝合金成形工艺; 电话: 010824115037;
E-mail: ninechenxh@163.com

态,而且连接界面的空洞对连接强度的影响很大,在接头的拉剪强度测试过程中会发生焊料脱焊、上表面或下表面脱离断裂^[3]。同年,他们在研究铝合金的搅拌摩擦焊接工艺时,连接接头的拉剪强度因搅拌针的转速升高和焊接走速减缓而增强。他们的最佳实验结果是,在 2100 r/min 转速下焊接 4s,可以得到拉剪强度达到 210N 的连接强度^[4,5]。搅拌摩擦焊连接后的铝合金连接区域经局部变形后会细化晶粒,接头储存了大量的变形能和高的位错密度,因此在后续热处理过程中,会导致异常的晶粒长大从而导致接头强度急剧下降^[6]。搅拌摩擦点焊技术,是在搅拌摩擦焊的基础上,通过搅拌针作交叉短距往复动作实现对复杂结构件进行点式连接的新技术,可以拓宽点焊接头的连接面积,并显著降低搭接界面畸变和匙孔材料的缺失,从而大大提高接头强度^[7]。2015 年,HeXiaocong 等人研究了铝合金 AA5052 同材的自冲铆接技术,发现自冲铆接头的强度取决于自冲铆接过程中母材与铆钉之间的塑性变形能否形成有效的机械互锁结构,而且自冲铆连接的拉剪断裂通常是由于上下层板在铆接处脱扣分离,而疲劳强度的断裂一般是底层板沿铆钉裙形成的圆筒边沿断裂,这主要是残余应力存在造成的^[8]。KMori 等人对铝合金板材的点焊、机械铆接和自冲铆接技术进行了对比研究,通过对接头的静态强度和疲劳强度的测试,发现自冲铆连接得到的连接件强度和疲劳强度都是最高的,而机械铆接的强度是点焊接头强度值的一半。他们分析发现,部分原因是由于点焊接头处应力集中在焊接点而自冲铆和机械铆则因连接瞬间界面的滑动释放了连接点的应力,同时,自冲铆和机械铆连接由于存在局部形变强化效应,从而导致点焊接头的屈服强度相对下降^[9]。

2 铝合金与钢的连接

2.1 铝合金与钢的机械连接

目前国内外汽车制造企业都在进行轻量化技术的研究与开发,部分钢构件逐步成为铝钢复合构件,铝合金与高强钢、超高强钢的连接越来越受到关注。自冲铆接技术属于非冶金结合技术,连接接头存在气密性差、耐疲劳性低的缺点,而且由于需要铆钉进行连接,某种程度上不能实现高效轻量化。其优势就在于通过铆钉穿透上层板在下层板内形成内扣完成冷连接,整个过程中,上层板不能发生断裂或铆体穿

透底板,由于可以连接多层板,所以适用于同材连接也适用于异材连接。作为常温连接方式,自冲铆对连接材料的强度是有韧性、强度要求的,作为上层板如果不能被铆钉穿透是无法形成连接的,而底板材料如果强度不够被穿透,也无法形成有效连接^[10]。以自冲铆方式连接多层铝/钢板材。通过对高强钢与铝合金、低碳钢与铝合金进行的连接实验,效果都很好。如果将相对较软的板材放在上层进行连接,会得到更好的连接效果^[11]。单面冲铆作为简便不需背撑装置的连接方式,适用于在车身组件过程中装配空间狭小区域的连接,但一般是与胶结联合使用^[12]。通过模具控制金属流动形成互锁。由于机械铆接过程中,板材会发生塑性变形^[13]。由于不需要界面熔融,自冲铆和机械铆在连接板材方面应用较多,自冲铆接可以在常温下连接两层以上的板材,而机械铆需要板材在连接处产生一定的塑性变形以形成界面的互锁,不需要铆钉,因此连接成本较低。自冲铆和机械铆、点焊相比,静态接头强度和疲劳强度最高。由于连接界面塑性变形引起的微裂纹,使得机械铆的静态连接强度相对最低,但与点焊相比,两者的疲劳强度几乎一样。

2.2 铝合金与钢的焊接

车身上的高强钢与铝合金两者热导率和弹性模量相差较大,在焊接过程中界面易形成钢铝金属间化合物引起接头脆性增加,容易引起接头的焊接应力^[14,15]。电阻点焊作为高效低成本易实现自动化的成熟技术一直是车身装配中的主导应用技术。为了提高铝合金与钢材的连接强度,A5052 铝合金与镀锌低碳钢采用交变双脉冲气焊连接,焊材分别选用 Al、Al-5Si、Al-12Si 和 Al-4.5Mg,发现 Si 的扩散钉扎了 Fe₂Al₅ 合金的 s 亚层和 IMC 层的长大,间接提高了接头性能^[16]。有学者在铝合金与先进高强钢电阻点焊工艺中,加入了磁控手段,在一定程度上可以提高接头的静态强度和疲劳性能,并改善界面断裂因素,但在实际应用中,尚有待稳定^[17]。有研究采用夹层材料进行镀锌高强钢 H220YD 与铝合金 A6008 电阻点焊,得到的连接接头与钎焊的接头相似,随着夹层厚度的增加,熔核直径会减小。拉剪载荷曲线提示出夹层厚度增加,强度会相应增加,断裂为熔核脱栓模式^[18]。2014 年,Qin Guoliang 等人研究镀锌钢与铝合金的连接技术,他们采用大光斑熔焊方式进行搭接实验,结果接头拉伸断裂多源于熔焊界面,接头的抗

拉强度达到铝合金板材的75%。与金属气焊相比,大光斑熔焊技术的关键在于焊接时间和过程稳定性的控制^[19]。对比不同表面状态的铝合金与钢材连接,发现在熔液浸润和扩展与钢材的表面状态相关,表层的镀锌会加强浸润和扩散,在一定程度上提高了接头的强度。表层金属间化合物的厚度与形貌取决于能量强度和分布^[15,20]。兰州理工大学的王谦等人,利用超声波辅助薄膜铝钎料进行焊接,发现超声波能够有效破除连接表面的氧化膜,且焊缝没有金属间化合物,抗剪测试中,断裂发生在铝膜与基体的结合界面处,抗剪强度为70MPa^[21]。大功率超声点焊是近年来发展起来的新技术,整个点焊过程低能耗,铝合金的同材连接可以达到3.0kN的连接强度,接头的失效是熔核脱栓模式,未镀层的钢材与铝合金连接时也可以达到这样的强度,但当焊接时间过长,使输入能过高时,会形成较多的脆性化合物从而导致界面断裂而不再脱栓的失效模式^[19]。由于超声点焊引起的机械形变诱导了焊区的高应变速率的动态形变,导致异材连接处的扩散和界面变形加剧,而且界面的反映程度与焊接时间呈某种函数关系^[22]。有研究采用双道次激光焊接,第一道是采用平行激光扫过两个板材搭接处,加热表层的锌层使之气化,第二道辅以聚焦激光光斑进行焊接。两道次完成后,可以得到完全无缺陷的接头,在线检测设备可以进行跟踪^[23]。目前尚处于实验阶段。如果采用胶粘+FBJ混合连接(FBJ+黏合剂),即采用搅拌摩擦焊(FBJ)进行铝合金AA7075和双相钢DP980连接时辅助以胶结方式,发现胶结层保护了搅拌摩擦焊过程中可能产生的微裂纹,从而避免了裂纹侵蚀断裂,混合连接接头的强度仍可达到侵蚀前强度的80%^[24]。

3 铝合金与其它材料的连接

为了进一步降低汽车质量,以镁合金、钛合金、复合材料为代表的轻质材料被逐步应用到汽车上,其适用的连接技术的研发与应用成为有效轻量化的必需手段。铜合金因塑性和耐蚀性好,热导和电导率高,广泛应用于电子产品元件。研究发现,在铜与铝合金的连接中,搅拌摩擦焊可以比熔焊得到更高的连接强度,这可能是由于铝的线膨胀系数是铜的1.4倍,在连接过程中,易产生很大的变形和内应力,而且微动裂纹也因界面粗糙增大了摩擦,而微动磨损也会促进裂纹产生和扩展,最终导致接头失效^[3]。铝合金

AA6061与钛合金TC4由于两者物理化学和冶金性能差别较大,易于在连接界面形成脆性金属间化合物从而危害连接接头。搅拌摩擦焊技术作为固相连接技术,避免了脆性相在界面形成连续界面层,当搅拌针旋转速度为750r/min时,可以得到80%基体强度的接头强度^[25]。采用搅拌摩擦焊对钛合金TC1和铝合金5A06进行搭接实验,发现当搅拌针旋转速度达到1500r/min,焊接走速达到60mm/min时,搭接处铝合金与钛合金混合充分,钛合金在界面处弯曲呈钩状,与铝合金结合紧密,接头无缺陷^[26]。

由于复合材料与金属之间的物理性能、化学性能以及力学性能均差异较大,其连接方式一般为胶结、铆接、螺丝固结。然而这些方式都存在连接效率低或危害环境等不足之处,因此需要发展其它连接方式以适应汽车车身制造中多材质连接的要求。铝合金与HDPE的搅拌摩擦焊过程中,当搅拌针转速达到750r/min以上且焊接走速达到63mm/min时,可以得到很好的连接强度,也说明机械互锁与表面的化学浸润连接可以替代传统的胶结和机械铆接^[27]。这一连接方式适用于金属基颗粒增强复合材料与铝合金的连接^[28]。铝合金与碳纤增强复合材料以摩擦点焊方式进行连接时,铝合金待连接表面以喷砂方式进行处理可以达到较高的表面粗糙度从而可以实现连接初期的界面机械咬合,从而提高最终连接强度^[29]。铝合金A5052与碳纤维增强材料直接进行摩擦搭接,发现焊接速度达到1600mm/min时,接头强度达到最大值^[30]。在铝合金与复合材料连接时,如果以直接胶结的方式,则铝合金表面的处理状态对于连接接头的影响较大,经过处理的表面,可以提高接头强度1.6~2.6倍^[31]。摩擦铆接是将摩擦焊与机械铆接相结合的新的连接技术,在金属板材与复合材料的连接方式中,与胶结相比,摩擦铆接对连接表面要求不高,连接时间还可以缩短,同时,不需要预加工连接孔。在目前的铝合金与复合材料的连接技术中,无论采用何种连接方式,需要进行材料的表面处理,以得到较高的连接强度。

4 结论与展望

综合来看,不同的连接方式适用不同的材料,而且不同的连接方式产生的连接效果限制了其使用的部件位置。电弧焊虽然可以得到较高的连接强度,但由于连接过程中高能量的输入导致其连接精度相对

较难控制,一般用于框架的连接。而激光焊由于局部小面积低能量输入造成的变形区域较小,且可以实现板单面连接,不仅可以保障较高的连接精度,而且可以隐藏焊接处。因此,多用于汽车外板和底板等外部件的连接。

虽然目前的连接技术已经考虑到连接材料的特性、连接空间以及连接精度的要求不同,但在车身连接过程中,多种连接方式的介入仍会影响彼此的连接效果。点焊时,会破坏掉焊点周边的胶,如果比例较小,在某些等级的要求下,可以接受。

参考文献:

- [1] Rui Z, Jianping L, Peichung W, et al. Effect of adhesive characteristics on static strength of adhesive-bonded aluminum alloys[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 57: 85-94.
- [2] Raj Kumar V, Venkatesh K M, Sadeesh P, et al. Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA 5052-AA 6061[J]. Procedia Engineering, 2014, 75: 93-97.
- [3] Zhikang S, Xinqi Y, Zhao Hua Z, et al. Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints[J]. Materials and Design, 2013, 44: 476-486.
- [4] 钱晓平. 基于计算机技术铝合金 7075 激光焊接仿真分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 184-187.
- [5] Peng D, Hongmei L, Daqian S, et al. Effects of welding speed on the microstructure and hardness in friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy [J]. Materials and Design, 2013, 45: 524-531.
- [6] Hu Z L, Wang X S, Pang Q, et al. The effect of post-processing on tensile property and microstructure evolution of friction stir welding aluminum alloy joint [J]. Materials Characterization, 2015, 99: 180-187.
- [7] 李新梅, 杜宝帅, 张忠文, 等. 摩擦搅拌焊 6061-T6 铝合金焊接接头的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2013, 42(11): 196-201.
- [8] 高宝杰, 吉华, 樊云杰, 等. 脉冲 MIG 焊对 7N01 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(15): 138-141.
- [9] Mori K, Abe Y, Kato T. Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminum alloy sheets joined by mechanical clinching and self-piercing riveting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 1900-1905.
- [10] Mori K, Abe Y, Kato T. Self-piercing riveting of multiple steel and aluminum alloy sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2002-2008.
- [11] Yuri M, Takahiro I, Eiji A, et al. Cold forge spot-bonding of high tensile strength steel and aluminum alloy sheets [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2006-2011.
- [12] Yuhong L, Lianhong Z, Weijing L, et al. Single-sided piercing riveting for adhesive bonding in vehicle body assembly [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32: 498-504.
- [13] Abe Y, Mori K, Kato T. Joining of high strength steel and aluminum alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 884-889.
- [14] 何广忠, 王峰, 李军, 等. 搅拌摩擦焊技术在高速动车组铝合金厚板焊接上的应用研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 206-210.
- [15] Yongchao S, Xueming H, Yixiong W. Quantitative characterization of porosity in Fe-Al dissimilar materials lap joint made by gas metal arc welding with different current modes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 81-86.
- [16] 于梦菲, 王文, 郭强, 等. 强制冷却搅拌摩擦焊铝合金最新研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(19): 5-9.
- [17] Chanjo L, Jungmin L, Hoyeon R, et al. Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2169-2178.
- [18] Weihua Z, Daqian S, Lijun H, et al. Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminum alloy with 4047 AISi 12 interlayer [J]. Materials and Design, 2014, 57: 186-194.
- [19] Guoliang Q, Zhen L, Yuhu S, et al. Large spot laser assisted GMA brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2684-2692.
- [20] Krishna P Y, Ravi N B, Koteswararao V R, et al. Fluxless arc weld-brazing of aluminium alloy to steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2949-2959.
- [21] 徐燕, 余驰斌, 张元好. 活化热浸铝工艺对高强钢和铝合金焊接性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 206-210.
- [22] Farid H. Rapid intermetallic growth under high strain rate deformation during high power ultrasonic spot welding of aluminum to steel [J]. Materials and Design, 2015, 66: 459-472.
- [23] Junjie M, Masoud H, Blair C, et al. Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding [J]. Materials and Design, 2014, 58: 390-401.
- [24] Yong C L, Lile S, Tsungyu P, et al. Study of mechanical joint strength of aluminum alloy 7075-T6 and dual phase steel 980 welded by friction bit joining and weld-bonding under corrosion medium [J]. Materials and Design, 2015, 69: 37-43.
- [25] Aiping W, Zhihua S, Kazuhiro N, et al. Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminum alloy 6061 [J]. Materials and Design, 2015, 71: 85-92.
- [26] 陈玉, 倪泉, 黄春平, 等. 钛 / 铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头的组织结构 [J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 73-79.
- [27] Khodabakhshi F, Haghshenas M, Sahraeinejad S, et al. Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene [J]. Materials Characterization, 2014, 98: 73-82.
- [28] Belete S Y, Venkateswarlu D, Mahapatra M M, et al. On friction stir butt welding of Al + 12Si / 10 wt% TiC in situ composite [J]. Materials and Design, 2014, 54: 1019-1027.
- [29] Goushegir S M, Santos J F, Amancio S T F. Friction spot joining of aluminum AA2024 / carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composites single lap joints: microstructure and mechanical performance [J]. Materials and Design, 2014, 54: 196-206.
- [30] Kimiaki N, Shoichiro Y, Atsuki T, et al. Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining [J]. Composites: Part B, 2015, 73: 82-88.
- [31] Jianhui Q, Eiichi S, Lin L, et al. Improving the shear strength by silane treatments of aluminum for direct joining of phenolic resin [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 2406-2412. H