铸铝连接工艺技术研究

李赫　李峰　王凤奇　赵醍　张玲玲　王亭力

中国第一汽车集团股份有限公司

摘要：本文主要研究了铸铝零件之间的连接工艺，通过对SPR自冲铆连接技术、FDS流钻螺钉连接技术和MIG焊连接技术的研究，通过连接试验及试验件拉伸试验，研究铸铝材料连接的可行性和可靠性。该技术能够为铸铝零件连接提供工艺技术参考，有效降低铸铝零件的制造和维修成本。

关键词：铸铝；连接工艺；铸铝维修

0　前言

随着高压铸铝技术的发展，铸铝零件在汽车车身上的应用越来越广泛。作为汽车轻量化的主要材料，铝合金具有以下优点：能耗低，无污染，环保节能；提高结构刚性和行驶性能；提高耐蚀性；可以实现相同和不同材料连接；同样使用条件，铝比钢轻60%。在铸铝生产制造过程中，零件尺寸设计越来越大，对于铸铝技术的要求越来越高，当铸铝零件应用过程中出现损坏时，通常采用整体更换的方式，导致铸铝的损坏维修成本较高。研究铸铝零件的连接技术，能够使铸铝零件的连接加工和维修成为可行、可靠的工艺技术。

1　铸铝连接工艺的选择

铝合金连接常用的工艺包括：SPR、FDS、铝点焊、CMT焊、MIG焊、激光焊及搅拌摩擦焊等，考虑到铸铝本身特性和铸铝零件之间的连接类型，本文主要研究两种铝合金冷连接：SPR连接技术（SPR是一种高强度冷连接工艺，适用于多种材料间的连接）和FDS连接技术（FDS技术最大的特点是实现了异型材料间的单面连接），以及一种铝合金热连接：MIG焊连接技术（铸件和型材的焊接更适合使用MIG焊）。采用合适的试片尺寸、厚度及搭接方案开展连接工艺试验。

2　铸铝零件母材试验过程

（1）母材：采用铸铝零件直接切割拉伸试片，试片长度为90 mm，中部宽度为6 mm，厚度为3 mm，如图1所示。

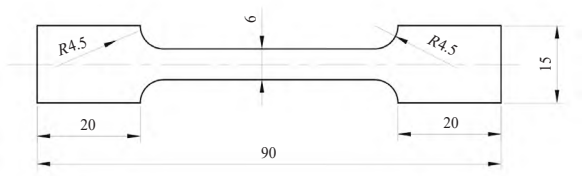


图1　母材试片示意

（2）母材试片拉伸测试：将母材试片进行拉伸测试，直至母材中部（截面积最小处）出现断裂失效。载荷和位移变化的典型曲线如图2所示。

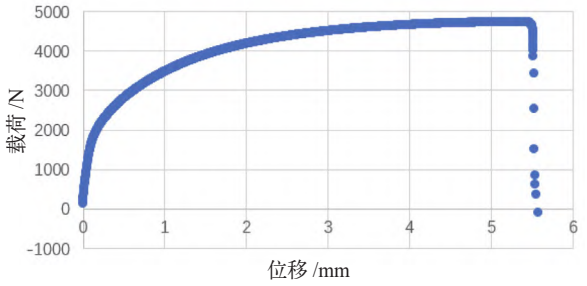


图2　母材试片拉伸载荷和位移变化典型曲线

（3）母材拉伸试验数据：母材拉伸测试数据如表1所示，5次拉伸测试中抗拉强度可以达到269.7 MPa以上，平均抗拉强度280.7 MPa。

表1　母材试片5次拉伸试验载荷及拉伸强度数据

序号	1	2	3	4	5	平均值
抗拉强度/MPa	282.6	287.9	284.1	269.7	279.2	280.7

3　SPR连接试验过程

（1）母材：采用铸铝零件直接切割试片，厚度为6 mm，试片长度为100 mm，宽度30 mm，搭接面厚度

3 mm，搭接面长度 20 mm。

（2）铆接方案：采用梯形表面对接形式、2 个铆钉的连接方案，铆接试片与铆钉尺寸如图 3 所示，铆钉中心距为 12 mm。

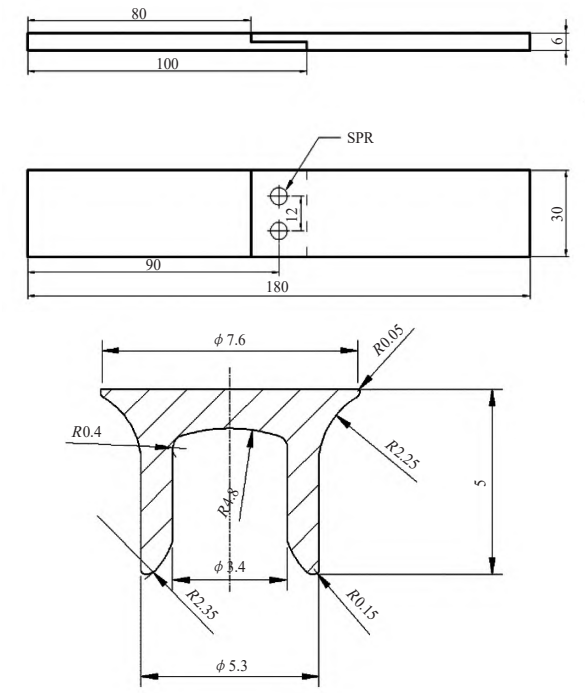


图 3　铆接试片及铆钉尺寸示意

（3）质量目标：镶嵌尺寸 f_1、f_2 大于 0.1 mm，底厚（下板最薄的部分）大于 0.2 mm，如图 4 所示。

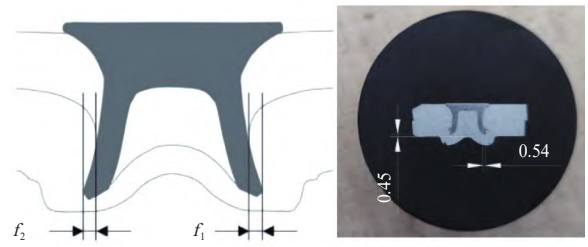


图 4　铆接质量目标及试片金相尺寸

（4）铆接试片金相测试：镶嵌尺寸为 0.54 mm，底厚为 0.45 mm，满足质量目标。

（5）铆接试片拉伸测试：将铆接后的试片进行拉伸试验，直至母材出现裂纹，最终导致铆接凸台脱扣失效。载荷和位移变化的典型曲线如图 5 所示。

（6）铆接拉伸试验数据：铆接拉伸测试数据如表 2 所示，5 次拉伸测试中载荷可以达到 5532 N 以上，平均载荷 6661 N。

（7）总结：采用 SPR 工艺方案进行连接，为了保证外观的平滑过渡，需要在连接部分加工梯形接口，

表 2　铆接试片 5 次拉伸试验载荷数据

序号	1	2	3	4	5	平均值
载荷 /N	7513	5796	7653	6813	5532	6661

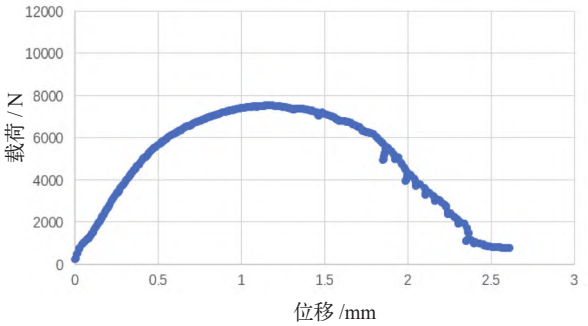


图 5　铆接试片拉伸载荷和位移变化典型曲线

用于实现 SPR 连接。在 30 mm 宽度、2 个铆钉的连接方案中，5 次拉伸测试中最低载荷为 5532 N，平均载荷为 6661 N。在发生失效时，铆钉边缘位置会发生母材断裂，进而导致铆钉脱扣。采用铆接连接方案时，梯形接口加工难度会随零件结构复杂程度而增加，因此该方案不适用于复杂结构进行连接。

4　FDS 连接试验过程

（1）母材：采用铸铝零件直接切割试片，厚度为 6 mm，试片长度为 100 mm，宽度 30 mm，搭接面厚度 3 mm，搭接面长度 20 mm。

（2）FDS 连接方案：采用梯形表面对接形式、2 个螺钉的连接方案，连接试片及螺钉尺寸如图 6 所示，螺钉中心距为 14 mm，螺钉中心距离边界 10 mm。

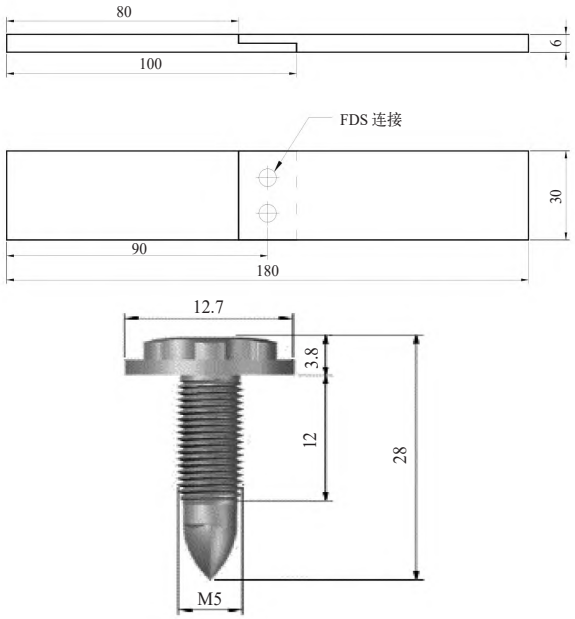


图 6　FDS 连接试片及螺钉尺寸示意

（3）质量目标：铸铝试片上不能出现裂纹或开裂特征、螺钉与下板咬合长度大于 1.5 t（t 为下板板厚）。

（4）FDS 连接试片金相测试：如图 7 所示，螺钉与下板咬合长度为 5.73 mm，大于下板板厚（3 mm），满足质量目标。

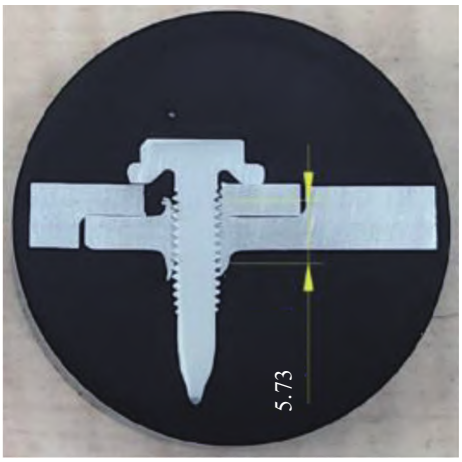


图 7　FDS 连接试片金相尺寸

（5）FDS 连接试片拉伸测试：将螺接后的试片进行拉伸试验，直至母材上出现裂纹，最终导致螺接凸台脱扣失效。载荷和位移变化的典型曲线如图 8 所示。

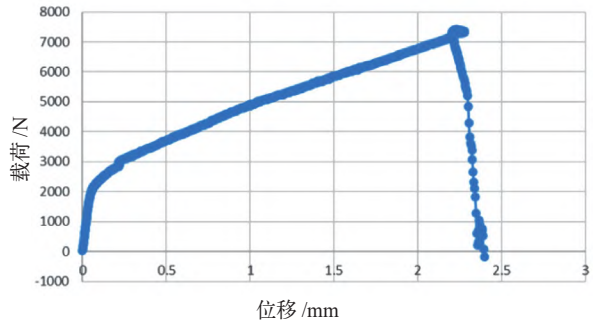


图 8　FDS 连接试片拉伸载荷和位移变化典型曲线

（6）FDS 连接拉伸试验数据：测试数据如表 3 所示，5 次试片拉伸测试中载荷可以达到 6478 N 以上，平均载荷 7281 N。

表 3　FDS 连接试片 5 次拉伸试验载荷数据

序号	1	2	3	4	5	平均值
载荷 /N	7405	6478	6946	7416	8160	7281

（7）总结：采用 FDS 工艺方案进行连接，为了保证外观的平滑过渡，需要在连接部分加工梯形接口，用于实现 FDS 连接。在 30 mm 宽度、2 个螺钉的连接方案下，5 次拉伸测试中最低载荷为 6478 N，平均载荷为 7281 N。在发生失效时，螺钉边缘位置会发生母材断裂，进而导致螺钉脱扣。采用 FDS 连接方案时，梯形接口加工难度会随零件结构复杂程度而增加，因此该方案不适用于复杂结构进行连接。

5　MIG 焊连接试验过程

（1）试片：采用铸铝零件直接切割试片，长度为 100 mm，宽度为 100 mm，厚度为 3 mm，焊接面加工 45° 坡口，底部留有 1 mm 钝边，不留装配间隙，如图 9 所示。

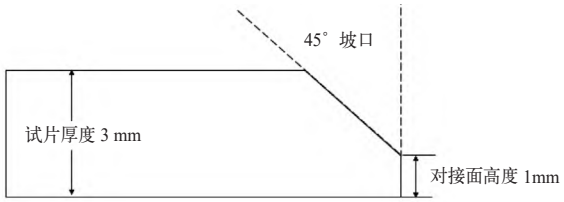


图 9　搭接面横截面示意

（2）MIG 连接方案：采用 Y 形坡口对接形式，底部利用陶瓷垫板防止焊液流出，如图 10 所示，采用 MIG 焊焊接，并保留焊缝余高 2 mm（用于排出焊缝气孔），并在焊接完成后将余高打磨平整，如图 11 所示。

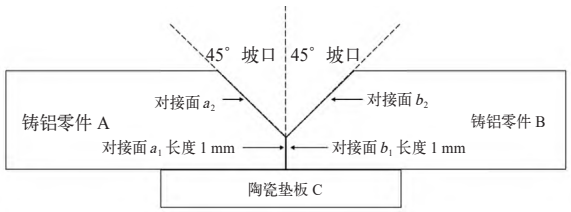


图 10　MIG 焊方案

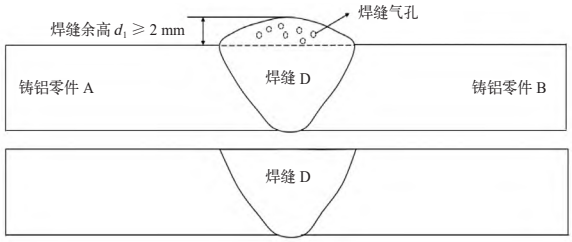


图 11　焊缝截面焊后及打磨后示意

（3）质量目标：焊后上表面区域允许存在气孔，但焊缝磨平后，焊缝内部不允许存在大于 0.5 mm 的气孔；焊缝内部无未熔合区域。

（4）MIG 焊试片金相测试：MIG 焊试片焊缝余高存在气孔，打磨平整后的焊缝内无气孔，不存在未融合区域，满足质量目标。

（5）MIG 焊试片拉伸测试：将焊后试片进行线切割，加工为便于测试的拉伸试验试片（与母材测试试片尺寸一致），总长度 90 mm，宽度 15 mm，焊道宽

度 6 mm。对 MIG 焊拉伸试验试片进行测试，直至焊缝出现断裂失效。载荷和位移变化的典型曲线如图 12 所示。

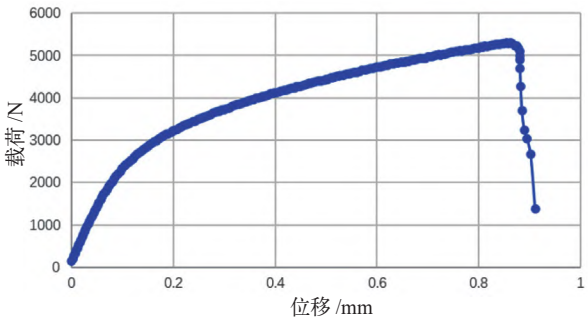


图 12　MIG 焊试片拉伸载荷和位移变化典型曲线

（6）MIG 焊拉伸试验数据：测试数据如表 4 所示，5 次拉伸测试中抗拉强度可以达到 193.9 MPa 以上，平均抗拉强度 217.2 MPa。

表 4　MIG 焊试片 5 次拉伸试验载荷及抗拉强度数据

序号	1	2	3	4	5	平均值
抗拉强度 /（MPa）	204.3	193.9	247.2	217.1	223.5	217.2

（7）总结：采用 MIG 焊工艺方案进行连接，利用 Y 形对接形式，焊后消除余高气孔的加工措施，当焊缝截面为 6 mm 宽、3 mm 厚时，5 次拉伸测试中最低载荷为 3490.2 N，最低抗拉强度为 193.9 MPa，抗拉强度平均值为 217.2 MPa。在发生失效时，焊缝处发生断裂。采用 MIG 焊连接方案时，焊接面坡口可通过常规工具在铸铝零件缺陷部位进行加工，不需要特殊焊接设备，仅需采用铝合金专用焊丝即可完成 MIG 焊连接，因此该方案适用于铸铝零件的连接。

6　结语

连接技术是车身设计的核心技术之一，也是影响车身制造工艺的重要因素，连接工艺的应用需要综合考虑，主要取决于车身结构以及材料选择。真正有意义的轻量化，是在考虑车身安全作为最基本前提下进行的。

本文研究了铸铝零件 SPR、FDS 和 MIG 焊三种典型工况的连接方案及连接强度，三种连接工艺技术的试验，均能实现对铸铝零件之间的连接。

（1）其中在 SPR 和 FDS 两种冷连接的典型工况下，5 次拉伸试验中断裂载荷分别达到 5532 N 和 6478 N 以上，失效模式为铆接点、螺接点周围母材断裂，主要原因为铆钉、螺钉对母材造成破坏后，局部应力集中导致。

（2）在 MIG 焊连接工况下，5 次拉伸试验中抗拉强度平均值为 217.2 MPa，失效模式为焊缝断裂，主要原因为焊缝强度低于母材强度，与母材 5 次拉伸试验中抗拉强度平均值 280.7 MPa 相比，强度可以达到母材的 77 %。

本文研究结果对未来工业生产中的铸铝连接加工提供参考依据，有助于在不同的实际工况下选用不同的工艺技术实现铸铝零件的加工和连接生产。

参考文献

[1] 于子秋 . 汽车车身铝合金连接工艺研究 [J]. 汽车工艺师 , 2021(5): 59-64.

[2] 王镝 . 轻量化工艺在车身开发中的应用研究 [J]. 汽车工艺与材料 , 2019(1): 15-23.

[3] 于欣 . 轻量化乘用车铸铝焊接工艺探索 [J]. 铝加工 , 2019(6): 61-64.

[3] 刘亦功 . 车身轻量化材料和工艺制造技术 [J]. 汽车文摘 , 2019(1): 40-44.